

Aplikasi isotop sebagai teknik nuklear dalam pentaksiran pencemaran air tanah disebabkan oleh aktiviti manusia

Application of isotope as a nuclear technique in groundwater pollution assessment due to human activities

AIDA SORAYA SHAMSUDDIN^{1,*}, NURFASHAREENA MUHAMAD¹, AZIEMAH ZULKIFLI¹,
NUR MAIZATUL IDAYU OTHMAN^{2,3}

¹ Institut Alam Sekitar dan Pembangunan (LESTARI), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM),
43000 Bangi, Selangor, Malaysia

² Fakulti Perladangan dan Agroteknologi, Universiti Teknologi Mara (UiTM), 77300 Merlimau,
Melaka, Malaysia

³ Kumpulan Inisiatif Penyelidikan (RIG), Konservasi dan Pengurusan Tanah,
Universiti Teknologi Mara (UiTM), 40450 Shah Alam, Selangor, Malaysia

* Pengarang koresponden: aidasoraya@ukm.edu.my

Abstrak: Air tanah yang bersih dan lestari adalah aset yang penting untuk kehidupan manusia dan ekosistem. Namun, ancaman pencemaran air tanah semakin meningkat akibat aktiviti manusia seperti perindustrian, pertanian, dan perbandaran. Objektif artikel tinjauan ini adalah untuk meneliti bagaimana teknik isotop, sebagai salah satu teknik nuklear berfungsi sebagai alat yang berkesan dalam mengkaji, mengesan, dan memahami isu pencemaran air tanah berpunca dari aktiviti antropogenik di permukaan. Artikel ini merangkumi penerangan dan perbincangan mengenai jenis-jenis isotop yang digunakan dalam pengesanan pencemaran air tanah dan faktor-faktor yang mempengaruhi variasi komposisi isotop di dalam air tanah berdasarkan dapatan kajian-kajian terdahulu. Selain itu, artikel ini juga memberi ulasan mengenai kajian pencemaran air tanah menggunakan isotop dalam konteks pentaksiran pencemaran air tanah di Malaysia. Artikel ini berfungsi sebagai panduan atau rujukan kepada penyelidik, profesional alam sekitar, dan pengurus sumber air yang ingin memahami dan melaksanakan teknik nuklear dalam pemantauan dan pentaksiran pencemaran air tanah. Artikel ini juga menggariskan satu pandangan holistik terhadap penyelesaian isu pencemaran air tanah melalui aplikasi teknik nuklear dan isotop berperanan sebagai alat yang signifikan dalam menjamin pengurusan alam sekitar yang lestari.

Kata kunci: Teknik nuklear, isotop, air tanah, sumber pencemaran

Abstract: Clean and sustainable groundwater is an important asset for human life and ecosystems. However, the threat of groundwater pollution is increasing as a result of human activities such as industrial, agricultural, and municipal. The objective of this review article is to examine how isotope techniques, as one of the nuclear techniques serve as an effective tool in studying, detecting, and understanding the issue of groundwater pollution stemming from anthropogenic activity on the surface. This article covers the description and discussion of the types of isotopes used in the detection of groundwater pollution and factors that influence the variation in the composition of isotopes in groundwater based on the findings of previous studies. In addition, this article also comments on the study of groundwater pollution using isotopes in the context of groundwater pollution assessment in Malaysia. This article serves as a guide or reference to researchers, environmental professionals, and water resources managers who want to understand and implement nuclear techniques in the monitoring and assessment of groundwater pollution. This article also outlines a holistic view on the resolution of groundwater pollution issues through the application of nuclear techniques and isotopes as a significant tool in ensuring sustainable environmental management.

Keywords: Isotope techniques, isotopes, groundwater, source of pollution

PENGENALAN

Air merupakan nadi kehidupan manusia. Air tanah merupakan salah satu sumber air utama dalam kehidupan manusia merangkumi lebih 50% keseluruhan sumber air tawar di dunia (Mahamat Nour *et al.*, 2022; Ansari *et al.*, 2023; Gupta *et al.*, 2023). Air tanah merupakan air yang terdapat di dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan bumi yang meresap ke dalam tanah melalui retakan dan liang-liang. Sumber air tanah ini digunakan secara meluas untuk tujuan domestik, pertanian dan perindustrian (Cao *et al.*, 2022; Carrión-Mero *et al.*, 2022; Chander *et al.*, 2023; Tanui *et al.*, 2023). Sejak abad ke-20, air tanah telah memainkan peranan penting dalam pertumbuhan populasi manusia dan pembangunan sosioekonomi (Zhang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2023). Walau bagaimanapun, kualiti air tanah telah terjejas teruk pada masa kini disebabkan oleh peningkatan aktiviti-aktiviti manusia seperti pembangunan bandar, pelupusan air sisa yang tidak mengikuti piawaian yang telah ditetapkan, penggunaan baja pertanian yang berlebihan, tumpahan minyak dan perubahan guna tanah. Secara tidak langsung, aktiviti-aktiviti berikut telah menyumbang kepada penambahan bahan cemar seperti bahan kimia beracun, logam berat, atau sisa toksik (Rodushkin *et al.*, 2022; Sankoh *et al.*, 2022; Gupta *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023). Usaha untuk merawat air tanah tercemar bagi mengembalikan kualiti asal air tanah adalah sangat sukar dan mencabar (Jakóbczyk-Karpierz & Ślósarczyk, 2022; Zhang *et al.*, 2023). Impak sinergistik aktiviti manusia yang intensif serta perubahan iklim turut memberi kesan yang kompleks kepada penurunan kualiti air tanah (Xia *et al.*, 2023).

Bagi menangani masalah pencemaran air tanah yang semakin meruncing, pelbagai kaedah telah digunakan bagi mengenal pasti punca pencemaran air tanah di seluruh dunia. Antara kaedah tersebut ialah hidrokimia, geofizik, hidrogeologi, dan hidrogeokimia (Ouhamdouch *et al.*, 2022; Sankoh *et al.*, 2022; Ansari *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023). Namun, bagi memperoleh maklumat yang lebih tepat mengenai punca pencemaran air tanah, teknik nuklear telah digunakan. Penggunaan teknologi nuklear terutamanya teknik isotop dalam pentaksiran pencemaran air telah mendapat perhatian yang meluas oleh penyelidik-penyelidik dari seluruh dunia. Menurut mereka, penggunaan teknologi nuklear ini berupaya menghasilkan maklumat yang lebih komprehensif dan sebagai pelengkap kepada kaedah konvensional dalam menyelesaikan isu-isu pengurusan sumber air (Blarasin *et al.*, 2021; Jakóbczyk-Karpierz & Ślósarczyk, 2022; Rodushkin *et al.*, 2022). Oleh itu, terdapat keperluan untuk memberi penekanan serius terhadap pemantauan dan kajian yang teliti mengenai punca pencemaran air tanah bagi memastikan sumber air ini kekal lestari (Xie *et al.*, 2023).

Objektif artikel tinjauan ini ialah untuk merungkai penggunaan teknik nuklear iaitu teknik isotop dalam

mengenal pasti sumber pencemaran air tanah yang berpunca daripada aktiviti manusia. Artikel ini mengandungi lima bahagian. Bahagian pertama artikel merangkumi pengenalan tentang keperluan pentaksiran pencemaran air tanah yang lebih tepat dengan menggunakan teknik isotop. Penerangan mengenai jenis isotop dalam penjejakan punca pencemaran air tanah diterangkan pada bahagian dua. Seterusnya, faktor-faktor yang mempengaruhi variasi komposisi isotop di dalam air tanah dibincangkan di bahagian tiga. Bahagian empat pula membincangkan hala tuju kajian pencemaran air tanah di Malaysia menggunakan teknik isotop ini. Bahagian lima pula adalah kesimpulan yang dapat diperolehi daripada penggunaan isotop dalam pentaksiran pencemaran air tanah. Artikel ini akan membantu pembaca memahami dengan lebih mendalam konsep isotop dan bagaimana ia digunakan dalam mengenal pasti punca pencemaran air tanah oleh aktiviti manusia. Kefahaman yang menyeluruh mengenai penggunaan isotop akan meningkatkan kebolehan penyelidik dan pihak bertanggungjawab dalam bidang alam sekitar untuk mengesan dan memantau pencemaran air tanah dengan lebih efektif. Secara tidak langsung, ia dapat membantu dalam menangani masalah pencemaran air tanah melalui tindakan pencegahan dan pemulihan yang lebih cepat dan berkesan.

JENIS ISOTOP DALAM PENGESANAN PUNCA PENCEMARAN AIR TANAH

Isotop merujuk kepada variasi atom dalam unsur kimia yang memiliki jumlah proton yang sama tetapi memiliki nombor neutron yang berbeza, menyebabkan berat atom yang berbeza (IAEA, 2022). Isotop-isotop ini mempunyai sifat kimia yang sama kerana masing-masing mempunyai bilangan dan susunan elektron yang sama, namun sifat fizik isotop seperti ketumpatan dan takat didih adalah berbeza (IAEA, 2022). Isotop boleh dibahagikan kepada dua jenis iaitu isotop stabil dan isotop radioaktif (Sankoh *et al.*, 2022). Menurut Agensi Tenaga Atom Antarabangsa (IAEA, 2022), 80 elemen pertama dalam Jadual Berkala mempunyai isotop stabil. Isotop stabil mempunyai jangka separuh hayat (*half-life*) yang sangat panjang sehingga mencecah ratusan juta tahun. Manakala isotop radioaktif ialah isotop yang mempunyai nukleus atom yang tidak stabil yang melalui proses pereputan radioaktif. Contoh isotop radioaktif ialah tritium yang mempunyai separuh hayat 12.33 tahun (Malkova *et al.*, 2023; Tanui *et al.*, 2023).

Dalam konteks penyelidikan sumber pencemaran air tanah, penggunaan isotop stabil dan radioaktif menjadi satu alat pengesanan pencemaran yang efektif. Ciri-ciri khusus yang dimiliki oleh setiap isotop telah membolehkan ia untuk memberikan petunjuk yang tepat tentang asal usul dan pergerakan air serta punca bahan pencemar seperti nitrat, sebatian klorin, karbonat dan sebatian-sebatian antropogenik lain dalam sistem hidrologi. Ini secara tidak langsung

telah meningkatkan kualiti dapatan kajian seterusnya meningkatkan pemahaman mengenai pelbagai proses hidrologi dan hidrogeologi yang terlibat (Mohamed *et al.*, 2021; Heiderscheidt *et al.*, 2022; IAEA, 2022; Ouhamdouch *et al.*, 2022; Sankoh *et al.*, 2022; Dee *et al.*, 2023; Malkova *et al.*, 2023; Pandey *et al.*, 2023; Tanui *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023). Proses-proses tersebut merangkumi interaksi air permukaan dengan air tanah, punca dan sumbangannya dalam alir masuk semula (*recharge*) air tanah dan proses alir masuk semula air tanah (Malkova *et al.*, 2023; Pandey *et al.*, 2023). Antara isotop yang paling banyak digunakan adalah oksigen (^{18}O), hidrogen (^2H , atau D), karbon (^{13}C), sulfur (^{34}S) dan nitrogen (^{15}N) (Mohamed *et al.*, 2021; Hosono *et al.*, 2023).

Aktiviti manusia di permukaan tanah mempunyai kesan yang signifikan terhadap kandungan isotop di dalam air tanah. Kegiatan seperti pertanian, perindustrian, penggunaan bahan api fosil dan pengeluaran sisa kimia merupakan antara aktiviti manusia yang dapat mempengaruhi komposisi isotop di dalam air tanah. Campuran pelbagai bahan pencemar yang terhasil dari kegiatan aktiviti-aktiviti tersebut boleh mencemar sumber air tanah. Maka, adalah menjadi satu keperluan untuk mengesan punca pencemaran air tanah ini dengan mengaplikasikan teknologi nuklear yang menjamin penghasilan dapatan kajian yang lebih tepat. Berdasarkan kajian-kajian yang lepas, terdapat pelbagai jenis isotop yang digunakan dalam mengesan punca pencemaran air tanah di seluruh dunia seperti rumusan pada Jadual 1. Julat-julat kandungan isotop ini berbeza mengikut lokasi kajian dan faktor-faktor yang dibincangkan di bahagian seterusnya. Untuk skop artikel ini, hanya beberapa jenis isotop yang diberi perhatian iaitu isotop hidrogen (deuterium dan tritium), oksigen, karbon, nitrat, sulfat, ammonium, dan boron. Ini kerana isotop-isotop ini adalah isotop yang biasa digunakan dalam kajian pengesanan pencemaran air tanah oleh aktiviti manusia.

Isotop hidrogen

Secara semulajadi, hidrogen yang membentuk molekul air mempunyai tiga isotop yang utama iaitu hidrogen (^1H), deuterium (^2H) dan tritium (^3H). Hidrogen (^1H) atau juga dikenali sebagai protium merupakan isotop utama yang mudah dibebaskan melalui proses penyejatan (Malkova *et al.*, 2023). Isotop ^1H hanya terdiri daripada satu atom dan mempunyai ketumpatan lebih daripada 99.98%. Isotop deuterium (^2H) terdiri daripada satu proton dan satu neutron di dalam nukleusnya. Deuterium tidak radioaktif dan tidak mendatangkan bahaya toksik yang tinggi.

Tritium (^3H) pula merupakan isotop radioaktif yang mengandungi satu proton dan dua neutron di dalam nukleusnya. Ia mereput melalui pereputan β^- untuk membentuk helium-3, dan mempunyai separuh hayat selama 12.32 tahun (Malkova *et al.*, 2023; Tanui *et al.*, 2023). Tritium digunakan sebagai pengesan dalam

penentuan usia air tanah semasa dan punca pencemaran air tanah (Tanui *et al.*, 2023). Penentuan usia air tanah menggunakan tritium membantu mengenal pasti zon akuifer yang rentan terhadap pencemaran. Tritium terbentuk dalam atmosfera akibat pengaruh partikel radiasi kosmik, semasa operasi loji nuklear dan reaktor penyelidikan, dan sisa dari ujian nuklear di udara terbuka pada masa lalu (Malkova *et al.*, 2023). Menurut Ouhamdouch *et al.* (2022), kandungan tritium yang melebihi 1 TU (*Tritium Unit*) (Unit Tritium) menunjukkan penambahan semua air tanah selepas nuklear (*post-nuclear recharge*) dan kandungan tritium yang kurang daripada 1 TU mewakili penambahan semula pra-nuklear (*pre-nuclear recharge*) atau campuran antara air baru dan air lama. Selain itu, tritium telah digunakan sebagai pengesan air larut resapan yang berkesan. Ini kerana tritium tidak wujud di dalam air laut mahupun baja. Fakta tersebut telah menetapkan asas dalam membezakan air tanah dan air larut resapan. Ciri-ciri unik ini menjadikan tritium lebih digemari berbanding parameter kimia dan isotop yang lain dalam proses membezakan air larut resapan tapak pelupusan dari sisa septik dan baja (Sankoh *et al.*, 2022).

Isotop oksigen

Isotop oksigen mempunyai tiga isotop stabil dengan jisim atom 16, 17, dan 18 (^{16}O , ^{17}O dan ^{18}O), dengan nisbah relatif 99.76%, 0.04% dan 0.2%. Oleh kerana pemeringkatan (*fractionation*) ^{17}O dan ^{18}O berkadar dengan ^{16}O , dan jumlah ^{17}O yang kecil, maka nisbah isotop dikira menggunakan $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\sim 1/500$). Kebiasaannya, pengiraan tersebut digunakan untuk mengira nisbah isotop di dalam sampel air (contohnya, air tanah dan ais), sedimen karbonat (CaCO_3), gas oksigen (O_2), karbon dioksida (CO_2), dan bahan organik. Manakala, nisbah $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ adalah berbeza dengan melebihi 100% (Delaygue, 2009). Kandungan ^{16}O lebih mudah terbebas berbanding dengan ^{18}O kerana perbezaan berat unsur. Proses fizikal seperti penyejatan boleh merubah variasi nisbah isotop-isotop stabil $^2\text{H}/^1\text{H}$ dan $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ di dalam sampel air yang mewakili lokasi tertentu. Secara tidak langsung, variasi sedemikian berkemungkinan membolehkan “fingerprint” air dapat dikaitkan dengan asal usul (*origins*) dan perkaitannya dapat dikenal pasti (Li *et al.*, 2019a; Yaacup *et al.*, 2002). Isotop oksigen dan hidrogen adalah pengesan yang sesuai dalam menentukan sumber air dan juga pergerakan air kerana ia merupakan molekul-molekul air (Li *et al.*, 2019a). Namun, terdapat pelbagai faktor yang berpotensi untuk mengubah komposisi isotop-isotop ini di dalam pemindahan sebelum sampai ke akuifer. Antara faktor yang berkaitan termasuklah geologi batu asas, jenis akuifer dan kedalamannya (Wright & Novakowski, 2020).

Isotop karbon

Isotop karbon adalah variasi atom karbon yang mempunyai nombor jisim yang berbeza. Terdapat

tiga isotop karbon utama yang biasa dijumpai, iaitu karbon-12 (^{12}C), karbon-13 (^{13}C) dan karbon-14 (^{14}C). ^{12}C adalah isotop paling lazim dengan nombor jisim 12. Ia membentuk sebahagian besar karbon yang ada di alam semulajadi, iaitu lebih daripada 98%. Isotop karbon sering digunakan untuk menilai transformasi karbon dan untuk mengikuti pergerakan karbon bukan organik terlarut (*dissolved inorganic carbon*, DIC). Pertukaran atau kehilangan karbon memberi kesan pada perubahan $\delta^{13}\text{C}$ -DIC disebabkan oleh degradasi isotop yang berlaku di setiap proses (Huang *et al.*, 2023).

Apabila penguraian CO_2 di dalam tanah menjadi faktor utama yang mempengaruhi penguraian mineral karbonat, nilai bagi isotop karbon DIC ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) adalah kira-kira -8.5% . Manakala, nilai $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ yang dihasilkan oleh penguraian bahan organik adalah lebih kurang -14% apabila air tanah dicemari oleh najis haiwan dan aktiviti manusia. Seterusnya, nilai $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ adalah pada 0% yang menggambarkan berlakunya proses pelarutan (*dissolution*) mineral karbonat, kesan pengaruh asid kuat atau CO_2 di udara (Huang *et al.*, 2023).

Pelepasan karbon biogenik yang isotopik ringan boleh dikaitkan dengan proses pengoksidaan dan penguraian bahan organik labil dalam air sisa. Penguraian bahan organik ini membawa kepada penurunan nilai $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ dengan peningkatan DIC. Oleh itu, hubungan antara $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ dan ion antropogenik seperti Na, K, NO_3 and Cl, di dalam air tanah cetek yang terjejas oleh air sisa menunjukkan bahawa aktiviti manusia (karbon dalam bahan organik dalam air sisa) boleh memberi kesan kepada pencemaran air tanah, dengan mengurangkan nilai $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ dan meningkatkan fluorida dan kemasinan air tanah (Li *et al.*, 2019b). Selain itu, pengeluaran air tanah yang intensif bagi kegunaan industri, pertanian, dan domestik selama beberapa dekad telah mengganggu keseimbangan dinamik air tawar dan air masin. Senario tersebut telah menyumbang kepada kemasukan air masin ke dalam sistem akuifer dan seterusnya merosakkan kualiti air tanah (Li *et al.*, 2019b).

Isotop nitrat

Pencemaran nitrat di dalam air tanah merupakan masalah serius yang di hadapi oleh majoriti pengguna air tanah di seluruh dunia. Nitrat merupakan sebatian yang mempunyai sifat yang stabil, keterlarutan yang tinggi dan mudah bermigrasi yang menjadikan ia antara pencemar utama air tanah (Zhang *et al.*, 2023). Kandungan nitrat yang tinggi dalam air tanah yang dijadikan sumber air minuman berpotensi untuk mendatangkan risiko kesihatan (Huang *et al.*, 2021; He *et al.*, 2022). Antara risiko kesihatan akibat pendedahan kepada kandungan nitrat yang tinggi di dalam sumber air ialah penyakit *methemoglobinemia* atau 'sindrom bayi biru', keguguran, dan penyakit tiroid (Huang *et al.*, 2021; Shamsuddin *et al.*, 2023). Sehubungan dengan itu, Pertubuhan Kesihatan

Sedunia (WHO) telah menetapkan garis dasar kepekatan tertinggi (*Maximum Contaminant Level, MCL*) bagi nitrat di dalam air minuman ialah pada $10 \text{ mg/L NO}_3\text{-N}$ (Huang *et al.*, 2021). Di samping itu, pelepasan air tanah yang mengandungi nitrat yang tinggi ke air permukaan boleh menyebabkan pelbagai masalah ekologi dan alam sekitar, termasuklah eutrofikasi dan hipoksia bermusim (Zhang *et al.*, 2018). Kajian terdahulu turut melaporkan keberkesanan aplikasi teknik isotop nitrat dalam penentuan punca pencemaran nitrat yang disebabkan oleh ciri-ciri komposisi isotopnya yang spesifik atau berbeza (Sankoh *et al.*, 2022; Hermawan *et al.*, 2023).

Nitrat terdiri daripada pelbagai isotop stabil nitrogen (N) dan oksigen (O) dengan komposisi kedua-dua isotop ini adalah berbeza di dalam sistem air permukaan dan air tanah (Snow, 2018). Transformasi nitrogen di persekitaran, seperti proses nitrifikasi dan denitrifikasi boleh mengubah komposisi isotop nitrat disebabkan oleh proses pemecahan fizikal, kimia dan biologi (Zhang *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2021). Oleh itu, kombinasi dua isotop ini $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ dan $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ telah digunakan untuk mengenal pasti punca nitrat di dalam sistem air tanah (Zhang *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021). Denitrifikasi merupakan satu proses penurunan semulajadi yang mengurangkan tahap nitrat dalam persekitaran air tanah. Kebiasaannya, proses tersebut dapat dikenal pasti dengan baik melalui kedua isotop ini, $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ dan $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ kerana nisbah pemingkatan $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-:\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ semasa denitrifikasi berada dalam julat antara 1.3:1 dan 2.1:1 (Huang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021). Selain itu, jumlah komposisi $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ dapat digunakan untuk membezakan punca nitrat sama ada berasal daripada penyerapan atmosfera yang mempunyai nilai yang tinggi ($>50\%$) atau dihasilkan secara biologi di dalam tanah dan air ($0.8\text{--}5.8\%$) (Chen *et al.*, 2019).

Penemuan kajian terkini yang dijalankan oleh Zhang *et al.* (2023) telah menggunakan isotop $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ dan $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ untuk menentukan punca utama pencemaran nitrat di dalam air tanah di lembangan Sungai Beichuan, China. Dapatan kajian ini menunjukkan bahawa komposisi nitrat adalah berbeza mengikut kepelbagaian tujuan guna tanah seperti kawasan hutan, bandar, perindustrian, pertanian dan perkampungan. Dapatan kajian ini menunjukkan bahawa punca pencemaran air tanah di kawasan-kawasan yang dinyatakan itu adalah daripada tanah bernitrogen ($\delta^{15}\text{N}$: $0\text{--}8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $0\text{--}15\text{‰}$) di kawasan hutan, sisa kumbahan domestik di kawasan bandar ($\delta^{15}\text{N}$: $4\text{--}25\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $0\text{--}10\text{‰}$) dan di kawasan industri ($\delta^{15}\text{N}$: $4\text{--}25\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $0\text{--}10\text{‰}$), campuran punca (baja ammonia, kumbahan dan baja ternakan) di kawasan pertanian ($\delta^{15}\text{N}$: $6\text{--}6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $10\text{--}10\text{‰}$) dan kumbahan dan baja ternakan di kawasan perkampungan (Zhang *et al.*, 2023).

Isotop sulfat

Sulfat merupakan salah satu unsur utama dalam air tanah dan memainkan peranan penting dalam kitaran

biogeokimia (Zhang *et al.*, 2023). Walau bagaimanapun, kandungan sulfat yang tinggi boleh menyebabkan pencemaran sulfat di dalam air tanah dan situasi ini sering diabaikan. Sulfat di dalam air tanah berasal dari pelarutan penyejatan (contohnya, gipsium), pengoksidaan mineral sulfida, zon luluhawa, bakteria penurun sulfat, penyerapan atmosfera, baja, sisa kumbahan, dan air lombong, dan lain-lain (Jakóbczyk-Karpierz & Ślósarczyk, 2022; Jiang *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023). Sama seperti nitrat, sulfat di dalam air tanah juga berasal daripada pelbagai punca.

Banyak kajian yang telah dijalankan bagi menentukan tahap pencemaran sulfat di dalam air tanah. Antaranya ialah Huang *et al.* (2023) yang menentukan kandungan sulfat di dalam air tanah di kawasan lombong arang batu. Dapatan isotop sulfat di kawasan kajian mendapati punca utama pencemaran sulfat di dalam air tanah adalah disebabkan oleh pengoksidaan sulfat. Aktiviti perlombongan telah memusnahkan struktur batuan dan menutup hubungan hidraulik di antara akuifer-akuifer. Selain itu, pengoksidaan pirit (*pyrite*), bahan organik dan bahan lain yang kaya dengan arang batu menyebabkan pengasidan lantai batu kapur, dan secara tidak langsung meningkatkan keupayaan pelarutan (*dissolution*). Kesan daripada kewujudan kepelbagaian mineral di dalam strata terlarut telah meningkatkan kandungan sulfat di dalam air tanah (Huang *et al.*, 2023).

Isotop ammonium

Ammonium adalah salah satu isotop nitrogen. Ammonium merupakan bahan pencemar alam sekitar yang kebiasaannya terkandung dalam air tanah. Penghasilan kandungan ammonium dalam air tanah tidak terhad kepada proses semulajadi sahaja namun turut dipengaruhi oleh aktiviti manusia. Kepekatan ammonium semulajadi yang tinggi sebanyak 390 mg/L telah ditemui di dalam air tanah di akuifer pada kedalaman 20 - 50 m di beberapa dataran di China (Liu *et al.*, 2023). Sementara itu, kehadiran air tanah dengan kepekatan ammonium yang tinggi (juga dirujuk sebagai air bawah tanah HANC) secara amnya disebabkan oleh pencemaran antropogenik iaitu kesan penggunaan baja pertanian, baja haiwan, kumbahan domestik bandar, dan kumbahan industri (Böhlke *et al.*, 2006; Norrman *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2023). Kepekatan NH_4^+ dalam julat 1–10 mmol/L telah dikenalpasti dalam akuifer yang tercemar akibat kewujudan tapak pelupusan dan amalan pelupusan air sisa pekat (Böhlke *et al.*, 2006). Selain daripada itu, NH_4^+ antropogenik turut dikenal pasti sebagai satu komponen terlarut utama dalam beberapa jenis plum bahan cemar air tanah. Sistem septik dan amalan pertanian juga turut menyumbang kepada kadar semula NH_4^+ yang tinggi di kawasan setempat. Kerosotan kualiti dan kebolegunaan air tanah juga berpunca dari kewujudan NH_4^+ dalam akuifer dan seterusnya memberi kesan yang besar terhadap interaksi batuan air, dan ia boleh menjadi

sumber besar N di perairan permukaan yang menerima pelepasan air bawah tanah.

Di sebalik kepentingan kandungan NH_4^+ kepada alam sekitar, terdapat beberapa kajian yang turut memfokuskan kepada proses pengangkutan dan tindak balas NH_4^+ dalam akuifer (Böhlke *et al.*, 2006). Pergerakan ammonium boleh terganggu oleh proses fizikal-kimia seperti penyerapan (termasuk pertukaran kation), atau proses biologi seperti transformasi yang disebabkan oleh mikrob. Namun, proses tersebut turut bergantung kepada geokimia akuifer dan sifat sistem aliran air bawah tanah. Kerencatan pengangkutan NH_4^+ telah diperhatikan di dalam air bawah tanah yang tercemar, dan ia boleh membawa kepada masa pembilasan akuifer yang lebih lama untuk NH_4^+ daripada spesies aquous mudah alih yang lain, dengan faktor terencat relatif berpotensi merangkumi lebih daripada 3 turutan magnitud (10^0 hingga 10^3) (Böhlke *et al.*, 2006). Pengoksidaan ammonium biasanya berlaku bersamaan dengan pengurangan O_2 (nitrifikasi) dan mungkin dikaitkan dengan pengurangan Mn-oksida (Böhlke *et al.*, 2006).

Selain daripada aktiviti antropogenik, kandungan ammonium dalam air tanah turut berpunca dari sumber ammonium semulajadi iaitu kesan mineralisasi protein dan komponen asid amino dalam bahan organik semulajadi (Liu *et al.*, 2023). Kerosotan anaerobik bahan organik dan kesan pembuangan sisa organik telah menyumbang kepada kandungan ammonium semulajadi dalam air tanah.

Isotop boron

Isotop boron, khususnya boron-11 (^{11}B) dan boron-10 (^{10}B), adalah antara alat penting dalam mengesan pencemaran air tanah. Ciri-ciri isotopik yang unik telah menjadikan isotop ini alat yang berguna dalam mengenalpasti punca pencemaran dalam sistem air tanah.

Dalam konteks pengesanan pencemaran air tanah, isotop boron digunakan untuk beberapa tujuan. Pertama, isotop boron diaplikasikan dalam mengenalpasti punca asal pencemaran dalam air tanah. Secara amnya, boron terdapat dalam pelbagai sumber, termasuk bahan kimia industri, pertanian, dan kumbahan. Melalui analisis isotop, penyelidik boleh membezakan samada kandungan boron yang dikenalpasti pada lokasi kajian berpunca dari sumber boron sumber semula jadi atau sumber buatan manusia. Kedua, isotop boron turut membantu dalam analisis pengukuran kesan pencemaran dalam air tanah. Perubahan dalam nisbah isotop boron dalam air tanah boleh memberikan petunjuk tentang sejauh mana pencemaran telah berlaku. Ini berguna dalam menilai tahap pencemaran dan menentukan tindakan yang diperlukan untuk membersihkan air tanah. Ketiga, analisis isotop boron juga digunakan untuk mengesan pergerakan air tanah. Boron dalam air bawah tanah boleh mengalami pertukaran isotop dengan batuan sekitarnya. Oleh itu, dengan mengukur nisbah isotop boron di beberapa lokasi, penyelidik dapat menentukan arah aliran air bawah tanah dan mendapat gambaran sistem akuifer.

Huraian diatas menunjukkan bahawa penggunaan Isotop boron adalah sangat penting dalam skop pemantauan dan pemahaman pencemaran air tanah. Berdasarkan ciri-ciri isotopik boron, kita dapat mengenal pasti punca pencemaran,

mengukur kesan pencemaran, dan memahami pergerakan air bawah tanah dengan lebih baik. Ini membolehkan tindakan yang tepat diambil untuk menjaga kualiti air bawah tanah yang penting bagi kesihatan manusia dan alam sekitar.

Jadual 1: Contoh kajian-kajian terdahulu yang menggunakan isotop dalam pentaksiran punca pencemaran air tanah.

Isotop	Jenis isotop	Julat	Punca pencemaran	Rujukan
Oksigen	$\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$	-8.9‰ hingga 8.8‰	Saliran lombong	Jiang <i>et al.</i> (2022);
		-4.5‰ hingga 3.7‰	Air larut resap	Sankoh <i>et al.</i> (2022)
Hidrogen	δD	-65.7‰ hingga 63.5‰	Saliran lombong	Jiang <i>et al.</i> (2022);
		-22‰ hingga +60‰	Air larut lesap	Sankoh <i>et al.</i> (2022)
Karbon	$\delta^{13}\text{C}-\text{DIC}$	-28‰	Penguraian bahan organik	Huang <i>et al.</i> (2021);
		-14.6‰ hingga +1.1‰	Pelarutan calcite dan mineral karbonat lain	Sankoh <i>et al.</i> (2022)
		+16‰ hingga +21.2‰		
		+5‰ hingga +38‰	Air tanah tercemar dengan air larut lesap	
Sulfat	$\delta^{34}\text{S}$	25‰ hingga 16.2‰	Pengoksidaan mineral sulfida	Jiang <i>et al.</i> (2022);
		2 ‰ hingga 12.5‰	Kumbahan	Jakóbczyk-Karpierz & Ślósarczyk (2022);
		7‰ hingga 21‰	Baja kimia	
		+12‰ hingga +35‰	Penyejatan biasa (gypsum)	Huang <i>et al.</i> (2023);
	$\delta^{18}\text{O}-\text{SO}_4^{2-}$	-18‰ hingga +12‰	Dibentuk oleh sulfida (<i>pyrite</i>)	Zhang <i>et al.</i> (2023)
		-5‰ hingga +6‰	Pemendakan atmosfera	
		+6‰ hingga +20‰	Penyejatan biasa (gypsum)	
		-5‰ hingga +5‰	Dibentuk oleh sulfida (<i>pyrite</i>)	
Nitrat	$\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$	-13‰ hingga +13‰	Pemendakan atmosfera	Zhang <i>et al.</i> (2018); Carrey <i>et al.</i> (2021); Huang <i>et al.</i> (2021); Li <i>et al.</i> (2021); He <i>et al.</i> (2022); Biddau <i>et al.</i> (2023); Hosono <i>et al.</i> (2023); Hussein <i>et al.</i> (2023); Ren <i>et al.</i> (2023); Zhang <i>et al.</i> (2023)
		0‰ hingga +8‰/ -3‰ hingga +9‰	Nitrogen tanah	
		+4‰ hingga +25‰	Kumbahan dan baja	
	$\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3$	-6‰ hingga +6‰	Baja nitrogen kimia dan urea	
		+17‰ hingga +25‰	Nitrogen tanah	
		+25‰ hingga +75‰	Nitrifikasi (seperti, NO_3^- dari tanah N, NH_4^+ dalam baja dan hujan, dan kumbahan dan baja)	
Ammonium	$\delta^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$	+10‰ hingga +25‰	Baja sintetik	Böhlke <i>et al.</i> (2006); Liu <i>et al.</i> (2023)
		-3‰ hingga +1‰	Pemendakan atmosfera	
		+2‰ hingga +7‰	Baja haiwan	
Boron	$\delta^{11}\text{B}$	+33‰ hingga +70‰	Baja sintetik	Sankoh <i>et al.</i> (2022)
		-6‰ hingga +5‰	Baja najis babi	
		+7.2‰ hingga +42.5‰	Baja najis lembu	
		+22.3‰ hingga +24‰	Kumbahan, tapak pelupusan dan larut septik	
		+5‰ hingga +25‰		
Tritium	$\delta^3\text{H}$	50.9 hingga 159,316 TU	Air larut lesap	Sankoh <i>et al.</i> (2022);
		2.3 hingga 76.6 TU	Air bawah tanah tercemar oleh air larut lesap	Malkova <i>et al.</i> (2023);
		0.04 hingga 10 TU	Air yang tidak tercemar	Tanui <i>et al.</i> (2023)
		<10 TU	Kerpasan (<i>precipitation</i>)	

TU = unit tritium, yang sama dengan 1 atom tritium untuk setiap 10^{18} atom hidrogen.

FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KOMPOSISI ISOTOP DALAM AIR TANAH

Variasi komposisi isotop di dalam air tanah dipengaruhi oleh keadaan persekitaran. Skop artikel ini akan memberi fokus kepada beberapa faktor keadaan persekitaran termasuklah (i) kawasan kajian, (ii) meteorologi atau iklim kawasan kajian, dan (iii) hidrogeologi kawasan kajian.

Kawasan kajian

Kawasan kajian memainkan peranan yang penting dalam mempengaruhi komposisi isotop di dalam air tanah. Sebagai contoh, status negara iaitu negara maju, membangun dan juga kurang membangun (mundur) akan mempunyai kandungan komposisi isotop yang berbeza antara satu sama lain. Faktor penyumbang kepada perbezaan komposisi isotop ini termasuklah faktor penggunaan tanah dan kepelbagaian aktiviti manusia yang dilaksanakan di negara-negara tersebut.

Di negara maju, pertumbuhan bandar biasanya adalah pesat. Terdapat pembinaan bangunan komersial yang pesat, perumahan yang padat, dan industri besar. Aktiviti pembinaan dan industri boleh menyebabkan pencemaran air tanah. Selain itu, kepesatan industri, penggunaan bahan kimia dalam pertanian dan perindustrian, pengurusan sisa dan air sisa bandar juga dapat mempengaruhi komposisi isotop di dalam air tanah. Ini berlaku apabila bahan pencemar yang terhasil daripada aktiviti tersebut meresap ke dalam air tanah. Bagi negara membangun pula, ia mungkin juga mengalami pertumbuhan bandar yang pesat, walaupun mungkin pada tahap pembangunan infrastruktur yang lebih rendah berbanding negara maju. Selain itu juga, aktiviti pertanian masih menjadi sumber utama pendapatan negara dan kebarangkalian penggunaan bahan kimia pertanian mungkin kurang intensif berbanding negara maju. Pengurusan bahan kimia pertanian masih pada tahap kurang canggih, dan ini boleh menyebabkan pencemaran air tanah yang terhasil daripada sisa domestik dan pertanian. Manakala bagi negara kurang membangun atau mundur, industri pertanian tradisional masih menjadi aktiviti utama penduduk. Penggunaan bahan kimia dalam industri tersebut sedikit sebanyak akan mempengaruhi komposisi isotop yang terkandung di dalam air tanah. Faktor pertumbuhan bandar yang terhad dan pengurusan sisa yang tidak cekap juga turut menyumbang kepada perubahan komposisi isotop air tanah di negara kurang membangun.

Eksplotasi penggunaan tanah yang tidak terkawal untuk pelbagai tujuan telah memberi kesan kepada kualiti air tanah. Senario tersebut berlaku akibat perkembangan pesat industri dan bidang pertanian, seterusnya menyumbang kepada manipulasi penggunaan sumber air tanah secara berleluasa tanpa kawalan (Zhang *et al.*, 2018). Beberapa penemuan kajian terdahulu membuktikan bahawa imbuhan air tanah di kawasan lembap dan gersang

sangat dipengaruhi oleh aktiviti manusia di permukaan (Liu *et al.*, 2020).

Meteorologi

Meteorologi merujuk kepada keadaan cuaca dan iklim dalam sesuatu kawasan pada masa tertentu. Faktor-faktor meteorologi atau iklim seperti intensiti hujan, suhu udara, kelembapan udara, corak angin dan jarak perjalanan wap air sebelum jatuh sebagai hujan, akan memberi kesan kepada kandungan isotop di dalam air tanah (Jung *et al.*, 2022). Ini bermakna setiap kawasan dengan iklim yang berbeza akan mempunyai komposisi isotop air hujan yang berbeza mengikut musim dan taburan hujan tahunan (Mohamed *et al.*, 2021; Vystavna *et al.*, 2021). Menurut Vystavna *et al.* (2021), isotop stabil seperti $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ adalah isotop yang biasanya dikesan di dalam air hujan. Ketika hujan terjadi, air hujan akan meresap ke dalam tanah dan mengisi ruang atau zon air tanah, dan komposisi isotop ini akan berubah bergantung kepada suhu dan zon geografi di mana air itu terperangkap.

Suhu udara juga boleh mempengaruhi kandungan isotop terutama sekali isotop hidrogen di dalam air tanah. Pada suhu rendah, air cenderung mengandungi lebih banyak isotop hidrogen yang berat (deuterium), manakala pada suhu yang tinggi, air cenderung mengandungi lebih banyak isotop hidrogen yang ringan (Christofi *et al.*, 2020). Mohamed *et al.* (2021) menyatakan kandungan isotop stabil berat dalam air hujan meningkat dengan suhu atmosfera, yang mempengaruhi proses penyejukan semasa kerpasan (*precipitation*). Selain itu, kandungan isotop stabil berat dalam hujan menurun dengan peningkatan ketinggian altitud yang disebabkan oleh penurunan suhu (Christofi *et al.*, 2020; Mohamed *et al.*, 2021). Kesan ini dikenali sebagai pemeringkatan isotop yang sangat bergantung pada suhu. Pemeringkatan isotop semasa proses perubahan fasa seperti penyejukan dan pemendakan lebih ketara pada suhu yang lebih rendah. Gabungan penurunan suhu dengan ketinggian altitud menghasilkan kesan ke atas komposisi isotop di dalam pemendakan (Christofi *et al.*, 2020). Namun begitu, aktiviti-aktiviti manusia seperti aktiviti pertanian yang meluas di kawasan beraltitud tinggi contohnya di Cameron Highland, Pahang, juga mempengaruhi kandungan isotop dalam air tanah seperti isotop sulfat, nitrat, ammonium dan karbon akibat daripada penggunaan baja dan racun perosak yang tinggi. Penggunaan racun perosak dan baja ini juga mempengaruhi aktiviti mikroorganisma di dalam tanah yang terlibat dalam kitar biogeokimia. Proses ini mengubah komposisi isotop dalam air tanah sebagai tindakbalas kepada perubahan dalam pertukaran unsur-unsur tertentu dalam sistem ekologi. Selain itu, dapatan kajian oleh Jung *et al.* (2022) turut melaporkan nilai $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ di dalam air tanah mempunyai hubung kait dengan latitud dan suhu, dengan penurunan nilai $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ secara beransur-ansur dalam air tanah dari barat daya ke timur laut Semenanjung Korea.

Selain suhu yang rendah disebabkan oleh altitud kawasan yang tinggi, iklim juga mempengaruhi kandungan isotop di dalam air tanah (Wright & Novakowski, 2020; Jódar *et al.*, 2021). Iklim yang sejuk cenderung untuk menyebabkan isotop-isotop berat seperti $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ terperangkap dalam kepekatan yang lebih tinggi dalam air tanah. Ini kerana semasa proses penyejatan ketika musim sejuk, molekul-molekul berat lebih sukar untuk berpindah ke fasa wap, sehingga molekul-molekul yang tinggal di air yang terperangkap dalam kepekatan yang lebih tinggi mempunyai isotop-isotop yang lebih berat. Kajian oleh Huang *et al.* (2021) memaparkan nilai median $\delta^{15}\text{N}$ cenderung untuk lebih positif pada musim monsun berbanding pada musim sejuk. Peningkatan nilai $\delta^{15}\text{N}$ dan penurunan nitrat di dalam air tanah tidak berkurang ketika musim monsun adalah disebabkan oleh proses denitrifikasi dalam tempoh cuaca panas (Huang *et al.*, 2021). Dapatan daripada Jung *et al.* (2022) menunjukkan spasial nilai $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ di dalam air bergantung kepada pemeringkatan isotop dengan pergerakan aliran udara pada musim panas.

Hidrogeologi

Hidrogeologi juga memainkan peranan penting dalam menentukan komposisi isotop dalam air tanah. Antaranya ialah geologi kawasan tersebut. Batuan yang membentuk lapisan bawah tanah mengandungi mineral tertentu yang mempengaruhi isotop di dalam air. Apabila air meresap dan mengalir dari kawasan imbunan ke kawasan pelepasan, interaksi air dengan mineral di dalam batuan mempengaruhi komposisi kimia air tanah termasuklah komposisi isotop (Gupta *et al.*, 2023). Antara proses semulajadi yang terlibat dalam proses interaksi air dan batuan ialah pelarutan gas atmosfera, pelarutan mineral utama di dalam batuan, mineral daripada kerpasan, pertukaran ion, dan pencampuran air tersekap (Li *et al.*, 2019c; Christofi *et al.*, 2020). Selain itu, jenis batuan dalam lapisan air tanah juga akan mempengaruhi keupayaan batuan untuk menyimpan air dan mempengaruhi pergerakan air tanah. Batuan yang mempunyai rongga dan rekahan (seperti batu gamping atau kapur) mempunyai lebih banyak ruang untuk menyimpan air dan memberikan ruang untuk proses pencampuran yang berbeza. Manakala kadar keupayaan penyerapan adalah lebih rendah bagi batuan yang rapat (seperti granit) (Huang *et al.*, 2021).

Akuifer *karst* dan batu kapur adalah antara akuifer yang paling terdedah kepada pencemaran disebabkan oleh kememancarannya (*transmissivity*) yang tinggi (Hermawan *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023). Kebiasaannya, akuifer kars berkarbonat ditemui di kawasan bukit dan pergunungan. Akuifer ini mempunyai ciri-ciri yang berbeza berbanding akuifer yang lain seperti keheterogenan yang tinggi, aliran air tanah yang berhalaju tinggi di dalam rongga-rongga, dan masa tinggal air yang pendek (Jódar *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2023). Ciri-ciri hidrodinamik yang dimiliki ini

membolehkan penghantaran cepat isyarat aliran masuk imbunan, termasuk variasi pengesan alam sekitar seperti $\delta^{18}\text{O}$, ke titik pelepasan air tanah (Jódar *et al.*, 2021).

Komposisi isotop juga dipengaruhi oleh kedalaman air tanah melalui beberapa cara yang berbeza. Akuifer cetek cenderung mempunyai kandungan isotop yang lebih tinggi, berbanding akuifer dalam yang lebih cenderung untuk mempunyai kandungan isotop yang lebih rendah dan stabil. Kebiasaannya, air tanah yang cetek mempunyai kerentanan (*vulnerability*) yang lebih tinggi terhadap pencemaran yang disebabkan oleh aktiviti manusia berbanding air tanah yang lebih dalam (Li *et al.*, 2019b; Jung *et al.*, 2022; Tanui *et al.*, 2023). Kajian oleh Jung *et al.*, (2022) turut menunjukkan kandungan isotop tritium lebih tinggi direkodkan di dalam air tanah cetek yang disebabkan oleh kesan imbunan air tanah melalui akuifer alluvium. Namun, kandungan tritium yang rendah dilaporkan di dalam air tanah dalam iaitu kesan aliran air melalui batuan hampar berhablur.

HALA TUJU KAJIAN PENCEMARAN AIR TANAH DI MALAYSIA MENGGUNAKAN TEKNIK ISOTOP

Pencemaran air tanah merupakan isu alam sekitar yang signifikan di Malaysia. Dalam usaha untuk mencari penyelesaian dan pengurusan isu global ini, para penyelidik telah mula mengaplikasikan teknik isotop dalam skop kajian mengenal pasti punca pencemaran. Isotop seperti isotop stabil hidrogen ($\delta^2\text{H}$) dan oksigen ($\delta^{18}\text{O}$), telah digunakan untuk mengenalpasti hubungan dinamik di antara air tanah dan air permukaan di akuifer pantai, bahagian timur semenanjung Malaysia (Mostapa *et al.*, 2022). Kajian tersebut menunjukkan tiada hubungan di antara air tanah yang separa dalam dan air tanah yang dalam. Penemuan data tersebut telah membuktikan bahawa sumber-sumber itu hadir dari akuifer yang berbeza. Selain itu, dapatan kajian tersebut turut melaporkan bahawa kombinasi 12% air tanah dan 88% air masin adalah datang dari sumber air hujan dan kemasukan air masin dari laut. Hal ini kerana, isotop-isotop ini dapat memberikan maklumat penting tentang asal usul dan punca penambahan air tanah, serta kemungkinan pencemaran dan penyerapan air masin ke dalam akuifer.

Dari segi sektor pertanian pula, kajian-kajian menunjukkan bahawa aktiviti pertanian, seperti penggunaan baja komersial boleh menyebabkan pencemaran nitrat dalam air tanah (Fadhullah *et al.*, 2020). Kajian tersebut melibatkan persampelan air tanah dari Pusat Takungan Air Bukit Merah yang dianalisis menggunakan kombinasi kimia air, isotop air stabil ($\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ dan $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$) dan isotop nitrat stabil ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ dan $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$). Kajian tersebut memberi fokus kepada penentuan sumber nitrat dan proses yang berlaku di dalam pusat takungan air yang tertua di Malaysia iaitu Pusat Takungan Bukit Merah. Dapatan kajian

menunjukkan bahawa nilai $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ di dalam sampel air sungai dan pusat takungan air adalah berada dalam julat +0.4 ke 14.9%, manakala nilai $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ berada dalam julat antara -0.01 dan +39.4%, masing-masing. Bagi tujuan mengenalpasti sumber pencemaran, hasil kajian tersebut mendapati bahawa campuran sumber dari atmosfera, baja ammonia, nitrogen tanah, tinja dan sisa buangan telah menyumbang kepada sumber nitrat yang terkandung dalam sampel takungan air di Bukit Merah.

Teknik isotop yang sama termasuk isotop stabil nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) dan oksigen ($\delta^{18}\text{O}$) juga telah digunakan untuk menjejaki punca pencemaran nitrat dalam persekitaran air tawar yang telah dijalankan oleh Niu *et al.* (2021). Isotop-isotop ini dapat membantu membezakan antara sumber nitrogen yang berlainan, seperti sumber nitrogen sintetik dan organik, serta memberikan maklumat penting untuk mengawal pencemaran nitrat. Air dari tapak pelupusan dan air sisa domestik atau kumbahan juga merupakan punca pencemaran air tanah. Teknik isotop, seperti isotop stabil karbon ($\delta^{13}\text{C}$) dan oksigen ($\delta^{18}\text{O}$), telah digunakan untuk mengesan pencemaran air tanah berdekatan dengan tapak pelupusan bandar seperti di dalam tinjauan kajian oleh Sankoh *et al.* (2022). Berdasarkan kajian tersebut, hasil penemuan kajian membuktikan bahawa pasangan isotop ^{11}B dengan $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ dan $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ serta parameter hidrokimia lain adalah berkesan dalam membezakan antara baja nitrat, baja ternakan, pencemaran air laut, dan sisa kumbahan. Oleh itu, adalah penting untuk menggabungkan teknik hidrokimia dan isotop dalam pengesanan punca pencemaran air tanah secara berkesan di negara membangun termasuk Malaysia. Dalam meneliti skop tersebut, penekanan seharusnya diberikan terutamanya di kawasan yang terjejas oleh aktiviti pertanian, air larutan dari tapak pembuangan, sisa domestik atau sisa kumbahan, dan pencemaran air laut.

Secara keseluruhannya, teknik isotop telah terbukti menjadi salah satu cara yang penting dan efisien dalam mengkaji dan mengenal pasti punca pencemaran air tanah di Malaysia. Teknik-teknik ini dapat memberikan maklumat tentang asal usul, punca pencemaran, kesan kepelbagaian punca pencemaran serta metodologi dalam penambahbaikan kualiti air tanah negara. Dengan memahami punca pencemaran dan teknik pengesanan pencemaran yang lebih efisien, langkah-langkah yang efektif boleh dilaksanakan oleh pihak berwajib dalam menguruskan dan mengendalikan isu pencemaran air tanah di Malaysia.

Walau bagaimanapun, penggunaan teknik isotop ini melibatkan kos yang tinggi yang merangkumi pelbagai aspek seperti peralatan analisis, penyelidikan lapangan, dan juga interpretasi data. Pembelian dan penyelenggaraan peralatan analisis isotop memerlukan kos perbelanjaan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan peralatan analisis teknik konvensional yang lain. Selain itu, proses persediaan sampel dan analisis di makmal bagi mengukur

kandungan isotop memerlukan kemahiran pakar dan tenaga kerja yang berkualiti, yang juga memberikan sumbangan kepada kos keseluruhan. Penyelidikan lapangan bagi mengumpul sampel air tanah serta ujian di lapangan, juga memerlukan sumber kewangan yang mencukupi. Meskipun kos teknologi ini boleh menjadi tinggi, manfaatnya termasuk pemahaman yang mendalam terhadap pencemaran air tanah dan kemampuan untuk merancang langkah-langkah pemulihan dan pengurusan secara efektif.

KESIMPULAN

Secara kesimpulannya, penggunaan teknik nuklear banyak memberi manfaat dalam penyiasatan forensik alam sekitar. Ini membolehkan lebih banyak penyiasatan berfokuskan penyiasatan makmal dan menghasilkan penyiasatan yang lebih pantas dan sewajarnya dalam sesuatu insiden alam sekitar. Selain itu, penggunaan teknik nuklear terutamanya teknik isotop mampu diaplikasikan untuk mengesan sebarang pergerakan bahan cemar sekiranya punca bahan cemar dapat dikenal pasti. Dengan kewujudan data asas kandungan isotop bahan buangan bagi sesuatu industri atau aktiviti manusia, secara tidak langsung, ianya dapat membantu pihak berkuasa dalam mengesan pihak yang bertanggungjawab terhadap sebarang insiden pencemaran alam sekitar dan seterusnya dapat melaksanakan langkah-langkah pengurusan yang efektif dalam mengatasi dan mengawal isu berkaitan alam sekitar. Pada akhirnya, ini akan memastikan perlindungan alam sekitar yang lebih lestari dan menjamin kesihatan dan kesejahteraan manusia yang lebih baik.

Artikel ulasan ini menyumbang dalam memperkukuhkan pengetahuan mengenai cara teknologi nuklear terutamanya teknik isotop sebagai alat yang berkesan dalam menangani masalah pencemaran air tanah. Dengan pemahaman yang lebih mendalam terhadap impak aktiviti manusia terhadap sumber air tanah, kita dapat membangunkan pendekatan-pendekatan yang lebih berkesan dalam melestarikan dan melindungi kualiti air tanah untuk generasi masa depan.

PENGHARGAAN

Kami ingin merakamkan penghargaan kepada semua pihak yang telah memberikan sumbangan dan sokongan secara langsung atau tidak langsung dalam penghasilan artikel ini. Sumbangan semua individu dan pihak adalah sangat dihargai, dan tanpa sokongan mereka, artikel ini tidak akan dapat disiapkan. Terima kasih diucapkan kepada semua pihak yang terlibat. Selain itu, kami juga ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada pewasit yang telah menyemak dan menilai artikel ini. Komen dan cadangan yang diberikan dalam penambahbaikan artikel ini amat dihargai.

SUMBANGAN PENGARANG

ASS: Perkonseptualan, penyiasatan, penulisan-draf asal, semakan dan penyuntingan. NM: Semakan

dan penyuntingan. AZ: Visualisasi, semakan dan penyuntingan. NMIO: Penulisan-draf asal, semakan dan penyuntingan.

KONFLIK KEPENTINGAN

Semua pengarang mengisytiharkan bahawa mereka tidak mempunyai sebarang kepentingan kewangan serta hubungan peribadi yang boleh mempengaruhi hasil kerja yang dilaporkan di dalam artikel ini.

RUJUKAN / REFERENCES

- Ansari, M.A., Kumar, U.S., Noble, J., Akhtar, N., Akhtar, M.A., & Deodhar, A., 2023. Isotope hydrology tools in the assessment of arsenic contamination in groundwater: An overview. *Chemosphere*, 340, 139898. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139898>.
- Biddau, R., Dore, E., Pelo, S.D., Lorrain, M., Botti, P., Testa, M., & Cidu, R., 2023. Geochemistry, stable isotopes and statistic tools to estimate threshold and source of nitrate in groundwater (Sardinia, Italy). *Water Research*, 232, 119663. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119663>.
- Blarasin, M., Matiatos, I., Cabrera, A., Lutri, V., Giacobone, D., Becher Quinodoz, F., Matteoda, E., Eric, C., Felizzia, J., & Giuliano, A., 2021. Characterization of groundwater dynamics and contamination in an unconfined aquifer using isotope techniques to evaluate domestic supply in an urban area. *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 103360. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103360>.
- Böhlke, J.K., Smith, R.L., & Miller, D.N., 2006. Ammonium transport and recation in contaminated groundwater: Application of isotope tracers and isotope fractionation studies. *Water Resources Research*, 42, W05411. Doi:10.1029/2005WR004349.
- Cao, X., Shi, Y., He, W., An, T., Chen, X., Zhang, Z., Liu, F., Zhao, Y., Zhou, P., Chen, C., He, J., & He, W., 2022. Impacts of anthropogenic groundwater recharge (AGR) on nitrate dynamics in a phreatic aquifer revealed by hydrochemical and isotopic technologies. *Science of the Total Environment*, 839, 156187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156187>.
- Carrey, R., Ballesté, E., Blanch, A.R., Lucena, F., Pons, P., López, J.M., Rull, M., Solá, J., Micola, N., Fraile, J., Garrido, T., Munné, Soler, A., & Otero, N., 2021. Combining multi-isotopic and molecular source tracking methods to identify nitrate pollution sources in surface and groundwater. *Water Research*, 188, 116537. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116537>.
- Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Herrera-Franco, G., Domínguez-Granda, L., Bravo-Montero, L., & Morante-Craballo, F., 2022. Research trends in groundwater and stable isotopes. *Water*, 14, 3173. <https://doi.org/10.3390/w14193173>.
- Chander, S., Paikaray, S., Bansal, S., Sharma, S., Sharma, K., Dhiman, D., & Deshpande, R.D., 2023. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ isotopes, trace metals and major ions in groundwater around uranium and fluoride contaminated Indus valley Quaternary alluvial plain, SW Punjab, India: Implications on hydrogeochemical processes, irrigation use and source. *Applied Geochemistry*, 152, 105652. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105652>.
- Chen, F., Zhou, X., Lao, Q., Wang, S., Jin, G., Chen, C., & Zhu, Q., 2019. Dual isotopic evidence for nitrate sources and active biological transformation in the Northern South China Sea in summer. *PloS ONE*, 14(1), e0209287. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209287>.
- Christofi, C., Bruggeman, A., Kuells, C., & Constantinou, C., 2020. Isotope hydrology and hydrogeochemical modeling of Troodos Fractured Aquifer, Cyprus: The development of hydrogeological description of observed watertypes. *Applied Geochemistry*, 123, 104780. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104780>.
- Dee, S., Bailey, A., Conroy, J.L., Atwood, A., Stevenson, S., Nusbaumer, J., & Noone, D., 2023. Water isotopes, climate variability, and the hydrological cycle: recent advanced and new frontiers. *Environmental Research: Climate*, 2, 022002. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/acceb1>.
- Delaygue, G., 2009. Oxygen Isotopes. In: Gornitz, V. (Ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. 1,049 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3_163.
- Fadhullah, W., Yaacob, N.S., Syakir, M.I., Muhammad, S.A., Yue, F.-J., & Li, S.-L., 2020. Nitrate sources and processes in the surface water of a tropical reservoir by stable isotopes and mixing model. *Science of The Total Environment*, 700, 134517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134517>.
- Gupta, S., Nandimandalam, J.R., Pant, D., Chatterjee, S., Ram, & P., 2023. Environmental isotope constraints and hydrogeochemical evolution of groundwater in the semi-arid national capital environs of Delhi, India. *Urban Climate*, 49, 101481. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101481>.
- He, S., Li, P., Su, F., Wang, D., & Ren, X., 2022. Identification and apportionment of shallow groundwater nitrate pollution in Weining Plain, northwest China, using hydrochemical indices, nitrate stable isotopes, and the new Bayesian stable isotope mixing model (MixSIAR). *Environmental Pollution*, 298, 118852. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118852>.
- Heiderscheidt, E., Tesfamariam, A., Marttila, H., Postila, H., Zilio, S., & Rossi, P.M., 2022. Stable water isotopes as a tool for assessing groundwater infiltration in sewage networks in cold climate conditions. *Journal of Environmental Management*, 302, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114107>.
- Hermawan, O.R., Hosono, T., Yasumoto, J., Yasumoto, K., Song, K.-H., Maruyama, R., Iijima, M., Yasumoto-Hirose, M., Takada, R., Hijikawa, K., & Shinjo, R., 2023. Effective use of farmland soil samples for N and O isotopic source fingerprinting of groundwater nitrate contamination in the subsurface dammed limestone aquifer, Southern Okinawa Island, Japan. *Journal of Hydrology*, 619, 129364. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129364>.
- Hosono, T., Taniguchi, K., Rahman, A.T.M.S., Yamamoto, T., Takayama, K., Yu, Z.-Q., Aihara, T., Ikehara, T., Amano, H., Tanimizu, M., & Nakagawa, K., 2023. Stable N and O isotopic indicators coupled with social data analysis revealed long-term shift in the cause of groundwater nitrate pollution: Insights into future water resource management. *Ecological Indicators*, 154, 110670. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110670>.
- Huang, P., Zhang, Y., Li, Y., Gao, H., Cui, M., & Chai, S., 2023. A multiple isotope (S, H, O and C) approach to estimate

- sulfate increasing mechanism of groundwater in coal mine area. *Science of the Total Environment*, 900, 165852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165852>.
- Huang, X-y., Zhang, D., Zhao, Z-q., Liu, Y-t., Meng, H-q., Zou, S., Ma, B-j., & Feng, Q-y., 2021. Determining hydrogeological and anthropogenic controls on N pollution in groundwater beneath piedmont alluvial fans using multi-isotope data. *Journal of Geochemical Exploration*, 229, 106844. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106844>.
- Hussein, R., Ahmed, M., & Aly, A.I., 2023. Tracking anthropogenic nitrogen-compound sources of surface and groundwater in southwestern Nile Delta: Hydrochemical, environmental isotopes, and modeling approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 22115-22136. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23536-1>.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 2022. What are isotopes?. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-isotopes>. Accessed on 8th September 2023.
- Jakóbczyk-Karpierz, S. & Ślósarczyk, K., 2022. Isotopic signature of anthropogenic sources of groundwater contamination with sulfate and its application to groundwater in a heavily urbanized and industrialized area (Upper Silesia, Poland). *Journal of Hydrology*, 612, 128255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128255>.
- Jiang, C., Chebf, L., Li, C., & Zheng, L., 2022. A hydrochemical and multi-isotopic study of groundwater sulfate origin and contribution in the coal mining area. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 248, 114286. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114286>.
- Jódar, J., Herms, I., Lambán, L.J., Martos-Rosillo, S., Herrera-Lameli, C., Urrutia, J., Soler, A., & Custodio, E., 2021. Isotopic content in high mountain karst aquifers as a proxy for climate change impact in Mediterranean zones: The Port del Comte karst aquifer (SE Pyrenees, Catalonia, Spain). *Science of the Total Environment*, 790, 148036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148036>.
- Jung, Y-Y., Shin, W-J., Seo, K-H., Koh, D-C., Ko, K-S., & Lee, K-S., 2022. Spatial distributions of oxygen and hydrogen isotopes in multi-level groundwater across South Korea: A case study of mountainous regions. *Science of the Total Environment*, 812, 151428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151428>.
- Li, C., Gao, X., Liu, Y., & Wang, Y., 2019b. Impact of anthropogenic activities on the enrichment of fluoride and salinity in groundwater in the Yuncheng Basin constrained by Cl/Br ratio, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^7\text{Li}$ isotopes. *Journal of Hydrology*, 579, 124211. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124211>.
- Li, J., Shi, Z., Liu, M., Wang, M., Wang, G., Liu, F., & Wang, Y., 2021. Identifying anthropogenic sources of groundwater contamination by natural background levels and stable application in Pinggu basin, China. *Journal of Hydrology*, 596, 126092. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126092>.
- Li, Z., Yang, Q., Yang, Y., Ma, H., Wag, H., Luo, J., Bian, J., & Martin, J.D., 2019a. Isotop and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities. *Journal of Hydrology*, 576, 685-697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.037>.
- Li, Z., Yang, Q., Yang, Y., Ma, H., Wang, H., Luo, J., Bian, J., & Martin, J.D., 2019c. Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities. *Journal of Hydrology*, 576, 685-697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.037>.
- Liu, J., Gao, Z., Wang, Z., Xu, X., Su, Q., Wang, S., Qu, W., & Xing, T., 2020. Hydrogeochemical processes and suitability assessment of groundwater in the Jiaodong Peninsula, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6), 384. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08356-5>.
- Liu, J., Yuan, J., Zhang, Y., Zhang, H., Luo, Y., & Su, Y., 2023. Identification of ammonium source for groundwater in the piedmont zone with strong runoff of the Hohhot Basin based on nitrogen isotope. *Science of the Total Environment*, 882, 163650. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163650>.
- Mahamat Nour, A., Huneau, F., Mahamat Ali, A., Mahamat Saleh, H., Ngo Boum-Nkot, S., Nlend, B., Djebebe-Ndjiguim, C.L., Foto, E., Sanoussi, R., Araguas-Araguas, L., & Vysravna, Y., 2022. Shallow Quaternary groundwater in the Lake Chad basin is resilient to climate change but requires management strategy: Results of isotopic investigation. *Science of the Total Environment*, 851, 158152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158152>.
- Malkova, Y.O., Kovalenko, I.O., Dolin, V.V., Demikhov, Y.M., Panasiuk, M.I., Sosonna, N.V., Bagriy, S.M., Kuzmenko, E.D., Onyshchenko, I.P., Kumar, U.S., & Buzynnyi, M.G., 2023. Isotope composition of groundwater and surface waters in the area of the Dombrovsky quarry of Kalush-Golinsk deposit of potassium salts. *Journal of Environmental Radioactivity*, 257, 107083. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107083>.
- Mohamed, M.M., Parimalarenganayaki, S., Khan, Q., & Murad, A., 2021. Review on the use of environmental isotopes for groundwater recharge and evaporation studies in the GCC countries. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100546. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100546>.
- Mostapa, R., Samuding, K., Daung, J.A.D., Hashim, M.M.M., & Pant, N., 2022. Assessment of groundwater recharge sources and their dynamics using environmental isotope and hydrochemical approaches in coastal aquifers of Peninsular Malaysia. *ASM Science Journal*, 17, 1-15. <https://doi.org/10.32802/asmscj.2022.1280>.
- Niu, C., Zhai, T., Zhang, Q., Wang, H., & Xiao, L., 2021. Research advances in the analysis of nitrate pollution sources in a freshwater environment using $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 11805. <https://doi.org/10.3390/ijerph182211805>.
- Norrman, J., Sparrenbom, C.J., Berg, M., Nhan, D.D., Jacks, G., Harms-Ringdahl, P., Nhan, P.Q., & Rosqvist, H., 2015. Tracing sources of ammonium in reducing groundwater in a well field in Hanoi (Vietnam) by means of stable nitrogen isotope ($\delta^{15}\text{N}$) values. *Applied Geochemistry*, 61, 248-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.06.009>.
- Ouhamdouch, S., Bahir, M., Ouazar, D., & Zouari, K., 2022. Isotopic signature of groundwater and climate change within a semi-arid environment. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100729. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100729>.
- Pandey, A., Padhya, V., Chakra, S., & Deshpande, R.D., 2023. Seasonality in groundwater recharge in Coastal Southwestern India and its hydrological implications based on stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD). *Physics and Chemistry of the Earth*, 130, 103396. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103396>.
- Ren, K., Pan, X., Peng, C., Chen, J., Li, J., & Zeng, J., 2023.

- Tracking contaminants in groundwater flowing across a river bottom within a complex karst system: Clues from hydrochemistry, stable isotopes, and tracer test. *Journal of Environmental Management*, 342, 118099. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118099>.
- Rodushkin, I., Engström, E., Pontér, S., & Pennisi, M., 2022. Elemental stable isotope assessment of groundwater contamination: Recent developments. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 26, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100330>.
- Sankoh, A.A., Derkyi, N.S.A., Frazer-williams, R.A.D., Laar, C., & Kamara, I., 2022. A review on the application of isotopic techniques to trace groundwater pollution sources within developing countries. *Water*, 14, 35. <https://doi.org/10.3390/w14010035>.
- Shamsuddin, A.S., Syed Ismail, S.N., Othman, N.M.I., Zakaria, N.H., Abd Manan, T.S., Ibrahim, M.A., & Abdul Mutalib, M., 2023. Human health risk assessment of nitrate in private well waters of shallow quaternary alluvial aquifer. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(11), 7741-7757. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01671-z>.
- Snow, D., 2018. Quality control summary report nitrate-N isotope analysis: May – June 2018. United States Environmental Protection Agency (USEPA). <https://www.epa.gov/wi/nitrate-n-isotope-results-and-interpretation-and-quality-control-summary-report-nitrate-n>.
- Tanui, F., Olago, D., Ouma, G., Kuria, Z., 2023. Hydrochemical and isotopic characteristics of the Lodwar Alluvial Aquifer System (LAAS) in Northwestern Kenya and implications for sustainable groundwater use in dryland urban areas. *Journal of African Earth Sciences*, 206, 105043. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105043>.
- Vystavna, Y., Matiatos, I., & Wassenaar, L.I., 2021. Temperature and precipitation effects on the isotopic composition of global precipitation reveal long-term climate dynamics. *Scientific Reports*, 11, 18503. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98094-6>.
- Wright, S.N., & Novakowski, K.S., 2020. Hydrogeologic and climate drivers of water isotopes in fractured rock: A word of caution for the use of groundwater isoscapes in humid continental settings. *Journal of Hydrology*, 586, 124857. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124857>.
- Xia, C., Liu, Y., Meng, Y., Liu, G., Huang, X., Chen, Y., & Chen, K., 2023. Stable isotopes reveal the surface water-groundwater interaction and variation in young water fraction in an urbanized rizer zone. *Urban Climate*, 51, 101641. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101641>.
- Xie, Z., Zhang, Y., Zhang, Z., & Huang, J., 2023. Nitrate removal mechanism in riparian groundwater in an intensified agricultural catchment. *Agricultural Water Management*, 280, 108223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108223>.
- Yaacup, R., Wan Muhamad Tahir, W.Z., & Nasir, M.K., 2002. Penggunaan kaedah pengimejan keberintangan geoelektrik dan isotop sekitaran dalam kajian air resapan di empangan Durian Tunggal, Melaka. Geological Society of Malaysia Annual Geological Conference 2002, May 26-27, Kota Bharu, Kelantan, Malaysia.
- Zhang, Q., Wang, H., & Wang, L., 2018. Tracing nitrate pollution sources and transformations in the over-exploited groundwater region of north China using stable isotopes. *Journal of Contaminant Hydrology*, 218, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.06.001>.
- Zhang, Q., Wang, H., Xu, Z., Li, G., Yang, M., & Liu, J., 2023. Quantitative identification of groundwater contamination sources by combining isotope tracer technique with PMF model in an arid area of northwestern China. *Journal of Environmental Management*, 325, 116588. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116588>.
- Zhu, Y., Yang, Q., Wang, H., Yang, J., Zhang, X., Li, Z., & Martín, J.D., 2023. A hydrochemical and isotopic approach for source identification and health risk assessment of groundwater arsenic pollution in the central Yinchuan basin. *Environmental Research*, 231, 116153. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116153>.

Manuscript received 22 September 2023;
Received in revised form 21 January 2024;
Accepted 26 January 2024
Available online 30 April 2024