

基于氢氧稳定同位素地下水补给与滞留时间研究中的应用进展

王 颖

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2025年12月22日; 录用日期: 2026年1月23日; 发布日期: 2026年2月11日

摘 要

地下水是全球最重要的淡水资源之一, 在维系区域水安全、生态系统稳定及社会经济发展中发挥着不可替代的作用。准确识别地下水补给来源、流动路径及其滞留时间, 是揭示地下水循环过程和实现水资源可持续管理的关键科学问题。氢氧稳定同位素($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)作为天然示踪剂, 因其对水循环过程高度敏感、示踪尺度灵活, 在地下水研究中得到了广泛应用。近年来, 随着同位素分析技术和水文模型方法的不断发展, 氢氧同位素在地下水补给来源识别、地表水-地下水相互作用解析以及地下水年龄与滞留时间估算等方面取得了显著进展。本文系统梳理了氢氧稳定同位素在地下水研究中的理论基础与主要应用方向, 重点综述其在地下水补给与滞留时间研究中的方法体系与典型案例, 总结气候变化和人类活动对地下水同位素特征的影响机制, 并讨论当前研究面临的关键挑战与未来发展趋势。研究表明, 氢氧同位素技术在多源补给解析和地下水时间尺度量化方面具有显著优势, 但在非稳态补给条件和复杂水文地质背景下仍存在不确定性。未来, 通过加强长期监测、推进多同位素联合示踪及模型耦合应用, 有望进一步提升地下水系统认知水平, 为区域水资源管理提供科学支撑。

关键词

氢氧稳定同位素, 地下水补给, 滞留时间, 水循环, 气候变化

Advances in Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Applications for Groundwater Recharge and Residence Time Studies

Ying Wang

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: December 22, 2025; accepted: January 23, 2026; published: February 11, 2026

Abstract

Groundwater is one of the most important freshwater resources worldwide and plays an indispensable role in regional water security, ecosystem stability, and socio-economic development. Robust identification of groundwater recharge sources, flow pathways, and residence time is fundamental to understanding groundwater cycling processes and supporting sustainable water-resources management. As natural tracers, stable hydrogen and oxygen isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) are highly sensitive to hydrological processes and can be applied across flexible spatial and temporal scales, and thus have been widely used in groundwater studies. In recent years, advances in isotope analytical techniques and hydrological modeling have substantially promoted isotope-based research on recharge-source identification, surface water-groundwater interactions, and the estimation of groundwater age and residence time. This paper systematically reviews the theoretical basis and major application domains of stable water isotopes in groundwater research, with emphasis on methodological frameworks and representative case studies related to groundwater recharge and residence time. We further summarize the mechanisms by which climate change and human activities influence groundwater isotope signatures, and discuss key challenges and future research directions. Overall, stable isotope techniques show clear advantages in resolving multi-source recharge and quantifying groundwater time scales, yet uncertainties remain under non-steady recharge conditions and complex hydrogeological settings. Future progress is expected through strengthened long-term monitoring, multi-isotope integrated tracing, and coupled modeling approaches, which will improve understanding of groundwater systems and provide scientific support for regional water-resources management.

Keywords

Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes, Groundwater Recharge, Residence Time, Water Cycle, Climate Change

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下水作为全球最重要的淡水资源之一，在保障人类饮用水安全、支撑农业灌溉及维持生态系统稳定方面发挥着关键作用[1]。随着全球气候变化和人类活动强度的持续增强，地下水补给过程、循环路径及其时间尺度正发生显著改变，地下水超采、水质退化和生态风险等问题在全球范围内普遍存在。因此，准确识别地下水的补给来源、流动过程及其在含水层中的滞留时间，是深化地下水循环机理认识和实现水资源可持续管理的关键科学问题[2]。

同位素水文学的发展为地下水研究提供了重要技术手段。其中，氢氧稳定同位素($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)因其在水循环过程中具有良好的保守性和示踪特性，自 20 世纪 70 年代以来被广泛应用于地下水研究领域[3]。地下水的氢氧同位素组成主要继承其补给水体的同位素特征，同时受到降水形成过程、蒸发分馏效应以及含水层水文地质条件等多重因素的综合影响。通过对地下水与降水、河流、湖泊等水体同位素特征的对比分析，可以有效揭示地下水的补给来源、演化路径及其与地表水之间的水文联系[4]。近年来，多源水体混合模型(如贝叶斯 MixSIAR、SIMMR)在地下水补给分析中被广泛应用，可定量估算各水体贡献比例及不确定性。

此外, 稳定同位素与放射性同位素(^3H 、 ^{14}C)的联合使用, 为地下水年龄与滞留时间估算提供了可靠约束。

随着高精度同位素分析技术和数值模拟方法的快速发展, 氢氧同位素在地下水研究中的应用不断深化, 研究重点逐渐从补给来源的定性判别拓展至地下水流动路径解析、地表水-地下水相互作用量化以及地下水年龄和平均滞留时间的定量估算。同时, 气候变化背景下极端降水事件频率增加、人类活动强度增强, 使地下水系统呈现明显的非稳态特征, 对传统同位素解析方法提出了新的挑战[5]。国内学者在不同水文地质条件下开展了氢氧同位素研究。湿润地区, 如长江中下游冲积平原, 通过降水-地下水同位素匹配分析地下水主要由现代降水补给[6]; 干旱半干旱地区, 如黄土高原, 通过地下水与河流、湖泊同位素对比, 揭示地下水侧向补给与蒸发富集特征[7]。西南山区高原地区, 如洱海流域, 结合高山泉水、河流和地下水同位素, 分析复杂补给路径与流动模式, 为区域水资源管理提供科学依据[8]。

基于此, 本文系统综述了氢氧稳定同位素在地下水补给与滞留时间研究中的理论基础与主要应用进展, 重点总结其在地下水补给来源识别、流动路径与水文连通性分析以及地下水滞留时间估算中的研究成果, 并讨论气候变化和人类活动对地下水同位素特征的影响机制, 最后对未来研究方向进行展望。

2. 氢氧稳定同位素示踪地下水的理论基础

2.1. 氢氧稳定同位素特征及其分馏机制

氢和氧在自然界中分别存在多种稳定同位素, 其中 ^1H 和 ^2H (氘)、 ^{16}O 和 ^{18}O 在水文研究中最常用。通常采用相对于维也纳标准平均海水(VSMOW)的 δ 值形式表示水体的同位素组成。水体在蒸发、凝结和降水形成过程中会发生显著的同位素分馏, 使不同来源和经历不同演化过程的水体呈现出差异化的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征[9]。

氢和氧是水分子中的主要元素, 其在自然界中存在多种稳定同位素: 氢主要为 ^1H 和 ^2H (氘), 氧主要为 ^{16}O 和 ^{18}O 。水体的氢氧同位素组成通常采用相对于国际标准-维也纳标准平均海水(VSMOW)的 δ 值表示, 即:

$$\delta X = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \text{ ‰} \quad (1)$$

X 为 $\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$, R 表示重/轻同位素比值。 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映了水体来源及其经历的水循环过程。在水文循环中, 水体经历蒸发、冷凝、降水形成等过程, 均会发生同位素分馏, 导致不同水体具有显著的特征差异[10]。例如, 蒸发过程中轻同位素更易挥发, 剩余水体表现为重同位素富集; 降水过程中, 随空气温度降低和降水递减, 水汽凝结使重同位素优先沉降, 从而形成区域性同位素梯度。

全球尺度上, 大气降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成遵循全球大气水线(GMWL)关系: $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 。在区域尺度上, 由于气候条件和水汽来源差异, 不同地区形成地方大气水线(LMWL), 反映当地降水的平均同位素关系。地下水若主要由当地降水补给, 其 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值通常接近区域 LMWL, 而受蒸发影响的水体则偏离水线, 表现为重同位素富集[11]。

2.2. 地下水同位素组成的控制因素

地下水氢氧同位素组成受多重因素控制, 可分为以下几类:

(1) 补给水体类型: 包括降水、河流、湖泊及雪融水。地下水同位素特征往往继承其主要补给水体的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

(2) 气候条件: 温度、降水量及季节性变化影响水体的同位素组成。例如, 高温和高蒸发强度地区地下水常表现为重同位素富集。

- (3) 地形因素：海拔升高会导致降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值下降(海拔效应)，从而影响补给水体的同位素特征。
- (4) 含水层条件：含水层的岩性、孔隙结构、裂隙发育程度以及地下水流速决定了水体混合和滞留效应，对同位素空间分布产生影响。

在非饱和带中，蒸发分馏和优先流作用可能改变入渗水体的同位素信号，使地下水同位素特征呈现复杂空间格局。此外，多源水体混合进一步增加同位素解析的不确定性[12][13]。

2.3. 不同含水层类型的同位素响应特征

据表 1，孔隙含水层水体以孔隙水为主，流动缓慢，水体混合程度较高。地下水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要反映长期降水平均特征，季节性波动较小。由于流动路径较短、蒸发影响有限，该类含水层同位素组成稳定，是定量估算地下水平均滞留时间的理想对象[13]。

裂隙含水层受地质构造控制，水流路径不均质，流速快，补给来源复杂。水体同位素特征受补给事件影响明显，短期降水变化可快速反映在地下水中，呈现明显季节性波动。此类含水层常用于研究降水 - 地下水响应时间和局地水文连通性[14]。

岩溶含水层流动高度非均质，存在快速管道流和缓慢基质流两类模式。氢氧同位素可区分不同流动路径的水体来源，通过空间梯度分析可识别主要地下水流通通道和补给区[15]。

Table 1. Comparison of hydrogen and oxygen isotope response characteristics of groundwater in different aquifer types (porous/fractured/karst).

表 1. 不同含水层类型(孔隙/裂隙/岩溶)地下水氢氧同位素响应特征对比

含水层类型	主要流动介质/结构	同位素季节信号	对极端降水的响应	典型适用研究问题	方法注意点
孔隙含水层	颗粒孔隙、较均质	明显衰减，振幅小	响应相对平滑，以混合为主	MRT 估算、区域补给背景	需较长序列；端元季节性需表征
裂隙含水层	构造裂隙、强非均质	衰减不均，空间差异大	事件驱动明显，滞后差异大	补给滞后、连通性、优先流	易出现“非稳态”；需分区/分层端元
岩溶含水层	管道流与基质流并存	管道流区振幅大、基质流衰减强	暴雨可快速入渗响应	快慢流分割、交换过程	需区分快速/慢速组分；高频监测更重要

2.4. 地表水 - 地下水互作示踪方法

氢氧同位素在地表水 - 地下水互作研究中具有广泛应用：

- (1) 补给区识别：通过对比河流、湖泊及地下水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征，可判断河流或湖泊对地下水的侧向补给区域。
- (2) 排泄区分析：地下水向河流排泄时，同位素信号可用于定量分析排泄强度及空间分布。
- (3) 时间序列分析：降水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化作为天然示踪信号，比较地下水响应滞后可估算地下水平均滞留时间和混合特性[16]。

此外，结合高频采样和数值模型(如集总参数模型、贝叶斯混合模型)，可量化不同水体的贡献比例，并估算地下水的时间尺度信息。

3. 氢氧稳定同位素示踪的应用领域：地下水补给、连通性与时间尺度

识别地下水的补给来源是地下水研究的核心问题之一。氢氧稳定同位素因其对水源差异高度敏感，被广泛用于区分地下水的主要补给来源。一般而言，地下水的同位素组成与其补给水体高度一致，通过对地下水与降水、河流、湖泊等水体同位素特征的对比分析，可以判识地下水的主导补给方式[17]。

在湿润区和季风区,研究表明地下水多以大气降水为主要补给来源,其 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值通常与当地降水特征高度一致。通过多点采样和统计分析,可以进一步揭示不同季节或不同补给事件对地下水的贡献比例。在冲积平原和河谷地区,氢氧同位素常被用于识别河流对地下水的侧向补给或排泄过程,揭示河流-地下水之间的动态交换关系[18]。

在干旱和半干旱地区,湖泊和灌溉回灌对地下水补给的作用尤为突出。受强烈蒸发影响,湖泊水体通常表现出明显的同位素富集特征,其信号可在邻近地下水中被识别,从而用于量化湖泊渗漏或灌溉回灌对地下水系统的影响。此外,氢氧同位素还被用于区分现代补给水与古地下水,为地下水资源可持续利用评估提供依据。

3.1. 地下水补给来源解析

地下水补给来源是指形成地下水系统的主要水体及其补给方式,包括降水、河流渗漏、湖泊渗透、融雪或冰川融水以及人为回灌等。准确识别地下水补给来源,是理解地下水循环、流动路径及时间尺度的基础,也是制定科学水资源管理方案的重要前提[19]。

在不同水文地质条件下,补给来源的相对贡献差异显著。例如,在湿润季风区,地下水主要由现代降水补给,受蒸发影响较小;在干旱或半干旱地区,湖泊渗漏和灌溉回灌可能成为主要补给水体,表现出明显的重同位素富集特征。通过氢氧稳定同位素分析,可揭示多源水体对地下水的空间和时间贡献,为区域水文循环研究提供科学依据。近年来,贝叶斯混合模型(如 MixSIAR)被广泛用于定量估算多源补给条件下不同水体对地下水的贡献比例。

地下水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征可通过 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 双坐标图分析,与大气水线进行比较,为补给来源初步判别提供依据。全球大气水线(GMWL)表达式为 $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$,而不同地区会形成地方大气水线(LMWL),反映区域降水的平均同位素特征[3]。在实际分析中,若地下水数据点接近当地 LMWL,说明补给主要来自降水;若偏离水线,常提示存在蒸发作用或地表水贡献。例如,湖泊水体因蒸发作用富集重同位素,其邻近地下水若呈偏离趋势,表明湖泊渗漏对地下水有贡献[20]。

通过对降水、河流、湖泊及高山泉水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据进行对比,可以初步判断各水体对地下水的贡献模式。通常表现为:降水补给: $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现季节性波动,地下水若受降水补给显著,其同位素特征与降水高度一致;河流补给:河水受集水区地形、蒸发及流量调节影响,其同位素值可能略富集,地下水若显示相似特征,说明存在河流侧向渗漏;湖泊渗透:湖泊水体蒸发富集明显, $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 数据点偏离 LMWL,邻近地下水呈偏离趋势,可量化湖泊对地下水的补给;高山泉水:来源于高海拔降水和融雪,通常 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低,通过空间梯度分析可识别高山补给路径[21]。

贝叶斯混合模型是一种基于概率统计的方法,可量化多源水体对地下水的贡献比例,并同时提供不确定性估计。模型通过输入地下水和可能补给源的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,结合先验信息,采用马尔科夫链蒙特卡洛(MCMC)方法进行参数估计[22]。该方法相较传统单一源分析具有可以处理多源水体混合问题;可提供贡献比例的不确定性范围;能结合空间和时间序列数据,反映地下水动态特征的优势。

近年来,贝叶斯混合模型(如 MixSIAR)在地下水补给来源定量分析中得到广泛应用。该类模型能够在考虑端元不确定性的基础上,定量估算多源水体对地下水补给的贡献比例,并给出可信区间,从而显著提升补给分析的定量化水平。然而,模型结果对端元选取和样品代表性较为敏感,需结合长期监测和独立水文信息进行综合解释。

3.2. 地表水-地下水交互与水文连通性分析

地下水在含水层中的流动路径及其与地表水的连通性,是理解区域水文循环特征和评估水资源可持

续利用的关键。通过分析地下水氢氧稳定同位素的空间分布,可以揭示地下水主要流动方向、补给区范围及不同水体之间的水文联系。在高原山区及构造复杂地区,地下水流动呈现高度非均质性,存在快速裂隙流、缓慢基质流和管道流等多种流动模式[23]。

在实际研究中,地下水同位素空间分布图常用于指示流动路径。水体 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的梯度方向通常反映地下水流向,尤其在低海拔山区,降水补给的地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低,而下游平原或入湖口地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高,通过空间梯度可清晰识别水体的迁移路径。此外,结合河流、湖泊及泉水的同位素数据,可以明确地下水补给和排泄区,实现对地表水-地下水相互作用的定量分析。

时间序列同位素数据分析为揭示地下水动态特征提供了重要手段。降水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在显著季节性变化,地下水对这些信号的响应存在滞后时间,通过比较不同含水层和区域地下水对降水同位素波动的响应滞后,可估算地下水系统的平均滞留时间及混合特征。在山谷地区,地下水响应降水变化较快,滞后时间通常为数月至一年;而在冲积平原或深层含水层中,响应滞后可达数年甚至十余年,表现出明显的时间尺度差异。

在岩溶和裂隙含水层中,由于水流路径短且流速快,地下水同位素特征变化明显,局地降水或河流事件可以迅速反映在地下水中。同时,不同补给路径水体混合程度不均,形成明显的空间异质性。同位素分析能够区分快速流动的管道水和缓慢流动的基质水,为理解岩溶地下水系统流动机理提供科学依据[24]。

结合贝叶斯混合模型或集总参数模型,可进一步量化不同水体对地下水流动的贡献比例及流动时间尺度。研究表明,地下水与河流、湖泊之间的连通性在流域水文循环中起着调节作用。河流在降水充沛时期向地下水补给水量,而在枯水期地下水又可能回补河流,形成季节性动态平衡。这种地表水-地下水动态交换关系不仅影响地下水补给量,还对水资源管理和生态环境保护具有重要意义。

同位素空间梯度与时间序列方法能够有效揭示地下水流动路径与地表-地下水交换,但应注意“稳态-非稳态”的模型边界。对于受强人类活动扰动(抽水、回灌、河道调控)或受强降水脉冲影响的系统,地下水流场与输入函数往往呈非稳态,单次剖面或短时序同位素可能仅反映阶段性过程而非长期规律。此外,在裂隙与岩溶介质中,快速通道流可能造成局地同位素异常与空间异质性增强,若以均质含水层假设解释,可能低估快流比例并误判连通性。建议在连通性解析中引入水位动态、基流分割或温度示踪等辅助证据,并强调“证据链一致性”而非单一同位素证据。

3.3. 地下水时间尺度量化: 年龄与滞留时间

地下水年龄和平均滞留时间是反映地下水系统更新能力的重要指标。氢氧稳定同位素通常与放射性同位素(如 ^3H 、 ^{14}C)联合使用,用于约束地下水的时间尺度信息。稳定同位素通过反映补给水体的时空变化特征,为地下水年龄模型提供初始条件和混合约束。

基于降水同位素季节性变化的集总参数模型被广泛用于估算地下水平均滞留时间。其中,指数模型、正弦拟合模型和扩散模型等方法可适用于不同水文地质条件下的地下水系统。研究表明,湿润区浅层地下水的滞留时间通常较短,为数月至数年;而在干旱区或深层含水层中,地下水滞留时间可达数百至数千年[25]。

在裂隙和岩溶含水层中,由于水流路径短且流速快,地下水滞留时间往往表现出显著的空间差异。通过高频同位素监测和模型拟合,可以较好地揭示不同补给路径和水文条件下地下水滞留时间的变化特征。例如,快速渗漏的溪水或降水补给水体通常具有较短的滞留时间,而湖泊渗透或深层补给水体的滞留时间相对较长。

近年来,高频同位素监测揭示了“快流-慢流并存”导致的停留时间分布特征,并用于解释地下水

或流域径流响应中“事件水比例不高但响应迅速”的现象,即所谓的“老水悖论”。在非稳态补给条件或监测数据有限的情况下,采用年轻水比例(young water fraction)等指标,可通过降水与出流同位素季节振幅比刻画短时间尺度内更新的快速组分,为地下水系统时间尺度分析提供补充信息[26]。

高频监测降水及地下水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 信号,可以揭示地下水系统对降水事件的响应特征。在快速响应含水层中,地下水同位素变化几乎同步于降水事件;在缓慢流动或深层含水层中,地下水响应滞后明显,信号被混合和衰减。通过滞后时间的分析,可以估算局地地下水的更新效率及流动路径长度,为理解复杂水文系统提供重要信息[27]。例如,云南洱海流域高山山区浅层地下水的滞留时间通常为数月至一年,主要反映雨季补给和快速裂隙流;而入湖口深层地下水滞留时间可达数年,反映水体长期混合及慢速渗透过程。不同区域滞留时间差异显著,揭示了补给效率与含水层特性之间的空间异质性[28]。

近 3~5 年研究强调,高频同位素监测能够揭示“快流-慢流并存”导致的停留时间分布特征,并解释流域径流或地下水响应中“事件水比例不高但响应迅速”的现象,即经典意义上的“老水悖论”。在数据不足或系统非稳态条件下,采用年轻水比例(young water fraction, Fyw)等指标,可用降水与出流同位素季节振幅比刻画 2~3 个月内更新的快速组分,为解释极端事件下的快速响应提供更稳健的统计表征,并可用于约束传统 LPM 的参数不确定性。

地下水滞留时间不仅受含水层性质影响,还与多源水体补给模式密切相关。在多源补给区域,地下水可能同时受到降水、河流、湖泊及高山泉水的贡献。不同补给水体流动路径及水化学特征差异,使地下水滞留时间呈现复杂分布。例如,快速渗漏的溪水补给水体滞留时间较短,而湖泊渗透和深层补给水体滞留时间较长,通过氢氧同位素结合贝叶斯混合模型分析,可量化不同水体对滞留时间的贡献及不确定性。研究发现,云南洱海流域入湖口地区地下水滞留时间受湖泊渗漏影响较大,而高海拔山区地下水滞留时间主要受高山降水和融雪补给控制。这种多源补给与滞留时间的关系不仅揭示地下水更新机制,也为水资源调控和生态保护提供决策依据[29]。

总体而言,氢氧稳定同位素在地下水时间尺度量化方面具有操作性强、数据需求相对较低的优势,但其结果对输入函数质量和模型假设较为敏感。因此,在实际应用中应结合长期监测资料、多示踪信息及水文背景,对模型结果进行合理解释。

4. 气候变化与人类活动影响下的地下水同位素响应

近年来,全球气候变化导致降水格局和强度发生显著变化,区域性干湿季节差异加大。在湿润季风区,降水量增加和极端降水事件频繁出现,会使浅层地下水快速补给,导致短期滞留水体比例增加,并改变地下水系统的季节性波动特征。相反,在干旱或半干旱地区,长期干旱和蒸发增强会延长地下水滞留时间,并可能使深层含水层水位下降,削弱地表水-地下水连通性[30]。氢氧稳定同位素长期监测结果显示,降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值年际波动幅度加大,极端降水事件对地下水补给的贡献比重明显增加,使地下水同位素特征呈现非稳态变化。通过时间序列分析可发现,浅层地下水对降水事件响应迅速,而深层地下水响应滞后时间更长,这种时间尺度差异反映了地下水系统对气候变化的响应能力与适应性[31]。

人类活动对地下水系统的影响主要表现在以下几个方面:地下水过度开采:过量抽取地下水会降低水位梯度,改变原有补给路径,导致局地含水层间水体混合程度增加,使地下水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值趋于均一化,削弱了水文连通性。农业灌溉回灌:灌溉过程中地表水或地下水的回渗,往往携带蒸发富集信号,使地下水同位素特征发生局地偏移,同时可能改变局部滞留时间,形成新的水文动态平衡。城市化发展:城市建设和生活污水排入地下水系统,增加局地补给水体多样性,可能改变地下水流动方向和补给效率,同时引入污染物,对水质和生态安全造成潜在风险。

气候变化与人类活动对地下水系统的影响常呈叠加效应。在降水充沛年份,人类抽水量可能难以对

地下水系统造成显著干扰；而在干旱年份，过度开采会加剧地下水位下降和水质退化，导致系统整体承载力下降。多源补给分析显示，气候变化可能改变不同水体的补给比例，例如极端降水事件增加浅层雨水补给占比，而湖泊渗漏或高山泉水补给占比相对下降。

5. 研究结论与展望

地下水补给来源特征。地下水补给来源多样，包括降水、溪水、湖泊渗漏及高山泉水等，不同水体对地下水贡献存在显著空间差异。高海拔山区地下水主要受降水和高山泉水补给，浅层地下水滞留时间较短；山谷及冲积平原区域地下水呈多源混合特征，湖泊渗漏在入湖口区域贡献明显。贝叶斯混合模型可有效量化多源水体对地下水补给的比例及不确定性，为补给分析提供定量依据。地下水流动路径与水文连通性。 $\delta^2\text{H}\sim\delta^{18}\text{O}$ 空间梯度分析揭示了地下水主要流动方向及补给区范围。地下水与河流、湖泊存在动态交换关系，流域不同区域补给模式和连通性差异显著。高山山区和裂隙岩溶含水层地下水流动路径短、流速快，而深层或平原地区地下水流动缓慢，滞后响应显著。氢氧同位素结合水位监测和水化学指标分析，有助于识别快速流、基质流及混合流，揭示复杂水文系统的运行机制。

地下水滞留时间与年龄特征。基于集总参数模型和时间序列同位素分析，浅层孔隙含水层地下水滞留时间通常为数月至数年，而深层或岩溶含水层滞留时间可达数十年至数千年。多源水体对滞留时间具有显著影响：快速补给水体滞留时间短，慢速补给水体滞留时间长。区域滞留时间差异反映了补给效率和含水层特征的空间异质性。氢氧稳定同位素与放射性同位素联合使用，可建立地下水多时间尺度年龄结构，为水资源更新能力评估提供依据。

气候变化与人类活动影响。气候变化通过改变降水量、降水时空分布及蒸发强度，直接影响地下水补给模式和滞留时间，极端降水事件显著增加浅层地下水快速补给比例。人类活动如地下水过度开采、灌溉回灌和城市化发展，会改变补给路径和水文连通性，使地下水滞留时间空间分布出现异质性。气候变化与人类活动交互作用显著，叠加效应可能导致地下水系统局地承载力下降和水质风险增加，需综合管理。

未来研究应加强长期、高频同位素监测网络建设，推动多同位素联合示踪和多模型耦合应用。同时，结合遥感、地球物理及机器学习等新技术，有望进一步提升地下水系统解析精度。未来研究可以长期高频监测；增加降水、河流及地下水同位素监测频率，捕捉极端事件和季节变化的快速响应。多同位素联合示踪；结合氢氧稳定同位素、硼、硫及放射性同位素，实现对地下水多源补给和滞留时间的多尺度解析。模型优化与耦合；将贝叶斯混合模型、集总参数模型与数值模拟模型结合，提高对非稳态和复杂含水层的预测能力。应用推广；将研究成果应用于水资源管理、生态保护及应对气候变化，为流域水资源可持续利用提供科学依据。

参考文献

- [1] Kuang, X., Liu, J., Scanlon, B.R., Jiao, J.J., Jasechko, S., Lancia, M., *et al.* (2024) The Changing Nature of Groundwater in the Global Water Cycle. *Science*, **383**, eadf0630. <https://doi.org/10.1126/science.adf0630>
- [2] 刘昌明. 中国农业水问题：若干研究重点与讨论[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875-879.
- [3] Dąbrowska, J., Menéndez Orellana, A.E., Kilian, W., Moryl, A., Cielecka, N., Michałowska, K., *et al.* (2023) Between Flood and Drought: How Cities Are Facing Water Surplus and Scarcity. *Journal of Environmental Management*, **345**, Article ID: 118557. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118557>
- [4] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [5] Poage, M.A. and Chamberlain, C.P. (2001) Empirical Relationships between Elevation and the Stable Isotope Composition of Precipitation and Surface Waters: Considerations for Studies of Paleoelevation Change. *American Journal of Science*, **301**, 1-15. <https://doi.org/10.2475/ajs.301.1.1>

- [6] Rusjan, S., Sapač, K., Petrič, M., Lojen, S. and Bezak, N. (2019) Identifying the Hydrological Behavior of a Complex Karst System Using Stable Isotopes. *Journal of Hydrology*, **577**, Article ID: 123956. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123956>
- [7] Lee, K.S., Kim, J.M., Lee, D.R., Kim, Y. and Lee, D. (2007) Analysis of Water Movement through an Unsaturated Soil Zone in Jeju Island, Korea Using Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes. *Journal of Hydrology*, **345**, 199-211. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.006>
- [8] Xia, C.C., Liu, G.D., Zhou, J., Meng, Y., Chen, K., Gu, P., *et al.* (2020) Revealing the Impact of Water Conservancy Projects and Urbanization on Hydrological Cycle Based on the Distribution of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Water. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 40160-40177. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11647-6>
- [9] Craig, H. (1961) Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, **133**, 1702-1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- [10] Florea, L., Bird, B., Lau, J.K., Wang, L., Lei, Y., Yao, T., *et al.* (2017) Stable Isotopes of River Water and Groundwater along Altitudinal Gradients in the High Himalayas and the Eastern Nyainqentanghla Mountains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **14**, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.10.003>
- [11] 廖会娟, 柴勇, 角媛梅, 张华, 余万江, 卢瑞涛, 沈剑, 徐秋娥, 贾士豪. 高原山地-湖泊地区雨季地表水补给来源的空间格局及形成机制[J]. *地理学报*, 2024, 79(7): 1862-1879.
- [12] 邹凯波, 杨智, 戍国标, 等. 洱海流域低污染水回用现状与潜力分析及对策[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(3): 872-881.
- [13] Cuthbert, M.O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K.M., Schneider, A., Hartmann, J., *et al.* (2019) Global Patterns and Dynamics of Climate-Groundwater Interactions. *Nature Climate Change*, **9**, 137-141. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4>
- [14] Asoka, A., Gleeson, T., Wada, Y. and Mishra, V. (2017) Relative Contribution of Monsoon Precipitation and Pumping to Changes in Groundwater Storage in India. *Nature Geoscience*, **10**, 109-117. <https://doi.org/10.1038/ngeo2869>
- [15] Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S.M., Heggy, E., Javadi, S., *et al.* (2023) Decline in Iran's Groundwater Recharge. *Nature Communications*, **14**, Article No. 6882. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42411-2>
- [16] Cameron, E.M., Hall, G.E.M., Veizer, J. and Krouse, H.R. (1995) Isotopic and Elemental Hydrogeochemistry of a Major River System: Fraser River, British Columbia, Canada. *Chemical Geology*, **122**, 149-169. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00007-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00007-9)
- [17] Bierkens, M.F.P. and Wada, Y. (2019) Non-Renewable Groundwater Use and Groundwater Depletion: A Review. *Environmental Research Letters*, **14**, Article ID: 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f>
- [18] Allan, R.P., Barlow, M., Byrne, M.P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H.J., *et al.* (2020) Advances in Understanding Large-Scale Responses of the Water Cycle to Climate Change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1472**, 49-75. <https://doi.org/10.1111/nyas.14337>
- [19] Li, M., Xie, Y., Dong, Y., Wang, L. and Zhang, Z. (2023) Review: Recent Progress on Groundwater Recharge Research in Arid and Semiarid Areas of China. *Hydrogeology Journal*, **32**, 9-30. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02656-z>
- [20] Lone, S.A., Jeelani, G., Deshpande, R.D., Sultan Bhat, M. and Padhya, V. (2023) Assessing the Hydrological Controls on Spatio-Temporal Patterns of Streamwater in Glaciated Mountainous Upper Indus River Basin (UIRB), Western Himalayas. *Journal of Hydrology*, **619**, Article ID: 129310. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129310>
- [21] Hu, K., Chen, H., Nie, Y., Wang, Z., Tan, X. Zhang, Y. (2015) Seasonal Recharge and Mean Residence Times of Soil and Epikarst Water in a Small Karst Catchment of Southwest China. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 10215.
- [22] Li, Z., Coles, A.E. and Xiao, J. (2019) Groundwater and Streamflow Sources in China's Loess Plateau on Catchment Scale. *Catena*, **181**, Article ID: 104075. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104075>
- [23] Liu, C., Jiao, Y., Xu, Q., Liu, Z. and Ding, Y. (2022) Temp-Spatial Heterogeneity of Water Recharge and Its Stable Mechanisms of the Mountainous Rice Terraces in East Asia Monsoon Region. *Water*, **14**, Article No. 4110. <https://doi.org/10.3390/w14244110>
- [24] Fu, G., Crosbie, R.S., Barron, O., Charles, S.P., Dawes, W., Shi, X., *et al.* (2019) Attributing Variations of Temporal and Spatial Groundwater Recharge: A Statistical Analysis of Climatic and Non-Climatic Factors. *Journal of Hydrology*, **568**, 816-834. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.022>
- [25] 韩鹏飞, 王旭升, 蒋小伟, 等. 氢氧同位素在地下水流系统的重分布: 从高程效应到深度效应[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(2): 1-12.
- [26] 陈建生, 彭靖, 詹沪成, 等. 鄱阳湖流域河水、湖水及地下水同位素特征分析[J]. *水资源保护*, 2015, 31(4): 1-7.
- [27] Ni, C., Chen, Y., Hu, X. and Feng, J. (2023) Vegetation Change and Conservation Evaluation of the Cangshan Erhai National Nature Reserve (Cangshan Mountain Part) in Southwest China. *Forests*, **14**, Article No. 1485.

-
- <https://doi.org/10.3390/f14071485>
- [28] She, W., Jiao, Y., Lu, R., Chai, Y., Chen, F., Shen, J., *et al.* (2024) Quantification of Nitrate Sources and Its Spatial Heterogeneity by Dual Isotopes. *Ecosystem Health and Sustainability*, **10**, Article No. 0201.
<https://doi.org/10.34133/ehs.0201>
- [29] Chen, K., Duan, L., Liu, Q., Zhang, Y., Zhang, X., Liu, F., *et al.* (2022) Spatiotemporal Changes in Water Quality Parameters and the Eutrophication in Lake Erhai of Southwest China. *Water*, **14**, Article No. 3398.
<https://doi.org/10.3390/w14213398>
- [30] Lin, S.S., Shen, S.L., Zhou, A.N. and Lyu, H. (2021) Assessment and Management of Lake Eutrophication: A Case Study in Lake Erhai, China. *Science of the Total Environment*, **751**, Article ID: 141618.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141618>
- [31] Zhong, S.Z., Geng, Y., Kong, H.N., Liu, B., Tian, X., Chen, W., *et al.* (2018) Emergy-Based Sustainability Evaluation of Erhai Lake Basin in China. *Journal of Cleaner Production*, **178**, 142-153.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.019>