

doi: 10.12029/gc20220303

杨艳林, 靖晶, 赵永波, 何军, 杜小锋. 2022. 基于氢氧稳定同位素的武汉北部新城地表水-地下水转换关系研究[J]. 中国地质, 49(3): 706-715.
Yang Yanlin, Jing Jing, Zhao Yongbo, He Jun, Du Xiaofeng. 2022. Conversion relationship between surface water and groundwater based on stable isotopes of D and ^{18}O of new town in the northern Wuhan, Hubei[J]. Geology in China, 49(3):706-715 (in Chinese with English abstract).

基于氢氧稳定同位素的武汉北部新城地表水-地下水转换关系研究

杨艳林¹, 靖晶², 赵永波¹, 何军¹, 杜小锋³

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 湖北师范大学城市与环境学院, 湖北 黄石 435002; 3. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034)

摘要:【研究目的】揭示武汉北部新城地表水、地下水的氢氧稳定同位素特征及其相互作用。【研究方法】2019年, 采集、测定了降水样 7 件、河水样 6 件、水库样 14 件、民井样 98 件、泉水样 3 件和钻孔样 11 件, 并收集到武汉站 1986—1998 年的监测数据 50 件, 以空间分析和流域分析为基础, 氢氧稳定同位素分析为手段。【研究结果】(1) 武汉降水氢氧同位素随季节变化, 并表现出“降雨效应”明显、“温度效应”不明显的特点; (2) 地表水在枯水期受到强烈的蒸散发, 表现出一定的“地貌效应”与“干支流效应”的特征; (3) 民井、泉和钻孔等地下水均源于大气降水, 表现出“含水层埋深效应”与“山区平原效应”的特点; (4) 枯水期, 界河流域中界河获得了上游水库和地下水的补给, 夏家寺水库流域中夏家寺水库得到了地下水补给。【结论】氢氧同位素能显著提高武汉北部新城地表水-地下水相互转换规律的认识。

关键词: 地下水; 河水; 水库; 氢氧稳定同位素; 水文地质调查工程; 北部新城; 武汉; 湖北

创 新 点: 利用各类水体氢氧同位素组成及空间分布特征, 揭示了武汉北部新城降水、地表水和地下水相互转换的规律

中图分类号: P592 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)03-0706-10

Conversion relationship between surface water and groundwater based on stable isotopes of D and ^{18}O of new town in the northern Wuhan, Hubei

YANG Yanlin¹, JING Jing², ZHAO Yongbo¹, HE Jun¹, DU Xiaofeng³

(1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. School of City and Environmental, Hubei Normal University, Huangshi 435002, Hubei, China; 3. Institute of Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

收稿日期: 2021-01-18; 改回日期: 2022-05-09

基金项目: 中国地质调查局项目“武汉多要素城市地质调查(DD20190282)”和“武汉滨江城市地质安全调查评价(DD20221743)”资助。

作者简介: 杨艳林, 男, 1984 年生, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究; E-mail: yangyanlin@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 何军, 男, 1984 年生, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究; E-mail: 176041779@qq.com。

[Object]Reveal the characteristics and interaction of D and ^{18}O between surface water and groundwater in the northern new town of Wuhan, **[Methods]**7 precipitation samples, 6 river samples, 14 reservoir samples, 98 minjing samples, 3 spring samples and 11 borehole samples were collected and measured in 2019, what's more, 50 monitoring data of Wuhan station from 1986 to 1998 were collected. The research methods of D and ^{18}O spatial analysis and watershed analysis are carried out in this paper. **[Results]**(1) The D and ^{18}O isotopes of precipitation in Wuhan vary with seasons, and the negative correlation between isotopic value and precipitation indicates "rainfall effect", but the no correlation between isotopic value and temperature indicates "no temperature effect". (2) Due to strong evapotranspiration, the surface water shows the certain correlation between isotopic value and geomorphic types, and the main stream is enriched in stable isotopic, while the tributaries is depleted; (3) Groundwater such as wells, springs and boreholes are all derived from atmospheric precipitation, and the stable isotopes value of groundwater is related to the buried depth and geomorphic type; (4) During the dry season, the Jiehe River is recharged by upstream reservoir and underground water in the Jiehe basin, and the XiaJiasi reservoir is recharged by underground water in the XiaJiasi reservoir basin. **[Conclusion]**D and ^{18}O can significantly improve the understanding of the conversion relationship between surface water and groundwater in the northern new town of Wuhan.

Key words: groundwater; river; reservoir; stable isotopes D and ^{18}O ; hydrogeological survey engineering; New Town; Wuhan; Hubei Province

Highlights: Based on the D and ^{18}O composition and spatial distribution characteristics, the mutual transformation law of precipitation, surface water and groundwater in the northern new town of Wuhan is revealed.

About the first author: YANG Yanlin, male, born in 1984, senior engineer, engaged in hydro-environmental geological survey; E-mail: yangyanlinjida@gmail.com.

About the corresponding author: HE Jun, male, born in 1984, senior engineer, engaged in hydro-environmental geological survey; E-mail: 176041779@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190282, No.DD20221743).

1 引言

武汉北部新城是打造武汉经济增长的第三极,区内水、土地、农业、林业和旅游等资源十分丰富。随着大投入、大建设、大发展,一座宜居、宜业、宜游、宜养的高品质生态新城正款款而来,区内土地利用、生态环境逐渐发生变化,地表水(河流、湖泊和水库)地下水相互作用也随之发生改变,而地表水和地下水是水量、能量与物质输入的两个重要载体,也是维持区内地球化学循环、水循环和生态平衡的关键环境要素(Moore et al., 2010)。通常地表水与地下水存在着密切的水力联系,相互作用的变化将直接影响到各水体的水量、水质以及与之相依赖的生态环境系统(王东升, 1989; Winter, 1999)。因此,针对武汉北部新城新时期的环境地质条件,开展多种水体之间相互作用关系的研究,是实现水资源优化管理,以及农业、林业、旅游等可持续发展的关键。本次在武汉北部新城水资源和环境问题调查评价中,采集了大量氢氧稳定同位素资料,样品涉及到大气降水、地表水和地下水(简称“三水”)

等不同类型的水体,分析各水体氢氧同位素的空间分布特征,揭示区内地下水的形成演化规律以及水体之间的转化关系,从而为水资源的合理开发、利用、管理提供理论与科学依据。

氢氧稳定同位素作为自然水体中的重要组成部分,同位素的分馏作用,贯穿于水循环的各个环节,尽管其所占比例很小,却非常敏感地响应着环境的变化,并记载着水循环演化的历史信息(Clark et al., 1997)。基于这一特性,氢氧稳定同位素技术已广泛应用于大气降水组成、水汽来源和变化特征等(郑淑蕙等, 1983; 孙婷婷, 2007; 赵家成等, 2009; 陈中笑等, 2010; 董小芳等, 2017)、地表水-地下水相互作用(章斌等, 2013; 陈建生等, 2015),以及地下水的补给来源及数量的研究(梁永平等, 2006; 苗晋祥, 2010; 黄小琴等, 2014)。对于武汉地区,前人也做过氢氧稳定同位素方面的研究,但主要围绕大气降水氢氧同位素特征(邓志民等, 2016)、水汽来源(谷金钰等, 2017)等方面,很少开展地表水地下水氢氧同位素特征及其相互转化方面的研究,这也是本文开展此项研究的目的。

2 研究区概况

研究区位于武汉市北部,隶属于武汉市黄陂区;区内交通发达,水资源丰富,主要水系有滠水、界河、石港河;水库众多,主要有夏家寺、梅店、院基寺;地貌类型有低山、丘陵、岗地和平原,地势总体为北高南低,海拔标高30~300 m(图1)。区内气候属于亚热带大陆季风气候,四季分明,年平均气温15.7~17.4℃,日平均气温28.4℃,7、8月气温最高,1、2月气温最低;雨量充沛,年平均降水量为1150~1450 mm,主要集中在6—8月,约占全年降水量的一半;阳光充足,年平均无霜期255 d,多年平均蒸发量508 mm。

研究区基岩出露地层有南华系双台组、震旦系陡山沱组、震旦系—寒武系灯影组、白垩系—古近系公安寨组。新元古代—古生代地层广泛分布于

研究区北部、东部低山—丘陵区,中生代地层零星出露于研究区西南部李家集—祁家湾一带,新生代第四纪地层有中更新统王家店组、晚更新统下蜀组 and 全新统走马岭组,分布于地势低洼的河流沟谷和岗坡地带,为冲积、洪冲积、湖积和人工填土等成因类型。根据地下水的埋藏条件及含水介质特征,区内有松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、变质岩类裂隙水、岩浆岩类裂隙水及碳酸盐岩类岩溶裂隙水五大类型,其中南华纪变质岩风化裂隙含水岩组分布面积最大,白垩系—古近系公安寨组裂隙含水岩组水量最丰富。

3 研究方法

3.1 样品采集

2019年采集河流样(6件)、水库样(14件)、降水

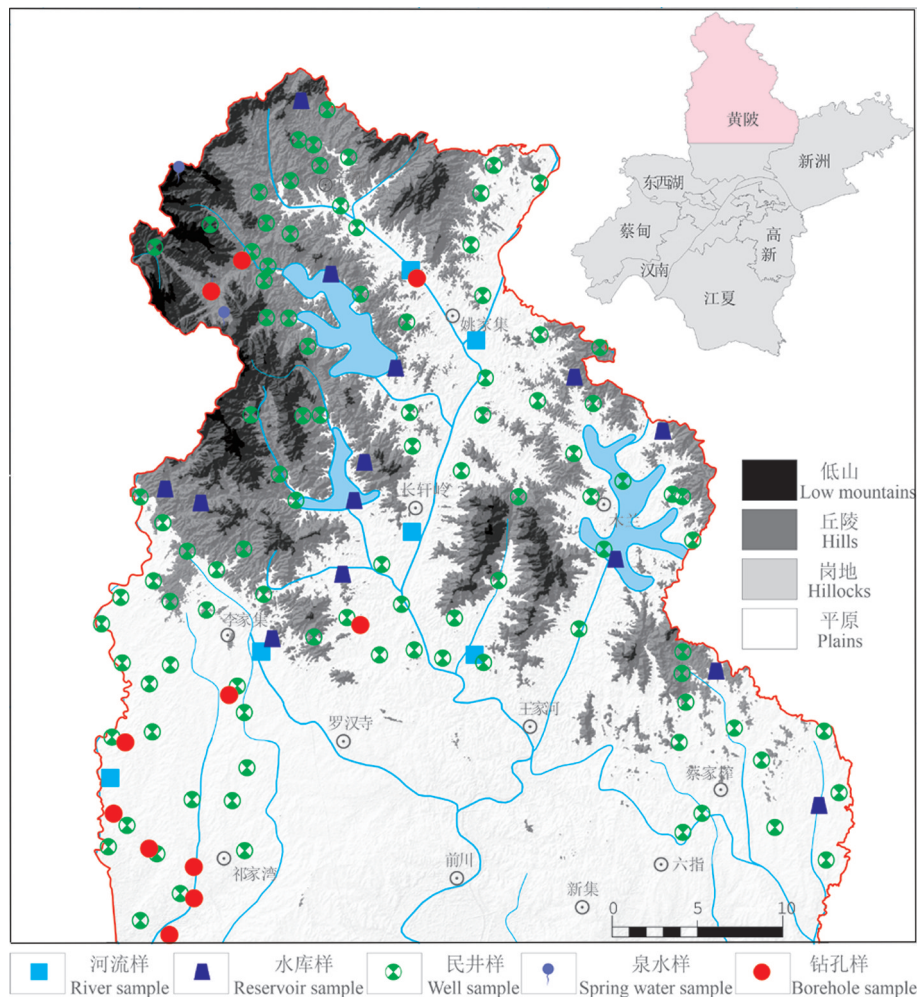


图1 研究区地形地貌及采样点分布

Fig.1 Topography of the study area and spatial distribution of sampling points

样(7件)、民井样(98件)、泉水样(3件)、钻孔样(11件),共计139件,采样点位空间分布如图1,其中降雨样(7件)位于武汉城区。样品采集严格按照规程进行,对不符合要求的样品进行了补充采样。样品瓶为无色聚乙烯瓶,每次采集水样时,用待取水样清洗采样瓶3次以上。样品采集完后,将样品瓶倒转,观察是否有气泡,若有气泡则重新采集,并即时送到检测单位测试。

3.2 样品测定

本次样品测试均在中南矿产资源监督检测中心进行,氢、氧稳定同位素测定采用元素分析仪FlashEA 1112 HT和质谱仪MAT253联机完成。测定过程中,将水样放入AS3000液体自动进样器托盘,由进样器采集0.1 μL水样注入元素分析仪高温转化炉(1380℃)中,通过高温碳还原生成H₂和CO,由He载气携带经恒温色谱柱分离(90℃)出H₂和CO,再导入质谱仪分别进行H、O同位素测定。分析过程采用国际标准V-SMOW和GISP,行业标准GBW(E)-070016和GBW(E)-070017,以及重复样(标准和重复样数量为样品总数的30%)进行质量监控。所有结果以相对于V-SMOW(Vienna Standard Mean Oceanic Water)维也纳标准样品标准的千分差表示(式1和2),测定结果可信可靠,均在国标、行标误差允许范围内。

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{样品}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

$$\delta\text{D} = \left[\frac{(D/H)_{\text{样品}}}{(D/H)_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (2)$$

式中:(¹⁸O/¹⁶O)_{样品}、(D/H)_{样品}为样品待测值, (¹⁸O/¹⁶O)_{V-SMOW}=(2005.2 ± 0.45) × 10⁻⁶, (D/H)_{V-SMOW}=155.76 × 10⁻⁶。

4 结果分析与讨论

4.1 降水同位素分析

大气降水是地表水、地下水的主要补给来源,掌握大气降水的同位素组成,对于揭示地表水和地下水的同位素构成及相互转化过程起到至关重要的作用。区内由于缺少降水稳定同位素的监测资料,本次分析数据来源于全球降水同位素监测网络(Global Network of Isotope in Precipitation, 简称

GNIP)(International Atomic Energy, 2011),监测频率每月一次,收集到武汉站点(30.62°N, 114.13°E)1986—1998年的监测数据,部分月份数据有缺失。

1986—1998年,武汉市大气降水δD的变化范围为-86.8‰~+4.2‰,δ¹⁸O的变化范围为-12.18‰~+0.12‰。图2是武汉大气氢氧稳定同位素、降雨量、气温等月变化趋势图。其中δD和δ¹⁸O的月降水同位素采用降水量加权平均计算(式3和4),月降雨量和月平均气温采用算术平均计算(式5和6)。由图2知,降水同位素偏负的季节主要分布在6—8月,恰巧是武汉的雨季,其他月份相对富集。7月份,值最贫瘠,夏季期间降水充沛,随着降雨的增多,水汽经多次冷凝后δD和δ¹⁸O变得越来越贫化,大气降水同位素表现出明显的“降水量效应”。δD和δ¹⁸O同位素与气温之间,未表现出气温越高,同位素分馏程度越大的相关关系,则武汉市大气降水氢氧同位素中的“温度效应”基本不明显。

$$\overline{O_{i,j}^{18}} = \frac{\sum_{i=1}^n O_{i,j}^{18} \times (1/\text{rain}(i,j))}{\sum_{i=1}^n 1/\text{rain}(i,j)} \quad (3)$$

$$\overline{D_j} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{i,j} \times (1/\text{rain}(i,j))}{\sum_{i=1}^n 1/\text{rain}(i,j)} \quad (4)$$

$$\overline{\text{rain}_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{rain}(i,j) \quad (5)$$

$$\overline{T_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T(i,j) \quad (6)$$

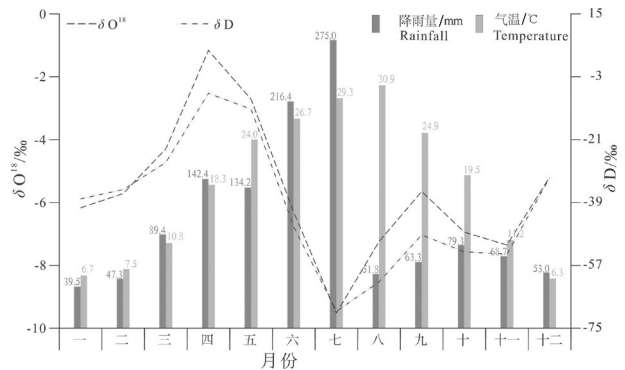


图2 武汉地区月降水量、气温、氢氧同位素变化特征
Fig.2 Variation characteristics of monthly precipitation, temperature, δ¹⁸O and δD in Wuhan area

式中: n 为某月份的数据总个数; j 为第 j 月份; i 为某月份第 i 个数据; rain 为降雨量,单位(mm); T 为温度,单位($^{\circ}\text{C}$); O^{18} 、 D 、 T 分别为氧18同位素值、氢同位素值和温度, $\overline{\text{O}^{18}_i}$ 、 $\overline{\text{D}_j}$ 、 $\overline{\text{rain}_j}$ 、 $\overline{T_j}$ 为对应的月均值。

武汉位于季风区,不同季节降水的水汽来源不同,冬季风来自高纬度的亚洲内陆,空气寒冷干燥,雨水少,空气湿度小,利于氢氧同位素分馏,致重同位素富集;而夏季风来自印度洋(西南季风)和太平洋(东南季风),雨水充沛,空气湿度高,不利于同位素分馏,从而使武汉降水同位素的组成呈明显的季节变化(谷金钰等,2017)。根据降雨同位素的数据特点,结合前人的分析,将数据分为3个时间段(邓志民等,2016):1986—1992年,1996—1998年和2019年。

图3显示了降水氢氧稳定同位素的季节变化。由图3知,1986—1992年,最小值($\delta^{18}\text{O}=-12.18\text{‰}$, $\delta\text{D}=-86.8\text{‰}$)出现在秋季;最大值($\delta^{18}\text{O}=-2.15\text{‰}$, $\delta\text{D}=-6.1\text{‰}$)出现在春季,大气降水方程为 $y=7.744x+0.1$ 。1996—1998年,最小值($\delta^{18}\text{O}=-9.68$, $\delta\text{D}=-76.2\text{‰}$)出现在夏季;最大值($\delta^{18}\text{O}=0.12\text{‰}$, $\delta\text{D}=4.2\text{‰}$)出现在春季,大气降水方程为 $y=8.699x+14.257$ 。2019年只有夏季与秋季两期数据,且具有秋季大于夏季的特点,大气降水方程为 $y=8.328x+10.688$,位于前两期降水方程之间(图3)。从数据整体分布来看,武汉降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素表现出春季>冬季>秋季>夏季的特点,从而进一步印证了武汉降水同位素随季节变化。

4.2 地表水氧同位素特征

地表水(河流与水库)11月和12月样品的 $\delta^{18}\text{O}$

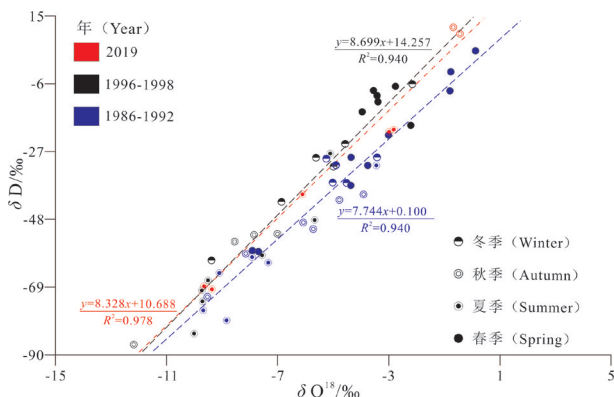


图3 降水氧同位素的季节变化

Fig.3 Seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation

与 δD 关系见图4。河流的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -3.40‰ ~ -0.02‰ ,均值 -1.85 , δD 值介于 -25.50‰ ~ -12.2‰ ,均值 -19.02‰ ;水库的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -3.28‰ ~ -0.50‰ ,均值 -2.18 , δD 值介于 -27.70‰ ~ -10.4‰ ,均值 -20.71‰ 。 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系点全部落在全球降水线(GMWL: $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$)下,说明地表水受到较强的蒸散发,较轻的 ^{16}O 优先逸出,水体中 ^{18}O 含量增加,从而使水体中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值富集。通过 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 同位素方程拟合,发现水库与河流的拟合方程一样,说明它们具有相同的补给水源、相当的蒸散发程度。散点的大小,是用过剩指标 $d(d=\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O})$ (Dansgaard, 1964)的绝对值(AbsD)来表示的(地表水样品中 d 均为负值),圆越大,表明蒸发量越大;由图4知,散点的大小与 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈正相关, $\delta^{18}\text{O}$ 值越富集,圆越大,即 d 值越大,从而进一步证实地表水在枯水期(11、12月)受到一定的蒸发作用。

图5是水库和河流样中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素的空间分布。由图5知,分布于丘陵山区的大型水库流域具有较小的AbsD,如梅店、院基寺和夏家寺等水库,而位于平原区的小型水库具有较大的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和AbsD值,如三枯、劳动和吴家寺等水库,表现出 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素的“地貌效应”。这可能是由于丘陵山区地势高,温度比平原区弱低,蒸发强度弱;森林资源丰富,水资源涵养丰富;人类活动干扰小,而且大型水库具有储水量大,汇水面积广和较多的地下水补给。水库中两期 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素值变化小,如梅店水库中 $\delta^{18}\text{O}$ 相差0.09, δD 相差1.3。水库的上下游之间的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素相差较小,如夏家水库中 $\delta^{18}\text{O}$ 相差0.08, δD 相差0。山区河流比平原区河

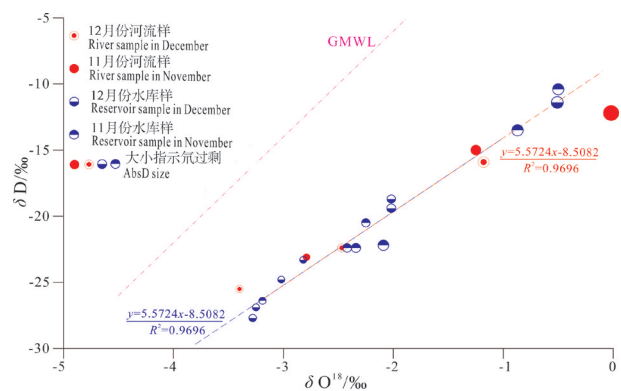


图4 河流、水库中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素及氘过剩值

Fig.4 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD and deuterium excess(d) in rivers and reservoirs

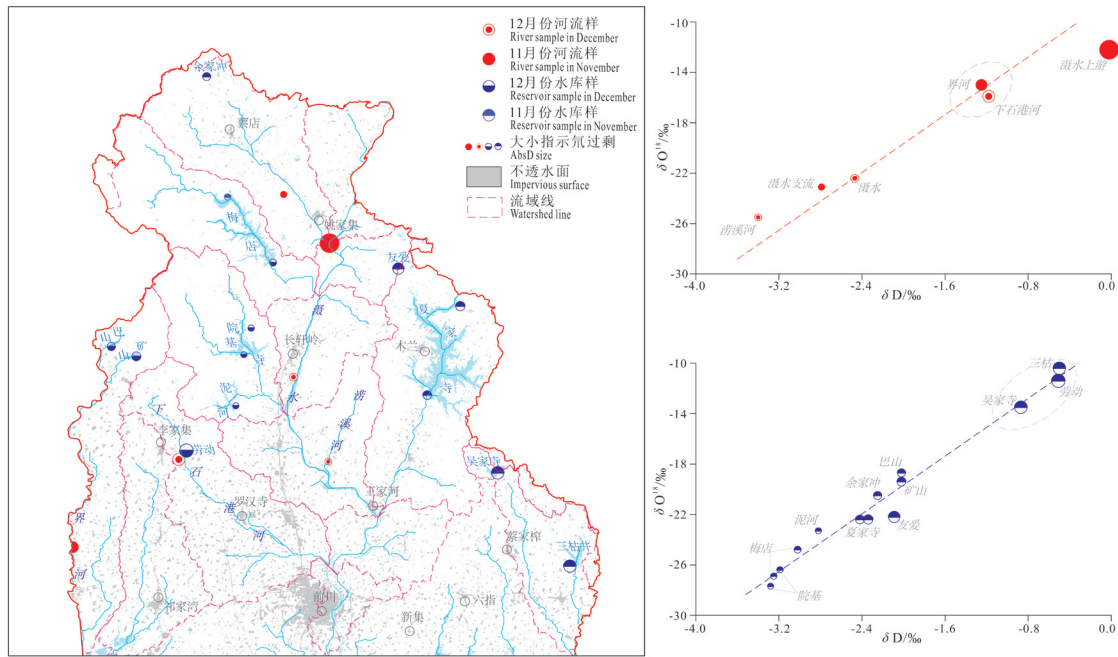


图5 河流、水库样中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素样的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of river and reservoir samples about $\delta^{18}\text{O}$ and δD

流具有较小的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和AbsD值,如平原区的界河比丘陵山区的淝水支流、滂溪河的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和AbsD值均大。这可能是因为山区海拔高、气温弱低、蒸发量小、流程短,人类活动少。支流(小型河流)比干流具有较小的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值,如姚家集地区的淝水支流、木兰山地区的滂溪河,表现出氧同位素的“干支流效应”。这是因为支流流量小,流程短,蒸发时间短,人类干扰小。在淝水上游姚家集附近的一处采样点,氧同位素表现出异常高,这可能与周边人类生产生活废水排放有关。

4.3 地下水的同位素特征

地下水是水资源的重要组成部分和生态环境的重要控制因素,其形成与演化是研究地表水-地下水相互作用的基础(章斌等,2013)。地下水(民井、泉和钻孔)样品的 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系见图6。民井采样点有97口,以潜水含水层样为主, $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -7.32‰ ~ -2.75‰ ,均值 -5.60‰ , δD 值介于 -49.30‰ ~ -22.20‰ ,均值 -36.02‰ ,分布于GMWL两侧,较分散,反映出潜水的径流交替循环强烈,径流时间短,地下水均来源于大气降水的特点。泉水样仅3眼,位于研究区的北部, $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -7.63‰ ~ -5.97‰ ,均值 -7.05‰ , δD 值介于 -48.60‰ ~

-40.3‰ ,均值 -45.03‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 分布于GMWL两侧,指示泉水水源来源于降水。钻孔样11口,分布于研究区的北部和南西部,其中10口为基岩裂隙水,1口为第四系孔隙潜水, $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -9.34‰ ~ -4.22‰ ,均值 -7.49‰ , δD 值介于 -64.10‰ ~ -31.90‰ ,均值 -51.74‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 落在GMWL上或附近,表明深部基岩裂隙水来源于降水。其中钻孔样点在井和泉样之下,而且钻孔样拟合方程的斜率最大,表现出 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素的“含水层埋深效应”。

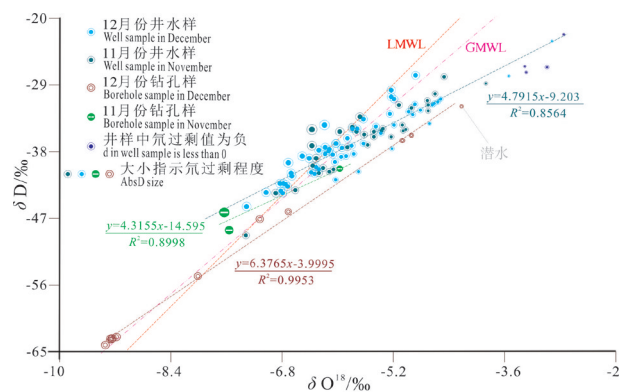


图6 井、泉、钻孔样中 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 同位素及 d
Fig.6 $\delta^{18}\text{O}$ - δD and d in well, spring and borehole samples

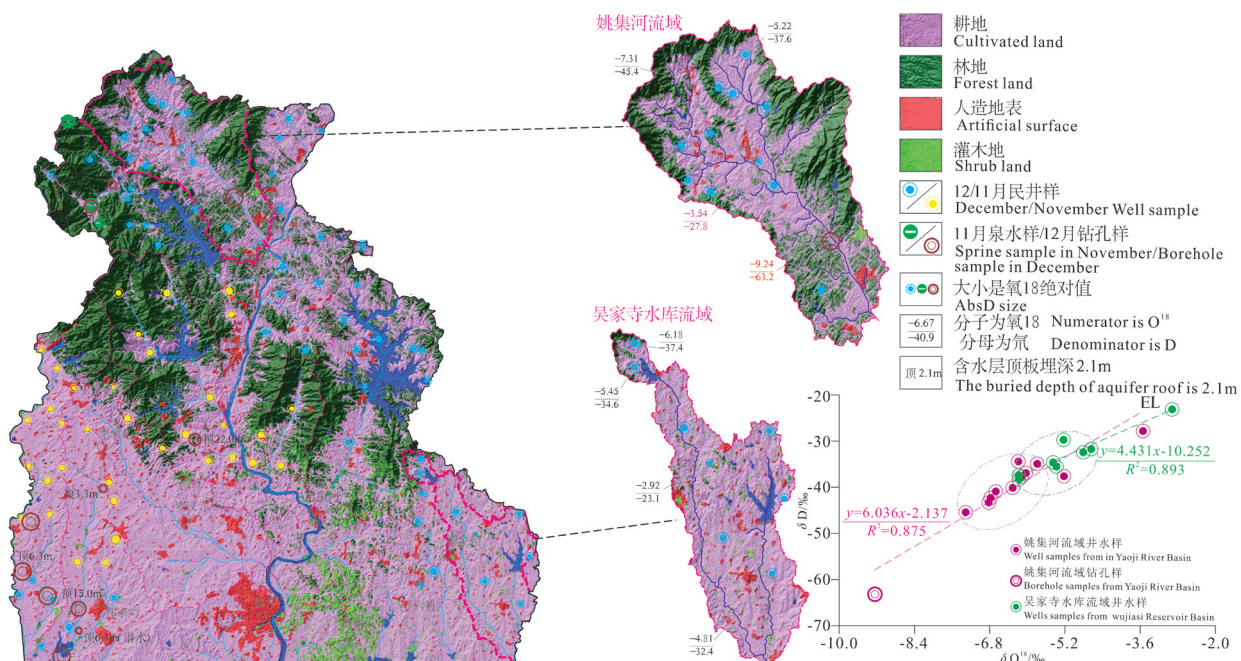


图7 民井、泉和钻孔等采样点的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of well, spring and borehole samples

应”。这是由于井和泉水样的含水层埋深浅,更易于发生蒸发浓缩作用;而深部含水层埋深较深,径流交替缓慢,受蒸发和人为活动的影响小,同时由于水岩相互作用,使重同位素耗损, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值贫化。

图7是民井、泉和钻孔样采样点空间分布,其中点的大小表示 $\delta^{18}\text{O}$ 的绝对值大小(本次调查中 $\delta^{18}\text{O}$ 均为负值),点越小, $\delta^{18}\text{O}$ 值越大,则蒸发浓缩作用越强。采样点基本布满整个研究区,丘陵山区、岗地和平原区,潜水和承压水,以及松散岩类孔隙水和基岩裂隙水均有采样点。从地貌来看,分布于山前丘陵与平原区的民井整体上有更小的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值,见图7中的散点图,北部姚集河流域($-9.24\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -3.54\text{‰}$, $-63.2\text{‰} < \delta\text{D} < -27.8\text{‰}$)与南部吴家寺水库流域($-6.18\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -2.92\text{‰}$, $-38.3\text{‰} < \delta\text{D} < -2.92\text{‰}$);靠近林地的民井有较小的 $\delta^{18}\text{O}$,而在村落周边的民井 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高(如北部姚集河流域中蔡店村处的采样点),姚集河流域的散点图斜率较大, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素表现出一定的“山区平原效应”。这可能是由于丘陵山区植被覆盖度高,地下水埋深较深,蒸散发稍小,能获得山区基岩裂隙的侧向补给;而平原区的植被覆盖度低,地下水埋深较浅,蒸发作用强;同时与居民的生产生活用水也

有关。基于民井与钻孔数据,对比分析深部与浅部、承压水与潜水的氢氧稳定同位素,埋深较浅的含水层,由于蒸发浓缩作用,具有较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值(图7中西南部的钻孔);埋深较深的基层裂隙水或承压水有较贫化的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值(图7中北部与西南部的钻孔),由于深部地下水径流速度缓慢,径流交替减弱,水岩相互作用时间延长,使重同位素耗损, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值贫化。

4.4 地表水-地下水之间的转化关系

本次采集地表水、地下水同位素样的 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-9.34\text{‰} \sim -0.02\text{‰}$,平均值 -5.25‰ , δD 的变化范围为 $-64.1\text{‰} \sim -10.4\text{‰}$,平均值 -35.13‰ 。图8是地表水、地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系图,其中中国、长江流域和武汉大气降水方程分别参考陈中笑等(2010),孙婷婷(2009)和谷金钰等(2017)研究成果。由图8知,研究区内地下水同位素样基本落在大气降水线上或两侧,这表明本区地下水均来自大气降水,受到蒸发作用影响很小。水库、河流的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高,落在降水线的右下方,表明水库、河流由于大面积暴露,蒸发作用强烈,使得同位素向重同位素方向富集。

为了便于分析,本次选取研究区内的两个子流

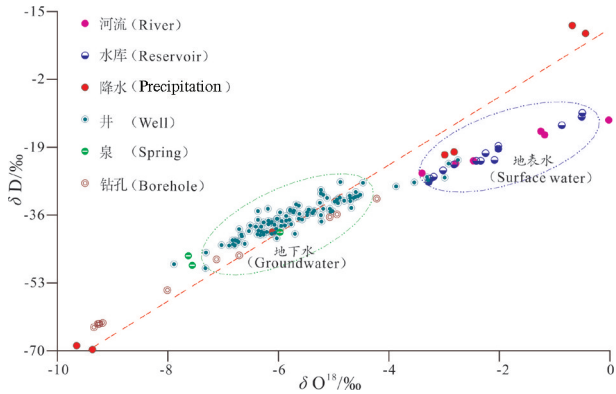


图8 地表水、地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系
Fig.8 $\delta^{18}\text{O}$ - δD relation between surface water and groundwater

域:河流流域(界河流域)和水库流域(夏家寺水库流域),见图9。

在界河流域中,水库样2个、河流样1个,地表水中 $\delta^{18}\text{O}$: $-2.02\text{‰} \sim -1.25\text{‰}$,平均值 -1.76‰ , δD : $-19.40\text{‰} \sim -15.00\text{‰}$,平均值 -17.7‰ ;民井样13

个, $\delta^{18}\text{O}$: $-6.06\text{‰} \sim -2.75\text{‰}$,平均值 -5.08‰ , δD : $-40.70\text{‰} \sim -22.20\text{‰}$,平均值 -34.12‰ ;对比地表水样与民井样中的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD ,结合图9中的界河氢氧同位素图,发现地表水中富集氢氧稳定重同位素十分明显。在枯水期,界河上游的矿山水库与巴山水库是下游农业和生态需水的重要补给水源。从水库、界河的氕氧同位素来看,它们几乎落在相近的区域,表明界河接受了两座水库的补给。地表水从水库流出后,沿程蒸发浓缩,至界河采样点处氢氧重同位素进一步富集。在枯水季,平原区河流由于得不到降雨的大量补给,水位逐渐下降,而此时地下含水层中储备了大量的地下水,水位埋深较浅,是河流的重要补给水源。水库、河流、井和钻孔的 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系点基本落在蒸发线EL1上,表明水库与河水、河水与地下水之间存在良好的连通性,这也从同位素角度证实了枯水季时,界河获得了地下水补给。

在夏家寺流域中,水库样3个, $\delta^{18}\text{O}$: $-2.42\text{‰} \sim$

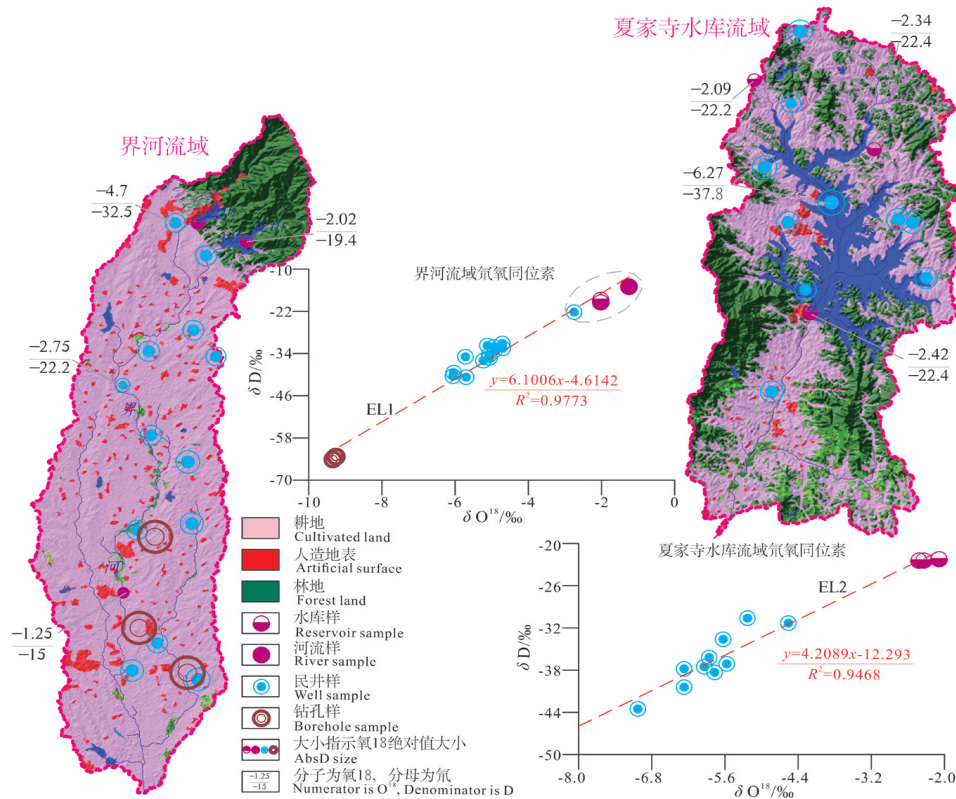


图9 南部流域中 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 空间分布
Fig.9 Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ - δD in the southern watershed

-2.09‰, 平均值-2.28‰, δD : -22.40‰ ~ -22.20‰, 平均值 -22.33‰; 民井样 11 个, $\delta^{18}O$: -7.03‰ ~ -4.56‰, 平均值-5.81‰, δD : -43.50‰ ~ -30.60‰, 平均值-36.63‰。井水样与水库水样落在 EL2 线上, 夏家寺水库的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值明显较高, 表明其受到强烈的蒸散发影响。枯水期, 夏家寺水库是周边河流和地下水的重要排泄地, 采样期间, 夏家寺水库水位高程约 49 m, 比周边地下水水位低 0.5~3 m, 地下水径流补给水库。从氧同位素来看, 夏家寺水库上游的 $\delta^{18}O$ 为 -2.34‰, 而下游的 $\delta^{18}O$ 为 -2.42‰, 水库水中的 $\delta^{18}O$ 得到了贫化, 不符合地表水径流过程中重同位素逐渐富集规律, 这可能是因为得到了地下水的径流补给, 进而从侧面印证了地下水向水库排泄的规律。

5 结论与建议

通过分析武汉北部新城降雨、地表水和地下水氢氧同位素组成及空间分布特征, 揭示了降水、地表水和地下水相互转换的规律, 主要取得以下认识:

(1) 武汉降水氢氧稳定同位素随季节变化, $\delta^{18}O$ 和 δD 值变化为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季, 并表现出“降雨效应”明显、“温度效应”不明显的特点。

(2) 地表水在 11 月和 12 月受到一定的蒸发作用, 平原区与丘陵山区相比, 平原区河流与水库表现出 $\delta^{18}O$ 和 δD 的富集; 河流的支流具有贫化的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值。

(3) 民井、泉和钻孔等地下水源于大气降水; 对比深层与浅层、潜水与承压水, 结果发现 $\delta^{18}O$ 和 δD 表现出深部的含水层或承压水具有贫化的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值; 对比北部的丘陵山区与南部的低岗平原, 发现南部低岗平原的浅层地下水富集 $\delta^{18}O$ 和 δD 。

(4) 地下水、地表水均来自大气降水, 地下水受到蒸发作用影响很小, 地表水受蒸发作用的影响强烈, 使得氢氧同位素向重同位素方向富集。以流域分析为基础, 同位素分析为手段, 结果表明枯水期界河获得了上游水库和地下水的补给, 夏家寺水库得到了地下水补给的规律。

本次的采样工作主要集中在枯水期, 未对丰水期的氢氧同位素进行采样, 建议后续开展这方面工作, 并联合枯丰两期数据, 形成三水同位素特征及其转换规律的完整认识。

致谢: 感谢两位匿名审稿专家及编辑部老师给予的宝贵建议和修改意见!

References

- Chen Zhongxiao, Cheng Jun, Guo Pinwen, Lin Zhenyi, Zhang Fuying. 2010. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 33(6):667-679(in Chinese with English abstract).
- Chen Jiansheng, Peng Jing, Zhan Lucheng, Zhang Shiyin. 2015. Analysis of isotopes characteristics of river water, lake water and groundwater in Poyang lake basin[J]. Water Resources Protection, 31(4):1-7(in Chinese with English abstract).
- Clark I D, Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology[M]. Boca Raton: Lewis Publishers of United State.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotope in precipitation[J]. Tellus, 14(4): 436-468.
- Deng Zhimin, Zhang Xiang, Pan Guoyan. 2016. Variations of hydrogen and oxygen isotopes in Meteoric precipitation in Wuhan, China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 33(7):12-17,22(in Chinese with English abstract).
- Dong Xiaofang, Deng Huangyue, Zhang Luan, Zhu Zhipeng, Wang Lin, Zheng Xiangmin, Zhou Limin. 2017. Characteristics of stable isotope in precipitation and its relationship with ENSO in Shanghai[J]. Environmental Science, 38(5): 1817-1827 (in Chinese with English abstract).
- Gu Jinyu, Zhang Wenjie, Xu Wensheng, Zhang Pingcang. 2017. Characteristics of D and ^{18}O in precipitation and water-vapor sources in Wuhan, middle reach of Changjiang river[J]. Yangtze River, 48(13): 31-35,63(in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaoqin, Liu Qing, Xue Zhongqi, Liu Jun. 2014. The characteristics of groundwater isotopes in upper reach plain of Qingshui river, Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 28(2):143-148(in Chinese with English abstract).
- International Atomic Energy Agency. 2011. Global network of isotopes in precipitation [EB/OL]. http://www-naweb.iaea.org/hapc/ih/IHS_resources_gnip.html.
- Liang Yongping, Yan Fugui, Hou Junlin, Wang Weitai. 2006. Discussion on condensed water supply to karst groundwater in Zhuozi mountain region, inner Mongolia[J]. Carsologica Sinica, (4):320-323(in Chinese with English abstract).
- Miao Jinxiang. 2013. Formation of the shallow groundwater in the northern Henan Plain based on isotope analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 37(4): 5-11 (in Chinese with English abstract).
- Moore, Willard S . 2010. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean[J]. Annual Review of Marine Science, 2(1): 59.
- Sun Tingting. 2017. Variation Characteristics of Stable Isotopes of

- Water in the Yangtze River Basin[D]. Nanjing: Hohai University (in Chinese with English abstract).
- Winter, T. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems[J]. *Hydrogeology Journal* 7, 28 - 45.
- Wang Dongsheng. 1989. Modern water resources science and isotope technology[J]. *Geology in China*, 16(8):27-28.
- Zhang Bin, Guo Zhanrong, Gao Aiguo, Yuan Xiaojie, Li Kaipei. 2013. An Analysis fo the Interaction between river water, groundwater and seawater in Minjiang River Exutuery Region, Fujian Province, Based on stable isotopes D and ^{18}O [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(2):213-222(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jiacheng, Wei Baohua, Xiao Shangbin. 2009. Stable isotopic characteristics of atmospheric precipitation from Yichang, Hubei[J]. *Tropical Geography*, 29(6):526- 531 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. 1983. Study on stable isotopes of D and ^{18}O in atmospheric precipitation in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 13:801-806(in Chinese).
- ### 附中文参考方献
- 陈建生, 彭靖, 詹沪成, 张时音. 2015. 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*, 31(4): 1-7.
- 陈中笑, 程军, 郭品文, 林振毅, 张福颖. 2010. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. *大气科学学报*, 33(6): 667-679.
- 董小芳, 邓黄月, 张峦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻. 2017. 上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系[J]. *环境科学*, 38(5): 1817-1827.
- 邓志民, 张翔, 潘国艳. 2016. 武汉市大气降水的氢氧同位素变化特征[J]. *长江科学院院报*, 33(7):12-17, 22.
- 谷金钰, 张文杰, 许文盛, 张平仓. 2017. 武汉市大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及水汽来源[J]. *人民长江*, 48(13):31-35,63.
- 黄小琴, 柳青, 薛忠岐, 刘君. 2014. 宁夏固原地区地下水同位素特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 28(2):143-148.
- 梁永平, 阎福贵, 侯俊林, 王维泰. 2006. 内蒙桌子山地区凝结水对岩溶地下水补给的探讨[J]. *中国岩溶*, (4):320-323.
- 苗晋祥. 2010. 基于同位素的豫北平原浅层地下水形成的认识[J]. *水文地质工程地质*, 37(4):5-11.
- 孙婷婷. 2007. 长江流域水稳定同位素变化特征研究[D]. 南京: 河海大学.
- 王东升. 1989. 现代水资源学与同位素技术[J]. *中国地质*, 16(8): 27-28.
- 章斌, 郭占荣, 高爱国, 袁晓婕, 李开培. 2013. 用氢氧稳定同位素揭示闽江河口区河水、地下水和海水的相互作用[J]. *地球学报*, 34(2): 213-222.
- 赵家成, 魏宝华, 肖尚斌. 2009. 湖北宜昌地区大气降水中的稳定同位素特征[J]. *热带地理*, 29(6): 526-531.
- 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 1983. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, (13): 801-806.