DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20240322002 文章编号:1672-9331(2024)05-0032-10
引用格式:谌宏伟,张馨妍,李正最,等.基于氢氧同位素的洞庭湖枯水期蒸发研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(5):32-41.
Citation: CHEN Hongwei, ZHANG Xinyan, LI Zhengzui, et al. Study on evaporation of Dongting Lake during dry season based on hydrogen and oxygen isotopes [J].J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci),2024,21(5):32-41.

基于氢氧同位素的洞庭湖枯水期蒸发研究

谌宏伟[1,2],张馨妍[1],李正最[3],喻娓厚[3],于莎莎[3],周慧[3]
(1.长沙理工大学 水利与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114;3.湖南省水文水资源勘测中心,湖南 长沙 410005)

摘　要:【目的】通过探讨洞庭湖枯水期不同水体的蒸发特征,揭示湖区水文循环规律,为湖区水资源管理提供参考。**【方法】**采用氢氧同位素示踪方法比较枯水期湖区河流、湖泊和地下水氢氧同位素组成及蒸发特征,并利用水量平衡方程和同位素质量守恒方程初步估算了湖水蒸发量。**【结果】**河水中湘江氧同位素千分偏差值$\delta_{^{18}O}$和氢同位素千分偏差值δ_D平均值最大,松滋河的最小,沅江、资江和澧水的与湘江的差别不大;资水的氘过量参数d_{excess}平均值最大,松滋河的最小,其他河流的相差较小。河水、湖水、地下水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D变化范围分别为−10.66‰~−2.84‰和−76.27‰~−21.69‰、−6.59‰~−4.66‰和−40.65‰~−28.56‰、−8.33‰~−4.60‰和−57.12‰~−27.50‰。采用最小二乘法拟合的三类水体的蒸发线分别为$\delta_D=8.04\delta_{^{18}O}+10.17$,$\delta_D=5.02\delta_{^{18}O}-6.58$和$\delta_D=8.08\delta_{^{18}O}+11.32$。经比较认为,湖水蒸发作用最强烈,其次为河水蒸发作用和地下水蒸发作用,河水中蒸发作用强度由大到小依次为松滋河、城陵矶、沅江、湘江、澧水、资水。采用水量平衡法和同位素质量守恒法估算湖水枯水期蒸发量为0.173×10^8 m^3/d,占湖水水量损失的4.1%。**【结论】**枯水期洞庭湖区不同水体、不同河流氢氧同位素组成和蒸发差异是水汽条件、地形和水文特征的差异所致,由蒸发导致的湖水水量损失较小。

关键词:洞庭湖;同位素;蒸发;河水;湖水;地下水;枯水期
中图分类号:O562.6　　**文献标志码:**A

Study on evaporation of Dongting Lake during dry season based on hydrogen and oxygen isotopes

CHEN Hongwei[1,2], ZHANG Xinyan[1], LI Zhengzui[3], YU Weihou[3], YU Shasha[3], ZHOU Hui[3]
(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Hunan Hydrology and Water Resources Survey Center, Changsha 410005, China)

Abstract: [**Purposes**] By exploring the evaporation characteristics of different water bodies in Dongting Lake during the dry season, the hydrological cycle law of Dongting Lake was revealed, providing a reference for water resources management in Dongting Lake. [**Methods**] The hydrogen and oxygen isotope composition and evaporation characteristics of rivers, lakes, and underground

收稿日期:2024-03-22;**修回日期:** 2024-05-09;**接受日期:** 2024-05-09
基金项目:湖南省水利科技重大项目(XSKJ2019081-09)
通信作者:谌宏伟(1969—)(ORCID:0000-0001-8903-5389),男,副教授,主要从事水土污染防治与控制等方面的研究。E-mail:303424977@qq.com

water were compared by using the hydrogen and oxygen isotope tracer method, and the evaporation of the lake water was estimated by using water balance and isotope mass conservation equations. [**Findings**] The Xiangjiang River has the highest average values of oxygen isotope deviation value $\delta_{^{18}O}$ and hydrogen isotope deviation value δ_D, and the Songzi River has the lowest values. The Yuanjiang River, Zijiang River, and Lishui River have little difference from Xiangjiang River. The average deuterium excess parameter d_{excess} of Zishui River is the largest, and that of the Songzi River is the smallest. Other rivers have little difference in terms of value. The $\delta_{^{18}O}$ and δ_D range of river water, lake water, and underground water is [− 10.66‰, − 2.84‰] and [− 76.27‰, − 21.69‰], [− 6.59‰, − 4.66‰] and [− 40.65‰, − 28.56‰], [− 8.33‰, − 4.60‰] and [−57.12‰,−27.50‰]. The evaporation lines of the three types of water bodies fitted by the least square method are as follows: $\delta_D=8.04\delta_{^{18}O}+10.17$, $\delta_D=5.02\delta_{^{18}O}-6.58$ and $\delta_D=8.08\delta_{^{18}O}+11.32$, respectively. It is believed that the evaporation of lake water is the strongest, followed by river water and underground water, and the evaporation intensity of river water in descending order is Songzi River, Chenglingji, Yuanjiang River, Xiangjiang River, Lishui River, and Zishui River. Water balance and isotope mass conservation methods are used to estimate the evaporation of the lake during the dry season as 0.173 × 108 m^3/d, accounting for 4.1% of the water loss in the lake. [**Conclusions**] The difference of hydrogen and oxygen isotope composition and evaporation in different water bodies and rivers in Dongting Lake area during dry season is caused by the difference of water vapor conditions, topography and hydrological characteristics, and the water loss caused by evaporation is small.

Key words: Dongting Lake; isotope; evaporation; river water; lake water; underground water; dry season

Foundation item: Project (XSKJ2019081-09) supported by Hydraulic and Technology Major Program of Hunan Province

Corresponding author: CHEN Hongwei (1969—) (ORCID: 0000-0001-8903-5389), male, associate professor, research interest: groundwater exploitation and utilization, soil-water pollution prevention and control. E-mail: 303424977@qq.com

0 引言

洞庭湖是我国第二大淡水湖,汇聚了“四水”和长江“三口”来水,水资源丰富。丰富的水资源为湖区社会经济发展提供了重要保障[1]。然而,洞庭湖区水资源时空分布不均的问题突出,特别是水质型缺水和水量型缺水问题已经严重影响到了区域社会生产生活[2]。气候因素、三峡水库截流和人类活动是导致湖区缺水的重要因素[3],这些因素造成的影响在枯水期显得更为明显。

蒸发作为水文循环的重要环节,能调节气温、促进水资源更新,但也是水量损失的重要途径。因此,开展湖区蒸发相关问题研究对于湖区水资源调配意义重大,也能为湖区水文循环规律的研究提供重要参考。

作为湖南省重要产粮区和长江经济带的重要枢纽,洞庭湖区水文循环规律的研究一直是国内外研究的热点,蒸发是其中重要的研究问题,如利用40年的多光谱遥感数据分析洞庭湖区内湖面积变化及其驱动因素[4]、利用15年MOD16数据探讨洞庭湖流域地表蒸散发时空变化[5]、利用14个气象站50年的气象统计资料分析洞庭湖区蒸发量的变化特征[6]以及树木蒸腾作用[7]和流域雨滴蒸发研究等[8]。总体而言,对洞庭湖蒸发问题的研究多采用统计学方法,稍显不足。

随着同位素技术的不断进步,氧的稳定同位素^{18}O和氢的稳定同位素氘D作为水的天然示踪剂,被越来越多地用于蒸发研究。陶士勇等[9]结合瑞利分馏模型和氘盈余估算了湖水的年平均蒸

发损失量,验证了稳定同位素技术在初步估算湖泊蒸发量中的关键作用。CHEN等[10]利用同位素技术计算出了南水北调工程的蒸发损失为1.66%~3.73%左右。AL-OQAILI等[11]利用稳定同位素方法,比较了不同灌溉条件的土壤灌溉水蒸发损失。相较于对仪器精度要求较高和监测点固定的直接观测、需要输入辐射收支和能量平衡的蒸发模型和精度不高的间接计算等方法而言[12-13],氢氧同位素技术物理意义明确、参数要求较少、准确度较高,已广泛应用于各类水体的蒸发研究。

发达的水系与东、西、南部山地环绕的地形特征使得洞庭湖平原区水文循环复杂,不同区域和水体的蒸发作用差异明显。拟采用氢氧同位素方法对比分析枯水期湖区不同水体的蒸发特征、估算湖水蒸发量,以期为湖区水文循环规律的认识和水资源管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洞庭湖位于湖南省东北部,是长江中游的荆江段与干流联通的唯一通道。受自然因素及人为因素的影响,湖泊面积不断缩小,逐渐被分割为了东、南、西三部分。洞庭湖也是亚洲最大的内陆湿地保护区,其东洞庭湖湿地属于国家级湿地自然保护区,在国际上具有重要地位。湖体近似“U”型,是过水洪道型的内陆湖泊,也是典型的吞吐调蓄型湖泊,对长江中下游具有十分重要的调蓄作用[14]。从地理位置上看,洞庭湖南部和西部分别有湘江、资水、沅江和澧水四水汇入,北部通过松滋口、太平口和藕池口“三口”与长江相连,最后从城陵矶汇入长江[15]。

洞庭湖位于亚热带季风气候区,多年平均降水量约为1 400 mm。降雨时空分布不均,季节性洪涝和干旱频发。枯水期降水约占全年的3.4%~11.7%。多年平均蒸发量1 400 mm,枯水期蒸发量约为40~50 mm/月。多年平均气温约为17.0 ℃,其中枯水期约为6~9 ℃。湖区冬季以干冷的偏北风为主。

1.2 样品采集、测试与数据收集

基于空间均匀、全水体覆盖的原则,在洞庭湖湖盆及周边区域、湘江、资水、沅江、澧水、松滋河入湖段、湖泊出口段等区域按一定间隔布置采样点,采集河水、湖水和地下水样品,采样点分布见图1。取样时间为2022年1月,共采集河水样品91组,湖水样品8组,地下水样品34组。

取样点分布图的底图采用数字高程数据绘制,数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)洞庭湖区90 m分辨率的DEM数据。

进行河水和湖水样品取样时,先用待取水样的水润洗采样瓶三遍,在水面以下约20 cm深度采集水样,并保证取样瓶中没有气泡及其他杂物。采集地下水水样时,先抽水至少五分钟,将水井中停滞的地下水排净后再取样,取样位置在地下水面以下约20 cm。采集的样品均置于50 ml聚乙烯塑料瓶中,采用Parafilm塑封膜进行密封保存,并尽快送实验室检测。

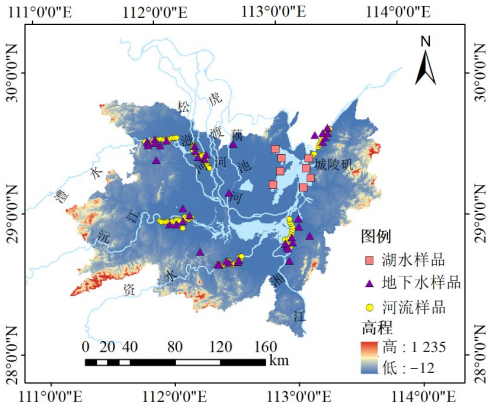

图1 洞庭湖平原区采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sample points in plain area of Dongting Lake

样品送至河北地质大学实验室,经0.45 μm滤膜过滤后使用同位素水质分析仪(Picarro L2140-i,美国)进行室内检测,$\delta_{^{18}O}$的确保精度为0.025‰,典型精度为0.011‰;δ_D的确保精度为0.100‰,典型精度为0.038‰。氢氧同位素组成采用国际原子能机构发布的维也纳标准平均海洋水作为标准。千分偏差值的定义为

$$\delta(‰) = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{sandard}}}{R_{\text{sandard}}} \times 1\,000 \qquad (1)$$

式中:δ为千分偏差值,即测试样品的同位素比值相对于标准样品的同位素比值;R为$^{18}O/^{16}O$或$^{2}H/^{1}H$的同位素比值;R_{sample}为样品的同位素比值,R_{standard}为标样的同位素比值。

气象数据采用岳阳、常德、益阳、桃江、沅江、石门、澧县等气象站点的逐日降水和蒸发数据。水文数据选用四水三口上的控制站的实测流量资料，包括松滋河沙道观站和新江口站、虎渡河弥陀寺站、藕池河的康家岗站和管家铺站、湘江湘潭站和郴梨站、资水桃江站、沅江桃源站、澧水石门站、汨罗江伍市站等逐日流量资料。

1.3　氢氧同位素分析方法

结合全球大气雨水线和当地大气降水线分析不同水体的同位素组成特征，再采用氘盈余分析方法反映水体的蒸发程度。最终，通过水量平衡方程和同位素质量守恒方程对湖泊蒸发进行定量分析，估算其枯水期的蒸发量，技术路线如图2所示。

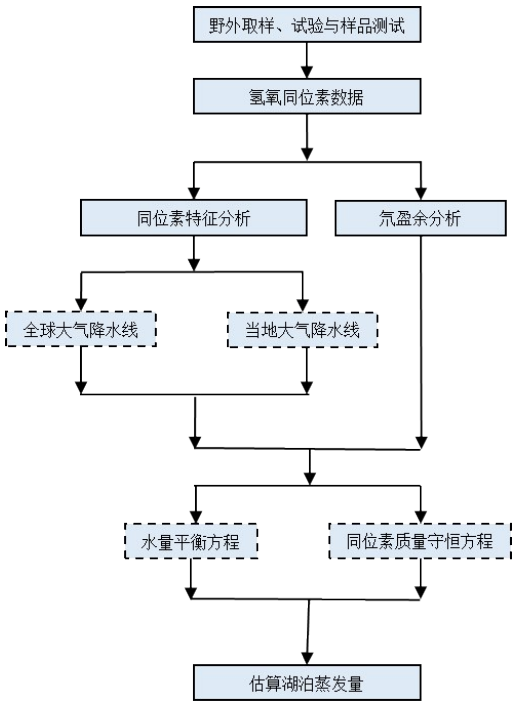

图2　技术路线图

Fig. 2　Technology roadmap

1.3.1　全球大气降水线(global meteoic water line, GMWL)

同位素研究常常在大气降水、地表水和土壤水中使用氢氧稳定同位素的线性回归关系，通过最小二乘法对氢氧稳定同位素的组成关系进行分析，对氢同位素千分偏差值δ_D和氧同位素千分偏差值$\delta_{^{18}O}$进行线性关系的拟合。国际原子能机构与世界气象组织合作研究全球降水同位素及水循环特征，建立了不同国家不同地区的全球大气降水同位素网络，为后续研究提供了数据基础。CRAIG[16]在1961年通过线性回归的数学理论发现了全球大气降水线(GMWL)，如式(2)所示：

$$\delta_D = 8\delta_{^{18}O} + 10 \tag{2}$$

式中：δ_D为氢同位素千分偏差值；$\delta_{^{18}O}$为氧同位素千分偏差值。

大气降水线的斜率和截距反映了水汽来源的气候环境特点，通过比较大气降水线与降水同位素特征，可以判断水汽来源所受干扰以及局部地区的地理条件对同位素组成的影响。

1.3.2　当地大气降水线(local meteoic water line, LMWL)

根据全球大气降水同位素网络所提供的200多个气象站降水同位素数据，选择长沙站作为洞庭湖研究区域最近的代表气象站，其数据对于整个洞庭湖区域的降水研究具有重要的参考价值。黄一民等[17]以湖南长沙地区为研究对象所确定的大气降水线为

$$\delta_D = 8.57\delta_{^{18}O} + 18.55 \tag{3}$$

本文以这一公式作为研究区域的当地大气降水线。

1.3.3　氘盈余(d_{excess})

氘盈余(氘过量参数)的概念在1964年被提出，其值表示为斜率为8时某地区的大气降水线的截距，公式为

$$d_{excess} = \delta_D - 8\delta_{^{18}O} \tag{4}$$

式中：d_{excess}为氘过量参数。

氘盈余可以直观反映某地区的蒸发作用强度，当蒸发强烈时，同位素产生分馏，d_{excess}值下降，反之升高[18]。

1.3.4　水量平衡方程和同位素质量守恒方程

结合水量平衡方程和同位素质量守恒方程估算洞庭湖湖泊蒸发量，水量平衡方程中的部分已知变量取值来自于各水文气象站的资料推算结果。水量平衡方程可表示为

$$E = I + G + P - Q - \Delta V \tag{5}$$

式中：E为蒸发量；I为河流入湖量；G为地下水入湖量；P为降水量；Q为出湖量；ΔV为湖容变化量。

氢氧同位素质量守恒方程可表示为

$$\delta_e E = \delta_i I + \delta_g G + \delta_p P - \delta_q Q - \delta_l \Delta V \tag{6}$$

式中：δ_e、δ_i、δ_g、δ_p、δ_q、δ_l依次为蒸发量、入湖量、地下水入湖量、降水量、出湖量、湖容变化量的氢氧同

位素千分偏差值。

湖水蒸发过程中,蒸发水汽中氢氧同位素分馏作用受大气温度、相对湿度、大气氢氧同位素含量等因素的共同影响,无法直接测量数值,因此,引入Crage-Gordon方程确定相关参数计算蒸发水同位素组成,方程表示为[16]

$$\delta_e = \frac{\beta\delta_l - h\delta_a - 10^{-3}\varepsilon}{1 - h + 10^{-3}\Delta\varepsilon} \tag{7}$$

式中:h为相对湿度;δ_a为当地空气中同位素千分偏差值;ε为总分馏系数;β为温度和当地大气蒸发水同位素含量的函数。

相关参数计算公式如下:

$$\beta = e^{(-1.137T^{-2} \times 10^3 + 0.415\ 6T^{-1} + 2.066\ 7 \times 10^{-3})} \tag{8}$$

$$\delta_a = -0.014T_a^{\ 2} + 0.67T_a - 23.4 \tag{9}$$

$$\varepsilon = 1\ 000 \times (1 - \beta) + \Delta\varepsilon \tag{10}$$

$$\Delta\varepsilon = 14.3 \times (1 - h) \tag{11}$$

式中:$\Delta\varepsilon$为动力学分馏系数;T为湖水的温度;T_a为湖水表面的空气温度。

2 结果

2.1 河水氢氧同位素组成及蒸发特征

各河流河水样品的氢氧同位素组成见表1。$\delta_{^{18}O}$平均值由大到小依次为湘江、沅江、资水、澧水、城陵矶和松滋河,其值分别为-5.55‰、-5.89‰、-6.04‰、-6.64‰、-6.68‰和-9.37‰;δ_D平均值由大到小依次为湘江、资水、沅江、澧水、城陵矶和松滋河,其值分别为-34.30‰、-36.63‰、-37.43‰、-42.20‰、-44.00‰和-67.13‰。六大河流河水的d_{excess}平均值由大到小依次为资水、澧水、湘江、沅水、城陵矶和松滋河,分别为11.71‰、10.93‰、10.08‰、9.70‰、9.47‰和7.84‰。

从氢氧同位素比值看,湘江水更富集^{18}O和D,暗示其蒸发作用更强烈,松滋河^{18}O和D明显偏贫,暗示其蒸发作用最弱。其他河流^{18}O和D与湘江比较差距相对较小,但总体差别不大,显示相对湘江较弱的蒸发强度。然而,d_{excess}则显示松滋河的蒸发强于湘江的。从湘江^{18}O和D沿程变化看,其上游取样点的$\delta_{^{18}O}$和δ_D分别为-5.43‰和-32.93‰,高于下游的-5.69‰和-35.30‰,推测湘江^{18}O和D富集应为上游来水的^{18}O和D含量较高所致。而松滋河上游来水^{18}O和D总体较贫,这是其相对其他河流^{18}O和D更贫的主要原因。

表1 不同河水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D组成特征

Table1 $\delta_{^{18}O}$ and δ_D composition features of different rivers ‰

河流名称	特征值	$\delta_{^{18}O}$	δ_D	d_{excess}
湘江	最大值	-5.32	-32.78	10.95
	最小值	-5.85	-36.70	8.49
	平均值	-5.55	-34.30	10.08
资水	最大值	-5.63	-33.60	12.65
	最小值	-6.33	-39.44	10.63
	平均值	-6.04	-36.63	11.71
沅江	最大值	-2.84	-21.69	11.80
	最小值	-6.46	-41.39	0.99
	平均值	-5.89	-37.43	9.70
澧水	最大值	-6.53	-41.29	11.82
	最小值	-6.81	-44.21	9.57
	平均值	-6.64	-42.20	10.93
松滋河	最大值	-4.63	-35.03	9.87
	最小值	-10.66	-76.27	2.05
	平均值	-9.37	-67.13	7.84
城陵矶	最大值	-5.71	-36.62	10.06
	最小值	-7.64	-51.16	8.26
	平均值	-6.68	-44.00	9.47

进一步分析各河流的$\delta_{^{18}O}$和δ_D的关系,并与大气降水线进行比较,如图3所示。结果显示,各河流河水的点位均大致呈带状分布GMWL两侧附近,但位于LMWL右下方,显示枯水期河水有大气降水的补给,但蒸发作用影响相对较强。综合同位素比值、d_{excess}分析结果,认为河水所受蒸发作用强度由大到小依次为松滋河、城陵矶、沅江、湘江、澧水、资水。

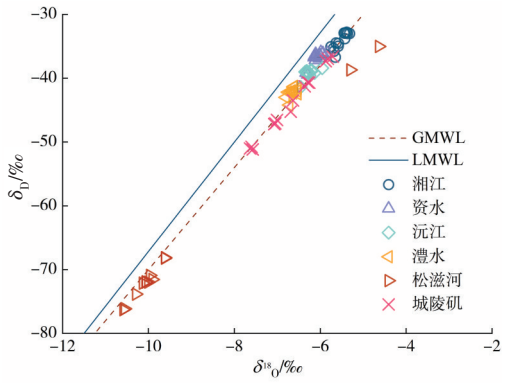

图3 河水的$\delta_{^{18}O}$-δ_D关系

Fig. 3 Relationship between $\delta_{^{18}O}$ and δ_D in different rivers

2.2　地下水氢氧同位素组成及蒸发特征

从地下水的同位素组成来看（表2），$\delta_{^{18}O}$平均值由大到小依次为资水、湘江、沅江、澧水、城陵矶和松滋河，其平均值分别为-5.12‰、-5.82‰、-5.99‰、-6.03‰、-6.40‰和-7.33‰，δ_D的平均值由大到小依次为资水、沅水、湘江、澧水、城陵矶和松滋河，其值分别为-30.04‰、-35.51‰、-36.13‰、-37.29‰、-39.94‰和-49.27‰。d_{excess}平均值由大到小依次为沅江、城陵矶、澧水、资水、湘江和松滋河，平均值分别为12.38‰、11.25‰、10.98‰、10.40‰、9.89‰和9.37‰。资水地下水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D平均值最大，松滋河的最小，沅江地下水的d_{excess}平均值最大，松滋河的最小。其他河流地下水$\delta_{^{18}O}$、δ_D和d_{excess}总体相差不大。

表2　不同河流地下水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D组成特征

Table2　$\delta_{^{18}O}$ and δ_D composition features of groundwater in different rivers　‰

河流名称	特征值	$\delta_{^{18}O}$	δ_D	d_{excess}
湘江	最大值	-4.74	-32.95	10.52
	最小值	-6.36	-39.74	9.30
	平均值	-5.82	-36.13	9.89
资水	最大值	-4.60	-27.50	12.87
	最小值	-5.73	-32.85	5.00
	平均值	-5.12	-30.04	10.40
沅江	最大值	-5.32	-29.42	13.74
	最小值	-6.33	-40.32	10.36
	平均值	-5.99	-35.51	12.38
澧水	最大值	-5.62	-34.17	12.42
	最小值	-6.84	-43.15	9.22
	平均值	-6.03	-37.29	10.98
松滋河	最大值	-7.00	-46.88	10.32
	最小值	-7.90	-54.39	8.82
	平均值	-7.33	-49.27	9.37
城陵矶	最大值	-5.62	-34.12	12.66
	最小值	-8.33	-57.12	9.12
	平均值	-6.40	-39.94	11.25

枯水期地下水$\delta_{^{18}O}$和δ_D关系及与大气降水线比较如图4所示。各河流区域地下水$\delta_{^{18}O}$和δ_D分布特点与河水相近，均位于GMWL两侧附近、LMWL线的右下方，但相对河水而言，更靠近LMWL线，显示地下水主要受到大气降水的补给，蒸发作用影响相对较弱。综合同位素比值和d_{excess}结果，认为地下水蒸发作用强度由大到小依次为松滋河、湘江、资水、澧水、城陵矶、沅江。

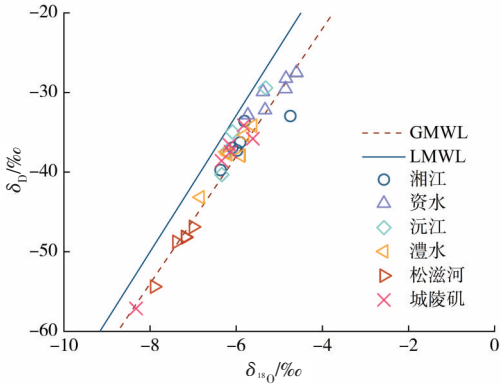

图4　地下水的$\delta_{^{18}O}$-δ_D关系

Fig. 4　Relationship between $\delta_{^{18}O}$ and δ_D in underground water

2.3　湖水氢氧同位素组成及蒸发特征

由湖水的氢氧同位素组成显示（表3），湖水$\delta_{^{18}O}$变化范围为-6.59%~-4.66%，平均值为-5.39%，δ_D变化范围为-40.65%~-28.56%，平均值为-33.64%，d_{excess}的平均值为9.47%。

表3　湖水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D组成特征

Table3　$\delta_{^{18}O}$ and δ_D composition features of lake water　‰

特征值	$\delta_{^{18}O}$	δ_D	d_{excess}
最大值	-4.66	-28.56	15.33
最小值	-6.59	-40.65	6.58
平均值	-5.39	-33.64	9.47

绘制湖水$\delta_{^{18}O}$和δ_D关系图，并与大气降水线比较（图5）。各点基本位于GMWL线右侧附近，并远离LMWL线，显示较弱的大气降水补给和较强的蒸发影响。

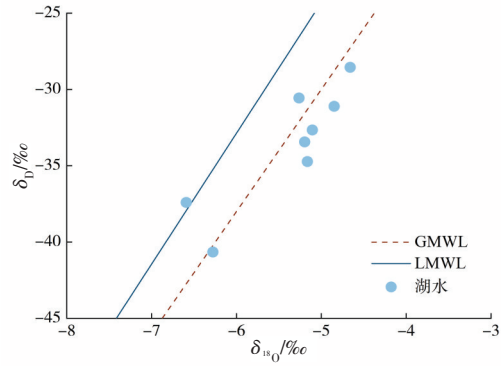

图5　湖水的$\delta_{^{18}O}$-δ_D关系

Fig. 5　Relationship between $\delta_{^{18}O}$ and δ_D in lake water

2.4　不同水体氢氧同位素组成及蒸发比较

表4显示，河水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D变化范围分别为

−10.66‰~−2.84‰和−76.27‰~−21.69‰,平均值分别为−6.75‰和−44.05‰;湖水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D的变化范围分别为−6.59‰~−4.66‰和−40.65‰~−28.56‰,平均值分别为−5.39‰和−33.64‰。地下水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D变化范围分别为−8.33‰~−4.60‰和−57.12‰~−27.50‰,平均值分别为−6.08‰和−37.83‰。比较看,湖水的$\delta_{^{18}O}$和δ_D平均值最大,地下水的次之,河水的最小。暗示湖水蒸发最强烈,河水蒸发作用相对较弱。然而,地下水的d_{excess}平均值最大(10.85‰),高于河水和湖水d_{excess}平均值(分别为9.91‰和9.47‰)。综合同位素比值和d_{excess}结果,地下水的蒸发作用最弱,其次是河水的蒸发作用,湖水的蒸发作用最强[19]。

表4 洞庭湖区$\delta_{^{18}O}$和δ_D组成特征

Table4 $\delta_{^{18}O}$ and δ_D composition features of Dongting Lake ‰

名称	特征值	$\delta_{^{18}O}$	δ_D	d_{excess}
河水	最大值	−2.84	−21.69	12.65
	最小值	−10.66	−76.27	0.99
	平均值	−6.74	−44.04	9.91
湖水	最大值	−4.66	−28.56	15.33
	最小值	−6.59	−40.65	6.58
	平均值	−5.39	−33.64	9.47
地下水	最大值	−4.60	−27.50	13.74
	最小值	−8.33	−57.12	5.00
	平均值	−6.08	−37.83	10.85

采用最小二乘法拟合水样的δ_D和$\delta_{^{18}O}$值(图6),获得研究区河水、湖水和地下水蒸发线分别为$\delta_D = 8.04\delta_{^{18}O} + 10.17$、$\delta_D = 5.02\delta_{^{18}O} - 6.58$ 和 $\delta_D = 8.08\delta_{^{18}O} + 11.32$。

河水和地下水的蒸发线斜率分别为8.04和8.08,与GMWL的(8)接近,略小于LMWL的(8.57)。两者的截距分别为10.17和11.32,略大于GMWL的(10),小于LMWL的(18.55)。说明河水和地下水均接受大气降水的补给,并经历了相近程度的蒸发作用,湖水的蒸发线斜率和截距分别为5.02和−6.58,远小于GMWL和LMWL的,显示湖水经历的蒸发较强烈,降雨补给相对较弱。综合同位素组成和蒸发线结果,认为蒸发强度由大到小依次为湖水、河水、地下水。

另外,大部分湖水和地下水点位及部分河水点位较集中且重叠度较高,可能暗示三者之间存在水量交换。

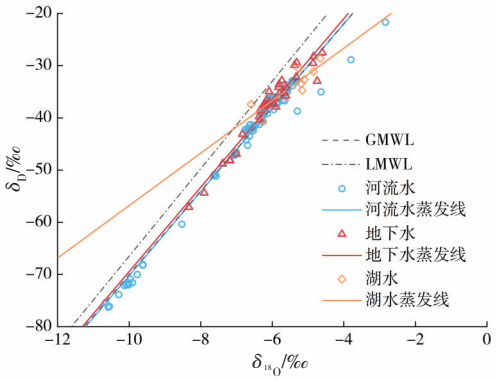

图6 洞庭湖区$\delta_{^{18}O}$-δ_D关系

Fig. 6 Relationship between $\delta_{^{18}O}$ and δ_D in Dongting Lake

2.5 蒸发量估算

由于调查期间无降水,未采集降水样品,计算中忽略降水项。根据收集到的水文气象资料,空气平均温度为6.4 ℃,湖容月变化量为−69.24~88.71亿m^3,流入湖泊的河水量为0.230×10^8~1.760×10^8 m^3/d,城陵矶流出流量为4.050×10^8 m^3/d,1月相对湿度取2013~2018年多年枯水期的平均值74%。

对湖泊、入湖河水、出湖河水和地下水水样氢氧同位素值取平均值,根据同位素质量守恒方程计算出蒸发水$\delta_{^{18}O}$为−20.54‰,估算枯水期湖水蒸发量为0.173×10^8 m^3/d。另外,根据水文资料统计计算的枯水期湖水蒸发量为0.170×10^8 m^3/d,两者相对误差仅为1.76%。

将估算结果与水量平衡方程中各项水量进行比较(图7),湖容变化量占比最大为56.7%,其次为出湖量为28.1%,蒸发在各项中水量占比仅为1.2%。

对比蒸发量和出湖水量这两项水量损失发现,蒸发量占比约4.1%。调查期间湖区温度低、湖面缩小,水流缓慢等可能是湖面蒸发较小的主要原因。

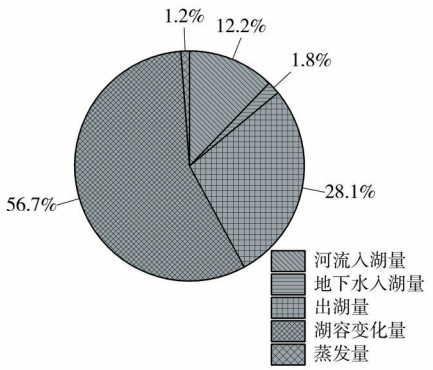

图7 水量平衡方程各项所占比例

Fig. 7 Proportion of items in water balance equation

3 讨论

从不同河流的氢氧同位素组成来看，松滋河作为长江的支流之一，得到来自上游长江的补给，长江干流上游段的氢氧同位素组成整体偏负，$\delta_{^{18}O}$变化范围为-11.40‰~-8.29‰，δ_D变化范围为-80.65‰~-57.25‰，d_{excess}为(10.3±1.5)‰[20]，松滋河水体中氢氧同位素组成与长江干流相比略有增大，符合河流同位素组成沿程逐渐升高的规律。湘江、资水、沅江和澧水的源头大多来自广西、贵州和湖南等内陆山区，在高程效应和沿途蒸发等作用的影响下，河水氢氧同位素组成呈现增大的趋势。湖区河水氢氧同位素组成偏富集应是上游来水较富集和本地蒸发等共同作用的结果[21]。城陵矶位于洞庭湖出口，其氢氧同位素比值介于湘、资、沅、澧和松滋河的之间，是上游各河流来水的混合与本地蒸发的综合效应。

松滋河和城陵矶分别位于洞庭湖北部和东部，更靠近长江，大气相对干燥。湘、资、沅、澧位于洞庭湖盆地西部和南部，受武陵山和雪峰山的阻隔，大气湿度相对较高。这可能是导致松滋河和城陵矶河水蒸发作用较强而湘、资、沅、澧河水相对较弱的主要原因。同时，河水流速和河面面积也是影响蒸发强度的重要原因。

不同区域地下水蒸发强度的差异主要与地下水的埋藏深度和包气带岩性有关。由于地下水取样点多位于河流两侧附近，地下水埋深多在5~10 m，最大可达15 m，即使在同一河流区域，其蒸发强度也存在明显差异。但总体而言，松滋河、湘江所在区域地下水埋深较浅、沅江和澧水埋深较大。另外，各河流所在区域地表基本以黏土为主，地表以下至10 m深度多为砂和砂砾[22]。因此，各地地下水蒸发强度的差异主要取决于地下水埋藏深度，从而表现为蒸发强度由大到小依次为松滋河、湘江、资水、澧水、城陵矶、沅江。

湖水蒸发作用最强烈，与其枯水期水流缓慢、湖面宽阔，从而受太阳辐射的影响相对更大有关。湖水得到上游河流来水的补给及本地较强的蒸发的共同影响，其同位素相对更富集。河水蒸发强度相对较弱，应归因于河水流速较快和河面面积较小。地下水较弱的蒸发则因其埋藏深度和包气带岩性。此外，枯水期地下水总体向河水和湖水的排泄，也是水体同位素组成的影响因素之一。

4 结论

河水中湘江氢氧同位素含量最高，地下水中资水区域氢氧同位素含量最高，松滋河在两类水体中氢氧同位素含量最低。河水中湘江氢氧同位素最富集，松滋河氢氧同位素最贫乏，蒸发作用强度由大到小依次为松滋河、城陵矶、沅江、湘江、澧水、资水。采用最小二乘法拟合的河水、湖水和地下水的蒸发线方程分别为$\delta_D=8.04\delta_{^{18}O}+10.17$、$\delta_D=5.02\delta_{^{18}O}-6.58$和$\delta_D=8.08\delta_{^{18}O}+11.32$。不同水体蒸发线斜率由大到小依次为地下水、河水、湖水，河水与地下水的斜率近似。氢氧同位素在湖水中更富集，湖泊蒸发损失大于河水和地下水。

结合水量平衡方程和同位素质量守恒法估算的湖区枯水期湖水蒸发量为0.173×10^8 m^3/d，占其损失水量的4.1%，结果相对误差为1.76%。从水量平衡关系来看，蒸发损失量对湖泊影响仅占总水量的1.2%，水量损失更多来自湖泊排出量。

洞庭湖区地形平缓，丘岗遍布，西、南和东面分别受武陵山、雪峰山和幕-连-九山脉的阻隔，冬季偏北风从其北部和东部灌入，在东、南部受阻，从而使得不同区域的水汽条件、温度和降水呈现明显的差异。在气象、地形和水文特征的综合作用下，使得枯水期洞庭湖各类水体的蒸发作用复杂化和差异化。

[参考文献]

[1] 谭志强，李云良，张奇，等.湖泊湿地水文过程研究进展[J].湖泊科学，2022，34(1)：18-37.DOI：10.18307/2022.0104.
TAN Zhiqiang, LI Yunliang, ZHANG Qi, et al. Progress of hydrological process researches in lake wetland: a revew[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 18-37. DOI:10.18307/2022.0104.

[2] GENG M M, WANG K L, YANG N, et al. Is water quality better in wet years or dry years in river-connected lakes? A case study from Dongting Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2021, 290: 118115. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118115.

[3] 黄草，周楚琪，杨忆昕，等.洞庭湖北部枯水位变化及

其对闸泵供水影响分析[J/OL].长沙理工大学学报(自然科学版),1-13(2024-01-15)[2024-03-22]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1444. N. 20240112. 0955.002.html.
HUANG Cao ,ZHOU Chuqi, YANG Yixin, et al. The variation of water levels in the dry season and its influence on water supply of the gate-pump system in the northern part of the dongting lake[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science) ,1-13(2024-01-15)[2024-03-22].http://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1444. N. 20240112.0955.002. html.

[4] 高耶,谢永宏,邹冬生,等.近40年洞庭湖区内湖水面面积变化及其驱动因素[J].湖泊科学,2019,31(3):755-765. DOI:10.18307/2019.0314.
GAO Ye, XIE Yonghong, ZOU Dongsheng, et al. Changes and driving factors of water surface area for inner lakes in Lake Dongting district in the past 40 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(3): 755-765. DOI: 10.18307/2019.0314.

[5] 张猛,曾永年,齐玥.基于MOD16的洞庭湖流域2000—2014年地表蒸散时空变化分析[J].农业工程学报,2018,34(20):160-168. DOI:10.11975/j. issn.1002-6819.2018.20.020.
ZHANG Meng, ZENG Yongnian, QI Yue. Analyzing spatio-temporal variations of evapotranspiration in Dongting Lake Basin during 2000—2014 based on MOD16[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 160-168. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.20.020.

[6] 黄云仙,郑颖.洞庭湖气象变化特征分析[J].湖南水利水电,2012(6):61-62,75. DOI:10.3969/j. issn.1009-4229.2012.06.020.
HUANG Yunxian, ZHENG Ying. Analysis of meteorological change characteristics in Dongting Lake [J]. Hunan Hydro & Power, 2012(6): 61-62, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4229.2012.06.020.

[7] 刘娜,关华德,罗紫东,等.环境因子对洞庭湖流域三种树木蒸腾的影响[J].生态学杂志,2016,35(6):1460-1466. DOI:10.13292/j. 1000-4890. 201606.019.
LIU Na, GUAN Huade, LUO Zidong, et al. Effects of environmental factors on transpiration of three tree species in the Dongting Lake Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(6): 1460-1466. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201606.019.

[8] 黄一民,宋献方,何清华,等.洞庭湖流域下落雨滴蒸发研究[J].地理科学,2018,38(08):1364-1369.DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2018.08.019.
HUANG Yimin, SONG Xianfang, HE Qinghua, et al. Study of sub-cloud evaporation in the Dongting Lake basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(8): 1364-1369. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2018.08.019.

[9] 陶士勇,张翔,夏军强,等.鄱阳湖湿地碟形湖-河流水稳定同位素变化特征及其指示意义[J].湖泊科学,2024,36(2):487-498. DOI:10.18307/2024. 0226.
TAO Shiyong, ZHANG Xiang, XIA Junqiang, et al. Variations of stable isotopic characteristics of shallow lake-river water system and its in-dicative significance in Lake Poyang wetland, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(2): 487-498. DOI: 10.18307/2024.0226.

[10] CHEN Y L, TIAN L D. Canal surface evaporation along the China's South-to-North Water Diversion quantified by water isotopes [J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146388. DOI: 10.1016/j. scitotenv.2021.146388.

[11] AL-OQAILI F, GOOD S P, PETERS R T, et al. Using stable water isotopes to assess the influence of irrigation structural configurations on evaporation losses in semiarid agricultural systems [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 291: 108083. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108083.

[12] XIAO W, LIU S D, LI H C, et al. A flux-gradient system for simultaneous measurement of the CH_4, CO_2, and H_2O fluxes at a lake-air interface [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(24): 14490-14498. DOI: 10.1021/es5033713.

[13] 史俊才,刘萍.基于ATCN模型的蒸发量预测[J].水电能源科学,2022,40(9):14-17,193. DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20212462.
SHI Juncai, LIU Ping. Evaporation prediction based on ATCN model[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(9): 14-17, 193. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709. 2022.20212462.

[14] 李莹杰,王丽婧,李虹,等.不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素[J].环境科学,2019,40(5):2170-2177. DOI:10.13227/j.hjkx.201809137.
LI Yingjie, WANG Lijing, LI Hong, et al. Distribution characteristics and influencing factors of phosphorus in the Dongting Lake at different water periods [J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2170-2177. DOI: 10.13227/j.hjkx.201809137.

[15] 马飞扬,樊团团,孙小平,等.洞庭湖不同湖区水体DOM的荧光特征及来源[J].生态环境学报,2021,30(12):2370-2379. DOI:10.16258/j. cnki. 1674-5906.2021.12.012.
MA Feiyang, FAN Tuantuan, SUN Xiaoping, et al. DOM fluorescence characteristics and sources in different regions of Dongting Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(12): 2370-2379.

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.12.012.

[16] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133 (3465): 1702-1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702.

[17] 黄一民,章新平,孙葭.长沙大气水线及与局地气象要素的关系[J].长江流域资源与环境,2014,23(10):1412-1417. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201410011.
HUANG Yimin, ZHANG Xinping, SUN Jia. Meteoric water line and relationship with local meteorological factors in Changsha[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(10): 1412-1417. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201410011.

[18] 赵祥宇,陈菁,王收,等.氢氧同位素组成对丰沛平原区水循环的指示意义[J].地球与环境,2024,52(1):86-95. DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2023.051.064.
ZHAO Xiangyu, CHEN Jing, WANG Shou, et al. Indicative significance of hydrogen and oxygen isotopic composition of water bodies in the Fengpei Plain to water cycle and evaporation [J]. Earth and Environment, 2024, 52(1): 86-95. DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2023.051.064.

[19] LU Xuancheng, WEN Jun, TIAN Hui, et al. Analysis of the turbulent fluxes of water & heat exchange between the Zoige alpine wetland and atmosohere[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 719-728. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00073.

[20] 程瑶,蒋蓉,王雨春,等.三峡库区典型支流氢氧同位素时空分布特征研究[J].人民长江,2018,49(20):13-18. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.20.003.
CHENG Yao, JIANG Rong, WANG Yuchun, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of hydrogen and oxygen isotope in typical tributary estuary of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River, 2018, 49(20): 13-18. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.20.003.

[21] 谢姝,孟玉川,刘国东,等.大渡河丰水期水体氢氧同位素特征及其影响因素[J].人民长江,2022,53(3):55-60. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.03.008.
XIE Shu, MENG Yuchuan, LIU Guodong, et al. Variations of hydrogen and oxygen isotopes in waterbody of Dadu River during flood period and their influencing factors[J]. Yangtze River, 2022, 53(3): 55-60. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.03.008.

[22] 赵膂.洞庭湖盆地三维地质建模及含水层储水潜力分析[D].长沙:长沙理工大学,2022.DOI:10.26985/d.cnki.gcsjc.2022.000104.
ZHAO Lyu. 3D geological modeling of Dongting Lake basin and analysis of water storage potential of aquifers [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2022.000104.

(责任编辑:毛娜;校对:赵冰)