



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405381

引用格式:陈蒙蒙,林晶晶,黄小龙,等. 洪湖与地下水交互的水量贡献及其时间变异特征[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(12): 5258-5265.

Chen Mengmeng, Lin Jingjing, Huang Xiaolong, et al. Water contribution and its temporal variability characteristics of the interaction between Honghu Lake and groundwater[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 5258-5265.

洪湖与地下水交互的水量贡献及其时间变异特征

陈蒙蒙^{1,2}, 林晶晶^{2*}, 黄小龙², 杨泽森³, 牛宏¹, 谭旺奇¹,
张朦², 刘昔², 谢婷婷²

(1. 中南民族大学资源与环境学院, 武汉 430074; 2. 生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430010;
3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430079)

摘要 为探讨闸控型湖泊水量平衡中湖水与地下水相互作用的贡献及其时间变异性,以长江中游洪湖为例,基于洪湖和地下水水位动态变化分析、水量平衡模型计算,识别并计算洪湖与地下水之间的补排关系和交换量,揭示了洪湖与地下水交互在湖泊水量平衡中的贡献及其时间变异特征。结果表明:洪湖与地下水具有明显水位差,两者动态变化显著正相关,相关系数 r 为0.729,且洪湖区域潜水含水层具有透水性,表明洪湖与地下水之间具备交互条件;2017—2022年年际尺度上,总体表现为洪湖向地下水排泄,多年平均排泄量为 $6.43 \times 10^8 \text{ m}^3$,占洪湖出湖水量的14.11%;2017—2022年多年平均月尺度上,枯水期(9月—次年2月)洪湖向地下水排泄,平均月排泄量为 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,丰水期(4—8月)洪湖与地下水交互处于动态变化状态,月交互量范围为 $-1.17 \times 10^8 \sim 0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。洪湖与已报道的鄱阳湖、洞庭湖等通江湖泊呈现出相反的湖水-地下水交互季节性变化特征,主要是由于洪湖水位受水利调度影响改变了湖泊-地下水自然交互过程。研究结果为湖泊和地下水相互作用研究补充了新认识,对洪湖水资源和水生态环境保护管理具有重要指导意义。

关键词 洪湖; 水量平衡; 湖泊与地下水相互作用; 水量交互

中图分类号 X524; 文献标志码 A

Water Contribution and Its Temporal Variability Characteristics of the Interaction between Honghu Lake and Groundwater

CHEN Meng-meng^{1,2}, LIN Jing-jing^{2*}, HUANG Xiao-long², YANG Ze-sen³, NIU Hong¹,
TAN Wang-qi¹, ZHANG Meng², LIU Xi², XIE Ting-ting²

(1. College of Resources and Environmental Science, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China;

2. Changjiang Basin Ecology and Environment Monitoring and Scientific Research Center, Changjiang Basin Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan 430010, China;

3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430079, China)

[Abstract] To investigate the contribution and temporal variability of lake-groundwater interactions in the water balance of flood-controlled lakes, Honghu Lake in the middle reaches of the Yangtze River was selected as a case study. Based on the analysis of water level dynamics of Honghu Lake and surrounding groundwater, the recharge-discharge relationship between Honghu Lake and groundwater were identified and calculated by a water balance equation. The contribution of groundwater-lake interactions to the water balance of Honghu Lake and its temporal variability were examined. The results indicate that there is a significant water level difference between Honghu Lake and the adjacent phreatic groundwater, with dynamic changes in both showing a significant positive correlation, correlation coefficient $r = 0.729$. The aquifer in the Honghu Lake area is permeable, which indicates that there are interaction conditions between Honghu Lake and groundwater. On an inter-annual scale from 2017 to 2022, Honghu Lake generally infiltrate into the groundwater, with an average annual discharge volume of $6.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 14.11% of the lake's outflow. On a multi-year average monthly scale from 2017 to 2022, Honghu Lake infiltrates into the groundwater during the dry season (September to February of the following year), with an average monthly discharge volume of $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$. During the rainy season (April to August), groundwater-lake interactions are dynamic, with an average monthly exchange volume of $-1.17 \times 10^8 \sim 0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$. Honghu Lake presents an opposite seasonal variation characteristic of the lake water-groundwater interaction compared with the reported

收稿日期: 2024-07-17; 修订日期: 2025-02-14

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金(U2240213)

第一作者: 陈蒙蒙(1999—),女,汉族,湖北黄冈人,硕士研究生。研究方向:地表水与地下水相互作用。E-mail:2714747558@qq.com。

*通信作者: 林晶晶(1990—),女,汉族,湖北枝江人,博士,工程师。研究方向:地表水与地下水相互作用及其生态环境效应。E-mail:jjlin90@163.com。

Yangtze-connected lakes such as Poyang Lake and Dongting Lake. This is mainly because the water level of Honghu Lake, affected by water conservancy regulation, has altered the natural interaction process between the lake and groundwater. These findings provide new insights into groundwater-lake interactions in flood-controlled lake systems and hold significance for the management of water resources and ecological protection in the Honghu Lake region.

[**Keywords**] Honghu Lake; water balance; lake-groundwater interactions; water quantity interaction

在水循环过程中,湖泊与地下水作为一个整体发生着相互作用,两者之间进行着水质和水量的交换^[1],由于受到地形地貌、气象、水文及开采活动等不同因素的影响^[2-3],湖泊与地下水之间的相互作用在不同的时空条件下具有不同的模式和强度^[4]。湖泊与地下水之间的相互作用研究对水体生态健康维护、水资源管理及水生动植物生存等方面具有重要意义^[5],正确认识湖泊与地下水之间的相互作用关系是科学管理水资源和维护水生态系统健康的首要条件^[6]。因此,湖泊与地下水相互作用研究已成为当前水文学和水文地质学界的热点研究之一^[7-8]。

近年来,已有较多研究报道了湖泊和地下水之间存在相互作用关系,包括地下水排放和湖水补给^[9],以及两者交互作用对湖泊水量平衡、污染物来源及迁移转化规律和水生态系统修复等方面产生的影响。曹思佳^[10]在鄱阳湖地表水与地下水转化的研究表明,地表水位波动是鄱阳湖与地下水之间补排模式变化的关键影响因素,春夏季节鄱阳湖补给地下水,秋冬季节地下水补给鄱阳湖。Sun等^[11]通过²²²Rn质量平衡模型对东洞庭湖两侧的地下水排放速率及相关营养盐输入的空间差异进行研究,发现东洞庭湖西部地下水排放速率和营养盐输入均高于东部。吴婧等^[12]通过研究长湖枯丰期地下水对长湖水量和营养盐平衡的贡献及变化,发现丰水期较枯水期因为较多的降雨和蒸发具有更强的地下水排泄能力及营养物质通量。然而,目前绝大部分研究主要集中在通江湖泊,其水位变化遵循地表水系自然水文节律,而闸控型湖泊的水位以人工调控为主,水利调度通常会改变原有湖泊-地下水水位差,进而影响湖水与地下水的相互作用过程。因此,闸控型湖泊与地下水的相互作用及其在湖泊水量平衡中的贡献值得进一步探讨。

洪湖是长江中游典型的受江湖阻隔的闸控型湖泊,水位主要受基于水利调度的人工调控影响,水文节律显著区别于洞庭湖和鄱阳湖等通江湖泊^[13]。同时,洪湖作为中国第七大淡水湖^[14],有着丰富的水生动植物资源,是一个集灌溉、航运、饮用水供应和养殖于一体的多功能湖泊,在流域经济发展中起着重要作用^[15-16]。近几十年来,由于气候不断变暖和人类活动不断增加,洪湖水资源的供需矛

盾日益突出,洪湖及其地下水均出现水质恶化、生态系统失衡等环境问题^[17]。查明洪湖水量来源是开展水污染防治及水生态保护修复工作的基础。Yu等^[18]利用²²²Rn质量平衡模型对洪湖地下水排泄速率进行了短期量化研究。这表明洪湖与地下水之间的确存在水量交换,但对于洪湖与地下水交互作用在湖泊水量平衡中的贡献及其时空变化规律的认识还十分有限。

目前对湖泊与地下水相互作用的研究方法主要有现场测量^[19]、水量平衡法、示踪法^[20]和数值模拟^[21]等。然而,现场测量和示踪法通常需要进行大量的地表水和地下水测量工作,人力和经济消耗较大;数值模型通常需要用大量水力学参数,计算结果往往具有较大的不确定性;水量平衡法较为灵活,通过对多种信息源数据进行结合来分析推算湖水与地下水的补排关系,操作起来简单方便且应用广泛^[22-23]。Liao等^[24]通过水量平衡法计算地下水流量来估算相关的化学通量,找出对鄱阳湖生态系统具有潜在威胁的因素。孙晓梁等^[25]运用水量平衡模型查明了洞庭湖在1996—2017年枯水期时处于地下水向湖泊排泄及其排泄量对水量均衡的贡献。Wang等^[7]运用水平衡模型计算了中国西北部巴丹吉林沙漠东南部4个代表性湖泊与地下水的交换量以及地下水的来源。

基于以上问题,以洪湖为研究对象,利用2017—2022年连续6年的水文和气象数据,基于水量平衡模型,研究和量化洪湖与地下水之间的补排关系及其交换量,探讨洪湖与地下水相互作用对洪湖水量平衡的贡献,揭示洪湖与地下水交换模式的季节性变化规律及成因。研究成果可为闸控型湖泊与地下水的相互作用研究提供新的认识,同时也可为洪湖水资源和水生态环境保护管理提供科学依据。

1 研究区概况

洪湖位于湖北省南部洪湖市、监利县之间,主要指内荆河老闸河段以西、洪湖市螺山镇以北、螺山干渠以东、四湖总干渠以南的地区,如图1(a)所示。湖岸平直,湖底平坦,地势自西北向东南呈缓倾斜,形成南北高、中间低、广阔而平坦的地貌,海拔大多在23~28 m^[26]。洪湖流域属于北亚热带湿

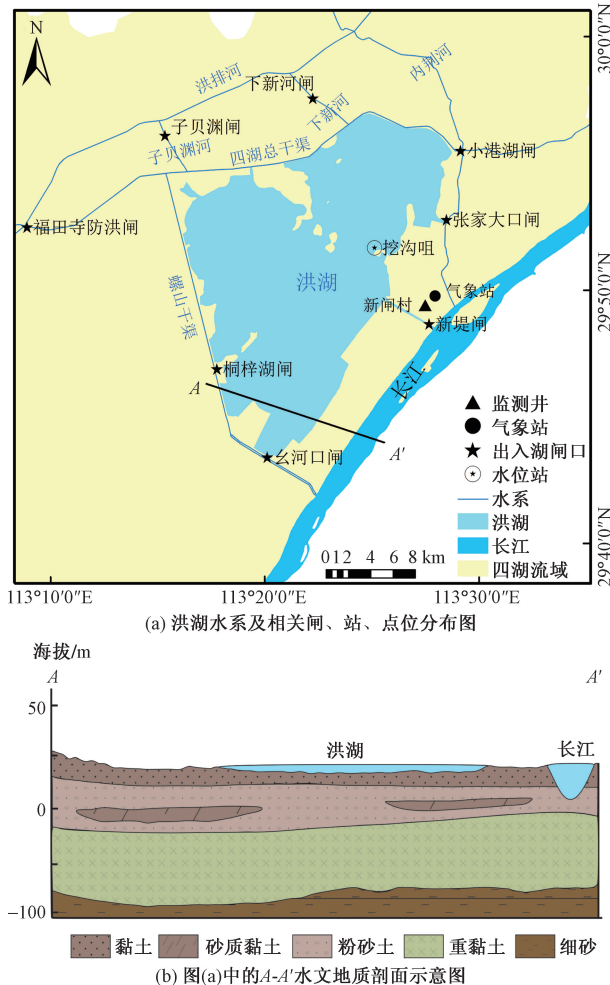


图1 研究区概况图

Fig. 1 Map of the study area

润季风气候,雨量充沛、温暖湿润、四季分明,多年平均温度 $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $1\ 321.3\ \text{mm}$ ^[27]。全湖呈多边形,分别由长江、汉江和东荆河环绕,东西两侧与长江相通;湖区南部黑鱼湾至螺山一带每年冬季雁鸭麋集,水禽资源丰富;东南顺靠长江黄金水道,西北与四湖总干渠贯通^[28-29]。洪湖流域上游来水主要通过四湖总干渠汇入洪湖,出水主要由新滩口排水闸和新堤大闸汇入长江^[30],周围河流与洪湖的水力连通性主要受福田寺防洪闸、新堤闸、桐梓湖闸、玄河口闸、子贝渊闸、下新河闸、小港湖闸、张家大闸等水闸控制。近些年来,洪湖因洪水调节、灌溉、过度捕捞、航运和供水需求而发生了很大的变化,水资源的密集利用以及化肥、农药和抗生素等污染物的排放,导致其水质严重恶化,湖泊富营养化程度不断加重^[31]。

洪湖湿地周边地层为第四系松散沉积物,岩相变化较大,具有明显的二元结构特征^[32-33]。湖底以砂、黏土为主,上层系静水沉积淤泥、腐殖质,表层主要为黏土,厚度 $10\sim 35\ \text{m}$,大多在 $20\ \text{m}$;下层主要

为砂土,厚度为 $50\sim 80\ \text{m}$,大体可分为四层,如图1(b)所示,第一层由黏土、亚黏土组成,呈黄褐色,质软可塑,按土质透水性划分为半透水层;第二层由粉砂土和极细砂土组成的浅砂层,呈灰色或黄褐色,划为弱透水层;第三层由重黏土组成隔渗层,不透水;第四层由细砂、中砂和小卵石组成的深砂土,为强透水层^[13,34]。

2 研究方法

2.1 数据的获取

水文数据来自湖北四湖防汛抗旱微信公众号、荆州市水文局、监利市湖泊水利局、洪湖市湖泊水利局;气象数据由武汉市气候中心提供;地下水水位数据摘自中国地质环境监测院编制的中国地质环境监测地下水水位年鉴。收集数据情况如下:①洪湖挖沟咀水位站2017—2022年逐日水位数据;②新堤村地下水水位监测井2019—2021年的月平均水位数据,监测深度 $10.10\sim 29.60\ \text{m}$;③福田寺防洪闸、新堤闸、桐梓湖闸、玄河口闸、子贝渊闸、下新河闸、小港湖闸、张家大闸2017—2022年逐日流量数据;④洪湖气象站2017—2022年日尺度的降雨、蒸发数据。

具体点位空间分布情况如图1(a)所示。

2.2 水量平衡模型

洪湖的水量补给项、排泄项以及湖泊容积变化在一定时空范围内存在着水量平衡关系^[35]。洪湖的水量补给项主要包括地表水入湖、降水;排泄项主要包括地表水出湖、蒸发(沟渠和灌溉等少量未知出入水量忽略不计)。

水量平衡关系可表示为

$$\Delta V = W + P + R_{in} - E - R_{out} \quad (1)$$

可得

$$W = \Delta V - P - R_{in} + E + R_{out} \quad (2)$$

式中: ΔV 为湖泊容积变化量, m^3 ; W 为洪湖与地下水净交换量, m^3 ,若 W 为正值,则整体表现为地下水向湖水排泄,为湖泊水量补给项;若 W 为负值,则整体表现为湖水向地下水排泄,为湖泊水量排泄项; P 为降水量, m^3 ; E 为蒸发量, m^3 ; R_{in} 为地表水径流入湖量, m^3 ; R_{out} 为地表水径流出湖量, m^3 。

2.3 相关参数计算方法

(1)洪湖面积计算。洪湖(挖沟咀)水位与面积存在直接的联系,刘波等^[13]以实测数据绘制洪湖水位和湖面面积的关系曲线。洪湖水位与面积之间的关系可表示为

$$S = 4.872H + 301.41 \quad (3)$$

式(3)中: S 为湖泊面积, km^2 ; H 为湖泊水位, m 。

(2) 洪湖容积变化计算。洪湖(挖沟咀)水位、面积和容积具有一定的相关性^[36],洪湖容积变化的计算公式为

$$\Delta V = \frac{1}{3}(H_1 - H_0)(S_0 + S_1 + \sqrt{S_0 S_1}) \quad (4)$$

式(4)中: ΔV 为湖泊容积变化量, m^3 ; H_0 为计算月前一月水位, m ; S_0 为计算月前一月面积, km^2 ; H_1 为计算月水位, m ; S_1 为计算月面积, km^2 。

通过式(4)可知,利用挖沟咀泵站的水位和湖泊的面积数据计算洪湖 2017—2022 年湖泊的容积变化,即湖泊水量变化。

(3) 降雨量和蒸发量计算。选用距离洪湖最近的洪湖气象站 2017—2022 年的降水和蒸发数据,洪湖湖区的降水量和蒸发量的计算公式分别为

$$P = 10^3 p_i S \quad (5)$$

$$E = 10^3 e_i S \quad (6)$$

式中: P 为洪湖湖面的总降水量, m^3 ; p_i 为洪湖气象站日降水量, mm ; E 为洪湖湖面的总蒸发量, m^3 ; e_i 为气象站日蒸发量, mm ; S 为湖泊面积, km^2 。

(4) 地表水出、入湖水量计算。地表水出入湖水量主要考虑通过四湖总干渠、下新河闸、子贝渊闸、桐梓湖闸、幺河口闸、小港湖闸、新堤闸、张家大口闸等河流或闸口出、入湖的水量。利用上述河流或闸口控制断面 2017—2022 年逐日流量监测数据计算各通道年度地表水出、入湖水量。

2.4 数据处理

主要使用 Excel 对降雨量、蒸发量和地表水出、入湖水量等进行预处理;使用 ArcGIS10.2 绘制研究区概况图;使用 Coreldraw2022 绘制水文地质剖面图;使用 Origin2021 绘制水位变化、洪湖与地下水净交换量、降雨量和蒸发量等图件。

3 结果与讨论

3.1 洪湖与地下水水位动态变化特征

2019—2021 年 3 年间洪湖及新闻村点位地下水水位变化曲线如图 2 所示。在整体的变化趋势中,洪湖(挖沟咀)的水位范围为 22.40 ~ 24.91 m,多年平均水位为 23.17 m,水位变化相对较小,水利调度减缓了洪湖的年内变化幅度。新闻村地下水水位范围为 21.43 ~ 24.67 m,多年平均水位为 22.94 m,水位变化略大于湖水的变化幅度。在季节变化规律中,新闻村地下水水位和洪湖水位大都在丰水期(6—10 月)达到峰值后慢慢回落。而且,洪湖水位还与新闻村地下水水位呈显著的正相关($P < 0.01$),相关系数为 0.729。

因此,地下水位与洪湖水位是呈同一变化趋

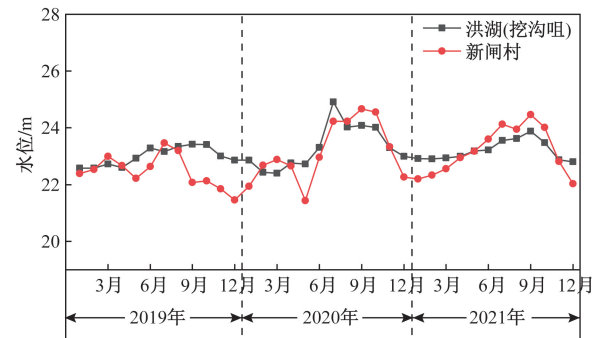


图 2 洪湖与地下水水位动态变化图

Fig. 2 Dynamic change of Honghu Lake and groundwater level

势,但不同变化幅度的周期性波动,而这一波动产生的水位差,也就促使了地下水与洪湖交互作用模式的转变。从图 2 中可以看出,2020—2021 年丰水期地下水水位显著高于洪湖水位,其余时段则低于洪湖水位。体现最明显的是 2020 年,在 5 月份,地下水水位达到水位周期性波动的低谷,比洪湖水位低 1.30 m;同年 9 月,地下水水位上升至 3 年内最高的水平,比洪湖高 0.59 m。为了判断地下水与洪湖交互的发生,根据达西定律进行分析。其中,周边潜水含水层因其砂土结构具有透水性^[13],上述水位差又构成了地下水与洪湖交互的驱动力,满足了水力梯度。因此,地下水与洪湖具备发生交互作用的必要条件,而水位差的动态变化也就决定了地下水与洪湖交互模式的转变。根据 Tong 等^[37]和 Liu 等^[38]对洪湖流域抗生素的调查,发现洪湖周边地下水井中存在一定浓度的抗生素,且地表水和地下水的抗生素浓度之间存在显著的相关性,指示了湖水的下渗补给。张彦鹏等^[39]通过对洪湖湿地及周边地下水进行水流场分析发现周边地下水存在向洪湖排泄的情况,这又指示了地下水的排泄补给。因此,这些研究都进一步证实了洪湖与地下水交互作用的存在。

3.2 洪湖与地下水年际交换量及其水量贡献

根据收集到的数据,计算得到 2017—2022 年不同年份洪湖各水均衡项的结果如图 3 所示。其中,由式(2)计算结果得:2017—2022 年,每年洪湖与地下水交换量 W_x 均小于 0,这说明从年尺度来看,洪湖与地下水之间的相互作用关系表现为洪湖补给地下水,这一结果与刘波等^[13]报道的 2018—2020 年湖水与地下水位响应关系一致。2017—2022 年,洪湖向地下水的补给量为 $3.91 \times 10^8 \sim 9.99 \times 10^8 \text{ m}^3$,多年平均为 $6.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

图 3 中的水量平衡结果显示,从水量来源来看,2017—2022 年,洪湖的入湖水量区间为 $36.77 \times$

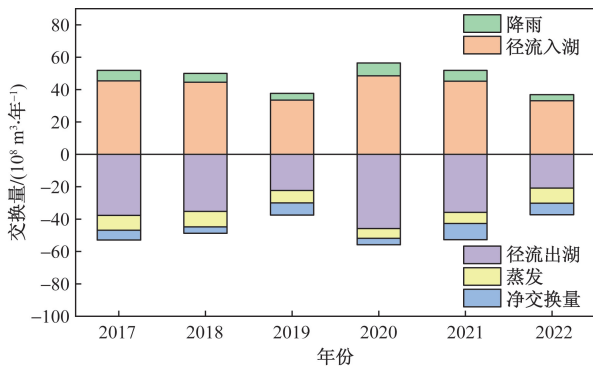


图3 2017—2022年水平衡各组成部分的贡献

Fig. 3 Contribution of water balance components in 2017—2022

$10^8 \sim 56.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 平均为 $47.46 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 地下水向湖泊补给对洪湖水量无明显贡献; 通过地表径流入湖的水量为 $33.09 \times 10^8 \sim 48.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 多年平均为 $41.73 \times 10^8 \text{ m}^3$, 贡献为 $85.75\% \sim 89.99\%$, 平均为 88.10% , 其中, 通过四湖总干渠入湖的水量贡献最大为 $75.65\% \sim 85.44\%$, 平均为 81.48% ; 湖区降水量为 $3.68 \times 10^8 \sim 8.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 多年平均为 $5.74 \times 10^8 \text{ m}^3$, 贡献占比 $10.01\% \sim 14.25\%$, 平均为 11.90% 。从出湖水量来看, 2017—2022年, 洪湖出湖水量区间为 $37.28 \times 10^8 \sim 55.93 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 多年平均为 $47.52 \times 10^8 \text{ m}^3$; 地表径流出湖水量为 $20.90 \times 10^8 \sim 45.83 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 平均为 $32.93 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 贡献占比为 $56.05\% \sim 81.93\%$, 平均为 68.06% , 主要通过新堤闸、小港湖闸、张家大口闸出湖; 湖区蒸发量为 $6.02 \times 10^8 \sim 9.67 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 多年平均为 $8.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, 贡献为 $10.77\% \sim 24.97\%$, 平均为 17.83% ; 湖水向地下水排泄的变化范围为 $3.91 \times 10^8 \sim 9.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 多年平均为 $6.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, 贡献为 $7.30\% \sim 19.94\%$, 平均为 14.11% 。由此可知, 从年尺度来看, 洪湖出入湖水量仍由地表径流为主, 其中四湖总干渠对水量来源的贡献占 71.78% ; 地下水向洪湖补给在洪湖水量来源中的作用不明显, 但湖水向地下水排泄在出湖水量中占据重要贡献, 不容忽视。

3.3 洪湖-地下水交互的季节变异性及成因

为进一步了解洪湖与地下水交互的时间变异性, 对2017—2022年洪湖和地下水的月度净交换量进行了计算和分析。由图4可知, 洪湖和地下水2017—2022年平均月度净交换量在正值和负值之间交替, 表明洪湖和地下水相互作用在月尺度上具有明显的时间变异性。全年有10个月均表现洪湖向地下水排泄(以负交换量表示), 月度排泄量在 $0.21 \times 10^8 \sim 1.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ 范围内波动, 平均为 $0.77 \times 10^8 \text{ m}^3$; 4月和6月为地下水向洪湖补给(以

正交换量表示), 补给量分别为 0.4×10^8 、 $0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均月补给量为 $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

根据图4呈现的洪湖与地下水多年平均月度净交换量的变异性, 可将年内洪湖与地下水相互作用划分为3个阶段: 第一阶段(1—2月), 为洪湖向地下水排泄期, 整体呈现交互强度逐渐减小的趋势, 主要是由于枯水期地下水水位处于较低水平, 尽管洪湖水位控制在较低水平但较地下水水位更高, 随着地下水水位开始抬升, 湖水与地下水水位差的减小, 两者的交互强度也相应变小; 第二阶段(3—8月), 为洪湖与地下水交互模式动态变化期, 进入雨季, 地下水水位随降雨量的变化出现显著波动, 随着净入湖径流量的增加, 洪湖水位逐渐升高, 湖水与地下水水位相对关系也处于动态变化状态, 进而使得湖水与地下水交互作用频繁发生逆转; 第三阶段(9—12月), 再次进入洪湖向地下水排泄期, 主要是由于降雨量减小, 地下水水位开始回落, 而受水利调度的影响, 洪湖水位降幅较小且速度较慢, 导致洪湖水位高于地下水水位(图5), 且整体表现出随两者水位差增加, 湖水向地下水的净排泄量

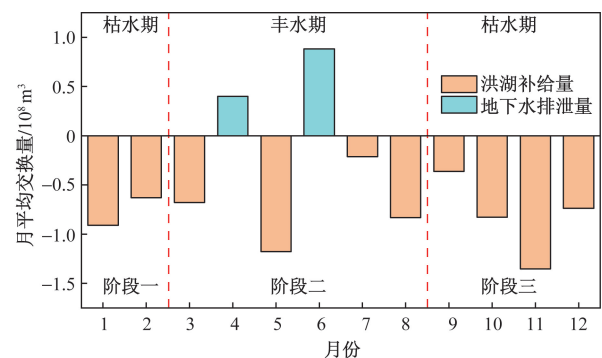


图4 2017—2022年洪湖与地下水平均月度净交换量

Fig. 4 Average monthly exchanges between Honghu Lake and groundwater in 2017—2022

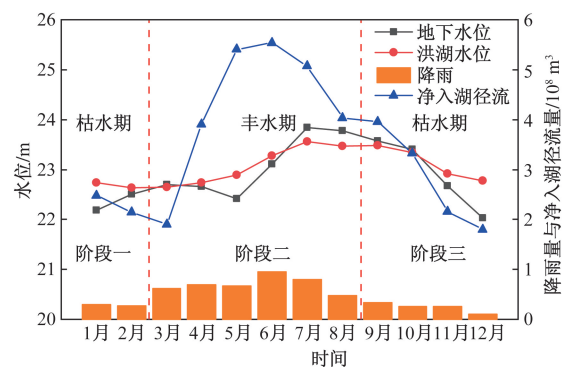


图5 2017—2022年洪湖平均月度降雨量、净入湖径流量、水位及地下水水位

Fig. 5 Average monthly rainfall, net runoff into the lake, water levels and groundwater levels in Honghu Lake, 2017—2022

表1 洪湖、鄱阳湖和洞庭湖与地下水的交换方式及交换量

Table 1 Mode and amount of exchange between Honghu Lake, Poyang Lake and Dongting Lake and Groundwater

湖泊	时间	交换方式	交换量/($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{月}^{-1}$)	
			范围	平均值
洪湖	枯水期(9月—次年2月)	洪湖向地下水排泄	0.36 ~ 1.35	0.80
	丰水期(3—8月)	交互模式动态变换	-1.17 ~ 0.88	-0.73, +0.64
鄱阳湖	丰水期(2—8月)	鄱阳湖向地下水排泄	0.07 ~ 2.54	1.30
	枯水期(9月—次年1月)	地下水向鄱阳湖补给	0.97 ~ 9.67	5.32
洞庭湖	丰水期(5—7月)	洞庭湖向地下水排泄	1.00 ~ 19.00	7.10
	枯水期(8月—次年4月)	地下水向洞庭湖补给	2.00 ~ 21.00	11.20

注:交互模式动态变换下,交换量“+”表示地下水向洪湖补给;“-”表示洪湖向地下水排泄。

逐月增加的特征(图4)。12月湖水与地下水水位差较11月更大(图5),但湖水向地下水的净排泄量却较11月更小(图4)。这类情况通常体现在地下水穿流型湖泊中^[40-41],湖水与地下水交互作用的空间异质性促使地下水排泄和湖泊下渗补给对净交换量的协同调节作用。洪湖与地下水交互作用的季节变异性受地下水水位动态变化、洪湖水利调度的综合控制,且其空间异质性值得在未来的研究中进行深入探讨。

洪湖整体呈现出枯水期(9月—次年2月)洪湖补给地下水,丰水期两者交互模式动态变化的特征(表1)。这与以往研究报道的丰水期地表水补给地下水、枯水期地下水补给地表水的一般认识^[42]不同。如表1所示,Zhou等^[43]研究表明,鄱阳湖2—8月为湖水向地下水排泄,月补给水量为 $0.07 \times 10^8 \sim 2.54 \times 10^8 \text{ m}^3$;其余月份为地下水向湖水补给,月补给水量为 $0.97 \times 10^8 \sim 9.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,且鄱阳湖与地下水之间的水量交换的时间变化主要受降雨和湖泊水位的共同影响。Yang等^[35]利用水平衡法对洞庭湖和地下水的交换量进行研究,表明5—7月洞庭湖向地下水排泄,月排泄量为 $1.0 \times 10^8 \sim 19 \times 10^8 \text{ m}^3$,月平均排泄量为 $7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,8月—次年4月地下水向洞庭湖补给,月补给量为 $2.0 \times 10^8 \sim 21 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均为 $11.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,且洞庭湖年度表现为地下水向湖泊补给,年净补给量为 $78.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,发现影响地下水与洞庭湖水量交换的主要因素是入湖径流和出湖径流的差值。而洪湖的情况近乎相反,且更为复杂,这可能是由于鄱阳湖、洞庭湖均为通江湖泊,其水位受长江水位控制,而洪湖水位主要受水利调度控制,江湖阻隔,改变了自然水文节律下的湖泊-地下水交互过程。类似的情况在长江中游的闸控型湖泊长湖也有体现,吴婧等^[12]通过对多种示踪剂质量浓度进行相关性分析,发现丰水期时长湖地下水排泄量显著大于枯水期,很好地验证了洪湖地表水与地下水之间交换模式动态变化的合理性。从月尺度交互量而言,枯水期

(9月—次年2月)洪湖向地下水排泄的月排泄量为 $0.36 \times 10^8 \sim 1.35 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均为 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$;丰水期(3—8月)洪湖与地下水交互模式处于动态变化状态,月交互量范围为 $-1.17 \times 10^8 \sim 0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。洪湖与地下水交互量较洞庭湖、鄱阳湖小1或2个数量级,这可能与湖泊面积、区域含水层渗透性等有关。水位受水利调度控制的湖泊系统中,湖水与地下水交互作用在湖泊生态环境演变过程中扮演何种角色,具有何种贡献值得未来的研究重点关注。

4 结论

基于水位动态分析和水量平衡模型计算,对2017—2022年洪湖与地下水的补排关系以及交换量的年际、年内变化特征开展研究,定性识别了洪湖与地下水交互模式,量化了洪湖与地下水交换量及其对湖泊水量平衡的贡献,揭示了湖泊与地下水交互模式的季节性变化特征及其变化机制,为认识洪湖与地下水交互作用及其生态环境效应提供了重要的见解。得出如下主要结论。

(1)洪湖与沿湖新闻村点位处的地下水水位存在显著水位差,两者水位的相关系数为0.729,且周边潜水含水层岩性具有透水性,允许湖水和地下水互相渗透和转移,表明洪湖和地下水之间具备产生相互作用的条件。

(2)2017—2022年,通过地表径流入湖的多年平均水量为 $41.73 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,是洪湖水量的主要来源(88.10%)。多年平均地表径流出湖水量为 $32.93 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,在出湖水量中仍占主导地位(68.06%)。2017—2022年,年际尺度上总体表现为湖水向地下水排泄,多年平均排泄水量为 $6.43 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,占出湖总水量的14.11%,表明洪湖水量平衡中,湖水与地下水的交换量不容忽视。

(3)洪湖与地下水的补排关系具有复杂的季节性变化特征:枯水期洪湖向地下水排泄,月排泄量为 $0.36 \times 10^8 \sim 1.35 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均为 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$;

丰水期湖水与地下水交互模式处于动态变化状态,月交互量范围为 $-1.17 \times 10^8 \sim 0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与鄱阳湖、洞庭湖等通江湖泊与地下水交互关系的一般规律相反,且更为复杂,主要是由于洪湖水位受水利调度控制而非由地表水系的自然水文节律主导。洪湖与地下水交互的空间异质性及其对湖泊系统的生态环境效应值得后续研究重点关注。

参 考 文 献

[1] 马文静,王文科,侯昕悦,等. 玛纳斯河流域河流—地下水转化驱动下的水文地球化学空间演化[J/OL]. (2024-10-12) [2024-07-17]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240360>.
Ma Wenjing, Wang Wenke, Hou Xinyue, et al. Spatial evolution of hydrogeochemistry driven by river-groundwater transformations in the Manas River basin[J/OL] (2024-10-12) [2024-07-17]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240360>.

[2] 周智强,黄奇波,汪玉松,等. 典型岩溶矿区地表水和地下水补给来源及水化学演化机制[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5264-5276.
Zhou Zhiqiang, Huang Qibo, Wang Yusong, et al. Recharge sources and hydrochemical evolution mechanism of surface water and groundwater in typical karst mining area[J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5264-5276.

[3] 王勃兴. 丹河流域地表水与地下水水化学特征及两水转化关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
Wang Boxing. Study on chemical characteristics of surface water and groundwater and their transformation relationship in Danhe River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.

[4] Xia Y, Xiao J, Wang W, et al. Nitrate dynamics in the streamwater-groundwater interaction system: sources, fate, and controls[J]. Science of the Total Environment, 2024, 918: 170574.

[5] Yang B, Li J T, Huang W, et al. Optical variations of dissolved organic matter due to surface water-groundwater interaction in alpine and arid Datonghe watershed[J]. Science of the Total Environment, 2023, 864: 161036.

[6] Townley L R, Turner J V. Consistent solutions for simultaneous dynamic water, solute, stable isotope and radon balances to estimate average exchange fluxes between surface water bodies and groundwater[J]. Journal of Hydrology, 2024, 644: 131995.

[7] Wang X, Zhao H, Sheng Y, et al. Groundwater net discharge rates estimated from lake level change in Badain Jaran Desert, Northwest China[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 63(5): 1-13.

[8] 张安广,梁莹,马瑞. 地表水-地下水相互作用下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸附/解吸行为及其对 N 迁移转化的影响[J]. 地球科学, 2024, 49(10): 3761-3772.
Zhang Anguang, Liang Ying, Ma Rui. Adsorption/desorption behavior of $\text{NH}_4\text{-N}$ under surface water-groundwater interaction and its impact on N migration and transformation [J]. Earth Science, 2024, 49(10): 3761-3772.

[9] Irvine D J, Singha K, Kurylyk B L, et al. Groundwater-Surface water interactions research: past trends and future directions [J]. Journal of Hydrology, 2024, 644: 132061.

[10] 曹思佳. 鄱阳湖典型洪泛区地下水—湖水转化及对变化环境的响应[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.

Cao Sijia. Groundwater-lake interactions and associated responses to changing environment in the typical floodplain area of Poyang Lake [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.

[11] Sun X, Du Y, Deng Y, et al. Contrasting nutrients input along with groundwater discharge to east Dongting Lake, central China: a geological perspective[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109658.

[12] 吴婧,甘义群,杜尧,等. 长湖地下水排泄及其携带营养盐通量的季节性变化[J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 206-215.
Wu Jing, Gan Yiqun, Du Yao, et al. Seasonal variations in groundwater discharge and associated nutrient fluxes in Changhu Lake[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 206-215.

[13] 刘波,李红梅,石长柏,等. 基于洪湖湿地生态水位控制的地下水位响应关系研究[J]. 资源环境与工程, 2021, 35(6): 827-833.
Liu Bo, Li Hongmei, Shi Changbo, et al. Study on response relationship of groundwater level based on ecological water level control of honghu wetland [J]. Resources Environment & Engineering, 2021, 35(6): 827-833.

[14] Mai Z, Xiong X, Hu H, et al. Occurrence, distribution, and ecological risks of antibiotics in Honghu Lake and surrounding aquaculture ponds, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(17): 50732-50742.

[15] Chen L, Tian Z, Zou K. Water quality evaluation based on the water quality index method in Honghu Lake: one of the largest shallow lakes in the Yangtze River Economic Zone [J]. Water Supply, 2020, 20(6): 2145-2155.

[16] 尤慧,邓艳君,高华东,等. 洪湖湿地土地利用/土地覆盖变化遥感监测[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 162-166.
You Hui, Deng Yanjun, Gao Huadong, et al. Remote sensing monitoring of land use/land cover change in the Honghu Lake wetland [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 162-166.

[17] Wang Y, Yang K, Jia T, et al. Influence of natural factors and land use change on changes in the main lake area in China over the past 30 years[J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 111005.

[18] Yu J, Wang Q, Gilfedder B S, et al. Is the impact of groundwater on lake greenhouse gas dynamics underestimated? a comparative analysis of subsurface and ecological factors[J]. Journal of Hydrology, 2024, 640: 131666.

[19] 陈静,李云良,周俊锋,等. 鄱阳湖洪泛区碟形湖湿地系统地表地下水交互作用[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 842-853.
Chen Jing, Li Yunliang, Zhou Junfeng, et al. Assessing surface water-groundwater interactions in the seasonal lake-wetland system of Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 842-853.

[20] Coutino A, Stastna M, Reinhardt E G. Interaction of mangrove surface coverage and groundwater inputs on the temperature and water level near Tulum, Quintana Roo, Mexico: observations and modelling[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583.

[21] Jafari F, Kiem A S, Javadi S, et al. Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 35: 100822.

[22] 牛宏,魏小雅,林晶晶,等. 盆地多级次地下水流系统盐分运

- 移实验模拟[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 177-182.
- Niu Hong, Wei Xiaoya, Lin Jingjing, et al. Experimental simulation of salt transport in hierarchically nested groundwater flow system[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 177-182.
- [23] Ma Y, Wu P, Chen Y, et al. Hydrological processes in the megadune slopes and their implications for the water source of lakes in the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130844.
- [24] Liao F, Wang G, Shi Z, et al. Estimation of groundwater discharge and associated chemical fluxes into Poyang Lake, China; approaches using stable isotopes (δD and $\delta O-18$) and radon[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1625-1638.
- [25] 孙晓梁, 杜尧, 邓娅敏, 等. 1996~2017年枯水期地下水排泄对洞庭湖水量均衡的贡献及其时间变异性[J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2555-2564.
- Sun Xiaoliang, Du Yao, Deng Yamin, et al. Contribution and its temporal variation of Groundwater discharge to the water mass balance of Dongting Lake from 1996 to 2017[J]. Earth Science, 2021, 46(7): 2555-2564.
- [26] 郑雄伟, 张响荣, 王瑞杰, 等. 洪湖市土壤酸碱度趋势分析及影响因素[J]. 华东地质, 2023, 44(2): 197-205.
- Zheng Xiongwei, Zhang Xiangrong, Wang Ruijie, et al. Trend analysis and influencing factors of soil pH in Honghu City, Hubei Province[J]. East China Geology, 2023, 44(2): 197-205.
- [27] 刘昔, 厉恩华, 徐杰, 等. 洪湖湿地生态系统演变及稳态转换关键驱动因子阈值研究[J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 934-940.
- Liu Xi, Li Enhua, Xu Jie, et al. Evolution mechanism of Lake Honghu Wetland ecosystem and regime shift crucial threshold[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(3): 934-940.
- [28] Chen S, Wang S, Yu Y, et al. Temporal trends and source apportionment of water pollution in Honghu Lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 5: DOI: 10.1007/s11356-021-14828-z.
- [29] Zhang Y, Zheng X, Zhao C, et al. Potential ecological risk quantification of metals in lake sediments: a considering of sources[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2022, 71(3/4): 212-228.
- [30] 罗慧萍, 罗平安, 曹慧群, 等. 洪湖水质时空变化规律及污染物汇入阈值研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 59-62.
- Luo Huiping, Luo Ping'an, Cao Huiqun, et al. Spatio-temporal variation of water quality and threshold of pollutants inflow of Honghu Lake[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 59-62.
- [31] Han M, Dsouza M, Zhou C, et al. Agricultural risk factors influence microbial ecology in Honghu Lake[J]. Genomics, Proteomics & Bioinformatics, 2019, 17(1): 76-90.
- [32] 贾诗琪. 洪湖湖滨河口区生态护岸结构研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- Jia Shiqi. Study of the ecological revetment structure in Honghu Lakeside Estuary Area[D]. Yi'chang: China Three Gorges University, 2023.
- [33] 梁莹. 江汉平原水动力驱动下地下水中氮的反应迁移与归趋[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- Liang Ying. The reactive transport processes and fate of groundwater nitrogen driven by water dynamics in the central Yangtze River Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.
- [34] Du Y, Ma T, Deng Y, et al. Caracterizando as interações águas superficiais/águas subterrâneas no interior da Planície de Jianghan, China central[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(4): 1047-1059.
- [35] Yang S, Xie L, Yang K, et al. The lake and groundwater interaction based on water balance in Dongting Lake, China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 53: 101783.
- [36] 车彦军, 张明军, 陈亚宁, 等. 近30年东昆仑阿牙克库木湖水量变化及其补给关系研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(6): 1-13.
- Che Yanjun, Zhang Mingjun, Chen Yaning, et al. Changes in water volume of Ayakkum Lake in the eastern Kunlun Mountains and its replenishment relationship in the last 30 years[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(6): 1-13.
- [37] Tong L, Qin L, Guan C, et al. Antibiotic resistance gene profiling in response to antibiotic usage and environmental factors in the surface water and groundwater of Honghu Lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(25): 31995-32005.
- [38] Liu X, Wang Z, Zhang L, et al. Inconsistent seasonal variation of antibiotics between surface water and groundwater in the Jiangnan Plain: risks and linkage to land uses[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 109: 102-113.
- [39] 张彦鹏, 严克涛, 陈晨. 洪湖湿地-地下水系统中氮来源与转化过程的水化学和多同位素解析[J]. 地球科学, 2024, 49(11): 3946-3959.
- Zhang Yanpeng, Yan Ketao, Chen Chen. Hydrochemical and multi-isotope analysis of nitrogen sources and transformation processes in the wetland-groundwater system of Honghu Lake[J]. Earth Science, 2024, 49(11): 3946-3959.
- [40] Rosen M. The importance of groundwater in playas: a review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas[M]. Geological Society of America Special Papers, 1994: 1-18.
- [41] Shaw G D, Mitchell K L, Gammons C H. Estimating groundwater inflow and leakage outflow for an intermontane lake with a structurally complex geology: Georgetown Lake in Montana, USA[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 25(1): 135-149.
- [42] Jianmin B, Yihan L, Yuxi M, et al. Study on hydrochemical characteristics and formation process of Antu mineral water in Changbai Mountain, China[J]. Water, 2022, 14(18): 2770.
- [43] Zhou P, Wang G, Mao H, et al. Numerical modeling for the temporal variations of the water interchange between groundwater and surface water in a regional great lake (Poyang Lake, China)[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127827.