

考虑水体面积变化的鄱阳湖平原区地表-地下水相互作用模拟

姜文瑜, 刘波, 邓月萍, 李云良, 束龙仓, 王文鹏

Simulation of surface water - groundwater interaction in the plain area of the Poyang Lake considering the change of water body area

JIANG Wenyu, LIU Bo, DENG Yueping, LI Yunliang, SHU Longcang, and WANG Wenpeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209048>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估

Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain

饶志, 储小东, 吴代赦, 颜春, 陈婷, 何景媛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 31-37

基于GSFLOW的青土湖生态输水量-湖水面积关系研究

A study of the relationship between ecological water conveyance and water surface area of the Qingtu Lake based on GSFLOW

郭云彤, 周妍, 崔亚莉, 邵景力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 32-41

水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table

潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154-163

基于GSFLOW的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟

Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland

郜会彩, 肖玉福, 胡云进, 陈柳安, 周如杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 182-191

潮白河再生水补给河道对周边浅层地下水影响的数值模拟研究

Numerical modeling of the impacts of reclaimed water recharge to the Chaobai River channel on the ambient shallow groundwater

姜瑞雪, 韩冬梅, 宋献方, 李炳华 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 43-54

保定平原区地下水生态水位阈值的探讨

Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area

靳博文, 王文科, 段磊, 马稚桐, 王一, 黄鑫慧 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 166-175



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209048

姜文瑜, 刘波, 邓月萍, 等. 考虑水体面积变化的鄱阳湖平原区地表-地下水相互作用模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 95-104.

JIANG Wenyu, LIU Bo, DENG Yueping, *et al.* Simulation of surface water - groundwater interaction in the plain area of the Poyang Lake considering the change of water body area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 95-104.

考虑水体面积变化的鄱阳湖平原区地表-地下水 相互作用模拟

姜文瑜¹, 刘波¹, 邓月萍², 李云良³, 束龙仓¹, 王文鹏¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 鄱阳湖水文水资源监测中心, 江西南昌 330038; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008)

摘要: 湖泊的水情变化会影响其与地下水之间的物理水文过程和生态行为, 鄱阳湖独特的“河湖相”转换特征使得该地区地表-地下水交换过程更加复杂。采用 Visual MODFLOW 构建三维非稳定流地下水流数值模型, 利用 LAK3 子程序模块, 通过输入五河入湖以及鄱阳湖流入长江的水量, 实现湖水面积的动态模拟。结果表明, 2019 年湖水水位模拟值与实测值的均方根误差为 0.225 m, 地下水水位模拟值与实测值的均方根误差为 0.571 m; 模型模拟鄱阳湖水面面积环比变幅 -41% ~ 83%, 与遥感影像结论吻合。该模型减少了湖泊作为边界条件的约束, 可以有效刻画鄱阳湖频繁变化的湖水位和水体面积, 准确模拟地下水流程和地表-地下水相互作用关系对湖泊水体高度动态变化的响应。枯水期主要由地下水补给湖水, 交换量为 $2.03 \times 10^7 \sim 10.58 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{mon}$; 丰水期湖水补给地下水, 交换量为 $2.04 \times 10^7 \sim 16.53 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{mon}$, 湖区及周边地下水水位相比枯水期平均抬升 2 ~ 3 m, 地下水由湖区流向周边地区。本研究为地表水体剧烈变化地区提供了有效的数值模拟方法, 研究成果可为鄱阳湖平原区未来水资源管理和环境评价提供基础。

关键词: 鄱阳湖; 湖水-地下水转换关系; 数值模型; LAK3; 水体面积变化

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0095-10

Simulation of surface water - groundwater interaction in the plain area of the Poyang Lake considering the change of water body area

JIANG Wenyu¹, LIU Bo¹, DENG Yueping², LI Yunliang³, SHU Longcang¹, WANG Wenpeng¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Poyang Lake Water Resources Monitoring Center, Nanchang, Jiangxi 330038, China; 3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract: Water changing conditions of a lake will affect the physical and hydrological conditions and ecology of the lake and groundwater. The unique "river-lake phase" transition of the Poyang Lake complicates the surface water-groundwater exchange process in the area. Therefore, this study uses Visual MODFLOW to build a 3D numerical model of groundwater transient flow and uses the LAK3 module to realize the dynamic simulation of

收稿日期: 2022-09-18; 修订日期: 2023-01-13

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 江西省水利厅科技项目(202223YBKT31; 202324YBKT13); 中央高校基本科研业务费项目(B220201028); 国家重点研发计划项目(2021YFC3200502)

第一作者: 姜文瑜(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: jiangwenyu1999@163.com

通讯作者: 刘波(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事地下水资源评价及模拟研究。E-mail: liubohu@hhu.edu.cn

the lake water area by inputting the runoff from five rivers into the lake and the Poyang Lake into the Yangtze River. The RMSE between the simulated and measured values of lake water level is 0.225 m, and between the simulated and measured values of groundwater level is 0.571 m. The month-on-month ratio variation of the Poyang Lake area simulated by the model ranges from -41% to 83%, consistent with the remote sensing images. This model reduces the constraint of lakes as boundary conditions, can effectively depict the frequently-changing water level and lake area, and accurately simulate the response of groundwater flow field and surface water-groundwater interaction relationship to the height dynamics of lake water. During the dry season, the lake is mainly recharged by groundwater, with an exchange flux ranging from 2.03×10^7 to 10.58×10^7 m³/mon. During the wet season, the lake water discharges into groundwater with an exchange flux ranging from 2.04×10^7 to 16.53×10^7 m³/mon, with the average groundwater level rise in the lake region and surrounding areas by 2 ~ 3 m compared to the dry season. The groundwater flows from the lake region to the surrounding areas. This study contributes an effective numerical simulation method for areas with dramatic changes in surface water bodies. The results can provide a basis for future water resources management and environmental assessment in the Poyang Lake Plain.

Keywords: Poyang Lake; lake-groundwater conversion relationship; numerical model; LAK3; change of water body area

鄱阳湖位于我国江西省北部,长江中下游南岸,作为我国最大的季节性淡水湖泊,“洪水一片,枯水一线”是其显著特征。近年来由于气候变化、人类活动和三峡水利工程的影响,鄱阳湖与流域和长江的水文关系发生变化,鄱阳湖水量平衡关系也发生改变,出现枯水期提前、延长、水位持续下降的现象,打破了鄱阳湖固有的水文节律^[1]。研究湖水-地下水的转化对湿地生态系统稳定性和水资源管理具有重要意义^[2],描述湖泊和周围含水层之间的水力联系对保护、开发和管理水资源至关重要^[3-4]。目前国内外学者已在巴尔喀什湖、乌拉米尔湖以及五大湖等流域开展区域水均衡研究,探究地表-地下水的转换关系^[5-7]。由于鄱阳湖水面积频繁变化,水位持续波动,很难从不同水文时期(枯水期、涨水期、丰水期、退水期)对鄱阳湖与周围地下水的交换关系进行完整探究。

目前对鄱阳湖水均衡的研究主要针对某些典型区域,已运用了水文法^[8]、热力学法^[9]、示踪法^[10]和解析法^[11]等多种方法进行探究。与解析法等方法相比,数值模拟仿真度高,结果更加直观^[12]。探究鄱阳湖的水量平衡关系时,高度动态变化的湖水位和湖面积是研究的重难点。兰盈盈等^[13]、宋炎炎等^[14]基于 GMS 软件将鄱阳湖水体处理为湖泊范围固定的水头边界; Wang 等^[15]利用 FEFLOW 软件结合月尺度遥感影像调整湖泊区域节点范围,并处理为水头边界; Zhou 等^[16]在 MODFLOW 中将不同时期的湖泊用 RIV 软件包进行处理。在现有研究中,建立的鄱阳湖地下水流数值模型对湖泊的处理各异,通常作为水头边界^[14]或河流

边界^[16],水体面积的变化通常依据遥感影像作为输入的约束条件。

MODFLOW 被广泛应用于地下水流数值模拟^[17]。LAK3 软件包是 MODFLOW 中用于模拟湖泊-含水层相互作用的模块^[17],其模拟湖泊水位变化的能力要优于使用定水头或通用水头边界^[18]。湖泊水位的变化由模型网格中每个湖泊单元的独立水量平衡计算确定^[19],因此可以根据湖泊水位与湖底高程关系确定湖泊网格的干湿转化,进而模拟湖泊范围。目前国内外学者主要将 LAK3 软件包应用于模拟水库渗漏和湖泊与地下水的相互作用。例如, LAK3 模块可用于模拟不同关井压采方案对水库渗漏量的影响^[20],湖水-地下水交换通量和湖泊长期水均衡^[21],以及湖泊塌陷和含水层非均质性对坑湖-地下水相互作用的影响^[22]。

已有研究对鄱阳湖的处理方式须给定计算时刻的遥感影像和实测湖水位作为边界条件,对于缺少实测资料的时期或不同的模拟期,数值模型的预测功能受到限制。因此,本文考虑鄱阳湖河湖相的周期性转变,采用 MODFLOW 的 LAK3 模块对湖泊水位动态与水量平衡进行模拟与预测,研究地表水-地下水的相互作用特点以及湖泊水量平衡关系,为后续环境变化影响等相关研究提供技术支撑。

1 研究区概况与数据来源

鄱阳湖位于我国江西省北部,长江中下游南岸,南北长约 173 km,东西宽约 74 km,是我国最大的通江性、季节性淡水湖泊,其湖水位、水体面积的季节和

年际变幅较大^[23](图1)。鄱阳湖流域属于亚热带温暖季风气候。4—9月为鄱阳湖流域的汛期,此时的降水量占全年降水的75%,洪泛平原被淹没,面积超过3 000 km²,最大容量为300×10⁸ m³;主汛期4—6月降水占全年的50%以上,并且此时的湖水位也较高,根据资料显示湖泊历史最大湖水深度为22.59 m。在10—

次年3月的枯季,湖泊淹没面积可能小于1 000 km²,1—2月甚至缩成狭窄的河道,暴露出广泛的洪泛平原和湿地^[23]。研究区地势四周高中间低,山地、岗地处位于鄱阳湖外环,该区内山脊线方向与构造线方向均为北东走向,且被“五河”分割,地下水水位分布与地形总体一致。

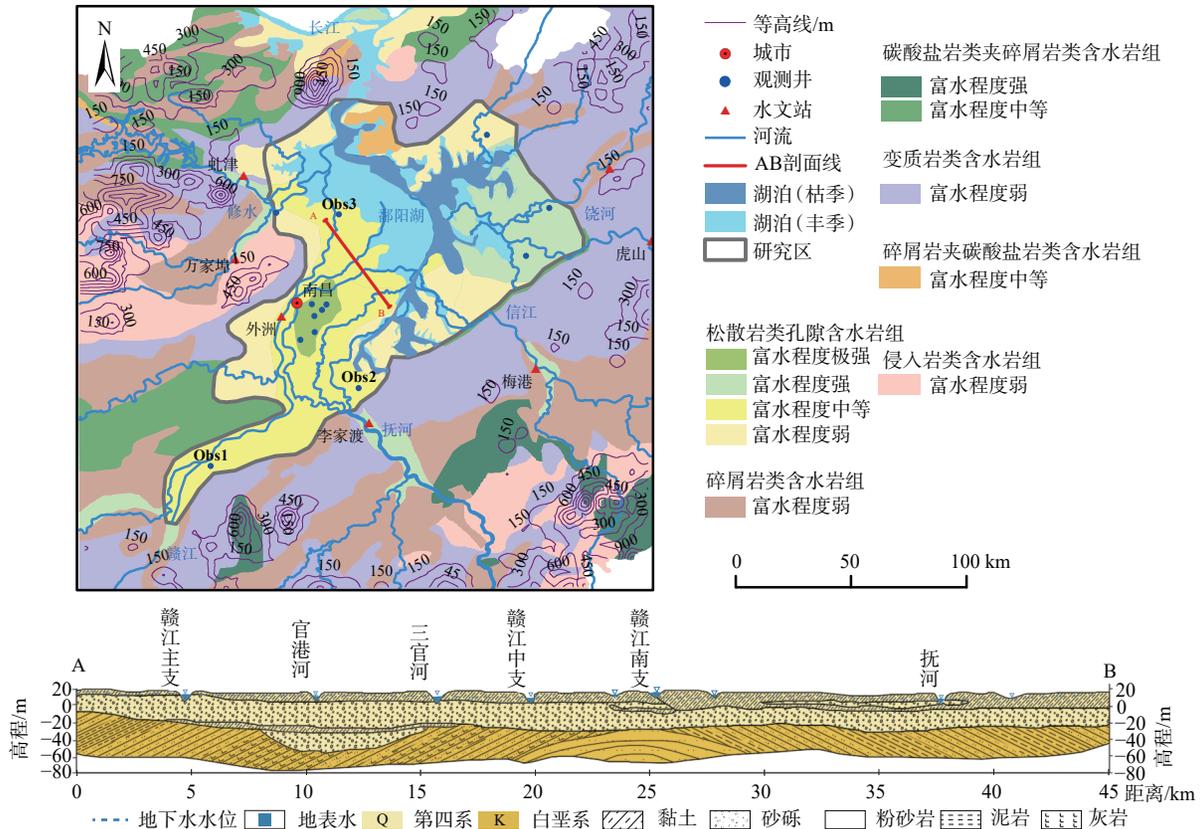


图1 研究区水文地质图和剖面图

Fig. 1 Hydrogeological map and hydrogeological section of the study area

本文收集的数据包括:①鄱阳湖主湖区3个水文站(星子站、都昌站和康山站)2019年逐日观测水位和降水数据,3个站在主湖区由北向南分布;②鄱阳湖5条入湖支流(赣江、抚河、信江、饶河和修水)下游的7个水文站2019年逐日流量和逐日水位观测数据;③鄱阳湖流域14个气象站2019年逐日降水量和蒸发量数据;④水文地质钻孔数据;⑤30 m精度的数字高程数据;⑥Landsat 8 OLI_TIRS 遥感影像数据(<http://www.gscloud.cn/>);⑦开采量来自江西省水资源公报。

2 地下水流数值模拟

2.1 水文地质概念模型

根据研究区水文地质条件,模型模拟的主要对象

为鄱阳湖流域平原区与湖区第四系松散孔隙含水层,未包含主要入湖支流中下游狭长河谷。据此确定的模拟区南北长180 km,东西长161 km,模拟总面积12 131.19 km²(图2)。模型西北侧修水与博阳河间的边界处是松散孔隙含水岩组,西侧锦河流入的边界以及东侧信江与昌江间的边界是富水程度中等的碎屑岩类夹碳酸盐岩类含水岩组,南侧赣江流入边界处是富水程度强的松散孔隙含水岩组,以上均概化为流量边界。其余边界处为侵入岩和变质岩,富水性较弱,概化为隔水边界(图2)。

平原区第四系松散孔隙含水层是本研究的目标含水层。上部由亚黏土、亚细砂结构的土壤组成,厚度为5~10 m,渗透系数较小,在赣抚平原较为发育,河谷区厚度较小;下部主要为中粗砂和砂砾石,厚度

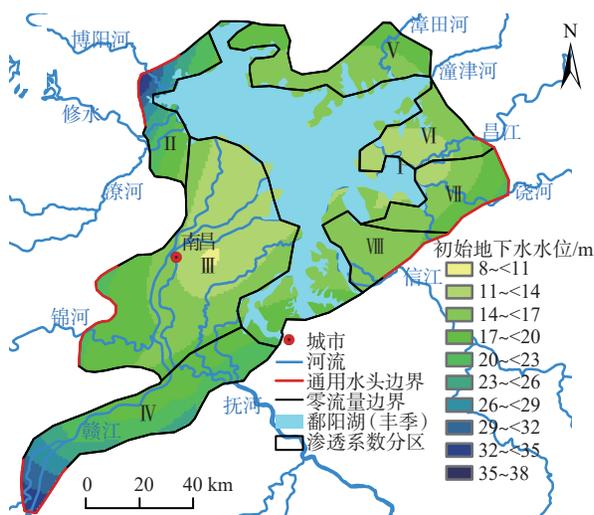


图 2 模型范围、边界类型以及模型渗透系数分区

Fig. 2 Model domain, boundary types and zonation of hydraulic conductivity in the model

为 10~20 m, 分布厚度自上游向下游递增, 渗透系数

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega, t \geq 0 \\ H(x, y, z, t)|_{t=0} = H_0(x, y, z) & (x, y, z) \in \Omega \\ K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ω ——地下水渗流区域;

H ——地下水水头/m;

Γ_2 ——模型的第二类边界;

K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} —— x 、 y 、 z 主方向的渗透系数/ $(m \cdot d^{-1})$;

W ——源汇项/ $(m^3 \cdot d^{-1})$;

S_s ——储水率/ m^{-1} ;

t ——时间/d;

q ——第二类边界上已知流量函数。

2.3 地下水流数值模型

采用 Visual MODFLOW 软件构建鄱阳湖平原区三维地下水流数值模型。研究区被离散为 150 m×150 m 的网格单元, 在垂向上被剖分为 4 层。

2.3.1 初始条件与源汇项

基于已获得的鄱阳湖流域降水、蒸发等资料及观测井的水位动态变化资料, 选取 2019 年 1 月 1 日—12 月 31 日作为模型的模拟期, 每个月划分为一个应力期。初始流场通过 2019 年 1 月 1 日的地下水观测数据插值生成。

降水入渗补给和蒸发分别通过 RCH 和 EVT 模块计算。地下水开采通过 WEL 模块计算, 开采量数据来自《江西省水资源公报》。边界处的侧向径流补给

为 2~60 m/d; 含水层底板以下主要为砂岩组成, 为相对隔水层。

模拟区内第四系含水层的主要补给来源是大气降水入渗补给、地表水体的渗漏和侧向径流补给, 而地下水排泄方式包括蒸发、向地表水排泄以及人工开采。鄱阳湖水量平衡的收入项包括湖面降水量、入湖径流量和地下水向湖泊排泄量, 支出项包括湖泊蒸发量、出湖径流量和湖泊对地下水补给量。当湖泊面积缩小, 裸露的部分需要重新计算蒸散量。其中, 降水量和蒸发量由气象站测得, 五河入湖水量由五河七口水文站测得流量相加, 出湖流量为湖口站测得流量。湖水-地下水交换量是由模型根据湖水位与地下水水位之间的水力梯度计算得出。

2.2 数学模型

根据鄱阳湖研究区水文地质概念模型, 建立相应的地下水流数学模型, 可用微分方程表示:

利用通用水头边界 (general head boundary, GHB) 计算。研究区内主要的地表水体有河流和湖泊, 河流和湖泊的位置根据遥感影像中水体的位置确定。将研究区内修水、赣江、抚河、信江和饶河 5 条干流及其支流概化成河流边界, RIV 子程序模块根据河流与含水层之间的水力梯度计算河水-地下水之间的转换关系。当河流穿过模型边界时, 边界处的单元格按照 RIV 设置, 河流水位根据水文站实测数据输入 RIV 模块。

采用 LAK3 模块输入各支流向鄱阳湖汇流的流量和鄱阳湖流入长江的水量以及降水量和蒸发量, 基于湖泊水量平衡与湖盆形状刻画湖水位与湖面积变化。LAK3 模块首先根据输入的湖泊初始水位和地下水水位, 基于达西公式计算湖泊渗漏量; 再建立湖泊水均衡方程, 根据补给量和排泄量, 与由湖盆的几何形状得到的库容曲线结合计算下一应力期的湖泊水位^[19]。

2.3.2 湖泊水体面积变化处理

将湖泊从垂向上概化为 2 部分, 下层湖泊单元处于常年有水的状态, 湖泊体积保持不变; 上层湖泊单元的体积将随着模拟的湖泊面积和湖水位而变化。第一层的湖泊范围根据 2019 年 7 月遥感影像即鄱阳湖年内最大面积设置, 模型根据计算出的水位判断是

否淹没第一层湖泊单元,如果湖泊水位低于湖底高程,这个单元格将不再按湖泊单元进行计算,当干涸的单元再次被湖水淹没时将被重新计算为湖泊单元,从而实现对鄱阳湖动态变化的湖水面积的模拟。模型第二层的湖泊单元表示鄱阳湖常年有水的区域,零星的碟形湖与常年有水的河道区域相连接,范围根据2019年11月遥感影像提取的水体范围确定。

该模型较准确地表示了湖泊的周长和面积。湖底数字高程模型(digital elevation model, DEM)由湖底水深测量数据生成,与研究区DEM合并重采样后应用于模型。利用LAK3模块,基于1、2层地形测深计算的水位-体积关系,确定每个应力期的湖水位。随着湖区的缩小,第1层未被湖水淹没的区域发生入渗补给和蒸散发,随着湖区的扩大,地下水可以通过新淹没的单元进行交换。

2.4 模型识别与验证

2.4.1 参数识别

根据模拟区水文地质条件,结合模型校正,确定含水层渗透系数、给水度、降雨入渗补给系数和蒸发折算系数等主要参数的分区。其中,渗透系数、降雨入渗补给系数和蒸发折算系数对模型较为敏感,通过人工试错法进行参数校正,使模拟效果满足精度要求。渗透系数分区和校正后各层参数取值见图2和表1。降雨入渗补给系数在丰水期一般小于0.008;在枯水期大于0.12,最大为0.26^[24]。

表1 研究区各分区渗透系数取值
Table 1 The hydraulic conductivity values in each subdomain of the study area / (m·d⁻¹)

参数区编号	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
第1~3层渗透系数	0.1	5	15	20	35	15	25	5
第4层渗透系数	10	10	20	25	35	20	25	15

2.4.2 模型的验证与可靠性评价

选择2019年1月1日—12月31日作为模型的识别期与参数校核期,采用相关系数(R)和均方根误差(RMSE)评价模型可靠性。湖水位模拟值与实测值的均方根误差为0.225 m, R 为0.998。研究区内有长期观测孔13个,连续观测365 d,均方根误差为0.571 m, R 为0.995。选择3个代表性观测孔进行分析,结果见图3,其中观测井Obs1位于赣江流域,观测井Obs2位于抚河流域,观测井Obs3位于鄱阳湖湿地。在模拟期内,地下水水位模拟值与实测值之间的趋势大致相同,均方根误差为0.587 m, R 为0.994。可见,该模型可以反映出研究区内地下水水位变化特征。

3 结果分析

3.1 湖泊水位和面积变化特征

选取星子站、都昌站和康山站的实测月平均水位及3个水文站平均水位与模型的模拟结果进行比较,结果如图3(e)所示。康山站位于鄱阳湖南部,处于湖体常年有水的区域,而都昌站和星子站位于研究区北部,地势较低。在丰水期,康山站与都昌站的湖水位较接近,其余时节康山站水位比都昌站高出0~3 m。1—8月,星子站月平均水位最低,与康山站最大平均水位差达5.3 m;退水期之后,都昌站水位骤然下降,低于星子站水位。模型对湖水位的模拟值与3个水文站湖水位平均值较为接近,说明模型可以在一定程度上体现湖水位平均的变化趋势。无论是实测湖水位还是模拟值,鄱阳湖水位都呈现了明显的季节性变化,其水位特征可以与遥感影像解译结果很好地相互印证。

采用来自Landsat 8的遥感影像数据,经大气校正后利用归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)对鄱阳湖水体信息进行提取,将模型所模拟的湖泊范围与利用归一化差异水体指数提取的水体信息进行对比,见图4。由遥感影像可知,枯水期(1月)湖面积较小,整体呈现“河相”,湖水位较低,湖水归于主河槽,碟形湖与主湖区脱离,洲滩露出;随着降水逐渐增加,涨水期到来(3月),湖水位逐渐升高,湖面积也随之扩张,此时鄱阳湖呈现“湖相”,洲滩逐渐被淹没;随着丰水期(7月)的到来,湖水位和湖面积达到峰值,洲滩已全部被淹没;9月鄱阳湖迎来退水期,湖泊水位骤然下降,湖面积萎缩,逐渐回归“河相”;之后随着降雨逐渐减少,湖面积持续缩小,鄱阳湖再次迎来枯水期。模型对湖泊范围的模拟结果也呈现季节性变化,模拟出的湖泊范围与遥感影像提取的水体信息范围大致重合。归一化差异水体指数提取的3、7、9月的水体面积相比前1个阶段的变化比例分别为增加79%、增加21%和减少49%;模型模拟的3、7、9月的水体面积相比前1个阶段的变化比例分别为增加83%、增加24%和减少42%。由此看来,该模型可以在一定程度上反映湖泊水体的扩张和退缩,能够体现出鄱阳湖水面积高度动态变化的特征。

3.2 地下水流场特征

模拟区内地下水流从鄱阳湖四周的平原区流向湖区,主要受到地势和地形地貌的影响,鄱阳湖东西两侧存在2个局部分布的地下水水位降落漏斗。赣

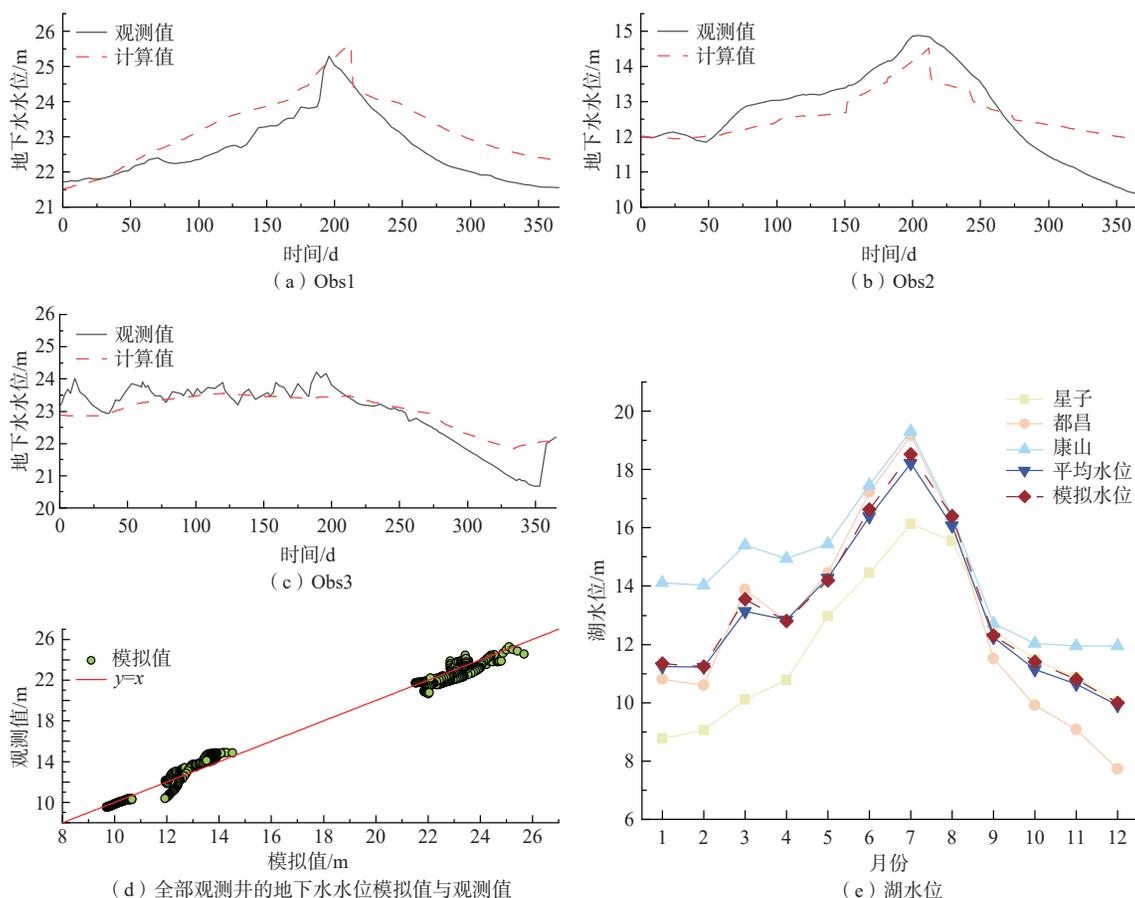


图 3 Obs1、Obs2、Obs3 地下水水位模拟值与观测值对比及湖水位模拟值与观测值对比图

Fig. 3 (a) - (d) Comparison of the simulated and observed groundwater levels; (e) Comparison of the simulated and observed lake level

抚平地区区和修水流域地下水水位较高，鄱阳湖东部平原区相对于西部地区地下水水位较低。从模拟期内地下水流场的变化看，在枯水期，湖区周围地下水水位较低，由于此时湖面积较小，湖体中心地下水水位相比两侧滩地地下水水位较高。随着降水量增加，湖面积逐渐扩张，湖体中心及湖区两侧地下水水位也逐渐抬升，区内地下水水位总体呈现抬升的趋势。丰水期时湖面积达到最大，此时湖水-地下水的交换关系转变为湖水补给地下水，湖区及周围地下水水位明显抬升，抬升面积也逐渐扩大。之后随着湖面积的缩小，含水层补给湖水，地下水水位逐渐降低。如图 5 所示，在枯水季节鄱阳湖呈现河相时，湖区地下水水位低于周围含水层地下水水位，四周地下水向湖流动；7 月，湖面积扩张至最大，此时可以看出湖区地下水水位明显高于周围地下水水位，且在赣江、抚河和信江流经地区，地下水水位也有明显抬升。总体看，丰水期相对于枯水期，湖区及周边地下水水位平均抬升 2~3 m，地下水流由湖区中心流向周边地区，湖泊与地下水的补给关系与枯水期相反。

将地下水监测数据形成的水位等值线与模拟流场进行对比，模拟的流场特征与天然状态下的流场特征基本吻合。采用这一建模方式建立的鄱阳湖平原区地下水流数值模型较为精准地模拟了湖水位的波动与湖水面积的消长，更好地刻画了地下水流场的情势，可以为鄱阳湖平原区地表-地下水相互作用分析提供有力的支撑。

4 讨论

4.1 湖泊水均衡的季节性特征

模型计算结果表明，入湖流量和出湖流量分别是鄱阳湖最主要的补给项和排泄项，对湖泊水量变化起着主导作用，入湖流量和出湖流量过程变化趋势大致相同。由图 6 所示，降水量和入湖流量主要集中在 2—7 月，此时的湖泊水量总体呈现增长的趋势，湖面积逐渐扩张，湖泊向含水层的排泄量逐渐增大。8 月，出湖流量超过入湖流量，且降水量急剧减少，蒸发较为强烈，此时湖泊水量骤然减少，湖水位猛然下降。随着出湖流量的逐渐减少和降水量的回升，湖泊水量

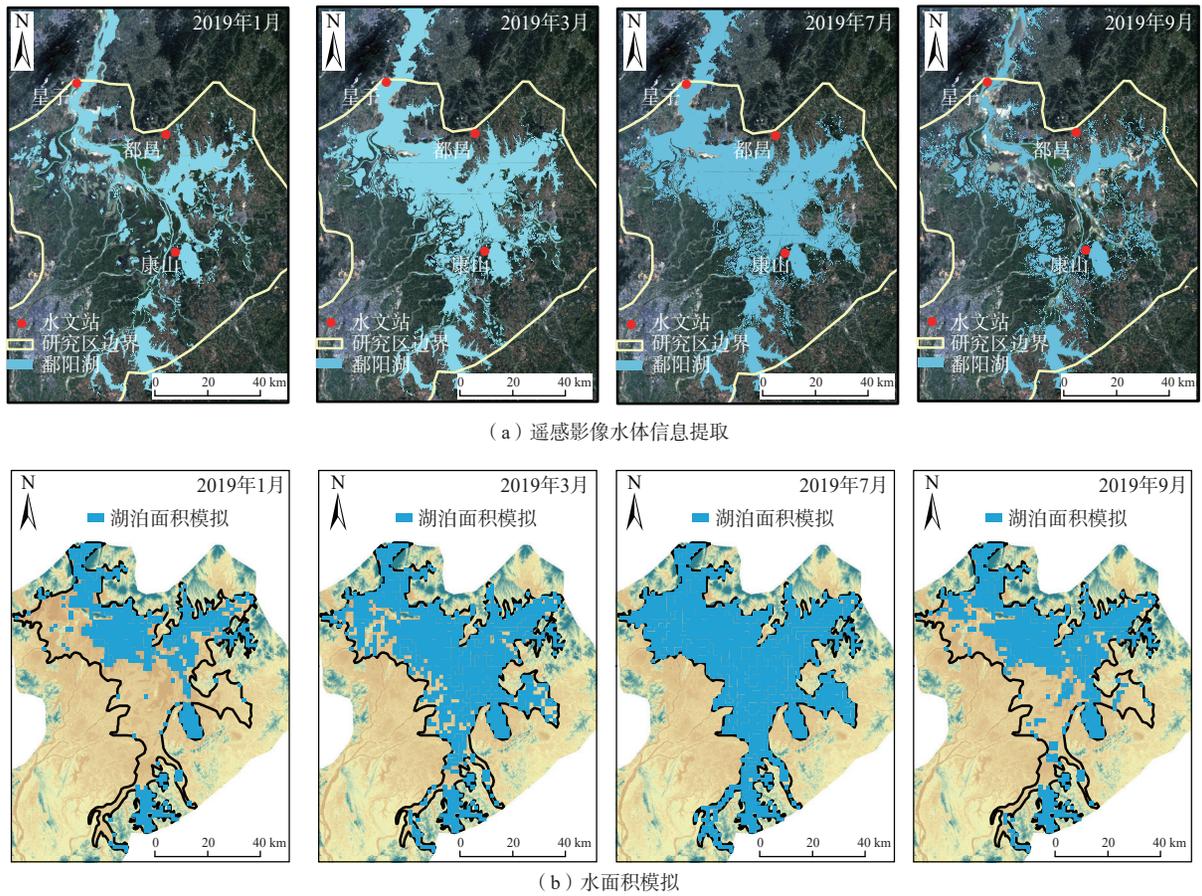


图 4 鄱阳湖遥感影像水体信息提取图及水面积模拟图

Fig. 4 Poyang Lake water body information extraction of remote sensing image and water area simulation

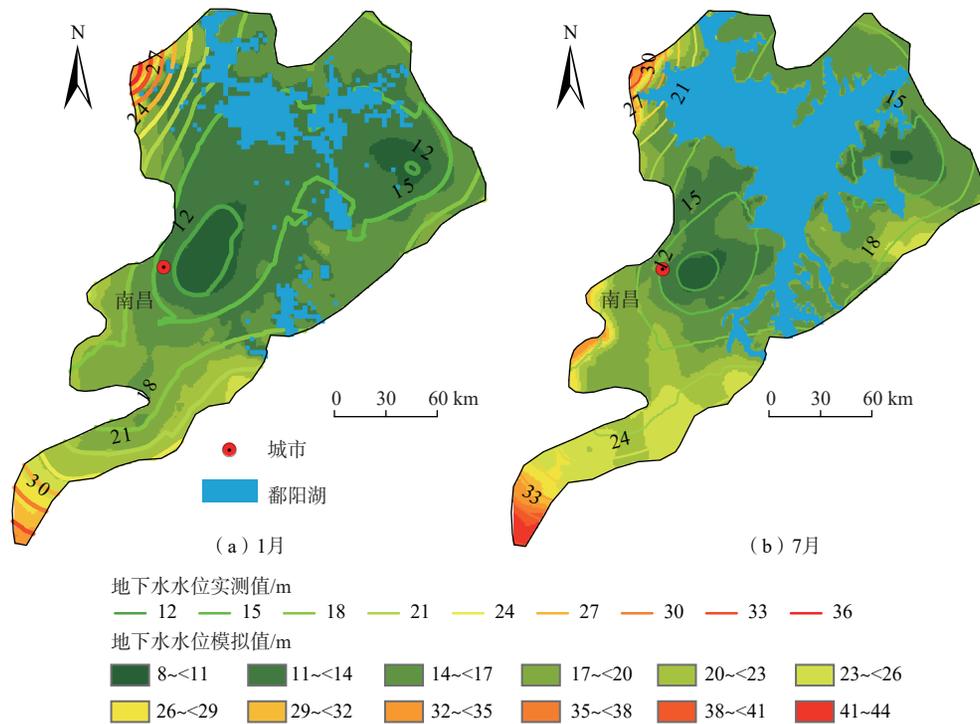


图 5 2019 年 1 月和 7 月地下水流场模拟结果对比图

Fig. 5 Comparison of the simulated groundwater flow fields in January and July, 2019

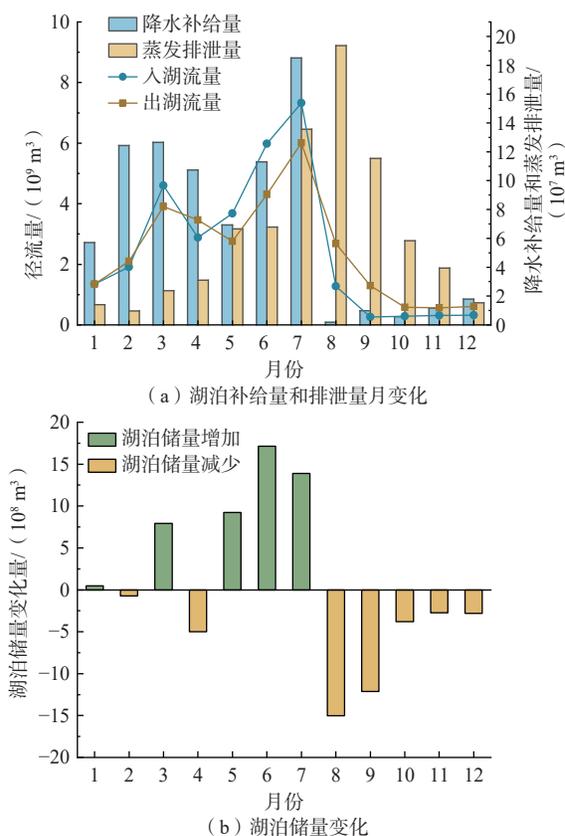


图 6 湖泊水均衡模拟结果图

Fig. 6 Lake water budget simulation results

减少的程度逐渐减弱,湖水位平稳下降,逐渐迎来枯水期。此时,地下水向湖泊的补给量逐渐增加。

4.2 地下水水均衡的季节性特征

地下水水均衡分析表明,湖泊对地下水的补给占 17.43%,地下水向湖泊的排泄占 24.91%。因此,研究区内地表水与地下水关系密切,探究湖水-地下水转换关系对研究区内水量平衡至关重要。从年内变化趋势(图 7)看,1—7 月含水层以接受外部补给为主,8—12 月含水层以向外排泄为主。8 月份时,鄱阳湖虽然处于丰水期,湖面积较大,但此时研究区内降水较少且蒸发强烈,导致区内含水层呈现向外排泄为主的状态。总体来看,2019 年地下水均衡为负均衡,水均衡差为 $-2.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

从图 7 可以看出,鄱阳湖湖水-地下水转换关系存在明显的季节性特征,6—8 月湖泊处于丰水期,主要是湖水补给地下水,在 7 月份湖泊面积和对含水层的补给量同时达到峰值;在其他时段较为枯水的季节,主要是含水层补给湖水。特别是在 9 月,由于湖水位快速消落,水体面积萎缩,含水层与湖泊的交换关系转置。从全年的趋势看,进入含水层的水量与流出含

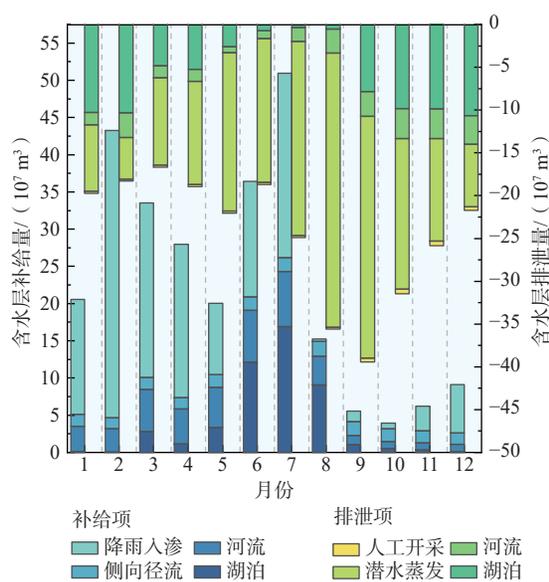


图 7 研究区补排关系图

Fig. 7 Recharge and discharge in the study area

水层的水量变化趋势大致相反,含水层向湖泊排泄的水量是接受湖泊补给水量的 1.5 倍。

综上所述,研究区在 2019 年内地表水-地下水相互作用与季节变化密切相关,含水层总体上在补给地表水体,5—8 月由地表水补给地下水,1—4 月、9—12 月主要是含水层向地表水排泄。

河水-地下水的转换也存在着明显的季节性特征,1—8 月主要是河水补给地下水,9—12 月含水层补给河水。从全年的交换量看,河水对地下水的补给量与含水层向河流的排泄量大致相等。

5 结论

(1)本研究采用 MODFLOW 构建了鄱阳湖平原区三维地下水流数值模型,利用 LAK3 模块计算湖泊水位与湖水面积。验证结果表明模型合理可靠,湖水位模拟值与实测值的均方根误差为 0.225 m,地下水水位模拟值与实测值的均方根误差为 0.571 m。鄱阳湖水面面积模拟值环比变幅为 $-41\% \sim 83\%$,与遥感影像结论吻合良好。

(2)构建的模型可定量计算湖水-地下水相互作用:丰水期时湖水位抬升,湖水面积达到最大,湖水-地下水的交换关系为湖水补给地下水,交换量为 $2.04 \times 10^7 \sim 16.53 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{mon}$,湖区及周围地下水水位明显抬升。枯水期时,平原区含水层补给湖泊,水量为 $2.03 \times 10^7 \sim 10.58 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{mon}$ 。该研究成果可为未来水资源管理和环境评价提供基础。

参考文献 (References) :

- [1] 杨中华,朱政涛,槐文信,等. 鄱阳湖水利调控对湖区典型丰枯水年水动力水质影响研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 156 - 167. [YANG Zhonghua, ZHU Zhengtao, HUAI Wenxin, et al. Study on the influence of Poyang Lake Hydraulic Project on hydrodynamics and water-quality in wet and dry year[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 156 - 167. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李刚,马佰衡,周仰效,等. 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 48 - 54. [LI Gang, MA Baiheng, ZHOU Yangxiao, et al. A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 48 - 54. (in Chinese with English abstract)]
- [3] PARIZI E, HOSSEINI S M, ATAIE-ASHTIANI B, et al. Quantifying lake-aquifer water exchange: The case of lake urmia, iran[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2022, 67(5): 725 - 740.
- [4] 束龙仓,栾佳文,宫荣,等. 傍河地下水位监测断面的优化设计[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(2): 555 - 565. [SHU Longcang, LUAN Jiawen, GONG Rong, et al. Optimal design of monitoring section for groundwater level beside the river[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 555 - 565. (in Chinese)]
- [5] 龙爱华,邓铭江,谢蕾,等. 巴尔喀什湖水量平衡研究[J]. 冰川冻土, 2011, 36(6): 1341 - 1352. [LONG Aihua, DENG Mingjiang, XIE Lei, et al. A study of the water balance of lake Balkhash[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 36(6): 1341 - 1352. (in Chinese with English abstract)]
- [6] JAVADZADEH H, ATAIE-ASHTIANI B, HOSSEINI S M, et al. Interaction of lake-groundwater levels using cross-correlation analysis: A case study of Lake Urmia Basin, Iran[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138822.
- [7] XU S, FREY S K, ERLER A R, et al. Investigating groundwater-lake interactions in the Laurentian Great Lakes with a fully-integrated surface water-groundwater model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125911.
- [8] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李云良,姚静,谭志强,等. 鄱阳湖洪泛区碟形湖域与地下水转化关系分析[J]. 水文, 2019, 39(5): 1 - 7. [LI Yunliang, YAO Jing, TAN Zhiqiang, et al. Interactions between typical sublakes and groundwater in floodplains of Poyang Lake[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(5): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [10] LIAO Fu, WANG Guangcai, YI Lixin, et al. Applying radium isotopes to estimate groundwater discharge into Poyang Lake, the largest freshwater lake in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124782.
- [11] LI Yunliang, ZHANG Qi, LU Jianrong, et al. Assessing surface water-groundwater interactions in a complex river - floodplain wetland - isolated lake system[J]. *River Research and Applications*, 2019, 35(1): 25 - 36.
- [12] 吴雯倩,靳孟贵. 淮北市地下水流数值模拟及水文地质参数不确定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 21 - 28. [WU Wenqian, JIN Menggui. Numerical simulation of groundwater flow near Huaibei and uncertainty analysis of the hydrogeological parameters [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 21 - 28. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 兰盈盈,曾马荪,靳孟贵,等. 基于GMS鄱阳湖拟建枢纽对地下水影响探讨[J]. 水文, 2015, 35(6): 37 - 41. [LAN Yingying, ZENG Masun, JIN Menggui, et al. Discussion on effects of proposed water structure on poyang lake groundwater using GMS[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(6): 37 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 宋炎炎,张奇,姜三元,等. 鄱阳湖湿地地下水埋深及其与典型植被群落分布的关系[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 123 - 133. [SONG Yanyan, ZHANG Qi, JIANG Sanyuan, et al. Groundwater depth and its relation with typical vegetation distribution in the Poyang Lake wetland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 123 - 133. (in Chinese with English abstract)]
- [15] WANG Zhenchen, YANG Y, CHEN G, et al. Variation of lake-river-aquifer interactions induced by human activity and climatic condition in Poyang Lake Basin, china[J].

- Journal of Hydrology*, 2021, 595: 126058.
- [16] ZHOU Pengpeng, WANG Guangcai, MAO Hairu, 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.
- [17] 郭云彤, 周妍, 崔亚莉, 等. 基于GSFLOW的青土湖生态输水量-湖水面积关系研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 32 – 41. [GUO Yuntong, ZHOU Yan, CUI Yali, et al. A study of the relationship between ecological water conveyance and water surface area of the Qingtu Lake based on GSFLOW [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 32 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [18] HUNT R J, HAITJEMA H M, KROHELSKI J T, et al. Simulating ground water-lake interactions: approaches and insights [J]. *Ground Water*, 2003, 41(2): 227 – 237.
- [19] MERRITT L M, KONIKOW L F. Documentation of a computer program to simulate lake-aquifer interaction using the modflow ground water flow model and the moc3d solute-transport model [R/OL]. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/wri004167>.
- [20] 王亚琴, 杨军耀, 刘庆, 等. 基于Modflow和LAK3的三泉水库渗漏量研究 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(2): 59 – 63. [WANG Yaqin, YANG Junyao, LIU Qing, et al. Research on leakage of Sanquan Reservoir based on modflow and LAK3 [J]. *Yellow River*, 2019, 41(2): 59 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [21] YIHDEGO Y, RETA G, BECHT R. Human impact assessment through a transient numerical modeling on the UNESCO World Heritage Site, Lake Naivasha, Kenya [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(1): 9.
- [22] ZHANG Bo, ZHENG Xilai, ZHENG Tianyuan, et al. The influence of slope collapse on water exchange between a pit lake and a heterogeneous aquifer [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(2): 1 – 9.
- [23] FENG Lian, HU C, CHEN X, et al. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using modis observations between 2000 and 2010 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 80 – 92.
- [24] 中国水利水电科学研究院. 江西省鄱阳湖水利枢纽工程环境影响报告书 [R/OL]. http://slt.jiangxi.gov.cn/art/2022/5/9/art_28230_3948434.html. [China Institute of Water Resources and Hydropower. Environmental impact report of Poyang Lake water conservancy hub project in Jiangxi Province [R/OL]. (in Chinese)]

编辑: 张若琳