

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.062>



基于 SWAT-MODFLOW 的四湖流域地下水补排表征及土壤潜育化风险评价

康叶¹, 朱棋^{1*}, 刘慧¹, 文章¹, 刘路广², 李葵³, 吴梦琪²

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078

2. 湖北省水利水电科学研究院, 湖北武汉 430070

3. 湖北省汉江兴隆水利枢纽管理局, 湖北武汉 430062

摘要: 位于江汉平原的四湖流域是长江中游典型的江—河—湖—田多端元系统, 生态环境问题突出, 为了精确量化四湖流域内主要水系和地下水的交互速率, 分析影响流域内土壤潜育化程度的主要因素. 利用 SWAT-MODFLOW 模型构建四湖流域地表水—地下水耦合模型, 围绕模型结果, 对四湖流域内地表水和地下水交互速率的时空差异以及冷浸田分布情况进行分析探讨. 研究表明, 耦合模型对径流与地下水的模拟效果较好; 长江与地下水交换呈现明显季节性转化, 春夏季以江水补给地下水为主, 秋冬季则地下水排泄入江; 流域内长湖交互强度高于洪湖, 总干渠上下游表现出不同的交换模式; 土壤潜育化风险区(地下水埋深 < 3 m)主要分布于洪湖周边、总干渠沿线及监利市西北部, 受降水入渗、地形和土壤利用类型共同影响. 本研究为四湖流域水交换过程与土壤渍涝风险提供了定量依据, 可为区域水资源管理与生态保护提供科学支撑.

关键词: 四湖流域; SWAT-MODFLOW 模型; 地表水—地下水交互规律; 土壤潜育化; 水文地质; 环境地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2026)06-2173-14

收稿日期: 2025-12-16

Characterizing Groundwater Recharge-Discharge Processes and Evaluating Soil Submergence Risk in Four-Lake Basin Using SWAT-MODFLOW Coupled Model

Kang Ye¹, Zhu Qi^{1*}, Liu Hui¹, Wen Zhang¹, Liu Luguang², Li Yan³, Wu Mengqi²

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

2. Hubei Water Resources and Hydropower Science Research Institute, Wuhan 430070, China

3. Hubei Hanjiang Xinglong Water Control Project Administration Bureau, Wuhan 430062, China

Abstract: The Four-Lake basin in the Jiangnan plain is a typical river-lake-wetland-farmland multi-element system in the Middle Reaches of the Yangtze River, facing prominent eco-environmental challenges. To accurately quantify the exchange rates between

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(Nos.U2340206; U23A2042); 国家自然科学基金面上项目(No.42572313); 湖北省科技创新平台计划项目(No.2025CSA007); 湖北省联合基金项目(No.2023AFD194); 湖北省水利重点科研项目(No.HBSLKY202408).

作者简介: 康叶(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地表水—地下水交互模拟. ORCID: 0009-0002-8291-991X. E-mail: kkyeah123@163.com

*** 通讯作者:** 朱棋, 副教授, 主要研究方向为地表水—地下水交互数值模拟. ORCID: 0000-0002-5973-0468. E-mail: zhuqi@cug.edu.cn

引用格式: 康叶, 朱棋, 刘慧, 文章, 刘路广, 李葵, 吴梦琪, 2026. 基于 SWAT-MODFLOW 的四湖流域地下水补排表征及土壤潜育化风险评价. 地球科学, 51(6): 2173–2186.

Citation: Kang Ye, Zhu Qi, Liu Hui, Wen Zhang, Liu Luguang, Li Yan, Wu Mengqi, 2026. Characterizing Groundwater Recharge-Discharge Processes and Evaluating Soil Submergence Risk in Four-Lake Basin Using SWAT-MODFLOW Coupled Model. *Earth Science*, 51(6): 2173–2186.

major water systems and groundwater in the basin and to analyze the main factors influencing the degree of soil gleyization, this study constructed a loosely coupled surface water-groundwater model for the Four-Lake basin using SWAT-MODFLOW. Based on the simulation results, the spatiotemporal variation in surface water-groundwater exchange rates and the distribution of cold waterlogged paddy field were systematically examined. The results show that the coupled model performs well in simulating both runoff and groundwater dynamics. The exchange between the Yangtze River and groundwater exhibits clear seasonal reversals: river water recharges groundwater in spring and summer, while groundwater discharges into the river in autumn and winter. Within the basin, the interaction intensity of Changhu Lake is higher than that of Hong Lake, and the main canal shows different exchange patterns between its upstream and downstream sections. The risk areas of soil gleyization (groundwater depth < 3 m) are mainly distributed around Honghu Lake, along the Four-Lake main canal, and in the northwest of Jianli City, influenced jointly by rainfall infiltration, topography, and land-soil types. This study provides a quantitative basis for understanding water exchange processes and soil waterlogging risks in the Four-Lake basin, offering scientific support for regional water resources management and ecological conservation.

Key words: Four-Lake basin; SWAT-MODFLOW coupling model; SW-GW interaction dynamics; soil gleyization; hydrogeology; environmental geology.

0 引言

地下水是维系众多河湖湿地生态健康的“隐形血脉”,其不仅提供湿地的基础水源、调节水文节律,还能维持湿地的水质稳定和生物多样性(Balerina *et al.*, 2024).湿地地下水受气候和人为双重影响下外部水动力条件的强烈影响(Kirwan and Megonigal, 2013),地表水与地下水间的水力联系成为维系湿地水量和水质安全的关键(Winter, 1999; Shuai *et al.*, 2019).因此,阐明地表水影响下地下水补排的时空变化规律,有助于科学制定河湖湿地的水资源管理策略,提高其生态环境的风险抵抗力.位于江汉平原的四湖流域广泛分布河流、湖泊、水库及农田,是三峡大坝下游第一个沿江大型湿地生态系统.作为长江中游生态系统稳定的重要缓冲地,该流域在防洪蓄洪、维持区域生态平衡和促进湿地农业经济发展方面具有举足轻重的地位(Zhou *et al.*, 2013).然而,自三峡大坝运行以来,以四湖流域为代表的长江中游地下水体中的氮磷污染问题日益突出,土壤潜育化程度发生显著变化(Xiao *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023).这些水生态环境演变过程的核心驱动力是水循环过程,而地表水和地下水的交互又是其中最为复杂的一环.

研究四湖流域内的地表水—地下水交互面临着独特的挑战,这是因为该流域中许多湖泊、河流和农业湿地主要通过地下水与长江进行交换(Deng *et al.*, 2016).然而,长江沿岸的沉积环境和水文地质条件空间上高度异质,河岸带同长江的水力交互特

征在区域范围内存在显著差异,而上游三峡大坝的调度影响又加剧了其地下水补排特征的复杂性(Feng *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023; Lai *et al.*, 2025).除上游大型水利工程的影响外,四湖流域复杂的防洪蓄水网络进一步增加了其地表水—地下水相互作用研究的难度.由人工调控的电排站干扰了长江与流域内部水系之间的自然水文联系,改变了地下水流动的动力学特征,导致地下水补排的量化变得更加困难.

对于地表水—地下水时空交互极为复杂的流域,以四湖流域所在的江汉平原为例,大量研究(Du *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2022; 周子皓等, 2024)通过建立剖面模型或区域模型,量化分析了地表水—地下水的相互作用过程.然而,这些研究未能充分考虑季节性波动以及四湖流域人工调控对四湖流域大尺度下地表水和地下水补排过程的影响.相比之下,大尺度的地表水—地下水耦合建模方法(如 SWAT-MODFLOW)已成功应用于区域规模的水循环研究(Aliyari *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2024).作为典型的平原水网区,四湖流域人工调控的复杂性主要体现在闸门泵站的调蓄极大改变了流域内的天然地表水文过程,这就要求模型能够准确刻画人工调控影响下的产汇流过程. SWAT(soil and water assessment tool)模型是一个基于物理机制的空间分布式流域模型,可将流域划分为子流域和更小的水文响应单元,这种结构能够在河网空间上对水利工程进行精确定位,例如可以将闸泵调度设置在具体的节点或子流域出口,而湖泊水库则可以作为具有独立调蓄特征的单元进行处理.在 SWAT 胜任地表

水文过程变化的基础上,再通过其与MODFLOW耦合,则能够良好地应用于本地化的地表水—地下水交互研究.因此,本研究构建了四湖流域SWAT-MODFLOW耦合模型,为量化人工调控背景下四湖流域的地表水—地下水交换规律提供了一个有效手段.

此外,土壤潜育化长期以来一直是四湖流域农业发展的关键制约因素,它是指在自然或人为因素作用下,土壤长期被地下水浸渍而发生还原作用的过程,该过程是影响四湖流域作物根系的生长环境,并形成冷浸田的核心机制,其本质受控于不协调的地下水补排过程(Balerna *et al.*, 2023).然而,针对冷浸田的现有研究主要集中于土壤利用模式、生境特征、改良措施等方面(董稳军等, 2013; Si *et al.*, 2018),这些工作主要集中在土壤理化性质改良和冷浸田治理方面,缺乏关于冷浸田区域地下水动态演变的相关研究.这一知识空白阻碍了对流域内冷浸田空间分布及形成机制的全面理解,从而限制了有效水资源管理和生态保护策略的实施.因此,有必要开发专门的地表水—地下水耦合模型,量化地表水影响下地下水水位的时空分布动态,进而识别表征冷浸田分布区域,为优化水资源管理和加强生态保护提供科学依据.

综上所述,四湖流域内地表水与地下水的补排规律受到气候、水文地质与水利调度多重因素的影响,展现出复杂的时空差异性,增加了流域内以冷浸田为代表的生态问题的治理难度.因此,本文基于SWAT-MODFLOW构建四湖流域地表水和地下水耦合模型,量化年内不同时期四湖流域主要水系和地下水的交互速率变化,并基于模型结果分析影响流域内土壤潜育化的因素,为四湖流域水资源管理、土壤潜育化评估和生态环境保护提供技术支撑和科学依据.

1 研究区概况

四湖流域位于三峡水库下游,长江中游北岸(图1),地理坐标为经度范围 $112.01^{\circ}\text{E}\sim 114.09^{\circ}\text{E}$,纬度 $29.44^{\circ}\text{N}\sim 31.08^{\circ}\text{N}$.其西北以荆门、江陵两县丘陵地带的自然分水岭和漳河灌区为界,北侧以汉江流域的地表分水岭为界,南侧和东部均以长江为界,总面积约为 $11\,547\text{ km}^2$.该地区多年平均降雨量和蒸发量分别为 $1\,269\text{ mm}$ 和 $1\,200\text{ mm}$,降水主要集中在4—8月,常伴随高温天气,蒸发主要集中在

4—10月,年平均气温 $15\sim 17^{\circ}\text{C}$ (冷智超等, 2022).

四湖流域整体地势平坦,平均海拔为 27 m ,区内湖泊众多,河渠密布,主要湖泊包括洪湖和长湖.四湖总干渠作为区域内的主干渠道,上起长湖,下止洪湖,最终汇入长江.根据埋藏条件,研究区含水层可以分为潜水含水层和承压含水层,其中,潜水孔隙含水层主要分布在长江一级阶地,以及长江和汉江共同作用的中间地带区域,主要岩性为粉质黏土、粉土、粉砂,局部地段有薄层砂砾石层,厚度一般 $3\sim 10\text{ m}$;承压含水层分为两层,上层孔隙承压含水层在研究区内分布最为广泛,岩性主要以黏土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、砂、砂砾石为主,含水层厚度变化较大,整体呈现平原腹地比边缘厚,东部较西部厚的规律,该层承压含水层与长江存在水力联系,为河流和地下水之间的水力交换提供了通道.下层承压含水层由砂砾石组成.

四湖流域地下水主要来源是降水以及河湖水体的入渗补给,其动态受季节降水和区域性地表径流的综合影响.流域内地下水埋深较浅,一般为 $2\sim 5\text{ m}$,为区域内农业生产生活提供重要水源.流域的主要土地利用类型是池塘、农田、城市、湖泊和河流,因此该地区也成为中国重要的农业和养殖生产基地.

2 研究方法数据来源

2.1 SWAT模型

SWAT模型属于典型的分布式水文模型,其核心原理是:在每个水文响应单元(HRU)上,首先应用传统的概念性模型来推求净雨;随后,在相邻HRU之间进行汇流演算,最终模拟出流域出口断面的流量过程.SWAT模型的核心优势在于能处理复杂土地利用和气候变化下大尺度流域的模拟(毕杨等, 2025).

本文采用SWAT模型,通过HRU划分技术实现土地利用/土壤类型空间异质性的精细化分,构建适用于"河—湖—闸"复杂调控系统的四湖流域SWAT模型.该模型不仅可量化气候变化与土地利用对地表径流的贡献率,更为后续耦合MODFLOW实现地表水—地下水耦合模拟提供边界条件.

构建四湖流域SWAT模型是利用ArcSWAT工具,需要收集整理四湖流域数字高程(DEM)、土地利用、土壤质地重分类数据及中国气象同化驱动

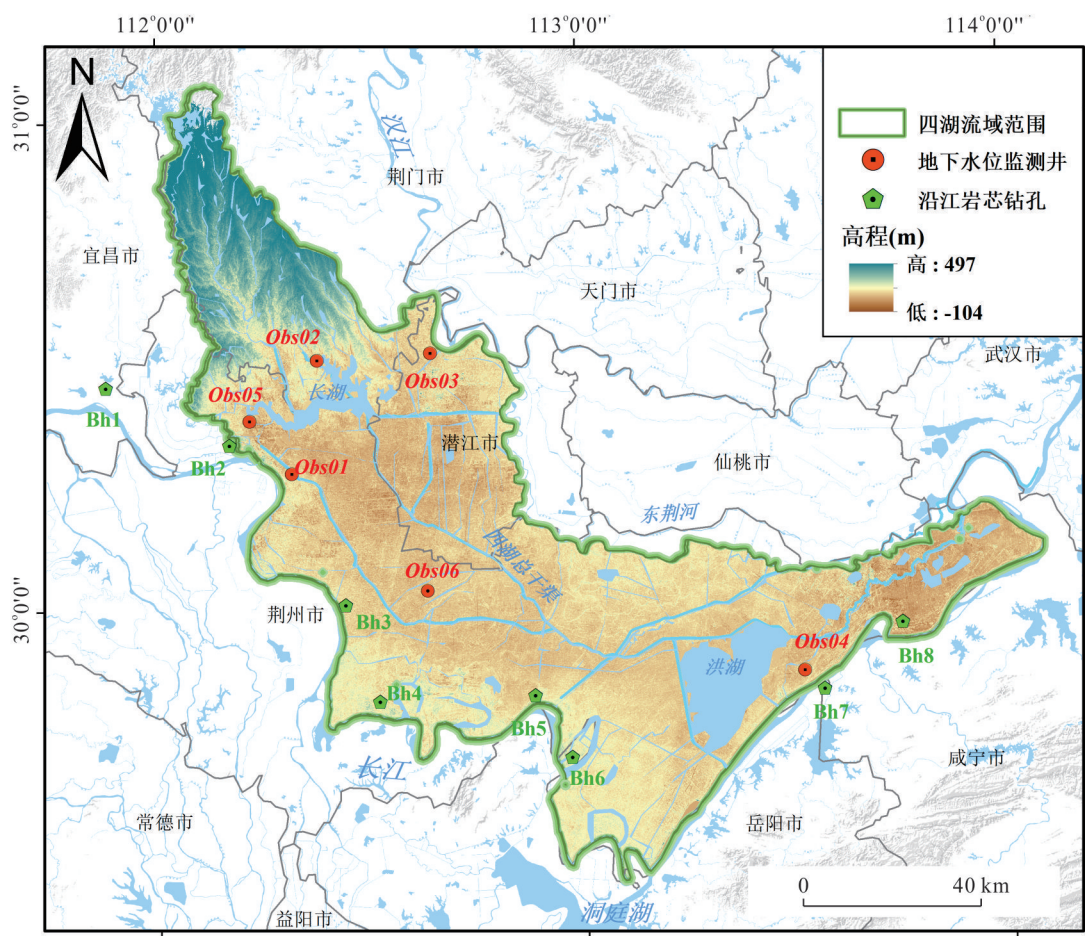


图1 四湖流域概况、地下水监测井和岩心钻孔分布

Fig.1 Overview of the Four-Lake basin with distribution of groundwater monitoring wells and core borings

表 1 SWAT模型数据类型和来源

Table 1 Data types and sources of the SWAT model		
数据类型	数据精度	数据来源
数字高程	30 m×30 m	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
土地利用类型	1 km×1 km	中国科学院资源环境科学与数据平台(https://www.resdc.cn)
土壤类型	30 m×30 m	世界土壤学数据库(HWSD)(https://www.fao.org/)
气象数据	1/8°×1/8°	中国气象同化驱动数据集(CMADSV1.2) (https://poles.tpdc.ac.cn)

数据集,数据精度和来源信息见表1.高程数据采用 ASTER GDEM V3 数字高程模型,为了提升 SWAT 模型生成流域河网与子流域边界的精度,在预处理阶段采用河道优先法消除了高程数据中的洼地;土地利用类型数据来源于2020年中国土地利用遥感监测数据集,该数据集涵盖了农田、林地、牧草地、水域、城镇建设用地和未利用地6个一级类型及25个二级类型,本文根据6类一级土地利用类型进行重分类预处理;从世界土壤数据库(HWSD)提

取出四湖流域的土壤栅格数据并进行重分类,利用经验公式和土壤计算软件(SPAW)将HWSD数据库原始属性数据转换为SWAT模型可以识别的user-soil数据库数据,并通过建立索引表实现user-soil数据库和土壤栅格数据之间的链接,以实现对研究区土壤类型栅格数据的属性赋值.

基于高程数据与河网(图2a),该流域被划分为35个子流域(图2b),随后,通过叠加预处理后的土地利用类型和土壤类型数据,最终生成了如图2e所

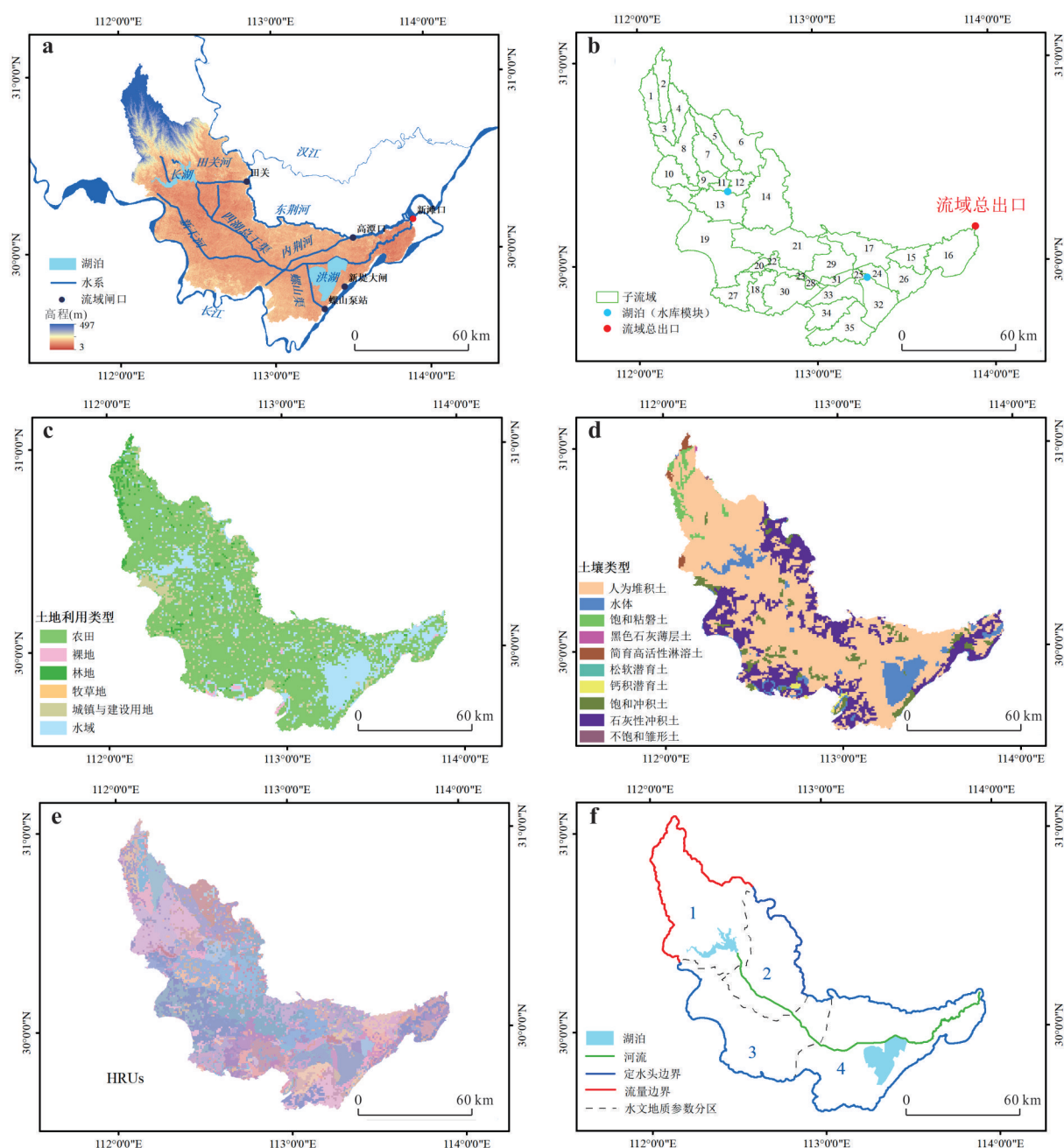


图2 四湖流域(a)高程、水系和主要排水闸口、(b)SWAT模型子流域划分、(c)土地利用类型、(d)土壤类型、(e)SWAT模型HRUs划分和(f)地下水模型的水文地质参数分区及边界条件设置

Fig.2 Maps of the Four-Lake basin: (a) elevation, stream network, and main sluices, (b) SWAT model subbasins division; (c) land use classification, (d) soil classification, (e) SWAT model HRUs and (f) hydrogeological parameter zonation and boundary condition configuration for the groundwater model

示的428个不同的水文响应单元.关于气象数据,本文从CAMADS V1.2数据集中提取了流域内部及周边288个监测站的数据.该模型模拟预热期是2008—2010年,2011—2014年是率定期,2015—2016年是验证期,时间步长为月.

在四湖流域的SWAT模型构建中,充分考虑了

排涝泵站及湖泊调度等人类活动对地表径流过程的显著影响.正如图2a所示,流域内的水文网由五条主要河渠(四湖总干渠、西干渠、田关河、内荆河、螺山渠)以及两个重要的调蓄湖泊(长湖和洪湖)组成.流域内部排水系统主要由4个关键闸口控制:(1)经田关闸排长湖水入东荆河;(2)经新堤大闸和

螺山泵站排洪湖水入长江;(3)经新滩口闸排四湖总干渠水入长江;(4)经福田寺节制闸排水入排涝河经高潭口泵站排入东荆河. 本文将4个出口概化为新滩口流域总出口,4个排水闸的排水总量作为流域总出口流量(尹述政等,2022). 此外,为了体现区域调蓄功能,洪湖和长湖在模型中采用目标库容法作为平原水库处理,具体见图2b(李蔚等,2018).

2.2 MODFLOW 模型

本文通过 Visual MODFLOW Flex 构建四湖流域地下水数值模型. 根据区域水文地质条件及钻孔岩性资料,将区域地下水系统概化为由上至下的3层结构:潜水含水层、隔水层和承压含水层,构建非均质各向异性非稳定流的地下水流模型. MODFLOW 模型中水平剖分成 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的网格,垂向分为3层,共33 450个有效单元网格. 水文地质参数及分区依据《江汉—洞庭平原地下水资源及其环境问题调查评价(湖北)》报告中的钻孔抽水试验结果来确定,其具体模型边界、水文地质分区和具体参数取值见图2f和表2. 地下水模拟时间为2011—2013年,时间步长为月.

2.3 SWAT-MODFLOW 模型耦合

为实现四湖流域地表水—地下水耦合模拟,本研究构建了基于月尺度通量传递的 SWAT-MODFLOW 单向耦合模型,其核心是在 SWAT 模型的水文响应单元(HRU)与 MODFLOW 模型的网格单元(Cell)之间建立空间链接. 耦合过程中,将 SWAT 模型在计算时间步长内输出的关键水文变量传递至 MODFLOW 模型:其中,下渗到含水层的水量(GW_RCHG)被概化为 MODFLOW 的补给项(RCH),而 HRU 上的实际蒸散发量(ET,包括土壤蒸发与作物蒸腾)则被概化为 MODFLOW 的蒸发项(EVT). 需要说明的是,本文构建的是基于通量的单向耦合模型,未考虑地下水位向地表水模型反馈的过程. 首先,在四湖流域人工排灌泵站的调控

下,地表水位剧烈波动,其对地下水的影响十分显著,相比之下,人工调蓄极大地加速了地表水文过程,地下水排泄对地表水的影响幅度则远小于人为调控引起的地表水位变幅. 总之,考虑地表水补给对地下水的影响的重要性远高于地下水排泄对地表水的影响,因此,在四湖流域采用单向的耦合模型模拟水文过程具有合理性与可行性.

具体操作流程如下:首先,从经过率定与验证的 SWAT 模型结果数据库 SWATOutput.mdb 中,导出每个 HRU 的逐月 GW_RCHG 与 ET 数据. 随后,在 ArcGIS 平台中,将 HRU 矢量图层与上述数据文件进行空间链接与属性关联,并将处理结果导出为 MODFLOW 可读取的 ASCII 数据集文件. 最终,这些数据文件被分别直接输入至 MODFLOW 的补给模块与蒸散模块,从而驱动地下水流的动态模拟过程.

3 结果与分析

3.1 SWAT-MODFLOW 耦合模型的可靠性

为评估模型可靠性,本研究分别对地表水与地下水模块进行了率定与验证. 由于 SWAT 模型参数多且复杂,模拟结果对不同参数的敏感性会因流域特征和模拟目标的不同产生差异. 因此,为了剔除低敏感参数,降低模型的不确定性并提升参数率定效率,首先要对参数进行敏感性分析. 本文使用 SWAT-CUP 工具进行敏感性分析,参考江汉平原 SWAT 模型的相关研究成果(王军霞,2015),初步选择了一系列参数进行敏感性分析,最终确定了对模型结果影响显著的17个参数用于模型的率定,表3给出了率定后的参数取值及其敏感性排序. 模型率定与验证均采用新滩口站(子流域16出口)2011—2016年的月尺度地表径流数据,其中2011—2014年的数据用于率定,2015—2016年的数据用于验证. 本文选择相关系数(R^2)和纳什效率系数

表 2 四湖流域 MODFLOW 模型的水文地质参数及分区
Table 2 Hydrogeological parameters and zonation for the MODFLOW model of the Four-Lake basin

水文地质 参数分区	水平渗透系数		垂向渗透系数		给水度	贮水率
	$K_x, K_y(\text{m/d})$		$K_z(\text{m/d})$		S_y	$S_s(\text{L}^{-1})$
	潜水含水层	承压含水层	潜水含水层	承压含水层	潜水含水层	承压含水层
1	1.00	9.75	0.150	1.1	0.021	0.000 4
2	1.5	16	0.302	1.6		0.002 2
3	0.79	7.7	0.120	0.85		0.001 0
4	0.54	4.9	0.081	0.57		0.002 3

表 3 SWAT 模型参数率定结果
Table 3 SWAT model parameter calibration results

参数	参数含义	取值范围	最优值	t-value	p-value	敏感性
GWQMN	基流判定系数	0~5 000	186.90	-30.89	0.00	1
REVAPMN	浅层地下水再蒸发系数	0~500	188.31	15.60	0.00	2
GW_DELAY	地下水延迟系数	0~500	232.39	-1.97	0.05	3
CH_N2	主河道曼宁系数	-0.01~0.30	0.11	1.91	0.06	4
SOL_BD	土壤湿容重	0.9~2.5	1.13	1.79	0.07	5
CH_N1	支流河道曼宁系数	0.01~30	20.30	-1.48	0.14	6
CH_K2	主河道河床有效水利传导度	-0.01~500	27.39	-1.22	0.22	7
SURLAG	地表径流延迟时间	0.05~24	15.11	-1.21	0.23	8
GW_REVAP	浅层地下水再蒸发系数	0.02~0.20	0.17	-1.20	0.23	9
SOL_AWC	土壤有效水容量	0~1	0.00	0.90	0.37	10
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.01~1	0.36	0.88	0.38	11
OV_N	坡面漫流的曼宁系数	0.01~30	17.89	-0.81	0.42	12
ALPHA_BNK	河岸基流 α 因子	0~1	0.33	-0.79	0.43	13
ALPHA_BF	基流回退系数	0~1	0.22	-0.47	0.64	14
SOL_K	土壤饱和和水力传导度	0~2 000	1 766.62	0.38	0.70	15
EPCO	植物蒸发补偿系数	0.01~1	0.38	0.16	0.87	16
CN2	SCS 径流曲线系数	35~98	35.34	-0.01	0.99	17

(NSE)对地表径流模拟的精确度进行评价, R^2 越接近 1,说明模型对于径流量的波动趋势捕捉得越准确;NSE 反映模拟结果相对于观测平均值的可靠程度,一般 $NSE>0.5$,说明模拟结果较好.图 3 可以看到 NSE 在率定期和验证期分别达到 0.7 和 0.65,对应的 R^2 分别为 0.76 和 0.67(显著性水平 $p<0.01$),两项指标均超过了可接受标准,且在统计学上显著,表明径流量的模拟值与实测值具有较高一致性.

其次,利用分布于流域内部的五口地下水监测井在(Obs1~Obs5,具体见图 1)2011—2013 年的观测水位数据,对 SWAT-MODFLOW 耦合模型进行了验证.由于模型的时间步长是月,实测地下水位数据是五日尺度,在计算相关系数时对模拟值进行了线性插值处理,来获取实测值所在时刻点的模拟值,便于相关系数的计算.由图 4 可见,在整个模拟期内,地下水位模拟值与实测值的 R^2 在 0.67~0.92 之间,拟合效果较好,模型能够有效再现区域地下水位动态过程.

本文中耦合模型的模拟时期主要集中在 2011—2013 年.经调研,模拟期的年均降雨量与近年的降雨水平基本相当,且涵盖了四湖流域多年来典型的“旱涝急转”年内气候过程;同时,该时段内四湖流域的土地利用格局与主要闸泵的调度模式已相对成熟,与当前情势基本吻合,因此,该时期的模拟能真实反映四湖流域当前的水循环特征.综合

结果显示,所构建的耦合模型能够较为可靠地模拟四湖流域的地表水-地下水相互作用.

3.2 四湖流域内主要水系与地下水交互速率的时空特征

3.2.1 主要水系与地下水交互速率的季节性差异

如图 5 所示,四湖流域内地表水(长江、四湖总干渠、洪湖及长湖)与地下水之间的交换速率在季节与空间上均存在显著差异.图 5 中,蓝色与红色分别表示长江补给地下水与地下水排泄入长江.为细致刻画空间变化,研究将长江与四湖总干渠沿线按约 15 km 间距进行分段,计算了地表水-地下水交换速率.

从图 5 可以看到,在春季(3—5 月)和夏季(6—8 月)以长江补给地下水为主导,而在秋季(9—11 月)和冬季(12—2 月),则以含水层向长江的排泄为主,这种差异主要受到季节性降水与长江水位调度变化的影响.在春季和夏季,充沛的降水促使大坝进行泄洪.巨大的下泄水量引起下游河段水位显著抬升,长江洪峰增大,河道水位波动加剧,从而增强了河水与邻近含水层之间的水力梯度,驱动了强烈的河水入渗并补给地下水.相反,在秋冬季的枯水期,上游泄洪减少导致河水位下降,水力梯度随之减小甚至转为负值,进而引发地下水向长江排泄.

在四湖流域内部,洪湖在年内补给地下水的速率大于地下水向洪湖的排泄速率,而长湖与地下水的相互作用模式呈现季节性反转,春夏以湖水补给

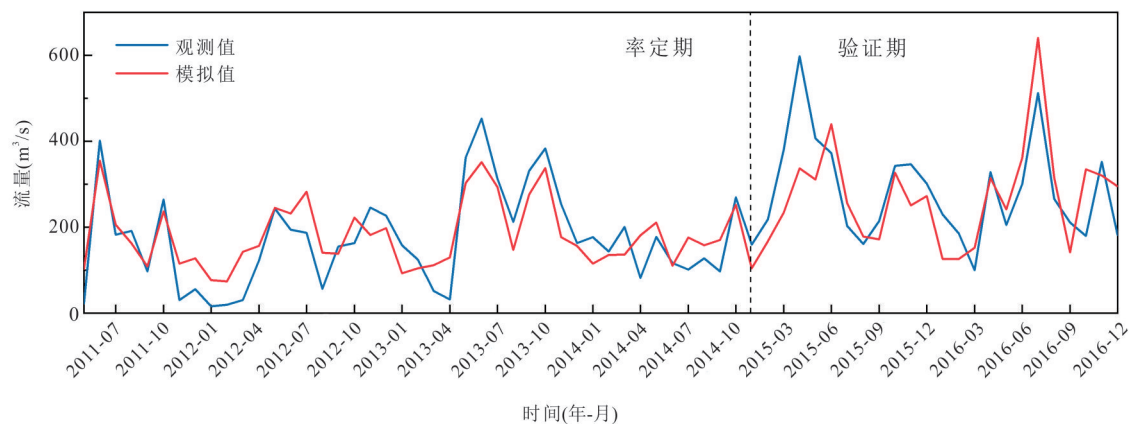


图3 新滩口站逐月径流量实测值和模拟值变化

Fig.3 Comparison of observed and simulated monthly runoff at the Xintankou station

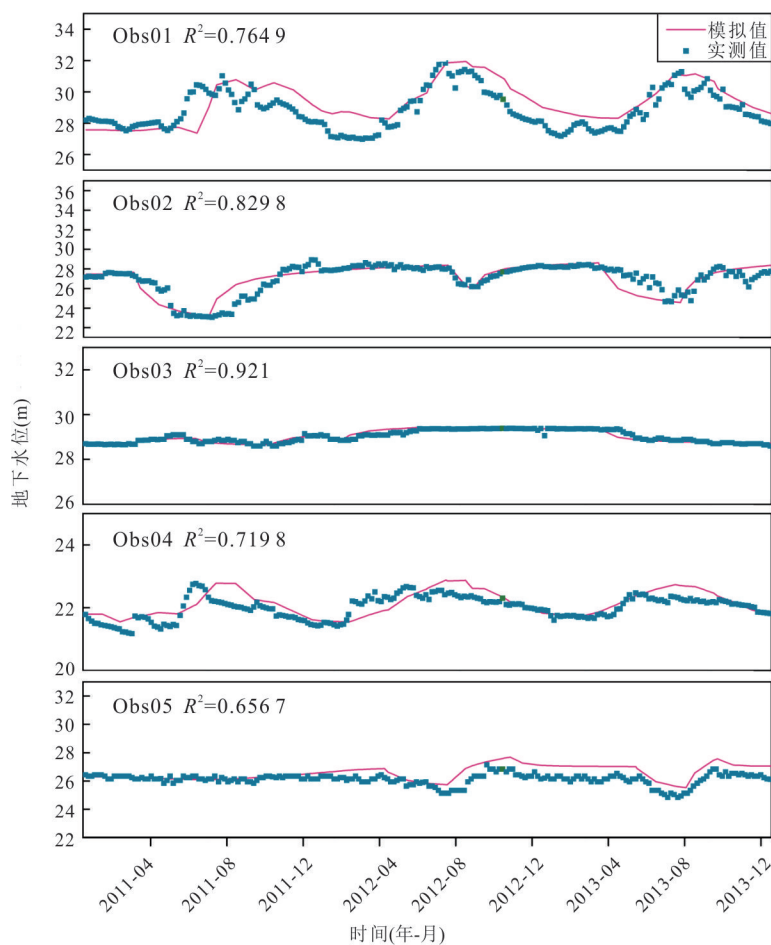


图4 地下水位监测井观测值和模拟值变化

Fig.4 Comparison of observed and simulated groundwater levels in monitoring wells

地下水为主,秋冬以地下水排泄至湖泊为主,且长湖的湖水—地下水交互速率高于洪湖.长湖湖底与地下水存在强烈的水力交换,而洪湖由于位于地势平缓的地区,湖水和地下水水位差较小,长期的泥沙淤积和湖床抬高,导致其湖水—地下水交互能力

大幅减弱.此外,在春夏季,四湖总干渠全段均表现为向地下水补给;而秋冬季,其上游段仍维持补给,下游段(洪湖以下区域)则转为接受地下水排泄.这可能是由于洪湖下游水系受长江回水影响:汛期,地表水位被顶托抬高,形成地表水补给地下水的条

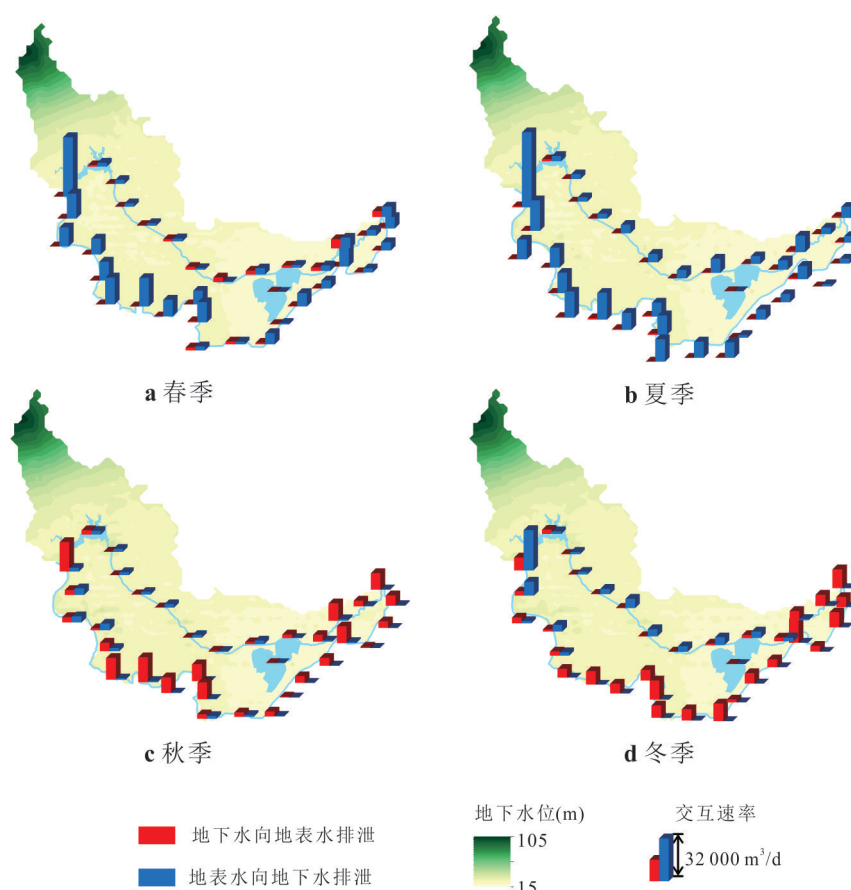


图5 四湖流域内主要水系(长江、四湖总干渠、洪湖和长湖)在不同季节与地下水的交互速率

Fig.5 Interaction rates between major surface water bodies (Yangtze River, Four-Lake Main Canal, Honghu Lake, Changhu Lake) and groundwater across seasons in the Four-Lake basin

件;枯季,地表水位快速回落,但周边潜水水位因介质阻滞作用而下降滞后,致使潜水位相对高于渠水位,水力梯度逆转,从而驱动地下水向干渠排泄。

3.2.2 主要水系与地下水交互速率的空间差异
本文以 Bh6 岩心钻孔(图 1)附近为界,将四湖流域的长江划分为上、下游两段。依据沿江钻孔岩心揭示的水文地质条件(图 7),该位置是含水层结构发生转变的关键过渡带。图 6 展示了长江全段、上游和下游分别与地下水的交互速率(基于 MODFLOW 模型导出的交互速率,计算逐月平均值,再对三年的同期的交互速率进行平均计算)。对于长江上游河段,2 月及 9 月至 12 月期间,地下水向长江排泄;其余月份则为长江补给地下水。下游河段的情况则有所不同:1 月至 2 月及 9 月至 12 月期间地下水排入长江,而 3 月至 8 月期间则为长江补给地下水。分析结果显示,上游地区长江补给地下水的平均速率为 $110\,124.1\text{ m}^3/\text{d}$,远高于下游的 $20\,607.5\text{ m}^3/\text{d}$ 。同样,上游的地下水排泄至长江的速率为 $42\,176.2\text{ m}^3/\text{d}$,

也高于下游的 $-25\,837.1\text{ m}^3/\text{d}$ 。这种空间交互速率的差异主要受江水位和地下水位的水力梯度、地形条件以及地质结构等因素的共同影响。根据湖北省水利水电科学研究院提供的沿江钻孔岩心数据(图 7),我们可以看到在 Bh6 钻孔上游,承压含水层主要以高渗的砂卵石和粗砂组成,长江水位波动能迅速传递到地下水流系统,同时上游河段因紧邻三峡水库,受其调度影响显著,水位波动幅度较大,地下水和长江之间形成了更高的水力梯度,表现出强烈的补排过程;相比之下,经过 Bh6 钻孔后,含水层岩性逐渐向粉细砂过渡,渗透性显著降低,且下游的长江水位对水库调度的响应逐渐减弱,长江水位变幅明显减小,因此地表水—地下水交互相对较弱。综上,长江水位振幅与含水层非均质性的共同作用,最终导致了长江与地下水之间交换强度呈现“上游强、下游弱”的显著差异。

区别于长江沿岸,四湖流域内部水系和地下水交互速率的差异,则主要受地形要素的影响。洪湖

以东的低洼地带,河、湖、渠密集连通,与长江及地下水形成复杂互馈,增加了系统复杂性.这一特性意味着,未来的区域研究应深入揭示这种动态交互对水体化学物质输运与通量的控制作用.

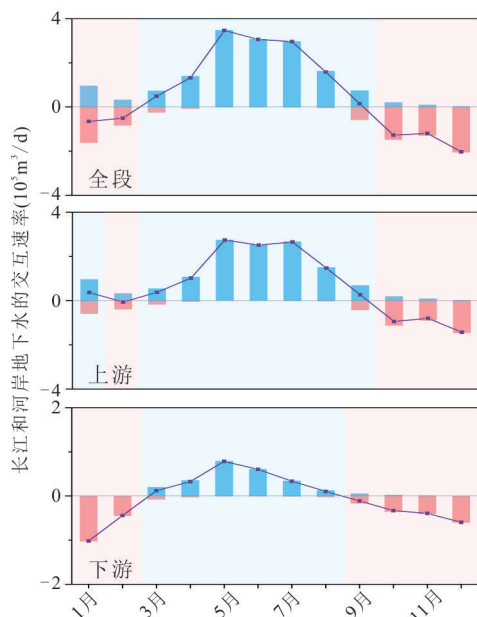


图 6 四湖流域内长江全段、上游和下游分别与河岸地下水的年均(2011—2013年)交互速率

Fig.6 Annual average (2011—2013) interaction rates between the Yangtze River (the entire, upper, and lower reaches) and riparian groundwater in the Four-Lake basin

正值表示长江补给地下水,负值表示地下水排泄至长江

3.3 四湖流域土壤潜育化影响因素与风险区域预测

3.3.1 降水对流域地下水位埋深的影响 本文将地下水位埋深作为评价土壤潜育化风险的主要指标.需要明确的是,潜育化是土壤长期积水的过程,而冷浸田则是潜育化在四湖流域的主要表现形式.首先,为了探究四湖流域地下水位埋深的变化特征,本研究选取了位于洪湖附近与其上游干渠附近的两个监测点(Obs04与Obs06,位置见图1).图8展示了2011年至2013年期间,两个监测井地下水位埋深与降雨量的对应关系.

2011—2013年间,监测点Obs04和Obs06的地下水位埋深变化幅度为1.0~1.5 m,且变化趋势与同期降水量的波动基本吻合.研究区降水主要集中于5月至8月,年内分布呈先增后减的单峰形态.与之相应,地下水位埋深整体也表现为先变浅、后变深的趋势,但由于地下水补给过程的滞后效应,埋深对降水的响应存在一定的时间延迟.经分析,Obs04和Obs06处地下水位埋深与降水量的皮尔逊相关系数分别为-0.67和-0.57,表明降水与埋深之间存在中等程度的负相关.

降水是驱动冷浸田形成的关键环境因子之一.在四湖流域,集中强降水易导致地表积水与地下水位的快速抬升,使得土壤长期处于饱和或淹水状态.排水不畅加之土体厌氧环境的持续,为潜育化发生创造了条件.这一过程与已有研究结论一致,即浅埋地下水会显著增加土壤饱和持续时间与潜育化风险(Miguez-Macho and Fan, 2012; 李亚云等,

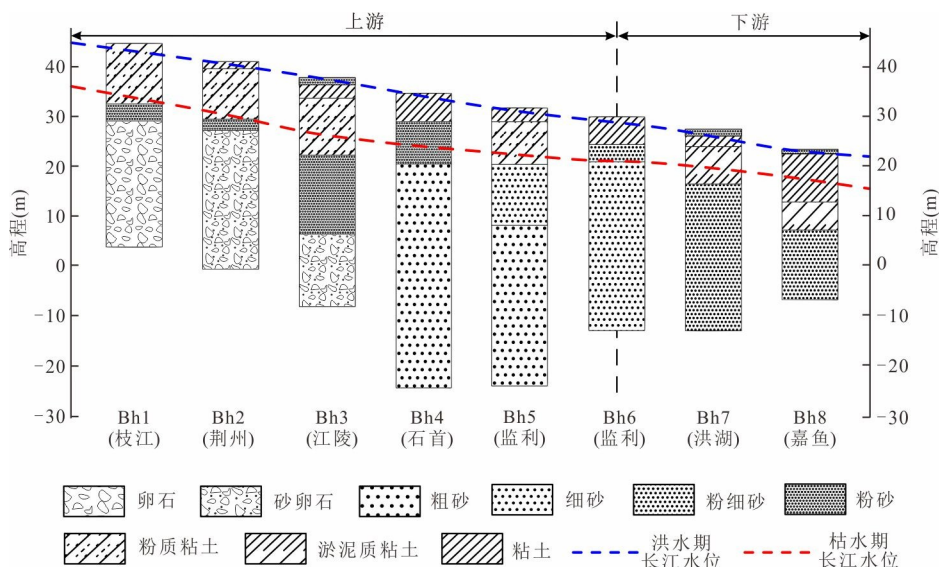


图 7 四湖流域沿江钻孔岩性

Fig.7 Lithologic logs of boreholes along the Yangtze River in the Four-Lake basin

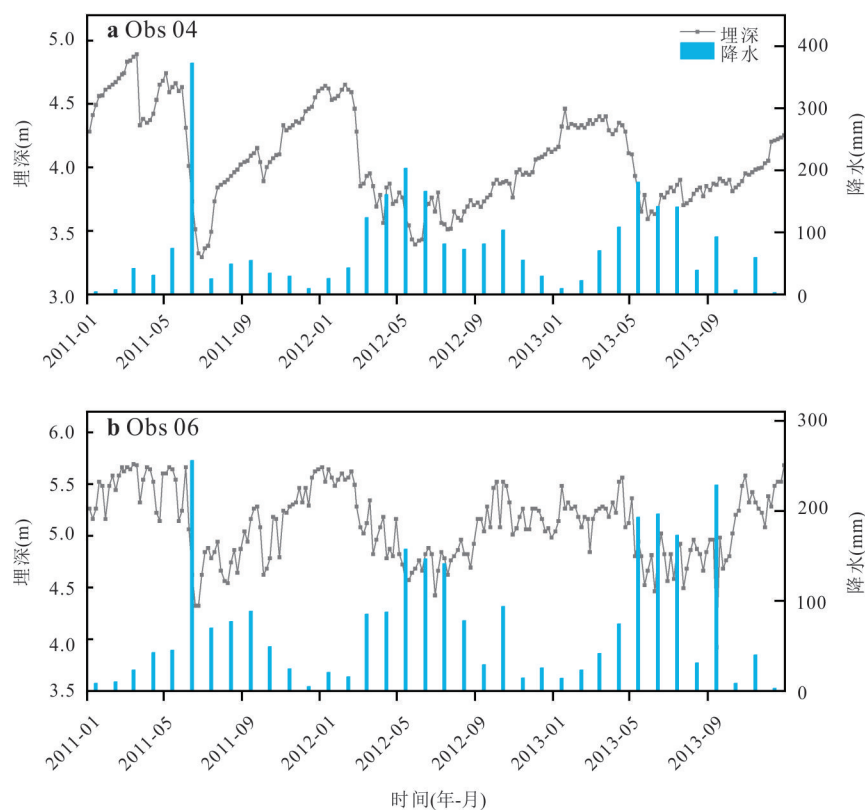


图8 地下水水位埋深与降雨量变化关系

Fig.8 Relation diagram of groundwater level depth and rainfall variation

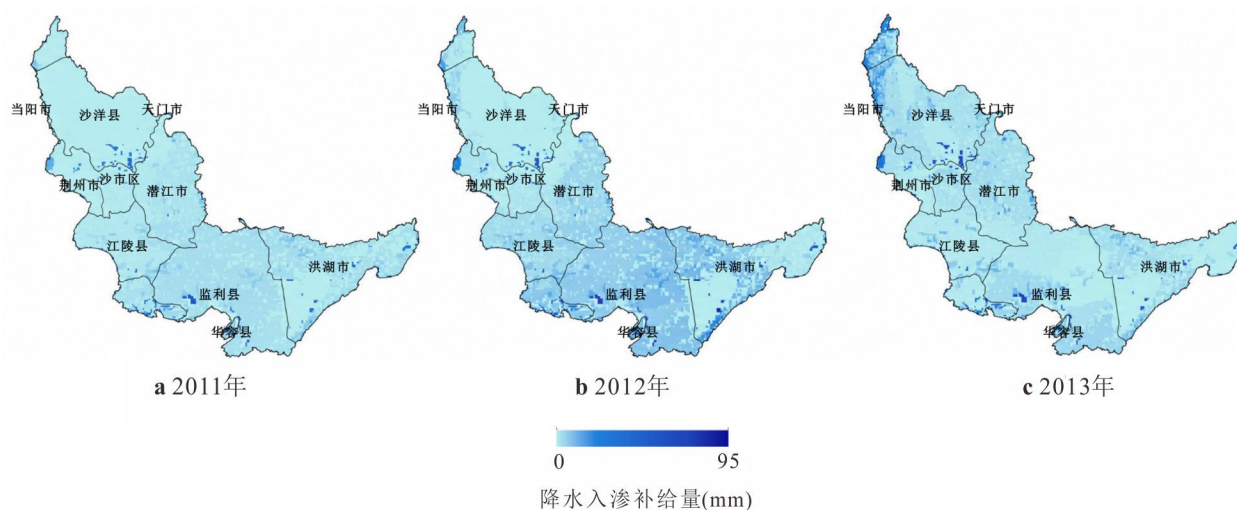


图9 四湖流域2011—2013年地下水补给量分布

Fig.9 Distribution of groundwater recharge in the Four-Lake basin (2011—2013)

2023; Hagage *et al.*, 2024). 因此, 流域内降水动态与地下水埋深变化之间的显著关联, 降水是区域土壤潜育化的重要环境驱动因素之一. 然而, 不可忽视的是, 四湖流域作为典型排灌区, 农田灌溉回补和自然降水入渗一样, 同样对流域内局部的地下水

位埋深存在影响.

3.3.2 土壤类型对土壤潜育化的影响 除了降水对土壤潜育化存在影响, 地形以及土壤类型对于流域降水补给也存在一定影响. 从图9可以看到四湖流域中部、东部降水入渗补给量均大于西北部, 尤

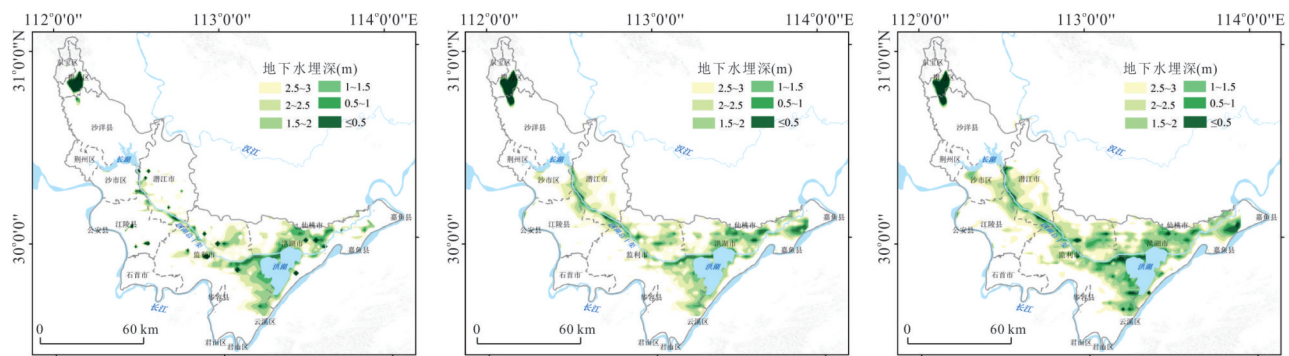


图 10 2011—2013 年四湖流域汛期地下水位埋深

Fig.10 Depth of groundwater table during the flood season in the Four-Lake basin (2011—2013)

其是在洪湖、潜江以及监利市地下水入渗补给量相对较大. 其中地形是主要的影响因素. 西北部地区的地形较为陡峭(图 1), 限制了降水的渗透和地下水的补给. 相比之下, 中部和东部地区的地形相对平坦, 加上有利的土壤特性, 加强了补给过程. 尤其是在地形平缓区域人为堆积土区域(图 2d)、降水入渗补给更多, 这是因为人为堆积土由人工回填, 孔隙度较大, 渗透性强, 更多水分直接补给地下水; 耕地会导致土壤板结破坏, 孔隙度增加, 从而增加降水入渗, 地下水位抬升.

3.3.3 基于模型预测的四湖流域潜育化风险区域

为识别四湖流域土壤潜育化潜在风险区域, 本研究基于模型模拟绘制了四湖流域 2011—2013 年丰水期平均地下水埋深图(2011—2013 年)(图 10). 在本研究中, 我们将地下水埋深小于 3 m 的地区视为易受冷涝影响的地区, 因为这种条件通常足以维持土壤的长期饱和. 如图 10 所示, 可以看到在洪湖周边、四湖总干渠两侧以及监利县城西北部, 地下水埋深普遍小于 3 m, 这表明发生冷涝的可能性很大. 因此, 随着地下水补给动态变化, 这些区域应该作为土壤潜育化发展的重点关注区域.

4 结论

本研究基于 SWAT-MODFLOW 耦合模型对四湖流域地表水-地下水交互过程进行了系统模拟, 揭示了其时空分异特征, 并评估了土壤潜育化风险的分布格局与主控因素. 主要结论如下.

(1)模型的适宜性与可靠性: 本研究构建的 SWAT-MODFLOW 耦合模型在四湖流域展现出良好的适用性. 率定与验证结果显示, 模型能够可靠刻画流域内地表径流与地下水动态, 为地表水-地

下水交互过程的定量分析提供了可靠工具.

(2)地表水—地下水交互的时空分异性: 长江与沿岸地下水交互呈现显著的季节与空间分异特征. 时间上, 表现为“春夏季江水补给地下水、秋冬季地下水排泄入江”的逆转规律; 空间上, 受三峡水库影响的水位波动及含水层岩性差异共同控制, 上游交互强度显著高于下游. 流域内部, 长湖与地下水交互呈现季节性反转且强度较高, 而洪湖受湖床沉积与地貌限制, 以微弱的单向渗漏补给为主; 四湖总干渠的交互模式存在空间分异, 下游段在枯水期由地下水排泄主导, 可能与长江回水顶托及潜水位变化滞后有关.

(3)土壤潜育化影响因素及高风险区预测: 研究表明, 降水和地下水埋深存在一定程度的相关性, 雨季地下水位显著抬升加剧了土壤饱和度, 平坦的地质和高渗透性土壤进一步强化了入渗过程. 根据模型结果显示, 四湖流域土壤潜育化高风险区(地下水埋深<3 m)主要分布在洪湖周边、四湖总干渠沿线及监利市西北部, 这些区域应该作为土壤潜育化发展的重点关注区域.

References

Aliyari, F., Bailey, R. T., Tasdighi, A., et al., 2019. Coupled SWAT - MODFLOW Model for Large - Scale Mixed Agro-Urban River Basins. *Environmental Modelling & Software*, 115: 200—210. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.014>

Balerna, J. A., Kramer, A. M., Landry, S. M., et al., 2023. Synergistic Effects of Precipitation and Groundwater Extraction on Freshwater Wetland Inundation. *Journal of Environmental Management*, 337: 117690. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117690>

Balerna, J. A., Kramer, A. M., Landry, S. M., et al.,

2024. Wetland Hydrological Change and Recovery across Three Decades of Shifting Groundwater Management. *Journal of Hydrology*, 644: 132052. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132052>
- Bi, Y., Rong, Y., Zhao, Y. X., et al., 2025. Identification of Critical Sources and Characteristic Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution in Yanjin River Basin Based on SWAT Model. *China Environmental Science*, 45(12): 6881—6891 (in Chinese with English abstract).
- Deng, K., Yang, S. Y., Lian, E. G., et al., 2016. Three Gorges Dam Alters the Changjiang (Yangtze) River Water Cycle in the Dry Seasons: Evidence from H-O Isotopes. *Science of the Total Environment*, 562: 89—97. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.213>
- Dong, W. J., Xu, P. Z., Zhang, R. Z., et al., 2013. Effects of Soil Amendments on Soil Properties and Population Quality of Rice in Cold Waterlogged Paddy Field. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 21(7): 810—816 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y., Ma, T., Deng, Y. M., et al., 2018. Characterizing Groundwater/Surface-Water Interactions in the Interior of Jiangnan Plain, Central China. *Hydrogeology Journal*, 26(4): 1047—1059. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1709-7>
- Feng, J. P., Shao, D. G., Gu, W. Q., et al., 2023. Surface Water - Groundwater Transformation Patterns in the Jiangnan Plain after the Impoundment of the Three Gorges Project and the Opening of the Yangtze-to-Hanjiang Water Transfer Project. *Water*, 15(16): 2952. <https://doi.org/10.3390/w15162952>
- Gao, Y., Zhang, W. L., Li, Y., et al., 2021. Dams Shift Microbial Community Assembly and Imprint Nitrogen Transformation along the Yangtze River. *Water Research*, 189: 116579. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116579>
- Hagage, M., Abdulaziz, A. M., Elbeih, S. F., et al., 2024. Monitoring Soil Salinization and Waterlogging in the Northeastern Nile Delta Linked to Shallow Saline Groundwater and Irrigation Water Quality. *Scientific Reports*, 14: 27838. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77954-x>
- Hu, M. P., Yao, M. Y., Wang, Y. C., et al., 2023. Influence of Nitrogen Inputs, Dam Construction and Landscape Patterns on Riverine Nitrogen Exports in the Yangtze River Basin during 1980—015. *Journal of Hydrology*, 617: 129109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129109>
- Jiang, X., Ma, R., Ma, T., et al., 2022. Modeling the Effects of Water Diversion Projects on Surface Water and Groundwater Interactions in the Central Yangtze River Basin. *Science of the Total Environment*, 830: 154606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154606>
- Kirwan, M. L., Megonigal, J. P., 2013. Tidal Wetland Stability in the Face of Human Impacts and Sea-Level Rise. *Nature*, 504: 53—60. <https://doi.org/10.1038/nature12856>
- Lai, X. H., Zou, H. J., Jiang, J., et al., 2025. Hydrological Dynamics of the Yangtze River-Dongting Lake System after the Construction of the Three Gorges Dam. *Scientific Reports*, 15: 50. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83751-3>
- Leng, Z. C., Du, Y., Tao, Y. Q., et al., 2022. Coexistence and Controlling Factors of Ammonium and Phosphorus in Groundwater along the Middle Reaches of the Yangtze River. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(1): 300—308 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Chen, X. H., He, Y. H., et al., 2018. Modification of Reservoir Module in SWAT Model and Its Application of Runoff Simulation in Highly Regulated Basin. *Tropical Geography*, 38(2): 226—235 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. Y., Guo, J., Cai, A. M., et al., 2023. Characteristics of Groundwater in the Cold Waterlogged Paddy Field of the Jiangnan Plain. *Resources Environment & Engineering*, 37(2): 163—170, 216 (in Chinese with English abstract).
- Miguez-Macho, G., Fan, Y., 2012. The Role of Groundwater in the Amazon Water Cycle: 2. Influence on Seasonal Soil Moisture and Evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D15): 2012JD017540. <https://doi.org/10.1029/2012JD017540>
- Shuai, P., Chen, X. Y., Song, X. H., et al., 2019. Dam Operations and Subsurface Hydrogeology Control Dynamics of Hydrologic Exchange Flows in a Regulated River Reach. *Water Resources Research*, 55(4): 2593—2612. <https://doi.org/10.1029/2018WR4193>
- Si, G. H., Yuan, J. F., Xu, X. Y., et al., 2018. Effects of an Integrated Rice-Crayfish Farming System on Soil Organic Carbon, Enzyme Activity, and Microbial Diversity in Waterlogged Paddy Soil. *Acta Ecologica Sinica*, 38(1): 29—35. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.01.005>
- Wang, J. X., 2015. Study on Coupled Simulation of Watershed Hydrologic Model and Groundwater Numerical Model in Jiangnan-Dongting Plain (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

lish abstract).

- Winter, T. C., 1999. Relation of Streams, Lakes, and Wetlands to Groundwater Flow Systems. *Hydrogeology Journal*, 7(1): 28–45 <https://doi.org/10.1007/s100400050178>
- Xiao, F., Li, Y. Z., Du, Y., et al., 2014. Monitoring Perennial Sub-Surface Waterlogged Croplands Based on MODIS in Jiangnan Plain, Middle Reaches of the Yangtze River. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(8): 1791–1801 [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60563-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60563-8)
- Yang, Y., Yuan, Y. L., Xiong, G. Y., et al., 2024. Patterns of Nitrate Load Variability under Surface Water–Groundwater Interactions in Agriculturally Intensive Valley Watersheds. *Water Research*, 267: 122474. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122474>
- Yin, S. Z., Xu, F., Wang, W. H., et al., 2022. Simulation of Runoff and Spatio-Temporal Variations of Blue and Green Water Resources in Sihui Basin. *Environmental Engineering*, 40(5): 133–140 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M. R., Xia, J. Q., Deng, S. S., et al., 2023. Modeling of Phosphorus and Nonuniform Sediment Transport in the Middle Yangtze River with the Effects of Channel Erosion, Tributary Confluence and Anthropogenic Emission. *Water Research*, 243: 120304. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120304>
- Zhou, Y., Wang, Y. X., Li, Y. L., et al., 2013. Hydrogeochemical Characteristics of Central Jiangnan Plain, China. *Environmental Earth Sciences*, 68(3): 765–778. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1778-9>

- Zhou, Z. H., Du, Y., Sun, X. L., et al., 2024. Quantification of Groundwater Discharge and Its Spatial Variability in Jingjiang Section of Middle Reach of the Yangtze River. *Earth Science*, 49(4): 1448–1458 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 毕杨, 荣易, 赵琰鑫, 等, 2025. 基于 SWAT 模型的盐津河流域氮磷污染关键源识别及特征解析. *中国环境科学*, 45(12): 6881–6891.
- 董稳军, 徐培智, 张仁陟, 等, 2013. 土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响. *中国生态农业学报*, 21(7): 810–816.
- 冷智超, 杜尧, 陶艳秋, 等, 2022. 长江中游沿岸地下水中铵氮与磷的共存规律及其控制因素. *地质科技通报*, 41(1): 300–308.
- 李蔚, 陈晓宏, 何艳虎, 等, 2018. 改进 SWAT 模型水库模块及其在水库控制流域径流模拟中的应用. *热带地理*, 38(2): 226–235.
- 李亚云, 郭静, 蔡爱民, 等, 2023. 江汉平原冷浸田地区地下水特征研究. *资源环境与工程*, 37(2): 163–170, 216.
- 王军霞, 2015. 江汉—洞庭平原流域水文模型与地下水数值模型耦合模拟研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 尹述政, 许峰, 王文荟, 等, 2022. 四湖流域径流及蓝水绿水资源时空分布模拟. *环境工程*, 40(5): 133–140.
- 周子皓, 杜尧, 孙晓梁, 等, 2024. 长江中游荆江段地下水排泄的量化及其空间差异性分析. *地球科学*, 49(4): 1448–1458.