J. Lake Sci.(湖泊科学), 2017, **29**(5): 1227-1237
DOI 10. 18307/2017. 0521
© 2017 by *Journal of Lake Sciences*

长江倒灌对鄱阳湖水文水动力影响的数值模拟*

李云良[1],姚　静[1],张　奇[1,2]
(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室,南京 210008)
(2: 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室,南昌 330022)

摘　要: 倒灌是发生在湖泊与周围水体交汇处的一个重要物理过程,对湖泊水文水动力与水环境带来严重影响或干扰,进而对湖泊水质产生重要的影响或控制作用. 本文采用统计方法和二维水动力-粒子示踪耦合模型来分析倒灌物理成因、倒灌发生判别与指示以及倒灌对鄱阳湖水文水动力的影响. 统计表明,流域"五河"入湖径流、长江干流径流情势以及两者叠加作用均是倒灌的影响因素,但长江干流径流情势是影响或者控制倒灌频次与倒灌强度的主要因素. "五河"来水与长江干流的流量比可用来判别与指示倒灌发生与否. 当流量比低于约 5%时,倒灌可能发生且最大发生概率可达 25%;当流量比高于 10%时,倒灌发生概率则低于 2%. 水动力模拟结果表明,倒灌对湖区水位与流速的影响向湖区中上游逐渐减弱,湖泊水位和流速受影响最为显著的区域主要分布在贯穿整个湖区的主河道,而浅水洪泛区的水位和流速则受倒灌影响相对较小. 倒灌使得湖泊空间水位提高约 0.2~1.5 m,湖泊主河道的流速增加幅度可达 0.3 m/s. 粒子示踪结果表明,倒灌导致湖区水流流向转变约 90°~180°,倒灌导致的水流流向变化能够使湖区大部分粒子或物质向上游迁移约几千米至 20 km,且粒子在下游主河道的迁移距离要明显大于中上游洪泛区.
关键词: 倒灌;水动力-粒子示踪模型;流量比;水文水动力;鄱阳湖;长江

Numerical study on the hydrodynamic influences of the Yangtze River backflow into Poyang Lake

LI Yunliang[1], YAO Jing[1] & ZHANG Qi[1,2]
(1: *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *P.R.China*)
(2: *Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang* 330022, *P.R.China*)

Abstract: Backflow is an important mechanism controlling flow and transport in many connected river-lake systems. This study used statistical methods and hydrodynamic-particle tracking models to examine primary causal factors of backflow, indication of backflow occurrence and influences of backflow on the hydrodynamics in a large floodplain lake (Poyang Lake, China). Statistical analysis indicates that although both catchment inflows and the Yangtze River discharge are all the influencing factors of backflow, the Yangtze River discharge is the main controlling factor of backflow during July and October, rather than catchment inflows to the lake. The ratio of Poyang Basin inflows to Yangtze River discharge can be used as an indication of the daily occurrence of backflow, which is most likely to occur during periods when this ratio is lower than 5%. If this ratio is higher than 10%, the probability of backflow occurrence is lower than 2%. Hydrodynamic modeling reveals that, in general, backflow causes an increasing in lake water levels ranging from 0.2 to 1.5 m, and tends to increase the magnitude of the water velocities (by up to 0.3 m/s) in the lake's main flow channels. Backflow disturbs the normal northward water flow direction in range of 90°-180° across Poyang Lake, and transports mass varied from a few kilometers to approximately 20 km southward into the lake. Backflow tends to increase the magnitudes of the water velocities and water levels in the lake's main flow channels more than in the shallow floodplain areas. The influence of backflow on the hydrological regimes in Poyang Lake attenuates with distance from the Yangtze River, as expected, but

* 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00)和国家自然科学基金项目(41401031,41371062,41301023)联合资助. 2016-10-16 收稿; 2016-11-18 收修改稿. 李云良(1983~), 男, 助理研究员; E-mail: yunliangli@ niglas.ac.cn.

nonetheless propagates to virtually its upstream extremity.

Keywords: Backflow; hydrodynamic-particle tracking model; flow ratio; hydrology and hydrodynamics; Poyang Lake; Yangtze River

湖泊是全球陆地水系统中极为重要的组分,因其具有丰富的地表水资源和高度的生态价值,湖泊是人们休闲娱乐、工农业用水和发展渔业的重要场所,也是众多生物群赖以生存的必需环境[1]. 世界上很多大型湖泊通过自然或者人工连通与其周围水体(例如河流、海洋等)存在复杂的水力联系[2]. 其中,倒灌通常是发生在湖泊与周围水体交汇处的一种逆向水流,是影响湖泊诸多功能的一个重要物理过程[3]. 伴随着湖泊外部环境、气候以及人类活动等多因素的复合作用,倒灌将会对湖泊水文水动力特征的时空变化以及湖泊水环境带来严重影响或干扰,进而对湖泊水质产生重要的影响或控制作用[4].

文献调研发现,国内外诸多学者已经针对不同复杂程度、不同尺度的湖泊系统,主要采用了湖泊水文要素原位观测、湖泊水量平衡模型以及水文水动力模型等研究方法,开展了大量工作来探究湖泊倒灌现象的发生及成因,但多数集中在对国外湖泊倒灌的研究(表 1). 总结得出,湖泊倒灌的发生呈明显的季节性变化,通常发生在湖泊周围水体的高洪水位时期,加之强风等气象因素的叠加影响,使得倒灌成为影响湖泊水文水动力条件的一个重要因素. 尽管如此,先前关于倒灌对湖泊水文水动力要素的时空影响研究仍涉及较少,缺乏对倒灌影响机制的深入认识.

表 1 国内外湖泊倒灌的相关研究进展

Tab.1 Research progress on the lake's backflow around the world

湖泊	国家	研究方法	研究结论	参考文献
Athabasca Lake	加拿大	湖泊水量平衡模型	倒灌发生在春、夏季节	[3]
Wakaipu Lake	新西兰	湖水位观测	倒灌发生在湖泊下游连通河流的洪水期	[5]
Osoyoos Lake	美国-加拿大	湖泊水流监测	倒灌发生在湖泊下游出口附近河流的高流量季节	[6-7]
Sap Lake	柬埔寨	半分布式水文模型	倒灌发生在下游连通河流的洪水期	[8]
St. Clair Lake	美国	水动力模型	倒灌主要由暴风雨和大风所致	[9]
鄱阳湖	中国	湖水位和流量观测	倒灌的发生时间与强度受长江干流水情变化影响	[10-12]

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊,也是长江中下游极具代表性的大型通江湖泊,在优质淡水供给、洪水调控和生物多样性保护等方面起着重要作用. 鄱阳湖水位季节性高度动态变化,导致湖泊水体面积呈年内明显的萎缩与扩张,进而使得湖区洪旱灾害频发[13]. 流域"五河"入湖径流对湖泊水位起着主控作用,而鄱阳湖与长江的水量交换也对湖泊水位造成季节性的顶托和拉空作用[14-15]. 大多数年份里,长江均会以持续或者间断发生的形式倒灌鄱阳湖,且倒灌发生天数约几天至几十天[14]. 先前很多研究均明确指出了长江倒灌会对鄱阳湖空间水文水动力以及水环境问题等带来不容忽视的影响,具体表现为倒灌将会增加湖区空间水位与水面积,增强鄱阳湖洪水发生风险与强度[16-17]. 此外,倒灌会延长湖区的换水周期,进而导致湖区水环境状况恶化等[18-21]. 然而,上述这些关于倒灌所导致的可能影响并没有得到具体研究工作的证实. 鄱阳湖倒灌的主要影响因素是什么? 倒灌发生如何判别和指示? 倒灌究竟给鄱阳湖水文水动力的时空变化特征带来哪些影响? 影响程度与范围有多大? 空间尺度上,不同湖区对倒灌是否存在不同的响应? 这些重要科学问题的解决和回答可为鄱阳湖水文水动力与水质水环境模拟及其对江湖关系变化的响应研究提供参考,对保障长江中下游水安全具有重要现实意义.

本文首次聚焦鄱阳湖倒灌事件及其影响,期望能对鄱阳湖复杂的河湖系统有更加清晰和深入的认识,从而为科学有效调控近年来江湖关系改变对鄱阳湖的影响提供科学依据. 本文主要解决以下几个问题或研究目标:(1)基于历史长序列观测数据,采用统计学方法来辨析倒灌的主要影响因素,寻求倒灌发生的判别依据与指示;(2)选取历史典型倒灌事件,基于二维水动力模型定量评估倒灌对湖区水文水动力要素的时空影响;(3)基于耦合粒子示踪模型来进一步研究倒灌对湖区水流与物质输移的影响范围与程度.

1 材料与方法

1.1 研究区概述

鄱阳湖位于江西省北部及长江中下游南岸,南北长约 173 km,东西最大宽度约 74 km,北部入江水道最窄处的宽度约 2.8 km,湖岸线总长约 1200 km(图 1). 湖盆高程呈南高北低的趋势,最大高程差约 13 m,南、北部平均高程相差约 6.5 m(图 1). 鄱阳湖湖盆主要由主河道、岛屿、洪泛洲滩等典型地貌构成. 研究结果表明,洪水季节约 85% 的鄱阳湖区平均水深小于 6 m,最大水深可达 30 m[22]. 在季节变化尺度上,主河道和洪泛洲滩的水体垂向混合程度较好,可以忽略其垂向流速和温度分层[23]. 湖区气象条件空间差异较小,主要表现在季节性变化,多年平均降雨量和蒸发量分别为 1766 mm 和 1236 mm. 根据实测资料统计的湖区年风向变化以 NE 向为主,年内平均风速约为 3.03 m/s[24]. 鄱阳湖主要承纳赣江、抚河、信江、饶河与修水五大水系来水,经调蓄后注入长江,其与"五河"及长江之间频繁的水量交换形成了鄱阳湖高动态的水位-水面积变化. 根据流量资料统计得出,赣江流域入湖径流约占年入湖总量的 62%、抚河流域约占 11%、信江流域约占 16%、饶河流域和修水流域分别约占 8% 和 3%,而年最大倒灌量约占年平均出湖流量的 13%. 鄱阳湖洪、枯季节的水位差可达 15 m,枯水季节的空间水位差约 5 m,而洪水季节整个湖区的水位基本保持一致. 丰水期鄱阳湖水面积可达 3000 km^2,而枯水期萎缩至不足 1000 km^2[25],呈现"洪水一片,枯水一线"的独特洪泛特征.

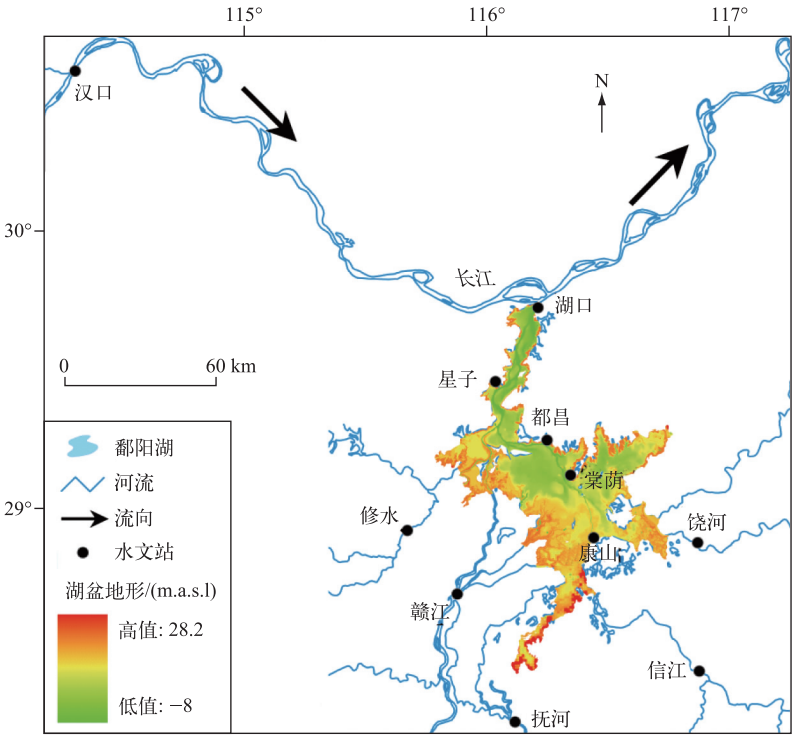


图 1 鄱阳湖湖盆地形、水文站点与水系分布

Fig.1 Lake bathymetry, hydrological gauging stations and major inflow rivers of Poyang Lake

1.2 数据描述与获取

流域"五河"主要控制站点日径流数据用来表征流域入湖径流情势变化,长江汉口日径流数据主要用来反映长江干流的综合水情变化,湖口日径流数据主要用来指示长江倒灌的发生与强度,湖泊主要站点日水位和流速资料则用来描述鄱阳湖空间水情特征与动态. 这些重要站点(图 1)水文数据序列长度约为 50 a(1960—2010 年),主要来自长江水利委员会和江西省水文局.

1.3 鄱阳湖水动力模型

MIKE 21 水动力模型是丹麦水力研究所(DHI)开发的二维水动力数学模型,该模型已成功应于不同国家及地区的河流、湖泊和海湾等大型地表水体的流场模拟. 鄱阳湖水动力模型 MIKE 21 采用三角形网格来适应鄱阳湖复杂湖盆地形和岸线,采用主河道网格加密剖分以及洪泛洲滩等区域粗化剖分的理念(网格尺寸变化 70~1500 m). 模型将湖区五站日降雨和蒸发资料考虑到水动力模型中参与计算,并将定常风(NE=45°,风速=3.03 m/s)纳入到水动力模型考虑其对局部湖流的影响. 流域"五河"的入湖径流过程作为水动力模型上游开边界条件,江湖交汇处的湖口水位过程作为下游开边界条件,综合反映鄱阳湖复杂河湖系统的相互作用. 模型率定的主要参数包括曼宁糙率系数和涡粘系数. 鉴于鄱阳湖水动力模型已成功构建并广泛应用于鄱阳湖水动力研究[22-24,26-28],详细模型构建过程与参数信息请参考上述发表成果.

鄱阳湖水动力模型 MIKE 21 已采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{ns})、确定性系数(R^2)和相对误差(R_e)等评价指标开展了湖水位、水面积、出流量和流速等关键变量的率定与验证. 水位验证采用星子、都昌、棠荫和康山(图 1)4 个站点 2000－2008 年的日水位,各站点拟合的 Nash-Sutcliffe 效率系数可达 0.98,相对误差不超过±5%[22];选取 2004 年的 14 景 MODIS 影像来验证水动力模型,洪水期和枯水期水面积拟合的相对误差分别为 3.3% 和 16.8%[22];鄱阳湖水动力模型能够很好地模拟 2003－2008 年湖泊出流和长江倒灌量时序变化,拟合的 R^2 可达 0.92,R_e 约为-12.9%[22];通过 2008 年湖口和星子 ADCP 断面流速走航资料来验证模型,表明 MIKE 21 模型能够理想再现鄱阳湖洪枯季节的流速变化,流速拟合的 R^2 可达 0.80[26]. MIKE 21 水动力模型的详细率定和验证情况可参考先前发表成果[22-24,26-28].

1.4 方案模拟与模型验证策略

本文通过水动力模型 MIKE 21 来获取鄱阳湖空间流场的实时变化,进一步耦合基于随机漫步理论的拉格朗日粒子示踪模型[29-30]来定量模拟倒灌对鄱阳湖水流与物质输移的影响范围与程度. 虽然倒灌频次和倒灌量在年际尺度上变化很大,但鄱阳湖倒灌现象主要发生在每年的 7－10 月份. 考虑到不同水情年份里倒灌以持续或者间断发生的形式并存,难以合理选取一个能够描述平均意义上的倒灌事件来开展倒灌影响研究. 因此,本文根据 1960－2010 年数据资料,选取 1964 年和 1991 年的 7－10 月份来分别表征鄱阳湖倒灌频次最多(27 d)的年份和倒灌量最大(1.2×10^{10} m^3)的年份,并通过湖泊空间水位、流速以及湖口断面流量来充分验证水动力模型. 基于此,通过平均化湖口水位过程来构建 1964 年和 1991 年无倒灌发生的模拟情景(表 2),借助不同情景下水动力模拟结果的比较(方案 S1 与 S3,S2 与 S4 比较)来评估典型倒灌事件对鄱阳湖水文水动力特征的影响. 此外,本文在整个湖区均匀投放 100 个虚拟的保守性粒子(投放时间为 7 月 1 日),通过耦合粒子示踪模型来进一步分析倒灌对湖区空间水流路径与物质输移的影响. 需要说明的是,本文水动力模型采用的湖盆地形数据(近 2000 年)与 1964 年和 1991 年的湖盆地形会存在一定的误差,但考虑到长江和鄱阳湖在 7－10 月的倒灌期间保持着较高水位,地形误差对该时期水位和流速的影响可以忽略.

表 2 模拟方案与水动力-粒子示踪模型关键参数

Tab.2 Simulation scenarios and key parameters for the hydrodynamic-particle tracking models

模拟方案	模型边界条件		目的与用途
	流域入流边界	湖口水位边界	
S1	1964 年 7－10 月观测数据	1964 年 7－10 月观测数据	真实条件,表征最多倒灌天数
S2	1991 年 7－10 月观测数据	1991 年 7－10 月观测数据	真实条件,表征最大倒灌量与强度
S3	1964 年 7－10 月观测数据	1960－2010 年 7－10 月平均日数据	情景设计,表征无倒灌发生
S4	1991 年 7－10 月观测数据	1960－2010 年 7－10 月平均日数据	情景设计,表征无倒灌发生

参数符号	参数描述	参数取值	参考文献
n	曼宁糙率系数	0.02~0.033 s/m$^{1/3}$	[22]
C_s	子涡扩散系数	0.28	[22]
ω_s	粒子沉降速率	0.0082 m/s	[31]
D_H	水平弥散系数	0.05 m^2/s	[32]
D_V	垂向弥散系数	0.001 m^2/s	[29-30]

2 结果与讨论

2.1 倒灌影响因素辨析与倒灌发生判别

影响倒灌的主要因素可归结为流域“五河”入湖径流、长江干流径流情势以及流域-长江的共同作用. 为了消除变量数值大小和量纲影响,图 2 为通过标准化处理后[33]的年倒灌天数与倒灌量同上述各影响因素之间的统计分析. 不难得出,年倒灌天数和年倒灌量均与长江和流域“五河”流量差之间具有密切的线性相关(R^2 分别为 0.96 和 0.81),表明倒灌受长江和流域来水变化的叠加影响. 由图 2 还可以发现,年倒灌天数和倒灌量均与长江干流流量有着更为密切的相关关系(R^2分别为 0.95 和0.78),而与流域“五河”入湖流量之间存在弱相关关系(R^2分别为 0.39 和 0.18),表明长江干流径流情势变化对倒灌的影响要明显强于流域入湖流量. 上述结果与先前研究[14]所得结论基本一致,即长江干流径流的增加以及抬高的河流水位会导致洪水季节长江作用鄱阳湖的强度明显增大,极有可能使得 7—9 月份湖口出流发生逆转,发生长江倒灌鄱阳湖的水文现象[15]. 因此,长江干流径流情势是影响或者控制倒灌频次与倒灌量的主要因素,而不是流域“五河”入湖径流.

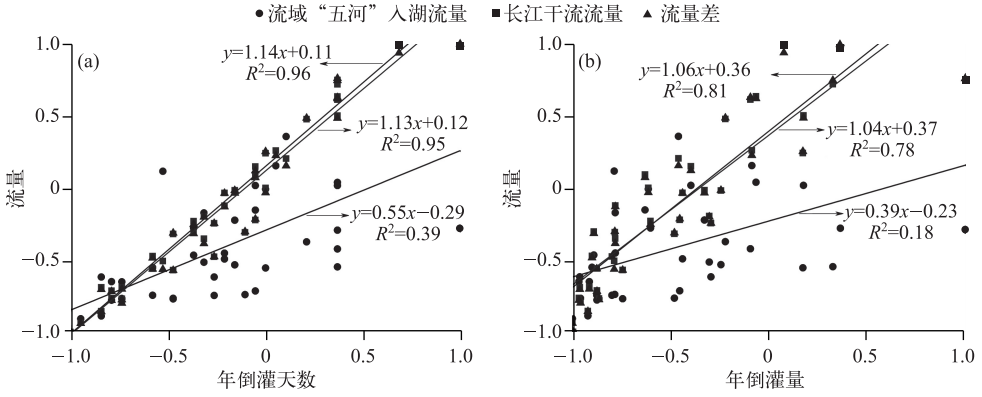


图 2 年倒灌天数(a)和年倒灌量(b)与流域“五河”、长江流量以及两者差值之间的统计关系

Fig.2 Relationship between the number of days of backflow and inflows from the catchment, flows in the Yangtze River and the difference between the two on an annual scale(a); corresponding relationships for the annual backflow volumes(b)

1960—2010 年观测数据的统计分析表明,流量比在无倒灌发生条件下变化幅度较大(1%~147%),50%中位数对应的流量比为 13%,而倒灌条件下流量比的变化幅度相对较小(0.9%~30%),50%中位数对应的流量比为 3%(图 3a). 换句话说,倒灌发生时的流量比要明显小于无倒灌发生时的流量比. 概率统计结果表明,有倒灌和无倒灌发生条件下的流量比分布函数差异明显(图 3b). 当流量比低于约 5%时,倒灌可能发生且最大发生概率可达 25%;当流量比高于 10%时,倒灌发生概率则低于 2%. 上述结果表明,强烈的长江作用(高流量)或者较弱的流域作用(低流量)极有可能增加倒灌发生概率. 尽管如此,越低的流量比并不是完全对应越高的倒灌发生概率(图 3b),主要是因为前期湖泊水位与蓄水量等其他因素影响了鄱阳湖倒灌发生[10]. 总的来说,流量比大小是判别倒灌发生的必要条件,可用来作为倒灌发生与否的一个重要指示. 实际上,倒灌发生与否直接取决于湖口和近邻湖口的长江干流水位高低,即两者水位差. 因为目前还无法获取近邻湖口的长江干流水位数据,加之湖口水位同样受长江干流水情影响,所以本文通过流域“五河”和长江流量来分析倒灌发生是切实可行的.

2.2 水动力模型验证

应用粒子示踪耦合模型调查倒灌对鄱阳湖水文水动力影响的重要前提是水动力模型要具有再现鄱阳湖水位、流速以及倒灌变化的能力. 总的来说,MIKE 21 鄱阳湖水动力模型能够很好地模拟 1964 年和 1991 年的湖口出流以及倒灌时序变化过程,在倒灌发生日期以及倒灌量级的捕捉方面体现了模型优势(图 4a).

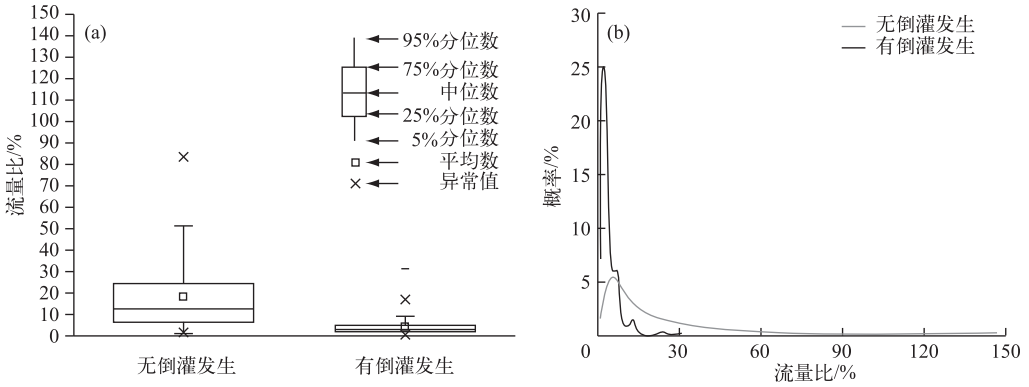


图 3 有、无倒灌发生条件下的流量比变化(a)以及相应的概率分布函数(b)

Fig.3 Comparison of flow ratios for days with and without backflow(a); corresponding probability distribution functions of flow ratios for the two conditions(b)

水动力模型对 1964 年和 1991 年湖区站点水位变化的模拟精度比较理想,R^2、E_{ns}和 R_e变化范围分别为 0.99~1.00,0.97~1.00 和-1.1%~0.2%(图 4b~e). MIKE 21 水动力模型能够较好地捕捉湖区空间不同点位流速及其差异,但部分点位的流速模拟值要略低于观测值,R^2值变化范围为 0.68~0.89(图 5). 尽管湖区流速不如水位模拟效果理想,可能是由于湖盆微地形变化的影响[22],但水动力模型很好地模拟了水文水动力要素的主要变化特征,为耦合粒子示踪模型开展倒灌影响研究提供保障.

2.3 倒灌影响的水动力评估

不难发现,倒灌导致了鄱阳湖全湖区水位的整体抬高,表明倒灌可能造成鄱阳湖更严重的洪水事件与灾害(图 6a、b). 对比图 6 中两次典型倒灌事件可以得出,湖泊水位受影响最为显著的区域主要分布在贯穿整个湖区的主河道,而浅水洪泛区的水位则受倒灌影响相对较小. 总体而言,倒灌使得湖泊空间水位提高约 0.2~1.5 m,倒灌影响程度由湖口逐渐向湖区中上游以及湖岸边界等区域衰减(图 6a、b). 倒灌对湖区流速的影响与水位呈现相似的空间分布格局,而且也向湖区中上游逐渐减弱,但流速的空间变化表现出更为复杂的特征(图 6c、d). 也就是说,倒灌趋向于增加湖泊主河道的流速(可达 0.3 m/s),但影响范围最远可至棠荫等中部湖区. 因为洪泛区的水流相对较缓,在地形和倒灌的复合影响下,倒灌使得流速变化既有增加(正值)又有减小(负值),但总体上洪泛区流速受倒灌影响表现得相对较弱(图 6c、d). 从湖区水量平衡角度出发,倒灌对空间水位和流速的影响主要取决于长江来水进入鄱阳湖的倒灌量. 数据资料显示,在 7—10 月,长江倒灌量约为流域"五河"来水总和的 4 倍,从而可以合理解释倒灌对湖区水位的整体抬高以及流速复杂的空间响应.

对比无倒灌条件下的流向变化(方案 S3 和 S4)可以发现,星子、都昌和棠荫等水文站的水流均对倒灌表现出较为一致的响应变化(方案 S1 和 S2),流向变化约 90°~180°,但上游康山湖区的流向变化相对较小,甚至没有变化(图 7). 由此得出,在湖区南北方向上,虽然流向转变角度可达 180°,但倒灌对流向的影响似乎也呈现出向湖区上游逐渐减弱的趋势. 水流流向变化将会使得湖区中不同类型物质排泄不畅以及长时间滞留湖区,进而对湖泊水环境状况造成严重影响. 粒子示踪结果清晰呈现了倒灌期间粒子或物质在倒灌改变水流作用下整体向湖区上游迁移,但是倒灌对不同湖区粒子的迁移距离影响却差异较大(图 8),表明水动力场的空间变异性. 总体上,倒灌导致的水流流向变化能够使得湖区绝大部分粒子向上游迁移几千米至大约 20 km,且倒灌使得粒子在下游主河道的迁移距离要明显大于中上游等洪泛区(图 8). 如上分析,原因主要归结为倒灌对流速和流向的影响随着距湖口距离的增加而逐步减弱(图 6、7). 本文研究结果充分证实了先前研究过程中的推断,即倒灌会阻止湖水的正常排泄而增加了湖区的换水周期,进而导致湖区水环境状况恶化等[18-21].

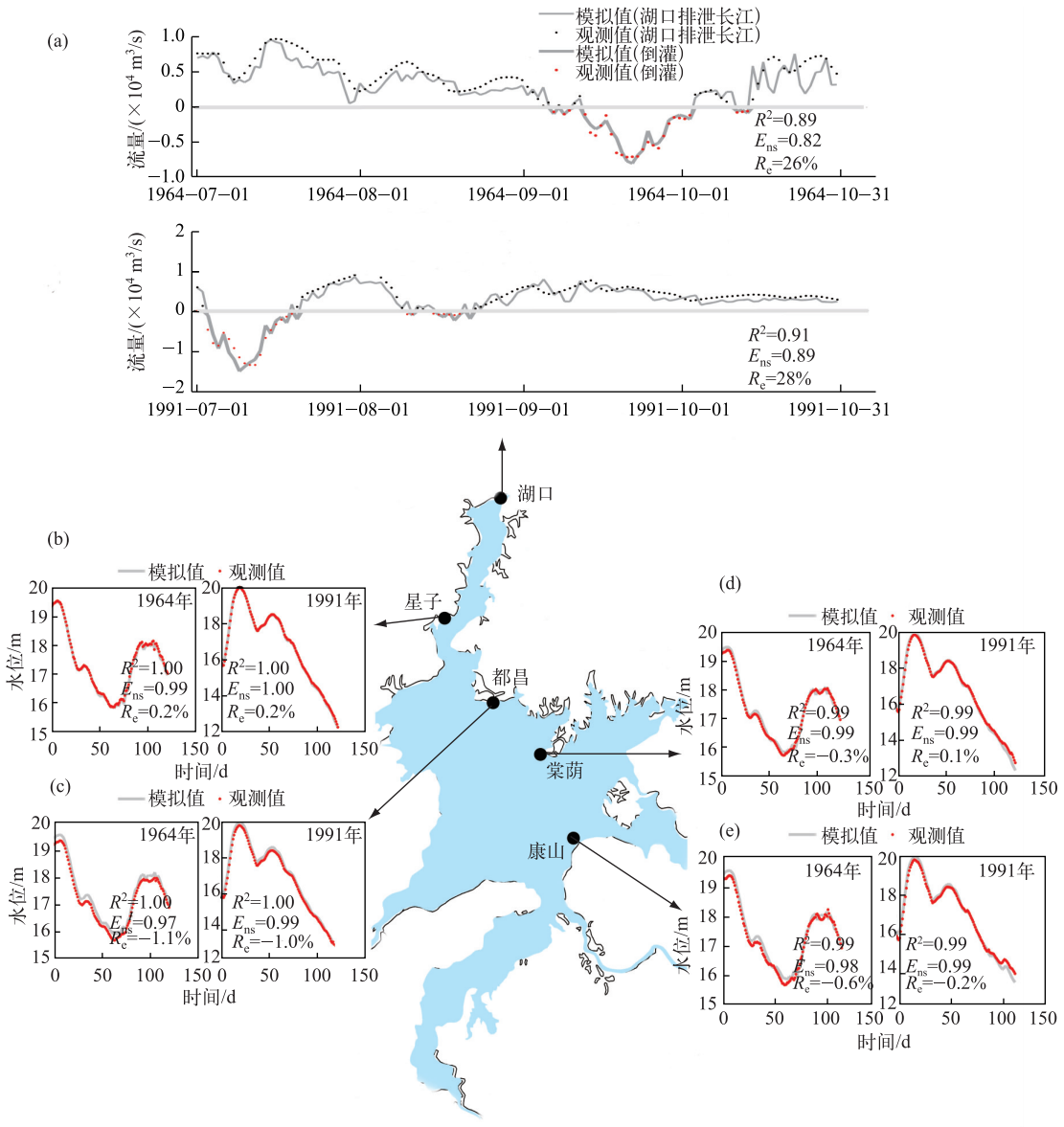


图 4 鄱阳湖湖口流量(a)和空间水位(b~e)验证

Fig.4 Validation of modelled and observed Hukou discharges (a) and spatial water levels (b−e) in Poyang Lake

3 结论与展望

本文以鄱阳湖复杂水系统的倒灌现象为切入点,基于统计方法和二维水动力-粒子示踪耦合模型阐明了倒灌的物理成因、倒灌发生的判别依据以及倒灌对鄱阳湖水文水动力影响等重要科学问题,为水流结构复杂以及水环境状况日益恶化的鄱阳湖的研究提供重要科学依据和参考,为其今后健康发展提供保障. 主要得出以下几点结论:

1)流域“五河”入湖径流、长江干流径流情势以及两者叠加作用均是倒灌的影响因素,但长江干流径流情势是影响或者控制倒灌频次与倒灌量的主要因素. 流量比大小是判别倒灌发生的必要条件,可用来作为

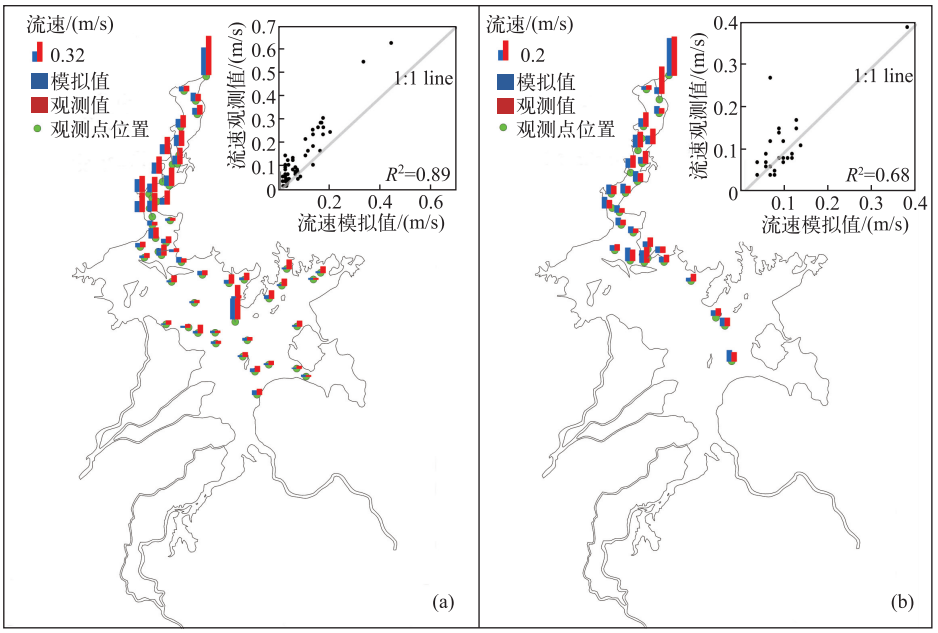


图 5 鄱阳湖空间流速验证图(a:1964 年 8 月 16 日;b:1964 年 9 月 7 日)

Fig.5 Validation of modelled and observed point velocities in Poyang Lake
(a and b represent the two dates on 16th August and 7th September in 1964, respectively)

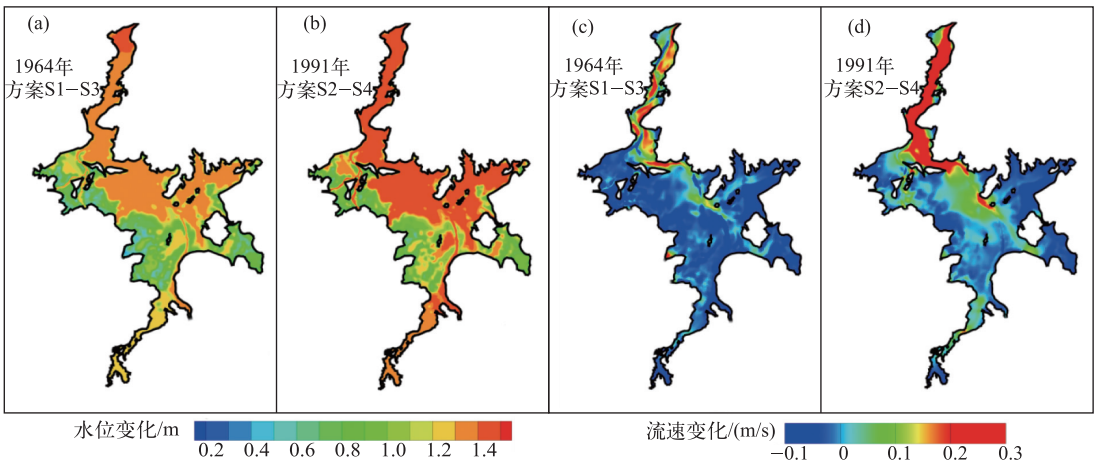


图 6 典型倒灌事件对鄱阳湖水位(a、b)和流速(c、d)的影响

Fig.6 Influence of typical backflow on water levels (a, b) and water velocities (c, d) within Poyang Lake

倒灌发生与否的一个重要指示. 流量比在无倒灌发生条件下变化幅度较大(1%~147%),而倒灌条件下流量比的变化幅度相对较小(0.9%~30%). 概率统计表明,当流量比低于约 5%时,倒灌可能发生且最大发生概率可达 25%;当流量比高于 10%时,倒灌发生概率则低于 2%.

2)鄱阳湖水动力模型 MIKE 21 具有再现鄱阳湖水位、流速以及倒灌特征的能力. 水动力结果表明,倒灌对湖区水位与流速的影响向湖区中上游逐渐减弱,湖泊水位和流速受影响最为显著的区域主要分布在贯穿整个湖区的主河道,而浅水洪泛区的水位和流速则受倒灌影响相对较小. 倒灌使得湖泊空间水位提高约

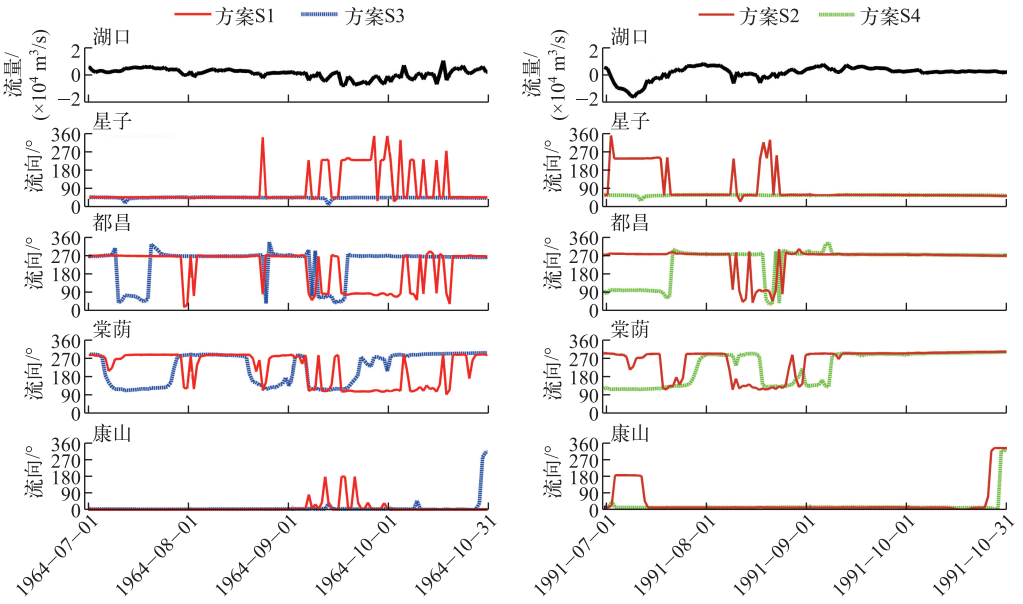


图 7 典型倒灌对鄱阳湖空间 4 个站点流向的影响

Fig.7 Influence of typical backflow on flow direction at four gauging stations in Poyang Lake

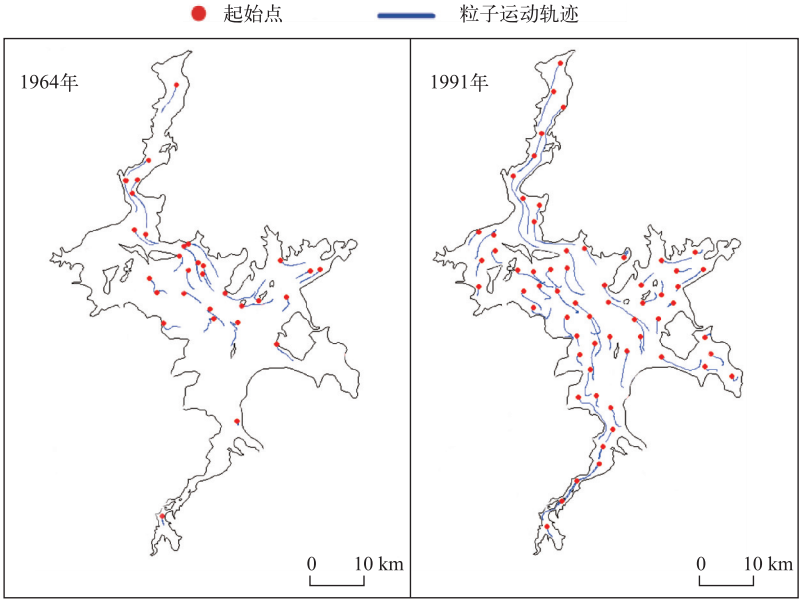


图 8 典型倒灌对鄱阳湖区空间粒子运动轨迹的影响

Fig.8 Influence of typical backflow on particle trajectories across Poyang Lake

0.2~1.5 m,湖泊主河道的流速增加幅度可达 0.3 m/s.

3)倒灌导致湖区水流流向转变约 90°~180°,倒灌对流向的影响呈现出向湖区上游逐渐减弱的趋势. 粒子示踪结果表明,倒灌导致的水流流向变化能够使湖区大部分粒子或物质向上游迁移约几千米至 20 km,且粒子或物质在下游主河道的迁移距离要明显大于中上游等洪泛区.

未来研究工作应耦合泥沙输移模型并考虑鄱阳湖地形变化来更加细致地研究倒灌对湖泊水文水动力的影响,也可重点关注倒灌对江湖交汇处以及泥沙开采区等典型湖区水动力要素的影响.

4 参考文献

[1] Lehner B, Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 2004, **296**(1/2/3/4): 1-22.

[2] Cooke GD, Welch EB, Peterson S *et al* eds. Restoration and management of lakes and reservoirs. United States: CRC Press, 2005.

[3] Peters DL, Buttle JM. The effects of flow regulation and climatic variability on obstructed drainage and reverse flow contribution in a Northern river-lake-delta complex, Mackenzie basin headwaters. *River Research and Applications*, 2010, **26**: 1065-1089.

[4] Leconte R, Pietroniro A, Peters DL *et al*. Effect of flow regulation and hydroclimatic conditions on the Peace-Athabasca delta 1996 summer flood. *River Research and Applications*, 2001, **17**: 51-65.

[5] Waugh JR, Webby MG. Hydraulic behaviour of the outlet of Lake Wakatipu, Central Otago, New Zealand. *Journal of Hydrology* (*New Zealand*), 2006, **45**: 29-40.

[6] Raman RK, Lin SD, Hullinger DL. Diagnostic-feasibility study of Lake George, Lake County, Indiana. Contract Report 606, 1996, Hammond, Indiana.

[7] Tran L, Barber M, Beutel M *et al*. Effects of Zosel dam water regulation on Osoyoos Lake water quality (Study 4). Washington: Washington State Department of Ecology, 2011.

[8] Kite G. Modelling the Mekong: hydrological simulation for environmental impact studies. *Journal of Hydrology*, 2001, **253**: 1-13.

[9] Anderson EJ, Schwab DJ. Relationship between wind-driven and hydraulic flow in Lake St. Clair and the St. Clair River Delta. *Journal of Great Lakes Research*, 2011, **37**: 147-158.

[10] Ye Xuchun, Li Xianghu, Zhang Qi. Temporal variation of backflow frequency from the Yangtze River to Poyang Lake and its influencing factors. *Journal of Southwest Agricultural University*: *Natural Science Edition*, 2012, **34**: 1-8. [叶许春, 李相虎, 张奇. 长江倒灌鄱阳湖的时序变化特征及其影响因素. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, **34**: 1-8.]

[11] Tang Changxin, Xiong Xiong, Wu Nianhua *et al*. Simulation of the impact of the reverse flow from Yangtze River on the hydrodynamic process of Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 700-710. DOI: 10.18307/2015.0419. [唐昌新, 熊雄, 邬年华等. 长江倒灌对鄱阳湖水动力特征影响的数值模拟. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 700-710.]

[12] Fang Chunming, Cao Wenhong, Mao Jixin *et al*. Relationship between Poyang Lake and Yangtze River and influence of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(2): 175-181. [方春明, 曹文洪, 毛继新等. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响. 水利学报, 2012, **43**(2): 175-181.]

[13] Shankman D, Heim BD, Song J. Flood frequency in China's Poyang Lake region: trends and teleconnections. *International Journal of Climatology*, 2006, **26**: 1255-1266.

[14] Guo H, Hu Q, Zhang Q *et al*. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003-2008. *Journal of Hydrology*, 2012, **416/417**: 19-27.

[15] Hu Q, Feng S, Guo H *et al*. Interactions of the Yangtze River flow and hydrologic processes of the Poyang Lake, China. *Journal of Hydrology*, 2007, **347**: 90-100.

[16] Min Qian. Research on rules of water level change in Poyang Lake. *J Lake Sci*, 1995, **7**(3): 281-288. DOI: 10.18307/1995.0312. [闵骞. 鄱阳湖水位变化规律的研究. 湖泊科学, 1995, **7**(3): 281-288.]

[17] Li Rongfang, Wu Dunyin, Liu Ying *et al*. Analysis on the pondage action of the Poyang Lake to the flood in Yangtze River. *Hydrology*, 2003, **23**(6): 13-17. [李荣昉, 吴敦银, 刘影等. 鄱阳湖对长江洪水调蓄功能的分析. 水文, 2003, **23**(6): 12-17.]

[18] Cui L, Wu G, Liu Y. Monitoring the impact of backflow and dredging on water clarity using MODIS images of Poyang Lake, China. *Hydrological Processes*, 2009, **23**: 342-350.

[19] Wu G, deLeeuw J, Skidmore AK *et al*. Concurrent monitoring of vessels and water turbidity enhances the strength of evidence in remotely sensed dredging impact assessment. *Water Research*, 2007, **41**: 3271-3280.

[20] Wu Longhua. The study on effects of Three Gorge Project to environment of Poyang Lake. *Hydrology*, 2007, **6**: 586-591. [吴龙华. 长江三峡工程对鄱阳湖生态环境的影响研究. 水文, 2007, **6**: 586-591.]

[21] Yao X, Wang S, Ni Z *et al*. The response of water quality variation in Poyang Lake (Jiangxi, People's Republic of China) to hydrological changes using historical data and DOM fluorescence. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**: 3032-3042.

[22] Li YL, Zhang Q, Yao J *et al*. Hydrodynamic and hydrological modeling of Poyang Lake catchment system in China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, **19**: 607-616.

[23] Li YL, Yao J, Zhang L. Investigation into mixing in the shallow floodplain Poyang Lake (China) using hydrological, thermal and isotopic evidence. *Water Science & Technology*, 2016, **74**(11): 2582-2598. DOI: 10.2166/wst.2016.444.

[24] Yao Jing, Zhang Qi, Li Yunliang *et al*. The influence of uniform winds on hydrodynamics of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 225-236. DOI: 10.18307/2016.0126. [姚静, 张奇, 李云良等. 定常风对鄱阳湖水动力的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 225-236.]

[25] Feng L, Hu C, Chen X *et al*. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observation between 2000 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**: 80-92.

[26] Li YL, Zhang Q, Yao J. Investigation of residence and travel time in a large floodplain lake with complex lake-river interactions: Poyang Lake (China). *Water*, 2015, **7**: 1991-2012.

[27] Zhang Q, Ye XC, Werner AD *et al*. An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake: Comparison of Yangtze River and local catchment impacts. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**: 425-434.

[28] Zhang Q, Werner AD. Hysteretic relationships in inundation dynamics for a large lake-floodplain system. *Journal of Hydrology*, 2015, **527**: 160-171.

[29] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE 21 flow model: hydrodynamic module user guide. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute Water and Environment, 2014.

[30] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE 21 flow model FM: particle tracking module user guide. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute Water and Environment, 2014.

[31] Anderson KE, Harrison LR, Nisbet RM *et al*. Modeling the influence of flow on invertebrate drift across spatial scales using a 2D hydraulic model and 1D population model. *Ecological Modelling*, 2013, **265**: 207-220.

[32] Fan Fanping. The study of hydrodynamic simulation of Poyang Lake based on Delft3D model [Dissertation]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2010. [范翻平. 基于 Delft3D 模型的鄱阳湖水动力模拟研究[学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2010.]

[33] Li YL, Zhang Q, Werner AD *et al*. Investigating a complex lake-catchment-river system using artificial neural networks: Poyang Lake (China). *Hydrology Research*, 2015, **46**: 912-928.