

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.195>



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

孙晓梁¹, 杜尧^{2*}, 邓娅敏^{1,2}, 陶艳秋², 马腾²

1. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 地下水排泄在湖泊水量及营养盐均衡中发挥着重要作用, 其中地下水向湖泊排泄的量化是关键, 但目前对其时间变异性的研究却十分薄弱. 针对这一科学问题, 以长江中游重要调蓄湖泊—洞庭湖为例, 通过收集1996~2017年洞庭湖流域的水文和气象数据, 基于质量平衡模型, 查明地下水排泄对洞庭湖水量均衡的贡献以及地下水向洞庭湖排泄强度随时间的变化. 结果显示: (1) 枯水期时地下水排泄量为 $(0.17\sim 1.51)$ 亿 m^3/d , 地下水排泄强度为 $38.74\sim 207.26$ mm/d, 地下水排泄对湖泊水量均衡的贡献为 $8.70\%\sim 30.37\%$; (2) 地下水排泄量、地下水排泄强度、地下水排泄对湖泊水量均衡的贡献在1996~2017年间均呈现出明显的先降低再升高的变化趋势, 三峡水库蓄水后至三峡工程全面竣工初期的地下水排泄相较于三峡水库蓄水前和三峡工程全面运行后显著降低; (3) 三峡工程运行对长江水位及地下水位的改变可能是引起湖底地下水排泄时间变异性的主要原因. 为洞庭湖区域的水量均衡提供了新的认识, 也为今后洞庭湖区域水资源开发利用和区域生态安全管理提供了理论支撑.

关键词: 地下水; 洞庭湖; 质量平衡模型; 时间变异性; 水量均衡.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2021)07-2555-10

收稿日期: 2020-07-07

Contribution and Its Temporal Variation of Groundwater Discharge to the Water Mass Balance of Dongting Lake from 1996 to 2017

Sun Xiaoliang¹, Du Yao^{2*}, Deng Yamin^{1,2}, Tao Yanqiu², Ma Teng²

1. Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Groundwater discharge plays an important role in lake water and nutrient mass balance, for which the key is to quantify lacustrine groundwater discharge (LGD). However, the temporal variation of LGD has been poorly known. In response to this scientific problem, this study takes the important lake in the middle reaches of the Yangtze River-Dongting Lake as an example. By collecting hydrological and meteorological data from the Dongting Lake basin in 1996–2017, the contribution of groundwater discharge to Dongting Lake and the temporal variation of LGD rate were determined based on the mass balance model. The results indicated that: (1) The LGD volume during the dry season was $(0.17\sim 1.51)\times 10^8$ m^3/d , the LGD rate was $38.74\sim 207.26$ mm/d, and the contribution of LGD to Dongting Lake was $8.70\%\sim 30.37\%$; (2) the LGD volume, rate and its contribution to Dongting Lake showed a decreasing tendency during 2003–2010 and an increasing tendency during 2010–2017, and the LGD from the impoundment of the Three Gorges Reservoir to the completion of the Three Gorges Project was significantly lower than that

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. 121201001000150121, 12120114069301).

作者简介: 孙晓梁 (1996–), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究工作. ORCID: 0000-0002-3227-7456. E-mail: XiaoliangSun1209@163.com

*** 通讯作者:** 杜尧, ORCID: 0000-0002-5934-9288. E-mail: yaodu@cug.edu.cn

引用格式: 孙晓梁, 杜尧, 邓娅敏, 等, 2021. 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. 地球科学, 46(7): 2555–2564.

before the impoundment of the Three Gorges Reservoir and the completion of the Three Gorges Project; (3) the changes of the Yangtze River stage and groundwater table induced by the operation of the Three Gorges Project may be an important cause for the temporal variability of LGD. This study provides a new understanding of the water balance in the Dongting Lake area, as well as the theoretical support for the future utilization of water resources and regional ecological security management in the Dongting Lake area.

Key words: groundwater; Dongting Lake; mass balance model; temporal variation; water balance.

0 引言

地下水排泄在湖泊水量及营养盐均衡中发挥着重要作用. 近年来越来越多的研究显示, 地下水是一些湖泊水均衡中的主要端元. 例如, Gurrieri and Furniss (2004) 发现地下水排泄占美国蒙塔纳州一湖泊中总入湖水量的 90%, Stets *et al.* (2010) 发现地下水排泄占美国明尼苏达州北部一湖泊中总入湖水量的 94%. 即使地下水排泄在某些湖泊的水均衡中有着很小的贡献, 但因为其携带的营养盐可能具有很高的浓度而成为湖泊营养盐均衡中最重要的输入端元 (Lewandowski *et al.*, 2015; Meinikmann *et al.*, 2015). 因此, 对地下水向湖泊的排泄进行量化对于湖泊水资源管理及生态安全保障均具有重要意义. 受气候变化与人类工程活动的影响, 湖底地下水排泄可能会随时间发生变化 (Rosenberry *et al.*, 2009). 由于湖底地下水排泄的微小变化即可能引起湖泊生态的显著变化, 为更好地预测和管理湖泊未来的水资源、水生态状况, 就需要深入理解湖底地下水排泄的时间变异性. 然而, 由于影响因素复杂, 湖底地下水排泄的时间变异性一直被忽视.

洞庭湖是我国第二大淡水湖, 以其丰富的水资源条件在抗击洪涝灾害和维持长江中游生态系统的多样性等方面发挥着重要作用, 具有极为重要的调蓄功能和生态功能 (赵军凯等, 2011). 加强洞庭湖区的水资源管理对于长江中游乃至整个长江流域的水资源、水环境和水生态保护具有重要意义 (熊建新等, 2018). 为科学地进行洞庭湖区的水资源管理与生态保护, 对湖区水量均衡的认识至关重要. 李振林 (2003) 等人研究指出由于自然条件和人类活动的改变, 长江向洞庭湖分流的水量呈递减趋势, 钱湛 (2014) 等人研究表明多年来除长江分流以外的河流入湖水量的变化相对稳定, 可见已有对洞庭湖区水量均衡的研究主要关注入湖河流以及湖泊自身. 然而, 作为一种潜在的输入端元, 地下水对

于洞庭湖水量均衡的贡献一直被忽视. 此外, 受气候与人类活动 (如水利工程修建) 的影响, 洞庭湖区开始出现水资源量减少、湿地退化等问题 (孙占东等, 2011). 与气候波动性和渐变性影响不同, 重大人类工程的影响具有趋势性的特征, 更值得关注. 由人类工程活动所导致的区域水文条件的变化必然会导致洞庭湖区湖底地下水排泄随时间的变化. 因此, 以洞庭湖为对象来研究湖底地下水排泄的时间变异性是十分典型的.

针对以上背景, 本研究将洞庭湖入湖河流与地下水作为一个统一的系统, 利用 1996~2017 年连续 21 年的水文数据和气象数据, 基于水量均衡模型, 评估地下水排泄对湖泊水量均衡的贡献, 重点研究其数十年尺度的时间变异性. 本研究可为洞庭湖区域的水量均衡提供新的认识, 为今后洞庭湖区域水资源开发利用和区域生态安全管理提供理论支撑.

1 研究区域概况

洞庭湖, 地处长江中游荆江南岸、湖南省北部 (余姝辰等, 2019). 湖区东部为低山丘陵, 南部和西部多为平原, 平均海拔不足 50 m (张季和翟红娟, 2011). 湖区年均气温 16.4~17.0 °C, 年均降水量 1 100~1 400 mm. 整个洞庭湖大致呈一个“J”字状, 分为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖 3 部分. 洞庭湖北纳长江的松滋口、太平口、藕池口 3 口来水 (李杨和杨文尧, 2016; 孙思瑞等, 2018), 南和西接湘江、资水、沅江、澧水 4 水及其他小型支流, 经湖泊调蓄后由城陵矶出流补给长江, 构成江湖水量交换关系 (何征等, 2015). 地表水整体形成不对称的向心水系, 水量充沛, 年径流变幅大, 年内径流分配不均 (刘培亮等, 2015), 汛期长而洪涝频繁. 此外, 洞庭湖水体滞留时间短、水体更新时间约为 18~22 d (王丽婧等, 2020). 由于多年的泥沙淤积和人工围垦, 洞庭湖的面积和容量正在不断减少 (王文清, 2000; 王鸿翔等, 2018).

洞庭盆地是长江中游最大的第四纪沉积盆地

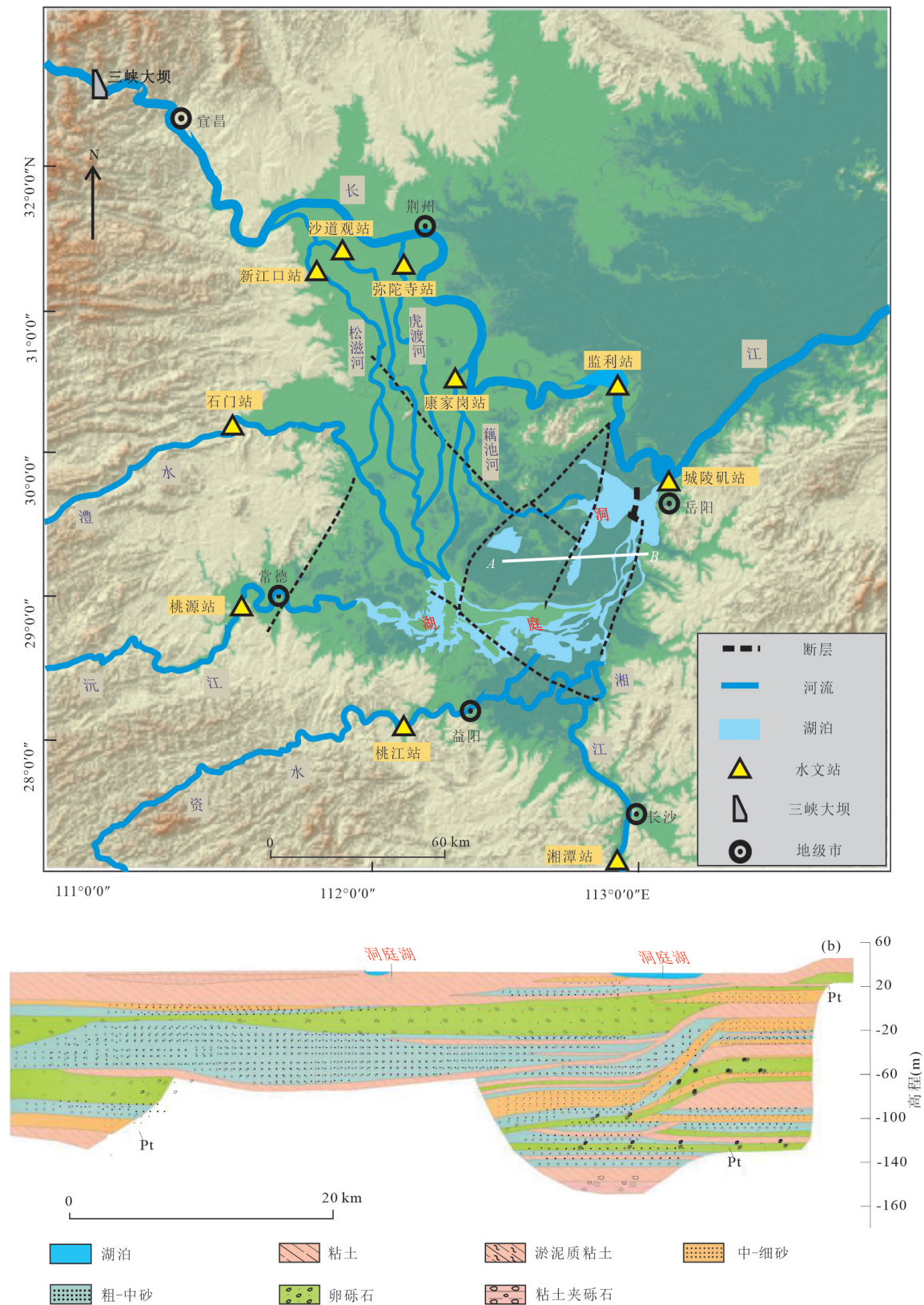


图1 洞庭湖区域概况

Fig.1 General map of Dongting Lake area

之一(赵举兴等,2016),是中生代白垩纪以来由中国东部地壳强烈拉伸而形成的断陷盆地,主要受北

北东向、北东向和北西向3组断裂的切割。湖区除桃花山、赤山、明山头 and 黄山头等地出露基岩和更新

统地层外,绝大部分地面均为全新统松散沉积层所覆盖.洞庭湖湖底沉积物粒径分布由东向西呈逐渐增大趋势,东洞庭湖区沉积物粒径较细(王岩, 2014).洞庭湖平原不存在严格意义上的、区域上连续隔水层圈定的地下水系统.整个区域含水层结构大致以3层结构为主,局部地区为双层结构和单层结构,含水层岩性主要以粉细砂、粗中砂为主,局部含砾石.区域内地下水位四周高,中部及东北部低,地下水从四周向中部及东、南洞庭湖一带运动(黄第藩等, 1965; 邹文发, 1989).

洞庭湖水资源总量较为丰富,但水资源的时空分布不均,使得洞庭湖成为一个季节性湖泊,导致区域性和季节性缺水严重,素有“洪水一大片,枯水几条线”之说.这使得洞庭湖在枯水期经常出现缺水问题,甚至干旱问题.因此,枯水期地下水向洞庭湖的排泄对于区域水量的维持就至关重要.

2 研究方法

2.1 数据的获取

受湘、资、沅、澧“四水”汛期入湖水量的影响,洞庭湖通常在5~10月维持在高水位,持续时间较长.在每年12月至次年2月,洞庭湖会进入枯水期,持续时间较短.本研究所需的水文数据和气象数据分别从湖南省水文信息查询系统和中国气象数据网获取,具体如下:

(1)湘江湘潭站、资水桃江站、沅江桃源站、澧水石门站、松滋河新江口站和沙道观站、虎渡河弥陀寺站和藕池河康家岗站的1996~2017年连续21年间每年12月至次年2月每日8:00的流量数据,这8个水文站是“四水三口”入洞庭湖距离最近、且有长期流量监测数据的站点.

(2)洞庭湖出水口城陵矶站的1996~2017年连续21年间每年12月至次年2月每日8:00的流量数据和水位数据.

(3)长江监利站的1998~2017年连续19年间每年12月至次年2月每日8:00的水位数据(1998年之前监利站的水位数据缺失).

(4)1996~2017年连续21年间每年12月至次年2月常德站每日的降水和蒸发数据.

2.2 相关数据计算

2.2.1 洞庭湖面积计算 湖泊水位越高,湖泊面积越大;反之,湖泊面积越小.洞庭湖水位与面积具有一定的相关性,谢文君(2017)等人以1996~2016年

Landsat和高分1号影像为主要数据源,采用水体指数和阈值相结合的方法提取洞庭湖水面信息,结合城陵矶站的水位数据,得出了水面面积和水位之间具有强烈的相关性,整体相关系数的平方达到0.948 2.建立的洞庭湖水位与面积之间的二次曲线回归方程如下:

$$S = 2.5408 \times x^2 + 5.9253 \times x - 761.97, \quad (1)$$

式中: S . 洞庭湖面积(km^2); x . 洞庭湖水位(m).

通过此公式,可以利用城陵矶的水位计算出洞庭湖1996~2017年连续21年间枯水期每日的面积.

2.2.2 洞庭湖容积计算 湖泊水位越高,湖泊容积越大;反之,湖泊容积越小.洞庭湖水位与容积具有一定的相关性,通过建立水位数学模型(易波琳等, 2000),得到了洞庭湖水位与湖容之间的数学方程:

$$V = 2.2948 \times x^{6.4786}, \quad (2)$$

式中: V . 洞庭湖体积(m^3); x . 洞庭湖水位(m).

通过此公式,可以利用城陵矶的水位计算出洞庭湖1996~2017年连续21年间枯水期每日的体积.

2.2.3 降水量和蒸发量计算 选用距洞庭湖最近的常德气象监测站1996~2017年的降水和蒸发数据,通过以下公式计算得出洞庭湖的降水量和蒸发量:

$$P_i = p \times S, \quad (3)$$

$$E_o = e \times S, \quad (4)$$

式中: P_i . 洞庭湖湖面的总降水量; p . 常德站日降水量; E_o . 洞庭湖湖面的总蒸发量; e . 常德站日蒸发量; S . 为湖泊面积.

2.3 质量平衡模型的建立

洞庭湖在枯水期的入湖水量、出湖水量、降水量和蒸发量以及地下水排泄量之间在一定时空范围内存在着一个水量均衡的关系,这一关系可表示为如下公式(Fu *et al.*, 2018):

$$\Delta V = G_x + P_i + R_i - E_o - R_o, \quad (5)$$

$$\Delta V = \frac{V_2 - V_1}{n}, \quad (6)$$

$$\text{可得: } G_x = \Delta V - P_i - R_i + E_o + R_o, \quad (7)$$

式中: ΔV . 湖容变化量(m^3/d); V_1 . 初始日期体积(m^3); V_2 . 截止日期体积(m^3); n 为枯水期天数; G_x . 净交换量(m^3/d); P_i . 降水量(m^3/d); R_i . 地表水入湖量(m^3/d); E_o . 蒸发量(m^3/d); R_o . 地表水出湖量(m^3/d). R_i 和 R_o 的计算通过选取各个水文站每日8:00的流量数据(m^3/s),将其进行单位换算得到计算所需的流量(m^3/d);对枯水期每日的流量求和,再根据枯水期的天数求取每日流量均值(m^3/d).

当 $G_x > 0$ 时,则整体表现为地下水向湖泊排泄;
当 $G_x < 0$ 时,则整体表现为地下水接受湖泊补给.

$$v = \frac{G_x}{S} \times 10^3,$$

(8)

式中: v . 地下水平均交换强度(mm/d); S . 枯水期湖面的平均面积(m^2).

2.4 参数敏感性分析

建立水量均衡模型时,对实际情况作出的一系列假设或概化,以及参数取值的误差均会给计算结果带来不确定性.敏感性分析是模型不确定量化的重要环节,有助于确定模型中各参数对模型精度的影响,在采样、测试到计算等过程中应加强对高敏感度参数的关注(田雨等,2010).本研究采用基于扰动分析的相对灵敏度分析方法(Scardi *et al.*, 1999; Choi *et al.*, 1992),即在其他因子都不变的情况下,通过在一定范围内扰动目标因子的取值,进行多次模拟,选取 n 次不同的计算结果,利用相邻的两次计算结果计算相对敏感性的一个值,然后取 $n-1$ 次的平均值.此方法计算公式为:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(Q_{i+1} - Q_i)/Q_a}{(P_{i+1} - P_i)/P_a}}{n - 1},$$

(9)

式中: S . 为参数相对敏感度; P_{i+1} 和 P_i 为第 $i+1$ 和第 i 次参数输入的数值; P_a 为两者均值; Q_{i+1} 和 Q_i 为第 $i+1$ 和第 i 次模型输出的结果, Q_a 为两者均值.

本研究根据各项参数取值范围和初始值不同,

在初始值基础上对每个参数分别增减 10%、20%、30%、40% 共 8 次,获得模型相应输出的敏感性指数,求出均值作为最终结果.敏感性分级(李燕等, 2013)如表 1 所示,根据相对敏感度 S 的数值结果进行敏感性分级,以此来判断各个参数的敏感性等级.

3 结果分析

3.1 湖底地下水排泄及其对水量均衡的贡献

根据所收集到的各项相关数据,计算得到了 1996~2017 年不同年份枯水期地下水排泄的相关结果.由式(7)计算结果可知:1996~2017 年间,每年的地下水交换量(G_x)均大于 0,这说明在枯水期洞庭湖与地下水之间的交换关系表现为地下水向洞庭湖排泄,与前期湖水与地下水的水位监测所表现出的信息一致(即枯水期时地下水位高于湖水位).1996~2017 年间地下水排泄量、排泄强度和各入湖端元对湖泊水量均衡贡献的变化范围和平均值见表 2(期间枯水期地下水排泄量、排泄强度和各入湖端元对湖泊水量均衡贡献的详细结果见附表 1、附表 2).

结果显示,1996~2017 年间,地下水排泄量变化区间为 0.17~1.51 亿 m^3/d ,多年平均为 0.55 亿 m^3/d ;地下水排泄强度变化区间为 38.74~207.26 mm/d,多年平均为 98.78 mm/d.降水、地下水排泄、地表水径流对湖泊总水量的贡献存在显著差异.其中,降水对湖泊总水量的贡献最小,变化区间为 0.09%~0.65%,多年平均为 0.32%;地表水径流对湖泊总水量的贡献最大,变化区间为 69.31%~91.00%,多年平均为 81.37%;地下水排泄对湖泊总水量的贡献介于二者之间,变化区间为 8.70%~30.37%,多年平均贡献为 18.31%.由此可知,湖泊的总水量主要来自于地表径流量,但地下水排泄量对湖泊总水量的贡献亦不可忽视.

表 1 敏感性分级

Table 1 Classification of sensitivity degree

等级	范围	敏感性表征
I	$ S < 0.05$	不敏感
II	$0.05 < S < 0.20$	弱敏感
III	$0.20 < S < 0.50$	一般敏感
IV	$0.50 < S < 1.00$	比较敏感
V	$1.00 < S $	极为敏感

表 2 1996~2017 年枯水期的地下水排泄量、排泄强度和各入湖端元对水量均衡的贡献

Table 2 Groundwater discharge and discharge rate during dry season and percentage of contribution to the water balance by each lake end element from 1996 to 2017

	地下水排泄量 (亿 m^3/d)	地下水排泄 强度(mm/d)	降水对水量均 衡的贡献(%)	地表水对水量均 衡的贡献(%)	地下水对水量均 衡的贡献(%)
区间	0.71~1.51	38.74~207.26	0.09~0.65	69.31~91.00	8.70~30.37
均值	0.55	98.78	0.32	81.37	18.31

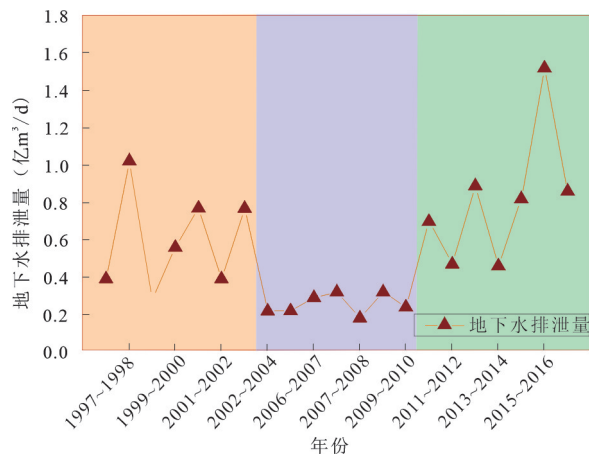


图2 1996~2017年地下水排泄量的变化

Fig.2 Changes in groundwater discharge from 1996 to 2017

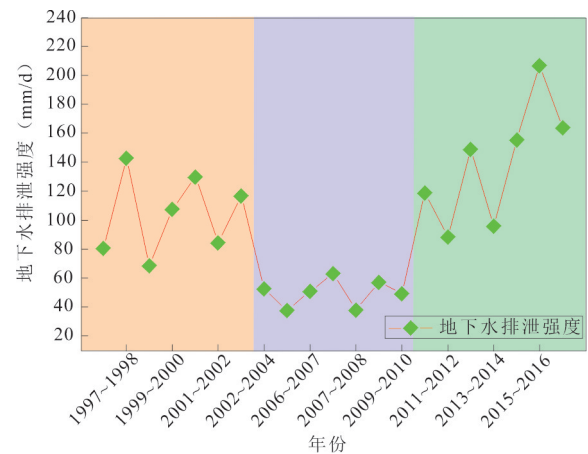


图3 1996~2017年地下水排泄强度的变化

Fig.3 Changes in groundwater discharge rate from 1996 to 2017

3.2 湖底地下水排泄的时间变异性及其影响因素

3.2.1 湖底地下水排泄的时间变异性 由附表1~附表2中的数据可以看出,地下水排泄量、地下水排泄强度及地下水排泄对水量均衡的贡献在不同年份具有显著的时间变异性.由图2~图4可以进一步看出,地下水排泄量、地下水排泄强度和地下水排泄对水量均衡的贡献的变化在整体上均表现出“先降低、再升高”的趋势.1996~2003年,地下水排泄量、地下水排泄强度和地下水排泄对水量均衡的贡献的平均值分别为0.59亿m³/d、103.07 mm/d和14.75%.相较于1996~2003年,地下水排泄量、地下水排泄强度和地下水排泄对水量均衡的贡献在2003~2010年之间均显著降低,平均值分别为0.25亿m³/d、59.10 mm/d和12.37%.在2010年之后,以上3个指标又显著升高,平均值分别为0.81亿m³/d、140.45 mm/d和24.39%.

3.2.2 大型水利设施对地下水排泄的影响及其原因分析 自然气候变化和人类工程活动均会导致湖底地下水排泄随时间的变化.作为一种重要的人类工程活动,水利工程的修建会强烈地改变地表水文情势,进而改变地表水—地下水相互作用关系.三峡水利枢纽建于湖北宜昌境内的长江干流上(Kai *et al.*, 2016),距洞庭湖出口约400 km,其与洞庭湖的相对地理位置如图1所示.三峡水利枢纽于1994年开始建造,2003年5月开始蓄水发电,2009年全面竣工(刘文彬等, 2018).

通过对比地下水排泄的时间变异性 and 三峡水利枢纽建设过程的时间节点,发现二者在时间上具有很好的一致性.基于此,可将地下水排泄在时间上的变化分为3个时期:

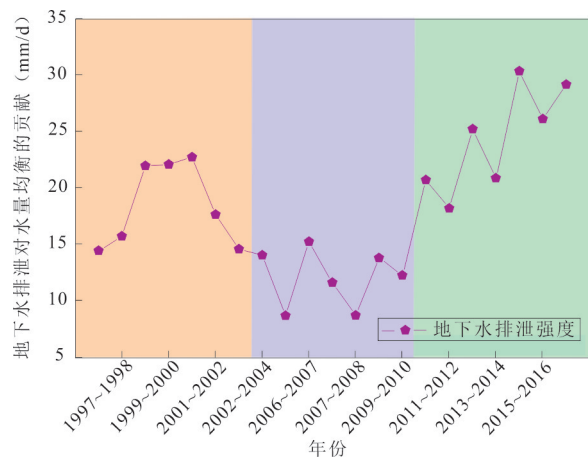


图4 地下水排泄量的贡献随时间的变化

Fig.4 Changes in contribution of groundwater discharge to water mass balance

(1) 1996~2003年,对应着三峡水库未蓄水时期.此时长江的水文情势由自然气候条件决定,不受三峡工程的影响,长江水位季节性变动大.

(2) 2003~2010年,对应着三峡水库蓄水初期(蓄水位135~156 m).此时三峡工程进入蓄水发电时期,常年的高水位发电使得三峡大坝以下的长江来水减少,枯水期时长江水位较之前几乎无变化.

(3) 2010~2017年,对应着三峡水库全面运行时期(蓄水位175 m).此时三峡大坝完全发挥着发电、调蓄作用,枯水期向下游补水作用明显,枯水期长江水位较往年有明显升高.

其中,在三峡水库全面运行后,地下水排泄对水均衡的贡献较之前显著升高.综合分析可知,在岩性、地貌、水系特征、水力梯度等天然因素的影响下,水利工程的建设和可能加剧了湖底地下水排泄的

时间变异性。

洞庭湖位于洞庭盆地最低处,枯水期时地下水由周边向湖盆汇集。洞庭湖周边的地下水位与洞庭湖的水位差影响着地下水的排泄强度。洞庭湖平原西部和北部的地表水系与长江有直接联系,长江水情影响着长江干流水系周边的地下水位并且受三峡工程的调蓄作用的控制。对于洞庭湖平原西部,长江水情的变化通过影响“三口”的水情进而使得洞庭湖平原腹地西部的地下水位发生变化;对于洞庭湖平原北部,詹泸成等(2014)的研究显示,东洞庭湖北侧君山一带的地下水极有可能来源于长江。长江与洞庭湖北侧边界之间距离仅为3~10 km,长江水情的改变影响着此处的地下水位的变化。三峡工程发挥调蓄作用后,三峡工程蓄水(2003年)以来,洞庭湖在枯水期整体上水位受三峡工程影响波动不大(陈虞平,2016)。因此,在受长江水情影响剧烈的洞庭湖平原西部和北部区域的枯水期地下水位越高,地下水向洞庭湖的排泄强度越大。

三峡工程开始蓄水(2003年)至全面运行(2010年)期间,长江汇入“三口”的流量明显减少,枯水期断流时间增加,使得洞庭湖西侧的地下水位下降,进而使得地下水向洞庭湖排泄强度降低。同时,在调蓄作用下,长江水位(监利站)较三峡工程蓄水前上升0.16 m,长江与洞庭湖区域的地下水位有所上升,但变幅很小,东洞庭湖北侧地下水位的细微抬升对该区域地下水排泄强度影响微小。因此,在整体上,地下水向洞庭湖的排泄强度降低。

在三峡工程全面运行后(2010年以来),新的调度方式使得枯水期长江水位大幅抬升(较2003~2009年抬升0.52 m)。赵秋湘(2020)、付湘等(2019)研究指出,三峡工程全面运行后,“三口”在枯水期断流天数减少且水量有所增加,这势必使得洞庭湖平原腹地西部地下水水位抬升,进而使得地下水向洞庭湖的排泄强度升高。且有监测数据显示,三峡工程运行后,枯水期时东洞庭湖北侧君山一带的地下水位有所抬升(姜端午等,2010)。因长江水位抬升造成的地下水水位抬升,进而导致地下水位与洞庭湖的水位差增大,使得此区域地下水向洞庭湖排泄强度增强(图5)。

此外,通过分析长江监利站(距东洞庭湖区域最近的长江水文站)水位与地下水向洞庭湖的排泄量之间的关系,可看出二者显著相关,相关系数为0.72(图6),这充分说明长江水位可能在很大程度上

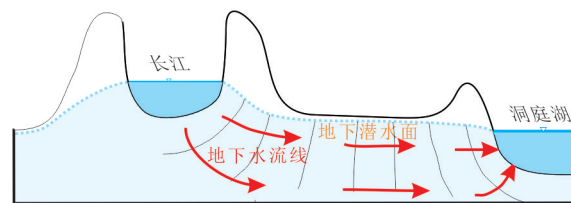


图5 长江—洞庭湖之间区域地下水流动的概念模型

Fig.5 Conceptual model of groundwater flow in the area between the Yangtze River and Dongting Lake

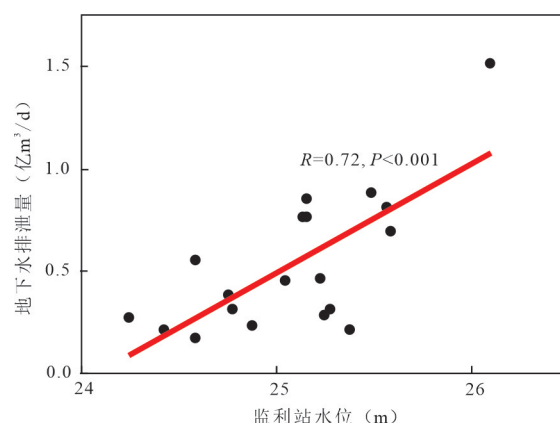


图6 长江监利站水位与地下水排泄量的关系

Fig.6 Relationship between water level in Jianli Station of Yangtze River and groundwater discharge to the Dongting Lake

通过改变地下水位而影响了地下水向洞庭湖的排泄。而在三峡工程全面运行后,规律性的调蓄使三峡大坝下游枯水期的长江水位相较于之前有所提高,因此,2010年后湖底地下水排泄量升高。

在1996~2017年间,地下水排泄的时间变异性在很大程度上受大型水利工程建设的影响。当前,在长江中游能够强烈改变地表水文情势的大型水利工程建设已基本完成,人类活动对洞庭湖湖底地下水排泄的影响将会减小,自然气候条件可能成为影响湖底地下水排泄的主要因素。基于近年来洞庭湖区地下水排泄的变化趋势,可合理预测在自然气候条件的控制下,未来一段时期洞庭湖区域地下水排泄对湖泊水量均衡的贡献将会保持与近年来相近的水平。

3.3 模型参数敏感度分析及误差分析

水量均衡模型涉及到的参数较多,参数相对敏感度分析结果见表3,结果如下:(1)洞庭湖出湖水量的参数相对敏感度很高,敏感度分级为V级,属极度敏感参数;(2)入湖水量的参数相对敏感度较高,敏感度分级为IV级,属比较敏感参数;(3)降水

表 3 水量均衡模型的参数相对敏感度分析结果
Table 3 Results of relative sensitivity analysis of parameters of water balance model

参数	相对敏感度	敏感度分级	敏感性特征
出湖水量 R_o	5.375	V	极度敏感
入湖水量 R_i	0.522	IV	比较敏感
降水量 P_i	0.013	I	不敏感
蒸发量 E_o	0.009	I	不敏感
湖容变化量 ΔV	0.047	I	不敏感

量、蒸发量和湖容变化量的参数相对敏感度最低,敏感度等级为 I 级,属不敏感参数。

因此,地表水向湖泊输入的水量和湖水流出的水量的不确定性对模型输出的结果影响较大。向湖泊输入和输出的地表水水量的误差可能来自于以下方面:(1)汨罗江,新墙河等小型地表水系的水量贡献未考虑;(2)计算总入湖水量时未考虑坡面流;(3)计算时段内洞庭湖区域地表水的人工取水量也会导致湖水的损失,是一个潜在的误差来源。

枯水期时湖区内汨罗江、新墙河等其他小型地表水系流量小于 $10\text{ m}^3/\text{s}$,而四水和三口总流量约为 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$,这些小型入湖河流流量远远小于主要入湖河流流量,因此这些小型河流对入湖水量的贡献可忽略。坡面流对洞庭湖水量的影响未知,但考虑到洞庭湖平原区极缓的地形坡度($<1/1\,000$)和枯水期很小的降水量(平均约 1.5 mm/d),此项误差的贡献十分有限。枯水期洞庭湖湖水的人工取水量未知,但考虑到枯水期退水后核心湖区外围会形成广阔的滩地,核心湖域的人工取水有限,其对总体水量均衡的贡献也很小,不足以影响计算结果。即使如此,将来的研究仍需要更加精细化,深入调研坡面流和人工取水量的影响。

4 结论

(1)在枯水期,湖泊水分的补给来源包括入湖河流、地下水排泄、降水,其中地下水排泄占总量的 18.31%。

(2)1996~2017 年间,地下水排泄量为 $0.17\sim1.51\text{ 亿 m}^3/\text{d}$,地下水排泄强度为 $38.74\sim207.26\text{ mm/d}$,地下水排泄量对湖泊总水量均衡贡献的占比为 $8.70\%\sim30.37\%$,这 3 项指标在整体上均表现出“先降低(2003~2010 年)、再升高(2010~2017 年)”的变化趋势。

(3)三峡工程建设和运行影响着地下水向洞

庭湖排泄。地下水排泄量、地下水排泄强度及地下水排泄对湖泊水量均衡的贡献在三峡水库蓄水至竣工(2003~2010 年)期间显著低于三峡水库蓄水前和三峡工程全面运行后。三峡工程在不同时期及调蓄模式的运行下,长江水位及地下水位的改变可能是引起湖底地下水排泄时间变异性的的重要原因,未来的研究将重点关注。

附表见本刊官网:www.earth-science.net。

References

Chen, Y.P., 2016. The Variation and Response of Water and Sediment Exchange between Yangtze River and Dongting Lake after the Three Gorges Reservoir Impoundment (Dissertation). China Institute of Resources & Hydropower Research, Beijing (in Chinese with English abstract).

Choi, J. Y., Choi, C.H., 1992. Sensitivity Analysis of Multi-layer Perception with Differentiable Activation Functions. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 3(1):101–107. <https://doi.org/10.1109/72.105422>.

Fu, L., Wang, G. C., Shi, Z. M., et al., 2018. Estimation of Groundwater Discharge and Associated Chemical Fluxes into Poyang Lake, China: Approaches Using Stable Isotopes (δD and $\delta^{18}\text{O}$) and Radon. *Hydrogeology Journal*, 26(5): 1625–1638. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1793-3>

Fu, X., Zhao, Q.X., Sun, Z.H., 2019. Effects of 175m Experimental Operation of the Three Gorges Reservoir on the Storage Capacity of Lake Dongting. *Journal of Lake Sciences*, 31(6):1713–1725 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.18307/2019.0603>.

Gurrieri, J. T., Furniss, G., 2004. Estimation of Groundwater Exchange in Alpine Lakes Using Non-Steady Mass-Balance Methods. *Journal of Hydrology*, 297(1/2/3/4): 187–208. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.04.021>

He, Z., Wan, R.R., Dai, X., et al., 2015. Seasonal Water Regime Change of Dongting Lake in Recent 30 Years and Its Response to Changes in Water Exchange in Rivers and Lakes. *Lake Science*, 27(6): 991–996 (in Chinese with English abstract).

Huang, D.F., Yang, S.Z., Liu, Z.Q., et al., 1965. Lake Geology of the Three Large Freshwater Lakes in the Lower Reaches of the Yangtze River and Its Formation and Development. *Ocean and Lake*, 7(4): 396–426 (in Chinese with English abstract).

Jiang, D.W., Huang, S.C., Zhang, Y.P., et al., 2010. A Discussion on the Evolution of the Dongting Lake Based on Geo-Environmental Remote Sensing Investigation and

- Monitoring Data. *Remote Sensing for Land & Resources*, (S1):124—129 (in Chinese with English abstract).
- Kai, D., 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(Part D): 89—97. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.213>
- Lewandowski, J., Meinikmann, K., Nützmann, G., et al., 2015. Groundwater: The Disregarded Component in Lake Water and Nutrient Budgets. Part 2: Effects of Groundwater on Nutrients. *Hydrological Processes*, 29(13): 2922—2955. <https://doi.org/10.1002/hyp.10384>
- Li, Y., Li, Z.F., Xi, Q., et al., 2013. Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF. *Environmental Science*, 34(6): 2139—2145 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Yang, W. Y., 2016. The Evolution of Runoff in the Three Rivers of Dongting Lake and the Challenges Faced by Agricultural Water. *China Rural Water and Hydropower*, (11): 86—92+100 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.L., 2003. The Change of Water Distribution between Yangtze River and Dongting Lake and Its Influence on Flood Control. Proceedings of the Fourth Symposium of Hydrology and Sediment Committee of Chinese Society of Hydraulic Engineering, Beijing, 65—68(in Chinese with English abstract).
- Liu, P.L., Mao, D.H., Zhou, H., et al., 2015. The Variation of Runoff in the Flood Season of Hunan Four Waters into Dongting Lake from 1990 to 2013. *Water Conservation*, 31(4): 52—61 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W.B., Yang, T., Du, M.Y., et al., 2018. Influence of Three Gorges Reservoir Operation on Hydrological Mechanism of Typical Hydrological Stations in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. *Three Gorges Ecological Environment Monitoring*, 3(3): 8—15(in Chinese with English abstract).
- Meinikmann, K., Hupfer, M., Lewandowski, J., et al., 2015. Phosphorus in Groundwater Discharge: A Potential Source for Lake Eutrophication. *Journal of Hydrology*, 524(6): 214—226. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.031>
- Qian, Z., Zhang, S.H., Zhuo, S.Y., et al., 2014. Analysis on Variation Trends and Cycle of Water Inflow from Four Rivers to Dongting Lake. *Yangtze River*, 45(15):39—42(in Chinese with English abstract).
- Rosenberry, D. O., Winter, T. C., 2009. Hydrologic Processes and the Water Budget: Chapter 2. Mirror Lake: Interactions among Air, Land, and Water. Academic Press, Utah, 23—68.
- Scardi, M., Harding, L. W. Jr., 1999. Developing an Empirical Model of Phytoplankton Primary Production: A Neural Network Case Study. *Ecological Modelling*, 120(2/3): 213—223. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(99\)00103-9](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(99)00103-9)
- Stets, E. G., Winter, T. C., Rosenberry, D. O., et al., 2010. Quantification of Surface Water and Groundwater Flows to Open- and Closed-Basin Lakes in a Headwaters Watershed Using a Descriptive Oxygen Stable Isotope Model. *Water Resources Research*, 46(3): W03515. <https://doi.org/10.1029/2009wr007793>
- Sun, S.R., Xie, P., Zhao, J.Y., et al., 2018. Analysis of Flood Peak Flow and Water Level Variation Characteristics of Three Mouths in Dongting Lake. *Lake Science*, 30(3): 812—824 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z.D., Huang, Q., Jiang, J.H., et al., 2011. Analysis on the Changes of Main Ecological Environment Problems in Dongting Lake. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 20(9): 1108—1113. (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Lei, X.H., Jiang, Y.Z., et al., 2010. Comment on Parameter Sensitivity Analysis of Hydrological Model. *Journal of China Hydrology*, 30(4):9—12 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.X., Cha, H.F., Li, Y., et al., 2018. Study on Hydrological Situation Change of Dongting Lake after Impoundment of Three Gorges Reservoir. *Hydropower Energy Science*, 36(10): 31—33+48 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.J., Tian, Z.B., Li, Y.J., et al., 2020. Trend and Driving Factors of Water Environment Change in Dongting Lake in the Last 30 Years. *Research of Environmental Sciences*, 33(5):1140—1149(in Chinese with English abstract).
- Wang, W.Q., 2000. Water resources of Dongting Lake and Its Impact on Wetland Ecological Environment. *Land and Resources Technology Management*, (6): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., 2014. Temporal and Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Dongting Lake and Ecological Risk Assessment(Dissertation). Northeast Forestry University, Harbin (in Chinese with English abstract).
- Xie, W.J., Yue, C.Y., Zhang, W., et al., 2017. Study on the Temporal and Spatial Characteristics of Dongting Lake from 1996 to 2016. *Water Resources Informatization*, (5): 32—38(in Chinese with English abstract).
- Xiong, J.X., Wu, N.F., Chen, D.L., et al., 2018. Spatial and Temporal Differentiation of Ecological Carrying Capacity Response in Dongting Lake Area. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, (12): 13—21+29.

- (in Chinese with English abstract).
- Yi, P.L., Li, X.B., Mei, J.H., et al., 2000. Assessment of the Relationship between the Volume and Water Level of Dongting Lake and Its Storage Capacity. *Hunan Geology*, (4): 267—270 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S.C., Yu, D.Q., Wang, L.C., et al., 2019. Remote Sensing Study of Dongting Lake Beach Changes before and after Operation of Three Gorges Reservoir. *Earth Science*, 44(12):4275—4283 (in Chinese with English abstract).
- Zhan, L.C., Chen, J.S., Zhang, S.Y., et al., 2014. Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation, Surface Water and Groundwater in the Dongting Lake Region. *Advances in Water Science*, 25(3):327—335 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Zhai, H.J., 2011. Dongting Lake and Lake District Water Resources Protection Plan. *Yangtze River*, 42(2): 56—58 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.K., Li, J.F., Dai, Z.J., et al., 2011. Analysis of Water Exchange Effect of Rivers and Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 26(9): 1613—1627(in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.X., Li, C.A., Zhang, Y.F., et al., 2016. Quaternary Chronostratigraphy of Borehole S3-7 in Dongting Basin. *Earth Science*, 41(4):633—643 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Q.X., Fu, X., Sun, Z.H., et al., 2020. Evaluation of the Impact of Three Gorges Reservoir on Three Outlets of Jingjiang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 37(2):7—14 (in Chinese with English abstract).
- Zou, W.F., 1989. Relationship between Soil Gleization and Geological features in Dongting Lake Area. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 12 (1): 88—93 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈虞平, 2016. 三峡水库运用后长江与洞庭湖水沙交换的变化及响应(博士毕业论文). 北京:中国水利水电科学研究院.
- 付湘, 赵秋湘, 孙昭华, 等, 2019. 三峡水库 175 m 试验性蓄水期调度运行对洞庭湖蓄水量变化的影响. *湖泊科学*, 31(6): 1713—1725.
- 何征, 万荣荣, 戴雪, 等, 2015. 近 30 年洞庭湖季节性水情变化及其对江湖水量交换变化的响应. *湖泊科学*, 27(6): 991—996.
- 黄第藩, 杨世倬, 刘中庆, 等, 1965. 长江下游三大淡水湖的湖泊地质及其形成与发展. *海洋与湖沼*, 7(4):396—426.
- 姜端午, 黄树春, 张苑平, 等, 2010. 基于地质环境遥感调查与监测数据探讨洞庭湖演变规律. *国土资源遥感*, (S1): 124—129.
- 李燕, 李兆富, 席庆, 等, 2013. HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究. *环境科学*, 34(6):2139—2145
- 李杨, 杨文尧, 2016. 洞庭湖三口河系地区径流演变情势与农业用水面临的挑战. *中国农村水利水电*, (11):86—92+100.
- 李振林, 2003. 荆江与洞庭湖水量分配关系的变化及对防洪的影响. *中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会第四届学术讨论会论文集*, 65—68.
- 刘培亮, 毛德华, 周慧, 等, 2015. 1990~2013 年湖南四水入洞庭湖汛期径流量的变化规律. *水资源保护*, 31(4):52—6
- 刘文彬, 杨涛, 杜牧野, 等, 2018. 三峡水库运行对长江中下游典型水文站水文机制的影响. *三峡生态环境监测*, 3(3):8—15.
- 钱湛, 张双虎, 卓志宇, 等, 2014. 四水入洞庭湖水量变化趋势及周期分析. *人民长江*, 45(15):39—42.
- 孙思瑞, 谢平, 赵江艳, 等, 2018. 洞庭湖三口洪峰流量和水位变异特性分析. *湖泊科学*, 30(3): 812—824.
- 孙占东, 黄群, 姜加虎, 2011. 洞庭湖主要生态环境问题变化分析. *长江流域资源与环境*, 20(9):1108—1113.
- 田雨, 雷晓辉, 蒋云钟, 等, 2010. 水文模型参数敏感性分析方法研究评述. *水文*, 30(4):9—12.
- 王鸿翔, 查胡飞, 李越, 等, 2018. 三峡水库蓄水后洞庭湖水文情势变化研究. *水电能源科学*, 36(10):31—33+48.
- 王丽婧, 田泽斌, 李莹杰, 等, 2020. 洞庭湖近 30 年水环境演变态势及影响因素研究. *环境科学研究*, 33(5):1140—1149.
- 王文清, 2000. 洞庭湖水资源及其对湿地生态环境的影响. *国土资源科技管理*, (6):1—7.
- 王岩, 2014. 洞庭湖氮磷时空分布及生态风险评价(博士毕业论文). 哈尔滨:东北林业大学.
- 谢文君, 岳翠莹, 张文, 等, 2017. 洞庭湖 1996~2016 年时空特征变化研究. *水利信息化*, (5):32—38.
- 熊建新, 吴南飞, 陈端吕, 等, 2018. 洞庭湖区生态承载力响应的时空分异. *中南林业科技大学学报*, (12):13—21+29.
- 易波琳, 李晓斌, 梅金华, 等, 2000. 洞庭湖面积容积与水位关系及调蓄能力评估. *湖南地质*, (4):267—270.
- 余姝辰, 余德清, 王伦澈, 等, 2019. 三峡水库运行前后洞庭湖洲滩面积变化遥感认识. *地球科学*, 44(12):4275—4283.
- 詹泸成, 陈建生, 张时音, 等, 2014. 洞庭湖湖区降水—地表水—地下水同位素特征. *水科学进展*, 25(3):327—335.
- 张季, 翟红娟, 2011. 洞庭湖湖区水资源保护规划. *人民长江*, 42(2):56—58.
- 赵军凯, 李九发, 戴志军, 等, 2011. 枯水年长江中下游江湖水交换作用分析. *自然资源学报*, 26(9):1613—1627.
- 赵举兴, 李长安, 张玉芬, 等, 2016. 洞庭盆地 S3-7 孔第四纪年代地层. *地球科学*, 41(4):633—643.
- 赵秋湘, 付湘, 孙昭华, 等, 2020. 三峡水库运行对长江三口分流的影响评估. *长江科学院院报*, 37(2):7—14.
- 邹文发, 1989. 洞庭湖区土壤潜育化和地质地貌的关系. *湖南师范大学自然科学学报*, 12(1):88—93.