

基于多源遥感数据的近30年洞庭湖蓄水量变化及其保障程度分析

余姝辰^{1,2}, 邹娟^{1,2,*}, 徐盾彬³, 张利军³, 刘启¹, 李海兵¹, 贺秋华^{1,2}, 张高华¹
1.湖南省自然资源事务中心, 湖南长沙 410004
2.洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室, 湖南长沙 410007
3.湖南省遥感地质调查监测所, 湖南长沙 410015

摘要: 为研究洞庭湖蓄水量变化及生态需水量保障程度, 本文利用1994年以来231个时相卫星遥感影像, 结合水位、径流量、降水量等水文数据, 拟合近30年来洞庭湖水面、湖容与水位的关系模型, 揭示三峡水库(Three Gorges Reservoir, TGD)运行前后洞庭湖蓄水量时序变化特征, 采用“生态需水量年内展布法”, 分析洞庭湖生态需水量保障程度, 剖析驱动原因。结果表明: (1) 近30年来, 洞庭湖年均蓄水量总体呈减小趋势, 由TGD运行前的 $51.41 \times 10^8 \text{m}^3$ 减少到运行后的 $45.83 \times 10^8 \text{m}^3$, 减幅10.85%。其中10月份减幅最大, 达24.50%, 与TGD因发电在每年10月份控制下泄量的时间吻合。(2) TGD运行后洞庭湖水生态安全趋于严峻, 年均最小、适宜生态需水量保障度和最大生态需水量超出度分别由96.38%、68.05%和20.69%减少到90.30%、62.71%和16.84%。其中9~10月最小、适宜生态需水量保障度大幅度降低, 加剧了洞庭湖秋季缺水与干旱水情; 7~8月最大生态需水量超出度明显减小, 缓解了洞庭湖汛期洪涝灾害隐患。(3) 洞庭湖入湖径流量、年均降水量减小和持续的泥沙淤积是洞庭湖蓄水量减少与保障度降低的主要驱动, 湖砂开采扩大了洞庭湖的湖容, 但蓄水量增幅极其有限。卫星遥感技术为湖泊蓄水量保障程度研究提供了新的技术手段, 这对支持洞庭湖水资源调配和水生态修复具有实用意义。

关键词: 多源遥感数据; 洞庭湖; 蓄水量变化; 生态需水量; 保障程度; 驱动原因

中图分类号: P343.3

收稿日期: 2025-06-10

Analysis of changes in water storage capacity of Dongting Lake over the past 30 years and its guarantee level based on multi-source remote sensing data

Yu Shuchen^{1,2}, Zou Juan^{1,2,*}, Xu Zhibin³, Zhang Lijun³, Liu Qi¹, Li Haibing¹, He Qiuhua^{1,2}, Zhang Gaohua¹

1.Hunan Center of Natural Resources Affairs, Changsha 410004, China

2.Hunan Provincial Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Ecological Environment in Dongting Lake Area, Changsha 410007, China

3.Remote Sensing Geological Survey and Monitor Institute of Hunan Province, Changsha 410015, China

Abstract: In order to study the changes in water storage capacity and the degree of ecological water demand guarantee in Dongting Lake, this paper uses 231 satellite remote sensing images since 1994, combined with hydrological data such as water level, runoff, and precipitation, to fit a model of the

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(No.2024JJ8320,2025JJ80020), 湖南省科技人才托举工程“年轻优秀科技人才培养计划”(No.2023TJ-N16), 湖南省自然资源科技计划项目(No.湘自资科 20230151ST, 湘自资科 20230142ST)共同资助, 洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室开放课题(2023-06)和自然资源部洞庭湖流域生态保护修复工程技术创新中心开放课题(2023-17)。

作者简介: 余姝辰(1990~), 女, 高级工程师, 博士, 水工环地质和国土空间生态遥感监测。E-mail: 22581400@qq.com, ORCID: 0000-0002-4240-6186.

通讯作者: 邹娟(1989~), 女, 高级工程师, 主要从事资源环境遥感监测与科研工作。E-mail: 339818271@qq.com

relationship between water surface, lake capacity, and water level in Dongting Lake in the past 30 years, revealing the temporal changes in water storage capacity of Dongting Lake before and after the operation of the Three Gorges Reservoir (TGD). The "annual distribution method of ecological water demand" is adopted to analyze the degree of ecological water demand guarantee in Dongting Lake and analyze the driving reasons. The results show that: (1) In the past 30 years, the average annual water storage capacity of Dongting Lake has generally decreased, from 5.141 billion m³ before TGD operation to 4.583 billion m³ after operation, a decrease of 10.85%. The largest decrease was in October, reaching 24.50%, which coincides with the time when TGD controls its discharge due to power generation in October each year. (2) After the operation of TGD, the ecological security of Dongting Lake water has become increasingly severe, with the annual minimum and suitable ecological water demand guarantee degree and maximum ecological water demand exceeding degree decreasing from 96.38%, 68.05%, and 20.69% to 90.30%, 62.71%, and 16.84%, respectively. The minimum and suitable ecological water demand guarantee in September and October has significantly decreased, exacerbating the autumn water shortage and drought situation in Dongting Lake. The maximum ecological water demand in July and August has significantly decreased, alleviating the hidden dangers of flood disasters in Dongting Lake during the flood season. (3) The decrease in runoff, average annual precipitation, and continuous sediment deposition in Dongting Lake are the main drivers of the reduction in water storage capacity and security. Sand mining has expanded the lake capacity of Dongting Lake, but the increase in water storage capacity is extremely limited. Satellite remote sensing technology provides a new technical means for studying the degree of water storage guarantee in lakes, which has practical significance for supporting the allocation of water resources and water ecological restoration in Dongting Lake.

Keywords: Multi-source remote sensing data; Dongting Lake; Changes in water storage capacity; Ecological water demand; Degree of guarantee; Driving reasons

洞庭湖多年年均水量占长江年均总水量的 31.7%（中华人民共和国水利部，2021；水利部长江水利委员会，2021），是长江主要分洪落淤场所和重要的国际湿地保护区域。但是，由于流域内气候、水沙条件变化和人类工程活动，洞庭湖水资源时空分布发生了重大改变，致使洞庭湖枯水季节提前、季节性缺水日趋严重（童潜明等，2014），洪涝灾害隐患仍然存在（仲志余和宁磊，2008；郑丹丹，2024）。湖泊水量的变化将影响生物数量和分布，进而影响湖泊的生产功能、环境功能和生态功能（Zhu et al., 2021；Wang et al., 2023）。因此，揭示洞庭湖蓄水量变化，对优化湖区水资源配置、改善水环境质量、维护水生态安全具有重要意义。

湖泊生态用水可用生态水位、生态需水量等表征，前人主要开展生态水位研究。杨毓鑫等（2019）基于 1953~2013 年城陵矶、鹿角、南嘴、小河嘴和杨柳潭 5 个水文站逐日水位观测数据，计算东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的最低生态水位分别是 22.62 m、27.19 m 和 28.11m；王鸿翔等（2020）基于 1959~2016 年城陵矶、杨柳潭、南咀 3 个水文站资料，计算东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的最低生态水位分别是 21.41m、27.84m 和 28.95m，适宜生态水位分别为 23.29m、28.36m 和 29.51m；黄宇云等（2020）基于 1953~2018 年城陵矶站资料，计算东洞庭湖的最低生态水位为 16.21~17.86m，最高生态水位为 28.54~31.48m。另外，徐志侠等（2004）、Zhang et al.（2016）、梁婕等（2013）先后利用 1955~2011 年、2005~2012 年、1952~2006 年等不同时段的城陵矶水文站资料，计算洞庭湖的最低生态水位分别为 23.39m、20.58~21.46m 和 22.26m。可见，前人的研究结果迥异。究其原因，一是所采用的计算方法不同，二是所利用的水文站观测时段不统一。这也说明，前人对洞庭湖生态水位的研究并未形成共识。特别是，由于湖泊生态系统各组成部分生长繁殖不仅与水位有关，还与湖泊水深、蓄水量存在动态响应关系（唐克旺等，2003），而湖泊生态水位主要反映湖泊消落带动物和植物的栖息环境，不能反映鱼类等水生生物所需的湖

泊水深、蓄水量等生境情况。由此,开展洞庭湖水资源量变化研究成为必然。徐幸仪等(2020)、Deng et al.(2021)先后分析枝城、城陵矶、螺山等水文站月均径流量资料,认为三峡工程的修建对洞庭湖水资源的调节影响明显;胡倩等(2022)进一步分析发现,三峡水库蓄水后洞庭区水资源量减幅为 22.7%,其中 10 月份减幅达 45%。这些研究主要根据洞庭湖区水文站出、入径流量观测数据,未反映洞庭湖蓄水量的空间分布,难以揭示时序变化规律。近年来,伴随遥感技术的日臻成熟,基于遥感的洞庭湖水资源时空变化研究成为热点。Li et al.(2021)和 Wang et al.(2022)提出了基于 2017~2020 年 Sentinel-1/2 数据的水体自动提取和长期变化监测技术,其精度在 95%以上;Peng et al.(2021)、Yang et al.(2021)利用 Landsat 和 MODIS 等卫星数据研究,认为三峡水库运行后洞庭湖永久水面与季节性水面均呈减小趋势;贺秋华等(2021)的研究认为,三峡水库运行后洞庭湖年均水面面积减幅为 20.45%。这些研究极大地提高了对洞庭湖水资源时空变化、季节性缺水及其影响原因的认识,但未涉及蓄水量保障程度研究。

水生态是指水对生物的影响和生物对水分条件的适应。水安全需要一定的生态水量、良好的水质状况和良性循环的水生态空间保障。其中,水量不仅是工农业生产中水权分配、水资源配置与水资源调度的重要指标,更是决定水质和水生态的基本因素。本文针对近年来洞庭湖季节性缺水等水资源生产功能问题(童潜明等,2014;贺秋华等,2021),利用 1994~2023 年 200 多个时相的卫星遥感影像,采用“生态需水量年内展布法”(王鸿翔等,2020,2021),监测近 30 年来洞庭湖蓄水量变化,分析生态需水量保障程度,剖析驱动原因。本研究将为后三峡时代洞庭湖区水资源调配和水生态修复提供科学依据和决策参考。

1 研究数据和方法

1.1 研究区域

洞庭湖是长江出三峡进入中下游平原后季节性水位涨落幅度特别明显的蓄洪调节湖泊,具有“水涨成湖,水落露洲”的水面变化特点(余姝辰等,2019,2020)。洞庭湖吞吐荆江藕池、松滋、太平“三口”分流,承接湘、资、沅、澧“四水”以及周边汨罗江、新墙河等区间来水,经调蓄落淤后,通过东北部唯一出口城陵矶泄入长江(图 1)。区内河网交错,沟渠纵横,形成了复杂的水系格局。洞庭湖区的湖泊包括垸内湖泊和通江湖泊两种类型(余姝辰等,2021),本文主要研究通江湖泊的蓄水量变化及其保障程度。

1.2 研究数据

本文利用的数据包括遥感信息源、基础地理数据、水文数据和气象数据四种。

遥感信息源包括 1994 年以来 TM/ETM/OLI/CBERS-1/HJ-1/Sentinel-2/GF-1 等 7 种卫星数据,共收集 231 个时相,其中三峡水库(TGD)运行前 10 年(1994~2003)为 48 期,TGD 运行后近 20 年(2004~2023)为 181 期。

基础地理数据包括 2008 年 1:50 000 DLG 数据,用于图像纠正处理平面控制;1998 年和 2017 年水下 DEM 数据,用于洞庭湖蓄水量计算。

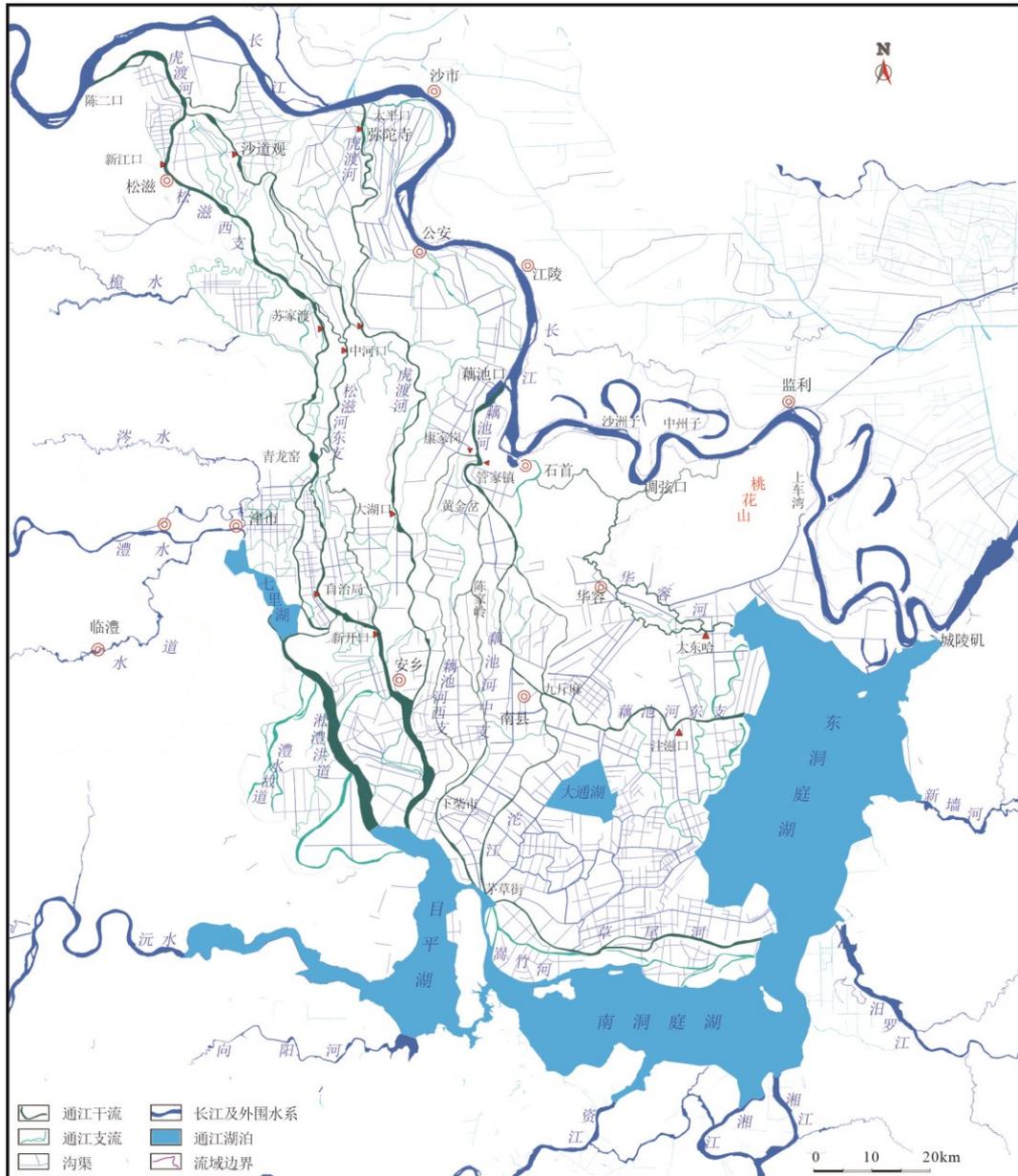


图1 洞庭湖区水系遥感解译图

Fig.1 Remote sensing interpretation map of water system in Dongting Lake area

水文数据包括 1994~2022 年城陵矶水文站每日水位实时监测数据，来自湖南省水文公共服务“一张图”；1994 年以来湘、资、沅、澧“四水”、长江松滋、太平、藕池“三口”径流量与输沙量数据，来自 2000 年以来水利部编制的《中国河流泥沙公报》（中华人民共和国水利部，2021）和 2006 年以来长江水利委员会编制的《长江泥沙公报》（水利部长江水利委员会，2021）。

气象数据主要是洞庭湖流域和洞庭湖区 2000~2022 年降水量资料，来自湖南省水利厅发布的 2000 年以来《湖南省水资源公报》（湖南省水利厅，2021）。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感图像处理。本文利用的 7 种卫星影像数据，空间分辨率为 15~30m，均具有严密的星历参数。为统一精度，在 ERDAS Imagine 支持下首先按 15.0m 重采样，然后以前述的 2008 年 1:50 000 DLG 数据为平面控制，基于星历参数建立物理纠正模型予以纠正。对处理后的各时段遥感影像，利用 ArcGIS/Georeferencing 模块进行坐标系转换，统一到 2000 国家大地坐标系。

以 2008 年 1:50 000 标准分幅 DLG 为参照基准进行纠正精度评价。评价中，每幅 1:50 000 图幅的检测点数量在 20 个点以上，分别计算同名地物点的中误差（表 1）。

表 1 各类卫星影像纠正精度一览表

单位: m

影像类型	TM	ETM	OLI	CBERS-1	HJ-1	Sentinel-2	GF-1
配准中误差	14.21	10.24	7.47	13.25	14.72	11.94	6.55

可以看出, 各类遥感影像的配准中误差介于 6.55~14.72m 之间, 空间分辨率越高配准精度也越高。根据《遥感影像平面图制作规范》(GB/T 15968-2008), 数学精度要求“图像套合误差不大于 0.3mm”, 相当于 1:50 000 图件的 15m。可见, 处理后的各期次地形图和遥感影像, 均优于配准精度要求。

1.3.2 水体信息提取。采用 McFeeters 提出的归一化差异水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 法提取 1994 年以来 231 个时相的湖泊水面信息, 并采用人机交互解译方法进行检查、修正。

1.3.3 蓄水量计算。根据提取的各时段水体面积及其对应日期的水位观测数据, 结合水下 DEM 数据, 拟合蓄水量—水位关系。在此基础上, 利用 1994 年以来逐日水位观测数据, 求解近 30 年来洞庭湖每日蓄水量时序数据和近 30 年来年均蓄水量、月均蓄水量。

Step1: 洞庭湖的蓄水量包括常年积水的底水量和底水以上随水位涨落的动态蓄水量, 即:

$$Q_h = Q_{\text{底}} + Q_{\text{动}} \quad (1)$$

式中, Q_h 为城陵矶水位为 h 时的洞庭湖蓄水量, $Q_{\text{底}}$ 为底水量, $Q_{\text{动}}$ 为底水以上随水位涨落的动态蓄水量。

1994 年以来城陵矶水位数据统计表明, 洞庭湖城陵矶最低水位为 18.77 m (1996 年 3 月 13 日), 以此作为底水量对应的水位高程。利用水下 DEM 数据和基于遥感影像圈定的水涯线, 借助 ArcGIS 软件的空间分析扩展模块计算底水量 $Q_{\text{底}}$ 。经求解, 洞庭湖底水量为 $3.42 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

动态蓄水量采用定积分方式求解, 即:

$$Q_{\text{动}} = \int_{h_0}^h S_h dh \quad (2)$$

式 (2) 中, $Q_{\text{动}}$ 为城陵矶水位为 h 时洞庭湖蓄水量, S_h 为城陵矶水位为 h 时洞庭湖水面面积, h_0 为 1994 年以来城陵矶最低水位 18.77 m, h 为 1994 年以来城陵矶最高水位 35.94 m (1998 年 8 月 20 日)。

Step2: 计算 1994~2023 年多年平均蓄水量、月均蓄水量和最大、最小年均蓄水量:

$$\bar{Q}_h = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{Q}_i, \quad \text{其中 } \bar{Q}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{Q}_{ij} \quad (3)$$

$$\bar{Q}_{\text{min}} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q(i)_{\text{min}}, \quad \text{其中 } Q(i)_{\text{min}} = \min(Q_{ij}), \quad j=1, 2, \dots \quad (4)$$

$$\bar{Q}_{\text{max}} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q(i)_{\text{max}}, \quad \text{其中 } Q(i)_{\text{max}} = \max(Q_{ij}), \quad j=1, 2, \dots \quad (5)$$

式 (3) - (5) 中, \bar{Q}_h 为多年年均蓄水量, \bar{Q}_{min} 为最小年均蓄水量, \bar{Q}_{max} 为最大年均蓄水量, \bar{Q}_i 为第 i 个月的多年月均平均蓄水量, \bar{Q}_{ij} 为第 j 年第 i 个月的月均蓄水量, $Q(i)_{\text{min}}$ 为第 i 个月的多年最小蓄水量, $Q(i)_{\text{max}}$ 为第 i 个月的多年最大蓄水量, n 为 1994~2023 年统计年数 (即 30 a)。

1.3.4 生态需水量计算。采用王鸿翔提出的洞庭湖“生态需水量年内展布法” (王鸿翔等, 2020, 2021), 计算洞庭湖最小、最大和适宜生态需水量。

首先, 利用多年年均水量和最小、最大年均蓄水量, 计算最小、最大蓄水量同期均值比和各月份最小生态需水量和最大生态需水量, 即:

$$\eta_{\text{min}} = \bar{Q}_{\text{min}} / \bar{Q}_h, \quad \eta_{\text{max}} = \bar{Q}_{\text{max}} / \bar{Q}_h \quad (6)$$

$$Q(i)_{\text{min}} = \bar{Q}_i \times \eta_{\text{min}}, \quad Q(i)_{\text{max}} = \bar{Q}_i \times \eta_{\text{max}} \quad (7)$$

式 (6) - (7) 中, η_{\min} 为最小同期均值比, η_{\max} 为最大同期均值比, $Q(i)_{\min}$ 为各月份最小生态需水量, $Q(i)_{\max}$ 为各月份最大生态需水量, \bar{Q}_h 为多年年均水量。

然后, 依据上述计算的各月份最小生态水量和最大生态水量过程数据, 采用 RVA 法 (Range of Variability Approach) 计算洞庭湖适宜生态水量。RVA 法认为, 湖泊适宜生态水量的变动范围不超过天然水量可变范围 (即 RVA 阈值), 如此才能够维持湖泊健康生态系统。RVA 阈值描述天然生态系统可以承受的变化范围, 这为估算湖泊生态需水量提供了参考。研究中, 以月均水量出现频率的 25% 和 75% 作为月均水量的上下限, 并认为 RVA 阈值中值 (月均水量出现频率为 50%) 并小于最大生态需水量是适宜生态需水量 (Mathews R et al., 2007)。

1.3.5 生态需水量保障程度。 比对 1994 年以来洞庭湖逐日蓄水量与各月份最小生态需水量和最大生态需水量, 计算生态需水量保障程度。生态需水量保障度即计算时段内, 湖泊蓄水量能够保障生态需水量的天数与总天数的比值。该比值越大, 表明洞庭湖生态需水量的保障程度越高, 反之亦然。生态需水量保障度的计算公式为:

$$\alpha_{ij} = \frac{D_{ij}}{D} = \frac{\sum \text{sgn}(Z_{ijk} - Z_j)}{D} \quad (8)$$

式中, α_{ij} 表示第 i 年第 j 月的生态需水量保障度; D_{ij} 表示第 i 年第 j 月生态需水量的保障天数; D 表示第 i 年第 j 月的总天数。其中:

$$\text{sgn}(Z_{ijk} - Z_j) = \begin{cases} 1 & Z_{ijk} > Z_j \\ 0 & Z_{ijk} \leq Z_j \end{cases} \quad (9)$$

式中, Z_{ijk} 表示第 i 年第 j 月第 k 日的湖泊日蓄水量 (10^8m^3) ; Z_j 表示第 i 年第 j 月的生态需水量 (10^8m^3)。

2 结果与分析

2.1 水位与水面面积的拟合关系

对 1994 年以来获取的洞庭湖 231 个时相的遥感影像, 采用归一化差异水体指数法提取水体信息, 水面面积与对应的城陵矶水位如图 2。

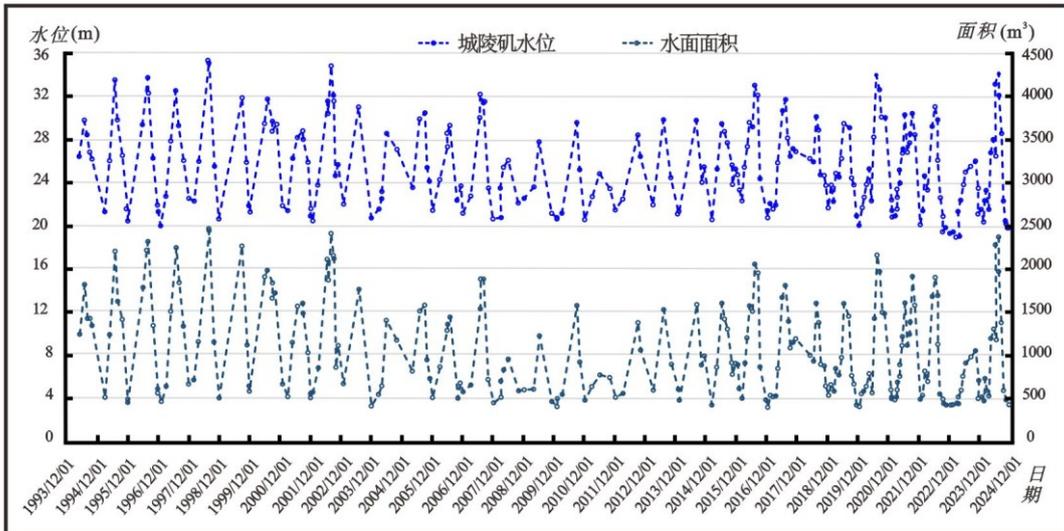


图 2 洞庭湖水位与水面面积变化

Fig.2 Changes in water level and water surface area of Dongting Lake

据此, 1994 年以来城陵矶水位 (h) 与洞庭湖水面面积 (S_h) 的函数关系如下:

$$S_h = -0.5089h^3 + 44.286h^2 - 1123.1h + 9248.7, \quad R^2 = 0.9599 \quad (10)$$

不同时间城陵矶的水位不同, 不同水位时洞庭湖的水面面积不同。洞庭湖水面面积与城陵矶

水位呈3次函数曲线关系，且城陵矶水位与洞庭湖水面面积呈同步增减关系。

2.2 洞庭湖蓄水量时序变化

根据公式(2)和(10)，1994年以来城陵矶水位(h)与洞庭湖蓄水量(Q_h)的函数关系如下：

$$Q_h = -2.0188 \times 10^{-3} h^4 + 224.653 \times 10^{-3} h^3 - 8.497 h^2 + 139.7 h - 856.48 \quad (11)$$

据此求解1994~2023年洞庭湖逐日蓄水量和各年度最小、最大和年均蓄水量(图3)。



图3 1994~2023年各年度最小、最大和年均蓄水量时序变化曲线

Fig.3 Time series variation curves of minimum, maximum, and annual average water storage for each year from 1994 to 2023

可以看出，洞庭湖年内最大蓄水量变幅较大，最丰水年(1998年)最大蓄水量 $249.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ 是最枯水年(2023年)最大蓄水量 $68.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的3.66倍；各年份最小蓄水量变幅相对较小，一般变化于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右，呈缓慢增加趋势；洞庭湖年均蓄水量除1998年、2020年等特别丰水年与2006年、2011年、2023年等特别枯水年的变化幅度较大外，总体变幅较小，一般变化于 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右，多年年均蓄水量总体呈减小趋势。

以TGD运行的2003年6月为时间节点，TGD运行前(1994年1月~2003年6月)、后(2003年7月~2023年11月)的年均蓄水量分别为 $51.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $45.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，亦即TGD运行后洞庭湖年均蓄水量减少了10.85%。分析各年度年内最大、最小与年均蓄水量之间的相关性，相关系数分别为0.7484和0.0302。可见，年均蓄水量与年内最大蓄水量相关性良好，而与年内最小蓄水量相关性弱，表明年均蓄水量与年内最大蓄水量基本同步增减，但不因年内最小蓄水量而变化。

2.3 月均蓄水量变化

依据公式(11)，可知TGD运行前、后多年月均蓄水量(如图4)。

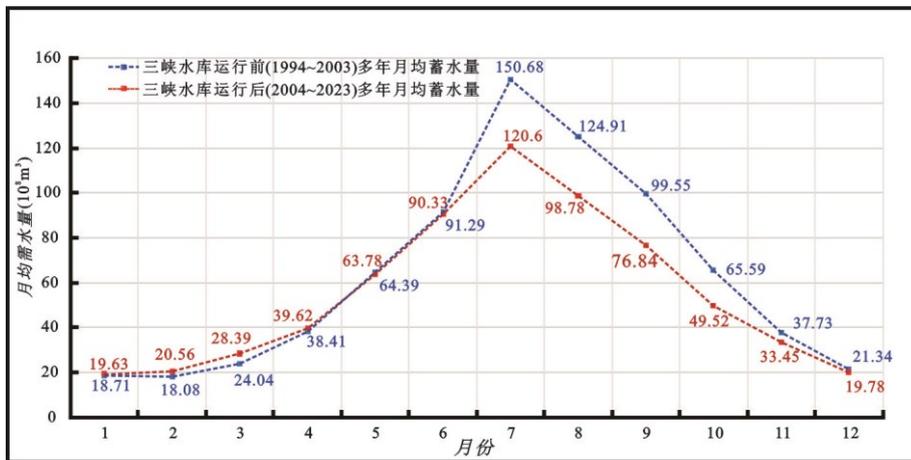


图4 TGD运行前、后多年月均蓄水量变化曲线

Fig.4 Multi-year monthly average water storage change curve before and after TGD operation

洞庭湖年内月均蓄水量总体呈现大幅度变化节律：上半年（1~6 月）呈显著增加趋势，下半年（7~12 月）呈明显减小趋势，以 7 月份为节点，上半年与下半年的蓄水量变化曲线呈对称形状。其中，1~2 月的月均蓄水量为 $20 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右，3 月份蓄水量开始增加，至 7 月份达到年度最大蓄水量 $150.68 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其后蓄水量逐渐减小，至 12 月份蓄水量又回到年初的 $20 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右。

分析 TGD 运行前、后洞庭湖月均蓄水量变化，1~6 月份和 11~12 月份的月均蓄水量变化不明显，表现为微弱增加趋势，由 TGD 运行前的 $39.25 \times 10^8 \text{m}^3$ 增加到 TGD 运行后的 $39.44 \times 10^8 \text{m}^3$ ，增幅为 0.48%；7~10 月的月均蓄水量则大幅减小，由 TGD 运行前的 $110.18 \times 10^8 \text{m}^3$ 减少到 TGD 运行后的 $86.44 \times 10^8 \text{m}^3$ ，减幅达 21.55%。亦即，TGD 运行后洞庭湖蓄水量的减少，主要缘于汛期及汛后平水期的水量减少。具体来说，洞庭湖在枯水期（1~3 月与 12 月）月均蓄水量增加了 $1.55 \times 10^8 \text{m}^3$ ，增幅为 7.55%；汛前 4~6 月的变化极其微弱，月均蓄水量由 TGD 运行前的 $64.70 \times 10^8 \text{m}^3$ 减小到 TGD 运行后的 $64.58 \times 10^8 \text{m}^3$ ，减幅为 0.19%；主汛期（7~8 月）月均蓄水量由 $137.80 \times 10^8 \text{m}^3$ 减少到 $109.69 \times 10^8 \text{m}^3$ ，减幅 20.40%；汛后平水期（9~10 月）由 $82.57 \times 10^8 \text{m}^3$ 减少到 $63.18 \times 10^8 \text{m}^3$ ，减幅达 23.48%。

近 30 年洞庭湖蓄水量变化数据说明，TGD 运行后对洞庭湖主汛期（7~8 月）的大幅度蓄洪调节，使得洞庭湖蓄水量大幅减小，在很大程度上缓解了洞庭湖的洪涝灾害隐患；TGD 运行在汛后平水期（9~10 月）的大幅蓄水，使得洞庭湖枯水季节提前了近 1 个月；TGD 在枯水期（12 月至翌年 1~3 月）对长江中下游补水，但进入洞庭湖的水量极其有限。

以近 30 年来洞庭湖区水患严重的 1998 年、2020 年和旱情严重的 2011 年、2022 年、2023 年为典型年份，作月均蓄水量变化曲线（如图 5）。

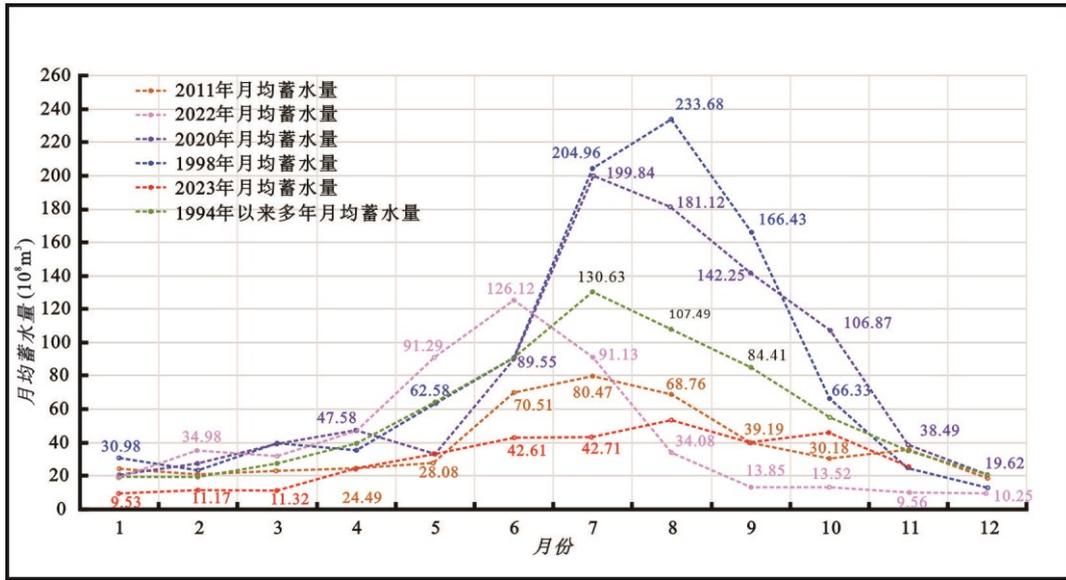


图 5 典型年份月均蓄水量变化曲线

Fig.5 Curve of monthly average water storage in typical years

近 30 年来洪涝灾害最严重的 1998 年和 2020 年，其月均蓄水量与多年月均蓄水量比较，汛期（7~9 月）严重偏高，幅度达 $70 \times 10^8 \text{m}^3 \sim 120 \times 10^8 \text{m}^3$ ；枯水期（1~3 月）略微偏高，因 4~6 月份已调整至多年月均蓄水量的水平，说明与洪涝灾情的发生无直接联系；10 月份的月均水面高出多年月均蓄水量，此时应为汛期水情的延续；11~12 月份的蓄水量回归到多年月均蓄水量程度。

2011 年、2022 年和 2023 年是近 30 年来干旱灾害最严重的年份，但这 3 年旱情的季节性绝然不同。2011 年枯水期（1~3 月和 11~12 月）的月均蓄水量和多年枯水期月均蓄水量基本持平，说明 2011 年的干旱并非枯水期缺水所致；平水期（4~5 月及 10 月）的蓄水量明显小于多年月均蓄水量，减幅在 50% 以上；9 月份的蓄水量只有 $40 \times 10^8 \text{m}^3$ ，相当于多年平水期 4 月和 11 月的月均蓄水量。由于 4~5 月是洞庭湖区早稻插秧季节，9~10 月是晚稻扬花吐穗时期，这两个农业用水高峰

期洞庭湖水量明显减少,使得旱情尤为凸显。因此,2011年洞庭湖的旱情主要是平水期缺水。2022年1~6月,洞庭湖水量明显高于多年月均蓄水量,尤其是5~6月,超幅分别为40.88%和38.45%,存在一定程度的水患。然而,7月份后,洞庭湖水量急剧减少,此时月均水量只有多年同期月均水量的64.76%,8月份之后旱情严重加剧,9月份之后的水量一直低于多年枯水期(12月至翌年2月)的月均水量,致使晚稻耕作缺水严重。2023年洞庭湖年均蓄水量($30.72 \times 10^8 \text{m}^3$)只有近30年来年均蓄水量($57.86 \times 10^8 \text{m}^3$)的53.09%,无论是枯水期、丰水期还是平水期,洞庭湖区处于缺水状态。

2.4 最小、最大和适宜生态需水量

湖泊生态需水量是指维持湖泊生物多样性并确保湖泊生态系统稳定和水资源功能正常发挥必须消耗的水量,包括湖泊生物需水量、蒸散发需水量、生物栖息需水量、污染物稀释需水量、航运需水量、灌溉需水量等(崔保山等,2005)。生态学的谢尔福德耐受性定律(崔保山等,2005;王鸿翔等,2021)认为,每一种生态环境因子都有一个适应范围,对湖泊水量而言,其上限、下限即为湖泊的最大、最小需水量。当蓄水量小于最小生态需水量时,水体中叶绿素 α 浓度、总悬浮物浓度、浊度等将随之增加,生态需水得不到保障,水生态系统的结构和功能难以维系;当蓄水量大于最大生态蓄水量时,在增加洪涝灾害隐患、威胁人民生命财产安全的同时,也会因土壤气孔被堵,根系难以正常呼吸,茎干枝叶等得不到营养供给而使部分植物被淘汰,影响生物的多样性,进而影响水生态。适宜生态需水量是在最小生态需水量的基础上强调了生态系统的完整性,在保护水生植物和水生动物的基础上,更进一步强调湖泊湿地生态系统中鸟类和陆栖动物栖息环境的保护,比最小生态需水量有更高的要求。同时,对蓄水量满足适宜生态需水量条件的,也不能大于最大生态需水量,因为大于最大生态需水量时陆栖动物栖息环境和生物多样性会同时受到负面影响,其蓄水量同样不“适宜”。

根据前述的洞庭湖生态需水量计算方法,得到最小、最大和适宜生态需水量的同期均值比分别为52.82%、126.53%和67.86%,各月份最小、最大和适宜生态需水量如表2。

表2 洞庭湖多年月均水量与最小、最大、适宜生态需水量 单位: 10^8m^3
Tab.2 Annual monthly average water volume and minimum, maximum, and suitable ecological water demand of Dongting Lake Unit: 10^8m^3

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
多年月均蓄水量	19.19	19.62	26.74	38.48	63.00	89.47	129.82	106.79	83.75	54.15	34.27	20.69	57.16
最小生态需水量	10.14	10.36	14.12	20.33	33.28	47.26	68.57	56.41	44.24	28.60	18.10	10.93	30.20
最大生态需水量	24.28	24.83	33.83	48.69	79.71	113.21	164.26	135.12	105.97	68.52	43.36	26.18	72.33
适宜生态需水量	13.02	13.31	18.15	26.11	42.75	60.71	88.10	72.47	56.83	36.75	23.26	14.04	38.79

2.5 洞庭湖生态需水量保障程度

据1994年以来城陵矶日观测水位数据和公式(11),计算1994~2023年间逐日蓄水量;在此基础上,根据公式(8)-(9),计算各年度洞庭湖最低、适宜生态需水量保障度和最大生态需水量超出度(图6)。

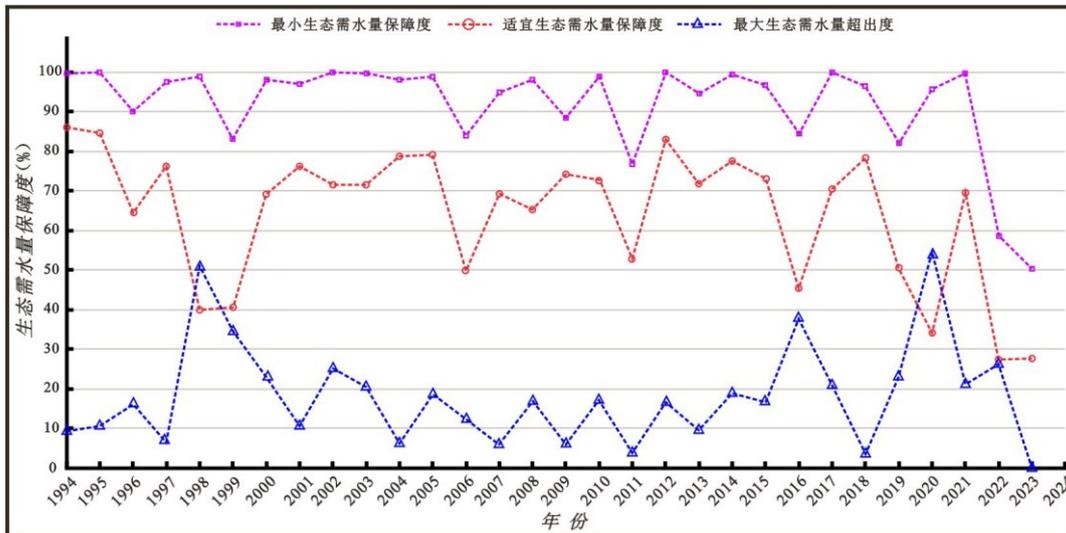


图 6 洞庭湖不同年份最小、适宜生态需水量保障度及最大生态需水量超出度

Fig.6 Minimum and suitable ecological water demand guarantee rates and maximum ecological water demand excess rates of Dongting Lake in different years

可以看出，洞庭湖最小生态需水量的保障程度总体较高，鱼类等水生生物产卵、育幼、洄游等基本生存环境能得到良好保障；适宜生态需水量的保障程度相对较小，一般为 60~80%，多年平均 64.48%，说明洞庭湖区鸟类、陆栖动物等栖息环境的保护修复亟待进一步加强；最大生态需水量的超出度反映了洞庭湖的洪涝灾害风险与生物多样性的危害程度，一般为 5~20%，多年平均 18.13%，说明洞庭湖在汛期仍然存在洪涝灾害风险，且由于蓄水量过大，致使部分水生生物因长期浸泡而衰退，并减小了湖泊消落带面积，进而影响陆栖动物栖息区域，造成生物多样性降低。

仍然以 TGD 运行（2003 年 6 月）为时间节点，分成 TGD 运行前（1994 年 1 月~2003 年 6 月）和 TGD 运行后（2003 年 7 月~2023 年 11 月）两个时段，分别计算 TGD 运行前、后洞庭湖月均最低生态需水量、适宜生态需水量保障度和最大生态需水量超出度（图 7）。

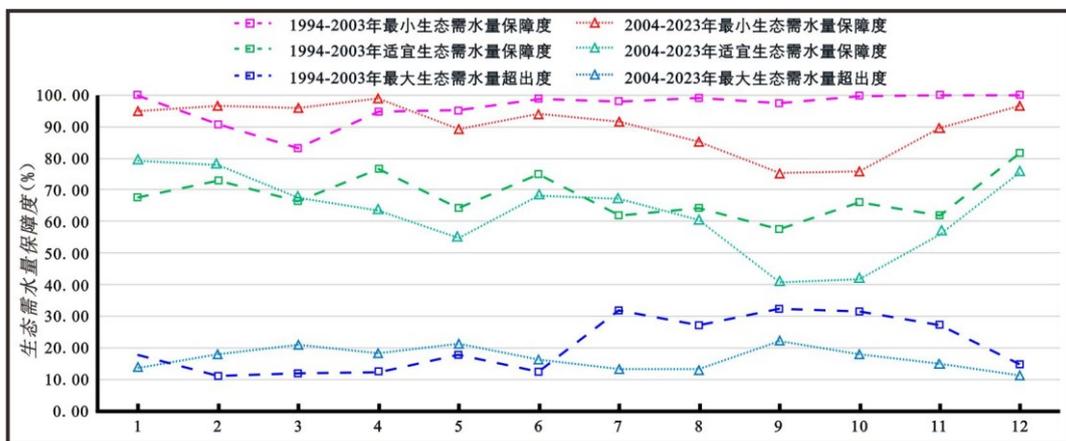


图 7 近 30 年来洞庭湖月均生态需水量保障程度变化曲线

Fig.7 Monthly average ecological water supply guarantee degree change curve of Dongting Lake in the past 30 years

TGD 运行前洞庭湖最小生态需水量保障度一般在 95%以上，多年平均保障度达到 96.38%，其中 1 月、11~12 月的日均保障程度达到 100%，但 2~3 月相对较低，特别是 3 月份的保障度只有 83.23%；TGD 运行后最小生态需水量保障程度相对于 TGD 运行前总体呈减小趋势，年保障程度由 96.38%下降到 90.30%，其中 9~10 月的下降幅度最大，最小生态需水量保障度分别由 97.33%、99.68%下降到 75.33%和 75.97%，这两个月平均减幅 22.85%。虽然最小生态需水量保障度总体表现降低，但 2~4 月呈上升趋势，尤其是 3 月份，保障度由 83.23%上升到 95.81%，增加了 12.58%。

适宜生态需水量保障程度在 TGD 运行后总体呈下降趋势，由 TGD 运行前的 68.05%下降到水

文突变后的 62.71%，减少 5.34%。不同月份表现出不同的增减变化。9~10 月的减幅最大，月均适宜生态需水量保障度分别由 57.67%和 66.13%下降到 40.83%和 41.77%，平均减小了 20.60%。1~2 月、7 月的适宜生态需水量保障度呈增加趋势，但增加幅度极其有限，这 3 个月的月均保障度平均增幅只有 7.14%。

最大生态需水量超出度的变化和最小、适宜生态需水量保障度的变化趋势一样，表现为下降趋势（前者反映缺水风险加剧，后者反映洪涝风险缓解），年超出度由 TGD 运行前的 20.69%下降到水文突变后的 16.84%。总体上，年内表现为截然相反的两个阶段，7~12 月以及 1 月等 7 个月明显减少，平均超出度由 26.13%减少到 15.26%，减幅为 10.87%。其中 7~8 月最为明显，平均减幅为 16.38%，其次是 9~11 月，平均减幅为 12.02%。2~6 月等 5 个月呈增加趋势，平均超出度由 13.07%增加到 19.06%，增幅为 5.99%。

上述分析表明，三峡水库运行在 7~8 月蓄洪调节，减小了洞庭湖汛期最大生态需水量的超出度，在缓解洞庭湖洪涝灾害隐患的同时，也降低了最小生态需水量保障程度，压缩了鱼类等水生生物洄游的活动空间。三峡水库因发电需要在每年汛后 9 月份开始控制下泄量，致使洞庭湖 9~10 月最小生态需水量和适宜生态需水量的保障程度同时减小，影响了水生生物生存空间和鸟类、陆栖动物的栖息环境；三峡水库在枯水期（12 月及翌年 1~3 月）对长江中下游补水，洞庭湖 2~4 月最小生态需水量保障度增加，这一时期正处于鱼类产卵、育幼期，有利于鱼类繁殖；1~3 月适宜生态需水量保障度增加，改善了陆栖动物和小天鹅、大雁等越冬候鸟的栖息环境。

3 洞庭湖蓄水量变化原因

根据湖泊水量平衡原理，洞庭湖的蓄水量变化主要受出入湖径流量、流域与湖区降水量、湖容（湖泊面积与湖底高程）等因素影响。

3.1 出入湖径流量对洞庭湖蓄水量的影响

洞庭湖入湖径流主要有荆江南流“三口”松滋河、虎渡河、藕池河和流域内湘、资、沅、澧“四水”，它们经洞庭湖沉沙落淤后从城陵矶唯一出口下泄长江。1994 年以来“三口”“四水”年均入湖径流量和城陵矶年均出湖径流量变化曲线如图 8 所示。

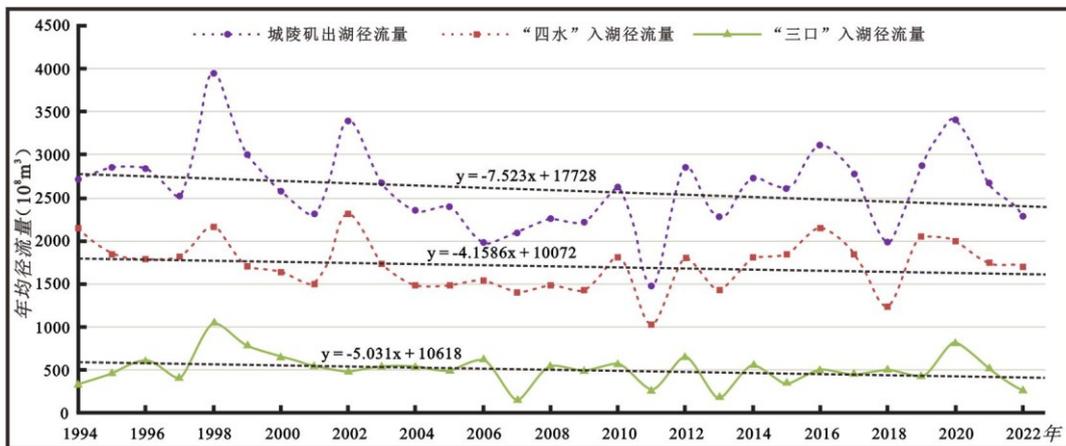


图 8 1956 年以来洞庭湖“三口”“四水”入湖径流量与城陵矶出湖径流量变化

Fig.8 Changes in the inflow of "three mouths" and "four waters" into Dongting Lake and the outflow of Chenglingji Lake since 1956

1994 年以来，“四水”多年年均入湖径流量 $1721.69 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占 30 年来年均总入湖径流量 $2237.28 \times 10^8 \text{m}^3$ 的 76.95%；“三口”多年年均入湖径流量 $515.59 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占多年年均总入湖径流量的 23.05%。数据说明，“四水”径流在洞庭湖入湖水量中占据主导地位。以 TGD 运行的 2003 年 6 月为时间节点，年均入湖径流总量由 TGD 运行前的 $2462.00 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 减少到 TGD 运行后的 $2119.00 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，减幅为 13.93%。其中，“三口”年均入湖径流量减少 $121.52 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，减幅 20.37%，占总减少量 $343.62 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的 35.43%；“四水”年均入湖径流量减少 $221.48 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，减幅 11.84%，

占总减少量的 64.57%。城陵矶多年年均出湖径流量呈明显的减小趋势，由 TGD 运行前的 $2885.10 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 减少到 TGD 运行后的 $2471.63 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，减幅为 14.33%。城陵矶出湖径流量的减小主要缘于入湖径流量的减小。分析入湖径流量变化趋势线，“四水”与“三口”入湖径流量均呈比较明显的减小趋势。因此，TGD 运行后洞庭湖水量的减少，是“三口”和“四水”入湖径流量同时减少的结果。

对 1994 年以来“三口”、“四水”入湖径流量以及城陵矶出湖径流量与洞庭湖蓄水量进行皮尔逊相关分析，结果如图 9。

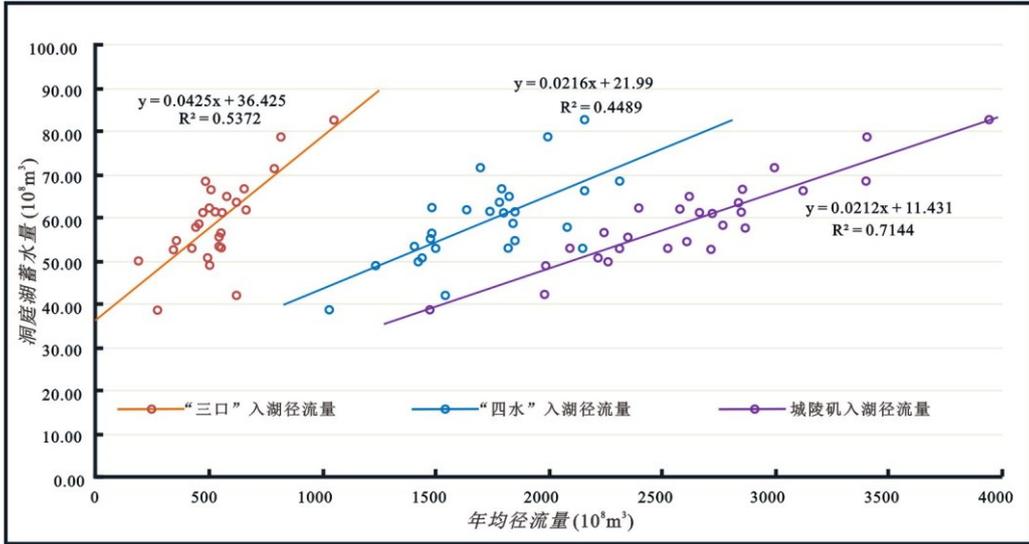


图 9 “三口”“四水”入湖径流量与洞庭湖蓄水量相关关系

Fig.9 The correlation between the inflow of "three mouths" and "four waters" into the lake and the water storage capacity of Dongting Lake

“三口”、“四水”入湖径流量以及城陵矶出湖径流量均与洞庭湖蓄水量呈显著正相关 ($p < 0.05$)，且城陵矶出湖径流、“三口”南流入湖径流、“四水”入湖径流与洞庭湖蓄水量的相关性系数分别为 0.7144、0.5372、0.4489。因此，欲缓解洞庭湖蓄水量的减小趋势，首先是控制城陵矶出湖径流量，其次是增加“三口”径流量和“四水”总径流量。

3.2 降水量对洞庭湖蓄水量的影响

降水是影响湖泊水体变化的最直接气候因素 (Wang et al., 2021)。依据《湖南省水资源公报》(湖南省水利厅, 2021) 统计, 2000~2022 年洞庭湖流域、洞庭湖区的年降水量均呈减少趋势, 其中湖区平均降水量由 TGD 运行前的 1343.44mm 下降到 TGD 运行后的 1248.40mm, 减少 95.04mm, 减幅为 7.07%, 且和洞庭湖年蓄水量基本呈同步增减变化趋势 (如图 10)。

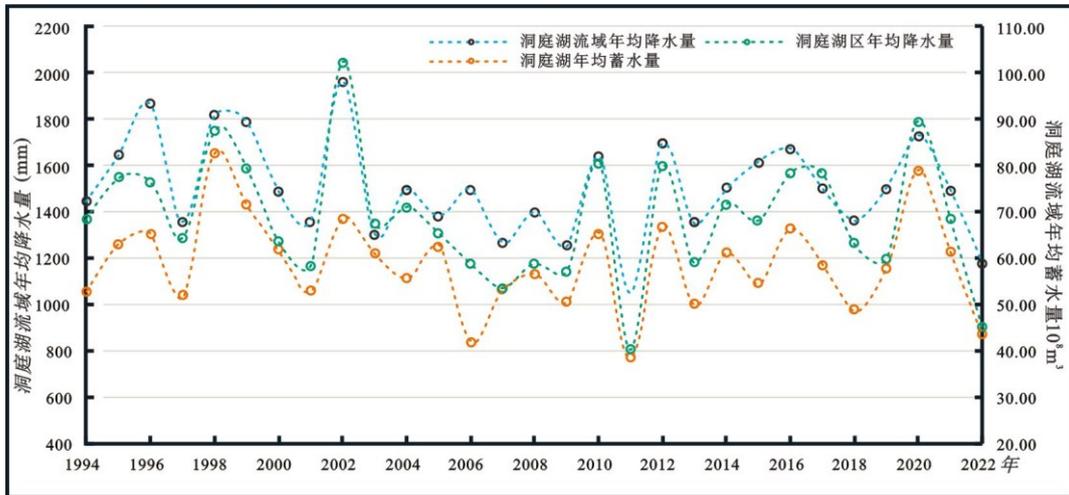


图 10 洞庭湖流域、洞庭湖区年均降水量与洞庭湖年均蓄水量变化

Fig.10 Changes in annual precipitation and annual water storage of Dongting Lake Basin and Dongting Lake Area

利用皮尔逊相关性分析洞庭湖流域、洞庭湖区的年均降水量与洞庭湖年均蓄水量的关系（图 11）。

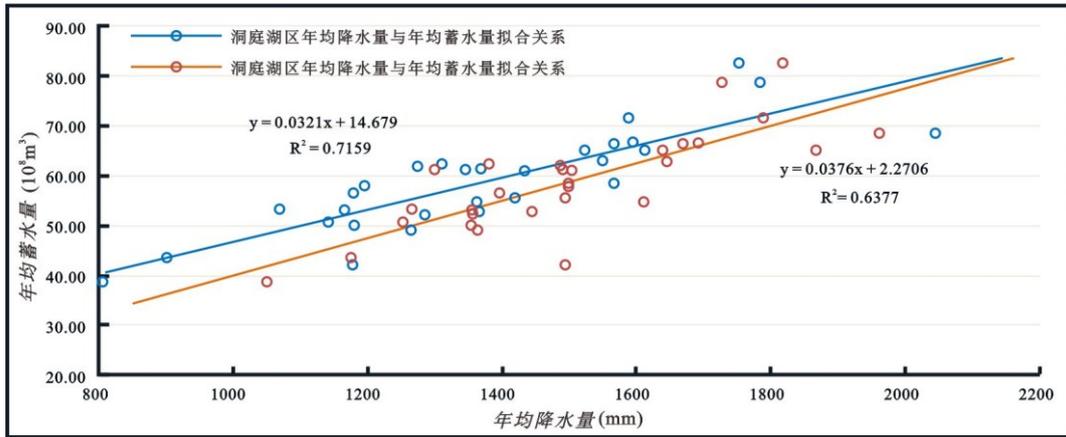


图 11 洞庭湖流域、洞庭湖区年均降水量与洞庭湖年均蓄水量相关关系

Fig.11 The correlation between the average annual precipitation in the Dongting Lake Basin and Dongting Lake area and the average annual water storage in Dongting Lake

结果显示，洞庭湖流域、洞庭湖区的年均降水量与洞庭湖年均蓄水量均呈显著的正相关（ $p < 0.05$ ），其中湖区降水量与洞庭湖蓄水量的相关性更高， R^2 为 0.7105；洞庭湖流域的降水量与洞庭湖蓄水量也有较好的相关性， R^2 为 0.5798。究其原因，应与汇水面积有关，洞庭湖流域的面积达到 262 891.12km²（中华人民共和国水利部，2021），而洞庭湖区的面积仅 18807.43km²。汇水面积大，无论是地表水蒸发量还是下渗量均相应增加，汇入洞庭湖的水量受外部干扰的因素更为复杂，由此干扰了降水量与洞庭湖蓄水量的相关性。

3.3 湖容变化对洞庭湖蓄水量的影响

湖容变化涉及湖泊面积与湖底高程变化。湖泊面积变化主要缘于 1998 年洞庭湖流域发生特大水灾后，国务院制定实施的“平垸行洪、退田还湖”。据水利部门通报，1998~2002 年洞庭湖区实施退田还湖 333 个垸垸，面积 779km²（湖南省国土资源厅，2011）。但根据遥感监测，洞庭湖区在通江湖泊内实际实施的“双退”极其有限，仅 6 个垸垸，还湖总面积 10.50km²（余姝辰等，2020）。洞庭湖通江湖泊总面积 2702.74km²（余姝辰等，2020），还湖面积仅占湖泊总面积的 0.39%。由于垸垸一般围筑于高位洲滩，亦即还湖垸垸的水域深度一般小于洞庭湖的平均深度，且只有在汛期（7~9 月）才能表现出来，枯水期和平水期一般都露出水面，因此，因退田还湖增加的洞庭湖蓄水量应小于 0.39%。据前文的表 2，近 30 年洞庭湖 7~9 月的月均水量为 $107.51 \times 10^8 \text{m}^3$ ，据此，因退田还湖引起的洞庭湖蓄水量增加应不大于 $0.42 \times 10^8 \text{m}^3$ ，增幅极其有限。

湖底高程的变化主要因泥沙冲淤和湖砂开采等引起（Li et al. 2021）。根据《中国河流泥沙公报》（中华人民共和国水利部，2021），1994~2022 年洞庭湖累计出入湖泥沙量变化曲线如图 12 所示。

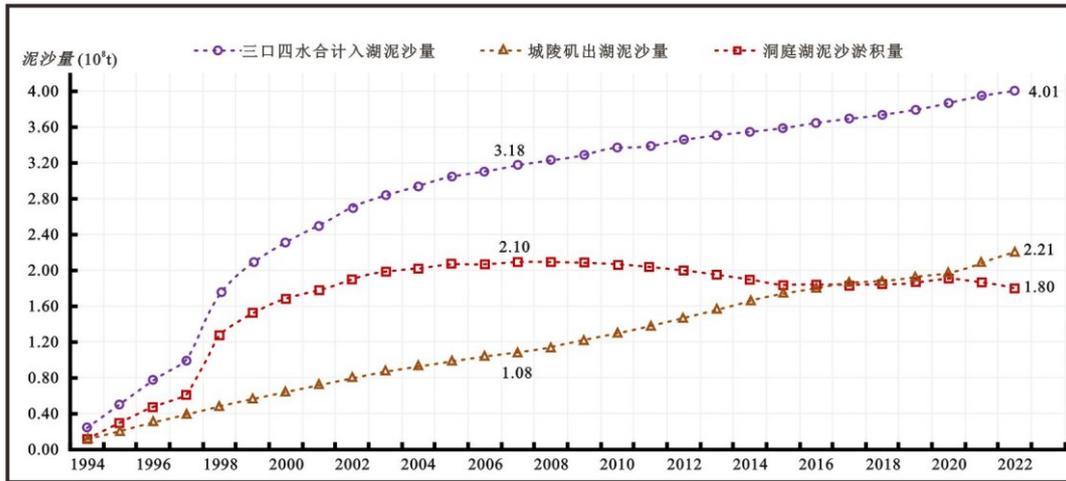


图 12 1994~2022 年洞庭湖累计出入湖泥沙量变化曲线

Fig.12 Cumulative sediment inflow and outflow curve of Dongting Lake from 1994 to 2022

可以看出, 1994 年以来荆江松滋、太平、藕池“三口”和湘、资、沅、澧“四水”累计入湖泥沙总量 $4.01 \times 10^8 \text{t}$, 城陵矶累计出湖总量 $2.21 \times 10^8 \text{t}$, 淤积于洞庭湖的泥沙总量为 $1.80 \times 10^8 \text{t}$, 按泥沙比重 1.65t/m^3 换算, 为 $1.09 \times 10^8 \text{m}^3$ 。泥沙淤积于湖底, 同水位时使洞庭湖蓄水量减少。据表 2, 洞庭湖多年平均蓄水量 $57.16 \times 10^8 \text{m}^3$, 因此泥沙淤积致使洞庭湖蓄水量减少了 1.90%。

洞庭湖泥沙淤积形成了丰富的现代沉积型建筑用砂石矿床。根据《湖南省洞庭湖采砂规划(2012~2016)》(湖南省水利厅, 2012), 在保持动态平衡的前提下, 洞庭湖年湖砂开采量达 $0.75 \times 10^8 \text{t}$, 合 $0.45 \times 10^8 \text{m}^3$ 。按此, 仅 2012~2016 年, 洞庭湖便开采湖砂 $2.27 \times 10^8 \text{t}$, 扩大湖容 $1.38 \times 10^8 \text{m}^3$, 占洞庭湖多年年均蓄水量的 2.38%。另据《湖南省湘资沅澧干流及洞庭湖河道采砂规划(2023~2027 年)》(湖南省水利厅, 2021), 2023~2027 年洞庭湖区规划开采湖砂 $13.7652 \times 10^8 \text{t}$, 合 $8.34 \times 10^8 \text{m}^3$ 。规划量远超历史开采规模, 该规划的实施, 将有效扩大洞庭湖的湖容, 在很大程度上缓解洞庭湖最小生态蓄水量的严峻发展趋势。

4 结论

本文利用 1994 年以来 231 个时相的卫星遥感影像, 构建近 30 年来洞庭湖水面、湖容与水位的关系模型, 提炼 TGD 运行前后洞庭湖蓄水量时序变化特征, 分析最小、适宜生态需水量保障程度和最大生态需水量超出程度, 从多维视角剖析驱动原因。

(1) 根据构建的洞庭湖“蓄水量—水位”函数关系, 洞庭湖年均蓄水量由 TGD 运行前的 $51.41 \times 10^8 \text{m}^3$ 减少到运行后的 $45.83 \times 10^8 \text{m}^3$, 减幅 10.85%。TGD 运行后除枯水期(1~3 月及 12 月)蓄水量略微增加外(增幅 7.55%), 平水期(4~5 月及 10~11 月)、洪水期(6~9 月)的月均蓄水量分别减少 $6.10 \times 10^8 \text{m}^3$ 和 $21.03 \times 10^8 \text{m}^3$, 减幅分别为 12.52%、18.81%。TGD 因发电在每年 10 月份控制下泄量, 使得洞庭湖 10 月份多年月均蓄水量由 $65.59 \times 10^8 \text{m}^3$ 减少到 $49.52 \times 10^8 \text{m}^3$, 减幅达 24.50%, 由此使得 TGD 运行后洞庭湖低枯水位提前了 1 个月以上。

(2) 采用“生态需水量年内展布法”计算表明, TGD 运行后年均最小、适宜生态需水量保障度和最大生态需水量超出度分别由 96.38%、68.05%和 20.69%减少到 90.30%、62.71%和 16.84%, 说明洞庭湖水生态安全趋于严峻。其中, TGD 运行后, 9~10 月最小、适宜生态需水量保障度的月均值分别由 98.51%和 61.90%减少到 75.65%和 41.30%, 加剧了洞庭湖秋季缺水与干旱水情; 7~8 月最大生态需水量超出度的月均值由 29.52%减小到 13.15%, 说明三峡水库在主汛期进行蓄洪调节, 缓解了洞庭湖洪涝灾害隐患。

(3) TGD 运行后, 洞庭湖年均入湖总径流量减少了 $343.62 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ (减幅 13.93%, 其中“四水”减幅 11.84%, “三口”减幅 20.37%), 年均降水量减幅为 7.07%, 说明引起洞庭湖水情变化的原因有出入湖径流量和区域年均降水量变化。另外, 近 30 年来泥沙淤积使洞庭湖蓄水量减少了

1.90%，但湖砂开采扩大了洞庭湖的湖容，仅 2012~2016 年便使洞庭湖年均蓄水量增加了 2.38%。

本研究拓展了卫星遥感技术在湖泊蓄水量保障程度的应用广度，对优化洞庭湖区水资源配置、保障水生态安全具有重要意义。洞庭湖水生态安全日趋严峻，制定科学的解决方案需要从水利、生态、环境等多方位论证，亟后续待研究。

References

- Cui,B.S.,Zhao,X.,Yang,Z.F.,2005.Eco-hydrology-based Calculation of the Minimum Ecological Water Requirement for Lakes. *Acta Ecologica Sinica*,07:1788-1795. (in Chinese with English abstract)
- Deng,Z.H.,Dai,L.Q.,Deng,B., et al.,2021. Evaluation and Spatial-temporal Evolution of Water Resources Carrying Capacity in Dongting Lake Basin. *Journal of Water and Climate Change*,12(5):2125-2135.
- He,Q.H.,Yu,D.Q.,Yu,S.C.,et al.,2021.Changes of Water Resources amount in Dongting Lake before and after the Operation of the Three Gorges Reservoir. *Earth Science*,46(01): 293-307. (in Chinese with English abstract)
- Hu,Q.,Wang,J.X.,Liu,S.Q.,et al.,2022.Calculation of Water Resources in Dongting Lake Plain Based on SWAT Model. *Safety and Environmental Engineering*, 29(3):244-252. (in Chinese with English abstract)
- Huang,Y.Y.,Yu,M.H.,Lu,J.,et al.,2020.Suitable Ecological Water level of the East Lake Dongting after the Three Gorges Project Operation. *Journal of Lake Sciences*,32(2) : 417-427. (in Chinese with English abstract)
- Li,J.J.,Wang,C.,Xu,L.,et al.,2021.Multitemporal Water Extraction of Dongting Lake and Poyang Lake Based on an Automatic Water Extraction and Dynamic Monitoring Framework. *Remote Sensing*,13(5):865.
- Liang,J.,Peng,Y.R.,Guo,S.L.,Li,X.D.,et al.,2013.Determination of Ecological Water-level in the Eastern Lake Dongting with Hydrological Alterations. *J Lake Sci*,25(3):330-334. (in Chinese with English abstract)
- Mathews R, Richter BD.Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow Setting1.JAW R A Journal of the American Water Resources Association,2007, 43(6) : 1400-1413.DOI: 10.1111 /j.1752-1688.2007.00099.x.
- Peng,Y.,He,G.J.,Wang,G.Z.,et al.,2021.Surface Water Changes in Dongting Lake from 1975 to 2019 Based on Multisource Remote-Sensing Images. *Remote Sensing*,13(9):1827.
- Tang,K.W.,Wang,H.,Liu,C.,2003.Preliminary Study of Hongjiannao Lakes Variation and Ecological Water Demand, *Journal of Natural Resources*,18(3):304-309. (in Chinese with English abstract)
- Wang,C.L.,Jiang,W.G.,Deng,Y.,et al.,2021.Long Time Series Water Extent Analysis for SDG 6.6.1 Based on the GEE Platform: A Case Study of Dongting Lake.*IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*,15:490-503.
- Wang,G.Q.,Wu,H.P.,Dai,J.,et al.,2023.Priorities Identification of Habitat Restoration for Migratory Birds Under the Increased Water Level During the Middle of Dry Season A case study of Poyang Lake and Dongting Lake wetlands, China. *Ecological Indicators*,151.
- Wang,H.X.,Zhu,Y.W.,Cha,H.F.,2020.Ecological Water Level and its Safeguard Measures in Lake Dongting.*Journal of Lake Sciences*, 32(5):1529-1538. (in Chinese with English abstract)
- Wang,H.X.,Zhu,Y.W.,Cha,H.F.,et al.,2021.Study on Ecological Water Level Threshold of East Dongting Lake Wetland. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,930(9): 2217-2226. (in Chinese with English abstract)
- Wang, Z., Xie,F.,Ling,F.,et al.,2022.Monitoring Surface Water Inundation of Poyang Lake and Dongting Lake in China Using Sentinel-1 SAR Images. *Remote Sensing*,14(14): 3473.
- Xu,X.Y.,Wu,Y.L.,Sheng,D.,et al.,2020.Evolution Characteristics of Water Resources at Dongting Lake from 1960 to 2015. *Journal of Water Resources and Water Engineering*.31(04):57-62. (in Chinese with English abstract)
- Xu,Z.X.,Chen,M.J.,Dong,Z.C.,2004.Researches on the Calculation Methods of the Lowest Ecological Water Level of Lake. *Acta Ecologica Sinica*,24(10) : 2324-2328. (in Chinese with English abstract)
- Yang,L.,Wang,L.C.,Zhang,M.,et al.,2021.Variation of Water Body in Dongting Lake from in Situ Measurements and MODIS Observations in Recent Decades. *International Journal of Digital Earth*,14(8):959-984.
- Yang,Y.X.,Du,C.Y.,Zhang,J.F.,et al.,2019.Determination of Lowest Ecological Water Level in Dongting Lake Area. *Water Resources Protection*,35(03):89-94. (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)
- Yu,S.C.,Li,C.A.,Yu,D.Q.,et al.,2020. Land Cover Change on Beach of Dongting Lake's Beach.*Earth Science*, 45(06): 1918-1927. (in Chinese with English abstract)
- Yu,S.C.,Wang,L.C.,Xia,W.P.,et al.,2020.Spatio-temporal Evolution of Riparian Lakes in Dongting Lake Area Since the Late Qing Dynasty. *Acta Geographica Sinica*, 75(11):2346-2361. (in Chinese with English abstract)
- Yu,S.C.,Li,C.A.,Zhang,Y.Z.,et al.,2021.Analysis of the Temporal and Spatial Evolution of Lakes in the Dongting Lake Area in the Past 100years. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9):1989-2003. (in Chinese with English abstract)
- Yu Shuchen, Zhang Yongzhong, He Qiuha, ,et al.2024. Spatiotemporal Evolution of the Dongting Lake Beach in Recent 90 Years. *Journal of Earth Science*, 35(6): 2081–2098.
- Zhang,C.,Yuan,Y.J.,Zeng,G.M.,et al.,2016.Influence of Hydrological Regime and Climatic Factor on Waterbird Abundance in Dongting Lake Wetland, China: Implications for Biological Conservation. *Ecological Engineering*,90:473-481.
- Zhong,Z.Y.,Ning,L.,2008.Analysis of Flood Situation in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River after 1998 Big Flood with Operation of Three Gorges Reservoir.*China Water Resources*,15:18-20. (in Chinese with English abstract)
- Zhu,Y.W.,Wang,H.X.,Guo,W.X.,2021. The Impacts of Water Level Fluctuations of East Dongting Lake on Habitat Suitability of Migratory Birds. *Ecological Indicators*,132.
- Zheng Dandan, Yang Nai, Kuang Jian,2024.A New Record of Characteristics of Droughts and Floods inYuan River Basin: Paleohydro-logical Values of Ancient Building.*Earth Science*,49(11):4035-4046.

附中文参考文献

- 陈英旭,2001.环境学.北京:中国环境科学出版社,2001年03月第1版,第36页.
- 崔保山,赵翔,杨志峰,2005.基于生态水文学原理的湖泊最小生态需水量计算.生态学报,(07):1788-1795.
- 贺秋华,余德清,余姝辰,等,2021.三峡水库运行前后洞庭湖水资源量变化.地球科学, 46(01): 293-307.
- 湖南省国土资源厅,2011.洞庭湖历史变迁地图集.长沙:湖南地图出版社, 254-255.
- 湖南省水利厅,2012.湖南省洞庭湖采砂规划(2012-2016). https://slt.hunan.gov.cn/xxgk/slxw/slxw_1/201206/t20120625_3322305.html.
- 湖南省水利厅,2021.湖南省水资源公报(2000-2021). https://slt.hunan.gov.cn/slt/xxgk/tjgb/newxxgklist_nochn_3.html.
- 湖南省水利厅,2021.湖南省湘资沅澧干流及洞庭湖河道采砂规划(2023~2027年). https://slt.hunan.gov.cn/slt/xxgk/ghjh/202309/t20230918_29487377.html.
- 胡倩,王军霞,刘世强,等,2022.基于SWAT模型的洞庭湖平原水资源量计算.安全与环境工程,29(3):244-252.
- 黄宇云,余明辉,陆晶,等,2020.三峡建库后东洞庭湖适宜生态水位需求分析.湖泊科学,32(2): 417-427.
- 梁婕,彭也茹,郭生练,等,2013.基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究.湖泊科学,25(3): 330-334.
- 水利部长江水利委员会,2021.长江泥沙公报(2021).武汉:长江出版社,10-12.
- 唐克旺,王浩,刘畅,2003.陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究.自然资源学报,18(3):304-309.
- 童潜明,韩伟,雷帆,等,2014解决洞庭湖区季节性缺水方案比较研究.长沙:湖南大学出版社, 31-36.
- 王鸿翔,朱永卫,查胡飞,等,2020.洞庭湖生态水位及其保障研究.湖泊科学,32(5):1529-1538.
- 王鸿翔,朱永卫,查胡飞,等,2021.东洞庭湖湿地生态水位阈值研究.长江流域资源与环境,30(9): 2217-2226.
- 徐幸仪,伍佑伦,盛东,等,2020.1960-2015年洞庭湖水资源演变特征分析.水资源与水工程学报,31(04): 57-62.
- 徐志侠,陈敏建,董增川,2004.湖泊最低生态水位计算方法.生态学报,24(10): 2324-2328.
- 杨毓鑫,杜春艳,张金帆,等,2019.洞庭湖湖区最低生态水位的确定.水资源保护, 35(3):89-94.
- 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.
- 余姝辰,李长安,余德清,等,2020.洞庭湖区湖泊洲滩地表覆盖变化.地球科学, 45(06): 1918-1927.
- 余姝辰,王伦澈,夏卫平,等,2020.清末以来洞庭湖区通江湖泊的时空演变.地理学报,75(11):2346-2361.
- 余姝辰,李长安,张永忠,等,2021.近百年来洞庭湖区垸内湖泊时空演变分析.遥感学报,25(09):1989-2003.
- 中华人民共和国水利部,2021.中国河流泥沙公报(2021).北京:中国水利水电出版社,5-6.

仲志余,宁磊,2008.三峡工程建成后再遇 98 大洪水长江中下游防洪形势分析.中国水利, 15:18-20.

郑丹丹,杨乃,旷健,2024.沅水流域历史时期旱涝特征的新记录: 古建筑的古水文价值.地球科学,49(11):4035-4046.

作者贡献度:

作者 1:余姝辰 负责整篇文章的构思,负责章节 1.2 和 1.3.1 影像数据的收集和水体信息的提取与处理,负责图 1、图 2、图 3 的编制、蓄水量的计算;

作者 2:邹娟 主要参与整篇文章的构思,负责水位与水面面积以及水位与蓄水量关系模型的构建,参与蓄水量的计算,负责章节 2.3 月均蓄水量变化的编制,负责图 4、图 5 的编制;

作者 3:徐质彬 主要参与整篇文章的构思,负责生态需水量和保障程度的计算,负责生态需水量保障程度的编制,负责图 6、图 7 的编制;

作者 4:张利军 主要参与整篇文章的构思,负责章节 3 的编制,负责图 8 的编制;

作者 5:刘启 负责 2.4 最小最大生态需水量的编制,负责表 1 的编制;

作者 6:李海兵 参与章节 3 的编制,负责图 9 的编制,参与水体信息提取、检查、修正,参与生态需水量和保障程度的计算;

作者 7:贺秋华 参与章节 3 的编制,负责图 12 的编制,参与水体信息提取、检查、修正,参与生态需水量和保障程度的计算;

作者 8:张高华 参与章节 3 的编制,负责图 10、图 11 的编制,参与水体信息提取、检查、修正。

投稿者联系方式: 邹娟,湖南省长沙市天心区杉木冲西路 49 号, 410004, 电话: 15116158192, E-mail: 339818271@qq.com