

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.056>



## 三峡水库运行前后洞庭湖水资源量变化

贺秋华<sup>1,2,4</sup>, 余德清<sup>2,4\*</sup>, 余姝辰<sup>1,2,3</sup>, 李长安<sup>1,2</sup>, 罗伟奇<sup>4</sup>, 杨柳<sup>1</sup>, 邹娟<sup>4</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
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 410004
3. 国土资源评价与利用湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004
4. 湖南省自然资源事务中心, 湖南长沙 410004

**摘要:** 为研究三峡水库运行前后洞庭湖水资源量变化情况, 通过利用 1994—2019 年 165 个时相的多平台中高分辨率 (15~30 m) 卫星遥感数据, 城陵矶多年日观测水位数据和洞庭湖区降水量、蒸发量等资料, 采用掩膜处理、K-Means 聚类分析提取水面信息, 结合观测数据进行统计分析, 研究了 1994 年以来洞庭湖水面面积与湖容变化情况。结果表明: 三峡水库运行后洞庭湖年均水面面积由 1 077.46 km<sup>2</sup> 减少到 857.13 km<sup>2</sup>, 减幅达 20.45%, 但是 2011 年后当城陵矶水位大于 26.34 m 时水面有所增加; 三峡水库对下泄量的调控在缓解洞庭湖洪涝灾害隐患的同时, 也使得低枯水位提前 1 个月, 且对洞庭湖枯水期的补给水量极其有限; 三峡水库运行后洞庭湖湖容明显减小, 且当城陵矶水位越高时, 洞庭湖湖容减幅越大; 当水位小于 20 m 时三峡水库运行前后两个时段的湖容逐渐接近。洞庭湖水资源量变化主要受出入湖径流影响, “四水”径流是影响洞庭湖水资源量的主要因素, “三口”径流的减少也对洞庭湖水资源量的变化起着重要作用。同时, 湖区年均降水量的减少和蒸发量的增加也是引起洞庭湖水资源量减少的原因之一。研究成果为三峡工程运行后治湖思路调整、洞庭湖区水资源保护和长江流域生态修复提供了客观资料。

**关键词:** 三峡水库; 洞庭湖; 遥感; 水面面积; 湖容; 水资源量变化。

中图分类号: P641.6

文章编号: 1000-2383(2021)01-293-15

收稿日期: 2020-03-20

## Changes of Water Resources amount in Dongting Lake before and after the Operation of the Three Gorges Reservoir

He Qiuhua<sup>1,2,4</sup>, Yu Deqing<sup>2,4\*</sup>, Yu Shuchen<sup>1,2,3</sup>, Li Chang'an<sup>1,2</sup>, Luo Weiqi<sup>4</sup>, Yang Liu<sup>1</sup>, Zou Juan<sup>4</sup>

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Key Laboratory of Hunan Province for Remote Sensing Monitoring of Dongting Lake Ecological Environment, Changsha 410004, China
3. Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Utilization in Hunan Province, Changsha 410004, China
4. Natural Resources Affairs Center of Hunan Province, Changsha 410004, China

**Abstract:** In order to study the changes of water resources amount in Dongting Lake before and after the operation of the Three Gorges Reservoir, this research used 165 multi platform high-resolution (15–30 m) satellite remote sensing data of 1994–2019, combined with the daily observation water level data of Chenglingji for many years and the data of precipitation and evaporation in

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos.41871019, 41672356); 湖南省自然资源厅“洞庭湖生态经济区地理国情监测”项目 (Nos.HNPCA2014-1, NGQJC2015-01, GJGQJC2016-04, HNGQJC2017-13, HNJCC-2018-13, HNZRZYJC-2019-02); “洞庭湖区生态环境变化遥感研究”项目 (No.2018-10)。

**作者简介:** 贺秋华 (1981—), 男, 高级工程师, 主要从事资源环境遥感研究。ORCID: 0000-0002-5717-6846. E-mail: hqhhrs@hotmail.com

\*通讯作者: 余德清, ORCID: 0000-0003-0315-4112. E-mail: 973272235@qq.com

**引用格式:** 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(1):293–307.

Dongting Lake area, the water surface information extracted by mask processing and K-means clustering analysis, studies the changes of water surface area and lake capacity of Dongting Lake since 1994. The operation of the Three Gorges Reservoir significantly influenced the changes of water resources in Dongting Lake. In this study, 165 multi-platform satellite data were combined with the daily hydrological and meteorological data to explore the changes of water area and lake capacity of Dongting Lake since 1994. The water surface information was extracted by using mask processing and K-means clustering analysis. Results showed that: after the operation of the Three Gorges reservoir, the annual average water surface area decreased from 1 077.46 km<sup>2</sup> to 857.13 km<sup>2</sup>, with a decrease of 20.45% at the water level in Chenglingji was more than 26.34 m after 2011. At the same time, the regulation of the Three Gorges reservoir not only alleviated the hidden danger of the flood disaster of Dongting Lake, but also advanced the dry water level by one month. In addition, the supply water for Dongting Lake was extremely limited during low water level period. After the operation of the Three Gorges Reservoir, the lake capacity of the Dongting Lake was significantly reduced, especially the higher the water level, the greater the reduction; When the water level is less than 20 m, the lake capacity gradually approaches during the before and after operation periods of the Three Gorges Reservoir. The change of water resources of Dongting Lake is mainly affected by the inflow of the lake. The runoff of "four waters" was the main factor determining the water resources of Dongting Lake, but the reduction of runoff of "three outlets" also played an important role. At the same time, the decrease of annual precipitation and the increase of evaporation were also the reasons for the decrease of water resources in Dongting Lake. The research results provided objective data for the adjustment of lake management ideas, the protection of water resources in Dongting Lake area and the ecological restoration of the Yangtze River basin after the operation of the Three Gorges Reservoir.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; Dongting Lake; remote sensing; water surface area; lake capacity; changes in water resources amount.

## 0 引言

水是人类赖以生存的自然资源,是构成生态环境的重要要素(李原园等,2018)。作为湖南省的母亲湖,洞庭湖的水资源对维持洞庭湖区经济社会可持续发展和洞庭湖区生态环境平衡发挥着重要的作用。开展洞庭湖水资源量尤其是三峡水库运行前后洞庭湖水资源量的变化研究,可为洞庭湖区水资源利用方案的制定、洞庭湖生态环境综合治理以及《洞庭湖生态经济区规划》实施效果的评估提供基础数据和决策参考。

由于三峡水库在汛期蓄洪调节与汛后蓄水发电,使得长江水沙条件发生了很大变化,由此改变了洞庭湖的蓄泄能力、生态系统的稳定性、水生生物多样性、湿地功能(仲志余和宁磊,2008)。鉴此,国家启动诸多重大项目开展三峡工程对坝下游河湖水情、泥沙、环境和生态的影响研究(黄真理等,2006;向菲菲等,2018),相关学者也分析了三峡工程自2003年蓄水以来的水面变化及荆江与洞庭湖区的连锁水文效应。龚伟等(2009)、刘可群等(2009)、李景刚等(2010)、宋求明等(2011)、田伟国等(2012)、吉红霞等(2015)以及胡金金等(2017)基于Terra/MODIS数据开展洞庭湖水面面积时序变化研究,柯文莉等(2017)充分考虑洞庭湖水面与水

位间的依从关系,结合同期城陵矶水位观测数据,建立了城陵矶水位与洞庭湖水面面积的绳套关系曲线。这些研究为认识三峡工程对洞庭湖水资源的影响提供了丰富的资料。但是,采用的250 m低分辨率的MODIS数据,由于精度原因难以客观反演洞庭湖的实际水面变化。鉴此,崔亮等(2015)、谢文君等(2017)等试图利用分辨率相对较高的Landsat TM/ETM以及GF-1卫星数据开展洞庭湖水面变化研究。然而,他们收集利用的信息源极其有限,如前人研究1993—2010年洞庭湖的水面变化仅利用4期遥感影像。洞庭湖具有“水落露滩,水涨成湖”的特点(余德清等,2016),不同年份、不同季节的水面变化大,同一年份同一季节但不同时间的水面面积也存在很大差别,只有具备足够的遥感信息源才能准确分析水面面积的时序变化情况。另外,前人的研究主要针对水面面积,囿于水下地形图等原因,未涉及湖容、蓄洪调节功能等反映水资源量的变化。可见,目前对三峡水库运行对洞庭湖水资源量变化的影响机制的认识并不完整。洞庭湖的水资源量主要受流域降水及江、河水情制约,集中表现在来水的组成和江、湖水流顶托。随着三峡工程建成投入运行,长江对洞庭湖水情的影响成为“常态”,尤其是汛末蓄水时段,上游来水减少使洞庭湖区出现季节性缺水,干旱事件频发(童潜明等,

2014). 三峡水库的运行很大程度上改变了湖区的水资源时空分布,同时引起了一系列生态环境问题.为此,三峡水库蓄水对洞庭湖水资源量的影响受到广泛关注.2014年国务院批复《洞庭湖生态经济区规划》,要求“到2020年,全面提升防洪减灾能力,恢复枯水期湖泊水面和调蓄容积,维持洞庭湖生态水域”.开展水资源变化研究是合理开发、利用、节约和保护洞庭湖区水资源的基础.本文基于1994—2019年165个时相的TM/ETM/HJ/CBERS等中高分辨率(15~30 m)卫星遥感影像,研究三峡水库运行前后洞庭湖水面、湖容与城陵矶水位关系及其变化特征,以期揭示三峡水库运行对洞庭湖水资源量变化产生的影响,为调整三峡工程运行后的治湖思路、服务洞庭湖区水生态修复和水资源保护提供客观资料.

## 1 研究区概况

我国第二大淡水湖洞庭湖位于长江荆江河段南部,它承接自身流域的湘、资、沅、澧“四水”以及汨罗江和新墙河尾间来水,吞吐荆江藕池、松滋、太平“三口”分流,经沉沙净化后由城陵矶汇入长江,是唯一与长江干流并联的吞吐型湖泊(王克英,1998),也是长江中下游季节性水位涨落特别明显的吞吐型调蓄湖泊.据2018年《中国河流泥沙公报》,洞庭湖流域面积262 891.12 km<sup>2</sup>,占长江流域总面积1 788 004.49 km<sup>2</sup>的14.70%;洞庭湖多年年均水量2 843×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,占长江年均总水量8 931×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>的31.83%,相当于鄱阳湖的3倍、太湖的10倍(李跃龙,2014),是长江中下游地区至关重要的防洪屏障(陈宝顺,1986).

洞庭湖区属亚热带季风湿润气候,雨量充沛,多年年均降水量1 350 mm,最大年降水量为2 337 mm(岳阳,1954年),最小年降水量806 mm(南县,1968年).降水量年内分布不均,有62.3%集中在4~8月,其中5~7月总降水量大约占全年40%,多年平均以5月份降水量最大(203 mm),暴雨日多年平均为3~4 d,最大年份可达10~13 d,6月份暴雨最多,最大日暴雨量为293.8 mm(南咀,1969年8月10日).

洞庭湖区的湖泊包括通江湖泊和垸内湖泊两种类型(图1).通江湖泊是指由防洪大堤和自然岸线围限、直接连通外部江河的湖泊,垸内湖泊是指垸内因堤垸或涵闸阻隔、不与外部江

河直接连通的湖泊.通江湖泊包括东洞庭湖、南洞庭湖、目平湖和七里湖,总面积2 702 km<sup>2</sup>,其中东洞庭湖1 307.18 km<sup>2</sup>,南洞庭湖901.29 km<sup>2</sup>,目平湖427.87 km<sup>2</sup>,七里湖66.40 km<sup>2</sup>.本文主要研究通江湖泊的水资源量变化.

## 2 数据源与方法

### 2.1 数据源及其处理

**2.1.1 遥感影像** 洞庭湖季节性调泄长江水沙,其水面面积随水位的升降而增减.即不同时间对应不同的水位,不同水位对应不同的水面.对同一湖泊而言,只有在同一水位下才能量算水面面积.由于洞庭湖的水位每天都在变化,故利用遥感影像量算水面面积时,必须采用同一天获取的遥感影像.

遥感调查表明,东洞庭湖的东西方向最大宽度为40.56 km,南洞庭湖为67.12 km,目平湖为18.16 km.为保证在相同水位条件下采集湖泊的水面信息,要求所利用的遥感影像的景区宽幅足以覆盖湖泊全局.因为景区宽幅过小,将出现同一通江湖泊需多条轨道的遥感数据才能覆盖的情况,而多条轨道的遥感数据很难在同一天获取.一般而言,卫星影像的景区宽幅和空间分辨率呈此低彼高的关系,常常需要牺牲一方来保证另一方.鉴此,对水面变化情况的监测,只能应用分辨率相对适中、单景区覆盖范围大的TM/ETM/CBERS/HJ-1/GF-1/4等数据,空间分辨率介于15~30 m,宽幅变化于60~400 km.另外,对历史上水面变化情况的监测基于已有的历史遥感数据,而这些数据均对应一定的水位,因此,监测中难以获取不同季节或不同年份的相同水位的历史遥感影像.为全面反映水面面积变化情况,尽可能多地收集各种遥感信息源数据.因难以足量收集1994年4月及以前合适的卫星数据,研究工作以1994年5月为起始时间.

三峡水库于2003年6月运行,研究中共收集了165个时相的遥感影像用于量算三峡水库运行前后近25年间(1994—2019年)水面面积.其中,三峡水库运行前(1994年5月—2003年6月)的9年收集了48期,三峡水库运行后(2003年7月—2019年12月)的近16年收集了117期.另外,还利用了2014年航摄的1:10 000正射影像图作为图像纠正的基准影像.

**2.1.2 水文数据** 不同年度的洞庭湖通江湖泊水面面积变化只有在同水位条件下才具有可比性,因

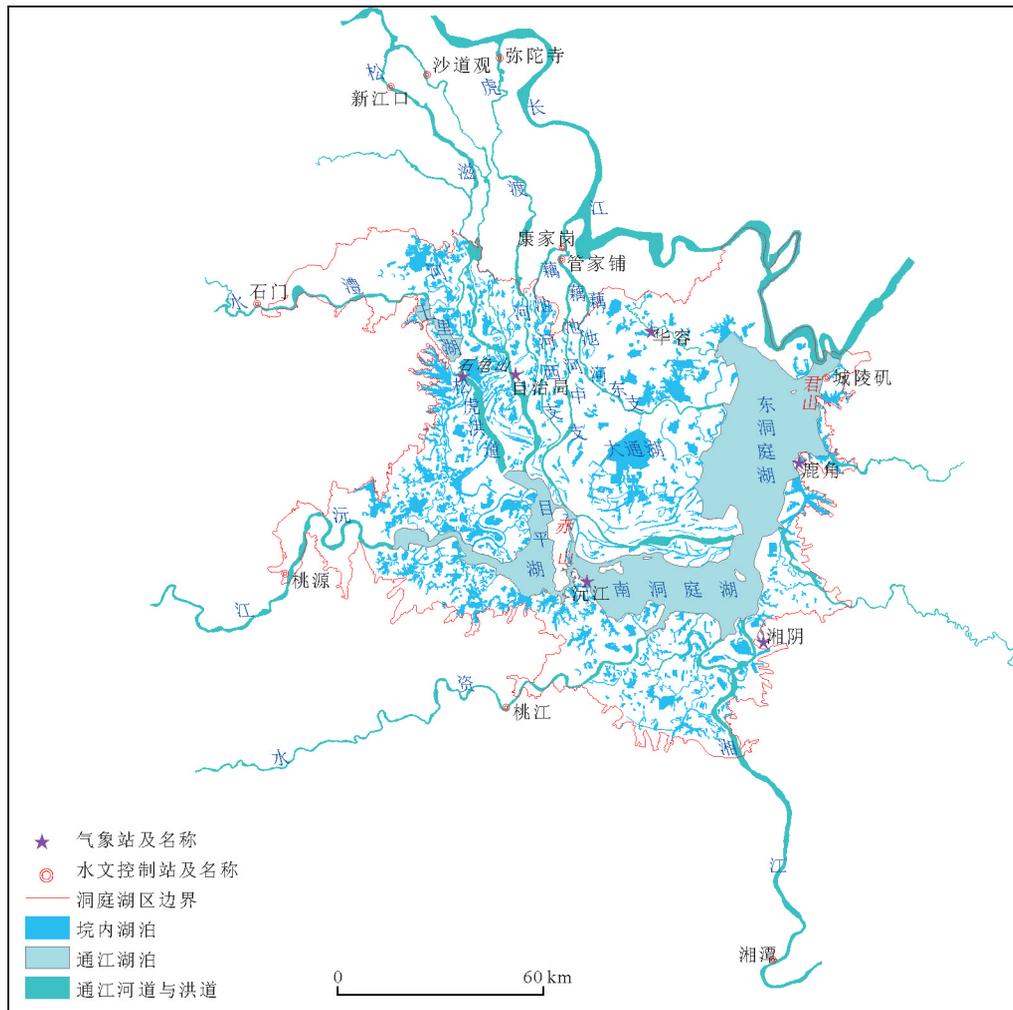


图1 洞庭湖区通江湖泊与境内湖泊分布

Fig.1 Distribution map of lake connecting to the Yangtze River and inner embankment in Dongting Lake area

此,进行水面遥感解译时,应查明各遥感数据对应的水位情况.研究中以洞庭湖出口的城陵矶水位作为洞庭湖的代表性水位.1994—2019年城陵矶水文站每日水位实时监测数据来源于湖南省水文信息查询系统(湖南省水文公众服务一张图,<http://gzt.hnswkjc.com/>).为研究洞庭湖水资源量变化原因,收集了水文气象相关观测数据.1994年以来湘、资、沅、澧“四水”径流数据和长江松滋、太平、藕池“三口”径流数据来源于2000年以来水利部编制的《中国河流泥沙公报》,湖区降水量和蒸发量资料来源于湖南省气象局相关气象站的测量数据.

## 2.2 技术方法

### 2.2.1 遥感影像处理

研究中利用的遥感影像幅宽变化和几何畸变大.图像纠正分两步进行:首先,利用卫星的星历参数(RPC)对原始数据进

行校正处理,消除几何畸变;然后,以按5.0 m重采样后的2014年航摄影像为平面控制,通过采集同名地物点,采用多项式纠正模型,在ERDAS Imagine支持下进行配准.各时相卫星影像图重采样后的空间分辨率统一为15.00 m,几何配准精度控制在1个像元以内,处理后的遥感影像数学基础为国家大地2000坐标系,高斯—克吕格投影6°分带,1985国家高程基准.

### 2.2.2 水涯线提取

水面或水体几乎吸收了近红外(NIR)和短波红外(SWIR)波段的全部能量,使之反射率很低(Gert and Edwin, 2006),而土壤和植被吸收的能量较小而有较高的反射率,这就使得水体在NIR或SWIR单波段图像上呈现暗色调(灰黑—黑色)而有别于植被和土壤呈现的浅色调(灰白—灰色)(杜云艳和周成虎,1998),因此,可以采用单波段阈值法简便识别并提取水体信息.尽管这一方

法难以有效区分水体与山丘阴影信息,但洞庭湖区通江湖泊主要由大堤围限,周边极少山丘地貌,故可不考虑这一影响因素.研究中, TM/ETM 卫星数据利用 SWIR 单波段图像, CBERS/HJ-1/GF-1/4 卫星数据利用 NIR 单波段图像.

洞庭湖的水涯线有 4 种表现形式:①水域与防洪大堤的界线,常沿大堤呈直线状;②水域与自然岸线的界线,常沿湖泊外部自然低丘边界呈弯曲状;③水域与湖泊洲滩的界线,常沿洲滩呈犬牙交错状;④湖泊水面与河流水面的水体断面,根据水利部门的划分惯例(李晓德和刘金军,2006)确定.

研究中,首先采用人机交互方式圈定洞庭湖的湖泊范围,并以此为对象进行掩膜处理,剔除非湖泊区域;其次,采用最流行、使用最广泛且计算效率较高的 K-Means 聚类分析非监督分类方法,提取水面信息,对提取结果进行收缩与膨胀运算,删除孤立点,联结离散点;然后,在遥感软件支持下将水面栅格图像转为矢量格式文件,采用人机交互判别,对水面图斑进行校核、调整、确认.

### 3 研究结果

#### 3.1 水面变化

**3.1.1 水面面积-水位关系** 为研究洞庭湖水面与水位变化之间的关系,基于 1994 年 5 月—2019 年 12

月获取的遥感影像逐时相提取的湖泊水面信息以及城陵矶水位数据,绘制洞庭湖不同时间的水面面积及其对应的城陵矶水位变化情况如图 2 所示.

以城陵矶水位代表洞庭湖水位,利用监测时段内 165 个时相的水面监测数据,采用指数、线性、对数、多项式以及幂函数等回归分析方法,分别按三峡水库运行前(1994.5—2003.6)、三峡水库运行后(2003.7—2019.12)2 个时间段进行通江湖泊水面面积与城陵矶水位的变化关系模拟(图 3),其中三次多项式回归分析的相关系数( $R$ )最大.

图 3 中,水面面积-水位关系式只有在监测时段内对应的水位区间适用.查阅 1994 年 5 月以来洞庭湖城陵矶的水位资料,三峡水库运行前的监测时段内,城陵矶的最低水位为 18.77 m(1996 年 3 月 13 日),最高水位为 35.94 m(1998 年 8 月 20 日,为城陵矶的历史最高水位);三峡水库运行后的监测时段内,城陵矶的最低水位是 19.31 m(2004 年 2 月 3 日),最高水位是 34.46 m(2016 年 7 月 8 日).

从图 2 和图 3 可以看出:

(1)不论是三峡运行前还是三峡运行后,水位越高,水面面积越大,水面面积与城陵矶水位呈正相关关系.

(2)同水位时三峡水库运行前的洞庭湖水面面积明显大于运行后的面积,说明三峡水库运行后洞庭湖的水面面积萎缩明显.

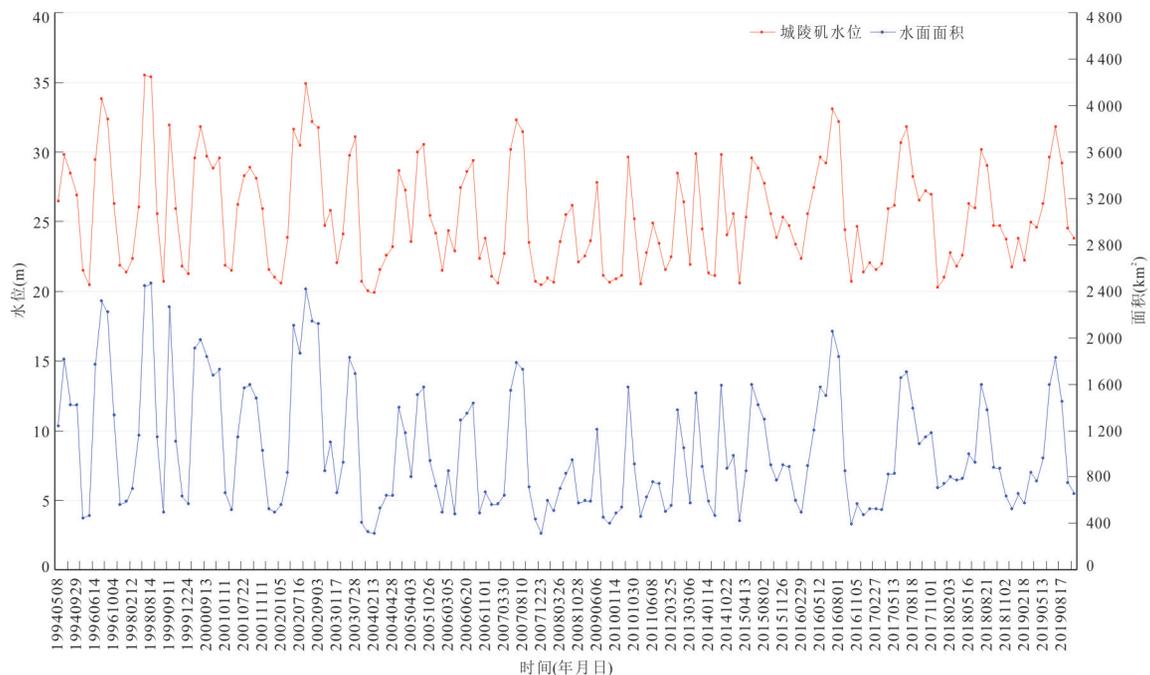


图 2 1994—2019 年洞庭湖水位与水面面积变化关系

Fig.2 Relationship between water level and surface area of Dongting Lake from 1994 to 2019

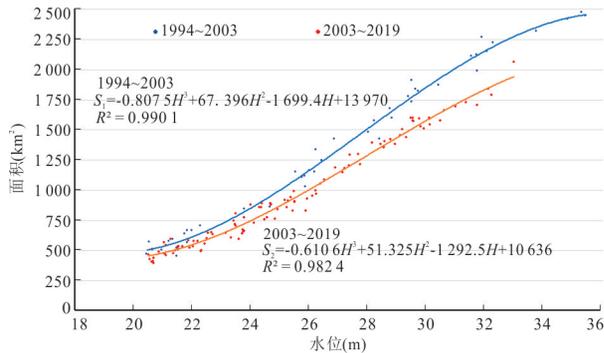


图3 三峡水库运行前后洞庭湖水面面积—水位关系曲线  
Fig.3 Relationship curve between water surface area-water level of Dongting Lake before and after operation of Three Gorges Reservoir

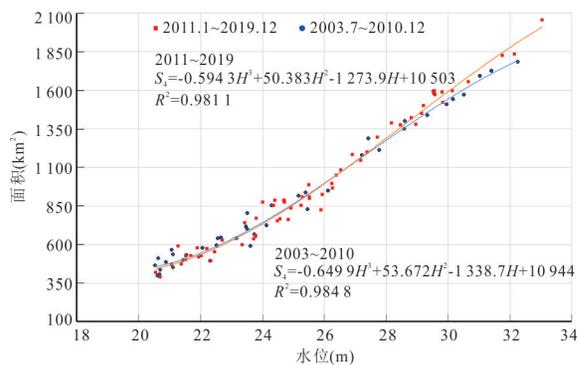


图4 三峡水库运行后不同时段洞庭湖水面面积—水位关系曲线  
Fig.4 Relationship curve between water surface area-water level of Dongting Lake in different periods after operation of Three Gorges Reservoir

(3)不同水位时水面面积萎缩程度不同,总体是水位越低,萎缩幅度越小,水位越高,萎缩幅度越大。如平均枯水位(21.49 m)时水面减少48.51 km<sup>2</sup>,平均平水位(24.78 m)时水面减少158.00 km<sup>2</sup>,平均洪水位(29.75 m)时减幅达417.93 km<sup>2</sup>。

为进一步研究三峡水库运行后的水面面积变化情况,根据洞庭湖出、入湖泥沙量变化情况(余姝辰等,2019),将三峡水库运行后的时间段划分为入湖泥沙量大于出湖泥沙量(2003.7—2010.12)和出湖泥沙量大于入湖泥沙量(2011.1—2019.12)两个时间段,分别建立水面—水位关系式,如图4所示,可以看出:

(1)2010年12月之前与2011年1月之后的水面面积—水位关系曲线相交于城陵矶水位为26.34 m时的对应水面面积1 043.39 km<sup>2</sup>。亦即,三峡水库运行后的时间段内(2003.7—2019.10),同水位时2010

年12月之前与2011年1月之后的水面面积不尽相同,只有水位为26.34 m时才具有相同的水面。

(2)当城陵矶水位小于26.34 m时,2011年1月之后的水面面积小于2010年12月之前的水面面积,如平均枯水位(21.62 m)时水面减少15.51 km<sup>2</sup>,平均平水位(24.51 m)时水面减少9.92 km<sup>2</sup>,平均洪水位(25.00 m)时水面减少7.87 km<sup>2</sup>,这一特征说明尽管2011年1月后洞庭湖的出湖泥沙量大于入湖泥沙量,但水位低于26.34 m时仍处于淤积状态;城陵矶水位大于26.34 m的情况刚好相反,且水位越高,水面增加量越大,如平均洪水位(28.70 m)时水面增加23.98 km<sup>2</sup>,当水位达到防汛水位(33.50 m)时水面增加量达129.02 km<sup>2</sup>。导致这一水面变化特征的原因除荆江三口和湘、资、沅、澧四水输沙量大幅减少外,还与洞庭湖的大规模湖砂开采有关(余姝辰等,2019)。湖砂开采于水位大于26.34 m的洲滩,致使这一高程的洲滩面积大幅减小,水面相应扩大。同时,湖砂开采时清洗的淤泥下沉,淤积于采砂高程之下,结果使低高程的洲滩呈现扩张趋势,水面减小。

**3.1.2 水面年际变化** 为研究洞庭湖水面年际变化规律,以1994—2019年25年间城陵矶水文站的水位日报数据为依据,根据图3中的公式分别得到三峡水库运行前、后洞庭湖水面面积的年际变化曲线、变化趋势线和年均水面面积线,如图5所示,可以看出:

(1)每一年份的水面面积曲线由波峰和波谷构成,反映了洞庭湖水资源显著的季节性特征,丰水期水面面积一般为枯水期水面面积4~5倍。其中,2004年2月的水面面积最小,仅424.20 km<sup>2</sup>;1998年8月的水面面积最大,达2 448.43 km<sup>2</sup>,两者相差了5.77倍。总体上,洞庭湖水面表现为洪水期汪洋一片,枯水期仅存几条带状水域的季节性变化特征。这些特征主要与流域内降雨的年内分布规律以及长江主汛期入湖水量有关。

(2)三峡水库运行后水面面积变化曲线的峰值明显小于运行前,而谷值与三峡水库运行前基本持平,表明三峡水库运行后洞庭湖的高洪水位明显减少,导致部分洲滩难以淹没,原来的湖泊消落区常年裸露地表,自然环境改变,生物的多样性与动植物群落随之发生调整。

(3)水面变化趋势线显示1994年以来洞庭湖的

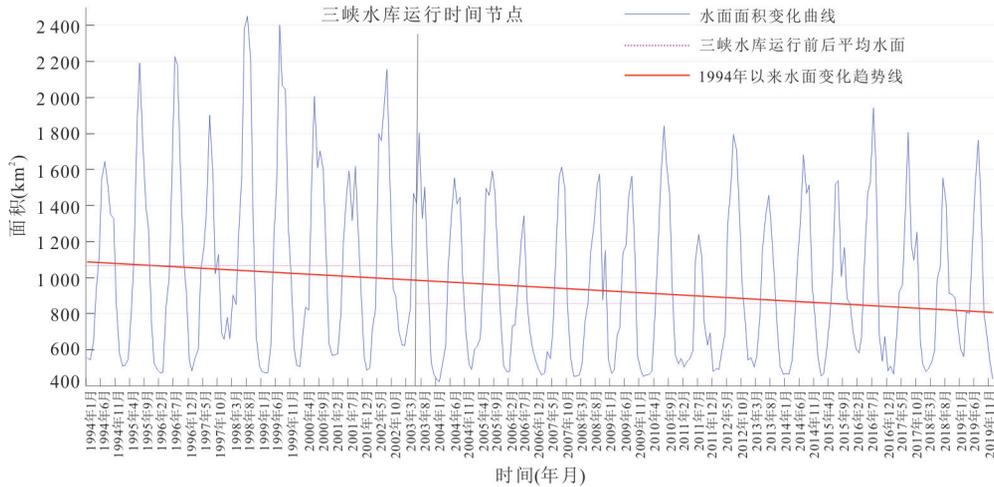


图 5 1994—2019年洞庭湖水面积年际变化

Fig.5 Inter-annual change in water surface area of Dongting Lake during 1994 to 2019

水面面积呈现明显的减小趋势.这一变化特点从三峡水库运行前、后的平均水面更能得到充分说明:三峡水库运行前城陵矶平均水位为 25.49 m,其对应平均水面面积为 1 077.46 km<sup>2</sup>,而三峡水库运行后城陵矶平均水位为 24.97 m,对应平均水面面积只有 857.13 km<sup>2</sup>,二者相差 220.33 km<sup>2</sup>,减幅达 20.45%.

**3.1.3 月均水面变化** 为研究每月的洞庭湖水面积变化情况,以获取的 1994 年 5 月至 2019 年 12 月城陵矶每日的水位数据为基础,计算每月的平均水位,根据图 3 中的公式,分别计算三峡水库运行前后洞庭湖的月均水面,并制作对应的水面与水位关系变化曲线,如图 6 所示,可以看出:

(1)洞庭湖的水面面积月际变化明显,7 月份的水面最大,1~2 月及 12 月的水面最小.三峡水库运行前月均水面变化于 527.24~2 057.64 km<sup>2</sup> 之间,三峡水库运行后变化于 488.92~1 601.66 km<sup>2</sup>,均相差 4 倍左右.

(2)洞庭湖为典型的季节性蓄水湖泊.枯水期(1~3 月及 12 月)的月均水面面积介于 490.80~611.22 km<sup>2</sup>,变幅仅 120.42 km<sup>2</sup>;平水期(4~5 月及 10~11 月)的水面面积变化于 661.94~1 277.05 km<sup>2</sup>,变幅为 615.11 km<sup>2</sup>;丰水期(6~9 月)的水面面积变化于 1 170.56~2 057.64 km<sup>2</sup>,变幅达 887.08 km<sup>2</sup>.

(3)三峡水库运行前后,1~4 月份以及 12 月份的月均水面面积变化不明显,但 5~11 月的月均水面面积则大幅度地减小,其中 7~10 月份的月均水面减幅均超过 400 km<sup>2</sup>,减幅最大的是 8 月份,达

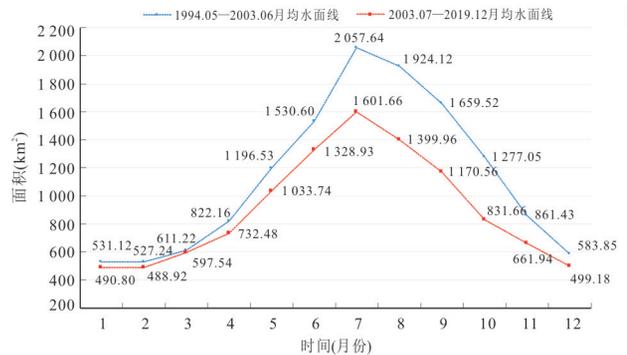


图 6 三峡水库运行前后月均水面面积变化曲线

Fig.6 Change curve of monthly average water surface area before and after operation of Three Gorges Reservoir

524.16 km<sup>2</sup>.平水期的 10 月份也减小 445.39 km<sup>2</sup>,减幅超过 1/3,接近汛期水面减小幅度.

(3)月均水面面积变化说明:三峡水库运行后对洞庭湖主汛期(6~8 月)的大幅度蓄洪调节(桂红华等,2014),使得洞庭湖水面面积大幅减小,在很大程度上缓解了洞庭湖的洪涝灾害隐患;三峡水库因发电需要在每年汛后 9 月份开始控制下泄量,导致洞庭湖 9~10 月的水面面积大幅度减小,使得洞庭湖的低枯水位由原来的 11 月份提前到 10 月份;三峡水库在枯水期(12 月及翌年 1~3 月)对长江中下游补水,而洞庭湖的月均水面面积并无明显增加,说明三峡水库在枯水期对洞庭湖的补水作用极其有限.

**3.1.4 特征水面变化** 特征水面能从宏观上反映洞庭湖水面的变化趋势,因此根据 1994 年以来城陵矶水文站日报水位数据,分别统计每年度最低水位、最高水位和年均水位等特征水位数据并依据图

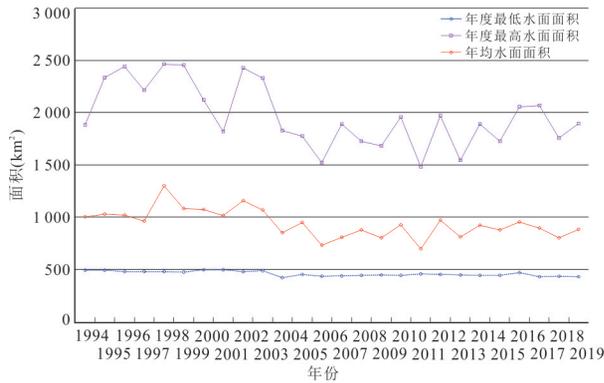


图7 三峡水库运行前后特征水面面积变化曲线

Fig.7 Change curve of characteristic water surface area before and after operation of Three Gorges Reservoir

3中公式计算相应的特征水面面积,制作变化曲线,如图7所示,可以看出:

(1)最大水面变化曲线呈波状起伏特征,变化幅度大.三峡水库运行前、后年均最大水面分别为2 247.86 km<sup>2</sup>和1 916.9 km<sup>2</sup>,减幅为330.96 km<sup>2</sup>,减少了14.72%.各年份最大水面面积大于2 400 km<sup>2</sup>的年份有1996、1998、1999和2002年,均出现于三峡水库运行前,这期间洞庭湖区均不同程度地遭受了洪涝灾害,尤以1996、1998年为最.年度最大水面面积小于1 600 km<sup>2</sup>的有2006、2011和2013年,洞庭湖区在这些年份均出现了不同程度的干旱现象.

(2)各年份最小水面面积在420~500 km<sup>2</sup>上下波动,变幅相对较小.三峡水库运行之后各年份最小水面面积呈微减小趋势,说明三峡水库在枯水期(12月至翌年3月)对下游调节补水,没有增加洞庭湖的水面面积.国务院批复的《洞庭湖生态经济区规划(2014)》设置的洞庭湖枯水期生态水域面积的规划目标为1 000 km<sup>2</sup>,此时对应的枯水期城陵矶生态水位应为26.12 m.

(3)年度最大与最小水面变幅最大的是1998年,达1 981.89 km<sup>2</sup>,变幅最小的是2013年,仅733.85 km<sup>2</sup>.这一现象表明,洞庭湖不仅季节性变化明显,年内的水面变化也非常显著.

(4)1994年以来,年均水面面积最大的年份是1998年,为1 299.55 km<sup>2</sup>,最小的年份是2011年,为695.29 km<sup>2</sup>,二者相差46.50%.三峡水库运行前,洞庭湖各年份年均水面面积均大于1 000 km<sup>2</sup>,而三峡水库运行后均小于1 000 km<sup>2</sup>,最大的2012年也只有970.06 km<sup>2</sup>.总体上,洞庭湖年均水面面积呈下降趋势,2004年是明显的转折点.

## 3.2 湖容变化

洞庭湖的湖容变化能从另一个角度反映出洞庭湖水资源量变化,洞庭湖的湖容大,说明洞庭湖的水资源量多,反之亦然.为研究湖容的变化情况,本文首先探讨了洞庭湖湖容的计算方法,然后根据上述水面与水位关系建立湖容—水位关系式,并据此分析三峡水库运行前后洞庭湖湖容变化情况.

**3.2.1 湖容计算** 洞庭湖的湖容包括枯水位以下常年积水的底水湖容和底水以上随水位涨落的漫滩湖容,即:

$$V_H = V_{\text{底}} + V_{\text{漫}},$$

上式中: $V_H$ 为水位为 $H$ 时的湖容; $V_{\text{底}}$ 为底水湖容; $V_{\text{漫}}$ 为漫滩湖容.

(1)底水湖容( $V_{\text{底}}$ ).底水湖容不因水位的变化而改变,可视为同一个常数.1994年5月以来,洞庭湖最低水位出现于1996年3月13日,对应城陵矶水位为18.77 m,以此作为底水湖容的水位高程.

基于2015年洞庭湖水下DEM并结合遥感影像显现的水面计算底水湖容.由于受湖底和周边来水影响,洞庭湖的水面是一个具有一定坡度的、可变的、凹凸不平的曲面,或者说是一个具有一定水力坡度的斜面,如果按城陵矶的最低水位值在水下地形图上圈定等值线的话,将不能反映水面的真实性,导致湖泊内本来属于水体的其他部位被圈定在外.对这一问题的解决,遥感影像的时效性和客观性能发挥作用.因为历史遥感影像不仅能反演当时的水面以解决时间问题,而且能真实反映水面展布状况以解决不同部位的水面高程问题.亦即将遥感影像套合于水下DEM栅格图上(图8),便可圈定水面边界并读取水面边界线上的高程.将水面看作一个具有一定坡度的斜面,求得水面上的任何点位的水位,即获得水面上任何位置的水深.在此基础上,借助ArcGIS平台的空间分析扩展模块,计算出底水湖容.

经计算,求得 $V_{\text{底}} = 3.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ .

(2)漫滩湖容( $V_{\text{漫}}$ ).基于前述的水面面积与水位关系的三次多项式回归方程,利用定积分求解水位为 $H$ 时的漫滩湖容( $V_{\text{漫}}$ ).

如图9, $S(H)$ 为水面面积, $H$ 为水位, $S(H)$ 在 $[H_0, H]$ 上连续.水位增加 $\Delta H_i$ 时所增加的湖容为:

$$\Delta V_i = S(\zeta_i) \Delta H_i.$$

如此,漫滩湖容可表达为:

$$V_{\text{漫}} \approx \sum_{i=1}^n \Delta V_i = \int_{H_0}^H S(H) dH,$$

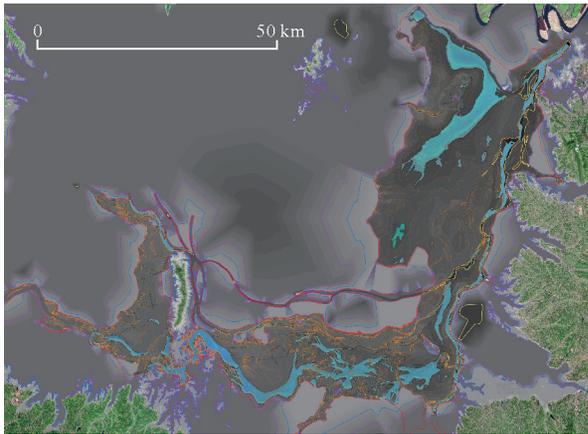


图 8 底水水面与水下 DEM 套合图

Fig.8 Bottom water surface and underwater DEM superposition map

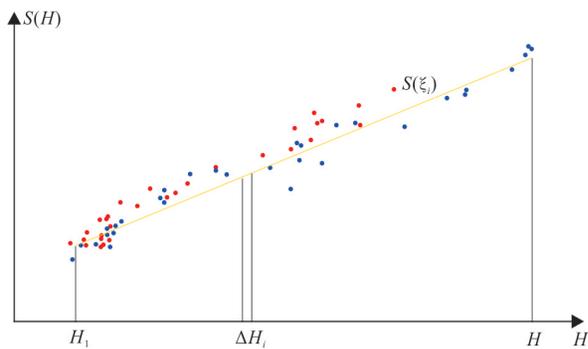


图 9 漫滩湖容求算原理示意图

Fig.9 Schematic diagram of flood plain and lake capacity calculation

上式中:  $H_0$  为城陵矶最低水位 18.77 m;  $H$  为漫滩水位;  $S(H)$  为水位为  $H$  时的水面面积.

图 3 和图 4 给出了三峡水库运行前后洞庭湖水面积与城陵矶水位的关系, 将其分别代入上式, 便可求解三峡水库运行前、后的漫滩湖容. 考虑底水湖容 ( $3.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) 和水位的取值区间, 得出三峡水库运行前、后的湖容与水位关系数学模型如下:

$$V_1 = -2.0188 \times 10^{-3} H^4 + 224.653 \times 10^{-3} H^3 - 8.497 H^2 + 139.70 H - 860.18,$$

$$V_2 = -1.5265 \times 10^{-3} H^4 + 171.083 \times 10^{-3} H^3 - 6.463 H^2 + 106.36 H - 660.28,$$

$$V_3 = -1.6247 \times 10^{-3} H^4 + 178.907 \times 10^{-3} H^3 - 6.694 H^2 + 109.44 H - 676.29,$$

$$V_4 = -1.4857 \times 10^{-3} H^4 + 167.943 \times 10^{-3} H^3 - 6.369 H^2 + 105.03 H - 652.33,$$

上述关系式中:  $V_1$  为 1994 年 5 月—2003 年 6 月洞庭湖湖容;  $V_2$  为 2003 年 7 月—2019 年 12 月洞庭湖湖容;

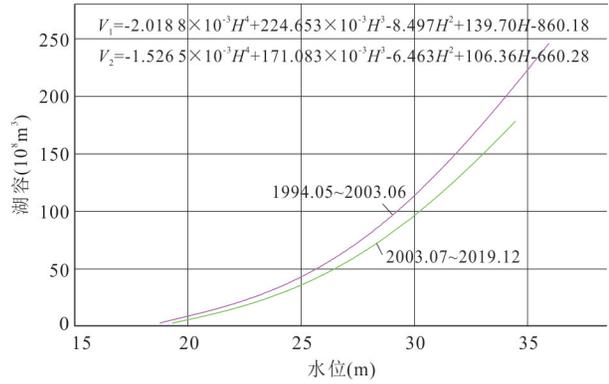


图 10 三峡水库运行前后洞庭湖湖容与城陵矶水位关系曲线

Fig.10 Relation curve between lake capacity and water level of Chenglingji before and after operation of Three Gorges Reservoir

容;  $V_3$  为 2003 年 7 月—2010 年 12 月洞庭湖湖容;  $V_4$  为 2011 年 1 月—2019 年 12 月洞庭湖湖容;  $V_1$  中  $H$  取值区间为  $18.77 < H \leq 35.94$ ;  $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$  中  $H$  取值区间为  $19.31 < H \leq 34.46$ ;  $H$  的单位为 m;  $V$  的单位为亿  $\text{m}^3$ .

**3.2.2 湖容变化** 根据前述湖容—水位关系式, 得到三峡水库运行前后洞庭湖湖容随水位的变化曲线(图 10). 可以看出:

(1) 洞庭湖湖容与水位呈 4 次多项式函数关系, 水位越高, 湖容越大.

(2) 三峡水库运行后(2003.7—2019.12)洞庭湖湖容明显小于运行前(1994.5—2003.6)的湖容, 减小幅度随水位的降低而逐渐减小, 当水位小于 20 m 时两个时段的湖容非常接近.

以城陵矶水文站水位日报数据为依据, 统计 1994—2019 年 25 年间洞庭湖枯水期、平水期和洪水期的平均水位以及洞庭湖警戒水位、防汛水位、历史最高水位等特征水位, 以 2003 年 6 月为三峡水库运行前、后两个时段的时间节点, 以 2011 年 1 月为三峡水库运行后因出、入洞庭湖泥沙量变化而发生整体冲淤转换的时间节点, 根据湖容—水位关系数学模型计算各时段特征水位时的湖容(表 1).

比较三峡水库运行前、后两个时段的湖容变化可以看出, 各特征水位时三峡水库运行后的湖容小于运行前的湖容. 不同水位下湖容减幅不同, 总体上是水位越高减幅越大. 平均枯水位、平均平水位和平均洪水位时, 湖容分别减少  $3.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $8.99 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $31.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ . 当城陵矶保持生态水位 26.12 m 时, 洞庭湖的湖容为  $46.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ . 城陵

表 1 三峡水库运行前后洞庭湖特征水位下的湖容对比

Table 1 Comparison of lake capacity under characteristic water level of Dongting Lake before and after operation of Three Gorges

1994.5—2003.6		2003.7—2019.10		湖容增减	2003.7—2010.12		2011.1—2019.10		湖容增减	备注
水位	湖容	水位	湖容		水位	湖容	水位	湖容		
18.77	3.42	18.77	3.42	无变化	18.77	3.42	18.77	3.42	无变化	底水水位,公式不适应
21.49	16.89	21.62	13.66	-3.23	21.62	13.87	21.62	13.77	-0.10	枯水期平均水位及其湖容
24.78	41.16	24.51	32.17	-8.99	24.51	32.65	24.51	32.49	-0.16	平水期平均水位及其湖容
25.49	48.35	25.00	36.23	-12.12	25.00	36.73	25.00	36.55	-0.18	各时段平均水位及其湖容
29.75	109.37	28.70	77.45	-31.92	28.70	77.90	28.70	78.11	0.21	洪水期平均水位及其湖容
32.50	164.73	32.50	139.77	-24.96	32.50	138.89	32.50	141.51	2.62	洞庭湖警戒水位及其湖容
33.50	187.36	33.50	159.06	-28.30	33.50	157.46	33.50	161.29	3.83	洞庭湖防汛水位及其湖容
35.94	246.03	35.94	209.47	-36.56	35.94	205.15	35.94	213.34	8.19	历史最高水位及其湖容

注:水位单位为 m;湖容单位为  $10^8 \text{ m}^3$ .

矾达到警戒水位 32.50 m 时,洞庭湖的湖容为  $139.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,这也是洞庭湖的安全蓄水量.当城陵矾水位达到历史最高水位 35.94 m 时,洞庭湖的湖容由三峡水库运行前  $246.03 \times 10^8 \text{ m}^3$  减小到  $209.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,减少量为  $36.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,减幅达 14.86%.

从三峡水库运行后因出、入洞庭湖泥沙量变化而使洞庭湖发生整体冲淤转换的两个时段看,当城陵矾水位小于等于平均水位 25.00 m 时,洞庭湖湖容仅略有减小,而城陵矾水位高于平均水位时,洞庭湖湖容则表现为较明显的增加,水位越高增加幅度越大.三峡水库运行后湖容的变化与前述的水面变化情况极其相似.

#### 4 水资源量变化原因

根据湖泊水量平衡原理,洞庭湖的水资源量变化主要受出入湖径流量、湖区降水量、湖面蒸发水量等因素影响.

##### 4.1 出入径流量的变化

洞庭湖接纳长江藕池、松滋、太平“三口”分流和湘、资、沅、澧“四水”来水,经城陵矾汇入长江.据水利部编制的《中国河流泥沙公报》,1994—2018 年洞庭湖年均出入径流量变化如图 11 所示.可以看出:

(1)1994 年以来湘、资、沅、澧“四水”入湖径流量与“三口四水”入湖径流量变化曲线波状起伏呈同步增减的变化趋势,二者的线性相关系数为 0.91,且三峡水库运行后一直保持 0.9 以上,说明洞庭湖入湖水量主要受制于“四水”径流.对于长江“三口”

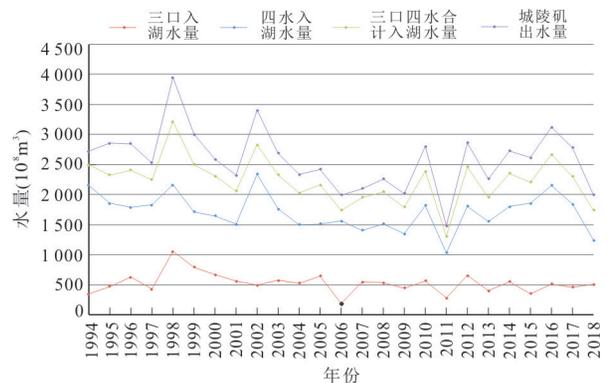


图 11 洞庭湖年均出入径流量变化

Fig.11 Change of annual inflow and outflow of Dongting Lake

分流入湖,除个别年份外进入洞庭湖的径流基本波动于  $500 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右,与洞庭湖入湖水量无明显的相关性,二者的线性相关系数为 0.54,三峡水库运行后略有增加,达到 0.61,说明“三口”分流并非影响洞庭湖入湖水量的主要因素.

(2)2006 年“三口”入湖径流明显偏低,仅  $182.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,尽管该年“四水”径流没有偏少,但仍然使 2006 年平均水面仅  $729.03 \text{ km}^2$  (参见图 7,下同),相当于三峡水库运行后年均水面  $857.13 \text{ km}^2$  的 85.05%;2011 年“三口”入湖径流也相对偏少,为  $276.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,由于该年“四水”径流也明显小于其他年份,仅为  $1027.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,在“三口”和“四水”径流同步减少的情况下,2011 年平均水面只有  $695.29 \text{ km}^2$ ,相当于三峡水库运行后年均水面的 81.12%;2018 年“三口”入湖径流平稳,为  $505.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,但由于“四水”入湖径流只有  $1234.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,致使该年平均水面仅  $801.71 \text{ km}^2$ ,相当于三峡水库运行后年均水面的 93.53%. 这些数据表明,

表2 1994—2018年洞庭湖年均径流量出入对比

Table 2 Comparison of annual inflow and outflow of Dongting Lake from 1994 to 2018

年均出入径流量	三峡水库运行前后 (1994—2018)	三峡水库运行前 (1994—2003)	三峡水库运行后 (2004—2018)	三峡水库运行后 出入径流减少量	减少幅度 (%)
三口年均入湖径流	524.21	596.97	487.71	109.26	18.30
四水年均入湖径流	1 704.46	1 870.61	1 593.69	276.92	14.80
年均入湖径流总量	2 211.97	2 467.58	2 081.40	386.18	15.65
城陵矶年均出湖径流	2 583.00	2 886.00	2 381.00	505.00	17.50

注:湖容单位为 $10^8 \text{ m}^3$ 。

固然“四水”径流是影响洞庭湖水资源量的主要因素,但“三口”径流的作用也不可忽视。或者说,“四水”径流能在一定程度上弥补“三口”来水的不足,但“三口”径流偏低时也会降低洞庭湖的水资源量。

为进一步研究“三口”和“四水”径流对洞庭湖水资源量的影响,以三峡水库正式运行的2003年为时间节点,分别统计三峡水库运行前、后“三口”、“四水”年均入湖径流量和城陵矶年均出湖径流量的变化情况(表2)。

(1)1994年以来,“四水”、“三口”年均入湖径流量为 $2\,211.97 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,城陵矶年均出湖径流量为 $2\,583.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中“四水”来水 $1\,704.46 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,占出湖总量的65.99%;“三口”来水 $524.21 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,占出湖总量的20.29%;区间补给量约 $371.03 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,占出湖量的14.36%。可见,洞庭湖水情受“四水”影响最大,其次是“三口”来水,再次是区间补给水量。

(2)三峡水库运行前、后两个时段比较,年均入湖径流总量减少 $386.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中“三口”年均入湖径流量减少 $109.26 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,减幅为18.30%,占总减少量 $386.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的28.29%;四水年均入湖径流量减少 $276.92 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,减幅为14.80%,占总减少量的71.71%。数据表明,三峡水库运行后洞庭湖水面与湖容减少,主要原因是“四水”的径流量减少,其次是长江“三口”分流的影响。也就是说,三峡水库运行对下泄量的调控,在一定程度上导致了洞庭湖水资源量的减少,但并非主要原因,洞庭湖水资源量减少主要是湘、资、沅、澧“四水”径流量减少所起的作用。

#### 4.2 洞庭湖区降水量的变化

以洞庭湖区东部岳阳的鹿角站、南部益阳的沅江站、西北部澧县的石龟山站和中部安乡县的自治局站为代表,据湖南省气象局提供的1994—2018年各站点降水量实测数据,按丰水期(4~8

月)和平水—枯水期(其他月份)统计三峡水库运行前后湖区降水量变化(表3)。

从表2可以看出:

(1)从区域上看,降水量减小幅度最大的是位于湖区东部的鹿角站,下降幅度达12.34%;其次是位于洞庭湖南部湖滨地带的沅江站,下降幅度为9.36%;再次是代表湖区西北部的石龟山站,下降幅度为4.79%;代表湖区腹地的自治局站,下降幅度最小,只有0.94%。总体上,湖区东南部的降水量减小幅度相对较大,湖区中部的降水量维持平衡状态。

(2)不同月份降水量减小幅度不同。代表丰水期的4~8月份的降水量年均减少75.39 mm,减幅为8.39%;代表枯水期和平水期的其他月份的降水量年均减少19.65 mm,减幅近为4.42%。可见,丰水期降水量减少程度明显大于其他月份,即洞庭湖水量的减少主要在丰水期,这和前述的月均水面变化监测结果(参见图6)一致。

(3)湖区平均降水量由三峡水库运行前的1 343.44 mm下降到三峡水库运行后的1 248.40 mm,减少95.04 mm,减幅为7.07%。按洞庭湖平原区面积 $1.882 \times 10^4 \text{ km}^2$ 测算(余姝辰等,2019),相当于每年度汇入洞庭湖的地表径流减少了 $17.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,如果按洞庭湖生态水面为1 000  $\text{km}^2$ 进行折算,相当于洞庭湖水位降低了1.79 m。

综上,三峡水库运行后湖区降水量的减少是引起洞庭湖水资源量减少的原因之一。

#### 4.3 洞庭湖区蒸发量的变化

湖泊蒸发量是调节湖区“小气候”的重要因素,也是影响湖泊水资源量的因素之一。以洞庭湖东南部的湘阴站、南部的沅江站、中部的安乡站和东北部的华容站等4个气象站为代表,以三峡水库运行的2003年为时间节点,分别统计1994年以来三峡水库运行前后湖区蒸发量的变化情况(表4)。

可以看出,在1994—2003年和2003—2018年

表 3 三峡水库运行前后洞庭湖区年均降水量变化

Table 3 Change of annual precipitation in Dongting Lake area before and after operation of Three Gorges

水文站	时间段	三峡水库运行前 (1994—2003)	三峡水库运行后 (2003—2018)	减小量	减小幅度 (%)
鹿角	4~8月份	950.32	809.55	140.77	14.81
	其他月份	487.82	451.12	36.70	7.52
	年均降水量	1 438.14	1 260.67	177.47	12.34
沅江	4~8月份	888.73	790.48	98.25	11.06
	其他月份	479.63	449.79	29.84	6.22
	年均降水量	1 368.36	1 240.27	128.09	9.36
石龟山	4~8月份	890.27	838.42	51.85	5.82
	其他月份	420.62	409.74	10.88	2.59
	年均降水量	1 310.89	1 248.16	62.73	4.79
自治局	4~8月份	865.12	854.44	10.68	1.23
	其他月份	391.25	390.07	1.18	0.30
	年均降水量	1 256.37	1 244.51	11.86	0.94
平均 降水量	4~8月份	898.61	823.22	75.39	8.39
	其他月份	444.83	425.18	19.65	4.42
	年均降水量	1 343.44	1 288.40	95.04	7.07

表 4 三峡水库运行前后洞庭湖区年均蒸发量变化

Table 4 Change of annual average evaporation in Dongting Lake area before and after operation of Three Gorges

气象站	时间段	三峡水库运行前 (1994—2003)	三峡水库运行后 (2003—2018)	变化量	变化幅度
湘阴	4~8月份	570.23	600.42	30.19	5.29%
	其他月份	245.21	261.19	15.98	6.52%
	年均蒸发量	815.44	861.61	46.17	5.66%
沅江	4~8月份	569.52	589.63	20.11	3.53%
	其他月份	254.25	300.39	46.14	18.15%
	年均蒸发量	823.77	890.02	66.25	8.04%
安乡	4~8月份	481.86	478.72	-3.14	-0.65%
	其他月份	225.28	220.66	-4.62	-2.05%
	年均蒸发量	707.14	699.38	-7.76	-1.10%
华容	4~8月份	500.61	559.22	58.61	11.71%
	其他月份	223.51	248.64	25.13	11.24%
	年均蒸发量	724.12	807.86	83.74	11.56%
平均 蒸发量	4~8月份	530.56	557.00	26.44	4.98%
	其他月份	237.06	257.72	20.66	8.72%
	年均蒸发量	767.62	814.72	47.10	6.14%

两个时间段,除代表湖区腹地的安乡站在丰水期(4~8月)和平水—枯水期的蒸发量略有减小外,其余的3个气象站无论是在丰水期还是平水—枯水期,蒸发量均呈现不同程度的增加。其中,湖区东北部的华容站增幅最大,丰水期年均蒸发量由500.61 mm增加到559.22 mm,枯水期年均蒸发量由223.51 mm增加到248.64 mm,增

加量分别为58.61 mm和25.13 mm,增幅分别为11.72%和11.24%;湖区南部的沅江站年均蒸发量的增加主要出现在枯水期,由254.25 mm增加到300.39 mm,是洞庭湖区蒸发量增加最大的区域,达18.15%;位于湖区东部的湘阴站,丰水期年均蒸发量由570.23 mm上升到600.42 mm,枯水期年均蒸发量由245.21 mm增加到

261.19 mm,增幅分别为5.29%和6.52%。

以4个气象站测量的蒸发量的平均值代表洞庭湖区的蒸发量,丰水期年均蒸发量由530.56 mm增加到557.00 mm,枯水期年均蒸发量由237.06 mm增加到257.72 mm,合计增加47.10 mm,增幅为6.14%。湖泊蒸发是湖泊水量平衡的支出项之一,三峡水库运行后洞庭湖蒸发量的增加是引起洞庭湖水资源量减少的另一因素。

## 5 结论

本文利用1994年以来165个时相的卫星遥感影像,通过建立“水面—水位”和“湖容—水位”函数关系,系统探究了以洞庭湖水面和湖容为主要内容的水资源量变化特征,详细分析了变化原因。研究结果表明:

(1)洞庭湖水面面积与城陵矶水位呈三次函数的正增长关系,1994年5月以来洞庭湖的水面面积萎缩明显。从年际变化看,年均水面由三峡水库运行前的1 077.46 km<sup>2</sup>减少到运行后的857.13 km<sup>2</sup>,减幅达20.45%,但2011年后城陵矶水位大于26.34 m时水面有所增加,且水位越高,水面增幅越大。从月均水面看,三峡水库对洞庭湖主汛期(6~8月)来水的大幅度蓄洪调节,在很大程度上缓解了洞庭湖的洪涝灾害隐患;三峡水库因发电需要在每年汛后9月份开始控制下泄量,导致洞庭湖9~10月的水面面积大幅度减小,使得洞庭湖的低枯水位提前1个月;三峡水库在枯水期(12月及翌年1~3月)对长江中下游补水,但对洞庭湖的补水极其有限。另外,洞庭湖枯水期生态水域面积规划目标为1 000 km<sup>2</sup>,对应的城陵矶水位应为26.12 m。

(2)洞庭湖的湖容与城陵矶水位呈四次函数关系。三峡水库运行后洞庭湖湖容明显减小,水位越高减幅越大,当水位小于20 m时两个时段的湖容逐渐接近。在年均枯水位、平水位和洪水位时,湖容分别减少 $3.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $8.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $31.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。洞庭湖的底水湖容(城陵矶水位18.77 m)为 $3.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,枯水期生态湖容(生态水面1 000 km<sup>2</sup>)为 $46.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,安全蓄水量为 $139.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,历史最大湖容为 $246.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(3)洞庭湖入湖径流量与“四水”入湖径流量的线性相关系数为0.91,与“三口”分流入湖的径流量只有0.54,说明“四水”径流是影响洞庭湖水资源量的主要因素,但“三口”径流的作用也不可忽视。亦

即三峡水库运行后洞庭湖水资源量的减少,主要缘于“四水”径流的减少,三峡水库在汛后调控下泄量是洞庭湖区枯水季节提前、出现局部干旱的主要原因。另外,三峡水库运行后湖区年均降水量减少95.04 mm,年均蒸发量增加47.10 mm等气候变化,也是引起洞庭湖水资源量减少的因素之一。

洞庭湖是长江重要的调蓄湖泊和重要的国际湿地保护区,查明洞庭湖水资源量变化对研究三峡工程运行后的治湖思路、服务洞庭湖区水资源保护具有重要意义。湖泊水资源量变化还受地下水排泄与补给、工农业用水等因素影响,本文尚未涉及,有待进一步研究。

## References

- Chen, B. S., 1986. Comprehensive Investigation Report on Harnessing and Development of Dongting Lake Area. Office of Hunan Provincial Land Commission, Changsha, 18—20 (in Chinese with English abstract).
- Cui, L., Liu, Y. P., Huang, G. H., et al., 2015. Dynamic Changes of Dongting Lake Based on Landsat-TM Remote Sensing Data. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 13(1): 63—66 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. Y., Zhou, C. H., 1998. Automatically Extracting Remote Sensing Information for Water Bodies. *Journal of Remote Sensing*, 2(4): 264—269 (in Chinese with English abstract).
- Gert, A. S., Edwin, T. E., 2006. The Remote-Sensing Technique in Hydrology and Water Management. Translated by Han Min. China Water Power Press, Beijing, 9—10, 127—132 (in Chinese).
- Gong, W., Yang, D. W., Qian, Q., 2009. MODIS-Based Water Surface Area Estimation Method of the Dongting Lake. *Yangtze River*, 40(14): 40—43 (in Chinese with English abstract).
- Gui, H. H., Zhang, W. J., Zou, B. Y., 2014. Effects of Three Gorges Reservoir Scheduling Scheme on Downstream Flood Level. *Electric Power Survey & Design*, 2: 25—28 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J. J., Zhang, Y., Li, P., 2017. Analysis of the Variation of Water Area in Dongting Lake Based on Modis Data. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*, 31(2): 25—29 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z. L., Wu, B. F., Ao, L. G., 2006. Study on the Ecological and Environmental Monitoring System of the Three Gorges Project. Science Press, Beijing (in Chinese).

- Ji, H.X., Fan, X.W., Wu, G.P., et al., 2015. Accuracy Comparison and Analysis of Methods for Water Area Extraction of Discrete Lakes. *Journal of Lake Sciences*, 27(2): 327–334 (in Chinese with English abstract).
- Ke, W.L., Chen, C.Z., Ji, H.X., et al., 2017. A Loop-Like Relationship Between Water Surface Area of Lake Dongting and Water Level and Chenglingji, the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 29(3): 753–764 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.G., Li, J.R., Huang, S.F., et al., 2010. The Remote Sensing Monitoring Analysis of Chinese Dongting Lake Water Area Variations in Last 10 Years Using Terra/MODIS Data Time Series. *Journal of China Institute of Water Resources & Hydropower Research*, 8(3): 201–207 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.D., Liu, J.J., 2006. Hydrography of Hunan Province. China Water & Power Press, Beijing, 42 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.L., 2014. A Brief History of the Evolution, Development and Management of Dongting Lake. Hunan University Press, Changsha, 3–4 (in Chinese).
- Li, Y.Y., Cao, J.T., Huang, H.J., 2018. International Progresses in Integrated Water Resources Management. *Advances in Water Science*, 29(1): 127–137 (in Chinese with English abstract).
- Liu, K.Q., Liang, Y.T., Huang, J., et al., 2009. Analysis of the Variations and Influencing Factors of Area in Dongting Lake Based on Remote Sensing Satellite. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 30(S2): 281–284 (in Chinese with English abstract).
- Song, Q.M., Xiong, L.H., Xiao, Y., et al., 2011. Study on Relationship between Lake Area and Water Level of Dongting Lake Based on MODIS Images. *Water Saving Irrigation*, 6: 20–26 (in Chinese with English abstract).
- Tian, W.G., Peng, J.D., Shen, J., et al., 2012. Sequence Analysis on the Area of Dongting Lake before and after Building Three Gorges Dam Based on MODIS Image Sequences. *Journal of Anhui Agri.*, 40(16): 9141–9145 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Q.M., Han, W., Lei, F., et al., 2014. The Comparative Study about Solution of Seasonally Water Shortage in Dongting Lake. Hunan University Press, Changsha, 31–36 (in Chinese).
- Wang, K.Y., 1998. Management and Development of the Dongting Lake. Hunan People Press, Changsha, 33–36 (in Chinese).
- Xiang, F.F., Wang, L.C., Yao, R., et al., 2018. The Characteristics of Climate Change and Response of Vegetation in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 43 (Suppl. 1): 42–52 (in Chinese with English abstract).
- Xie, W.J., Yue, C.Y., Zhang, W., 2017. Study on Change of Temporal and Spatial Characteristic of Dongting Lake from 1996 to 2016. *Water Resources Information*, 5: 32–38 (in Chinese with English abstract).
- Yu, D.Q., Yu, S.C., He, Q.H., et al., 2016. Monitoring of Dongting Lake Atrophy in One Hundred Years by jointing Historical Map and Remote Sensing Technology. *Remote Sensing for Land and Resources*, 23(1): 78–81 (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).
- Zhong, Z.Y., Ning, L., 2008. Analysis of Flood Control Situation in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River after the Completion of the Three Gorges Project. *China Water Resources*, 15: 18–20 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈宝顺, 1986. 洞庭湖区整治开发综合考察研究报告. 长沙: 湖南省国土委员会办公室, 18–20.
- 崔亮, 刘永平, 黄国和, 等, 2015. 基于 Landsat-TM 影像的洞庭湖水面动态变化. 南水北调与水利科技, 13(1): 63–66.
- 杜云艳, 周成虎, 1998. 水体的遥感信息自动提取方法. 遥感学报, 2(4): 264–269.
- Gert, A. S., Edwin, T. E., 2006. 韩敏译. 水文与水管理中的遥感技术. 北京: 中国水利水电出版社, 9–10, 127–132.
- 龚伟, 杨大文, 钱群, 2009. 基于 MODIS 数据的洞庭湖水面面积估算方法. 人民长江, 40(14): 40–43.
- 桂红华, 张文杰, 邹冰玉, 2014. 三峡水库调度对下游洪水水位的影响分析. 电力勘测设计, 2: 25–28.
- 黄真理, 吴炳方, 敖良桂, 2006. 三峡工程生态与环境监测系统研究. 北京: 科学出版社.
- 胡金金, 张艳, 李鹏, 2017. 基于 MODIS 数据的洞庭湖水体面积变化分析. 黑龙江工程学院学报, 31(2): 25–29.
- 吉红霞, 范兴旺, 吴桂平, 等, 2015. 离散型湖泊水体提取方法精度对比分析. 湖泊科学, 27(2): 327–334.
- 柯文莉, 陈成忠, 吉红霞, 等, 2017. 洞庭湖水面面积与城陵矶水位之间的绳套关系. 湖泊科学, 29(3): 753–764.
- 李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等, 2010. 近 10 年来洞庭湖区水面面积变化遥感监测分析. 中国水利水电科学研究院学报, 8(3): 201–207.

李晓德,刘金军,2006.湖南省水文志.北京:中国水利水电出版社,42.

李跃龙,2014.洞庭湖的演变、开发和治理简史.长沙:湖南大学出版社,3-4.

李原园,曹建廷,黄火键,2018.国际上水资源综合管理进展.水科学进展,29(1):127-137.

刘可群,梁益同,黄靖,等,2009.基于卫星遥感的洞庭湖水体面积变化及影响因子分析.中国农业气象,30(增刊2):281-284.

宋求明,熊立华,肖义,等,2011.基于MODIS遥感影像的洞庭湖面积与水位关系研究.节水灌溉,6:20-26.

田伟国,彭嘉栋,沈军,等,2012.基于MODIS影像序列的三峡截流前后洞庭湖面积变化序列分析.安徽农业科学,40(16):9141-9145.

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.

王克英,1998.洞庭湖治理与开发.长沙:湖南人民出版社,33-36.

向菲菲,王伦澈,姚瑞,等,2018.三峡库区气候变化特征及其植被响应.地球科学,43(增刊1):42-52.

谢文君,岳翠莹,张文,2017.洞庭湖1994—2016年时空特征变化研究.水利信息化,5:32-38.

余德清,余姝辰,贺秋华,等,2016.联合历史地图与遥感技术的洞庭湖百年萎缩监测.国土资源遥感,23(1):78-81.

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.

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.防汛与抗旱,15:18-20.

\*\*\*\*\*

### 《地球科学》

#### 2021年2月 第46卷 第2期 要目预告

造山带板内洋岛—海山残片的识别及地质意义 .....	范建军等
拉萨地体中部古新世早期灯垌火山—侵入杂岩成因及地壳硅质岩浆演化 .....	周逍遥等
藏北班公湖—怒江缝合带西段沙木罗组火山岩年代学、Hf同位素及地球化学特征 .....	吴建亮等
江西崇义铁木里钨铁矿区内辉绿玢岩的年代学、地球化学特征及地质意义 .....	郭娜欣等
苏鲁造山带威海古元古代泥质麻粒岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素特征及其构造属性 .....	熊志武等
鄂西建始地区五峰组—龙马溪组黑色页岩生物地层特征 .....	周志等
四川盆地下奥陶统桐梓组白云岩多元成因 .....	刘志波等
陆相致密油与页岩油藏特征差异性及其勘探实践意义:以渤海湾盆地黄骅坳陷为例 .....	周立宏等
文昌A凹陷珠海组砂岩碳酸盐胶结物发育特征及其对储层质量的影响 .....	姜华等