

## 近 40 年洞庭湖区内湖水面面积变化及其驱动因素\*

高 耶<sup>1,2</sup>,谢永宏<sup>3,4\*\*</sup>,邹冬生<sup>1</sup>,侯婷娟<sup>5</sup>,李正最<sup>2</sup>

(1: 湖南农业大学生物科学技术学院,长沙 410128)

(2: 湖南省水文水资源勘测局,长沙 410007)

(3: 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125)

(4: 中国科学院亚热带农业生态研究所洞庭湖湿地生态系统观测研究站,岳阳 414018)

(5: 郴州市水文水资源勘测局,郴州 423000)

**摘 要:** 选择 1979–2016 年间多时期、多类型、多光谱遥感数据,分析评价洞庭湖区内湖近 40 年的面积变化。结果表明,最近 40 年洞庭湖区内湖面积保持相对稳定,丰水期间呈上升趋势,枯水期间波动下降,2016 年内湖总面积比 1980s 初减少 3.94%。随着湖泊面积增加,湖泊水面面积变化的比例和幅度逐渐减小,大型湖泊(>10 km<sup>2</sup>)和中型湖泊(5~10 km<sup>2</sup>)面积相对稳定,小型内湖(<5 km<sup>2</sup>)面积变化尤为剧烈。内湖水面面积主要受降雨、蒸发等气候因素和生产生活取水、防洪排涝和退田还湖等人为活动调控。1980–2000 年和 2001–2015 年两个时期,洞庭湖区多年平均降雨量呈现不同程度的下降趋势,多年平均蒸发量明显上升。三峡工程运行后,三口分流衰减,但水资源需求量不断增长,退田还湖和留蓄雨洪作为水资源使得丰水期间内湖水面面积增长,气候变化和水资源开发利用导致枯水期水面面积趋于减少。有必要加强洞庭湖区内湖的研究和保护,适当退田还湖提高湖泊率,优化三口水系格局,实施河湖水系连通工程,缓解洞庭湖区季节性水资源紧张问题。

**关键词:** 洞庭湖区;内湖;遥感监测;水面面积

## Changes and driving factors of water surface area for inner lakes in Lake Dongting district in the past 40 years

GAO Ye<sup>1,2</sup>, XIE Yonghong<sup>3,4\*\*</sup>, ZOU Dongsheng<sup>1</sup>, HOU Tingjuan<sup>5</sup> & LI Zhengzui<sup>2</sup>

(1: College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, P.R.China)

(2: Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, P.R.China)

(3: Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, P.R.China)

(4: Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Observation and Research, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Yueyang 414018, P.R.China)

(5: Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Chenzhou City, Chenzhou 423000, P.R.China)

**Abstract:** In Lake Dongting district, there are some inner lakes located at low-lying fields surrounded by protective embankments. As a result of the dual effects of climate change and human activities, the area of inner lakes had changed apparently over the past decades. In this study, changes of water surface area for inner lakes in Lake Dongting district had been surveyed, using multi-time remote sensing images from 1979 to 2016. The total area was relatively stable, while a rising trend in wet season and decreased in a fluctuation way during dry season. With the increase of lake area, the proportion and extent of area change decreased. Inner lakes larger than 5 km<sup>2</sup> were relatively stable, while for lakes less than 5 km<sup>2</sup>, area change was particularly intense. Water surface area change of inner lakes was mainly influenced by climatic factors, such as rainfall and evaporation, and human activities of water in-taking, flood control, drainage and Returning Farmland to Lake. Between 1980–2000 and 2001–2015, the average annual rainfall

\* 湖南省第三次水资源调查评价项目和湖南省水利科技项目(XSKJ2018179-14)联合资助。2018-10-09 收稿;2018-11-13 收修改稿。高耶(1984-)男,博士研究生;E-mail: gaoye28@qq.com.

\*\* 通信作者;E-mail: xyh@isa.ac.cn.

in both dry season and rainy season showed a decreasing trend in varying degrees in Lake Dongting district, while the average annual evaporation increased significantly, resulting in the utilizable precipitation reducing significantly. After the operation of the Three Gorges project, the diversion flow of 3 diversion outlets of Jingjiang River and the utilizable precipitation both had declined significantly, while the demand for water resources has been increasing, which resulting in reduced water surface area during dry season. In addition, severe water shortages in Lake Dongting area makes it necessary to storing stormwater as water resources, which combined with implementing Returning Farmland to Lake to increase the surface area of lakes during the wet season. For enough water supply, it is necessary to reinforce studies and conservation about inner lakes, make further efforts to return farmland to lake, and optimize the structure of rivers and the river-lake connectivity.

**Keywords:** Lake Dongting district; inner lakes; remote sensing monitoring; water surface area

卫星遥感对地观测具有瞬时覆盖面积大、可周期性重复、数据更新迅速等优点,快速准确地从多时相卫星遥感影像中提取水体信息已经成为水资源调查、湿地保护和防灾减灾等领域的重要技术手段<sup>[1]</sup>。遥感技术在湖泊监测中正发挥着越来越重要的作用,如赵玉灵<sup>[2]</sup>应用多类型遥感数据调查和监测安固里淖湖近30年的水体分布变化;冯钟葵等<sup>[3]</sup>、刘瑞霞等<sup>[4]</sup>选用不同卫星图像数据跟踪监测青海湖的水域面积变化;马明国等<sup>[5]</sup>利用多时相、多类型遥感图像监测若羌湖泊群的动态变化特征。

内湖是相对于外湖洞庭湖而言,系指湖区圩垸内的湖泊,其主要特征是与堤垸外的江河无直接水文联系,湖泊入出流受到人为控制<sup>[6-7]</sup>。最近20年间,随着全球气候变化以及三峡水库和长江上游梯级水库的建设运行,洞庭湖和长江的水文联系发生了显著变化,三口河系断流天数持续增加,洞庭湖区(尤其是北部地区)面临较为严重的水资源短缺问题。洞庭湖区内湖是圩垸渍水的天然蓄积地,可以作为圩垸生活和农业生产灌溉的重要补充水源,有利于缓解洞庭湖区季节性的水资源短缺。黄群等<sup>[6]</sup>曾研究1950s到本世纪初洞庭湖区内湖水面面积的演变,本研究主要关注近20年来洞庭湖区内湖水面面积的变化,与1980-2000年期间进行比较分析,为保护内湖资源和实施河湖水系连通工程提供理论参考。

## 1 研究区概况及数据源

洞庭湖区指长江荆江段南岸以洞庭湖为中心,海拔高程在50 m以下的广大河、湖冲积-淤积平原和环湖岗丘及外围低山区,地跨湘、鄂两省,总面积18780 km<sup>2</sup>。湘、资、沅、澧四水由南部注入洞庭湖,北面松滋、太平、藕池三口(调弦河1954年堵塞),分泄长江水入湖,由岳阳城陵矶汇入长江,为一个纵横交错的水网区。区域内除洞庭湖外,圩垸内还分布着众多内湖。由于上世纪大规模围垦,湖泊率由1950s的20%下降到如今的不到5%,且空间分布不均匀,有的圩垸3%左右,有的仍保持10%左右<sup>[8]</sup>,总体远低于《湖南省洞庭湖区水利管理条例》所规定10%的湖泊率。洞庭湖区丰水期(4-9月)暴雨强度较大,而圩垸内地面高程一般低于外河(湖)水位,排水闸无抢排机会,造成内湖水位上升,需要借助机械抽排防止渍堤,因此汛期防洪调度方案通常要求空湖待蓄,保证足够的调蓄容量。另外,投肥养殖及其他面源污染物入湖使得内湖水体富营养化问题普遍比较突出。

本研究中1980s初采用的为MSS数据,2010年后的为ETM数据,中间年份的为TM数据(表1)。Landsat 1-3 MSS是由Landsat 1-3卫星携带的传感器,重现期为18天。Landsat 4-5 MSS和TM都是由Landsat 4-5卫星携带的传感器,重现期为16天。Landsat MSS影像数据有4个波段,空间分辨率为60 m。Landsat TM影像包含7个波段,波段1~5和波段7的空间分辨率为30 m。Landsat 7 ETM<sup>+</sup>是Landsat 7卫星携带的增强型主题成像仪,Landsat 7 ETM SLC-off指2003年5月31日机载扫描行校正器(scan lines corrector,简称SLC)突然发生故障之后的异常数据产品。Landsat ETM<sup>+</sup>影像数据包括8个波段,其中波段1~5和波段7的空间分辨率为30 m。

为全面反映过去40年洞庭湖区内湖的面积变化,同时考虑丰水期(4-9月)和枯水期(10月至来年3月)水面面积的季节变化,本研究选取1980、1990、2000、2005和2016年5个时期遥感影像进行解译和分析,丰水期遥感影像以6、7和8月为主,枯水期遥感影像以10、11和12月为主,遥感影像条带号主要为123、124,行编号为39和40。

表 1 遥感数据的类型及接收日期  
Tab.1 Dates and types of remote sensing images

序号	数据类型	条带号	行编号	接收日期	序号	数据类型	条带号	行编号	接收日期
1	1-3 MSS	132	40	1979-11-07	21	1-3 MSS	132	39	1980-10-14
2	4-5 MSS	123	40	1983-08-06	22	1-3 MSS	132	39	1981-08-16
3	4-5 TM	123	40	1991-07-19	23	4-5 TM	123	39	1991-07-19
4	4-5 TM	123	40	1993-10-12	24	4-5 TM	123	39	1993-10-12
5	4-5 TM	123	40	2000-10-31	25	4-5 TM	123	39	2000-07-27
6	4-5 TM	123	40	2000-07-27	26	4-5 TM	123	39	2000-10-31
7	4-5 TM	123	40	2004-12-13	27	4-5 TM	123	39	2009-07-20
8	4-5 TM	123	40	2004-07-22	28	4-5 TM	123	39	2009-11-25
9	7 ETM SLC-off	123	40	2015-07-29	29	7 ETM SLC-off	123	39	2016-07-31
10	7 ETM SLC-off	123	40	2016-12-06	30	7 ETM SLC-off	123	39	2016-12-06
11	1-3 MSS	133	40	1981-07-30	31	TSS 1-3	133	39	1980-11-02
12	4-5 MSS	124	40	1984-10-26	32	TSS 1-3	133	39	1981-08-17
13	4-5 TM	124	40	1992-07-28	33	4-5 TM	124	39	1992-07-28
14	4-5 TM	124	40	1994-10-22	34	4-5 TM	124	39	1992-10-16
15	4-5 TM	124	40	2000-11-07	35	4-5 TM	124	39	2000-06-16
16	4-5 TM	124	40	2000-06-16	36	4-5 TM	124	39	2000-10-06
17	4-5 TM	124	40	2004-11-18	37	4-5 TM	124	39	2004-11-18
18	4-5 TM	124	40	2005-06-30	38	4-5 TM	124	39	2005-06-30
19	7 ETM SLC-off	124	40	2013-07-30	39	7 ETM SLC-off	124	39	2014-12-08
20	7 ETM SLC-off	124	40	2016-11-27	40	7 ETM SLC-off	124	39	2016-07-22

## 2 研究方法

遥感影像分析主要基于地物的光谱特征,在大部分遥感传感器的波长范围内,水体总体呈现出较弱的反射率,尤其是在波长大于 740 nm 的近红外及中红外波段(相当于 TM/ETM<sup>+</sup> 的 Band4、Band5 和 Band7) 几乎所有入射能量均被水体吸收<sup>[9-11]</sup> 与其他地物类别形成明显反差。水体信息主要通过分析水体及背景地物的光谱值,利用单个波段或多个波段组合来提取<sup>[12-13]</sup>。单波段阈值法在单个波段上设定阈值提取水体信息,可以简便识别水体,但没有充分利用其他波段的光谱信息,无法将水体与山区阴影区分开来,一般只能满足 4000 m<sup>2</sup> 以上水体的要求。多波段谱间关系法通过对波段进行组合运算增强水陆反差,再提取水体信息。TM 影像中,水体具有光谱特征: (TM2+TM3) > (TM4+TM5), 可利用此谱间关系增强图像提取水体信息。谱间关系法可以将水体与阴影区分开,适合较大水体的提取<sup>[12,14]</sup>,但与建筑物存在混分现象<sup>[15]</sup>。

本研究中,首先对研究区域不同类型影像在统一投影和坐标系下采取如下的处理方式:①MSS 数据,类似于谱间关系法采用 (MSS4+MSS5) - (MSS6+MSS7) 对图像进行增强处理;②TM 数据,采用谱间关系法对图像进行增强处理;③ETM 数据,通过 ENVI 的 Landsat\_gapfill 条带修复补丁对 ETM 5 波段进行修复处理。再以几何精校正的高分辨率遥感影像资料为地理基础,对增强影像进行几何校正和配准。然后对图像采用 K-Means 聚类分析的非监督分类,定义分类结果、合并子类并转为矢量格式文件。最后对照 MSS7、TM5 和 ETM 5 波段影像,结合典型地物类型的光谱特征曲线,按照常规的人机交互解译对分类结果的矢量文件再次进行校核确认。

参照黄群等<sup>[6]</sup> 对于内湖界线和入出湖河流分界线的定义,内湖界线的提取过程中遵照如下规则: (1) 尽可能以堤岸线作为湖泊的界线; (2) 以河流宽度急剧增大处作为湖泊与入出湖河流的分界; (3) 依据研究期间内湖的最大水面范围,内湖水面面积等于内湖及最大水面范围内内湖分隔出来的水面面积之和。对于影像重叠区域的内湖,水面面积等于同一时期多景影像所提取水面面积的平均值。

### 3 研究结果

#### 3.1 洞庭湖区内湖总面积的变化

根据研究区 1979–2016 年的遥感影像解译得到洞庭湖区 156 个面积在 1 km<sup>2</sup> 以上内湖的水面面积, 统计结果见图 1. 近 40 年来, 丰水期间, 洞庭湖区内湖面积呈上升趋势, 由 1980 年的 498.52 km<sup>2</sup> 上升到 2016 年的 556.94 km<sup>2</sup>, 上升幅度为 11.72%. 枯水期间, 洞庭湖区内湖面积波动较大, 5 个时期的湖泊面积分别为 683.28、596.09、674.46、657.99 和 579.48 km<sup>2</sup>. 2016 年内湖面积比 1980s 初减少了 103.8 km<sup>2</sup>, 减少 15.2%. 洞庭湖区内湖总面积相对稳定, 由 1980s 初的 591.51 km<sup>2</sup> 下降到 2016 年的 568.21 km<sup>2</sup>, 减少 3.94%.

#### 3.2 不同大小湖泊面积的变化

3.2.1 湖泊变化面积分析 根据湖泊面积大小, 将湖泊分为 3 类: 小于 5 km<sup>2</sup> 的小型湖泊、大于 5 km<sup>2</sup> 且小于 10 km<sup>2</sup> 的中型湖泊和大于 10 km<sup>2</sup> 的大型湖泊. 依据解译得到的 5 个时期的内湖面积, 按照 1980–2000 年和 2000–2016 年两个时期计算洞庭湖区内湖面积均值和变化比例, 若变化比例在 5% 以内, 则认为湖泊面积相对稳定; 若变化比例为 5%~10%、10%~20% 和大于 20% 则分别记为减(增)、减+(增+) 和减--(增++) , 其中增表示增加, 减表示减少. 结果表明, 25.64% 的湖泊面积在两个时期保持相对稳定状态, 41.02% 的湖泊面积减少, 33.33% 的湖泊面积出现增加. 在面积减少的湖泊中, 小型湖泊占到 81.25%, 中型湖泊占 10.94%, 大型湖泊占 7.8%; 在面积增加的湖泊中, 小型湖泊占 92.3%, 中型湖泊占 5.77%, 大型湖泊占 1.9% (图 2).

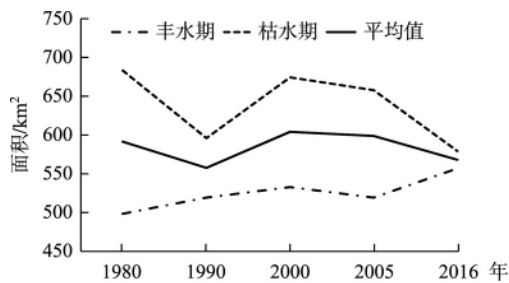


图 1 洞庭湖区内湖面积变化

Fig.1 Water area changes for inner lakes in Lake Dongting district in different seasons

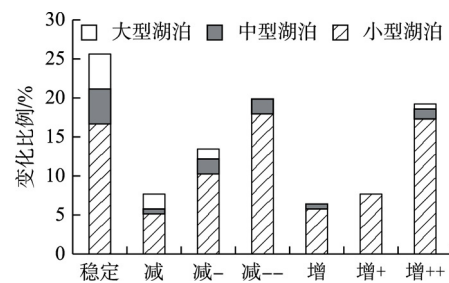


图 2 洞庭湖区不同大小内湖面积变化

Fig.2 Water area changes for inner lakes of different sizes in Lake Dongting district

总体上看, 小型湖泊水面面积出现明显的增减变化, 比例占 79.3%, 保持相对稳定的仅占 20.63%; 中型湖泊中, 41.18% 的湖泊水面面积显著减少, 其中白芷湖、太白湖和鹤龙湖面积减少比例分别为 23.1%、33.4% 和 24.3%; 大型湖泊中, 5 个时期的湖泊面积详细统计见表 2, 其中 38.46% 的湖泊面积减少, 53.84% 的湖泊维持相对稳定状态, 仅鹰湖水面积显著增加. 由此可见, 不同大小湖泊的面积变化呈现显著差异, 随着湖泊面积增加, 湖泊水面面积变化的比例和幅度逐渐减少, 湖泊更加趋于稳定.

3.2.2 丰水期湖泊面积的变化 由图 3 可见, 1980–2016 年 5 个时期, 大型湖泊和中型湖泊水面面积在丰水期间保持相对稳定, 大型湖泊水面面积维持在 245 km<sup>2</sup>, 中型湖泊水面面积维持在 100 km<sup>2</sup>; 小型湖泊水面面积在丰水期间呈现较为明显的增长趋势, 2016 年比 1980 年增加 42.47 km<sup>2</sup>. 因此, 1980–2016 年丰水期间洞庭湖区内湖面积的增加 (图 1) 主要是由小型湖泊增长所造成的.

按照 1980–2000 年和 2000–2016 年两个时期计算洞庭湖区内湖面积均值和变化比例, 按湖泊面积大小分别统计, 结果见图 4、5. 25% 的湖泊在两个时期面积保持相对稳定状态, 30.12% 的湖泊面积减少, 44.87% 的湖泊面积增加. 湖泊面积变化在空间分布上无明显规律. 小型湖泊减少的占 33%, 增加的占 50.8%; 中型湖泊减少的占 17.65%, 增加的占 23.53%; 大型湖泊面积减少的占 15.38%, 增加的占 15.38%. 可见随着湖泊面积增加, 湖泊水面面积变化的比例逐渐降低, 湖泊变得更加稳定, 总体上丰水期湖泊面积保持上升的趋势.

表 2 洞庭湖区大于 10 km<sup>2</sup> 的内湖面积

Tab.2 Water areas statistics of inner lakes with areas more than 10 km<sup>2</sup> in Lake Dongting district

序号	名称	内湖面积/km <sup>2</sup>				
		1980 年	1990 年	2000 年	2005 年	2016 年
1	大通湖	79.72	79.01	76.95	77.67	79.5
2	毛里湖	25.38	24.6	25.59	23.65	25.2
3	东湖	25.73	25.55	25.24	25.08	23.64
4	鹰湖	3.49	3.21	10.86	16.81	17.93
5	珊瑚湖	19.77	18.33	18.02	18.38	17.93
6	牛浪湖	16.66	15.31	14.87	15.07	16.73
7	南湖	15.91	14.64	13.77	13.72	12.3
8	北民湖	16.43	13.59	13.52	13.44	13.69
9	黄家湖	9.53	11	11.75	10.10	9.99
10	烂泥湖	13.02	12.52	12.81	10.98	10.28
11	坪桥湖	6.63	13.06	12.23	10.67	10.35
12	安乐湖	10.12	9.89	10.42	10.11	10.24
13	胭包山湖	9.6	10.23	11.98	9.72	10.41

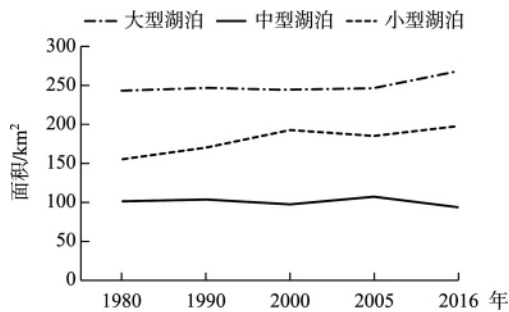


图 3 丰水期洞庭湖区不同大小内湖面积变化

Fig.3 Water area changes for inner lakes of different sizes in Lake Dongting district in wet season

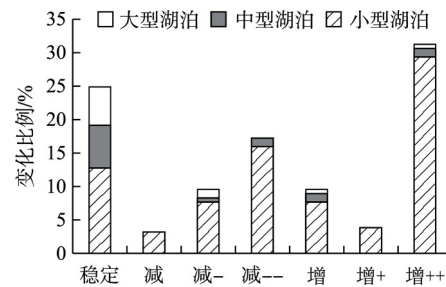


图 4 丰水期洞庭湖区内湖面积变化

Fig.4 Water area changes for inner lakes in Lake Dongting district in wet season

3.2.3 枯水期湖泊面积的变化 1980-2016 年 5 个时期 ,大型湖泊、中型湖泊和小型湖泊水面面积在枯水期间均呈现出总体波动下降的趋势( 图 6) ,造成枯水期洞庭湖区内湖面积的波动下降( 图 1) . 大型湖泊水面面积由 281.41 km<sup>2</sup>下降到 266.84 km<sup>2</sup> ,中型湖泊水面面积由 146.58 km<sup>2</sup>下降到 110.68 km<sup>2</sup> ,小型湖泊水面面积由 255.29 km<sup>2</sup>下降到 201.97 km<sup>2</sup> .

按照 1980-2000 年和 2000-2016 年两个时期计算洞庭湖区内湖面积均值和变化比例 ,按湖泊面积大小分别统计 枯水期湖泊面积变化结果如图 7、8 所示. 21.15%的湖泊保持相对稳定 ,52.56%的湖泊面积减少 ,26.28%的湖泊面积增加 枯水期湖泊面积变化在空间分布上无明显规律. 小型湖泊面积减少的占 55% ,增加的占 27%; 中型湖泊面积减少的占 41% ,增加的占 29%;大型湖泊面积减少的占 46% ,增加的占 15%. 与丰水期一样 ,大型湖泊和中型湖泊的水面面积相对更加稳定. 但是 ,枯水期面积减少的湖泊比例显著高于丰水期 ,同时面积增加的湖泊比例又显著低于丰水期 ,导致枯水期湖泊水面面积总体呈现较为明显的减少趋势.

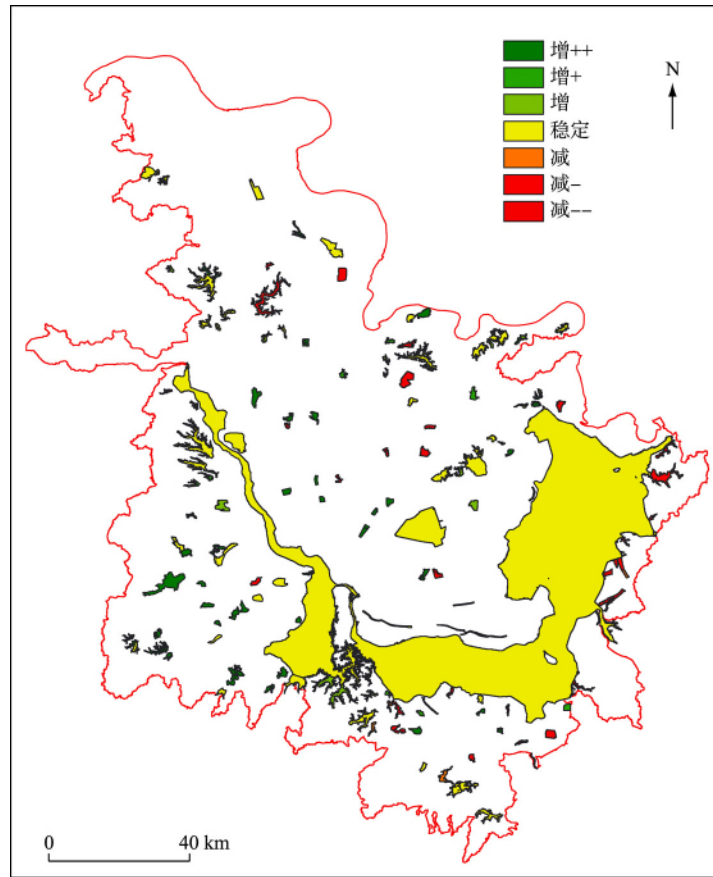


图 5 丰水期洞庭湖区内湖面积变化

Fig.5 Distribution of water area changes for inner lakes in Lake Dongting district in wet season

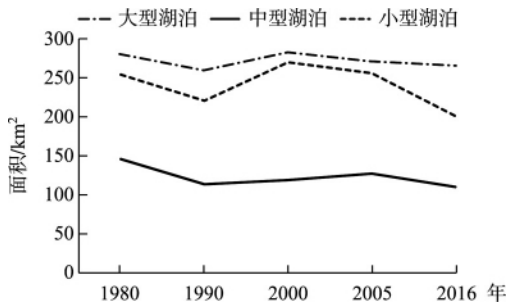


图 6 枯水期不同大小内湖面积变化

Fig.6 Water area changes for inner lakes of different sizes in dry season

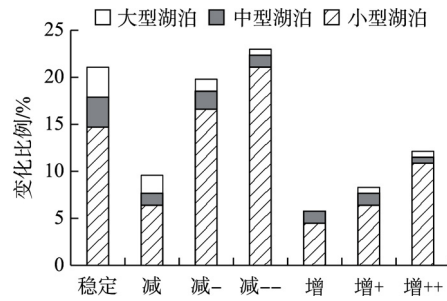


图 7 枯水期洞庭湖区内湖面积变化

Fig.7 Water area changes for inner lakes in Lake Dongting district in dry season

#### 4 内湖水面面积变化的驱动因素分析

湖泊水面面积可视为湖泊水量变化的度量,根据湖泊水量平衡原理,出入湖水量不完全相等造成湖泊

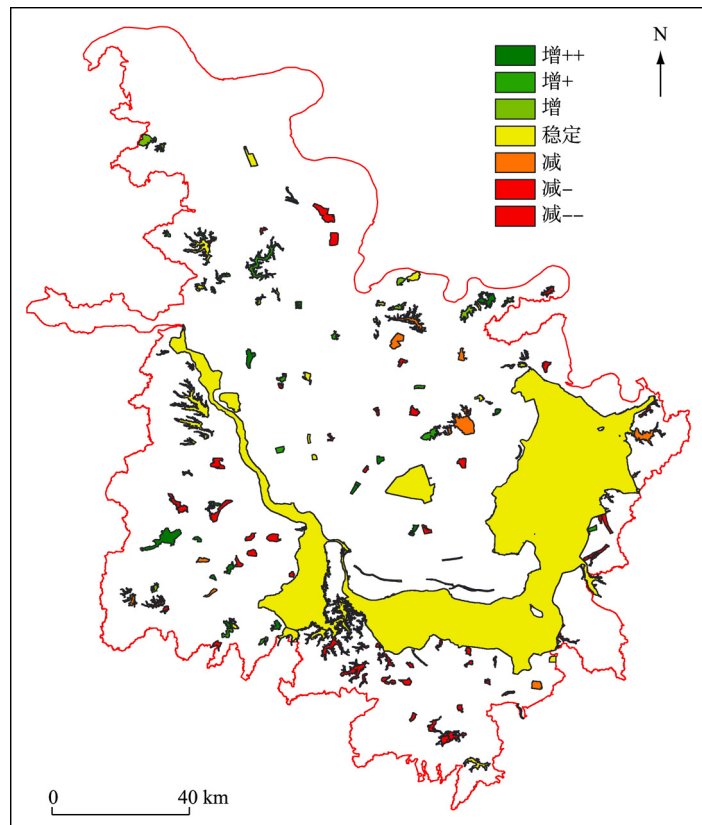


图 8 枯水期洞庭湖区内湖面积变化

Fig.8 Water area changes for inner lakes in Lake Dongting district in dry season

水量和水面面积变化,降水、蒸发和出入流等气象和水文过程产生水量不平衡,进而导致湖泊水面面积变化。由于内湖与堤垸外的江河无直接水文联系,湖泊入出流受到人为控制,内湖水量和水面面积主要受降雨、蒸发等气候因素和生产生活取水、防洪排涝和退田还湖等人为活动调控调节。

#### 4.1 不同大小内湖水面面积变化的驱动因素分析

4.1.1 典型湖泊面积变化的驱动因素分析 考虑到洞庭湖区降雨量的空间变化,选取自治局雨量站附近的珊瑚湖、塌西湖和黄田湖作为大、中和小型内湖的代表湖泊。对不同接收日期影像所提取的水面面积,基于 SPSS 19 软件,对前 3 个月降雨量之和、蒸发量以及二者差值和前一个月降雨量、蒸发量以及二者差值作多元回归分析,由于缺乏 2016 年降雨量和蒸发量数据,2016 年枯水期样本无效,  $n=9$ 。珊瑚湖、塌西湖和黄田湖多元回归分析所对应的 Sig 值分别为 0.20、0.18 和 0.57,说明湖泊个体尺度上降雨量和蒸发量等气候变量联合起来对水面面积没有显著影响。

4.1.2 区域尺度上湖泊面积变化的驱动因素分析 洞庭湖区内湖主要分布在条带号为 124,行编号为 40 的影像所在区域,因此基于此区域不同接收日期影像所提取湖泊水面面积,分析区域尺度上降雨量、蒸发量等气候变量对湖泊面积变化的影响。由于 1981 年 7 月 30 日所接收影像的覆盖区域不一致,而且缺乏 2016 年降雨量和蒸发量数据,  $n=8$ 。对不同接收日期影像所提取的水面面积,剔除存在缺失值的样本,分别对大型湖泊 ( $n=8$ )、中型湖泊 ( $n=7$ ) 和小型湖泊 ( $n=69$ ) 面积求和。基于 SPSS 19 软件,对前 3 个月降雨量之和、蒸发量和以及二者差值和前一个月降雨量、蒸发量以及二者差值作多元回归分析,降雨量数据取自自治局、石龟山和沅江 3 个代表雨量站数据平均值,蒸发量数据取自华容、安乡和沅江 3 个代表站点数据平均值。大、中和小型湖泊多元回归分析所对应的 Sig 值分别为 0.19、0.15 和 0.10,说明区域尺度上降雨量和蒸发量等气

候变量联合起来对不同大小湖泊的水面面积没有显著影响。

通过湖泊面积与降雨量、蒸发量等气候变量的多元回归分析表明,在湖泊个体和区域两个不同尺度上,降雨量和蒸发量并不是洞庭湖区内湖水面积变化的显著影响因素。由于内湖与堤坑外的江河无直接水文联系,出入流受人为调控,人为水量调节可能是内湖水量和水面面积发生变化的主导性影响变量。

#### 4.2 洞庭湖区的气候变化

4.2.1 洞庭湖区的降雨量变化 选取自治局、石龟山、沅江和鹿角 4 个代表站,分析评价近 40 年来洞庭湖区降雨量变化,结果如图 9 所示。4 个代表站点在 1980–2000 年和 2001–2015 年两个时期,枯水期和丰水期降雨量均呈现不同程度的下降趋势。从空间分布上看,自治局降雨量下降幅度最小,鹿角站降雨量下降幅度最大,代表洞庭湖区北部腹地的自治局和石龟山两站下降程度要小于位于洞庭湖南部湖滨地带的沅江和鹿角两站,且枯水期和丰水期的下降幅度在空间分布上表现一致。在时间上,各站点丰水期降雨量减少程度大于枯水期。总体上,洞庭湖区两个时期的枯水期多年平均降雨量由 443.98 mm 下降到 424.43 mm,丰水期多年平均降雨量由 897.77 mm 下降到 822.15 mm。

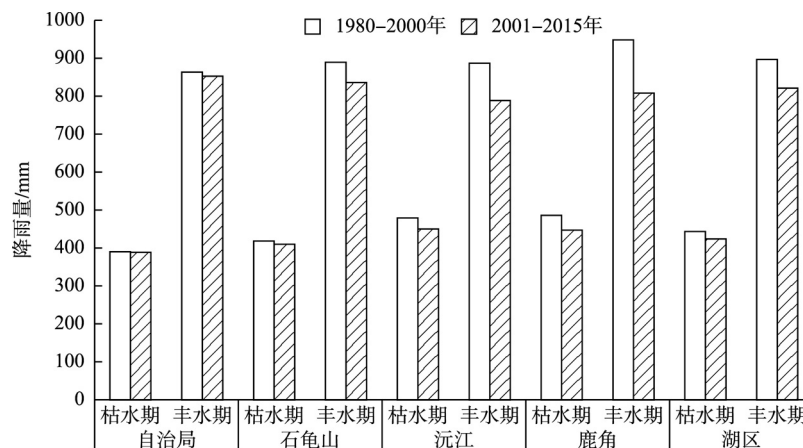


图 9 洞庭湖区典型代表站的降雨量变化

Fig.9 Rainfall change of typical representative stations in Lake Dongting district

4.2.2 洞庭湖区的蒸发量变化 选取华容、安乡、沅江和湘阴 4 个代表站,分析评价近 40 年来洞庭湖区蒸发量变化,结果如图 10 所示。4 个代表站点在 1980–2000 年和 2001–2015 年两个时期,除洞庭湖区北部腹地的安乡站枯水期和丰水期蒸发量相对稳定外,其余 3 个代表站枯水期和丰水期蒸发量均呈现不同程度的上升趋势。洞庭湖区东北部的华容站,枯水期多年平均蒸发量由 222.53 mm 增加到 246.17 mm,丰水期多年平均蒸发量由 499.8 mm 增加到 558.49 mm,上升幅度分别为 10.63%和 11.74%。西洞庭湖的沅江站,枯水期多年平均蒸发量由 252.55 mm 增加到 297.69 mm,增幅在各站点中最大,达 17.87%;丰水期多年平均蒸发量由 569.17 mm 增加到 587.23 mm。南洞庭湖的湘阴站,枯水期多年平均蒸发量由 243.74 mm 增加到 260.33 mm,丰水期多年平均蒸发量由 568.5 mm 上升到 597.93 mm。总体而言,洞庭湖区枯水期多年平均蒸发量由 235.8 mm 增加到 256.02 mm,丰水期多年平均蒸发量由 529.27 mm 增加到 555.45 mm,增幅分别为 8.57%和 4.94%。

#### 4.3 洞庭湖区内湖的治理和人为开发利用

近 20 年来,内湖水面面积变化受以下人为因素的共同作用影响: 1) “退田还湖、平垸行洪”工程的实施。1998 年长江流域发生洪涝灾害后,中国政府及时提出了“退田还湖”等长江流域洪水治理 32 字指导原则,规划平退堤垸 300 余处,其中双退总面积达 227.3 km<sup>[17-20]</sup>。此外,湖区各地对垸内易涝低洼区积极实行退田还湖,扩大了内湖调蓄容量和水面面积,但还是存在一定区域内的围湖造田现象<sup>[21]</sup>。2) 城镇化快速发展,垸坑下垫面条件发生变化。2000 年后洞庭湖区城镇化快速发展,不透水面积迅速增加,截断了水分入渗及补给地下水的通道,使垸坑地表滞洪、蓄洪能力下降,导致丰水期雨洪径流增加<sup>[22]</sup>。3) 水资源需求量急剧增长,水



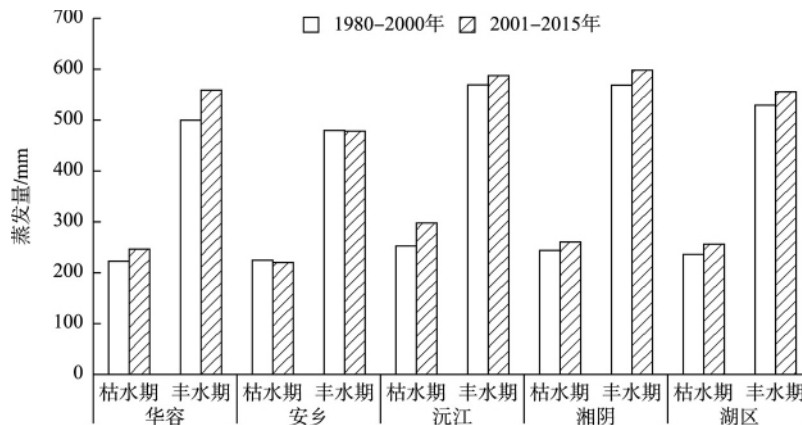


图 10 洞庭湖区典型代表站的蒸发量变化

Fig.10 Vaporization changes of typical representative stations in Lake Dongting district

资源开发利用强度加大. 随着人口增长和工农业的迅速发展, 湖区水资源的需求也不断增长<sup>[22]</sup>. 但三峡工程正式运行后, 受清水下泄影响, 上荆江河段冲刷加剧以及三口河道淤积的共同影响, 三口分流衰减明显, 洞庭湖区连年季节性缺水成为常态, 夏秋连旱或冬春连旱灾害频发<sup>[23-24]</sup>. 湖区政府和广大群众逐渐改变以往重排涝、轻抗旱的传统思路, 不断加大退耕还湖力度, 充分利用现有内湖在丰水期留蓄宝贵的水资源.

综上所述, 2000年后洞庭湖区总体上多年平均降雨量出现下降趋势, 而蒸发量呈上升趋势. 2003年三峡水库建设运行后, 洞庭湖和长江的水文联系发生显著变化, 三口河系断流天数持续增加. 但是湖区同时期的水资源需求量却不断增长, 水资源开发利用强度加大. 因此, 枯水期不同大小的内湖水面面积呈现较为明显的下降; 丰水期间, 内湖的调度运用需要兼顾考虑排涝和抗旱的综合效益, 气候变化和日益突出的季节性水资源短缺问题促使人们改变内湖开发利用与调度方式, 转而实施退田还湖政策, 将汛期的雨洪储存起来作为水资源加以利用, 使得丰水期小型水面面积出现增长. 而相对于小型湖泊, 大中型内湖在丰水期间受防汛排涝调度方案的更严格限制, 一般维持在较低水位待蓄, 因此大中型内湖水量和水面面积在丰水期间保持相对稳定.

## 5 结论

本研究选择区域内 1979-2016 年间多时期、多类型、多光谱遥感数据进行解译, 分析评价洞庭湖区的内湖在最近 40 年的面积变化. 结果表明, 洞庭湖区的内湖面积在最近 40 年保持相对稳定, 丰水期间呈略上升趋势, 增加 11.72%; 枯水期间, 内湖面积波动较大, 2016 年内湖面积比 1980s 初减少 15.2%. 不同大小湖泊的面积变化呈现显著差异, 随着湖泊面积增加, 湖泊水面面积变化的比例逐渐减少, 湖泊变得更加稳定.

内湖水面面积主要受降雨、蒸发等气候因素和生产生活取水、防洪排涝和退田还湖等人为活动调控. 在 1980-2000 年和 2001-2015 年两个时期, 洞庭湖区多年平均降雨量均呈现不同程度的下降趋势, 而多年平均蒸发量均呈现出明显的上升趋势. 三峡工程运行后, 三口分流衰减明显, 但洞庭湖区水资源需求量却不断增长, 湖区面临季节性水资源短缺问题. 退田还湖和丰水期间留蓄水资源的使得内湖水面面积增长; 气候变化和水资源开发利用强度增加, 导致枯水期水面面积趋于减少.

受长江中上游系列水利工程的建设和运行影响, 三口水系枯季流量持续减少, 断流天数持续增加, 对洞庭湖地区的生产生活造成显著的负面影响. 有必要加强洞庭湖区内湖的研究和保护, 适度退田还湖提高湖泊率, 优化三口水系格局, 实施河湖水系连通工程, 缓解洞庭湖区水资源紧张问题<sup>[7, 25]</sup>.

## 6 参考文献

- [1] Xia X, Yuan XZ. Water information extraction method of freshwater lake wetland. *Geospatial Information*, 2012, 10(5):

- 8-10. [夏双, 阮双宗. 淡水湖泊湿地水体信息提取方法. 地理空间信息, 2012, 10(5): 8-10.]
- [2] Zhao YL. Dynamic monitoring on water level of Angulinao Lake and the causes of its drying up. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(3): 312-317. [赵玉灵. 近30年来安固里淖湖面监测与变化分析. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 312-317.]
- [3] Feng ZK, Li XH. Remote sensing monitoring study for water area change and lakeshore evolution of Qinghai Lake in last 20 years. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 8(1): 131-141. [冯钟葵, 李晓辉. 青海湖近20年水域变化及湖岸演变遥感监测研究. 古地理学报, 2006, 8(1): 131-141.]
- [4] Liu RX, Liu YJ. Area changes of Lake Qinghai in the latest 20 years based on remote sensing study. *J Lake Sci*, 2008, 20(1): 135-138. DOI: 10.18307/2008.0121. [刘瑞霞, 刘玉洁. 近20年青海湖湖水面积变化遥感. 湖泊科学, 2008, 20(1): 135-138.]
- [5] Ma MG, Song Y, Wang XM. Dynamically monitoring the lake group in Ruoqiang County, Xinjiang Region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 189-195. [马明国, 宋怡, 王雪梅. 1973-2006年新疆若羌湖泊群遥感动态监测研究. 冰川冻土, 2008, 30(2): 189-195.]
- [6] Huang Q, Jiang JH. Changes of inner lakes in Lake Dongting District in the past 50 years. *J Lake Sci*, 2005, 17(3): 202-206. DOI: 10.18307/2005.0302. [黄群, 姜加虎. 近50年来洞庭湖区的内湖变化. 湖泊科学, 2005, 17(3): 202-206.]
- [7] Wang X, Xiao WH, Zhu WY et al. Analysis and strategy on Water supply security in Dongting Lake area. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, (1): 82-84, 93. [王旭, 肖伟华, 朱维耀等. 洞庭湖区供水安全问题. 南水北调与水利科技, 2012, (1): 82-84, 93.]
- [8] Liu KB. Renovation and management of large drainage pumping station in Dongting Lake area. *Hunan Hydro & Power*, 2005, 6: 57-59. [刘卡波. 洞庭湖区大型排涝泵站更新改造与管理实现. 湖南水利水电, 2005, 6: 57-59.]
- [9] Mei AX et al eds. Introduction to remote sensing. Beijing: Higher Education Press, 2011. [梅安新等. 遥感导论. 北京: 高等教育出版社, 2011.]
- [10] Zhao YS et al eds. Principle and method of remote sensing application analysis. Beijing: Science Press, 2003. [赵英时等. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [11] Chang QY, Jiang PA, Zhou Y eds. Introduction of remote sensing technology. Beijing: Science Press, 2004. [常庆瑞, 蒋平安, 周勇等. 遥感技术导论. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [12] Li XM, Wang G, Tian J. Study of the method of picking-up small water-bodies in Landsat TM remote sensing image. *Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science*, 2006, 28(4): 580-582. [李小曼, 王刚, 田杰. TM影像中的水体提取方法研究. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2006, 28(4): 580-582.]
- [13] Wu WY, Shen XH, Zhou LJ et al. An integrated method for water body detection and delineation using Landsat ETM+ data. *Bulletin of Science and Technology*, 2008, 24(2): 252-259. [吴文渊, 沈晓华, 邹乐君等. 基于Landsat ETM+影像的水体信息综合提取方法. 科技通报, 2008, 24(2): 252-259.]
- [14] Chen HF, Wang JL, Chen Z et al. Comparison of water extraction methods in mountainous plateau region from TM image. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, (6): 479. [陈华芳, 王金亮, 陈忠等. 山地高原地区TM影像水体信息提取方法比较——以香格里拉县部分地区为例. 遥感技术与应用, 2004, (6): 479.]
- [15] Zhou CH et al eds. Geoscience understanding and analysis of remote sensing images. Beijing: Science Press, 2001. [周成虎等. 遥感影像地学理解与分析. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [16] Ding MC. Optimum programming for drainage of polder area in Dongting Lake district. *Rural Water Conservancy and Small Hydropower*, 1983, 6: 2-7. [丁孟春. 洞庭湖区圩垸排涝最优规划. 农村水利与小水电, 1983, 6: 2-7.]
- [17] Zhang DC, Ding DS, Dong MH et al. A wetland ecological construction study on reclaiming a lake from an area in Dongting Lake Plain. *World Regional Studies*, 2002, 11(2): 107-112. [庄大昌, 丁登山, 董明辉等. 洞庭湖平原退田还湖区湿地生态功能建设初探. 世界地理研究, 2002, 11(2): 107-112.]
- [18] Zhuang DC, Ou WX, Ding DS. Evaluation of the lake recovery area eco-economy benefit in Dongting Lake wetland. *Journal of Natural Resources*, 2003, (18): 536-543. [庄大昌, 欧维新, 丁登山. 洞庭湖湿地退田还湖的生态经济效益研究. 自然资源学报, 2003, (18): 536-543.]
- [19] Jiang JH, Zhang S, Huang Q et al. Analysis on the restoration and ecological recovery of Dongting Lake by stopping cultivation. *J Lake Sci*, 2004, 16(4): 325-330. DOI: 10.18307/2004.0406. [姜加虎, 张琛, 黄群等. 洞庭湖退田还湖及

- 其生态恢复过程分析. *湖泊科学*, 2004, **16**( 4): 325-330.]
- [20] Peng PQ, Cai CA, Zhao QC. Huyuan agricultural and its substitutive patterns in Dongting Lake areas of returned field to lake. *Territory & Natural Resources Study*, 2004, ( 2): 23-25. [彭佩钦, 蔡长安, 赵青春. 洞庭湖区的湖垸农业、洪涝灾害与退田还湖. *国土与自然资源研究*, 2004, ( 2): 23-25.]
- [21] Zhang HQ, Zhu XR, Zhou JX *et al.* Analysis on wetland change before and behind implementing the project of returning farm land to lake in Dongting Lake region. *Forest Research*, 2009, **22**( 3): 309-314. [张怀清, 朱晓荣, 周金星等. 退田还湖工程前后洞庭湖区湿地变化分析. *林业科学研究*. 2009, **22**( 3): 309-314.]
- [22] Li JZ, Zhu X, Li JB *et al.* Relationships between urbanization and water resource utilization in Dongting Lake District of South central China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**( 6): 1677-1685. [李静芝, 朱翔, 李景保等. 洞庭湖区城镇化进程与水资源利用的关系. *应用生态学报*, 2013, **24**( 6): 1677-1685.]
- [23] Li JB, Wang KL, Yin H *et al.* The characteristics and causes of agricultural drought disasters in the area of Dongting Lake from 2000 to 2007. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2008, **19**( 6): 1-5. [李景保, 王克林, 尹辉等. 洞庭湖区 2000 年-2007 年农业干旱灾害特点及成因分析. *水资源与水工程学报*, 2008, **19**( 6): 1-5.]
- [24] Duan K, Xiao WH, Mei YD *et al.* An analysis of the impacts of large water projects on water resources utilization in the Dongting Lake region. *Resources and environment in the Yangtze River Basin*, 2012, **21**( 11): 1389-1394. [段凯, 肖伟华, 梅亚东等. 大型水利工程对洞庭湖区水资源开发利用的影响. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**( 11): 1389-1394.]
- [25] Bian HX, Gong XL. Preliminary study on the reclamation problems in the Dongting Lake area. *Acta Geographica Sinica*, 1985, **40**( 2): 131-141. [卞鸿翔, 龚循礼. 洞庭湖区围垦问题的初步研究. *地理学报*, 1985, **40**( 2): 131-141.]