# 东洞庭湖水面面积变化监测及其与水位的关系

彭焕华<sup>1,2</sup>张静<sup>2,3</sup>梁继<sup>1,2</sup>陈浩<sup>1,21</sup>

(1.湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室,湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

3. 兰州大学 生命科学学院, 甘肃 兰州 730000)

【摘 要】: 开展东洞庭湖水面面积长时间变化监测研究对于湖区洪涝旱灾监测、灾害评估等具有重要意义。采 用 2000~2017 年的经过辐射一致性校正的 Landsat Collection 1 遥感数据集,在 ENVI 遥感数据处理平台下采用 4 种常见的水体提取方法(单波段阈值、多波段谱间关系、水体指数、支持向量机)开展了水面面积遥感提取方法比较 及东洞庭湖区长时间序列水面面积提取,以此数据为基础开展了东洞庭湖区近 18 年来湖区水面面积年内和年际变化 研究,并探讨了水面面积与城陵矶水文站水位之间的相关关系。结果显示:Landsat Collection 1 遥感数据集具有较 高的空间和时间分辨率,可以满足东洞庭区长时间序列水面面积提取,且水面面积提取精度较好;采用支持向量机方 法提取的湖区多年水面面积平均值为 569.9km<sup>2</sup>,丰水期水面范围波动较大,而枯水期变化较小;湖区水面面积变化与 城陵矶水位变化存在紧密相关关系,不管线性模型还是多项式模型均能准确地描述两者变化关系,受湖区地形分布 特征影响,水面面积与水位之间的关系在丰水期较紧密,而枯水期两者之间的相关关系明显降低。

【关键词】: 支持向量机 三峡工程 水位变化 水体提取

【中图分类号】:P237;P332【文献标识码】:A【文章编号】:1004-8227(2020)12-2770-11

洞庭湖是我国长江中游地区重要的调洪蓄水湖泊。由于近年来气候变化、上游三峡大坝水库的修建以及人类活动影响等原因,造成了洞庭湖水面面积不断缩小,洪涝干旱灾害频繁发生,生态功能逐步降低,对洞庭湖区及周边的生态环境产生了重要影响。东洞庭湖是洞庭湖湖系中最大的湖泊,承纳了长江中上游和湖南的湘、资、沅、澧四条江河水量,不同季节的汇水变化带来了洞庭湖水位及水面的不稳定变化,开展东洞庭湖水面面积变化监测并研究水面面积和水位之间的关系对于水利规划、洪涝旱灾监测以及灾害评估等具有重要意义。

遥感影像水体信息识别是开展湖泊水体面积变化研究及湖泊洪涝灾害遥感监测的关键前提<sup>[1,2]</sup>。国内外学者对此开展了大量 水体遥感自动提取研究工作<sup>[3~5]</sup>,提出了单波段阈值法、谱间关系法<sup>[6]</sup>、比值法<sup>[7]</sup>、水体指数法<sup>[8,9]</sup>、密度分割法<sup>[10]</sup>、决策树分类法 <sup>[11]</sup>等水体提取方法。近年来随着支持向量机<sup>[12~14]</sup>、随机森林方法<sup>[15,16]</sup>以及神经网络模型<sup>[17]</sup>等机器学习算法的涌现,通过对水体目 标特征参数进行抽取,建立特征参数与水体之间的非参数机器学习模型,完成水体信息的识别,目前已成为水体提取的热门研究 方向<sup>[1,12]</sup>。在洞庭湖区杜涛等<sup>[18]</sup>采用 250m 分辨率的 MODIS 数据利用动态阈值法对 2003~2006 年水体面积进行了多年遥感监测;

<sup>&</sup>quot;作者简介: 彭焕华(1984~), 男, 讲师, 主要研究方向为生态环境遥感监测. E-mail: penghh03@163. com

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0505500);湖南省自然科学基金项目(2019JJ50162;2018JJ2117);高分辨率对地 观测系统重大专项省域应用项目(82-Y40G23-9001-18/20);湖南省教育厅科研项目(18C0309);湖南科技大学创新团队建设项目 (CXTD003)

崔亮等<sup>[19]</sup>应用 Landsat30m 数据采用水体指数、多波段谱间关系等 5 种方法提取了湖区多年水面变化。不同研究者采用的遥感数据源及研究区域不同,导致采用的最优水体提取方法并不一致。加之,受卫星重返周期限制,较高分辨率的长时间遥感水体面积提取受较多限制,尤其同系列不同卫星之间需进行不同传感器校准<sup>[20]</sup>。2017 年 USGS 提供的经过辐射一致性校正的 Landsat Collection 1 遥感数据集为我们进行长时间水体面积提取提供了一套高空间分辨率的标准长时间序列数据集,开展该数据集在地表覆盖变化剧烈的东洞庭湖区水体面积的提取,首先需针对研究区特点开展水体信息提取最优方法研究。

湖泊水面面积与水位是表征湖泊受气候变化与人类活动影响程度的重要指标。目前,已有大量学者通过构建统计模型探究湖 泊水面面积和水位之间的相关性<sup>[21]</sup>。在长江中游地区,黄淑娥等<sup>[22]</sup>、李辉等<sup>[23]</sup>结合遥感影像,分别采用统计分析的方法探究了鄱 阳湖湖泊面积与湖口站水位值之间的关系模型,结果均表明采用水位-面积模型获取的水面面积与遥感影像提取的水面面积相差 较小。在洞庭湖区,袁敏等<sup>[24]</sup>研究了洞庭湖水域面积和城陵矶水文站水位之间的关系,指出可用二次曲线模型较好拟合洞庭湖水 域面积和城陵矶水位间关系;柯文莉等<sup>[26]</sup>采用 MODIS 遥感产品数据,提取了洞庭湖水面面积,结合同期城陵矶水位观测数据,指出 洞庭湖区水面面积与水位并非单值关系,而是呈现一种类似"绳套"变化关系。

因此,本文将利用 2000~2017 年的 Landsat 系列 Collection 1 产品遥感数据集,对几种常见的水体提取方法在东洞庭湖区 的适用性进行评价,并采用最优方法提取东洞庭湖区长时间序列的水面面积数据,以此数据为基础分析湖区水面面积年内和年际 动态变化特征。进一步的,开展湖区多年水面面积与城陵矶水位之间的相关关系研究,为后续洪涝旱灾监测、灾害评估等提供科 学依据。

## 1研究区概况

洞庭湖地处长江荆江南岸,跨湖北、湖南两省,是我国第二大淡水湖,享"八百里洞庭"之称,包括洞庭湖冲积平原区和受洪水顶托影响的尾闾地区,分为东、西、南洞庭湖以及大通湖四个湖泊。东洞庭湖位于 28°59′ N~29°38′ N、112°43′ E~113°15′ E,是洞庭湖湖系中最大的湖泊。东洞庭湖区是典型的亚热带季风湿润气候。湖区多年平均气温为 16.4℃~17.0℃,年平均降水量在 1300~1700mm 之间,全年降水量的其中 70%集中在 3~8 月,6 月的降水量最多。洞庭湖承纳湘、资、沅、澧四水,经东洞庭湖调蓄后由城陵矶汇入长江,湖区河流与湖泊错综交叉,关系复杂,径流在年际间变化幅度大。丰水期洪涝灾害频繁发生,而逢枯水期的春冬季节干旱少雨,表现为"洪水一大片,枯水几条线"的自然景观。



图1研究区示意图

# 2数据与方法

## 2.1 数据来源

### 2.1.1 遥感数据及预处理

本文采用的 2000~2017 年 Landsat 系列卫星 Collection1 遥感数据集,来源于美国地质调查局(USGS)网站(https://earthexplorer.usgs.gov),数据下载时筛选出无云或云量低于 20%且质量较好,轨道号为 123040 的包含研究区域的影像数据,共 收集到有效数据 85 期(数据来源详细信息见表 1 和图 2)。同时,为了对 Landsat 系列影像水体提取精度进行验证,选用国内 GF-1WFV 传感器 16m 多光谱数据进行水体提取,该数据来源于中国资源卫星应用中心陆地卫星数据服务平台(数据来源信息见表 2)。

选用遥感软件 ENVI5.3 对下载的影像数据进行预处理,本文所涉及的预处理工作主要包括:(1)Landsat7 ETM+部分影像的条 带修复;(2)影像辐射定标;(3)辐射校正;(4)GF-1影像正射校正;(5)研究区影像裁剪等。

轨道号	数据类型	时间段	空间分辨率	影像数量
123040	Landsat8/0LI	2013~2017	30m	18 景
123040	Landsat7/ETM+	2000~2015	30m	26 景
123040	Landsat5/TM	2000~2011	30m	41 景

表1 Landsat 系列卫星遥感影像数据列表



图 2 本研究所采用遥感数据日期分布图

表2 GF-1WFV 遥感影像数据信息

彩像口旁 刀列子 工间刀 开半 公里(10)	影像日期	序列号	空间分辨率	云量(%)
------------------------	------	-----	-------	-------

2015. 10. 25	1715070	16m	3
2016.07.23	2643862	16m	1

2.1.2 水位数据

水位和水面面积间具有比较强的相关性,已有研究<sup>[18,29]</sup>指出洞庭湖区石门、南咀、城陵矶、监利等水文站点中湖区入江口处的城陵矶站水位与湖区水面面积的关系最为紧密。因此,本研究从湖南省水文信息网(www.hnsw.com.cn)提供的日平均水位数据中,提取出城陵矶水文站2000年1月1日~2017年12月31日逐日水位数据,通过筛选出与遥感影像数据日期对应的日平均水位数据来分析洞庭湖区水文站点水位与湖区水面面积之间关系。

2.2 研究方法

2.2.1 水体提取方法

为了选取适用于东洞庭湖区水体信息识别最优方法。本文在 ENVI5.3 软件中采用单波段阈值、多波段谱间关系、水体指数 (NDWI)、支持向量机方法四种方法对预处理后的 Landsat 系列影像数据以及 GF-1 卫星数据进行水体提取,并通过目视解译与定量统计相结合的方法对水体提取精度进行判定。

(1)单波段阈值法是利用水体反射率在近红外和中红外波段较低,且与其他地物如植被、建筑物等存在显著差异,通过设置判 识参数确定水体信息。单波段阈值法最关键步骤是判识阈值的确定,阈值的准确性决定了提取结果的精度,只有根据经验和不断 试验才能确定最终判识阈值,其表达式一般为:

$$B_i < a$$

(1)

式中:Bi表示所选取的短波红外波段。通过修改阈值 a 的大小, 查看影像中水体提取效果, 直至符合水体提取预期结果。

(2)多波段谱间关系法在波段运算时选用两个以上波段,较为充分地利用波段信息,通过不同波段之间的关系比较达到水体和非水体有效地分离。如,Landsat5/TM影像可以利用 B2+B3>B4+B5 这一规律区别水体和植被等其他地物。

(3)水体指数法主要通过构建反射率相差大的波段之间的比值关系式,达到突出水体在影像上的灰度值,抑制非水体地物亮度值的效果。常见水体指数模型有归一化水体指数(NDWI)<sup>[8]</sup>、改进的水体指数(MNDWI)<sup>[9]</sup>等。

$$NDWI = (\rho_{(Green)} - \rho_{(NIR)}) / (\rho_{(Green)} + \rho_{(NIR)})$$
(2)  
MNDWI =  $(\rho_{(Green)} - \rho_{(MIR)}) / (\rho_{(Green)} + \rho_{(MIR)})$ (3)

式中:Green 是指绿波段,如Landsat5/TM影像中第二波段;NIR 是指近红外波段,TM影像中第四波段;MIR 是指近红外波段,TM影像中第七波段。

(4)支持向量机(SVM)是遥感分类中应用最为广泛的机器学习算法之一<sup>[26]</sup>,是一种非线性分类器,通过对偶优化形式在高维特

征空间中寻找最优分类超平面,从而解决复杂数据的分类及回归问题。对于地表信息丰富、地物混合度较高的区域,该分类方法 能够达到较高分类结果<sup>[14]</sup>。

对比可知,前3种水体提取方法主要基于像元的阈值分类法,而SVM则属于分类器分类法。对于复杂地物分类问题,分类器法 在构建水体信息提取规则时,可以借助于多源数据、多重影像属性,建立参数化或非参数化的学习模型,从而计算最优分割阈值 <sup>[26]</sup>。当然,每种方法都存在优劣,要视研究区、研究内容等比较后确定最适宜方法。

2.2.2 相关性分析

受不同季节降水影响,东洞庭湖区一年内具有非常明显的丰水期和枯水期。根据东洞庭湖水面面积及对应时期城陵矶水文站 逐日水位数据建立两者之间的相关性分析。相关性分析主要在 Origin 平台中进行, 拟合模型的基本原型为:

$$Y = aX^{n1} + bX^{n2} + cX^{n3} + \dots + m$$
(4)

式中:Y代表通过最优水体提取方法遥感提取的水面面积,X为与遥感影像对应日的城陵矶水文站实测的日平均水位数据,a、b、c、m均为拟合系数,而 n1、n2、n3则为拟合模型的幂次。通过拟合模型判定系数大小进行相关性强弱分析。

# 3 结果与分析

## 3.1 水体遥感提取方法比较分析

本文选用经过预处理的 2015 年 10 月 25 日(退水期)、2016 年 07 月 23 日(丰水期)两期 Landsat 遥感影像利用上述四种水体 提取方法进行水体分布提取,湖区水体提取结果如图 3 所示。



图 3 丰水期、退水期 Landsat 影像不同水体遥感提取方法水体提取分布图

通过目视判读对提取的结果分析可知:无论是丰水期还是退水期,除了多波段谱间关系法提取的水体和非水体之间分界不明显外,其他三种方法的提取结果都很好地抑制了其他地物的影响,水体提取较为准确。分别统计丰水期、退水期四种方法对Landsat影像提取的水体面积以及同期 GF-1影像的水体提取结果(表 3)。可以看出,在四种方法中,单波段阈值方法的水体提取 相差最大;多波段谱间关系方法在丰水位时提取效果最好,而退水位时效果不佳;NDWI方法丰水期提取效果较差,边缘处混合像元的错提及漏提较多;支持向量机方法在退水期的误差最小,在丰水期的提取精度也较准确。结合研究区特点,丰水期整个湖区几乎均被水体覆盖,无较多其他地物干扰,水体提取相对较为容易,而退水期湖区地物类型变化多样,其他地物干扰较多,水体提取难度较大。因此,综合以上不同方法提取结果,可认为支持向量机法是东洞庭湖区较为理想的遥感水体信息提取方法。

表3丰水期不同遥感水体提取方法水体提取结果比较(2016.07.23)

方法	单波段阈值法	多波段谱间关系法	NDWI	SVM	GF-1
面积(km²)	1057.862	1146.776	1184.837	1179.577	1140.542
差值(km²)	-82.680	6.234	44. 295	39.035	

表4退水期不同遥感水体提取方法水体提取结果比较(2015.10.25)

方法	单波段阈值法	多波段谱间关系法	NDWI	SVM	GF-1
面积(km²)	419.327	400. 745	381.635	350.363	361.115
差值(km²)	58.212	39.630	20. 520	-10.752	

#### 3.2近18年来东洞庭湖区水面面积变化分析

根据上述分析,采用支持向量机方法对 2000~2017 年东洞庭湖区 85 期 Landsat 系列影像数据进行水面面积提取,分析东洞 庭湖区水面面积年内、年际变化特征。

#### 3.2.1 湖区水面面积年内变化

将2000~2017年研究时间段内,同一月内的两景影像提取的水体面积取平均值作为本月平均水体面积,对一个月内只有一景影像的月份,将该景影像提取的水体面积作为本月的平均水体面积。2000~2017年东洞庭湖区水面面积的月变化如图4所示,可以发现水面面积随城陵矶水位变化关系明显,每年7~10月丰水期湖区水面面积达到最大。研究期间湖区水面面积最大值出现在2016年7月,为12246.9km<sup>2</sup>(对应水位33.2m);湖区水面面积最小值出现在2000年2月,面积为145.4km<sup>2</sup>(对应水位21.1m);湖区水面面积多年平均值为569.9km<sup>2</sup>。从东洞庭湖多年水面面积变化特征不难发现,一年中湖区水面存在较为明显的丰枯变化特征:1~3月为枯水期,湖泊水面覆盖度低;4~6月为涨水期,湖泊水面覆盖度逐渐增加;7~9月为丰水期,湖泊水面覆盖度基本达到峰值;10~12月为退水期,湖泊水面覆盖度逐渐降低。



图 4 东洞庭湖湖区 2000~2017 年水面面积、城陵矶水位随时间变化特征

为更直观反映东洞庭湖区水面的空间变化特征,图 5 列出了影像较为完整的 2013 年湖区水面分布图。2013 年东洞庭湖区水 面面积在 155.6~896.1km<sup>2</sup>之间变化,湖区水面面积最大值与最小值相差近 6 倍。从水体分布区域来看,6~9 月期间整个湖区绝大 部分被水体覆盖,1、2、11、12 月期间仅湖区西北部湖盆区域以及沿湖区东部的河道区域被水体覆盖。一年当中,随着水体覆盖 范围的变化,东洞庭湖区表现出明显的丰水期"洪水一大片"和枯水期"枯水几条线"的景观变化特征。

3.2.2 湖区水面面积年际变化

一般而言,外界环境不发生剧烈变动时,相近年份的同月湖区水面面积仅与降水量变化显著相关。本文在综合考虑遥感数据 源数量以及湖区水面面积变化特征后,选用每年7月丰水期和12月枯水期的水面变化进行年际变化分析。从图6可以看出,每年 7月丰水期,东洞庭湖绝大部分区域被湖水覆盖,水面宽阔,不同年份湖水覆盖区域范围波动较大。其中2016年长江流域的强降雨 导致洞庭湖承纳四水洪水和长江下泄,东洞庭湖水面面积达到自2000年以来的最大峰值。每年12月属于东洞庭湖区的枯水期, 湖区水位较低,湖区极少部分区域被湖水覆盖,2001~2017年间水面面积年际变化微小,相近年份间几乎没有发生变化(图7)。

3.3 湖区水面面积与水位之间的变化关系

利用支持向量机提取的东洞庭湖区 2000~2017 年长时间序列水面面积数据分析其与城陵矶水位站对应的水位变化关系(图 8)。从图可以看出湖区水面面积与城陵矶水位站之间水位变化存在非常高的相关关系。对水面面积-水位进行线性、二次、三次 拟合分析,决定系数 R<sup>2</sup>分别达到 0.958、0.965、0.977,不管线性模型还是多项式模型均能准确地描述两者的变化关系。

在 3.2.1 湖泊水面面积年内变化分析中已知,东洞庭湖区存在较为明显的年内丰枯变化特征,通过与水面面积与城陵矶水位 之间的比较分析,也发现东洞庭湖水面面积最大时对应着城陵矶的最高水位,但水面面积最小的时候并非对应最低水位。



图 5 2013 年不同月份东洞庭湖区水面面积变化



图 6 2000~2017 年丰水期东洞庭湖区水面面积变化



#### 图 7 2000~2017年枯水期东洞庭湖区水面面积变化

为进一步分析不同时期湖区水面与水位之间的变化关系,将洞庭湖区水面变化按枯水期-涨水期-丰水期-退水期进行划分。 由图9可知,不同水文时期湖面面积与水位之间的相关系存在较大差异,其中,枯水期(1~3月)水面面积数据与水位间的相关性低, 决定系数仅为0.44,由拟合关系式推算得到在此期间水位每变化1m,湖区水面面积变化33.3km<sup>2</sup>;涨水期(4~6月)和丰水期(7~9 月)东洞庭湖水面面积数据与水位间的均存在较高的相关性,决定系数均为0.90,相较于枯水期,涨水期和丰水期随水位变化1m, 湖面水面面积变化较大,分别为96.6和101.8km<sup>2</sup>;退水期(10~12月)湖区水面面积数据与水位间的相关性又有所较低,两者之间 决定系数为0.68,随着水位每变化1m,湖水面面积变化49.5km<sup>2</sup>。







图9东洞庭湖区水面面积与城陵矶水位之间随水文变化特征变化关系

分析变化可得知,东洞庭湖区在水面面积较大时,湖泊水面面积和城陵矶水位之间的关系比较紧密,而在湖面面积较小的时候,两者之间相关关系则却很低。究其原因,本文采用的水位数据来源于城陵矶水文站,城陵矶地处洞庭湖与长江的交汇口,在枯水期湖区水面面积的变化受长江水位变化影响较小,由于地势原因,整个湖泊平均水面和长江水面并非同一个水平面。枯水期,城

陵矶水位更多受长江水位变化影响,而受东洞庭湖水位变化影响较小。

此外,从枯水期-丰水期湖区水面面积随水位之间的变化速率来看。低水位时,湖泊水面面积随水位变化增加速率较为缓慢; 而在丰水期,随水位升高,湖泊水面面积增加较多,这与东洞庭湖湖盆呈近似倒"{"(大括号)相符。东洞庭湖湖盆底部主要是河 流冲刷沟,而湖盆中部和上部较为平坦的洲滩,在枯水期和平水期出露地表,在洪水期基本淹没于水下,洲滩面积占全湖的比例较 大,因而随水位增加,水面面积快速增加。

## 4 结论与讨论

本文利用 2000~2017 年 Landsat 系列卫星 Collection1 遥感数据产品,获取了东洞庭湖区长时间序列的遥感水面面积,并结 合城陵矶水位探讨分析了湖区水体面积变化与水位之间的相关关系,通过结果分析可知:

(1)Landsat系列卫星Collection1遥感数据产品具有较高的空间和时间分辨率,可以满足东洞庭区长时间序列水体面积提取, 且水体面积提取精度较好。通过常见的单波段阈值法、多波段谱间关系、水体指数和支持向量机4种水体提取方法结果比较,归 属于机器学习算法中的支持向量机方法在丰水期,尤其是退水期地表覆盖变化多样情况下的提取精度较准确,可认为是东洞庭湖 区较为理想的遥感水体信息提取方法。当然,在何灵敏等<sup>[27]</sup>的支持向量机分类研究中也指出,对于地表信息丰富、地物混合度较 高区域,该分类方法能够达到较高分类结果。但 SVM 分类方法中核函数的选择对分类结果影响较大,已有的研究<sup>[28]</sup>指出径向基核 函数相比于线性核函数、多项式核函数等具有识别率高、性能最好,且随训练集减少时分类性能最稳定。因此,在本论文中选用 了径向基核函数及对应参数进行水体信息提取。

(2)东洞庭湖区水面存在较为明显的丰枯变化特征,1~3 月为枯水期;4~6 月为涨水期;7~9 月为丰水期;10~12 月为退水 期。采用支持向量机方法提取的东洞庭湖区水面面积多年平均值为 569.9km<sup>2</sup>,丰水期水面范围波动较大,而枯水期变化较小。袁 敏等<sup>[24]</sup>的研究发现三峡工程修建后洞庭湖水面面积均有不同程度降低。尤其是三峡工程运行对长江汛期的洪峰削减作用,使得汛 期长江进入洞庭湖水量有所降低,从而降低了湖区汛期最大的水面面积。但三峡工程对湖区水面面积的影响并无法消除降水等气 候因素带来的变化,2016年的湖区最大水面面积就是由于湘、资、沅、澧四大流域强降雨所导致。

(3)东洞庭湖区水面面积与城陵矶水位站之间水位变化存在非常高的相关关系,不管线性模型还是多项式模型均能准确地描述两者的变化关系。但同时,本文的分析结果也表明,湖区水面面积较大时,水面面积和水位之间的关系比较紧密;而水面面积较小时,两者之间关系则不那么紧密。尤其在枯水期,湖区水面面积与水位之间的关系非常低。将整个湖区水体面积作为因变量,建立整个湖区水体面积-水位关系曲线,虽然拟合精度较高,但其中也必然存在着一定的不合理性<sup>[18]</sup>。而柯文莉等<sup>[28]</sup>研究也指出洞庭湖区水面面积与水位之间存在"绳套"变化关系,不同时期相同水位可能对应着不同的水面面积。

目前,除了支持向量机外,随机森林、神经网络模型等机器学习算法在水体提取中也表现了较高的提取精度,后续分析过程中还有待进一步对其他机器学习算法进行比较分析。此外,为了构建东洞庭湖水面面积与水位之间的关系,还需进一步构建多站点水位与湖区水面面积之间的相关关系,以克服单一站点水位与水面面积之间的弱空间分布性。

## 参考文献:

[1] 王航, 秦奋. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 测绘科学, 2018, 43(5):23-32.

[2]张毅,陈成忠,吴桂平,等.遥感影像空间分辨率变化对湖泊水体提取精度的影响[J].湖泊科学,2015,27(2):335-342.

[3] FEYISA G L, MEILBY H, FENSHOLT R, et al. Automated water extraction index: A new technique for surface water

mapping using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140:23-35.

[4]李浩杰,种丹,范硕,等.近三十年云南九大高原湖泊水面面积遥感变化监测[J].长江流域资源与环境,2016,25(S1): 32-37.

[5]张浩彬,李俊生,向南平,等.基于 MODIS 地表反射率数据的水体自动提取研究[J].遥感技术与应用,2015,30(6): 1160-1167.

[6] 汪金花, 张永彬, 孔改红. 谱间关系法在水体特征提取中的应用[J]. 矿山测量, 2004, (4): 30-32.

[7] 毕海芸, 王思远, 曾江源, 等. 基于 TM 影像的几种常用水体提取方法的比较和分析[J]. 遥感信息, 2012, 27 (5): 77-82.

[8]MCFEETERS S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1425-1432.

[9] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5):589-595.

[10] JAIN S K, SINGH R D, JAIN M K, et al. Delineation of flood-prone areas using remote sensing techniques[J]. Water Resources Management, 2005, 19(4):333-347.

[11]ACHARYA T, LEE D, YANG I, et al. Identification of water bodies in a Landsat 8 OLI image using a J48 decision tree[J]. Sensors, 2016, 16(7):1075.

[12] IRELAND G, VOLPI M, PETROPOULOS G. Examining the capability of supervised machine learning classifiers in extracting flooded areas from Landsat TM imagery: A case study from a Mediterranean flood[J]. Remote Sensing, 2015, 7(3): 3372-3399.

[13] 段秋亚, 孟令奎, 樊志伟, 等. GF-1 卫星影像水体信息提取方法的适用性研究[J]. 国土资源遥感 2015, 27 (4): 79-84.

[14] 肖奥, 赵文吉, 胡德勇, 等. 利用对象和支持向量机的遥感信息提取方法探讨[J]. 测绘科学, 2010, 35 (5):154-157.

[15]GISLASON P O, BENEDIKTSSON J A, SVEINSSON J R. Random Forests for land cover classification[J].Pattern Recognition Letters, 2006, 27 (4):294-300.

[16]JIA K, JIANG W G, LI J, et al. Spectral matching based on discrete particle swarm optimization: A new method for terrestrial water body extraction using multi-temporal Landsat 8 images[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209:1-18.

[17]陈前,郑利娟,李小娟,等.基于深度学习的高分遥感影像水体提取模型研究[J].地理与地理信息科学,2019,35(4): 43-49.

[18] 杜涛, 熊立华, 易放辉, 等. 基于 MODIS 数据的洞庭湖水体面积与多站点水位相关关系研究[J]. 长江流域资源与环 境, 2012, 21 (6):756-765.

[19] 崔亮, 李永平, 黄国和, 等. 基于 Landsat-TM 影像的洞庭湖水面动态变化 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1):63-66.

[20]LI S, WANG W, GANGULY S, et al. Radiometric characteristics of the Landsat collection 1 dataset[J]. Advances in Remote Sensing, 2018, 7:203-217.

[21] 汪丹, 王点, 齐述华. 鄱阳湖水位-淹水面积关系不确定性的分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(S1):95-102.

[22]黄淑娥,钟茂生.鄱阳湖水体淹没模型研究[J].应用气象学报,2004,15(4):494-499.

[23]李辉,李长安,张利华,等.基于 MODIS 影像的鄱阳湖湖面积与水位关系研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28 (2): 332-337.

[24] 袁敏, 李忠武, 谢更新, 等. 三峡工程调节作用对洞庭湖水面面积 (2000-2010 年) 的影响 [J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 37-45.

[25] 柯文莉, 陈成忠, 吉红霞, 等. 洞庭湖水面面积与城陵矶水位之间的绳套关系[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3):753-764.

[26]MOUNTRAKIS G, IM J, OGOLE C. Support vector machines in remote sensing: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(3):247-259.

[27]何灵敏, 沈掌泉, 孔繁胜, 等. SVM 在多源遥感图像分类中的应用研究[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(4):648-654.

[28]朱树先,张仁杰.支持向量机核函数选择的研究[J].科学技术与工程,2008,8(16):4513-4517.