

doi: 10.6046/zrzyg.2023061

引用格式: 赵辉,陈振,冯超帆,等. 基于 Landsat 影像的鄱阳湖面积监测及其与水位关系研究[J]. 自然资源遥感,2024,36(2): 198–206. (Zhao H, Chen Z, Feng C F, et al. Monitoring of the area of Poyang Lake based on Landsat images and its relationship with the water level[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(2): 198–206.)

基于 Landsat 影像的鄱阳湖面积 监测及其与水位关系研究

赵 辉¹, 陈 振², 冯超帆¹, 张 通¹, 赵学晶¹, 张兆旭^{3,4}

(1. 山东省核工业二四八地质大队, 青岛 266041; 2. 青岛市勘察测绘研究院, 青岛 266033;
3. 天津工业大学环境科学与工程学院, 天津 300387; 4. 河北省海洋岸线生态修
复与智慧海洋监测工程研究中心, 秦皇岛 066000)

摘要: 湖泊是陆地生态系统的一个重要的组成部分, 湖泊水域的变化对环境和人类的生产活动都有着重大的影响。鄱阳湖作为中国第一大淡水湖, 近年来多次出现洪旱灾害现象, 因此对鄱阳湖进行动态监测意义重大。文章以 2000—2021 年鄱阳湖 175 期 Landsat 影像作为数据源, 对比分析了归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)、改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)、自动水体提取指数(automated water extraction index, AWEI)、谱间关系法(spectrum photometric method, SPM)这 4 种水体提取方法, 优选最适宜鄱阳湖的水体提取模型; 利用 175 期面积数据分析了鄱阳湖 2000—2021 年面积的年际变化趋势, 分析年内季节变化特征, 同时结合 2009—2013 年和 2017—2018 年同时期的 50 组水位数据, 建立面积-水位关系模型。结果表明: ①AWEI 模型提取水体精度优于其他 3 种, 该文最终选用 AWEI 进行鄱阳湖水体提取; ②鄱阳湖面积存在明显的季节性变化, 且丰水季面积年际波动大, 枯水季较平缓; ③棠荫水位站湖泊面积-水位分段线性模型为最佳模型, 从而可以根据鄱阳湖区域的实时水位观测值对水体覆盖面积进行预测, 以弥补云雨天气时利用可见光遥感手段难以监测到湖泊水体淹没情况的不足。

关键词: 鄱阳湖; Landsat; 水体提取; 面积变化; 面积-水位模型

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)02-0198-09

0 引言

湖泊面积与水位情况受气候变化与人类活动影响较为明显^[1-3], 鄱阳湖地处江西省北部, 长江中下游以南, 是我国面积最大的淡水湖^[4]。近年来, 鄱阳湖频繁发生洪旱灾害, 受人类生产活动影响日益严重, 加之湖泊通江特性等, 导致鄱阳湖水位处在巨大的变化中^[5-6]。因此, 对鄱阳湖进行连续动态监测意义重大。自 1970 年以来, 卫星遥感技术发展迅速, 凭借其高时间、高空间分辨率, 监测范围广, 速度快等优点被广泛应用于大范围水体识别、洪涝灾害监测及湖泊变化分析等方面^[7-10]。Landsat 具有观测时间长、精度相对较高、可以免费下载等优势, 已成为世界各国广泛应用的遥感数据源, Landsat 对于实现湖泊面积的连续变化监测意义重大^[11-13]。随

着卫星技术的发展, 遥感为湖泊变化监测提供了有力的支撑, 遥感技术可以获得大范围的地表地物信息, 可以快速准确地提取水体信息, 越来越多的研究者将卫星遥感技术应用到湖泊变化的连续监测研究中^[14-15]。McFeeters^[16]构建了归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI), 发现将绿光波段和近红外波段做比值运算之后能够在很大程度上抑制植被的信息, 从而在影像中突出显示水体信息。Frazier 等^[17]比较了 Landsat5 的中红外波段阈值法与最大似然法的水体提取结果, 发现 2 种方法对于水体的提取精度相差不大; Olmanson 等^[18]利用定量模型估算的方法对美国明尼苏达州的湖泊面积及水体透明度进行了监测和评价工作; Fisher 等^[19]利用 Landsat 数据, 计算不同水体提取指数, 确认优化的阈值, 实现 Landsat 影像水体准确分类的自

收稿日期: 2023-03-08; 修订日期: 2023-07-04

基金项目: 河北省海洋岸线生态修复与智慧海洋监测工程研究中心开放基金项目“基于多源遥感数据和 Google Earth Engine 平台的海岸带土地利用变化及其驱动力研究”(编号: HBME502311)资助。

第一作者: 赵 辉(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事光学遥感应用研究。Email: 15621135786@126.com。

通信作者: 张兆旭(1989-), 男, 博士, 讲师, 主要从事定量遥感与 GIS 建模研究。Email: zhangzhaoxu@tiangong.edu.cn。

动化。在国内,不同学者针对水体提取也做了大量的工作。Li 等^[20]利用 Landsat8 影像,在机器学习算法中采用了决策树、逻辑回归、随机森林、神经网络、支持向量机和 Xgboost 等模型,通过交叉验证和网格搜索方法,确定了每个模型的参数,讨论了几种模型在水体提取中的优缺点,并传统 NDWI 中的 3 种阈值确定方法进行了比较分析;Qin 等^[21]将 U-Net 卷积神经网络应用于珠海一号卫星高光谱遥感影像中并提取了小水体;李辉等^[22]根据 2001 年 13 个时相的无云 MODIS 影像及水位数据,分别建立了线性、对数、指数 3 种模型来拟合面积与水位的关系,发现对数关系模型中二者相关性最高;刘可群等^[23]选用洞庭湖 2001—2007 年间 173 个时相的 MODIS 遥感影像分析了湖泊面积与降水、水位之间的关系,证明湖水面积与城陵矶水位站水位相关性较强;张楠楠等^[24]利用 2000—2010 年 11 a 的 MODIS 数据,针对鄱阳湖建立了 4 种面积-水位模型,最终证明二次多项式模型相关性最高;李鹏等^[25]利用 1989—2010 年鄱阳湖 100 期 TM 影像,建立了汛期及非汛期水面-水位关系模型并确定了各时期相应的代表性水位站;周洋等^[26]对鄱阳湖的星子站、都昌站、湖口站的水位-面积关系进行了评估,发现星子站及都昌站的平均拟合面积相差较小。

从以上分析可以发现,虽然众学者都对鄱阳湖的面积变化进行了详细的研究,但少有学者将水位值分段来建立模型以预测湖泊面积。现有对鄱阳湖湖泊面积-水位关系的分析探究大多仅选取单一水位站,不具有代表性,而且鄱阳湖受到降水等季节性因素的巨大影响,丰水季与枯水季差异较大,因此很有必要考虑不同水位站及季节因素对湖泊面积-水位关系模型的影响,分别开展不同站点、不同水位下水位与面积的关系研究。因此,本文选取 2000—2021 年 Landsat 无云影像,对比了 4 种不同的水体提取方法 (NDWI、改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)、自动水提取指数(automated water extraction index, AWEI)、谱间关系法(spectrum photometric method, SPM)^[27]),最终选用 AWEI 提取鄱阳湖面积,并对鄱阳湖面积变化进行分析,结合 2009—2013 年、2017—2018 年同时期 6 个水位站的水位值,通过回归分析构建了面积-水位的线性、指数、对数、二次多项式关系模型,并进一步根据水位值分段构建线性模型,取得了较好的效果。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

鄱阳湖地处 E115°47′~116°45′,N28°22′~29°

45′之间(图 1),湖泊覆盖面积约为 26 280 km²,占江西省国土面积的 15.7%^[28]。鄱阳湖受信江、赣江、修河、抚河和饶河 5 条河流和长江水位共同影响,季节间降水量分配极不平衡,导致湖区水位变化巨大。夏秋季为丰水期,水位可达 20 m,水域面积可增至 4 125 km² 以上,冬春季为枯水期,水位低至 12 m,面积不到 500 km²^[29]。

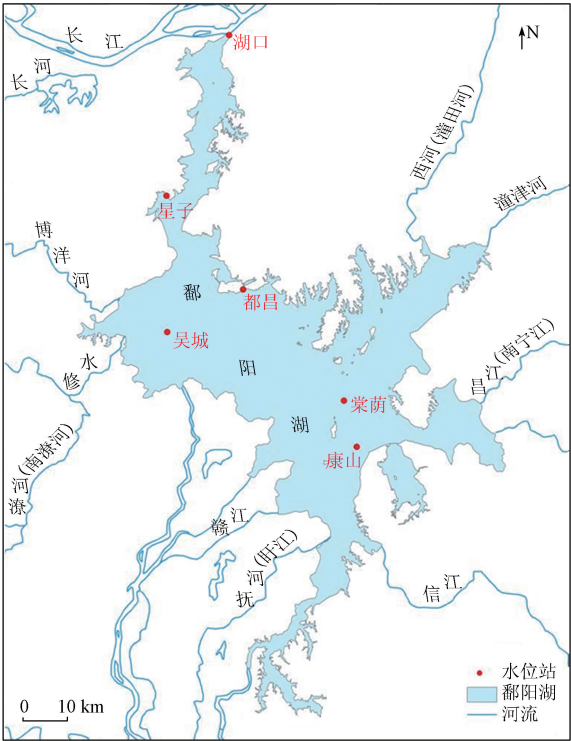


图 1 鄱阳湖位置及其水位站点分布

Fig. 1 Location of Poyang Lake and distribution of water level stations

1.2 数据源及其预处理

1.2.1 遥感影像及预处理

共收集了 2000—2021 年 Landsat5,7,8 卫星的 175 景无云影像对鄱阳湖水体进行连续观测与提取,Landsat 的空间分辨率为 30 m,表 1 显示了用到的遥感影像信息。同时选用了与 Landsat 影像同期的 GF-1 号 16 m 多光谱数据进行水体提取精度验证,影像获取日期为 2014 年 10 月 24 日,本文中的 Landsat 影像数据主要来源于美国地质调查局,这些数据已经过系统的辐射定标、大气校正、几何纠正等处理。2003 年 5 月 31 日,Landsat7 ETM+机载扫描行校正器故障导致数据出现条带现象(即 SLC-off),条带修复利用的是中科院地理空间数据云平台提供的多影像固定窗口回归分析模型(2003—2014 年)以及 ENVI 软件中的 Destripe 功能(2015—2021 年数据)^[30]。由于涉及面积的计算,本文采用 Albers Conical Equal Area 标准投影(等积投影)作为统一的

投影坐标系统,以保证投影后湖泊面积保持不变。

表 1 遥感影像信息表

Tab. 1 Remote sensing image information

卫星参数	Landsat5	Landsat7	Landsat8	GF-1
传感器	TM	ETM+	OLI	WV
发射时间	1984 年 3 月	1999 年 4 月	2013 年 2 月	2013 年 4 月
覆盖周期/d	16	16	16	4
空间分辨率/m	30	30	30	16

1.2.2 水位数据及预处理

根据鄱阳湖区的水文站点分布及已有文献中对站点的选取情况^[31-32],本文选取湖口站、星子站、都昌站、棠荫站、康山站、吴城站共 6 个水位站进行研究,站点的空间分布状况如图 1 所示。本文中的水位数据是根据我国的水文年鉴资料摘录整理而得,数据集包括以上 6 个站点 2009—2013 年、2017—2018 年与遥感数据同期的日平均水位值。上述水位站的高程基准面有所不同,包括吴淞基面、冻结基面。在过去对长江流域的众多研究中,吴淞基面被普遍采用^[33]。为了使数据具有可比性,将各站点水位值统一换算为吴淞基准面。

2 鄱阳湖水体提取

2.1 鄱阳湖范围的界定

鄱阳湖范围有狭义和广义之分,广义的鄱阳湖包括湖区及赣江、抚河、信江、饶河、修水 5 条河流组成的大水系,而狭义的仅指湖区内连通的面状水

体^[33]。本文研究的湖泊是狭义的鄱阳湖区。本文中鄱阳湖范围是依据国家地球系统科学数据共享平台中湖泊-流域科学数据中心提供的鄱阳湖 1:25 万矢量边界数据来确定,经投影转换为 Albers 等积投影,以保证与影像的一致性。

2.2 水体提取方法及精度比较

目前针对 Landsat 数据的水体提取方法较多,大多通过波段间组合运算来增强水体信息,抑制非水体信息,排除易混淆地物。本文选用 NDWI, MNDWI, AWEI 和 SPM 来提取水体^[16,34-35],并对各方法提取精度进行比较,各模型计算公式如表 2 所示。

表 2 不同模型提取水体的计算公式

Tab. 2 Formula of various models for extracting water body

模型	公式 ^①	备注
NDWI	$NDWI = (\rho_{B2} - \rho_{B4}) / (\rho_{B2} + \rho_{B4})$	$NDWI > a$ 为水体
MNDWI	$MNDWI = (\rho_{B2} - \rho_{B5}) / (\rho_{B2} + \rho_{B5})$	$MNDWI > b$ 为水体
AWEI	$AWEI = 4(\rho_{B2} - \rho_{B5}) - (0.25\rho_{B4} + 2.75\rho_{B7})$	$AWEI > c$ 为水体
SPM	$SPM = (\rho_{B2} + \rho_{B3}) - (\rho_{B4} + \rho_{B5})$	$SPM > 0$ 为水体

①式中: $\rho_{B2}, \rho_{B3}, \rho_{B4}, \rho_{B5}, \rho_{B7}$ 分别对应 Landsat5 TM 影像的绿光波段、红光波段、近红外波段、第 1 短波红外波段、第 2 短波红外波段的反射率; a, b, c 为不是固定值的常数,不同影像的取值不同。

本文选用研究区 2004 年 2 月 15 日(枯水期)、2014 年 10 月 24 日(丰水期)的 Landsat 影像,对 TM 数据进行预处理后,利用这 4 种模型进行水体提取实验,并对不同的水体提取方法进行比较(图 2)。

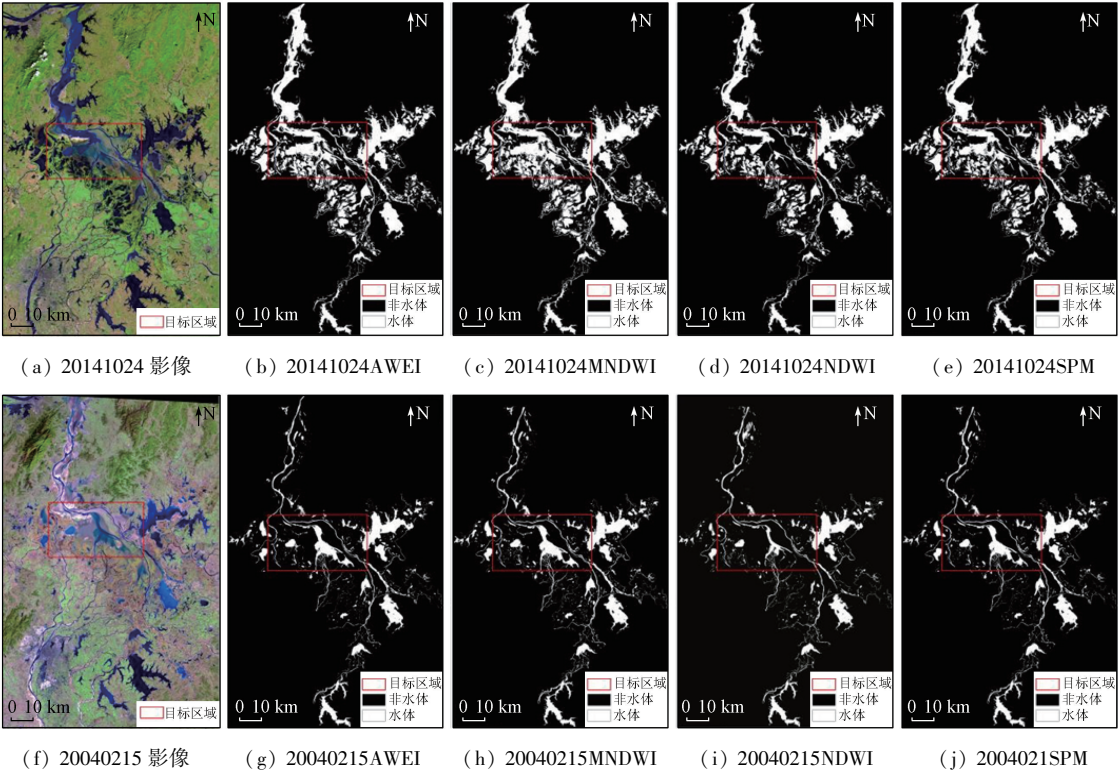


图 2 不同方法提取水体比较

Fig. 2 Comparison of different methods for extracting water body

从图 2 中目视判读可以看出,对比红框区域,无论是丰水期还是枯水期影像,NDWI 方法提取的水体信息最少,漏提最多;其他模型结果相当,都较好地抑制了其他地物的影响。分别统计 2 期影像用 4 种模型提取的水体面积,如表 3 所示,其中,2014 年 10 月 24 日是以 GF-1 影像为基准进行验证,由于波段限制,GF-1 影像的水体是采用 NDVI 方法提取;2004 年 2 月 15 日是以目视解译结果为参考值。

表 3 不同模型提取面积的比较

Tab. 3 Comparison of the different models for extracting area (km²)

参数	影像时相	NDWI	MNDWI	SPM	AWEI	参考值
面积	20141024	1 389.16	1 684.71	1 471.57	1 590.15	1 570.80
	20040215	662.39	829.06	767.18	764.15	748.80
差值	20141024	-181.64	113.91	-99.23	19.35	—
	20040215	-86.41	80.26	18.38	15.35	—

由表 3 分析发现,利用 AWEI 方法提取得到的水体面积最接近真实值(差值最小),其次是 SPM 法,MNDWI 方法的错提现象突出,NDWI 方法的提取效果最差,漏提现象最严重。因此,本文最终选用效果最好、精度最高的 AWEI 方法来提取湖泊面积。

由于不同影像获取的时相、气候状况不同,同时水体提取的阈值也不同,经统计,本文中所有影像的阈值范围均在 0.01~0.15 之间。将水体提取结果加载到 ArcGIS 软件中,并与鄱阳湖矢量边界进行叠加,从而计算出研究区不同时间的水体面积。

3 鄱阳湖面积变化及其与水位关系探究

3.1 鄱阳湖水面积覆盖的变化分析

3.1.1 年内季节变化分析

鄱阳湖面积变化较大,尤其是在丰水期及枯水

期转换时,湖泊涨、退水较快,因此会导致湖区面积发生显著变化。为更好地了解鄱阳湖在 2000—2021 年内面积的季节变化规律,在得到 175 景影像湖泊面积基础上,进一步计算了多年各月湖泊面积平均值,图 3 为多年各月平均面积。从多年面积均值可以发现,全年各月中 6 月和 7 月鄱阳湖面积最大,1 月面积最小。鄱阳湖 1—6 月面积稳定上升,8—12 月逐步降低,在 3 月出现了异常峰值,原因可能是 3 月份的影像数量较少,加之 2003 年和 2010 年 3 月湖泊面积较往年偏高,导致多年平均值偏高,总体来说,各月面积均值总体呈单峰型,湖泊面积存在明显季节性变化,夏季面积最大,秋季开始逐渐减小,冬季面积最小。

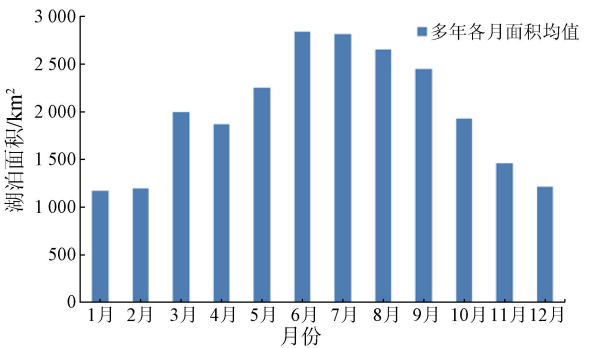


图 3 多年各月平均面积

Fig. 3 Average area of each month for many years

3.1.2 年际变化分析

由于 2018 年 7 月、9 月、12 月没有收集到可用影像,故选取 2000—2017 年,2019—2021 年 7 月、9 月、12 月的 Landsat 卫星影像进行面积变化监测,其中,7 月是 5 条河来水形成的湖泊汛期,9 月受长江汛期影响,导致高水位、大面积,12 月属于枯水期。本文选择这 3 个典型月份,通过各月逐年变化趋势来分析其年际变化,图 4 为湖泊面积年际变化曲线。

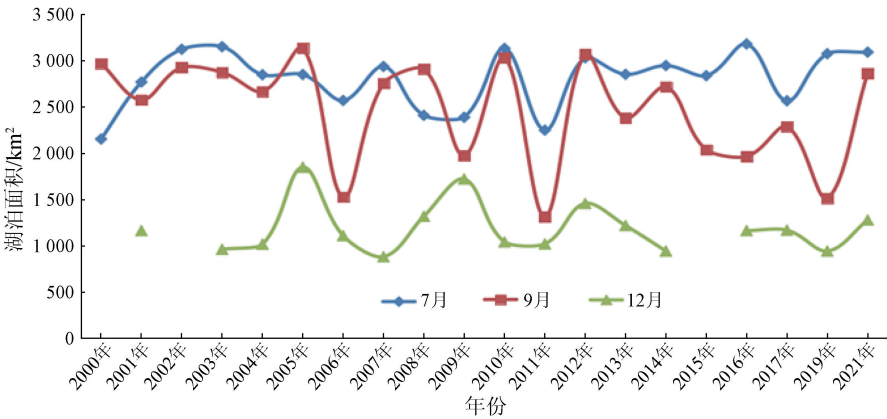


图 4 湖泊面积年际变化曲线

Fig. 4 The interannual variability curve of Poyang Lake area

受云影响,2000 年、2002 年、2015 年 12 月均没有合适影像,故 12 月的折线图出现了断点。分析发

现:同处汛期,大部分年份 7 月湖泊面积大于 9 月,仅在 2000 年、2005 年、2008 年、2012 年小于 9 月;9

月处于丰水期,2005 年以来,9 月湖泊面积波动较大;12 月处于枯水期,湖泊面积都较小且变化较平缓。总体来说,丰水期面积年际波动大,枯水期波动较平缓。

3.2 湖泊面积与水位关系探究

3.2.1 湖泊面积-水位关系模型建立

利用鄱阳湖 2009—2013 年和 2017—2018 年共 50 期湖泊面积与各水位站日均水位数据绘制散点图。图 5 显示了湖口站、星子站、都昌站、吴城站、棠

荫站、康山站 6 个水位站湖泊面积与水位的关系。同时,本文针对这 6 个水位站分别建立了面积-水位的线性、对数、指数、二次多项式模型,各个站点模型的决定系数如表 4 所示。从表 4 中可以发现,二次多项式模型在各个站点的决定系数均大于其他模型,指数模型决定系数最低;棠荫站、吴城站、都昌站湖泊面积-水位的二次多项式模型决定系数相对较高,因此,选择棠荫站、吴城站、都昌站为代表性水位站,进一步验证模型精度。

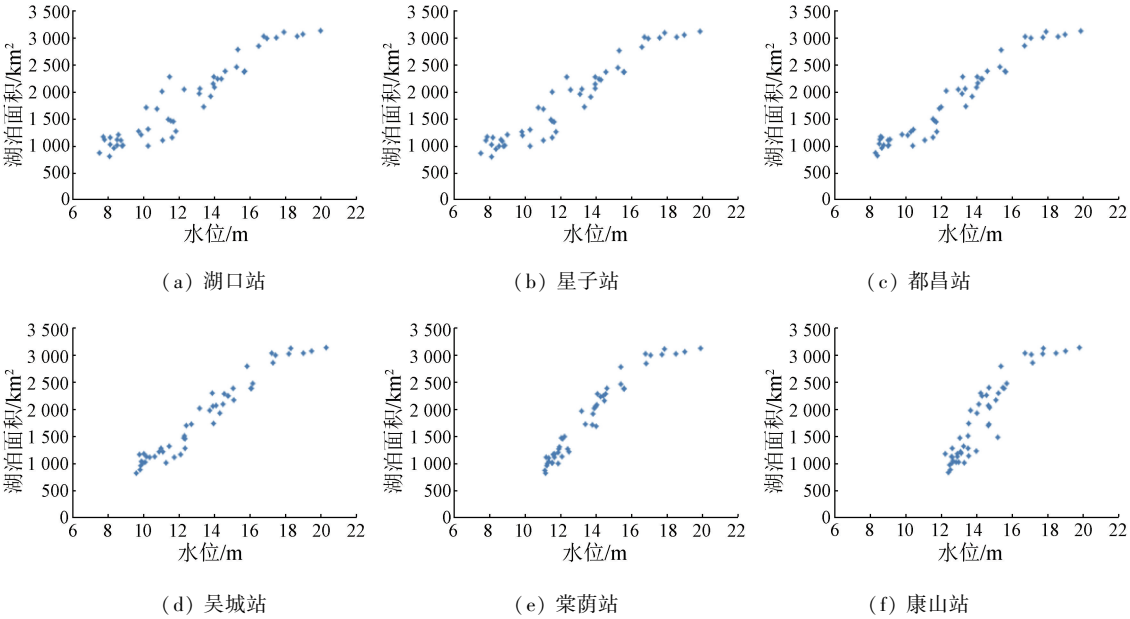


图 5 各水位站湖泊面积与水位关系散点图

Fig. 5 Scatter diagram of relationship between area and water level at each water level stations

表 4 各水位站湖泊面积-水位各模型决定系数 R^2

Tab. 4 Coefficients of determination (R^2) of the four models between lake area and water level at each water level station

模型	湖口站	星子站	都昌站	吴城站	棠荫站	康山站
线性	0.898 4	0.918 6	0.940 0	0.947 1	0.930 0	0.838 3
对数	0.874 1	0.893 2	0.921 9	0.944 7	0.952 8	0.860 8
指数	0.867 4	0.891 3	0.914 6	0.912 3	0.865 4	0.764 7
二次多项式	0.898 9	0.919 1	0.940 1	0.949 9	0.966 1	0.884 7

采用 40 个点构建二次多项式模型,随机选取

10 个点对模型做精度验证,3 个代表性水位站(棠荫站、吴城站、都昌站)模型及决定系数见表 5,误差情况如表 6 所示。

表 5 代表性水位站二次多项式模型及决定系数

Tab. 5 Quadratic polynomial model and coefficient of determination of representative water level stations

水位站	二次多项式模型	决定系数 R^2
棠荫站	$y = -23.834x^2 + 1\,008.8x - 7\,401.6$	0.956 7
吴城站	$y = -3.021x^2 + 329.68x - 2\,030.6$	0.942 3
都昌站	$y = 1.7096x^2 + 176.01 - 694.32$	0.931 6

表 6 二次多项式模型模拟湖泊面积与遥感提取面积比较

Tab. 6 Comparison between the area fitted by quadratic polynomial model and that extracted by remote sensing

影像时相	棠荫站			都昌站			吴城站		
	水位值/m	模拟面积值/km ²	误差/%	水位值/m	模拟面积值/km ²	误差/%	水位值/m	模拟面积值/km ²	误差/%
20090316	13.99	2 046.72	0.11	12.953	1 872.37	-8.42	13.87	1 960.89	-4.09
20090604	15.40	2 481.45	0.86	15.313	2 401.80	-2.38	16.12	2 498.82	1.57
20091103	11.27	940.35	-6.39	8.983	1 024.73	2.01	9.96	953.32	-5.10
20100319	14.55	2 230.72	-2.34	13.193	1 925.34	-15.71	13.85	1 955.97	-14.36
20101208	11.34	973.24	-6.14	8.493	923.85	-10.90	9.84	920.94	-11.18
20110728	14.41	2 186.12	-2.53	14.243	2 159.41	-3.72	14.74	2 172.52	-3.14

(续表)

影像时相	棠荫站			都昌站			吴城站		
	水位值/m	模拟面积 值/km ²	误差/%	水位值/m	模拟面积 值/km ²	误差/%	水位值/m	模拟面积 值/km ²	误差/%
20120620	17. 71	2 988. 85	-0. 57	17. 713	2 959. 73	-1. 54	18. 15	2 957. 91	-1. 60
20120807	19. 01	3 162. 55	3. 31	18. 983	3 262. 94	6. 59	19. 45	3 238. 82	5. 80
20170210	11. 24	926. 18	-3. 75	8. 623	950. 53	-1. 22	9. 83	918. 24	-4. 58
20180205	11. 88	1 219. 15	1. 15	10. 093	1 256. 30	4. 23	11. 07	1 248. 75	3. 61

从结果来看,棠荫站二次多项式模型拟合效果优于其他 2 个站点,误差绝对值最大为 6. 39%,最小为 0. 11%,大部分误差绝对值都在 4%以内,且其决定系数也优于其他 2 个站点模型,而其他两站点误差均较大,最大误差绝对值均超过 14%。

3. 2. 2 湖泊面积-水位关系模型分段探讨

通过对图 5 中都昌站、棠荫站、吴城站面积-水位散点图进一步分析,可发现当水位小于 17 m 时,二者大体呈线性增长关系,但当水位大于 17 m 后,随着水位持续升高,湖泊面积并没有呈现出显著的

增长趋势,大体保持不变,因此,考虑按水位值分段研究面积-水位之间的关系,设置初始分段点水位值为 17 m。

由于湖口站和星子站的湖泊面积与水位数据散点在低于 14 m 的枯水位时较离散,康山站在水位 14~16 m 范围内较离散,而都昌站、棠荫站和吴城站相对较集中,因此,本节仍只针对都昌站、棠荫站和吴城站做相关分析。以水位值 17 m 为界分为 2 部分,分别建立线性模型,并计算决定系数及标准差,并与表 4 中二次多项式模型相比较,如表 7 所示。

表 7 各水位站面积-水位二次多项式模型与分段线性模型比较

Tab. 7 Comparison between the quadratic polynomial model and piecewise linear model of water area and water level

模型	都昌站		棠荫站		吴城站	
	R^2	标准差	R^2	标准差	R^2	标准差
二次多项式模型	0. 940 1	178. 899 2	0. 966 1	134. 626 1	0. 949 9	163. 564 3
分段模型	0. 947 4	167. 615 2	0. 967 9	130. 745 5	0. 959 8	146. 403 1

由表中可以发现,在每个水位站,分段模型的决定系数 R^2 均大于二次多项式模型,而标准差均小于二次多项式模型;棠荫站面积-水位分段模型优于吴城和都昌站。

为进一步验证分段模型精度,选取棠荫站 40 个点构建分段模型,随机选取 10 个点做精度验证,设置初始分段点水位值为 17 m,分段拟合出各段的面积-水位关系模型,并通过反复试验,最终确定分段

点水位值为 16. 55 m 时,拟合效果最好,此时,该分段模型为:

$$\begin{cases} y = 370. 3x - 3\ 183. 6 & x \leqslant 16. 55\text{ m} \\ y = 56. 46x + 2\ 011. 7 & x > 16. 55\text{ m} \end{cases}, \quad (1)$$

模型 $R^2 = 0. 960\ 2$,利用该分段模型和二次多项式模型预测出的 10 个点的面积及对应误差如表 8 所示。

表 8 棠荫站遥感提取面积、分段模型拟合面积、二次多项式拟合面积之间的比较

Tab. 8 Comparison between the area atracted by remote sensing,the area fitted by piecewise models and the area fitted by quadratic polynomial

序号	影像时相	棠荫站 水位值/m	提取面积 /km ²	分段模型 拟合值/km ²	误差/%	二次多项式 拟合值/km ²	误差/%
1	20090316	13. 99	2 044. 54	1996. 90	-2. 33	2 046. 72	0. 11
2	20090604	15. 40	2 460. 28	2 519. 02	2. 39	2 481. 45	0. 86
3	20091103	11. 27	1 004. 53	989. 68	-1. 48	940. 35	-6. 39
4	20100319	14. 55	2 284. 06	2 204. 27	-3. 49	2 230. 72	-2. 34
5	20101208	11. 34	1 036. 86	1 015. 60	-2. 05	973. 24	-6. 14
6	20110728	14. 41	2 242. 89	2 152. 42	-4. 03	2 186. 12	-2. 53
7	20120620	17. 71	3 005. 89	3 011. 61	0. 19	2 988. 85	-0. 57
8	20120807	19. 01	3 061. 28	3 085. 00	0. 77	3 162. 55	3. 31
9	20170210	11. 24	962. 28	978. 57	1. 69	926. 18	-3. 75
10	20180205	11. 88	1 205. 28	1 215. 56	0. 85	1 219. 15	1. 15

从表 8 可以发现,分段模型拟合效果较好,误差绝对值最大为 4. 03%,最小为 0. 19%,误差均在 5%以内。将棠荫站分段模型与二次多项式模型的预测

面积误差进行比较可以发现,两模型预测结果相差不大,误差都在 10%以内,但分段模型预测结果误差大部分都小于二次多项式模型,且误差绝对值最

大为 4.03%,而二次多项式模型预测误差相对较大,最大的误差绝对值是 6.39%,经计算,分段模型的残差标准差 2.226 5,而二次多项式模型的残差标准差为 3.183 7,因此,总体来说分段模型更稳定,优于二次多项式关系模型。图 6 为棠荫站湖泊面积-水位关系的分段模型的模拟结果。

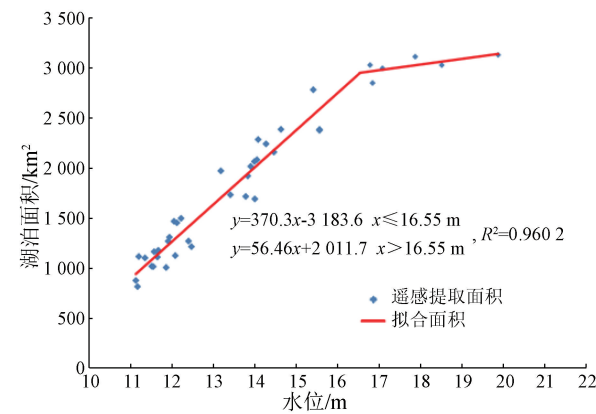


图 6 棠荫站湖泊面积-水位分段线性模型拟合
Fig. 6 Fit plot of the piecewise linear model between the lake area and water level of Tangyin station

4 结 论

本文选用 2000—2021 年 Landsat 卫星数据,针对鄱阳湖探索了该地区水体提取方法,分析了湖泊面积变化规律,结合 2009—2013 年和 2017—2018 年同期实测水位数据,构建了湖泊面积与水位的关系模型。

1)利用 AWEI 自动水提取指数对鄱阳湖水体进行提取能达到较为理想的效果。

2)鄱阳湖全年各月面积均值的总体趋势呈单峰型,面积存在明显的季节性变化,夏季湖泊面积最大,秋季开始逐渐减小,冬季湖泊面积最小。丰水季时,湖泊面积年际波动大,枯水季较平缓。

3)鄱阳湖湖泊面积-水位存在较大的相关性,分段线性模型能较好地模拟湖泊面积-水位之间的关系。经验证发现,棠荫站湖泊面积-水位分段线性模型拟合效果最优,云雨天气可见光遥感难以监测到鄱阳湖水体淹没情况时,可根据该模型对湖泊面积进行有效预测。

本文的研究可以为鄱阳湖地区防洪减灾、评估其蓄洪的能力提供科学的依据及基础性参考资料。

参考文献 (References) :

[1] Smith L C, Sheng Y, MacDonald G M, et al. Disappearing Arctic lakes. Science[J]. Science, 2005, 308(5727): 1429.
[2] 孟 恺, 石许华, 王二七, 等. 青藏高原中部色林错湖近 10 年来

湖面急剧上涨与冰川消融[J]. 科学通报, 2012, 57(7): 571-579.
Meng K, Shi X H, Wang E Q, et al. High-altitude salt lake elevation changes and glacial ablation in Central Tibet, 2000—2010 [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(7): 571-579.
[3] Benson L V, Paillet F L. The use of total lake-surface area as an indicator of climatic change: Examples from the Lahontan basin [J]. Quaternary Research, 1989, 32(3): 262-275.
[4] 张歆牧. 鄱阳湖湿地生态环境评价[D]. 武汉: 华中师范大学, 2008.
Zhang X M. Evaluation of the ecological environment of Poyang Lake wetland [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2008.
[5] 闵 蹇. 近 50 年鄱阳湖形态和水情的变化及其与围垦的关系 [J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 76-81.
Min Q. Study on the relationship between shape, water regime and innings of Poyang Lake [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 76-81.
[6] 姜鲁光. 鄱阳湖退田还湖地区洪水风险与土地利用变化研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2006.
Jiang L G. Flood risk and land use change in the wetland restoration area around Poyang Lake, China [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2006.
[7] Nie Y, Zhang Y, Ding M, et al. Lake change and its implication in the vicinity of Mt. Qomolangma (Everest), central high Himalayas, 1970—2009 [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(1): 251-265.
[8] Feng L, Hu C M, Chen X L, et al. Satellites capture the drought severity around China's largest freshwater lake [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(4): 1266-1271.
[9] Carroll M L, Townshend J R G, DiMiceli C M, et al. Shrinking lakes of the Arctic: Spatial relationships and trajectory of change [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(20): L20406.
[10] 李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等. 近 10 年来洞庭湖区水面面积变化遥感监测分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(3): 201-207.
Li J G, Li J R, Huang S F, et al. The remote sensing monitoring analysis of Chinese Dongting Lake water area variations in last 10 years using Terra/MODIS data time series [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(3): 201-207.
[11] 于 欢, 张树清, 李晓峰, 等. 基于 TM 影像的典型内陆淡水湿地水体提取研究 [J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(3): 310-315.
Yu H, Zhang S Q, Li X F, et al. Inland limnetic wetlands water body extraction using TM imagery [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(3): 310-315.
[12] 车向红. 2000—2014 年青藏高原湖泊动态遥感监测与分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
Che X H. Monitoring and analyzing of lake dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using remote sensing from 2000 to 2014 [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
[13] Sokolov M, Storie J L, Henry C J, et al. Semantically-consistent

- Landsat8 image to Sentinel-2 image translation for alpine areas[J/OL]. arXiv, 2022 (2022-12-22) [2023-02-20]. <https://arxiv.org/abs/2212.12056>.
- [14] Zhang G Q, Li J L, Zheng G X, et al. Lake-area mapping in the Tibetan Plateau: An evaluation of data and methods[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(3): 742-772.
- [15] 刘东, 李艳. 基于遥感技术的鄱阳湖面积库容估算[J]. 遥感信息, 2012, 27(2): 57-61.
- Liu D, Li Y. The calculation of area and storage of Poyang Lake based on remote sensing technology[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(2): 57-61.
- [16] 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.
- [17] Frazier P S, Page K J. Water body detection and delineation with Landsat TM data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(12): 1461-1467.
- [18] Olmanson L G, Bauer M E, Brezonik P L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(11): 4086-4097.
- [19] Fisher A, Flood N, Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 175: 167-182.
- [20] Li A M, Fan M, Qin G D. Comparative analysis of machine learning algorithms in water extraction[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2076(1): 012045.
- [21] Qin P, Cai Y L, Wang X L. Small waterbody extraction with improved U-net using Zhuhai-1 hyperspectral remote sensing images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 5502705.
- [22] 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.
- Li H, Li C A, Zhang L H, et al. Relationship between water level and water area in Poyang Lake based on MODIS image[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(2): 332-337.
- [23] 刘可群, 梁益同, 黄靖, 等. 基于卫星遥感的洞庭湖水体面积变化及影响因子分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(s2): 281-284, 336.
- Liu K Q, Liang Y T, Huang J, et al. Analysis of the variations and influencing factors of area in Dongting Lake based on remote sensing satellite[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(s2): 281-284, 336.
- [24] 张楠楠, 王文, 王胤. 鄱阳湖面积的卫星遥感估计及其与水位关系分析[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(6): 947-953.
- Zhang N N, Wang W, Wang Y. Estimate the area of the Poyang Lake using satellite remote sensing data and analyze its relationship with water level[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(6): 947-953.
- [25] 李鹏, 封志明, 姜鲁光, 等. 鄱阳湖天然湖面遥感监测及其与水位关系研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1556-1568.
- Li P, Feng Z M, Jiang L G, et al. Natural water surface of Poyang Lake monitoring based on remote sensing and the relationship with water level[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(9): 1556-1568.
- [26] 周洋, 张增信, 王言鑫. 鄱阳湖湖泊水位与面积的关系评估[J]. 科技通报, 2015, 31(11): 42-47.
- Zhou Y, Zhang Z X, Wang Y X. Discussion of relationship between water level and area of Poyang Lake[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(11): 42-47.
- [27] Feysa 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.
- [28] 朱宏富, 金锋, 李荣昉. 鄱阳湖调蓄功能与防灾综合治理研究[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- Zhu H F, Jin F, Li R F. Study on regulation and storage function and comprehensive disaster prevention and control of Poyang Lake[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.
- [29] 王大钊, 王思梦, 黄昌. Sentinel-2 和 Landsat8 影像的四种常用水体指数地表水体提取对比[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 157-165. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 03. 20.
- Wang D Z, Wang S M, Huang C. Comparison of Sentinel-2 imagery with Landsat8 imagery for surface water extraction using four common water indexes[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(3): 157-165. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 03. 20.
- [30] 寿敬文. 陆地卫星7号 ETM+图像数据缺行的修复与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- Shou J W. Research on recovering and application of the Landsat-7 ETM+ SLC-off image[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [31] 李国文, 喻中文, 陈家霖. 鄱阳湖动态水位~面积、水位~容积关系研究[J]. 江西水利科技, 2015, 41(1): 21-26, 34.
- Li G W, Yu Z W, Chen J L. Study on the relationship between dynamic level-area and level-volume of Poyang Lake[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2015, 41(1): 21-26, 34.
- [32] 曾少龙. 基于 EFDC 模型的鄱阳湖水水位与湖面面积关系分析[D]. 南昌: 江西师范大学, 2018.
- Zeng S L. Analysis of the relationship between water level and lake surface area of Poyang Lake based on EFDC model[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2018.
- [33] 蔡晓斌. 主被动遥感辅助下的鄱阳湖水位时空动态及洲滩变化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- Cai X B. The change analysis of water stage and beach wetland in Poyang Lake with the aid of multi-temporal active and passive remote sensing data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [34] 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.
- Xu H Q. A Study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index(MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.
- [35] 杜云艳, 周成虎. 水体的遥感信息自动提取方法[J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 264-269.
- Du Y Y, Zhou C H. Automatically extraction remote sensing information for water bodies[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(4): 264-269.

Monitoring of the area of Poyang Lake based on Landsat
images and its relationship with the water level

ZHAO Hui¹, CHEN Zhen², FENG Chaofan¹, ZHANG Tong¹, ZHAO Xuejing¹, ZHANG Zhaoxu^{3,4}
(1. 248 Geological Brigade of Shandong Nuclear Industry, Qingdao 266041, China; 2. Qingdao Survey and Mapping Research Institute, Qingdao, 266033, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 4. Marine Ecological Restoration and Smart Ocean Engineering Research Center of Hebei Province, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Lakes constitute a crucial part of terrestrial ecosystems. Changes in the water areas of lakes significantly influence environments and human production activities. Poyang Lake, the largest freshwater lake in China, has experienced many floods and droughts in recent years, thus necessitating its dynamic monitoring. With 175-phase Landsat images of Poyang Lake from 2000 to 2021 as the data source, this study comparatively analyzed four water body extraction methods: the normalized difference water index (NDWI), the modified normalized difference water index (MNDWI), the automated water extraction index (AWEI), and the spectrum photometric method (SPM), determining the optimal water body extraction index for Poyang Lake. Moreover, based on the 175-phase area data, this study delved into the inter-annual area variation trend from 2000 to 2021 as well as the intra-annual seasonal variations. Furthermore, it established the area – water level model by combining 50 sets of water level data from 2009 to 2013 and 2017 to 2018. The results show that: ① The AWEI model, outperforming the other three models in the extraction accuracy, was employed for the water body extraction of Poyang Lake; ② The area of Poyang Lake exhibited significant seasonal variations, large inter-annual fluctuations in the wet season, and relatively gentle inter-annual fluctuations in the dry season; ③ The area – water level piecewise linear model of the Tangyin gauging station proved optimal, which can predict the water coverage area based on real-time water level observations in Poyang Lake, compensating for the limitation of visible spectral remote sensing methods in monitoring the lake water coverage during cloudy and rainy weather.

Keywords: Poyang Lake; Landsat; water body extraction; area variation; area – water level model
(责任编辑: 陈 庆)