

## 近 45 年泸沽湖水体面积变化遥感监测

譙程駿<sup>1</sup>, 孙洁<sup>2\*</sup>

(1. 四川省林业和草原调查规划院, 四川成都 610081; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081)

**摘要** 利用 1974、1986、1993、2003、2013、2018 年陆地资源卫星 (Landsat) 遥感影像数据以及数字高程模型 (DEM), 以泸沽湖为研究区, 对比了目前常见的 7 种水体指数模型, 采用精度最高的经验型归一化差异水体指数 ENDWI 提取了泸沽湖不同时期的湖泊面积, 最后结合气象资料综合分析, 结果表明, 泸沽湖湖泊面积与年降水量变化基本一致, 呈正相关关系, 与年均气温基本呈负相关关系, 气温升高, 水体蒸发加剧, 以致在降水量恒定的情况下, 湖泊面积随气温上升而减小。泸沽湖湖泊面积变化主要受草海面积变化的影响, 近 45 年来, 湖泊面积总体趋于稳定。

**关键词** 泸沽湖; 水体指数模型; 遥感; 地理信息系统; 动态监测

中图分类号 X 832 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)07-0095-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.07.028



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

### Remote Sensing Monitoring of Water Body Area Changes in Lugu Lake in Recent 45 Years

QIAO Cheng-jun<sup>1</sup>, SUN Jie<sup>2</sup> (1. Sichuan Forestry and Grassland Inventory and Planning Institute, Chengdu, Sichuan 610081; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081)

**Abstract** Based on the Landsat numeric remote sensing image data in 1974, 1986, 1993, 2003, 2013, 2018 and DEM, Lugu Lake was taken as study area. In this paper, seven common water body index models accuracy was evaluated, then the lake area datum was extracted in different time by proper water index model of ENDWI (Empirical Normalized Difference Water Index). Finally, a comprehensive analysis was conducted on the variations of Lugu lake area by meteorological data. The result showed that the lake area of Lugu Lake was basically the same as the annual precipitation, which was positively correlated with it, and negatively correlated with the annual average temperature. As the temperature increased, water evaporation intensified, so that the lake area decreased with the temperature increased under the condition of constant precipitation. The area change of Lugu Lake was mainly affected by the change of Caohai area. Over the past 45 years, the lake area has generally stabilized.

**Key words** Lugu Lake; Water index model; Remote sensing; Geographic information system; Dynamic monitoring

湖泊作为陆地水圈的组成部分, 参与自然界的水分循环。湖泊对气候的波动变化极为敏感, 同时又是流域陆源物质的储存库, 具有较高的沉积速率, 能真实地记录湖区在较长的地质历史时期各种气候和其他环境变化的信息<sup>[1]</sup>。湖泊是重要的国土资源, 对发展经济、维持区域生态环境平衡起到重要的作用<sup>[2]</sup>。因此, 对湖泊水体的研究具有重要意义。

遥感 (remote sensing) 技术获取信息可以不受区域环境条件的限制, 可以在任何用户需要时采集地理信息, 获得的遥感卫星资料具有实时连续准确地反映大范围地表信息的特点, 地理信息系统 (geographic information system) 能够存储空间信息和属性信息, 其分析模块具有强有力的地学分析功能, 能够最大量地从已有数据中获取感兴趣的地理信息<sup>[2]</sup>。随着高空间、高时间和高光谱分辨率遥感数据的出现, 以及水体遥感定量与反演研究的深入, 利用遥感数据提取水体信息, 已成为当前水利遥感技术研究的重点<sup>[3]</sup>。以遥感丰富的数据资源为基础数据, 综合运用地理信息系统技术高效的空间数据处理功能, 可以有效地获取和分析湖泊水体变化信息。目前, 通过遥感影像提取水体信息的方法有阈值法、水体指数法、谱间关系法、图像分类法等。其中, 水体指数法可快速提取水体信息, 如 McFeeters<sup>[4]</sup> 提出了归一化差异水体指数 (NDWI); 徐涵秋<sup>[5]</sup> 提出改进型归一化差值水体指数 (MNDWI); 丁凤<sup>[6]</sup> 提出新型水体指数 NWI; 闫需等<sup>[7]</sup> 提出增

强型水体指数 EWI; 张强等<sup>[8]</sup> 提出结合坡度信息的调节水体指数 SAWI; 曹荣龙等<sup>[9]</sup> 提出修订型归一化差值水体指数 RNDWI; 聂欣然等<sup>[10]</sup> 提出经验型归一化差异水体指数 ENDWI, 针对不同的研究区水体特性, 以上水体指数模型在提取水体信息研究中, 都取得了较好的效果。

凭借独特有效的数据特征和近期开放共赢的数据管理策略, Landsat 系列卫星数据很好地满足了相关全球或区域性地学问题的研究需要, 成为人类进行长期陆表状态及其变化监测研究中最为有效的遥感数据之一<sup>[11]</sup>。笔者以泸沽湖为研究区, 采用美国陆地资源卫星 (Landsat) 系列影像数据, 在分析水体面积提取模型精度的基础上, 选择精度较高的水体指数模型对 1974—2018 年近 45 年泸沽湖表面水体面积进行提取, 最后结合气象观测数据, 综合分析了泸沽湖对气候变化的响应。

### 1 研究区概况与数据来源

**1.1 研究区概况** 泸沽湖位于云南省西北部和四川省西南部的 2 省交界处 (图 1), 是一个高原断层溶蚀陷落湖泊, 主要的断裂构造体系由 1 个西北东南向和 2 个东西向的断层共同构成, 地理坐标为 100°45'~100°51'E, 127°41'~27°45'N, 是一个天然淡水湖泊, 属金沙江水系<sup>[12]</sup>。泸沽湖由亮海和草海组成, 水位 2 690.75 m, 亮海湖长 9.4 km, 最大宽 7.3 km, 平均宽 5.2 km, 面积 48.45 km<sup>2</sup>, 最大水深 93.5 m, 平均水深 40.3 m, 蓄水量 19.53×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>; 草海长 7.5 km, 最大宽 1.5 km, 平均宽 1.0 km, 面积 7.4 km<sup>2</sup>, 夏季水深 1.5~2.0 m, 与亮海连通。冬季枯水成沼泽湿地<sup>[1]</sup>。泸沽湖地区冬季受干燥的大陆风控制, 夏季盛行湿润的印度洋季风, 干湿季分明。年均降水量 730~830 mm, 全年降水约 89% 集中在雨季。

**作者简介** 譙程駿 (1983—), 男, 四川什邡人, 助理工程师, 硕士, 从事 3S 技术在资源环境监测方面的应用研究。\* 通信作者, 工程师, 硕士, 从事地质矿产勘查方面的研究。

**收稿日期** 2019-09-29

湖泊出口位于南部湖区东岸,通过唯一出口草海湿地外泄,每年的干季湖水基本无外流<sup>[12]</sup>。泸沽湖湖水来自第四纪降

水(含冰、雪),近期由降雨(雪)和少量地表水及岩溶地下水补给<sup>[13]</sup>。

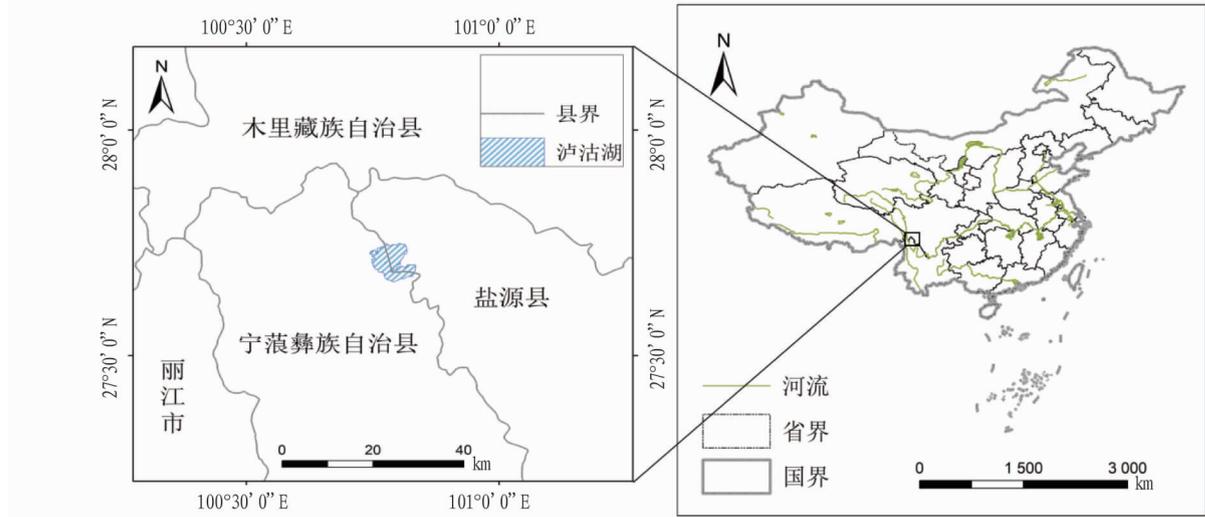


图1 研究区地理位置

Fig.1 The geographical location of the study area

**1.2 数据来源及预处理** ①遥感影像数据来自美国地质调查局(USGS)网站上下下载的1974、1986、1993、2003、2013、2018年陆地资源系列卫星(Landsat)数据,由于时间序列较长,包含MSS(multispectral scanner,多光谱传感器)、TM(thematic mapper,专题制图仪)及OLI(operational land imager)传感器接收的数据。选择研究区冬季无云、无条带的影像数据(表1),并对遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正等一系列预处理;②研究区数字高程模型(digital elevation mode, DEM)为30 m分辨率的ASTER GDEM V2数据,下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);③距离研究区最近的国家气象台站盐源、木里、宁蒗以及香格里拉4个台站的年平均降水量、年平均气温,数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

表1 Landsat 遥感影像数据

Table 1 Landsat image datasets

传感器 Sensor	成像时间 Imaging time	轨道号 Track No.
MSS	1974-01-04	141041
TM	1986-12-20	131041
TM	1993-12-23	131041
TM	2003-12-03	131041
OLI	2013-12-30	131041
OLI	2018-12-28	131041

### 1.3 研究方法

**1.3.1 水体面积提取模型。**卫星遥感影像记载了地表物体对电磁波的反射信息及其自身向外的辐射信息。相对于其他地物而言,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<sup>[6]</sup>,水体指数法的实质就是把地物的最弱反射波段和最强反射波段分别作为分子和分母,先进行比值运算,拉大两者差距,再对比值进行归一化处理,从而抑制背景信息,突出研究地物<sup>[10]</sup>。采用前人研究的水体指数法

提取泸沽湖水体面积,水体指数模型见表2。

模型中,Green为绿光波段,对应TM影像数据的第2波段和OLI影像数据的第3波段;Red为红光波段,对应TM影像数据的第3波段和OLI影像数据的第4波段;NIR为近红外波段,对应TM影像数据的第4波段和OLI影像数据的第5波段;MIR为中红外波段,对应TM影像数据的第5波段和OLI影像数据的第6波段;模型SAWI中,slope是DEM生成的坡度数据,min是研究区内最小坡度,max是研究区内最大坡度。利用2018年12月陆地资源卫星OLI传感器影像数据,分别采用上述模型提取泸沽湖水体信息,结果见图2。

表2 水体指数模型

Table 2 Model of the water index

指数名称 Index name	模型公式 Model formula	参考文献 Reference
NDWI	$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	[4]
MNDWI	$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$	[5]
EWI	$EWI = \frac{Green - NIR - MIR}{Green + NIR + MIR}$	[7]
SAWI	$SAWI = \frac{Green - slope * \times MIR}{Green + slope * \times MIR}$ $slope * = \frac{slope - min}{max - min} + 1$	[8]
RNDWI	$RNDWI = \frac{MIR - Red}{MIR + Red}$	[9]
NWI	$NWI = \frac{Band_1 - (Band_4 + Band_5 + Band_7)}{Band_1 + (Band_4 + Band_5 + Band_7)} \times C$	[6]
ENDWI	$ENDWI = \frac{Green - MIR}{Green + NIR}$	[10]

**1.3.2 模型精度分析。**采用水体指数模型进行水体信息提取的陆地资源卫星影像数据空间分辨率为30 m,采用同时相OLI影像数据的全色波段(空间分辨率为15 m)作为参考数

据,在泸沽湖主体水域选取测试样本,计算分类混淆矩阵进行精度分析,结果见表 3。

综合分析图 2 和表 3,就研究区而言,各水体模型对水体的提取结果精度均较高,但还是存在细微差异。NDWI 存在部分水体误提情况;MNDWI、NWI、RNDWI 有部分山体

阴影误提情况;SAWI 和 EWI 虽然消除了部分山体阴影的影响,但存在水体漏提情况。相对其他模型,ENDWI 虽然也存在一部分非水体像元误提,但数量很少,且精度最高,因此采用 ENDWI 水体指数模型快速提取各时段研究区湖泊面积。

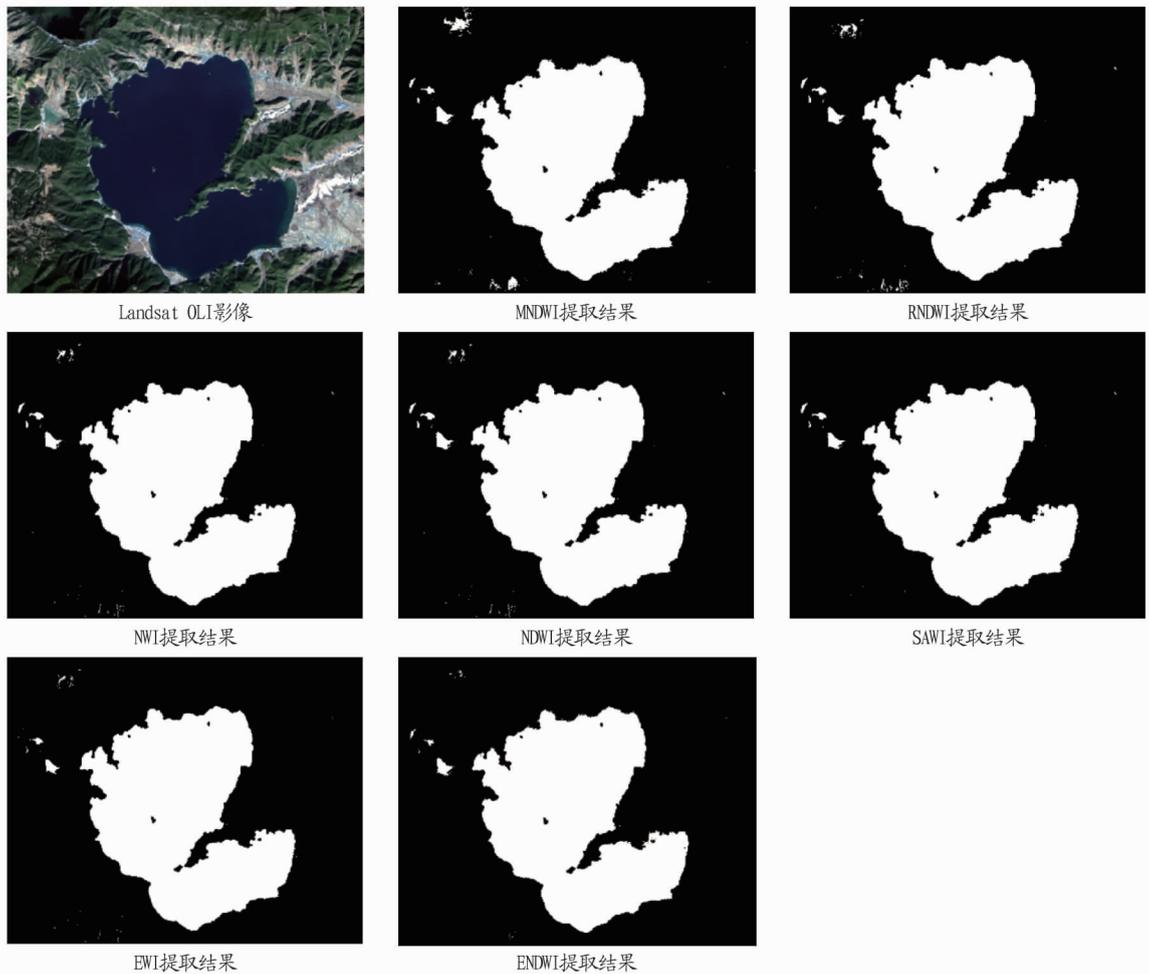


图 2 水体指数模型提取湖泊面积结果

Fig. 2 Lake area extraction result by water index model

表 3 水体指数模型精度

Table 3 Accuracy of water index model

水体指数模型 Water index model	总体精度 Overall accuracy//%	Kappa 系数 Kappa coefficient
MNDWI	90.76	0.87
RNDWI	92.46	0.88
NWI	92.77	0.89
NDWI	93.68	0.89
SAWI	94.69	0.91
EWI	94.86	0.91
ENDWI	95.95	0.92

## 2 结果与分析

**2.1 湖泊面积变化** 早期的陆地资源卫星采用的是多光谱传感器((landsat multispectral scanner, MSS),仅有 4 个波段。针对 MSS 影像数据,采用前人提出的方法提取水体信息<sup>[14]</sup>。1974—2018 年所选时段内,泸沽湖湖泊面积提取结果见图 3,湖泊面积变化见图 4。选取的遥感影像数据均为冬季成像数

据,此时为泸沽湖的枯水期,除 1986 年 12 月和 1993 年 12 月外,湖水面积基本上为泸沽湖亮海面积。从图 3 可以看出,泸沽湖冬季面积较大的情况,主要是因为湖水没有完全通过草海湿地外泄,多出的面积为草海水体面积。

**2.2 气候变化** 湖水水体面积变化同气候变化密切相关,利用克里金算法对周围气象站的气温和降水数据进行插值分析,逐年插值得到泸沽湖地区 1970—2018 年的气温和降水数据。图 5 和图 6 分别为插值得到的 1970—2018 年研究区年平均气温和年降水量。从图 5、图 6 可以看出,近 50 年,年降水量有减小趋势,但不显著,而气温升高了 1℃左右,增幅较显著。

**2.3 湖泊面积对气候变化的响应** 图 7、图 8 为泸沽湖水体面积与年平均气温及年降水量的关系。由于 1973 年 12 月 MSS 遥感影像数据不能满足要求,因此使用的是 1974 年 1 月影像数据提取水体面积,年均气温和年降水量采用 1973 年数据,其余年份气象数据与遥感影像数据获取年份一一对

应。从图 7 和图 8 可以看出,湖泊面积与当年的年降水量变化基本一致,呈正相关关系,年降水量越多,湖泊面积越大,湖泊面积与年均气温基本呈负相关关系,气温升高会加剧水体蒸发,以致在降水量恒定的情况下,水体面积随气温上升

而减小。近 45 年来,泸沽湖湖泊面积虽然每年都有变化,但变化不大,主要是草海面积的变化影响了湖泊整体面积的变化,湖泊面积总体稳定。

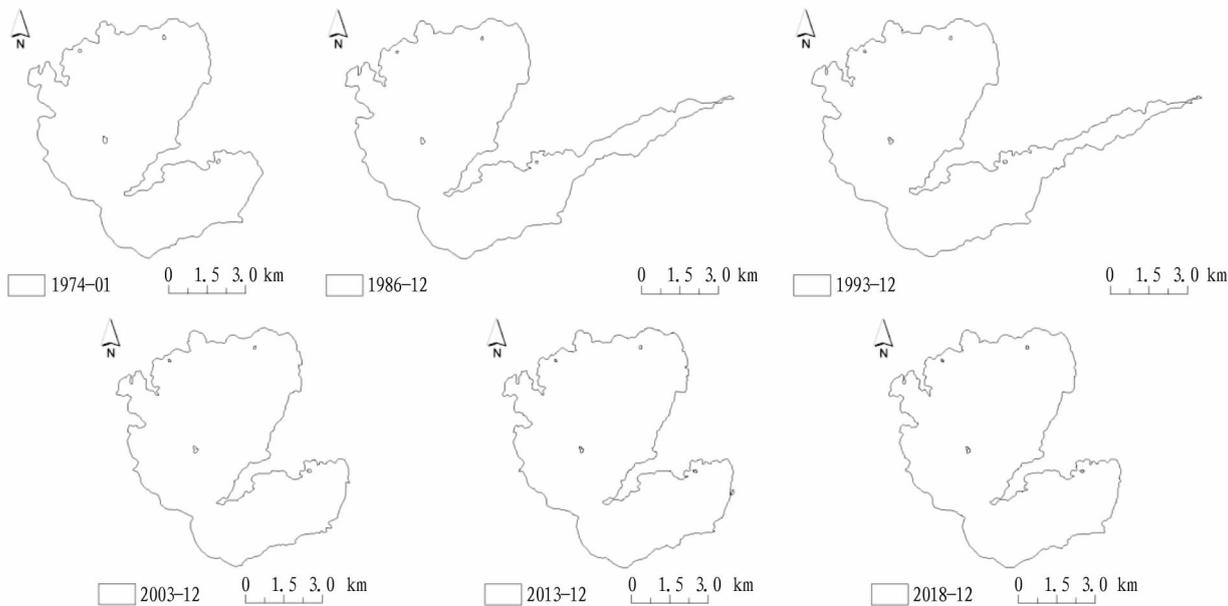


图 3 不同时期湖泊面积提取结果

Fig. 3 Lake area extraction result in different times

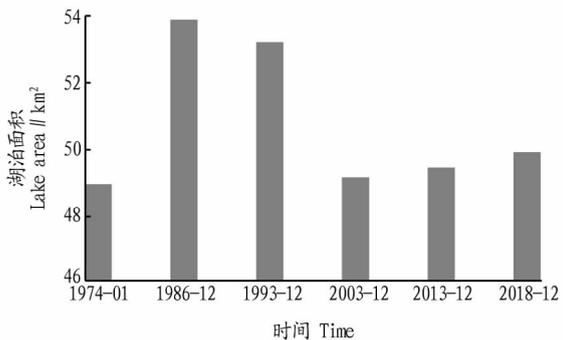


图 4 不同时期湖泊面积

Fig. 4 Lake area in different times

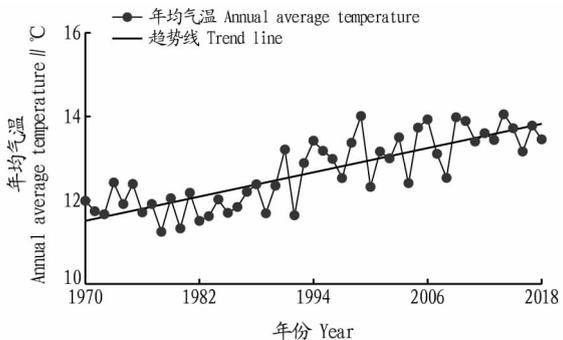


图 5 1970—2018 年年均气温变化

Fig. 5 Variations of annual average temperature during 1970—2018

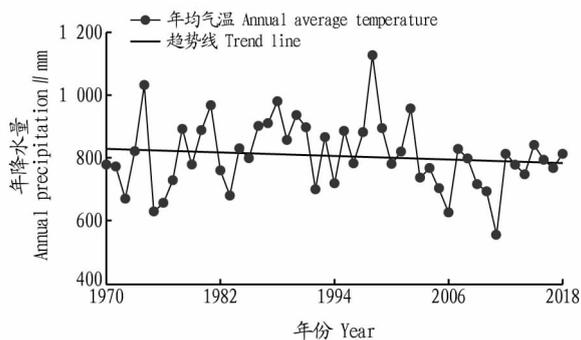


图 6 1970—2018 年降水量变化

Fig. 6 Variations of annual precipitation during 1970—2018

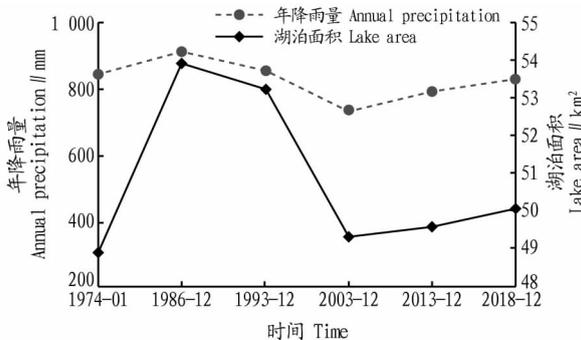


图 7 年降水量与湖泊面积变化

Fig. 7 Variations of annual precipitation and lake area

### 3 结论

该研究基于遥感和地理信息系统技术,以陆地资源卫星影像为基础数据,将目前常见的多种水体指数模型应用于研

究区湖泊面积提取,并通过分析模型精度,选取相对最优的水体指数模型快速提取泸沽湖湖泊面积,监测了 1974—2018 年近 45 年泸沽湖湖泊面积变化情况。利用研究区周边气象台站的气象资料,采用数值插值方法得到研究区气象数据,

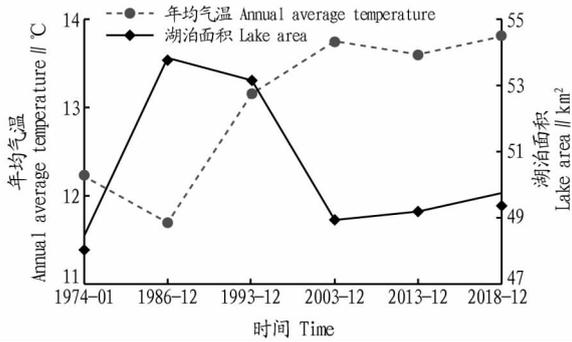


图 8 年均气温与湖泊面积变化

Fig. 8 Variations of annual average temperature and lake area

通过泸沽湖湖泊面积变化与气温、降水量变化相关分析发现,湖泊面积变化与年降水量变化呈正相关性,与年平均气温变化呈负相关性。泸沽湖面积主要是草海面积的变化影响了湖泊整体面积的变化,近 45 年来,湖泊面积总体稳定。该研究虽然从较长的时间尺度上监测了研究区湖泊面积变化,但由于遥感影像数据空间分辨率的局限性,在湖泊面积的提取精度上,会产生一定误差。因此,可综合运用多源遥感数据,特别是高分辨遥感数据,同时加入专家知识等其他辅助手段,能进获得更好的效果。

(上接第 94 页)

## 参考文献

- [1] 李军,韩晓日,魏凤兰. 畜禽养殖业污染防治技术的研究进展[C]//节能环保 和谐发展——2007 中国科协年会论文集(三). 北京:中国科学技术协会声像中心,2007:1-5.
- [2] 李盟军,林科峰,姚建武,等. 典型规模化猪场地下水环境质量现状分析[J]. 广东农业科学,2015(15):122-126.
- [3] 刘青付. 三明市畜禽养殖场周边土壤重金属污染调查及评价研究[J]. 海峡科学,2016(6):38-41.
- [4] 栗萍,程瑞,李玉玲,等. 河北省邯郸市畜禽养殖场周边土壤重金属含量调查及污染评价[J]. 中国猪业,2016(1):67-70.
- [5] 陈欣. 畜禽粪便中粪大肠菌群对蔬菜污染的研究[D]. 南京:南京师范大学,2007.
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2010-02-11) [2019-01-05]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qt-tjgb/qgqqtjgb/2001002/t20100211\\_30641.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qt-tjgb/qgqqtjgb/2001002/t20100211_30641.html).
- [7] 吕红. 我国畜禽养殖污染的现状与治理措施[J]. 当代畜禽养殖业,2015(11):51,31.
- [8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8):975-1001.
- [9] GUO W H, LIU X B, LIU Z G, et al. Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin[J]. Procedia environmental science, 2010, 2:729-736.
- [10] FU C, GUO J S, PAN J, et al. Potential ecological risk assessment of heavy

## 参考文献

- [1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 于雪英, 江南. 基于 RS, GIS 技术的湖面变化信息提取与分析: 以艾比湖为例[J]. 湖泊科学, 2003, 15(1): 81-84.
- [3] 李艳华, 丁建丽, 闫人华. 基于国产 GF-1 遥感影像的山区细小水体提取方法研究[J]. 资源科学, 2015, 37(2): 408-416.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 丁凤. 一种基于遥感数据快速提取水体信息的新方法[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 167-171.
- [7] 闫需, 张友静, 张元. 利用增强型水体指数 (EWI) 和 GIS 去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息, 2007, 22(6): 62-67.
- [8] 张强, 吴波, 杨艳魁. 一种结合坡度信息调节的水体指数[J]. 遥感信息, 2018, 33(4): 98-107.
- [9] 曹荣龙, 李存军, 刘良云, 等. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测[J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 158-160.
- [10] 葛欣然, 刘荣, 聂爱球, 等. 近 30 年南昌城区湖泊面积变化图谱和动态监测[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(8): 117-122.
- [11] 姜高珍, 韩冰, 高应波, 等. Landsat 系列卫星对地观测 40 年回顾及 LD-CM 前瞻[J]. 遥感学报, 2013, 17(5): 1033-1048.
- [12] 文新宇, 张虎才, 常凤琴, 等. 泸沽湖水体垂直断面季节性分层[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 858-869.
- [13] 林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 云南宁蒗泸沽湖区岩溶洞穴特征及泸沽湖成因初探[J]. 中国岩溶, 2000, 19(3): 232-238.
- [14] 刘建国. 陆地卫星 MSS 图像地表水域信息的机助识别提取[J]. 环境遥感, 1989, 4(1): 19-28.

metal pollution in sediments of the Yangtze River within the Wanzhou Section, China[J]. Biological trace element research, 2009, 129(1/2/3): 270-277.

- [11] 唐磊, 张会昌, 季宏兵, 等. 北京市平谷应急水源地周边农业土壤中的重金属分布及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1897-1904.
- [12] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 117-122.
- [13] CHEN M, MA L Q, HOOGEWEG C G, et al. Arsenic background concentrations in Florida, U. S. A. surface soils: Determination and interpretation [J]. Environmental forensics, 2001, 2(2): 117-126.
- [14] GOUGH L P, SEVERSON R C, JACKSON L L. Baseline element concentration in soils and plants, Bull Island, Cape Romain, National Wildlife Refuge, South Carolina, U. S. A. [J]. Water, air and soil pollution, 1994, 74(1/2): 1-17.
- [15] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLE L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental pollution, 2001, 114(3): 313-324.
- [16] BLASER P, ZIMMERMANN S, LUSTER J, et al. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils [J]. The science of the total environment, 2000, 249(1/2/3): 257-280.
- [17] 黄治平. 规模化猪场区域农田土壤重金属污染研究: 以京安猪场为例 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.