近 30 a 云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析^{*}

肖茜^{1,3}, 杨昆^{2,3**}, 洪亮^{1,3}

(1: 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

(2: 云南师范大学信息学院, 昆明 650500)

(3: 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 昆明 650500)

摘要: 以云贵高原湖泊近 30 a 来的 TM、ETM⁺ 和 OLI 遥感影像为数据源, 采用归一化水体指数 (NDWI)、改进归一化水体指数 (MNDWI)、新型水体指数 (NWI)、增强型水体指数 (EWI) 和自动水体提取指数 5 种水体指数提取了 1985—2015 年云贵高原 10 个湖泊表面水体面积, 并对各种算法进行精度对比分析. 针对湖泊各自特点采用不同的水体指数提取其表面水体面积, 并进行水体面积变化时空分析. 结果表明: 云贵高原湖泊表面水体面积总体呈现先增加后缩减趋势, 1985—1995 年湖泊表面水体面积增加了 30.86 km², 1995—2015 年湖泊水体表面面积减少了 48.12 km², 其中, 面积变化最大的是杞麓湖与异龙湖. 对云贵高原湖泊表面水体面积变化与该区域的年降水量、蒸发量、平均气温、流域植被覆盖面积和人类活动时空进行相关分析, 结果表明: 1) 高原湖泊对区域气候变化的响应具有明显的空间差异性, 云贵高原湖泊的表面水体面积与气候相关性较显著, 气温升高引起蒸发加速, 降水量下降, 湖面不断缩小, 与逐年上升的气温呈负相关, 与逐年波动上升的蒸发量呈负相关, 与逐年减少的降水量呈正相关; 2) 云贵高原湖泊各流域的植被覆盖面积与湖泊面积变化相关性较弱; 3) 人类活动是影响湖泊面积变化的重要因素, 大肆围湖造田、围湖养殖以及旅游开发等人类活动直接导致云贵高原湖泊面积的锐减, 并对湖泊生态环境产生重要影响.

关键词: 归一化水体指数; 改进归一化水体指数; 新型水体指数; 增强型水体指数; 自动水体提取指数; 高原湖泊; 遥感监测; 降水量; 水体面积

Remote sensing monitoring and temporal-spatial analysis of surface water body area changes of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau over the past 30 years

XIAO Qian^{1,3}, YANG Kun^{2,3**} & HONG Liang^{1,3}

(1: School of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, P.R.China)

(2: School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, P.R.China)

(3: GIS Technology Research Center of Resource and Environment in Western China of Ministry of Education, Kunming 650500, P.R.China)

Abstract: The data on the surface areas of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau over the past 30 years (1985–2015) are extracted from the TM and ETM⁺ and OLI remote sensing images in this paper. Using five water indexes including Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Enhanced Water Index (EWI), New Water Index (NWI) and Automated Water Extraction Index (AWEI), we evaluate the accuracy of the above 5 indexes and analyzed the area variations of surface water body with proper water index based on lake's individual characteristics. The results show that the total surface water body areas are increased by 30.86 km² from 1985 to 1995, then reduced by 48.12 km² from 1995 to 2015. The Lakes Qilu and Yilong have the greatest area changes among the investigated 10 lakes. The correlation analysis between the area change of each lake and annual average precipitation, annual average evaporation, annual average temperature, vegetation-covered area, human activities of each catchment shows that: the lakes have a spatial heterogeneity response to regional climate change. The surface

^{*} 国家自然科学基金项目 (41661082, 41201463, 41461038, 41561086, 41371514, 41262013) 和江苏省资源环境信息工程重点实验室开放基金项目 (JS201301) 联合资助. 2017-03-10 收稿; 2017-08-28 收修改稿. 肖茜 (1992 ~), 女, 硕士研究生; E-mail: 490360074@qq.com.

^{**} 通信作者; E-mail: kmdcynu@163.com.

area changes of these lakes are negatively related to the local temperatures and evaporations, while positively related to the local precipitations. There is a weak correlation between the surface water body areas and vegetation-covered area. Human activities could be one of the important causes of the area shrinking of surface water bodies on the Yunnan-Guizhou Plateau.

Keywords: NDWI; MNDWI; EWI; NWI; AWEI; plateau lakes; remote sensing monitoring; precipitation; water body area

水是大自然赋予人类最宝贵的财富,是生命的源泉,是人类赖以生存和发展不可缺少的最重要的物质资源之一^[1]. 湖泊,是指陆地上的盆地或者洼地积水形成的水体,其具有一定水域面积且换水较缓慢^[2]. 联合国政府间气候变化专门委员会(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告中也明确指出,湖泊是陆表水的重要组成部分,水循环对于生活在陆地上的生命势必不可少^[3]. 云贵高原湖泊是影响该区域生态环境的关键因子之一,同时在社会经济发展过程中也占据重要的战略地位,研究近 30 a 云贵高原湖泊的表面水体面积变化及其影响湖泊面积变化因子具有重要的科学意义.

遥感技术具有范围广、速度快、周期短、受限条件少和信息量大等优点,广泛应用于陆表生态环境关键要素提取和动态监测、测绘制图、城市管理、灾害监测与管理、精细农业等领域. 近 20 a 来,国内外学者提出了各种水体指数自动提取表面水体面积^[4-6],如:McFeeters^[7]提出了归一化差值水体指数(NDWI);徐涵秋^[8]提出改进型归一化差值水体指数(MNDWI),并应用 MNDWI 提取了福州市水体,取得了良好实验效果;周杨等^[9]采用缨帽变换、归一化差值水体指数(NDWI)和增强型水体指数(EWI)3 种方法提取了大理州洱海水域面积并进行精度分析,结果表明 NDWI 方法的提取精度最好. 近几年来,分析湖泊变化与气候的响应成为国内外学者研究的热点,常学礼等^[10]利用 TM/ETM⁺影像提取了科尔沁沙地湖泊的水体,并对其变化对气候变化的响应做了相关分析,结果表明该地区湖泊消长主要受降水量的影响;董斯扬等^[11]同样利用 Landsat 影像数据提取了近 40 a 青藏高原的湖泊面积,结果发现近年来青藏高原湖泊面积总体呈扩大趋势,2000—2010 年期间该区域湖泊扩张最显著,与该时期青藏高原气温升高、大部分地区降水量增加相关. 此外还有许多国内外学者开展湖泊表面水体面积的时空变化分析相关研究^[12-15]. 综上所述,近年来虽然国内外学者提出了各种水体提取指数,但由于湖泊水质、地形等自身条件差异,没有一种水体指数合适提取所有表面水体面积;且不同的区域,影响湖泊面积变化的因子也各不相同.

纵观已有湖泊动态变化研究,大多是对青藏高原的湖泊研究,或者云贵高原上单个湖泊的水质研究,对云贵高原上主要的高原湖泊的面积变化研究较少,长时间序列的研究更少. 因此,本文以云贵高原作为研究区,在分析各种水体指数提取精度的基础上,选择精度较高的水体指数对 1985—2015 年近 30 a 云贵高原主要湖泊表面水体进行遥感提取,分析近 30 a 来云贵高原湖泊的表面水体面积时空变化. 最后全面系统地分析了云贵高原湖泊面积变化的影响因素(如气温、降水、蒸发量、土地利用变化和人类活动),重点研究了云贵高原区域内陆水域对区域气候变化的响应以及人类活动的影响. 为高原湖泊生态环境的科学治理提供数据参考和决策支持.

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

云贵高原位于我国西南部,是中国四大高原之一,地处青藏高原东侧的中低纬度过渡带,地势西北高,东南低,属亚热带季风气候,气候差别显著. 云贵高原是中国西南边疆的主体部分,也是中国通向东南亚/南亚的必经之地. 云贵高原的主要湖泊包括位于云南省的滇池、程海、泸沽湖、抚仙湖、杞麓湖、异龙湖、星云湖、阳宗海和洱海,位于贵州省的威宁草海. 10 个湖泊位于不同的地理区位(图 1),分布在中海拔区域、高海拔区域、城市周围及山林中. 且所选 10 个湖泊均属于大型自然湖泊,对区域气候环境较为敏感.

1.2 数据源

本文采用的遥感数据是从美国地质调查局(USGS)网站上下载的实验区 1985、1990、1995、2000、2005、2010 和 2015 年的 Landsat 系列卫星数据,选择实验区无云、且没有条带质量较好的影像数据. 云贵高原湖泊的表面水体面积变化具有较强的季节性,相关研究表明内陆湖泊在每年的 9 月至次年 2 月间水体表面的面积保持相对稳定,湖泊最大面积变化率不超过 2%^[16]. 所以本文选择近 30 a 实验区的遥感数据均为当年 9

月至次年 2 月,每年该时期内每月选取一期影像,具体如表 1 所示. 采用遥感软件 ENVI 5.3 对遥感影像进行几何校正、辐射定标、大气校正和镶嵌等一系列预处理.

从中国气象数据网获取 1985—2015 年云贵高原 12 个测站点的年平均降水量、气温及蒸发数据对湖泊表面水体面积变化进行分析.

图 1 研究区地理位置

Fig.1 The geographical location of study area

表 1 Landsat TM, ETM⁺和 OLI 遥感影像数据

Tab.1 The remote sensing image datasets of Landsat TM, ETM⁺ and OLI

轨道号	时相						
	1985 年 MSS	1990 年 TM	1995 年 TM	2000 年 ETM ⁺	2005 年 TM	2010 年 TM	2015 年 OLI
129041	1985-11	1990-10	1995-12	2000-11	2005-09	2010-12	2015-11
129042	1985-11	1990-10	1995-01	2000-01	2005-11	2010-12	2015-10
129043	1985-11	1990-01	1995-01	2001-01	2005-02	2010-12	2015-10
129044	1985-01	1990-09	1995-10	2000-11	2005-12	2010-11	2015-10
130041	1985-12	1990-10	1995-01	2000-12	2005-01	2010-10	2015-10
131041	1985-10	1990-01	1995-01	2000-11	2005-11	2010-12	2015-10
131042	1985-10	1990-12	1995-12	2000-10	2005-11	2010-12	2015-11

2 研究方法

2.1 方法选取

近 10 a 来,国内外学者开展大量基于遥感的表面水体自动提取算法研究,目前常见的表面水体提取算法包括单波段阈值、多波段谱间关系和水体指数等. 本文将采用水体指数法提取云贵高原湖泊表面水体面积,目前常用的 5 种水体指数提取算法如表 2 所示.

表 2 主要水体提取指数
Tab.2 Five main water extraction indexes

水体指数	算法优缺点	参考文献
$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	提取较精确,水体边界清晰,对于部分湖泊有部分误提现象	[7]
$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$	部分水体漏提,且存在大量山体阴影误提现象	[8]
$EWI = \frac{Green - NIR - MIR}{Green + NIR + MIR}$	能区分山体阴影,对于部分湖泊水体漏提现象严重	[17]
$NWI = \frac{Blue - (NIR + MIR + SWIR)}{Blue + (NIR + MIR + SWIR)} C$	水体部分提取清晰,但无法区分水体和山体阴影	[18]
$AWEIsh = Blue + 2.5Green - 1.5(NIR + MIR) - 0.25SWIR$	提取效果较好,对少部分湖泊周围阴影有误提现象	[19]

2.2 5 种水体指数算法的表面水体提取精度对比分析

本文分别采用 5 种水体指数提取 2015 年云贵高原湖泊表面水体面积,再利用该区域 2015 年 Google Earth 上的 GeoEye-1 高分辨率遥感影像,在每个湖泊实验区随机选取 80~100 个测试样本,计算分类混淆矩阵进行精度分析,具体结果如表 3 所示.

通过分析基于 5 种水体指数的云贵高原十大湖泊表面水体提取精度和各个湖泊自身相关因素,选择云贵高原各个湖泊表面水体提取精度最高的水体指数,滇池、泸沽湖采用 *AWEIsh* 水体指数法,抚仙湖、星云湖、杞麓湖和威宁草海采用 *NDWI* 水体指数法,阳宗海和程海采用 *EWI* 水体指数法,异龙湖和洱海采用 *NWI* 水体指数法.

表 3 5 种水体指数提取精度分析
Tab.3 The water extraction accuracy analyses of five water extraction indexes

湖泊	<i>NDWI</i>		<i>MNDWI</i>		<i>EWI</i>		<i>NWI</i>		<i>AWEIsh</i>	
	总体精度/%	Kappa 系数	总体精度/%	Kappa 系数	总体精度/%	Kappa 系数	总体精度/%	Kappa 系数	总体精度/%	Kappa 系数
滇池	93.05	0.89	92.77	0.89	89.21	0.87	88.35	0.87	96.71	0.93
抚仙湖	96.33	0.93	93.54	0.90	93.74	0.89	89.84	0.87	95.58	0.92
星云湖	93.63	0.89	85.37	0.83	91.56	0.88	87.62	0.85	92.54	0.88
阳宗海	89.88	0.87	86.72	0.84	96.37	0.93	86.52	0.84	93.78	0.90
杞麓湖	93.27	0.89	87.53	0.85	92.98	0.88	85.17	0.82	89.37	0.87
异龙湖	91.23	0.88	89.76	0.87	90.78	0.88	93.84	0.90	90.05	0.87
洱海	87.69	0.85	85.36	0.82	90.58	0.87	92.55	0.88	91.85	0.88
程海	85.02	0.82	86.98	0.84	92.66	0.88	92.07	0.88	90.84	0.87
泸沽湖	92.79	0.88	90.62	0.87	88.74	0.86	89.36	0.86	94.57	0.91
威宁草海	94.17	0.90	87.32	0.84	89.74	0.87	85.76	0.83	90.48	0.87

2.3 云贵高原湖泊流域土地利用分类算法

目前遥感影像土地利用分类算法主要包括:K-menas 和迭代自组织的数据分析算法 ISODATA 等非监督分类算法;盒式分类器、最小距离法和极大似然分类器等监督分类算法;以及多层感知器、概率神经网络、关系向量机、随机森林、条件随机场、马尔可夫随机场、深度学习、稀疏表达和支持向量机等智能化分类算法.支持向量机(Support Vector Machines, SVM)是一种基于统计学习理论的机器学习算法,其核心思想是把样本通过非线性映射投影到高维特征空间,以结构风险最小化原理(Structural Risk Minimization ,SRM)为原则,在高维特征空间中构造 VC 维(Vapnik-Chervonenkis Dimension)尽可能低的最优分类超平面作为分类面,使分类风险上界最小化,从而使分类器具有对未知样本最优的平均分类精度.近年来,SVM 已广泛应用于遥感影像的监督分类.本文利用 ENVI 软件的支持向量机分类模块对近 30 a 来云贵高原各流域土地利用分类,土地利用类型为水体、植被、耕地、裸地和建筑用地五类.

3 结果与分析

3.1 1985—2015 年云贵高原湖泊表面水体面积变化分析

1985—2015 年云贵高原湖泊表面水体总面积变化如图 2 所示,云贵高原湖泊表面面积总体呈先增大后减小的趋势.1985—1995 年云贵高原湖泊表面水体总面积呈增大趋势,总面积增大了 30.856 km²;1995 年云贵高原湖泊表面水体总面积达到近 30 a 的最大值,总面积高达 1045.017 km²;1995—2015 年期间云贵高原湖泊表面水体总面积大幅度缩小,这 20 a 间总面积减少了 48.12 km².

云贵高原主要湖泊 1985—2015 年湖泊表面水体面积变化见表 4、图 3 和图 4.从地理区位差异分析,位于高海拔的滇西北地区的湖泊,如程海和泸沽湖,其面积变化较小;而位于海拔稍低的滇中、滇东南地区的杞麓湖和异龙湖等面积变化较大.从湖泊水体深度差异分析,威宁草海、异龙湖、杞麓湖和星云湖等水体较浅的湖泊水面面积变化较大,抚仙湖、洱海和程海等水体较深的湖泊,面积变化较小,趋于稳定状态.

图 2 1985—2015 年云贵高原湖泊表面水体面积统计

Fig.2 The statistical results of surface water body areas of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau from 1985 to 2015

表 4 1985—2015 年云贵高原湖泊表面水体面积变化(km²)

Tab.4 The surface water body area changes of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau from 1985 to 2015							
湖泊	1985 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
滇池	286.776	293.339	297.760	298.026	296.678	296.350	297.570
抚仙湖	213.579	213.413	214.488	213.847	215.073	214.262	212.927
星云湖	32.985	34.303	34.318	34.787	34.308	33.404	32.202
阳宗海	29.628	29.767	30.55	30.433	30.193	29.757	29.061
杞麓湖	36.288	36.006	37.019	36.835	35.818	30.644	22.408
异龙湖	35.931	28.777	34.041	27.696	27.964	24.483	12.840
洱海	236.601	244.175	246.27	239.651	241.50	242.264	241.744
程海	73.646	74.476	74.167	74.720	74.197	73.196	73.085
泸沽湖	51.590	49.696	50.837	49.329	49.509	49.402	49.498
威宁草海	17.421	18.290	25.897	25.610	22.636	20.028	22.487

图 3 1985、1995 和 2015 年云贵高原湖泊表面水体面积变化

Fig.3 The surface water area changes of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau in 1985, 1995 and 2015

图 4 1985、1995 和 2015 年云贵高原湖泊表面水体总面积统计

Fig.4 The statistical of surface water body areas of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau in 1985, 1995 and 2015

3.2 云贵高原湖泊表面水体面积变化对气候的响应分析

目前,全球气候变暖日益显著,而全球气候变化必会导致全球降水量分布的变化,大量研究表明全球气候变暖加速了水循环,在过去 100 a,全球降水总量呈增加趋势,但部分地区呈减少趋势. IPCC 第 3 次评估报告显示,自 20 世纪以来全球气温呈上升趋势,升高约 0.6°C 左右,这也导致降水量的分布发生了变化,北半球亚热带陆地地区 ($10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$) 每 10 年减少约 0.3%,而大部分中高纬度地区降水量每 10 年增加 0.5%~1.0%^[20]. 我国地处北半球副热带和中纬度地区,在全球气候变暖的背景下,我国的气候也明显受到了影响. 过去 100 a,中国平均气温上升了 $0.4\sim 0.5^{\circ}\text{C}$,丁一汇等^[21]研究表明,我国西北地区的气候变化与全球气候变化基本一致,气温升高,降雨量增加. 陈隆勋等^[22]对近 40~50 a 的中国降水量研究指出,全国平均年降水量呈减少趋势,但西部降水量增长趋势明显,西北部增长最为明显,而西南一些地区有减少趋势. 20 世纪以来,虽然全球降雨总量增加,但我国西南地区降水减少,这与云贵高原 1995 年后高原湖泊水体总面积减少具有一致性.

湖泊表面水体面积对气候变化较为敏感,尤其是内陆湖泊,分析湖泊表面水体面积变化与气候变化的相关性,是探究湖泊表面水体面积变化的良好指标. 该研究中气候影响因子主要为降水量、蒸发量和气温,统计 1985—2015 年云贵高原上 12 个靠近研究区域的测站点的年平均降水量、年均蒸发量和平均气温作为研究区降水和气温的指标,分析云贵高原湖泊面积变化与降水、蒸发和气温的时空相关性. 研究区的平均降雨量、平均蒸发量和平均气温,由研究区湖泊周围的气象站点的数据取其平均值获得.

3.2.1 湖泊表面水体面积对年均气温的响应 1985—2015 年云贵高原年均气温变化如图 5 所示,近 30 a 来,云贵高原地区整体呈波动上升的趋势,趋势线方程斜率大于 0,说明气温逐年上升,1997—1999 和 2009—2011 年温度增加幅度最大. 相关研究发现^[25-26]云贵高原湖泊与年平均气温呈显著相关,气温升高引起蒸发加速,湖泊表面水体面积不断缩小,与逐年上升的气温呈负相关. 1992 年云贵高原平均气温低至 14.85°C ,是 1985—2015 年最低,1998 年云贵高原平均气温首次突破 16°C ,达到 16.5°C 的小高峰,之后平均气温一直在 $15.5\sim 16.5^{\circ}\text{C}$ 之间波动,2010 达到 16.73°C ,为近 30 a 来的气温最高值.

由于云贵高原湖泊的主要补给来源有降水补给和入湖径流补给,所以相比降水量与蒸发量,气温只是间接影响湖泊表面水体面积的变化. 在降水量恒定的情况下,气温升高会使蒸发增加,进而增大湖泊表面水体蒸发以及减少入湖径流的补给. 1985—2015 年云贵高原气温呈上升趋势,尤其是 2008—2009 年,气温大幅上升,这与 2008—2009 年蒸发量增加一致.

3.2.2 湖泊表面水体面积对年平均降水量的响应 1985—2015 年云贵高原地区平均降水量变化波动较大,总体上呈减少趋势,近 30 a 平均降水量为 9153.171 mm ,在 1986 年达到最高值,2009—2011 年降水量相对较低,分别比平均值低 1080 和 2235 mm ,其后几年降水量呈现出增加趋势渐渐趋近于平均值. 1997—2002 年降雨较充沛都在平均值以上,1986—1967 和 2008—2009 年降水量降幅较大,分别下降了 2624.00 和 3058.66 mm .

图5 1985—2015 年均温度变化

Fig.5 The annual average temperature changes from 1985 to 2015

mm(图 6a)。

研究区近 30 a 降水量减少,1995 年较前几年降水量增加,到 2000 年降水量开始减少,虽然在 2001、2007 和 2008 年出现上涨小高峰,但在 1995 年后整体降水量是减少的,这与云贵高原湖泊表面水体面积变化趋势基本趋于一致,二者呈正相关关系。1985—1995 年期间,湖泊表面水体面积逐渐增大,在 1986、1991 和 1995 年出现了 3 个降水量上涨的小高峰,除 1987—1989 年降水量较低,但其他年份降水量变化波动较小,整体呈增长趋势,1995 年后降水量整体呈减少趋势,2008—2009 年降水量降幅较大,这与云南省 2009 年开始的大早有直接关系,由图 6a 可以直接看出降水量与湖泊面积的变化趋势基本一致,呈现出先增加后减少的趋势,可见对于主要靠降水补给的云贵高原内陆湖泊来说,降水量是影响湖泊表面水体面积变化的重要因素,特别是位于高海拔、远离市区的泸沽湖,其面积变化与降水量的变化一致性较高,但与城市毗邻、受人类活动影响较大的异龙湖和杞麓湖,其面积变化与降水量的变化一致性相对较低。利用湖泊面积变化量与降水量进行相关性分析如图 7a 所示, R^2 接近于 0.5,进一步说明二者具有显著正相关性,可见降水量是直接影响湖泊面积变化的重要因素。

3.2.3 湖泊表面水体面积对年平均蒸发量的响应 气象站的蒸发皿观测的蒸发量为水面蒸发,因此气象站的蒸发数据能够反映湖泊的蒸发情况。1985—2015 年的年平均蒸发量为 11632.24 mm,1987—2000 年蒸发量逐渐降低,并在 2000 年达到最低值,2000 年后蒸发量呈波动上升趋势,并在 2011 年达到最大值(图 6b)。

图 6 1985—2015 年均降水量(a)和蒸发量(b)变化

Fig.6 The changes of annual precipitation(a) and evaporation(b) from 1985 to 2015

研究区近 30 a 蒸发量总体呈增加趋势,具体为 1985—1987 年呈增加趋势,1987—2000 年呈减少趋势,2000 年之后蒸发量再次呈增加趋势,1987—1995 年蒸发量减少且波动较小,1995—2000 年蒸发量虽然总体呈现减少趋势,但中间仍有上涨的小高峰,这与 1995—2000 年的湖泊表面水体面积变化有关,之后几年蒸发量增大,而湖泊面积减小。利用湖泊面积变化量与蒸发量进行相关性分析如图 7b 所示, R^2 达到 0.4164,可见蒸发量是影像湖泊变化的重要因素。综上所述蒸发量是影响湖泊表面水体面积变化的重要因素。

3.3 植被覆盖与湖泊表面水体面积变化的相关性分析

国内外研究者相关研究表明湖泊流域植被覆盖具有一定涵养水源作用,特别高山松林及灌木具有更强

图 7 年均降水量(a)和蒸发量(b)与湖泊面积变化量相关分析

Fig.7 Correlation analysis of mean precipitation(a), evaporation(b) and lake area changes

的水源涵养能力^[25]. 本文采用支持向量机分类算法提取云贵高原湖泊各流域的植被覆盖面积,具体统计结果如图 8a 所示. 再将云贵高原湖泊各流域的植被覆盖面积与湖泊表面水体面积进行相关性分析,结果表明滇池流域的植被覆盖面积 2000—2005 年之间发生巨大变化,其他湖泊流域的植被覆盖面积变化波动较小,尤其是在 2010—2015 年,异龙湖与杞麓湖湖水面积发生巨大变化的情况下,其植被覆盖面积基本没有发生变化(图 8). 综上所述,湖泊流域内的植被覆盖面积变化与该湖泊面积变化关系较弱.

图 8 1985—2015 年云贵高原湖泊植被覆盖面积(a)和湖泊表面水体面积(b)的变化

Fig.8 The changes of vegetation coverage area(a) and surface water body area(b) of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau from 1985 to 2015

3.4 人类活动对云贵高原湖泊表面水体面积变化的影响

云贵高原湖泊表面水体总面积变化与降水量呈正相关,与蒸发量呈负相关,但抚仙湖和洱海等湖泊表面水体面积变化较小,杞麓湖和异龙湖等表面水体面积变化较大. 据相关研究表明^[5,15],人类活动也是影响湖泊表面水体面积变化的重要因素之一. 人类活动最明显的表现就是土地利用变化,通过分析各个湖泊流域的土地利用变化来反映人类活动对云贵高原湖泊表面水体面积变化的影响. 1985—2015 年各个云贵高原湖泊各流域土地利用变化见表 5.

近 30 a 来云贵高原各湖泊流域的土地利用发生了巨大的变化,随着社会经济的发展,各流域的建设用地面积逐年增长,滇池流域增长速度最快;除杞麓湖与异龙湖流域,其他各湖泊流域的植被、耕地及裸地面积呈小幅波动变化(表 5). 杞麓湖流域植被面积整体呈减少趋势,在 2010—2015 年水体和裸地面积减少较多,耕地面积大幅增长;异龙湖 2010—2015 年耕地面积增长较多,而这一期间该湖泊表面水体面积大幅减少. 杞麓湖与异龙湖流域的建设用地面积变化与湖泊面积变化的相关性分析见图 9;杞麓湖和异龙湖流域

表 5 土地利用面积统计

Tab.5 The statistical results of land use areas

湖泊	类别	1985 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
滇池	水体	317.311	326.436 ↑	336.192 ↑	339.012 ↑	325.871 ↓	329.049 ↑	338.459 ↑
	植被	1092.134	1035.125 ↓	1067.326 ↑	1099.751 ↑	897.926 ↓	889.071 ↓	952.414 ↑
	耕地	424.490	392.108 ↓	349.095 ↓	273.854 ↓	296.942 ↓	239.838 ↓	199.709 ↓
	裸地	820.433	780.664 ↓	734.025 ↓	613.647 ↓	748.788 ↑	557.094 ↓	349.918 ↓
	建设用地	252.072	276.107 ↑	379.802 ↑	558.176 ↑	636.912 ↑	771.387 ↑	1085.939 ↑
抚仙湖	水体	216.692	215.582 ↓	219.498 ↑	217.898 ↓	219.001 ↑	216.180 ↓	216.616 ↑
	植被	224.038	203.654 ↓	225.672 ↑	204.159 ↓	189.657 ↓	171.775 ↓	171.420 ↓
	耕地	60.189	72.499 ↑	75.849 ↑	72.535 ↓	77.636 ↑	63.032 ↓	60.871 ↓
	裸地	151.158	164.781 ↑	113.850 ↓	124.147 ↑	163.496 ↑	154.444 ↓	150.727 ↓
	建设用地	22.881	28.441 ↑	30.088 ↑	56.219 ↑	65.169 ↑	69.528 ↑	75.325 ↑
星云湖	水体	77.079	79.417 ↑	82.683 ↑	80.843 ↓	80.374 ↓	77.327 ↓	77.037 ↓
	植被	212.181	227.635 ↑	233.053 ↑	234.469 ↑	233.884 ↓	206.759 ↓	195.977 ↓
	耕地	75.960	109.337 ↑	93.223 ↓	98.837 ↑	100.435 ↑	95.104 ↓	85.394 ↓
	裸地	149.901	139.924 ↓	103.272 ↓	168.352 ↑	116.885 ↓	124.022 ↓	104.142 ↓
	建设用地	45.095	47.904 ↑	49.986 ↑	79.718 ↑	90.641 ↑	119.006 ↑	189.667 ↑
阳宗海	水体	33.548	33.047 ↓	35.723 ↑	35.479 ↓	35.334 ↓	34.492 ↓	34.204 ↓
	植被	205.026	200.822 ↓	202.132 ↑	203.560 ↑	200.972 ↓	201.582 ↑	208.813 ↑
	耕地	92.378	84.588 ↓	86.679 ↑	80.870 ↓	85.968 ↑	65.942 ↓	53.531 ↓
	裸地	203.268	211.068 ↑	178.560 ↓	175.339 ↓	148.058 ↓	149.073 ↑	94.769 ↓
	建设用地	19.469	24.160 ↑	30.596 ↑	58.440 ↑	83.358 ↑	102.602 ↑	162.373 ↑
杞麓湖	水体	38.695	38.375 ↓	39.086 ↑	38.823 ↓	36.895 ↓	35.709 ↓	25.180 ↓
	植被	122.568	95.768 ↓	125.249 ↑	97.711 ↓	76.394 ↓	79.634 ↑	82.890 ↑
	耕地	79.566	90.048 ↓	84.590 ↓	84.020 ↓	80.647 ↑	74.975 ↓	86.976 ↑
	裸地	66.515	67.214 ↑	40.770 ↓	54.149 ↑	55.288 ↑	54.203 ↓	20.381 ↓
	建设用地	14.166	20.104 ↑	21.813 ↑	36.806 ↑	52.286 ↑	66.987 ↑	96.082 ↑
异龙湖	水体	47.709	40.849 ↓	45.321 ↑	37.838 ↓	37.988 ↑	36.701 ↓	20.611 ↑
	植被	287.303	278.319 ↓	308.264 ↑	257.557 ↓	270.323 ↑	318.863 ↑	261.930 ↓
	耕地	76.097	77.459 ↑	76.242 ↓	87.404 ↑	72.190 ↓	61.343 ↓	89.308 ↑
	裸地	126.528	138.323 ↑	94.570 ↓	136.816 ↑	136.381 ↓	102.225 ↓	122.671 ↑
	建设用地	20.321	23.009 ↑	33.561 ↑	38.342 ↑	41.076 ↑	47.521 ↑	63.438 ↑
洱海	水体	261.785	271.194 ↑	276.819 ↑	267.588 ↓	263.714 ↓	263.729 ↑	262.172 ↓
	植被	1104.065	1095.669 ↓	1154.829 ↑	1096.299 ↓	1144.497 ↑	1134.203 ↓	1119.451 ↓
	耕地	530.829	536.327 ↑	466.789 ↓	431.267 ↓	413.704 ↓	344.013 ↓	347.482 ↑
	裸地	463.476	422.741 ↓	413.120 ↓	500.555 ↑	427.539 ↓	490.235 ↑	477.663 ↓
	建设用地	115.733	149.618 ↑	164.044 ↑	180.157 ↑	226.35 ↑	243.710 ↑	268.737 ↑
程海	水体	85.121	85.117 ↓	88.017 ↑	84.512 ↓	87.753 ↑	85.558 ↓	101.954 ↑
	植被	820.212	864.858 ↑	861.259 ↓	882.333 ↑	893.037 ↑	849.212 ↓	805.300 ↓
	耕地	117.065	91.552 ↓	115.496 ↑	117.397 ↑	111.033 ↓	112.661 ↑	101.483 ↓
	裸地	263.137	340.637 ↑	305.261 ↓	284.223 ↓	277.458 ↓	306.905 ↑	330.484 ↑
	建设用地	68.827	50.975 ↓	62.374 ↑	64.214 ↑	73.319 ↑	78.842 ↑	96.428 ↑
泸沽湖	水体	55.559	55.183 ↓	56.287 ↑	55.214 ↓	55.334 ↑	55.549 ↑	55.895 ↑
	植被	518.728	545.170 ↑	527.565 ↓	501.640 ↓	508.563 ↑	513.152 ↑	491.358 ↓
	耕地	58.022	55.000 ↓	65.123 ↑	67.233 ↑	63.984 ↓	61.888 ↓	60.922 ↓
	裸地	119.180	116.538 ↓	120.082 ↑	141.505 ↑	138.339 ↓	128.389 ↓	138.927 ↑
	建设用地	8.617	10.214 ↑	12.049 ↑	12.514 ↑	17.885 ↑	22.129 ↑	29.004 ↑
威宁草海	水体	19.792	20.100 ↑	27.077 ↑	27.712 ↑	25.955 ↓	22.762 ↓	24.237 ↑
	植被	159.839	157.081 ↓	161.632 ↑	142.972 ↓	126.220 ↓	109.878 ↓	136.822 ↑
	耕地	114.476	123.009 ↑	111.213 ↓	115.443 ↑	138.256 ↑	158.756 ↑	158.598 ↓
	裸地	246.776	222.427 ↓	229.001 ↑	231.550 ↑	216.327 ↓	210.352 ↓	161.911 ↓
	建设用地	17.384	20.414 ↑	28.347 ↑	38.595 ↑	43.495 ↑	55.474 ↑	75.677 ↑

1985、2010 及 2015 年土地利用变化如图 10 和 11 所示。

云贵高原各大湖泊的面积近年来大部分呈减少的趋势,而各个湖泊流域的建设用地面积均呈增长趋势。建设用地的扩张最能反映出人类活动的强度(图 9),杞麓湖与异龙湖的建设用地面积变化与湖泊面积变化呈负相关,且相关系数高达 0.8 以上,可见人类活动对湖泊面积变化影响较大。

图 9 建筑用地面积变化量与湖泊面积变化量相关分析

Fig.9 Correlation analysis of building area change and lake area change

杞麓湖在 1985—2010 年湖泊面积稍有减少,到 2015 年,湖泊表面水体面积明显减少,减少部分变为耕地与裸地。杞麓湖属于浅水型封闭湖泊,从 2009 年开始连续的干旱造成湖水减少,加之杞麓湖是整个通海县人民生活用水及农业灌溉用水的源泉,且湖滨带遭到人为破坏严重,水质越来越差,水土流失严重,导致湖内大量泥沙沉积,围湖造田现象严重,以致其湖泊表面水体面积显著减少(图 10)。

异龙湖 1985、2010 和 2015 年土地利用图如图 11 所示,1985—2015 年湖泊北面裸地减少、植被面积大幅增加,湖泊表面水体面积稍有缩减,到 2015 年,异龙湖面积缩小一半,另一半变成了耕地和部分泥滩地。异龙湖面积持续下降的原因是异龙湖的主要水源供给是赤瑞湖,但由于 2009—2012 年的持续干旱,赤瑞湖已经干涸,异龙湖失去了主要水源补给,加上周围村民围湖造田严重,导致其湖泊面积锐减。所以,尽管 2013—2015 年降水量增加,但异龙湖的表面水体面积还是不可遏止地大幅度减少。

泸沽湖,海拔高及其山地地形使人类活动受限,即使最近几年开始发展旅游,但区位优势还是将它保护的很好,人类活动对其影响较小,因此其表面水体面积变化小,趋于平稳的状态。但位于城市周边且湖泊周围人口密集的湖泊而言,人类影响较为显著。

相关资料表明^[28]云南省在 1978 和 1979 年经历了旱灾,从 1985 年开始,云南降水量增多,这是 1985—2000 年滇池湖面表面水体面积增大的主要原因;子城西园隧洞工程完成后,2000 年之后滇池增加了出流通道,导致湖水出水量增加,再加上滇池周围大规模的开发、围湖造田以及昆明市人口剧增,以及 2010 年云南省遭遇百年一遇的特大旱灾,使得湖泊表面水体面积在 2000—2010 年呈下降趋势;2011 年对滇池的治理初见成效,并继续推进“护滇”的“六大工程”的建设,2013 年牛栏江—滇池补水工程通水,每天向滇池补水 200 万 m³,2014 年开始,云南的旱情有所缓解,降水量增多,到 2015 年,滇池表面水体面积有所增加。

抚仙湖 1985—2015 年湖泊面积缩小部分主要集中在抚仙湖的东北部,经查阅资料^[29]发现该区域分布了较多的酒店和娱乐场所等人工设施,且作为国家一类饮用水源地,抚仙湖一直被保护得较好,2000 年后玉溪市对抚仙湖流域的“禁止开发区”范围不断增大,加之雨水充沛,到 2005 年抚仙湖表面水体面积呈增加趋势;2009 年末,云南开始经历旱灾,加上湖边旅游设施越来越完善,这也是后来几年湖泊面积减少的原因。

1980s 星云湖流域养殖业迅速发展,沿湖围垦严重,使湖泊表面水体面积缩减,污染加重,后因政府制止,要求退塘还湖,并投入大量资金治理星云湖,所以星云湖在 2000 年湖泊面积都呈增长趋势;2009 年末,云南开始经历旱灾,降水减少,导致之后几年星云湖表面水体面积锐减。综上所述,人类活动将是导致云贵高原湖泊表面水体面积变化的重要影响因素。

4 结论

本文选用 5 种不同的水体指数提取了云贵高原湖泊的表面水体面积,对 5 种水体指数提取各个湖泊表面水体的精度进行分析,实验结果表明 NDWI 和 AWEI 对山体阴影有很好的抑制效果,MNDWI 和 NWI 无法

消除云层和山体阴影对湖泊表面水体提取的影响, *EWI* 存在部分表面水体漏提现象。

图 10 杞麓湖流域土地利用图
Fig.10 Land use maps of Lake Qilu Basin

图 11 异龙湖流域土地利用图
Fig.11 Land use maps of Lake Yilong Basin

近 30 a 来, 云贵高原湖泊表面水体总面积呈先增加后减少的趋势. 除滇池、洱海与威宁草海表面水体面积较 1985 年有所上升, 其他湖泊面积都有不同程度的下降趋势, 其中杞麓湖和异龙湖的面积缩减最为严重, 主要原因是云南省在 2009—2012 年长达四年的持续干旱及人为破坏湖泊环境。

云贵高原湖泊与区域气候变化相关分析发现, 高原湖泊与气候的响应有明显的区域性, 近几年来云贵高原湖泊表现水体面积呈缩减趋势而与之相邻的青藏高原湖泊面积整体则呈现出扩大趋势; 研究发现, 气候对湖泊表面水体面积变化的影响显著, 年降水量的变化和湖泊面积的变化呈显著正相关性; 年蒸发量的变化和湖泊面积的变化呈显著负相关性; 年平均气温与湖泊面积的变化也呈现出负相关性. 湖泊流域范围内的土地利用变化与该湖泊面积变化相关性不大, 但人类活动与湖泊表面水体面积变化密切相关, 随着社会经济的发展, 人类肆意围湖造田以及湖泊旅游景点的开发等人类活动导致了湖泊面积的减少, 成为云贵高原湖泊表面水体面积缩减的重要因素。

5 参考文献

- [1] Xu SZ. Talking about the importance of water resources. *China Science and Technology Review*, 2012, **34**: 370. [许素贞. 浅谈水资源的重要性. 中国科技博览, 2012, **34**: 370.]
- [2] Ma RH, Yang GS, Duan HT. Number, area and spatial distribution of Chinese lakes. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, (3): 394-401. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, (3): 394-401.]
- [3] Working Group I Contribution to The IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- [4] Du JK, Huang YS, Feng XZ *et al.* Study on water bodies extraction and classification from SPOT Image. *Journal of Remote Sensing*, 2001, **5**(3): 214-219. [都金康, 黄永胜, 冯学智等. SPOT 卫星影像的水体提取方法及分类研究. 遥感学报, 2001, **5**(3): 214-219.]
- [5] Chen FH, Wang JL, Chen Z *et al.* Comparison of water extraction methods in mountainous plateau region from TM image. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, **19**(6): 479-484. [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. 遥感技术与应用, 2014, **19**(6): 479-484.]
- [6] Shi ZJ, Wen XP, Ma W *et al.* Application of tasseled cap transformation in Fuxian Lake area changes analysis. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(25): 352-355. [石振杰, 温兴平, 马威等. 缨帽变换在抚仙湖水面变化分析中的应用. 安徽农业科学, 2015, **43**(25): 352-355.]
- [7] Mcfeeters SK. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(7): 1425-1432.
- [8] Xu HQ. Modification of normalized difference water index (MNDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(5): 589-595. [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. 遥感学报, 2005, **9**(5): 589-595.]
- [9] Zhou Y, Wen XP, Zhang LJ *et al.* Research on extraction methods of water surface area in Erhai Lake based on technology of remote sensing. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, (6): 236-243. [周杨, 温兴平, 张丽娟等. 基于遥感技术的洱海水域面积提取方法研究. 水资源与水工程学报, 2016, (6): 236-243.]
- [10] Chang XL, Zhao XY, Wang W *et al.* Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(21): 7002-7012. [常学礼, 赵学勇, 王伟等. 科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应. 生态学报, 2013, **33**(21): 7002-7012.]
- [11] Dong SY, Xue X, You QG *et al.* Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 535-544. DOI:10.18307/2014.0407. [董斯扬, 薛娴, 尤全刚等. 近 40 年青藏高原湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 535-544.]
- [12] Chang XL, Zhao XY, Wang W *et al.* Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **33**(21): 7002-7012.
- [13] Bian D, Bian BCR, La B *et al.* The response of water level of Selin Co to climate change during 1975-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(3): 313-319. [边多, 边巴次仁, 拉巴等. 1975-2008 年西藏色林错湖面变化对气候变化的响应. 地理学报, 2010, **65**(3): 313-319.]
- [14] Wu SX, Chang GG, Li FX *et al.* Recent lake changes in Maduo County, source region of the Yellow River. *J Lake Sci*, 2008, **20**(3): 364-368. DOI:10.18307/2008.0316. [吴素霞, 常国刚, 李凤霞等. 近年来黄河源头地区玛多县湖泊变化. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 364-368.]
- [15] Bai J, Chen X, Li JL *et al.* Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975-2007 remote-sensing analysis. *J Lake Sci*, 2011, **23**(1): 80-88. DOI:10.18307/2011.0113. [白洁, 陈曦, 李均力等. 1975-2007 年中亚干旱区内陆湖泊面积遥感分析. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 80-88.]
- [16] Chu D, Pu Q, La BZM *et al.* Remote sensing analysis on lake area variations of YamzhoYumco in Tibetan Plateau over the past 40 a. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 494-502. DOI:10.18307/2012.0324. [除多, 普穷, 拉巴卓玛等. 近 40 a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 494-502.]
- [17] Yan P, Zhang JY, Zhang Y *et al.* A study on information extraction of water system in semi-arid regions with the Enhanced Water Index (EWI) and GIS based noise remove Techniques. *Remote Sensing Information*, 2007, **94**(6): 62-67. [闫霁,

- 张友静, 张元等. 利用增强型水体指数(EWI)和GIS去噪音技术提取干旱地区水系信息的研究. 遥感应用, 2007, **94**(6): 62-67.]
- [18] Ding F. A new method for fast information extraction of water bodies using remotely sensed data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, **24**(2): 167-171. [丁凤. 一种基于遥感数据快速提取水体信息的新方法. 遥感技术与应用, 2009, **24**(2): 167-171.]
- [19] Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R *et al.* Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sens Environ*, 2014, **140**: 23-35.
- [20] IPCC ed. Climate Change 2001: Impacts, adaptation & vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 1-18.
- [21] Ding YH, Wang SR eds. Introduction to climate and ecological environment in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 77-154. [丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论. 北京: 气象出版社, 2001: 77-154.]
- [22] Chen LX, Shao YN, Zhang QF *et al.* Preliminary analysis of climatic change during the last 39 years in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1991, **2**(2): 164-173. [陈隆勋, 邵永宁, 张清芬等. 近四十年来中国气候变化的初步分析. 应用气象学报, 1991, **2**(2): 164-173.]
- [23] Pan M. The change trend of precipitation in China is detected. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, **57**(2): 208-216. [盘茂. 中国降水极值变化趋势检测. 气象学报, 1999, **57**(2): 208-216.]
- [24] Zhai P, Zhang X, Wan H *et al.* Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, **18**(18): 1096-1108.
- [25] Sun FD. Monitoring dynamic changes of major lakes in China from 2000-2010 using MODIS data[Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2013. [孙芳蒂. 中国主要湖泊面积 2000—2010 年动态遥感监测[学位论文]. 南京: 南京大学, 2013.]
- [26] Li HJ, Zhong D, Fan S *et al.* Remote sensing monitoring of the nine plateau lakes' surface area in Yunnan in recent thirty years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(S1): 32-37. [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. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(S1): 32-37.]
- [27] Shi XL, Zhang Y, Shan YG *et al.* Study on water conservation function of typical forest vegetation in plateau of Yunnan Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(8): 1366-1372. [石小亮, 张颖, 单永娟等. 云南省高原典型森林植被涵养水源功能研究. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(8): 1366-1372.]
- [28] Liu LJ, Zhang WC, Chen Y *et al.* An analysis of homogeneity and changing trend of precipitation in the past fifty years in Yunnan. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2016, **38**(6): 888-896. [刘茛今, 张万诚, 陈艳等. 云南 50 年降水均一性与变化趋势分析. 云南大学学报: 自然科学版, 2016, **38**(6): 888-896.]
- [29] Hu YL, Zhao GZ. Conservation and sustainable development of the lake district. *Inquiry into Economic Issues*, 2006, (9): 130-133. [胡元林, 赵光洲. 抚仙湖保护与湖区可持续发展. 经济问题探索, 2006, (9): 130-133.]