

近 40 年青藏高原湖泊面积变化遥感分析*

董斯扬^{1,2}, 薛 娴^{1**}, 尤全刚^{1,2}, 彭 飞¹

(1: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 以 MSS、TM 和 ETM 遥感影像作为主要信息源, 综合利用 RS、GIS 技术, 提取青藏高原 1970s、1990s、2000s 及 2010s 4 个时段的湖泊面积信息, 分别从区域位置、面积规模、海拔高度 3 方面分析其近 40 年来的变化趋势及变化特征, 同时结合 1972—2011 年间青藏高原气候变化情况, 初步探讨了影响青藏高原湖泊面积变化的主要原因. 研究表明: (1) 青藏高原面积大于 10 km² 的湖泊有 417 个, 这些湖泊大多是面积为 10 ~ 100 km² 的小型湖泊, 空间上集中分布在高原西部地区, 海拔上集中在 4500 ~ 5000 m 范围内; (2) 近 40 年青藏高原湖泊面积的变化趋势及差异性特征在整体上表现为湖泊呈加速扩张的趋势, 其中 2000s—2010s 时段是湖泊扩张最显著的时期; 在区域位置上, 北部地区的湖泊变化最为剧烈; 在面积规模上, 小型湖泊扩张最为显著; 在海拔高度上, 低海拔地区湖泊扩张剧烈; (3) 近 40 年青藏高原气候暖湿化程度明显, 气候变化对湖泊面积变化影响显著; 在气象要素中, 降水量的变化是青藏高原湖泊面积变化的主要驱动因子.

关键词: 青藏高原; 湖泊面积; 动态变化; 气候变化; 遥感

Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years

DONG Siyang^{1,2}, XUE Xian¹, YOU Quangang^{1,2} & PENG Fei¹

(1: *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

Abstract: Based on RS and GIS technology, remote sensing images including MSS, TM, ETM and topographic maps are visual interpreted to get the areas, positions and changes of the lakes with the area above 10 km² in the Qinghai-Tibet Plateau in 1970s, 1990s, 2000s and 2010s, respectively. The patterns and trends of lake area changes are analyzed in the respects of regions, area scales and altitude scopes, respectively. Meanwhile, combining with the climate change of the Qinghai-Tibet Plateau during the period of 1972—2011, the main reasons of the lake area changes are discussed. The main conclusions are as follows: (1) There are 417 lakes with area above 10 km² in the Qinghai-Tibet Plateau. Most of these lakes have an area less than 100 km² and most of them are located in the western region. Seen from the altitude distribution, most of them were concentrated in the range of 4500—5000 m above sea level. (2) In recent 40 years, the increasing numbers and the areas of these lakes in the Qinghai-Tibet Plateau present an evident expansion pattern, with more evident expanding in the period of 2000s—2010s. As for the regional differences, the changes of these lakes in the eastern and southern regions are slighter than those in the northern and western regions. Small lakes with the area less than 100 km² had larger changes. Lakes with the altitude below 4000 m above sea level had larger changes. (3) The climate of the Qinghai-Tibet Plateau presented a warmer and more humid tendency in recent 40 years. It is obviously that climate change has a significant influence on lake area changes. According to the analyses, precipitation change seems to be the main reason of lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; lake area; dynamic change; climate change; remote sensing

* 中国科学院“百人计划”项目资助. 2013-06-25 收稿; 2013-12-12 收修改稿. 董斯扬(1987~), 女, 博士研究生; E-mail: dongsongyang@lzb.ac.cn.

** 通信作者; E-mail: xianxue@lzb.ac.cn.

青藏高原分布有地球上海拔最高、数量最多、面积最大,以盐湖和咸水湖集中为特色的高原内陆湖群,是我国湖泊分布密集的地区之一,其湖泊总面积约占全国湖泊总面积的一半^[1]. 由于湖泊是大气圈、生物圈、岩石圈和陆地水圈相互作用的连接点,它的形成与消失、扩张与收缩是其周围环境因子共同作用的结果,同时,湖面面积的增减也可通过改变下垫面条件对气候变化产生影响^[2]. 青藏高原地区地势高、自然条件恶劣,湖泊大多数仍保持或接近自然原始状态,其变化受人类活动因素影响较小,能够真实地反映区域气候与环境的变化状况,是全球气候变化的敏感指示器. 因此,掌握近几十年来青藏高原地区湖泊的变化特征对于研究区域气候变化具有十分重要的意义.

卫星遥感具有覆盖范围广、信息量大、重复频率高等优势,在全球变化研究中已经成为常规观测无法替代的重要信息源. 近年来已有一些学者利用 RS 和 GIS 技术对青藏高原地区部分湖泊的面积变化进行研究^[3-16],结果表明,近半个世纪以来,伴随着全球气候变暖及其影响下的冰川消融、冻土退化,青藏高原地区的湖泊因补给条件差异而分别表现出扩张、萎缩、稳定 3 种状态,整体上以扩张趋势为主. 同时,有少数学者认为青藏高原湖泊呈全面萎缩的态势^[17]. 在前期的科学研究中,由于研究者、研究时段、研究方法以及衡量标准各不相同,且研究区范围主要集中在羌塘东南、那曲地区及少数面积较大的单个湖泊(如青海湖),使得我们很难从这些研究结果中获取青藏高原湖泊面积变化的总体信息. 李均力等^[18]曾以流域为单元对青藏高原内陆湖泊的面积变化进行分析,该研究是目前对于青藏高原湖泊面积变化分析中研究范围最广的,但也仅覆盖了高原 70% 的湖泊.

本文针对以上不足,以整个青藏高原作为研究区,利用遥感、GIS 技术对该区域内面积大于 10 km² 的湖泊在 1970s—2010s 期间面积的变化情况进行研究,并对湖泊变化情况进行分区域、分面积梯度以及分海拔梯度的分析,以期对近 40 年来青藏高原地区湖泊面积变化的整体特征有一个相对全面的了解. 同时,结合 1972—2011 年间青藏高原地区的气候变化情况,初步定性地分析湖泊面积变化的主要原因.

1 研究区概况

青藏高原在我国境内部分西起帕米尔高原,东至横断山脉,南自喜马拉雅山脉南缘,北迄昆仑山—祁连山北侧,面积约为 2.6×10^6 km², 占我国陆地总面积的 26.8%^[19]. 高原面平均海拔 4000 ~ 5000 m,冰川广布,冻土发育. 气候总体特征表现为辐射强烈、日照多、气温低. 由于其范围广阔、地域差异较大,在气候区划上可划为 3 个温度带、9 个干湿区、12 个气候区^[20]. 据统计^[1],高原区内面积大于 1 km² 的湖泊有 1091 个,总面积约为 44993.3 km²,且大多为咸水湖,主要分布在高原西部. 降水、冰雪融水、地下水以及冻土中的水分释放是该区域湖泊补给的主要形式.

为便于讨论,本文依据山脉、地形等要素将青藏高原划分为北(N)、东(E)、南(S)、西(W)4 个子区域(图 1).

1) 高原北部区:为昆仑山脉山脊线以北、柴达木盆地东缘以西的高原区,该区湖泊主要分布在东部柴达木盆地内,盆地边缘分布有气象台站.

2) 高原东部区:为柴达木盆地以东以及可可西里山脉、唐古拉山脉山脊线以东的高原区,该区湖泊分布不均,主要集中在三江源地区,气象站广布.

3) 高原南部区:为冈底斯山脉、念青唐古拉山脉山脊线以南的高原区,该区湖泊较少,气象站大多分布在东部地区.

4) 高原西部区:为昆仑山脉山脊线以南、可可西里山脉和唐古拉山脉山脊线以西、冈底斯山脉和念青唐古拉山脉山脊线以北的高原区,该区范围大体上与羌塘高原范围一致,湖泊分布十分密集,气象台站极为稀少.

2 数据与方法

2.1 数据源

根据遥感数据的可获得性和云量情况,分别选取以 1975、1990、2000 和 2010 年为中心年份的覆盖研究区的一系列数据,包括 MSS、TM 和 ETM 影像. 由于 1970s MSS 影像无法覆盖全区,少数缺失地区采用 1970s

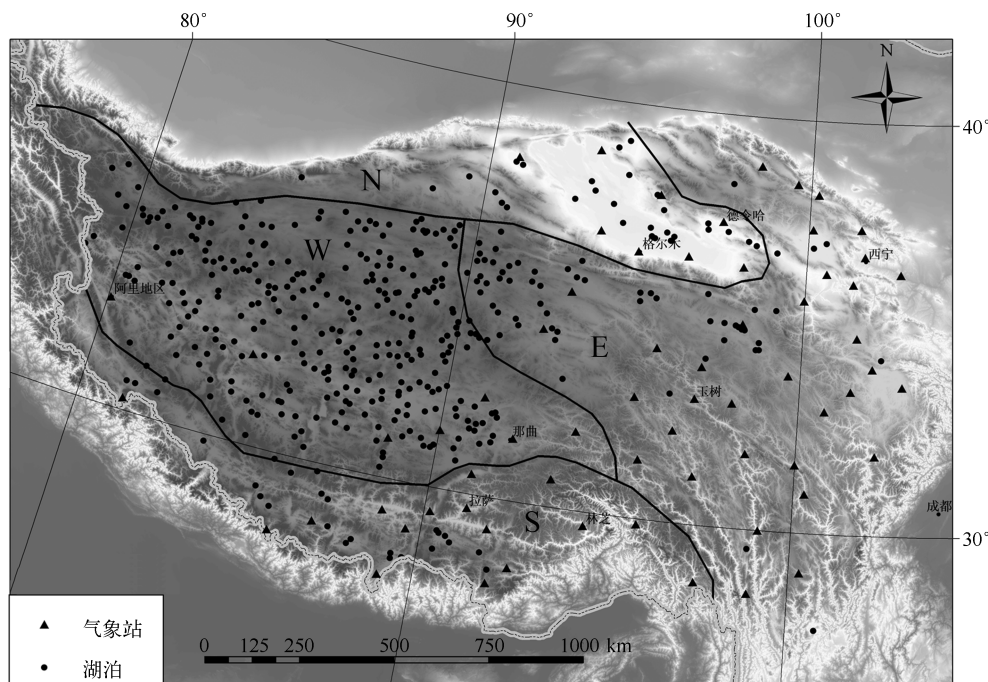


图 1 青藏高原主要湖泊、气象站分布

Fig. 1 Distribution of main lakes and meteorological stations in the Qinghai-Tibet Plateau

(1970—1974 年) 1:10 万地形图作为补充. 各期遥感影像质量完好, 基本无云覆盖, 地形图扫描清晰 (扫描精度为 300 dpi), 湖泊水边线易于勾画. 由于青藏高原湖泊面积的季节性变化十分明显, 所以不同时期遥感影像所反映的湖泊面积变化可能属于阶段性变化, 也可能是季节性变化与阶段性变化的综合结果. 已有研究表明: 尽管内陆湖泊在一年之内的面积变化剧烈, 而在 9—12 月却能保持面积的相对稳定, 湖泊最大面积变化率不超过 2%^[18]. 基于此, 遥感影像尽量选用 9—12 月的数据, 且以 10—11 月数据为最佳. 同时, 将 2% 的变化率确定为判断湖泊面积是否发生阶段性变化的临界值: 若湖泊面积变化率的绝对值小于或等于 2%, 则认为湖泊是稳定的, 没有发生阶段性变化; 若面积变化率的绝对值大于 2%, 则认为湖泊发生了扩张或萎缩的阶段性变化.

分别从 SRTM DEM 影像 (空间分辨率为 90 m) 和 Google Earth 数据提取湖泊的高程信息, 通过对比, 发现整体上 Google Earth 的数据较 SRTM DEM 影像数据更准确, 故本文中的湖泊高程信息使用的是 Google Earth 提供的数据.

气象资料为由国家气象中心提供的青藏高原地区有完整观测资料的 65 个标准气象台站 1972—2011 年的逐月气象观测数据, 包括最低、最高和平均空气温度, 最低、最高和平均空气相对湿度, 10 m 高度处平均风速、日照时数、降水量等以及各站的经纬度和高程数据.

2.2 数据处理

根据水体的光谱特性, 本研究选用 ETM741、TM543 及 MSS754 波段合成图像作为主要信息源, 其行列号、获取时间、数据类型等基本信息见表 1. 用空间分辨率为 15 m 的全色波段对 ETM741 合成影像作图像融合处理, 以获得信息更丰富、影像更清晰的图像数据. 然后以空间分辨率相对较高的 2000s 期 ETM 影像作为参考图像, 对其他各期遥感影像及地形图进行配准, 误差均控制在 1 个像素之内, 以保证各期影像在空间上具有一致性, 其数据可用于动态对比. 之后, 通过人工目视解译的方法勾绘各期影像中的湖泊边界, 提取湖泊面积信息. 以上所有操作均在 ENVI 及 ArcGIS 软件平台上进行. 所有数据均采用 WGS-84 大地坐标系.

表 1 遥感影像/地形图时相选择
Tab. 1 The selection of RS images and topographic maps

数据类型	行列号/图幅编号	时相选择	数据类型	行列号/图幅编号	时相选择		
		1970s			1990s	2000s	2010s
MSS	141-36	19770714	TM/ETM	131-36	19900708	20000812	20090728
	141-41	19740104		131-41	19890102	20001202	20120203
	143-34	19761230		133-34	19950821	20000810	20090811
	143-35	19770222		133-36	19950720	20001029	20090811
	143-36	19761124		133-39	19890124	20011219	20091014
	143-39	19750516		134-34	19900830	20001004	20100805
	144-34	19770629		134-35	19900830	20010703	20090717
	144-35	19761125		134-36	19940724	20010703	20081026
	144-36	19770118		135-33	19950819	20030902	20110807
	145-36	19761126		135-34	19880628	19990923	20111229
	145-33	19731028		135-35	19900821	19990721	20100913
	145-34	19770119		135-37	19920826	19990923	20111229
	145-35	19770419		136-34	19881025	20011021	20110915
	145-37	19761126		136-35	19881025	19990914	20110806
	146-34	19731222		136-36	19940503	20000831	20110806
	146-36	19770102		137-33	19890917	20011028	20110930
	147-33	19750520		137-34	19900819	20011028	20111227
	147-37	19761216		137-35	19911009	20010113	20111227
	147-40	19781224		137-36	19950817	20010708	20110914
	148-33	19731024		137-37	19921112	20010708	20120213
	148-34	19720930		137-40	19881101	20001228	20111227
	148-35	19761111		138-34	19941024	20020803	20101012
	148-36	19761111		138-35	19890119	20021006	20100902
	148-38	19761217		138-36	19920815	20011003	20100902
	148-39	19761217		138-37	19920831	20020515	20111218
	148-40	19761217		138-38	19920831	20010613	20111218
	149-34	19730821		138-39	19910914	20001219	20111218
	149-35	19761130		138-40	19901114	20001117	20111218
	149-36	19761112		138-41	19901114	20011120	20111108
	149-37	19730610		139-34	19901105	20001108	20110912
	149-38	19770228		139-35	19891102	20001007	20100901
	149-39	19761218		139-36	19941218	20010924	20090930
	149-40	19761218		139-37	19900529	20001007	20111123
	149-41	19770123		139-38	19900630	19990919	20110827
	150-34	19721002		139-39	19891110	20001108	20111225
	150-37	19761219		139-40	19891110	20001108	20111209
	150-38	19761219		140-34	19900808	20011017	20111013
	150-39	19761219		140-35	19901112	19990825	20111005
	150-40	19761219		140-36	19920930	19990825	20111005
	151-34	19770531		140-37	19920930	19990825	20111013
	151-35	19761202		140-38	19920930	20001030	20091031
	151-36	19761202		140-39	19920930	20001030	20111005
	151-37	19761202		140-40	19920930	20001030	20111130
	151-38	19770107		141-34	19890124	20011008	20110825

续表 1

数据类型	行列号/图幅编号	时相选择	数据类型	行列号/图幅编号	时相选择		
		1970s			1990s	2000s	2010s
MSS	151-39	19770107	TM/ETM	141-35	19901103	19990917	20110825
	151-40	19770107		141-36	19901103	19990917	20110825
	152-35	19770303		141-37	19901103	20010922	20110825
	152-36	19770303		141-38	19901103	20010922	20110825
	152-37	19770303		141-39	19001103	20010922	20110825
	152-38	19761115		141-40	19881012	20001122	20111223
	152-39	19770303		142-35	19001110	20020916	20111003
	152-40	19761203		142-36	19901110	20001028	20101117
	153-38	19761116		142-37	19891022	20001028	20111011
	153-39	19770322		142-38	19901110	20001028	20090927
	154-35	19731212		142-39	19901110	20000926	20111011
	154-36	19761117		143-35	19921021	20001104	20111221
	154-37	19731124		143-36	19891029	20010920	20110823
	154-38	19770215		143-37	19901117	20010920	20111119
	154-39	19770323		143-38	19001117	20011022	20090918
	155-35	19770306		143-39	19921021	20001003	20090918
	155-36	19770306		144-35	19900820	19990922	20111126
	155-37	19770306		144-36	19921012	20011013	20101115
	155-38	19761206		144-37	19901023	20001010	20101115
	155-39	19761206		144-38	19901023	19991109	20091027
	156-36	19770217		144-39	19901023	20011013	20111110
	156-37	19770623		145-36	19911017	20011020	20110805
	157-35	19721027		145-37	19921104	20011020	20110805
	157-36	19761120		146-35	19921010	19991022	20110913
	157-37	19770413		146-36	19921010	20001008	20110913
1 : 10 万地形图	9-45-3	197012		146-37	19891018	20001008	20101129
	9-45-35	197010					
	9-45-36	197010					
	9-45-47	197010					
	9-45-58	197101					
	9-45-59	197101					
	9-45-72	197410					
	9-45-74	197111					
	9-45-75	197111					
	9-45-86	197111					
	9-45-98	197111					
	9-45-109	197111					
	9-46-1	197010					
	9-46-25	197010					
	10-46-133	197101					

对于湖泊边界的确定,遵循以下 2 个原则:1) 以丰水期水边线的上边界作为湖泊边界;2) 湖泊面积指湖泊水域面积,岛屿和水边线外围滩地均不作为湖泊的组成部分.

在气象数据的处理过程中,气温(T)与降水(P)由观测数据整理而得,最大可能蒸散(ET_0)及干燥度指数(AI)根据公式计算得出. ET_0 根据 1998 年联合国粮农组织修订的 Penman-Monteith 公式进行计算^[21],其中

净辐射(R_n)的计算由公式(2)进行地区校正^[22],以更加符合青藏高原的气候特点.干燥度指数由公式(3)计算得出^[20].最后,用 Mann-Kendall 方法对气象要素的变化趋势进行信度检验.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{1}$$
$$R_n = 0.77 \left(0.2 + 0.79 \frac{n}{N} \right) R_{so} - \sigma \left(\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) (0.56 - 0.25 \sqrt{e_a}) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \tag{2}$$
$$AI = \frac{ET_o}{P} \tag{3}$$

式中, Δ 为饱和水汽压随温度的斜率, R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, γ 为干湿表常数, u_2 为2 m 高处风速, e_s 为饱和水汽压, e_a 为实际水汽压, $\frac{n}{N}$ 为日照百分率, R_{so} 为晴天辐射, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d})$), $T_{\max,K}$ 和 $T_{\min,K}$ 分别为绝对温标的最高和最低气温.

3 结果与讨论

3.1 湖泊现状

由于小型湖泊的面积受季节变化影响较大,且其面积的变化对区域环境产生的影响十分有限,故本文仅选取面积大于 10 km²的湖泊作为研究对象.4 期影像的解译结果表明,青藏高原面积大于 10 km²的湖泊一共有 417 个,总面积(研究时段内湖泊面积的平均值)为 39106.66 km²,其分区域、分面积梯度及海拔梯度的统计结果列于表 2. 本文所使用的分类标准中,区域划分按照第 1 节所述方法分为北部、东部、南部、西部 4 类;面积梯度划分以 100、500 和 1000 km²为分界点将湖泊分为小型、中型、大型和超大型 4 类;海拔梯度划分以 4000、4500 和 5000 m 为分界点分为低海拔、中海拔、中高海拔和高海拔 4 类.

在空间分布方面,青藏高原的湖泊分布并不均匀(表 2),有 72.4% 的湖泊集中在西部地区,该区湖泊分布的密集程度远远大于其他地区;在湖泊面积方面,青藏高原内的湖泊大多为面积不足 100 km²的小型湖泊(占高原湖泊总数的 81.5%),面积大于 500 km²的大型湖泊有 13 个,其中面积最大的是青海湖;在海拔高度方面,有 65.9% 的湖泊分布在海拔 4500 ~ 5000 m 的范围内,海拔最高的湖泊是森里错,湖面海拔为 5393 m.

表 2 青藏高原湖泊数量、面积及海拔的分段统计*
Tab. 2 The numbers, areas and elevations of different groups of lakes in the Qinghai-Tibet Plateau

分区	数量	总面积/ km ²	面积分段 X/km^2	数量	总面积/ km ²	海拔分段 Y/m	数量	总面积/ km ²
北部	29	3337.87	$X \leq 100$	340	11197.11	$Y \leq 4000$	30	7223.07
东部	62	9925.92	$100 < X \leq 500$	64	13634.84	$4000 < Y \leq 4500$	66	5642.86
南部	24	2450.66	$500 < X \leq 1000$	10	6408.82	$4500 < Y \leq 5000$	275	23886.64
西部	302	23392.21	$X > 1000$	3	7865.89	$Y > 5000$	46	2354.09
总体	417	39106.66		417	39106.66		417	39106.66

* 湖泊面积为研究时段内的平均值.

3.2 湖泊面积变化的总体趋势及差异性特征

近 40 年湖泊面积变化总体趋势如图 2 所示.为了进一步分析近 40 年青藏高原湖泊面积变化的差异性特征,依据上节所述的分类标准,各研究时段内各类湖泊总面积变化率的统计值列于表 3.

不难看出,近 40 年来青藏高原的湖泊总体上呈明显的加速扩张趋势,特别是在 2000s—2010s 期间,扩张尤为剧烈.而在湖泊面积变化的差异性特征上,北部地区的湖泊总体上扩张程度最剧烈,近 40 年的变化趋势表现为明显扩张—萎缩—剧烈扩张;西部地区的湖泊总体扩张也十分明显,近 40 年表现出持续加速扩张的

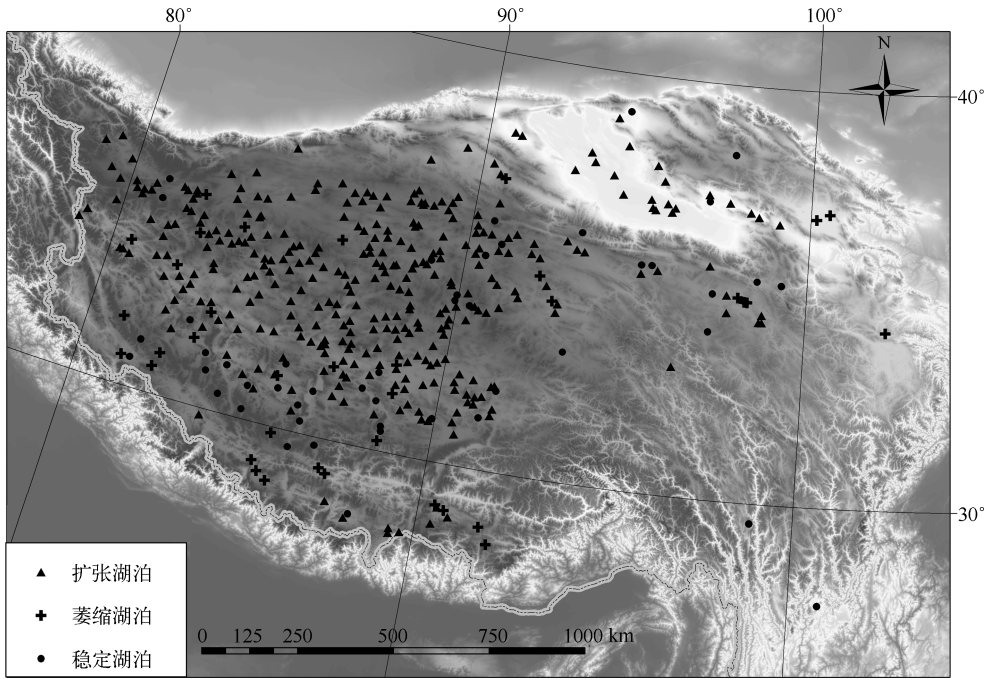


图 2 青藏高原近 40 年湖泊面积变化

Fig. 2 Lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years

表 3 近 40 年来青藏高原湖泊面积变化率(%)统计

Tab. 3 Statistics of lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years

分类标准		研究时段			
		1970s—1990s	1990s—2000s	2000s—2010s	1970s—2010s
分区	总体	2.54	2.90	16.47	22.89
	北部	10.72	-5.84	70.52	77.78
	东部	-3.73	0.25	6.68	2.95
	南部	-0.67	4.26	-5.36	-2.00
	西部	4.84	5.10	16.36	28.21
面积分段 X/km^2	$X \leq 100$	7.02	10.91	28.67	52.73
	$100 < X \leq 500$	2.82	-1.01	16.01	18.09
	$500 < X \leq 1000$	-0.99	0.69	7.90	7.58
	$X > 1000$	-0.48	1.01	6.71	7.28
海拔分段 Y/m	$Y \leq 4000$	3.00	-3.61	28.46	27.54
	$4000 < Y \leq 4500$	3.36	3.83	5.10	12.79
	$4500 < Y \leq 5000$	2.57	4.31	16.97	25.15
	$Y > 5000$	-1.03	6.58	5.26	11.03

趋势,如色林错^[4,11]、纳木错^[6-7,10,15]及其周边的巴木错、班戈错、兹格塘错、蓬错、懂错、乃日平错^[12,18]等,近几十年来水量增加,面积扩张十分明显;东部地区的湖泊总体上也呈现出扩张趋势,但扩张程度远不及北部和西部地区的湖泊,近 40 年其变化趋势表现为萎缩—稳定—扩张,相关研究结果也表明近年来该区内的鄂陵湖面积有所增加,冬给措纳湖面积则保持相对稳定^[14];南部地区的湖泊总体面积保持相对稳定,近 40 年表现出稳定—扩张—萎缩的变化趋势,有研究表明该区内的主要湖泊如羊卓雍错^[5]、佩枯错^[9]近年来面积减少、水位下降。从面积规模方面来看,表现出随湖泊面积规模逐渐增大,湖泊扩张程度逐渐减小的特征;小型湖

泊扩张最剧烈,近 40 年呈持续加速扩张状态;中型湖泊表现出扩张—稳定—明显扩张的变化趋势;大型和超大型湖泊均表现为先稳定后扩张的趋势.从海拔范围方面来看,低海拔地区的湖泊扩张最明显,近 40 年表现出扩张—萎缩—明显扩张的变化趋势;中海拔和中高海拔地区的湖泊均呈持续加速扩张的趋势,且中高海拔地区的湖泊扩张程度稍大;高海拔地区的湖泊也呈扩张状态,但扩张程度相对较小,近 40 年的变化趋势为先稳定后扩张.

3.3 湖泊面积变化对气候变化的响应

将气象观测资料按前文所述方法进行数据处理后获得青藏高原各气象台站 1972—2011 年平均 T 、 P 、 ET_0 和 AI 及其累积距平序列.结果表明^[23],近 40 年青藏高原地区的气温明显升高,降水显著增加,最大可能蒸散显著降低,干燥度指数显著降低,气候向暖湿化方向发展.

近 40 年来青藏高原的气候变化存在明显的区域差异:北部地区的暖湿化程度最为明显,其次是西部地区,东部和南部地区的气候暖湿化程度相对较轻.相应的,近 40 年青藏高原的湖泊面积变化也存在明显的区域差异:北部地区的湖泊扩张程度最为剧烈,其次是西部地区的湖泊,而东部和南部地区的湖泊相对来说面积变化不大,比较稳定(表 4).可见,受气候差异的影响,不同区域湖泊的面积变化特征也存在明显的区域差异.

表 4 近 40 年青藏高原气候变化与湖泊面积变化特征值统计

Tab.4 Statistics of lake area changes and climate change in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years

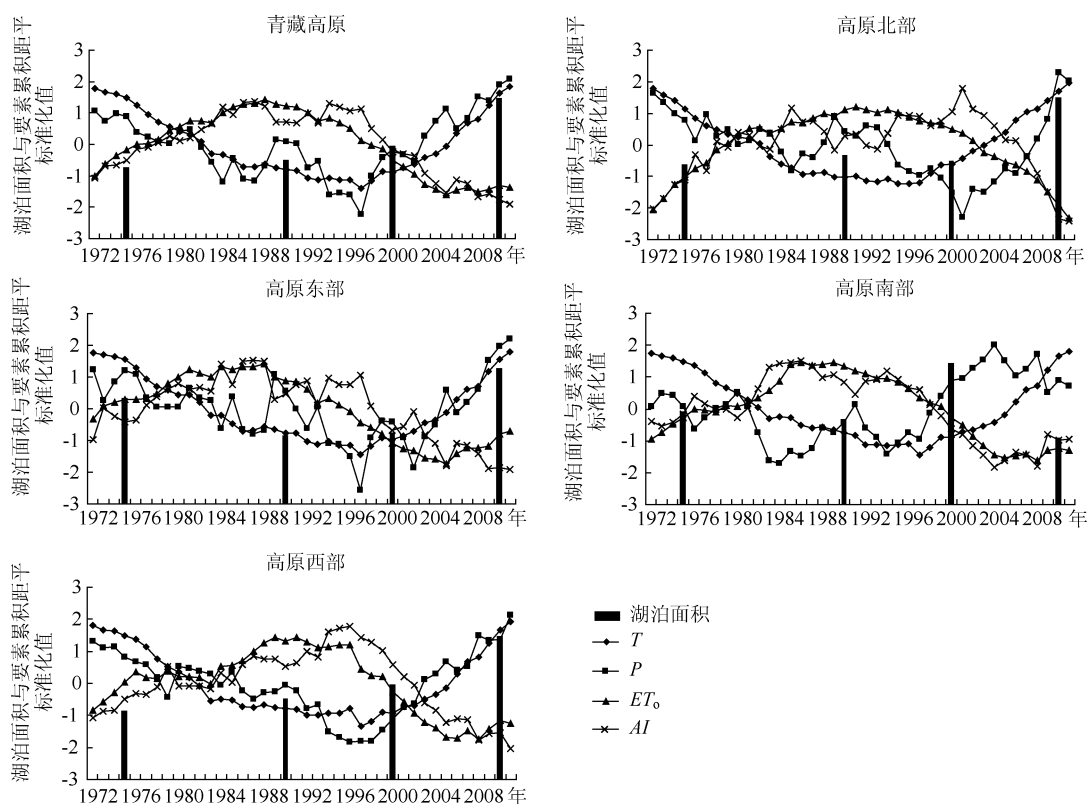
分区	T 趋势/($^{\circ}\text{C}/\text{a}$)	P 趋势/(mm/a)	ET_0 趋势/(mm/a)	AI 趋势/ a^{-1}	湖泊总面积变化率/%
总体	0.038 **	0.809 **	-1.215 **	-0.006 **	22.89
北部	0.057 **	0.498 **	-4.102 **	-0.159 **	77.78
东部	0.035 **	0.768	-0.504 *	-0.003 *	2.95
南部	0.034 **	0.564	-1.430 **	-0.005 **	-2.00
西部	0.045 **	1.885 **	-1.395 **	-0.018 **	28.21

** 表示变化趋势的置信度为 95%, * 表示变化趋势的置信度为 90%.

为了进一步分析湖泊面积变化与各气象要素之间的关系,计算了近 40 年青藏高原湖泊标准化面积与 T 、 P 、 ET_0 、 AI 标准化累积距平曲线(图 3).对 T 、 P 、 ET_0 和 AI 计算累积距平有助于掌握气候的阶段特征.气温累积距平曲线的上升段和下降段分别代表气候的相对暖期和相对冷期;降水累积距平曲线的上升/下降代表降水量偏多/少,对应流域的丰水期/枯水期;最大可能蒸散累积距平曲线的上升段和下降段分别对应强蒸散时期和弱蒸散时期;干燥度指数累积距平曲线的上升段和下降段分别代表气候的干旱期和湿润期.

结合表 4 和图 3 数据,对比高原北部与西部地区,北部湖泊只依靠降水补给,西部地区的湖泊除降水外还有冰川融水作为补给.两区气候变化趋势较为一致,温度显著升高,降水显著增加,最大可能蒸散显著降低,干燥度指数显著降低,在变化程度上,由于北部地区年降水量较少,故降水增加更为剧烈,气候的湿润化程度较西部地区更明显.相应地,两个区域湖泊总面积均明显增加,但西部湖泊的扩张程度远不及北部湖泊.在时间过程上,两个区域的降水量都有明显的波动,但基本趋势是一致的,并且与湖泊面积的变化趋势基本吻合:在 1980s 中期以前,两个区域降水量都低于正常值,处于枯水期,之后的 3~5 年时间里,降水较为充足,北部地区降水量明显高于正常值,西部地区降水量略高于正常值,两区湖泊面积相应增加;进入 1990s,两区降水量又异常偏低,区域气候相对干旱,西部降水于 1996 年恢复正常,并于 1998 年开始持续偏高,然而,北部地区的旱情一直持续到 2001 年,期间降水量只在 1998 年高于正常值,从 2002 年开始降水量持续偏高,区域气候相对湿润.相应地,两区湖泊分别呈现出萎缩—剧烈扩张(北部)和持续扩张(西部)两种不同的变化趋势.同时,这也与受升温影响而产生大量冰川融水补给西部湖泊有一定关系.

对比高原东部地区和南部地区,气候变化趋势是一致的:气温显著升高,降水变化不显著,最大可能蒸散显著降低,干燥度指数显著降低,区域气候向暖湿化方向发展.东部地区的主要湖泊如扎陵湖、鄂陵湖等大多位于三江源地区,属外流湖,湖泊大多依靠降水补给,部分湖泊同时存在冰川融水补给.南部地区虽然基本属于恒河流域,为外流区,但该区主要湖泊如羊卓雍错、普莫雍错、佩枯错、拉昂错、玛旁雍错等均为内陆湖,仅有少数小型湖泊为外流湖,该区湖泊主要依靠降水补给,部分湖泊同时存在冰川融水补给.对于东

图3 近40年青藏高原湖泊标准化面积与 T 、 P 、 ET_0 和 AI 标准化累积距平Fig. 3 Standardized lake area and accumulated anomalies of T , P , ET_0 and AI of the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years

部地区的湖泊来说,受到暖湿化气候的影响以及冰川融水的补给,湖泊总面积有所增加。而南部地区湖泊总面积基本稳定但略有减少的情况则很可能与近年来该区降水量的减少有关。

与北部和西部地区相比,东部和南部地区气候的暖湿化程度较弱,降水变化不明显,因此,整体上湖泊的变化程度较小。另外,与内陆湖泊不同,外流湖的水量变化主要取决于出湖径流,而出湖径流量的变化同时受许多因素影响,使得这类湖泊对气候变化的响应不够敏感。或多或少的外流湖在不同程度上降低了东部和南部地区总体上湖泊对于气候变化响应的敏感程度。因此,区域湖泊的总面积变化不大。在时间过程上,与北部地区和西部地区一样,东、南两区降水量都存在明显的波动,但降水累积距平曲线依然能够较为准确地反映出湖泊面积的变化情况。

比较图3各条曲线的变化情况,不难看出:1) 在 T 、 P 、 ET_0 和 AI 中, P 累积距平曲线能够最好地反映湖泊总面积的变化情况;2) 虽然 AI 的变化同时取决于 ET_0 与 P 的变化情况,但在青藏高原地区明显受降水影响更大。据此,我们推测,在受人为因素影响较小的青藏高原地区,降水量的变化是导致该区湖泊面积发生变化的主要驱动因子。

4 结论

本文主要利用RS和GIS技术,从遥感影像(地形图)中提取出青藏高原内面积大于 10 km^2 的湖泊面积信息,并对其在1970s—2010s时段内的变化特征进行分析。同时,结合近40年青藏高原地区的气候变化情况,初步探讨了影响青藏高原湖泊面积变化的主要原因。通过分析,我们得到以下结论:

1) 青藏高原面积大于 10 km^2 的湖泊有417个,这些湖泊大多为面积 $10\sim 100\text{ km}^2$ 的小型湖泊,空间上集

中分布于西部地区,海拔上集中在 4500 ~ 5000 m 范围内。

2) 近 40 年来,青藏高原的湖泊总体上呈加速扩张趋势,2000s—2010s 时段是湖泊扩张最显著的时期。

3) 在变化差异上,北部地区的湖泊扩张程度最剧烈,其次是西部地区的湖泊,东部和南部地区的湖泊面积变化程度相对较小;面积小于 100 km² 的小型湖泊扩张最为剧烈;低海拔地区湖泊扩张剧烈。

4) 近 40 年青藏高原气候暖湿化程度明显,气候变化对湖泊面积变化影响显著。在气象要素中,降水量的变化是青藏高原湖泊面积变化的主要驱动因子。

5 参考文献

- [1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 7.
- [2] 鲁安新, 王丽红, 姚檀栋. 青藏高原湖泊现代变化遥感方法研究. 遥感技术与应用, 2006, 21(3): 173-177.
- [3] Kropáček J, Braun A, Kang SC *et al.* Analysis of lake level changes in Nam Co central Tibet utilizing synergistic satellite altimetry and optical imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012. doi: 10.1016/j.jag.2011.10.001.
- [4] 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. 科学通报, 2012, 57(7): 571-579.
- [5] 除 多, 普 穷, 拉巴卓玛等. 近 40a 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.
- [6] 马颖钊, 易朝路, 吴家章等. 1970—2009 年纳木错湖泊面积扩张的遥感卫星观测证据及原因之商榷. 冰川冻土, 2012, 34(1): 81-88.
- [7] Zhang B, Wu YH, Zhu LP *et al.* Estimation and trend detection of water storage at Nam Co Lake, central Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2011, 405: 161-170.
- [8] Lin H, Liu JY, Shao QQ *et al.* Changing inland lakes responding to climate warming in northeastern Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2011. doi: 10.1007/s10584-011-0032-x.
- [9] Zhang GQ, Xie HJ, Kang SC *et al.* Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003—2009). *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 1733-1742.
- [10] 朱立平, 谢曼平, 吴艳红. 西藏纳木错 1971—2004 年湖泊面积变化及其原因的定量分析. 科学通报, 2010, 55(18): 1789-1798.
- [11] 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.
- [12] Bian D, Bian BCR, Li L *et al.* The response of lake change to climate fluctuation in north Qinghai-Tibet Plateau in last 30 years. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19: 131-142.
- [13] Liu JS, Wang SY, Yu SM *et al.* Climate warming and growth of high-elevation inland lakes on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2009, 67: 209-217.
- [14] 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] 吴艳红, 朱立平, 叶庆华等. 纳木错流域近 30 年来湖泊——冰川变化对气候的响应. 地理学报, 2007, 62(3): 301-311.
- [16] 姚晓军, 刘时银, 李 龙等. 近 40 年可可西里地区湖泊时空变化特征. 地理学报, 2013, 68(7): 886-896.
- [17] 丁永建, 刘时银, 叶柏生等. 近 50a 中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623-632.
- [18] 李均力, 盛永伟, 骆剑承等. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图. 湖泊科学, 2011, 23(3): 311-320.
- [19] 张懿铨, 李炳元, 郑 度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.
- [20] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. 地理学报, 2010, 65(1): 3-12.
- [21] Allen RG, Pereira LS, Raes D *et al.* Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [22] Yin YH, Wu SH, Yang Q *et al.* Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 77-84.
- [23] 董斯扬, 薛 炯, 徐满厚等. 气候变化对青藏高原水环境影响初探. 干旱区地理, 2013, 36(5): 841-853.