

文章编号: 1008-2786-(2018)2-206-11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000316

青藏高原湖泊面积动态变化及其对气候变化的响应

梁 斌, 齐 实*, 李智勇, 李昱彤, 陈建辉

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 为了探究整个青藏高原湖泊总面积变化的原因, 本文利用 RS 和 GIS 技术, 提取了 1960 s—2015 年青藏高原大于 1 km^2 的湖泊数据, 分析了近 50 年来青藏高原湖泊面积的动态变化, 并结合相应的气象数据, 通过相关性分析及回归分析等方法分析了影响湖泊面积变化的主要气象因子。结果表明: (1) 青藏高原整体变暖湿的过程中大于 1 km^2 湖泊的总面积呈现增长—减少—加速增长的趋势, 从 1960 s—2015 年共增长了 9138.60 km^2 , 增长率为 23.90%; (2) $100 \sim 500 \text{ km}^2$ 级别的湖泊总面积占青藏高原湖泊总面积的比重最大, 各不同等级的湖泊总面积总体呈上升趋势; (3) 青藏高原 $4500 \sim 5000 \text{ m}$ 海拔范围内的湖泊总面积最大, 海拔 $4500 \sim 5000 \text{ m}$ 及海拔 3000 m 以下的湖泊面积变化较剧烈, 呈现波动中增长的趋势, 其余海拔范围内的湖泊面积基本维持稳定; (4) 青藏高原西部地区和北部地区的湖泊总面积总体上呈现增长趋势, 东部及南部地区湖泊总面积基本维持稳定, 整个青藏高原湖泊面积变化的区域在空间上呈现扩张趋势; (5) 年平均气温、年降水量及年蒸发量与湖泊面积呈现显著的相关性, 研究区边缘地区湖泊面积和年平均气温有显著相关性, 研究区中部地区湖泊面积同年平均气温、年降水量及年蒸发量有显著相关性, 而研究区东北部及中西部部分地区湖泊面积和年平均气温及年蒸发量有显著相关性。通过气象因子与湖泊总面积的回归分析结果表明, 年平均气温和年蒸发量变化是导致青藏高原湖泊总面积改变的主要原因。本研究填补了青藏高原长时间序列和多尺度的湖泊面积动态变化方面的空白, 同时本研究得出的湖泊数据可以为其他研究人员提供一定的帮助。

关键词: 青藏高原; 湖泊; 动态变化; 气候变化

中图分类号: P343.3

文献标志码: A

湖泊是青藏高原生态系统和水循环的重要组成部分, 其面积的改变是青藏高原气候变化的指示器, 分析其变化及对气候变化的响应具有重要的意义^[1-2]。前人对青藏高原的湖泊面积变化进行了大量的研究, 有一些学者以纳木错湖^[3]、羊卓雍错湖^[4]、青海湖^[5]、玛旁雍错^[6]、色林错^[7]等单个湖泊为对象进行了研究, 发现近年来纳木错、青海湖、色林错的面积总体上呈现增长趋势, 而羊卓雍错和玛旁雍错的面积总体上呈现减小的趋势; 也有一些学者从区域尺度上进行了研究, 研究了一个区域范围

内的湖泊面积动态变化情况^[8-11], 结果表明大部分区域的湖泊面积呈增加趋势, 但也有部分地区的湖泊呈萎缩趋势, 并指出气温、降水量及蒸发量变化是导致湖泊面积变化的主要原因; 之后有学者进一步研究了整个青藏高原大于 10 km^2 湖泊的面积变化, 发现青藏高原湖泊总面积呈增大趋势, 并指出降水量的变化是湖泊面积变化的主要驱动因子^[12]。

前人的研究主要是以大型湖泊为主要研究对象, 而青藏高原的小型湖泊也是其非常重要的一部分, 以往的研究忽略了小型湖泊的研究价值^[13], 这

收稿日期 (Received date): 2016-11-30; **改回日期** (Accepted date): 2018-1-10

基金项目 (Foundation item): 水利部公益性行业科研专项 (2030311)。[Special Funds for Public Welfare Industry Research Projects of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (2030311).]

作者简介 (Biography): 梁斌 (1992-), 男, 硕士研究生, 河北衡水人, 主要从事水土流失及地理信息系统方面的研究。[LIANG Bin (1992-), male, Postgraduates, born in Hebei Hengshui person, engaged in study of water and soil loss and GIS.] E-mail: 1509030398@qq.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 齐实 (1964-), 男, 教授, 陕西西安人, 主要从事流域治理方面的教学与研究。[QI Shi (1964-), male, professor, born in Shanxi Xi'an, specialized in teaching and studying in watershed management.] E-mail: qishi@bjfu.edu.cn

使得这些研究不够全面,而且大部分研究集中在近20年来,时间间隔较大,缺少长时间序列的研究,难以精确反映多年来整个青藏高原湖泊面积变化情况,同时由于青藏高原的气象站空间分布不均匀,前人在进行整个青藏高原的气象值计算时没有考虑海拔及空间位置对各气象因子的影响^[14],而只是简单地利用算术平均法得出各个气象因子值,使其在湖泊面积对气候变化的响应分析上不够精确^[15]。

因此为了填补整个青藏高原湖泊面积动态变化方面的研究空白,更加清晰、全面地说明青藏高原湖泊面积的变化及其对气候变化的响应,本文利用GIS和RS手段补充完善了整个青藏高原1960s—2015年大于1 km²湖泊的数据资料,分析了大于1.0 km²湖泊面积的动态变化^[16],并结合气象数据探究了青藏高原湖泊对气候变化的响应规律及湖泊面积动态变化的主要气象影响因子,本研究的研究方法和结果可以为相关研究提供方法上的借鉴和数据上的支撑。

1 研究区概况

研究区为中国境内的青藏高原部分(见图1),包括整个西藏及青海、新疆、甘肃、四川和云南的部分地区,总面积为2.57×10⁶ km²,平均海拔为4400 m,年平均温度在3.4~5.9℃之间,年平均风速约为2.5 m/s,年平均蒸发量为1940~2100 mm左右,年平均降水量在250~270 mm之间,年平均相对湿度在0.5左右。根据2015年青藏高原湖泊统计数

据,青藏高原大于1 km²湖泊数量为1268个,总面积为4.74×10⁴ km²,占青藏高原面积的1.84%。

2 数据与研究方法

2.1 数据资料

本项目1960 s的湖泊数据来源于科学数据网站,数据由Wei Wan等^[17]提供,1995—2015年的数据来源于中国科学院青藏高原研究所^[18],1978年及1988年的湖泊数据主要通过Landsat卫星影像处理得来。因为青藏高原9—11月份的湖泊面积变化较小,所以选择9~11月份的Landsat卫星影像进行湖泊提取,部分区域的Landsat卫星影像存在数据缺失情况的采用临近年份的数据进行替代^[19]。各时间段数据来源见表1。

表1 地图数据来源

Tab. 1 Map data sources

时间	来源	备注
1960s	scientificdata	1960 s,来源于科学数据网站
1978	Landsat MSS 影像	主要为1978年9—11月,部分地区采用临近年份影像,共101景
1988	Landsat TM 影像	主要为1988年9—11月,部分地区采用临近年份影像,共101景
1995	青藏高原	1995—2015年9—11月,来源于中国
2000	湖泊空间	科学院青藏高原研究所
2005	分布数据	
2010		
2015		

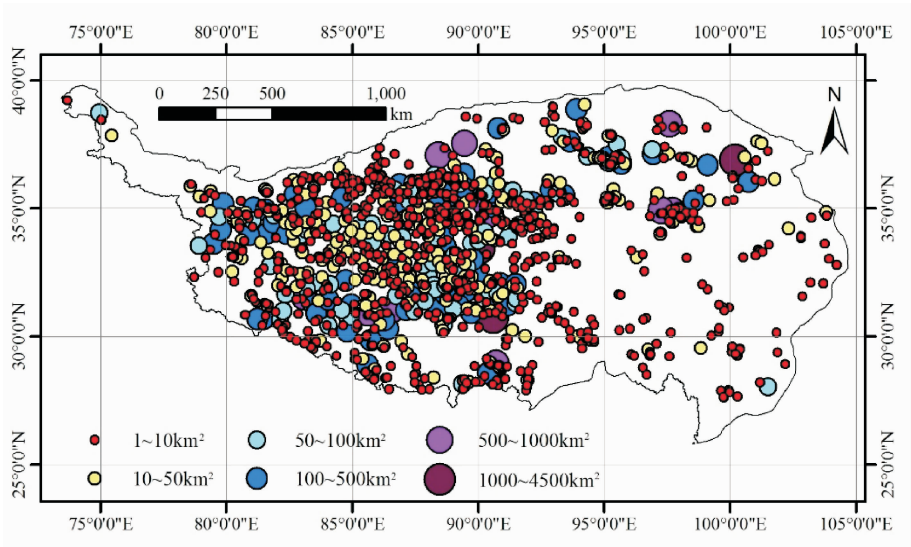


图1 研究区范围及湖泊分布图(2015)

Fig. 1 Map of the study area and lake distribution (2015)

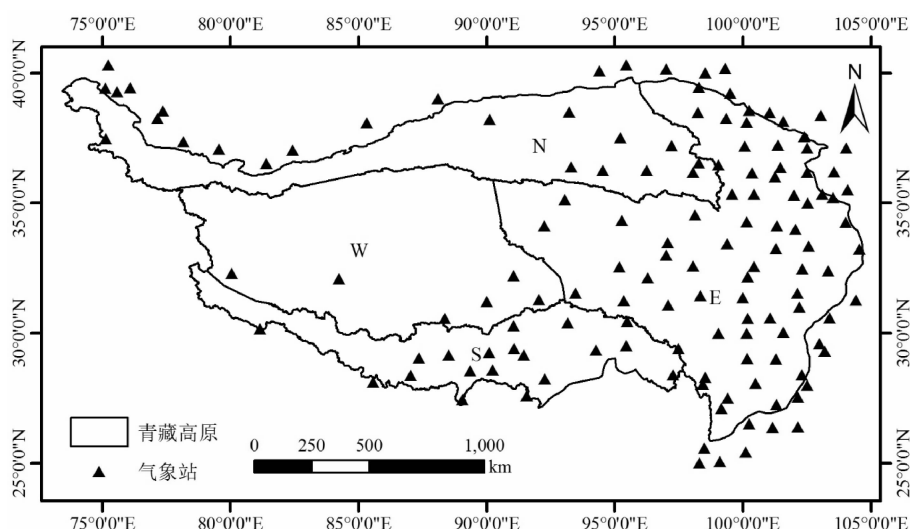


图2 气象站点分布图

Fig. 2 Meteorological sites

气象数据来源于中国气象数据网,本研究收集了研究区内及周边 137 个气象站 1960—1969、1978、1988、1995、2000、2005、2010 及 2015 年共 8 个时间段的逐日气象观测数据,包括气温、降水、相对湿度、风速及蒸发量等^[3,8],个别站点在 1960—1969 年数据存在缺失的情况,这些站点将不参与该时段的插值计算,气象站点分布见图 2。

地形数据来源于日本 METI 和美国 NASA 联合研制的 ASTER GDEM V2 数据,栅格大小为 30 m × 30 m。

2.2 数据处理

2.2.1 气象数据处理方法

通过对各个气象站点的逐日气象数据分析得到各站点的年平均温度、年降水量、年平均蒸发量、年平均相对湿度及年平均风速数据。采用引入了高程数据的改进克里格方法对各个站点的各气象要素年平均数据进行空间插值^[20-21],插值栅格大小为 1000 m。本研究中 1960 s 的气象数据取 1960—1969 年气象数据的平均值。

2.2.2 湖泊数据处理方法

通过几何校正、边缘增强及缨帽变换等对 1978 年及 1988 年总计 202 景遥感数据进行处理,并参考戴玉凤^[19]和 Verpoorter^[22]的研究选取了单波段阈值法、NDWI、谱间关系法和比值法进行湖泊边界提取,通过对比发现采用单波段阈值法获取的结果最为精确,因此本研究采用单波段阈值法进行湖泊的提取,波段选取为中红外波段,阈值设置为 30,并结合配准后的遥感图采用目视解译的方法进行修改,

将湖泊边界误差控制在一个像元以内(1978 年误差在 60 m 以内,1988 年的误差在 30 m 以内),最终完成对 1978 年 1083 个及 1988 年 1119 个湖泊数据的提取。受限于 Landsat MSS 影像的分辨率,本研究仅提取湖泊面积大于 1 km² 的湖泊,提取过程见图 3。

在湖泊提取完成的基础上,依据湖泊面积的大小统计分析 1960 s—2015 年青藏高原 1 ~ 10 km²、10 ~ 50 km²、50 ~ 100 km²、100 ~ 500 km²、500 ~ 1000 km² 及 1000 km² 以上共六个不同等级湖泊的面积变化^[12,23];同时根据湖泊的海拔高度统计分析 1960 s—2015 年青藏高原 < 3000 m、3000 ~ 3500 m、3500 ~ 4000 m、4000 ~ 4500 m、4500 ~ 5000 m 及 > 5000 m 六个不同海拔范围内的湖泊面积变化^[12]。

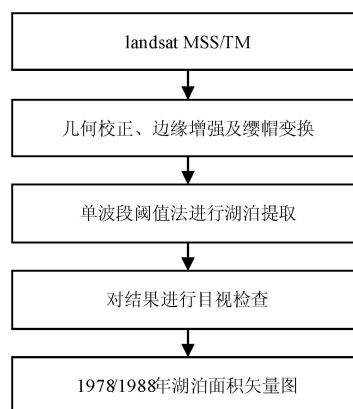


图3 湖泊数据处理过程图

Fig. 3 Flowchart for production and validation of the lake data set

由于单个湖泊的面积变化可能受气候、水源、地质以及人为干扰等多重影响^[23-24],单个湖泊的面积改变难以代表该区域湖泊面积整体情况,因此为了研究青藏高原湖泊面积变化的空间趋势,以流域为单元对青藏高原的湖泊面积的空间变化趋势进行研究。将面积变化绝对值在 2% 以内的流域视为湖泊面积保持稳定的区域,面积变化大于 2% 的区域视为湖泊扩张的流域,面积变化小于 -2% 的区域视为湖泊萎缩的流域^[23]。并根据青藏高原的东、南、西、北 4 个区域^[12](区域划分边界见图 2)对不同区域湖泊面积变化的空间趋势进行分析,探究青藏高原不同区域的湖泊面积变化情况。

2.2.3 气象要素与湖泊面积的相关性分析

利用 Arcgis 对各个流域内的气象数据进行统计,然后利用 Spearman 法进行相关性分析,寻找同各个流域湖泊面积存在显著性相关关系的气象因

子,同时利用多元线性回归法建立气象因子和青藏高原湖泊总面积之间的多元线性方程。

3 结果与分析

3.1 近 50 年来西藏湖泊面积动态变化

对研究区统计分析得到各时间的青藏高原大于 1 km² 湖泊总面积、年平均气温、年降水量、年平均相对湿度、年平均风速及年蒸发量数据(见图 4)。在对 1978 及 1988 年遥感影像分析的基础上,获取了 1960 s—2015 年青藏高原大于 1 km² 湖泊面积数据(见表 2、表 3 及表 4),经统计发现:1960 s—2015 年青藏高原大于 1 km² 湖泊总面积呈增长—减少—加速增长趋势,共增长了 9138.60 km²,增长率为 23.90%。

表 2 青藏高原不同等级湖泊的面积

Tab. 2 Lake areas at different area level in the Tibetan Plateau

单位:km²

年	1 ~ 10 km ²	10 ~ 50 km ²	50 ~ 100 km ²	100 ~ 500 km ²	500 ~ 1000 km ²	1000 ~ 4500 km ²	总计
1960 s	2253.43	4680.27	5405.08	11937.18	5877.1	8088.03	38241.09
1978	2204.12	4661.32	5395.27	12199.31	5797.99	7979.17	38237.17
1988	2061.66	5420.9	4949.81	12244.51	6850.54	8008.74	39536.17
1995	2091.22	5380.17	4434.46	12189.45	5288.95	7999.11	37383.36
2000	2439.53	5583.93	5380.12	12449.92	6850.37	8171.97	40875.83
2005	2542.62	5405.35	5432.65	15392.48	6501.52	8451.99	43726.61
2010	2903.17	5714.47	5298.86	15919.41	8882.2	8726.41	47444.51
2015	2655.16	6024.57	5275.15	15514.1	8062.21	9848.5	47379.69

表 3 青藏高原不同海拔的湖泊面积

Tab. 3 Lake areas at different altitudes in the Tibetan Plateau

单位:km²

年	< 3000 m	3000 ~ 3500 m	3500 ~ 4000 m	4000 ~ 4500 m	4500 ~ 5000 m	总计
1960 s	614.72	4587.98	574.53	6228.81	24033.95	38241.09
1978	606.44	4527.60	570.00	6141.99	24220.88	38237.17
1988	1232.92	4539.31	746.88	6602.83	24240.66	39536.17
1995	1160.23	4395.80	668.92	5948.92	23034.24	37383.36
2000	1408.95	4481.95	700.84	6237.05	25522.62	40875.83
2005	1932.82	4533.98	884.43	6188.43	27622.25	43726.61
2010	3192.37	4622.74	1012.29	6695.05	29178.68	47444.51
2015	2504.13	4735.18	1111.21	6655.31	29640.31	47379.69

表 4 青藏高原不同区域的湖泊面积

Tab.3 Lake areas at different areas in the Tibetan Plateau

单位:km²

年	东部	北部	西部	南部	总计
1960 s	9099.76	2330.56	23891.78	2918.99	38241.09
1978	9098.83	2330.32	23889.33	2918.69	38237.17
1988	9368.65	3010.46	24195.26	2961.79	39536.17
1995	8818.89	2785.99	22946.94	2831.54	37383.36
2000	9169.73	3065.23	25641.69	2999.18	40875.83
2005	9581.72	3879.63	27524.29	2740.97	43726.61
2010	10035.39	5330.45	29248.37	2830.30	47444.51
2015	10110.45	4872.47	29623.08	2773.68	47379.69

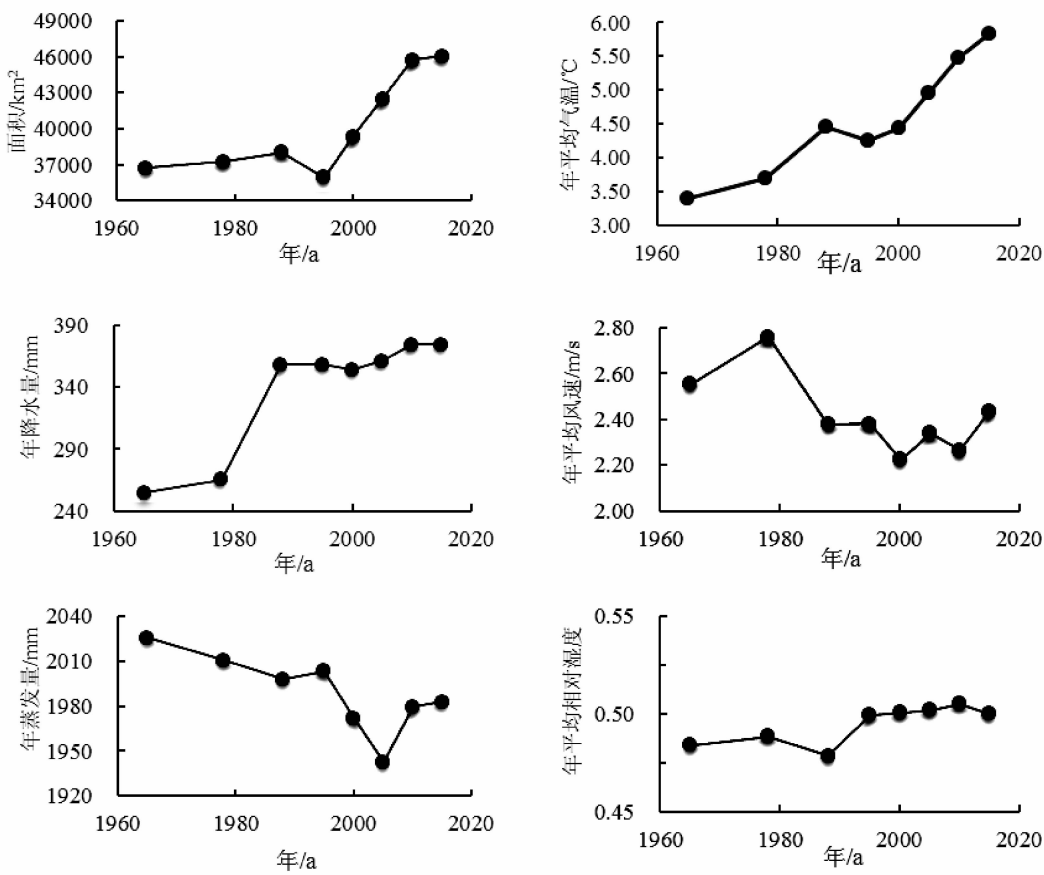


图 4 近 50 年来青藏高原湖泊总面积及气象因子动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of the lake areas in the Tibetan Plateau and meteorological factors for the past 50 years

3.1.1 不同等级湖泊面积动态变化

对不同面积等级的湖泊面积进行分析可知100 ~ 500 km² 等级的湖泊面积占青藏高原湖泊总面积的比重最大,其次为 1000 km² 以上和 500 ~ 1000 km² 等级的湖泊面积,1 ~ 10 km² 等级的湖泊占总面积的比重最小;从变化趋势上来看,湖泊面积在 1 ~ 10 km²、10 ~ 50 km²、100 ~ 500km²、500 ~ 1000 km² 及 1000

km² 以上等级的湖泊总面积总体上呈上升趋势,1 ~ 10 km² 和 100 ~ 500 km² 等级的湖泊面积近年来增速降低,面积基本趋于稳定,而 10 ~ 50 km²、1000 ~ 4500 km² 等级的湖泊面积近年来呈现加速扩大趋势;50 ~ 100 km² 等级的湖泊总面积总体上呈稳定趋势;而 10 ~ 50 km²、100 ~ 500 km²、及 500 ~ 1000 km² 等级的湖泊总面积变化波动较大(见图 5 和表 5)。

表5 湖泊面积变化率

Tab.5 Lake area change rates

分类		时间						
		1960s ~ 1978	1978 ~ 1988	1988 ~ 1995	1995 ~ 2000	2000 ~ 2005	2005 ~ 2010	2010 ~ 2015
不同区域	东	-0.01%	2.97%	-5.87%	3.98%	4.49%	4.73%	0.75%
	西	-0.01%	1.28%	-5.16%	11.74%	7.34%	6.26%	1.28%
	南	-0.01%	1.48%	-4.40%	5.92%	-8.61%	3.26%	-2.00%
	北	-0.01%	29.19%	-7.46%	10.02%	26.57%	37.40%	-8.59%
不同海拔	<3000 m	-1.35%	103.30%	-5.90%	21.44%	37.18%	65.17%	-21.56%
	3000 ~ 3500 m	-1.32%	0.26%	-3.16%	1.96%	1.16%	1.96%	2.43%
	3500 ~ 4000 m	-0.79%	31.03%	-10.44%	4.77%	26.20%	14.46%	9.77%
	4000 ~ 4500 m	-1.39%	7.50%	-9.90%	4.84%	-0.78%	8.19%	-0.59%
	4500 ~ 5000 m	0.78%	0.08%	-4.98%	10.80%	8.23%	5.63%	1.58%
不同等级	1 ~ 10 km ²	-2.19%	-6.46%	1.43%	16.66%	4.23%	14.18%	-8.54%
	10 ~ 50 km ²	-0.40%	16.30%	-0.75%	3.79%	-3.20%	5.72%	5.43%
	50 ~ 100 km ²	-0.18%	-8.26%	-10.41%	21.33%	0.98%	-2.46%	-0.45%
	100 ~ 500 km ²	2.20%	0.37%	-0.45%	2.14%	23.64%	3.42%	-2.55%
	500 ~ 1000 km ²	-1.35%	18.15%	-22.80%	29.52%	-5.09%	36.62%	-9.23%
	1000 ~ 4500 km ²	-1.35%	0.37%	-0.12%	2.16%	3.43%	3.25%	12.86%

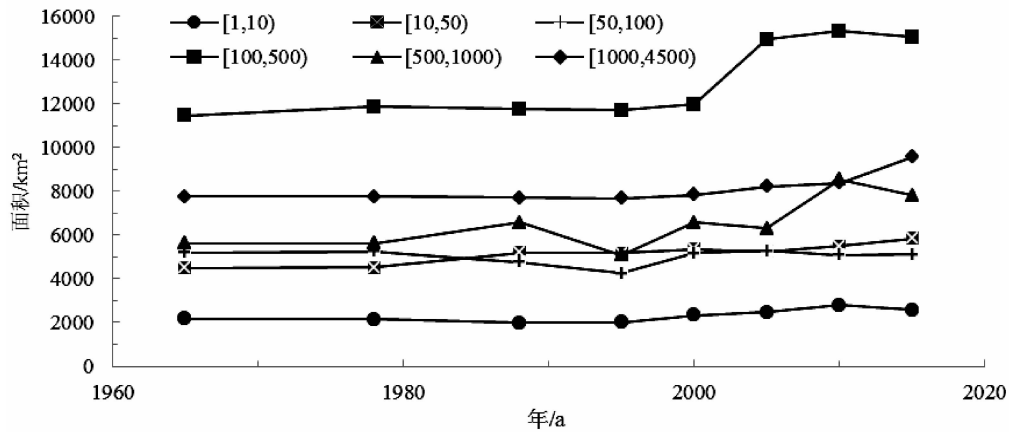


图5 青藏高原不同等级湖泊面积变化

Fig. 5 Changes of the lake areas at different area level in the Tibetan Plateau

3.1.2 不同海拔湖泊面积动态变化

对不同海拔的湖泊面积进行分析可知:4500 ~ 5000 m 海拔范围内的湖泊面积最大,其次为 4000 ~ 4500 m 和 3000 ~ 3500 m 海拔范围内的湖泊面积,3500 ~ 4000 m 海拔范围内的湖泊面积最小;从不同海拔高度的湖泊分布来看,大部分湖泊分布在 4500 ~ 5000 m 范围内;从变化趋势上来看,4500 ~ 5000 m 及 3000 m 海拔以下的湖泊面积变化较剧

烈,呈现波动中增长的趋势,其余海拔范围内的湖泊面积基本维持稳定(见图 6 和表 5)。

3.1.3 不同区域湖泊面积动态变化

通过对不同流域湖泊面积的变化情况进行分析发现:1960s—2015 年各个时间段之间湖泊面积发生变化(扩张或萎缩)的区域已经从 197 个流域持续增加到 234 个流域,表明越来越多的流域内的湖泊面积发生改变(见图 7)。对不同区域的湖泊面积

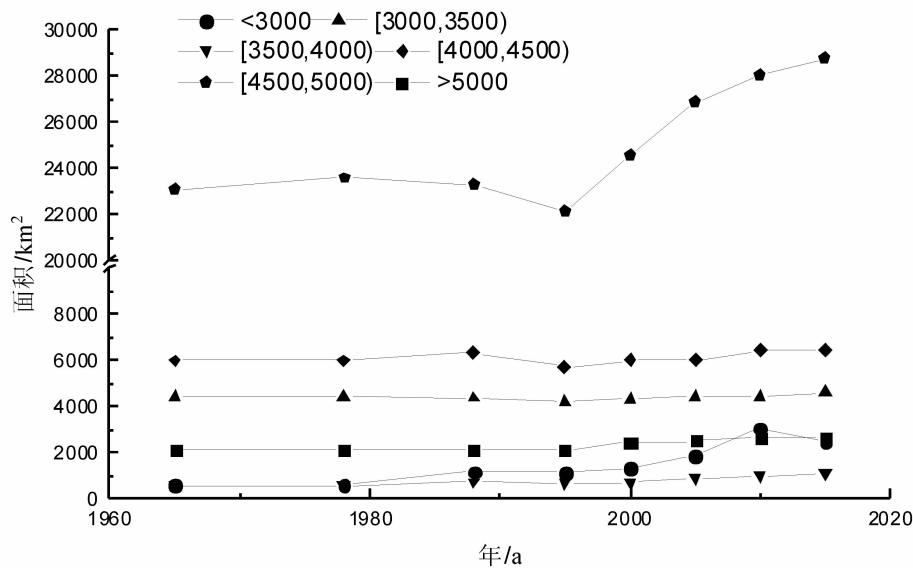


图 6 青藏高原不同海拔湖泊面积

Fig. 6 Tibetan Plateau lakes' areas at different altitudes

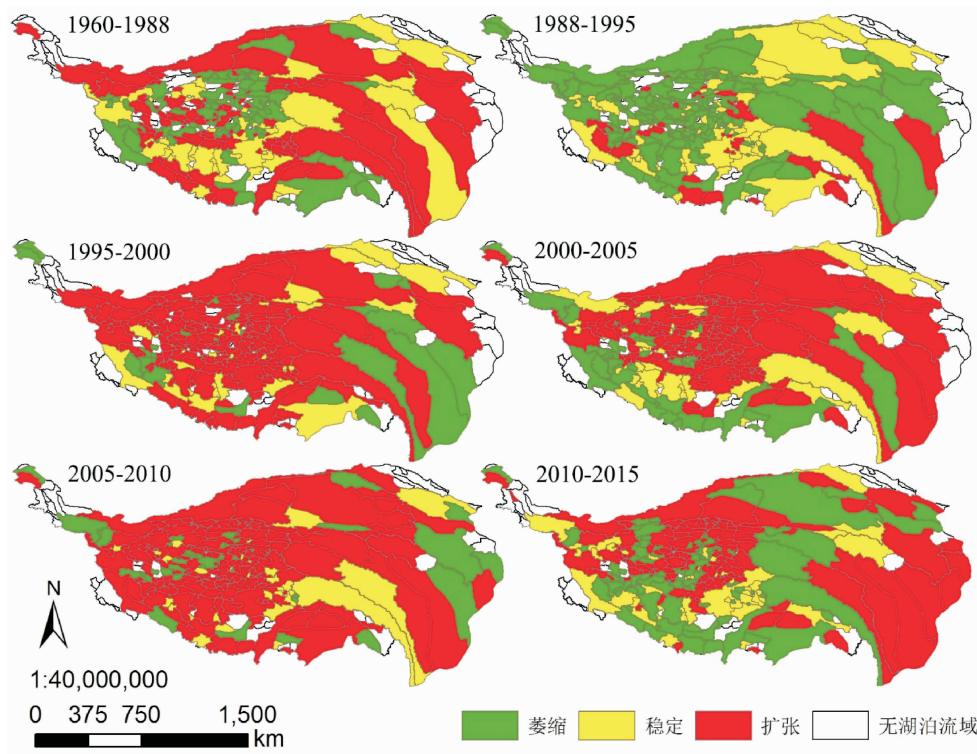


图 7 1960s—2015 年各流域湖泊面积变化情况

Fig. 7 Changes of the lake areas in each watershed in 1960s—2015

进行分析可知:西部地区的湖泊总面积最大,而且是湖泊面积发生改变的重点区域,1995 年之后西部地区湖泊面积呈持续增长趋势,即使在 2010—2015 年青藏高原湖泊总面积减小的情况下仍保持增长趋势;北部地区的湖泊总面积在 1960s—2010 年持续增长,在 2010—2015 年有所减小,但总体上呈现增

加趋势;东部地区的湖泊总面积占青藏高原湖泊总面积的比例仅次于西部地区,东部地区的湖泊面积总体上变化不大,但近年来湖泊面积呈现持续增加趋势;南部地区的湖泊总面积总体上变化不大,基本维持稳定(见表 5 及图 8)。

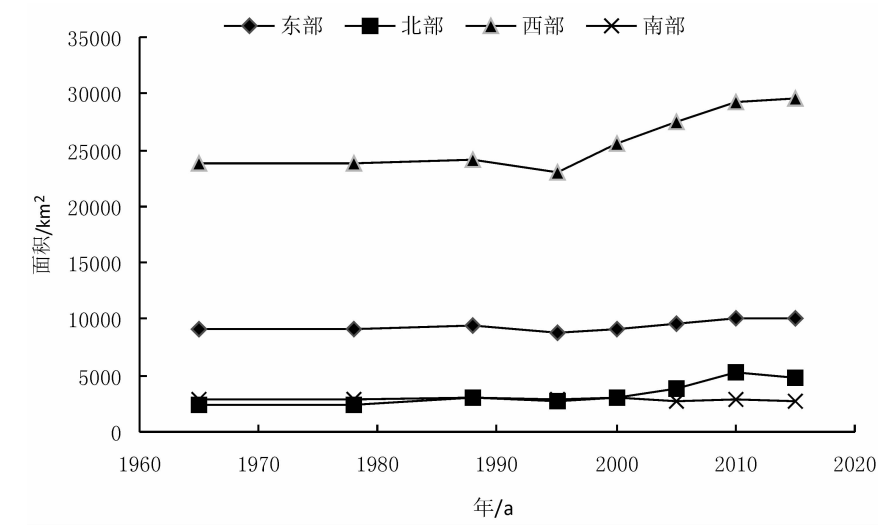


图8 青藏高原不同区域湖泊面积变化

Fig.8 Variations of the lake areas in different regions in the Tibetan Plateau

3.2 湖泊面积对气候变化的响应

根据青藏高原年平均气温、年降水量、年平均相对湿度、年平均风速及年蒸发量数据与湖泊总面积相关性分析表明(见表6),年平均气温、年降水量及年蒸发量与湖泊面积呈现显著的相关性。其中年平均气温与年降水量为正相关,年蒸发量为负相关,表明气温及降水量的增加将导致湖泊面积的增大,而蒸发量的增加将导致湖泊面积的减小。对研究区各个流域的湖泊面积同各气象因子的相关性分析发现:研究区边缘地区湖泊面积和年平均气温相关性显著,研究区中部地区湖泊面积和年平均气温、年降

水量及年蒸发量之间相关性显著,而研究区东北部及中西部部分地区湖泊面积和年平均气温及年蒸发量之间相关性显著,不同流域湖泊面积的显著性相关的气象因子空间分布见图9。

表6 各气象因子与湖泊面积变化相关性

Tab.6 Correlation between meteorological factors and the lake areas

	年平均 气温	年降 水量	年平均 相对湿度	年平均 风速	年蒸 发量
Spearman	0.905 **	0.755 *	0.562	-0.395	-0.714 *

注: * 为在 0.05 水平上显著相关; ** 为在 0.01 水平上显著相关。

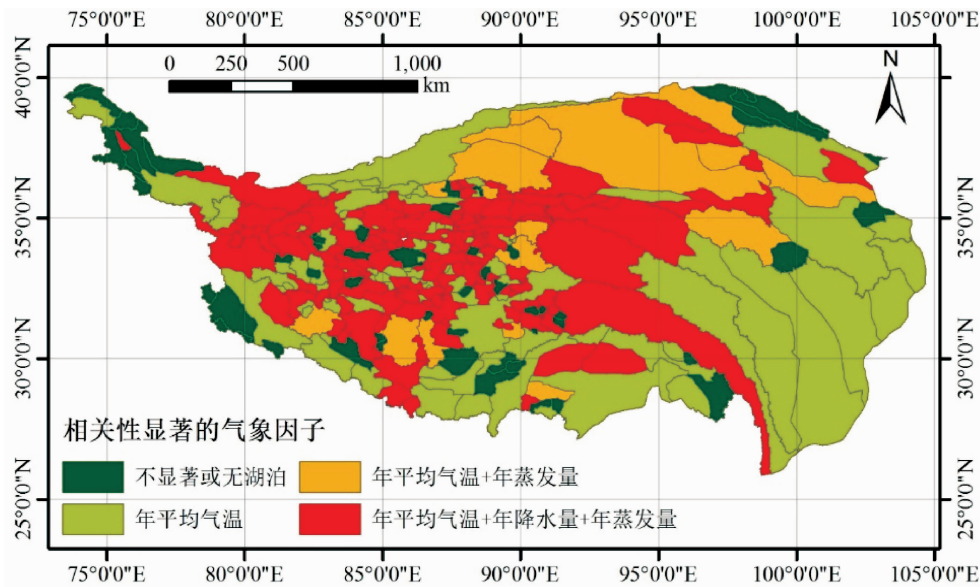


图9 不同流域湖泊面积显著相关的气象因子的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of meteorological factors with significant correlation of the lake areas in different watersheds

根据表 6 的相关性分析结果可知年平均气温、年降水量及年蒸发量 3 个气象与湖泊总面积相关性显著,由于年平均气温和年降水量有较强的共线性关系,因此只选择年平均气温和年蒸发量两个气象因子作为自变量,以各时期湖泊面积为因变量,建立多元线性回归方程,逐步回归分析结果显示年平均气温和年蒸发量是影响湖泊总面积变化的主要影响因素,青藏高原大于 1 km^2 湖泊的总面积和年平均气温是正相关的关系,与年蒸发量呈负相关关系,方程最终结果为:

$$A = 6864.12 \times T - 49.19 \times E + 25459.46 \quad (1)$$

式中: A 为湖泊面积(km^2); T 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$); E 为年蒸发量(mm)。调整后 R^2 为 0.93,且通过显著性水平检验($P < 0.05$),表明建立的回归方程有效。

4 结论与讨论

(1)1960 s—2015 年,青藏高原大于 1 km^2 的湖泊总面积呈先增加再减小然后增加的趋势;研究区 $100 \sim 500 \text{ km}^2$ 级别的湖泊总面积最大,其次为 1000 km^2 以上及 $500 \sim 1000 \text{ km}^2$ 级别的湖泊, $1 \sim 10 \text{ km}^2$ 级别的湖泊面积最小,各不同级别的湖泊总面积总体上呈上升趋势。其中 $10 \sim 50 \text{ km}^2$, $100 \sim 500 \text{ km}^2$,及 $500 \sim 1000 \text{ km}^2$ 的湖泊面积波动较大;研究区的湖泊主要集中在 $4500 \sim 5000 \text{ m}$ 海拔范围内,分布在 $4500 \sim 5000 \text{ m}$ 及 3000 m 以下的湖泊总面积总体上呈上升趋势,其他海拔范围内的湖泊总面积变化不大;研究区湖泊面积改变的区域空间上呈扩张趋势,越来越多流域的湖泊面积发生了改变,东部及南部地区的湖泊总面积基本维持稳定,西部和北部地区湖泊总面积呈现增长趋势。

(2)年平均气温、年降水量和年蒸发量同研究区湖泊面积存在显著性相关关系,其中年平均气温和年蒸发量是湖泊面积变化的主要影响因素。

(3)研究区的气象站分布不均匀,大部分气象站集中在东部地区,西部地区气象站极少,这使得本研究西部地区的精确度相对较低,在今后的工作中可以通过遥感手段获取更加精确的气象数据,进一步提高研究精度。同时除气象因素之外,冰川、积雪及冻土层等都对青藏高原湖泊面积的改变也有巨大影响^[25-30],但是由于未能收集到完整的冰川、积雪和冻土数据,无法完成这方面的研究,将在以后关注

其他研究者对这方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] YAO T, Thompson L G, MOSBRUGGER V, et al. Third pole environment (TPE) [J]. Environmental Development, 2012, 3: 52-64.
- [2] YANG Xiankun, LU Xixi. Drastic change in China's lakes and reservoirs over the past decades [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6041-6041.
- [3] 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 [J]. 科学通报, 2010, 55(18): 1789-1798. [ZHU Liping, XIE Manping, WU Yanhong. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau. Chinese Sci Bull, 2010, 55(18): 1294-1303.]
- [4] 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 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 494-502. [CHU Duo, PU Qiong, LABA Zhuoma, et al. Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40a [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(3): 494-502.]
- [5] 刘宝康, 卫旭丽, 杜玉娥, 等. 基于环境减灾卫星数据的青海湖面积动态 [J]. 草业科学, 2013, 30(2): 178-184. [LIU Baokang, WEI Xuli, DU Yue, et al. Dynamics of Qinghai Lake area based on environmental mitigation satellite data [J]. Pratacultural Science, 2013, 30(2): 178-184.]
- [6] 拉巴, 边多, 次珍, 等. 西藏玛旁雍错流域湖泊面积变化及成因分析 [J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 992-996. [LA Ba, BIAN Duo, CI Zhen, et al. Study on the change of lake area and its causes in the Mapangyong Co basin in Tibet [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 992-996.]
- [7] 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 [J]. 地理学报, 2010, 65(3): 313-319. [BIAN Duo, BIAN Baciren, LA Ba, et al. The response of water level of Selin Co to climate change during 1975—2008 [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(3): 313-319.]
- [8] 林乃峰, 沈渭寿, 张慧, 等. 近 35a 西藏那曲地区湖泊动态遥感与气候因素关联度分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 231-237. [LIN Naifeng, SHEN Weishou, ZHANG Hui, et al. Correlation degree analysis of meteorological elements and dynamic remote sensing of alpine lakes in Naqu region of Tibet in the past 35 years [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(3): 231-237.]
- [9] 张鑫. 基于多源遥感数据的青藏高原内陆湖泊动态变化研究 [D]. 西北农林科技大学, 2015. [ZHANG Xin. Dynamics changes of typical inland lakes on Tibetan Plateau using multi-sensor remote sensing data [D]. Northwest A&F University, 2015.]
- [10] 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 [J]. 地理学报, 2013, 68(7): 886-896. [YAO Xiaojun, LIU Shiyin, LI Long, et al. Spatial-temporal variations of lake area in Hoh Xil region in the past 40 years [J]. Acta

- Geographica Sinica, 2013, **68**(7):886–896.]
- [11] LI L, WANG W. The response of lake change to climate fluctuation in north Qinghai-Tibet Plateau in last 30 years [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, **19**(2): 131–142.
- [12] 董斯扬, 薛炯, 尤全刚, 等. 近40年青藏高原湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 535–544. [DONG Siyang, XUE Xian, YOU Quangang, et al. Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(4): 535–544.]
- [13] DOWNING J A. Emerging global role of small lakes and ponds; little things mean a lot [J]. Limnetica, 2010, **29**(1): 0009–24.
- [14] 杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 西藏高原近50年气温和降水时空变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(12): 167–172. [YANG Chunyan, SHEN Weishou, LIN Naifeng. Spatial and temporal variation characteristics of air temperature and precipitation in Tibet plateau in recent 50 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, **27**(12): 167–172.]
- [15] LIU X, CHEN B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades [J]. International journal of climatology, 2000, **20**(14): 1729–1742.
- [16] VERPOORTER C, KUTSER T, SEEKELL D A, et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery [J]. Geophysical Research Letters, 2014, **41**(18): 6396–6402.
- [7] WEI W, LONG D, YANG H, et al. A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014 [J]. Scientific Data, 2016, 3.
- [18] Science data center of Tibetan Plateau (<http://www.tpedatabase.cn>) DOI: 10.11888/Lake.tpe.249437.file.
- [19] 戴玉凤, 高杨, 张国庆, 等. 2003—2011年青藏高原佩枯错相对水量变化及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(3): 723–732. [DAI Yufeng, GAO Yang, ZHANG Guoqing, et al. Water volume change of the Paiku Co in the southern Tibetan Plateau and its response to climate change in 2003—2011 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(3): 723–732.]
- [20] 胡林涓, 彭定志, 张明月, 等. 雅鲁藏布江流域气象要素空间插值方法的比较与改进[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, **48**(5): 449–452. [HU Linjuan, PENG Dingzhi, ZHANG Mingyue, et al. Comparison and improvement of spatial interpolation methods of meteorological elements in the Brahmaputra Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, **48**(5): 449–452.]
- [21] 张强, 阮新, 熊安元. 近57年我国气温格点数据集的建立和质量评估[J]. 应用气象学报, 2009, **20**(4): 385–393. [ZHANG Qiang, RUAN Xin, XIONG Anyuan. Establishment and quality evaluation of temperature data set in China in recent 57 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, **20**(4): 385–393.]
- [22] VERPOORTER C, KUTSER T, TRANVIK L. Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data [J]. Limnol & Oceanogr. Methods, 2012, **10**(12): 1037–1050.
- [23] 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[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 311–320. [LI Junli, SHENG Yongwei, LUO Jiancheng, et al. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(3): 311–320.]
- [24] LEI Y B, ZHANG H C, WANG S, et al. Change in lake area of Zige Tang Co on Central Tibetan Plateau since the 1970s and its mechanisms [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(1): 48–54.
- [25] 车涛, 李新, P. K. Mool, 等. 希夏邦马峰东坡冰川与冰川湖泊变化遥感监测[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(6): 801–805. [CHE Tao, LI Xin, P K Mool, et al. Monitoring glaciers and associated glacier lakes on the east slopes of mount Xixiabangma from Remote Sensing images [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(6): 801–805.]
- [26] YE Q, KANG S, CHEN F, et al. Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies [J]. Journal of Glaciology, 2006, **52**(179): 537–545.
- [27] LIU J, WANG S Y, YU S M, et al. Climate warming and growth of high-elevation inland lakes on the Tibetan Plateau. [J]. Global & Planetary Change, 2009, **67**(3–4): 209–217.
- [28] LIU J, KANG S, GONG T, et al. Growth of a high-elevation large inland lake, associated with climate change and permafrost degradation in Tibet (SCI) [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2010, **14**(3): 481–489.
- [29] 鲁安新. 青藏高原冰川与湖泊现代变化关系研究[D]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006. [LU Anxin. Study on the relationship between glacier and lake fluctuations in the Qinghai-Tibetan Plateau [D]. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2006.]
- [30] 类延斌, 张虎才, 王甦, 等. 青藏高原中部兹格塘错1970年来的湖面变化及原因初探[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(1): 48–54. [LEI Yanbin, ZHANG Hucai, WANG Sheng, et al. Change in lake area of Zige Tangco on central Tibetan Plateau since the 1970s and its mechanisms [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2009, **31**(1): 48–54.]

Dynamic Change of Lake Area over the Tibetan Plateau and Its Response to Climate Change

LIANG Bin, QI Shi^{*}, LI Zhiyong, LI Yutong, CHEN Jianhui

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the change of the total area of lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, in this research RS and GIS techniques were used to extract the data of the lakes with areas larger than 1 km² in the Qinghai-Tibet Plateau from 1960s to 2015, and the dynamic changes of the lake areas over the past 50 years were analyzed. Combined with the relevant meteorological data, it concluded the main meteorological factors affecting the changes of lake areas through the analysis of relevance and regression. The results showed that: (1) in the overall process of warming and humidification of the Qinghai-Xizang Plateau, the total area of lakes greater than 1 km² showed a trend of increase-decrease-accelerate. From 1960 s to 2015, the total area had increased by 9138.60 km² with a growth rate of 23.90%. (2) The total area of lakes with areas between 100 ~ 500 km² accounted for the largest proportion in all lakes in the Qinghai-Tibet Plateau. The total area of lakes at different area level generally showed an upward trend. (3) Lakes within the altitude range of 4500 ~ 5000 m in the Tibetan Plateau occupied the biggest total area, whereas the lakes within the altitude range of 4500 ~ 5000 m and those below 3000 m sea level presented relatively drastic changes in areas, showing an increasing trend with fluctuation. The lakes within the remaining altitude ranges generally remained stable. (4) The total area of the lakes in the western and northern Tibetan Plateau showed an overall growth trend, but in the eastern and southern regions it remained basically stable, and the changes in the entire area of the lakes in the Qinghai-Tibet Plateau revealed a spatial expansion trend. (5) The annual mean temperature, annual precipitation and annual evaporation had a significant correlation with the lake areas. There was a significant correlation between the lake areas and annual average temperature in the border area of the study area. The lake areas in the central area of the study area had a significant correlation with the average temperature, annual precipitation, and annual evaporation. The areas of the lakes in the northeastern part of the study area and part of the central and western regions were significantly correlated with the annual average temperature and annual evaporation. According to the regression analysis on meteorological factors and the total lake area, changes in annual average temperature and annual evaporation were responsible for the changes in the total area of lakes in the Tibetan Plateau. This study fills the research gap on the dynamic changes of lake areas in the Tibetan Plateau from perspective of long time series and multi-scale, and the lake data obtained in this study can provide reference to other researchers.

Key words: Tibetan Plateau; lake; dynamic change; climate change