

青藏高原湖泊湖面变迁及影响因素

闫立娟^{1,2}, 郑绵平², 齐路晶³

1. 中国地质科学院, 北京 100037

2. 中国地质科学院矿产资源研究所; 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

3. 防灾科技学院, 三河 065201

摘要 湖泊对气候波动有敏感记录。以地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术为基础,从20世纪70年代、90年代、2000年前后和2010年前后4期Landsat遥感影像中,提取青藏高原所有湖泊边界信息,建立青藏高原湖泊空间数据库,并收集了青藏高原47个气象站的年平均气温和年降雨量资料(1961—2010),研究青藏高原湖泊湖面变迁及其影响因素。结果表明,1973—2010年,青藏高原湖泊个数和总面积呈显著增加的趋势;青藏高原湖泊湖面变迁主要受气温升高、降雨量增加和蒸发量减少的影响;此外,影响青藏高原湖泊湖面动态变化的因素还有冰川分布、人类活动、湖盆形状、补给和排泄区等。

关键词 青藏高原;湖泊;湖面变迁

青藏高原面积约250万km²,平均海拔4000~5000 m,是中国最大、世界平均海拔最高的高原。青藏高原是中国湖泊的主要分布区之一,依据本课题组的遥感解译结果,2010年前后,青藏高原湖泊显著扩张^[1-4],共有面积0.5 km²以上的湖泊1715个(不包括干盐湖和干涸湖泊),总面积45240.51 km²,约占中国湖泊总面积的56%。这一时期,青藏高原湖泊总面积比20世纪70年代增长了约34%。

湖泊作为陆地水圈的组成部分,参与自然界的水分循环,对气候波动极为敏感,是揭示全球气候变化与区域响应的重要信息载体^[5-6],是气候环境的记录器^[7]。青藏高原上分布着大量的高山湖泊,湖泊水位和面积是气候变化和变异的指示器,内陆湖表现得更为明显。这些高山地区的水文环境受人类活动的影响较小,对其动态变化的监测,是研究青藏高原气候环境变化的重要组成部分。本文以地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术为基础,依据1973—2010年遥感调查和气象观测数据,研究青藏高原湖面动态变化特征及其影响因素。

1 数据与方法

1.1 遥感影像

收集了覆盖青藏高原的20世纪70年代、90年代、2000年

前后和2010年前后4期Landsat遥感影像共531景。所有遥感影像无云或有少量云。

对遥感影像进行预处理和假彩色合成,作为矢量化的底图。逐幅扫描,矢量化所有湖泊边界信息,建立了湖泊空间数据库。湖泊矢量化软件选用ArcGIS和ENVI。建立湖泊空间数据库时,投影坐标选用Asia_Lambert_Conformal_Conic,中央经线为110°,双标准纬线为25°和47°。

1.2 气象数据

为了精确分析中国青藏高原的气候变化特征,收集了中国气象科学数据共享服务网提供的青藏高原47个气象站的年平均气温和年降雨量资料。采用最小二乘法计算气温倾向率、降雨量倾向率,分析了不同时期气温和降雨量变化情况。

1.3 青藏高原湖泊个数及面积

以20世纪70年代、90年代、2000年前后和2010年前后4期遥感数据为底图,建立了4期湖泊空间数据库。青藏高原各个时期的湖泊个数和总面积如表1所示,其中,2010年前后青藏高原面积大于1 km²的湖泊共有1153个,总面积44840.16 km²。青藏高原面积大于1 km²的湖泊总面积从20世纪70年代至90年代增加了13.38%,从20世纪90年代至2000年前后增加了4.72%,从2000年前后至2010年前后增加

收稿日期:2016-11-10;修回日期:2016-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(U1407207,40531002,41603048);中国地质调查局地质调查项目(1212011120046)

作者简介:闫立娟,博士,研究方向为遥感应用与湖泊环境,电子信箱:yanlijuan@126.com;郑绵平(通信作者),中国工程院院士,研究方向为盐湖学与盐类矿床地质学,电子信箱:zhengmp2010@126.com

引用格式:闫立娟,郑绵平,齐路晶. 青藏高原湖泊湖面变迁及影响因素[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 83-88; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.06.010

了12.88%。研究表明,在1973—2010年的近40年间,西藏湖泊个数和总面积均呈不断上升的趋势。

2010年前后,湖泊显著扩张,面积大于200 km²的湖泊已达46个,总面积25605.41 km²,如表2所示。

表1 青藏高原湖泊统计信息

Table 1 Statistical data of lakes in Tibetan Plateau

面积/km ²	20世纪70年代		20世纪90年代		2000年前后		2010年前后	
	数量	总面积/km ²	数量	总面积/km ²	数量	总面积/km ²	数量	总面积/km ²
≥500	11	12769.16	10	12612.73	10	12859.77	12	14925.70
≥100	59	23368.41	74	26244.46	76	26903.62	93	31593.30
≥50	124	28017.64	140	30938.51	149	31901.80	167	36852.93
≥10	291	31985.45	352	36080.31	382	37351.12	403	42430.49
≥1	731	33457.60	934	37932.56	1112	39723.20	1153	44840.16

表2 青藏高原面积大于200 km²湖泊面积动态变化

Table 2 Dynamic changes of surface area of lakes with area larger than 200 km² in Tibetan Plateau

编号	湖泊	20世纪70年代		20世纪90年代		2000年前后		2010年前后	
		年代面积/km ²	时间	年代面积/km ²	时间	后面积/km ²	时间	后面积/km ²	时间
1	青海湖*	4475.10	1977-02-22	4363.15	1995-08-21	4306.10	2000-08-10	4320.31	2009-08-11
2	色林错	1132.76	1976-12-19	1761.60	1990-06-30	1846.67	1999-09-19	2349.46	2010-08-08
3	纳木错	1932.89	1976-12-17	1964.57	1991-09-14	1981.77	2000-12-19	2028.78	2009-10-17
4	扎日南木错	900.24	1976-11-15	986.96	1990-11-03	975.61	2001-09-22	1006.83	2009-06-16
5	当惹雍错	813.09	1977-01-07	834.08	1990-11-03	843.57	2001-09-22	841.83	2009-06-16
6	班公错	618.10	1977-04-13	629.09	1989-10-18	638.64	2000-10-08	679.83	2010-06-22
7	鄂陵湖*	612.51	1976-11-26	613.69	1994-07-24	621.59	2001-07-03	651.30	2009-07-17
8	哈拉湖*	598.59	1973-10-28	589.42	1995-08-19	590.46	1999-09-23	598.56	2009-08-09
9	乌兰乌拉湖*	—	—	483.40	1994-12-18	537.17	2001-09-24	591.13	2009-08-05
10	羊卓雍湖	617.12	1976-12-17	588.62	1990-11-14	610.45	2000-11-17	583.23	2009-10-17
11	赤布张错*	480.34	1973-06-10	472.01	1990-05-29	486.01	2000-10-07	543.96	2009-08-05
12	扎陵湖*	527.20	1976-11-26	522.74	1994-07-24	525.00	2001-07-03	525.04	2009-07-17
13	昂拉仁错	517.45	1977-02-15	507.78	1990-11-17	498.82	2001-10-22	501.42	2009-09-18
14	塔若错	487.24	1976-11-16	482.06	1990-11-10	485.39	2000-10-28	488.83	2009-09-18
15	多尔索洞错	366.65	1976-12-19	360.41	1990-05-29	393.04	2000-10-07	476.31	2009-08-05
16	多格错仁	—	—	373.46	1992-09-30	395.48	1999-08-25	476.00	2009-08-28
17	格仁错	552.20	1976-12-19	478.24	1992-09-30	478.79	2000-11-08	473.78	2010-05-27
18	昂孜错	421.01	1977-01-07	389.88	1992-09-30	406.43	2000-10-30	461.85	2009-10-15
19	玛旁雍错	414.75	1976-12-06	414.53	1992-10-23	413.17	2001-10-13	415.92	2010-09-28
20	西金乌兰湖*	382.79	1976-11-12	299.34	1994-12-18	279.99	2001-09-24	413.94	2009-08-05
21	鲁玛江东错	350.92	1977-03-06	350.71	1992-10-12	340.33	2001-10-20	372.22	2009-08-15
22	李家峡*	0	1977-02-22	186.86	1987-08-15	303.56	1999-08-01	371.70	2009-09-21
23	吴如错	341.94	1976-12-19	346.53	1992-09-30	364.67	2000-10-30	348.83	2010-05-27
24	多格错仁强错	—	—	200.83	1990-11-12	211.50	1999-08-25	343.20	2009-08-28
25	错鄂-时补错	267.18	1976-12-19	267.87	1990-06-30	285.42	2000-10-30	336.94	2010-08-08
26	南霍布逊湖*	8.12	1973-12-22	49.20	1989-05-13	165.20	2000-08-10	336.83	2009-10-03
27	可可西里湖*	310.73	1976-11-30	309.01	1989-11-12	307.56	2000-10-07	324.14	2009-05-01
28	普莫雍错	282.82	1976-12-17	284.91	1990-11-14	293.09	2000-11-17	292.02	2009-10-17
29	达则错	256.30	1976-12-06	250.75	1992-09-30	244.58	2000-10-30	291.73	2010-05-27
30	库赛湖*	272.28	1976-11-11	258.43	1994-10-24	262.11	2001-01-13	289.42	2010-07-25

注:*表示湖泊在青海,其他表示湖泊在西藏,下表同。

表2 青藏高原面积大于200 km²湖泊面积动态变化

(续表)

Table 2 Dynamic changes of surface area of lakes with area larger than 200 km² in Tibetan Plateau

编号	湖泊	20世纪70年代		20世纪90年代		2000年前后		2010年前后	
		面积/km ²	时间	面积/km ²	时间	面积/km ²	时间	面积/km ²	时间
31	佩枯错	279.06	1976-12-03	279.32	1988-10-12	276.57	2000-11-22	271.01	2009-10-22
32	东台吉乃尔*	251.74	1972-09-30	260.12	1990-08-19	195.70	2001-10-28	270.54	2009-10-10
33	卓乃错*	261.34	1976-11-30	256.91	1994-10-24	257.48	2002-02-15	265.50	2009-05-01
34	拉昂错	270.12	1976-12-06	271.54	1992-10-23	267.40	2001-10-13	262.59	2010-09-28
35	巴不错	187.57	1977-02-28	201.36	1992-08-31	207.41	2001-06-13	254.35	2009-08-30
36	勒斜武担湖*	—	—	225.21	1990-11-05	229.36	2000-10-07	252.94	2009-05-01
37	一里坪盐湖*	63.24	1972-09-30	84.13	1992-07-30	0.00	2002-05-05	251.09	2008-09-28
38	郭扎错	252.34	1977-02-17	249.67	1991-10-17	250.64	2001-10-20	246.09	2009-08-15
39	扎布耶茶卡	140.75	1976-11-16	219.93	1989-10-22	246.28	2000-10-28	245.87	2009-09-18
40	错那	174.61	1976-12-17	225.51	1992-08-31	226.42	2001-06-13	239.56	2009-08-30
41	兹格塘错	196.86	1976-12-17	207.67	1992-08-31	213.84	2001-06-13	234.88	2009-08-30
42	冬给措纳湖*	236.07	1976-11-25	236.81	1994-07-24	228.75	2001-07-03	234.82	2009-07-17
43	达布逊湖*	271.45	1973-12-22	288.95	1989-05-13	165.20	2000-08-10	228.71	2009-10-03
44	错仁德加*	172.04	1976-11-11	199.85	1992-08-15	210.75	2001-10-03	211.13	2009-08-30
45	许如错	209.08	1977-01-07	210.19	1990-11-03	209.50	2001-09-22	209.45	2009-06-16
46	若拉湖	96.92	1976-12-02	70.50	1990-11-12	104.79	1999-08-25	200.30	2009-08-12

2 青藏高原湖泊面积动态变化

提取青藏高原4期所有湖泊的边界信息,并选择适合动态变化分析的面积数据,分析1973—2010年青藏高原湖泊的涨缩情况。

2.1 20世纪70年代至90年代

20世纪90年代,青藏高原面积大于10 km²的湖泊共352个,总面积36080.31 km²,其中241个湖泊适合做动态变化分析。从20世纪70年代至90年代,有128个湖泊萎缩,每湖面积平均萎缩7.94 km²;有113个湖泊扩张,每湖面积平均扩张21.09 km²。被分析湖泊总面积增加了1366.97 km²,占90年代湖泊总面积的3.58%。萎缩湖泊主要集中在西藏北部、西

藏中部、藏南地区、青海羌塘盆地和青海东部,其余地区湖泊扩张,如图1(a)所示。

2.2 20世纪90年代至2000年前后

2000年前后,研究区面积大于10 km²的湖泊共382个,总面积37351.12 km²,其中291个适合做动态变化分析。从20世纪90年代至2000年前后,有224个湖泊面积增加,每湖面积平均增加6.97 km²;有67个湖泊面积减小,每湖面积平均减小11.44 km²。被分析湖泊总面积增加了795.65 km²,占2000年前后湖泊总面积的2.01%。青海北部湖泊呈萎缩的趋势,其余地区呈扩张趋势,如图1(b)所示。

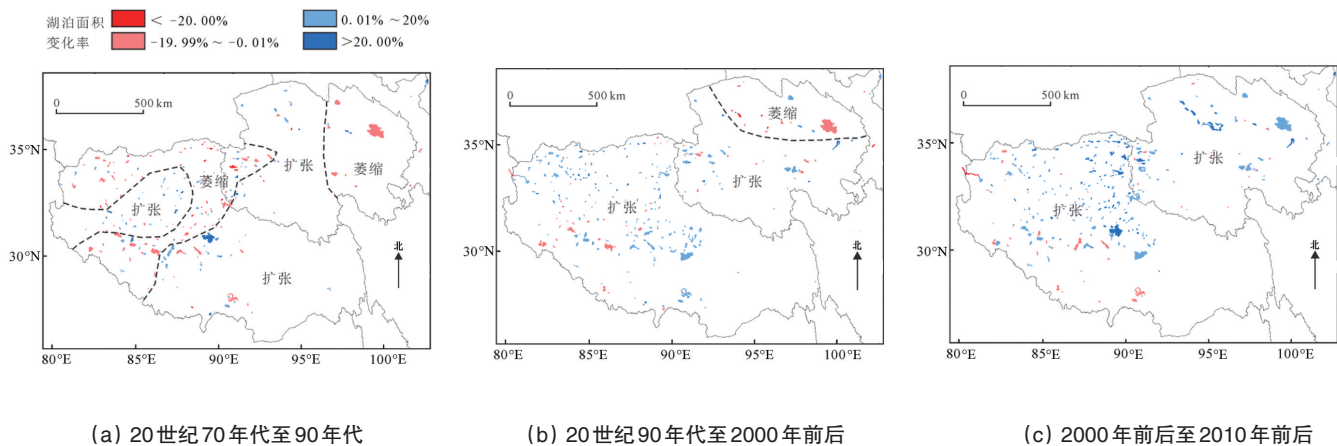


图1 青藏高原近年来湖泊面积动态变化^[8]

Fig. 1 Dynamic changes of lake surface area in Tibetan Plateau in recent years

2.3 2000年至2010年前后

2010年前后,研究区面积大于10 km²的湖泊共403个,总面积42430.49 km²,其中295个适合做动态变化分析。从2000年前后至2010年前后,有251个湖泊面积增加,每湖面积平均增加19.58 km²;有44个湖泊面积减小,每湖面积平均减小3.71 km²。被分析湖泊总面积增加了4750.54 km²,占2010年前后湖泊总面积的10.50%。除藏南外,青藏高原湖泊基本上呈现全面扩张的趋势,如图1(c)所示。

3 青藏高原湖泊变迁的影响因素

地质构造是湖盆形成的基础,控制了湖泊的空间分布和区域宏观特征^[9]。青藏高原上湖泊星罗棋布,大多沿大断裂发育,呈条带状分布,加上高寒的气候条件,多为咸水湖和盐湖^[10]。短时间尺度的湖泊变迁主要影响因素如下。

3.1 气候

在短时间尺度内,气候条件对湖泊的塑造更为直接。在气候的诸要素中,温度、降雨量和蒸发量对湖泊的影响最为显著,降雨量和蒸发量的改变直接控制了湖泊进出水量的平衡状态,表现为湖泊水体的收缩和扩张。

3.1.1 气温

已有研究表明,近年来青藏高原气温呈升高的趋势,最低气温的升高速度快于最高气温的升高速度^[11-14]。据青藏高原47个气象站观测数据,1961—2010年青海、西藏的平均气温分别为1.35℃和4.57℃,气温倾向率分别为0.360℃/10a和0.328℃/10a。1961—1970、1971—1990、1991—2000、2001—2010年,青藏高原的平均气温分别为1.87℃、2.31℃、2.66℃和3.37℃。平均气温呈现不断升高的趋势。

气温升高导致研究区内冰川大面积融化,使以冰雪融水为补给源的湖泊水量增加。

3.1.2 降雨量

青藏高原的降雨量分布不均匀,东多西少,南多北少。近40年来,青藏高原降雨量总体上略有增加,但其分布和变化具有不均衡性。1961—2010年,青海、西藏的年降雨量分别为361.19 mm和470.21 mm,降雨量倾向率分别为6.39 mm/10a和12.56 mm/10a。1961—1970年、1971—1990年、1991—2000年、2001—2010年,青海的年降雨量分别为274.96、287.46、281.98和309.57 mm,西藏的年降雨量分别为442.62、467.65、486.73和486.41 mm。总体上,青藏高原的降雨量呈增加的趋势。

降雨量增加使以大气降雨及其径流为补给源的湖泊呈扩张的趋势。

3.1.3 蒸发量

蒸发量直接影响着湖泊水量的散失。前人研究结果表明,中国蒸发量总体上呈下降趋势^[15-20],1955—2001年蒸发皿蒸发量以-34.12mm/10a速度递减。青藏高原20世纪60、70、80、90年代的蒸发量分别为1871.57、1817.17、1724.29和

1704.85 mm,蒸发量的下降幅度大于全国平均水平^[21]。

蒸发量的下降直接减少了湖泊水量的散失,有利于湖泊面积的增加。

3.2 冰川

青藏高原冰川广布,为众多水系和湖泊的发源地。青藏高原为中国冰川分布集中地区。在全球气候变暖的大环境下,冰川直接或间接地影响着湖泊的变迁。近几十年来,青藏高原冰川末端变化以退缩为主,且退缩幅度正在加剧,20世纪70年代中后期至2010年前后,高原冰川面积减少17%^[22]。1973—2009年,各拉丹东雪山面积减少近60 km²,呈现明显退缩的趋势。其冰雪融水为赤布张错的主要补给源之一,在各拉丹东冰雪融水径流的影响下,赤布张错面积显著增加,此消彼长,与冰川面积变化呈明显负相关^[23]。

3.3 人类活动

人类活动直接影响着湖泊等水体的涨缩,大致分为农业灌溉、人工水库和盐湖工业开发等。水资源丰富、气候湿润的地区通常农业较发达,一些淡水湖常用于农业灌溉。人工水库是指在山沟或河流的狭口处建造拦河坝形成的人工湖泊,可用于灌溉、发电、防洪等,其水位变化完全为人为控制,如青海省的李家峡等。青高原因盐湖资源丰富,很多盐湖已开始工业开发,如青海的大柴旦湖、达布逊盐湖等。遥感解译表明,2009—2013年,大柴旦湖的面积已从35.54 km²增加到72.77 km²,这主要是由盐湖开发过程中注入淡水引起的。1976—2009年,在升温引起的冰雪融水增加和降雨量增加条件的影响下,扎布耶盐湖面积呈显著扩张的趋势。但据最新遥感资料,2009年之后,在盐湖给补量增加条件下,湖泊水位反而出现了下降的现象,这主要与工业开发中的晒卤加速了湖水蒸发有关^[9]。

3.4 湖盆形状

湖盆形状与构造活动的性质和强度密切相关。青藏高原,以整体的强烈隆升为特色,湖泊大多沿断裂发育^[24-26]。一般湖水较深,湖盆陡峭的湖泊面积对补给水量的变化较迟钝。同一区域的湖泊,因湖盆形状不同,其面积对补给水量的响应速度不同。

3.5 补给和排泄区

青藏高原湖泊多为内陆湖,有独立的集水区,湖水不外泄。湖泊面积变化只受补给源的影响,水循环相对简单。而外流湖的水位波动影响因素较多,除受气候等因素的影响外,还受上游补给区和下游排泄区的影响,如黄河源区的扎陵湖和鄂陵湖。

4 结论

总体上,1973—2010年,青藏高原湖泊个数和总面积呈增加的趋势,但不同区域具有差异性。气候为影响青藏高原湖泊动态变化的主要因素:气温升高,使以冰雪融水为主要补给源的湖泊补给量增加,湖泊扩张;降雨量增加,使以大气

降雨和地表径流为主要补给源的湖泊水量增加;蒸发量直接影响着湖泊水量的散失。此外,影响青藏高原湖泊面积的因素还有冰川、人类活动、湖盆形状、补给和排泄区等。

参考文献(References)

- [1] Zheng M P, Qi W, Jiang X F, et al. Trend of salt lake changes in the background of global warming and tactics for adaptation to the changes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(3): 795-807.
- [2] 闫立娟, 齐文. 青藏高原湖泊遥感信息提取及湖面动态变化趋势研究[J]. *地球学报*, 2012, 33(1): 65-74.
Yan Lijuan, Qi Wen. Lakes in Tibetan Plateau extraction from remote sensing and their dynamic changes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(1): 65-74.
- [3] Sun F D, Zhao Y Y, Gong P, et al. Monitoring dynamic changes of global land cover types: Fluctuations of major lakes in China every 8 days during 2000-2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(2): 171-189.
- [4] Wan W, Xiao P F, Feng X Z, et al. Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(10): 1021-1035.
- [5] Liu J S, Wang S Y, Yu S M, et al. Climate warming and growth of high-elevation inland lakes on the Tibetan Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(3/4): 209-217.
- [6] 闫立娟, 郑绵平. 我国蒙新地区近40年来湖泊动态变化与气候耦合[J]. *地球学报*, 2014, 35(4): 463-472.
Yan Lijuan, Zheng Mianping. Dynamic changes of lakes in Inner Mongolia-Xinjiang region and the climate interaction in the past forty years[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(4): 463-472.
- [7] Zheng M P, Zhao Y Y, Liu J Y. Palaeoclimatic indicators of China's quaternary saline lake sediments and hydrochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(2): 259-265.
- [8] 闫立娟, 郑绵平, 魏乐军. 近40年来青藏高原湖泊变迁及其对气候变化的响应[J]. *地学前缘*, 2016, 23(4): 310-323.
Yan Lijuan, Zheng Mianping, Wei Lejun. Change of the lakes in Tibetan plateau and its response to climate in the past forty years[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 310-323.
- [9] 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 9-20.
Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 9-20.
- [10] 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 8-9.
Shen Ji, Xue Bin, Wu Jinglu, et al. Lake sedimentary and environmental changes[M]. Beijing: Science Press, 2010: 8-9.
- [11] Du J. Change of temperature in Tibetan Plateau from 1961-2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(33): 690-698.
- [12] Niu T, Chen L X, Zhou Z J. The characteristics of climate change over the Tibetan Plateau in the last 40 years and the detection of climatic jumps[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(2): 193-203.
- [13] Shi Y F, Shen Y P, Kang E, et al. Recent and future climate change in Northwest China[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(3/4): 379-393.
- [14] You Q L, Kang S C, Pepin N, et al. Climate warming and associated changes in atmospheric circulation in the eastern and central Tibetan Plateau from a homogenized dataset[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 72(1): 11-24.
- [15] 郭任宏, 金晓媚, 王晓林, 等. 基于中等分辨率遥感数据的柴达木盆地实际蒸散量的计算[J]. *地学前缘*, 2014, 21(4): 107-114.
Guo Renhong, Jin Xiaomei, Wang Xiaolin, et al. Actual evapotranspiration estimation in Qaidam Basin based on moderate resolution imaging[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4): 107-114.
- [16] 杜军, 边多, 鲍建华, 等. 藏北高原蒸发皿蒸发量及其影响因素的变化特征[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 786-791.
Du Jun, Bian Duo, Bao Jianhua, et al. Changes of pan evaporations and its impact factors over northern Tibet in 1971-2006[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 786-791.
- [17] 杜军, 房世波, 唐小萍, 等. 1981-2010年西藏怒江流域潜在蒸发量的时空变化[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(1): 35-42.
Du Jun, Fang Shibo, Tang Xiaoping, et al. Spatial and temporal changes of potential evaporation over the Nujiang River Basin in Tibet during 1981-2010[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2012, 8(1): 35-42.
- [18] 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近50年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 259-269.
Liu Min, Shen Yanjun, Zeng Yan, et al. Changing trend of pan evaporation and its cause over the past 50 years in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(3): 259-269.
- [19] 李景玉, 张志果, 徐宗学, 等. 影响西藏地区蒸发皿蒸发量的主要气象因素分析[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2009, 4(4): 20-29.
Li Jingyu, Zhang Zhiguo, Xu Zongxue, et al. Major meteorological factors affecting pan evaporation in the Tibetan region[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2009, 4(4): 20-29.
- [20] 李岳坦, 李小雁, 崔步礼, 等. 青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量变化(1961-2007年)及趋势分析[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(4): 616-624.
Li Yuetan, Li Xiaoyan, Cui Buli, et al. Trend of pan evaporation and its impact factors over lake Qinghai Basin from 1961 to 2007[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(4): 616-624.
- [21] 申双和, 盛琼. 45年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J]. *气象学报*, 2008, 66(3): 452-460.
Shen Shuanghe, Sheng Qiong. Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(3): 452-460.
- [22] 李治国. 近50 a 气候变化背景下青藏高原冰川和湖泊变化[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1431-1443.
Li Zhiguo. Glacier and lake changes across the Tibetan Plateau during the past 50 years of climate change[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1431-1443.
- [23] Yan L J, Zheng M P. The response of lake variations to climate change in the past forty years: A case study of the northeastern Tibetan Plateau and adjacent areas, China[J]. *Quaternary International*, 2015, 371: 31-48.
- [24] 郑绵平, 向军, 魏新俊, 等. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989: 192-236.
Zheng Mingping, Xiang Jun, Wei Xinjun, et al. Saline lakes on the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1989: 192-236.
- [25] 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 等. 中国盐湖志[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 29-35.
Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Xu Chang, et al. Saline lakes in China

- [M]. Beijing: Science Press, 2002: 29-35.
[26] 李均力, 盛永伟. 1976—2009年青藏高原内陆湖泊变化的时空格局与过程[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 571-581.

Li Junli, Sheng Yongwei. Spatiotemporal pattern and process of inland lake change in the Qinghai-Tibetan Plateau during the period of 1976 - 2009[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 571-581.

Surface area variations of lakes in the Tibetan Plateau and their influencing factors

YAN Lijuan^{1,2}, ZHENG Mianping², QI Lujing³

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS Beijing 100037, China
3. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China

Abstract The levels and the surface areas of lakes are indicators of the climate change and the climate variability. In order to assess the surface area variations of lakes in the Tibetan Plateau and their influencing factors, the surface extent of all lakes in the Tibetan Plateau is extracted from the Landsat remote sensing images of the 1970's, the 1990's, around 2000 and 2010, to develop the lake spatial database based on the RS and GIS technologies. Moreover, the annual average temperature and the annual precipitation from 1961 to 2010 at 47 weather stations are collected. It is shown that the number and the total surface area of the lakes in the Tibetan Plateau increase significantly from 1973 to 2010. The surface area variations of the lakes are mainly influenced by the increasing temperature and precipitation, as well as the decreasing evaporation. Additionally, there are other factors responsible for the changes, i.e., the glaciers, the human activities, the lake basin shape, and the recharge and discharge areas.

Keywords Tibetan plateau; lake; lake surface area variations

(责任编辑 韩星明)