

近 30 年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析*

万 玮¹, 肖鹏峰¹, 冯学智¹, 李 晖¹, 马荣华², 段洪涛²

(1: 南京大学地理信息科学系, 南京 210093)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要: 以多时相 Landsat TM/ETM+ 影像、CBERS CCD 影像和早期 1:10 万地形图为数据源, 选取羌塘高原东南部 22 个面积较大的湖泊作为研究对象, 借鉴城市扩展研究的思路, 引入变化强度指数和象限方位分析等方法, 从面积、强度和空间分异特征等多个方面对该区湖泊近 30 年来的变化进行分析。结果表明, 1975–2005 年间研究区湖泊呈扩张趋势, 总面积共扩大了 1162.19 km²; 色林错扩张面积最多, 达 510.02 km², 以北部扩张最为明显; 国加轮湖扩张强度最大; 造成区域内湖泊面积扩张的主要因素是冰雪融水量的增加、降水量的增多以及蒸发量的减少。

关键词: 湖泊变化; 羌塘地区; 青藏高原; 遥感

Remote sensing analysis for changes of lakes in the southeast of Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years

WAN Wei¹, XIAO Pengfeng¹, FENG Xuezhì¹, LI Hui¹, MA Ronghua² & DUAN Hongtao²

(1: *Department of Geographical Information Science, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China*)

(2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

Abstract: This study presented a remote sensing/GIS-based method to monitor changes of lakes in the southeast of Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau. The Landsat TM/ETM+ and CBERS CCD images together with 1:100000 topographic maps were applied to research 22 lakes from the area. Methods of changing intensity index and quadrant-azimuth analysis were used to mainly research the urban expansion. The lakes area in recent 30 years were analyzed by changing intensity and spatial differential features. The results showed that the lake area had an expanding trend from year 1975 to 2005, and the total area had enlarged about 1162.19 km². Among these lakes, the Selin Co had expanded the largest area with 510.02 km² and significant expanding northwards. Meanwhile, the Lake Guojialun had the highest changing intensity in the area.

Keywords: Changes of lakes; Qiangtang area; Qinghai-Tibet Plateau; remote sensing

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, 作为全球环境变化的敏感区域, 湖泊变化的研究尤为重要^[1-2]。运用遥感手段实时、准确、定量地掌握湖泊水域动态, 对研究气候变化和可持续发展具有十分重要的意义。因此, 国内外许多学者对区域湖泊变化进行了研究, 如 Guirguis 等选择多时相的假彩色合成图像用主成分分析方法对埃及 Brullus 湖 1983–1991 年的动态变化进行研究^[3]; Pietroniro 用多时相的 MSS 和 TM 遥感图像研究加拿大 Peace Athabasca 三角洲的湖泊面积变化^[4]; Bianduo 等利用 CBERS 影像等数据对藏北高原湖泊变化对气候波动的响应进行研究^[5]; 曾忠平等引入湖泊萎缩强度等测度指标对武汉市湖群演化的趋势及原因进行分析^[6]; 邵兆刚等结合多种资料对青藏高原的主要大湖变迁特征做了详细阐述^[7]。

“羌塘”系藏语“北方高平地”之意, 羌塘地区是青藏高原的主体部分, 北起昆仑山、南抵冈底斯-念青唐古拉山、东自怒江分水岭、西到帕米尔高原^[8-9]。该区是青藏高原最大的内流区, 区内湖泊众多, 是中国第二大湖区和世界海拔最高的内陆湖区, 著名的纳木错、色林错等大湖均位于该区东南部。

* 科技部基础性工作专项“中国湖泊水质、水量和生物资源调查”项目(2006FY110600)资助。2009–11–19 收稿; 2010–08–25 收修改稿。万玮, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: wanwei_4824@163.com。

由于羌塘地区环境条件恶劣,人迹罕至,借助遥感手段来研究该区湖泊变化成为一种必须的、切实可行的方法.本文利用 3 个时相 Landsat TM/ETM + 影像、CBERS CCD 影像和 1975 年的 1:10 万地形图,选取羌塘地区东南部 22 个 50km² 以上的湖泊作为研究对象,借鉴城市扩展研究的思路,从面积、强度和空间分异特征等方面对其变化趋势进行分析,总结出该区湖泊近 30 年来呈扩张趋势这一变化规律.

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

羌塘地区是青藏高原最大的内流区、世界海拔最高的内陆湖区.由于羌塘地区东南部地形起伏大且构造发育,绝大部分大湖泊、大河流都集中分布在这里.相对小湖而言,大湖的变化状况更能反映该区域天然湖泊变化的总体趋势,因此,研究选取羌塘地区东南部的 22 个 50km² 以上的湖泊作为研究对象(87°54'10"–91°10'9"E,30°41'14"–32°0'16"N),22 个湖泊位于那曲地区,一级流域来自内流区诸河,二级流域来自西藏内流区.各湖泊简要编目见表 1,研究范围覆盖西藏自治区尼玛、安多、申扎、班戈和当雄五个县级行政区(图 1).

羌塘地区东南部气候寒冷干燥,复杂多变,年平均气温多在 0℃ 以下,暖季(7–9 月)日均温度虽可超过 5℃,但夜间仍可降至 0℃ 以下,有冰冻现象,是我国较寒冷的地区之一^[10].该区年均降水量约为 50–300mm,80% 以上集中在 6–9 月,干湿季分明,其中班戈县的年降水量约为 301.3mm,申扎县为 290.9mm^[11],多以雪、霰、冰雹等固态降水形式出现.区内有扎加藏布、恰嘎尔藏布、永珠藏布、申扎藏布和巴汝藏布等几条河流贯穿,冰雪融水补给较羌塘北部稍丰,多为空寂的无人区,有少数藏族牧民居住.

表 1 研究区各湖泊简要编目

Tab. 1 The summary catalogue of each lakes

湖泊	湖泊代码	县	经纬度	湖泊面积 (km ²)
纳木错	T54B001	班戈县	90.61°E,30.74°N	2040.90
色林错	T54B002	班戈县	88.99°E,31.81°N	2129.02
格仁错	T54A202	申扎县	88.34°E,31.12°N	477.98
吴如错	T54A207	申扎县	88.00°E,31.71°N	362.52
错鄂	T54A336	申扎县	88.72°E,31.58°N	333.75
巴木错	T54B217	班戈县	90.58°E,31.26°N	236.16
兹格塘错	T54C216	安多县	90.86°E,32.08°N	225.55
蓬错	T54B225	班戈县	90.97°E,31.51°N	172.11
懂错	T54B227	安多县	91.16°E,31.71°N	149.60
班戈错	T54D344	班戈县	89.51°E,31.74°N	136.34
果忙错	T54B302	申扎县	89.20°E,31.22°N	113.46
雅个冬错	T54D378	申扎县	89.01°E,31.56°N	97.41
恰归错	T54A309	申扎县	88.25°E,31.82°N	90.54
木纠错	T54F316	申扎县	89.00°E,31.05°N	83.58
赛布错	T54B330	尼玛县	88.22°E,32.00°N	80.90
孜桂错	T54F319	尼玛县	87.90°E,31.37°N	77.84
国加轮湖	T54F834	尼玛县	88.69°E,31.99°N	69.26
达如错	T54B346	班戈县	90.74°E,31.70°N	134.27
仁错贡玛	T54F234	申扎县	89.67°E,30.93°N	139.03
仁错约玛	T54D343	班戈县	89.84°E,30.93°N	67.49
东卡错	T54C352	班戈县	90°E,31°N	66.00
申错	T54B356	班戈县	90.48°E,31.01°N	51.95

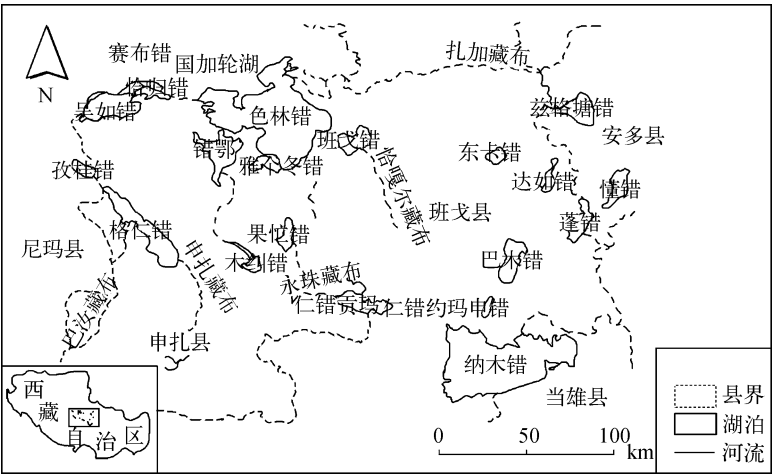


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the research area

1. 2 数据选择与处理

根据遥感数据的可获得性和云量情况,分别选取以 1975 年、1990 年、2000 年和 2005 年为中心年份的一系列数据,包括丰水期 Landsat TM/ETM + 影像(空间分辨率 30m)、CBERS CCD 影像(空间分辨率 20m)和早期 1: 10 万扫描地形图,各年份所使用的数据情况如表 2 所示. 各期遥感影像质量完好,基本无云覆盖,地形图扫描清晰,湖泊水边线易于勾画.

表 2 数据源
Tab. 2 Data source

时间(年)		数据源			
1975	1: 10 万地形图(编号:如 H-45)	45	46		
		I	1975	1975	
		H	1975, 1976	1975, 1976	
1990	TM(Path/Row)	140	139	138	
		038	1992. 09	1990. 06	1992. 08
		039	—	1989. 11	1991. 09
2000	ETM + (Path/Row)	140	139	138	
		038	2000. 10	2000. 10	2001. 06
		039	—	2000. 11	2000. 12
2005	CBERS CCD(Path/Row)	028	027	026	025
		064	2005. 09	2005. 09	—
		065	2005. 09	2005. 09	2005. 10
		066	—	—	2006. 09
				2004. 09	2004. 09

首先利用经纬网和公里网对 1: 10 万地形图进行校正,按 10km 设置一个控制点的要求,每幅地形图的控制点不少于 25 个,均方根(*RMS*)误差控制在 10m 以内. 然后利用地形图,在影像上选取道路交叉点、地形特征点、道路和河流的交叉点等同名点对遥感影像逐景校正,每景影像不少于 20 个控制点,*RMS* 误差控制在 20m(约 1 个像元)以内,使湖泊边界的提取满足经度要求,校正后的影像统一采用以 Krasovsky_1940 为基准面的 Albers Conical Equal Area 投影.

根据青藏高原湖区湖泊边界的总体确定原则,结合研究区内湖泊自身特点,确定 22 个湖泊边界的提取原则如下:(1) 以丰水期水边线的上边界作为湖泊边界;(2) 岛屿作为湖泊的组成部分;(3) 水边线外围滩地不作为湖泊边界的组成部分. 采用人机交互的方式,分别以各时间段遥感影像或地形图为底图,勾绘出四个时相的 22 个湖泊的水边线,并根据上述原则确定湖泊边界,在此基础上建立湖泊边界信息数据库. 因为获取的数据有限,研究采用了多传感器、多分辨率的遥感影像以及 1: 10 万的地形图数据. 由于不同类型数据分辨率存在差异,在勾绘水边线时将影像放大到能清晰地看到每一像素,以保证湖泊边界的提取精度. 另外,对于同一年份,研究选取同一类型的数据,以保证湖泊边界在该年份不会因数据分辨率不同而造成提取误差.

2 湖泊变化趋势分析

2. 1 变化面积分析

研究区内湖泊在 1975、1990、2000 和 2005 年四个年份的面积可以清晰地看出,在 1975—2005 年间,各湖泊面积均呈扩张趋势,但扩张程度有所不同(图 2). 其中西藏自治区的两大内陆湖纳木错和色林错均位于该区域内,据《中国湖泊志》记载纳木错(90°16′—91°03′E,30°30′—30°56′N)面积为 1961. 50km²,跨班戈、当雄两县,是西藏第一大内陆湖;而作为第二大内陆湖的色林错(88°33′—89°21′E,31°34′—31°57′N)则跨班戈、尼玛和申扎三县,面积为 1628. 00km²[11]. 根据解译结果可看出,2005 年纳木错和色林错湖泊面积分别为 2040. 90km²和 2129. 00km²,色林错面积已超过纳木错. 另外,其他如国加轮湖和雅个冬错,湖泊扩张也非常明显,早期地形图上国加轮湖仅有 1. 90km²的一小片水域,而在 2005 年遥感影像上已扩张成为一个面积为 69. 30km²的大湖.

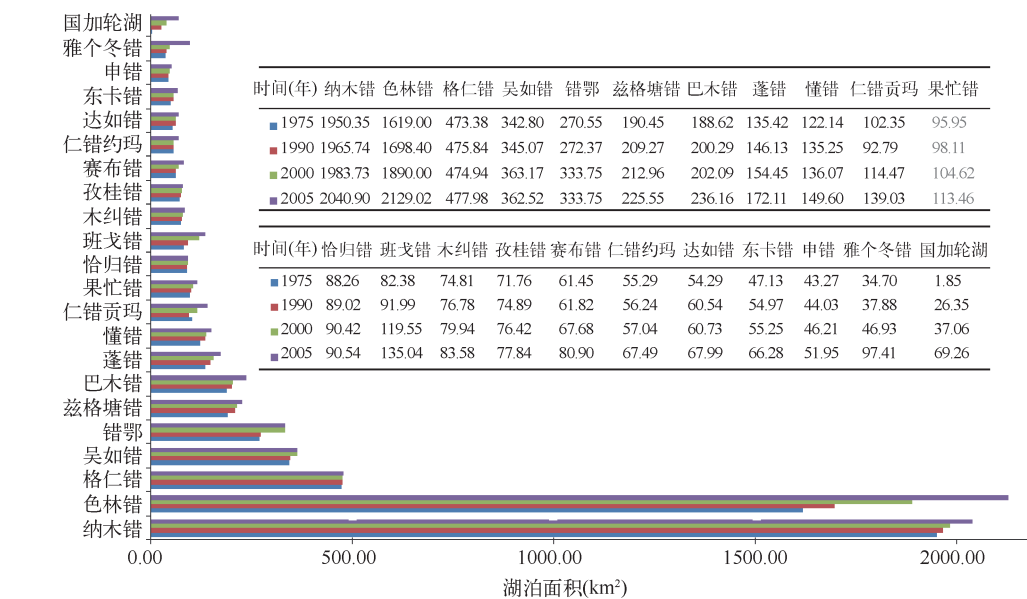


图 2 各年份湖泊面积统计

Fig. 2 Statistics of lake areas

所有湖泊在各个时间段内的整体变化情况见表 3，研究引入年变化率作为衡量湖泊变化的一个指标，它可以表示湖泊在一定时间范围内数量或面积变化情况. 其计算公式为：

$$\eta = \frac{S_b - S_a}{S_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{1}$$

其中， η 表示研究时间段内湖泊面积的年变化率； S_a 和 S_b 分别为研究期初和研究期末的湖泊面积； T 为研究时段长度，单位设定为年。

分析表明，1975－2005 年间，区内湖泊面积共增加了 1162.19km²，年均扩张面积为 38.74km²，年变化率为 0.63%。其中在 2000－2005 年间，虽然其年份间隔相对较短，但湖泊扩张却最为明显，共扩张了 560.89km²，年变化率高达 1.54%。整体上来说，研究区内湖泊面积扩张速度较快，且随着年份的增长扩张速度呈增长趋势，1975－1990 年间最小，1990－2000 年间次之，2000－2005 年间最大。

2.2 扩张强度分析

在研究城市扩展方面，很多学者利用城市扩展强度指数来衡量不同时期城市用地扩展的速度^[12-14]，本文借鉴这一思想，构建湖泊变化强度指数来分析研究区内各个湖泊的变化情况，其计算公式为：

$$\mu = \frac{\Delta S_{ab}}{\Delta T_b \times S} \times 100 \tag{2}$$

其中， μ 表示湖泊变化强度指数； ΔS_{ab} 表示 b 时段内第 a 个湖泊的变化面积， ΔS_{ab} 大于 0 说明湖泊在该时段内呈扩张趋势，小于 0 则说明呈萎缩趋势； ΔT_b 为时间跨度，以年为单位； S 为第 a 个湖泊的总面积，文中取 1975 年的湖泊面积。湖泊变化强度指数实际上是用湖泊面积对其年平均变化速度进行标准化处理，使不同时期湖泊变化速度具有可比性。22 个湖泊的 μ 值计算结果如表 4。

表 3 各时间段内面积变化

Tab. 3 Changes of lake areas in each period

时段(年)	总扩张面积(km ²)	年均扩张面积(km ²)	年变化率(%)
1975－1990	207.55	13.84	0.23
1990－2000	393.74	39.37	0.62
2000－2005	560.89	112.18	1.54
1975－2005	1162.19	38.74	0.63

表 4 湖泊变化强度指数(μ 值)
Tab. 4 Intensity index of lake changes

湖泊	μ 值			湖泊	μ 值		
	1975 - 1990 年	1990 - 2000 年	2000 - 2005 年		1975 - 1990 年	1990 - 2000 年	2000 - 2005 年
纳木错	0.05	0.09	0.59	恰归错	0.06	0.16	0.03
色林错	0.33	1.18	2.95	班戈错	0.78	3.35	3.76
格仁错	0.03	-0.02	0.13	木纠错	0.18	0.42	0.97
吴如错	0.04	0.53	-0.04	孜桂错	0.29	0.21	0.40
错鄂	0.04	2.27	0	赛布错	0.04	0.95	4.30
兹格塘错	0.66	0.19	1.32	仁错约玛	0.12	0.14	3.78
巴木错	0.41	0.10	3.61	达如错	0.77	0.04	2.68
蓬错	0.53	0.61	2.61	东卡错	1.11	0.06	4.68
懂错	0.72	0.07	2.21	申错	0.12	0.50	2.65
仁错贡玛	-0.62	2.12	4.80	雅个冬错	0.61	2.61	29.10
果忙错	0.15	0.68	1.84	国加轮湖	88.06	57.79	347.24

除了格仁错(1990 - 2000 年)、吴如错(2000 - 2005 年)和仁错贡玛(1975 - 1990 年)出现负值,错鄂(2000 - 2005 年)出现零值以外,其余 μ 值均为正值,这充分说明前述研究区域内湖泊呈扩张状态这一总体趋势的正确性. 在三个时段内,国加轮湖的 μ 值均最高,国加轮湖在四个时期的边界变化图谱可以看出其面积扩张的演化趋势(图 3). 另外,广为人们关注的纳木错、色林错和兹格塘错等湖泊的 μ 值也均呈较高的状态,这一结论与 2.1 节中对湖泊面积的分析结果相符.

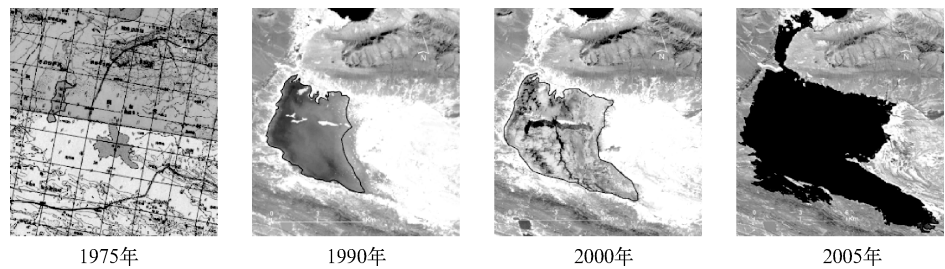


图 3 国加轮湖边界变化图谱

Fig. 3 Temporal pedigree of Lake Guojialun's boundaries from 1975 to 2005

3 典型湖泊空间分异分析

湖泊变化趋势不仅表现在时间序列上的演进,而且表现在空间上的分异特征,这与湖泊的地理位置、构造特征、气温和降水等因素密切相关,因此,分析湖泊变化的空间特征具有十分重要的意义. 研究区内有些湖泊沿边界向四周较均匀的扩张,如懂错、达如错和东卡错;有些湖泊则在某一方向上扩张尤为明显,如巴木错北部扩张较大,雅个冬错南部扩张较大等. 色林错流域是西藏最大的内陆湖水系^[15],而色林错湖泊水域面积大且边界曲折,具有代表性,因此研究选取该湖作为典型湖泊来分析变化的空间分异特征.

3.1 色林错湖泊扩张的空间分异特征

研究借鉴几何学上的象限方位分析方法^[16],通过正东、东北、正北、西北、正西、西南、正南和东南 8 个方位上湖泊差异来分析城市扩展的分异特征. 以 1975 年色林错湖泊边界的几何重心(88°58'12"E, 31°44'24"N)为起点,按照地理方位将平面划分为 8 个夹角为 45°的象限,并用其分割色林错各年份的湖泊面积,图 4 为色林错象限方位分析示意图. 统计各时段、各方位内湖泊变化的面积,分析不同时段各分区内湖泊扩张的空间

差异(表 5),并据此绘制各时段湖泊面积扩张玫瑰图(图 5),以便更直观地发现各时期各方位的扩张差异和各时段扩张的主导方向.

从各时段各象限扩张面积来看,1975-1990 年间(表 5、图 5a),色林错扩张总面积为 79.39km²,其中以正北为主导方向,扩张面积达 17.39km². 另外,正西和正东两个方向也扩张较多,西南和正南方向扩张面积仅为 0.70km²和 1.93km²,为缓滞扩展方向. 1990-2000 年间(表 5,图 5b),湖泊扩张总面积达 191.61km²,正北为主导方向,该方向扩张面积占了该时间段总扩展面积的 56.11%,其次是东北方向,其他六个方向扩张程度均很小. 2000-2005 年间(表 5、图 5c),虽时间间隔较短,湖泊扩张总面积却多达 239.02km²,为高速扩张时期,正北方向扩张面积仍最多,依旧为整个湖泊在该时段内扩张的主导方向.

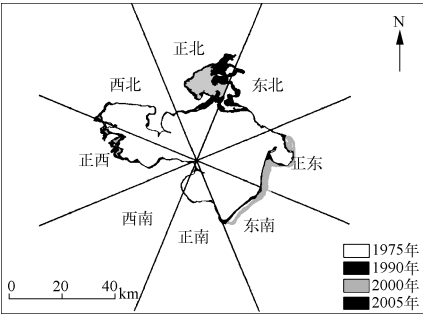


图 4 色林错象限方位分析示意
Fig 4 Quadrant-azimuth analysis of Selin Co

表 5 色林错各方位扩张面积
Tab. 5 The expanding area of Selin Co in each direction

象限	1975-1990 年 (km ²)	1990-2000 年 (km ²)	2000-2005 年 (km ²)	总扩张面积 (km ²)	年均扩张面积 (km ²)
正东	15.74	13.02	49.58	78.34	2.61
东北	9.49	31.50	34.05	75.04	2.50
正北	17.39	107.52	83.47	208.38	6.95
西北	6.18	6.59	10.48	23.25	0.77
正西	16.73	16.01	26.52	59.27	1.98
西南	0.70	0.41	1.15	2.26	0.08
正南	1.93	1.97	4.58	8.48	0.28
东南	11.23	14.59	29.18	55.01	1.83
总面积	79.39	191.61	239.02	510.02	17.00
均值	9.92	23.95	29.88	63.75	-
标准差	6.56	35.15	27.07	65.28	-

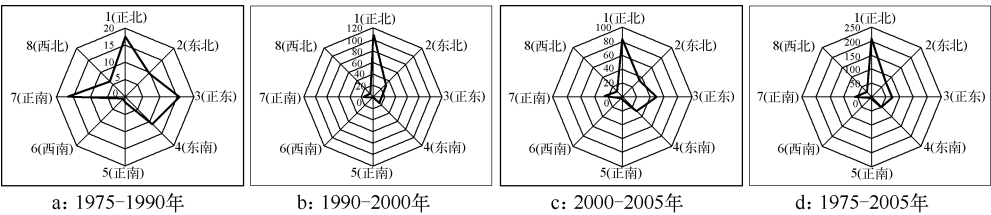


图 5 色林错各时段面积扩张玫瑰图
Fig. 5 Rose map of Selin Co's area expansion in 8 directions during different periods

从整体趋势来看(表 5,图 5d),1975-2005 年近 30 年来,色林错湖泊扩张面积多达 510.02km²,扩张面积从多到少依次为:正北、正东、东北、正西、东南、西北、正南和西南. 以正北作为主导方向,西南和正南方向扩张缓滞. 另外,从表 5 中计算的标准差可以看出,湖泊在 1975-1990 年间相对较稳定,而在 1990-2000 年间动态变化较大,进一步的研究可以对造成这种趋势的原因做详尽分析.

3. 2 色林错湖泊重心的转移

近 30 年来,由于色林错湖泊面积扩大的比例很大且方向性极强,造成了湖泊重心的不断转移. 1975-1990 年间,湖泊重心向正北稍偏东方向转移,转移距离为 1.83km,而 1990-2000 年间和 2000-2005 年间湖泊重心均向西北方向转移,且 1990-2000 年间转移距离多达 4.64km. 宏观上来说色林错湖泊重心在 1975-

2005 年间逐渐往西北方向转移,这与湖泊面积在北方向上主导扩张密切相关.

4 区域内湖泊扩张的影响因素分析

本研究的目的是利用遥感手段对研究区内湖泊变化特征进行分析,对于造成这种变化的影响因素,本文主要结合目前最新公布的研究结论做一验证.大量实测资料表明,在全球气候变暖的影响下,对气候反应敏感的青藏高原的冰川也在退缩和融化^[17-18],从而使流域内的湖泊有丰富的水源补给,因此冰雪融水量的增加是造成区域内湖泊面积呈扩张趋势的主要原因.据西藏高原大气环境科学研究所的最新研究资料表明,藏北地区年平均气温变化同全球气温增暖的趋势相一致,总体上呈较显著的上升趋势,2006 年达到近 36 年来最高值,比多年平均值高 1.45℃,另外,申扎、改则、那曲、安多、班戈和当雄 6 个气象站的观测数据也表明该区域平均温度呈逐年上升趋势^[19].另外,羌塘地区东南部海拔超过 4500m,因而高原冻土非常发育,如果温度持续升高,冻土便会开始解冻释放水,进而对区域内湖泊面积变化产生影响^[7,19].

造成区域内湖泊面积扩张的另一主要因素是降水量的增加和蒸发量的减少.有关资料表明,从 1994 年至今,该区降水量呈持续增加的趋势,其中 1973-2008 年平均每 10a 上升 23.65mm^[19],杜军等利用 1971-2006 年 20cm 口径小型蒸发皿观测资料,分析了藏北高原蒸发量的变化趋势,结果表明近 36 年藏北高原年蒸发皿蒸发量各站点均呈现显著的减少趋势,平均减少 61.7mm/10a(通过 99% 显著性检验),各季节蒸发量以 -10.2 至 -20.8mm/10a 的变化速率减少,以夏季减幅最明显^[20].

以色林错湖泊为例,边多等结合实测资料对 1975-2008 年色林错湖面变化对气候变化的响应做了深入的剖析,通过年均气温变化、年均降水量/蒸发量变化、平均积雪日数变化、年均最大冻土深度变化等气象资料的分析,得出色林错湖泊面积扩张的主要原因,即冰雪融水的补给增多、降水量的增加以及蒸发量的减少,由于色林错位于全流域最低洼的地区,是水流汇集的中心,因而是区域内面积扩张最明显的湖泊之一,这一结论有力地佐证了本文的研究结果.本研究表明北方向为色林错扩张的主导方向,造成这种趋势的原因主要是与其北部各拉丹冬冰川的变化有直接关系,有资料显示 2000 年各拉丹冬冰川面积比 1969 年减少了 1.7%,近年来其面积也一直处于萎缩的趋势^[21].

5 结语

青藏高原的大型和特大型湖泊对整个流域的生态环境变化起着至关重要的作用,作为青藏高原主体部分的羌塘地区大湖云集,尤其是羌塘东南部,许多湖泊都是湖泊调查需要选取的重点湖泊,这些湖泊的变化情况可以反映青藏高原一定范围内湖泊的整体变化趋势,因此,借助遥感手段分析和研究其演化情况可以为青藏高原对全球气候变化响应的研究提供依据.

本文结合多时相 Landsat TM/ETM+ 影像、CBERS CCD 影像以及 1975 年左右 1:10 万地形图,从湖泊总体面积、单个湖泊变化强度和典型湖泊空间分异特征等多个方面对羌塘高原东南部湖群近 30 年来的变化进行分析,得出该区 22 个 50km² 的湖泊变化趋势.结果表明:区域湖泊总体呈扩张状态,总体面积增加了 1162.19km²,以色林错扩张面积最多,达 510.02km²;湖泊变化强度以国加轮湖为首,2000-2005 年变化强度指数高达 347.24;色林错作为研究的典型湖泊,其近 30 年来扩张面积为 510.02km²,以正北方向为扩张主导方向,且湖泊重心往西北方向转移;造成区域内湖泊面积变化的主要因素是近年来冰雪融水量的增加、降水量的增多以及蒸发量的减少.

由于数据资料收集的限制,本文仅选取 1975 年左右的地形图和三个时相的遥感影像作为数据源,因此,湖泊边界的提取存在一定的误差,即从地形图上提取的湖泊边界为多年水边线平均值,而在遥感影像上提取的湖泊边界则为丰水期的瞬时水边线,这样可能导致提取的湖泊面积较平均值稍偏大.但如果舍弃地形图的湖泊边界提取结果,仅从 1990、2000 和 2005 年三个时相的湖泊边界变化仍能明显反映出研究区湖泊的扩张趋势,与本文的主要结论是一致的.

6 参考文献

- [1] 鲁安新,姚檀栋,王丽红等.青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究.冰川冻土,2005,27(6):783-785.

- [2] 黄 群,姜加虎.近 50 年来洞庭湖区的内湖变化.湖泊科学,2005,17(3):139-142.
- [3] Guirguis SK, Hassan HM, El-Raey ME *et al.* Multi-temporal change of Lake Brullus, Egypt, from 1983 to 1991. *International Journal of Remote Sensing*, 1996,17(15):2915-2921.
- [4] Pietroniro A. Mapping areal extent of lakes and Perched basins in the Peace-athabasca Delta. *The Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, 1997,(2):468-471.
- [5] Bianduo, Bianbaciren, Lin Li *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(2):131-142.
- [6] 曾忠平,卢新海.城市湖泊时空演变的遥感分析——以武汉市为例.湖泊科学,2008,20(5):648-654.
- [7] 邵兆刚,朱大岗,孟宪刚等.青藏高原近 25 年来主要湖泊变迁的特征.地质通报,2007,26(12):1633-1644.
- [8] 陈传友,范云崎.羌塘高原的河流、湖泊及水资源.资源科学,1983,(2):38-43.
- [9] 雍永源.羌塘及可可西里地区几个重要地质、构造与资源问题.沉积与特提斯地质,2004,24(1):1-10.
- [10] 朱大岗,孟宪刚,赵希涛等.纳木错湖相沉积与藏北高原古大湖.地球学报,2001,22(2):149-153.
- [11] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志.北京:科学出版社,1989:398-399.
- [12] 李飞雪.南京市城市扩展信息图谱研究[学位论文].南京:南京大学,2007:23-24.
- [13] 汤君友,杨桂山.基于 RS 与 GIS 的无锡市城镇建设用地扩展时空特征分析.长江流域资源与环境,2004,13(5):2-5.
- [14] 郝彩霞,柯长青,万 玮.基于遥感和 GIS 的东营市城市扩展分析.云南师范大学学报,2008,28(6):56-60.
- [15] 杨日红,于学政,李玉龙.西藏色林错湖面增长遥感信息动态分析.国土资源遥感,2002,(2):64-66.
- [16] 董 芳.基于陆地卫星 TM/ETM+ 和 GIS 的济南城区扩展动态监测研究[学位论文].山东:山东农业大学,2003:50-53.
- [17] 任贾文,秦大河,井 哲.气候变暖使珠穆朗玛峰地区冰川处于退缩状态.冰川冻土,1998,20(2):17-18.
- [18] 蒲健辰,姚檀栋,王宁练等.近百年来青藏高原冰川的进退变化.冰川冻土,2004,26(5):517-522.
- [19] 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.
- [20] 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.水科学进展,2008,19(6):786-792.
- [21] 鲁安新,姚檀栋,刘时银等.青藏高原各拉丹冬地区冰川变化的遥感监测.冰川冻土,2002,24(5):559-562.