

# 近 35 a 西藏那曲地区湖泊动态遥感与气候因素关联度分析

林乃峰<sup>1,2</sup>, 沈渭寿<sup>2①</sup>, 张 慧<sup>2</sup>, 李海东<sup>2</sup> (1. 南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

**摘要:** 利用 1976、1990、2000 和 2010 年 4 期遥感影像对西藏那曲地区面积大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊的动态变化进行信息提取, 并结合 1966—2010 年研究区 9 个站点的气象数据, 探讨其对气候变化的响应。结果表明, 2010 年那曲地区大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊的总面积为 16 841.93 km<sup>2</sup>, 湖泊总数为 469。近 35 a 那曲地区大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊面积共增加 3 505.12 km<sup>2</sup>, 增幅为 26.28%, 其中以 2000—2010 年增长速度最快, 达 18.18%; 近 35 a 湖泊数量增加 96, 增幅为 25.73%, 其中以 1990—2000 年增幅最大, 达 13.38%。色林错面积从 1976 年的 1 648.61 km<sup>2</sup> 增加到 2010 年的 2 332.55 km<sup>2</sup>, 超过纳木错成为西藏第一大咸水湖。1966 年以来, 那曲地区年平均温度、年平均最高温度、年平均最低温度、年平均相对湿度和年平均降水量总体呈上升趋势, 年平均蒸发量呈下降趋势, 气候朝暖湿方向发展, 其中温度变化最明显, 线性气温倾向率为 0.51 °C · (10 a)<sup>-1</sup>。湖泊动态变化与气象因子的灰色关联分析表明, 气温升高引起冰雪融水增加、降水量增加、相对湿度增加和蒸发量减少, 是近 35 a 来那曲地区湖泊面积和数量不断增加的主要原因。气象要素与湖泊面积间的回归方程表明, 两者具有显著线性相关关系。

**关键词:** 西藏; 那曲地区; 湖泊动态; 气候变化响应

**中图分类号:** P343.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2012)03-0231-07

**Correlation Degree Analysis of Meteorological Elements and Dynamic Remote Sensing of Alpine Lakes in Naqu Region of Tibet in the Past 35 Years.** LIN Nai-feng<sup>1,2</sup>, SHEN Wei-shou<sup>2</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, LI Hai-dong<sup>2</sup> (1. Institute of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Out of the 1976, 1990, 2000 and 2010 remote sensing images of Naqu region of Tibet, information was extracted about dynamic variations of alpine lakes bigger than one square kilometer in water surface, therein. And correlation analysis was done of the information with the meteorological data from 1966 to 2010 available from the nine meteorological stations in the region to explore responses of the dynamics of the lakes to changes in the climate. Results show that there were a total of 469 lakes (bigger than 1 km<sup>2</sup> in water surface), amounting to 16 841.93 km<sup>2</sup> in total area in 2010. In the past 35 years, the lakes increased by 3 505.12 km<sup>2</sup> or 26.28% in total area (especially in the period of 2000–2010 by 18.18%) and by 96 or 25.73% in number of lake (especially in the period of 1990–2000 by 13.38%). The area of Lake Selin Co increased from 1 648.61 km<sup>2</sup> in 1976 to 2 332.55 km<sup>2</sup> in 2010, an increase rate of 41.49%, and exceeded Lake Nam Co in area, becoming the largest saline lake in Tibet. In the past 45 years, Naqu region witnessed a general rising trend in annual mean air temperature, annual mean highest air temperature, annual mean lowest air temperature, annual mean precipitation and annual mean relative humidity, but a reverse trend in annual mean evaporation, suggesting that the climate in that region is changing towards warm and wet, and the change in temperature is the most remarkable, increasing by 2.27 °C from 1966 to 2010. The climate tendency rate reached 0.51 °C · (10 a)<sup>-1</sup>. The gray correlation degree analysis of dynamic changes in lakes with the meteorological factors shows that the the increase in ice-snow melt-water triggered by the rise of the air temperature, the increase in precipitation, the increase in relative humidity and the decrease in evaporation were the main causes of the increase in lake area and number of lakes in Naqu of Tibet over the past 35 years. Regression of the meteorological elements with changes in lake area shows they are linearly related.

**Key words:** Tibet; Naqu region; dynamics of the lake; response to climate change

作为全球海拔最高的一个独特地域单元, 青藏高原是中国高原湖泊的最主要分布区, 也是中国乃至东亚地区许多大江、大河的发源地<sup>[1]</sup>, 还是众多珍稀物种的栖息地和候鸟迁徙地, 具有生态蓄水、

收稿日期: 2012-03-01

基金项目: 环保公益性行业科研专项(20080901, 200909050, 201209032)

① 通信作者 E-mail: shenweishou@163.com

涵养水源、调节气候等重要的生态功能<sup>[2]</sup>。因其特殊的地理位置以及对我国、东亚乃至全球气候的重要影响,青藏高原一直是学者们研究的热点区域<sup>[3-7]</sup>。

那曲地区是藏北高原的主体部分,境内湖泊星罗棋布,是世界上海拔最高、面积最大的内流区。由于该地区严酷的自然条件,湖泊受人类活动的直接影响较小,大多数湖泊变化主要受气候因素控制,湖泊变化趋势能够很好地反映气候的变化历史。吴艳红等<sup>[8]</sup>对纳木错流域1970—2000年湖泊和冰川变化的研究发现,升温幅度增加是冰川加速退缩的根本原因,而湖面扩张主要受冰川加剧退缩及其引起的融水增加影响;叶庆华等<sup>[9]</sup>认为1974—2003年,由于气候变暖、年降水量减少和蒸发量增大,西藏玛旁雍错流域冰川和湖泊以退缩为主,且冰川退缩明显加速;类延斌等<sup>[10]</sup>研究发现夏季和冬季降水量增加而蒸发量下降是导致青藏高原中部兹格塘错湖面增大的主要原因;时兴合等<sup>[11]</sup>认为1961—2000年的40 a间青海湖地区气温和地表蒸发等气象要素向暖干化过渡的趋势是造成青海湖水位下降的主要原因;边多等<sup>[12]</sup>就西藏羊卓雍错、空姆错、沉错和巴纠错4个湖泊的水位变化及其对气候变化的响应进行分析,发现湖泊面积在近30 a来呈缓慢下降趋势,升温引起的湖泊蒸发效应超过降水增加带来的补给是导致湖泊面积下降的主要原因。不难看出,已有研究大多侧重于某个湖泊或某个流域内湖泊的变化分析,对于大区域内湖泊的变化情况及其与气候之间关系的研究还较少。为此,笔者以1976、1990、2000和2010年4期遥感影像为数据源,对那曲地区大于1 km<sup>2</sup>湖泊的面积、数量以及近35 a(1976—2010年)的演变趋势进行分析,并结合1966—2010年研究区9个站点的气象数据,探讨其对气候变化的响应特征。

## 1 研究区概况

那曲地区位于西藏冈底斯山和念青唐古拉山以北<sup>[13]</sup>,平均海拔4 500 m以上,整体地形呈西高东低的倾斜状,发育有现代冰川,是众多湖泊的重要水源之一。地区面积超过42万 km<sup>2</sup>,占西藏自治区总面积的35%,全区共辖10个县以及双湖特别行政区,总人口39万,其中藏族人口占全区总人口的98%以上。受高原地形影响,该地区气候的突出特点是寒冷干燥,昼夜温差大,多大风天气,年平均温度在-2.8~1.6℃之间,年平均降水量在247.3~513.6 mm之间,并且由东南向西北递减,年平均蒸发量在1 500~2 300 mm之间,由东南向西

北增大。另外,冬、春季受高空西风气流的影响,地面气温低,天气干燥晴朗,多7级以上大风,有时风力可达10~12级。那曲地区日照时数高于同纬度其他区域,全年日照时数在2 400~3 200 h之间,由东向西递增。由于海拔高和空气洁净等原因,光能资源相当丰富,平均年总辐射量达6 000 MJ·m<sup>-2</sup>,西部最高达6 800 MJ·m<sup>-2</sup><sup>[14]</sup>。由于气候、土壤性质和海拔高度等因素的差异,那曲地区地表植被分布较为复杂,植物种类从东南向西北逐渐递减,草地是最重要、面积最大的生态系统,主要以高寒草甸类和高寒草原类草地为主<sup>[15]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据资料

采用的4期遥感影像数据分别为1976年的MSS影像、1990年的TM影像、2000年的ETM影像和2010年的环境一号(HJ-1)卫星影像,其中MSS、TM和ETM影像由中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台提供,环境一号卫星影像由环境保护部卫星环境应用中心提供。除MSS数据空间分辨率为60 m外,其余影像的空间分辨率均为30 m,可满足湖泊解译的精度要求。为了获取覆盖全区域的高质量湖泊信息,当某区域该时期无可选数据或者云量数据较大时,选取该区域相近年份的数据进行补充(表1)。

气象资料由国家气象信息中心提供,包括那曲、班戈、安多、申扎、索县、嘉黎、比如、改则和当雄9个站点1966—2010年的逐日常规气象观测要素,即气温、降水量、相对湿度、日照时数和风速。

### 2.2 数据处理

#### 2.2.1 湖泊信息提取

利用1:10万电子版地形图作为底图,在ERDAS图像处理软件的支持下,在影像上选取道路、河流交叉点和地形突出的特征点对影像进行逐幅校正,每景影像不少于25个控制点,采用二次多项式模型分别对4期遥感影像进行几何精校正,几何误差控制在0.5个像元内,统一采用Albers等角圆锥投影和相应参数下的WGS-84坐标系。

高原上湖泊的理化特性各异,不同湖泊的光谱差异较大<sup>[16]</sup>,而且湖泊边界在影像上的表现并非十分清晰,为了突出湖泊水体等地物的遥感影像信息,尤其是湖泊边界信息,对经过几何纠正后的图像进行边缘增强和缨帽变换等处理,将原始影像结构轴进行旋转,以优化图像数据显示结果,增强水体特征。与原始影像相比,处理之后的影像亮度方

位扩大, 水体边缘清晰度增加。

表 1 4 期遥感影像数据的时相

Table 1 Time phases of the remote-sensing image data of the four periods

轨道号	时相			轨道号	时相			2010 年 HJ-1	
	1976 年 MSS	1990 年 TM	2000 年 ETM		1976 年 MSS	1990 年 TM	2000 年 ETM	行列号	时相
140035	1976-12	1990-11	2000-10	142037	1976-11	1989-10	2000-10	33-72	2010-08
141035	1976-12	1990-11	2001-07	136038	1976-12	1992-09	2000-12	36-72	2010-11
142035	1976-12	1990-11	2000-10	137038	1976-12	1988-09	2000-11	38-72	2010-08
143035	1976-12	1992-10	2000-11	138038	1976-12	1992-08	2000-11	28-76	2010-09
139036	1976-11	1994-12	2000-10	139038	1976-11	1990-06	2000-11	34-76	2010-11
140036	1976-12	1992-09	2000-10	140038	1976-12	1992-09	2000-10	36-76	2010-11
141036	1976-12	1990-11	2000-09	141038	1976-12	1990-11	2000-10	38-76	2010-10
142036	1977-02	1990-11	2000-10	142038	1976-12	1990-11	2000-10	30-80	2010-10
143036	1976-11	1989-10	2000-11	136039	1976-12	1988-10	2001-10	36-80	2010-11
136037	1976-11	1992-09	1999-09	137039	1976-12	1988-09	2000-03		
137037	1976-12	1992-11	2000-06	138039	1976-12	1991-09	2001-06		
138037	1976-12	1992-08	2000-10	139039	1976-12	1990-01	2000-10		
139037	1976-11	1990-05	2000-10	140039	1976-12	1992-09	2000-10		
140037	1976-12	1992-09	2000-10	141039	1976-12	1990-11	2000-10		
141037	1976-12	1990-11	2000-10						

1976 年 MSS 影像轨道号的行号应加 10, 如 140035 实际应为 150035。

提取湖泊信息时, 首先利用 ENVI 软件中的归一化植被指数 (NDVI) 工具模块进行水体检测, 初步分离出水体和植被信息; 再将水体与其他背景信息进行二值化处理, 通过软件中的数据转化模块输出结果; 然后在 ArcGIS 软件中结合人工目视解译对提取结果进行修正, 提取各期湖泊的湖面边界, 误差控制在 1 个像元内; 最后检查检测结果并计算湖泊面积<sup>[17]</sup>。

### 2.2.2 气象数据分析

选取研究区域内 9 个气象站点的逐日气象观测资料进行统计, 得到各站点各气象要素的年平均, 进而得到各气象要素的 9 站平均值, 以此反映那曲地区 1966—2010 年的气候变化趋势。然后以气候要素为因变量, 时间为自变量, 建立 2 个变量之间的一元线性回归方程, 并比较各变量的变化特征, 分析那曲地区气候的历史演变特征以及湖泊对区域气候变化的响应规律。

### 2.2.3 灰度关联分析

气候变化对湖泊动态变化的影响具有广泛的灰色性, 即信息不完全性和不确定性。因此, 用灰色系统理论<sup>[18]</sup>来研究和评价不同气象因素对湖泊变化的影响较适宜。以灰色系统两要素历史数据序列之间的关联度来表征湖泊面积与主要气象要素之间的密切程度, 关联度的计算公式为

$$R_{om} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^1 R_{om}(t) \quad (1)$$

式(1)中,  $R_{om}$  为子序列  $m$  与母序列  $o$  的关联度;  $N$

为数据序列长度, 即数据数;  $R_{om}(t)$  为子序列  $m$  与母序列  $o$  在时刻  $t$  的关联系数, 其计算公式为

$$R_{om}(t) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{om}(t) + \rho\Delta_{\max}} \quad (2)$$

式(2)中,  $\Delta_{\min}$  和  $\Delta_{\max}$  分别为各时刻两序列绝对差的最小值和最大值;  $\Delta_{om}(t)$  为  $t$  时刻两序列的绝对差;  $\rho$  为分辨系数,  $\rho \in (0, 1)$ , 通常取值 0.5。

## 3 结果与分析

### 3.1 那曲地区湖泊现状

2010 年, 那曲地区大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊总数为 469, 湖泊总面积为 16 841.93 km<sup>2</sup>, 占那曲地区总面积的 3.98%。从湖泊空间分布 (图 1) 来看, 无论是面积上还是数量上都呈现出明显的西多东少的分布趋势。就面积而言, 湖泊主要分布在班戈县、尼玛县和申扎县, 其中以班戈县湖泊面积最大, 占该地区湖泊总面积的 41.5%; 就数量而言, 尼玛县最多, 占湖泊总数的 46.3%, 班戈县次之, 占湖泊总数的 36.5%, 东部的聂荣、巴青、比如等县只有小湖泊零星分布。

### 3.2 近 35 a 湖泊动态变化

#### 3.2.1 湖泊数量变化

1976—2010 年那曲地区不同大小湖泊数量变化见表 2。从整体上看, 那曲地区面积大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊的数量呈持续增加趋势, 其中 1990—2000 年增幅最明显, 达 53。35 a 来面积 > 1 ~ 10 km<sup>2</sup> 的湖泊增加 69 个, > 10 ~ 50 km<sup>2</sup> 的湖泊增加 14 个, > 50 ~

100 km<sup>2</sup> 的湖泊增加 4 个, > 100 ~ 500 km<sup>2</sup> 的湖泊增加 9 个, 面积在 500 km<sup>2</sup> 以上的湖泊仍为纳木错、

色林错和当惹雍错, 近 35 a 数量没有发生变化。

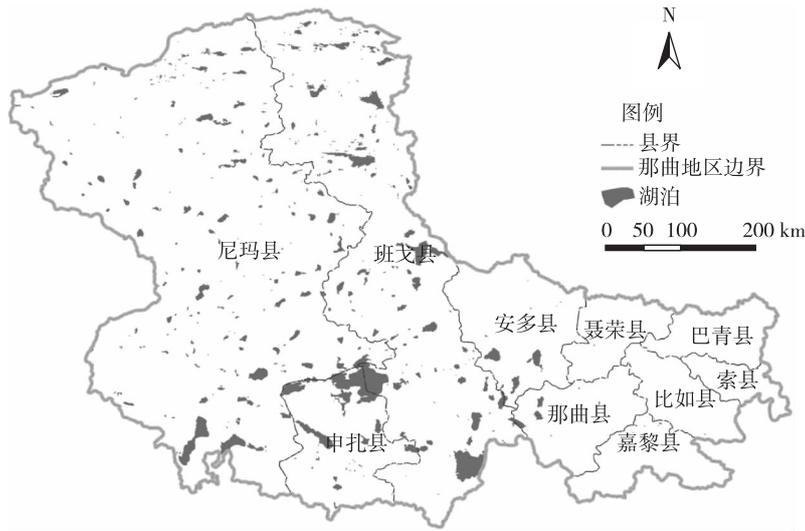


图 1 2010 年那曲地区湖泊空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the lakes in the study area in 2010

表 2 1976—2010 年那曲地区大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊数量变化

Table 2 Dynamic variation of the number of lakes bigger than 1 km<sup>2</sup> in the study area in 1976 - 2010

湖泊面积/ km <sup>2</sup>	1976 年		1990 年		2000 年		2010 年	
	数量	总面积/km <sup>2</sup>						
> 1 ~ 10	227	726. 87	243	742. 57	289	927. 93	296	943. 31
> 10 ~ 50	92	2 269. 35	100	2 335. 32	103	2 485. 07	106	2 573. 93
> 50 ~ 100	33	2 329. 54	33	2 353. 64	33	2 282. 49	37	2 663. 88
> 100 ~ 500	18	3 755. 06	17	3 637. 51	21	4 137. 64	27	5 570. 70
> 500 ~ 1 000	1	1 396. 32	1	1 370. 96	1	1 404. 87	1	1 507. 90
> 1 000	2	2 859. 67	2	2 968. 78	2	3 013. 46	2	3 582. 21
合计	373	13 336. 81	396	13 408. 78	449	14 251. 46	469	16 841. 93

### 3. 2. 2 湖泊面积变化

1976—2001 年那曲地区湖泊总面积变化见表 3。

表 3 1976—2010 年那曲地区湖泊总面积动态变化

Table 3 Dynamic variation of the total lake area in the study area in 1976 - 2010

年代	时段末面积/ km <sup>2</sup>	变化面积/ km <sup>2</sup>	变化幅度/ %	年平均变化速率/ (km <sup>2</sup> · a <sup>-1</sup> )
1976	13 336. 81			
1976—1990	13 408. 78	71. 97	0. 54	5. 14
1990—2000	14 251. 46	842. 68	6. 28	84. 27
2000—2010	16 841. 93	2 590. 47	18. 18	259. 05
1976—2010		3 505. 12	26. 28	103. 09

由表 3 可见, 1976—2010 年, 那曲地区大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊面积增加 3 505. 12 km<sup>2</sup>, 增长幅度为 26. 28%, 年均增长率为 103. 09 km<sup>2</sup> · a<sup>-1</sup>。1976—

1990、1990—2000、2000—2010 年湖泊面积年均增长率分别为 5. 14、84. 27 和 259. 05 km<sup>2</sup> · a<sup>-1</sup>, 可见 2000—2010 年湖泊面积增长最快, 近 35 a 来那曲地区湖泊面积呈现先缓慢后快速的的增长趋势。

### 3. 3 纳木错和色林错湖泊面积动态变化

1976—2010 年纳木错和色林错湖泊面积变化见表 4。纳木错曾经是我国仅次于青海湖的第二大咸水湖, 1976—2010 年其面积从 1 942. 50 km<sup>2</sup> 增加到 2 010. 82 km<sup>2</sup>, 增长幅度较小, 仅 3. 52%。而色林错面积从 1976 年的 1 648. 61 km<sup>2</sup> 增加到 2010 年的 2 332. 55 km<sup>2</sup>, 增幅达 41. 49%, 其中 2000—2010 年是色林错面积增幅最大时期, 10 a 间面积增加 537. 76 km<sup>2</sup>, 占近 35 a 来增长总面积的 78. 63%。色林错湖水主要依赖扎根藏布、扎加藏布、波曲藏布和阿里藏布 4 条河流的径流补给, 其中, 西岸入湖的扎根藏布发源于冈底斯山布日雪山, 是西藏自治

区流域面积最大的内流河,北岸入湖的扎加藏布源于唐古拉和格拉丹东等雪山,是西藏自治区最长的内流河<sup>[19]</sup>。据科学考证,古色林错面积曾达 10 000 km<sup>2</sup>,后因气候变干,湖泊退缩,从中分离出格仁错、错鄂、雅根错和班戈错等 23 个小湖。2004 年以来,由于色林错湖面上涨,南面与雅根错连在了一起,这也直接导致色林错湖泊面积超过纳木错,成为西藏自治区面积最大的咸水湖<sup>[20]</sup>。

表 4 1976—2010 年纳木错和色林错湖泊面积变化  
Table 4 Change in lake area of Nam Co and Selin Co in 1976 - 2010

年份	面积/km <sup>2</sup>	
	色林错	纳木错
1976	1 648. 61	1 942. 50
1990	1 750. 16	1 950. 91
2000	1 794. 79	1 951. 36
2010	2 332. 55	2 010. 82

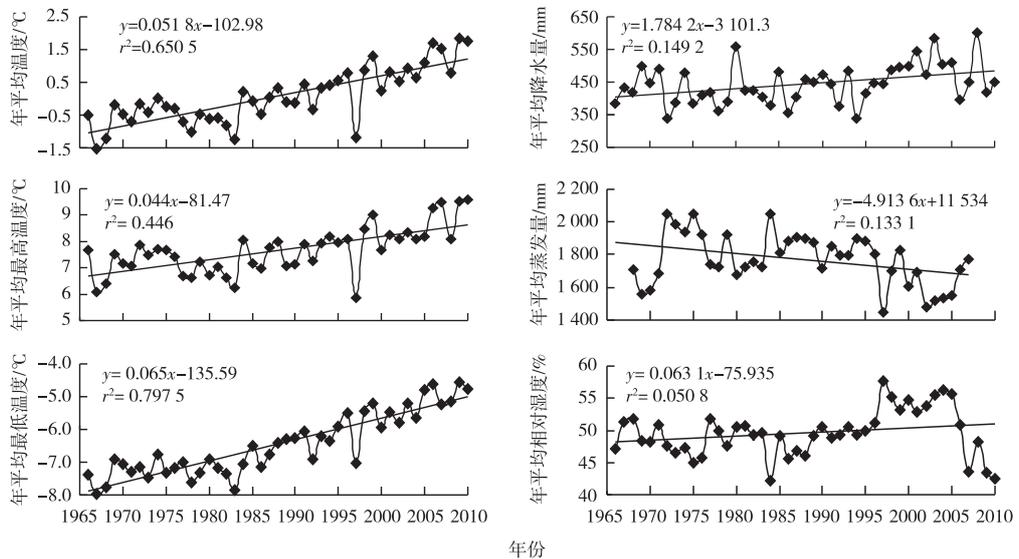


图 2 1966—2010 年那曲地区主要气候因子变化

Fig. 2 Variations of the main meteorological factors in Naqu in 1966 - 2010

### 3.4.2 年平均降水量变化

由图 2 可见,1966—2010 年那曲地区年平均降水量的变化幅度较大,总体上呈小幅增加趋势,其气候倾向率为  $17.84 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,近 45 a 年平均降水量为 446 mm。1972 年降水量达到近 45 a 来的最低值,比多年平均值低 106 mm,而后降水量波动上升,在 1980 年达到一个峰值,1994 年出现又一个相对低值,比平均值低 105 mm,其后降水量表现出较明显的增加趋势,2008 年年平均降水量达 603 mm,是近 45 a 的最高值,与 1972 年的最低值相比

### 3.4 气候要素分析

#### 3.4.1 年平均温度变化

1966—2010 年研究区主要气象因子变化情况见图 2。由图 2 可见,近 45 a 来,那曲地区年平均温度、年平均最高温度和年平均最低温度总体上均表现为波动上升趋势。其中,近 45 a 年平均温度为  $0.08 \text{ }^\circ\text{C}$ ,2010 年较 1966 年增加  $2.27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,其线性气温倾向率为  $0.52 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,高于整个青藏高原的平均温度变幅 [ $0.44 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]<sup>[21]</sup>。从 20 世纪 60 年代中期开始,那曲地区年平均气温逐渐上升,到 1974 年达到一个峰值,首次达到  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  以上;从 20 世纪 80 年代中期开始气温呈明显上升趋势,但 1997 年由于大范围的降雪,气温明显回落,从 1996 年的  $0.79 \text{ }^\circ\text{C}$  降至  $-1.20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,随后气温逐步升高,2009 年达  $1.85 \text{ }^\circ\text{C}$ ,是近 45 a 来的最高值,比多年平均值高  $1.77 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

增幅达 77.35%。

#### 3.4.3 年平均蒸发量变化

由图 2 可见,与温度和降水不同,那曲地区年平均蒸发量总体表现为下降趋势,其气候倾向率为  $-49.14 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。年平均蒸发量在 20 世纪 70 年代初期达到一个低值,随后逐渐增加;20 世纪 70 年代中期到末期,蒸发量减少;20 世纪 80 年代初期到中期蒸发量增加;此后蒸发量进入一个较长时期的下降期,1997 年因积雪覆盖,蒸发量达到最低值,随后蒸发量在波动中逐渐增加。

### 3.4.4 年平均相对湿度变化

由图2可见,近45 a来,那曲地区年平均相对湿度整体上呈上升趋势,但增长幅度较小,其气候倾向率为 $0.63(10\text{ a})^{-1}$ ,研究区相对湿度在20世纪70年代初有所下降;从70年代中期起有较大幅度的增长,而后又有所下降;1983年达到近45 a的最低值;而后进入一个快速上升期,到1997年达到最高值后又有所下降。

### 3.5 湖泊动态变化对气候变化的响应

在对湖泊面积变化与气候因子进行灰度关联分析时,对所选数据作如下处理:首先,根据1976—1989、1990—1999和2000—2010年3个阶段湖泊面积的年平均增长率估算逐年湖泊面积;然后,对湖泊面积和气候数据进行标准化处理,选取分辨系数为0.5,对于标准化数据进行关联度分析,得到湖泊面积与年平均温度、年平均最高温度、年平均最低温度、年平均降水量、年平均蒸发量、年平均相对湿度的关联度分别为0.828 5、0.842 1、0.701 8、0.795 9、0.771 1和0.7468,且全部通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。

可以看出,在参与分析的几个气象因子中,年平均最高温度、年平均温度和年平均降水量是影响湖泊面积变化最主要的3个关联因子,其次是年平均蒸发量与年平均最低温度。

近45 a来,那曲地区年平均温度呈现出较明显的上升趋势(图2)。气候持续变暖带来的最直接影响是冰川萎缩和冰雪融水量增加。冰雪融水是那曲地区湖泊最重要的补给方式,而气温升高是冰雪融水增加的最主要原因。1976—1989、1990—1999和2000—2010年的线性气温倾向率分别为0.57、0.73和 $1.34\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ,与这3个时期湖泊面积的增长规律相一致,气温升高最迅速的10 a也是湖泊面积增加最为剧烈的时期。1976—2010年色林错的面积变化进一步证明了气温升高对湖泊动态的影响。色林错最大的2条补给河流均由冰川发育而来,气温升高引起的冰雪融水增加,导致入湖径流量增加,从而使湖泊面积明显增加,而且主要集中在近10 a,这与气象要素的分析结果相一致。根据鲁安新等<sup>[22-23]</sup>的研究结果,格拉丹东冰川面积从1969年的 $899.31\text{ km}^2$ 减小到2000年的 $884.40\text{ km}^2$ ,降幅为1.66%;程稼骏<sup>[24]</sup>发现,1969—2007年唐古拉山克拉玛底地区的冰川面积减少 $17.61\text{ km}^2$ ,降幅为9.81%,冰储量减少 $5.75\text{ km}^3$ ;另外,康世昌等<sup>[25]</sup>对格拉丹东冰芯进行 $\delta^{18}\text{O}$ 研究发现,该冰川在20世纪90年代以来的增温率约为20世纪

70年代的2倍,表明近期增温有加速趋势,且高海拔区域对全球变暖的响应更为敏感。

近45 a来,那曲地区年平均降水量总体上呈增加趋势,年平均相对湿度也呈波动上升态势,而年平均蒸发量则表现为较平稳的下降趋势(图2)。在这些要素的共同作用下,那曲地区气候正朝着暖湿化方向发展,这无疑会直接促进湖泊面积增加,这种现象可以认为是全球明显变暖驱动水循环加剧的部分结果<sup>[26]</sup>。

### 3.6 湖泊面积与气象要素的拟合模型

为了预测湖泊面积的变化趋势,分析湖泊面积与各气象要素间的相关关系,以各时期的湖泊面积为因变量,各气象要素为自变量,建立气象要素与湖泊面积间的多元回归方程

$$Y = 850.92X_1 - 5.50X_2 - 3.23X_3 - 93.89X_4 + 29\ 652.73. \quad (3)$$

式(3)中, $Y$ 为湖泊面积, $\text{km}^2$ ;  $X_1$ 为年平均气温, $^{\circ}\text{C}$ ;  $X_2$ 为年平均蒸发量, $\text{mm}$ ;  $X_3$ 为年平均降水量, $\text{mm}$ ;  $X_4$ 为年平均相对湿度,%。 $R^2$ 为0.907,且通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,表明模型与数据的拟合程度较好,建立的回归方程有效。

通过以上预测模型,得到1976、1990、2000和2010年那曲地区的湖泊面积预测值分别为 $13\ 217.57$ 、 $13\ 841.24$ 、 $14\ 275.82$ 和 $16\ 582.45\text{ km}^2$ 。与实际值相比,偏差最大的为1990年,比实际面积( $13\ 408.77\text{ km}^2$ )大 $432.47\text{ km}^2$ ;偏差最小的是2000年,仅比实际面积( $14\ 251.46\text{ km}^2$ )大 $24.36\text{ km}^2$ 。预测模型得到的湖泊面积与实际湖泊面积间的 $r^2$ 为0.906,可见预测模型能较好地拟合湖泊面积变化。

## 4 结论

(1)2010年那曲地区大于 $1\text{ km}^2$ 的湖泊总面积为 $1\ 6841.93\text{ km}^2$ ,湖泊总数为469。1976—2010年,该地区大于 $1\text{ km}^2$ 湖泊面积增加 $3\ 505.12\text{ km}^2$ ,增幅为26.28%,其中2000—2010年增长幅度最大,达 $2\ 590.47\text{ km}^2$ ;1976—2010年湖泊数增加96,其中1990—2000年增长幅度最大,达53。

(2)色林错面积从1976年的 $1\ 648.61\text{ km}^2$ 增加到2010年的 $2\ 332.55\text{ km}^2$ ,增幅达41.49%,超过纳木错成为西藏的第一大咸水湖。气温升高引起的冰雪融水增加导致入湖径流量增加,是色林错面积增加的最主要原因。

(3)近45 a来,那曲地区气候向暖湿化趋势发展,年平均温度、年平均最高温度、年平均最低温

度、年平均相对湿度和年平均降水量总体呈上升趋势,年平均蒸发量呈下降趋势,其中年平均温度变化最显著,其气候倾向率为 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。通过湖泊面积与气象因子间的灰度关联分析,发现气温升高引起的冰雪融水增加,降水量、相对湿度增加和蒸发量减少是近35 a来那曲地区湖泊面积和数量不断增加的主要原因。气象要素与湖泊面积间的回归方程表明两者具有显著线性相关关系,得到的预测模型能较好地拟合湖泊面积变化。

(4)由于卫星遥感影像的局限性,笔者研究中卫星资料的获取日期并没有完全在同一个季相,使得获得的湖泊变化情况存在一定误差。由于缺乏相关的水文观测数据和湖泊周围冰雪融水的变化情况资料,对于湖泊变化和冰川变化之间的关系模型建立,各种气象要素是如何引起湖泊和冰川变化以及它们之间的相互作用等问题尚需进一步研究。此外,由于卫星资料年份有限,建立的湖泊面积与气象要素间的回归方程还有待更长时间序列资料的验证。

#### 参考文献:

- [1] 汤奇成,熊怡. 中国河流水文[M]. 北京:科学出版社,1998:15-19.
- [2] 陈宜瑜. 中国湿地研究[M]. 长春:吉林科学出版社,1995:34-36.
- [3] FREYMUELLER J T. Earth Science: A New Mechanical Model for Tibet[J]. *Nature*,2011,472(7341):48-49.
- [4] WISCHNEWSKI J, KRAMER A, KONG Z C, *et al.* Terrestrial and Aquatic Responses to Climate Change and Human Impact on the Southeastern Tibetan Plateau During the Past Two Centuries[J]. *Global Change Biology*,2011,17(11):3376-3391.
- [5] 沈渭寿,李海东,张涛,等. 西藏高寒风沙化土地飞播可行性分析[J]. *生态与农村环境学报*,2009,25(1):106-111.
- [6] 舒俭民,王家骥,高吉喜,等. 雅鲁藏布江中部地区生物多样性保护规划[J]. *生态与农村环境学报*,1997,13(2):1-5.
- [7] 张永春. 流域、区域、生态——湖泊环境治理的战略思考[J]. *生态与农村环境学报*,2010,26(增刊1):1-3.
- [8] 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[J]. *地理学报*,2007,62(3):301-311.
- [9] 叶庆华,姚檀栋,郑红星,等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化及其对气候变化的响应[J]. *地理研究*,2008,27(5):1178-1191.
- [10] 类延斌,张虎才,王牲,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.
- [11] 时兴合,李林,汪青春,等. 环青海湖地区气候变化及其对湖泊水位的影响[J]. *气象科技*,2005,33(1):58-62.
- [12] 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.
- [13] 甘肃草原生态研究所草地资源室,西藏自治区那曲地区畜牧局. 西藏那曲地区草地畜牧业资源[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1991:14-19.
- [14] 高清竹,李玉娥,林而达,等. 藏北地区草地退化的时空分布特征[J]. *地理学报*,2005,60(6):965-973.
- [15] 刘雪松,马玉才,拉巴,等. 那曲地区牧业气候区划[M]. 北京:气象出版社,2003:44-45.
- [16] 全彩荣,马海州,周笃珺. 基于MODIS数据的西台吉乃尔盐湖水体提取及水域面积的监测[J]. *盐湖研究*,2008,16(4):27-31.
- [17] 李晖,肖鹏峰,冯学智,等. 近30年三江源地区湖泊变化图谱与面积变化[J]. *湖泊科学*,2010,22(6):862-873.
- [18] CHAN W K, TONG T K L. Multi-Criteria Material Selections and End-of-Life Product Strategy: Grey Relational Analysis Approach[J]. *Materials & Design*,2007,28(5):1539-1546.
- [19] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京:科学出版社,1998:399.
- [20] 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.
- [21] SHEN Wei-shou, JI Di, ZHANG Hui, *et al.* The Response Relation Between Climate Change and NDVI Over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*,2012,59:2216-2222.
- [22] 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[J]. *冰川冻土*,2002,24(5):559-562.
- [23] 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[J]. *冰川冻土*,2005,27(6):783-792.
- [24] 谯程骏. 唐古拉山冬克玛底地区冰川变化遥感监测[J]. *安徽农业科学*,2010,38(14):7703-7705.
- [25] 康世昌,张拥军,秦大河,等. 近期青藏高原长江源区急剧升温的冰芯证据[J]. *科学通报*,2007,52(4):457-462.
- [26] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型评估[M]. 北京:气象出版社,2003:1-3.

作者简介:林乃峰(1986—),男,江苏宜兴人,硕士生,主要从事3S技术在生态退化与修复方面的应用研究。E-mail: Inf\_1986@163.com