

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0074

DU Jun, NIU Xiaojun, YUAN Lei, et al. Climatic and environmental features in Chang Tang National Nature Reserve during 1971–2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):1017–1026. [杜军, 牛晓俊, 袁雷, 等. 1971–2017年羌塘国家级自然保护区陆地生态环境变化[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):1017–1026.]

1971–2017年羌塘国家级自然保护区 陆地生态环境变化

杜 军^{1,2}, 牛晓俊³, 袁 雷³, 次旺顿珠³

(1. 西藏高原大气环境科学研究所, 西藏 拉萨 850001; 2. 西藏高原大气环境研究重点实验室, 西藏 拉萨 850001;
3. 西藏自治区气候中心, 西藏 拉萨 850001)

摘 要: 利用羌塘国家级自然保护区边缘5个气象站1971–2017年逐月平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量和逐年最大冻土深度等气象资料, 以及卫星遥感资料, 采用线性回归、相关系数等方法, 分析了自然保护区气候(气温、降水等)、水体(湖泊、冰川)和植被等生态环境因子的变化。结果表明: 近47年自然保护区年平均气温以 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速率显著升高, 明显高于同期全球和亚洲地表温度的升温率。四季平均气温升温率为 $0.37\sim 0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 升幅在冬季最大、夏季最小。年降水量呈明显的增加趋势, 增幅为 $11.0\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 主要表现在春、夏两季。近43年(1975–2017年)色林错面积呈显著增加趋势, 平均增长率为 $38.48\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 。1973–2017年, 普若岗日冰川面积整体上趋于减少, 平均每年减少 2.11 km^2 ; 自然保护区年最大冻土深度变化率为 $-35.7\text{ cm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。1999–2013年保护区NDVI增幅达25.3%, 平均每10年增加0.0184, 植被覆盖度明显增加。总之, 近47年自然保护区表现为气候暖湿化、冰川退缩、湖泊扩张、冻土退化、植被覆盖增加的变化特征, 而冰川变化引发的水资源时空分布和水循环过程的变化, 无疑将给高原社会经济发展带来深刻影响。

关键词: 气温; 降水; 湖泊; 冰川; 冻土; 植被覆盖; 生态环境; 羌塘国家级自然保护区

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-1017-10

0 引言

IPCC第5次评估报告指出, 过去30年, 每10年全球地表温度的增暖幅度高于1850年以来的任何时期。在北半球, 1983–2012年可能是最近1400年来气温最高的30年, 21世纪的第1个10年是最暖的10年^[1]。素有“世界屋脊”和“亚洲水塔”之称的青藏高原^[2–3], 受大气环流和高原地貌特征的制约, 形成了独特的高原气候, 并对中国其他地区以及东南亚、南亚等地区的气候和植被格局产生了深刻影响^[4]。由于青藏高原在全球气候变化中的重要性, 国内外学者对青藏高原气候变化进行了大量的研究^[5–9]。

约占青藏高原总面积1/5的羌塘高原, 是世界上海拔最高、气候条件最恶劣的高原, 大部分地区位于半干旱、干旱的高原寒带, 区域生态环境极其脆弱。由于其地理位置的特殊性, 该区域还存在大片的气象观测空白, 而青藏高原的气象观测站点集中分布于中东部地区。羌塘国家级自然保护区(以下简称自然保护区)内无观测站点, 仅有5个国家级气象站点分布在其周边地区, 区域内气温、降水等气象要素时空格局以及气候变化趋势尚不明确。目前主要以遥感反演产品、融合数据和短期观测来获取资料, 以分析羌塘高原环境和气候变化^[10–12]。李彩瑛等^[11]利用卫星遥感资料反演了羌塘高原夏季土壤湿度, 指出羌塘高原中部和北部夏季土壤湿

收稿日期: 2018-11-21; 修订日期: 2019-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41765011); 2019年西藏自治区科技重点研发计划项目“西藏主要地表特征科学考察及研究”资助

作者简介: 杜军(1969–), 男, 贵州绥阳人, 正研级高级工程师, 1991年在南京气象学院获学士学位, 从事青藏高原气候变化和农业气候研究. E-mail: dujun0891@163.com.

度呈显著变干趋势,而南部大部土壤湿度变化趋势不显著。李兰晖等^[12]基于2015年羌塘高原自动观测站降水数据和5套降水格点产品等,认为羌塘高原存在轻微湿化的过程,局部强降水事件频发的概率增大。为了揭示自然保护区陆地生态环境的变化事实,本文利用自然保护区周边5个气象站1971–2017年逐月平均气温、降水量等气象资料以及卫星遥感资料,分析了近47年自然保护区气候、湖泊、冰川和植被等的变化事实,力求为当地应对气候变化、防灾减灾提供参考,为评估未来气候变化的影响提供基础性成果支撑。

1 研究区概况

自然保护区位于西藏自治区西北部,冈底斯山和念青唐古拉山以北,可可西里山、昆仑山以南,地处东经79°59′~90°26′E,北纬32°12′~36°29′N之间,平均海拔5 000 m以上,被称为“世界屋脊的屋脊”。自然保护区于1993年经西藏自治区人民政府批准成立,2000年4月4日经国务院批准晋升为国家级自然保护区。保护区面积约29.8×10⁴ km²,它是我国面积最大的自然保护区,是仅次于格陵兰国家公园的世界第二大陆地自然保护区,也是平均海拔最高的自然保护区。行政隶属阿里地区北部三县(日土、改则、革吉)和那曲市西部三县(尼玛、双湖、安多)^[11–15]。

自然保护区是世界上湖泊数量最多、湖面最高的高原湖区。根据《中国湖泊志》^[16]统计,羌塘保护区大小湖泊有9 563个,以小湖泊为主,总面积为10 340.78 km²。其中,超过1 km²的湖泊有960个,总面积约9 424.08 km²,分别占全国湖泊总数量和总面积的32.8%和10.4%。

自然保护区也是我国高原现代冰川分布最广的地区。这里有昆仑山、羌塘高原、唐古拉山和念青唐古拉山等现代冰川。这些冰川的总面积超过2.5×10⁴ km²,主要分布在羌塘高原的东、南、北以及中心地区。

自然保护区绝大部分属于多年冻土区,年平均地温为-1.5~-5.0℃;其南部边缘地区属于季节性冻土,年平均地温在0.5~-1.5℃^[17]。活动层厚度由羌塘盆地向四周增大,活动层厚度在多年冻土区边缘最大^[18]。

自然保护区植被最为显著的特点是种类较少、结构简单,从东南向西北,草地植被大体呈高寒草

甸草原、高寒草原、高寒荒漠草原、高寒荒漠的分布^[13]。

自然保护区空气稀薄,气候寒冷而干燥,自然环境严酷。年平均气温大都在0℃以下,高原的西北边缘属寒带气候,年平均气温在-5℃以下^[19]。李兰晖等^[11]分析得出,羌塘高原核心区降水量为95.6~294.9 mm,年平均值为154.9 mm;降水日数为37~68 d,年均值为50 d。昆仑山脉以北地区是羌塘高原降水量最低的地区,是“寒旱核心”的主要区域之一。自然保护区光照条件充足,年日照时数为2 800~3 600 h,年太阳总辐射高于6 100 MJ·m⁻²,远超过同纬度地区。羌塘草原冬春季多大风,高原风力强,频度高,年大风日数大于100 d,如安多站大风日数平均每年有123 d,最多可达283 d(出现在1976年)。

2 资料与方法

2.1 资料来源

因自然保护区内无气象站,所以选取其周边同属羌塘高原湖盆高寒草原区的安多、班戈、申扎、改则和狮泉河5个气象站(图1),1971–2017年逐月降水量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温以及逐年最大冻土深度等资料进行分析。自然保护区年、季气象要素的数据序列采用对5个站进行算术平均得到。所有气象数据来源于西藏自治区气象信息与网络中心,并采用Excel和SPSS软件进行统计。气象要素多年平均值采用1981–2010年的30年平均值。全球和亚洲表面平均温度序列由国家气候中心提供。

自然保护区的核心区是指保存完好的天然状态的生态系统及珍稀、濒危动植物的集中分布区域,禁止任何单位和个人进入;缓冲区为只准进入从事科学研究观测活动的区域;试验区是可以进入从事科学试验、教学实习、参观考察、旅游以及驯化、繁殖珍稀、濒危野生动植物等活动的区域。

遥感影像资料主要利用陆地资源卫星Landsat(TM、ETM+、MSS、OLI_TRIS)、环境减灾卫星(HJ1A-CCD1)和我国高分1号卫星(GF1-WFV1)3种卫星遥感影像数据,主要包括TM/ETM+、Landsat-MSS、遥感数据41景、Landsat 8 OLI_TRIS数据8景、HJ1A-CCD1卫星数据3景、高分GF1-WFV1卫星数据2景,共54景多源卫星遥感影像。遥感数据的分辨率从16~57 m不等。所有卫星遥感资料均

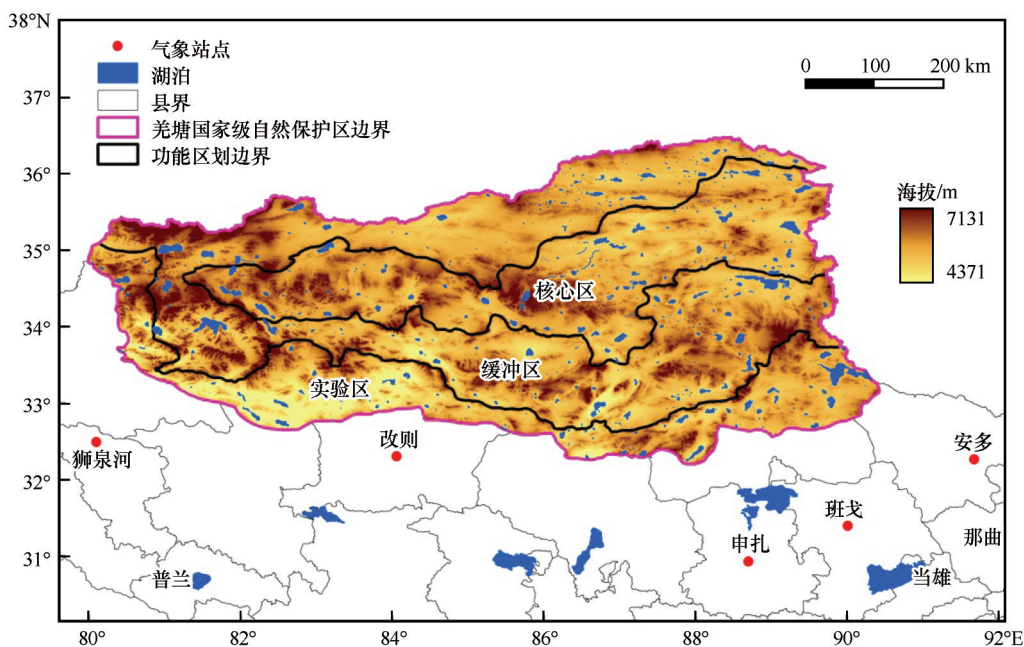


图1 羌塘国家级自然保护区周边气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Chang Tang Nature Reserve (CTNR)

为晴空资料,分析时段为每年9—11月水位相对稳定的季节。

植被指数(NDVI)数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/data.aspx>)的中国逐月植被指数(NDVI)空间分布数据集。

2.2 方法

遥感数据处理方法:利用ENVI图像处理软件对1975年出版的1:10万电子版地形图进行重采样,输出分辨率为30 m的图像作为底图,将误差控制在一个像元之内对卫星影像资料进行了几何精校正。对湖泊、冰川等预处理图像还进行边缘增强、灰度变换、波段比值运算等处理,并基于ArcMap和ArcCatalog软件制作完成湖泊、冰川的数字化、编辑和面积测算、制图等。

NDVI数据利用ArcGIS分别裁剪出羌塘自然保护区核心区、缓冲区和试验区1999—2015年逐月NDVI数据集,并根据当地牧草生长特点,将7—9月平均值作为区域当年NDVI值,以分析其时空变化。

气象要素、湖泊与冰川的面积、NDVI等生态环境因子的线性变化趋势采用下式(1)进行计算。

$$Y = a_0 + a_1 t \quad (1)$$

式中: Y 为生态环境因子; t 为时间; a_0 为常数项; a_1 为线性趋势项,把 $a_1 \times 10$ 年称为生态环境因子每10

年的气候倾向率(线性变化趋势)。对于变化趋势的显著性,采用时间 t 与序列变量 Y 之间的相关系数进行不同程度的显著性检验。

3 自然保护区气象要素的变化趋势

3.1 气温变化

在全球变暖的大背景下,自然保护区的气候呈现出显著的增暖趋势(表1),近47年(1971—2017年)保护区年平均气温以 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率显著升高 ($P < 0.01$, 图2),明显高于同期全球平均地表温度的升温率 ($0.18\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.001$, 图3)和亚洲的升温率 ($0.31\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.001$, 图3)。尤其是近27年(1991—2017年)升温更为明显,升温率达 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。从季节变化来看,近47年保护区四季平均气温升温率为 $0.37 \sim 0.55\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$),升幅以冬季最大,其次是秋季,夏季最小;近27年冬季升温率达 $1.01\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$,是夏季升温率 [$0.36\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$] 的2.8倍。就地域分布而言,近47年狮泉河四季增温最为明显,其次是改则,申扎增温最小。

近47年自然保护区年平均最高气温和平均最低气温都表现为升高趋势(表1),升温率分别为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$) 和 $0.59\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$),主要表现在冬季。从地域分布上来看,以狮泉河、改则2站升温更为明显。各站年平均最高

表1 1971–2017年自然保护区各站气温要素的变化趋势[单位: $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$]
Table 1 Linear trend of temperature elements in CTNR from 1971 to 2017 [unit: $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$]

站点	平均气温			平均最高气温			平均最低气温		
	全年	冬季	夏季	全年	冬季	夏季	全年	冬季	夏季
安多	0.39****	0.56****	0.29****	0.27**	0.41**	0.18*	0.53****	0.62****	0.47****
班戈	0.46****	0.57****	0.39****	0.36****	0.43****	0.29***	0.60****	0.72****	0.55****
申扎	0.30****	0.34****	0.28****	0.31****	0.34***	0.27***	0.28****	0.32***	0.33****
改则	0.56****	0.77****	0.43****	0.39****	0.59****	0.26***	0.83****	1.02****	0.74****
狮泉河	0.57****	0.62***	0.45****	0.45****	0.63****	0.27***	0.78****	0.74****	0.78****
保护区	0.46****	0.55****	0.37****	0.37****	0.47****	0.27****	0.59****	0.65****	0.57****

注: *、**、***、****分别表示 $P<0.10$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 。

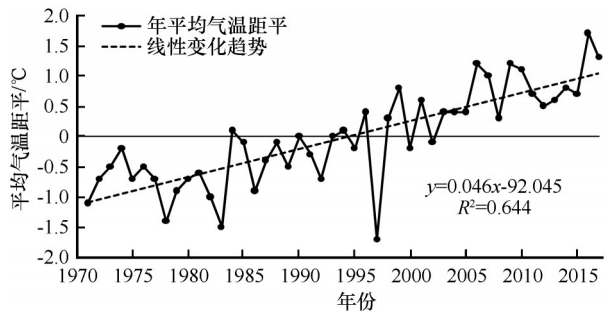


图2 1971–2017年自然保护区地表面年平均气温距平的变化
Fig. 2 The trend of annual mean land surface air temperature anomalies in CTNR from 1971 to 2017

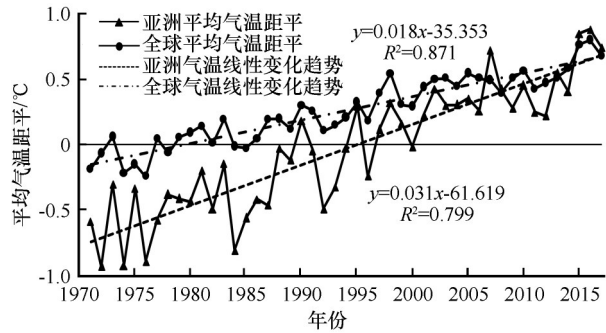


图3 1971–2017年全球和亚洲地表面年平均气温距平变化
Fig. 3 The trend of global and Asian annual mean land surface air temperature anomalies from 1971 to 2017

气温均呈现为显著的增温趋势,增幅为 $0.27\sim 0.45\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.05$),以狮泉河最大;各地冬季平均最高气温上升明显,升温率为 $0.34\sim 0.63\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.05$);夏季平均最高气温升温率为 $0.18\sim 0.29\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.10$)。大部分站点平均最低气温升温幅度明显大于平均最高气温,年平均最低气温升温率为 $0.28\sim 0.83\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$),以改则最大;四季平均最低气温均呈现为显著的升高趋势,以冬季升温最明显,升幅为 $0.32\sim 1.02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$),特别是近27年改则升温率达 $1.48\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$)。近47年夏

季平均最低气温升温率为 $0.33\sim 0.78\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$),其中狮泉河升幅最大、申扎最小。

3.2 降水量变化

近47年自然保护区年降水量表现为明显的增加趋势(图4),平均每10年增加 11.0 mm ($P<0.05$)。在季节变化上看,保护区春、夏两季降水增幅较为明显,增幅分别为 $3.8\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$)、 $8.0\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.10$);而秋、冬季降水变化不大。近27年夏季降水呈现显著增加趋势,增幅达 $21.4\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.05$);春季降水也趋于增加,为 $7.9\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$);而秋季和冬季降水倾向于减少,但因春、夏两季降水明显增加,致使年降水量增幅达到 $21.9\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.05$)。

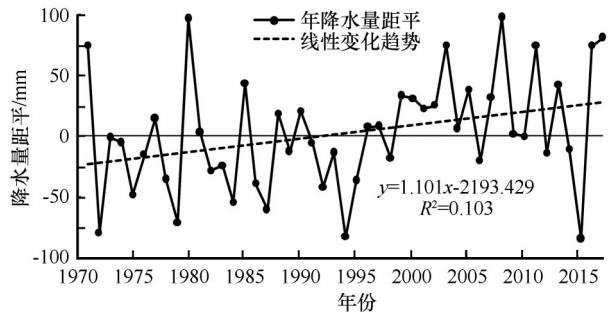


图4 1971–2017年自然保护区年降水量距平的变化
Fig. 4 The trend of annual precipitation anomalies in CTNR from 1971 to 2017

从地域分布来看(表2),近47年年降水量除狮泉河呈弱的减少趋势外,其余各站均为增加趋势,其中申扎增幅最为明显,为 $20.9\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.05$);其次是改则,为 $15.4\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.05$);安多增幅最小,为 $13.2\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$;特别是近27年各站年降水量增幅明显,为 $5.0\sim 35.4\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$,以改则最大($P<0.01$),其次是申扎,为 $29.3\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$,安多最小。季降水量也

表2 1971—2017年自然保护区各站年、季降水量的变化趋势[单位: $\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$]

Table 2 Linear trend of annual and seasonal precipitation in CTNR from 1971 to 2017 [unit: $\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$]

站点	春季	夏季	秋季	冬季	全年
安多	6.4***	6.3	0.9	-0.3	13.2
班戈	5.4***	6.8	0.5	0.6	13.3
申扎	6.3****	15.6**	-1.5	0.5*	20.9**
改则	1.7	15.8***	-1.8	-0.2	15.4**
狮泉河	0.6	-0.4	-1.7*	0.2	-1.3
保护区	3.8***	8.0*	-1.0	0.2	11.0**

注: *, **, ***, ****分别表示 $P < 0.10$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 。

具有较明显的地域性差异,春季降水各站均为增加态势,以东部各站增幅明显;夏季降水量除狮泉河为弱的减少趋势外,其他各站均趋于增加,以改则增幅最大,达 $15.8 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$);秋季降水仅在安多、班戈为增加趋势,其他3站趋于减少;冬季降水各站变化不大,在 $\pm 1.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 以内。

4 自然保护区陆地生态环境变化

4.1 湖泊变化

本文根据多源卫星遥感资料分析得出,1975—2017年色林错面积变化呈显著上升趋势(图5),湖面面积平均上涨率为 $38.48 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.001$)。其中,2000年以后湖泊面积持续扩张,2000年湖泊面积与1975年相比,扩大了 267.28 km^2 ,扩张率为16.48%;2003年面积达到 2058.09 km^2 ,超过纳木错面积,成为西藏第一大咸水湖;2014年湖泊面积达 2393.33 km^2 ,为近43年最大值。2017年色林错湖面面积为 2383.97 km^2 ,较1975年(1621.77 km^2)扩张了46.9%。

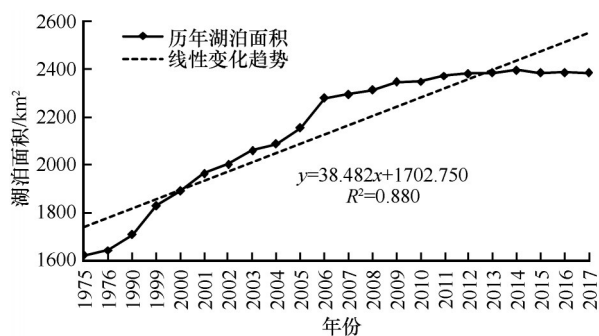


图5 1975—2017年色林错湖泊面积变化

Fig. 5 The area change of Selin Co in Tibet from 1975 to 2017

4.2 冰川变化

自然保护区是中国高原现代冰川分布最广的地区,普若岗日冰川是自然保护区最大的由数个冰帽型冰川组合成的大冰原,冰川分布范围在 $89^{\circ}20' \sim 89^{\circ}50' \text{ E}$, $33^{\circ}44' \sim 34^{\circ}04' \text{ N}$ 之间,覆盖总面积为 422.58 km^2 ,冰储量为 52.5153 km^3 ,冰川雪线海拔高度为 $5620 \sim 5860 \text{ m}$,是世界上最大的中低纬度冰川,也被确认为世界上除南极、北极以外最大的冰川。

本文根据1973—2017年多源卫星遥感监测资料分析,普若岗日冰川面积整体呈明显的减少趋势(图6),近45年平均每年减少 2.11 km^2 ($P < 0.001$)。2017年,冰川面积为 389.0 km^2 ,较1973年减少了17.9%。

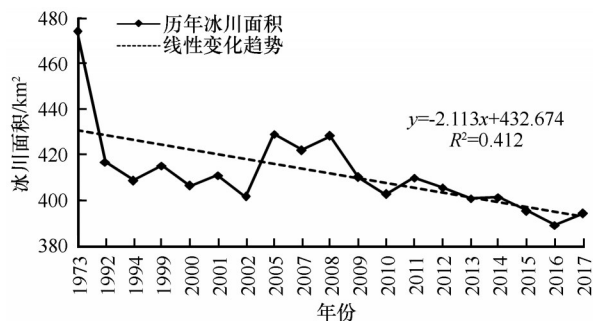


图6 1973—2017年普若岗日冰川面积变化

Fig. 6 Variation of the coverage of Puruogangri Glacier in Tibet from 1973 to 2017

4.3 冻土变化

鉴于自然保护区仅有安多气象站有长序列的冻土观测资料,本文利用1973—2017年安多站年最大冻土深度资料,分析了其变化趋势,结果发现:近45年安多站年最大冻土深度呈显著的变浅趋势(图7),平均每10年变浅 35.7 cm ($P < 0.001$),尤其是近37年(1981—2017年)变浅趋势在加大,幅度达 $-43.6 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$),表明自然保护区边缘冻土退化明显,且这种趋势仍在持续。

4.4 植被变化

本文根据1999—2015年卫星遥感资料分析发现,近17年自然保护区平均NDVI为0.126,其中试验区NDVI最大,为0.140;缓冲区和核心区NDVI均为0.118。从变化趋势来看(图8),1999—2015年自然保护区NDVI的变化总体上趋于增加,平均每10年增加0.0068(未通过显著性检)。其中,1999—2013年保护区NDVI表现为显著的增加趋势,15年增幅达25.3%,平均每10年增加

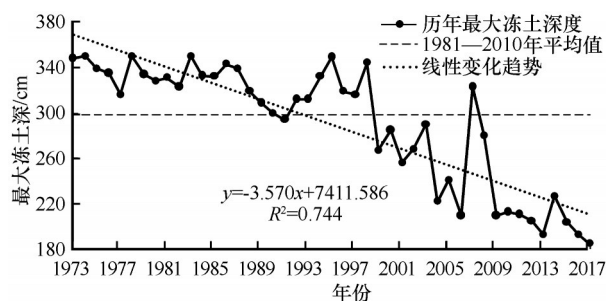


图7 1973—2017年安多站年最大冻土深度变化

Fig. 7 Variation of the maximum frozen depth at Amdo station in Tibet from 1973 to 2017

0.0184 ($P < 0.001$), 植被覆盖度明显增加; 2014—2015年NDVI趋于下降, 就其原因是大部分站点初夏降水明显偏少, 致使牧草返青推迟, 长势较差, 尤其是2015年保护区中东部5—7月降水量偏少5成以上, 植被长势极差。就各区域NDVI变化来看, 近17年核心区NDVI呈较显著的增加趋势, 增幅为 $0.0097 \cdot (10a)^{-1}$ ($P < 0.10$); 而缓冲区、试验区NDVI也趋于增加, 但未通过显著性检验水平。

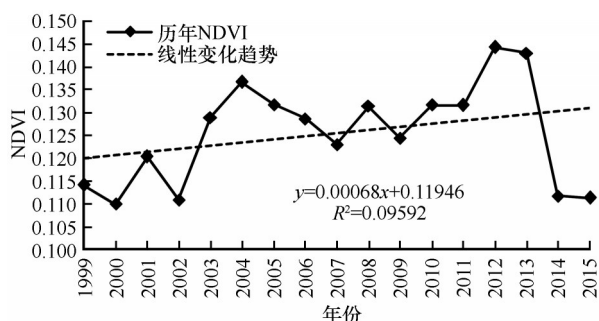


图8 1999—2015年自然保护区年平均NDVI变化

Fig. 8 The change of annual mean NDVI in CTNR from 1999 to 2015

此外, 分析了自然保护区平均NDVI与边缘气象站月平均气温、降水量、日照时数、相对湿度等气象要素的相关系数, 发现气象要素与NDVI的相关性不高, 仅有7月降水量相关系数最大, 为0.403, 但未通过显著性检验水平。这也表明, 保护区边缘地区站点只能反映保护区周边的气象要素特征, 不能很好地反映自然保护区内各气象要素的气候特征, 因此加强遥感数据的应用, 以弥补数据的缺陷就显得十分重要。

5 讨论与结论

5.1 讨论

尽管自然保护区气温、降水等变化直接影响到

自身及其周边区域冰冻圈和生态系统的变化, 但由于自然保护区无气象站, 观测资料严重匮乏, 且自然保护区边缘地区的5个站点只能反映自然保护区周边的气候特征, 对于自然保护区核心区而言, 国内学者目前多以遥感反演产品、融合数据、短期观测为主获取资料, 以分析羌塘高原环境变化。若需科学认识自然保护区的气候特征及其变化, 从长期来看, 应在保护区合理建立地球系统多圈层的综合观测站, 实时进行观测, 积累数据; 短期来看, 应加大卫星遥感反演产品、再分析资料在羌塘高原的适用性研究, 提高数据的精度, 以弥补数据的不足。

自然保护区湖泊众多, 大于 10 km^2 、 100 km^2 湖泊分别有154个和12个, 总面积分别为 $7\,098.39 \text{ km}^2$ 和 $2\,596.58 \text{ km}^2$; 大于 300 km^2 的湖泊主要有多格错仁(393.3 km^2)^[16]、多尔索洞错(366.65 km^2)、鲁玛江东错(324.8 km^2)^[16]和赤布张错(480.34 km^2)^[20]。闫立娟等^[20]分析表明, 20世纪70年代至90年代, 自然保护区除中部湖泊趋于扩张, 其他大部分湖泊均出现不同程度的萎缩; 而2000年前后至2010年前后自然保护区大部分湖泊面积以扩张为主。其中, 2009年多格错仁、多尔索洞错、鲁玛江东错、赤布张错和多格错仁强错5个湖泊面积较1990年分别增加了27.5%、32.2%、6.1%、15.2%和70.9%。此外, 距离保护区最近的色林错, 曾是西藏第二大咸水湖, 边多等^[21]研究认为2003年超过了纳木错的面积, 成为西藏第一大咸水湖。近年来国内学者^[22-24]利用RS和GIS技术对色林错面积变化进行了大量的研究, 总体都认为近30年色林错湖面面积呈明显的扩张趋势。

蒲健辰等^[25]发现小冰期以来, 普若岗日冰川呈退缩趋势, 在普若岗日西侧, 小冰期后期至20世纪70年代, 冰川退缩了20 m; 70年代至90年代末, 冰川退缩了40~50 m; 平均 $1.5 \sim 1.9 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。井哲帆等^[26]认为普若岗日冰原5Z611A6号冰舌末端自1974年1月至2000年10月是处于退缩状态, 但是退缩幅度不大, 约为50 m, 26年间平均每年的退缩量约为1.92 m。拉巴等^[27]采用卫星影像人工数字化方法计算了2013年普若岗日冰川面积为 400.68 km^2 , 与中国冰川目录中给出20世纪80年代的普若岗日冰川面积对比发现, 冰川面积减少了 21.29 km^2 。本研究也认为普若岗日冰川面积趋于明显的退缩态势。此外, 自然保护区周边的古里雅冰川和申扎

杰岗日冰川都表现为明显的退缩, 2018年西藏境内古里雅冰川面积为 112.79 km², 较 1977 年减少 1.89%; 申扎杰岗日冰川面积为 72.2 km², 较 1976 年退缩 38.82%^[28]。

多年冻土作为全球气候变化的冰冻圈敏感因子之一, 其变化即可通过改变地气水热交换过程而影响气候系统, 也会通过改变冻土碳库进而影响全球碳循环和气候变化^[29]。在全球气候变化的背景下, 青藏高原多年冻土的退化已成为不争的事实^[30-31], 及其所引发的生态环境效应已成为人们关注的焦点问题之一^[32-35]。徐晓明等^[18]分析表明, 青藏高原多年冻土区活动层厚度平均为 2.39 m, 活动层厚度在羌塘盆地最小。活动层厚度由羌塘盆地向四周增大, 活动层厚度在多年冻土区边缘最大。自然保护区周边的安多站位于羌塘盆地, 其活动层厚度增大明显^[32]。

近年来, 很多学者利用 NDVI 研究青藏高原植被的动态变化, 总体上青藏高原 NDVI 值呈幅度较小的增加趋势^[36-39]。吴晓萍等^[40]分析了近 10 年来羌塘国家级自然保护区 NDVI 的变化, 认为其东部 NDVI 呈显著上升趋势, 植被覆盖增加; 中部和西部呈下降趋势, 植被覆盖减少。

在全球变暖的大背景下, 本研究认为自然保护区气候暖湿化特征明显。李兰晖等^[12]也认为羌塘高原存在轻微湿化的过程, 由于其生态环境的极脆弱性, 微弱的湿化过程也可能引起该地区生态环境发生强烈的变化, 如何变化还有待进一步研究。气候变暖明显, 高原温带、亚寒带南界北移, 东界西移, 温带区扩大, 生态系统总体趋好^[41]; 高原草原面积增加, 牧草返青期提前, 枯黄期推迟, 生长期延长, 植被净初级生产力呈增加态势^[42]。

综上所述, 受气候变暖影响, 自然保护区与青藏高原大部一样, 冰川趋于消融、湖泊呈明显扩张态势。冰川退缩已经改变了发源于高原河流的水文过程及其时空分布, 增加了以冰川融水补给为主的河流的不稳定性^[43-44]。以冰川融水补给为主的河流近期流量可能会增大, 而长期冰川融水将会随着冰川面积退缩而减小。而且, 以冰川融水补给为主的湖泊水位明显上涨、湖泊面积扩张迅速, 导致湖周边草地淹没, 严重影响了当地农牧民的生活和生态环境^[43, 45]。此外, 冰川消融、湖泊扩张、冻土退化也会改变高原地表状况, 进而影响到能量和水分循环过程, 这些过程可能通过一系列的作用机制对

区域乃至全球的水循环和气候变化过程产生较大的影响^[46]。羌塘高原冰川消融以及冻土融化可能在短期内会增加向长江、澜沧江和怒江等河流上游的融水供水量, 径流量增加, 湖泊水位升高, 但在远期将导致融水供水量减少, 河流径流年内变化进程可能发生改变, 给流域水资源的调控和利用带来新的挑战。建议应开展冰川融水对地表水、冰川融水补给河流水文过程的预测研究, 科学规划水资源的利用和开发, 正确认识其对地表水资源和区域气候的调控作用^[47]。

5.2 结论

(1) 近 47 年(1971—2017 年)保护区年平均气温以 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速率显著升高, 明显高于同期全球平均地表温度的升温率 [$0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$] 和亚洲的升温率 [$0.31\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$]。保护区四季平均气温升温率为 $0.37\sim 0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 升幅以冬季最大、夏季最小。年降水量表现为明显的增加趋势, 增幅为 $11.0\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 主要表现在春、夏两季, 尤其是近 27 年降水增幅更明显。

(2) 近 43 年(1975—2017 年)色林错面积变化呈显著上升趋势, 湖面面积平均上涨率为 $38.48\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 。近 45 年(1973—2017 年), 普若岗日冰川面积整体表现为明显的减少趋势, 平均每年减少 2.11 km^2 ; 期间安多站年最大冻土深度呈显著的变浅趋势, 平均每 10 年变浅 35.7 cm, 尤其是近 37 年退化趋势仍在持续。

(3) 保护区 1999—2015 年 NDVI 总体上趋于增加, 平均每 10 年增加 0.0068。其中, 1999—2013 年 NDVI 增幅达 25.3%, 平均每 10 年增加 0.0184, 植被覆盖度明显增加; 2014—2015 年 NDVI 趋于下降。就各区域 NDVI 变化来看, 核心区 NDVI 呈显著的增加趋势, 为 $0.0097\cdot(10\text{a})^{-1}$; 而缓冲区、试验区 NDVI 增幅不明显。

致谢: 感谢西藏自治区气候中心边多、德吉央宗正研级高级工程师在论文写作过程中提供的湖泊遥感监测数据。

参考文献(References):

- [1] Hartmann D, Klein A, Rusticucci M, et al. Observations: atmosphere and surface [M]//IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press.
- [2] Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. Geographical Research, 2002, 21(1): 1-8. [张懿翎, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积 [J]. 地理研究, 2002, 21(1):

- 1-8.]
- [3] Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3-12. [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.]
- [4] Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. Thermal and mechanical forcing of the Tibetan Plateau and the Asian monsoon onset: Part I: situating of the onset[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(6): 22-35. [吴国雄, 张永生. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发: I. 爆发地点[J]. *大气科学*, 1998, 22(6): 22-35.]
- [5] You Qinglong, Min Jinzhong, Zhang Wei, et al. Comparison of multiple datasets with gridded precipitation observations over the Tibetan Plateau[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(3/4): 791-806.
- [6] Liu Guifang, Lu Heli. Basic characteristics of major climatic factors on Qinghai-Tibet Plateau in recent 45 years[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(12): 2281-2288. [刘桂芳, 卢鹤立. 1961-2005年来青藏高原主要气候因子的基本特征[J]. *地理研究*, 2010, 29(12): 2281-2288.]
- [7] Ding Mingjun, Li Lanhui, Zhang Yili, et al. Temperature change and its elevation dependency on the Tibetan Plateau and its vicinity from 1971 to 2012[J]. *Resources Science*, 2014, 36(7): 1509-1518. [丁明军, 李兰晖, 张懿锂, 等. 1971-2012年青藏高原及周边地区气温变化特征及其海拔敏感性分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(7): 1509-1518.]
- [8] Duan A, Xiao Z. Does the climate warming hiatus exist over the Tibetan Plateau? [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 13711.
- [9] Zhang Renhe, Su Fengge, Jiang Zhihong, et al. An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60: 3036-3047. [张人禾, 苏凤阁, 江志红, 等. 青藏高原21世纪气候和环境变化预估研究进展[J]. *科学通报*, 2015, 60: 3036-3047.]
- [10] Chen Chuanyou, Fan Yunqi. Rivers, lakes and water resources in the Qiangtang Plateau[J]. *Resources Science*, 1983, 5(2): 38-44. [陈传友, 范云崎. 羌塘高原的河流、湖泊及水资源[J]. *资源科学*, 1983, 5(2): 38-44.]
- [11] Li Caiying, Yan Jianzhong, Liu Linshan, et al. Analysis of soil moisture variation in summer of Qiangtang Plateau based on TVDI[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(11): 2101-2111. [李彩瑛, 阎建忠, 刘林山, 等. 基于TVDI的羌塘高原夏季土壤湿度变化分析[J]. *地理研究*, 2017, 36(11): 2101-2111.]
- [12] Li Lanhui, Liu Qionghuan, Zhang Yili, et al. Spatial distribution and variation of precipitation in the Qiangtang Plateau[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(11): 2047-2060. [李兰晖, 刘琼欢, 张懿锂, 等. 羌塘高原降水空间分布及其变化特征[J]. *地理研究*, 2017, 36(11): 2047-2060.]
- [13] Xu Zhigao, Wang Xiaoyan, Zongga, et al. The conflict and strategy between wildlife protection and livestock production in Qiangtang Natural Reserve[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2010, 29(1): 33-37. [徐志高, 王晓燕, 宗嘎, 等. 西藏羌塘自然保护区野生动物保护与牧业生产的冲突及对策[J]. *中南林业调查规划*, 2010, 29(1): 33-37.]
- [14] Zhou Wei, Zhong Xianghao. Wild animal management in the areas outside of natural reserves: a case study in Qiangtang Natural Reserve[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 800-804. [周伟, 钟祥浩. 自然保护区外野生动物的管理: 以藏北羌塘自然保护区为例[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(7): 800-804.]
- [15] Qi Wei, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. Characteristics of soil temperature variation in core region of northern Tibetan Plateau in China during 2013-2014[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(11): 2075-2087. [祁威, 张懿锂, 刘林山, 等. 羌塘高原核心区2013-2014年土壤温度变化特征[J]. *地理研究*, 2017, 36(11): 2075-2087.]
- [16] Wang Sumin, Dou Hongshen. China lakes[M]. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [17] Cheng Guodong, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristic changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795. [程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[M]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2783-2795.]
- [18] Xu Xiaoming, Wu Qingbai, Zhang Zhongqiong. Responses of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau to climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 1-8. [徐晓明, 吴青柏, 张中琼. 青藏高原多年冻土活动层厚度对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 1-8.]
- [19] Gao Youxi, Jiang Shikui, Zhang Yiguang, et al. Xizang climate[M]. Beijing: Science Press, 1984. [高由禧, 蒋世遒, 张宜光, 等. 西藏气候[M]. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [20] 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. [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): 311-323.]
- [21] Bianduo, Bianba Ciren, Laba, 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. [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.]
- [22] Hao Guibin, Wu Bo, Zhang Lifu, et al. Temporal and spatial variation analysis of the area of Siling Co Lake in Tibet based on ESTARFM (1976-2014)[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(6): 833-846. [郝贵斌, 吴波, 张立福, 等. ESTARFM模型在西藏色林错湖面积时空变化中的应用分析(1976-2014年)[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(6): 833-846.]
- [23] Wan Wei, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, 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(8): 701-714. [万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化[J]. *科学通报*, 2014, 59(8): 701-714.]
- [24] Meng Kai, Shi Xuhua, Wang Erqi, et al. High-altitude salt lake elevation changes and glacial ablation in central Tibet, 2000-2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(7): 668-676. [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[J]. *科学通报*, 2012, 57(7): 668-676.]
- [25] Pu Jianchen, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. Puruogangri ice field and its variations since the little ice age of the northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 87-92. [蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 普若岗日冰原及其小冰期以来的冰川变化[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(1): 87-92.]

- [26] Jing Zhefan, Yao Tandong, Wang Ninglian. The surface flow features of the Puruogangri ice field[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 288–290. [井哲帆, 姚檀栋, 王宁练. 普若岗日冰原表面运动特征观测研究进展[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 288–290.]
- [27] La ba, Gesang Zhuoma, Laba Zhuoma, et al. Variation and reasons of the coverage of Puruogangri glacier and its surrounding lakes during 1992–2014[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(4): 770–776. [拉巴, 格桑卓玛, 拉巴卓玛, 等. 1992–2014年普若岗日冰川和流域湖泊面积变化及原因分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 770–776.]
- [28] Du Jun, Bianduo, Huang Xiaoqing, et al. Tibet climate change monitoring bulletin (2018)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018. [杜军, 边多, 黄晓清, 等. 西藏气候变化监测公报(2018年)[M]. 北京: 气象出版社, 2018.]
- [29] Qin Dahe, Ding Yongjian. Cryospheric changes and their impacts: present, trends and key issues[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(4): 187–195. [秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究: 现状、趋势及关键问题[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 187–195.]
- [30] Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi, et al. Features and degradation of frozen ground in the sources area of the Yellow River, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 10–17. [金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 10–17.]
- [31] Liu Minghao, Sun Zhizhong, NiuFujun, et al. Variation characteristics of the permafrost along the Qinghai-Tibet Railway under the background of climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1122–1130. [刘明浩, 孙志忠, 牛富俊, 等. 气候变化背景下青藏铁路沿线多年冻土变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1122–1130.]
- [32] Du Jun, Jian Jun, Hong Jianchang, et al. Response of seasonal frozen soil to climate change on Tibet region from 1961 to 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 512–521. [杜军, 建军, 洪健昌, 等. 1961-2010年西藏季节性冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 512–521.]
- [33] Yang M X, Nelson F E, Shiklomanov N I, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: a review of recent research[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 103(1/2): 31–44.
- [34] Niu Li, Ye Baisheng, Li Jing, et al. Effect of permafrost degradation on hydrological processes in typical basins with various permafrost coverage in western China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 41(1): 85–92. [牛丽, 叶柏生, 李静, 等. 中国西北地区典型流域冻土退化对水文过程的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(1): 85–92.]
- [35] Yin Guo'an, Niu Fujun, Lin Zhanju, et al. The distribution characteristics of permafrost along the Qinghai-Tibet Railway and their response to environmental change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 772–781. [尹国安, 牛富俊, 林战举, 等. 青藏铁路沿线多年冻土分布特征及其对环境变化的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 772–781.]
- [36] Wang Qingxia, Lü Shihua, Bao Yan, et al. Characteristics of vegetation change and its relationship with climate factors in different time-scales on Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(2): 301–312. [王青霞, 吕世华, 鲍艳, 等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 301–312.]
- [37] Lu Qing, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng. Variations in alpine grassland cover and its correlation with climate variables on the Qinghai-Tibet Plateau in 1982–2013[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 292–300. [陆晴, 吴绍洪, 赵东升. 1982–2013年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J]. 地理科学, 2017, 37(2): 292–300.]
- [38] Meng Meng, Niu Zheng, Ma Chao, et al. Variation trend of NDVI and response to climate change in Tibetan Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3): 360–365. [孟梦, 牛铮, 马超, 等. 青藏高原NDVI变化趋势及其对气候的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 360–365.]
- [39] Zhuoga, Chen Sirong, Zhou Bing. Spatio-temporal variation of vegetation coverage over the Tibetan Plateau and its responses to climatic factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3208–3218. [卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3208–3218.]
- [40] Wu Xiaoping, Yang Wunian, Li Guoming. Research on NDVI temporal and spatial variation of Qiangtang National Nature Reserve[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(2): 55–58. [吴晓萍, 杨武年, 李国明. 羌塘国家自然保护区近十年归一化植被指数的研究[J]. 测绘科学, 2014, 39(2): 55–58.]
- [41] Zhao Xinyi, Zhang Huiyuan, Wan Jun. The impact of climatic change on the climate zones in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 190–195. [赵昕奕, 张惠远, 万军. 青藏高原气候变化对气候带的影响[J]. 地理科学, 2002, 22(2): 190–195.]
- [42] Che Mingliang, Chen Baozhang, Innes J L, et al. Spatial and temporal variations in the end data of vegetation growing season throughout the Qinghai-Tibetan Plateau from 1981 to 2011[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189: 81–90.
- [43] Yao Tandong, Pu Jianchen, Lu Anxin, et al. Recent glacial retreat and its impact on hydrological processes on the Tibetan Plateau, China, and surrounding regions[J]. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2007, 39(4): 642–650.
- [44] Yao Tandong. Glacial fluctuations and its impacts on lakes in the southern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(20): 2071.
- [45] Bianduo, Yang Zhigang, Li Lin, et al. The response of lake area change to climate variations in north Tibetan Plateau during last 30 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 510–518. [边多, 杨志刚, 李林, 等. 近30年来西藏那曲地区湖泊变化对气候波动的响应[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 510–518.]
- [46] Li Zhiguo. Glaciers and lakes changes on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change in the past 50 years[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(2): 123–131.
- [47] Yao Tandong, Qin Dahe, ShenYongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3): 179–186. [姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 179–186.]

Climatic and environmental features in Chang Tang National Nature Reserve during 1971 – 2017

DU Jun^{1,2}, NIU Xiaojun³, YUAN Lei³, Ciwang Dunzhu³

(1. Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science, Lhasa 850001, China; 2. Tibet Key Laboratory of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research, Lhasa 850001, China; 3. Tibet Climate Centre, Lhasa 850001, China)

Abstract: Based on monthly mean air temperature, maximum temperature, minimum temperature, precipitation and annual maximum frozen soil depth data from five meteorological stations in Chang Tang Nature Reserve (CTNR) from 1971 to 2017, in combination with the satellite remote sensing data during 1973 – 2017, the changes in major ecological environment variables such as climate (e. g. , temperature and precipitation), water (lakes, glaciers) and grassland vegetation were analyzed using the linear trend analysis and correlation analysis methods. The results shows that: (1) In the past 47 years (1971 – 2017), the annual mean temperature had been significantly increasing with a rate of $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ in CTNR, a much higher rate than that in the global and Asia. The seasonal mean temperature increased in CTNR at a rate of $0.37 - 0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ with the maximum rate occurring in winter, and the minimum rate in summer. Besides, the annual precipitation amount exhibited a significant increasing trend with a rate of $11.0\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, especially in spring and summer. (2) During the 1975 – 2017, the area of Selinco showed a significant expansion with a rate of $38.48\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$. The coverage area of Puruogangri Glacier presented a shrinking tendency with a total retreated area of 2.11 km^2 from 1973 to 2017, and the maximum annual depth of permafrost in nature reserves was 35.7 cm per 10 years on average. (3) The NDVI in the reserve increased by 25.3% from 1999 to 2013, with an average increasing rate of 0.0184 per decade, indicating the vegetation coverage increased significantly. (4) Overall, this study area is featured by warm and humid climate, melting glaciers, lake expansion, permafrost degradation, and increasing vegetation cover in CTNR. More importantly, the glacier ablation is one of the main factors leading to the changes in the spatial and temporal distribution of water resources and the water cycle process change, which will undoubtedly exert a profound impact on social and economic development in the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: temperature; precipitation; lake; glacier; permafrost; vegetation coverage; ecological environment; Chang Tang Nature Reserve

(责任编辑: 周成林; 编辑: 周成林)