



近 30 年色林错湖面变化特征及其对气候变化的响应

摘要

为了探讨气候变化对高原湖色林错湖面面积变化的影响,基于 1988—2020 年 Landsat 卫星遥感影像资料,用最大似然法提取色林错水体信息,采用线性回归及 M-K 检验法分析色林错湖面面积及其流域内温度、降水和积雪深度等气候因子变化特征,并用皮尔逊相关分析法探讨了湖面面积与气象因子之间的相关性。结果表明:近 30 年色林错湖面面积增加了 650.70 km²,增长速率为 203.34 km²/(10 a)。色林错湖面扩张存在着明显的空间差异,湖面向南、向北扩展比较明显;色林错流域年平均气温及降水量呈显著上升趋势($p < 0.05$),而积雪深度呈显著下降的趋势($p < 0.05$),其中增温速率为 0.50 °C/(10 a),降水量增加速率为 17.32 mm/(10 a),积雪深度递减率为 0.65 cm/(10 a);色林错湖面面积的变化与该流域气温的升高以及冷季积雪深度的降低具有极显著相关性($p < 0.001$),气温升高使得色林错上游的冰雪融水增加是色林错湖面面积增大的主要原因。

关键词

气候变化;湖面变化;遥感;色林错

中图分类号 P237;P343.3

文献标志码 A

收稿日期 2021-12-31

资助项目 国家自然科学基金(4207733)

作者简介

宋玉芝,女,博士,教授,主要从事水环境与生态气象方面的研究.syz70@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 中国气象局生态系统碳源汇开放重点实验室,南京,210044

2 南京信息工程大学 应用气象学院,南京,210044

0 引言

青藏高原是世界上海拔最高的高原,也是中国最大的湖泊密集地区^[1],其湖泊总面积约占我国湖泊总面积的 49.5%,是中国乃至东亚大河的发源地,被称为“亚洲水塔”^[2]。湖泊作为陆地水圈的重要组成部分,对地表水循环过程具有重要的影响,对气候变化的响应极为敏感。因此,在全球气候变化背景下,研究青藏高原湖泊的扩张与收缩对气候变化的响应具有重要的意义^[3-5]。

近年来,由于气候变暖,青藏高原湖泊的变迁及其变迁的原因受到广泛的关注,国内外许多学者基于不同方法对青藏高原湖泊变化进行了研究^[6-17]。董斯扬等^[15]选取青藏高原 1970、1990、2000 和 2010 年 4 个时段的 Landsat 遥感影像,通过人工解译提取湖泊面积,指出近 40 年来青藏高原湖泊面积呈加速扩张的趋势,但在不同地理位置和海拔高度,湖泊面积变化趋势并不一致。李蒙等^[16]基于 Landsat 影像,利用归一化水体指数法提取水体信息,发现纳木错水面面积从 1976 年的 1 928.63 km² 增加到 2015 年的 2 018.55 km²。李东昇等^[17]基于 3S 技术提取青藏高原哈拉湖流域内湖泊面积,发现该流域湖泊面积在 1986—2001 年间呈波动下降的趋势,2001—2015 年间却呈波动上升的趋势。湖泊面积变迁主要受地质构造决定,而短时间尺度(几十年)的湖泊变迁主要受气候因素的影响^[18-20]。Zhang 等^[19]发现,由于气温升高,蒸发量增加及降水量的减少,使得玛旁雍措湖泊面积在 1970—2008 年之间持续发生萎缩。何友翔等^[20]认为,2000—2020 年纳木错湖泊面积的扩大与气温升高导致冰川融水增加有关。色林错作为西藏第一大湖泊,近年来也有一些学者对其变化特征进行了研究^[21-24]。孟恺等^[23]认为,气温升高是 2000—2010 年间色林错湖面面积急剧扩大的主要因素,而降水量的增加是次要因素。德吉央宗等^[24]则认为,近 40 年来色林错流域湖泊面积变化与气温和降水有关。已有的研究成果为进一步探讨高原内陆湖泊面积变化与高原气候变化之间的关系奠定了基础,但这些研究结果主要基于间断的时间序列分析,缺乏对研究区域连续性长时间序列数据的分析,且部分研究使用的数据月份不统一,这将造成因丰水期和枯水期湖泊现象不同产生的水体提取误差。此外,在湖面面积变化与气象因子如气温、降水量和积雪等之间的关系还需进一步探讨。基于此,本文选取 1988—2020 年 7—9 月色林错处于丰水期的 Landsat 影像资料共 33 期,利用遥感影

像监督分类法中应用最广泛的极大似然分类法,提取水体信息,分析色林错湖面面积的时空变化特征并探讨其对气候变化的响应,为在全球气候变化背景下,对未来水资源合理使用和调配提供科学依据。

1 研究区概况

色林错位于西藏自治区尼玛、申扎、班戈三县交界处,是西藏第一大湖泊,湖面海拔高度约为 4 530 m.流域总面积 45 530 km²,流域内湖泊面积 3 262 km²[25].色林错湖水补给依赖于地表径流,入湖河流有发源于巴布日雪山的波曲藏布、甲岗雪山的扎根藏布、冈底斯山的阿里藏布以及唐古拉雪山的扎加藏布,这些河流分别从色林错湖泊的东、西、南、北岸入湖,源区都是冰雪覆盖,水源丰富[23].

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

基于遥感技术提取色林错水体信息的 Landsat 数据,为 1988—2020 年 7—9 月湖泊处于丰水期且无云或少云的影像资料(表 1),Landsat 卫星影像资料来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云和美国地质勘探局(USGS)官网.气象资料由西藏自治区气象局信息中心提供,气象资料为色林错流域附近的申扎、那曲、安多、班戈和当雄 5 个气象站(图 1)的 1985—2020 年月平均气温、降水量和最大积雪深度数据。

表 1 研究区遥感数据源

Table 1 Sources of remote sensing data for the study area

年份	卫星型号	行列号	分辨率/m
1990—1998	Landsat-5 TM	138/39	30
1999—2001	Landsat-7 ETM	138/39	30
2002—2020	Landsat-8 OIL	138/39	30

2.2 分析方法

2.2.1 遥感资料处理方法

利用 ENVI 软件对 Landsat 影像进行几何校正和大气校正的预处理[26],通过人工判别将图像中的地物分类为裸地、水体、雪山,并进行训练样区的选取,采用遥感影像监督分类法中应用最广泛的极大似然分类法提取水体信息[27-30].此方法主要利用每个像元与邻近像元之间的光谱特性,或像元在已分类好的裸地、水体、雪山三个训练样区中属于哪一个训练样区的概率最大来最终确定其所属的地物类型.在完成水体信息提取之后,对最终分类结果进行

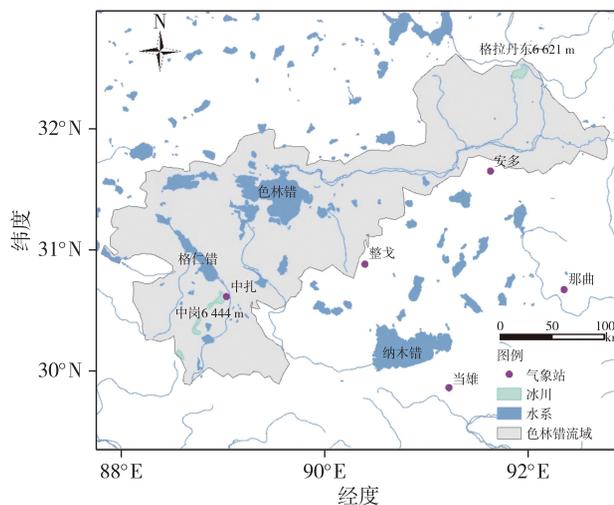


图 1 色林错流域和气象站点分布

Fig. 1 Geographical location of Selin Co basin and the meteorological stations

精度评价,即将分类结果与标准分类像元建立混淆矩阵,进行总体分类精度与 Kappa 系数的计算[30].其中总体分类精度表示分类正确的像元数量与标准的像元总数的比值,Kappa 系数表示分类后的像元与标准像元的一致程度,只有符合分类要求(Kappa 系数>0.90)之后,再利用 ArcGIS 软件将结果转换成矢量数据来统计湖泊的面积,以及用来分析湖面的空间变化特征。

2.2.2 数据分析

1) 本文将月平均气温大于 0 °C 的月份(5—10 月)归类为暖季,月平均气温小于 0 °C 的月份(11 月—次年 4 月)归类为冷季,使用气候倾向率法分析气象因子的变化趋势,计算公式如下:

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

式中 Y 为气象要素, a_0 为常数项, t 为时间, a_1 为线性趋势项, $a_1 \times 10$ 表示为气象因子每 10 年的变化趋势。

2) 利用 Mann-Kendall 突变检验法(M-K test)[31-32],揭示色林错湖面面积和各气象因子的突变特征,采用皮尔逊相关分析(Pearson correlation)研究湖泊面积与气象因子之间的相关性。

3 结果与讨论

3.1 色林错湖泊面积变化特征

近 30 年色林错湖面面积总体上呈增大的趋势(表 2,图 2).从图 2 可看出,色林错湖面面积随时间的变化显著增加($r = 0.957, p < 0.001$).由表 2 可知,1988—2020 年,湖面面积从 1 742.65 km² 增长到

2 393.35 km²,增加了 650.70 km²,增加速率为 203.34 km²/(10 a).进一步分析发现,近30年色林错湖面面积的增长过程可分为缓慢增长、急剧增长、缓慢增长三个阶段,即1997年之前湖泊面积增幅较小,平均每年增加 2.98 km²;1997—2015年快速增长,平均每年增加 34.23 km²;2015年之后色林错湖面面积的增长开始减慢,平均每年增加 14.50 km².通过遥感影像发现,2003年之前色林错与雅根错是两个独立的湖泊,2003年这两个湖面连成一片,这与已有文献^[18]的结果,即色林错南部在2003—2005年间与雅根错发生了连通接近.因此,2003年开始,色林错湖面面积将雅根错湖面面积纳入计算.2003年色林错和雅根错的湖面总面积为2 099.13 km²,与2002年(两个湖泊还未相连)色林错湖面面积相比,2003年(相连之后)湖面面积增加了 91.29 km².进一步采用 M-K 检验法,对色林错流域湖面面积的变化进行突变检验,发现 UF 和 UB 曲线相交于 2006 年,但交叉点并不在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平内,表明色

林错湖面面积不存在显著突变点(图3).

利用1990、2000、2010和2020年四个时期的遥感影像数据,对色林错湖面面积空间变化进行分析,分析结果也表明:色林错湖面面积随时间推移呈增加的趋势,不同时间段湖面扩张的速率不同,也呈慢快慢的变化规律.即1990—2000年色林错湖面面积扩展了 169.40 km²,占总扩展面积的 26%;2000—2010年是近30年中色林错湖面扩展最快的10年,湖面面积扩展了 378.95 km²,占总扩展面积的 58%;2010—2020年湖面扩张度整体变慢,湖面面积扩展了 99.94 km²,只占总扩展面积的 15%(图4).进一步分析发现,色林错湖岸线在四周扩展程度并不相同,扩展最明显的区域在湖的北部和南部(图4).由于色林错北部与扎加藏布相连,而扎加藏布是属于西藏地区最长的内流河,源于唐古拉雪山的当玛岗北坡^[23],因此,色林错北部湖水面积的增加与冰川融水经过扎加藏布汇入色林错有密不可分的关系.色林错南部与其相邻的雅根错发生了连通,使得色

表2 色林错各年份湖泊面积统计

Table 2 Areas of Selin Co lake from 1988 to 2020

年份	面积/km ²						
1988	1 742.65	1997	1 762.52	2006	2 236.35	2015	2 375.32
1989	1 738.87	1998	1 789.28	2007	2 238.02	2016	2 340.91
1990	1 745.06	1999	1 823.47	2008	2 253.11	2017	2 345.77
1991	1 796.44	2000	1 914.46	2009	2 276.32	2018	2 344.00
1992	1 786.38	2001	1 951.29	2010	2 293.41	2019	2 385.90
1993	1 797.05	2002	2 007.84	2011	2 335.71	2020	2 393.35
1994	1 785.35	2003	2 099.13	2012	2 339.36		
1995	1 765.15	2004	2 137.09	2013	2 342.57		
1996	1 772.37	2005	2 203.51	2014	2 371.16		

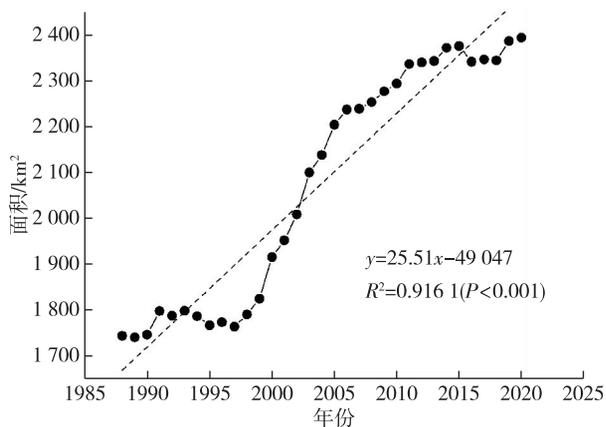


图2 色林错湖面面积变化趋势

Fig. 2 Variation trend of Selin Co lake area

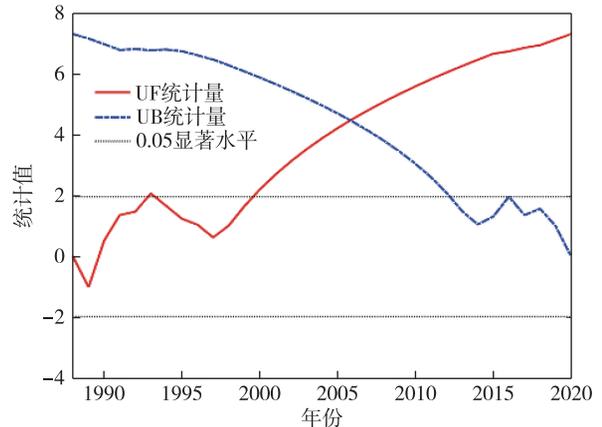


图3 色林错湖面面积变化的 M-K 检验

Fig. 3 M-K test of Selin Co lake area

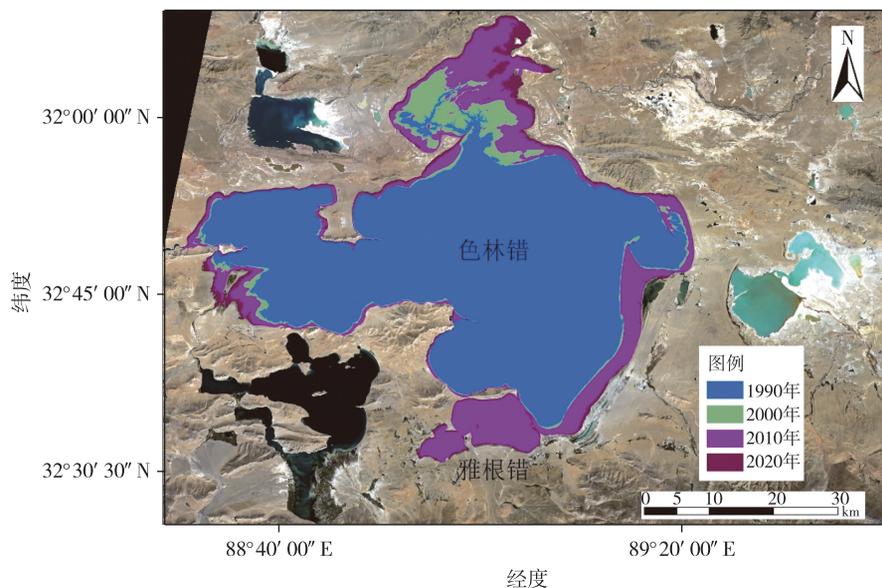


图4 色林错湖面面积动态变化
Fig. 4 Dynamic changes of Selin Co lake area

林错面积明显增大。

3.2 色林错流域气候变化

3.2.1 气温

1985—2020年,色林错流域年平均气温呈极显著的上升趋势($r = 0.743, p < 0.001$),增温速率为 $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$,多年平均气温为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图5a)。1998年之前(除了1988年)流域年均气温低于多年平均气温,最低气温达 $-1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1997年);1998年之后,该流域气温明显升高,除2000和2002年之外均高于多年平均气温,最高年均气温为 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2009、2016和2017年)。采用M-K突变检验法,对年平均气温进行突变检验(图6)。由图6可知,UF和UB曲线相交与2004年,且交叉点在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平内,即气温在2004年发生了突变,多年平均气温从突变前(1985—2004年)的 $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到突变后(2005—2020年)的 $0.83\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升了 $1.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明2004年以后色林错流域的气温增暖趋势变得十分显著。此外,该流域多年平均冷季气温为 $-6.35\text{ }^{\circ}\text{C}$,暖季为 $6.87\text{ }^{\circ}\text{C}$,且冷季及暖季年平均气温随时间的变化均呈极显著的上升趋势($r_{\text{冷}} = 0.686, r_{\text{暖}} = 0.647, p < 0.001$),冷季增温速率为 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$,暖季为 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$,冷季增温速率是暖季的1.42倍(图5b、c)。由此可见,色林错流域气候正在变暖,增温幅度比较明显,且冷季更为显著。

3.2.2 降水量

1985—2020年间色林错流域年平均降水量呈显

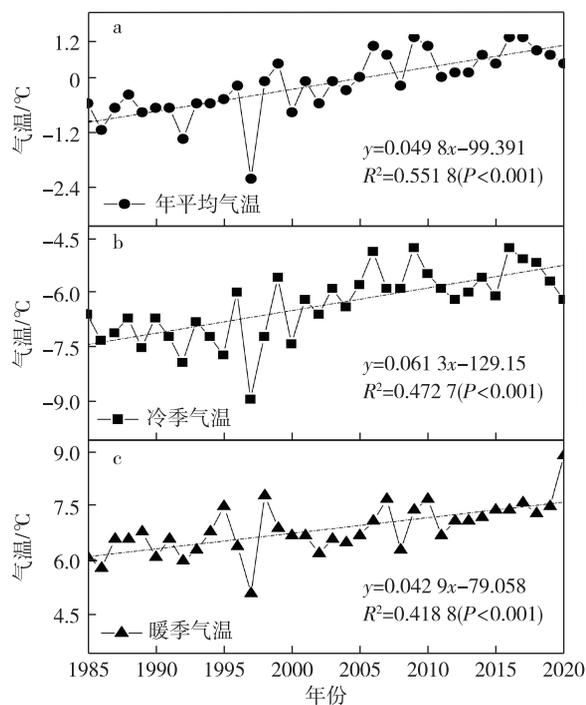


图5 色林错流域气温变化趋势趋势
Fig. 5 Variation trends of air temperature in Selin Co basin

著上升趋势($r = 0.301, p < 0.05$),平均每10年增加 17.3 mm ,多年平均降水量为 381.0 mm ,年平均降水量最低为 218.0 mm (2015年),最高为 551.3 mm (2008年)(图7a)。该流域在1985—1995年间降水量较少,1995年之后缓慢增多,而在2005—2015年期间降水量呈波动变化,2015年之后再持续增加

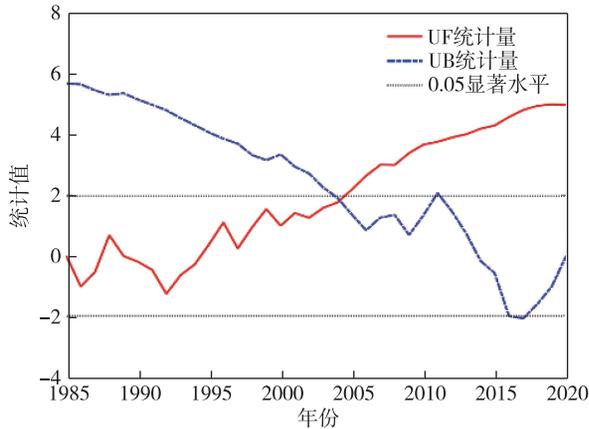


图6 色林错流域年平均气温变化的 M-K 检验

Fig. 6 M-K test of annual average air temperature in Selin Co basin

(图7a).采用 M-K 检验法,对色林错流域降水量的变化进行突变检验,发现 UF 和 UB 曲线相交与 1998 年,且在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平内,即降水量在 1998 年发生了突变,多年平均降水量从突变前(1985—1998 年)的 351.8 mm 上升到突变后(1999—2020 年)的 399.6 mm,上升了 47.8 mm(图 8),这说明色林错流域降水量在 1998 年开始显著上升.这一结果与已有的关于高原气候变化的研究结果基本一致^[25].此外,该流域冷暖季降水量虽都呈上升趋势,但冷季降水量随时间的变化并不显著($r = 0.105, p > 0.05$),暖季却呈显著上升的趋势($r = 0.324, p < 0.05$),其中降水量上升速率冷季为 1.11 mm/(10 a),暖季为 3.17 mm/(10 a)(图 7b、c).冷季的多年平均降水量为 3.35 mm,远远小于暖季的多年平均降水量(60.39 mm),这说明,色林错流域降水量的变化主要以暖季为主.

3.2.3 积雪深度

图 9 为色林错流域最大积雪深度.由图 9a 可知,色林错流域年平均最大积雪深度在 1985—2020 年呈显著下降趋势($r = 0.376, p < 0.05$),下降速率为 0.65 cm/(10 a).2000 之前,该流域年平均最大积雪深度除 1991、1992 年和 1994 年以外均大于多年平均积雪深度(6.30 cm).2000 年之后,该流域年平均最大积雪深度均小于多年平均积雪深度,最低值为 3.20 cm(2010 和 2018 年)(图 9a).采用 M-K 突变检验法,对年平均最大积雪深度进行了突变检验,发现 UF 和 UB 曲线相交与 2002—2003 年,且在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平内,即积雪深度在 2002—2003 年间发生了突变,多年平均积雪深度从突变前(1985—2003

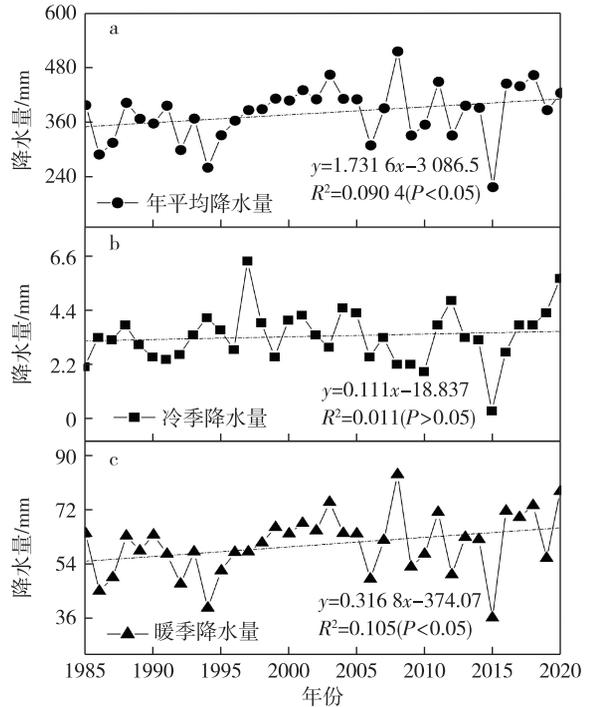


图7 色林错流域降水量变化趋势

Fig. 7 Variation trends of precipitation in Selin Co basin

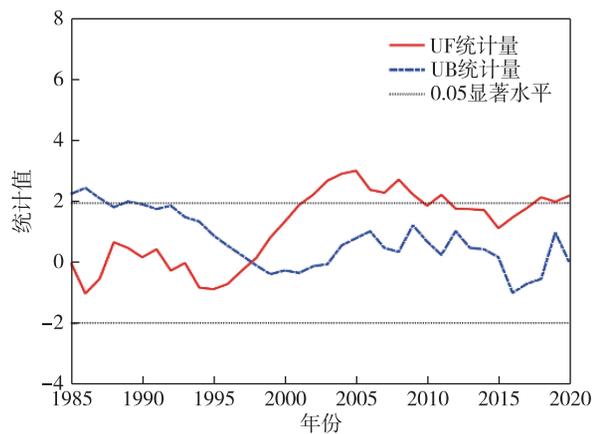


图8 色林错流域年平均降水量的 M-K 检验

Fig. 8 M-K test of annual average precipitation in Selin Co basin

年)的 6.74 cm 下降到突变后(2004—2020 年)的 5.84 cm,下降了 0.90 cm,表明 2003 年后色林错流域积雪深度的降低趋势十分显著(图 10).此外,色林错流域冷季和暖季积雪深度均呈显著下降趋势,且冷季积雪深度的下降趋势相比暖季更显著($r_{冷} = 0.528, p_{冷} < 0.01; r_{暖} = 0.387, p_{暖} < 0.05$),以及冷季积雪深度的下降速率(0.32 cm/(10 a))大于暖季(0.25 cm/(10 a))(图 9b、c).

3.3 色林错湖泊面积变化与气象因子的关系

根据以上的研究结果可知,色林错湖面面积及

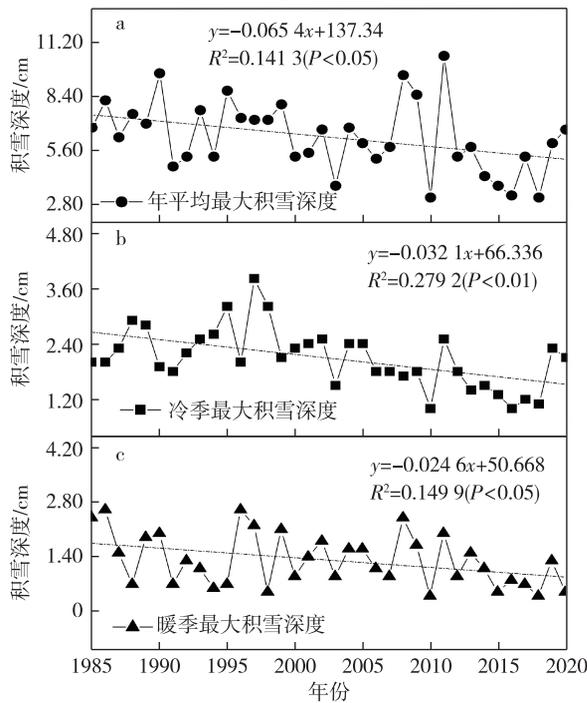


图9 色林错流域最大积雪深度变化趋势
Fig. 9 Variation trends of maximum snow cover depth in Selin Co basin

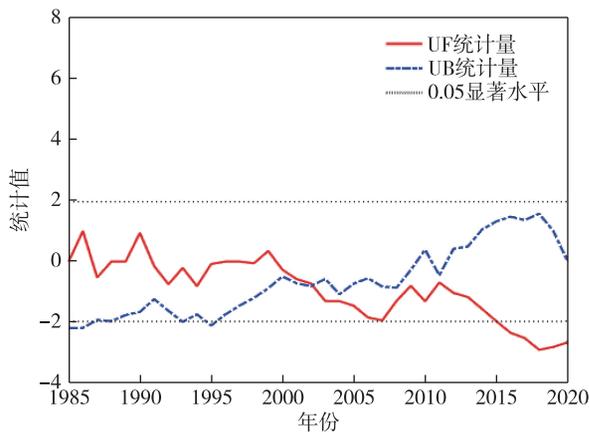


图10 色林错流域年平均最大积雪深度的M-K检验
Fig. 10 M-K test of annual average maximum snow cover depth in Selin Co basin

该流域温度、降水量和最大积雪深度均存在显著的变化趋势(图3、5、7、9).采用皮尔逊相关分析法分析湖泊面积与流域气象因子之间的相关性发现,色林错湖面面积与该流域年平均气温的相关系数 $r = 0.744 (p < 0.001)$,两者之间呈极显著的正相关(图11a).从图11b和图11c也发现,冷暖季气温均与湖面面积存在极显著的正相关($r_{冷} = 0.739, p_{冷} < 0.001$; $r_{暖} = 0.552, p_{暖} < 0.001$),其中冷季气温与湖面面积的

相关系数($r_{冷}$)略大于暖季气温与湖面面积的相关系数($r_{暖}$).

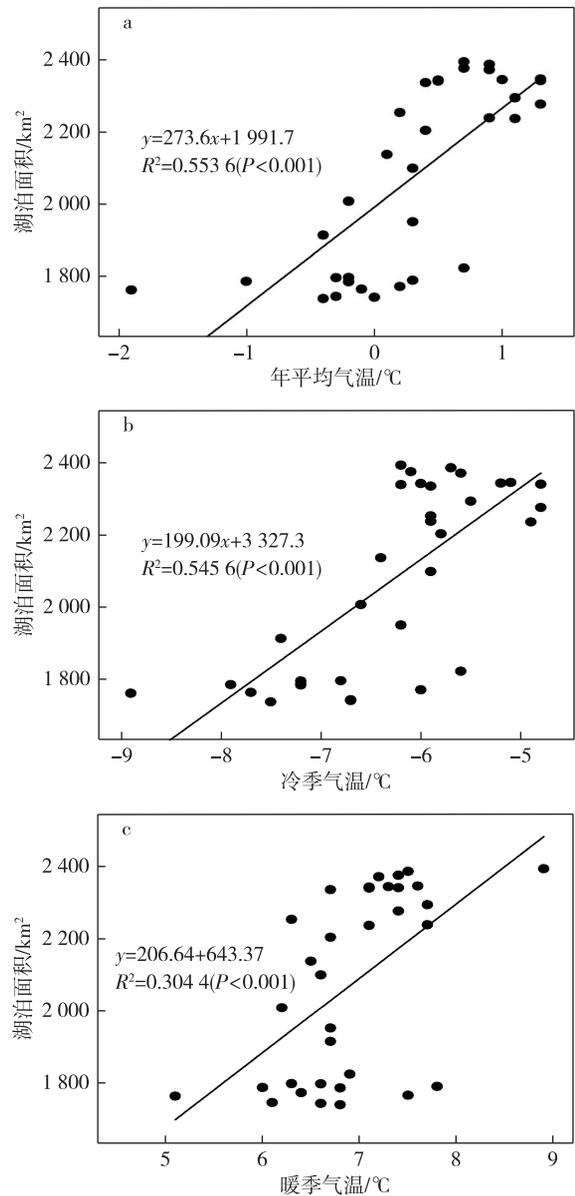


图11 色林错湖泊面积与气温之间的关系
Fig. 11 Relationships between lake area and temperature for Selin Co

图12是色林错湖面面积与该流域冷季降水量之间的关系.从图12b可知,湖面面积与该流域冷季降水量不存在相关关系,与年平均降水量和暖季降水量虽呈一定的正相关,但均未达到显著水平($p > 0.05$)(图12a、c),这说明色林错流域降水量虽呈显著的增加趋势,但对色林错湖面面积的扩张影响不大.

图13是色林错湖泊面积与积雪深度间的关系.由图13可见,色林错流域年平均最大积雪深度与湖

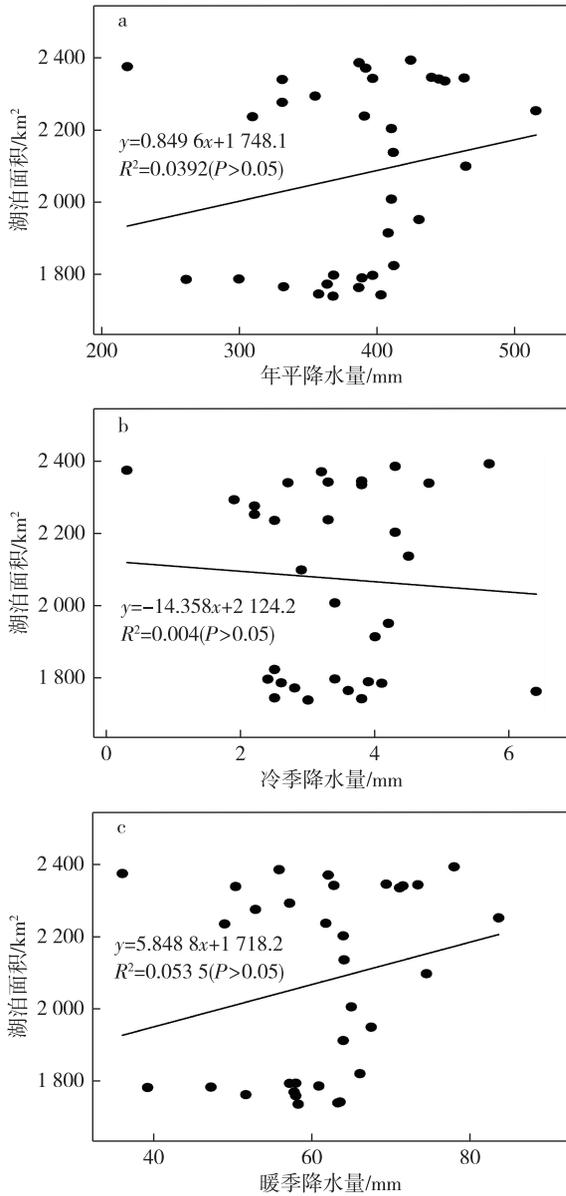


图 12 色林错湖泊面积与降水之间的关系
Fig. 12 Relationships between lake area and precipitation for Selin Co

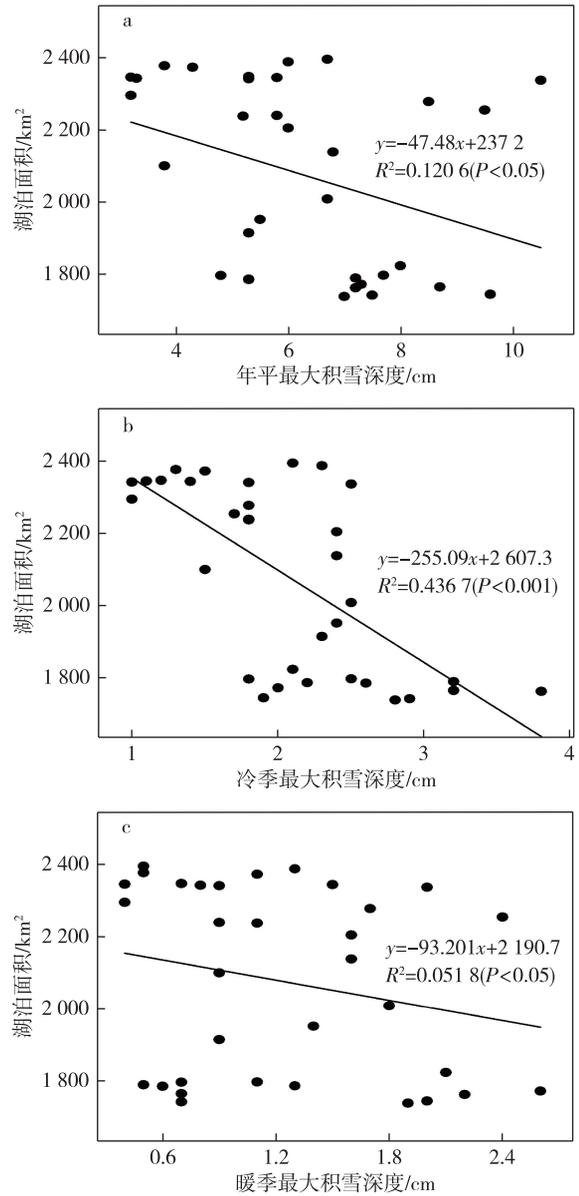


图 13 色林错湖泊面积与积雪深度之间的关系
Fig. 13 Relationships between lake area and maximum snow cover depth for Selin Co

面面积呈显著的负相关($r = -0.347, p < 0.05$),进一步分析发现,冷季最大积雪深度与湖泊面积呈极显著的负相关($r_{冷} = -0.661, p < 0.001$),但暖季最大积雪深度与湖泊面积的负相关性并不显著($r_{暖} = -0.228, p > 0.05$).

4 结论

色林错湖面面积在近30年里持续增加,这与该流域气象因子有着密切的关系.本文根据色林错湖面面积与该流域各气象因子的变化特征,以及它们之间的相关性,得出以下结论:

1) 近30年色林错湖面面积总体上呈持续增加的趋势,湖面面积在1988年为1742.65 km²,到2020年湖面已达2393.35 km²,湖泊面积共增加了650.70 km².1997—2015年间湖面增长尤为迅速,平均每年增加34.23 km².随着时间的变化,湖岸不断向外扩展但向四周扩展的速度并不均一,湖的北部及南边扩展明显.

2) 近30年色林错流域气候变化特征比较明显,年平均气温和降水量均呈显著的增加趋势($p < 0.05$),而年平均最大积雪深度呈显著下降的趋势($p < 0.05$),其中增温速率为0.50 °C/(10 a),降水量

增加速率为 17.32 mm/(10 a),最大积雪深度递减率为 0.65 cm/(10 a)。此外,冷季气温和积雪深度的变化较暖季更为明显,而降水量的变化主要以暖季为主。

3)近 30 年色林错湖面面积不断扩大与流域气候变化密切相关。色林错湖面面积与气温的升高及冷季积雪深度的降低呈极显著的相关性($p < 0.001$),与降水量的相关性并不显著($p > 0.05$)。这说明,色林错湖面面积的增长主要是由于温度的显著升高导致上游冰雪迅速融化,湖水补给增加所致。

参考文献

References

- [1] Zhang G Q, Xie H J, Yao T D, et al. Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58 (31): 3815-3829
- [2] 张国庆.青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展[J].地理科学进展, 2018, 37 (2): 214-223
ZHANG Guoqing. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations [J]. Progress in Geography, 2018, 37 (2): 214-223
- [3] Du Y, Xue H P, Wu S J, et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92 (4): 1248-1255
- [4] Feng M, Sexton J O, Channan S, et al. A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first results of a topographic-spectral classification algorithm [J]. International Journal of Digital Earth, 2016, 9 (2): 113-133
- [5] Carroll M L, Townshend J R, DiMiceli C M, et al. A new global raster water mask at 250 m resolution [J]. International Journal of Digital Earth, 2009, 2 (4): 291-308
- [6] 程梦鸽, 庞晓峰. 基于 Landsat-8 遥感影像的色林错 2014—2018 年变化研究 [J]. 陕西广播电视大学学报, 2021, 23 (2): 91-96
CHENG Mengge, PANG Xiaofeng. The research of changes on Siling Co from 2014 to 2018 based on Landsat-8 remote sensing imagery [J]. Shaanxi Radio and TV University Journal, 2021, 23 (2): 91-96
- [7] 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
BIAN Duo, 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
- [8] 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
- [9] 杨珂含, 姚方方, 董迪, 等. 青藏高原湖泊面积动态监测 [J]. 地球信息科学学报, 2017, 19 (7): 972-982
YANG Kehan, YAO Fangfang, DONG Di, et al. Spatiotemporal monitoring of lake area dynamics on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19 (7): 972-982
- [10] 王琼, 王君波, 郭俊钰, 等. 基于支持向量机的色林错湖冰提取及时空分布 [J]. 载人航天, 2019, 25 (6): 789-798
WANG Qiong, WANG Junbo, GUO Junyu, et al. Lake ice extraction of Selin Co and its space-time distribution based on support vector machine [J]. Manned Spaceflight, 2019, 25 (6): 789-798
- [11] Huang L, Liu J Y, Shao Q Q, et al. Changing inland lakes responding to climate warming in northeastern Tibetan Plateau [J]. Climatic Change, 2011, 109 (3/4): 479-502
- [12] 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
- [13] 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近 30 年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析 [J]. 湖泊科学, 2010, 22 (6): 874-881
WAN Wei, XIAO Pengfeng, FENG Xuezh, et al. Remote sensing analysis for changes of lakes in the southeast of Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22 (6): 874-881
- [14] 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 [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (18): 1789-1798
- [15] 董斯扬, 薛娴, 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 Quanguang, 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
- [16] 李蒙, 严登华, 刘少华, 等. 近 40 年来纳木错水面面积及蓄水量变化特征 [J]. 水电能源科学, 2017, 35 (2): 41-43, 52
LI Meng, YAN Denghua, LIU Shaohua, et al. Variation characteristics of water surface area and water storage capacity of Nam Co Lake in recent 40 years [J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (2): 41-43, 52
- [17] 李东昇, 张仁勇, 崔步礼, 等. 1986—2015 年青藏高原哈拉湖湖泊动态对气候变化的响应 [J]. 自然资源学报, 2021, 36 (2): 501-512
LI Dongsheng, ZHANG Renyong, CUI Buli, et al. Response of lake dynamics to climate change in the Hala Lake basin of Tibetan Plateau from 1986 to 2015 [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36 (2): 501-512
- [18] 闫立娟. 气候变化对西藏湖泊变迁的影响 (1973—

- 2017)[J].地球学报,2020,41(4):493-503
Yan Lijuan. The influence of climate change on lake variations of the Tibet Plateau in the period of 1973–2017 [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2020, 41(4): 493-503
- [19] Zhang G Q, Yao T D, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(11): 5550-5560
- [20] 何友翔,刘娟.2000—2020年纳木错的时空变化特征及其对气候变化的响应[J].甘肃地质,2021,30(3):57-64
HE Youxiang, LIU Juan. Spatial-temporal changes in Nam Co Lake from 2000 to 2020 and its impact to climate change [J]. Gansu Geology, 2021, 30(3): 57-64
- [21] 王坤鑫,张寅生,张腾,等.1979—2017年青藏高原色林错流域气候变化分析[J].干旱区研究,2020,37(3):652-662
WANG Kunxin, ZHANG Yinsheng, ZHANG Teng, et al. Analysis of climate change in the Selin Co basin, Tibetan Plateau, from 1979 to 2017 [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 652-662
- [22] 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, BIANBA Ciren, 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
- [23] 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):571-579
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): 571-579
- [24] 德吉央宗,尼玛吉,强巴欧珠,等.近40年西藏色林错流域湖泊面积变化及影响因素分析[J].高原山地气象研究,2018,38(2):35-41,96
DEJI Yangzong, NIMA Ji, QIANGBA Ouzhu, et al. Lake area variation of Selin Tso in 1975–2016 and its influential factors [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2018, 38(2): 35-41, 96
- [25] 关志华,陈传友,区裕雄,等.西藏河流与湖泊[M].北京:科学出版社,1984
- [26] 杜培军.遥感原理与应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006
- [27] Yao X J, Liu S Y, Li L, et al. Spatial-temporal characteristics of lake area variations in Hoh Xil region from 1970 to 2011 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(4): 689-702
- [28] 孙琳,宋爱红,高文秀.基于最大似然法和SVM法的太湖流域HJ-1B影像分类[J].测绘信息与工程,2012,37(3):30-33
SUN Lin, SONG Aihong, GAO Wenxiu. Land use/cover classification in Taihu Lake basin with HJ-1B images: comparing maximum likelihood classification and support vector machine methods [J]. Journal of Geomatics, 2012, 37(3): 30-33
- [29] 乔丹玉,郑进辉,鲁晗,等.面向不同环境背景的Landsat影像水体提取方法适用性研究[J].地球信息科学学报,2021,23(4):710-722
QIAO Danyu, ZHENG Jinhui, LU Han, et al. Application of water extraction methods from Landsat imagery for different environmental background [J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(4): 710-722
- [30] 王增林,朱大明.基于遥感影像的最大似然分类算法的探讨[J].河南科学,2010,28(11):458-461
WANG Zenglin, ZHU Daming. A study of maximum likelihood classification algorithm based on remote sensing image [J]. Henan Science, 2010, 28(11): 458-461
- [31] 周长艳,邓梦雨,齐冬梅.青藏高原湿池的气候特征及其变化[J].高原气象,2017,36(2):294-306
ZHOU Changyan, DENG Mengyu, QI Dongmei. Characteristics of the moist pool over the Qinghai-Tibetan Plateau and its variation [J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(2): 294-306
- [32] 尹云鹤,吴绍洪,陈刚.1961—2006年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J].自然资源学报,2009,24(12):2147-2157
YIN Yunhe, WU Shaohong, CHEN Gang. Regional difference of climate trend and abrupt climate change in China during 1961–2006 [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(12): 2147-2157

Variation of Selin Co lake area during 1988–2020 and its response to climate change

SONG Yuzhi^{1,2} DEJI Yuzhen^{1,2}

1 Key Laboratory of Ecosystem Carbon Source and Sink, China Meteorological Administration (ECSS-CMA),
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract To explore the impact of climate change on the lake area of Selin Co, this paper used maximum likelihood method to extract the lake areas of Selin Co for the past 33 years (1988–2020) from Landsat data, then ana-

lyzed the variations in lake area, temperature, precipitation as well as snow cover depth in Selin Co basin using linear regression and Mann-Kendall test, and discussed the correlation between lake area and climate change by Pearson correlation. The results showed that, in the past 33 years, the Selin Co Lake expanded by 650.70 km^2 at the rate of $203.34 \text{ km}^2/(10 \text{ a})$, mostly at northward and southward directions. The average annual temperature and precipitation increased significantly at the rates of $0.50 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$ and $17.32 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ ($p < 0.05$), while the average maximum snow cover depth decreased significantly at the rate of $0.65 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ ($p < 0.05$) during 1988–2020. An extremely significant correlation was found between the change of lake area and the rise of air temperature in the basin as well as the decreasing maximum snow cover depth in cold season ($p < 0.001$), indicating that the Selin Co lake's expansion in the past 33 years was a consequence of the increasing water supply from ice-snow meltwater due to the rising air temperature in Selin Co basin.

Key words climate change; lake area change; remote sensing; Selin Co