

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0149

WANG Zhoufeng, ZHENG Bo, HE Xiangqi, et al. Spatial-temporal variations and influencing factors of glacial lakes in Tibet based on Optimal Parameters-Based Geographical Detector[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(6):1950-1960. [汪宙峰, 郑博, 贺相碁, 等. 基于参数最优地理探测器的西藏冰湖时空变化与影响因素研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(6):1950-1960.]

基于参数最优地理探测器的西藏冰湖时空变化 与影响因素研究

汪宙峰^{1,2}, 郑博¹, 贺相碁³, 张焱菁¹, 沈惠龄¹

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 天然气地质四川省重点实验室, 四川 成都 610500;
3. 北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院, 中国 北京 100875)

摘 要: 随着全球变暖的加剧, 西藏地区冰湖的规模不断扩大, 由此可能会发生冰湖溃决自然灾害。本文基于 GIS 空间分析和参数最优地理探测器方法, 分析了西藏地区 1990 年至 2015 年间冰湖时空变化以及各环境因子: 冰湖海拔、年总降水、年平均温度、年相对湿度、冰川面积变化、GDP、人口密度的影响程度。结果表明: (1) 25 年间冰湖总数量和总面积的增长率分别为 2.57%、6.32%, 各个面积大小的冰湖在不同的海拔都有增长, 增长最多的是小型冰湖 (面积小于 0.1 km²), 西藏冰湖增长方向性显著, 数量分布和面积分布离散程度高, 基本分布在西藏东部和南部地区。(2) 通过 Pearson 相关分析, 西藏冰湖变化主要受该地区冰川面积变化以及降水量大小影响。(3) 地理探测器中, 冰川面积变化对冰湖变化影响强度最高, q 值为 0.5006; 交互作用探测中, 温度因子与冰川面积变化因子交互作用后对冰湖变化影响解释力最强, 且呈非线性增强关系, 除温度因子以外, 冰湖变化受各因子交互作用影响强度高。

关键词: 西藏地区; 冰湖; 时空变化; 参数最优地理探测器

中图分类号: P343.3; P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)06-1950-11

0 引言

由冰川作用形成的或以冰川融水补给为主的湖泊, 称为冰湖, 其主要分布在高海拔山区, 主要来源包含冰川融水以及降水^[1-3]。冰湖在当地居民的日常生活中占重要地位, 也是世界上最重要的水资源之一^[4]。冰湖根据成因可以分为多种冰湖, 以冰川冰为堤坝的有冰坝湖、冰面湖以及冰下湖; 以冰碛物为堤坝的冰湖有终碛阻塞湖、侧碛阻塞湖、冰碛垄热融湖; 以基岩为堤坝的冰湖有冰斗湖、槽谷湖、冰蚀洼地^[5]。在各种类型的冰湖中, 冰碛湖不仅数量多分布广, 而且冰碛湖发生冰湖溃决洪水 (GLOF) 的危害性最大^[6-8]。在过往的研究中, 冰湖的面积增长速率与规模大小均作为冰湖的危险性潜力评价指标对 GLOF 灾害进行风险评估^[9-11]。

在全球变暖的大背景下, 亚洲高海拔地区冰川普遍退缩, 以冰川融水补给为主的冰湖正在经历快速的变化^[12]。在过去的 50 年里, 高海拔地区的温度每十年上升 0.3 °C^[13]。气候变暖加剧了冰川消融速度, 冰川融水急剧增加, 以冰川融水为主要补给的冰湖容量急剧升高, 发生 GLOF 的频率增加, 其潜在危险性不断升高^[14]。我国西藏地区紧靠喜马拉雅山脉, 西藏地区大部分 GLOF 事件都起源于喜马拉雅山脉地区的冰湖^[15-16]。

目前对冰湖空间分异的内在驱动因素研究基本停留在对冰湖性质上, 使用定量的方法较少。殷永胜等^[17]利用逐步回归分析了不同流域的各种因素对冰湖变化的整体影响, 是以冰湖变化速率作为分析中的因变量, 而自变量主要考虑的是气候因素。不足之处就在于逐步回归要求各因素相互对立, 但是

收稿日期: 2023-04-14; 修订日期: 2023-10-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFF0414359); 四川省科技计划资助 (2023YFS0406); 成都市科技人才创新创业项目 (2021-RC03-00027-CG); 四川省知识产权高价值专利实施及产业化项目 (2022-ZS-00022) 资助

作者简介: 汪宙峰, 副教授, 主要从事地理空间人工智能、地质灾害预测预警方面的研究. E-mail: wangzf@swpu.edu.cn

冰湖的面积变化影响因素显然是相互影响的,例如温度的变化影响着各区域冰川变化^[18]。刘佳丽等^[19]分析了西藏区域近 25 年湖泊变迁及驱动力分析,从气候影响、人为影响分别讨论了驱动该地区湖泊变化的因素,结果说明人类活动影响对西藏湖泊环境干扰越来越严重,但气候仍占主要影响因素。参数最优地理探测器,可以对所有连续型数据进行最优离散化,选择生成 q 值最高的离散化方法,用以探测冰湖变化背后驱动因子以及各因子之间空间分异性^[20-23]。本文以中国西藏自治区为研究区,利用第三极冰湖数据库开放数据,提取了区域内 1990 年、2015 年冰湖数据,使用 GIS 软件及参数最优地理探测器方法,分析了西藏区域内冰湖的空间分布变化规律,探测西藏区域内冰湖变化的主要影响因子及交互作用机制。本文为西藏地区发生 GLOF 的潜在风险评估以及危险性分析提供基础信息与数据支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

西藏自治区位于 $26^{\circ}50' \sim 36^{\circ}53' \text{ N}$, $78^{\circ}25' \sim 99^{\circ}06' \text{ E}$ 之间,面积为 $122.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占中国陆地总面积的 $1/8$,平均海拔在 $4\ 000 \text{ m}$ 以上。西藏自治区下辖 6 个地级市、1 个地区(8 个市辖区、66 个县,合计 74 个县级行政区划单位)^[24]。西藏地区受西风带天气和印度洋暖湿气流的影响,干湿季节差异明显,气候变化影响显著。该地区降水主要集中在东南部,并且在西北地区降水极少,时间上也集中在 5—9 月,占全年降水量的 90% 左右;大部分地区全年平均温度低于 0°C ,其中只有藏南谷地年平均温度在 8°C 上下^[25]。由于西藏区域社会经济系统的脆弱性,暴发频繁、危险性高的自然灾害往往会对当地社会经济造成巨大影响^[26]。

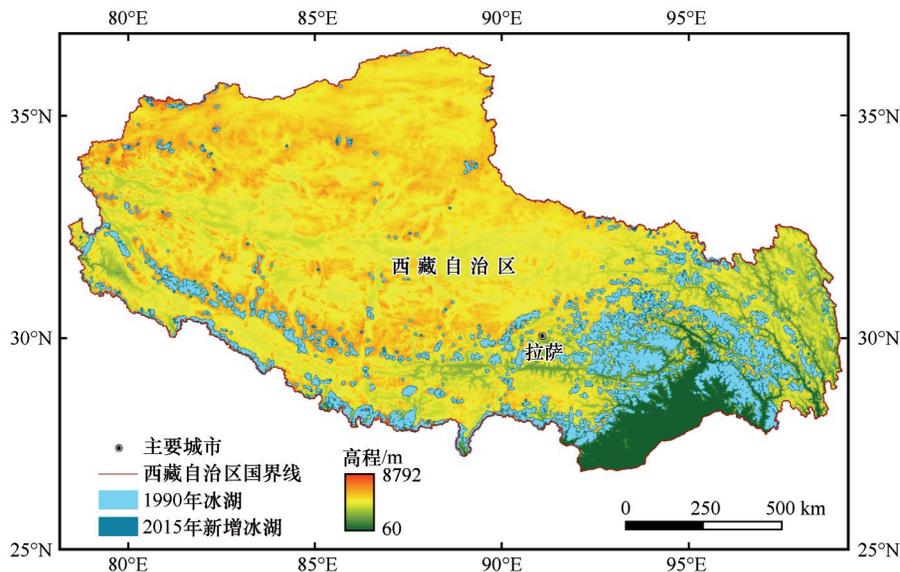


图1 西藏冰湖分布

Fig. 1 Distribution of glacial lakes in Tibet

1.2 数据来源

(1)冰湖数据。本研究主要数据源来自于学者 Zheng 等^[27]提供的第三极冰湖开源数据: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01028-3>, 本文对西藏地区所有面积大于 0.01 km^2 的冰湖进行了制图。

(2)DEM数据。SRTM 数字高程模型(DEM), 主要从地理空间数据云获取,分辨率为 30 m 。使用 ArcGIS 10.8 提取区域内的海拔。

(3)气候数据。中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集(1901年至2021年)^[28]和中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901年至2021年)^[29],从国家青

高原科学数据中心获取,分辨率为 1 km ,从 NetCDF 栅格图层中分别提取 1990 年和 2015 年年平均气温和年总降水数据;中国 1 km 分辨率月相对湿度数据集(1990 年和 2015 年),从国家地球系统科学数据中心获取,分辨率为 1 km ,从栅格图层中分别提取 1990 年和 2015 年年相对湿度数据^[30-32]。

(4)冰川编目数据。第三极地区冰川编目评价数据(1990—2015年),从国家青藏高原科学数据中心获取,主要反映第三极地区内 1990—2015 年的冰川状况^[33]。

(5)1990—2015 年中国人口空间分布公里网格

数据集^[34]、中国 GDP 空间分布公里网格数据集^[35]，从中国科学院地理科学与资源环境所数据中心获得。

1.3 影响因子选取

冰湖的变化主要受地形、气候以及冰川面积变化等因素的综合影响。在以往的众多研究中，对冰湖变化影响显著的是区域内气温、降水以及冰川面积变化。其中，有冰川补给的冰湖主要受冰川影响；而没有冰川补给的冰湖主要受区域内的降水与蒸发影响。除此之外，区域内相对湿度、所处地区海拔等因素都影响着冰湖变化^[35]。这是因为相对湿度影响降水增减，冰湖所处海拔高度影响区域内降水、温度等变化。结合前人对冰湖变化影响因素研究成果的分析和总结，本文选取 7 个影响因子：冰湖海拔、降水量、气温、相对湿度、冰川面积变化、GDP、人口密度(表 1)，其中，冰湖变化 Y 代表冰湖的面积变化。

表 1 冰湖变化影响因子

Table 1 Influencing factors of glacial lake change

要素	因子	
冰湖变化 Y	地形	冰湖海拔 X_1
	气候	年总降水 X_2
		年平均温度 X_3
		年平均湿度 X_4
	冰川	冰川面积变化 X_5
	人文	GDP X_6
		人口密度 X_7

1.4 研究方法

(1) 标准差椭圆 (standard deviational ellipse, SDE) 是一种由社会学家 Lefever 提出的，能够精确揭示地理要素的整体空间分布特征，反映研究对象的多维空间特征的方法。SDE 主要参数的计算公式如下：

$$\text{平均中心: } \bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Y_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$\text{旋转角: } \tan \theta = \frac{(A+B)}{C}$$

$$A = \left(\sum_{i=1}^n \bar{X}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{Y}_i^2 \right)$$

$$B = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \bar{X}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{Y}_i^2 \right) + 4 \left(\sum_{i=1}^n \bar{X}_i \bar{Y}_i \right)} \quad (2)$$

$$C = 2 \left(\sum_{i=1}^n \bar{X}_i \bar{Y}_i \right)$$

$$\text{x轴标准差: } \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_i \cos \theta - \bar{Y}_i \sin \theta)^2}{n}} \quad (3)$$

$$\text{y轴标准差: } \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_i \sin \theta - \bar{Y}_i \cos \theta)^2}{n}} \quad (4)$$

式中： (X_i, Y_i) 表示研究对象的坐标； W_i 表示权重； (\bar{X}_w, \bar{Y}_w) 表示每个区县冰湖平均中心的坐标； θ 表示椭圆的方位角； \bar{X}_i 和 \bar{Y}_i 分别表示各研究对象在空间上的坐标到平均中心的偏差； σ_x 和 σ_y 分别表示沿 x 轴、 y 轴的标准差。其中，平均中心代表各区县冰湖在空间上的相对位置，方位角表示冰湖的分布趋势。

(2) 采用 Pearson 相关分析揭示冰湖面积变化与各环境因子的相关关系。其中，影响因子的相关系数大于 0 表示正相关，相关系数小于 0 表示负相关。相关系数的绝对值越大，表示冰湖变化与影响因子之间的相关性越近。 P 值用于检验两个变量之间相关系数的显著性。 $P < 0.05$ 表明相关系数在 95% 的可信度水平下具有显著性，相关性计算公式如下：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中： n 为样本量； x 、 y 为变量的观测值。

(3) 地理探测器是由王劲峰等^[20]提出的一种新的统计方法，这种方法可以用来检测多种空间单元下多种因素的影响及其相互关系，但传统的地理探测器模型对连续性数据的离散化处理需要人工进行设定，其中存在离散不够准确以及人为主观因素的影响。参数最优地理探测器可以计算所有连续型数据不同分级方式下以及不同间断数下的 q 值：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (6)$$

式中： N 和 N_i 分别为层 i 和全区的单元数； L 为 Y 或 X 的分层。另外， q 值在 $[0, 1]$ 取值范围内， q 值越大，表示选取的影响因子 X 对冰湖面积变化的值 Y 影响越大，在极端的情况下， $q=1$ 表示影响因子 X 完全控制冰湖的面积变化，而 $q=0$ 则表示该因子与冰湖变化无关。

地理探测器还可以用来识别影响因子之间的相互作用，即分析多因子之间共同作用和相互独立作用对冰湖变化的影响力大小。本文使用的影响因子皆存在着相互影响的关系，例如相对湿度影响区域的降水，冰湖海拔影响区域的温度，温度变化又会影响区域内的冰川面积变化。

(4) 对影响冰湖变化的七个环境影响因子：冰湖海拔、年总降水、年平均温度、年平均湿度、冰川面积变化、GDP、人口密度，计算五种分级方法：equal(等间距分级法)、natural(自然间断点分级法)、quantile

(分位数间距分级法)、geometric(几何间距分级法)和sd(标准偏差间距分级法),以及不同间断等级下的影响解释力(q 值),选择 q 值最高的参数组合。

以冰湖海拔和年总降水因子为例(图2~图3),

对于冰湖海拔,当分类方式为几何间距分级法,间断等级为8时,解释力最强;对于年总降水,当分类方式为自然间断点分级法,间断等级为9时,解释力最强。其他因子离散化原理同理。

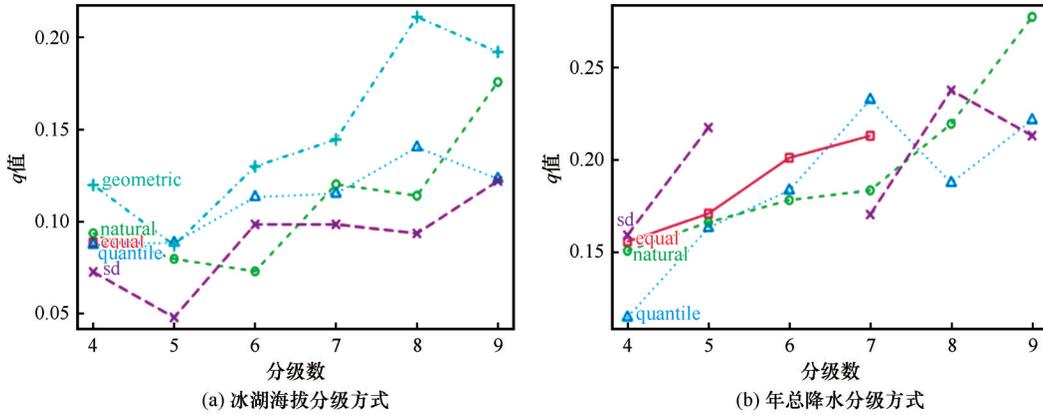


图2 冰湖海拔、年总降水分级方式
Fig. 2 Classification method of glacial lake elevation and precipitation: classification method of glacial lake elevation (a); classification method of precipitation (b)

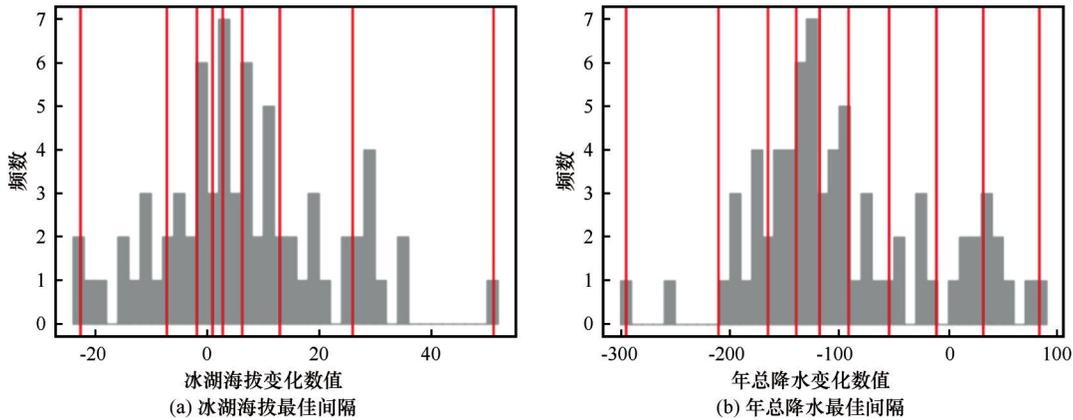


图3 冰湖海拔、年总降水最佳间隔
Fig. 3 Optimum interval between glacial lake elevation and precipitation: optimum interval between glacial lake elevation (a); optimum interval between precipitation (b)

2 西藏自治区冰湖时空变化与影响因素分析

2.1 冰湖时空变化

2.1.1 不同区县冰湖分布变化

对西藏冰湖数量进行统计制图,整体来看,1990年至2015年西藏地区冰湖分布格局并没有显著的变化(图4)。从区域上看,冰湖数量分布东部大于西部,南部大于北部,由藏东南向西北方向逐步递减趋势。由图可知,1990年至2015年间,冰湖数量减少的区县单位数量有30个,数量不变的有4个,数量增加的有37个,25年间增加数量最多的是察隅县,减少最多的是巴宜区。

根据数据统计,1990年至2015年西藏地区冰湖数量由1990年的11 164个增加到2015年的11 465个,冰湖增长数量为301个,增长了约2.69%;1990年冰湖总面积约为942.20 km²,2015年冰湖总面积约为1 002.00 km²,增长了约6.34%。

25年间,区县内冰湖总面积分布没有发生显著的变化,只有少部分区县内冰湖面积缩小,整体分布规律与冰湖数量分级图大体一致。25年间,冰湖面积增加的区县数量有32个,增加最多的是巴宜区;冰湖面积减少的区县数量有39个,减少最多的是工布江达县。

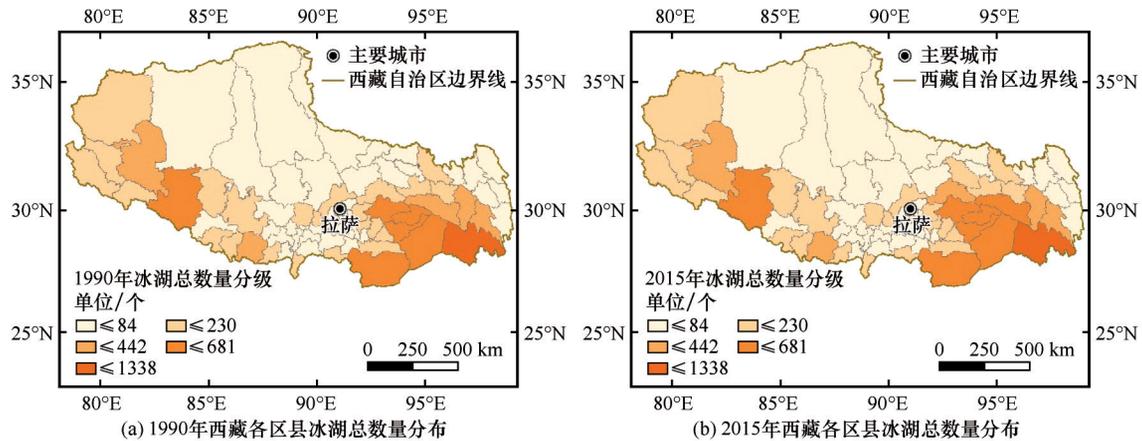


图4 1990年、2015年西藏各区县冰湖总数量分布

Fig. 4 The total quantity distribution of glacial lakes by districts and counties in Tibet in 1990 and 2015: the total quantity distribution of glacial lakes by districts and counties in Tibet in 1990 (a); the total quantity distribution of glacial lakes by districts and counties in Tibet in 2015 (b)

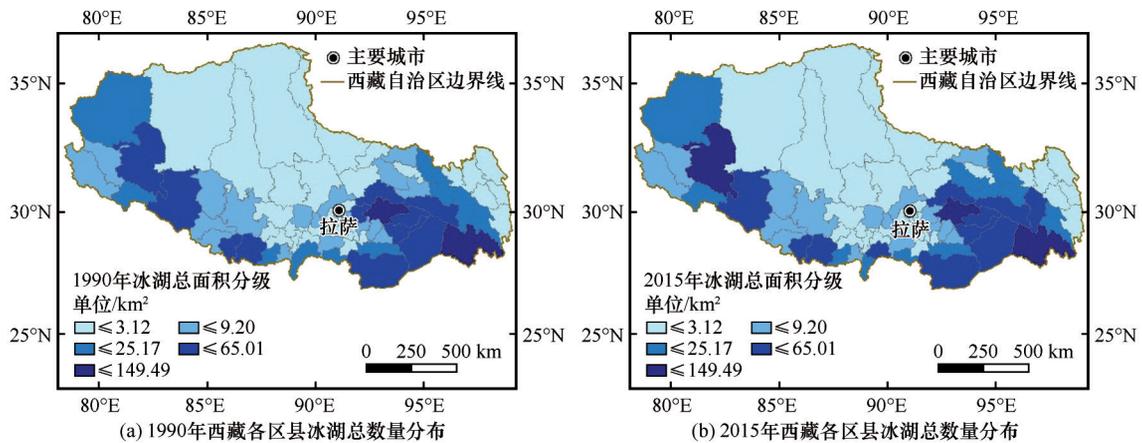


图5 1990年、2015年西藏各区县冰湖总面积分布

Fig. 5 The total area of glacial lakes in Tibet by district and county in 1990 and 2015: the total area of glacial lakes in Tibet by district and county in 1990 (a); the total area of glacial lakes in Tibet by district and county in 2015 (b)

2.1.2 不同规模冰湖的分布变化

不同规模的冰湖因高度而异。1990年面积在 $0.01\sim 0.1\text{ km}^2$ 之间的冰湖,主要分布在 $3\,500\sim 6\,000\text{ m}$ 海拔之间,并且规模较小的冰湖分布海拔更高,多在 $4\,500\sim 6\,000\text{ m}$ 之间;而面积大小在 $0.1\sim 1\text{ km}^2$ 的冰湖,大多分布在 $4\,000\sim 5\,700\text{ m}$ 的海拔;面积大于 1 km^2 的冰湖,数量较少,基本都分布在 $3\,500\sim 5\,000\text{ m}$ 海拔之中。

2015年,在不同海拔高度,各种规模大小的冰湖在急剧扩张,在 $3\,500\sim 4\,500\text{ m}$ 之间也开始形成较多面积在 $0.01\sim 0.1\text{ km}^2$ 之间的冰湖,而面积大于 1 km^2 的冰湖,在 $3\,000\sim 6\,000\text{ m}$ 海拔之间均有分布,并集中于 $4\,500\sim 5\,700\text{ m}$ 海拔。

2.1.3 西藏冰湖空间分布趋势

统计1990年和2015年西藏冰湖的标准差椭圆

参数(表2),以每个区县所在地范围内冰湖总数量和冰湖总面积作为统计单元。25年来西藏冰湖不管是数量分布还是面积分布整体呈现增长趋势,并且所有标准差椭圆扁率偏大,冰湖变化方向性显著,数量分布和面积分布离散程度高;1990年和2015年西藏冰湖基本都分布在西藏东部和南部地区,中心向西偏移,说明冰湖数量增长和面积增长略微是由藏东南向藏西南方向发展,受经度影响大于纬度影响。

2.2 冰湖影响因素分析

2.2.1 Pearson相关分析结果

通过Pearson相关分析,揭示所选取各因子的相关性。如图8所示,在0.01级别的显著性检验中,冰湖变化与年总降水因子和冰川面积变化因子相关性显著,这证明了西藏地区冰湖变化主要受该地

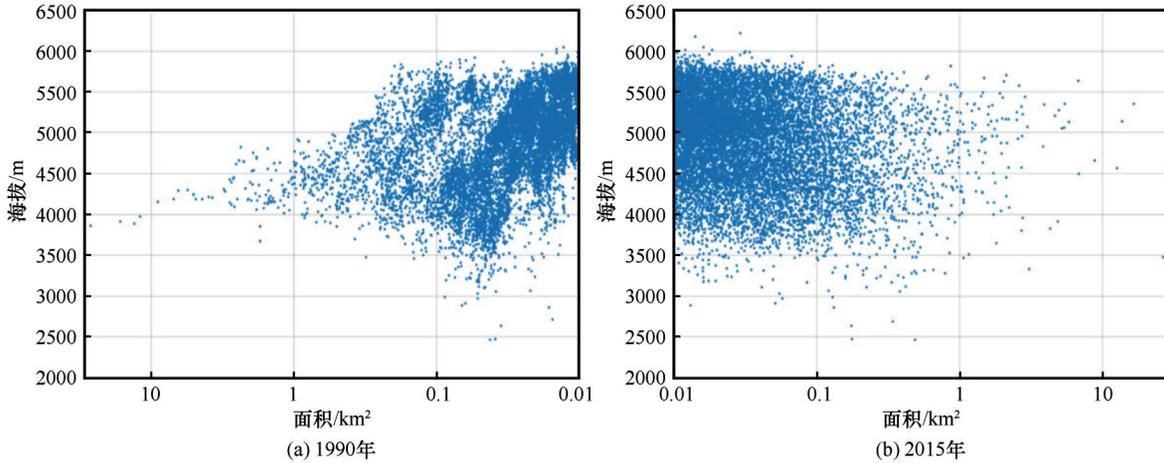


图6 1990年、2015年不同面积冰湖分布

Fig. 6 Distribution of glacial lakes in different areas in 1990 and 2015

表2 西藏冰湖分布和面积标准差椭圆参数

Table 2 Standard deviation ellipse parameters of the number and area of glacial lakes in Tibet

类型	时段	中心经度/E	中心纬度/N	短半轴	长半轴	扁率	方向角度/(°)
冰湖数量	1990年	91.74°	29.58°	6.92	1.65	3.21	94.02
	2015年	91.62°	29.59°	7.06	1.69	3.17	94.22
冰湖面积	1990年	90.90°	29.69°	7.49	1.82	3.12	95.40
	2015年	90.78°	29.68°	7.55	1.86	3.05	95.26

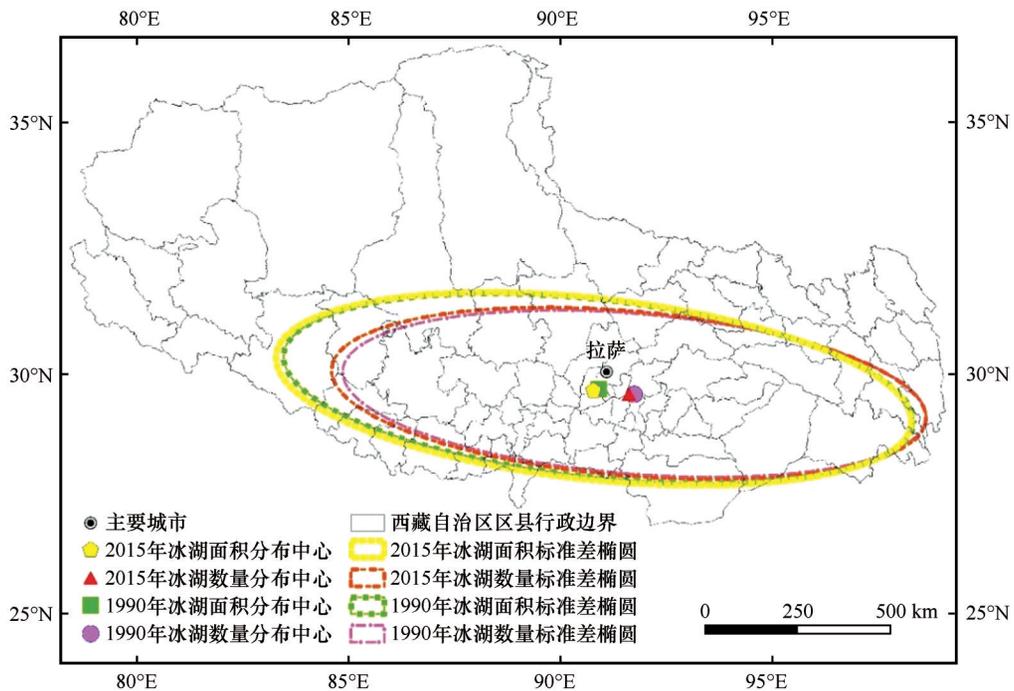


图7 西藏冰湖分布和面积标准差椭圆

Fig. 7 Standard deviation ellipse of the number and area of glacial lakes in Tibet

区降水量和冰川面积变化量的影响。其余因子均存在相互影响关系,例如冰川面积变化因子与年总降水因子和平均气温因子。

其中,在 Pearson 相关分析中,冰湖变化与冰川面积变化因子相关性最高,呈中度正相关;其次是总降水因子,呈中度正相关;然后是相对湿度因子

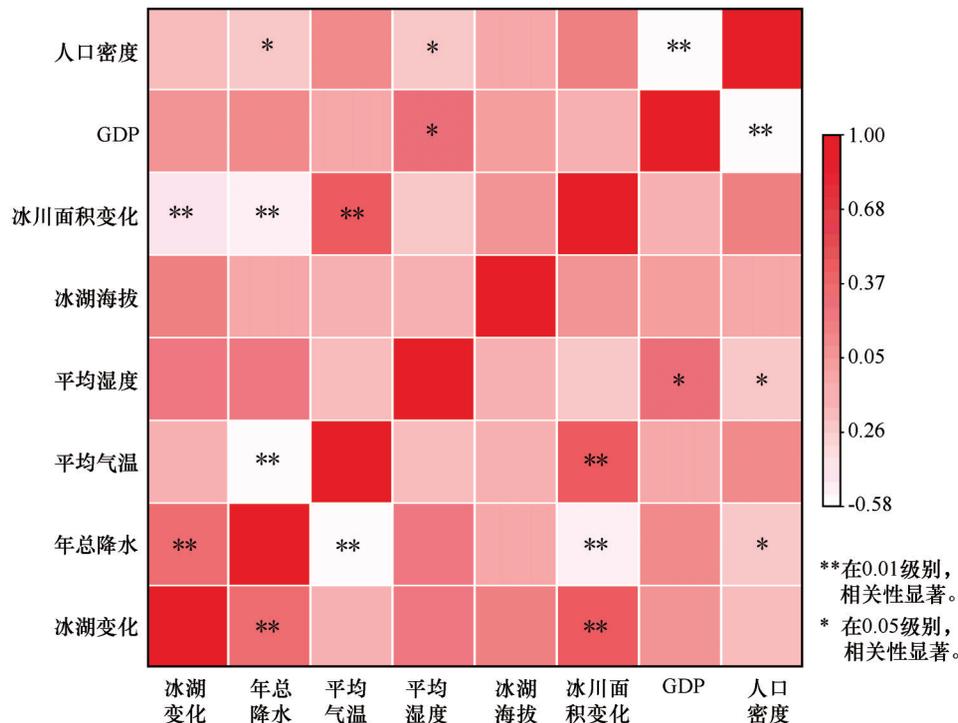


图8 Pearson 相关分析热度
Fig. 8 Pearson correlation analysis

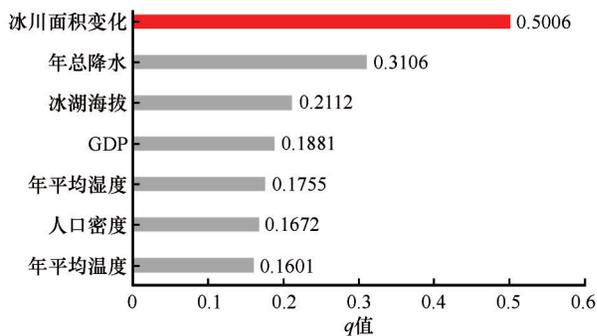


图9 各因子影响强度结果
Fig. 9 Results of each factor detection

和冰湖海拔因子,呈弱正相关,而与人口密度因子则呈弱负相关;最后是冰湖变化与平均气温因子和 GDP 因子不相关。说明 25 年间,西藏冰湖变化主要受该地区冰川面积变化大小以及降水量大小影响,冰川面积变化增加,降水量增加,冰湖面积扩张越显著。

2.2.2 参数最优地理探测器分析结果

进一步利用参数最优地理探测器对影响冰湖变化的影响因子进行探测,从空间角度分析各因子对冰湖变化的影响程度,并探索各因子之间的交互作用机制。

通过参数最优地理探测器,探测出各环境因子对冰湖变化的影响解释力。由图9可知,本文选取

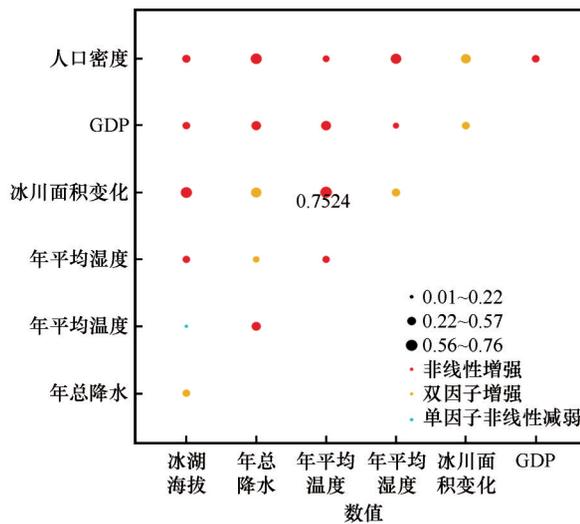


图10 各因子交互作用结果
Fig. 10 Results of interaction detection

的各环境因子,对西藏地区冰湖变化均有不同程度的影响。其中,冰川面积变化对冰湖变化影响强度最高(q 值为 0.5006),其次是年总降水(q 值为 0.3106),年平均温度对冰湖变化影响强度最低(q 值为 0.1601),其余因子对冰湖变化影响强度均低于 0.25。 q 值大小排名:冰川面积变化>年总降水>冰湖海拔>GDP>年相对湿度>人口密度>年平均温度。从因子探测可以看出,冰湖变化主要受冰川面

积变化和年总降水量的影响,尤其是冰川面积变化,在其中起主导作用。

通过交互探测器(图10)可以得知,尽管年平均温度因子单因子影响强度最低,其与冰川面积变化因子交互作用后影响强度最高, q 值为0.7542,说明两因子协同作用后可以解释75%的冰湖变化,但是冰川面积变化与其余气候因子和人文影响因子则呈双因子增强关系,这意味冰川面积变化与其余因子交互作用后对冰湖影响程度稍低。另外,大多数因子之间交互作用呈现非线性增强关系,各因子之间交互作用后的影响力均大于单因子的影响力,说明冰湖变化受各因子交互作用影响强度高。

3 讨论

时间上,1990年至2015年间,西藏地区冰湖整体呈增加趋势。1990年冰湖数量为11 164个,2015年冰湖数量为11 465个,增长301个,增长了约2.69%;1990年冰湖总面积约为942.20 km²,2015年冰湖总面积约为1 002.00 km²,增长了约6.34%。在全球气候变暖大环境下,亚洲高海拔地区冰川普遍退缩,冰川融水增多,以冰川融水补给为主的冰湖规模呈现扩张趋势^[12]。在未来情境下,温度如果持续攀升,可能致使冰川融水剧增从而导致冰湖湖泊持续增加^[37-38]。

空间上,不同规模大小的冰湖在不同的海拔高度都有增加,增长最多的是小型冰湖(面积小于0.1 km²)。25年来西藏地区冰湖整体呈现增长趋势,并且冰湖变化方向性显著,数量分布和面积分布离散程度高;西藏冰湖基本都分布在西藏东部和南部地区,分布中心向西偏移,说明冰湖数量增长和面积增长略微是由藏东南向藏西南方向发展。出现这种分布特征的原因可能是因为藏东南区域内分布着很多的海洋型冰川,其退缩速率大于西藏其他区域的大陆型冰川,对冰湖补给量比其他区域多^[39]。

通过Pearson相关分析结果和参数最优地理探测器结果,发现两种方法均分析出冰川面积变化和降水量在冰湖变化中起着至关重要的作用,可以解释大部分的冰湖变化。冰湖作为当地居民重要水资源之一,人类活动频繁对冰湖存在一定程度上的影响,人口密度增加,GDP的增加象征着区域内经济的发展,人口增长、经济发展意味着用水量增加,但西藏区域整体呈增长趋势,说明人类生产生活对冰湖影响很有限。其次,气温因子在两种分析方法

中影响力均是最低。这表明,在25年时间里,西藏地区地处青藏高原,冰湖对温度变化的响应不强烈,在研究冰湖溃决洪水的潜在危险性时,可以重新考虑温度对其的影响程度。上述分析表明,西藏自治区不同区域的冰湖规模增长速率不同,各地需因地制宜地采取不同方法进行对冰湖溃决洪水的防治。

4 结论

本研究运用标准差椭圆、参数最优地理探测器等方法,对西藏区域内冰湖的空间分布变化规律,冰湖变化的主要影响因子及交互作用机制进行研究分析,得出了以下结论:

(1)西藏地区冰湖总数增加了303个,增长约为2.57%,增加数量最多的区县单位是察隅县;西藏地区冰湖总面积增长了约为6.32%,冰湖面积增加最多的区县单位是巴宜区。各个面积大小的冰湖在不同的海拔都有显著的增长,其中多数增长是规模较小冰湖(面积小于0.1 km²),并且分布在海拔3 500 m~6 000 m之间。25年来西藏冰湖增长方向性显著,数量分布和面积分布离散程度高;1990年和2015年西藏冰湖基本分布在西藏东部和南部地区,中心向西偏移,受经度影响大于纬度影响。

(2)在Pearson相关分析中,冰湖变化与冰川面积变化因子相关性最高,其次是总降水因子,二者均呈中度正相关;然后是相对湿度因子和冰湖海拔因子,呈弱正相关,而冰湖变化与人口密度因子则呈弱负相关;最后是冰湖变化与平均气温因子和GDP因子不相关。说明25年间,西藏冰湖变化主要受该地区冰川面积变化大小以及降水量大小影响,冰川面积变化增加,降水量增加,冰湖面积扩张越显著。

(3)从空间角度利用地理探测器方法探测西藏地区冰湖变化影响因素。其中,冰川面积变化对冰湖变化影响强度最高(q 值为0.5006),其次是年总降水(q 值为0.3106),年平均温度对冰湖变化影响强度最低(q 值为0.1601)。单因子角度上,冰川面积变化因子和年总降水因子对该地区冰湖变化影响程度高。当年平均温度因子与冰川面积变化因子交互作用后对冰湖变化影响强度最高,且呈非线性增强关系,说明二者共同驱动下会影响西藏地区冰湖变化。而人为影响因子对西藏地区冰湖变化影响程度不高,主导因素还是气候变化与冰川面积

变化,需重点关注区域内气候变化与冰川退缩对冰湖造成的影响。

参考文献(References):

- [1] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Han Lei, et al. Definition and classification systems of glacial lake for inventory and hazards study [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1173-1183. [姚晓军, 刘时银, 韩磊, 等. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究[J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1173-1183.]
- [2] Wang Xin, Wu Kunpeng, Jiang Lianghong, et al. Wide expansion of glacial lakes in Tianshan Mountains during 1990-2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 983-993. [王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹, 等. 近20年天山地区冰湖变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 983-993.]
- [3] Watson C S, Kargel J S, Shugar D H, et al. Mass loss from calving in Himalayan proglacial lakes [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 7: 342.
- [4] He Xiangqi, Wang Zhoufeng, Wang Chengwu, et al. A method for estimating the probability of glacial lake outburst floods based on logistic regression and geodetector: a case study of the Himalayan region [J]. *Earth Science Informatics*, 2022, 15(1): 649-658.
- [5] Yang Zongji, Dong Wufan, Liu Jinfeng, et al. Genetic types and distribution of glacial lakes in Western Sichuan and Eastern Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2071-2079. [杨宗杰, 董悟凡, 柳金峰, 等. 川西藏东地区冰湖主要成因类型与分布规律[J]. *地质通报*, 2021, 40(12): 2071-2079.]
- [6] Wang Xin, Liu Shiyin, Guo Wanqin, et al. Hazard assessment of moraine-dammed lake outburst floods in the Himalayas, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 782-790. [王欣, 刘时银, 郭万钦, 等. 我国喜马拉雅山区冰碛湖溃决危险性评价[J]. *地理学报*, 2009, 64(7): 782-790.]
- [7] Cui Peng, Jia Yang, Su Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 985-992. [崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(9): 985-992.]
- [8] Wang Xin, Liu Shiyin, Mo Hongwei, et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 895-904. [王欣, 刘时银, 莫宏伟, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖扩张特征及其气候意义[J]. *地理学报*, 2011, 66(7): 895-904.]
- [9] Liu Juan, Yao Xiaojun, Gao Yongpeng, et al. Glacial Lake variation and hazard assessment of glacial lakes outburst in the Parlung Zangbo River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4): 1132-1143. [刘娟, 姚晓军, 高永鹏, 等. 帕隆藏布流域冰湖变化及危险性评估[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(4): 1132-1143.]
- [10] Stuart-Smith R F, Roe G H, Li S, et al. Increased outburst flood hazard from Lake Palcacocha due to human-induced glacier retreat [J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(2): 85-90.
- [11] Zhang Taigang, Wang Weicai, Gao Tanguang, et al. An integrative method for identifying potentially dangerous glacial lakes in the Himalayas [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150442.
- [12] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): hazards effects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1355-1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1355-1370.]
- [13] Qiu J. China: The Third Pole [J]. *Nature*, 2008, 454(7203): 393-396.
- [14] Bolch T, Buchroithner M F, Peters J, et al. Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest region/Nepal using spaceborne imagery [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, 8(6): 1329-1340.
- [15] Liu Jankang, Zhang Jiajia, Gao Bo, et al. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1335-1347. [刘建康, 张佳佳, 高波, 等. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1335-1347.]
- [16] Wang X, Liu S, Ding Y, et al. An approach for estimating the breach probabilities of moraine-dammed lakes in the Chinese Himalayas using remote-sensing data [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(10): 3109-3122.
- [17] Yin Yongsheng, Wang Xin, Liu Shiyin, et al. Characteristics and influence factors of the glacial lake changes in China from 1990 to 2020 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(1): 358-367. [殷永胜, 王欣, 刘时银, 等. 1990—2020年中国冰湖变化特征及影响因素[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(1): 358-367.]
- [18] Bhuiyan M A H, Kumamoto T, Suzuki S. Application of remote sensing and GIS for evaluation of the recent morphological characteristics of the lower Brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh [J]. *Earth Science Informatics*, 2015, 8(3): 551-568.
- [19] Liu Jiali, Zhou Tiancai, Yu Huan, et al. Dynamics and driving forces of lake changes in Tibet during the past 25 years [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(2): 145-150. [刘佳丽, 周天财, 于欢, 等. 西藏近25 a 湖泊变迁及其驱动力分析[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(2): 145-150.]
- [20] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [21] Zhang Ruoqing, Chen Yuehong, Zhang Xiaoxiang, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of flash flood disasters in Jiangxi Province analyzed by optimal Parameters-Based Geographical Detector [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(4): 72-80. [张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(4): 72-80.]
- [22] Li Linfeng, Li Kaiming. Study on the relationship between glacier change and topographic factors in the Shiyang River Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1026-1035. [李林凤, 李开明. 石羊河流域冰川变化与地形因子的关系探究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1026-1035.]
- [23] Wang Zhoufeng, Fan Shangjie, Wang Yujun, et al. Research on influencing factors of glacier area change in Sichuan based on geographic detectors [J]. *Journal of Geomatics*, 2023, 48(2): 97-101. [汪宙峰, 樊尚杰, 汪裕峻, 等. 基于地理探测器的四川地区冰川面积变化影响因素探究[J]. *测绘地理信息*, 2023, 48(2): 97-101.]
- [24] Peng Jianbing, Cui Peng, Zhuang Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan—Tibet railway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377-

2389. [彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377-2389.]
- [25] He Yiping, Hu Kaiheng, Wei Fangqiang, et al. Characteristics of debris flow in polongzangbu basin of Sichuan-Tibet Highway [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(3): 76-80. [何易平, 胡凯衡, 韦方强, 等. 川藏公路迫隆藏布流域段泥石流活动特征[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 76-80.]
- [26] Jia Yang, Cui Peng. The extreme climate background for glacial lakes outburst flood events in Tibet [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(4): 395-404. [贾洋, 崔鹏. 西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 395-404.]
- [27] Zheng Guoxiong, Allen S K, Bao Anming, et al. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation [J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(5): 411-417.
- [28] Ding Yongxia, Peng Shouzhong. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901—2100 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(2): 477.
- [29] Peng Shouzhong, Gang Chengcheng, Cao Yang, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100 [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(5): 2250-2264.
- [30] Sun Wenyi, Mu Xingmin, Song Xiaoyan, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960—2013 under global warming [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 168: 33-48.
- [31] Sun Wenyi, Song Xiaoyan, Mu Xingmin, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209/210: 87-99.
- [32] Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyan, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China [J]. *CATENA*, 2014, 121: 151-163.
- [33] He Xia, Zhou Shiqiao. Data: An assessment of glacier inventories for the Third Pole region (1990—2015) [DS]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2022. <https://doi.org/10.11888/Cryos.tpd.272302>. [何霞, 周石乔. 第三极地区冰川编目评价数据(1990—2015) [DS]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2022. <https://doi.org/10.11888/Cryos.tpd.272302>.]
- [34] Xu Xinliang. China population spatial distribution kilometer grid dataset [DS]. Beijing: Resource and Environmental Science Data Registration and Publishing System (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121101. [徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集 [DS]. 北京: 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121101.]
- [35] Xu Xinliang. China GDP spatial distribution kilometer grid dataset [DS]. Beijing: Resource and Environmental Science Data Registration and Publishing System (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121102. [徐新良. 中国GDP空间分布公里网格数据集 [DS]. 北京: 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121102.]
- [36] Wang Zhoufeng, He Xiangqi, Wang Chengwu. Prediction of glacial lake outburst floods based on geodetector and SVM: a case study of the Himalayan region [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(6): 220-228. [汪宙峰, 贺相祺, 王成武. 基于地理探测器与SVM的冰湖溃决预测研究——以喜马拉雅山地区为例 [J]. 自然灾害学报, 2022, 31(6): 220-228.]
- [37] 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): 310-323.]
- [38] Shen Ji. Spatiotemporal variations of Chinese Lakes and their driving mechanisms since the Last Glacial Maximum: a review and synthesis of lacustrine sediment archives [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(1): 17-31.
- [39] Guo Guohe, Cheng Zunlan, Wu Guoxiong, et al. Risk assessment of glacial-lake outburst along the south section of Sichuan-Tibet Highway [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(2): 50-55. [郭国和, 程尊兰, 吴国雄, 等. 川藏公路南线典型冰湖及其溃决危险性评价 [J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 50-55.]

Spatial-temporal variations and influencing factors of glacial lakes in Tibet based on Optimal Parameters-Based Geographical Detector

WANG Zhoufeng^{1,2}, ZHENG Bo¹, HE Xiangqi³, ZHANG Yanjing¹, SHEN Huiling¹

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With the intensification of global warming, glaciers at high altitudes in Asia are in an overall state of accelerated melting, the glacial lakes, which are mainly recharged by glacier meltwater, are undergoing rapid changes. As one of the important water resources in Tibet, glacial lakes play an important role in the daily life of the local people. The scale of glacial lakes in Tibet has been expanding, which may lead to natural disasters such as glacial lake outburst. Tibet is close to the Himalayas, and most of the GLOF events in Tibet originated in the glacial lakes of the Himalayan region. The current research on the factors affecting glacial lake changes basically stays on the nature of glacial lakes, using more qualitative methods. This paper is based on GIS spatial analysis,

Pearson correlation analysis and Optimal Parameters-Based Geographical Detector method. All the glacial lakes with an area larger than 0.01 km^2 in Tibet were counted using the open-source data of the Third Pole Glacial Lake. This study mainly analyzed the changes in the number and scale of glacial lakes in Tibet from 1990 to 2015, as well as the spatial distribution trend of glacial lakes in the region. Pearson correlation analysis and Parameters-Based Geographical Detector were used to examine the influence of seven selected environmental factors: glacial lake altitude, annual total precipitation, annual average temperature, annual relative humidity, glacier area change, GDP, and population density. The results showed that: (1) The total number of glacial lakes in Tibet increased by 303, an increase of about 2.57%; the total area of glacial lakes in Tibet increased by 59.90 km^2 , an increase of about 6.32%. The glacial lakes of different sizes increased significantly at different altitudes, most of which were small glacial lakes (area less than 0.1 km^2), and distributed between 3 500~6 000 m. The growth direction of glacial lakes in Tibet in the past 25 years was significant, and the quantity and area distribution were highly dispersed. In 1990 and 2015, the glacial lakes in Tibet were basically distributed in the eastern and southern parts of Tibet, with the center shifting to the west. The influence of longitude was greater than that of latitude, and the growth of quantity and area of glacial lakes was slightly from southeast Tibet to southwest Tibet. (2) In Pearson correlation analysis, the glacial lake change was most correlated with the glacier area change factor, followed by the total precipitation factor, both of which showed moderate positive correlation. Then the relative humidity factor and the glacial lake altitude factor showed weak positive correlation, while the population density factor showed weak negative correlation. Finally, the glacial lake change was not correlated with the average temperature factor and GDP factor. The glacial lake change in Tibet was mainly affected by the change of glacier area and precipitation in the region. The increase of glacier area and precipitation increased, and the glacial lake expansion was more significant. (3) Parameters-Based Geographical Detector method was used to detect the influencing factors of glacial lake change in Tibet. Among them, the change of glacier area had the highest influence intensity on glacial lake change, with a value of 0.5006. The second was the annual total precipitation, with a value of 0.3106. The annual average temperature had the lowest influence intensity on glacial lake change, with a value of 0.1601. From the perspective of single factor, the change of glacier area and precipitation factor had a high influence on glacial lake change in this region. When the temperature factor and the change of glacier area interacted, they had a severe influence on glacial lake change, and the relationship was nonlinear enhancement, indicating that the two factors would affect the change of glacial lake in Tibet under the common drive. However, the influence of human factors on glacial lake change in Tibet was not high, and the dominant factors were climate change and glacier area change. It is necessary to focus on the impact of climate change and glacier retreat on glacial lake in the region. This study provides new ideas and references for exploring the driving mechanism of glacial lake changes, and provides basic information and data support for the potential risk assessment and risk analysis of GLOF in Tibet.

Key words: Tibet; glacial lake; spatial-temporal variation; Optimal Parameters-Based Geographical Detector

(责任编辑: 张国庆)