

近 30 年青藏公路沿线热融湖塘时空变化特征及成因分析



陈旭^{1,2,*}, 杨子宾¹, 杨文³

¹96843 部队, 甘肃兰州 730000

²兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000

³93920 部队, 陕西汉中 723000

摘要: 在气候变暖背景下, 近几十年来青藏高原多年冻土急剧退化, 其中最明显的特征之一就是热融湖塘的形成。以谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 平台为基础, 结合野外监测与 Landsat 数据, 分析了青藏公路沿线热融湖塘近 30 年 (1991-2020 年) 变化规律及影响热融湖塘分布的环境因素。结果表明, 1991-2020 年青藏公路沿线热融湖塘数量面积变化呈现减小-增加-快速增加-减少的变化趋势, 面积从 107.14 km² (1991 年) 增大到 184.92 km² (2020 年)。2018 年青藏公路沿线热融湖塘密度为 14.4 个/100km², 相比于高原其他区域数量显著。此外, 青藏高原热融湖塘数量、面积变化与区域的年平均气温显著正相关 ($p<0.05$), 与区域年平均降水量呈现弱的正相关, 表明青藏高原热融湖塘数量、面积变化受温度影响较强。研究高原公路沿线热融湖塘的分布变化及成因, 对认识多年冻土区生态环境对气候变化的响应提供了重要依据, 也可为青藏公路铁路建设提供重要本底资料, 进而服务于我国生态安全屏障建设。

关键词: 热融湖塘; 气候变暖; 多年冻土; 青藏公路; 区域变化

DOI: [10.57237/j.earth.2022.01.001](https://doi.org/10.57237/j.earth.2022.01.001)

The Temporal-Spatial Variation and the Cause Analysis of the Thermokarst Lakes Along the Qinghai-Tibet Highway in Recent 30 Years

Chen Xu^{1,2,*}, Yang Zibin¹, Yang Wen³

¹Unit 96843, Lanzhou 730000, China

²College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

³Unit 93920, Hanzhong 723000, China

Abstract: As the climate changed, the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP) has been experiencing rapid permafrost degradation in the past decades. One of the most remarkable characteristics is the formation of thermokarst lakes. Based on the Google Earth Engine platform (GEE), the distribution of thermokarst lakes along the Qinghai-Tibet Highway (QTH) in recent 30 years (1991-2020) are examined, and the environmental factors affecting the distribution of thermokarst lakes are investigated, combined with field monitoring and Landsat data. Both the number and area of thermokarst lakes along QTH

*通信作者: 陈旭, 1193715620@qq.com

收稿日期: 2022-09-05; 接受日期: 2022-09-19; 在线出版日期: 2022-11-01

<http://www.earthscieng.com>

show a trend of decreasing - increasing - rapidly increasing - decreasing. The area of thermokarst lakes increased from 107.14 km² in 1991 to 184.92 km² in 2020. In 2018, the density of thermokarst lakes along the Qinghai-Tibet Highway was 14.4 /100km² which is generally high over QTP. The changes in the number and area of the thermokarst lakes on the QTP were significantly positively correlated with the annual mean temperature ($p < 0.05$), while weakly positively correlated with the annual mean precipitation, indicating that the number and area variations of the thermokarst lakes on the QTP were strongly affected by temperature than precipitation. The study on QTP thermokarst lakes provides an investigation of the impact of climate change on the ecology and environment of permafrost regions, background research for the construction of QTH, and further serve the construction of ecological safety barrier in China.

Keywords: Thermokarst Lake; Climate Warming; Permafrost; Qinghai-Tibet Highway; Regional Change

1 引言

在全球持续变暖背景下, 作为中低纬度多年冻土面积最大的青藏高原, 增温趋势明显[1]。高原温度升高的结果之一是多年冻土的退化。多年冻土的退化最显著的表现特征之一是, 多年冻土的融化会形成的热喀斯特地貌[2-4]。热喀斯特是富冰多年冻土退化或地下冰融化而形成的特殊地貌过程[5], 常见的热喀斯特地貌有热融侵蚀、热融滑塌、热融沉降和热融湖塘等[6]。



图 1 青藏高原热融湖塘野外照片

热融湖塘在青藏高原多年冻土区十分常见, 北麓河地区总面积 5% 为热融湖塘[10]。热融湖塘对地球化学生物循环、地表过程、水文过程以及人类活动等具有重要影响[11-13]。热融湖塘面积变化, 湖岸坍塌, 会使得周围公路、铁路等工程发生沉陷、坍塌[14]。另一方面, 热融湖塘提供了大量淡水栖息地, 对调节碳、水和能源有重要作用。然而, 青藏高原热融湖塘区域分布和变化情况在很大程度上仍是未知的, 限制了对多年冻土碳反馈及生态环境效应的认识。

其中, 热融湖塘的形成使陆地生态系统转变为水生生态系统[7], 因此需要着重研究。

热融湖塘是在富冰多年冻土地区, 在多种因素(自然和人为)影响下, 地下冰发生融化, 活动层变厚, 随后地表发生塌陷形成洼地, 逐渐积水后所形成的的塘/池(图1)[8]。热融湖塘的形成和发展使之前的陆地生态系统变成水生生态系统, 是富冰多年冻土的主要地貌类型[9]。

青藏高原北麓河盆地等部分小区域的热融湖塘研究发现, 2007 - 2009 年该区域热融湖塘总面积的增长速率为每年增长 $1.25 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{a}$ 。青藏高原小区域的热融湖塘近年来数量面积的变化呈现明显增加的趋势[14], 但是对于与社会经济发展、文化传播和军事活动密切联系的大通道—青藏公路沿线, 热融湖塘的分布及变化速率相关研究较少。这阻碍了重点区域热融湖塘发育变化与多年冻土环境变化的探究, 使得在多年冻土退化背景下未来青藏高原的经济、文化和军事等

活动存在安全隐患。因此,本研究将重点分析青藏公路沿线热融湖塘数量面积的分布变化特征,并探寻影响其变化的主要气候因素。

2 研究区概况

本研究选取G109国道格尔木-拉萨 1609 km,向左右

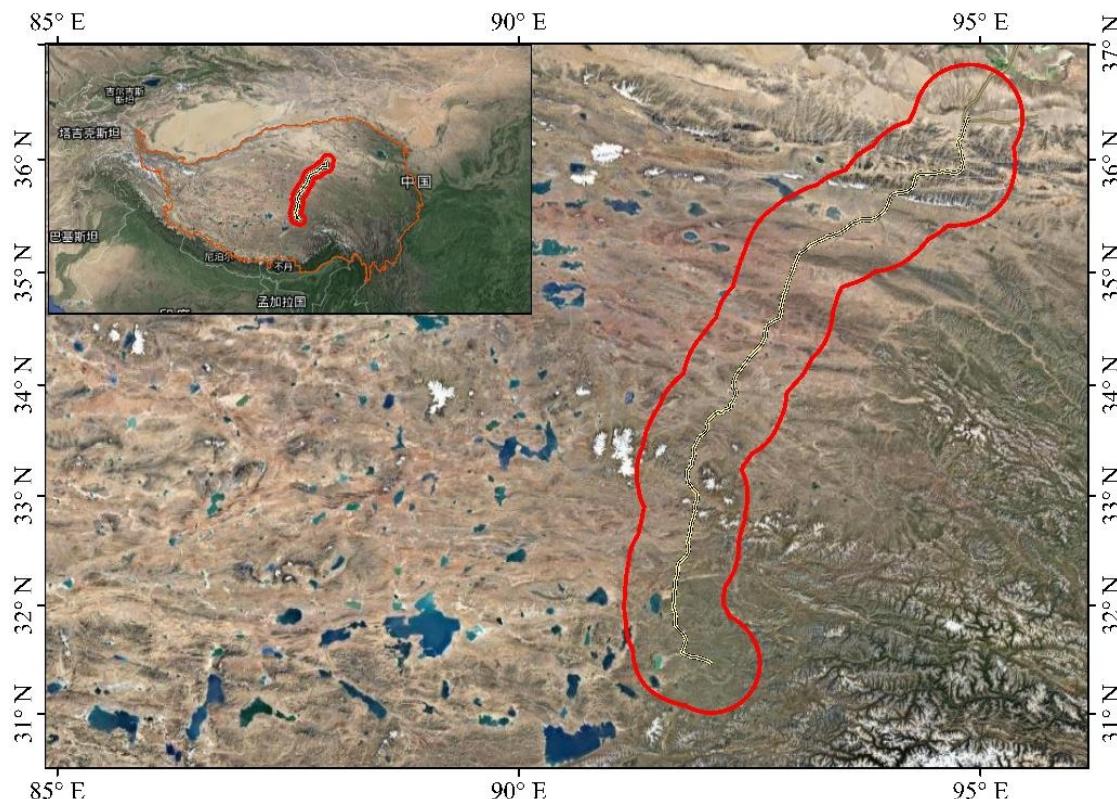


图2 选取的青藏公路沿线研究区

3 数据与方法

3.1 遥感数据

本研究所使用的遥感数据来自 Sentinel-2A、Landsat 和中分辨率成像光谱仪等数据集,具体如下:

Sentinel-2A 数据为欧洲哥白尼计划中承担多光谱高分辨率的子卫星,搭载了具有 13 个波段的 MSI 成像传感器 [18], Sentinel-2A 观测范围具有 13 个光谱带,覆盖了可见光、近红外及短波红外部分 [18-20]。具有对地球表面进行密集、连续监测的优势。其数据通过欧空局官网 (<https://scihub.copernicus.eu/>) 公开下载。(表 1)

表 1 哨兵卫星波段

波段号	Sentinel-2A 波段	中心波长/nm	空间分辨率/m
1	Coastal aerosol	443	60
2	蓝	490	10
3	绿	560	10
4	红	665	10
5	植物红边	705	20
6	植物红边	740	20

波段号	Sentinel-2A 波段	中心波长/nm	空间分辨率/m
7		783	20
8		865	20
8a	近红外	842	10
9	水蒸气	945	60
10	短波红外 卷云	1375	60
11	短波红外 1	1610	20
12	短波红外 2	2190	20

Landsat 卫星数据来自美国陆地卫星计划, 是目前运行时间最长的地球观测计划, 目前已发射 8 颗卫星, 本研究采用 Landsat 5/7/8 三颗卫星的数据。该卫星影像空间分辨率为 30m。(表 2)

中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 作为地球观测系统 (Earth Observing System, EOS) 中重要的卫星传感器之一。该卫星影像空间分辨率为 500m。(表 2)

表 2 Landsat 和 MODIS 卫星波段

波段	Landsat	MODIS
蓝光	Band1 (0.45~0.52μm)	Band3 (0.46~0.48μm)
绿光	Band2 (0.52~0.60μm)	Band4 (0.55~0.57μm)
红光	Band3 (0.63~0.69μm)	Band1 (0.62~0.67μm)
近红外	Band4 (0.76/0.77~0.90μm)	Band2 (0.84~0.88μm)
中红外	Band5 (1.55~1.75μm)	Band5 (1.23~1.25μm)
中红外	Band7 (2.08/2.09~2.35μm)	Band6 (1.63~1.65μm)
中/热红外	Band6 (10.40~12.50μm)	Band7 (2.11~2.16μm)

3.2 气象、植被和冻土数据

本研究所使用的气象数据包括气温和降水来自 ERA5 (ERA Interim, <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>), 是欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 第 5 代大气全球气候再分析数据[21], 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

多年冻土数据来自基于改进的 MODIS 地表温度 (LSTs) 的冻融指数及多年冻土顶部温度 (TTOP) 模拟的多年冻土分布数据集[22]。活动层厚度来自基于融化指数和 Stefan 方法获取的数据集[23]。

遥感 NDVI 时间序列采用 MODIS 遥感影像 (150 m) 计算得出。DEM 数据集主要是国际热带农业中心的 SRTM 地形数据[24], 数据分辨率 90 米。

平均地温数据来自 Ran 等的公开数据集[25], 该数据是基于 2010 年左右青藏高原 233 个钻孔年变化深度处的年平均地温数据和一系列与冻土制图相关的遥感数据产品获得的, 空间分辨率为 1 km \times 1 km。

青藏高原多年冻土区植被数据采用 Wang 等的公开数据集[26], 该数据是基于 EVI (Enhanced Vegetation Index, MOD13A2, 2009-2013)、LST (Land Surface

Temperatures, MOD11A2, 2009-2013)、DEM (Digital Elevation Model) 获得的, 空间分辨率为 1 km \times 1 km。

地下冰数据据引自环北极多年冻土和地下冰分布图 [27], 该冻土图描述了北半球中高纬度多年冻土的分布、属性及地下冰丰富条件。

地温数据集是在系统整编青藏高原 2005-2015 年共 237 个钻孔位置年变化深度年平均地温测量数据基础上, 利用模型融合了地面观测, 集合模拟了代表 2005-2015 年的青藏高原 1km 分辨率年平均地温分布图[28]。

3.3 Google Earth Engine 自动提取及人工目视解译

云地理信息处理平台 Google Earth Engine (GEE)。利用谷歌云计算和存储能力用于进行数据获取、处理、计算与分析, 可以快速、批量地处理大量的地理数据, 不受时间和空间的限制[29]。主要包含 Landsat 系列数据、MODIS 数据、Sentinel 卫星数据, 此外还有气候、水文等再分析资料。在本研究中, 水体提取、气象数据提取、NDVI 数据提取都是在 GEE 平台完成。

本文基于 GEE 平台结合 Sentinel 2A L1C 数据, 利用归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index,

NDWI) [30] 提取青藏高原水体。计算公式如下：

$$NDWI = \frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR} \quad (1)$$

式中：GREEN 为绿光波段；NIR 为近红外波段。由于青藏高原建设用地比较少，所以用 NDWI 提取结果可以忽略误差。

Sentinel-2 MSI 图像包括 20 m 分辨率的 SWIR 波段和 10 m 分辨率的绿色和近红外波段，从而使基于 10 m 分辨率的水指数的制图成为可能。

一般来说，一个湖是在一个恒定的水位上的一个平坦的表面，湖面的梯度是非常轻微的。青藏高原的热融湖塘一般分布在高平原或坡度<3°的平坦低洼的山间盆地和谷地处[8]。Li 和 Sheng[31]对大量样本图像冰湖的 NDWI 图进行了阈值为 0.1 的分割研究，发现得到的几乎所有的冰湖都位于潜在湖区的内部，采用潜

在湖区掩膜后，排除了山体阴影，对水体的提取较为准确。故本研究的水体指数提取水体的分割阈值为 0.1。

目视解译是遥感图像解译的一种，又称目视判读，或目视判译，是遥感成像的逆过程。由于研究区面积大，影像多，GEE 提取的水体在影像旁向重叠部分上存在提取误差，进行了自动水体检测之后，仍然需要人工检查和编辑。特别是研究区的环境因素，如大量的云、雪、冰川和阴影。会使分类过程复杂化。此因此，本研究采用基于先验知识的可视化数字化方法绘制湖泊地图。通过目视解译将通过 Goole Earth Engine 平台自动提取的水体中的冰川、河流、大型构造湖去除，湖塘的位置面积进行校正。提取湖区的精度可能受到像素大小、受云、雪、冰川和阴影覆盖影响的图像质量、分类算法和研究人员的经验等因素的控制。

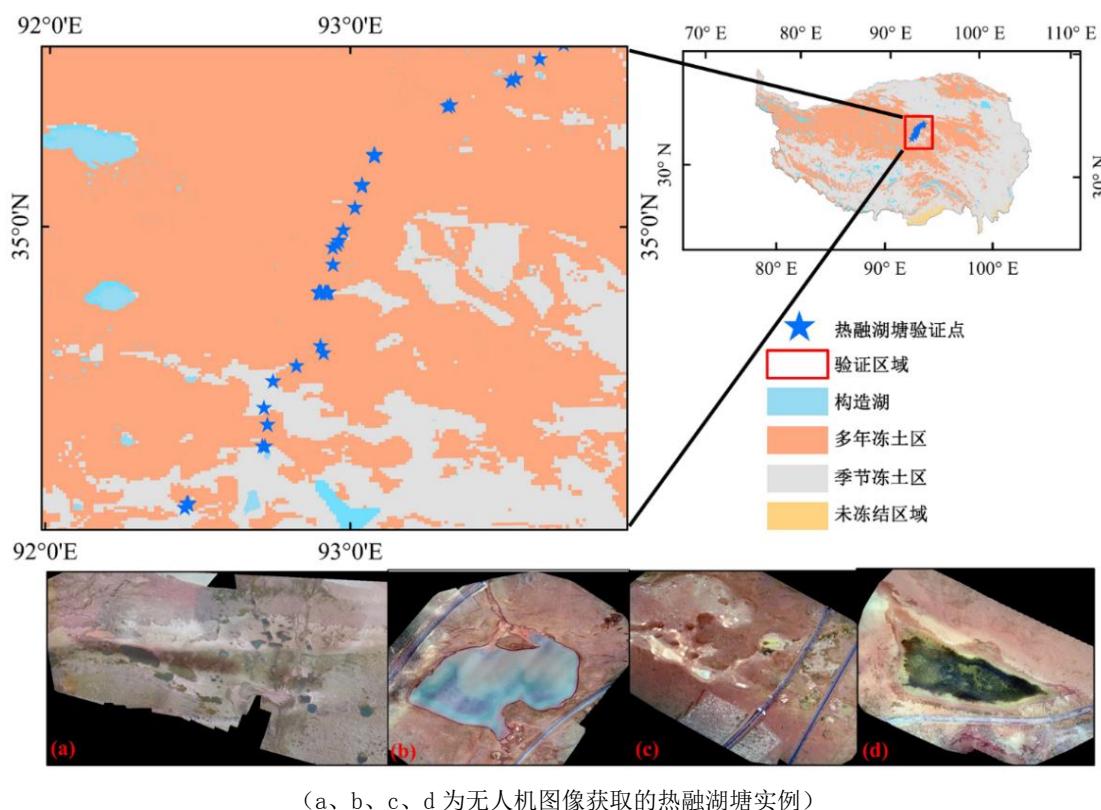


图 3 无人机验证的热融湖塘分布

3.4 植被归一化指数提取

NDVI (植被归一化指数)，由遥感数据的红外波段及近红外波段计算得来，是研究植被活动的良好指标，其空间覆盖范围广、时间分辨率高。NDVI 是植被遥感

中使用最广泛的指数模型之一，其计算公式为：

$$NDVI = \frac{NIR+RED}{NIR-RED} \quad (2)$$

其中：NIR 为近红外波段的反射率值，RED 为红光波段的反射值。本文基于 GEE 平台结合 Landsat8

L1T 数据, 提取青藏高原 NDVI(植被归一化指数)[32]。

同时, 利用 GEE 平台现有的 MYD13Q1 V6 产品的 NDVI 值计算出 2000-2018 年青藏高原 NDVI 变化图。

将热融湖塘通过 ARCGIS 10.2 建立湖周围 500m 缓冲区, 提取缓冲区内的 NDVI 值, 并计算缓冲区内平均值, 得到每个热融湖塘周围的 NDVI 值。同样方式得到热融湖塘周围 2000-2018 年 NDVI 变化值。

3.5 无人机数据与 Sentinel-2A 数据对比验证

使用大疆无人机精灵(Phantom 4 Pro 2.0), 在 2019 年 9 月 24 日-28 日和 2020 年 6 月 30 日在青藏公路沿线热融湖塘进行拍摄, 选取 50 个不同面积极分级的热融湖塘, $<1000 \text{ m}^2$ 的热融湖塘 11 个, $1000-10000 \text{ m}^2$ 的热融湖塘 31 个, $10000-100000 \text{ m}^2$ 的热融湖塘 10 个, $>100000 \text{ m}^2$ 的热融湖塘 4 个, 充分代表各面积极分级下的热融湖塘, 进行精度检验, 无人机的飞行高度为 100-500 m, 航向重叠率和旁向重叠率分别为 80%、75%, 使用 RTK 打点用于矫正和精度评价, 解算后的平均

GSD (地面采样距离, 相当于卫星遥感中的地面分辨率) 为 2.60 cm (图 3)。精度检验结果如下表。通过精度检验, 面积较小的热融湖塘相对误差略大, 面积越大的相对误差接近 0, 总体来看监测效果较好。

4 结果

4.1 1991-2020 年青藏公路沿线热融湖塘分布变化

通过 1991-2020 年的 Landsat 和 Sentinel-2A 遥感影像确定了 1991、1995、2000、2005、2010、2016、2018、2020 年各年青藏公路沿线热融湖塘的分布数量及面积 (图 4)。结果表明, 青藏公路沿线热融湖塘主要分布在 35.5°N 附近, 在北麓河盆地、沱沱河、五道梁、秀水河盆地处, 在公路铁路两侧热融湖塘数量多、分布广, 主要以小型热融湖塘为主, 在盐湖、小岛湖等一些高原大湖附近热融湖塘分布密度大。1991-2020 年变化表明, 五道梁及北麓河盆地地区热融湖塘近 30 年数量面积变化最为明显。

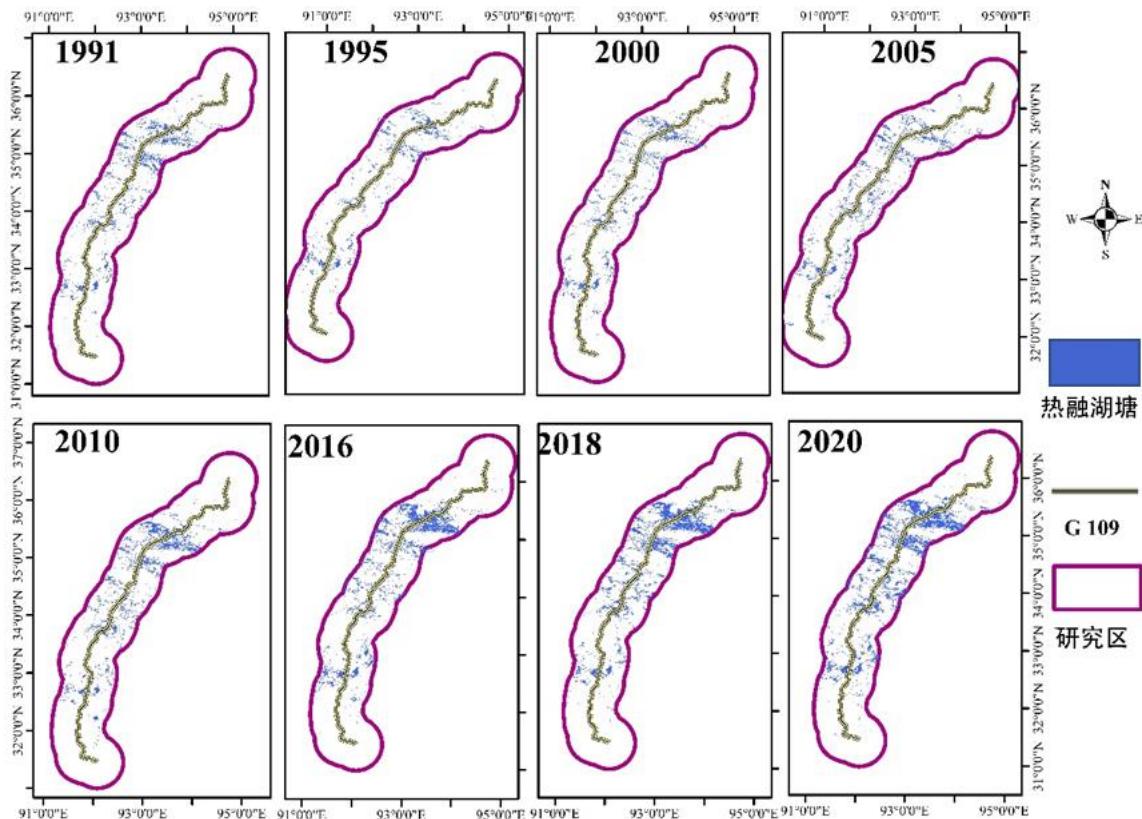


图 4 1991-2020 年青藏公路沿线热融湖塘变化

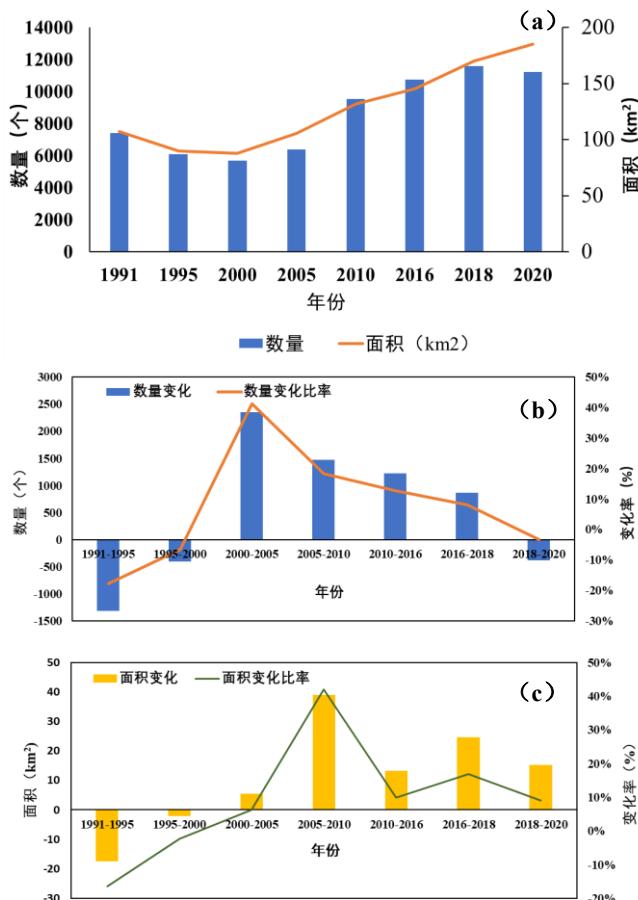


图 5 1991-2020 年青藏公路沿线热融湖塘变化(a)及数量(b)、面积(c)变化比率

1991 - 2000 年之间, 青藏公路沿线热融湖塘呈现减少趋势(图 5a)。青藏公路沿线 1991 年热融湖塘数量为 7407 个, 面积为 107.14 km^2 , 热融湖塘主要分布在北麓河盆地, 主要以小面积湖塘为主, 900 m^2 - 1500 m^2 的热融湖塘数量最多, 为 1699 个, 占 1991 年热融湖塘数量的 23%。热融湖塘在 1990-1995 年数量和面积变化更明显, 变化率分别为 -17.71% 和 -16.37%, 1995 年 - 2000 年热融湖塘面积数量变化为减小趋势, 变化率数量面积变化率缩分别为 -6.56% 和 -2.33%, 变化速度较 1990-1995 有所减慢。

2000 年后, 青藏公路沿线热融湖塘数量面积逐渐上升, 到 2005 年数量面积分别为 6368 个、 105.5 km^2 , 变化率分别为 41.23% 和 6.21%。2005-2010 年热融湖塘的数量面积增长率分别为 18.33% 和 41.95% (图 5b)。2010 年之后, 青藏公路沿线热融湖塘的识别从 Landsat 系列卫星转变为 Sentinel-2A, 分辨率的提高, 使得我们可以识别更多及更小的热融湖塘, 之前的我们能够

识别的最小的热融湖塘为 900 m^2 , 2016 年以后达到了 400 m^2 。结果表明, 小于 900 m^2 的热融湖塘在青藏公路沿线仍占较大部分, 青藏公路沿线的小型热融湖塘的数量偏多。为了统一分辨率, 研究 900 m^2 以上的热融湖塘, 可知 2010-2016 年热融湖塘数量增加了 1219 个, 面积增大了 13.17 km^2 。2018 年青藏公路沿线的热融湖塘数量达到峰值, 为 11599 个 (大于 900 m^2), 面积为 169.7 km^2 。2016-2018 年数量面积年平均变化率分别为 4.02% 和 8.48, 达到了 30 年平均变化率的峰值。2018-2020 热融湖塘数量呈现减小趋势, 数量变为 11215 个, 减小了 384 个, 与此同时, 面积却在增加, 达到了 30 年的峰值, 为 184.92 km^2 (图 5c)。

综合以上结论, 近 30 年青藏公路沿线热融湖塘数量增加了 3808 个, 增长率为 51.4%, 年平均增长率为 1.77%, 面积增加 77.78 km^2 。1991-2020 年, 热融湖塘数量变化趋势呈现: 减小 - 增加 - 快速增加 - 减小。热融湖塘面积变化趋势呈现: 减小 - 增加 - 快速增加。总体来看, 面积变化与数量变化相比, 具有滞后性。

4.2 青藏公路沿线热融湖塘变化的影响因素分析

通过近 18 年青藏公路沿线 NDVI 变化 (图 6) 可知, 1991 - 2000 年, 青藏公路沿线 NDVI 指数减少的区域较多, NDVI 指数增大的区域主要集中在研究区东北部, 而在研究区南面大部分区域 NDVI 指数都是降低和没有变化的。而 2000 年以后来看, 青藏公路沿线研究区内, 普遍 NDVI 指数都是增加的, 在 32°N 附近还出现了剧烈增加的现象。这可以进一步的呼应了, 在 2000 年以前青藏公路沿线热融湖塘数量面积减少, 而在 2000 年以后热融湖塘数量面积增加。说明热融湖塘的时空变化与植被及 NDVI 指数关系密切。

青藏公路沿线研究区多年冻土区面积占总研究区面积的 61.62%, 受气温、降水等受人类活动强烈。研究区平均气温在 1991 - 2000 年呈现缓慢降低的趋势, 2000 后逐渐上升, 到 2015 年前后达到最大值, 随后快速降低, 且 2020 年达到最低值 (图 7a)。

研究区的平均年降水量 1991 - 2000 年和 2010-2018 年持平, 约为 600 mm/a , 极大值出现在 2005 年, 极小值出现在 2020 年。2020 年研究区年总降水量最大值约为 513 mm , 研究区平均年总降水量仅为 286 mm (图 7a)。

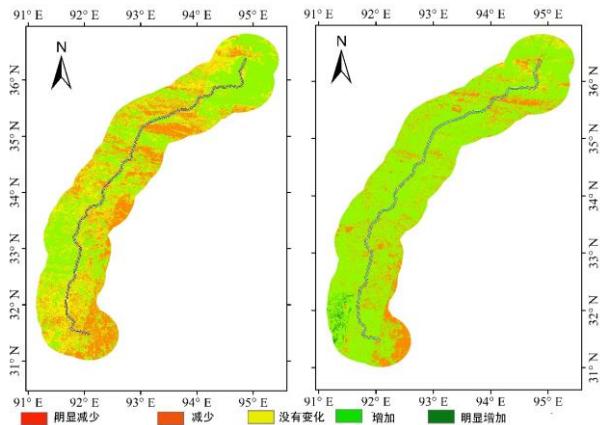


图 6 2000-2018 青藏公路沿线 NDVI 变化图

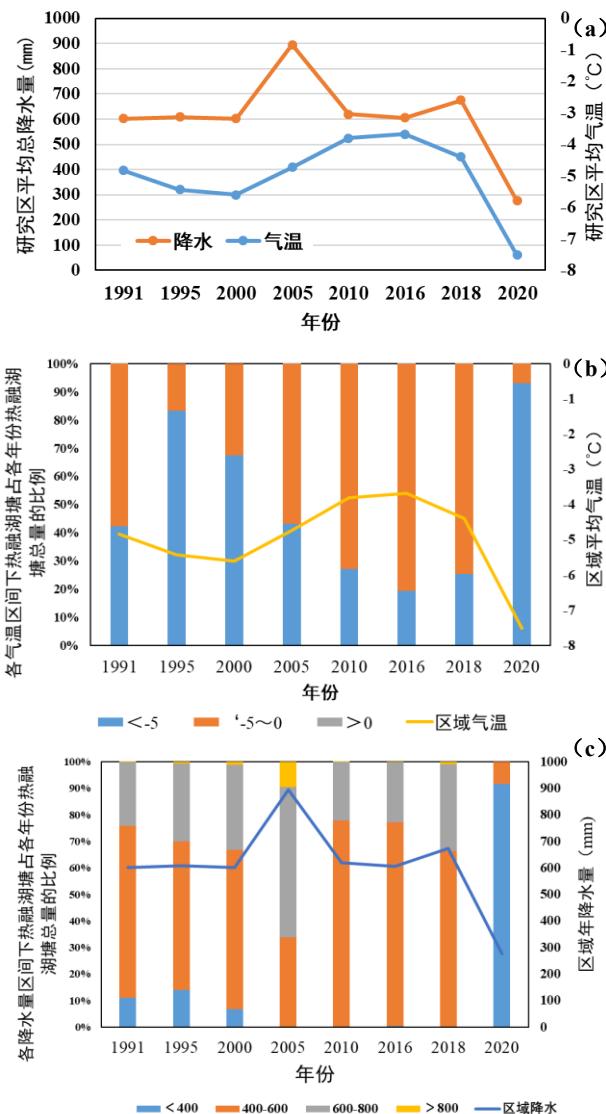


图 7 1991-2020 年青藏公路沿线区域内总降水量和平均气温变化 (a) 及气温区间下 (b) 和各降水量区间下 (c) 热融湖塘占各年份热融湖塘总量的比例

根据 1991-2020 年青藏公路沿线区域内各气温区间下热融湖塘占各年份热融湖塘总量的比例 (图 7b) 所示, 研究区内年均气温的变化与青藏公路沿线热融湖塘年均气温区间 $< -5^{\circ}\text{C}$ 的热融湖塘数量占总体热融湖塘数量的比例呈正相关, 与青藏公路沿线热融湖塘年均气温区间 $-5 - 0^{\circ}\text{C}$ 的热融湖塘数量占总体热融湖塘数量的比例呈负相关。

由青藏公路沿线区域内各降水量区间下热融湖塘占各年份热融湖塘总量的比例可知 (图 7c), 青藏公路沿线热融湖塘主要分布的年降水量区间内 (400 - 600 mm) 的热融湖塘数量占总体热融湖塘数量的比例与研究区内年总降水量的变化呈正相关。

通过分析青藏公路沿线区域内各植被类型下热融湖塘的数量 (图 8) 可知, 青藏公路沿线热融湖塘多分布在高寒草甸植被类型下。随着气温降低、降水减少, 各植被类型下的热融湖塘数量也随之减少, 其中高寒荒漠和裸地植被类型下, 热融湖塘随着气温降低、降水减少, 减少的速度最为迅速。在多年冻土区, 高寒沼泽草甸下的热融湖塘受气温、降水影响最小, 相对来说, 高寒荒漠和裸地植被类型下的热融湖塘受气温和降水的影响大。2018 - 2020 年高寒荒漠和裸地植被类型下, 热融湖塘数量降低, 与 2020 年该研究区整体降水偏少、气温降低关系密切。

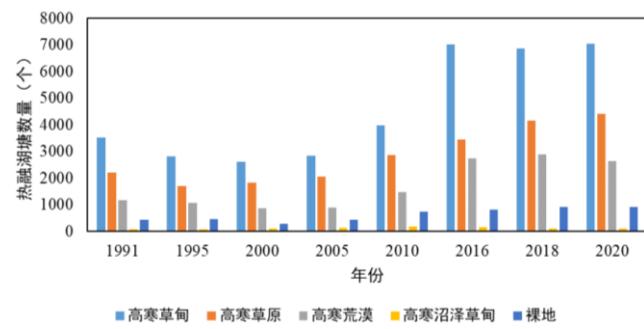


图 8 1991-2020 年青藏公路沿线区域内各植被类型下热融湖塘的数量

5 讨论

1991 - 2020 年, 青藏公路沿线热融湖塘增加了 3808 个, 增长率为 51.4%, 年平均增长率为 1.77%, 面积增加 77.78 km^2 。青藏公路沿线 2010 年热融湖塘数量约为 9500 个, 约占研究区面积的 0.02%。通过近 30 年对青藏公路沿线热融湖塘的研究可知, 相对于大型构造湖来说, 热融湖塘的数量变化与气温和降水呈关系密切。由图 7 可知, 随着研究区气温和降水的变化,

研究区热融湖塘数量随之变化。

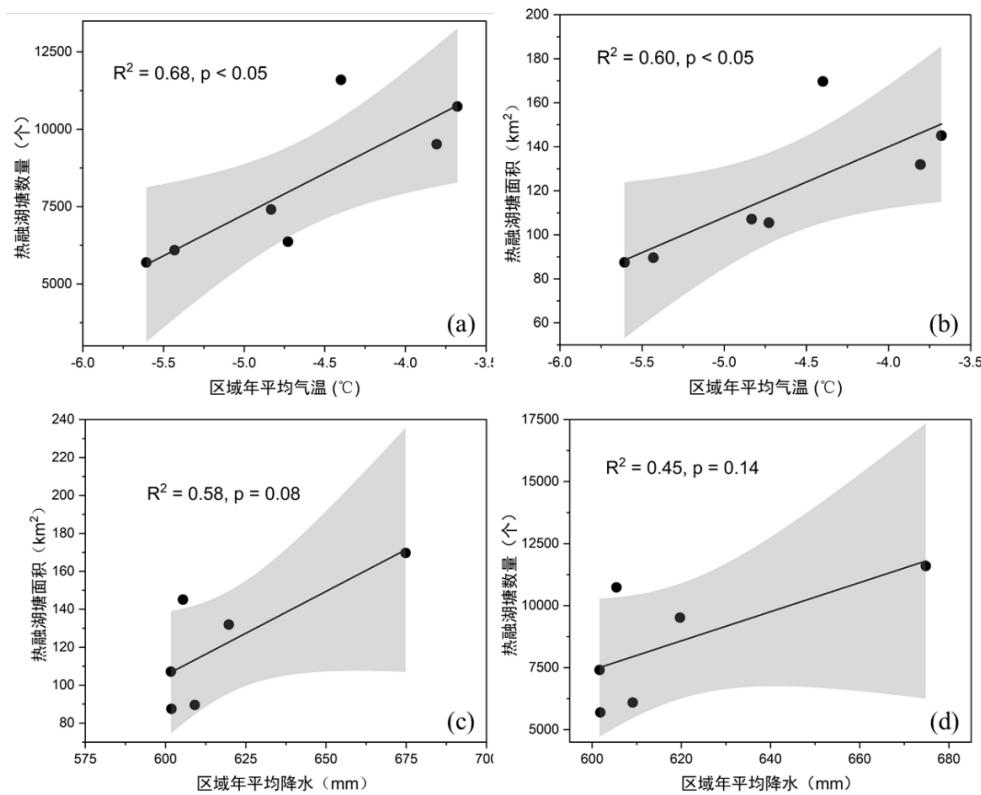


图 9 青藏公路沿线区域内热融湖塘数量-气温 (a)、面积-气温 (b)、面积-降水 (c)、数量-降水 (d) 相关性分析图

根据热融湖塘数量-降水、数量-气温、面积-气温和面积-降水相关性分析 (图 9) 表明, 青藏高原热融湖塘数量面积变化与区域的年平均气温显著正相关, 与区域年平均降水量正相关显著性弱。青藏公路沿线研究区呈长条状, 跨越昆仑山, 海拔差距大, 且受人类活动剧烈, 故而青藏公路沿线的区域年平均气温和年总降水量与整个高原相比, 具有一定的特异性[10]。这种特异性也是导致公路沿线小型热融湖塘数量年际变化大的重要原因。高原年平均气温升高, 多年冻土退化加剧, 但是高原的蒸发偏小, 热融湖塘数量面积与气温表现为正相关。

综上, 青藏公路沿线热融湖塘的数量面积变化与气温变化速率关系密切。

6 结论

通过分析不同观测、遥感及再分析数据, 本研究得出一下主要结论:

1) 1991 - 2000 年热融湖塘数量从 7407 个变化到

5695 个。热融湖塘数量变化趋势呈现: 减小 - 增加 - 快速增加 - 减小。热融湖塘面积变化趋势呈现: 减小 - 增加 - 快速增加。青藏公路沿线热融湖塘近 30 年数量增加了 3808 个, 增长率为 51.4%, 年平均增长率为 1.77%, 面积增加 77.78 km²; 热融湖塘数量面积, 1991 - 2000 年为减少趋势, 2000 年之后呈现增加趋势, 面积增大与数量增加相比具有滞后性。

- 2) 青藏公路沿线热融湖塘密度普遍偏高, 2018 年青藏公路沿线热融湖塘密度为 14.4 个/100km²。青藏公路沿线热融湖塘在高寒草甸植被类型下最多, 约占青藏公路沿线热融湖塘总面积的 48%, 青藏公路沿线热融湖塘在高寒荒漠植被类型下密度最大, 为 45/100km²。
- 3) 青藏公路沿线热融湖塘多分布在降水量为 400 - 600mm 的地方, 年平均气温低于 0 °C 的区域, 2020 年 93% 的热融湖塘都分布在年平均气温 < -5 °C 的区域。且热融湖塘的数量面积变化与气温和蒸发速率关系密切, 青藏公路沿线热融湖塘变化与气温变化正相关显著。

致谢

本文为中国科学院 A 战略性先导科技专项(XDA20100313); 国家重点研发计划“北极快速变化的机理、影响及其气候效应研究”项目(2019YFA0607003); 国家自然科学基金项目(41871050)阶段性成果之一。

参考文献

- [1] Wang, B., et al., Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia. *Geophysical Research Letters*, 2008. 35 (14): p. 63-72.
- [2] Grosse, G., et al., Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environmental Research Letters*, 2016. 11 (4): p. 040201.
- [3] Loranty, M. M., et al., Reviews and syntheses: Changing ecosystem influences on soil thermal regimes in northern high-latitude permafrost regions. *Biogeosciences*, 2018. 15 (17): p. 5287-5313.
- [4] Chadburn, S. E., et al., An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change*, 2017. 7 (5): p. 340-344.
- [5] Kozarski, S., L. Marks, and J. Repelewska-Pękalowa, Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. 1998.
- [6] Elder, C. D., et al., Greenhouse gas emissions from diverse Arctic Alaskan lakes are dominated by young carbon. *Nature Climate Change*, 2018. 8 (2): p. 166-171.
- [7] Turetsky, M. R., et al., Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 2020. 13 (2): p. 138-143.
- [8] 秦大河, 冰冻圈科学辞典. 2014: 气象出版社.
- [9] Niu, F., et al., Characteristics of thermokarst lakes and their influence on permafrost in Qinghai-Tibet Plateau. *Geomorphology*, 2011. 132 (3-4): p. 0-233.
- [10] 王慧妮, 基于遥感的青藏高原热融湖塘时空演化监测与趋势分析. 2013, 长安大学.
- [11] Marsh, P., et al., Changes in thaw lake drainage in the Western Canadian Arctic from 1950 to 2000. *Hydrological Processes*, 2009. 23 (1): p. 145-158.
- [12] Kokelj and Jorgenson, Advances in Thermokarst Research. *Permafrost & Periglacial Processes*, 2013. 24 (2): p. 108-119.
- [13] 牟翠翠, 热喀斯特改变多年冻土区景观和地表过程. *自然杂志*, 2020. 42 (05): p. 386-392.
- [14] 牛富俊, et al., 青藏高原多年冻土区热喀斯特湖环境及水文学效应研究. *地球科学进展*, 2018. 33 (04): p. 335-342.
- [15] 张中琼 and 吴青柏, 气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测. *冰川冻土*, 2012. 34 (3): p. 505.
- [16] Mu, C., et al., The status and stability of permafrost carbon on the Tibetan Plateau. *Earth-Science Reviews*, 2020: p. 103433.
- [17] Zhao, L., et al., Changing climate and the permafrost environment on the Qinghai-Tibet (Xizang) plateau. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020. 31 (3): p. 396-405.
- [18] Drusch, M., et al., Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 2012 (120): p. 25-36.
- [19] 杨斌, et al., Sentinel-2A 卫星数据处理分析及在干旱河谷提取中的应用. *国土资源遥感*, 2018 (3): p. 128-135.
- [20] Li, J. and D. P. Roy, A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sensing*, 2017. 9 (9).
- [21] D. P. Dee, S. M. U., A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Polia, S. Kobayashib,, et al., The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011.
- [22] Zou, D., et al., A New Map of the Permafrost Distribution on the Tibetan Plateau. *Chinese Pharmaceutical Affairs*, 2017. 11: p. 1-28.
- [23] Peng, X., et al., Spatiotemporal Changes in Active Layer Thickness under Contemporary and Projected Climate in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 2018. 31 (7): p. 251-266.
- [24] Reuter, H. I., A. Nelson, and A. Jarvis, An evaluation of void - filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007. 21 (9): p. 983-1008.
- [25] Ran, Y., et al., A permafrost stability distribution map over the Third Pole inferred from remote sensing and borehole measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2019.
- [26] Wang, Z., et al., Mapping the vegetation distribution of the permafrost zone on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2016. J (06): p. 1035-1046.
- [27] Brown, J., O. J. Ferrians, Jr., J. A. Heginbottom, and E. S. Melnikov.. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions. [indicate subset used]. Boulder, 2002 (National Snow and Ice Data Center.).

- [28] Ran, Y., et al., Mapping the permafrost stability on the Tibetan Plateau for 2005–2015. *Science China Earth Sciences*, 2020: p. 1-18.
- [29] Gorelick, N., et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017.
- [30] Mcfeeters and K. S., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996. 17 (7): p. 1425-1432.
- [31] Li, J. and Y. Sheng, An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: a case study in the Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 2012. 33 (16): p. p. 5194-5213.
- [32] Chander, G., B. L. Markham, and D. L. Helder, Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2009. 113 (5): p. 893-903.