

青藏高原冻土退化对气候的响应及环境效应

张轲凡

浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年2月15日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月3日

摘要

作为全球海拔最高的独特自然地理单元,青藏高原对局部、区域乃至全球天气和气候系统具有显著影响。文章基于青藏高原地区温度、降水因素,对地温和冻土现今发生的变化进行分析,并了解其产生的影响。青藏高原地区由于温度不断趋暖,降水变率增大,以及地温的升高,使一些多年冻土转变为季节性冻土,季节性冻土出现不衔接冻土和融化夹层。另一方面,由于高原对于气候变化反应敏感,不同地区冻土受到气候因素的影响消减程度也不同。冻土退缩及其对环境和人类活动的影响也存在很大的不确定性。

关键词

青藏高原, 冻土, GIS

Response of Permafrost Degradation to Climate Change and Environmental Effects on the Qinghai-Xizang Plateau

Kefan Zhang

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Feb. 15th, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 3rd, 2025

Abstract

As the unique natural geographical unit with the highest elevation in the world, the Qinghai-Xizang Plateau has a significant impact on local, regional, and even global weather and climate systems. Based on temperature and precipitation factors in the Qinghai-Xizang Plateau region, this paper analyzes the current changes in ground temperature and permafrost and understands their impacts. Due to the continuous warming of temperature, increased variability in precipitation, and rising ground temperature in the Qinghai-Xizang Plateau region, some permafrost has been

transformed into seasonal frozen ground, with discontinuous frozen ground and thawed interlayers appearing in the seasonal frozen ground. On the other hand, as the plateau is highly sensitive to climate change, the degree of reduction in permafrost in different areas due to climatic factors also varies. There is also great uncertainty in the retreat of permafrost and its impacts on the environment and human activities.

Keywords

The Qinghai-Xizang Plateau, Permafrost, GIS

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青藏高原的热力效应对我国乃至全球的气候系统具有极其重要的影响。高原季节性冻土作为高原地表的重要特征,对气候变化表现出高度的敏感性。青藏高原及其周边地区的气候变化与冻土之间存在紧密联系。由于青藏高原地区气候变暖趋势明显,其多年冻土出现快速、广泛的退化现象。主要表现为冻土融化,冻土之间不衔接,地温升高等现象。王澄海等[1]研究表明,青藏高原季节性冻土厚度在同一阶段呈现变薄趋势。对于青藏高原地区高海拔的多年冻土而言,气候变暖会导致冻土下界的海拔上升。在过去30年间,青藏高原多年冻土温度升高了约0.2℃,冻土下界正以160 m/℃的趋势上升,在喜马拉雅山北坡,冻土下界的升高趋势是80 m/℃ [2]。虽然在未来一段时间内青藏高原多年冻土不会发生本质变化,但当高原气温平均升高到一定程度后,多年冻土的范围和深度等状况将发生显著变化。本文通过对前人研究青藏高原多年冻土分布变化及高原温度、降水等数据,分析了气候变化对冻土的影响,并探讨了冻土变化现状以及可能未来冻土对环境 and 人类活动所产生的影响。

2. 青藏高原气候变化对冻土的影响

2.1. 区域温度变化

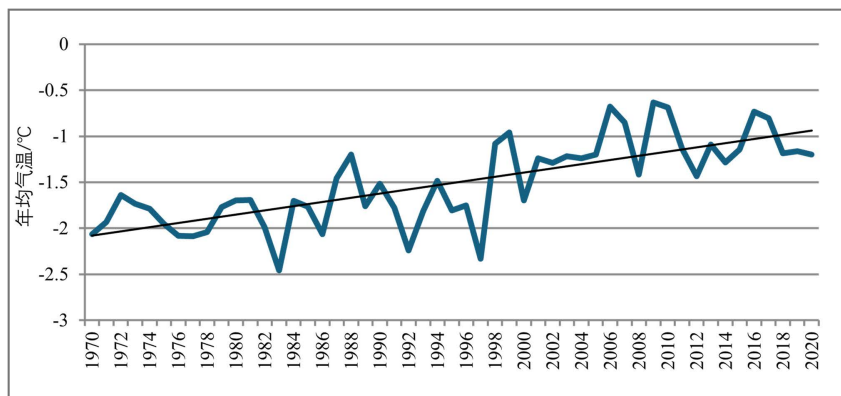


Figure 1. Annual temperature variation trend on the Qinghai-Xizang Plateau during 1970~2018

图 1. 1970~2018 年青藏高原年温度变化趋势

见图 1, 展示了 1970~2018 年青藏高原年温度变化趋势。由青藏高原历年平均温度的折线图中可看

出，在 1970~2018 年之间，青藏高原年均温度整体呈现上升趋势。其中最低温度出现在 1984 年，最高温度出现在 2011 年，明显地，2000 年前后的年均气温以 1.5℃左右为界逐步上升。马钰等[3]通过对 1990 与 1985 这两个年代之间的温度变化对比，发现青藏高原地区气温存在继续升高的趋势。

Table 1. Annual temperature variation in Qinghai Province stations (°C/a) (data modified after [3])

表 1. 青海省一些台站气温年变率(°C/a) (引用自马钰等[3])

站名	民和	贵德	西宁	祁连	刚察	兴海	都兰	大柴旦	冷湖	五道梁	清水河	昂欠	达日	平均
1 月 气温	0.036	0.026	0.067	0.030	0.049	0.080	0.060	0.077	0.050	0.027	0.004	0.012	0.033	0.043
平均 最低	0.001	0.000	0.038	0.022	0.039	0.069	0.030	0.081	0.018	0.030	0.012	0.029	0.042	0.032
7 月 气温	-0.03	-0.035	-0.002	-0.025	-0.016	-0.007	-0.037	-0.001	-0.025	-0.014	-0.019	-0.011	0.001	-0.017
平均 最高	-0.007	0.002	0.001	-0.011	-0.000	-0.003	0.014	0.002	0.010	0.005	-0.008	0.016	0.005	0.002

观察表 1 青海省一些台站气温年变率，可以发现青藏高原在冷期时，温暖趋势明显，升温幅度较大；相反，暖期升温不明显，甚至显示出有降温趋势。其中，青海省站台 1 月气温和平均最低气温的年变率均为正值，且 1 月气温的增温幅度大于多年平均及年平均最低值。而 7 月气温的年变率在某些地区为负值，说明暖期部分地区存在降温趋势。由此可见冷期趋暖最为明显。

青藏高原的降水变化规律相对复杂，年降水量呈现明显增多或减少趋势的现象仅限于局部台站的一段时期内，而多数台站长周期的变化趋势并不明显。

总体上温度变化特征为高海拔区更敏感，海拔 4000 米以上区域的升温速率明显高于低海拔地区，如唐古拉山、羌塘高原等地。以及西北部升温更强，高原西北部(如阿里地区)增温幅度高于东南部(如林芝地区)，可能与干旱化加剧有关。这种不同区域间显示出的不同步干旱化，是冻土产生区域性的退化的因素之一。

2.2. 区域尺度降水变化特征

通过金会军图 2(A)部分[4] [5]，历年降水量变化趋势线显示，整体上来说青藏高原地区降水量呈现上升趋势，并且降水变率逐步在增大。受季风影响，青藏高原地区降水主要集中在夏季，占全年降水量 50% 以上；春季时期稍低于秋季，冬季降水量则最少。通过图 2(B)部分，发现 20 世纪 60 年代以来冬春两季降水量显著增加，而夏季、秋季降水量变化趋势并不显著。在 2000 年以前，春季降水量的年际间波动幅度较大；冬季降水量在 1995 年以前呈上升趋势，而 1995 年后则呈下降趋势。

金会军等人[4]分析了不同地区年降水量的变化趋势和年季节降水量变化速率。整体上，青藏高原降水量变化的空间特征较为复杂，并且近 60 年来年降水量变化特征有很大差异。例如，三江源区与祁连山区整体年降水量呈现增加趋势，且 21 世纪以来变化速率显著增加，增加趋势更为明显[6] [7]；而雅鲁藏布江流域年降水量增加趋势并不明显[8]。大部分地区，如青海高原、西藏高原、柴达木盆地和共和盆地年降水量均呈现上升趋势。

青藏高原地区由于降水增加，表土层土壤水分含量也有所增加。这对高原草场退化、地表沙化有一定抑制作用，有助于缓解环境压力，同时可使多年冻土在逐步变暖的趋势下退化速度有所减缓。

IPCC 第六次评估报告指出[9]，气候变暖导致全球大部分地区极端天气气候事件发生的频率和概率

增加, 青藏高原地区犹如气候放大镜, 对气候变化更为敏感。影响降水变化的因素中, 青藏高原地表状况、全球和区域气候变暖与大尺度大气环流等因素对高原降水变化具有重要影响。而这些因素也影响到了高原多年冻土与季节冻土的区域变化。

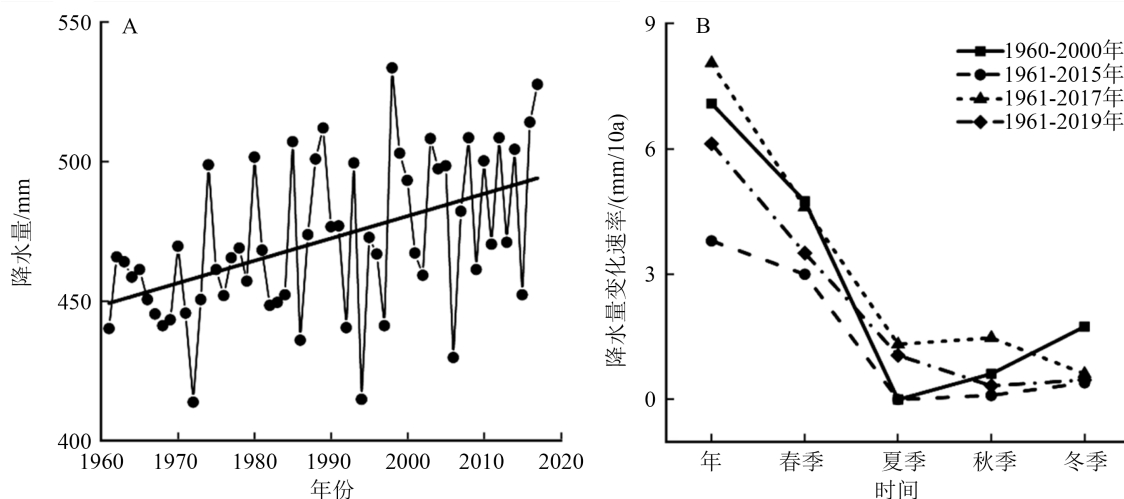


Figure 2. (A) Comparison of annual precipitation change trends, (B) annual and seasonal precipitation change rates on the Qinghai-Xizang Plateau since 1960 (data is modified after Hao, 2023 [5])

图 2. 1960 年以来青藏高原年降水量变化趋势(A)和年及季节降水量变化速率(B)对比(引用自郝爱华等[5])

3. 青藏高原冻土变化状况

通过青藏高原地区的温度和降水变化发现近几十年来青藏高原地区气候逐步转暖。区域性温度的升高与降水的减少会使高原冻土逐步消减, 常年冻土深度变浅, 范围缩小。季节性冻土冻结深度变小, 融化深度增大。因此需要对冻土的分布和变化状况进行分析。

3.1. 地温变化

地温是地表面和地面以下不同深度的土壤温度的统称。它受到降水、日照以及地表覆盖等多种因素的综合影响。因此, 地温可以作为反映冻土动态特征的重要标志之一。随着海拔升高、地温降低, 冻土厚度也会增大。因此, 地温变化是对温度, 降水等气候要素变化的响应。

青藏高原腹部地区(沿青藏公路)海拔每升高 100 m 高原冻土厚度就会增加 20 m 左右, 而在高原东部为 13~17 m。刘广岳等人[10]研究表明青藏高原地区多年冻土厚度随年平均地温的变化梯度约为 31 m/℃。程国栋等人[11]以西昆仑地区为例, 运用 TEM 方法探测的多年冻土下限可以与测点(线)附近钻孔的 10 m 地温间建立较好的线性回归关系。这也说明了地温与冻土之间的强相关性。

王绍令等人[12]通过对比上世纪 70 年代以来青藏高原不同地区钻孔深度地温进行对比发现, 由于气候逐渐转暖, 不同地区不同类型的冻土均出现升温现象。

而 20 世纪以来, 地温的变化被广泛报道。大量资料表明, 我国尤其以青藏高原地区地温增加明显。这会造成青藏高原地区冻土退化以及热量平衡的变化, 对于区域生态效应及实际生产实践也产生重大影响。

3.2. 冻土分布状况

通过对青藏高原区域冻土的数据分析, 能够明晰的看到冻土的变化状况。本文数据来源于国家青藏高原科学数据中心, 年气温变化数据由国家气象信息中心提供, 降水数据为“青藏高原及其周边地区逐

日降水”(来源: 青藏高原科学数据中心 <http://www.tpedatabase.cn>)。数据集包括青海、西藏以及云南、四川、甘肃、新疆等地靠近青藏高原地区的部分气象站的逐日监测数据。通过 GIS 分析数据后得到 1983 年与 2021 年高原季节性冻土与多年冻土的分布状况。通过观察季节性冻土区域的变化,发现高原西南部的多年冻土范围减少,转变为季节性冻土;东南部横断山区也有部分地区多年冻土转变为季节性冻土;而在高原中部偏北和北部地区,其南缘地区有季节性冻土的延伸,总体上还是以多年冻土为主。总的来说,青藏高原南部冻土转变为季节性的较多,而中部偏北和北部地区变化较南部地区小。这与高原不断变化的气温和降水量等气候条件密切相关。

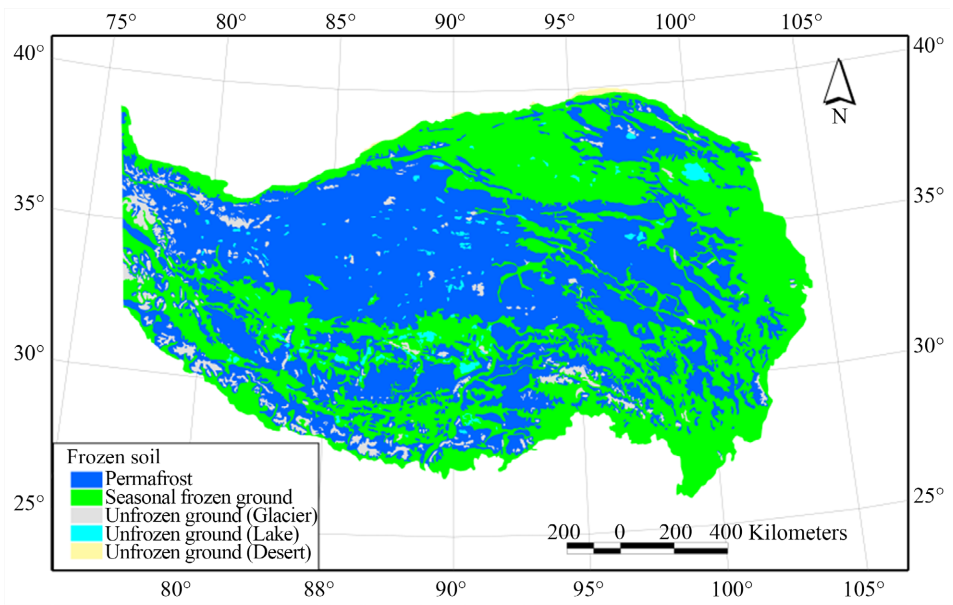


Figure 3. Distribution of permafrost on the Qinghai-Xizang Plateau in 1983 (data is modified after Chen, 2011 [13])
图 3. 1983 年青藏高原冻土分布图(引用自程国栋等[13])

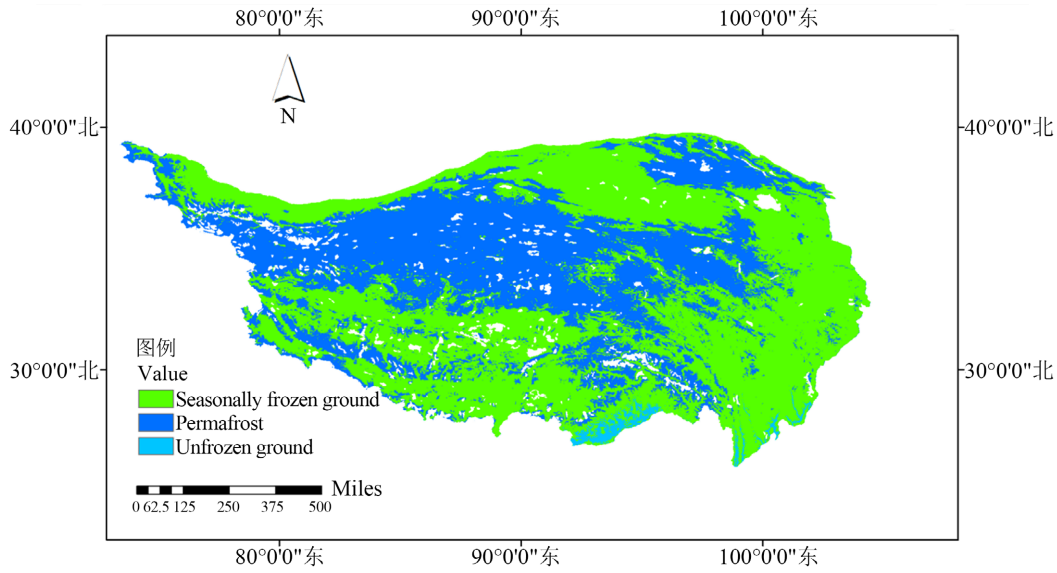


Figure 4. Distribution of permafrost on the Qinghai-Xizang Plateau in 2021 (Data from <http://www.tpedatabase.cn>)
图 4. 2021 年青藏高原冻土分布状况(来源: 青藏高原科学数据中心 <http://www.tpedatabase.cn>)

通过对比图 3 与图 4 不同年代青藏高原多年冻土分布图可以看出, 多年冻土分布具有明显的空间差异, 相比于其他地区, 青藏高原地区整体升温速率高于全球, 冻土分布与变化也有着高度和纬度地带性规律。

总体来看, 青藏高原多年冻土以及羌塘高原北部和昆仑山是多年冻土最发育的地区, 基本连续或大片分布。连续多年冻土带由此向西、西北方向延伸, 直至喀喇昆仑山。安多以南多年冻土主要分布在高山顶上, 如冈底斯山、喜马拉雅山和念青唐古拉山地区。由于存在阿尼玛卿山、巴颜喀拉山和果洛山等 5000 m 以上的山峰, 区内有片状、岛状多年冻土与季节冻土并存, 横断山区基本为岛状山地多年冻土。

在青藏高原北部的昆仑山区, 多年冻土主要分布于较高海拔地区。昆仑山区冻土海拔下限较低, 主要由于位置更北, 与纬度和气候条件的不同有关。总体来看, 青藏高原地区多年冻土厚度变化范围较大, 且受到海拔和纬度等多种因素共同影响[5]。

1980 年以来, 青藏高原气温逐渐升高, 特别是冷期升温明显, 受温度变化影响, 近 20 年来青藏高原多年冻土由于年平均地温普遍升高, 造成季节冻结深度变小以及融化深度增大, 一些边缘地区甚至垂向上不衔接, 形成融化夹层。冻土退化迹象随着气候变化越来越强烈[14], 厚度逐渐减小。总体上看, 青藏高原地区多年冻土受气候变化影响在地表范围和深度上都逐步缩小, 而多年冻土的范围变化也会对青藏高原地区的环境等造成较大影响。

4. 多年冻土退化的环境效应

冻土是冰冻圈的重要组成部分, 在中国分布广阔, 冻土与生态、水文、气候以及工程稳定性有着紧密联系。因此, 冻土的发育与变化也会对自然环境中其它因素造成影响。

4.1. 多年冻土变化对生态环境影响

近几十年来, 高原多年冻土呈现退化趋势, 表现为地温升高、活动层增厚等, 但退化程度在空间上差异较大, 这与区域气候变化强度、冻土热状况及冻土环境密切相关。不同地区、不同深度段冻土退化的内涵也有差别。在季节冻土区, 岛状多年冻土和融区的边缘地段, 以及大片连续多年冻土区内, 由于岩性、含冰量的差异, 浅层地温升值也不同。

并且, 在气候变暖的背景下, 活动层内部冰-水相变会导致的季节性的冻胀和融沉, 多年冻土上限处地下冰融化将引起长期的地表沉降, 影响地下冰、地下水的径流路径和排泄过程以及地下水与地表水的交换等。这使得冻土区的水文地质过程发生改变。

此外, 由于多年冻土退化, 地表水分存储有限, 植物可利用水分减少, 这会导致依赖表层水分的短根系植物枯死。更严重的会导致生态系统植物退化和荒漠化趋势增强等生态环境问题。这些变化无疑会对多年冻土区地表的水、土、气、生间的相互作用关系产生影响, 进而影响着区域水文、生态, 影响到人类工程活动及区域可持续发展。

4.2. 多年冻土变化与碳循环

土壤活性有机碳组分对水热变化敏感, 温度降低会减弱活性炭的含量。青藏高原多年冻土区土壤活性有机碳的比例随着海拔的升高而增加, 但到达 4800~4950 m 海拔时快速下降。多年冻土区的活性有机碳储存要高于非多年冻土区。非多年冻土区除了荒漠草原外和裸地外, 其他地区土壤由于水乳环境优于多年冻土区, 碳库分解潜力大, 碳的释放贡献较大[13]。

而现今多年冻土范围不断减小, 厚度变薄的状况下, 增强了生态系统在生长季的碳汇能力, 以及非生长季节的碳分解。通过对比多年冻土区和季节冻土区的碳通量也发现, 季节冻土区的碳通量要高于多年冻土区。而多年冻土区的退化则会增加生态系统碳的释放量。另一方面, 地表环境的变化会引起植被

种类的改变,可能也会增加碳的释放。根据数据分析发现,1980~2010年间,气候变化已经使多年冻土区土壤活性有机碳的分解不断增加[15]。这会使区域生态环境发生重要改变。

4.3. 多年冻土变化对人类活动影响

除了以上生态环境问题外,多年冻土退化还会造成地质灾害。而影响地质灾害危险性判定的因素主要有冻土特征,区域性和人为因素这三个主要因素。

由于青藏高原地区高含冰量的冻土“热胀冷缩”,自然环境中会形成很多冻胀丘、热融湖、冻融泥流等冰缘地貌。这些冻融地貌对于地区的工程等会产生危险性。而区域性因素则是冰缘地貌产生的决定性因素。主要有地形地貌,地层成因与岩性,水文因素和构造因素。多种自然环境因素共同作用于冻土层,使冻土的发育与退化状况各不相同,使得青藏高原地区的冻土分布状况更为复杂。灾害的主体是人类活动,同时人类活动也是青藏高原地区灾害发生的重要诱因。包括已存在的或拟建的工程等,都会部分引起由冻土导致的灾害发生。

5. 总结与展望

从目前青藏高原所有的地温观测资料表明,近20年来,青藏高原地区气温逐步转暖,已不同程度地影响到多年冻土的融化,尤其是浅层的冻土,一些多年冻土已经转变为季节性冻土,之中还存在不衔接冻土和融化夹层。青藏高原地貌状况复杂,并受到气候状况影响,无论是整体还是区域尺度上,高原气候变化的时空异质性都很强。这使得不同地区冻土变化有区别,对生态环境、土壤碳循环以及人类活动等产生不同程度的影响。因此需要理清青藏高原多年冻土现状、了解其变化特征,能够更好地了解地区气候变化、生态环境变化等。然而要更进一步解释冻土变化后产生的一些问题,还需要对冻土变化各方面做更多研究。

参考文献

- [1] 王澄海,董文杰,韦志刚. 青藏高原季节性冻土年际变化的异常特征[J]. 地理学报, 2001, 56(5): 523-531.
- [2] Cui, Z.J. (1980) Periglacial Phenomena and Environmental in the Qinghai Xizang Plateau. Collection of Research Papers for the International Exchange. Geological Publishing House.
- [3] 马钰,唐朝淑,周余萍. 青海三十多年来气温、降水变化的诊断分析[J]. 青海环境, 1992(1): 32-41.
- [4] 金会军,李述训,王绍令,赵林. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J]. 地理学报, 2000(2): 161-173.
- [5] 郝爱华,薛娴,尤全刚,等. 青藏高原近60年降水变化研究进展[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 43-52.
- [6] 刘晓琼,吴泽洲,刘彦随,等. 1960-2015年青海三江源地区降水时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1803-1820.
- [7] 张盛魁. 祁连山区气候变化的研究[J]. 青海农林科技, 2006(2): 15-18.
- [8] 杨浩,崔春光,王晓芳,等. 气候变暖背景下雅鲁藏布江流域降水变化研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(6): 565-575.
- [9] Ge, G., Shi, Z., Yang, X., Hao, Y., Guo, H., Kossi, F., et al. (2017) Analysis of Precipitation Extremes in the Qinghai-Tibetan Plateau, China: Spatio-Temporal Characteristics and Topography Effects. *Atmosphere*, **8**, Article 127. <https://doi.org/10.3390/atmos8070127>
- [10] 刘广岳,赵林,谢昌卫,等. 青藏高原多年冻土区地温年变化深度的变化规律及影响因素[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1189-1200.
- [11] 程国栋,赵林,李韧,等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2783-2795.
- [12] 王绍令,赵秀锋,郭东信,等. 青藏高原冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 1996, 18(S1): 157-165.
- [13] 程国栋,李树德,南卓铜,童伯良. 青藏高原1:300万冻土图(1983-1996) [Z]. 国家青藏高原科学数据中心, 2011.
- [14] 王绍令. 近数十年来青藏公路沿线多年冻土变化[J]. 干旱区地理, 1993(1): 1-8.
- [15] Tian, L., Zhao, L., Wu, X., Hu, G., Fang, H., Zhao, Y., et al. (2019) Variations in Soil Nutrient Availability across Tibetan Grassland from the 1980s to 2010s. *Geoderma*, **338**, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.009>