

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0091

PENG Chenyang, SHENG Yu, WU Jichun, et al. Simulation of the permafrost distribution in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):158-169. [彭晨阳, 盛煜, 吴吉春, 等. 祁连山区多年冻土空间分布模拟[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):158-169.]

## 祁连山区多年冻土空间分布模拟

彭晨阳<sup>1,2</sup>, 盛煜<sup>1</sup>, 吴吉春<sup>1</sup>, 曹伟<sup>1</sup>, 何彬彬<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**祁连山区位于青藏高原东北边缘,是亚洲水塔重要的组成部分,多年冻土的变化对生态系统和水资源平衡有着重要影响。基于青藏高原第二次综合科学考察、道路勘察钻孔点以及前人获得的多年冻土下界资料,回归得出祁连山区多年冻土下界统计模型,借助 ArcGIS 平台在 DEM 数据的支持下,模拟出祁连山区多年冻土空间分布图。结果表明:祁连山区多年冻土分布的下界具有良好的地带性规律,表现为随经纬度增加而降低的规律;祁连山区多年冻土在空间分布上呈现出以哈拉湖为中心向四周扩散的分布格局;祁连山区总面积约为  $16.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中多年冻土面积约为  $8.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占总面积约 47.51%。多年冻土区与季节冻土区之间存在着有不连续多年冻土分布的过渡区,过渡区面积约  $1.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占总面积约 8.46%。

**关键词:**高海拔多年冻土;祁连山区;多年冻土下界;空间分布模拟;地带性规律

**中图分类号:**P642.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-0240(2021)01-0158-12

## 0 引言

多年冻土是指持续两年或两年以上温度处于  $0^\circ\text{C}$  及以下岩土层<sup>[1]</sup>,高海拔多年冻土泛指高纬度多年冻土南界以南、一定海拔高度以上出现的多年冻土<sup>[2]</sup>。我国高海拔多年冻土面积居世界首位,总面积约  $173.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中约 80% 分布在青藏高原<sup>[3]</sup>。冻土在世界气象组织(WMO)的全球观测系统中被列为 6 个指示全球气候变化的冰冻圈因子之一<sup>[4]</sup>,其主要特征是低温且大部分地区的土层中含有丰富的地下冰。青藏高原被称为“亚洲水塔”<sup>[5]</sup>,其中分布的冰川和冻土是东亚地区重要的水资源来源。近五十年来青藏高原区域增温速率为全球平均值的两倍<sup>[6]</sup>,区域整体气候正逐步向着暖湿化方向发展。冻土对气候变化与人类活动反映极其敏感<sup>[7]</sup>,在气候变暖和人类活动双重影响下,冰川、冻土呈快速退化态势<sup>[8]</sup>。尽管多年冻土对气候变化响应相较于冰川表现不是很明显,但由于其存在范围广,多年冻土的变化对当地生态环境影响正在逐渐

凸显,特别是对水资源的影响有着不可忽视的作用。

祁连山区位于青藏高原的东北缘,横跨甘肃青海两省,是我国甘青两省与河西地区主要内陆河流的发源地,是“亚洲水塔”的重要组成部分,是我国重要的生态屏障区之一<sup>[9]</sup>。祁连山区内多年冻土分布广泛,属于典型的高海拔多年冻土<sup>[10]</sup>。相关研究最早可以追溯到 20 世纪 70 年代,由中国科学院在祁连山木里煤矿地区建立了冻土长年观测站<sup>[1]</sup>。早年关于祁连山多年冻土空间分布的研究主要包含在青藏高原整体多年冻土分布研究的子集中<sup>[11-14]</sup>,或对祁连山区局部地区的多年冻土下界进行调查,如:王绍令等<sup>[15]</sup>对祁连山东西段局部地区多年冻土调查结果显示,西段喀克图地区多年冻土下界在  $3\,950 \sim 4\,000 \text{ m}$ ,东段达坂山垭口附近的多年冻土下界在  $3\,780 \sim 3\,830 \text{ m}$ ,年均地温偏高,多年冻土层较薄<sup>[16]</sup>。近年来,有许多学者对祁连山局部地区的多年冻土进行了研究,如吴吉春等<sup>[10,17]</sup>对祁连山东部冻土特征调查结果显示,该区冻土受垂直地带性影

收稿日期:2019-10-14; 修订日期:2020-07-23

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(IV15-T01-2018-03/08-JH);国家自然科学基金项目(41971093)资助

作者简介:彭晨阳,硕士研究生,主要从事冻土与气候变化研究.E-mail:chenyangpeng17@lzb.ac.cn

通信作者:盛煜,研究员,主要从事冻土工程与普通冻土研究.E-mail:sheng@lzb.ac.cn

响显著,冻土分布呈现季节冻土-不连续多年冻土-大片连续冻土-连续冻土逐渐过渡分布的模式,且多年冻土正处于退化状态;王庆峰等<sup>[18]</sup>对黑河上游多年冻土考察结果显示,该区多年冻土下界在 3 650~3 700 m;王生廷等<sup>[19]</sup>基于钻孔数据,对大通河源区多年冻土特征及变化进行了分析,结果显示源区冻土平均地温随海拔变化梯度约  $3.82\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ,整体处于退化状态,年平均地温上升速率为  $0.0075\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。Wang 等<sup>[20]</sup>基于模型响应的研究发现,受气候变影响,近几十年来祁连山区多年冻土面积减少了约  $2.63\times 10^4\text{ km}^2$ 。

目前关于祁连山区多年冻土的研究,大多情况下都是伴随着区域经济开发活动展开的,对多年冻土研究的区域有比较明显的限制,多数研究都集中在东部地区,中西部地区几乎没有进行过系统调查。掌握祁连山区多年冻土的空间分布范围,是研

究多年冻土退化对区内脆弱的高寒生态环境影响的前提。在第二次青藏高原综合科考中,对祁连山区不同区域的多年冻土下界进行了较为系统的调查,本文综合此次调查结果,结合部分钻孔资料以及前人的研究的成果,对祁连山区多年冻土空间分布规律进行了分析与总结。

## 1 研究区概况

本文研究区的地理范围介于  $93^{\circ}30'\sim 103^{\circ}03'\text{ E}$ 、 $35^{\circ}50'\sim 39^{\circ}50'\text{ N}$  之间,基于美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)数据,数据转化为 WGS1984 坐标系后,重采样成 100 m 的空间分辨率,采用以此数据海拔 3 000 m 作为界定祁连山区范围的基带,以高于此海拔的祁连山区作为本文研究对象(图 1),面积约  $16.90\times 10^4\text{ km}^2$ 。

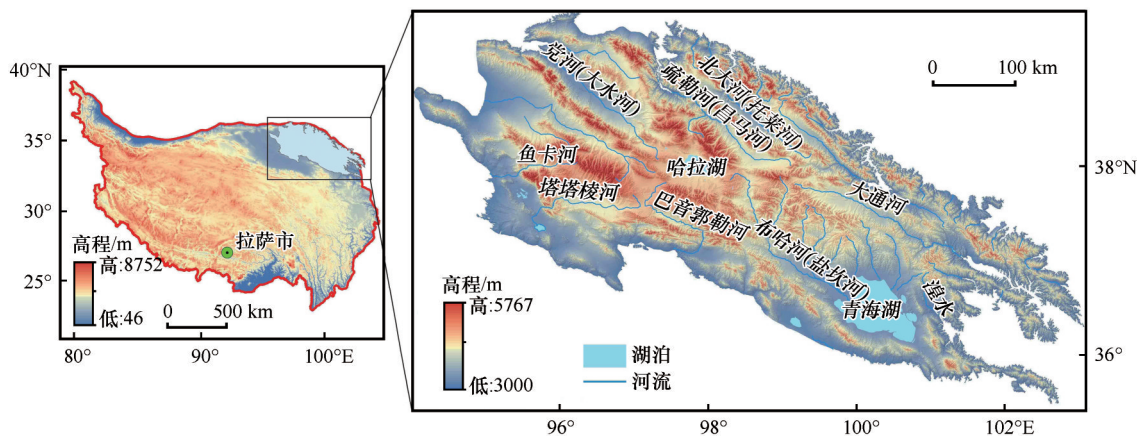


图 1 祁连山区地形及地理位置示意图

Fig. 1 Map showing the topography and geographical position of the Qilian Mountains

祁连山区地处青藏高原东北前缘,因不断遭受构造隆升,逐渐成为高原的一部分<sup>[21]</sup>。祁连山区由一系列条块状、逆冲结构的造块体相互叠覆形成的 NWW—SEE 走向的 7 条大致平行的山脉和宽谷组成的,山脉东起于乌鞘岭,西止于当金山口与阿尔金山相接,南靠柴达木盆地,北临河西走廊<sup>[22]</sup>,东西长约 1 000 km,南北宽约 250 km,在一系列构造活动中谷地和盆地发育。

祁连山区水系丰富,西部海拔相对较高,大量冰碛堆积地貌,第四纪冰川发育;东部海拔相对较低,黄土堆积较厚<sup>[23]</sup>;河流以哈拉湖为中心,向四周辐射状外流。祁连山区东部水系主要是以黄河水系为主的大通河、湟水等;南部主要以流向柴达木盆地和青海湖的内陆河水系为主的巴音郭勒河、布

哈河等;西部主要是党河、鱼卡河等;北部主要是疏勒河、北大河、黑河等。

祁连山区地处青藏高原、黄土高原和蒙新高原交汇地带,受大陆性气候和青藏高原气候综合影响,处于西风环流、青藏高原季风、东亚季风三个大气环流系统的交汇区<sup>[24]</sup>。张强等<sup>[25]</sup>对祁连山区空气水资源研究表明,祁连山区东西部降水差异较大,其中中部降水量最多,东部较少,东部高于西部,西部最少,平均每年水汽输送量为  $8.85\times 10^{10}\text{ m}^3$ 。近年来祁连山区中部降水明显增加<sup>[26]</sup>,贾文雄等<sup>[27]</sup>基于气象站的气温和降水资料的分析表明,祁连山区气候呈现暖湿化,与我国西北地区变化规律基本一致,对全球气候变化响应明显。曹广超等<sup>[28]</sup>基于祁连山区南坡气象站的气温数据表明,

祁连山区多年平均气温呈上升趋势,增长率约  $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。

## 2 数据与方法

目前我国对高海拔多年冻土的研究主要集中在青藏高原。研究方法主要是建立多年冻土空间分布与纬度、高程、平均地温、冻结指数等起决定性作用的宏观因素的统计关系。如吴青柏等<sup>[30]</sup>在对青藏公路沿线冻土分布研究中采用的年平均地温模型<sup>[29]</sup>、顶板温度模型;南卓铜等<sup>[31]</sup>在对青藏高原整体多年冻土分布研究中采用的地面冻结数模型。上述模型可以较好的在宏观上或局部地区模拟出多年冻土分布情况,但也存在一定的局限性,如年平均地温模型需要一定数量、较均匀分布的地温数据支持,顶板温度模型被证实在青藏高原不适用于  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的高温多年冻土分布模拟<sup>[30]</sup>。

祁连山位于多年冻土南界以南,其中的多年冻土属于高海拔多年冻土。本文尝试利用地带性规律对祁连山区多年冻土的空间分布规律进行探究。地带性规律是指程国栋提出的高海拔多年冻土空间分布遵从“三向地带性”规律,即由南北热量差异引起的纬度地带性<sup>[32]</sup>;由距海洋远近和大气环流造成的干燥度地带性;由水热条件随高度变化引起的垂直地带性。高海拔多年冻土与高纬度多年冻土分布相比,多年冻土分布虽然受纬度地带性、干燥度地带性影响,但主控因素是海拔,直接受垂直地带性控制<sup>[33]</sup>。吴吉春等<sup>[10]</sup>对祁连山区研究也表明,祁连山区多年冻土空间分布具有明显的垂直地带性。因此确定祁连山区地区的多年冻土分布面积,核心是查明祁连山区多年冻土分布下界。

Zhao 等<sup>[34]</sup>提出多年冻土下界模型在局部大尺度的多年冻土分布研究中,多年冻土分布面积可能存在高估的现象,其中一部分原因可能与下界模型所采用的下界数据有关。传统的下界模型将发现多年冻土存在的最低海拔高度定义为该区域多年冻土分布下界,即将不连续多年冻土下界视为多年冻土下界<sup>[35]</sup>。而在多年冻土分布的边界区域的一定海拔范围内,真正存在多年冻土的区域十分有限。因此采用不连续多年冻土分布下界为依据的下界模型,在较大尺度的多年冻土分布研究中,一定程度上会高估多年冻土的分布面积,特别是在高原较为平坦区域,大量的非多年冻土被误判为多年冻土。而当达到大片连续多年冻土分布区的海拔

高度时,多年冻土分布受局部因素影响减弱,只在少数区域或局部存在融区,其余区域一般均发育多年冻土,因此采用大片连续多年冻土分布区下界确定多年冻土分布范围显然更为合理。

本文按照不连续多年冻土分布区和大片连续多年冻土分布区分类建立多年冻土下界统计模型,将大片连续多年冻土分布区视为祁连山区多年冻土分布区、不连续多年冻土区视为多年冻土与季节冻土之间存在的过渡区,对祁连山区多年冻土的空间分布规律进行分析。本文所采用的多年冻土下界数据主要来源于三个方面:①青藏高原第二次综合科学考察实地踏勘获取的数据。②早年科学考察中基于道路勘察、冻土监测的祁连山区多年冻土区数据。③部分前文献中所提及的祁连山区多年冻土下界。

### 2.1 多年冻土下界数据

在第二次青藏高原综合科考实地考察中,在祁连山区不同流域的溯源踏勘中依据冻土环境,将多年冻土下界按照不连续多年冻土分布区和大片连续多年冻土分布区分类统计(图2)。

由于存在某些对多年冻土的发育影响较大的局部因素,在一定的海拔高度范围内,多年冻土存在于某些最利于多年冻土发育的区域,如阴坡山沟出口的缓坡等地带,但由于不同区域的地形地貌等条件差异较大,多年冻土呈零星或岛状分布,出现这类多年冻土的区域最低海拔值,即可代表不连续多年冻土区下界;随着海拔升高,多年冻土在某些不利于多年冻土发育的区域也开始发育,如平坦的谷地等,局部因素对多年冻土发育影响减弱,多年冻土呈大片连续乃至连续分布,出现此类现象的最低海拔即可代表大片连续多年冻土区分布下界。由于不连续多年冻土分布区,存在大量的非多年冻土,多年冻土表现为零星或岛状分布,因此可以将该区域视为大片连续冻土分布区和季节冻土分布区之间的过渡区。

另一部分数据来源于多年冻土分布边界区域的钻孔点,主要是在疏勒河、德令哈、大通河等地或道路两侧人工钻取的钻孔点。钻孔点数据包括钻孔点的经纬度、冻土类型、上限深度、体积含冰量等信息,通过对设立在多年冻土分布边缘地带的钻孔点及周边环境信息分析,也可以获得相应地区不连续分布及大片连续分布的多年冻土区下界值。

此外,祁连山区的多年冻土一直受到相关研究



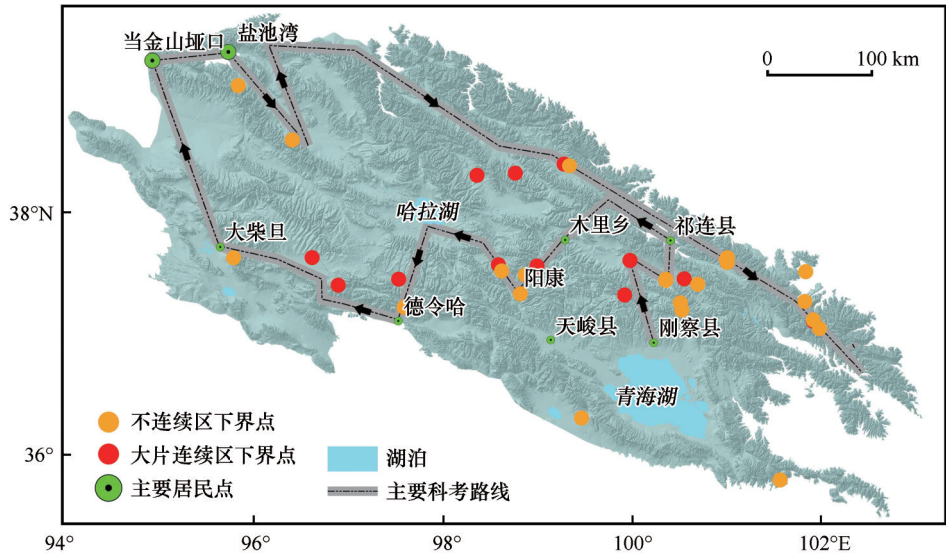


图2 祁连山区科考踏勘路线  
Fig. 2 Map showing the scientific investigation route in the Qilian Mountains

者的关注,不同的研究者开展了有关多年冻土不同方面的研究和调查工作,其中有些工作涉及到了祁连山区多年冻土下界。程国栋等<sup>[33]</sup>、吴吉春等<sup>[10]</sup>、王绍令等<sup>[15]</sup>、王庆锋等<sup>[36]</sup>在文献中提到多年冻土下界,这些工作大部分完成时间较早,虽然多年冻土退化的速度在加快<sup>[37]</sup>,活动层厚度以 $0.15\text{ m}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度增加<sup>[38]</sup>,但这对近几十年的尺度上的下界变化影响不是特别显著,所以这些早期调查的下界对目前多年冻土分布仍然具有指导意义。通过结合实地考察结果,经过甄别和具体分析后,也

可以获得相应地区不连续分布及大片连续分布的多年冻土下界值。

将上述来源所获得的下界资料,分为大片连续分布与不连续多年冻土分布区下界数据进行整理,由于不连续多年冻土分布区多年冻土分布受局地地形影响较大,在不连续多年冻土分布区下界数据添加坡向分类,坡向基于数据点的经纬度坐标,在已有的高分辨率数字高程模型(DEM)中通过ESRI公司出版的ArcMap10.3软件进行提取,结果如下所示(表1和表2)。

表1 大片连续多年冻土分布区下界数据表  
Table 1 Longitude, latitude and the lower bound of large tracts of continuous permafrost in the Qilian Mountains

区域	经度/E	纬度/N	下界海拔/m	资料来源
德令哈	96.68°	37.63°	4 000	本文冻土监测
疏勒河	98.10°	38.63°	3 750	本文冻土监测
热水-祁连	100.43°	37.87°	3 700	本文道路勘察
天峻-木里	98.82°	37.91°	3 842	本文道路勘察
西格尔曲盆地	98.70°	37.83°	3 840	吴吉春等 <sup>[10]</sup>
江仓盆地	99.83°	38.00°	3 700	吴吉春等 <sup>[10]</sup>
扁都口	100.88°	38.05°	3 600	吴吉春等 <sup>[10]</sup>
黑河源头	99.05°	38.77°	3 650	王庆锋等 <sup>[36]</sup>
喀克图	96.37°	37.84°	3 950	王绍令 <sup>[15]</sup>
刚察沙柳河	99.79°	37.71°	3 786	本文科考
讨赖河源区	98.52°	38.67°	3 809	本文科考
阳康曲源区	98.40°	37.90°	3 821	本文科考
巴音郭勒河干流	97.33°	37.72°	4 004	本文科考
柴达木大羊头煤矿	95.52°	37.78°	4 041	本文科考
冷龙岭北坡西营河	101.85°	37.56°	3 559	本文科考

表2 不连续多年冻土分布区下界数据表

Table 1 Longitude, latitude and the lower bound of discontinuous permafrost in the Qilian Mountains					
区域	经度/E	纬度/N	下界海拔/m	坡向	资料来源
大通河南岸	100. 23°	37. 86°	3 560	阴坡	本文冻土监测
大通河北岸	100. 23°	37. 86°	3 566	阴坡	本文冻土监测
热水	100. 42°	37. 61°	3 591	阴坡	本文道路勘察
天峻-木里	98. 66°	37. 67°	3 670	阴坡	本文道路勘察
俄博岭	100. 89°	38. 02°	3 500	阴坡	本文道路勘察
扁都口-盘坡	100. 89°	38. 06°	3 399	阳坡	本文道路勘察
江仓-热水	100. 23°	37. 85°	3 546	阴坡	本文道路勘察
青海南山橡皮山口	99. 04°	36. 67°	3 678	阳坡	程国栋等 <sup>[33]</sup>
柴达木大羊头煤矿	95. 52°	37. 78°	3 850	阴坡	程国栋等 <sup>[33]</sup>
热水煤矿	100. 40°	37. 67°	3 480	阳坡	程国栋等 <sup>[33]</sup>
冷龙岭白蛇沟	101. 75°	37. 97°	3 500	阳坡	程国栋等 <sup>[33]</sup>
拉脊山尕让	101. 55°	36. 23°	3700	阴坡	程国栋等 <sup>[33]</sup>
西格尔曲盆地	98. 70°	37. 83°	3 670	阴坡	吴吉春等 <sup>[10]</sup>
扁都口	100. 88°	38. 05°	3 400	阴坡	吴吉春等 <sup>[10]</sup>
默勒	100. 58°	37. 83°	3 470	阴坡	吴吉春等 <sup>[10]</sup>
当河黑刺沟	96. 04°	38. 80°	3 858	阴坡	本文科考
当河扎子沟	95. 39°	39. 21°	3 743	阴坡	本文科考
冷龙岭南坡宁缠河	101. 92°	37. 50°	3 486	阳坡	本文科考
冷龙岭北坡西营河	101. 85°	37. 57°	3 424	阳坡	本文科考
德令哈	97. 46°	37. 50°	3 869	阴坡	本文科考
德令哈怀头塔拉	97. 41°	37. 49°	3 826	阳坡	本文科考
巴音郭勒河	97. 46°	37. 51°	3 868	阳坡	本文科考
阳康曲上游	98. 44°	37. 85°	3 770	阳坡	本文科考
黑河西支	99. 11°	38. 76°	3 598	阳坡	本文科考

2.2 多年冻土下界统计模型

本文利用线性回归方法,建立多年冻土下界统计模型,基于经纬度分析祁连山不同区域的多年冻土下界,探究祁连山区多年冻土的空间分布规律。由于大片连续多年冻土分布区海拔较高,多年冻土呈大片乃至连续分布,局部不利因素对多年冻土发育影响较弱。因此在建立回归方程时,只将受局部不利因素影响较大的不连续多年冻土分布区,按照阳坡阴坡分类建立回归方程,对于大片连续多年冻土分布区,只考虑经纬度变化对其下界变化的影响。通过对经纬度与下界的回归分析,得出:

大片连续多年冻土分布区下界统计模型:  
 $H_1=15811-78.05\times Long-113.30\times Lat,R^2=0.93$  (1)

不连续多年冻土分布区下界统计模型(阴坡):  
 $H_2=16827-80.93\times Long-136.48\times Lat,R^2=0.89$  (2)

不连续多年冻土分布区下界统计模型(阳坡):  
 $H_3=15532-94.01\times Long-67.56\times Lat,R^2=0.92$  (3)

式中:Long代表经度;Lat代表纬度。

F检验(F-test)通常是用来分析用了超过一个

参数的统计模型,以判断该模型中的全部或一部分参数是否适合用来估计母体,可以较好的体现检验方程整体的显著性。对式(1)、式(2)与式(3)做回归方程显著性检验,由结果(表3)可知 $P>F$  概率远小于0.05,结果表现显著,回归方程显著性较好,统计模型具有一定的可信度。

表3 回归方程显著性检验

Table 3 Results of the significance test of regression equation					
类别	自由度	标准偏差	$R^2$	F值	$P>F$
式(1)	13	289.88	0.93	172.77	$6.96\times 10^{-9}$
式(2)	8	364.94	0.92	97.42	$9.36\times 10^{-6}$
式(3)	12	372.63	0.89	95.68	$4.54\times 10^{-7}$

2.3 多年冻土分布模拟制图

在ESRI公司的ArcMap10.3版本中,将重采样的DEM数据转换成带经纬度及海拔数据(H)的点,并赋以基于DEM数据提取的坡向数据。依据每个点所在的经纬度坐标,通过式(1)计算出大片连续多年冻土分布区下界值 $H_1$ ,再依据坡向数据,

分阴坡阳坡通过式(2)和式(3)计算出阴坡不连续多年冻土分布区下界值 $H_2$ 与阳坡不连续多年冻土分布区下界值 $H_3$ 。再将其海拔( $H$ )与 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 值对比,当若 $H>H_1$ ,则认为其所在海拔高于大片连续多年冻土分布区下界值,即存在大片连续分布多年冻土,将其视为多年冻土区;若 $H\leq H_2$ 或 $H\leq H_3$ ,则认为不存在多年冻土,将其视为季节冻土区;若 $H\leq H_1$ ,但 $H>H_2$ 或 $H>H_3$ ,即认为其所在海拔低于大片连续多年冻土分布区下界值,但高于不连续多年冻土分布区下界值,即存在不连续多年冻土,将其视

为多年冻土区与季节冻土区之间的过渡区,由此获得祁连山区多年冻土空间分布模拟(图3)。此外,由于过渡区存在着大量的非多年冻土区,比较合理的估算祁连山区多年冻土分布面积的方法是只考虑大片连续多年冻土分布区所代表的多年冻土区的面积,将过渡区中存在的部分多年冻土视作大片连续多年冻土区中非多年冻土区部分的补偿,最终得出祁连山区多年冻土区面积为 $8.03\times 10^4\text{ km}^2$ ,从多年冻土区向季节冻土区过渡的区域面积约 $1.43\times 10^4\text{ km}^2$ 。

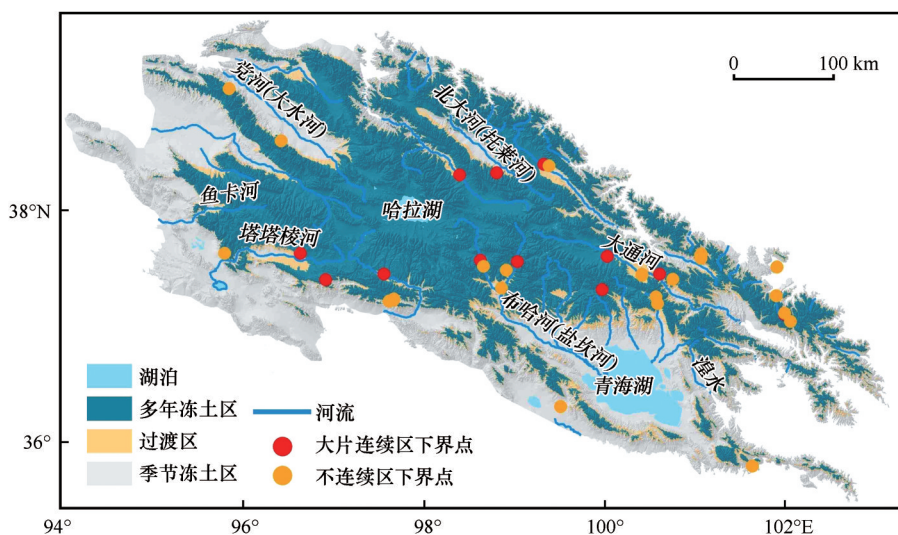


图3 祁连山区多年冻土空间分布模拟

Fig. 3 Spatial distribution of the simulated permafrost in the Qilian Mountains

### 3 验证与讨论

#### 3.1 与实地钻孔点的交叉验证

本文所采用的钻孔点主要完成时间在2004—2011年,分布于道路两侧或部分河流流域。每个钻孔数据都包括钻孔点的经纬度、冻土类型、上限深度、体积含冰量等信息。钻孔数据共有548个,其中季节冻土的钻孔数为117个,多年冻土的钻孔数为431个,具体分布情况如下所示(表4、图4)。

钻孔点数据能很好的体现钻孔点附近多年冻土分布的真实情况,将下界统计模型计算得到的模拟结果与已有的钻孔数据做交叉验证(表5),结果表明:共有374个钻孔在模拟结果为多年冻土区内,其中有337个钻孔为多年冻土钻孔,多年冻土钻孔占比90.1%;共有169个钻孔点位于模拟结果为过渡区中,其中有92个钻孔为多年冻土钻孔,多年冻土钻孔占比54.4%。钻孔在钻取时存在一定的人

表4 祁连山区已有钻孔点信息表

Table 4 Information of the drilling points in the Qilian Mountains

区域	钻孔数/个	海拔范围/m	多年冻土 钻孔数/个	季节冻土 钻孔数/个
大通河源区	89	3 375~3 765	68	21
塔塔梭河源区	9	4 040~4 288	9	0
疏勒河源区	20	3 735~4 203	19	1
黑河源区	7	3 609~4 132	6	1
江仓-热水段	117	3 546~4 060	59	58
热水-祁连段	65	3 482~4 125	54	11
天骏-木里段	140	3 685~4 330	115	25
木里-江仓段	101	3 771~3 987	101	0
总和	548	3 375~4 330	431	117

为的干扰因素,这种干扰因素表现为在钻取钻孔时人为的倾向选择多年冻土存在概率较高的区域。由于多年冻土分布边界区域存在着大量的非多年冻土,这种人为干扰因素造成的影响,在过渡区对



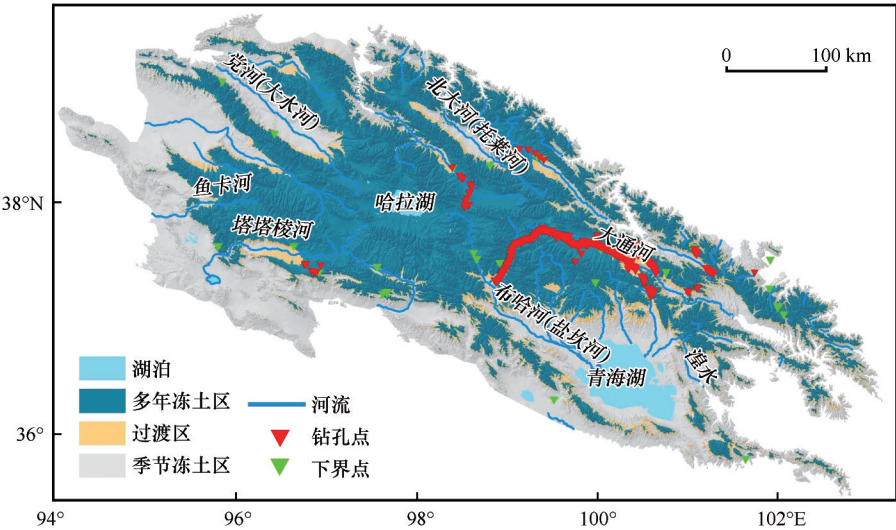


图4 祁连山区钻孔点位置示意图

Fig. 4 Map showing the distribution of drill points in the Qilian Mountains

表5 多年冻土模拟与钻孔点交叉验证结果  
Table 5 Results of cross-validation between permafrost simulation result and borehole observation

类型	多年冻土区	过渡区	季节冻土区
多年冻土孔/个	337	92	2
季节冻土孔/个	37	77	3
钻孔数总计/个	374	169	5
多年冻土孔数占比	90.1%	54.4%	—

验证结果的影响尤为显著。因此可以推断,基于钻孔数据的验证的结果表明:模拟结果为多年冻土的区域,实际多年冻土面积占比应略低于90.1%,验证结果在一定程度上证明了所得到的多年冻土分布区具有较好的准确性;而在模拟结果为过渡区的区域,实际多年冻土面积占比应远低于54.4%,验

证结果也表明,该区域存在着大量的季节多年冻土区。另一方面,由于处在较低海拔的季节冻土区钻孔数量较少,基于实地钻孔数据交叉验证的结果对于季节冻土区的验证不具有代表性。

3.2 与黑河上游冻土图的交叉验证

地表温度对冻土的空间分布有着重要的影响。葛社民<sup>[39]</sup>基于黑河上游源区内外九个站点0 cm处的地表温度,通过空间插值,结合冻土模拟方法,获得了黑河上游山区冻土模拟分布图(下称:黑河上游冻土图),制图成果将冻土分为多年冻土与季节冻土两类,其成果范围大致在本文所模拟的范围内(图5)。将其在本文模拟范围内的部分截取,用于与本文模拟的结果做叠加分析,以进一步验证模拟结果的准确性。

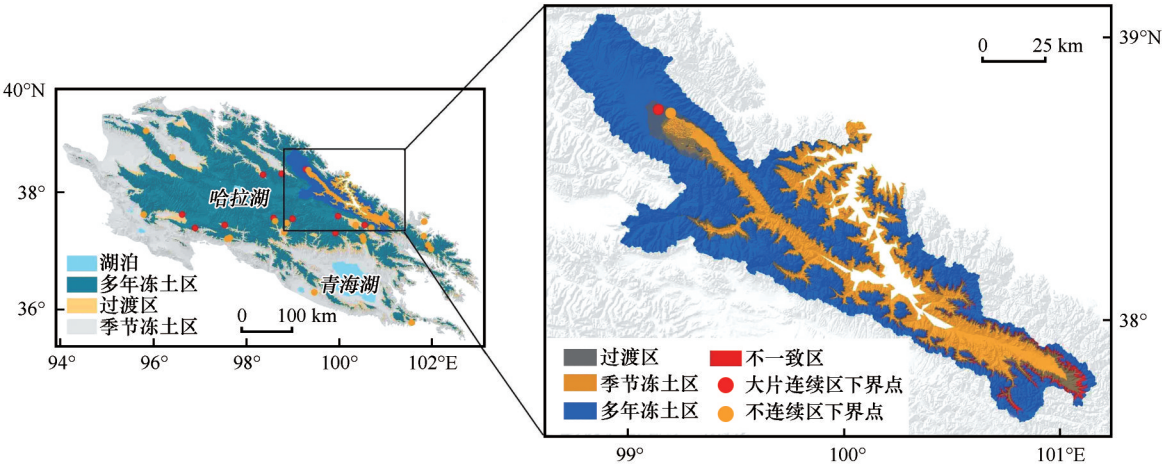


图5 黑河上游冻土图位置示意图

Fig. 5 Map showing the permafrost in the upper reaches of the Heihe River

将截取所获得的部分与本文模拟结果做叠加分析(图6),按照本文所模拟的结果,将叠加分析的

结果划分为多年冻土区、过渡区和季节冻土区三个范围。

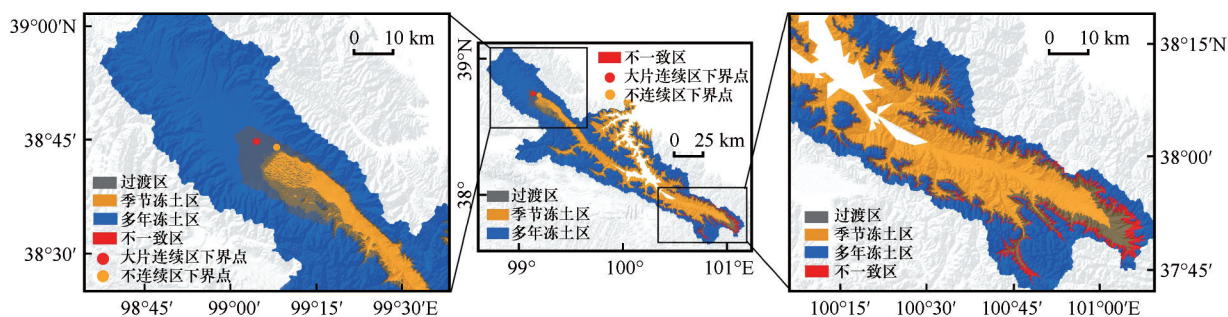


图6 与黑河上游冻土图的叠加分析结果

Fig. 6 Superposition analysis results with the permafrost map in the upper reaches of the Heihe River

叠加分析(图6)结果表明:模拟结果截取的部分与黑河上游冻土图有较好的一致性,差异主要集中在多年冻土发育的边界区域。在本文模拟结果为多年冻土区的范围内,黑河上游冻土图中整体上为多年冻土,约占该范围面积的96.46%;在本文模拟结果为季节冻土区的范围内,黑河上游冻土图中未出现多年冻土。由于所截取的部分黑河上游冻土图的制图使用的是九个站点的实测地表温度数据,具有一定的准确性,且制图方法与本文不同,因此尽管该冻土图只占本文所模拟区域的一小部分,但检验结果仍旧具有一定的代表性。叠加分析结果在一定程度上验证了本文模拟结果中多年冻土区和季节冻土区的准确性。过渡区中存在着大量的季节冻土,叠加分析结果也有较好的体现。在过渡区范围内,黑河上游冻土图中多年冻土主要集中在本文模拟结果为多年冻土区的边界区域,多年冻土面积约占过渡区总面积的24.65%,验证结果对本文模拟结果有较好的支撑。

### 3.3 与其他制图成果的比较

本文模拟结果得出祁连山区多年冻土区面积为 $8.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占研究区总面积的47.5%,从多年冻土区向季节冻土区过渡的区域面积约 $1.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占研究区总面积的8.5%。研究区内多年冻土在空间分布上表现为以哈拉海为中心向四周扩散分布的格局,哈拉湖至祁连山区外围山区多年冻土呈大片连续分布,外围山区多年冻土受山体、河谷的地形控制逐渐呈不连续分布,直至过渡到季节冻土区。将模拟结果与《青藏高原冻土图》<sup>[13]</sup>、《中国冰川冻土沙漠图》<sup>[12]</sup>以及青藏高原新绘制冻土分布图(2017)<sup>[40]</sup>祁连山区部分比较,结果如图7所示。

受海拔因素影响,祁连山区多年冻土发育直接受垂直地带性规律控制。由上图可以直观得出,本文基于祁连山区实地踏勘数据,利用冻土下界由高程之间的统计关系,建立的空间模型所模拟的结果整体上与《青藏高原冻土图》《中国冰川冻土沙漠图》以及青藏高原新绘制冻土分布图(2017)中祁连山部分相似,差异主要集中在多年冻土边界区域。

《青藏高原冻土图》同样是基于冻土下界由高程的统计关系所模拟的结果。研究区在《青藏高原冻土图》中多年冻土面积为 $9.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,该值接近与本文模拟结果中多年冻土区面积与过渡区面积之和 $9.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。造成与本模拟结果边界区域差异的主要原因可能与前者所依据的下界数据较低有关。即《青藏高原冻土图》在多年冻土分布边界区域,将大量季节冻土判断为多年冻土,在一定程度上,高估了祁连山区多年冻土的分布面积。

《中国冰川冻土沙漠图》主要基于青藏铁路沿线钻孔获取的平均地温数据,建立地温经验公式,从而对青藏高原整体多年冻土分布进行模拟。研究区在《中国冰川冻土沙漠图》中多年冻土分布整体上与本文模拟结果差异较小,差异较大的区域集中在祁连山区东部多年冻土分布边界区域,特别是大通河以及布哈河流域。在流域区域,地温受地表植被、土壤含水率影响较大,因此较以地温经验公式为基础的《中国冰川冻土沙漠图》,本文的模拟结果具有更高的可靠性。

青藏高原新绘制冻土分布图(2017)是利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)地表温度(LSTs)的冻融指数及多年冻土顶部温度(TTOP)模型模拟生成的。由于成图时间较晚,分辨率较高,且综合了多种遥感数据,因此较《青藏高原冻土图》与《中国冰



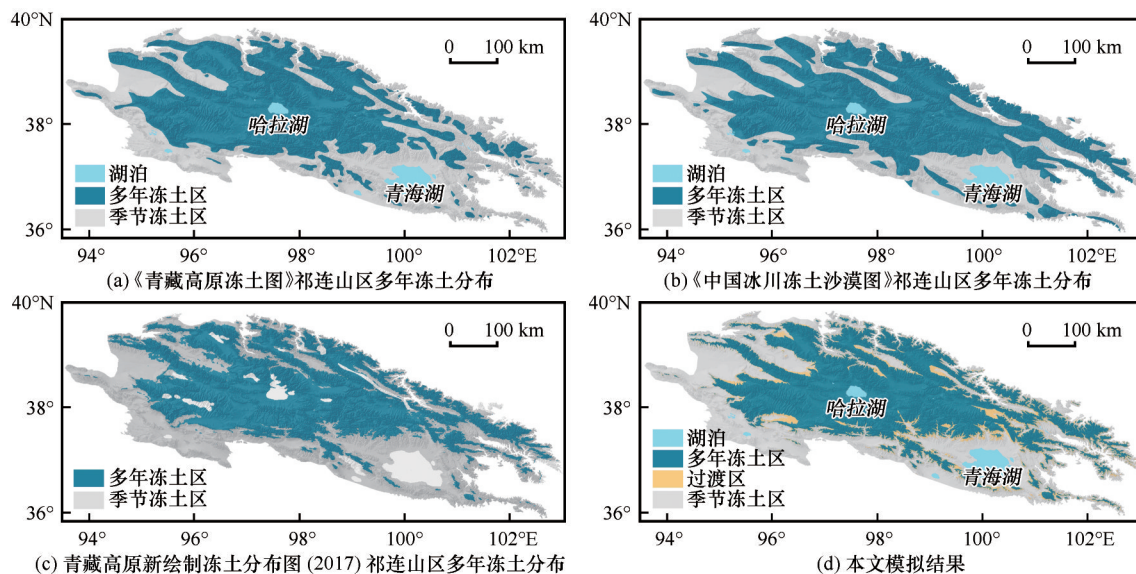


图7 《青藏高原冻土图》(a)、《中国冰川冻土沙漠图》(b)、青藏高原新绘制冻土分布图(2017)(c)中的祁连山区多年冻土分布及本文模拟结果(d)

Fig. 7 Permafrost distribution over the Qilian Mountains, quoted from: the map of permafrost distribution over the Tibetan Plateau (1996) (a), the map of glacier, permafrost and deserts in China (2005) (b), a new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau (2017) (c) and the result of this paper (d)

川冻土沙漠图》具有更高的可靠性。除去资料缺失区域,本文模拟结果在青藏高原新绘制冻土分布图(2017)中差异较小,多年冻土分布结果基本一致。但在大通河流域、塔塔棱河流域以及党河流域等区域,对于多年冻土分布边界区域模拟有一定差异,这可能与该区土壤含水率较高,植被发育较好,从而对地表温度遥感解译产生了影响有关。此外,由于本文模拟结果基于地带性规律,对于祁连山区多年冻土模拟没有出现资料缺失区域,因此本文模拟结果可以更好的反映祁连山区多年冻土分布的情况。

综上,本文模拟结果与早年出版的青藏高原多年冻土分布图中祁连山部分,具有相似的空间分布特征,与近年新绘制的青藏高原多年冻土分布图中祁连山部分具有较好的一致性。由于本文依据的多年冻土下界点是依据实地勘探所获取的,在祁连山区域综合了更多的实地资料,具有更高的可靠性。此外,较已出版的三幅图件,还给出了位于多年冻土与季节冻土之间的过渡区的范围,因此在祁连山地区本文模拟结果具有更好的适用性。

#### 4 结论与展望

多年冻土分布面积一般来自模型估算,而估算的准确性取决于模型的合理性和关键数据量的支

持,祁连山区多年冻土分布主要控制因素是海拔,多年冻土下界是确定其多年冻土分布的关键参数。本文基于青藏高原第二次综合科考,结合冻土现象分析和核实冻土资料缺失区域多年冻土下界,获取了较为详实的关键数据量,并建立了多年冻土分布的统计模型,绘制了祁连山区多年冻土空间分布模拟图,并通过已有的钻孔点资料和前人所做的多年冻土图进行了验证与比较。根据下界统计模型及制作完成的祁连山区多年冻土空间分布图,对祁连山区多年冻土空间分布特征的基本认识归纳如下:

(1) 祁连山区多年冻土在空间上呈现出以哈拉湖为中心向四周扩散的分布格局。哈拉湖至祁连山区外围山区多年冻土大片连续分布,外围山区多年冻土受山体、河谷的地形控制逐渐呈不连续分布,直至过渡到季节冻土区。

(2) 在多年冻土区与季节冻土区之间存在着过渡区,由于过渡区存在着大量的非多年冻土区,比较合理的估算祁连山区多年冻土分布面积的方法是只考虑大片连续多年冻土分布区所代表的多年冻土区的面积,将不连续多年冻土中存在的部分多年冻土视作大片连续多年冻土区中非多年冻土区部分的补偿,根据统计模型分析,最终得出祁连山区多年冻土区面积为  $8.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,从多年冻土区向季节冻土区过渡的区域面积约  $1.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

(3) 祁连山区多年冻土分布具有良好的地带性规律,多年冻土下界随经纬度增加而降低。在祁连山区东北部多年冻土下界最低,如冷龙岭一带大片连续分布多年冻土下界约为 3 540 m,不连续多年冻土分布的下界约 3 410 m;在西南部多年冻土下界最高,如大柴旦附近,大片连续多年冻土分布下界达到了 4 050 m,不连续多年冻土分布下界也达到了 3 900 m。整体上下界值呈西南>西北>东南>东北的规律。

本文以实地考察资料为基础,估算了祁连山区多年冻土空间分布,所获得的下界统计模型模拟结果较好,为祁连山区多年冻土空间分布提供了一定的参考。另一方面,受条件限制,祁连山区西部以及季节冻土区的钻孔点较少,尚需进一步的工作以对目前已取得的模拟结果进行进一步验证和改良。

致谢:《黑河上游山区冻土模拟分布图》数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdac.cn),《青藏高原冻土图》与《中国冰川冻土沙漠图》数据来源于“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn/)。

#### 参考文献(References):

- [1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-2. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-2.]
- [2] Cheng Guodong, Dramis F. Distribution of mountain permafrost and climate [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1992, 3(2): 83-91.
- [3] Li Xin, Cheng Guodong. Response model of alpine permafrost to global change[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 1999, 2: 185-192. [李新, 程国栋. 高海拔多年冻土对全球变化的响应模型[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 1999, 2: 185-192.]
- [4] Biskaborn B K, Lanckman J P, Lantuit H, et al. The new database of the global terrestrial network for permafrost (GTN-P) [J]. Earth System Science Data, 2015, 7: 245-259.
- [5] Zheng Du, Yao Tandong. Progress in research on formation and evolution of Tibetan Plateau with its environment and resource effects[J]. Basic science in China: 2004, 6(2): 15-21. [郑度, 姚檀栋. 青藏高原形成演化及其环境资源效应研究进展[J]. 中国基础科学, 2004, 6(2): 15-21.]
- [6] Yao Tandong. A comprehensive study of Water-Ecosystem-Human activities reveals unbalancing Asian Water Tower and accompanying potential risks[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2761-2762. [姚檀栋. 青藏高原水-生态-人类活动考察研究揭示“亚洲水塔”的失衡及其各种潜在风险[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2761-2762.]
- [7] Ran Youhua, Li Xin, Cheng Guodong, et al. Distribution of permafrost in China; an overview of existing permafrost maps[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2012, 23(4): 322-333.
- [8] Deji, Yao Tandong, Yao Ping, et al. Characteristics of climate change in warm and cold periods revealed from ice cores and meteorological records during the past 100 years on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1382-1390. [德吉, 姚檀栋, 姚平, 等. 冰芯和气象记录揭示的青藏高原百年来典型冷暖时段气候变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1382-1390.]
- [9] Li Xin, Gou Xiaohua, Wang Ninglian, et al. Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2928-2937. [李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2928-2937.]
- [10] Wu Jichun, Sheng Yu, Yu Hui, et al. Permafrost in the middle-east section of Qilian Mountains (I): distribution of permafrost [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 418-425. [吴吉春, 盛煜, 于晖, 等. 祁连山中东部的冻土特征 (I): 多年冻土分布[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 418-425.]
- [11] Guo Dongxin. Permafrost on the Qinghai-Tibet Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(1): 77-77. [郭东信. 青藏公路沿线多年冻土图[J]. 冰川冻土, 1981, 3(1): 77-77.]
- [12] Wang Tao, Shi Yafeng, Guo Dongxin. Frozen ground map of China based on a map of the glaciers, frozen ground and deserts in China (1981—2006) [DB]. National Tibetan Plateau Data Center, 2012. DOI: 10.11888/Geocry. tpdac. 270038. [王涛, 施雅风, 郭东信. 基于《中国冰川冻土沙漠图》的中国冻土分布图 (1981—2006) [DB]. 国家青藏高原科学数据中心, 2012. DOI: 10.11888/Geocry. tpdac. 270038.]
- [13] Li Shude, Cheng Guodong. Map of permafrost distribution over Qinghai-Tibet Plateau [M]. Lanzhou: Gansu Cultural Press, 1996. [李树德, 程国栋. 青藏高原冻土图[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996.]
- [14] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Liu Yongzhi. Mean annual ground temperature distribution on the Tibetan Plateau: permafrost distribution mapping and further application [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 142-148. [南卓铜, 李述训, 刘永智. 基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图及应用[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 142-148.]
- [15] Wang Shaoling. Basic features of frozen ground and periglacial in the Kakitu region of western part of the Qilian Mountains [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1992, 6(3): 9-17. [王绍令. 祁连山西段喀克图地区冻土和冰缘的基本特征[J]. 干旱区资源与环境, 1992, 6(3): 9-17.]
- [16] Wang Shaoling, Chen Xiaobai, Zhang Zhizhong. Permafrost distribution in the dabanshan pass section of Ning-Zhang Highway in eastern Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(2): 184-188. [王绍令, 陈肖柏, 张志忠. 祁连山东段宁张公路达坂山垭口段的冻土分布[J]. 冰川冻土, 1995, 17(2): 184-188.]
- [17] Wu Jichun, Sheng Yu, Yu Hui, et al. Permafrost in the middle-east section of Qilian Mountains (II): characters of permafrost [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 426-432. [吴吉春, 盛煜, 于晖, 等. 祁连山中东部的冻土特征 (II): 多年冻土特征[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 426-432.]
- [18] Wang Qingfeng, Zhang Tingjun, Wu Jichun. Investigation on permafrost distribution over the upper reaches of the Heihe River in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 19-29. [王庆峰, 张廷军, 吴吉春, 等. 祁连山区黑河上游多年冻土分布考察[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 19-29.]
- [19] Wang Shengting, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. The characteristics and changing tendency of permafrost in the source regions of the Datong River, Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 19-29.

- gy and Geocryology, 2015, 37(1): 27-37. [王生廷, 盛煜, 吴吉春, 等. 祁连山大通河源区冻土特征及变化趋势[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 27-37.]
- [20] Wang Xiqiang, Chen Rensheng, Han Chuantan, et al. Response of frozen ground under climate change in the Qilian Mountains, China[J]. Quaternary International, 2019, 523: 10-15.
- [21] Tapponnier P. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294(5547): 1671-1677.
- [22] You Lianyuan, Yang Jingchun. Chinese geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 2013: 75-76. [尤联元, 杨景春. 中国地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 75-76.]
- [23] Guo Huaijun. An investigation on Quaternary geology and geomorphology of Qilian Mountains and its adjacent areas[D]. Xi'an: Northwest University, 2017: 21-22. [郭怀军. 祁连山及邻区第四纪地质与地貌研究[D]. 西安: 西北大学, 2017: 21-22.]
- [24] Zhang Liang, Zhang Qiang, Feng Jianying, et al. A study of atmospheric water cycle over the Qilian Mountains( I ): variation of annual water vapor transport[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1079-1091. [张良, 张强, 冯建英, 等. 祁连山地区大气水循环研究( I ): 空中水汽输送年际变化分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1079-1091.]
- [25] Zhang Liang, Wang Shigong, Shang Kezheng, et al. Research on vapor and precipitation resources over the Qilian Mountain area[J]. Arid Meteorology, 2007, 25(1): 14-20. [张良, 王式功, 尚可政, 等. 祁连山区空中水资源研究[J]. 干旱气象, 2007, 25(1): 14-20.]
- [26] Jia Wenxiong, Zhang Yushun, Li Zongxing. Spatial and temporal change of precipitation extremes in the Qilian Mountains and Hexi Corridor in recent fifty years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(8): 1002-1009. [贾文雄, 张禹舜, 李宗省. 近 50 年来祁连山及河西走廊地区极端降水的时空变化研究[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 1002-1009.]
- [27] Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongxing, et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in the Qilian Mountains region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 63(3): 257-269. [贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 地理学报, 2008, 63(3): 257-269.]
- [28] Cao Guangchao, Fu Jianxin, Li Lingqin, et al. Analysis on temporal and spatial variation characteristic of air temperature in the south slope of Qilian Mountains and its nearby regions during the period from 1960 to 2014[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 88-96. [曹广超, 付建新, 李玲琴, 等. 1960—2014 年祁连山南坡及其附近地区气温时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 88-96.]
- [29] Wu Qingbai, Li Xin, Li Wenjun. Computer simulation and mapping of the regional distribution of permafrost along the Qinghai-Xizang Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(4): 323-326. [吴青柏, 李新, 李文君. 青藏公路沿线冻土区域分布计算机模拟与制图[J]. 冰川冻土, 2000, 22(4): 323-326.]
- [30] Wu Qingbai, Zhu Yuanlin, Liu Yongzhi. Application of the permafrost table temperature and thermal offset forecast model in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 614-617. [吴青柏, 朱元林, 刘永智. 青藏高原多年冻土顶板温度和温度位移预报模型的应用[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 614-617.]
- [31] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Cheng Guodong, et al. Surface frost number model and its application to the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 89-95. [南卓铜, 李述训, 程国栋, 等. 地面冻结数模型及其在青藏高原的应用[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 89-95.]
- [32] Cheng Guodong. Problems on zonation of high-altitude permafrost[J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 51(2): 185-193. [程国栋. 我国高海拔多年冻土地带性规律之探讨[J]. 地理学报, 1984, 51(2): 185-193.]
- [33] Cheng Guodong, Wang Shaoling. The high-altitude and the high-latitude permafrost have common characteristics in origin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(2): 1-17. [程国栋, 王绍令. 试论中国高海拔多年冻土带的划分[J]. 冰川冻土, 1982, 4(2): 1-17.]
- [34] Zhao Shuping, Nan Zhuotong, Huang Yingbing, et al. The application and evaluation of simple permafrost distribution models on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2017, 28(2): 391-404.
- [35] Cheng Guodong. New progress in research on alpine permafrost and ground ice[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(19): 1441-1443. [程国栋. 高海拔多年冻土与地下冰研究的新进展[J]. 科学通报, 1990, 35(19): 1441-1443.]
- [36] Wang Qingfeng, Jin Huijun, Zhang Tingjun, et al. Active layer seasonal freeze-thaw processes and influencing factors in the alpine permafrost regions in the upper reaches of the Heihe River in the Qilian Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(24): 2742-2756. [王庆锋, 金会军, 张廷军, 等. 祁连山区黑河上游高海拔多年冻土区活动层季节冻融过程及其影响因素[J]. 科学通报, 2016, 61(24): 2742-2756.]
- [37] Cheng Guodong, Wu Tonghua. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112(F2): F02S03.
- [38] Guo Donglin, Wang Huijun. Simulation of permafrost and seasonally frozen ground conditions on the Tibetan Plateau, 1981—2010[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(11): 5216-5230.
- [39] Ge Shemin. Simulation of the permafrost distribution over the upper reaches of the Heihe River (1993—2012)[DB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, 2014. doi: 10.3972/heihe.071.2014.db. [葛社民. 黑河上游山区冻土模拟分布图(1993—2012)[DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2014. doi: 10.3972/heihe.071.2014.db.]
- [40] Zhao Lin. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau (2017)[DB]. A Big Earth Data Platform for Three Poles, 2019. DOI: 10.11888/Geocry. tpdc. 270468. [赵林. 青藏高原新绘制冻土分布图(2017)[DB]. 时空三极环境大数据平台, 2019. DOI: 10.11888/Geocry. tpdc. 270468.]



## Simulation of the permafrost distribution in the Qilian Mountains

PENG Chenyang<sup>1,2</sup>, SHENG Yu<sup>1</sup>, WU Jichun<sup>1</sup>, CAO Wei<sup>1</sup>, HE Binbin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Qilian Mountains, located on the northeast edge of the Qinghai-Tibet Plateau, is an important part of the Asian water tower. Changing in permafrost can exert great impacts on the ecosystem and regional water balance. Based on the data from the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research and the borehole data of road survey along the elevation of lower limit of permafrost, we employed the statistical model of the permafrost elevation using statistical regression. The spatial distribution map of permafrost in the Qilian Mountains was worked out by using the ArcGIS platform and DEM data. The results show that the lower limit elevation of permafrost in the Qilian Mountains has significant zonality, with the lower limit decreases with latitude or longitude. The permafrost in the Qilian Mountains shows a distribution pattern centered at Hala Lake. The total area of the Qilian Mountains is about  $16.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ , of which the permafrost area is about  $8.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for about 47.51%. There is a transition zone of island permafrost between the permafrost area and the seasonal frozen soil area, covering an area of about  $1.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for 8.46% of the total area.

**Key words:** alpine permafrost; Qilian Mountains; lower limit of permafrost; simulation of spatial distribution; zonality

(责任编辑: 吴晓东; 编辑: 周成林, 庞瑜)