

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0002

Yu Qihao, You Yanhui, Yan Hai, et al. Distribution and characteristics of permafrost in Nalati Mountain, Western Tianshan Mountains in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 10–18. [俞祁浩, 游艳辉, 阎海, 等. 中国天山西部那拉提山地区多年冻土分布特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 10–18.]

中国天山西部那拉提山地区多年冻土分布特征

俞祁浩¹, 游艳辉¹, 阎海², 刘熙峰²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000;

2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院, 陕西西安 710065)

摘 要: 那拉提山位于中国天山西部, 其冻土变化过程对区域自然环境变化、工程活动产生重要互馈作用。结合即将修建的新疆伊(宁)-库(车)输电线路前期的冻土勘察结果, 对那拉提山地区冻土分布特性、主要影响因素等进行了探讨。结果表明: 那拉提山地区冻土分布属于典型的山地多年冻土, 冻土发育区域、冻土类型和地下冰空间发育特征及冻土温度状况等主要受到海拔、地形地貌、地表水分条件等因素的影响和控制。同时, 该地区大量发育有泥流阶地、泥流舌、热融滑塌、石环、石河等冰缘现象。受坡向、植被、水分等因素影响, 区域内冻土活动层厚度为 0.7~4.5 m, 随着海拔增加, 冻土厚度由阳坡连续多年冻土下界(海拔 3 000 m)附近的约 20~22 m 增加到海拔 3 300 m 附近的约 70~100 m。自 1985 年以来, 区域年平均气温上升(约 0.088 °C·a⁻¹), 该区域内的冻土退化趋势明显。

关键词: 那拉提山; 多年冻土; 分布; 特性

中图分类号: P642.14 **文献标识码:** A

0 引言

中国境内的天山山脉多年冻土分布面积在 20 世纪的 80—90 年代约为 63 000 km², 是典型的高山多年冻土区^[1]。受气温和降水在三度空间上变化的影响^[2-3], 天山山区多年冻土具有向北、向东下界降低, 向高处增厚、变冷的地带性规律^[4]。位于中国天山中部的乌鲁木齐河源区(大西沟), 冻土热状况具有垂直地带性规律, 随着高程由海拔 3 348 m 升高至 3 900 m, 冻土年平均地温由 -0.7 °C 降至 -4.9 °C, 厚度由 50 m 增至 230 m^[5-6]。近年来, 气候的年际波动和升温趋势对天山地区多年冻土的热状况产生了显著的影响。根据哈萨克斯坦境内的北天山西部地温监测结果显示, 过去 30 a 里, 冻土温度上升了 0.3~0.6 °C, 活动层厚度增加了 23%^[7]。乌鲁木齐河源区的地温监测孔数据显示, 在 1993—2008 年期间, 该地区多年冻土年平均地温由 -1.6 °C 上升到 -1.0 °C, 其活

动层呈现逐渐增厚, 且冻土下限逐渐抬升的趋势^[8-10]。

受地形、地质背景和冰川活动等因素的影响, 天山多年冻土还具有地下冰成因的多样性和冰缘现象发育等特点。在乌鲁木齐河源区的冰川前缘发现了埋藏的冰川冰, 且证实哈希勒根地区具有发育埋藏雪冰的条件。大西沟气象站已经发现发育埋藏腐殖及共生多年冻土^[6]。此外, 天山地区冰缘现象种类较多, 大西沟地区有包括泥流舌和泥流阶地在内的多种冰缘地貌, 以及那拉提山拉尔墩达坂一带分布有泥流舌、泥流阶地、石冰川和冰缘倒石堆等冰缘地貌^[11-12]。

目前, 对天山的多年冻土已进行了较多的研究, 且已取得了不少成果。但是受经济条件限制, 且山区交通不便, 很多研究区域人员难以到达。因此, 在我国境内对天山多年冻土的深入研究还仅仅局限于乌鲁木齐河源区和奎先达坂附近等局部区域。就研究内容而言, 对该区域冻土的研究还不够

收稿日期: 2012-09-18; 修订日期: 2012-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171059)资助

作者简介: 俞祁浩(1964—), 男, 浙江宁波人, 研究员, 2006 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 现主要从事冻土工程方面的研究。E-mail: yuqh@lzb.ac.cn

深入和全面, 给气候变化条件下区域冻土演化趋势的研究和工程活动中对冻土工程地质条件的评估带来了困难。即将开展的伊宁-库车输电线路工程自北向南跨越了我国天山西段的那拉提山, 此次研究沿输电线路进行现场踏勘, 采用钻探、人工坑探、探地雷达和冻土温度监测等手段, 对那拉提山的多年冻土分布、活动层厚度、冻土热状况、冻土厚度和冻土变化趋势等特征进行了较多研究。

1 那拉提山区域概况

那拉提山位于中国西部的天山地区, 新疆巴音郭楞蒙古自治州, 巴音布鲁克镇以北(图 1)。勘察研究线路从新源县的恰西林场以南开始, 至库车县的大龙池北, 西北-东南方向穿越那拉提山多年冻土区, 全长 135.5 km。其中, 在那拉提山, 大致沿输电线路由西北向东南跨越那拉提山, 区域范围东西位于 $82^{\circ}40' \sim 83^{\circ}40' E$ 之间, 南北位于 $42^{\circ}58' \sim 43^{\circ}04' N$ 之间, 海拔在 2 637~3 425 m。

在那拉提山南坡海拔 3 400 m 以下区域, 地表主要为由冰碛、冲积和洪积等形成的砾石、砂、粉质黏土等; 海拔 3 400 m 以上区域, 基岩出露较多, 地势较低处和坡脚有岩屑、岩块分布, 主要岩性为碳酸岩、火山碎屑岩等。在北坡海拔 3 300 m 以下区域的山前缓坡和地势低洼处, 分布有由冰碛、冲积、洪积形成的砾石、砂、粉质黏土等; 海拔 3 300 m 以上, 主要出露灰色-灰绿色大理岩、结晶板岩及板岩等^[13]。

根据距研究区域以南约 80 km 处的巴音布鲁克气象站(海拔 2 428 m)的资料, 在 1958—2010 年

期间, 该区域多年年平均气温为 $-4.3^{\circ}C$, 每年 10 月到次年 3 月月平均气温稳定地低于 $0^{\circ}C$; 在 1990—2010 年期间, 多年年平均降水量约为 290 mm, 其中约 80% 以上的降水均发生在月平均气温高于 $0^{\circ}C$ 的 4—9 月, 年最大积雪厚度为 4~45 cm, 平均厚度为 17.8 cm。

此次的冻土勘察研究工作主要以输电线路为中心并向两旁扩展 600 m(图 1), 勘察工作兼顾了区域内的典型地形地貌单元, 并对冻土分布复杂的区域进行了重点研究。通过对获取资料的综合分析和研究, 对那拉提山的冻土分布情况和发育特征有了较深入的认识。

2 那拉提山的多年冻土分布情况

由于强烈的地形变化和山地微气候的多样性, 高山多年冻土和高纬度平原区的多年冻土具有明显的差异^[14-15]。大的气候背景(受经纬度、海拔和与海洋的距离的影响)决定了区域冻土分布的宏观格局, 同时, 地形条件的差异也会带来一些局部的变化^[16]。

在山区, 由面积连续率对多年冻土区域的划分往往失效。根据对天山多年冻土的研究, Gorbunov^[17]提出了对山区多年冻土的划分标准, 即只有阳坡未发育多年冻土的为不连续多年冻土区; 只在较陡的阴坡(大于 30°)和冬季积雪较薄的谷底泥炭地发育有多年冻土的为岛状多年冻土区, 而阴坡阳坡均有多年冻土发育的为连续多年冻土区。在此我们采用此标准对研究区多年冻土进行划分。

根据勘察结果和综合分析研究发现, 那拉提山

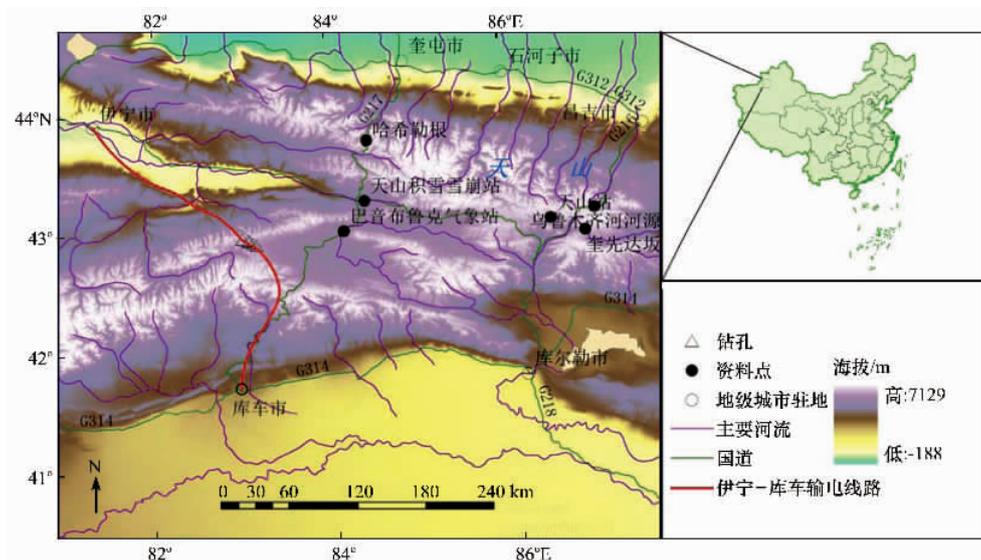


图 1 研究区域

Fig. 1 The study area

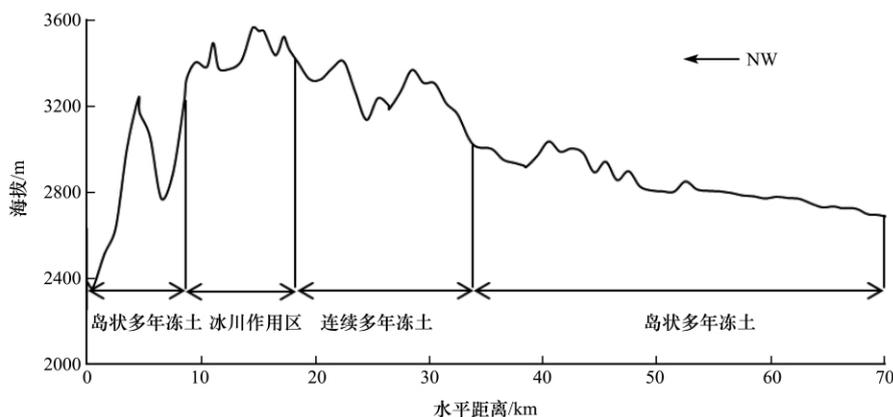


图 2 中国西部新疆境内那拉提山多年冻土分布随海拔变化情况

Fig. 2 Elevational distribution of permafrost types divided by areal extent (continuity) in the Nalati Mountain

多年冻土分布主要受海拔的控制, 其南坡随海拔升高有季节冻土区、岛状和连续多年冻土区、冰川和雪蚀作用区等依次分布, 那拉提山北坡地势急剧上升, 随海拔升高由季节冻土区、岛状多年冻土区快速过渡到冰川作用区(图 2), 体现了地形对局部冻土分布的控制作用. 各多年冻土区段的分布位置及特点如下.

2.1 岛状多年冻土区

在那拉提山北坡, 岛状多年冻土区分布于海拔 2 340~3 320 m 范围内. 此区段地势陡峻, 沟谷深切. 沿勘察线路区域内, 多年冻土连续度约 15%~20%, 多发育于水分充足的沟谷中, 在陡坡和山脊上多为融区. 在海拔 2 900~3 100 m 范围内, 多年冻土几乎呈连续分布, 但因地势陡峭, 很快上升至海拔 3 300 m 以上, 导致连续多年冻土分布区面积很有限.

在那拉提山南坡, 岛状多年冻土区主要分布于低山缓坡和山前冲积盆地边缘, 整体地势北高南低, 微向北东倾斜, 坡度较缓, 多小于 5°. 在海拔 2 700~3 000 m 范围内, 主要地层为冲洪积粉质黏土、砂砾及碎石土, 植被覆盖达到 90% 以上. 由钻孔、坑探和探地雷达勘察结果的分析, 沿勘察线路多年冻土连续度约为 20%, 主要分布于低洼的湿地内, 山脊和地表较干燥的草甸区多为融区.

2.2 连续多年冻土区

连续多年冻土区主要分布于那拉提山南坡海拔 3 000~3 400 m 范围内. 此段山势起伏, 海拔高差较大. 坡度大多在 2°~15° 范围内, 植被覆盖多大于 70%. 坡脚、山顶台地、山梁的中上部均有多年冻土发育. 根据钻孔、坑探和 20 km 长的探地雷达测线的勘察结果的综合分析和统计, 沿线路方向阴阳坡均发育多年冻土, 其连续率大于 80%, 在坡度大

于 15° 的阳坡和局部植被稀疏的地段存在融区.

区段内的冻土类型复杂多变, 地下冰和多年冻土的发育随地形地貌发生变化. 沼泽化湿地内多发育高含冰量冻土. 冻土上限附近可见 0.5~1.0 cm 的纯冰层, 冰层主要密集分布于腐殖质层中, 呈微层状或层状结构. 从上限以下约 3 m 深度范围内, 冻土类型至上而下多属于饱冰冻土至富冰冻土, 更深处地层变为粗颗粒的砂砾石土, 含冰量减少, 冻土类型变为少冰冻土. 山顶台地或山梁的中上部的高山草甸区, 腐殖质厚度层约为 20 cm, 以下主要为粗颗粒的砂砾卵石层. 上限附近可见块状或包裹状地下冰, 为富冰冻土或多冰冻土层, 其厚度约 3~4 m. 往下深度上, 多年冻土的含冰量减少, 地下冰主要呈整体状或包裹状结构, 主要为少冰冻土.

2.3 冰川作用区

冰川作用区主要分布于那拉提山北坡海拔 3 300 m 以上和南坡海拔 3 400 m 以上地区. 该区域受末次冰期、新冰期和小冰期等冰川作用影响, 遗留了大量古冰川遗迹, 并有现代冰川发育. 地表形态主要为冰川作用所产生的冰川侵蚀地形, 如冰斗、角峰和冰碛垄岗等, 以及强烈的寒冻风化产生的碎石坡、石海、岩堆等. 根据遥感影像资料, 线路经过区域以西约 10 km, 东侧约 5 km 以外发育多条现代冰川, 其发育大多在海拔 3 300 m 以上, 最低海拔为 3 260 m.

可见, 那拉提山多年冻土分布的总体格局受海拔控制. 但同时, 该区域的坡向、地形、地质条件等使多年冻土表现出以下局部特征: 南、北坡岛状多年冻土分布下界海拔分别为 2 700 m 和 2 340 m, 比乌鲁木齐河源区大西沟南北坡的下界海拔分别低出 200 m 和 910 m, 而与奎先达坂地区南坡的下界

海拔值相当、而其南坡海拔值低出 760 m。南坡岛状多年冻土下界比北坡低 360 m, 其差值与天山东部乌鲁木齐河源区和奎先达坂地区较为接近^[7]。由于地势的急剧上升, 北坡直接由岛状多年冻土区过渡到冰川作用区, 连续多年冻土区分布不明显。研究区域的多年冻土下界海拔较乌鲁木齐河源区和奎先达坂地区明显较低, 可能还与降水量自西向东减少, 地表水热过程差异有关。如据天山积雪雪崩站的资料, 1968—1993 年间的平均年降水量为 832.2 mm^[18], 而乌鲁木齐河源区 1958—2003 年的年均降水量仅为 452 mm^[19]。此外, 青藏高原多年冻土的高含冰量区主要分布于细颗粒的沉积层中, 与此不同的是, 那拉提山多年冻土区在粗颗粒砂砾石和碎石土中仍可见含冰量较大的块状和包裹状的地下冰。这也是该区域多年冻土的典型特征和较为独特之处。

3 活动层厚度

活动层是地气热量交换的产物, 其冻融过程和水热特征受海拔、岩性、含水量、坡向及植被等因素的影响^[20-21]。由于其影响因素的多样性, 常引起活动层厚度的不均一性, 而在不同地区, 起主导作用的因素不尽相同。经勘察研究发现, 那拉提山多年冻土活动层厚度为 0.7~4.5 m, 并在横向几十米的范围内, 活动层厚度会发生很大变化。在该区域内, 引起冻土活动层厚度变化的主要因素为地表水分条件、植被、地形地貌等因素。

地表水分情况差异最为明显的为沼泽化湿地区和高山草原区。沼泽化湿地主要发育于排水条件差或者基本不具备排水条件的山前缓坡、谷地和台地的地势低洼处, 湿地内泥炭层厚度多在 1.0 m 左右, 夏季处于饱和或过饱和状态。高山草原区腐殖质层厚度多在 0.2 m 左右, 地表则较干燥。沼泽化湿地内的多年冻土活动层厚度在 0.7~1.0 m 范围, 而高山草原区活动层厚度多在 2.5~3.5 m。导致不同地表条件下活动层厚度差异的原因可能为: 1) 冬季, 湿地内饱水的腐殖质层冻结, 由于冰的导热系数($2.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)是水的导热系数($0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)的 4 倍多, 导致腐殖质层冬季放热迅速且放热量大于夏季吸热量, 形成“热半导体”效应^[22]; 2) 夏季, 与高山草原区相比, 湿地内活动层中融化时的相变过程需要消耗更多的热量, 在同样的热量收入的情况下其融化深度更浅; 3) 湿地内处于饱和或者过饱和状态, 水的蒸发潜热消耗了较多热量, 同时水的热容量大, 湿地内冻土活动层在夏季升

温更慢。由于以上因素的综合影响, 导致沼泽化湿地区的活动层厚度明显小于地表较为干燥的草原区。

通过对那拉提山地区的 19 个位于高山草原区的钻孔和探坑数据的统计分析发现, 不同坡向的活动层厚度也有明显的差别(图 3)。区域内南坡的多年冻土活动层平均厚度为 2.9 m, 西坡平均 2.8 m, 东坡平均 1.6 m, 北坡平均 1.0 m, 即不同坡向的多年冻土上限深度大体有如下规律: 南坡 > 西坡 > 东坡 > 北坡。

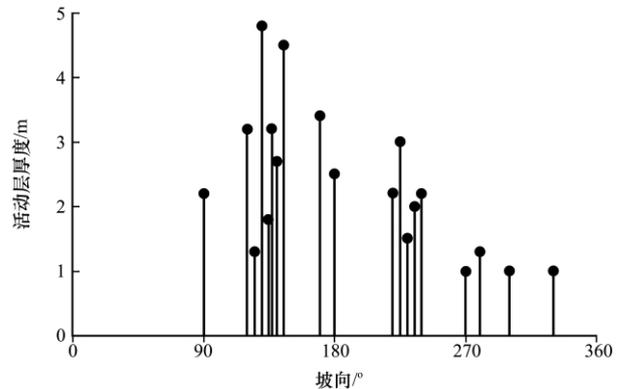


图 3 活动层厚度随坡向变化

Fig. 3 Variation of the active layer depth with slope orientation in the Nalati Mountain

4 冻土热状况及厚度

为研究区域内多年冻土的热状况, 在那拉提山南坡海拔 3 000~3 400 m 之间布设了 5 个地温观测孔(图 1), 测温孔布设于具有代表性的一些典型地形地貌单元(表 1)。于 2011 年 8 月 10 日进行了温度观测, 可以看出, 15 m 深度地温观测值有随海拔增高而降低的总体趋势, 但在海拔、地形及植被都较为相近的钻孔 ZK2 和 ZK3, 位于西坡的 ZK2 地温略低于位于阳坡的 ZK3, 显示了坡向对地温的影响。且 ZK1 与 ZK4 相比, 其海拔稍高, 位于半阴坡(西坡), 地表植被覆盖度也更高, 其地温却低出 $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 可能是不同坡度条件下活动层水分含量和土质差异, 以及地形对温度场分布的影响造成的。

分析钻孔 ZK4 和 ZK5 的地温曲线, ZK4 年平均地温在 $-2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 8~16 m 深度范围内地温梯度梯度约为 0, 冻土热状况较稳定。而位于连续多年冻土下界附近 ZK5, 年平均地温约 $-0.14 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 5~9 m 具有正的温度梯度(温度随深度增加而升高), 9~16 m 地温梯度接近于 0, 热稳定性很差, 并可能受到侧向热流的影响, 在由退化型向相变过渡型转变^[23]。

表 1 那拉提山多年冻土区钻孔中 15 m 深度处地温

Table 1 Information of the boreholes in the Nalati Mountain, including ground temperatures of permafrost at the depth of 15 m

钻孔编号	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
海拔/m	3337	3184	3170	3311	3005
地形	缓坡中部	坡脚	坡脚	山顶台地	缓坡中部
坡向/(°)	240	230	130		200
坡度/(°)	8	11	11	0	2
植被覆盖率/%	70	80	70	40	80
15 m 深度地温/°C	-1.8	-0.3	-0.3	-2.0	-0.1

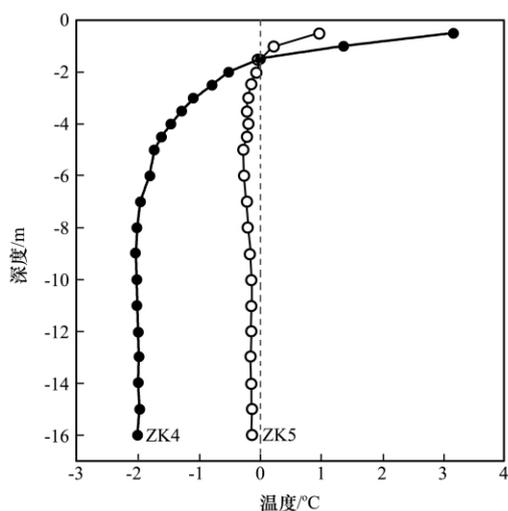


图 4 那拉提山多年冻土区钻孔 ZK5、ZK4 地温曲线

Fig. 4 Ground temperature profiles measured in the Boreholes ZK5 and ZK4 in the Nalati Mountain

根据图 4 的地温曲线特征, 15 m 深度处地温近似看作是冻土的年平均地温值, 其随海拔变化的趋势见图 5. 线性拟合结果显示, 区域内冻土年平均地温随海拔增加而降低, 幅度约为 $0.6^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{m})^{-1}$ (相关系数 0.7507), 与气温随海拔变化

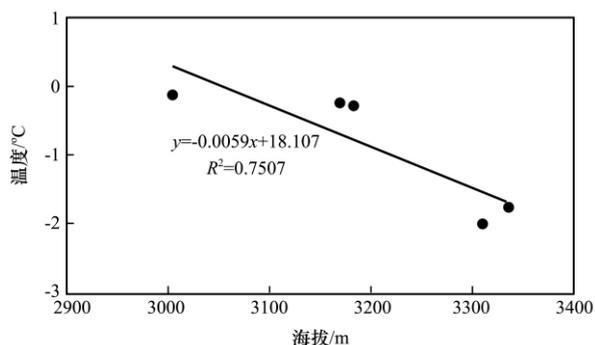


图 5 那拉提山钻孔 15 m 深度处地温随海拔变化的线性拟合结果

Fig. 5 Mean annual ground temperature at the depth of 15 m changing with elevation, together with linear regression line

梯度值接近, 也间接的说明了海拔对冻土发育和热状况起主要控制作用.

由于钻孔均未贯穿多年冻土层, 无法直接测得多年冻土层的厚度值, 一般可通过地温梯度和统计规律估算冻土层的厚度. 若参考天山东部乌鲁木齐上游的多年冻土层内的地温梯度值, 即深度每增加 43 m 地温上升 1°C ^[4], 并假设从钻孔 ZK5、ZK4 在 16 m 以下为地温零梯度结束点, 则可推算其多年冻土厚度分别为 22 m 和 102 m. 另据统计, 我国西部地区多年冻土厚度 (H , m) 与年平均地温 (T , $^{\circ}\text{C}$) 之间有如下关系式: $H = 15.84 - 27.17T$ (相关系数 $R = 0.94$)^[24]. 由此推算, 在 ZK5 的多年冻土厚度约 20 m, 钻孔 ZK4 多年冻土厚度约 70 m. 据此估计, 那拉提山多年冻土区连续多年冻土区下界附近冻土厚度可能在 20~22 m 之间, 在海拔 3 300~3 400 m 范围内, 冻土厚度可能在 70~102 m 之间.

5 区域内的冰缘现象

已有研究表明, 那拉提山地区分布有石冰川和泥流舌、泥流阶地等冰缘现象. 其中, 石冰川具有规模大、活动性强等特点. 1988—1989 年间对位于那拉提山拉尔墩达坂附近的泥流阶地的观测发现, 其年均冻融蠕流速率达到 $0.49 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 远快于北极、南极地区和亚极地区泥流舌的运动速率, 降水量和活动层中的含水量可能是影响泥流舌和泥流阶地运动速度的主要因素^[9, 25].

研究区内也发现分布多种冰缘现象, 如冻胀丘、泥流舌、泥流阶地、热融滑塌、石环及石河等 (图 6), 其中分布面积最广的为泥流舌和泥流阶地. 冻胀丘分为季节性的冻胀丘和多年生的冻胀丘, 见于岛状多年冻土区和连续多年冻土区坡脚水分汇集处, 其高度一般不超过 1 m, 顶部常见开裂现象, 并已对区域内发育典型的冻胀丘进行了开挖确认.



图 6 那拉提山常见的冰缘现象

Fig. 6 Some periglacial phenomena in the Nalati Mountain

区内分布面积最广的为泥流舌和泥流阶地，泥流舌分布于连续多年冻土区阴坡，其前缘高度一般低于 0.5 m，后侧宽度最大约 20 m。泥流阶地主要见于连续多年冻土区阳坡中上部，阶地前缘高度可高达 2.5 m 左右，沿等高线方向，阶地宽度可达 500 m 左右，沿斜坡向下方向，阶地前后缘距离为 10~50 m。区域内热融滑塌见于地表潮湿的缓坡，其形成可能与地下冰融化和地下水有关；石环和石河分布于海拔 3 400 m 以上的冰川作用区，形成于水分充足的坡脚或沟谷地带。

冰缘现象的发育与区域内的气候、地质背景、冰川活动历史以及地形变化有关^[26]，因此冰缘地貌也常常作为较大区域或者局部地区的气候特征的指示标志^[27]。众多冰缘现象的发育也间接反映了那拉提山地区较低的年平均气温，冻土上限附近的地下冰较发育，随季节变化的冻融循环作用强烈等特征。

6 气温和冻土的变化趋势

图 7 为距研究区域约 80 km 的巴音布鲁克气

象站 1958—2010 年年平均气温变化曲线及 3 次多项式拟合结果。从 1958 年到 1985 年, 年平均气温呈下降的趋势, 约 30 a 间年平均气温下降了约 0.1 °C; 1985—2010 年期间, 气温开始呈现迅速上升的趋势, 年平均气温增加速度约为 0.088 °C · a⁻¹。同期, 天山西部的升温速度 0.006 ~ 0.032 °C · a⁻¹[5], 天山冻土东部乌鲁木齐河源区的升温速率为 0.065 °C · a⁻¹[6, 28]。青藏高原近 47 a 的年平均气温上升速率也只有 0.037 °C · a⁻¹[29]。可见, 那拉提山区的年平均气温升高的趋势很明显, 而且升温速率高于天山其他地区和青藏高原。

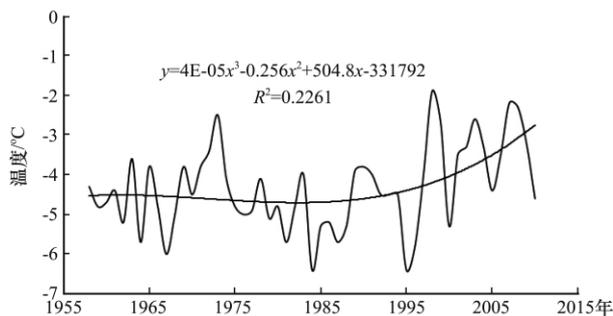


图 7 巴音布鲁克气象站 1958—2010 年平均气温变化趋势

Fig. 7 Change in annual mean air temperature at Bayanbulak Meteorological Station, 1958—2010

气候的变化为冻土退化和环境变化提供了先决条件。从连续多年冻土下界附近的钻孔 ZK5 地温曲线(图 4)可以看出, 其年平均地温高达 -0.1 °C, 冻土层厚度估计为 20 m 左右, 地温有随深度增加而增加的趋势, 已具有退化型多年冻土的地温特征[19]。

此外, 经勘察发现, 在那拉提山南坡的岛状多年冻土区内, 部分沼泽化湿地已退化为高山草甸区, 退化面积大约占沼泽化湿地面积的 20%, 根据探地雷达的勘察结果, 退化后的沼泽化湿地内部只有零星的多年冻土特征, 而未退化的湿地内部有连续性很好的多年冻土反射波特征。可见, 多年冻土的退化是沼泽化湿地退化为高山草甸区的主要原因。

在连续多年冻土区内的山顶和阳坡较陡处, 植被覆盖率低于 30% 甚至有地表完全裸露的现象, 对这些区域的坑探和探地雷达勘察结果均未发现多年冻土, 很有可能是冻土已经退化或者上限下降到较深的深度。那拉提山南坡连续多年冻土下界附近的一个钻孔发现, 多年冻土上限已达 7.0 m, 而区域内观测到的最大冻结深度为 4.4 m[30], 即在连续多年冻土下界附近已很有可能出现不衔接的多年冻土, 这也是冻土正在发生退化的较为明显的特征。

另外需要考虑的是, 与青藏高原和东北多年冻

土的情况不同, 此区域内浅层普遍发育粗颗粒的冰水沉积物。在这种地质背景下, 气候变暖使冻结层融化后, 冻土层的隔水作用消失, 而粗颗粒土持水性能差, 地表降水很快向下渗漏, 从而加速了多年冻土的退化, 对地表生态环境产生不利影响。

7 结论

那拉提山地区为典型的高山多年冻土区, 海拔为其多年冻土分布的最主要控制因素, 但同时局地的地形因素也在很大程度上影响到其分布特征。其南坡随海拔升高有季节冻土区、岛状多年冻土区、连续多年冻土区、冰川作用区依次分布, 而北坡连续多年冻土区分布不明显, 直接由岛状多年冻土区快速过渡到冰川作用区。多年冻土区内的地下冰分布主要与地表植被、水分和腐殖质层厚度有关, 冻土厚度也随海拔增加而变厚, 冻土温度随海拔增加而降低。

受沼泽化湿地的大面积发育和坡向变化的影响, 那拉提山多年冻土活动层厚度在横向几十米的范围内能发生明显变化, 变化幅度在 0.7 ~ 4.5 m 范围。通过影响地表和大气之间的热量交换, 沼泽化湿地而分布区的活动层厚度小于非沼泽化湿地。在不同坡向接收到的太阳辐射量的差异使区域内阳坡的活动层厚度明显大于半阴坡, 半阴坡又大于阴坡。

那拉提山区的冰缘现象种类多而且分布面积广, 区内可见的冰缘现象种类有冻胀丘、泥流舌、泥流阶地、热融滑塌、石环及石河等, 尤其是泥流舌和泥流阶地分布面积很广。冰缘地貌形成与区域内的气候、地质背景和地形的因素密切相关。

自 1985 年以来, 该区域年平均气温升温速率明显高出天山其他地区, 受此影响, 多年冻土区内开始呈现出沼泽化湿地退化、局部植被退化和不衔接多年冻土现象, 这些现象说明区域多年冻土已处于不断退化的过程中。此外, 那拉提山区普遍发育粗颗粒的冰水沉积物, 在此地质背景下, 其多年冻土将更易受到气候变暖的影响, 冻土退化后带来的生态环境问题也会更加明显。

致谢: 童长江研究员, 以及两位审稿人对本文提出了宝贵的修改意见, 在此表示衷心感谢。

参考文献 (References):

- [1] Qiu Guoqing, Huang Yizhi, Li Zuofu. Alpine permafrost in Tianshan, China [C]//Proceedings of Fourth International

- Conference on Permafrost. Washington: National Academy Press, 1983: 1020—1023.
- [2] Zhao Yong, Deng Xueliang, Li Qin, *et al.* Characteristics of the extreme precipitation events in the Tianshan Mountains in relation to climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(5): 927—934. [赵勇, 邓学良, 李秦, 等. 天山地区夏季极端降水特征及气候变化[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(5): 927—934.]
- [3] Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, *et al.* Variations of extreme flood of the rivers in Xinjiang Region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and their response to climate change in recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(5): 1037—1046. [毛炜峰, 樊静, 沈永平, 等. 近 50a 来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应. *冰川冻土*, 2012, **34**(5): 1037—1046.]
- [4] Qiu Guoqing. Development condition of alpine permafrost in the Mt. Tianshan, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, **15**(1): 96—102. [邱国庆. 中国天山高山多年冻土的形成条件[J]. *冰川冻土*, 1993, **15**(1): 96—102.]
- [5] Zeng Zhonggong, Qiu Guoqing. Explanation of electrical D. C. resistivity sounding at the headwaters of Ürümqi River, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, **13**(2): 169—176. [曾仲琬, 邱国庆. 天山乌鲁木齐河源地区电测深资料的推断[J]. *冰川冻土*, 1991, **13**(2): 169—176.]
- [6] Jin Huijun, Qiu Guoqing, Zhao Lin, *et al.* Thermal regime of alpine permafrost in the upper reach of Ürümqi River, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, **15**(1): 110—114. [金会军, 邱国庆, 赵林, 等. 东天山中段乌鲁木齐河上游冻土热状况研究[J]. *冰川冻土*, 1993, **15**(1): 110—114.]
- [7] Marchenko S S, Gorbunov A P, Romanovsky V E. Permafrost warming in the Tien Shan Mountains, Central Asia[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, **56**(3—4): 311—327.
- [8] Zhao Lin, Liu Guangyue, Jiao Keqin, *et al.* Variation of permafrost in the headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains since 1991[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(2): 223—230. [赵林, 刘广岳, 焦克勤, 等. 1991—2008 年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(2): 223—230.]
- [9] Qiu Guoqing, Huang Yizhi, Li Zuofu. Basic characteristics of permafrost in Tian Shan, China[C]// *Proceedings of Second National Conference on Permafrost (Selection)*. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1983: 21—29. [邱国庆, 黄以职, 李作福. 中国天山地区冻土的基本特征[C]// 第二届全国冻土学术会议论文选集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 21—29.]
- [10] Zhao Lin, Qiu Guoqing. Buried humus soil and syngenetic permafrost around the Daxigou meteorological station at the source of the Ürümqi River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, **13**(2): 177—180. [赵林, 邱国庆. 乌鲁木齐河源大西沟气象站附近的埋藏腐殖质层与共生冻土[J]. *冰川冻土*, 1991, **13**(2): 177—180.]
- [11] Zhu Cheng, Cui Zhijiu. Analysis of movement and creeping mechanism of gelifluction lobes (terrace), middle Tianshan Mountain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1992, **12**(4): 349—356. [朱诚, 崔之久. 中天山泥流舌和泥流阶地运动特征及其蠕动机理探讨[J]. *地理科学*, 1992, **12**(4): 349—356.]
- [12] Zhu Cheng, Cui Zhijiu. A superficial discussion of talus at the head of Ürümqi River, Tian Shan[J]. *Journal of Mountain Research*, 1988, **6**(4): 203—209. [朱诚, 崔之久. 天山乌鲁木齐河源区倒石堆浅论[J]. *山地研究*, 1988, **6**(4): 203—209.]
- [13] Compilation Group for Regional Stratigraphy Chart of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional Stratigraphic Chart of Northwestern China: Xinjiang Volume[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981. [新疆维吾尔自治区区域地层表编写组. 西北地区区域地层表: 新疆维吾尔自治区分册[M]. 北京: 地质出版社, 1981.]
- [14] Hoelzle M, Mittaz C, Etzelmüller B, *et al.* Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: an overview of current developments[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**(1): 53—68.
- [15] M hll D V, Hauck C, Gubler H, *et al.* New geophysical methods of investigating the nature and distribution of mountain permafrost with special reference to radiometry techniques[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**(1): 27—38.
- [16] Cheng Guodong, Dramis F. Distribution of mountain permafrost and climate[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1992, **3**(2): 83—91.
- [17] Gorbunov A P. Permafrost investigations in high-mountain regions[J]. *Arctic and Alpine Research*, 1978, **10**(2): 283—294.
- [18] Hu Ruji, Ma Hong, Jiang Fengqing. Geographical environment in the area of Tianshan Station for snow & avalanche research, Yili, Xinjiang, China[J]. *Arid Land Geography*, 1997, **20**(2): 25—33. [胡汝骥, 马虹, 姜逢清. 中国天山积雪雪崩站区的地理环境[J]. *干旱区地理*, 1997, **20**(2): 25—33.]
- [19] Han Tianding, Ye Baisheng, Ding Yongjian, *et al.* Increasing runoff in the Ürümqi River Basin since 1980s[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(5): 655—659. [韩添丁, 叶柏生, 丁永建, 等. 乌鲁木齐河流域径流增加的事实分析[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(5): 655—659.]
- [20] Zhao Lin, Cheng Guodong, Li Shuxun, *et al.* Thawing and freezing processes of active layer in Wudaoliang region of Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(23): 2181—2187. [赵林, 程国栋, 李述训, 等. 青藏高原五道梁附近多年冻土活动层冻结和融化过程[J]. *科学通报*, 2000, **45**(11): 1205—1211.]
- [21] Hinkel K M, Doolittle J A, Bockheim J G, *et al.* Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, Barrow, Alaska[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**(2): 179—190.
- [22] Cheng Guodong. The effects of local factors on permafrost distribution and its revealing of Qinghai-Tibetan Railroad design[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, **33**(6): 602—607. [程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, **33**(6): 602—607.]
- [23] Jin Huijun, Zhao Lin, Wang Shaoling, *et al.* Thermal regimes and degradation modes of permafrost along the Qinghai-Tibet Highway[J]. *Science in China (Series D)*, 2006, **36**(11): 1009—1019. [金会军, 赵林, 王绍令, 等. 青藏公路沿线冻土的地温特征及退化方式[J]. *中国科学(D 辑)*, 2006,

- 36(11): 1009—1019.]
- [24] Tong Changjiang, Wu Qingbai. Permafrost zonation of ground temperature and stability of engineering constructions in the western region, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(Suppl.): 166—173. [童长江, 吴青柏. 我国西部多年冻土地带与工程建筑物稳定性[J]. 冰川冻土, 1996, **18**(增): 166—173.]
- [25] Zhu Cheng, Cui Zhijiu, Yao Zeng. Research on the features of rock glaciers in the Central Tian Shan Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 1992, **47**(3): 233—241. [朱诚, 崔之久, 姚增. 中天山石冰川特征研究[J]. 地理学报, 1992, **47**(3): 233—241.]
- [26] Matsuoka N. Solifluction rates, processes and landforms: a global review[J]. Earth-Science Reviews, 2001, **55**(1—2): 107—134.
- [27] Matsuoka N. Climate and material controls on periglacial soil processes: Toward improving periglacial climate indicators [J]. Quaternary Research, 2011, **75**(2): 356—365.
- [28] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, *et al.* A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at headwaters of Ürümqi River, Tianshan, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(2): 117—123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40a观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 117—123.]
- [29] Li Lin, Chen Xiaoguang, Wang Zhenyu, *et al.* Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau [J]. Advances in Climate Change Research, 2010, **6**(3): 181—186. [李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J]. 气候变化研究进展, 2010, **6**(3): 181—186.]
- [30] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, *et al.* Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 248—252. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 248—252.]

Distribution and Characteristics of Permafrost in Nalati Mountain, Western Tianshan Mountains in China

YU Qi-hao¹, YOU Yan-hui¹, YAN Hai², LIU Xi-feng²

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Northwest Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: Nalati Mountain is located in the western Tianshan Mountains in Xinjiang Region, China. The permafrost changing process in this region influences the natural environment and engineering activities. Owing to many factors, such as transportation difficulties and scarcity of previous human activities, there are few researches about the permafrost and environment in this area. The permafrost distribution characteristics in Nalati Mountain and their main impact factors are studied systematically, combining with permafrost investigation of a transmission line which will be built from Yining to Kuche. It is found that permafrost in this region is typical mountain permafrost, of which the development area, types, ground ice characteristics and thermal regime all depend on altitude, topography and swamp condition. Any change in altitude, topography and swamp condi-

tion will result in change in permafrost distribution, permafrost type and ground ice. Meanwhile, there are many periglacial phenomena developing, such as solifluction terraces, solifluction lobes, stone rings and block streams. Depending on slope aspect, vegetation, water and other factors, the active layer depth varies from 0.7 m to 4.5 m, and the thickness of permafrost on south slopes increases from about 20~22 m at the lower limit (3 000 m) of continuous permafrost to 70~100 m at the altitude of 3 300 m. According to temperature data, it is found that regional annual mean air temperature has rapidly increased since 1985, with a rate of about 0.088 °C·a⁻¹. Therefore, some features of permafrost degradation can be seen, such as ground temperature rising, degradation of marsh wetland and vegetation and detachment of frozen ground.

Key words: Nalati Mountain; permafrost; distribution; characteristics