

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0306

HAO Jiansheng, ZHANG Feiyun, HUANG Farong, et al. Altitudinal distribution pattern of seasonally frozen ground and its influencing factors in the Ili basin, Xijiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1179–1185. [郝建盛, 张飞云, 黄法融, 等. 新疆伊犁地区季节冻土沿海拔的分布规律及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1179–1185.]

新疆伊犁地区季节冻土沿海拔的分布规律 及其影响因素

郝建盛^{1,2}, 张飞云^{1,3}, 黄法融^{1,4}, 李兰海^{1,4}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 新疆农业大学 管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4. 中国科学院 中亚生态环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 基于 2000–2014 年新疆伊犁地区不同海拔区域观测的冻融期内的冻土、积雪和气象数据, 应用相关性分析和回归分析方法, 分析该地区季节冻土沿海拔的分布规律, 以及气温、积雪对季节冻土特征的影响。结果表明: 伊犁地区表层土壤存在着每年 11 月份开始结冻, 于次年 4 月份完全融化的周期性变化。每个周期内土壤冻结时长随海拔以 $4\text{ d}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ 的趋势增加, 土壤最大冻结深度随海拔以 $3.9\text{ cm}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ 的趋势增加。土壤冻结时长与冻结期的平均气温具有显著负相关关系, 相关系数为 $-0.98(P<0.05)$ 。土壤冻结日数与积雪覆盖历时呈正相关关系, 土壤的最大冻结深度与最大雪深呈负相关关系。随着海拔升高, 温度递减, 导致伊犁地区土壤最大冻结深度和土壤冻结日数整体呈现增加趋势。但在海拔相对较高的地区, 由于相对较厚积雪的影响, 出现土壤最大冻结深度随海拔升高而减小的反常现象。研究结果可为新疆伊犁地区季节冻土的分布对气候变化的响应研究提供支持, 帮助研究区域生态规划和水资源管理, 为农业发展制定适应气候变化对策。

关键词: 新疆; 伊犁; 季节冻土; 海拔; 积雪

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1179-07

0 引言

冻土是一种温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且含冰的土岩, 基于土壤冻结状态持续时间长短, 冻土分为短时冻土(持续数小时至半月)、季节冻土(持续半年至数月)以及多年冻土(持续两年以上)^[1-3]。气候变化背景下我国多年冻土的分布范围逐渐缩减^[3-6], 分布更为广泛的季节冻土的最大冻结深度和土壤冻结时长也逐渐减少^[7-8], 造成山区高原湖泊和沼泽湿地萎缩, 地下水位下降以及山区融雪洪水提前, 导致严重的生态环境灾难并直接影响农业活动和工程建设和设计^[3-6]。所以, 明确季节冻土结冻和融化过程的影响因素将有助于掌握气候变化下冻土变

化的发展趋势, 从而指导工程建设及各行业安全生产, 为制定农业发展计划、环境适应性对策提供支撑。土壤的结冻和融化过程受气温、积雪、地形、太阳辐射、地表覆盖条件以及人类活动等多种因素影响^[9-12]。不同海拔地区土壤的冻结时长和冻结深度, 以及其主要影响因素呈现显著不同, 如在巴颜喀拉山北坡海拔每降低 100 m 冻土层厚度相应减少 $16\sim 25\text{ m}$ ^[13]。其中分布于中高海拔地区的季节冻土受温度和积雪影响相对最为显著^[10,12], 季节冻土最大冻结深度的变化与冬春季气温呈负相关关系^[14]。积雪导热系数低, 且积雪融化释放大量潜热, 因此积雪的存在对中高海拔地区的土壤温度有显著的影响^[9-11]。积雪厚度对季节冻土最大冻结深

收稿日期: 2017-05-15; 修订日期: 2018-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401030); 科技部科技基础资源调查专项“中国典型积雪区积雪特性地面调查”(2017FY100501)资助

作者简介: 郝建盛(1991–), 男, 甘肃兰州人, 助理研究员, 2016 年在中国科学院新疆生态与地理研究所获硕士学位, 从事积雪物理和雪崩防治研究. E-mail: haojiansheng14@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 李兰海, 研究员, 从事流域水文与生态系统研究. E-mail: lilh@ms.xjb.ac.cn.

度影响也十分明显,当季节性积雪到达一定厚度时,积雪的厚度越厚,季节冻土最大冻结深度越浅^[15-18]。

不同区域由于气候环境、积雪覆盖和海拔等条件的差异,季节冻土对气候变化的响应呈现显著不同^[3,7,17]。其中地处于干旱和半干旱区的新疆地区的冻土对气候变化响应十分敏感,近50年季节冻土最大冻土深度以 $3.5\text{ cm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速率在减小^[19]。季节冻土最大冻结深度和平均冻结深度整体呈现下降趋势并且减小的幅度表现出明显的区域差异^[19-23]。新疆北部地区最大冻土深度受海拔高度的影响相对最为显著,20世纪80年代以来,最大冻土深度呈现显著减小的趋势,且平原相对山区减小幅度更加明显^[23]。新疆地区积雪厚度达到30 cm时,积雪对土壤的保温作用十分明显,明显影响季节冻土的最大冻结深度^[15]。由于北疆地区冬季平均积雪深度超过20 cm,其中西部和北部最大超过80 cm,因此不同区域积雪深度也被认为是最大冻土深度变化区域差异性的主要因素。目前对气候变化下季节冻土冻结深度的变化,以及气温和积雪对季节冻土的冻结深度影响方面有较为深入的认识,但是对季节冻土冻结时长的影响因素的研究相对缺乏。季节冻土冻结时长直接影响山区径流的产汇流过程^[24],尤其在素有新疆“湿岛”之称的伊犁地区^[24-25],季节冻土冻结时长的变化对整个区域水资源管理产生显著影响。新疆伊犁地区冬季积雪和温度相对高于周边地区,所以土壤最大冻结深度和土壤冻结时长显著低于北疆其他地区并对气候变化相对十分敏感^[19-20]。因此,利用新疆伊犁地区观测的季节冻土深度、积雪和气象资料,分析季节冻土冻结时长和最大冻结深度随海拔的分布规律,并探讨影响季节冻土冻结时长和最大冻结深度的影响因素,为研究气候变化对季节冻土的分布和变化的影响提供支持,从而为生态规划、水资源管理以及农业发展方面制定适应气候变化的对策提供帮助。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

新疆伊犁地区位于中国天山西部($80^{\circ}10' \sim 84^{\circ}57' \text{ E}$, $42^{\circ}14' \sim 44^{\circ}50' \text{ N}$)(图1),为欧亚大陆中心区域。该区远离海洋,三面由天山支脉环绕,阻挡了来自西伯利亚的寒流和周围沙漠的干热气

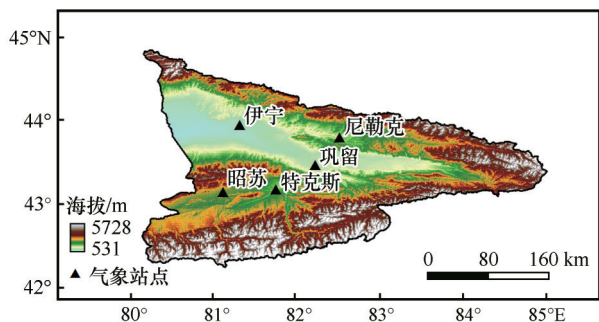


图1 伊犁地区示意图和气象站点位置

Fig. 1 Map showing the Ili basin Prefecture and the location of meteorological stations

流,向西开口,西风环流携带来的大西洋、地中海、黑海水汽在山地形成降水,这使伊犁地区成为天山山系最大的降水中心和新疆降水量最多的地区,加上年平均气温 $2.9 \sim 9.1^{\circ}\text{C}$,导致该地区素有新疆的“湿岛”之称^[24-25]。该区北面有科古琴山和婆罗科努山,南面有哈克他乌山和那拉提山,造就该地区复杂的地形条件。海拔差异明显,海拔分布在531~5728 m。由于海拔的差异导致该地区水热分布明显不均,气候呈现明显的垂直变化^[26]。伊犁河河谷区年平均降水量为200~300 mm,海拔1800 m以下降水量垂直递增率约为 $50\text{ mm}\cdot(100\text{m})^{-1}$,谷地周边海拔1500~2500 m年降水量高于800 mm^[24,27]。不同海拔水热分布的差异性导致该地区植被群落多样化,随着海拔的升高自然植被带依次呈现温性荒漠草原、温性草原、温性草甸草原、山地森林、草甸和高寒草甸^[26,28]。该地区冬春两季固态降水量占全年降水量的30%左右,冬春季积雪日数变化相对比较稳定,受海拔差异影响,不同区域平均雪深明显不同,伊宁县的平均雪深最小,海拔相对较高的特克斯县平均雪深最大^[27]。

1.2 数据来源与处理方法

本研究利用伊犁地区伊宁、巩留、尼勒克、特克斯、昭苏五个站点实测积雪、冻土以及气象数据(表1),分析季节冻土随海拔的分布规律及其与环境要素的关系。气象站冻土数据由人工监测冻土器记录完成。本研究以季节冻土冻结时长和最大土壤冻结深度作为描述该地区季节冻土特征的参数。季节冻土冻结时长为冻土上限深度大于0 cm开始到冻土下限深度为0 cm的日数,也就是土壤从开始结冻到完全融化所需要的时间,在时间上直接反映土壤热状况^[9]。最大土壤冻结深度指在整个冻融周期内观测到的土壤最大冻结深度,在很大程

表1 气象台站资料			
Table 1 Elevation, longitude and latitude of meteorological stations			
站点	海拔/m	经度/E	纬度/N
伊宁	663.4	81°20′	43°57′
巩留	776.5	82°14′	43°28′
尼勒克	1 106.5	82°31′	43°48′
特克斯	1 210.6	81°46′	43°11′
昭苏	1 854.6	81°08′	43°09′

度上反映了土壤最低温度的情况^[9-12]。本文对伊犁地区各站点 2000 – 2014 年冻土数据进行统计分析,得到各站点逐个冻融周期内土壤冻结时长和最大冻结深度,并统计各站点逐个土壤冻融周期内的最大积雪深度和积雪覆盖历时。利用线性回归分析的方法对季节冻土指标随海拔的变化进行研究,并采用相关系数和回归分析方法分析季节冻土与积雪深度、积雪覆盖历时和气温的关系。

2 结果与分析

2.1 季节冻土沿海拔分布特征

通过对伊犁地区不同海拔高度的气象台站的土壤冻结和融化时间进行统计分析(表2),发现该地区的季节冻土主要存在于每年的11月至次年4月,不同海拔高度土壤结冻时间和融化时间不同。海拔相对较高地区土壤结冻时间比海拔相对较低地区早,海拔高于1 000 m的大部分站点土壤都在11月上旬以前结冻,而海拔低于1 000 m的站点土壤都在11月下旬开始结冻。在春季土壤融化期,海拔相对较高地区土壤完全融化的时间比海拔相对较低地区晚,海拔高于1 000 m的大部分站点土壤都在3月下旬陆续完全融化,而海拔低于1 000 m的站点土壤都在3月下旬以前就已完全融化。因此海拔相对较高地区土壤冻结日数长(图2),海拔相对较高的昭苏站(1 854.6 m)平均土壤冻结日数为

表2 伊犁地区各站土壤结冻和融化时间			
Table 2 The initial freezing date and initial thawing date in various meteorological stations of the Ili basin			
站点	海拔/m	土壤结冻时间	土壤融化时间
伊宁	663.4	11月下旬	3月中旬
巩留	776.5	11月下旬	3月中旬
尼勒克	1 106.5	11月中旬	3月下旬
特克斯	1 210.6	11月中旬	3月下旬
昭苏	1 854.6	11月上旬	4月中旬

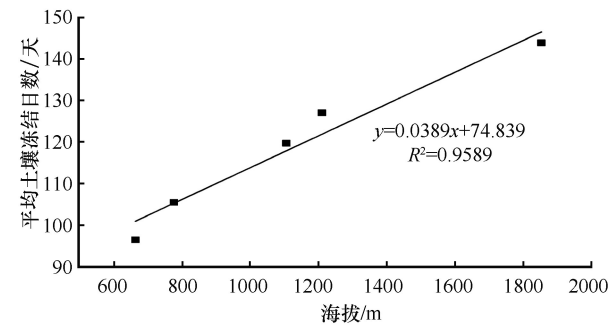


图2 伊犁地区不同海拔的土壤冻结日数
Fig. 2 Mean frozen duration changing with elevation in the Ili basin

144天,而海拔相对较低的伊宁站(663.4 m)的平均土壤冻结日数仅为97天。图2显示伊犁地区土壤冻结日数随着海拔的升高呈现线性增长的趋势,海拔每升高100 m,季节冻土的冻结日数约增加4天。

冻结时长随海拔高度的变化主要是由气温引起。在影响土壤结冻融化的诸多因素中,气温是一个非常关键的因素,它不仅具有纬度地带性规律,还随着海拔的升高呈现明显变化^[29],气温随海拔呈现一定的递减规律^[13,30]。该地区年平均气温垂直递减率为0.50℃·(100m)⁻¹[图3(a)],土壤冻结期(11月至次年4月)气温垂直递减率为0.43℃·(100m)⁻¹[图3(b)]。气温直接影响土壤热力状况,进而影响季节冻土的物理状态。土壤冻结日数与土壤冻结期的日平均气温具有极显著负相关关系,相关系数为-0.985(P<0.01)。

土壤最大冻结深度对植物根系和动物冬眠等具有重大影响^[31],是描述季节冻土特征的重要参数。土壤冻结深度是土壤热力状况的反映,由于不同海拔高度的气象条件和地表覆被不同,土壤最大冻结深度也不同。图4中可以看出,随海拔上升,季节冻土最大冻结深度总体上呈上升趋势,且海拔每升高100 m,季节冻土最大冻结深度增加3.9 cm。但地处相对较高海拔的昭苏(1 854.6 m)的季节冻土最大冻结深度小于海拔相对较低的特克斯(1 210.6 m)。

2.2 积雪对季节冻土的影响

积雪是一种由空气、雪晶体和水构成的混合体,是一种低的热导体,较低的热传导性使积雪可以被认为是一种绝热体,具有高反射率和消融时需要大量相变热等特点。因此积雪在很大程度上影响了地面与大气之间的热交换过程。对各站点14个土壤冻融周期内数据进行相关性分析,得到伊

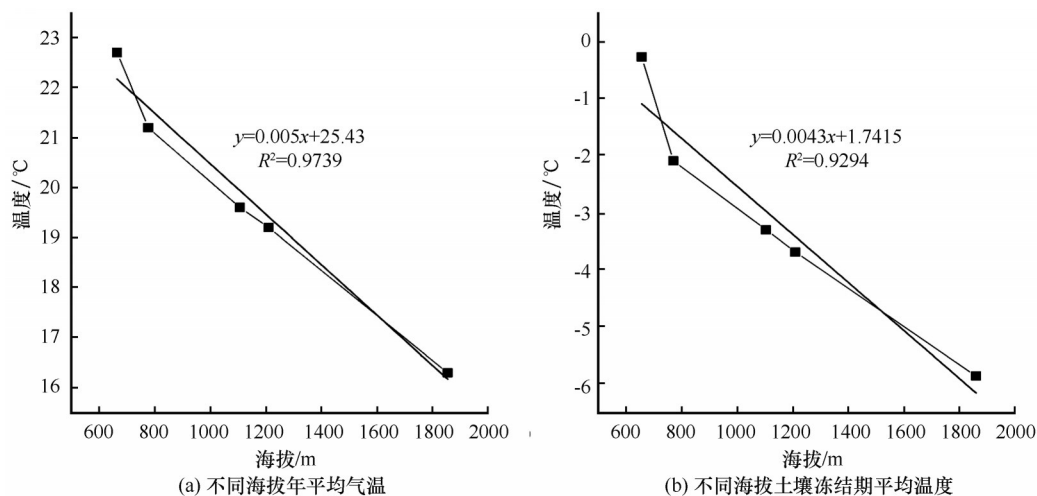


图3 不同海拔年平均气温(a)及不同海拔土壤冻结期平均温度(b)

Fig. 3 Variations of annual mean air temperature (a) and mean air temperature during soil freezing-thawing period (b) with elevation

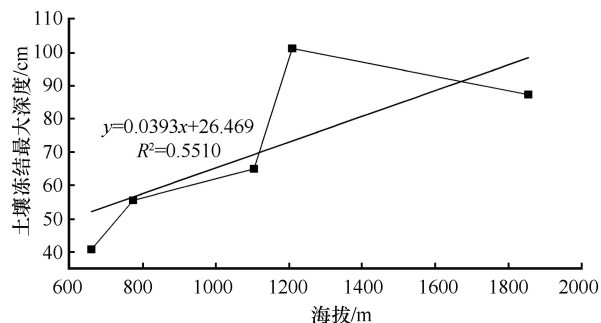


图4 不同海拔土壤冻结最大深度

Fig. 4 Maximum frozen depth changing with elevation

宁、巩留、尼勒克、特克斯和昭苏站最大雪深和土壤最大冻结深度的相关系数分别为-0.66、-0.29、-0.76、-0.28和-0.62,表明最大雪深和土壤最大冻结深度之间呈现负相关关系,即:最大雪深越大,对地表土壤的保温作用越明显,土壤最大冻结深度越浅。这一结果也被马虹等证实^[15]。土壤温度控制土壤最大冻结深度,土壤温度的变化主要由地表和大气之间的能量交换决定。在季节性积雪覆盖区,春冬两季季节性积雪的存在影响地表和大气间的热量传递,进而影响了土壤的温湿度^[8]。而积雪作为一种三相混合的绝热体,随着厚度的增加,其隔热作用越明显,土壤温度受到的影响越小。

对14个土壤冻融周期内各站点的积雪覆盖历时和土壤冻结日数进行相关性分析,得到伊宁、巩留、尼勒克、特克斯和昭苏站积雪覆盖历时与土壤冻结日数的相关系数分别为0.35、0.71、0.75、0.62和0.33,这一结果表明当积雪的覆盖历时越长,土壤冻结时长就越长。这归因于:长时间的积

雪覆盖阻隔了大气与土壤之间的热量交换;另外在春季,太阳辐射增强,气温回升,积雪开始融化,潜热效应^[9-10]延长了季节冻土的融化时间。

3 讨论

随着海拔高度的升高,温度逐渐降低,造成伊犁地区土壤最大冻结深度和土壤冻结日数整体呈现增长的趋势,但在海拔相对较高的地区出现土壤最大冻结深度随海拔升高呈现减小的反常现象。这种反常现象归因于不同地区积雪覆盖条件的差异。由于积雪为良好的热绝缘体,所以随着积雪厚度的增加,积雪对地表的保温效果明显增加。本研究结果显示最大雪深越大,对地表土壤的保温作用越明显,土壤最大冻结深度越浅。该结果与其他冻土区域的研究结果相一致。如有学者在美国阿拉斯加北部地区研究得出:在年积雪最大深度超过15 cm时,年最大积雪深度每增加1 cm,地表温度增加0.1℃^[16-17]。这表明积雪厚度对土壤的热机制具有重要的影响,尤其当积雪到达一定厚度时,对地表保温作用越明显,从而导致土壤最大冻结深度越浅。本研究显示积雪的覆盖历时越长,由于积雪具有较高反照率和积雪融化时的潜热效应导致积雪对地表土壤起到的制冷作用明显,从而导致冻土融化时间延长。综上所述,一定厚度的积雪会导致季节冻土的最大冻结深度和冻融历时呈现不同的变化趋势,表现为积雪越深则土壤最大冻结深度呈现下降趋势,而土壤冻结日数呈现上升趋势。

图5显示伊犁相对较高海拔地区的特克斯站(1210.6 m)在土壤冻融周期内平均积雪最大深度

(23.5 cm) 小于海拔相对更高的昭苏站(1 854.6 m) 的平均积雪最大深度(33.0 cm), 所以海拔较低的特克斯站的土壤平均最大冻结深度(102.9 m) 要高于海拔相对较高的昭苏站的土壤平均最大冻结深度(84.6 cm)(图4)。图6显示特克斯站的平均积雪覆盖历时为91天, 昭苏站的平均积雪覆盖历时为130天, 特克斯站的积雪覆盖历时短于昭苏站的积雪覆盖历时。积雪覆盖历时增加, 土壤冻结时长增加, 因为积雪厚度和积雪覆盖历时使得昭苏地区的季节冻土冻结日数要长于特克斯地区。另外根据图3(b)可知, 由于海拔的不同, 特克斯站土壤冻结期内日平均气温为 -3.7°C , 而地处较高海拔的昭苏站土壤冻结期内日平均气温为 -5.9°C 。由于土壤冻融期内日平均气温和土壤冻结冻结期日数呈极显著负相关, 在气温和积雪的双重作用下, 特克斯的土壤年平均冻结日数(126天)少于海拔相对较高的昭苏站点的土壤平均冻结日数(144天)。以上分析解释了伊犁地区地处较低海拔的特克斯站比较高海拔的昭苏站土壤最大冻结深度大, 而土壤冻结历时短。另外, 地处较高海拔的昭苏站位于温带草原自然植被带, 土壤类型为栗钙土, 腐殖质厚

度为10~30 cm^[26,28]。地处较低海拔的特克斯站位于温带荒漠草原自然植被带, 土壤类型为灰钙土, 腐殖质厚度为5~15 cm^[26,28]。植被覆盖度和腐殖质厚度越大, 季节冻土最大厚度越小^[32-33]。昭苏站的植被覆盖度和腐殖质厚度都大于特克斯站, 这也是地处较低海拔的特克斯站比地处较高海拔的昭苏站土壤最大冻结深度大的另一个原因。综上所述, 由于积雪覆盖和植被覆盖的影响, 在海拔相对较高的地区, 土壤最大冻结深度随海拔高度的升高呈现减小趋势, 而土壤冻结时长呈现增加趋势。在本研究中仅考虑了气温、积雪时长和最大雪深对冻土特征的影响, 忽略了微地形、水文条件、降水对冻土的影响。在后期的研究中将进一步考虑不同地形特征、初始降雪量和降雪时间对土壤最大冻结深度和冻结日数的影响。

4 结论

为了深入探讨中海拔地区季节冻土的空间分布变化规律和影响因素, 本文对伊犁地区5个站点2000—2014年的冻土、气温、积雪数据进行了分析, 得到以下结论:

(1) 在新疆伊犁地区, 土壤在每年11月开始冻结, 在次年4月基本完全融化, 不同海拔土壤冻结和融化时间不同。海拔相对较高区域的冻结时长大于海拔较低区域, 并且海拔每升高100 m, 土壤冻结时长增加4天。

(2) 土壤最大冻结深度整体上随海拔的升高以 $3.9\text{ cm}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ 的速度增加。但在海拔相对较高的地区出现土壤最大冻结深度随海拔升高而减小的趋势, 主要是受到了积雪厚度和地表植被覆盖的影响。

(3) 该地区土壤冻结时长与土壤冻结期的日平均气温呈现显著负相关, 相关系数为 $-0.98(P<0.05)$ 。积雪对冻土的影响表现为积雪覆盖历时越长, 土壤冻结日数就越长; 积雪最大雪深越深, 土壤的最大冻结深度越浅。

致谢: 本研究在数据收集与处理等方面得到中国科学院伊犁河流域生态系统研究站和天山积雪雪崩研究站的大力支持, 特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science press. 2000: 329—353. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版

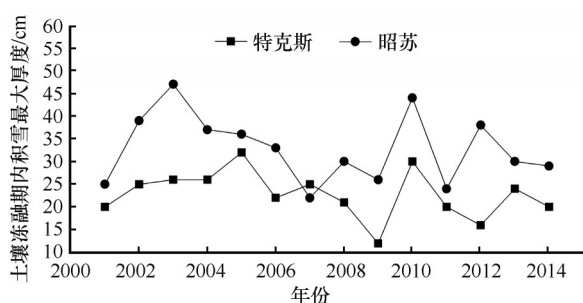


图5 特克斯(1 210.6 m)和昭苏(1 854.6 m)台站多年积雪最大厚度

Fig. 5 Annual variations of maximum snow cover depth at Tekesi (1 210.6 m) and Zhaosu (1 854.6 m)

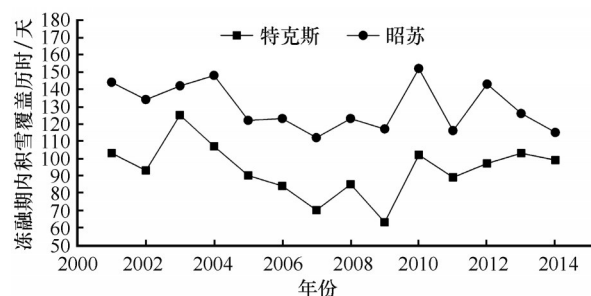


图6 特克斯(1 210.6 m)和昭苏(1 854.6 m)台站多年积雪覆盖历时

Fig. 6 Annual variations of snow cover duration at Tekesi (1 210.6 m) and Zhaosu (1 854.6 m)

- 社. 2000: 329 – 353.]
- [2] Cheng Bo, Li Jianping. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in china in recent 50 Years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2003, 32(3): 432 – 443. [陈博, 李建平. 近 50 年来中国季节性冻土与短时冻土的时空变化特征[J]. 大气科学, 2003, 32(3): 432 – 443.]
 - [3] Luo Dongliang, Jin Huijun, Lin Lin, et al. Degradation of permafrost and cold-environments on the interior and eastern Qinghai Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 538 – 546. [罗栋梁, 金会军, 林琳, 等. 青海高原中、东部多年冻土及寒区环境退化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 538 – 546.]
 - [4] Wang Shaoling, Zhao Xiufeng, Guo Dongxin, et al. Response of permafrost to climate change in the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18: 157 – 165. [王绍令, 赵秀峰, 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: 157 – 165.]
 - [5] Jin Huijun, Li Shuxun, Wang Shaoling, et al. Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2): 173 – 181. [金会军, 李述训, 王绍令, 等. 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, 55(2): 161 – 173.]
 - [6] Nan Zhoutong, Gao Zeshen, Li Shuxun, et al. Permafrost changes in the northern limit of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 30 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6): 817 – 823. [南卓桐, 高泽深, 李述训, 等. 近 30 年来青藏高原西大滩多年冻土变化[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 817 – 823.]
 - [7] Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(5): 525 – 531. [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.]
 - [8] Zhao Lin, Ping C L, Yang Daqing, et al. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China [J]. Global and Planetary Change, 2004, 43(1): 19 – 31.
 - [9] Zhang Tingjun. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview [J]. Reviews of Geophysics, 2005, 43(4): 1 – 23.
 - [10] Rödder T, Kneisel C. Influence of snow cover and grain size on the ground thermal regime in the discontinuous permafrost zone, Swiss Alps [J]. Geomorphology, 2012, 175: 176 – 189.
 - [11] Bense V F, Kooi H, Ferguson G, et al. Permafrost degradation as a control on hydrogeological regime shifts in a warming climate [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117(F3): 1 – 18.
 - [12] Osterkamp T E. Establishing long-term permafrost observatories for active-layer and permafrost investigations in Alaska: 1977 – 2002 [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2003, 14(4): 331 – 342.
 - [13] Luo Dongliang, Jin Huijun, Lin Lin, et al. New progress on permafrost temperature and thickness in the source area of the Huanghe River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(7): 898 – 904. [罗栋梁, 金会军, 林琳, 等. 黄河源区多年冻土温度及厚度研究新进展[J]. 地理科学, 2012, 32(7): 898 – 904.]
 - [14] Gao Rong, Wei Zhigang, Dong Wenjie. Analysis of the cause of the differential in interannual variation between snow cover and seasonal frozen soil in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2): 153 – 159. [高荣, 韦志刚, 董文杰. 青藏高原冬春积雪和季节冻土年际变化差异的成因分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 153 – 159.]
 - [15] Ma Hong, Hu Ruji. Effect on snow cover on thermal regime of frozen soil [J]. Arid Land Geography, 1995, 18(4): 23 – 27. [马虹, 胡汝骥. 积雪对冻土热状况的影响[J]. 干旱区地理, 1995, 18(4): 23 – 27.]
 - [16] Ling Feng, Zhang Tingjun. Impact of the timing and duration of seasonal snow cover on the active layer and permafrost in the Alaskan Arctic [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2003, 14(2): 141 – 150.
 - [17] Zhang Tingjun, Osterkamp T E, Stamnes K. Effects of climate on the active layer and permafrost on the North Slope of Alaska, USA [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1997, 8(1): 45 – 67.
 - [18] Wang Guoya, Mao Weiyi, He Bin, et al. Changes in snow covers during 1961 – 2011 and its effects on frozen ground in Altay region, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1293 – 1300. [王国亚, 毛伟峰, 贺斌, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1293 – 1300.]
 - [19] Zhang Shanqing, Pu Zongchao, Li Jinglin, et al. Response of the maximum depth of seasonal freezing to the cumulated negative temperature in Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1419 – 1427. [张山清, 普宗朝, 李景林, 等. 1961 – 2010 年新疆季节性最大冻土深度对冬季负积温的响应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1419 – 1427.]
 - [20] Wang Qiuxiang, Li Hongjun, Wei Rongqing, et al. Annual change and abrupt change of the seasonal frozen soil in Xinjiang, China during 1961 – 2002 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(6): 820 – 826. [王秋香, 李红军, 魏荣庆, 等. 1961 – 2002 年新疆季节冻土多年变化及突变分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 820 – 826.]
 - [21] Fu Chuanbo, Dan Li, Wu Jian, et al. Variation and abrupt change of maximum depth of frozen soil over Xinjiang under the background of global warming [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1410 – 1418. [符传博, 丹利, 吴润, 等. 全球变暖背景下新疆地区近 45a 来最大冻土深度变化及其突变分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1410 – 1418.]
 - [22] Zhan Hongxia, Qiu Hui. Analyze on frozen soil in Yili valley during 1962 – 2007 [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2009, 3(6): 34 – 36. [詹红霞, 邱辉. 1962 – 2007 年伊犁河谷冻土分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(6): 34 – 36.]
 - [23] Li Yang, Li Jiangang, Liu Yan, et al. Preliminary analysis on the characteristics of depth variation of snow accumulation and frozen soil in northern Xinjiang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 342 – 348. [李杨, 李健刚, 刘艳, 等. 北疆地区积雪与冻土变化的特征分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 342 – 348.]
 - [24] Wang Rongjun, Liu Zhihui, Li Chengzhi, et al. Impact of change in seasonal frozen soil moisture on snowmelt flood in snowmelt season [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4): 277 – 281. [王荣军, 刘志辉, 李诚志, 等. 融雪期季节性冻土湿度变化对融雪洪水的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 277 – 281.]
 - [25] Zhang Junmin. Study on temporal and spatial distribution of climate resource in Yili River Basin [J]. Arid Meteorology, 2006, 24(2): 1 – 4. [张军民. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 1 – 4.]
 - [26] Sun Huilan, Li Weihong, Yang Yuhui, et al. Soil organic car-

- bon changing with altitudes on the Ili Mountainous region[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(5): 603 – 608. [孙慧兰, 李卫红, 杨余辉, 等. 伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布[J]. *地理科学*, 2012, 32(5): 603 – 608.]
- [27] Li Yanhua, Gao Minghua, Xiao Jidong, et al. Comparison analysis of snow change characteristic in Yili region in recent 35 years[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2007, 1(2): 26 – 28. [李彦华, 高明华, 肖继东, 等. 伊犁地区近35年冬季积雪变化特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2007, 1(2): 26 – 28.]
- [28] Yang Ruihong, Wang Xinjun. The vertical distribution of vegetation patterns and soil properties at the northern slope of Ili River valley[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 12(6): 32 – 39. [杨瑞红, 王新军. 伊犁河谷山地北坡土壤特性及植被群落多样性垂直分布格局[J]. *水土保持研究*, 2016, 12(6): 32 – 39.]
- [29] Wang Yinxue, Zhao Lin, Li Ren, et al. Which control variation of permafrost table[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1064 – 1067. [王银学, 赵林, 李韧, 等. 影响多年冻土上限变化的因素探讨[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 1064 – 1067.]
- [30] Ding Mingjun, Li Lanhui, Zhang Yili. Temperature change and its elevation dependency on the Tibetan Plateau and its vicinity from 1971 to 2012[J]. *Resources Science*, 2014, 36(7): 1509 – 1518. [丁明军, 李兰晖, 张懿铨, 等. 1971 – 2012年青藏高原及周边地区气温变化特征及其海拔敏感性分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(7): 1509 – 1518.]
- [31] Guo Zhenggang, Niu Fujun, Zhan Hu, et al. Changes of grassland ecosystem due to degradation of permafrost frozen soil in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3294 – 3301. [郭正刚, 牛富俊, 湛虎, 等. 青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(8): 3294 – 3301.]
- [32] Nowinski N S, Taneva L, Trumbore S E, et al. Decomposition of old organic matter as a result of deeper active layers in a snow depth manipulation experiment[J]. *Oecologia*, 2010, 163(3): 785 – 792.
- [33] Hu Hongchang, Wang Genxu, Wang Yibo, et al. Response of soil heat-water processes to vegetation cover on the typical permafrost and seasonally frozen soil in the headwaters of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(7): 1225 – 1233. [胡宏昌, 王根绪, 王一博, 等. 江河源区典型多年冻土和季节冻土区水热过程对植被盖度的响应[J]. *科学通报*, 2009, 54(2): 242 – 250.]

Altitudinal distribution pattern of seasonally frozen ground and its influencing factors in the Ili basin, Xinjiang

HAO Jiansheng^{1,2}, ZHANG Fei Yun^{1,3}, HUANG Farong^{1,4}, LI Lanhai^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Faculty of Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 4. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on the observation of seasonally frozen ground, snow cover and temperature during 2000 – 2014 from various representative meteorological stations in the Ili basin, using linear regression and correlation analysis, the variation of seasonally frozen ground along altitude and the influence of temperature and snow cover depth on seasonally frozen ground in the Ili basin were analyzed. The results showed that the ground starts freezing in November and thawed completely in April of the next year in the prefecture. The seasonally frozen duration and maximum frozen depth of the ground increases with the rates of $4 \text{ d} \cdot (100\text{m})^{-1}$ and $3.9 \text{ cm} \cdot (100\text{m})^{-1}$, respectively, with altitude. The seasonally frozen duration of the ground shows a significant negative correlation to the average temperature during soil freezing period ($R=-0.98$, $P<0.05$). The frozen duration of the ground is positively correlated with the duration of snow cover, and the maximum frozen depth of the ground is negatively correlated with the maximum snow depth. The temperature decreases with the increase of altitude, which leads to the overall increase of maximum frozen depth of the ground and the frozen duration of the ground in the Ili basin. However, the maximum frozen depth of the ground shows decreases with the increase of altitude in the relatively high altitude region due to the influence of relatively thick snowpack. The results of the study will provide help for the research on the response of seasonally frozen ground distribution to climate change in the Ili basin, thus helping ecological planning, water resources management and agricultural development to formulate adaptive climate change countermeasures.

Key words: Xinjiang; the Ili basin; seasonally frozen ground; altitude; snow cover

(责任编辑: 赵林; 编辑: 周成林)