

新疆开都河流域季节性冻土特征的控制和影响因子分析

张飞云¹, 郝建盛², 黄法融^{2,3}, 李兰海^{2,3}

(1.新疆农业大学管理学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2.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;3.中国科学院中亚生态环境研究中心,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:全球变暖使季节性冻土范围逐渐缩小,而季节性冻土对春季径流,尤其是春季洪峰的影响使得该方面的研究更为重要。为了分析季节性冻土广泛分布的山区不同海拔高度条件下季节性冻土发育和融化期影响因子的差异,采用通径分析方法对开都河流域不同海拔高度季节性冻土最大冻结深度和解冻日数的影响因子进行了分析。结果表明,不同海拔高度这两者的影响因子差异不大,但其控制因子存在差异。季节性冻土最大冻结深度的控制因子由低海拔处的负积温和最大积雪深度转为中高海拔处的平均相对湿度;解冻日数的控制因子由低海拔处的平均风速和最大冻结深度转变为高海拔处的平均相对湿度。该差异主要由不同海拔高度的地理位置和局地气候条件等决定。

关键词:季节性冻土;控制因子;海拔高度;开都河流域

中图分类号:P642.14

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)04-0012-07

1 引言

冻土是气候变化的灵敏感应器。随着全球气候变化和人类活动的增强,多年冻土普遍在退化,季节性冻土的范围也在缩小^[1-4]。由冻土退化引起的生态问题和水文效应逐渐引起人们的关注^[5-7]。季节性冻土的存在和动态变化会影响以积雪融水为重要补给源的山区河流春夏季洪峰的变化^[8,9],从而改变径流的季节动态^[10],对季节性冻土的冻结融化作用研究尤为重要。

季节性冻土的发育和消融受多种因素影响。气温决定土的冻结深度和冻融历时^[8,11]。土的最大季节冻结深度的变化还与太阳辐射的变化关系密切^[12]。积雪的雪深、密度和深霜等结构发育对土的冻融过程产生明显的影响^[12-14],且该影响与云层关系密切。在寒冷、干燥和晴空条件下,积雪表面的高反射率会使地表温度降低,形成逆温层^[15],进而影响土壤的冻结融化过程。土的冻深不仅与雪深等有关,还与负积温有关^[16,17]。例如,新疆北部土的平均冻深随着日小时负积温临界值的增加而减少^[18]。土的冻结也受风速的影响;风速的增

加会促进土的冻结。土的散热特性对冻深则起削弱或加强作用;土壤的散热性能大小与地形、植被、腐殖质含量、太阳入射角度、大气相对湿度等有着显著的关系^[19]。土融化时间受冻深的影响;冻结越深,需要的融化时间越长。季节性冻土的发育和消融受多种因素影响。因而,许多研究从区域性差异造成的土的质地、含水量和含盐量等方面考虑^[11]。在气候条件(气温、相对湿度、云量、风速、光照等)对季节性土的冻融影响的研究中,许多学者多研究一种或几种气候要素对季节冻融的影响。气候条件对季节性土的冻融过程影响缺乏系统性研究。

目前对季节性冻土的研究多是集中在季节性冻土对径流^[20],融雪水^[21]的影响,以及季节性冻土本身的冻融过程分析^[22,23]。系统地对季节性冻土的影响因子进行研究的较少,少量的影响因子分析多是集中在季节性冻土内部微观层面上^[24],或者是在分析季节性冻土的冻融过程时简单地对其影响因子进行分析。而在季节性冻土广泛分布的山区,由于海拔的差异而引起的整个气候条件的变化对季节性冻土产生的影响,以

收稿日期:2017-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41401030);中国科学院“西部青年学者”B类项目(2016-QNXZ-B-13)

作者简介:张飞云(1987-),女,山西晋城人,博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail:feiyun42265@126.com

通讯作者:李兰海(1964-),男,江西赣州人,研究员,博士,主要从事积雪水文研究。E-mail:lilh@ms.xjb.ac.cn

及各气候要素对不同海拔季节性冻土冻融的影响差异都没有进行深入的分析。基于该问题,本研究拟通过途径分析的方法,分析开都河流域不同海拔高度季节性冻土冻融过程中土壤最大冻结深度和解冻日数的影响因子和控制因子的差异,揭示不同海拔高度条件下,各气候要素对季节性冻土影响的差异。该研究将为气候变化背景下,山区季节性冻土变化研究提供一定的参考。

2 研究区概况及方法

2.1 研究区概况

开都河流域(如图 1)位于新疆天山南坡,介于 82°58′~86°05′E 和 42°14′~43°21′N 之间,包括和静、和硕、焉耆、博湖等县,面积约 2.2×10⁴km²。开都河发源于中国境内天山中部的萨尔明山(海拔 5 000m asl)。干流自东向西经过巴音布鲁克水文站,而后转向东南流至呼斯台西里,经大山口水文站出山,最终流入博斯腾湖(海拔 1 048m)。开都河全长约 610km,是天山南坡水量最丰富的河流之一,对新疆巴音郭楞蒙古自治州经济发展和生态环境建设有着极其重要的意义。开都河流域冰川面积约 445km²[25],占出山口以上流域面积的 2.36%。开都河流域内永久冻土分布较小,但季节性冻土广泛分布。

位于开都河流域内的国家气象站有巴音布鲁克、巴伦台、和静、焉耆、和硕、轮台、尉犁、库尔勒以及博湖站。在这 9 个站中,本研究选取数据系列齐全的(1960~2011 年)巴音布鲁克、和静以及库尔勒站的数据对开都河流域土壤冻结融化过程的影响因子进行分析。所用数据均为日数据,来自于中国气象局国家气象中心。

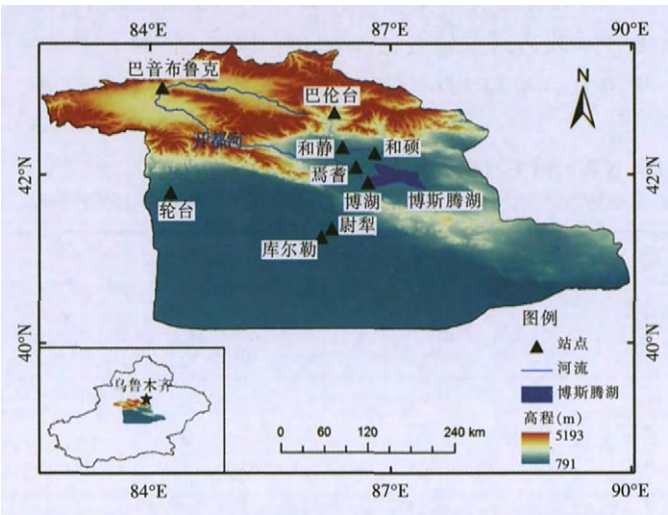


图 1 研究区(开都河流域)概况
Fig.1 The location of the study area(Kaidu River basin)

2.2 季节性冻土最大冻结深度和解冻日数的影响因子

为了研究最大冻结深度和解冻日数与其影响因子之间的关系,设定从 9 月份开始连续 5d 及以上气温小于 0℃的那天到季节性冻土的最大冻结深度那天被定义为季节性冻土发育期(以下简称发育期),冻结时段的下一天到土壤完全融化为季节性冻土融化期(以下简称融化期),融化期结束后到发育期开始前称为完全融化期,该阶段没有季节性冻土(如图 2)。

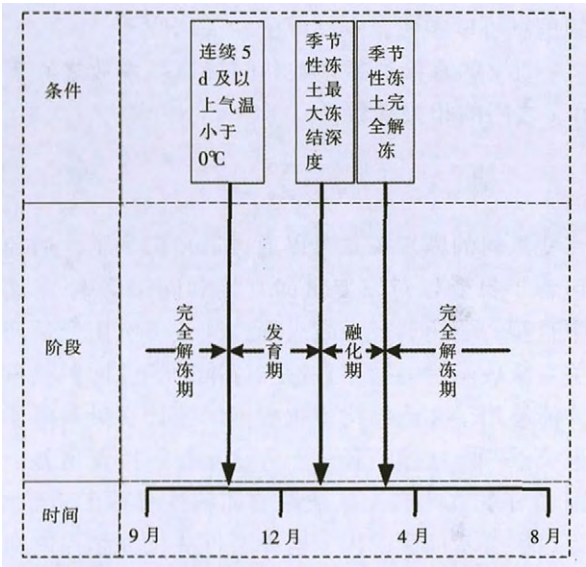


图 2 季节性冻土发育-融化-完全消融过程示意图
Fig.2 The process of the seasonal frozen soil developing-melting-complete ablation process

影响季节性冻土发育和融化的气候因素有许多,但在不同海拔条件下各影响因子的影响程度不同,综合前人对季节性冻土发育和融化影响因子的研究,本文选取发育期的负积温(x_1)、平均相对湿度(x_2)、平均总云量(x_3)、最大积雪深度(x_4)、平均风速(x_5)、平均日照时数(x_6)以及土壤冻结时间(x_7)作为影响季节性冻土最大冻结深度(the maximum frozen depth, FD)的影响因子。选取融化期的正积温(x_8)、平均相对湿度(x_9)、平均总云量(x_{10})、最大积雪深度(x_{11})、平均风速(x_{12})、平均日照时数(x_{13})以及最大冻结深度(x_{14})作为影响季节性冻土解冻日数(thawing days, TD)的影响因子。其中,土的冻结时间可以反映先积雪还是先冻结对冻深的影响,通过从 9 月 1 日到第一次积雪时的天数减去 9 月 1 日到土壤第一天冻结时的天数得到。当计算得到的土的冻结时间为正值时,表明先冻结后积雪;当土的

冻结时间为负值时,表明先积雪后冻结。土壤解冻日数指季节性冻土完全解冻所需日数。

2.3 通径分析方法

通径分析方法是回归分析方法的扩展。该方法不仅可以区分自变量对因变量的直接影响和间接影响,还可以区分自变量和因变量之间的相关关系和因果关系^[26],明确数据的因果结构^[27]。假设有 n 个自变量 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 以及一个因变量 y , 任意两个自变量之间的相关系数为 r_{ij} , x_i 到 y 的直接通径系数为 p_{yi} 。 x_i 通过 x_j 对 y 的间接通径系数为 $r_{ij} \times p_{yj}$ 。通径系数计算过程的详细信息可以参考张玉铭等的相关研究^[28]。

x_i 对 y 的直接通径系数和间接通径系数之和等于 x_i 和 y 之间的相关系数:

$$r_{iy}=p_{yi}+\sum_{j=1}^nr_{ij}p_{yj}$$

变量间的因果关系可以通过通径图表示, 通径图中包含了自变量对因变量的直接和间接影响^[29], 通径图中直接影响用通径系数表示, 间接影响用变量间的相关系数展示。“通径系数”是“标准的线性回归权重系数, 能够用于验证结构方程模型的统计变量间可能的因果关系”^[30]。通过通径分析方法不仅可以得出各个影响因子对季节性冻土冻结深度和解冻日数的贡献率, 还可以区分不同影响因子对季节性冻土冻结深度和解冻日数的直接和间接影响。

3 结果和结论

3.1 季节性冻土最大冻结深度、解冻日数及相应影响因子的变化

通过 Mann-kendall 趋势分析, 1960~1996 年或 2005 年各站 FD 和 TD 与各影响因子的变化情况见表 1。 随时间的推移, 和静站的 FD 呈现显著增加趋势, 而巴

音布鲁克站和库尔勒站呈现不显著的减小趋势。3 个站 TD 随着时间的变化趋势存在差异: 海拔最高的巴音布鲁克站 TD 随着时间的变化呈显著增加趋势, 和静站随着时间的变化增加趋势不显著, 而海拔最低的库尔勒站随着时间的变化呈显著减小趋势。

在发育期, 影响 FD 的所有指标在不同海拔高度变化一致; 而在融化期, 影响 TD 的各指标在不同海拔具有明显差异, 主要体现在: 平均总云量和最大积雪深度在不同海拔高度变化一致, 平均相对湿度和平均风速在和静站和库尔勒站的变化趋势一致, 而海拔相对较高的巴音布鲁克站与其他两个站完全相反。

2000~2011 年巴音布鲁克站、和静站以及库尔勒站的平均 FD 分别为 250 cm 以上、104 cm 和 49 cm; 平均 TD 分别为 87d、11d 和 2d。随着海拔高度的升高, FD 和 TD 均出现增加的趋势。

3.2 土壤最大冻结深度的通径分析

3 个站点各个影响因子与 FD 的通径分析结果如表 2, 图 3 为相应的通径图。在海拔最高的巴音布鲁克站, 平均相对湿度与 FD 存在显著相关性 ($p<0.05$), 但它们之间的直接通径系数尽管最大, 但并不显著; 平均风速的直接通径系数最小。从各因素与 FD 的间接通径系数可以发现, 各因子均可以通过影响平均相对湿度对 FD 产生影响, 且间接通径系数均大于等于 0.200。

在和静站, 平均相对湿度和平均风速与 FD 之间的相关系数均存在极显著相关性 ($p<0.01$)。而各因子与 FD 的直接通径系数中, 只有平均湿度的直接通径系数达到了显著性 ($p<0.05$) 水平。各因子中除了平均总云量与 FD 的直接通径系数最小 (-0.045) 外,

表1 开都河流域三个站FD和TD与各影响因子的变化趋势
Table1 The changes in FD (cm) and TD (in days) with their influencing factors at the 3 selected stations in the Kaidu River basin

	站点	FD	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	Z
变化趋势	巴音布鲁克		*	*		—	*	*		
	和静	*	*	*		—	*	*		
	库尔勒		*	*		—	*	*		*
	站点	TD	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	
变化趋势	巴音布鲁克	*	*			—	*			
	和静		*	*		—	*	*		
	库尔勒	*		*		—	*	*	*	

注: —:不显著增加; *:在 0.05 水平上显著增加; :不显著减小; *:在 0.05 水平上显著减小; —:不显著变化; Z:季节性冻土的冻结时间。

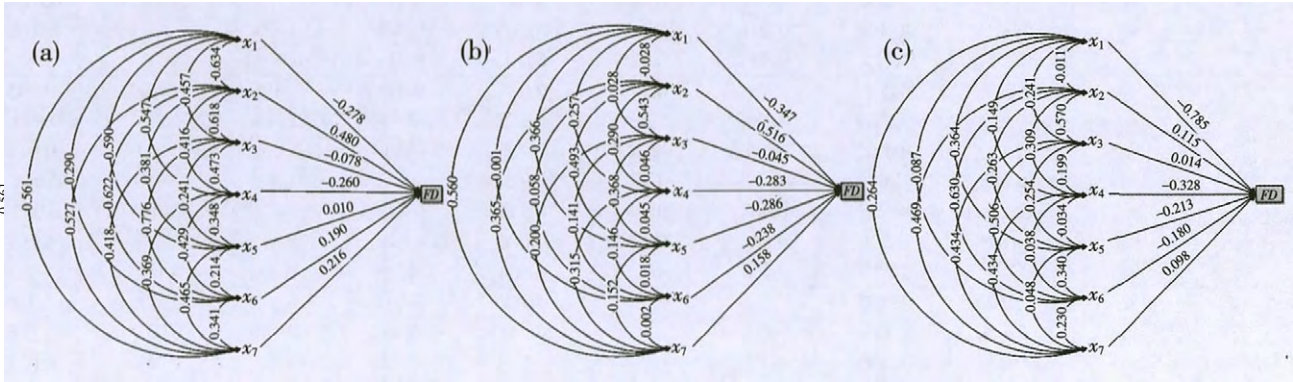
其他各因子的直接通路系数均大于 0.150。平均总云量能够通过平均相对湿度对 *FD* 产生间接影响, 其间接通路系数为 0.280; 同时, 平均风速和土壤冻结时间也能够通过平均相对湿度对 *FD* 产生间接影响。

在海拔最低的库尔勒站, 负积温和 *FD* 之间存在极显著相关性 ($p<0.01$), 相关系数为-0.653; 负积温和 *FD* 的直接通路系数也达到了极显著水平 ($p<0.01$), 直接通路系数为-0.785, 最大积雪深度和 *FD* 的直接通路系数达到了显著水平 ($p<0.05$), 直接通路系数为-0.328。平均总云量、平均风速和土壤冻结时间均可以通过影响负积温对 *FD* 产生影响, 其间接通路系数分别为 0.189、0.285 和-0.207。

表2 开都河流域3个站*FD*与各影响因子的通路分析结果
Table2 Path analysis of *FD* and its influencing factors at the stations of Bayinbuluk, Hejing and Kuerle in the Kaidu River basin

站点		相关系数	直接通路系数	间接通路系数						
				x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
巴音布鲁克站	x_1	-0.222	-0.278		-0.304	0.035	0.142	0.006	0.055	0.122
	x_2	0.262*	0.480	0.176		-0.048	-0.108	-0.006	-0.118	-0.114
	x_3	-0.017	-0.078	0.127	0.297		-0.123	-0.002	-0.148	-0.090
	x_4	-0.110	-0.260	0.152	0.200	-0.037		-0.004	-0.082	-0.080
	x_5	-0.182	0.010	-0.164	-0.278	0.019	0.091		0.041	0.101
	x_6	0.059	0.190	-0.081	-0.298	0.060	0.111	0.002		0.074
	x_7	0.005	0.216	-0.156	-0.253	0.032	0.096	0.005	0.065	
和静站	x_1	-0.097	-0.347		-0.015	-0.001	0.073	0.105	0.000	0.089
	x_2	0.516**	0.516#	0.010		-0.024	-0.082	0.141	0.014	-0.058
	x_3	0.253	-0.045	-0.010	0.280		-0.013	0.105	-0.033	-0.032
	x_4	-0.075	-0.283	0.089	0.149	-0.002		-0.013	0.035	-0.050
	x_5	-0.438**	-0.286	0.127	-0.254	0.016	-0.013		-0.004	-0.024
	x_6	-0.238	-0.238	0.000	-0.030	-0.006	0.041	-0.005		0.000
	x_7	-0.083	0.158	-0.194	-0.188	0.009	0.089	0.044	0.000	
库尔勒站	x_1	-0.653**	-0.785##		-0.001	-0.003	0.049	0.077	-0.016	0.026
	x_2	-0.073	0.115	0.009		0.008	-0.101	0.056	-0.114	-0.046
	x_3	0.016	0.014	0.189	0.065		-0.065	-0.054	-0.091	-0.043
	x_4	-0.215	-0.328#	0.117	0.035	0.003		0.007	-0.007	-0.043
	x_5	0.114	-0.213	0.285	-0.030	0.004	0.011		0.061	-0.005
	x_6	0.131	0.180	0.068	-0.072	-0.007	0.013	-0.072		0.023
	x_7	0.025	0.098	-0.207	-0.054	-0.006	0.143	0.010	0.041	

注:**表示相关系数在 0.01 水平上显著相关;*表示相关系数在 0.05 水平上显著相关;##表示通路系数在 0.01 水平上显著;#表示通路系数在 0.05 水平上达到显著。下同。



注: $x_i \leftrightarrow x_j$ 表示 x_i 和 x_j 的相关系数, $x_i \rightarrow FD$ 表示因子 x_i 对季节性冻土最大冻结深度的直接通路系数。

图3 开都河流域巴音布鲁克站(a)、和静站(b)以及库尔勒站(c)的 *FD* 通路图
Fig.3 The path of *FD* at the selected three stations (Bayinbuluk (a), Hejing (b) and Kuerle (c)) in the Kaidu River basin

由以上分析可知,不同站点由于海拔高度的不同导致气候条件存在一定差异,使得各个站点 FD 的控制因子存在差异。巴音布鲁克站位于海拔较高的山区,是干旱半干旱地区河流的发源地,空气相对湿度较高。由于海拔较高所以气温较低,日照时数长,这些条件均有利于季节性冻土的发育。并且巴音布鲁克站积雪深度较大,积雪历时长,对先结冻后积雪的巴音布鲁克站季节性冻土的持续时间有促进作用。和静站和库尔勒站位于开都河出山口以下地区,地处绿洲,由于海拔较低且受人类活动的影响,水分散失较快,使得季节性冻土的发育程度不及巴音布鲁克站。其中库尔勒站海拔最低,季节性冻土发育最低气温较高,使得冻结期负积温较高,最大积雪厚度较小,负积温和最大积雪深度成为制约 FD 的主要因子。

3.3 季节冻土解冻日数的通径分析

三个站点 TD 的通径分析结果如表 3(通径图略)。由表 3 可知,3 个站 TD 的影响因子及对 TD 的直接作用的显著程度不一:

- (1) 巴音布鲁克站只有平均相对湿度、平均总云量、平均日照时数以及最大冻结深度对 TD 有直接或间接影响。平均相对湿度(x_9)与 TD 的直接作用在 0.05 水平上达到了显著水平。
- (2) 和静站七个影响因子均对 TD 有直接或间接

影响,平均日照时数(x_{13})与 TD 的直接作用都在 0.05 水平上达到了显著水平

(3) 库尔勒站除最大积雪深度外,其余影响因子均对 TD 有直接或间接影响,但平均风速(x_{12})和最大结冻深度(x_{14})与 TD 的直接作用在 0.01 水平上达到了显著水平。

制约三个站点 TD 的影响因子及其显著水平的主要原因是不同站点的地理位置、海拔高度以及局地气候条件等。

孙广友等对大小兴安岭多年冻土的主导成因进行了系统分析^[16],但对于季节性冻土,只是在分析冻融过程或对径流、融雪水的影响等方面简单地提到了一些相关的影响因子^[11-12, 14, 20-23],缺乏系统地分析。本研究系统地对季节性冻土发育和融化过程中的影响因子进行了分析,并确定了不同海拔高度最大冻结深度和解冻日数的控制因子的差异。

4 结论

气候变化条件下季节性冻土严重退缩,以及季节性冻土对春季径流和春季洪峰的影响决定了山区季节性冻土研究的紧迫性。山区不同海拔高度下季节性冻土发育和融化期影响因子和控制因子的差异对季节性冻土有重要影响。本研究采用通径分析的方法,

表3 开都河流域三个站点TD与各影响因子的通径分析结果
Table3 Path analysis of TD and its influencing factors at the 3 selected stations in the Kaidu River basin

站点		相关系数	直接通径系数	间接通径系数						
				x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
巴音布鲁克站	x_8	0.015	-0.029		0.108	-0.015	0.001	-0.018	0.004	-0.002
	x_9	-0.287*	-0.436#	0.007		0.070	-0.007	0.011	0.074	0.008
	x_{10}	0.100	0.184	0.002	-0.165		0.006	-0.017	0.062	0.004
	x_{11}	-0.146	-0.094	0.000	-0.031	-0.012		0.007	0.001	0.005
	x_{12}	0.057	-0.065	-0.008	0.072	0.049	0.010		0.033	0.025
	x_{13}	0.021	-0.146	0.001	0.219	-0.077	0.001	0.015		0.011
	x_{14}	0.213	0.115	0.009	0.021	0.046	0.014	0.019	-0.014	
和静站	x_8	0.043	0.005		0.245	0.013	0.017	-0.126	-0.107	-0.003
	x_9	-0.051	-0.539	-0.002		-0.029	-0.030	0.193	0.311	0.045
	x_{10}	-0.156	-0.065	-0.001	-0.241		-0.014	0.126	0.051	-0.012
	x_{11}	-0.068	-0.078	-0.001	-0.205	-0.011		0.063	0.119	0.044
	x_{12}	0.055	-0.258	0.003	0.404	0.032	0.019		-0.146	0.002
	x_{13}	-0.313*	-0.526#	0.001	0.318	0.006	0.018	-0.072		-0.059
	x_{14}	0.237	0.220	0.000	-0.110	0.004	-0.016	-0.002	0.141	
库尔勒站	x_8	-0.265*	-0.135		-0.023	-0.045	0.004	-0.049	-0.001	-0.016
	x_9	-0.128	0.183	0.017		-0.090	-0.014	-0.148	0.031	-0.108
	x_{10}	-0.090	-0.195	-0.031	0.084		-0.008	0.107	0.017	-0.064
	x_{11}	-0.051	-0.045	0.011	0.057	-0.034		0.002	0.018	-0.059
	x_{12}	0.715**	0.640##	0.010	-0.042	-0.033	0.000		-0.030	0.170
	x_{13}	0.315*	-0.082	-0.002	-0.069	0.040	0.010	0.237		0.180
	x_{14}	0.622**	0.382##	0.006	-0.052	0.033	0.007	0.285	-0.039	

对开都河流域不同海拔高度三个站点季节性冻土发育和融化期的最大冻结深度和解冻日数的影响因子和控制因子进行了分析,得出如下结论:

(1) 不同海拔高度季节性冻土最大冻结深度和冻土解冻日数的影响因子差异不大;

(2) 随着海拔高度的升高,季节性冻土最大冻结深度的控制因子由海拔最低处的负积温和最大积雪深度,转为中高海拔处的平均相对湿度;

(3) 随着海拔高度的升高,季节性冻土解冻日数的控制因子由海拔最低处的平均风速和最大冻结深度,转变为中海拔处的平均日照时数,高海拔处的平均相对湿度。

季节性冻土的分布范围较广,从季节性冻土出现地带到永久冻土的过渡区域均存在,涉及海拔高度差异较大。由于数据方面的缺失,本研究仅采用了三个站点对季节性冻土的控制因子进行了分析,且海拔高度差距不是很大。为了弥补数据缺失方面的差异,在未来的研究中可以考虑通过遥感、数值模拟等方法解决季节性冻土数据不足的问题,从而为季节性冻土研究和融雪径流模拟提供数据支持。

参考文献:

- [1] Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming[J]. *Climatic Change*, 2005, 68(1-2): 135-152.
- [2] 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*, 2008,32(3):432-443. (CHEN 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 Sciences*, 2008,32(3): 432-443.(in Chinese))
- [3] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应[J]. *山地学报*, 2004,22(3):278-285. (YANG Jianping, DING Yongjian, CHEN Rensheng, et al. Permafrost change and its effect on eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Journal of Mountain Science*, 2004,22(3):278-285. (in Chinese))
- [4] 马东涛, 张金山, 王蒙, 等. 新藏公路新疆段多年冻土特征及其灾害初探[J]. *山地学报*, 2004,22(5):554-561. (MA Dongtao, ZHANG Jinshan, WANG Meng, et al. Characteristics and hazards of permafrost along the Xinjiang-Tibetan highway, Xinjiang[J]. *Journal of Mountain Science*, 2004,22(5):554-561. (in Chinese))
- [5] Etzelmüller B. Recent advances in mountain permafrost research[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2013,24(2):99-107.
- [6] Woo M K, Kane D L, Carey S K, et al. Progress in permafrost hydrology in the new millennium [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008,19(2):237-254.
- [7] Yang M, Nelson F E, Shiklomanov N I, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: a review of recent research [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010,103(1): 31-44.
- [8] Zhang F, Li L, Ahmad S, et al. Using path analysis to identify the influence of climatic factors on spring peak flow dominated by snowmelt in an alpine watershed [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014,11(4):990-1000.
- [9] Zhang F, Ahmad S, Zhang H, et al. Simulating low and high streamflow driven by snowmelt in an insufficiently gauged alpine basin [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016,30(1):59-75.
- [10] Zhang F, Bai L, Li L et al. Sensitivity of runoff to climatic variability in the northern and southern slopes of the middle Tianshan mountains[J]. *Journal of Arid Land*, 2016,8(5):681-693.
- [11] 李超, 刘建军, 程建军, 等. 季节性冻土地区土壤冻结深度的研究[J]. *低温建筑技术*, 2009,31(10):81-83. (LI Chao, LIU Jianjun, CHENG Jianjun, et al. Research of ground frozen depth in seasonally frozen areas[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2009,31(10):81-83. (in Chinese))
- [12] 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. (MA Hong, HU Ruji. Effects of snow cover on thermal regime of frozen soil[J]. *Arid Land Geography*, 1995,18(4):23-27. (in Chinese))
- [13] 王晓巍. 北方季节性冻土的冻融规律分析及水文特性模拟[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010. (WANG Xiaowei. Study of Soil Freezing and Thawing Law and Simulation of Hydrologic Properties in the Northern Seasonally Frozen Soil Area [D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2010. (in Chinese))
- [14] 付强, 马效松, 王子龙, 等. 稳定积雪覆盖下的季节性冻土水分特征及其数值模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2013,11(1):151-154. (FU Qiang, MA Xiaosong, WANG Zilong, et al. Characteristics and numerical simulation of moisture in seasonal frozen soil under the stable snow cover [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science Technology*, 2013,11(1):151-154. (in Chinese))
- [15] Serreze M C, Schnell R C, Kahl J D. Low-level temperature inversions of the Eurasian Arctic and comparisons with Soviet drifting station data[J]. *Journal of Climate*, 1992,5(6):615-629.
- [16] 孙广友, 于少鹏, 王海霞. 大小兴安岭多年冻土的主导成因及分布模式[J]. *地理科学*, 2007,27(1):68-74. (SUN Guangyou, YU Shaopeng, WANG Haixia. Causes, south borderline and subareas of permafrost in Da Hinggan mountains and Xiao Hinggan mountains [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007,27(1):68. (in Chinese))
- [17] 张志忠. 天山巩乃斯河谷季节性积雪的温度及其与土冻深的关系[J]. *冰川冻土*, 1987,9(1):69-79. (ZHANG, Zhizhong. Preliminary research on temperature regime in seasonal snow cover and its relation to frost penetration depth in Gongnaisi valley, Tianshan mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987,(9)1: 69-79. (in Chinese))
- [18] 白磊, 李兰海, 李倩, 等. 新疆北疆地区季节性冻土冻结过程与日积

- 温的关系[J]. 冰川冻土, 2012,34(2):328–335. (BAI Lei, LI Lanhai, LI Qian, et al. Relationship between soil's seasonal freezing process and daily accumulative hourly temperature in northern Xinjiang region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012,34(2):328–335. (in Chinese))
- [19] 郑秀清,樊贵盛,邢述彦. 水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M]. 北京: 地质出版社, 2002.(ZHENG Xiuqing, FAN Guisheng, XING Shuyan. Water Movement in the Unsaturated Seasonal Freeze–thaw Soil[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [20] 习阿幸,刘志辉,卢文君. 干旱区季节性冻土冻融状况及对融雪径流的影响[J]. 水土保持研究, 2016,23(2):333–339. (XI Axing, LIU Zhihui, LU Wenjun. Processes of seasonal frozen soil freezing thawing and impact on snowmelt runoff in arid area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(2):333–339. (in Chinese))
- [21] 魏天锋,刘志辉,王元. 积雪覆盖下的季节性冻土对融雪水出流的影响[J]. 干旱区研究, 2015,32(3):435–441. (WEI Tianfeng, LIU Zhihui, WANG Yuan. Effect on snowmelt water outflow of snow–covered seasonal frozen soil [J]. Arid Zone Research, 2015,32(3): 435–441. (in Chinese))
- [22] 张盟. 季节性冻土水文特性及冻层土壤水分运移规律研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2016. (ZHANG Meng. Hydrological Characteristics of Seasonal Frozen Soil and the Study of Soil Water Movement in Frozen Soil [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2016. (in Chinese))
- [23] 王敬哲,刘志辉,王岚,等. 天山北坡融雪期季节性冻土融化过程分析[J]. 干旱区研究, 2017,34(2):282–292. (WANG Jingzhe, LIU Zhihui, WANG Lan, et al. Thawing process of seasonal frozen soil on northern slope of the Tianshan mountains during snowmelt period[J]. Arid Zone Research, 2017,34(2):282–292. (in Chinese))
- [24] 胡铭. 天山北坡季节性冻土冻融过程及影响因子分析——以军塘湖流域为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013. (HU Ming. Seasonal Frozen Soil Frozen–thaw Process and the Analysis of Impact factors in the North Slope of Tianshan Mountain [D]. Urumchi: Xinjiang University, 2013. (in Chinese))
- [25] 李宇安,谭芃,姜逢清,等. 20 世纪下半叶开都河与博斯腾湖的水文特征[J]. 冰川冻土, 2003,25(2):215–218. (LI Yuan, TAN Yuan, JIANG Fengqing, and et al. Study on hydrological features of the Kaidu River and the Bosten Lake in the second half of 20th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003,25(2):215–218. (in Chinese))
- [26] Wright S. The method of path coefficients [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1934,5(3):161–215
- [27] Kozak M, Kang M. Note on modern path analysis in application to crop science[J]. Communications in Biometry and Crop Science, 2006,1(1): 32–34.
- [28] 张玉铭,毛任钊,胡春胜,等. 华北太行山前平原土壤肥力状况与玉米产量相关关系的通径分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2004,22(3): 51–55. (ZHANG Yuming, MAO Renzhao, HU Chunsheng, et al. Path analysis on the relationship between soil fertility and maize production in the north China plain located in front of Taihang mountain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004,22(3): 51–55. (in Chinese))
- [29] 张全德,胡秉民. 农业试验统计模型和 BASIC 程序[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1985. (ZHANG Quande, HU Bingmin. Agricultural Experiment Statistical Model and BASIC Procedures [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1985. (in Chinese))
- [30] Wright S. Correlation and causation[J]. Journal of Agricultural Research, 1921,20(7):557–585

Controlling and Influencing Factors on the Basic Features of Seasonally Frozen Soil in Kaidu River Basin

ZHANG Feiyun¹, HAO Jiansheng², HUANG Farong^{2,3}, LI Lanhai^{2,3}

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

Abstract: The extent of seasonally frozen soil is shrinking under global warming. The influence of seasonally frozen soil on spring runoff, especially on the spring peak flow is making the concerned study necessary. In order to analyze the influence and controlling factors of seasonally frozen soil in the mountain areas with different elevation, this study used the path analysis method to analyze the influence and controlling factors of the maximum depth of frost penetration and thawing days in the Kaidu River basin. The results indicate that the influencing factors of the maximum depth of frost penetration and thawing days are similar under different elevation, while the controlling factors are different. The controlling factors of the maximum depth of frost penetration change from the negative accumulative temperature and maximum snow depth in lower elevation to average relative moisture in middle and high elevation. The controlling factor of the thawing days change from the average wind speed and maximum frozen depth in lower elevation to average relative moisture in high elevation. The difference is primarily determined by the geophysical condition and local climate condition in different elevations.

Key words: seasonally frozen soil; controlling factor; elevation; Kaidu River basin