

新疆阿勒泰地区 1963—2012 年最大冻土深度的时空分布及其对气温变化的响应

李海花¹, 刘大锋¹, 段淑芳¹, 李新建²

(1. 新疆阿勒泰地区气象局, 新疆 阿勒泰 836500; 2. 新疆维吾尔自治区农业气象台, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 利用阿勒泰地区 1963—2012 年 7 个气象站的最大冻土深度、平均气温、极端最低气温资料, 采用回归分析、相关性检验、Mann-Kendall 突变检测、Hurst 提出的 R/S 分析等方法, 对阿勒泰地区最大冻土深度的时间演变、空间分布及与气温的关系进行了分析。结果表明: 吉木乃站的均方差和变差系数最大; 阿勒泰地区最大冻土深度以 $0.574 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度显著减少; 年最大冻土深度几乎出现在 2—3 月; 阿勒泰地区的最大冻土深度的突变时间是在 1986—1987 年, 发生了下降趋势的突变, 福海和富蕴站没有发生突变; 阿勒泰地区年极端最大值、最大值的平均值、平均最大值均出现在青河站; 年最大冻土深度与平均气温和极端最低气温呈显著负相关, 其相关系数分别为 -0.508 和 -0.293 。

关键词: 最大冻土深度; 时空分布; 气温; 阿勒泰地区

中图分类号: S152.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)05-0251-08

The spatial-temporal distribution change of maximum frozen soil depth and temperature change in altay region of Xinjiang Province from 1963 to 2012

LI Hai-hua¹, LIU Da-feng¹, DUAN Shu-fang, LI Xin-jian²

(1. Altay Meteorological Bureau, Altay, Xinjiang 836500, China;

2. Xinjiang Agriculture Observatory, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

Abstract: Based on the Maximum Frozen Soil Depth and annual mean temperature and Extreme low temperature across seven meteorological stations in Altay region from 1963—2012, using linear regression, Mann-Kendall mutation detection, Hurst R/S analysis method, the temporal evolution and spatial distribution of maximum depth and temperatures of frozen soil were analyzed. The results show: the mean-square deviation and coefficient of variation of maximum appears in Jimunai; the maximum depth have declined by $0.574 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$; The annual maximum frozen depth almost always occurs in February and March; Maximum Frozen Soil Depth appear an abrupt decrease in 1986—1987s in Altay region; the deepest of annual Extreme and maximum of average and average of maximum depth appears in Qinghe; The Maximum Frozen Soil Depth and are negatively correlated with annual mean temperature and Extreme low temperature and the correlation coefficients are -0.508 and -0.293 .

Keywords: maximum frozen soil depth; spatial-temporal distribution; temperature; altay region

冻土是指含有水分的土壤因温度下降到 0°C 以下而呈冻结状态的现象^[1]。冻土变化实际上是地表热力变化的反映, 是气候变化的敏感指示器, 气候变化对冻土有着重要影响^[2-4]。刘小宁等^[5]利用中国近 50 a 的冻土观测资料分析发现, 中国最大冻土深度 20 世纪 80 年代以来开始减小, 90 年代显著减小。

杨小利等^[6]研究得出近几十年来, 西北地区整体最大冻深减小, 20 世纪 90 年代是近几十年来最大冻深最浅的时期, 其中变化最明显的区域是新疆。阿布都克木·阿巴司等^[7]分析了喀什地区最大冻土深度变化, 得出喀什地区多年的最大冻土深度年际变化总体呈明显的减少趋势。众所周知, 冻土是土

壤状况的一个重要部分,土壤冻结深度与农事活动、建筑业、道路桥梁设计、铁路设计等关系密切,气候变化对冻土造成的影响及其反馈作用不仅波及到这些行业,也会影响到周围的环境,近几年,随着社会需求,冻土研究方向也逐步拓展到上述相关行业^[8-21],因而研究其变化意义重大,对社会经济的发展有着直接的影响。

新疆阿勒泰地区地处新疆的西北部,属于季节性冻土区,从已有的文献看,针对阿勒泰地区冻土的研究比较少,特别是最大冻土深度对天气、气候变化的响应研究尚处于起步阶段。本文主要以阿勒泰地区 6 县一市 7 个冻土观测站多年资料为依据,分析其时空分布及其变化特征,并进一步分析了最大冻土深度和气温之间的关系,为今后阿勒泰地区开展与冻土有关的各类工程建设、农事生产活动,兴建铁路等提供科学的依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

采用阿勒泰地区的阿勒泰市、吉木乃、哈巴河、布尔津、福海、富蕴和青河 7 个国家级基准、基本气象站的冻土气象站的月最大冻土深度和同期的月平均气温和月极端最低气温资料,观测方法遵循中国气象局制定的《地面气象观测观测规范》^[1]的相关要求,时间序列为 1963—2012 年共 50 a,全部资料经过了新疆气象局信息中心的严格的质量控制和错误值订正。7 个气象站在 50 a 来均未曾迁移,观测数据时间序列长,且完整性和连续性较好,能够满足研究的需要。

1.2 研究方法

阿勒泰地区的冻土出现在 9 月至次年 5 月,由于大部分站的冻土出现在 10 月到次年 4 月,为了各站资料的统一和完整性,本文将当年 10 月至次年 4 月定义为一个冻土连续时段,为了进一步说明最大冻土深度与气温的关系,选取了与冻土同期的月平均气温和月极端最低气温资料进行了分析,年极端最大值是指各个站点 1963—2012 年 50 a 间出现的冻土深度的最大值,即 MAX(各站 1963—2012);年最大值平均是指每年的最大值的平均值,AVERAGE(每年出现的最大冻土深度);年平均最大是指各个站点多年平均冻土深度中的最大值,即 MAX(1963—2012 年最大平均);年平均是指冻土深度多年的平均值。

图表中所指的阿勒泰地区逐年代月平均冻土深

度、阿勒泰地区 10 月到次年 4 月年平均气温变化、阿勒泰地区 10 月到次年 4 月年极端最低气温变化是各个气象站的平均值。

本文采用了最小二乘法线性趋势倾向分析,主要应用线性回归法对阿勒泰地区的各气象要素进行线性趋势分析。假设 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n, n - 1)$ 为一个气候要素的观测序列, n 为序列长度,以序列 i 为自变量,气候要素为因变量,利用最小二乘法建立一元线性回归方程: $x_i = b_1 i + b_0$,线性方程斜率 b_1 定义为气候倾向率,表征时间序列的变化趋势。气候倾向率的大小表征变化速度;正负则表征变化方向; $b_1 > 0$ 表示增加; $b_1 < 0$ 表示减少。并对趋势系数进行了显著性检验。

变差系数 V 是表示气候值偏离其平均值的程度,是均方差和数学期望的比值。它描述逐年气象要素分散的程度如何,是高度集中在某个范围内,还是比较均匀地分布在平均值周围。变差系数大,说明气象要素稳定性差。

采用 Mann—Kendall^[22-23]法来判断气候序列是否发生了突变,对于平稳随机序列 $x_i (1 \leq i \leq N)$,构造统计量

$$U(d_k) = (d_k - E[d_k]) / (\text{Var}[d_k])^{1/2}$$

式中, $d_k = \sum M_i$ 是 1 至 i 之间小于 x 的样本数,即 $M_i = \{X_j : j < i \text{ 且 } X_i < X_j\}$ 。 $E[d_k]$ 为均值, $\text{Var}[d_k]$ 为方差。在原序列随机平稳假设下, d_k 的分布渐进正态, $U(d_k)$ 则为标准正态分布。其概率 a 可以通过计算或查表获得。给定显著水平 a_0 ,若 $a > a_0$,则接受序列无变化的原假设;若 $a < a_0$,则拒绝原假设。把 $U(d_k)$ 沿时间轴绘成曲线 UF,而后将序列反向,计算出 $U(d_k)$,绘成曲线 UB。

Hurst 提出的 R/S 分析法的主要原理为:考虑一个时间序列 $\{(\xi)_\tau\}, t = 1, 2, \dots, n$,对于任意正整数 $\tau \geq 1$,定义均值序列:

$$(\xi)_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi_i(\tau) \quad \tau = 1, 2 \quad (1)$$

累积离差为:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^{\tau} (\xi(u) - (\xi)_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

极差为:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min X(t, \tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad \tau = 1, 2 \quad (3)$$

标准差为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi_i(t) - (\xi)_\tau)^2 \right]^{1/2} \quad \tau = 1, 2 \quad (4)$$

若 $R(\tau)/S(\tau) = R/S \propto \tau^H$ (5)

则该序列存在 Hurst 现象。

对(5)式取对数,有: $H \propto \frac{\ln R/S}{\ln \tau}$ (6)

H 称为 Hurst 指数, $0 < H < 1$ 。根据 H 大小,可以判断该时间序列是完全随机的抑或是存在趋势性成分。趋势性成分表现为持续性或反持续性。

赫斯特等人曾证明,如果时间序列是相互独立、方差有限的随机序列,即 Gauss - Markov 过程,则有赫斯特(Hurst)指数 $H = 1/2$ 。对应于不同的 Hurst 指数 $H(0 < H < 1)$,存在以下几种情况:

① 当 $H = 1/2$ 时,意味着序列未来与过去无关或短程相关,符合 Gauss - Markov 假设。

② 当 $H > 1/2$ 时,意味着未来的趋势与过去一致,即过程具有持续性。且值越接近于 1,持续性就越强。在这种情形下,如果过去某时有一个正的增量即增加,那么在平均意义上说,未来也有一个增加。反映在气候指标上,表明气候变化的整体方向将继续承过去的整体趋势。如过去为整体升温的趋势,预示将来整体趋势还是升温,反之亦然。

③ 当 $H < 1/2$ 时,意味着未来的趋势与过去正好相反,即该过程具有反持续性。且 H 值越接近于 0,反持续性就越强。在这种情形下,过去的增加趋势意味着未来的减少趋势,而过去的减少趋势意味着未来可能出现增加趋势。

Hurst 提出的 R/S 方法是研究时间序列长程相关性的有力工具^[22-25],近年来逐渐应用于气候研

究。它在对时间序列长程相关(反相关)持续性(反持续性)的识别方面,具有独特的优点,本文采用了 R/S 方法分析阿勒泰地区最大冻土深度,以对未来的趋势有个定性。

用 surfer8 软件,将阿勒泰地区 7 站的冻土深度使用克里金(Kriging)插值法进行插值处理,绘制等值线图。

2 结果与分析

2.1 冻土深度的时间变化特征

2.1.1 最大冻土深度的年际变化及稳定性 从表 1 中看出,吉木乃站的均方差和变差系数最大,为 28.021 cm 和 0.303%,这说明吉木乃站的最大冻土深度的稳定性最差;均方差最小的是布尔津和阿勒泰市,为 12.417 cm 和 14.219 cm;变差系数最小的是青河,仅为 0.197%,说明它们的稳定性是最好的。阿勒泰地区最大冻土深度以 $0.574 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度显著减少,相关系数为 -0.601 ,通过了信度 0.001 的显著性检验,达到极显著相关水平;其他站除富蕴外均呈一致的减少趋势,倾向率为 $-0.275 \sim -1.410 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ (均通过 0.05 以上显著性检验),其中吉木乃站减小的最明显,倾向率为 $-1.410 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,其次是哈巴河站,其气候倾向率为 $-0.797 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,减小最不明显的是阿勒泰市,倾向率仅为 $-0.275 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$;富蕴站近 50a 的最大冻土深度是以倾向率为 $0.030 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度略有增加的。

表 1 阿勒泰地区各站年最大冻土深度的稳定性、倾向率和趋势系数

Table 1 Stability and trend rate and tendency coefficient of the maximum frozen depths for stations over Altay region during 1963—2012

项目 Item	哈巴河 Habahe	吉木乃 Jimunai	布尔津 Buerjin	福海 Fuhai	阿勒泰市 Altay	富蕴 Fuyun	青河 Qinghe	总的 Total
均方差/cm Mean square deviation	20.509	28.021	12.417	17.422	14.219	18.289	20.468	
变差系数/% Coefficient of variation	0.254	0.303	0.240	0.234	0.242	0.252	0.197	
倾向率/($\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$) Trend rate	-0.797	-1.410	-0.550	-0.411	-0.275	0.030	-0.528	-0.574
趋势系数 Tendency coefficient	-0.566**	-0.733**	-0.645**	-0.344	-0.282	0.024	-0.376*	-0.601**

注: *、** 分别表示显著性水平达 0.01 和 0.001 以上。

2.1.2 最大冻土的年代际变化 阿勒泰地区年平均冻土深度为 77 cm,年最大冻土深度为 107 cm,出现在 1969—1970 年;年最小冻土深度为 51 cm,出现在 1997—1998 年,最大与最小深度差为 56 cm。

从表 2 来看,在 10 a 际尺度上,近 50 a 阿勒泰地区 7 个站 60 年代到 70 年代呈略有增加(除阿勒

泰市外)的趋势;从 70 年—90 年代呈年代变浅趋势;90 年代到 2000 年以后,哈巴河、富蕴和青河站是减少的,而吉木乃、布尔津和阿勒泰市是略有增加的;2000 年以后较 70 年代减小了 3~54 cm,以吉木乃最明显,减少了 54 cm;其次是哈巴河站减少了 30 cm;阿勒泰市和富蕴减幅是最小的,仅为 3 cm。各

站大部分在 70 年代出现了最大值,其中吉木乃站的最大值为 125 cm,各站均在 90 年代出现了最小值,其中最小值出现在布尔津站仅为 43 cm,这说明 90 年代是近 50 a 来最大冻土深度最浅的时期,与杨小利^[6]研究的一致。

2.1.3 最大冻土深度的月变化 从表 3 中可以看出,阿勒泰地区最大冻土深度以 2—3 月为最大,各年代的冻土深度均大于 100 cm,最大值出现在 60 年代的 3 月份,其冻土深度为 130 cm,最小的是在 90 年代的 3 月份,其值为 101 cm;其次为 1 月,各年代的冻土深度均大于 90 cm,最大的出现在 70 年代的 1 月份冻土深度为 108 cm;4 月份,各年代的冻土深度分布不很平衡,60 和 70 年代为 112 cm 和 110 cm,80 年代到 2000 年以后的冻土深度在 31~76 cm;11 月和 12 月冻土深度相比较小,各年代的冻土深度均小于 80

cm;10 月份是冻土度出现最小的各年代,各年代的冻土深度均小于 10 cm;冻土深度各月均以 20 世纪 60~80 年代偏大,2000 年以后略偏小,90 年代偏小。

表 2 阿勒泰地区各站年最大冻土深度的年代际变化/cm
Table 2 The decadal variations of the maximum frozen depths for stations over Altay region during 1963—2012

地区 Region	1963— 1969	1970— 1979	1980— 1989	1990— 1999	2000 年 以后
哈巴河 Habahe	93	96	89	68	66
吉木乃 Jimunai	116	125	94	69	71
布尔津 Buerjin	62	64	52	43	44
福海 Fuhai	84	91	67	63	71
阿勒泰市 Altay	67	62	58	58	59
富蕴 Fuyun	64	78	83	60	75
青河 Qinghe	109	110	118	98	89

表 3 阿勒泰地区逐年代月平均冻土深度/cm

Table 3 Monthly mean depth and days of various ages in Altay region

年代 Years	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
60 年代	8	38	74	105	124	130	112
70 年代	9	45	80	108	127	128	110
80 年代	8	42	76	104	121	127	76
90 年代	6	36	68	93	102	101	53
2000 年以后	6	37	72	97	109	106	31

2.1.4 最大冻土深度的持续性 根据 R/S 基本原理对阿勒泰地区各站年最大冻土深度的持续性进行分析,计算相应的 H 指数,结果见表 4。从表 4 中可知,近 50 a 各站年最大冻土的 H 值均大于 0.5,说明最大冻土深度序列具有持续性,即未来年最大冻土

深度除富蕴站仍将趋于加厚外,其他各站将继续变薄,其中,吉木乃和哈巴河当 H 值较接近 1.0,表明未来它们的年最大冻土深度持续变薄的趋势较其他站明显。

表 4 近 50 a 阿勒泰地区各站年最大冻土深度的 R/S 分析的 H 指数

Table 4 The Hurst index(R/S analysis) of the maximum frozen depth for stations over the Altay region during 1963—2012

站名 Station	哈巴河 Habahe	吉木乃 Jimunai	布尔津 Buerjin	福海 Fuhai	阿勒泰市 Altay	富蕴 Fuyun	青河 Qinghe
H 值	0.735	0.769	0.716	0.734	0.523	0.637	0.643

2.1.5 最大冻土深度的突变 采用 Mann-Kendall 法来判断阿勒泰地区最大冻土深度气候序列是否发生了突变,如果 UF 与 UB 在临界值 ± 1.96 ($\alpha = 0.05$) 之间有一个显著的交点,且 UF 上升超过 $+1.96$ 或降低于 -1.96 ,则可认为该序列产生了突变,前者表示从低向高突变,后者表示从高向低突变,并且这个交点就是突变的开端,反之,则认为没有突变产生^[26]。从图 1 可见,阿勒泰地区的最大冻土深度的突变时间是在 1986—1987 年发生了下降趋势的突变,各县中,只有福海和富蕴站没有发生突变,其他站均发生了下降趋势的突变,哈巴河和吉木

乃站突变发生在 1983—1984 年,布尔津在 1969—1970 年,阿勒泰市在 1979—1980 年,青河站在 1985—1986 年。

2.2 冻土深度的空间变化特征

由阿勒泰地区最大冻土深度的空间分布(图 2)看,极端最大值出现在青河为 239 cm,其次是西部的吉木乃站位 200 cm,看出,极端最大值是阿勒泰地区的最西部和最东部大于中部地区,其值最小的出现在布尔津站为 127 cm;各站的最大值平均、平均值最大以及平均冻土深度总的空间分布与极端最大值具有很好的相似性,空间分布曲线变化基本一致。

阿勒泰地区最大冻土深度的空间变化特征,冻土深度的东西部的极端最大值、最大值平均、平均值最大以及平均值均出现在青河站和吉木乃站,这主

要由于最大冻结深度与海拔关系较为密切,随海拔的增加而增大^[27],青河和吉木乃站的海拔在阿勒泰地区是排名第一和第二的。

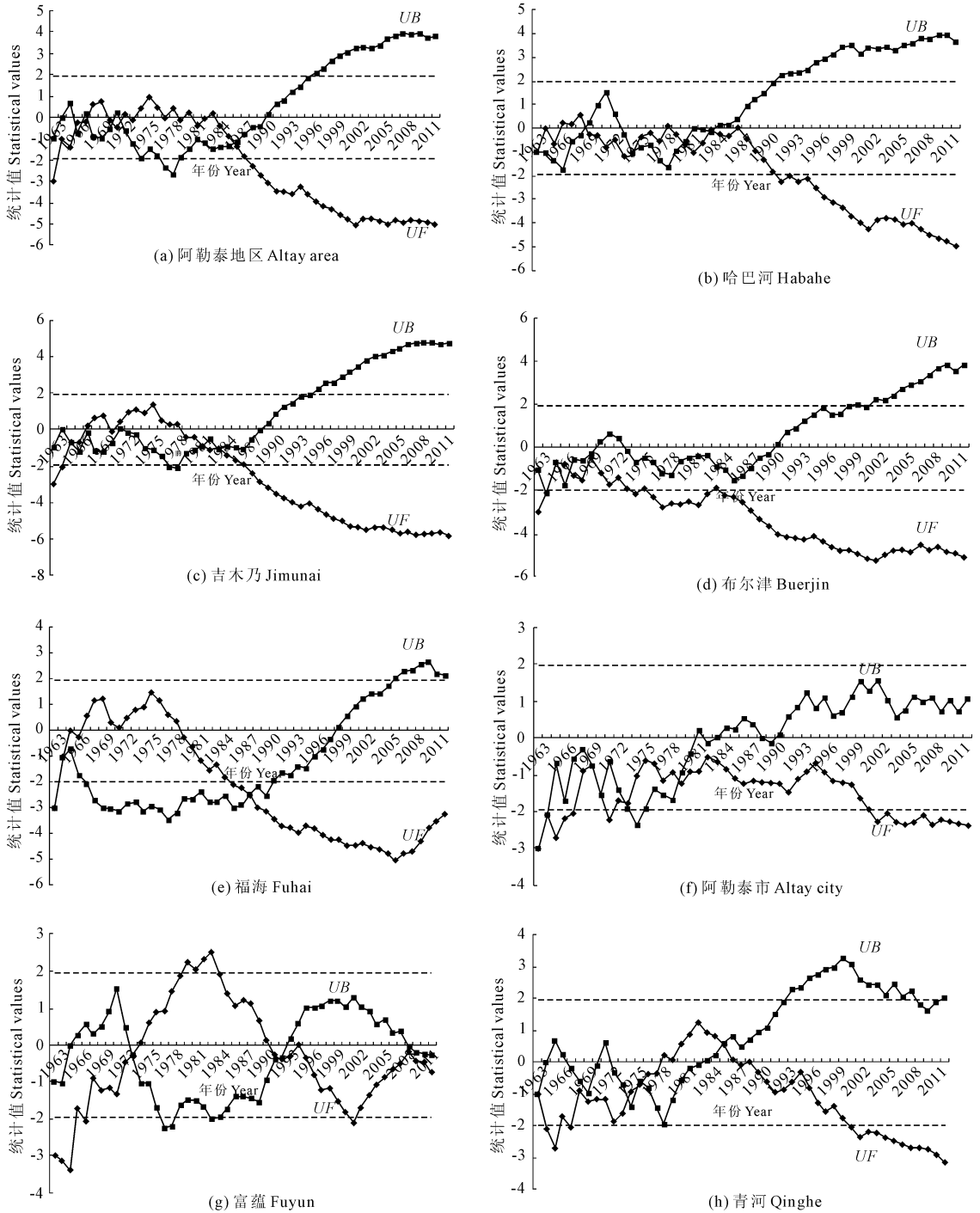


图 1 阿勒泰地区最大冻土深度的 Mann - Kendall 突变检验

Fig.1 The Mann - Kendall mutation analysis of the maximum frozen depth in Altay area

2.3 冻土深度对气温变化的响应

2.3.1 平均气温对最大冻土深度的响应 从时间演变趋势来看(图 3),1963—2012 年 10 月到次年 4 月阿勒泰地区平均气温呈上升的趋势,其上升率为 $0.6^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,随着平均气温的上升,冻土深度

在减小(图 4),与同期的平均气温每升高 1°C ,冻土深度减小 4.160 cm ,最大冻土深度与平均气温之间的相关系数为 -0.508 ,通过了信度 0.001 的显著性检验,达到极显著相关水平,说明最大冻土深度与平均气温的相关性较强,另从表 1 中得知,最大冻土深

度随年际变化呈明显的减小趋势,说明最大冻土深度的减小与平均气温的上升有关,平均气温上升,最

大冻土深度减小。

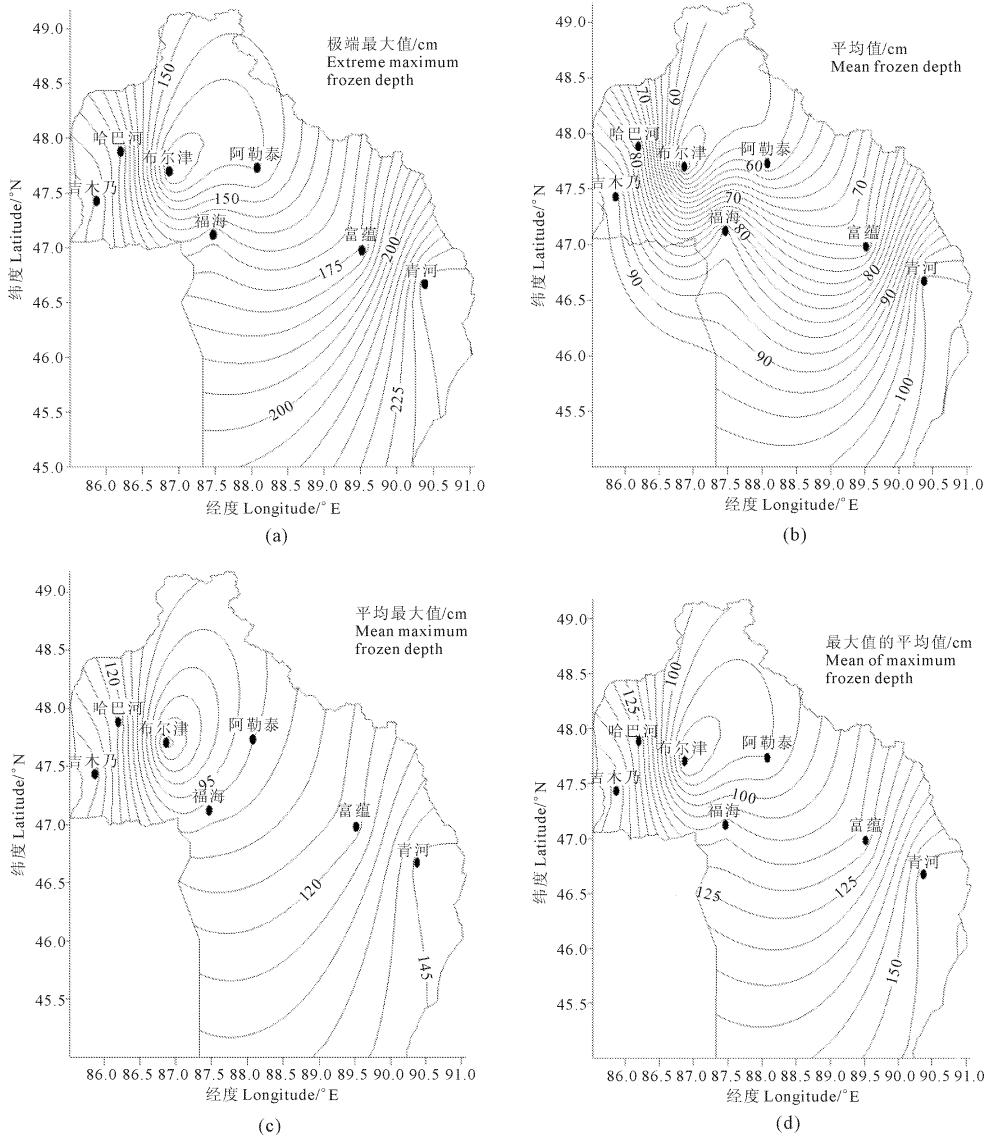


图 2 阿勒泰地区最大冻土深度的空间分布

Fig.2 Space distribution of the maximum frozen depth in Altay area

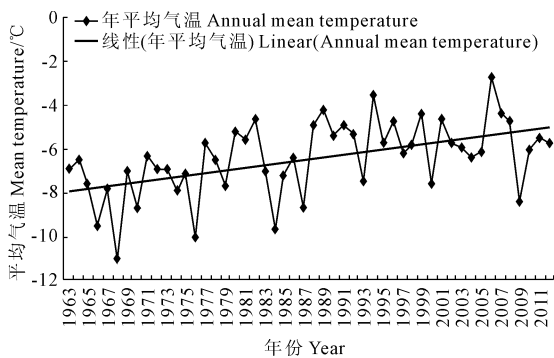


图 3 阿勒泰地区 10 月到次年 4 月年平均气温变化

Fig.3 Variation of annual mean temperature from Oct. to Apr. next year in Altay area

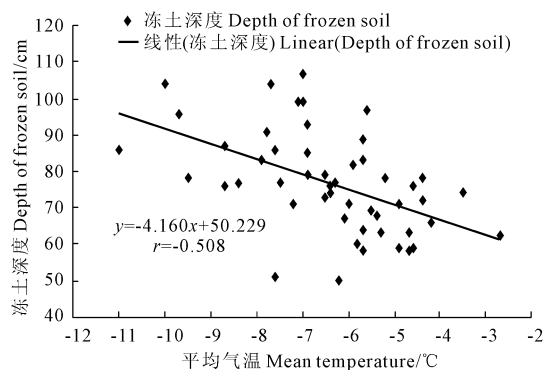


图 4 阿勒泰地区年平均气温与冻土深度的关系

Fig.4 Relationships between annual mean temperature and annual depth of frozen soil in Altay area

2.3.2 极端最低气温对最大冻土深度的影响 从时间演变趋势来看(图 5),1963—2012 年 10 月到次年 4 月阿勒泰地区年极端最低气温呈上升的趋势,其上升率为 $0.8^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。随着极端最低气温的上升,冻土深度在减小(图 6),同期的极端最低气温每升高 1°C ,冻土深度减小 1.4 cm ,最大冻土深度与极端最低气温之间的相关系数为 -0.293 ,通过了信度 0.05 的显著性检验,说明最大冻土深度与极端最低气温之间存在一定的相关性。另从表 1 中得知,最大冻土深度随年际变化呈明显的减小趋势,说明最大冻土深度的减小也受极端最低气温升高的影响,极端最低气温上升,最大冻土深度减小,只是极端最低气温对冻土深度的影响不如平均气温对最大冻土深度的影响明显。

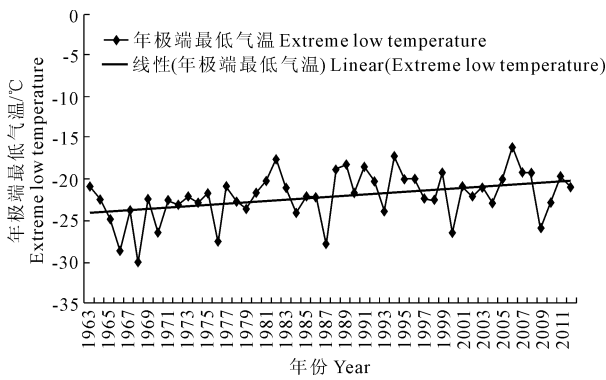


图 5 阿勒泰地区 10 月到次年 4 月年极端最低气温变化

Fig.5 Extreme low temperature from Oct. to Apr. next year in Altay area

的。
2) 阿勒泰地区最大冻土深度以 $0.574\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度显著减少,相关系数为 -0.601 ,通过了信度 0.001 的显著性检验,达到极显著相关水平;其他站除富蕴外均呈一致的减少趋势,倾向率为 $-0.275\sim -1.410\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$,富蕴站近 50 a 的最大冻土深度是以倾向率为 $0.030\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度略有增加的。
3) 阿勒泰地区年平均冻土深度为 77 cm ,年最大冻土深度为 107 cm ,出现在 1969—1970 年;年最小冻土深度为 51 cm ,出现在 1997—1998 年,最大冻土深度以 2—3 月为最大,各年代的冻土深度均大于 100 cm ,其次为 1 月,各年代的冻土深度均大于 90 cm ,10 月份是冻土度出现最小的月份,各年代的冻土深度均小于 10 cm 。
4) 近 50 a 各站年最大冻土的 H 值均大于 0.5 ,说明最大冻土深度序列具有持续性,即未来年最大冻土深度除富蕴站仍将趋于加厚外,其他各站将继续变薄;阿勒泰地区的最大冻土深度的突变时间是在 1986—1987 年,发生了下降趋势的突变,在各县站中,只有福海和富蕴站没有发生突变,其他站均发生了下降趋势的突变。
5) 阿勒泰地区最大冻土深度的空间分布看,各站的极端最大值、最大值平均、平均值最大以及平均值的最大值均出现在青河站,其次是吉木乃站。
6) 阿勒泰地区最大冻土深度与同期的平均气温和极端最低气温的相关性较强,其中与平均气温的相关性最强。同期的平均气温每升高 1°C ,冻土深度减小 4.2 cm ,同期的极端最低气温每升高 1°C ,冻土深度减小 1.4 cm 。

本文只研究了阿勒泰地区最大冻土深度在本地区的时间及空间上的分布,除此之外,最大冻土深度还与地表植被、地层岩性、土层含水量及地表积雪覆盖厚度等局域性因素有关,今后应对这些方面再进行深入研究。另外冻土日数变化也会对气温变化进行响应,今后也可以综合进行这方面的研究。

2.3.2 极端最低气温对最大冻土深度的影响 从时间演变趋势来看(图 5),1963—2012 年 10 月到次年 4 月阿勒泰地区年极端最低气温呈上升的趋势,其上升率为 $0.8^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。随着极端最低气温的上升,冻土深度在减小(图 6),同期的极端最低气温每升高 1°C ,冻土深度减小 1.4 cm ,最大冻土深度与极端最低气温之间的相关系数为 -0.293 ,通过了信度 0.05 的显著性检验,说明最大冻土深度与极端最低气温之间存在一定的相关性。另从表 1 中得知,最大冻土深度随年际变化呈明显的减小趋势,说明最大冻土深度的减小也受极端最低气温升高的影响,极端最低气温上升,最大冻土深度减小,只是极端最低气温对冻土深度的影响不如平均气温对最大冻土深度的影响明显。

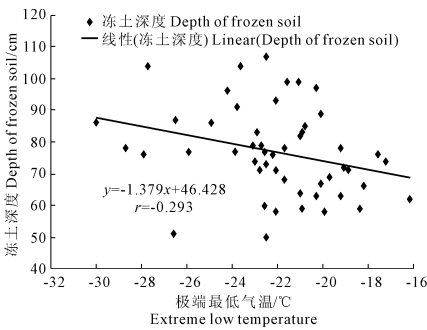


图 6 阿勒泰地区年极端最低气温与冻土深度的关系

Fig.6 Relationships between Extreme low temperature and annual depth of frozen soil in Altay area

3 结论与讨论

1) 吉木乃站的均方差和变差系数最大,为 28.021 cm 和 0.303% ,这说明吉木乃的最大冻土深度的稳定性最差,均方差最小是布尔津和阿勒泰市,变差系数最小的是青河,说明它们的稳定性是最好

参考文献:

[1] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003.
[2] 高荣,韦志刚,董文杰,等.20 世纪后期青藏高原积雪和冻土变化及其与气候变化的关系[J].高原气象,2003,22(2):191-196.
[3] 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.
[4] 金会军,李述训.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(5):545-554.
[5] 刘小宁,李庆祥.我国最大冻土深度变化及初步解释[J].应用

- 气象学报, 2003, 14(3): 299-308.
- [6] 杨小利, 王劲松. 西北地区季节性最大冻土深度的分布和变化特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 238-243.
- [7] 阿布都克日木·阿巴司, 陈荣毅. 喀什地区 1961—2010 年最大冻土深度变化[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(5): 25-29.
- [8] 郭 慧, 李栋梁, 张 强, 等. 甘肃河西冬季冻结深度年代际变化特征及其气候成因分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 503-508.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 黄 斌, 张洪芬. 甘肃河西冬季平均冻土深度对春小麦生育期的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 254-257.
- [12] 张洪芬, 王劲松, 刘治国. 祁连山区春季冻土深度特征及对春小麦发育期的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 301-305.
- [13] 王晓巍, 付 强, 丁 辉, 等. 季节性冻土区水文特性及模型研究进展[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 953-959.
- [14] 郑 波, 张建国, 常小晓, 等. 广州地铁隧道冻结工程冻土力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 893-897.
- [15] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 80-84.
- [16] 吴青柏, 董献付, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土对气候变化和工程影响的响应分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 50-54.
- [17] 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.
- [18] 李 韧, 赵 林, 丁永建, 等. 青藏高原季节冻土的气候学特征[J]. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1051-1056.
- [19] 杨晓玲, 马中华, 马玉山, 等. 石羊河流域季节性冻土的时空分布及对气温变化的响应[J]. 资源科学, 2013, 35(10): 2104-2111.
- [20] 彭小清, 张廷军, 潘小多, 等. 祁连山区黑河流域季节冻土时空变化研究[J]. 地球科学进展, 2013, 28(4): 497-508.
- [21] 王春学, 李栋梁. 中国近 50a 积雪日数与最大积雪深度的时空变化规律[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 247-256.
- [22] 李海花, 刘大锋. 新疆阿勒泰地区冬季低温日数气候特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(3): 508-509.
- [23] 李海花, 刘大锋. 1961—2010 年阿勒泰地区冬季降雪日数和强度的气候特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(S1): 28-29.
- [24] 李海花, 李 焕, 葛洪燕, 等. 阿勒泰地区冬季极端最低气温变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(6): 41-44.
- [25] 赵 晶, 杨淑华, 王乃昂, 利用 R/S 方法分析兰州城市化气候效应[J]. 气象, 2001, 27(2): 7-15.
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [27] 王国亚, 毛炜峰, 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): 1293-1299.

(上接第 245 页)

参 考 文 献:

- [1] 刘国伟. 水文循环的大气过程[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] 杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 9-22.
- [3] 张学文. 可降水量与地面水汽压力的关系[J]. 气象, 2004, 32(2): 9-11.
- [4] 徐淑英. 我国的水汽输送和水分平衡[J]. 气象学报, 1958, 29(1): 33-43.
- [5] 黄荣辉, 张振洲, 黄 刚, 等. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 460-469.
- [6] 简茂球, 秦晓昊, 乔云亭. 华南大尺度空中水资源时空演变特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, 45(6): 97-101.
- [7] 牛存稳, 张利平, 夏 军. 华北地区降水量的小波分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 66-70.
- [8] 崔玉琴. 西北内陆上空水汽输送及其源地[J]. 水利学报, 1994, (9): 79-87, 93.
- [9] 李栋梁, 谢金南, 王 文. 中国西北地区夏季降水特征及其异常研究[J]. 大气科学, 1997, 21(3): 331-340.
- [10] 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊, 等. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 35-42.
- [11] 王可丽, 江 灏, 赵红岩, 等. 中国西北地区水汽的平流输送和辐合输送[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 164-169.
- [12] 林振耀, 郑 度. 新疆塔里木盆地东缘水汽输送探讨[J]. 干旱区研究, 1992, 9(2): 1—7.
- [13] 李红军, 毛炜峰, 赵 勇, 等. 近 40 a 塔里木盆地近地面水汽含量的趋势和突变研究[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6): 861-867.
- [14] 俞亚勋, 王劲松, 李青燕, 等. 西北地区空中水汽分布特征及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 149-156.
- [15] 施雅风, 沈水平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的型号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [16] 高振荣, 刘晓云, 杨庆华, 等. 河西走廊荒漠—绿洲区气候环境演变特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(1): 31-38.
- [17] 李新国, 樊自立, 李会志, 等. 开都河下游灌区土壤盐渍化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 147-151.
- [18] 李新国, 阿斯耶姆·图尔迪, 刘 彬, 等. 近 50 年开都河流域下游降水和气温变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 252-259.
- [19] 张宝军, 马金珠, 赵 鑫, 等. 近 50 年来民勤县气温变化特征及其原因分析[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 226-229.
- [20] 王东方, 张风华, 孙自武, 等. 近 60 年来玛纳斯河流域气候时空变化趋势分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 235-240.
- [21] 郭良才, 岳 平, 李红英, 等. 河西走廊干旱区的水资源分布及循环过程[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 157-163.
- [22] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 28-88, 193-214.
- [23] 施雅风, 沈水平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [24] 吴洪宝, 吴 蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 178-245.