

# 北疆地区积雪与冻土变化的特征分析

李 杨<sup>1</sup>, 李建刚<sup>2</sup>, 刘 艳<sup>1</sup>, 张 璞<sup>3</sup>

(1. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002;

2. 新疆气象台, 乌鲁木齐 830002; 3. 乌鲁木齐气象卫星地面站, 乌鲁木齐 830011)

**摘 要:**利用 1960—2007 年北疆 6 个国家基本气象站积雪及冻土资料,分析了北疆地区积雪和冻土深度的气候分布特征,并利用统计学方法总结了积雪对冻土变化的影响。结果表明:(1) 最大冻土深度受海拔高度的影响较大,并与其成正比。最大冻土深度值出现年代从平原向山区滞后;从 20 世纪 80 年代后最大冻土深度出现减小的趋势,且平原较山区更加明显;3 个不同类型冻土区冬季最大冻土深度和平均冻土深度的年际变化基本上随时间逐渐减小;(2) I 区的最大积雪深度大于 II 区和 III 区,各站冬季最大积雪深度和平均积雪深度的年际变化基本上都呈现单峰单谷型;(3) I 区最大积雪深度和最大冻土深度的对应关系呈现双峰型,II 区为单峰型,III 区则为对数型。积雪深度较浅时,冻土深度增加较明显,随着积雪深度的增加,冻土深度变化较小,当积雪深度超过一定限值后,冻土深度还有下降的趋势;(4) M-K 检验结果为各站最大冻土深度与积雪的变化趋势基本相反且突变点基本一致,呈现负相关。

**关键词:**北疆; 积雪; 冻土; Mann-Kendall 检验法

**中图分类号:**P468.0<sup>+</sup>25; P642.14

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)05-0342-07

## Preliminarily Analysis on the Characteristics of Depth Variation of Snow Accumulation and Frozen Soil in Northern Xinjiang

LI Yang<sup>1</sup>, LI Jiangang<sup>2</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, ZHANG Pu<sup>3</sup>

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China; 3. Urumqi Meteorological Satellite Ground Station, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The climatic distribution characteristics of snow accumulation and frozen soil depth in the area of northern Xinjiang was analyzed based on daily snow accumulation and frozen soil data obtained from six national basic meteorological observing stations during the period from 1960 to 2007, and the effect of snow accumulation depth on frozen soil variation was discussed by use of statistic method. The result showed that: (1) the maximum frozen soil depth (MFD) was greatly affected by the altitude, and was proportional to the altitude, the appearing age of MFD was lagged from plain to mountain area, MFD appeared the trend of decreasing since 1980's and this phenomenon was obvious in plain compared with mountain area. The inter-annual variation of MFD and average frozen soil depth at three different frozen soil type regions in winter kept descending basically; (2) the maximum snow accumulation depth (MSD) at region I was greater than region II and region III, the inter-annual variation of MSD and average snow accumulation depth appeared single-valley pattern; (3) the mapping between MSD and MFD was displayed by bimodal pattern at region I, unimodal pattern at region II, logarithmic pattern at region III, the depth of frozen soil increased obviously when snow accumulation depth was shallow, however, frozen soil depth changed less with the increase of snow accumulation depth, and dropped after snow accumulation depth exceeded a certain threshold value; (4) MFD and MSD were tested by Mann-Kendall abrupt change detection method, and the result showed that varying trend of these two parameters was opposite, and they basically had the negative correlation.

**Keywords:** northern Xinjiang; snow accumulation; frozen soil; Mann-Kendall test

冰冻圈是现代气候系统的 5 大圈层之一,积雪在冰冻圈中的地理分布最为广泛<sup>[1]</sup>。在全球变暖背景下,积雪对气候变化具有高度敏感性和重要反馈作用,是气候系统的重要组成部分,现已成为全球变化研究的核心内容和热点之一<sup>[2]</sup>。冻土是指含有冰晶的土壤,一般可以分为多年冻土和季节性冻土两类<sup>[3]</sup>。季节性冻土广泛分布于纬度高于 24°的地区,每年约有 53.5% 表层土壤经历冻结—融化循环过程<sup>[4]</sup>。冻土与气候之间是相互作用的,一方面气候变化会影响冻土的深度和分布范围;另一方面冻土的存在改变了地表属性,从而改变了地—气系统的能量交换<sup>[5]</sup>。

目前,国内外对于积雪的研究主要是利用气象站点积雪观测数据或者遥感数据的反演来研究积雪的时空分布,如利用 EOS/MODIS, NOAA/AVHRR 等卫星资料进行积雪面积和深度的反演计算<sup>[6-9]</sup>。虽然利用遥感方法能弥补气象站点单点数据的缺陷,可以得到区域积雪深度及含水量的分布<sup>[10-12]</sup>,但由于各种反演方案都是建立在方程的基础上,对地势不同的区域效果不是很好。因此,多年的积雪观测数据才能较真实地反映本地区气候变化对积雪深度的影响。对于冻土的研究,国内外许多学者主要是通过观测资料对其时空分布特征以及冻融过程的机理等方面进行研究<sup>[13-16]</sup>,而利用气象站观测资料对区域积雪和冻土深度同时展开研究较少,特别是积雪对冻土影响的相关研究更少。

北疆是新疆主要的工农业经济区。北疆冻土属于季节性冻土,这为该地区短命植物春季获得生长提供了必要的水分<sup>[17]</sup>。另外,北疆也是我国冬季积雪深度较大的区域之一,而冰雪融水是北疆农业区最重要的水资源补给方式。但是,冬季积雪范围大、持续时间长也可能造成干旱区农牧业各种灾害<sup>[18]</sup>。因此,研究本地区积雪深度和冻土的时空分布意义尤为重要。本文选取了乌鲁木齐以西的北疆沿天山一带代表性较强的气象站积雪和冻土资料,以冬半年大气环流特征为背景,重点对积雪和冻土之间的相关性进行分析,以期了解在干旱半干旱区积雪和冻土的相互影响规律,为进一步提高卫星资料反演积雪的能力以及冻土对植被生长的影响提供科学依据。

# 1 研究区域和资料选取

## 1.1 研究区概况

北疆地区位于新疆北部,以天山为南界,阿尔泰山为北界,中部有准噶尔盆地。由于境内有一系列山脉环绕,海洋湿润水汽很难到达,气候较干旱,特别受天

山阻隔,气候为温带大陆性干旱半干旱气候。地势东高西低,自然坡度不大。北疆地区拥有阿尔泰山—北塔山高寒—温带山地多年冻土区、准噶尔盆地以西高寒带—温带山地多年冻土区、准噶尔盆地温带季节性冻土区、天山高寒带山地多年冻土区<sup>[3]</sup>。对于积雪,北疆地区冬季严寒而漫长,平原地区降雪量占年降水量的 30% 以上,高山地区则高达 80% 以上<sup>[19]</sup>,积雪深度一般超过 20 cm,北疆西部和北部最大超过 80 cm。

本文利用 1960—2007 年北疆沿天山一带的 6 个国家基本站逐日的积雪和冻土资料,对上述 3 个不同冻土区的积雪和冻土深度的相关性进行分析,以期找出两者之间的规律。其中,选取阿勒泰、清河站代表阿尔泰山—北塔山高寒—温带山地多年冻土区Ⅰ区,托里、温泉代表盆地以西高寒带—温带山地多年冻土区Ⅱ区,乌苏、沙湾代表盆地温带季节性冻土区Ⅲ区,代表站在地理位置上覆盖了北疆的绝大部分地区。

由表 1 可以看出,一半代表站均在平原或浅山区,海拔在 1 000 m 以下;除阿尔泰山—北塔山高寒—温带山地多年冻土区年均气温较低外,其他类型冻土区气温都较高,年均降水量一般随海拔高度的增加而增多;年均蒸发为降水量的 2~8 倍。

表 1 各代表站海拔、年均气温、年均降水量和年均蒸发量

站名	海拔/m	年平均 气温/℃	年均降 水量/mm	年均蒸 发量/mm
阿勒泰	737.7	4.8	212.6	1597.8
清河	1220.3	1.3	189.2	1367.0
托里	1077.1	6.0	245.0	2081.6
温泉	1356.3	3.6	239.9	1555.0
乌苏	478.3	7.3	158.0	1941.6
沙湾	523.4	6.9	185.0	1800.0

## 1.2 资料选取

选取的冻土和积雪资料主要根据中国气象局出台的《地面观测规范》要求,冻土观测开始日为地面温度降至 0℃ 时,直至次年冻土完全解冻为结束,观测时间为每日北京时间(BST)8:00 时。观测仪器为达尼林冻土器。积雪深度观测主要是利用量雪尺进行 3 次测量,然后求平均,结果取整。

为提高观测资料的可信度和一致性,在数据处理前,对 6 个站的积雪和冻土进行了预处理,由于时间跨度较大,因此对资料中出现的缺测值及积雪和冻土不足 0.5 cm 进行了剔除。另外,由于逐日资料变化增幅较大,无法显示长期的变化规律,因此对资料进行了进一步处理,找出了各站月最大和最小积雪和冻土深度进行对比。

## 2 研究方法

### 2.1 线性回归分析

基于各个代表站所观测的积雪及冻土数据,利用线性回归分析得出各类型冻土区近60年的积雪和冻土变化趋势。

### 2.2 突变分析

利用 Mann-Kendall 法对冻土及积雪进行突变检验,以期得出在北疆气候变暖的背景下,积雪和冻土对气温变化的反馈。Mann-Kendall 检验法是一种非参数统计检验方法,它不需要样本遵守一定的分布,也不受异常值的干扰,不仅可以明确突变开始的时间,并且可以看出突变的区域。

其原理为利用要统计的量在显著性水平一定的情况

下绘制  $UF_k$ ,  $UB_k$  曲线,分析出变量随时间变化的趋势。若  $UF_k$  值大于0,这表明序列呈上升趋势,若小于0呈下降趋势,若超过临界线,则说明上升、下降趋势明显。当  $UF_k$ ,  $UB_k$  曲线出现交点时,且交点位于两临界线之间,则说明交点对应的的时间就是变量的突变时间。

## 3 结果与分析

### 3.1 冻土的变化趋势

由图1可以看出,I区阿勒泰站除5—9月无冻土外,其他各月均有冻土出现,且从10月到次年3月深度逐渐增加,翌年4月明显减少;而清河站从9月就有冻土出现,一直延续到翌年5月,最大冻土深度值出现在2—3月,然后逐渐递减;II区、III区两个站与阿勒泰站的变化趋势基本一致。

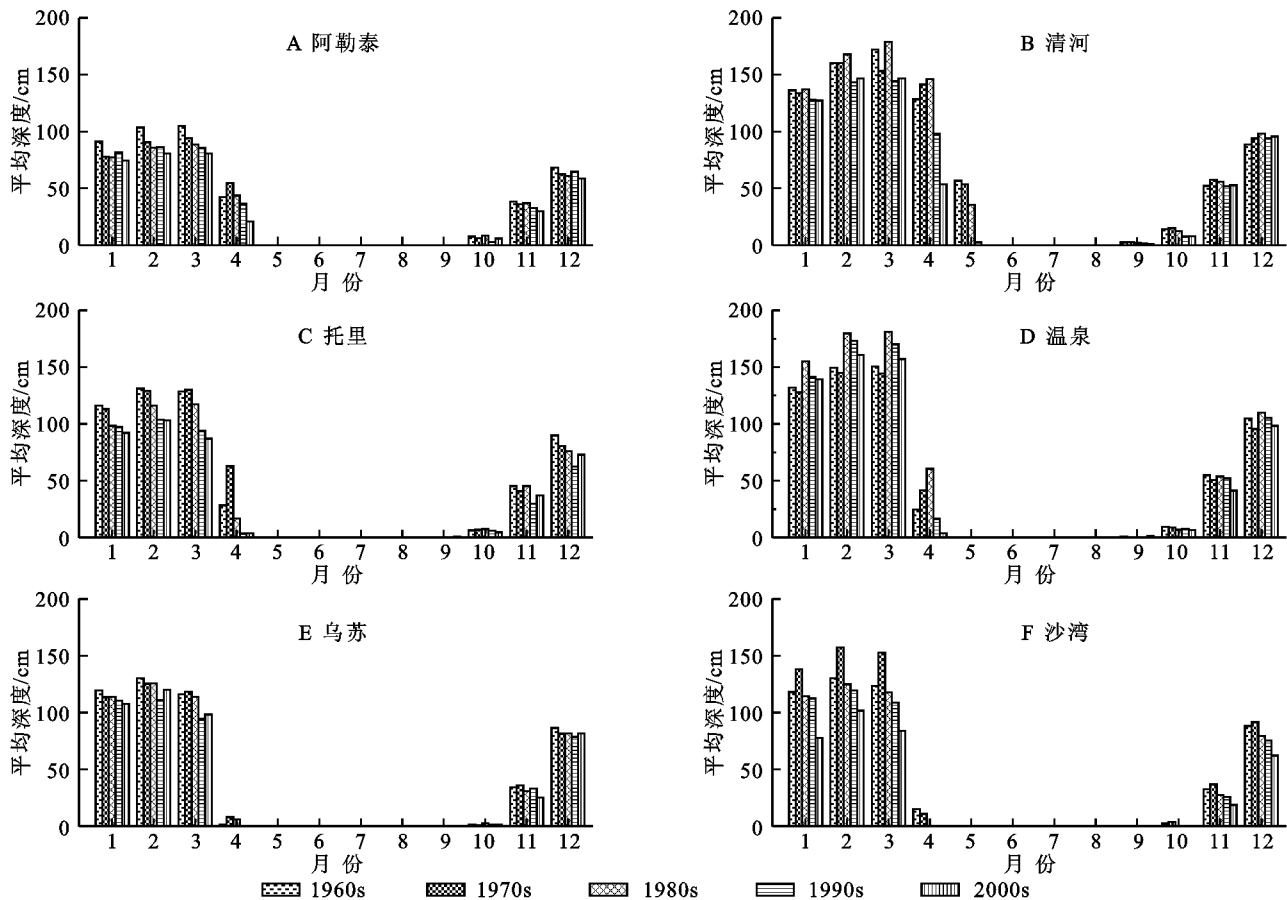


图1 平均最大冻土深度的年际变化

清河和温泉站的最大冻土深度值较大,11月各年际基本达到100 cm,2—3月达到最大值,分别为178.8,181.1 cm,而基本与清河处于同温度带的阿勒泰站最大冻土深度才接近100 cm,这说明最大冻土深度受海拔高度的影响较大,冻土深度与海拔高度成正比;其他3个站的冻土变化基本一致,最大值在125 cm左右。

另外,最大冻土值出现的年代并不相同,清河和温泉站出现在1980s;阿勒泰、托里和乌苏站出现在1960s,由于托里站位于塔城盆地边缘,冬季易受极锋急流的影响,因此最大值出现时间也与北疆平原站一致;沙湾站则出现在1970s。从以上可以分析出,最大冻土深度值出现年代从平原向山区滞后,且从1980s以后最大冻土深度出现减小的趋势,且平原较

山区更加明显,这验证了在全球气候变暖的大背景下,北疆气候也正向暖湿趋势发展。

从同月年际变化来看,阿勒泰站冻土值各月基本上随着年际的增加逐渐减小,即递减型;清河和温泉站则显示双峰型,即分别在 1960s,1980s 出现最大值,1970s,1980s 以后显示为低值区;托里、乌苏站为递减型;沙湾站为单峰型,即在 1970s 出现最大值。

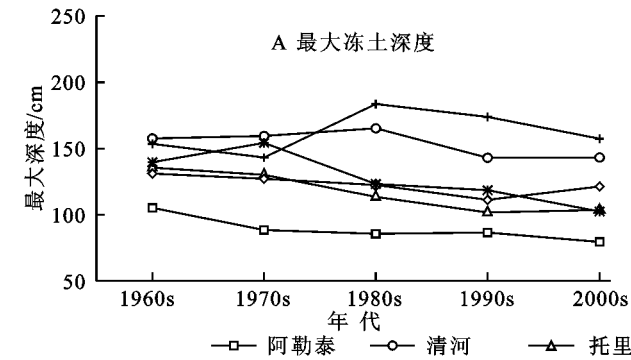


图 2 冬季各站冻土深度平均年际变化

3.2 积雪的变化趋势

从图 3 可以看出,Ⅰ区的最大积雪深度显然大于Ⅱ区、Ⅲ区,极大值超过 30 cm,且Ⅰ区、Ⅱ区从 10 月到翌年 5 月均有积雪,Ⅲ区只到次年 4 月,这主要是北疆北部冬季受极地冷空气活动次数较多,降雪量较大;Ⅱ区托里站位于开口向西的塔城盆地的南部迎风

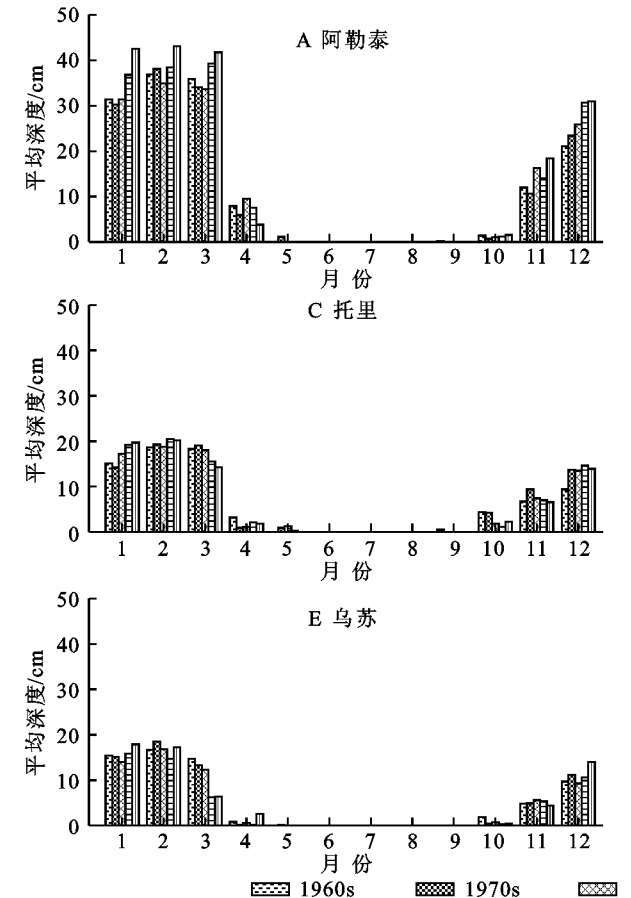


图 3 平均最大积雪深度的年际变化

图 2A 为各站冬季(12—2 月)最大冻土深度的平均年际变化,显然各站总体趋势基本一致,即随时间逐渐减小,只是沙湾站在 1970s 有一个高值,温泉、清河在 1980s 出现极大值,这与图 2B 显示的平均冻土深度的变化趋势一致。冬季阿勒泰站的冻土深度在各站中是最小的,托里、乌苏和沙湾站其次,清河排名第二,数值最大的是温泉。

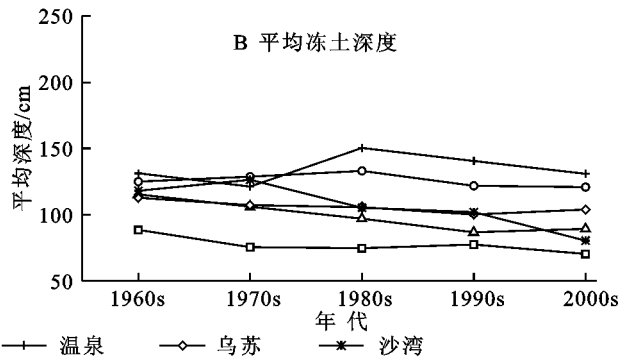


图 2 冬季各站冻土深度平均年际变化

坡,冬季水汽条件较好,而温泉站虽然也为山区,但冬半年影响新疆的冷空气主要为西北路径,而此站位于北疆西部山区,三面环山,且向东开口,水汽条件相对较差,因此冬季最大积雪深度与Ⅲ区的乌苏相当;沙湾与乌苏站同属于北疆沿天山一带,但由于乌苏离风大雨少的阿拉山口较近,因此降雪量较沙湾站少。

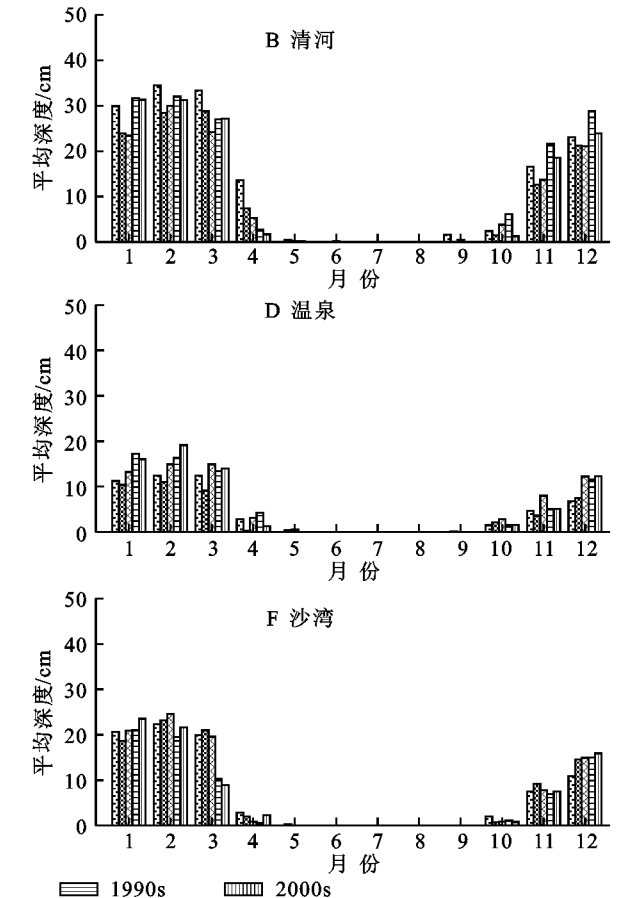
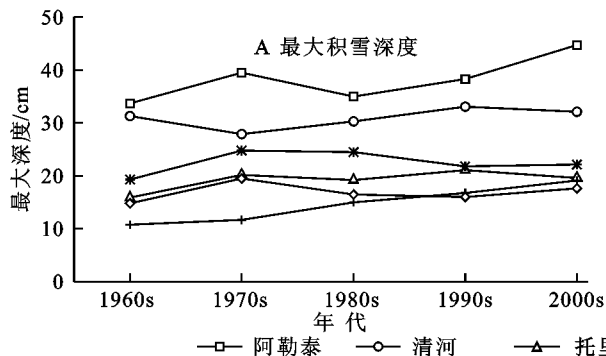


图 3 平均最大积雪深度的年际变化

从最大积雪深度的年际变化来看,各站的变化趋势基本上都呈现单谷型,即1960s出现极大值,1970s达到极小值,然后逐渐上升,到2000s达到第2个极大值。

从图4可以看出,与冬季冻土的年际变化值基本



相反,阿勒泰积雪深度最大,最小的为温泉站,比较特殊的是清河站,仍排名第二,这与高海拔、高纬度且在冬季是大部分冷空气必经之路有关。从各站变化趋势来看,基本为单峰单谷型,即分别在1970s、2000s达到极大值,1990s达到极小值,清河站则出现相反的趋势。

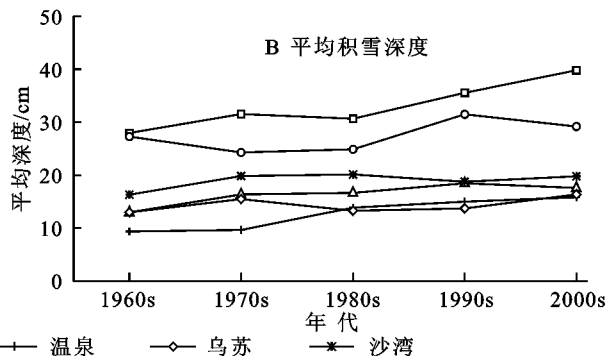


图4 冬季各站积雪深度平均年际变化

从上面的分析可以看出,北疆各站的积雪深度对冻土深度有很大影响,但并不是简单的对应关系。因此,研究积雪与冻土之间的关系是非常有必要的。

### 3.3 积雪对冻土的影响

3.3.1 回归分析 从上面的分析可以初步看出,阿勒泰、清河、温泉站的积雪和冻土的年际变化最为明显,因此挑选这3个站以及沙湾站作为代表站进行分析。

从图5A—5B可以看出,I区的两个站最大积雪和冻土的对应关系相似,即双峰型。当最大积雪在0—15 cm时,最大冻土值上升较快;15—40 cm出现缓慢地下降;40—65 cm缓慢上升;最大积雪深度大于65

cm时,最大积雪深度又出现下降。图5C为温泉站的最大积雪和冻土的对应关系,与I区不同,此站显示为单峰型,当最大积雪深度为0—8 cm时最大冻土值增加明显;在8—25 cm变化较小;最大积雪深度超过25 cm后,冻土深度则逐渐下降。沙湾站则显示最大冻土深度随积雪深度逐渐增加,特别是在0—15 cm增加较快(图5D)。这与王国亚等<sup>[20]</sup>对于阿勒泰地区近40年积雪对冻土的影响的研究结果相似。另外,从图5还可以看出,各站最大积雪与冻土之间并不是简单的线性关系,而是高阶多项式,两者的决定系数除清河和托里站较小外,其他均在0.7以上。

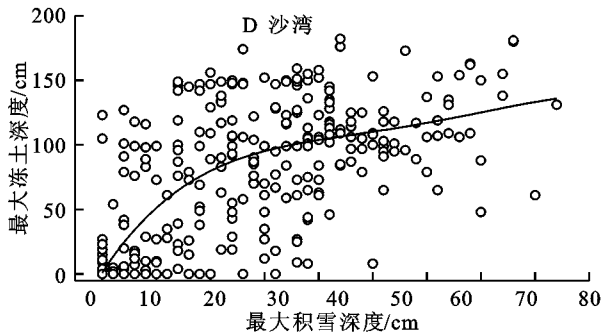
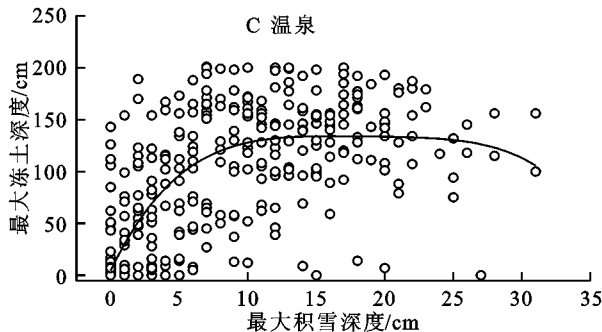
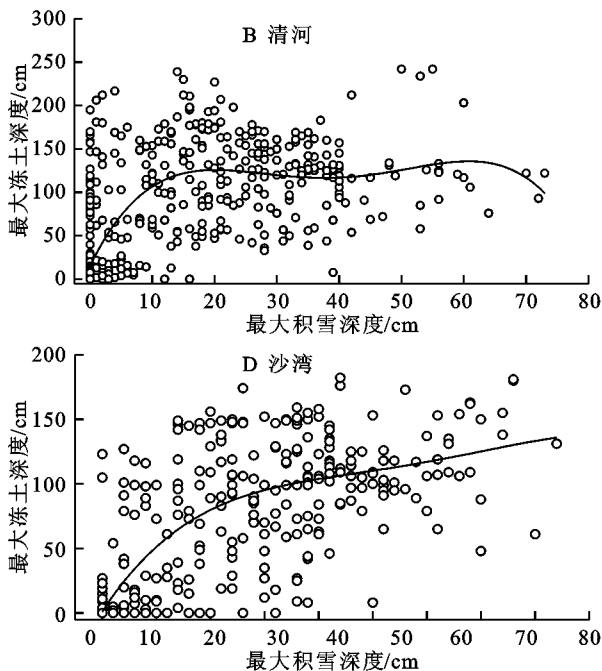
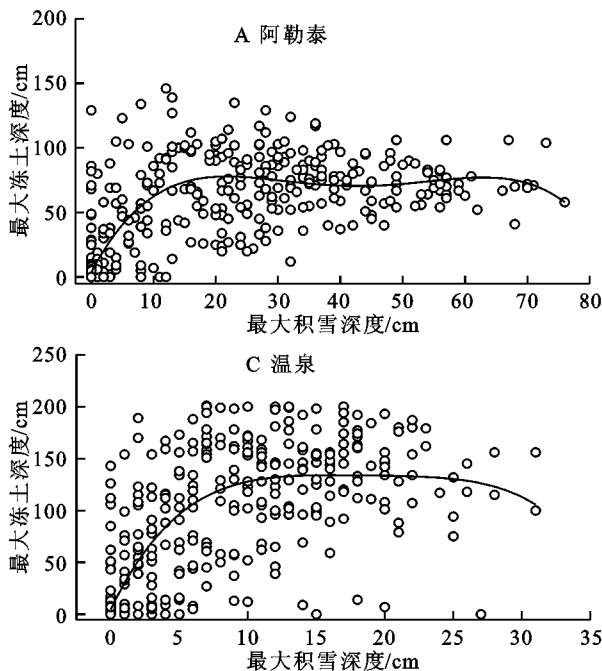


图5 最大积雪深度与最大冻土深度的关系

为了更清楚地显示积雪深度对冻土深度的影响,计算了各站不同深度的最大积雪对应的冻土深度均

值。如图6所示,积雪深度小于40 cm时,温泉站的最大冻土深度最大,其次为清河站,阿勒泰站变化最

小;当积雪深度大于 40 cm 时,清河站对应的最大冻土深度均大于阿勒泰站。

另外,从积雪深度每增加 10 cm 冻土的变化值来看,各站均表现为从 0—9 cm 增加到 10—19 cm 的阶段,最大冻土值变化最为明显,且为正值,其他阶段除Ⅲ区均出现正值外,大部分站变化较小或出现负值。

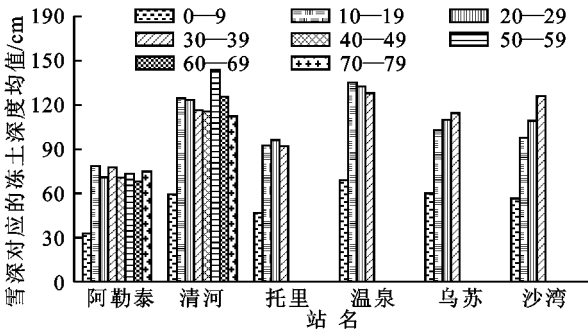


图 6 各站不同深度的最大积雪对应的冻土深度均值

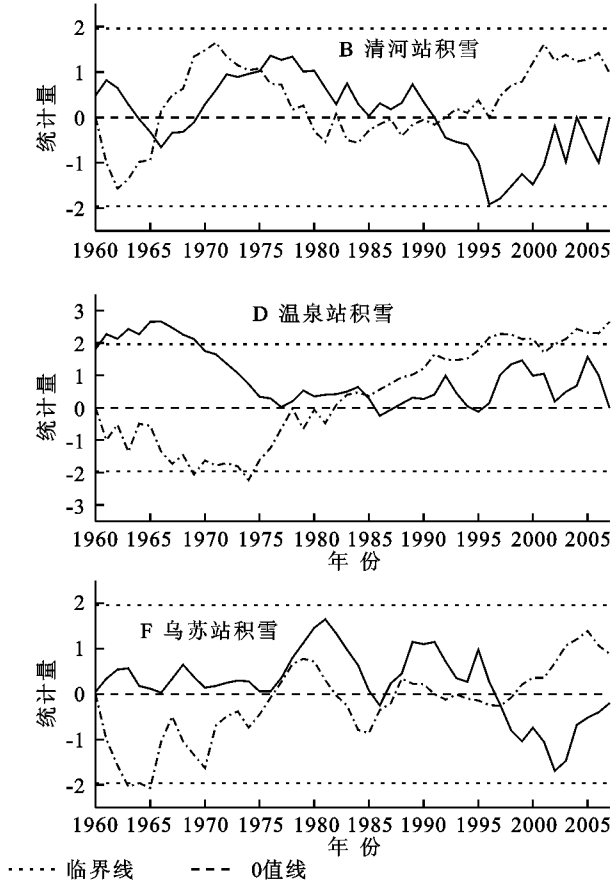
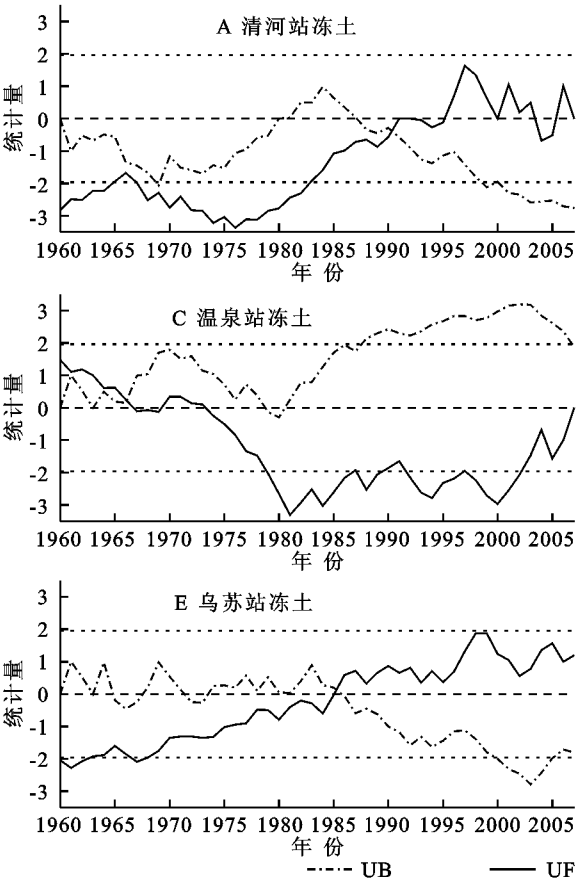


图 7 冻土及积雪的 Mann-Kendall 突变性检验

由图 7A 的 UF 曲线可见,1990s 以来Ⅰ区清河站的年最大冻土深度具有增加的趋势;在 1990s 之前为减小的趋势,特别是 1960—1983 年甚至超过了显著性水平  $U_{0.01} = \pm 2.56$  的临界线;由于 UF,UB 的交点在两临界线之间,这说明冻土深度在 1990 年发生了突变。而从图 7B 可以看出,该站 UF 曲线的变化趋势与最大冻土的变化趋势基本相反,虽然交点有 3 个,分别为 1965 年、1975 年、1991 年,但结合冻土

总的来说,积雪深度较薄时,冻土深度增加较明显,随着积雪深度的增加,冻土深度变化较小,但积雪深度超过一定限值后,冻土深度还有下降的趋势。这主要是因为积雪深度较薄时,土壤温度受到气温的影响较大,冬季当本地受到冷空气影响时,冻土深度会快速增大;当本地稳定积雪达到一定厚度时,由于积雪层能阻止空气热传导的发生,因此土壤温度变化较小,冻土深度无明显变化;当积雪较厚,土壤温度高于气温达到一定程度时,地表的冻土会因土壤孔隙里的水融化而消失,导致冻土深度减小。

3.3.2 Mann-Kendall 检验 利用冻土和积雪资料,分别找出 1960—2007 年每年极大值,并进行 Mann-Kendall 检验(简称 M-K 检验)。分别选取清河、温泉及乌苏作为代表站进行分析,如图 7 所示。

的突变点可以确定应该为 1991 年,这说明冻土和积雪的突变点基本一致。

Ⅱ区温泉站在 1967 年前冻土深度值是增加的,但在这之后呈现下降趋势,且在 1980s 后下降明显,从 UF,UB 的交点位置来看,应该在 1966 年发生突变,如图 7C。而图 7D 上积雪深度为递增趋势,但突变点在 1984 年,与该点冻土突变时间不太一致。

乌苏站在 1990s 前 UF 基本小于 0,说明冻土深

度有减小的趋势,1990s后有增加的趋势,而积雪深度的变化趋势基本上与冻土深度变化趋势相反(图7E—7F)。从突变点的位置来看,冻土基本上在1985年,积雪深度变化曲线UF,UB的交点在1997年,突变时间也不是很一致。

从以上冻土和积雪的趋势来看,基本上呈现负相关;从突变时间看,有些代表站两者出现不一致的情况,且积雪滞后于冻土,具体原因还有待进一步研究。

## 4 结论

(1) 最大冻土深度受海拔高度影响较大,并与其成正比。最大冻土深度值出现年代从平原向山区滞后,而从1980s后出现减小的趋势,且平原较山区更加明显。3个不同类型冻土区冬季最大冻土深度和平均冻土深度的年际变化基本上随时间逐渐减小。

(2) I区的最大积雪深度大于II区、III区。各站冬季最大积雪深度和平均积雪深度的年际变化基本上都呈现单峰单谷型。

(3) I区最大积雪和冻土的对应关系呈现双峰型,II区为单峰型,III区则为对数型。总的来说,积雪深度较薄时,冻土深度增加较明显,随着积雪深度的增加,冻土深度变化较小,但积雪深度超过一定限值后,冻土深度还有下降的趋势。两者的决定系数除清河和托里站较小外,其他均在0.7以上。

(4) M-K检验结果为各站最大冻土与积雪的变化趋势基本相反且突变点基本一致,两者基本上呈现负相关。

### 参考文献:

- [1] Li P. Dynamic characteristic of snow cover in western China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(6): 503-515.
- [2] 宋长青, 冷疏影, 吕克解. 地理学在全球变化研究中的学科地位及重要作用[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 318-320.
- [3] 周幼吾, 郭东信, 程国栋, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学

出版社, 2000.

- [4] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 北京出版社, 2001.
- [5] 李新, 程国栋. 冻土气候关系模型评述[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 315-321.
- [6] 刘玉洁, 郑照军. 我国西部地区冬季雪盖遥感和变化分析[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 114-123.
- [7] 冯学智, 柏延臣, 史正涛, 等. 北疆地区积雪深度的克里格内插估计[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 358-361.
- [8] 黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 722-729.
- [9] 李杨, 顾建丽, 张璞, 等. 准噶尔盆地积雪储量的遥感反演及变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 623-629.
- [10] 梁天刚, 吴彩霞, 陈全功, 等. 北疆牧区积雪图像分类与雪深反演模型的研究[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(2): 160-165.
- [11] 车涛, 李新. 利用被动微波遥感数据反演我国积雪深度及其精度评价[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(5): 301-306.
- [12] 李三妹, 傅华, 黄镇, 等. 用 EOS/MODIS 资料反演积雪深度参量[J]. *干旱区地理*, 2007, 29(5): 718-725.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王澄海, 董文杰, 韦志刚. 青藏高原季节冻融过程与东亚大气环流关系的研究[J]. *地球物理学报*, 2004, 46(3): 309-316.
- [17] 周宏飞, 周宝佳, 汤英, 等. 古尔班通古特沙漠季节性冻土入渗特性试验研究[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(4): 532-536.
- [18] 陈曦. 中国干旱区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] 李江风. 新疆气候[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [20] 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): 1293-1300.