

引用格式: 李佳, 周祖昊, 王浩, 等. 松花江流域最大冻土深度的时空分布及对气温变化的响应[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 147-156. [Li J, Zhou Z H, Wang H, et al. The spatial-temporal distribution of maximum depth of frozen soil and its response to temperature change in the Songhuajiang River Basin[J]. *Resources Science*, 2017, 39(1): 147-156]. DOI: 10.18402/resci.2017.01.15

松花江流域最大冻土深度的时空分布及对气温变化的响应

李 佳^{1,2}, 周祖昊², 王 浩², 刘佳嘉²

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘 要: 利用松花江流域内及周边的56个气象站点资料, 采用气候统计学分析方法, 对1960-2004年松花江流域最大冻土深度的时空变化及其与气温的关系进行了分析。结果表明: 流域年最大冻土深度分布整体呈由南向北增加的趋势。月最大冻土深度有明显的季节变化, 最大值多出现在3月, 且高纬度地区最大冻土深度均大于低纬度地区。1960-2004年松花江流域年最大冻土深度呈明显下降趋势, 变化率为-8.25 cm/10a, 与冻土同期的年均气温呈显著升高趋势, 变化率为0.41℃/10a。年最大冻土深度在1980s中期发生突变, 突变年前后最大冻土深度减小了35 cm。此外, 年最大冻土深度和年均气温在时间和空间尺度上均呈显著负相关, 高纬度地区最大冻土深度比低纬度地区对气候变暖的响应滞后。

关键词: 最大冻土深度; 变化趋势; 突变; 松花江流域

DOI: 10.18402/resci.2017.01.15

1 引言

在寒冷地区, 土壤中的水分因土壤温度降至0℃或以下而发生冻结, 从而引起土壤特性、结构发生改变, 影响土壤固有水文特征以及物质交换能力, 这种对温度极为敏感的土体介质称为冻土。中国是世界第三大冻土国, 季节性冻土面积约达518.4万km², 主要分布在中国的西北高原、东北平原以及华北平原各地^[1-3]。

冻土作为气候变化的指示器, 对气候和生态环境演变有重大影响, 因此国内外学者针对冻土的变化及其对气候变化的响应等进行了大量研究^[4-8]。陈博等根据观测资料对全国冻土分布的演变规律进行分析^[9], 结果表明中国冻土分布广泛, 季节性冻土有显著的年内变化特征, 东部地区冻土随纬度呈带状分布, 而青藏高原冻土随海拔呈垂直地带分布, 西北地区两种分布状态均有, 总体上全国的最

大冻土深度减小, 持续时间变短, 但也有部分地区的冻土呈现增加趋势。王澄海等、高荣等根据实测数据对青藏高原季节性冻土的时空分布和年际变化进行了研究, 研究表明青藏高原季节性冻土总体上呈下降趋势, 在20世纪80年代中期发生一次均值突变, 突变后冬季平均冻结深度下降了约10cm, 20世纪90年代青藏高原东北、东南和南部冻土均呈变薄趋势, 但是柴达木盆地和青藏高原中部表现相反的趋势, 有所加厚^[10, 11]。符传博等、张山清等、李海花等的研究表明, 新疆地区月最大冻土深度有明显的季节变化, 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^[12-14]。郝振纯等的研究表明, 黄河源区季节冻土的冻结下界深度与负积温呈线性相关, 最大冻结深度和最大负积温相关性显著, 最大负积温可反映季节冻土随时间的变化趋势, 最大冻结深度小的地区对气候变暖更加敏感,

收稿日期: 2016-08-02; 修订日期: 2016-11-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2008ZX07207-006, 2012ZX07201-006); 国家自然科学基金项目(51179203)。

作者简介: 李佳, 女, 山西晋城人, 博士, 主要从事寒区水循环模拟及对气候响应研究。E-mail: sxjcljia@163.com

最大冻结深度随时间推移呈减小趋势^[15]。李忠辉等通过对吉林省土壤温度及化冻深度的研究表明,土温与平均气温、土壤化冻深度与正积温有较好相关性,可以通过相关模型开展土壤温度和土壤化冻深度预报^[16]。现有研究大多针对青藏高原、新疆等地区多年性冻土随气候变化的退化规律,而对于中国东北地区季节性冻土的时空变化规律研究还较少。

季节性冻土会随着季节变化在近地表土壤层产生反复的多次冻融循环现象,直接改变土壤的物理性质和物质、能量交换能力,影响寒区水循环过程^[17-20]。松花江流域是中国重要的商品粮生产基地,气候变暖背景下冻土的时空变化直接影响着水资源开发利用和粮食产量。因此分析气候变化条件下的冻土变化规律,对松花江流域的生态水文过程研究、农业管理和水资源管理都有着重要的意义。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

松花江流域位于中国的东北部(E119°52'~E132°31'、N41°42'~N51°38'),流域面积约55.68万km²,属温带大陆性季风气候,1960-2004年的多年平均气温为2.67℃,年均降雨量为528mm。流域内多分布季节性冻土,年均最大冻土深度为174cm。松花江流域有两个源头,北源为嫩江,南源为第二松花江,在三岔口汇合后称为松花江^[21,22]。

2.2 数据来源

本文采用了松花江流域内及周边的56个气象站点资料,资料包括逐日气象数据与冻土冻结深度,气象资料来源于中国气象数据网^[23],冻土数据来源于寒区旱区科学数据中心^[24]。气象数据系列为1956-2013年,冻土数据系列为1951-2004年,由于56个气象站点的冻土数据在1951-1959年有不同程度的缺失,各站冻土数据开始时间不同,考虑到数据的一致性及完整性,本文利用1960-2004年的数据资料分析松花江流域近45a最大冻土深度的演变规律。所选气象站点地理位置分布见图1。

为了进一步分析不同海拔、不同纬度的冻土特征对气候变暖的响应,本文将松花江流域分为4个区域。通过统计研究区的海拔分布及下垫面情况可知,海拔在300m以下的区域约占流域面积的

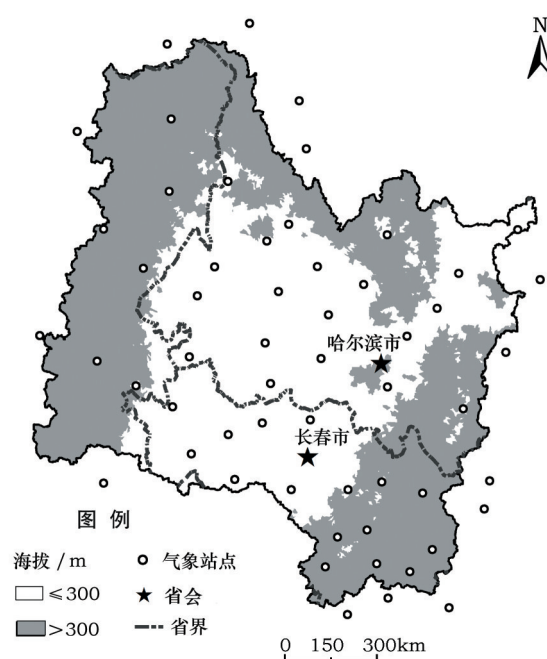


图1 松花江流域观测站点及流域海拔分布

Figure 1 Distributions of the stations and elevation in Songhua River Basin

50%,而且松花江流域南部为山区,中部为平原,海拔300m等值线与山区平原的分界线近似重合,故以海拔300m作为分区指标之一。同时,由于松花江流域南北跨度较大,海拔300m以下区域的纬度跨度约为6°,这使得此区域内南北部的冻土平均深度差异大,所以需要进一步分区讨论,而松花江干流和嫩江支流霍林河处于流域的中部位置,也处于海拔300m以下区域的中部,因此以两河沿线作为纬度的划分边界,此为分区指标之二。综上,研究区按照海拔与纬度分为4个子区域(见表1),四个区域由北向南依次为A1、A2、A3、A4。56个气象站点覆盖了整个流域,A1-A4区及周边的气象站点数分别为13、14、16和13,各区站点的平均海拔为425m、191m、165m和436m,站点基本均匀分散分布在各区。松花江流域的冻融期一般为11月到次年5月,本文将一年中观测到的冻土深度最大值定义为该年的最大冻土深度,将每月观测到的冻土深度

表1 研究区域分区情况

Table 1 The sub regions of study area

纬度	海拔≥300m	海拔<300m
高纬度	A1	A2
低纬度	A4	A3

2017年1月

最大值定义为月最大冻土深度。

2.3 分析方法

为了分析1960–2004年松花江流域年最大冻土深度的空间分布特征,本文将松花江流域根据水系和高程分为9829个子流域,然后用反距离加权平均法将冻土的站点数据展布到每个子流域的形心(见公式(1)、公式(2)),再根据面积加权平均求得研究区的最大冻土深度,最后基于ArcGIS利用Kriging插值法绘制最大冻土深度等值线^[25]。全流域或者四个分区的年最大冻土深度、月最大冻土深度以及年均气温都是通过区域内所有子流域单元的冻土深度或年均气温值进行面积加权平均求得的平均值(见公式(3))。采用最小二乘法对1960–2004年松花江流域最大冻土深度变化趋势进行分析,采用Mann-Kendall突变检验方法对松花江流域年最大冻土深度时间序列进行突变分析,采用Person系数对年最大冻土深度与气温的相关性进行分析。

$$P = \sum_{i=1}^n w_i p_i \quad (1)$$

$$w_i = r_i^{-2} / \sum_{i=1}^n r_i^{-2} \quad (2)$$

$$P_{zone} = \sum_{j=1}^n P_j A_j / \sum_{j=1}^n A_j \quad (3)$$

式中 P 为插值点冻土深度或气温的插值结果; w_i 为气象站点 i 的权重; p_i 为气象站点 i 的冻土深度或气温测量结果; r_i 为插值点与气象站 i 的距离; P_{zone} 为区域冻土深度或气温的平均值; A_j 为区域内子流域 j 的面积; P_j 为子流域 j 的插值结果; n 为气象站点数。

3 结果分析

3.1 最大冻土深度时空分布特征

大气层是影响冻土层形成和变化的主要边界条件,因此气温的变化影响着冻土的分布。图2a和图2b分别给出了松花江流域1960–2004年的多年平均年最大冻土深度和年均气温的空间分布情况。由图2a可以看出,流域内的年最大冻土深度基本呈现由南向北逐渐变深的趋势,在东南部的山区,最大冻土深度略大于周边地区。松花江流域年均最大冻土深度的最大值在流域的北部,近大兴安岭区域,冻土深度在200cm以上,松花江干流以北

的区域最大冻土深度在150~200cm,以南区域的年均冻深在150cm以下。结合图2b可以看出年均气温分布也整体上呈现由南向北逐渐降低的趋势,在最南部的局部高海拔地区气温较低。在松花江干流以南的低纬度分区,年均气温呈现整体上自西向东降低的趋势,虽然此区域年最大冻土深度也基本上呈现西浅东深的趋势,但是变化幅度没有年均气温明显,这是因为冻土深度变化较气温变化滞后,且受土壤植被特性等其他因素影响,局部地区变化趋势不同。总体上来说年均最大冻土深度分布与年均气温分布较一致,年均气温较低的地区分布的年最大冻土深度较大。

图3为松花江流域4个分区的月平均残余冻土厚度的逐月变化,A1–A4区的平均海拔分别为549m、180m、180m、和529m,由北向南分布,纬度逐渐降低。图3数据进一步说明松花江流域的平均最大冻土深度是由南向北递增。通过对比4个子区域的月残余冻土厚度值发现,海拔相同、纬度不同区域(A1与A4、A2与A3)间月残余冻土厚度的差异较大,可知纬度对残余冻土厚度的影响大于海拔的影响。此外,由图3可知,松花江流域的冻土深度呈现显著的季节性变化,进入冬季后,气温降至0℃以下,土壤开始冻结,随着气温下降,冻土深度不断加深,而转入春季后冻土开始融化,冻土深度减少。其中,A1区土壤在全年的冻结时间最长,一般冻结期为10月–次年7月,在最北部地区有些年份会全年存在冻土,A2区一般为10月–次年6月,A3、A4区的冻结期一般为10月–次年5月。由于一些年份7月–9月气温较低,所以各区域在7–9月会出现不同程度的冻结深度,这使得多年平均冻土深度在7月–9月并不为0cm。从深度变化速率来看,9月开始,从北向南逐渐进入冻结期,10月–12月冻土深度快速加深,1月–3月冻结深度增加变缓,并在3月进入冻土深度的最大值,4月开始融化,A1区的5月–7月为快速融化期,A2–A4区的快速融化期为5月–6月,随后冻土消失。为了进一步分析纬度对最大冻土深度和气温的影响,本文选取流域内站点,分别对多年年均最大冻土深度(X_1)、多年年均气温(X_2)和站点纬度(Y)进行回归分析,纬度和年均最大冻土深度的回归方程为 $Y=13.194X_1-442.810$,相关系

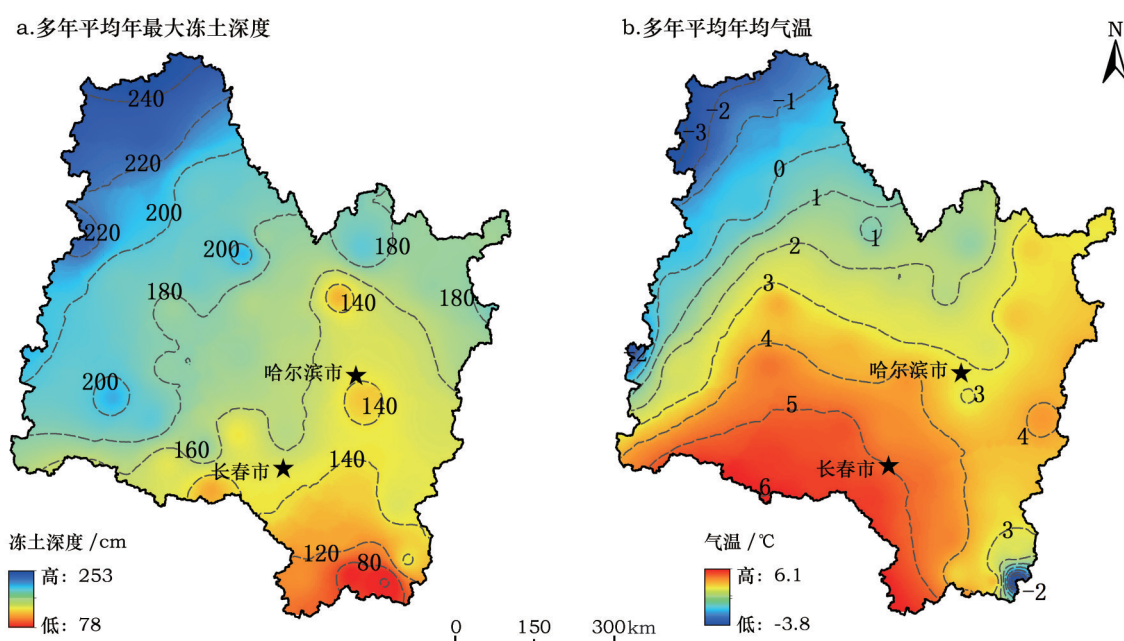


图2 1960–2004年松花江流域平均年最大冻土深度和年均气温

Figure 2 The average distributions of maximum depth of frozen soil and air temperature in Songhua River Basin from 1960 to 2004

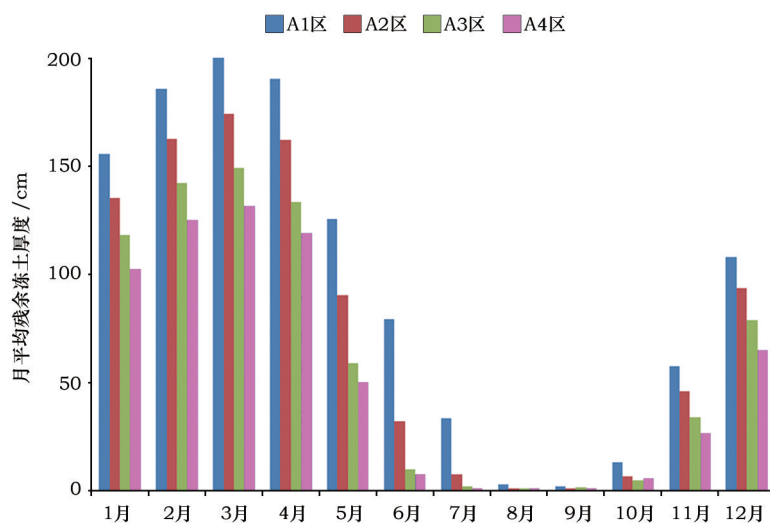


图3 松花江流域月平均残余冻土厚度变化

Figure 3 The monthly variation of depth of frozen soil in Songhua River Basin

数 $r=0.789$,显著相关,纬度和年均气温的回归方程为 $Y=-0.519X_2+27.157$,相关系数 $r=0.679$,也是显著相关,此回归分析也可为无资料地区最大冻土深度研究提供一定的参考。

3.2 年最大冻土深度趋势性分析

图4为松花江流域4个分区年最大冻土深度和年均气温的年际变化情况,通过二元线性回归分析可知,4个分区年最大冻土深度在1960–2004年整

体上都有显著减小的趋势,通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。A1区–A4区的多年平均年最大冻土深度分别为202cm、177cm、152cm、134cm,年最大冻土深度的减小速率分别为5.98cm/10a、9.69cm/10a、9.00cm/10a、9.30cm/10a,气候趋势系数分别为0.505、0.692、0.692、0.646。其中A1区最大冻土深度变化速率小于其他三区,退化速率约为其他区域的64.1%,说明高纬度高海拔区域对于气候变暖情况下的响应滞

2017年1月

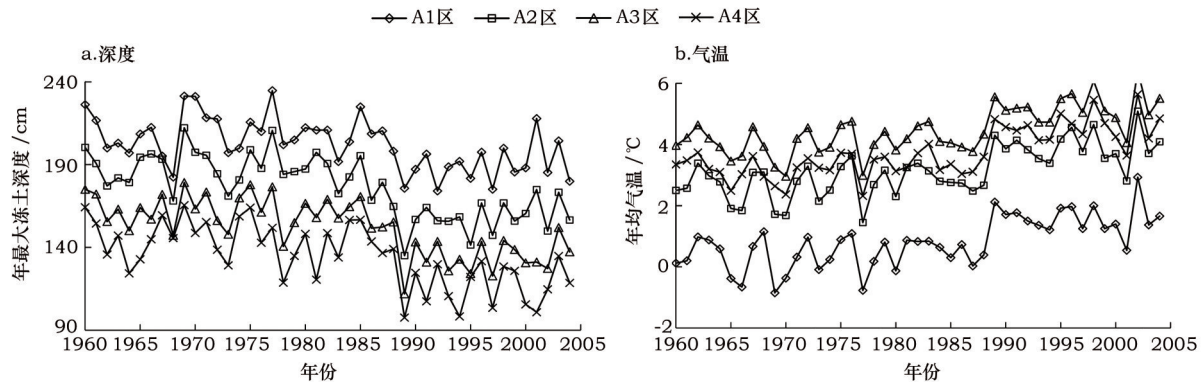


图4 松花江流域年最大冻土深度与年均气温的年际变化

Figure 4 The annual variation of maximum depth of frozen soil and air temperature

后于其他区域。图4b为年均气温的变化情况,可以看到最大冻土深度较大的A1、A2区相应年均气温较低,这与空间分布规律相同,然而虽然低纬度的A3区比A4区的年最大冻土深度要大,但是A3区的年均气温比A4区高,这也说明除了气温可能还有其他的氣象因素影响冻土深度的变化。松花江流域的多年平均最大冻土深度为174cm,年均气温为2.66℃,年最大冻土深度和年均气温的变化率分别为-8.25 cm/10a和0.41℃/10a。以上结果与其他学者研究的气候变暖情况下冻土深度减小的趋势是一致的^[26]。表2为各分区最大冻土深度的年际变化情况,由表可知高纬度的A1区和A2区1970s平均最大冻土深度最深,而1990s最浅,最大冻土深度从1970s开始逐年代减小。而低纬度的A3区和A4区年最大冻土深度的年代变化规律有所不同,两区最大值出现在1960s,并从1960s开始逐年代减小,高纬度地区比低纬度地区减小趋势滞后。

3.3 年最大冻土深度突变性分析

为了研究松花江流域年最大冻土深度的突变情况,对1960–2004年4个分区的年最大冻土深度的时间序列进行Mann–Kendall突变检验(M–K检验),给定的信度水平为0.05。图5为M–K检验计算结果,图5显示4个分区的标准正态分布序列和反序列均有交点,且在信度线内,说明松花江流域的年最大冻土深度在1960–2004年间发生了突变现象,A1、A2、A3区的突变年份分别为1983年、1984年、1985年,而A4区的交点在1981–1985年有略微的重叠,但是在1981年有明显的交点,所以突变开

表2 松花江流域年最大冻土深度年际变化情况

Table 2 The interannual variation of maximum depth of frozen soil in Songhua River Basin

	1960s 平均值 /cm	1970s 平均值 /cm	1980s 平均值 /cm	1990s 平均值 /cm	2000s 平均值 /cm
A1区	207	213	205	188	195
A2区	189	190	177	157	163
A3区	164	162	156	135	136
A4区	147	144	138	118	115

始发生在1981年。说明A4低纬度地区冻土深度对气候变化的响应先于其他高纬度区域。通过分析松花江流域年最大冻土深度M–K检验曲线图可以看出虽然4个分区发生突变的年份不同,但是都在80年代中期。1980s的平均最大冻深较1970s有所减小,且这种减小趋势在90年代更加明显。松花江流域的平均最大冻土深度从1985年前的184cm,减少到突变后的159cm,减少35cm。

3.4 年最大冻土深度与气温因子相关性分析

为了进一步研究气候变暖对冻土深度变化的影响,本文利用Person相关系数检验了松花江流域的年最大冻土深度与年均气温的空间和时间的的相关性。为了确保冻土深度变化与气温变化的一致性,气温因子统计周期为8月至翌年的7月。由表3可知,4个子区域的年均气温与年均最大冻土深度在空间上均呈显著负相关,其中空间相关性最好的区域为A1区,达到-0.828,表明在松花江流域的高海拔高纬度区域气温变化对冻土深度变化影响较大。A3区的空间相关性次之,空间相关系数为-

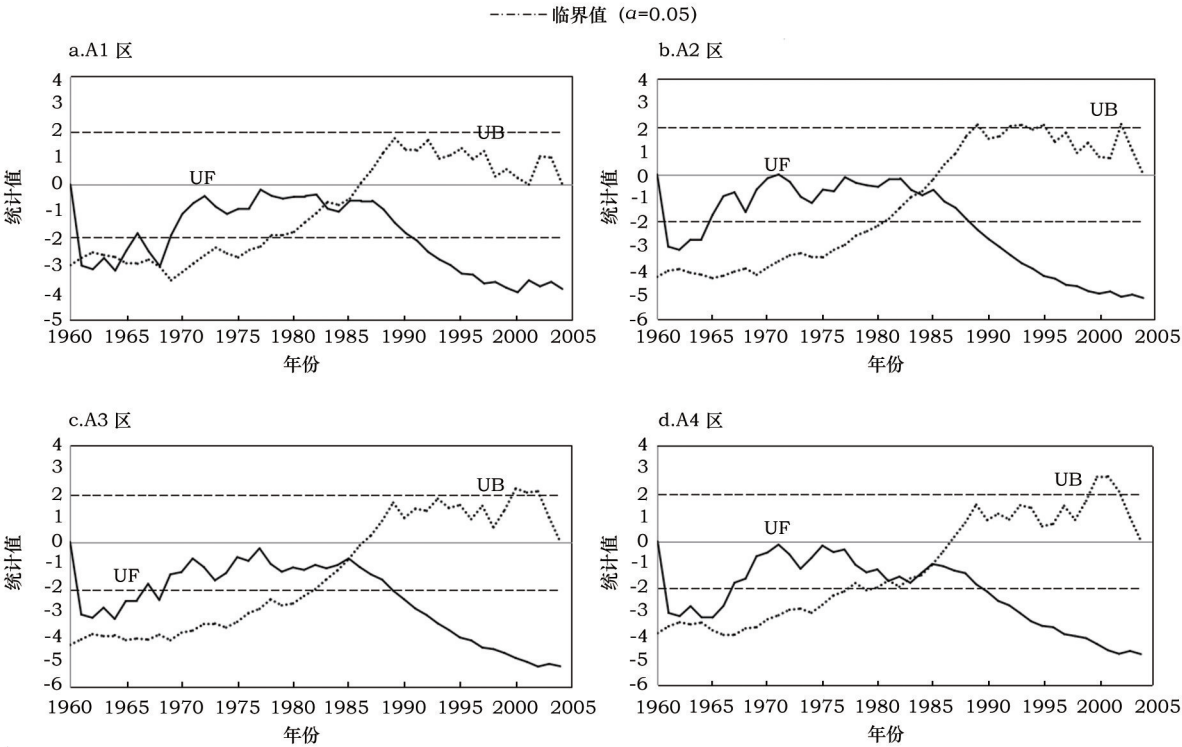


图5 松花江流域年最大冻土深度M-K检验

Figure 5 M-K abrupt test of annual variation of maximum depth of frozen soil

表3 松花江流域年均气温与年最大冻土深度相关系数

Table 3 Correlation coefficients between annual air temperature and maximum depth of frozen soil

	A1区	A2区	A3区	A4区
空间相关系数	-0.828**	-0.191**	-0.310**	-0.116**
时间相关系数	-0.727**	-0.733**	-0.624**	-0.583**

注:**. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

0.310,表明气温因子对低纬度低海拔区域的最大冻土深度也具有重要影响,A2和A4区的气温与最大冻土深度空间相关系数相对较低,但都通过0.01显著性检验。随着全球变暖进一步深化,在1960–2004年时间轴上,松花江流域全部4个子区域内的年均最大冻土深度值与年均气温值均呈现很好的显著负相关性,4个子区域间相关系数差异不大,表明了气温升高对于冻土深度减小影响的一致性。在时间序列上,高纬度区域气温与冻土深度的相关性比低纬度的要高。将全流域的年均最大冻土深度与年均气温进行相关性分析,时间相关系数为0.757,气温每升高1℃,最大冻土深度减小15cm。

为了识别驱动最大冻土深度变化的主要气温

因子,本文进一步分析了4个区域的最冷月平均气温、年负温积温与年最大冻土深度的相关性。最冷月气温指的是一个统计周期内的最低月平均气温,年负温积温指的是一个统计周期内日平均温度小于0℃的所有日平均气温之和。由表4可知,A1–A3区的最冷月气温与区域的平均年最大冻深有显著的相关性,但是A4区的最冷月气温并未表现出与年最大冻土深度的显著相关性,而4个区域的年负温积温与最大冻土深度均表现出了显著的相关性。对比年均气温、最冷月气温、年负温积温与年最大冻土深度的相关性可知,在一个统计周期内,不同区域与年最大冻土深度相关性最好的气温因

表4 松花江流域气温因子与年最大冻土深度相关系数

Table 4 Correlation coefficients between temperature factor and maximum depth of frozen soil

	A1区	A2区	A3区	A4区
最冷月气温	-0.665**	-0.556**	-0.350*	-0.268
年负温积温	-0.693**	-0.656**	-0.483**	-0.462**

注:**代表在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*代表在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2017年1月

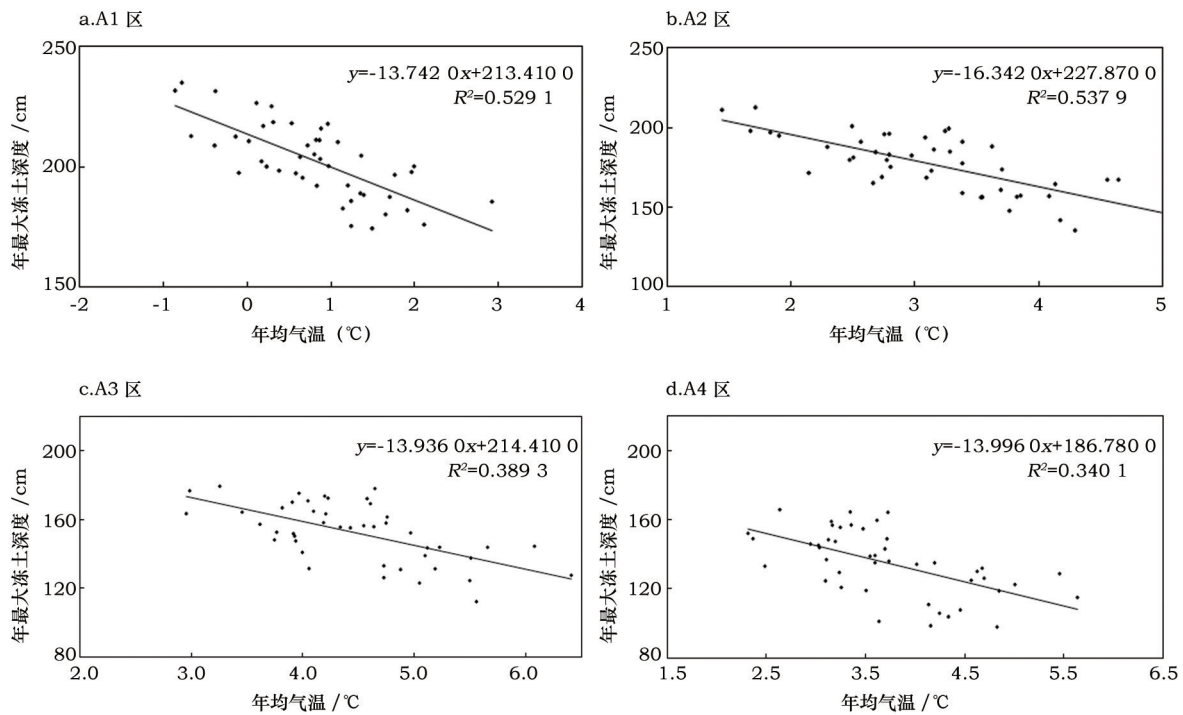


图6 松花江流域年最大冻土深度与主要气温因子的关系

Figure 6 Relationships between maximum depth of frozen soil and main temperature factor

子均为统计周期内的年均气温。图6给出了4个区域年最大冻土深度与主要气温因子的关系,可知各区域的年最大冻土深度与主要气温因子呈现较好的线性关系。

4 结论

本文利用松花江流域内及周边的56个气象站点资料,采用气候统计学分析方法,对1960–2004年松花江流域最大冻土深度的时空变化及其与气温的关系进行了分析,得出以下主要结论:

(1)流域内的年均最大冻土深度基本呈现由南向北逐渐增加的趋势,最大值在北部,纬度和海拔高度两个因子同时影响最大冻土深度的空间分布,纬度因子影响大于海拔因子。同时,松花江流域的最大冻土深度呈现显著的季节性变化,冬季最大冻土深度逐渐增加,春季开始减小,至7、8月最大冻土深度值降为全年最小。A1区土壤在全年的冻结时间最长,达10个月,4个区域全年最大冻结深度出现时间均为3月,A1–A4区的多年平均年最大冻土深度分别为202cm、177cm、152cm、134cm。

(2)流域内的年最大冻土深度在1960–2004

年整体上呈现显著减小的趋势。松花江流域的多年平均最大冻土深度为174cm,年均气温为2.66℃,年最大冻土深度和年均气温的变化率分别为–8.25cm/10a和0.41℃/10a。A1区–A4区年最大冻土深度的减小速率分别为5.98cm/10a、9.69cm/10a、9.00cm/10a、9.30cm/10a,气候趋势系数分别为0.505、0.692、0.692、0.646。通过不同年代平均最大冻土深度比较可知,1960–2004年间高纬度的A1区和A2区年代平均最大冻土深度的最大值出现在1970s,而A3区和A4区出现在1960s。高纬度区域冻土比低纬度区域对气候变化的响应滞后。

(3)松花江流域的年最大冻土深度在1960–2004年间发生了突变现象。通过分析松花江流域年最大冻土深度M–K检验曲线图可知松花江流域四个分区发生突变的年份不同,但是都在80年代中期,且A4分区发生突变年份最早。A1、A2、A3区的突变年份分别为1983、1984、1985,A4区的突变年份为1981–1985。松花江流域的平均最大冻土深度从1985年前的184cm,减少到突变后的159cm,减少35cm。

(4)通过Person相关系数检验可知松花江流域的年最大冻土深度与年均气温在空间和时间尺度上均存在显著的负相关性。其中A1区域最大冻土深度和年均气温的相关最好,空间和时间相关系数分别为-0.828和-0.727,这表明在松花江流域的高海拔高纬度区域冻土深度变化的主要原因之一是气温因子。通过4个分区结果对比可知,最大冻土深度和年均气温在高纬度区域比低纬度区域相关性好。对松花江流域进行最大冻土深度和年均气温的相关性分析可知,相关系数为0.757,气温每升高1℃,最大冻土深度减小15cm。对比年均气温、最冷月气温、年负温积温与年最大冻土深度的相关性可知,在一个统计周期内不同区域影响年最大冻土深度的主要气温因子均为统计周期内的年均气温,即驱动最大冻土深度变化的主要气温因子为年均气温。由于数据限制,本文仅分析了1960-2004年松花江流域不同区域最大冻土深度的变化规律。2004年以后气温整体上仍有上升趋势,所以2004年以后松花江流域的冻土时空分布规律还有待于未来的进一步探究。

参考文献(References):

- [1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社, 2000. [Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000.]
- [2] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in Northern Hemisphere[J]. *Polar Geography*, 1999, 23(2): 132-154.
- [3] 郭玲鹏,李兰海,徐俊荣,等. 天山巩乃斯河谷积雪深度及季节冻土温度对气温变化的响应[J]. 资源科学, 2012, 34(4): 636-643. [Guo L P, Li L H, Xu J R, et al. Responses of snow depth and seasonal frozen ground temperature to enhances air temperature in Kunges Valley, Tianshan Mountains[J]. *Resources Science*, 2012, 34(4): 636-643.]
- [4] 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. [Wang Q X, Li H J, Wei R Q, 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.]
- [5] 陈光宇,李栋梁. 东北及邻近地区累积积雪深度的时空变化规律 [J]. 气象, 2011, 37(5): 513-521. [Chen G Y, Li D L. Temporal-spatial characteristics of cumulative snow depth in northeast China and its vicinity[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(5): 513-521.]
- [6] 李玲萍,李岩瑛. 石羊河流域冬季冻土深度变化趋势及原因 [J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 587-593. [Li L P, Li Y Y. Changing trend and reasons of winter maximum frozen soil depth in Shiyang River Basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 587-593.]
- [7] 赵庆云,李栋梁,吴洪宝. 西北区东部近40年地面气温变化的分析[J]. 高原气象, 2006, 25(4): 643-650. [Zhao Q Y, Li D L, Wu H B. Analyses on surface air temperature change in east part of northwest China in last 40years[J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(4): 643-650.]
- [8] 王兴菊,许士国,李文义,等. 扎龙湿地季节性冻土冻融规律及其生态水文功能研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(6): 897-903. [Wang X J, Xu S G, Li W Y, et al. Freezing-thawing rule of seasonal frozen soil and its eco-hydrological function in Zhalong Wetland[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2008, 48(6): 897-903.]
- [9] 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. [Wang B, Li J P. 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.]
- [10] 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. [Wang C H, Dong W J, Wei Z G. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(5): 523-531.]
- [11] 高荣,董文杰,韦志刚. 青藏高原季节性冻土的时空分布特征 [J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 740-744. [Gao R, Dong W J, Wei Z G. The features of temporal and spatial distributions of seasonal frozen soil in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(5): 740-743.]
- [12] 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. [Fu C B, Dan L, Wu J, et al. Variation and abrupt change of maximum depth of frozen soil over Xinjiang under the background of global warming, 1961- 2000[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1410-1418.]
- [13] 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. [Zhang S Q, Pu Z C, Li J L, et al. Response of the maximum depth of seasonal freezing to the Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1419-1427.]
- [14] 李海花,刘大锋,段淑芳,等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2014, (5): 251-258. [Li H H, Liu D F, Duan S F, et

2017年1月

- al. The spatial-temporal distribution change of maximum frozen soil depth and temperature change in Altay region of Xinjiang Province from 1963 to 2012[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, (5): 251-258.]
- [15] 郝振纯, 王晓燕, 侯艳茹, 等. 黄河源区季节冻土最大冻结深度估算方法[J]. 水电能源科学, 2013, (5): 73-76. [Hao Z C, Wang X Y, Hou Y R, et al. Estimation method for maximum frozen depth of seasonal frozen soil in source region of the Yellow River [J]. *Water Resources and Power*, 2013, (5): 73-76.]
- [16] 李忠辉, 韦晓丽, 王秀娟, 等. 吉林省春季土壤温度及化冻深度研究[J]. 土壤通报, 2016, (2): 334-338. [Li Z H, Wei X L, Wang X J, et al. Study of soil temperature and thaw depth during spring in Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, (2): 334-338.]
- [17] 王学佳, 杨梅学, 万国宁. 藏北高原D105点土壤冻融状况与温湿特征分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 56-63. [Wang X J, Yang M X, Wan G N. Processes of soil thawing-freezing and features and moisture at D105 on the northern of ground temperature Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 56-63.]
- [18] 付强, 侯仁杰, 王子龙, 等. 冻融期积雪覆盖下土壤水热交互效应[J]. 农业工程学报, 2015, (15): 101-107. [Fu Q, Hou R J, Wang Z L, et al. Soil moisture thermal interaction effects under snow cover during freezing and thawing period[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, (15): 101-107.]
- [19] 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 A X, Liu Z H, Lu W J. 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.]
- [20] 赵显波, 刘铁军, 许士国, 等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 233-240. [Zhao X B, Liu T J, Xu S G, et al. Freezing thawing process and soil moisture migration within the black soil plow layer in seasonally frozen ground regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 233-240.]
- [21] 冯波, 章光新, 李峰平. 松花江流域季节性气象干旱特征及风险区划研究[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 466-474. [Feng B, Zhang G X, Li F P. Characteristics of seasonal meteorological drought and risk regionalization in Songhua River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 466-474.]
- [22] 于敏. 松花江流域水环境管理系统[D]. 上海: 同济大学, 2008. [Yu M. Water Environment Management System of Songhua River Basin[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.]
- [23] 中国气象数据网[EB/OL]. <http://data.cma.cn>. [China Meteorological Data Network [EB/OL]. <http://cdc.cma.gov.cn>.]
- [24] 寒区旱区科学数据中心[EB/OL]. <http://westdc.westgis.ac.cn>. [Cold and arid regions Science Data Center[EB/OL]. <http://westdc.westgis.ac.cn>.]
- [25] 王喜峰, 周祖昊, 贾仰文, 等. 几何插值法在大尺度长系列降雨插值中的比较和改进[J]. 水电能源科学, 2010, 28(12): 1-3. [Wang X F, Zhou Z H, Jia Y W, et al. Comparison and improvement of geometry interpolation methods in rainfall interpolation with large-scale long-series data[J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(12): 1-3.]
- [26] 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. [Yang X L, Ma Z H, Ma Y S, et al. The spatial-temporal distribution state of seasonal frozen soil and responses to temperature change in the Shiyang River Basin[J]. *Resources Science*, 2013, 35(10): 2104-2111.]

The spatial-temporal distribution of maximum depth of frozen soil and its response to temperature change in the Songhuajiang River Basin

LI Jia^{1,2}, ZHOU Zuhao², WANG Hao², Liu Jiajia²

(1. Environmental Science and Engineering Department, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Beijing 100038, China)

Abstract: In the Songhuajiang River Basin seasonal frozen soil is extensively distributed. Frozen soil is defined as a soil temperature of 0 °C or below 0 °C where the soil freezes causing changes in soil characteristics, soil structure and hydrological processes. Based on data from 56 meteorological stations in the Songhuajiang River Basin and surrounding areas, the temporal and spatial distribution of the maximum depth of frozen soil in the Songhuajiang River Basin from 1960 to 2004 and its relationship with air temperature were analyzed using climate statistical analysis methods. We found that the annual maximum depth of frozen soil north of the region is higher than that in the south. The monthly maximum depth of frozen soil in the basin shows seasonal variation, with the maximum occurring in March. At the same time, the maximum depth of frozen soil in high latitude area was higher than in a low latitude area. There was a distinct decrease from 1960 to 2004 across the basin, with regression coefficients of -8.25 cm per year, and the annual mean air temperature of the frozen period has increased with variation of 0.41°C per decade. There was an abrupt change of the maximum depth of frozen soil in mid 1980s, and the maximum depth of frozen soil was reduced by 35 cm. This study also found that the maximum depth of frozen soil and annual mean temperature are negatively correlated at spatial and temporal scales and the response of the maximum depth of frozen soil at high latitudes to climate warming is slower at lower latitudes.

Key words: maximum depth of frozen soil; changing trend; abrupt change; Songhuajiang River Basin