

近50年来黑龙江省冻土厚度的时空变化特征

王 宁, 臧淑英, 张丽娟

(黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨师范大学, 哈尔滨 150025)

摘要: 基于MK检验、滑动 t 检验、EOF分析方法, 使用近50年(1961-2012年)黑龙江省32个气象基准台站逐日冻土观测数据、气温观测数据, 对黑龙江省冻土厚度时空变化特征进行了分析。结果表明: ①近50年黑龙江省冻土厚度减少了12.86 cm, 下降速率为-0.53 cm/a, 以2001年为界发生了突变。②冻土厚度空间分布呈现由北厚南薄格局, 中部地区冻土厚度较同纬度其他区域偏低; 空间变化呈现南部冻土厚度降低快, 北部降低慢, 中部与西部、东南部呈相反变化的特征, 伊春、铁力、漠河观测点为冻土变化敏感区。③气温是影响黑龙江省冻土厚度变化的主要因素, 与冻土厚度相关系数为-0.611。本文的主要贡献为揭示了黑龙江省冻土厚度的空间变化特征, 为相关研究及各级政府规划提供了依据。

关键词: 时空变化; 突变分析; EOF分析; 冻土厚度; 黑龙江省

DOI: 10.11821/dljy201803013

1 引言

冻土是一种对温度敏感和易变的地质体, 与气候之间相互作用, 一方面气候变化会影响冻土厚度和冻土分布范围^[1,2]; 另一方面冻土的消融也可能引起水文、工程基础等变化^[3]。在全球气候变暖备受关注的大背景下, 分析冻土厚度时空变化特征, 对掌握冻土退化的影响以应对气候变化显得尤为重要。研究表明, 近60年来黑龙江省升温速率远高于东北及全国的升温速率, 是升温幅度最高的省份^[4], 也是冻土退化的区域之一^[5,6]。

冻土厚度变化是冻土退化的最主要标志之一, 可以直接或间接影响土壤水热过程, 受到国内外学者的广泛关注。Brown等开展了环北极多年冻土区活动层和近地表冻土变化的监测^[7,8], Jorgenson等使用GIS数据库生成冻土分类地图, 利用实地测量数据, 基于恒定速率的假设计算得出在阿拉斯加中部自1850年以来53%的多年冻土发生退化^[9]。Cammill利用实测数据结合树木年轮分析发现在加拿大中部多年冻土融化速率显著增加^[10]。Frauenfeld利用土壤温度数据使用线性内插方法确定0℃等温线, 确定0℃层深度作为估计解冻深度并结合实测数据发现在俄罗斯多年冻土区, 活动层厚度增大了约22 cm, 冻结深度减少了34 cm^[11]。Sharkhuu利用深钻孔多年测量数据, 发现Mongolia中部地区活动层厚度以1~6 cm/10a的速度在上升^[12]。

国内冻土的研究主要集中在青藏高原、新疆和东北大小兴安岭地区。吴吉春等基于数值模拟结果和多年冻土深孔测温数据发现青藏高原多年冻土边缘层在萎缩, 处于消失

收稿日期: 2017-09-26; 修订日期: 2017-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571199)

作者简介: 王宁(1993-), 女, 黑龙江绥化人, 硕士, 研究方向为冻土变化研究。E-mail: 370741890@qq.com

通讯作者: 臧淑英(1963-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 研究方向为LUCC与3S综合应用等方面研究。E-mail: zsy6311@163.com

阶段^[13]。李林等利用相关分析、回归分析方法发现青海季节冻土对气温变化的响应具有显著的滞后期^[14]。赵林等利用降水、气温、地温观测数据结合分析发现在新疆河源区活动层厚度增厚,多年冻土可能正在发生自下而上的迅速退化^[15]。王秋香等利用土壤10 cm深度封冻时段资料和最大冻土深度观测资料分析发现新疆地区最大冻土深度趋向变浅,土壤封冻时间缩短^[16]。同时,学者研究发现东北大小兴安岭地区活动层厚度加深,融区扩大,多年冻土岛消失的现象^[17-19],但研究零散不系统,无法支撑龙江快速经济社会发展的需求。

本文利用1961-2012年黑龙江省气象基准台站的逐日冻土观测数据以及同期气温资料,分析黑龙江省冻土厚度的时空变化特征,并进行敏感性分析及突变检测,以全面而准确地掌握不同冻土区域冻土厚度动态特征。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

黑龙江省位于中国东北部,气候为温带大陆性季风气候,地势大体为北部、西北部、东南部高,东北部、西南部低。根据寒区旱区科学数据中心发布的基于《中国冰雪冻土图》的中国冻土分布图^[25],本文选取以黑龙江省为界限的冻土区,研究区内包含多年冻土区和季节冻土区(图2)。

2.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall (MK) 检验。对具有 n 个样本量的时间序列 n , 首先构造一秩序列^[20]:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i (k=2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$\text{其中 } r_i = \begin{cases} 1 & (x_i > x_j) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad j=(1, 2, \dots, i) \quad (2)$$

可见,秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于第 j 时刻数值的累计数。在时间序列随机独立的假定下,定义统计量^[20]:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{V_{ar}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中 $UF_1=0$, $E(S_k)$, $V_{ar}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,且有相同连续分布时,它们可由下式算出^[20]:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (4)$$

$$V_{ar}(S_k) = \frac{n(n+1)(2n+5)}{72} \quad (5)$$

UF_i 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,若 $UF_i > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,再重复上述过程,使 $UB_k = -UF_k, k=n, n-1, \dots, 1, UB=0$ 。

2.3 滑动 t 检验

对于具有 n 个样本量的时间序列 $\{X_i, i=1, 2, \dots, n\}$,选择某一时刻为基准点,基准点前后两段子序列 X_1, X_2 的样本数分别为 n_1, n_2 (一般取 $n_1 = n_2$),两段子序列的平均值

为 \bar{X}_1 和 \bar{X}_2 ，方差为 S_1^2 和 S_2^2 。

定义统计量为^[21]：

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (6)$$

其中

$$S^2 = \frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (7)$$

则 t 服从自由度 $n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。

2.4 EOF 分析

经验正交分解 (EOF) 原理是将时间和空间场分解为多个空间的特征向量和时间系数序列的线性组合，分析场的空间和时间变化^[22]。本文对冻土厚度距平时空场进行经验正交分解^[21]，分析研究区域内冻土厚度的变化特征。EOF 分析方法使用 Parallel Studio XE 2011 with VS2010 软件编程实现。

2.5 空间插值法

交叉验证可以确定选用的插值方法的可行性^[23]。本文依次假设某一已知观测站的冻土厚度未知，利用剩余的观测站 (31 个) 数据进行逐年插值，进而得到此观测站插值的冻土厚度，并将此插值数值与实际观测数据的 MAE 和 RMSE 的值进行比较^[24]，最终选用普通克里金方法进行空间插值。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(V_{oi} - V_{pi}) \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{oi} - V_{pi})^2} \quad (9)$$

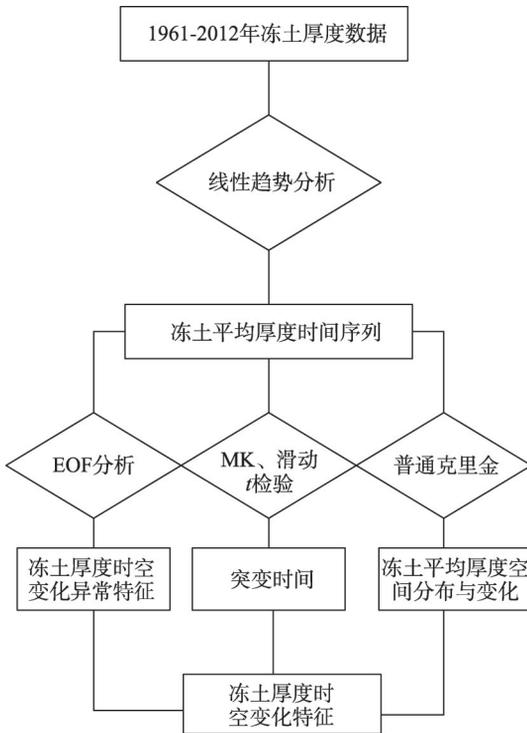


图1 技术路线图

Fig. 1 Technical roadmap

2.6 技术路线

通过线性趋势分析方法对近 50 年冻土厚度数据在年、年代、季节时间序列上的变化趋势进行分析，并利用 MK 检验、滑动 t 检验对近 50 年冻土平均厚度进行突变检验，得到冻土厚度突变时间。选用普通克里金空间插值方法对冻土厚度数据进行空间上的分布与变化的分析，并通过 EOF 方法对冻土厚度在空间上的异常敏感区域进行分析，最终得到黑龙江省冻土厚度的时空变化特征 (图 1)。

2.7 数据来源

筛选了黑龙江省绥芬河、哈尔滨、齐齐哈尔、漠河等 32 个观测站的冻土观测资料，冻土观测资料时间尺度为 1961-2012 年，为逐日冻土观测数据。选择原则基于两个，一是 32 个观测站的观测数据序列较长，观测记录较完整；二是台站布局具有空间代表性和均匀性。逐日冻土观测数据

来源于黑龙江省气象信息中心。冻土观测按照国家地面气象观测规范,根据埋入土中的冻土器内水柱所在位置,从管壁刻度线上读出冰上下两端的相应刻度数,分别记为冻结层的上、下限深度值^[26]。

1961-2012年32个气象观测站的逐日气温资料来自黑龙江省气象局。

3 结果分析

3.1 黑龙江省冻土厚度时间变化特征

近50年来黑龙江省冻土平均厚度为100.2 cm,最大值为119.5 cm,最小值为72.9 cm,相差46.6 cm,分别出现在1966年和2011年。1961-2012年冻土厚度减少了12.86 cm,冻土平均厚度呈极显著下降趋势(通过0.01概率水平检验),年平均下降速率为 -0.53 cm/a,年变异系数为11.6%,年际间变化幅度平稳(图3)。在20世纪70年代(1971-1980年)冻土平均厚度达到最大,20世纪80年代后逐年代呈减少趋势,21世纪最初十年(2001-2012年)相比20世纪70年代,冻土平均厚度减少了21.1 cm(图4)。

黑龙江省近50年冻土平均厚度时间序列Mann-Kendall突变检验分析表明,如图5所示,在1997年和2001年有两个交点,两个交点均位于置信区间外,不能确定是否为突变点。本文又对近50年冻土平均厚度时间序列进行了滑动 t 检验,在滑动 t 检验中,有3个时间点前后出现了突变,分别是1988年前后,1997年前后和2001年前后(图6)。综合两种检验方法的结果,可以确定在1997年和2001年有突变的可能性,也就是说,在20世纪90年代末期,黑龙江省冻土厚度发生了突变,在2001年以后的冻土厚度明显小于2001年以前,2001年有可能为冻土厚度突变时间。

为了进一步探究突变的原因,本文对黑龙江省近50年平均气温进行Mann-Kendall检验,气温突变的年份出现在1987年。有研究表明,1988-2009年为气温变化的第

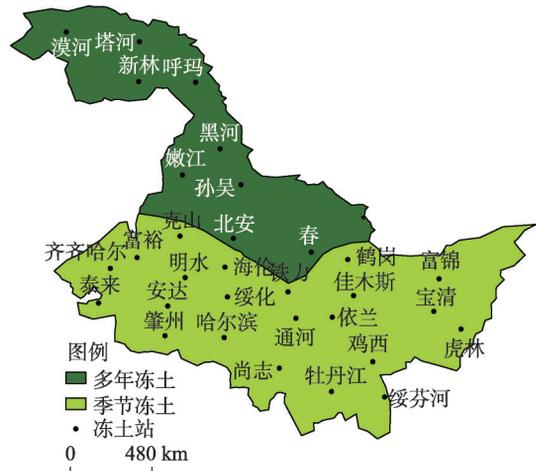


图2 研究区冻土类型分布图

Fig. 2 Distribution of permafrost types in the research area

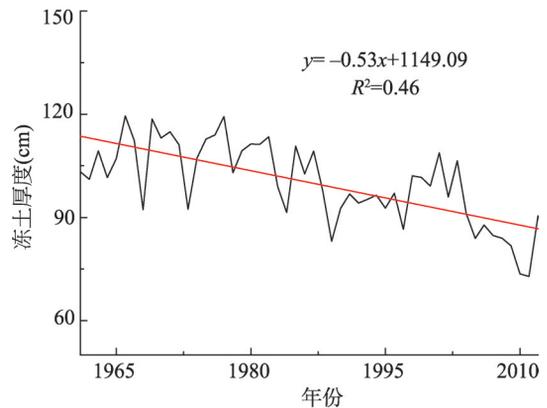


图3 冻土厚度年变化图及其回归分析

Fig. 3 Annual variation of permafrost thickness and its regression analysis

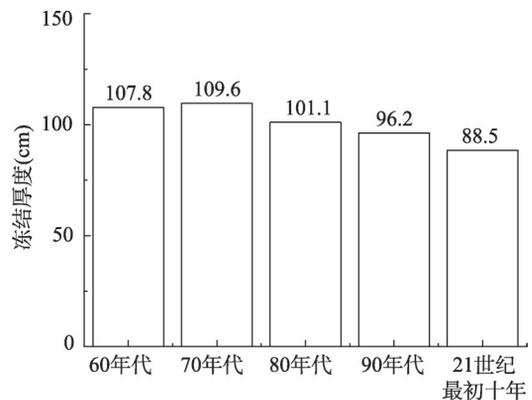


图4 冻土厚度年代变化图

Fig. 4 Periodic permafrost thickness variation

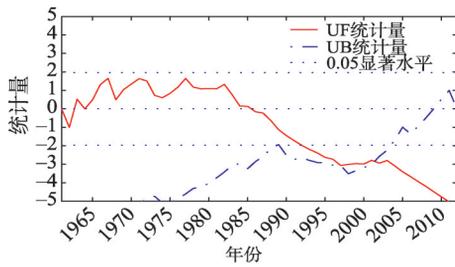


图5 冻土厚度Mann-Kendall检验图

Fig. 5 Results of the Mann-Kendall test for permafrost thickness

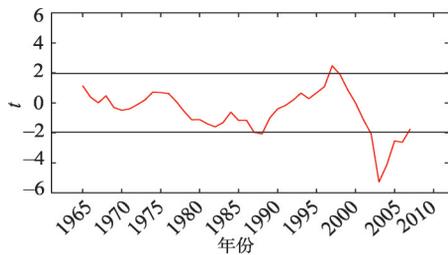


图6 冻土厚度滑动t检验图

Fig. 6 Permafrost thickness smoothing t-test

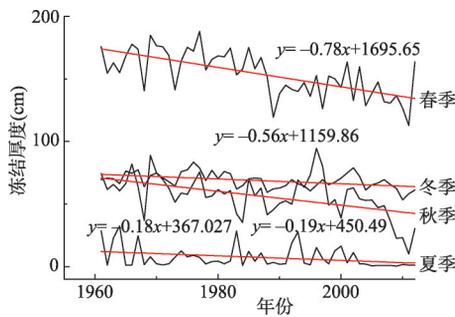


图7 冻土厚度季节变化图及其回归分析

Fig. 7 Seasonal variation of permafrost thickness and its regression analysis

结果表明,普通克里金插值结果最好,所以本文采用普通克里金方法对冻土厚度数据进行空间插值分析,为了进一步验证普通克里金插值的准确性,本文按照2.5所述方法计算了32个站点插值与实测两组数据的RMSE和MAE分别为0.0087和0.0046(表1)。

3.2.2 黑龙江省冻土厚度空间分布特征 利用近50年黑龙江省冻土平均厚度数据进行插值分析发现黑龙江省冻土厚度总体分布呈现北厚南薄格局,但并不完全与纬线平行。同纬度相比,黑龙江省中部地区冻土厚度较同纬度其他区域偏低,东南部的虎林也为低值区。冻土厚度最高值区位于大兴安岭地区,小兴安岭地区次之(图9)。

黑龙江省冻土冻结一般从秋季开始,82%的冻土厚度在40~50 cm之间(图10c);冬季冻土冻结范围逐渐扩大,51%的冻土厚度在120~140 cm之间,11%的冻土厚度在140~160 cm之间,4.5%的冻土厚度达到200~220 cm之间,冻结厚度普遍达到100 cm以上,

三阶段,即高温阶段^[4],可以看出,黑龙江省冻土厚度发生突变的时间正处于气温变化的高温阶段,另一方面,也说明,冻土厚度发生突变与气温突变有一个滞后期。黑龙江省年平均气温与冻土厚度呈极显著负相关,相关系数为-0.611(通过0.01概率水平检验)。其关系方程为

$$y = -6.995x + 117.482 \quad (10)$$

式中: y 为冻土厚度; x 为年平均气温。可以看出,黑龙江省年平均气温每增加1℃,冻土厚度减少6.99 cm。这些结论也进一步证明了气温是导致冻土厚度发生突变的主要原因。

将黑龙江省冻土厚度数据按照气象部门的季节划分标准,分别划分为春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)、冬季(12月-翌年2月)4个季节时间段^[27]。近50年来黑龙江省春季、夏季、秋季、冬季平均冻土厚度分别为113.9 cm、17.3 cm、37.7 cm、135 cm。各个季节的冻土厚度均呈下降趋势,春季、夏季、秋季、冬季冻土厚度的下降速率分别为-0.78 cm/a、-0.18 cm/a、-0.19 cm/a、-0.56 cm/a,其中春季呈极显著下降趋势(通过0.01概率水平检验),其他三个季节均为不显著下降趋势。也就是说,黑龙江省春季冻土厚度减少最为显著(图7)。相比1961年,至2012年时,黑龙江省春季、夏季、秋季、冬季的平均冻土厚度分别减少了40 cm、12 cm、10 cm、27 cm,变异系数分别为11.6%、7.8%、10.9%、8.9%,春季冻土厚度变化相对来说最不稳定。

3.2 黑龙江省冻土厚度空间分布特征

3.2.1 空间插值方法选择 分别采用普通克里金、全局多项式、反距离权重、泛克里金、局部多项式方法进行空间插值,并提取了32个观测站的插值结果,与观测值进行了精度比较(图8),

在大兴安岭地区冻结厚度达到200 cm以上(图10d);春季,随着温度的升高,冻土厚度在全省范围内开始减小,除大兴安岭观测点外,72%的冻土厚度下降到100~120 cm之间,其中伊春、泰来观测站点冻土厚度减少较慢,呈现出空间差异性(图10a);夏季后,冻土冻结厚度进一步减小,除大兴安岭观测点外,黑龙江省冻土基本完全融化(图10b)。

3.3 黑龙江省冻土厚度空间变化特征

本文分别将32个观测点的冻土厚度以线性函数来拟合原序列, $y=ax+b$, 其中a值的正负表示各站冻土厚度随时间变化的方向,绝对值大小表示变化速率,作为判定冻土厚度的变化速率。发现黑龙江省全区域冻土厚度为不同程度的递减趋势,递减速率绝对值大小由北到南逐渐升高。南部冻土厚度降低的快,而北部降低的慢。全省区域内71%的冻土站冻土厚度呈现显著递减趋势。其中新林、通河、肇州、富锦、黑河观测站的冻土厚度呈现为显著减少趋势(通过0.05概率水平检验),占有所有站点的15%,平均减少速率为-0.26 cm/a;嫩江、伊春、佳木斯、依兰、哈尔滨、尚志、齐齐哈尔、安达、克山、富裕、泰来、宝清、虎林、明水、海伦、鹤岗、绥化观测站的冻土厚度呈现极显著减少趋势(0.01概率水平检验),占有所有站点的56%,平均减少速率为-0.49 cm/a(图11)。

黑龙江省冻土厚度按年代划分在空间上表现出明显的变化特征。20世纪60年代(1961-1970年)全省冻土基本表现为增厚趋势,只有10.4%的面积冻土厚度减少(图12a);20世纪70年代(1971-1980年),冻土厚度减少区的面积越来越大,增厚区的面积越来越少,冻土厚度减少的面积已经达到39.8%(图12b);20世纪80年代(1981-1990年),冻土厚度减少面积已经占了99.4%(图12c);20世纪90年代(1991-2000年),冻土厚度减少面积占了100%(图12d);21世纪最初的10年(2001-2012年),黑龙江省全省区域冻土厚度下降速度明显增快,全省范围内冻土厚度下降速率均表现出大于20世纪80年代,北部大兴安岭冻土厚度下降速率最快(图12e)。

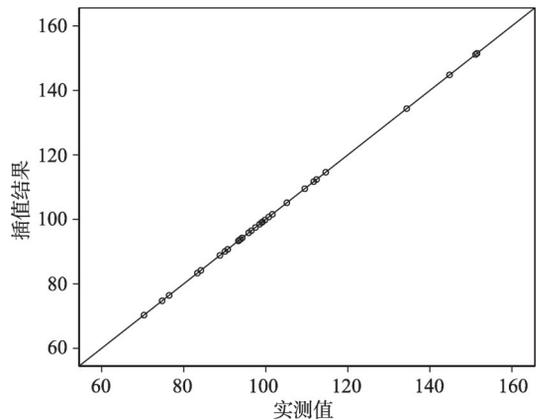


图8 实测值与插值结果点对比图

Fig. 8 Comparison of measured and interpolated points

表1 五种方法交叉检验结果

Tab.1 Five methods of cross-validation results

插值方法	MAE	RMSE
普通克里金	6.9949	1.6241
泛克里金	14.6388	3.9783
反距离权重	14.1078	3.7253
全局多项式	10.0323	2.5412
局部多项式	15.0864	4.8455

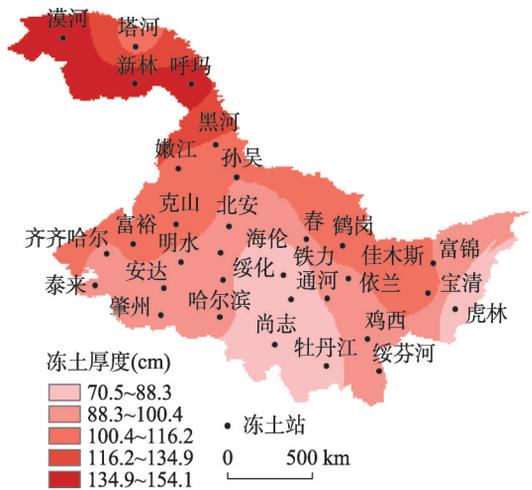


图9 冻土厚度年空间分布图

Fig. 9 Annual spatial distribution of permafrost thickness

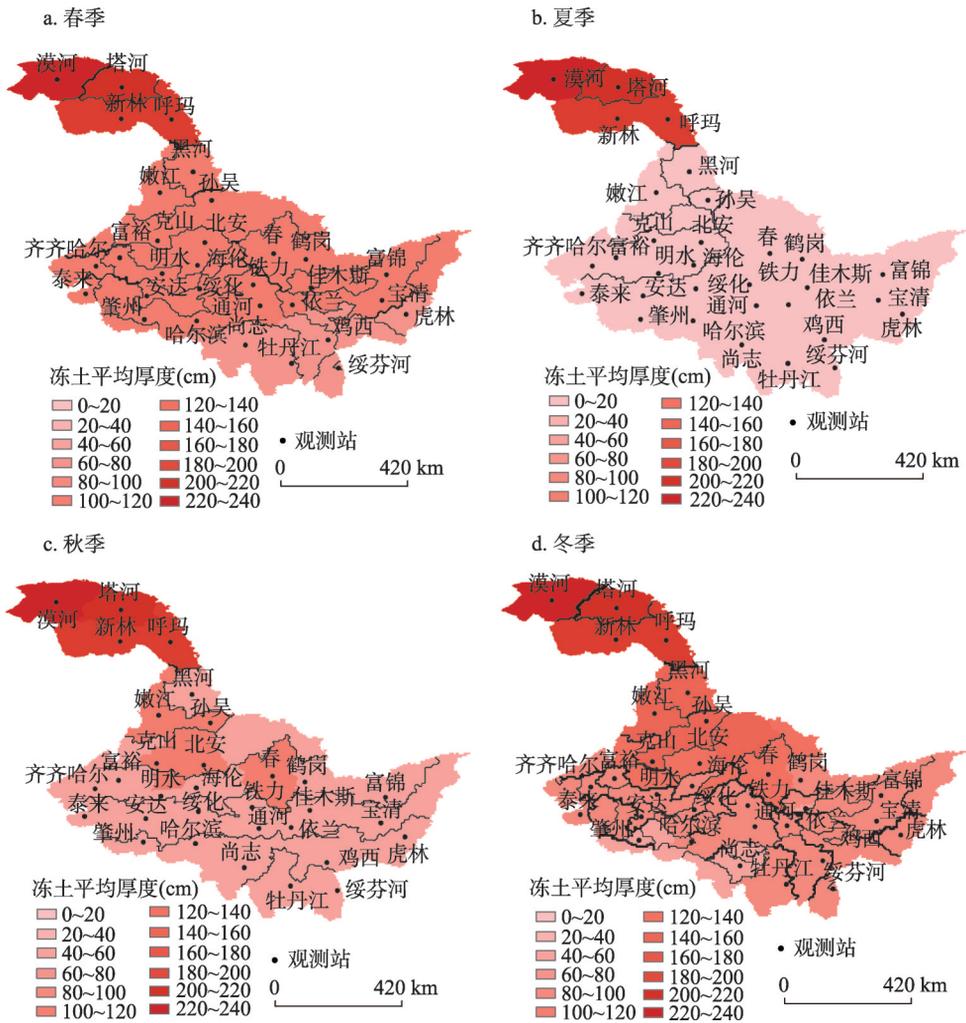


图 10 冻土厚度季节空间分布图

Fig. 10 Seasonal spatial distribution of permafrost thickness

3.4 冻土厚度与气温的空间关系

从空间分布看, 年平均气温与冻土厚度的相关系数具有空间差异性。可以说气温是影响黑龙江省中西部冻土厚度变化的主要因素之一, 在黑龙江省东南部和西北部冻土厚度与气温呈不显著相关关系, 而且冻土厚度也为不显著下降趋势, 这些冻土观测点主要分布在森林地区, 研究表明植物的蒸腾作用会吸收土壤中的水分, 从而带走部分热量, 植物的根系有良好的隔热作用, 从而影响冻土的厚度与分布^[28]。可以说对于不同区域影响冻土厚度的主要因素各有不同, 需进一步讨论 (图 13)。

3.5 黑龙江省冻土厚度变化的空间异常特征

为了分析黑龙江省冻土厚度变化的空间异常特征, 本文对选取的 32 个观测站点的冻土厚度距平并进行 EOF 分析, 方差贡献率如表 2 所示, 根据 EOF 特征值显著性检验^[21], 本文中第六和第七特征根之间不存在显著性差别, 因此选择前六个特征向量进行分析。

图 14a 显示第一特征向量数值全部为正, 说明各站冻土厚度空间变化具有一致性的特征。图 14c 显示了第一特征向量的时间系数, 在 2001 年以前, 时间系数为正, 2001 年

以后时间系数为负,说明2001年为转折年份,这与Mann-Kendall检验突变时间相吻合。2001年前,黑龙江省冻土厚度呈现整体性增加趋势,2001年后冻土厚度整体性变薄。空间上伊春观测站为冻土厚度变化最敏感区。

第二特征向量显示黑龙江省中部以及西南部地区数值为负,其余地区数值为正,表明黑龙江省中部和西南部的冻土厚度与北部和东南部的冻土厚度呈现出反向变化趋势(图14b)。结合第二特征向量的时间系数(图14d),可以看出,在20世纪60年代中期到20世纪90年代中期,黑龙江省中部表现出冻土厚度变薄,东南部和西北部冻土厚度变厚的趋势,20世纪90年代后,则表现出相反趋势。其中铁力和漠河观测站为变化中心区。

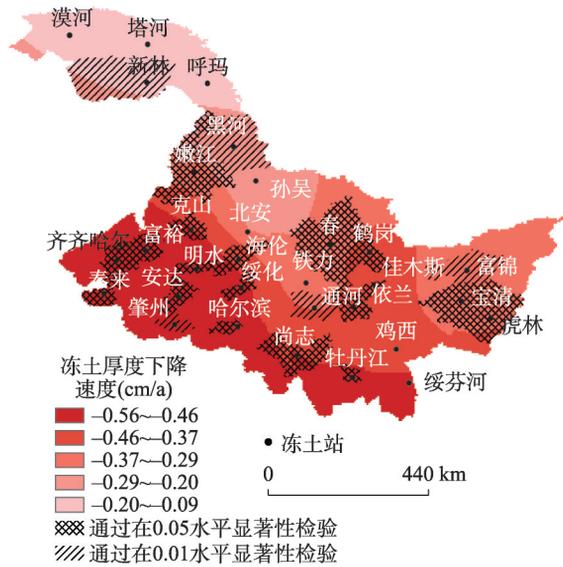


图11 冻土厚度年倾向率空间分布图

Fig. 11 Spatial distribution of annual variation trends of permafrost thickness

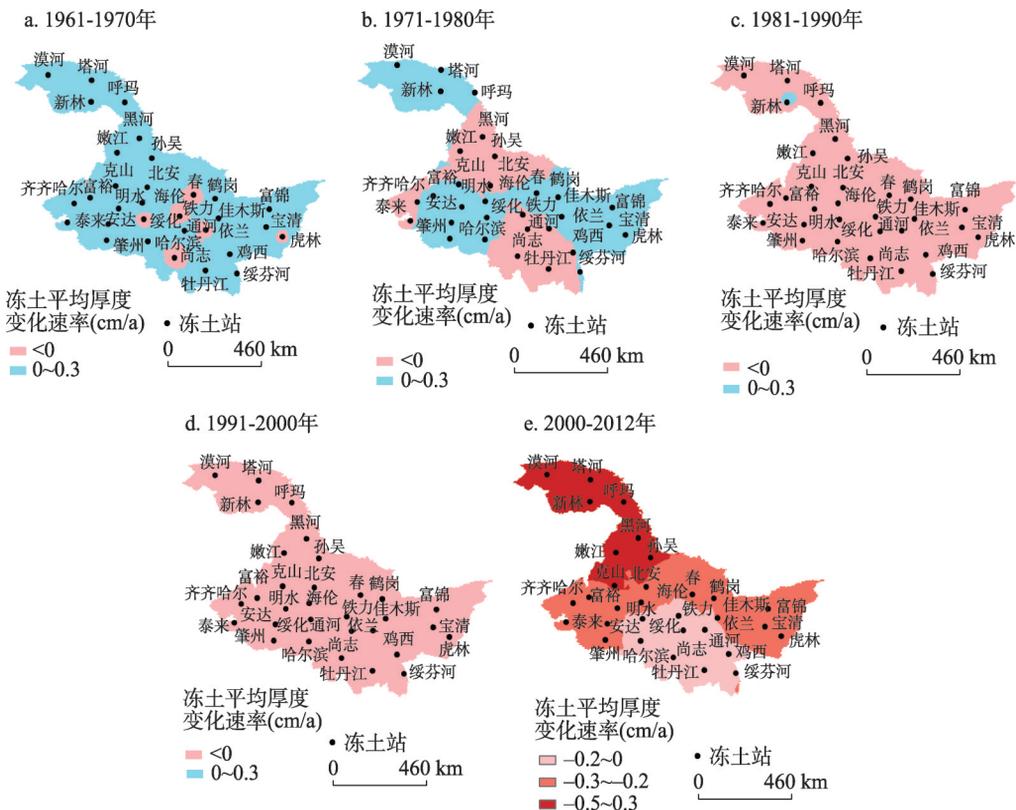


图12 冻土厚度年代倾向率空间分布图

Fig. 12 Spatial distribution of periodic variation trends of permafrost thickness

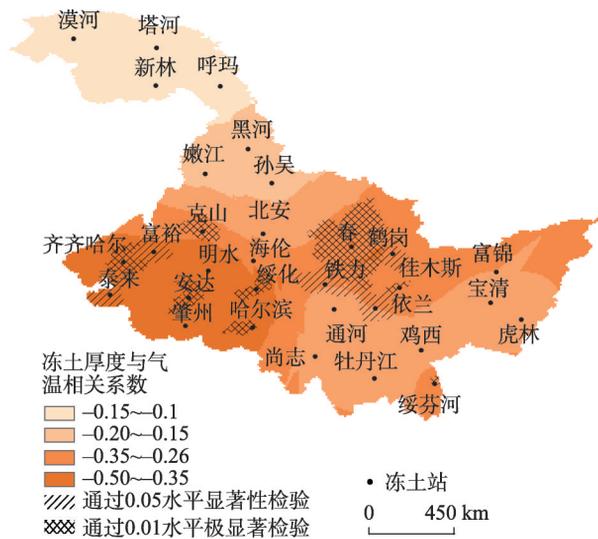


图13 气温与冻土厚度相关系数图
Fig. 13 Correlation between temperature and permafrost thickness

表2 EOF前十个特征向量方差累计贡献率(%)

Tab.2 Cumulative contribution rate of the mean square deviation of the first ten EOF eigenvectors (%)

特征向量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
方差	44.2	11.3	7.4	5.1	4.5	4	3.2	2.7	2.6	2.3
累计方差	44.2	55.5	62.9	68	72.5	76.5	79.7	82.4	85	87.3

平值为负,冻土厚度距平高值区主要位于伊春观测站附近(图15b)。在20世纪60年代中期到20世纪90年代中期冻土厚度距平值负值区主要集中在黑龙江省中部地区,正值区主要集中在东南部和西北部(图15c),在20世纪80年代初期至中期,冻土厚度距平值负值区主要集中在黑龙江省西部地区(图15d)。说明了黑龙江省冻土厚度在呈现出整体下降变化特征的前提下,中部冻土厚度与西部和东南部呈相反变化的特征,其中伊春、铁力以及漠河观测站为变化中心区域可以称为冻土变化敏感区或脆弱区,也进一步说明EOF所分析的冻土厚度空间异常特征的准确性。

4 结论

本文通过对近50年来黑龙江省32个气象基准台站的逐日冻土观测数据以及同期气温数据的整理,分析了黑龙江省地区冻土的时空变化特征。主要结论如下:

(1) 近50年来黑龙江省冻土平均厚度以 -0.53 cm/a 的速率呈极显著下降趋势,在20世纪70年代冻土平均厚度达到最大,相比20世纪60年代,最近10年黑龙江省冻土厚度减少了 19.4 cm ,突变年份为2001年。春季呈极显著下降趋势,下降速率为 -0.78 cm/a ,研究表明,近50年来黑龙江省入春、入夏时间提前,入秋、入冬时间推迟,夏季提前和冬季推迟主要发生在20世纪90年代后^[28],这与冻土厚度的年代变化趋势相吻合并且由于入春时间提前,是可能导致冻土厚度在春季表现出极显著的下降趋势的因素之一。

第三特征向量显示黑龙江省中西部地区以及绥芬河和富锦观测站为负,其余地区为正,负距平中心在北安观测站,正距平中心在漠河观测站(图14e)。其时间系数均为负值(图14g),说明黑龙江省中西部及绥芬河和富锦观测站冻土厚度以增厚为主,其他区域冻土厚度变薄。

第四特征向量(图14f)显示,黑龙江省西部和东部显现出相反的变化趋势,时间系数显示(14h)西部地区在80年代初期至80年代中期冻土厚度表现为下降趋势,下降中心在漠河观测站附近。

第五特征值(图14i)及第六特征值(图14j)均显示出,黑龙江省中部冻土厚度变化与其他区域冻土厚度变化的异向性,距平中心集中在北安、漠河观测站附近。

为了验证EOF分析结果的准确性,本文按照不同年代的冻土厚度距平值进行空间插值,可以看出,在2000年以前,冻土厚度距平值为正(图15a),2000年以后,冻土厚度距

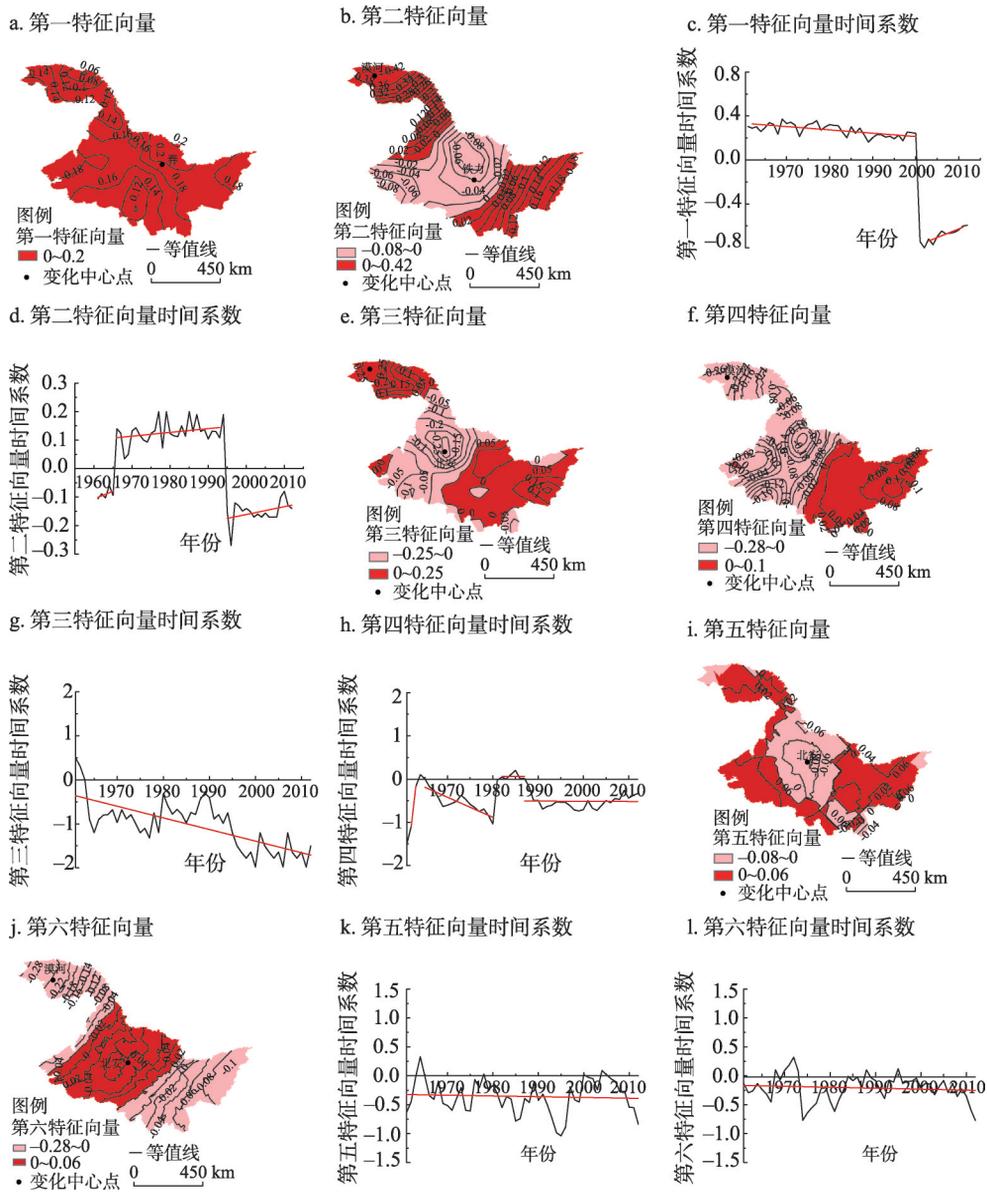


图14 EOF分解特征向量空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of EOF decomposition eigenvectors

(2) 黑龙江省冻土厚度总体分布呈现由北向南逐渐变薄趋势,但空间分布并不与纬线平行,中部地区冻土厚度较同纬度其他地区偏低。

(3) 黑龙江省冻土厚度在空间变化上具有一致性,均出现变薄趋势,但变化特征又呈现空间差异性,递减速率由南到北逐渐降低,在20世纪60年代中期至90年代中期中部地区冻土厚度与西部和东南部呈相反变化的特征,其中伊春、铁力以及漠河观测站为冻土变化敏感区。按年代空间变化来看,20世纪60-80年代黑龙江省冻土厚度基本上为上升趋势,20世纪90年代至21世纪最初的10年,黑龙江省全省区域冻土厚度均出现下降趋势,大兴安岭地区转变为全省下降速率最快的地区。

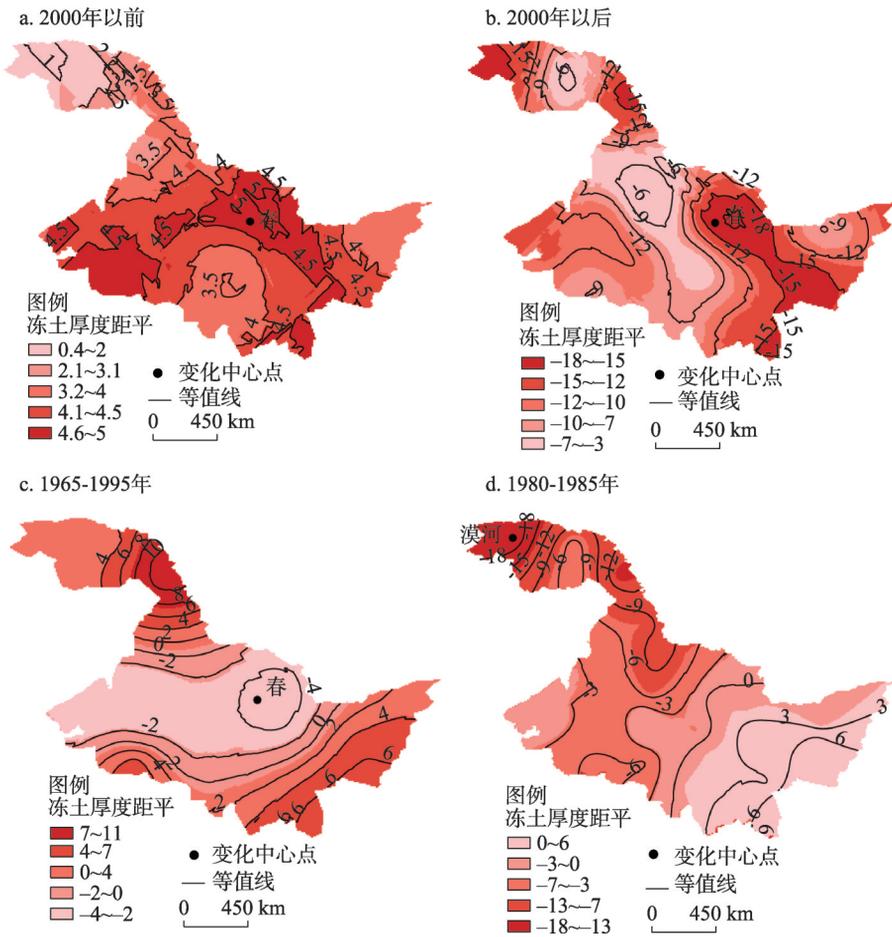


图15 冻土厚度距平值空间分布

Fig. 15 Spatial distribution of permafrost thickness anomalies

(4) 黑龙江省冻土厚度所表现出来的春季冻土厚度极显著减少、尤其21世纪最初10年黑龙江省冻土厚度下降更为显著的趋势，这与新疆、青藏高原地区冻土变化特征相似^[29]。说明，在目前气候变暖的大趋势下，全国冻土变化呈现出相似的特征。

参考文献(References)

[1] 周幼吾, 郭东信, 程国栋, 等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000. [Zhou Youwu, Guo Dongxin, Cheng Guodong, et al. Geocryology in China. Beijing: Science Press, 2000.]

[2] 白磊, 李兰海, 李倩, 等. 新疆北疆地区季节性冻土结冻过程与日积温的关系. 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. Journal of Glaciology & Geocryology, 2012, 34(2): 328-335.]

[3] 张文杰, 程维明, 李宝林, 等. 气候变化下的祁连山地区近40年多年冻土分布变化模拟. 地理研究, 2014, 33(7): 1275-1284. [Zhang Wenjie, Cheng Weiming, Li Baolin, et al. Simulation of the permafrost distribution on Qilian Mountains over past 40 years under the influence of climate change. Geographical Research, 2014, 33(7): 1275-1284.]

[4] 周秀杰, 王凤玲, 吴玉影, 等. 近60年来黑龙江省与东北及全国气温变化特点分析. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 124-129. [Zhou Xiujie, Wang Fengling, Wu Yuying, et al. Analysis of temperature change characteristics of Heilongjiang province northeast China and whole country in recent 60 years. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(2): 124-129.]

[5] 刘先昌, 国世友, 金磊, 等. 近47a来黑龙江省地面最大冻土深度变化分析. 黑龙江气象, 2008, 25(4): 42-43. [Liu

- Xiancang, Guo Shiyu, Jin Lei, et al. Change analysis of the deepest frozen soil layer over nearly 47 years of Heilongjiang province. *Heilongjiang Meteorology*, 2008, 25(4): 42-43.]
- [6] 高峰, 刘军, 倪长健, 等. 高寒地区冻土活动层变化特征分析. *气象与环境学报*, 2014, 30(4): 84-90. [Gao Feng, Liu Jun, Ni Changjian, et al. Characteristics of frozen soil active layer in alpine region. *Journal of Meteorology & Environment*, 2014, 30(4): 84-90.]
- [7] Brown J, Hinkel K M, Nelson F E. The circumpolar active layer monitoring (calm) program: Research designs and initial results. *Polar Geography*, 2000, 24(3): 166-258.
- [8] Nelson F E, Shiklomanov N I, Hinkel K M, et al. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Workshop and THE CALM II Program. *Polar Geography*, 2004, 28(4): 253-266.
- [9] Jorgenson M T, Racine C H, Walters J C, et al. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change*, 2001, 48(4): 551-579.
- [10] Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming. *Climatic Change*, 2005, 68(1): 135-152.
- [11] Frauenfeld O W, Zhang T, Barry R G, et al. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D5): 413-421.
- [12] Sharkhuu N. Recent changes in the permafrost of Mongolia. In: Phillips M, Springman S M, Arenson L U. *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*. Netherlands: Balkema AA, 2003: 1029-1034.
- [13] 吴吉春, 盛煜, 吴青柏, 等. 青藏高原多年冻土退化过程及方式. *中国科学*, 2009, 39(11): 1570-1578. [Wu Jichun, Sheng Yu, Wu Qingbai, et al. Processes and modes of permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China*, 2009, 39(11): 1570-1578.]
- [14] 李林, 王振宇, 汪青春, 等. 青海季节冻土退化的成因及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2008, 27(1): 162-170. [Li Lin, Wang Zhenyu, Wang Qingchun, et al. Cause of seasonal tjalde degeneration and its response to climate change in Qinghai. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 162-170.]
- [15] 赵林, 刘广岳, 焦克勤, 等. 1991-2008年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 223-230. [Zhao Lin, Liu Guangyue, Jiao Keqin, et al. Variation of the permafrost in the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains since 1991. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2010, 32(2): 223-230.]
- [16] 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. *冰川冻土*, 2005, 27(6): 820-826. [Wang Qiuxiang, Li Hongjun, Wei Rongqing, et al. Annual change and abrupt change of the seasonal frozen soil in Xinjiang China during 1961-2002. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2005, 27(6): 820-826.]
- [17] 王春鹤, 张宝林, 刘福涛. 大、小兴安岭多年冻土退化规律及利弊的初步分析. *冰川冻土*, 1996, 18(SI): 174-179. [Wang Chunhe, Zhang Baolin, Liu Futao. A preliminary analysis on the regularity of permafrost degradation its advantages and disadvantages in the Greater and Lesser Xing'an Mountains. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 1996, 18 (SI): 174-179.]
- [18] 常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 等. 中国东北大兴安岭多年冻土与寒区环境考察和研究进展. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 176-182. [Chang Xiaoli, Jin Huijun, He Ruixia, et al. Advances in permafrost and cold regions environments studies in the Da Xing'anling Mountains, Northeastern China. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2008, 30(1): 176-182.]
- [19] 赵博宇. 黑龙江多年冻土变化趋势以及与气温的相关关系研究. *哈尔滨师范大学: 自然科学学报*, 2016, 32(5): 77-80. [Zhao Fuyu. Research on change trend of frozen soil and correlation with temperature in Heilongjiang province over the years. *Journal of Harbin Normal University: Natural Science*, 2016, 32(5): 77-80.]
- [20] 魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术*. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. *Contemporary Techniques for Climatic Prognostication: Diagnosis and Statistics*. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]
- [21] 刘莹, 张文煜, 贾东于, 等. 河西走廊沙尘暴50a频率突变检测分析. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1579-1584. [Liu Xuan, Zhang Wenyu, Jia Dongyu, et al. Research of abrupt changes of sandstorm frequency in Hexi Corridor in recent 50 years. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6): 1579-1584.]
- [22] 张丽娟, 于洋, 粟练灵, 等. 1960-2010年黑龙江省土地利用变化对气温的影响. *地理科学*, 2017, 37(6): 952-959. [Zhang Lijuan, Yu Yang, Su Lianling, et al. Effects of land use change on air temperature of Heilongjiang province in 1960-2010. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(6): 952-959.]
- [23] 顾春雷, 杨漾, 朱志春. 几种建立DEM模型插值方法精度的交叉验证. *测绘与空间地理信息*, 2011, 34(5): 99-102. [Gu Chunlei, Yang Yang, Zhu Zhichun. Accuracy cross-validation of several interpolation methods of DEM. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2011, 34(5): 99-102.]
- [24] 张慧智, 史学正, 于东升, 等. 中国土壤温度的空间插值方法比较. *地理研究*, 2008, 27(6): 1299-1307. [Zhang Huizhi,

- Shi Xuedong, Yu Dongsheng, et al. Spatial prediction of soil temperatures in China using different methods. *Geographical Research*, 2008, 27(6): 1299-1307.]
- [25] 施雅风, 米德生. 中国冰雪冻土图. 北京: 中国地图出版社, 1988. [Shi Yafeng, Mi Desheng. Map of Snow Ice and Frozen Ground in China. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1988.]
- [26] 谭海涛. 地面气象观测. 北京: 气象出版社, 1986. [Tan Haitao. The Ground Meteorological Observation. Beijing: China Meteorological Press, 1986.]
- [27] 刘玉莲. 1961-2010年黑龙江省气候季节时空分布及其变化特征. *气象与环境学报*, 2015, 31(2): 89-96. [Liu Yulian. Temporal and spatial distribution of climatic season and its variation from 1961 to 2010 in Heilongjiang province. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(2): 89-96.]
- [28] 孟祥君. 土地覆被一积雪对长白山地区季节性冻土的地温影响研究. 长春: 东北师范大学博士学位论文, 2014. [Meng Xiangjun. Thermal effect of land cover and snow cover on the underlying middle-thick seasonal frozen ground in the active layer in the Changbai Mountains. Changchun: Doctoral Dissertation of Northeast Normal University, 2014.]
- [29] 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. *地理学报*, 2001, 56(5): 523-531. [Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(5): 523-531.]

Spatial and temporal variations of permafrost thickness in Heilongjiang province in recent years

WANG Ning, ZANG Shuying, ZHANG Lijuan

(Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: This study used the Mann-Kendall test, the smoothing T-test, and empirical orthogonal function analysis method to analyze the spatial and temporal variation characteristics of permafrost thickness in Heilongjiang province, with daily permafrost monitoring and temperature data obtained from 32 meteorological stations in the past 50 years (1961-2012). The results were as follows. (1) In the past 50 years, the permafrost thickness in Heilongjiang province decreased by 12.86 cm, at a rate of -0.53 cm/yr. An abrupt change occurred in 2001. (2) The spatial distribution of the permafrost thickness showed a tendency of being thick in the northern part and thin in the southern part, whereas in the central region the permafrost thickness was lower than that in other areas at the same latitude. The spatial variation showed that the permafrost thickness decreased faster in the southern part and at a slower rate in the northern part, while the central, western, and southeastern regions showed the opposite characteristics. The Yichun, Tieli, and Mohe observation points were more susceptible to permafrost change. (3) Temperature was the main factor influencing the permafrost thickness variations in the study area, and the correlation coefficient was -0.611 . This main contribution of this article is that it reveals the spatial variation characteristics of permafrost thickness in Heilongjiang, and thus provides a suitable background for related research and various government programs.

Keywords: spatial and temporal variations; abrupt change analysis; empirical orthogonal function analysis; permafrost thickness; Heilongjiang province