第 42 卷 第 2 期
2020 年 8 月

冰 川 冻 土
JOURNAL OF GLACIOLOGY AND GEOCRYOLOGY

Vol. 42, No. 2
Aug. , 2020

DOI:10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2020. 0035
REN Jingquan, LIU Yuxi, WANG Dongni, et al. Spatiotemporal changes of annual freezing/thawing index of seasonally frozen soil in Jilin Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):430-438. [任景全, 刘玉汐, 王冬妮, 等. 吉林省季节冻土区年冻融指数的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):430-438.]

吉林省季节冻土区年冻融指数的时空变化特征

任景全[1], 刘玉汐[2], 王冬妮[1], 王 亮[3], 孙 月[4], 郭春明[1], 李 琪[5]

(1. 吉林省气象科学研究所, 吉林 长春 130062; 2. 吉林省气象台, 吉林 长春 130062; 3. 吉林省气候中心, 吉林 长春 130062; 4. 吉林省气象探测保障中心, 吉林 长春 130062; 5. 江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘 要: 利用1961 - 2015年吉林省46个气象站的气象数据, 采用气候诊断分析方法, 研究了吉林省季节冻土区年冻融指数的时空变化特征及其与经度、纬度、海拔的关系。结果表明: 吉林省冻结指数呈由北向南逐渐降低, 融化指数由西向东逐渐降低的趋势分布。1961 - 2015年冻结指数呈显著下降趋势, *AFI*(空气冻结指数)和*SFI*(地表冻结指数)气候倾向率分别为-48. 7 ℃·d·(10a)$^{-1}$和-166. 8 ℃·d·(10a)$^{-1}$。融化指数显著上升, *ATI*(空气融化指数)和*STI*(地表融化指数)分别以57. 0 ℃·d·(10a)$^{-1}$和93. 7 ℃·d·(10a)$^{-1}$的气候倾向率显著上升。*SFI*、*ATI*和*STI*分别于2001年、1994年和1997年发生了突变。20世纪60、70年代冻结指数异常偏高, 融化指数异常偏低。吉林省年冻融指数的变化趋势在未来整体上依然延续下去, 即冻结指数为下降趋势, 融化指数为上升趋势。冻结指数受纬度影响最大, 随着纬度的升高而上升, 融化指数受海拔影响最大, 随着海拔的升高而显著下降。冻结指数气候倾向率随着海拔的升高而上升, 融化指数气候倾向率随着纬度的升高而上升。

关键词: 冻结指数; 融化指数; 季节冻土; 时空变化; 吉林省

中图分类号: P642. 14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0430-09

0 引言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出, 1880 - 2012年, 全球平均地表温度升高了0. 85 ℃[1]。《第三次气候变化国家评估报告》[2]指出, 1909年以来中国的变暖速率高于全球平均值, 在0. 9 ~ 1. 5 ℃·(100a)$^{-1}$之间。在气候变暖背景下, 冻土也发生着显著的变化。1967 - 2012年中国季节冻土冻结深度以(-0. 18 ± 0. 03) cm·a^{-1}的速率下降[3]。1956 - 2006年中国地表冻结初日以(0. 10 ± 0. 03) d·a^{-1}的速率推迟, 冻结终日以(0. 15 ± 0. 02) d·a^{-1}的速率提前[4]。冻融指数作为研究冻土变化的重要因子, 对研究气候变化也具有重要意义。Frauenfeld等[5]研究表明, 21世纪北美、加拿大和阿拉斯加多年冻土区冻结指数下降, 沿海地区和加拿大东部融化指数显著上升。我国学者[6-8]对青藏高原地区和青藏铁路路基、沿线冻融指数进行了较为全面的研究。Wu等[9]研究表明, 青藏高原多年冻土区冻结指数下降速率高于季节冻土区, 融化指数上升速率低于季节冻土区。Luo等[10]研究表明, 1972 - 2005年东北多年冻土区地表冻结指数和空气冻结指数显著下降, 地表融化指数和空气融化指数显著上升。代海燕等[11]研究表明, 内蒙古大兴安岭林区融化指数呈显著上升变化, 冻结指数变化不显著。总体而言, 我国对冻融指数研究区域主要集中在青藏高原和东北多年冻土区, 针对东北季节性冻土区冻融指数的长序列研究还较少。

吉林省冻土分布主要以季节冻土为主, 冻土冻结深度、分布及冻融过程等对全省的农业生产、生态环境保护、工程建设等具有重要意义。鉴于此,

收稿日期: 2018-06-11; **修订日期:** 2018-12-12
基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206018; GYHY201506001); 吉林省重点科技攻关项目(20150204014NY)资助
作者简介: 任景全(1988 -), 男, 内蒙古赤峰人, 工程师, 2013年在南京信息工程大学获硕士学位, 从事农业气象方向研究. E-mail: renjingquan1988@126.com
通信作者: 郭春明, 正研级高级工程师, 从事农业气象方向研究. E-mail:717689413 @qq.com.

本文基于吉林省46个气象站的数据对年空气冻融指数和地表冻融指数进行定量研究，分析比较空气冻融指数和地表冻融指数的时空变化特征，以期为吉林省冻土和气候变化的研究提供数据支撑。

1　资料与方法

1.1　资料来源

本文使用气象数据为1961－2015年吉林省46个气象站的逐日地表温度、平均气温等数据，地理属性数据包括各气象站的经度、纬度和海拔，数据均来源于吉林省气象局。吉林省气象站点分布见图1。

1.2　研究方法

1.2.1　时空变化分析

采用线性倾向估计方法研究冻融指数的时间变化趋势，确定气候倾向率。基于ArcGIS 10.0数据处理平台的IDW（Inversed Distance Weighted Method）方法表达冻融指数的空间变化特征。采用线性回归分析研究冻融指数与地理因子的关系。

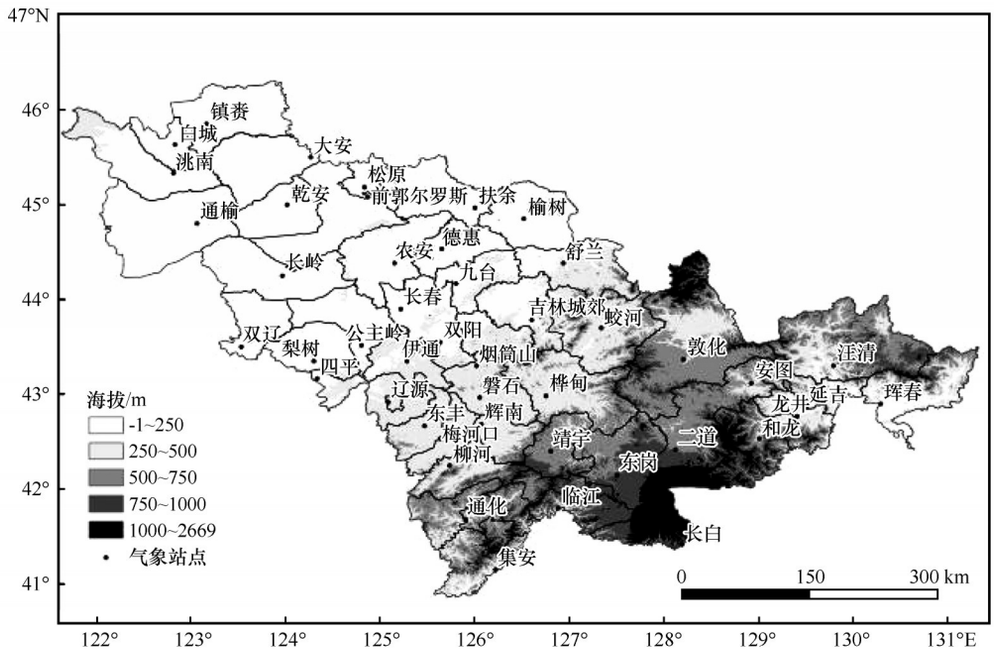

图1　吉林省气象站点分布

Fig. 1　Spatial distribution of meteorological station in Jilin Province

1.2.2　突变分析

气候从一种稳定态（或稳定持续的变化趋势）跳跃式地转变到另一种稳定态（或稳定持续的变化趋势）的现象，称为气候突变。采用Mann-Kendall突变检验和信噪比（S/N）确定冻融指数的突变年份。Mann-Kendall突变检验基本原理如下[12-13]：气候序列设为平稳序列（$i = 1, 2, 3, \cdots, n$），表示第i个样本的累计数，定义统计量：

$$d_k = \sum_{i=1}^{k} m_i \tag{1}$$

在原序列的随机独立等的假设下，均值、方差分别为：

$$S\left(d_k\right) = k(k-1)(2k+5)/72 \tag{2}$$

d_k标准化后，

$$UF_k = \left(d_k - E\left(d_k\right)\right) \Big/ \sqrt{S\left(d_k\right)} \tag{3}$$

满足标准正太分布，其概率$\alpha = \mathrm{prob}\left(|U| > \left|UF_{ki}\right|\right)$可通过计算或者查表获得。给出显著性水平（$\alpha = 0.05$），若$|UF| > U_\alpha$，则表明该气候序列呈现显著的变化趋势。将气候序列（$i = 1, 2, 3, \cdots, n$）的逆序列，按照以上过程计算1次。同时使$\left|UB_k\right| = -UF_k$，（$k = n, n-1, \cdots, 1$），$UB_1 = 0$。若$|UF| > 0$，此时序列呈上升趋势；$|UF| < 0$，序列呈下降趋势。通过信度检验可知其是否有变化趋势。当曲线超过置信水平线时，表明序列的上升（下降）趋势显著。若UF和UB两条曲线出现在交点，且交点位于知心区间内，该交点对应的时刻即序列突变开始的时刻。

Mann-Kendall方法具有检测范围宽、定量化程度高等优点，对均值突变检测很有把握，但是对转折突变、翘翘板突变、变率突变的检测有些缺陷。信噪比方法配合Mann-Kendall检验，能有良好的效果[14-15]。信噪比计算方法：

$$S/N = \frac{\left|\overline{X_1} - \overline{X_2}\right|}{S_1 + S_2} \tag{4}$$

式中：S/N为信噪比；$\overline{X_1}$、$\overline{X_2}$和S_1、S_2分别为转折年份前后两阶段冻融指数的平均值和标准差。当S/N>1.0，定义为突变，最大信噪比的时间定义为气候突变出现的时间。

1.2.3 异常气候分析

气候异常是气候要素的距平值达到一定数量级的气候状况。世界气象组织对气候异常提出两种判别标准：一是距平超过标准差的2倍以上，二是它出现的几率为25 a以上一遇。本研究采用的距平大于标准差的2倍作为异常，分析年冻融指数的异常特征[16-17]，将1981－2010年30 a年冻融指数的平均值作为基准值，计算1961－2015年历年的距平值，与标准差进行对比，判断其是否为异常年份。

1.2.4 未来变化趋势分析

采用重标极差法（R/S分析）计算Hurst指数（H）探讨冻融指数的未来变化趋势[18-20]。重标极差法（R/S分析）是研究非线性时间序列分析法，它在对时间序列长程相关（反相关）持续性（反持续性）的判别方面，具有独特优势，能很好地预测未来变化趋势。R/S分析方法中的Hurst指数（$0<H\leqslant1.0$）能很好地揭示出时间序列中的趋势成分。当$H = 0.5$时，表明气候要素完全独立，气候变化是随机的。当$0.5<H\leqslant1.0$时，表明时间序列具有长期相关的特征，过程具有持续性。反应在气候指标上，则表明未来的气候整体变化将与过去的变化趋势一致，H值越接近1，持续性越强。当$0\leqslant H<0.5$时，表明时间序列具有长期相关性，但未来的趋势与过去正好相反，H值越接近于0，反持续性就越强。

1.3 冻融指数的计算

冻融指数分为地表冻融指数和空气冻融指数，由逐日观测的温度数据计算得出。在本文中指定冻结指数计算的时间为每年的7月1日－翌年的6月30日，融化指数计算时间为每年的1月1日－12月31日。冻融指数的计算公式为：

$$FI = \sum_{i=1}^{N_F}\left|T_i\right|,\ T_i<0\ ℃ \tag{5}$$

$$TI = \sum_{i=1}^{N_T}T_i,\ T_i>0\ ℃ \tag{6}$$

式中：FI为冻结指数；TI为融化指数；T_i为第i日的温度，单位为℃；N_F为年内温度小于0 ℃的日数，单位为d；N_T为年内温度大于0 ℃的日数，单位为d。

2 结果与分析

2.1 冻融指数的空间变化

2.1.1 冻融指数平均值的空间分布

吉林省各站点冻融指数多年平均值的空间分布特征见图2，由图可知，AFI（空气冻结指数）和SFI（地表冻结指数）在空间分布上比较一致，除东北部外，主要呈由北向南逐渐减小的趋势分布特征。AFI最大值位于扶余站，为1 711.5 ℃·d，珲春和集安站较小，分别为962.1 ℃·d和1 022.7 ℃·d。SFI最大值位于长白站，为1 621.9 ℃·d，珲春和集安站较小，分别为942.7 ℃·d和964.6 ℃·d。ATI（空气融化指数）和STI（地表融化指数）具有一致的空间分布特征，均呈由西向东逐渐减小的趋势分布。ATI最大值位于四平站，为3 692.0 ℃·d，最小值位于长白站，为2 644.8 ℃·d。STI较大值位于集安和前郭尔罗斯站，分别为4 353.3 ℃·d和4 297.3 ℃·d，最小值位于东岗站，为3 222.5 ℃·d。冻融指数呈现的空间分布特征与温度的分布具有一致性，而地理因子是影响温度的重要因素。吉林省自西向东由平原向丘陵山地过渡，海拔逐渐升高。冬季气温和地表温度主要为负值，由北向南逐渐升高，导致冻结指数由北向南逐渐降低，与纬度关系密切。春、夏、秋季气温和地表温度主要为正值，由西向东逐渐降低，导致融化指数由西向东逐渐降低，这与海拔关系密切。

2.1.2 冻融指数气候倾向率的空间分布

吉林省各站点冻融指数气候倾向率空间分布特征见图3，由图可知，AFI气候倾向率介于−87.9 ~ −6.5 ℃·d·(10a)$^{-1}$，其中，85%的站点通过了0.05的显著性水平检验，农安站最大，二道站最小。SFI气候倾向率自西向东呈“高−低−高”的趋势分布，全部站点通过了0.01的显著性水平检验，其中，东岗站最小，为−313.5 ℃·d·(10a)$^{-1}$。ATI气候倾向率自西向东逐渐降低，全部站点通过了0.05的显著性水平检验，最大值位于松原站，为87.0 ℃·d·(10a)$^{-1}$。STI气候倾向率介于19.4 ~

145.2 ℃·d·(10a)$^{-1}$，桦甸站最小，长白站最大，其中，98% 的站点通过了 0.01 显著性水平的检验。可知，各站冻结指数气候倾向率均为负值，融化指数气候倾向率均为正值，即冻结指数均呈下降趋势，融化指数呈上升趋势，但各站气候倾向率存在差异，主要与其站点位置、气候环境有关。

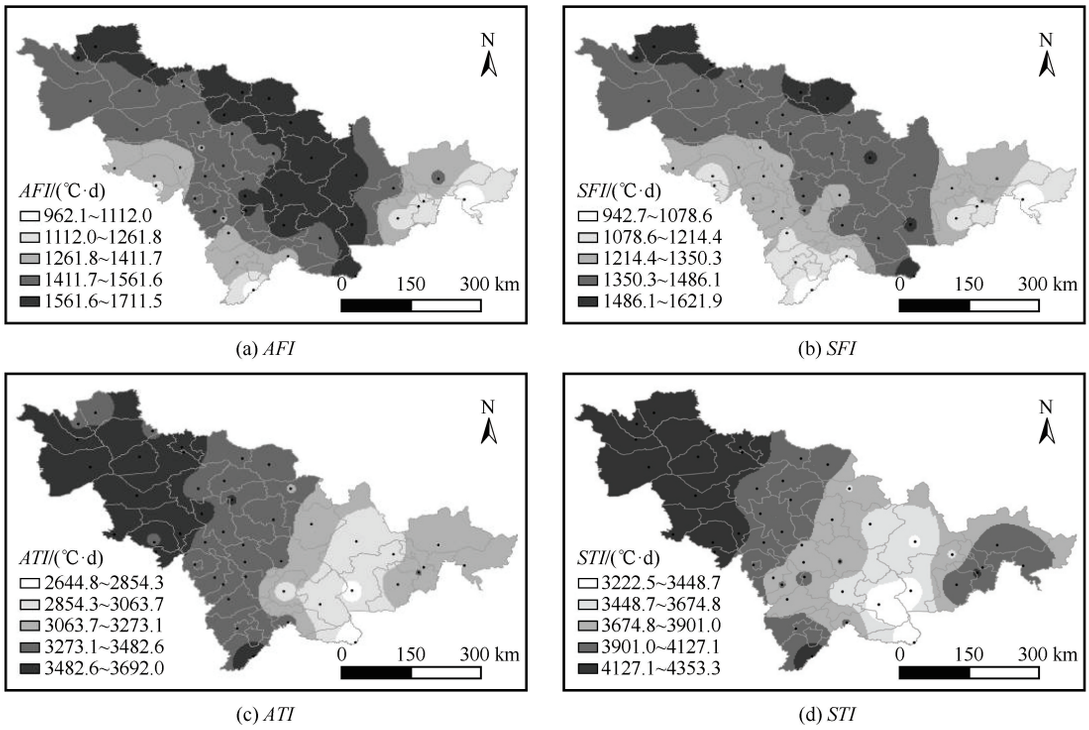

图 2　吉林省冻融指数的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of freezing/thawing index in Jilin Province

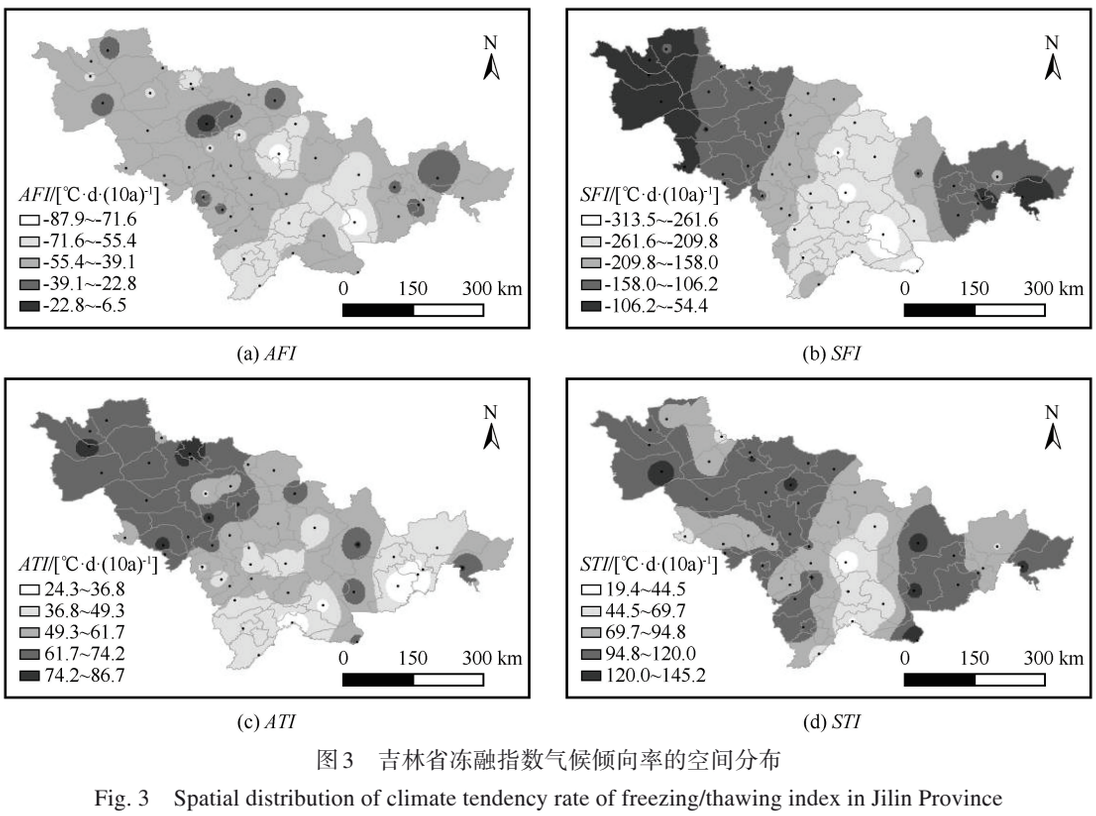

图 3　吉林省冻融指数气候倾向率的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of climate tendency rate of freezing/thawing index in Jilin Province

2.2 冻融指数的时间变化

吉林省冻融指数的时间变化见图4，由图可知，1961－2015年冻结指数均呈显著下降趋势，*AFI*和*SFI*气候倾向率分别为−48.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$和−166.8 ℃·d·(10a)$^{-1}$，均通过了0.01显著性水平检验，变化范围分别为1 077.7～1 938.7 ℃·d和529.3～1 991.7 ℃·d。从年代际变化看，*AFI*从20世纪60年代开始逐渐下降，在2011－2015年转为上升趋势，而*SFI*表现为逐年代下降的趋势，在2011－2015年达到最低值，为720.0 ℃·d。*ATI*和*STI*分别以57.0 ℃·d·(10a)$^{-1}$和93.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$的气候倾向率显著上升，均通过了0.01显著性水平检验，变化范围分别为3 076.4～3 682.7 ℃·d和3 561.6～4 412.9 ℃·d。*ATI*和*STI*均在20世纪70年代最低，分别为3 220.7 ℃·d和3 771.5 ℃·d，之后逐年代上升。冻融指数的变化趋势是由同期温度的变化趋势引起的，与温度的上升趋势有直接关系。*AFI*在2011－2015年转为上升，而*SFI*则持续下降，这可能是由于2011年和2012年吉林省冬季气温偏低，即气温绝对值偏大，导致2011年和2012年空气冻结指数偏大，使得2011－2015年平均值偏高，而地表温度持续上升，绝对值偏小，即地表冻结指数持续下降。

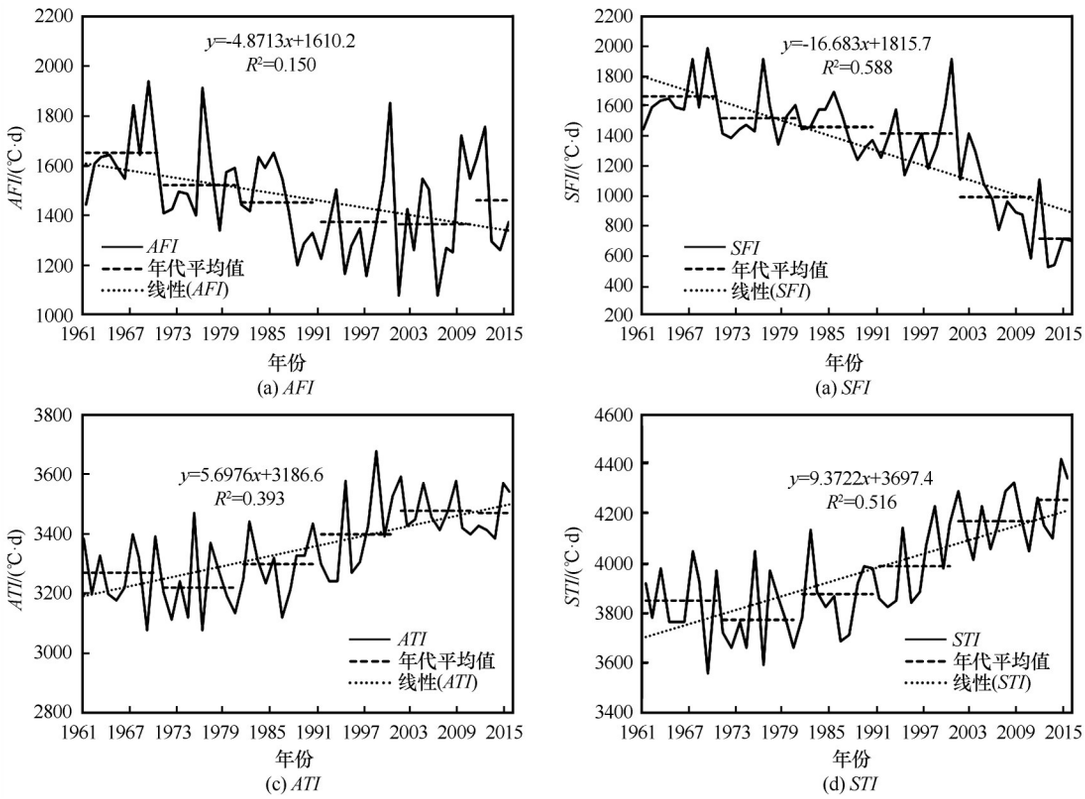

图4 吉林省冻融指数的时间变化

Fig. 4 The change of freezing/thawing index in Jilin Province

2.3 冻融指数的突变特征

吉林省冻融指数的突变分析结果见图5，由图5(a)可知，*AFI*的*UF*和*UB*两条曲线在临界线内有两个交点，分别为1975年和1978年，分别计算两年的S/N值，两者均小于1.0，表明*AFI*没有发生突变。*SFI*的*UF*和*UB*两条曲线在临界线外相交于2001年，无法判断是不是突变点，进一步计算S/N值，其值大于1.0，认为*SFI*在2001年发生了突变，突变后降低了608.5 ℃·d。同理可知，*ATI*在1994年发生了突变，突变后升高了206.5 ℃·d，*STI*突变年份为1997年，突变后上升了334.8 ℃·d。可知，冻融指数发生了显著变化，突变的节点基本在20世纪90年代末，突变后冻结指数降低，融化指数上升。也说明气候正在发生着显著的变化。

2.4 冻融指数的异常气候特征

吉林省冻融指数的异常气候特征分析结果见表1，由表可知，冻融指数具有显著的异常气候特征，在20世纪60年代和70年代冻结指数异常偏高，融化指数异常偏低，直接原因是由于20世纪60年代、70年代的平均气温和地表温度相对于基准值

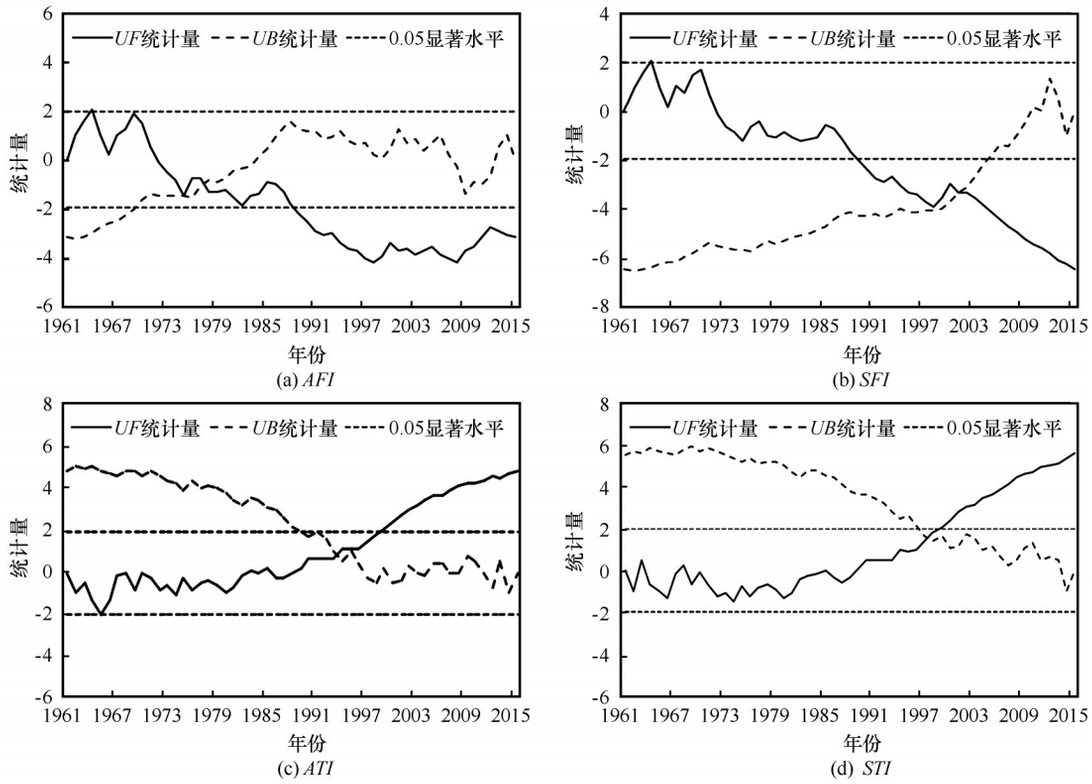

图5　吉林省冻融指数的Mann-Kendall检验曲线

Fig. 5　The Mann-Kendall test results of freezing/thawing index in Jilin Province

表1　吉林省冻融指数的异常气候特征分析

Table 1　Analysis of abnormal climate characteristics of freezing/thawing index in Jilin Province

冻融指数	异常气候年份
AFI	1967+，1969+，1976+，2000+，
SFI	1967+，1969+，1976+，2000+，2010−，2012−，2013−，2015−
ATI	1969−，1972−，1974−，1976−，1986−，1998+，
STI	1969−，1976−，2014+

注："+"表示异常偏高，"—"表示异常偏低。

均偏低。从2010年以来，*SFI*表现为异常偏低，这与2010年以来地表温度，特别是冬季地表温度大幅上升有关。*STI*在2014年为异常偏高也说明了这一点。异常气候特征分析的结果与突变特征具有一致性。

2.5　冻融指数的未来变化趋势分析

用R/S法分析吉林省年冻融指数的Hurst指数，基于年冻融指数的历史变化情况，预估其未来冻融指数的变化趋势。由表2可知，吉林省冻融指数的*H*值均大于0.5，说明存在比较明显的Hurst现象，表明吉林省年冻融指数的过去变化趋势在未来整体上依然延续下去，即冻结指数延续过去的下降趋势，融化指数延续过去的上升趋势。温度变化直接决定冻融指数的变化，由于吉林省气温和地表温度呈上升趋势，导致融化指数也为上升趋势。冻结指数由低于0 ℃的气温和地温计算而来，随着温度上升，即气温和地表温度绝对值减小，导致冻结指数下降。

表2　吉林省冻融指数的*H*值

Table 2　The *H* value of freezing/thawing index in Jilin Province

冻融指数	*H*值
AFI	0.9
SFI	0.9
ATI	1.0
STI	1.0

2.6　冻融指数与经度、纬度、海拔的关系

吉林省冻融指数与经度、纬度、海拔的关系见表3，由表可知，冻结指数随着海拔、纬度的升高而显著上升，从标准化回归系数看，纬度对冻结指数的影响最大。融化指数随着海拔、纬度、经度的升高而显著下降，其中，海拔的影响最大，这与融化指数在吉林省的空间分布特征一致。从冻融指数气候倾向率与地理因子关系看，冻结指数气候倾向

表3 吉林省冻融指数与经度、纬度、海拔的多元线性回归标准化系数

Table 3 The multivariate linear regression standardization coefficient between freezing/thawing index and longitude, latitude, altitude in Jilin Province

项目	*AFI*	*SFI*	*ATI*	*STI*	AFI_t	SFI_t	ATI_t	STI_t
海拔	0.864**	0.879**	−0.818**	−0.871**	0.248	0.540**	0.135	0.168
纬度	0.912**	1.112**	−0.395**	−0.252*	−0.132	−0.223	0.456**	0.262
经度	−0.079	−0.024	−0.566**	−0.284**	−0.172	−0.065	−0.286	0.018

注：*和**分别代表通过了0.05和0.01的显著性水平检验，AFI_t、SFI_t、ATI_t、STI_t代表各指数的气候倾向率。

率随着海拔的升高而上升，其中，SFI_t通过了0.01水平的显著性水平检验，说明海拔较高的站点，冻结指数上升幅度更大，这与冻结指数气候倾向率的空间分布一致。融化指数倾向率与纬度关系更为密切，随着纬度的升高而上升。

3 讨论与结论

3.1 讨论

在气候变暖背景下，吉林省冻结指数显著下降，融化指数显著上升，这与吉林省近年来气温升高有很大关系。从20世纪70年代开始，吉林省平均气温逐渐上升[21]。1961－2004年在北半球中纬度地区，吉林省是农业生长季(5－9月)平均温度上升趋势最显著的地区[22]。1960－2004年松花江流域年最大冻土深度呈明显下降趋势，而年均气温呈显著升高趋势[23]。这与本研究所揭示的冻结指数下降，融化指数上升的结果比较一致。空气冻结指数在2011－2015年转为上升，而地表冻结指数则持续下降，直接原因是气温和地表温度变化差异造成，进一步分析其原因，2004年气象站全面由人工观测改为自动站观测，积雪天气时人工观测的地面温度为雪面温度，自动气象站观测的地面温度为雪下温度，由于积雪有保温性能，导致近年地表温度持续升高[24]，所以，导致冻融指数的变化差异既有气候变化本身的原因，也有观测方式改变导致的原因。

曹斌等[25]研究表明，黑河流域冻结指数呈明显的下降趋势，融化指数呈上升趋势，这与本文的研究结论一致，但黑河流域地表冻结指数下降速率较空气冻结指数要慢，与本文有所不同。本研究认为吉林省地表冻结指数下降速率比空气冻结指数要快，主要原因是吉林省观测的地表温度上升趋势显著，导致地表冻结指数下降速率快，地理环境、气候条件、数据观测方式等也是造成差异的重要因素。

本文基于多年观测数据，研究了吉林省季节冻土区冻融指数的时空变化特征，不仅有助于掌握季节性冻土的变化特征，还对温室气体排放、湿地和森林生态、地质灾害和寒区工程建设有重要的意义。本文也存在不足之处，所使用数据为站点观测数据，空间分辨率和精细化程度较低；仅分析了气候变化和地理因素对冻融指数的影响，没有考虑其他影响因素。所以，在今后的研究中，要加强冻土区环境数据的监测，提高精细化程度，更好地做出评价和预警，及时制定相应的适应性对策。影响冻融指数的因素众多，如何定量评价影响冻融指数的影响因子，揭示其影响机制，也是今后关注的重要方面。

3.2 结论

(1)吉林省冻结指数基本呈由北向南逐渐减小，融化指数呈由西向东逐渐减小的分布特征。1961－2015年冻结指数呈显著下降趋势，*AFI*和*SFI*气候倾向率分别为−48.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$和−166.8 ℃·d·(10a)$^{-1}$，融化指数呈显著上升趋势，*ATI*和*STI*气候倾向率分别为57.0 ℃·d·(10a)$^{-1}$和93.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$。

(2)吉林省*SFI*在2001年发生突变，突变后降低了608.5 ℃·d，*ATI*和*STI*突变年份分别为1994年和1997年，突变后分别升高了206.5 ℃·d和334.8 ℃·d。20世纪60年代和70年代冻结指数异常偏高，融化指数异常偏低，从2010年以来，*SFI*表现为异常偏低。吉林省未来冻结指数为下降趋势，融化指数为上升趋势。

(3)吉林省冻结指数随着海拔、纬度的升高而显著上升，纬度对冻结指数的影响最大。融化指数随着海拔、纬度、经度的升高而显著下降，海拔的影响最大。冻结指数气候倾向率随着海拔的升高而上升，融化指数气候倾向率随着纬度的升高而上升。

参考文献(References)：

[1] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068 - 1076. [沈永平，王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土，2013，35(5)：1068 - 1076.]

[2] The Third National Assessment Report on Climate Change Editorial Committee. The third national assessment report of climate change[M]. Beijing: Science Press, 2016. [《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京：科学出版社，2016.]

[3] Peng Xiaoqing, Zhang Tingjun, Frauenfeld O W, et al. Response of seasonal soil freeze depth to climate change across China[J]. The Cryosphere, 2017, 11(3): 1059 - 1073.

[4] Wang Kang, Zhang Tingjun, Zhong Xinyue. Changes in the timing and duration of the near-surface soil freeze/thaw status from 1956 to 2006 across China[J]. The Cryosphere, 2015, 9(3): 1321 - 1331.

[5] Frauenfeld O W, Zhang Tingjun, McCreight J L. Northern Hemisphere freezing/thawing index variations over the twentieth century[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(1): 47 - 63.

[6] Jiang Fengqing, Hu Ruji, Li Zhen. Variation trends of the freezing and thawing index along the Qinghai-Xizang Railway for the period 1966-2004[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(9): 935 - 945. [姜逢清，胡汝骥，李珍. 青藏铁路沿线1966 - 2004年冻结与融化指数的变化趋势[J]. 地理学报，2007，62(9)：935 - 945.]

[7] Zhao Hongyan, Jiang Hao, Wang Keli, et al. The surface thawing-freezing indexes along the Qinghai-Tibet Railway: analysis and calculation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4): 617 - 622. [赵红岩，江灏，王可丽，等. 青藏铁路沿线地表融冻指数的计算分析[J]. 冰川冻土，2008，30(4)：617 - 622.]

[8] Jiang Hao, Wang Dayong, Cheng Guodong, et al. A prediction for temperature and thawing-freezing index of roadbed along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 855 - 859. [江灏，王大勇，程国栋，等. 青藏铁路路基表面温度及融冻指数预测[J]. 冰川冻土，2008，30(5)：855 - 859.]

[9] Wu Tonghua, Qin Yanhui, Wu Xiaodong, et al. Spatiotemporal changes of freezing/thawing indices and their response to recent climate change on the Qinghai - Tibet Plateau from 1980 to 2013[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 132(3/4): 1187 - 1199.

[10] Luo Dongliang, Jin Huijun, Jin Rui, et al. Spatiotemporal variations of climate warming in northern Northeast China as indicated by freezing and thawing indices[J]. Quaternary International, 2014, 349: 187 - 195.

[11] Dai Haiyan, Chen Suhua, Wu Yanjuan, et al. Analysis of the warm and cool season's climate variations in the ecological function sites in the Great Khingan, Inner Mongolia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 645 - 652. [代海燕，陈素华，武艳娟，等. 内蒙古大兴安岭生态功能区冷暖季节气候变化趋势分析[J]. 冰川冻土，2016，38(3)：645 - 652.]

[12] Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992, 16(4): 482 - 493. [符淙斌，王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学，1992，16(4)：482 - 493.]

[13] Ge Feifan, Mao Kebiao, Jiang Yuelin, et al. Analysis on characteristics and causes of temperature and vegetation changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River after the Three Gorges dam operation[J]. Climate Change Research, 2017, 13(6): 578 - 588. [葛非凡，毛克彪，蒋跃林，等. 三峡大坝运行后长江中下游流域气温与植被变化特征及原因分析[J]. 气候变化研究进展，2017，13(6)：578 - 588.]

[14] Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京：气象出版社，1999.]

[15] Tan Junling, Jiang Zhihong, Ma Tingting. Projections of future surface air temperature change and uncertainty over China based on the Bayesian Model Averaging[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(4): 583 - 597. [郯俊岭，江志红，马婷婷. 基于贝叶斯模型的中国未来气温变化预估及不确定性分析[J]. 气象学报，2016，74(4)：583 - 597.]

[16] Chen Chao, Zhou Guangsheng. Characteristics of air temperature and ground temperature in Alxa Left Banner from 1961 to 2010[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 91 - 103. [陈超，周广胜. 1961 - 2010年阿拉善左旗气温和地温的变化特征分析[J]. 自然资源学报，2014，29(1)：91 - 103.]

[17] Chen Chao, Zhou Guangsheng. Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2043 - 2053. [陈超，周广胜. 1961 - 2010年桂林气温和地温的变化特征. 生态学报，2013，33(7)：2043 - 2053.]

[18] Liu Yongting, Xu Guanglai, Yin Zhouxiang, et al. spatio-temporal change of surface air temperature in Anhui Province in the context of global warming from 1960 to 2014[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 680 - 691. [刘永婷，徐光来，尹周祥，等. 全球变化背景下安徽近55 a气温时空变化特征[J]. 自然资源学报，2017，32(4)：680 - 691.]

[19] Liu Qunqun, He Wenping, Gu Bin, et al. Detecting abrupt dynamic change based on changes in the fractal properties of spatial images[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 130(1/2): 435 - 442.

[20] Tang Xiaoping, Zhang Hezhen, Lu Hongya, et al. Characteristics of total cloud amount over Tibet in 1971 - 2008[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(6): 343 - 347. [唐小萍，张核真，路红亚，等. 西藏地区1971 - 2008年台站观测总云量的变化特征[J]. 气候变化研究进展，2009，5(6)：343 - 347.]

[21] Yu Xiujing, Li Dongliang, Hu Jingbiao. Inter-decadal climatic variation and climatic abruptness in Jilin Province in the recent 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 779 - 783. [于秀晶，李栋梁，胡靖彪. 吉林近50 a来气候的年代际变化特征及其突变分析[J]. 冰川冻土，2004，26(6)：779 - 783.]

[22] Lian Yi, Gao Zongting, Shen Baizhu, et al. Climate change and its impacts on grain production in Jilin Province[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(1): 46 - 49. [廉毅，高枞亭，沈柏竹，等. 吉林省气候变化及其对粮食生产的影响[J]. 气候变化研究进展，2007，3(1)：46 - 49.]

[23] Li Jia, Zhou Zuhao, Wang Hao, 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. [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.]

[24] Zhu Ling, Gong Qiang, Wang Xiaotao, et al. Change characteristics of ground-air temperature difference and their causes in Liaoning Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(4): 71－77. [朱玲, 龚强, 王小桃, 等. 辽宁省地气温差变化特征及其原因分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(4): 71－77.]

[25] Cao Bin, Zhang Tingjun, Peng Xiaoqing, et al. Spatial variability of freezing - thawing index over the Heihe River Basin [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(3): 357－366. [曹斌, 张廷军, 彭小清, 等. 黑河流域年冻融指数及其时空变化特征分析[J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 357－366.]

Spatiotemporal changes of annual freezing/thawing index of seasonally frozen soil in Jilin Province

REN Jingquan[1], LIU Yuxi[2], WANG Dongni[1], WANG Liang[3], SUN Yue[4], GUO Chunming[1], LI Qi[5]

(1. Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062, China; 2. Jilin Meteorological Observatory, Changchun 130062, China; 3. Jilin Climate Center, Changchun 130062, China; 4. Jilin Meteorological Detection Support Center, Changchun 130062, China; 5. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the meteorological data from 46 meteorological stations in Jilin Province from 1961 to 2015, the spatiotemporal changes of annual freezing/thawing index and its relationship with longitude, latitude, altitude were studied by the method of climatic diagnosis analysis in Jilin Province. The results showed that the freezing index had decreased gradually from north to south, and the thawing index had decreased from west to east in the province. The freezing index showed a significant downward trend, with the climatic tendency rates of *AFI* (air freezing index) of −48.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$ and *SFI* (surface freezing index) of −166.8 ℃·d·(10a)$^{-1}$. The *ATI* (air thawing index) and *STI* (surface thawing index) increased significantly at 57 ℃·d·(10a)$^{-1}$ and 93.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$, respectively. The *SFI*, *ATI*, and *STI* had mutated in 2001, 1994, and 1997, respectively. In the 1960s and 1970s, the freezing index was very high and the thawing index was extremely low. The trend of freezing thawing index in the future was consistent with the past, when the freezing index had an downward trend and the thawing index had an upward trend. The freezing index was mainly affected by latitude and increased with the rise of latitude. The thawing index was mainly affected by altitude and decreased significantly with the rise of altitude. The climatic tendency of freezing index increased with the rise of altitude, and the climate tendency of the thawing index increased with the rise of latitude.

Key words: freezing index; thawing index; seasonally frozen soil; spatiotemporal change; Jilin Province

(责任编委: 周成林; 编辑: 庞瑜, 周成林)