

# 长白山区年最大冻深的纬度效应及其对温度要素变化的响应

常泽华<sup>1,2</sup>, 齐 鹏<sup>2\*</sup>, 孙颖娜<sup>1</sup>, 章光新<sup>2</sup>, 唐晓宇<sup>2</sup>

(1. 黑龙江大学 水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

**摘 要:**气候变化变暖背景下,冻土退化及其带来的环境生态效应已成为国际社会关注的重要科学问题。以长白山为典型研究区,通过 51 个气象站点资料,采用气候统计学方法,分析 1960—2019 年最大冻土深度时空演变特征及其对温度要素变化的响应机制。结果表明,长白山区年最大冻土深度均值处于 60~180 cm,具有明显的纬度效应。同时,纬度越高冻土退化越明显,最大冻土深度 <120 cm 的区域不断增大。长白山区冻融期均温整体处于 0~3 ℃,温度增加显著,平均温度、最低温度和年负积温均呈现不同程度的增加趋势,随着纬度增加,温度要素变化均更为显著。冻土退化主要受冻融期均温影响,其次是负积温,对最低温变化响应不显著。随着纬度降低,温度对冻土退化影响更显著。

**关键词:**最大冻深;气候变化;温度;长白山区

**中图分类号:**S718.5

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2022)04-0018-11

## The Latitude Effect of the Annual Maximum Frozen Soil Depth in the Area of Changbai Mountain and Its Response to Changes in Temperature Elements

CHANG Ze-hua<sup>1,2</sup>, QI Peng<sup>2\*</sup>, SUN Ying-na<sup>1</sup>, ZHANG Guang-xin<sup>2</sup>, TANG Xiao-yu<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun 130102, Jilin, China)

**Abstract:** Under the background of climate warming, the degradation of frozen soil and its eco-environmental effects have become important scientific issues. The Changbai Mountain was selected to analyze the spatio-temporal variation of annual maximum frozen soil depth (AMFSD) based on the data collected from 51 meteorological stations, and its response mechanism to temperature changes during 1960 to 2019 by using climate statistics methods. The results showed that the average AMFSD in the mountain ranged from 60—180 cm, presenting obvious latitude effect. At the same time, the higher the latitude, the more obvious the frozen soil degenerated. The area of frozen soil depth less than 120 cm was increasing. The average temperature during freezing-thawing period in the Changbai Mountain area was between 0 ℃ and 3 ℃. The average temperature, minimum temperature and annual negative accumulated temperature all showed increasing trends. With the increase of latitude, the changes of temperature elements were more significant. The degradation of frozen soil was mainly affected by the average temperature during the freeze-thaw period, followed by the negative accumulated temperature, which did not respond significantly to the changes in the minimum temperature. As the latitude increased, the temperature had a more significant impact on the degradation of frozen soil.

**Key words:** maximum frozen soil depth; climate change; temperature; Changbai Mountain

收稿日期:2021-09-24 修回日期:2022-02-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0409104);国家自然科学基金项目(42001032)。

第一作者:常泽华。研究方向:寒区水文学。E-mail:changzehua@iga.ac.cn

\* 通信作者:齐 鹏,博士,助理研究员。研究方向:寒区生态水文学。E-mail:qipeng@iga.ac.cn



数为-0.09,无显著相关性),基于纬度覆盖范围将长白山区分为3个区域,即A区(39°~42°N)、B区(42°~44°N)、C区(44°~46°N)。

### 1.3 分析方法

1.3.1 反距离权重法 为分析长白山区年最大冻深和温度要素的时空演变规律,利用反距离权重法对长白山区各气象站点的冻深和温度资料进行空间插值。反距离权重法(IDW)是一种常用的空间插值方法,以插值点和样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近权重越大。计算公式为

$$Z(X_0) = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{z(x_i)}{(d_{i0})^p} \right] / \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_{i0})^p} \right] \quad (1)$$

式中: $Z(X_0)$ 为在 $X_0$ 处冻深或温度要素的值; $n$ 为参与预测 $Z(X_0)$ 周围站点的数量; $d_{i0}$ 为预测点和样本点之间的距离,km; $z(x_i)$ 为 $x_i$ 处气象站点的实测值; $p$ 为距离的幂。

1.3.2 相关系数分析法 年最大冻深的变化过程是多种复杂因素耦合作用的结果,为分析长白山区年最大冻深对温度要素的响应,本研究选取各站冻融循环期的平均气温,冻结时期的负积温与年最低温度和各站年最大冻深相关性分析。采用皮尔逊(Pearson)积差法计算相关系数,计算公式为

$$r = \frac{SS_{XY}}{\sqrt{SS_{XX} SS_{YY}}} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: $r$ 为年最大冻深和温度要素的相关系数; $X, Y$ 分别表示年最大冻深和温度要素的观测值。

1.3.3 Mann-Kendall 趋势检验 为分析长白山区最大冻深和温度要素的变化趋势,对各区最大冻深和温度要素采用秩次相关检验。Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数统计检验方法,该方法具有不要求样本遵从一定的分布规律,也不受少数异常值的影响的特点,近些年来被广泛应用于分析气象和水文等要数时间序列的变化趋势。统计经验公式为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

当 $n > 10$ ,统计量 $S$ 接近正态分布,则

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{var}[S] = [n(n-1)(2n+5) - \sum_i t_i(t_i-1)(2t_i+5)]/18 \quad (6)$$

式中: $x_i$ 和 $x_j$ 为第 $i$ 年和第 $j$ 年对应的最大冻深或温度要素的值; $n$ 为数据系列的长度,本研究 $n$ 为59, $t$ 为“结”的宽度, $\Sigma$ 表示所有“结”的总数。

## 2 最大冻深和温度要素时空演变特征

### 2.1 最大冻土深度时空演变特征

2.1.1 最大冻土深度年际变化趋势 长白山区年最大冻土深度具有明显的纬度效应,随着纬度升高年最大冻土深度显著增加,A区最小,C区最大(图2)。A区最大冻土深度具有减少趋势( $\text{slope} = -0.16$ ),但无显著性特征( $P > 0.05$ );B区和C区最大冻土深度均呈现显著减少趋势( $P < 0.01$ ),虽然二者年际变化有所差别,但二者变化趋势一致( $\text{slope} = -0.57$ )。

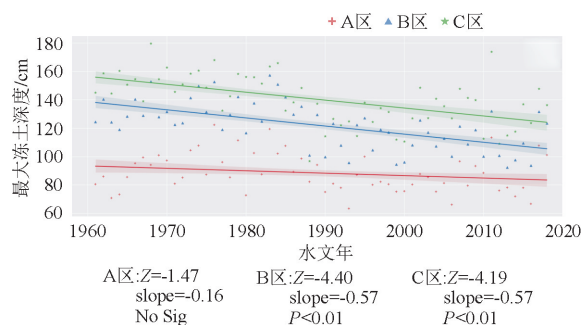


图2 最大冻土深度年际变化趋势

Fig. 2 Interannual variation trend of maximum frozen soil depth

长白山各年代均表现出纬度效应,即不同年代最大冻土深度在C区最大,B区次之,A区最小(表1)。A区最大冻土深度先增加后减少的年际变化趋势,1970s的均值最大,为97.74 cm,1990s最小,为80.22 cm;A区整体处于减少趋势,减小率为-1.60 mm/a。B区年代最大均值出现在1970s,最大值为134.36 cm,2010s均值最小,为109.01 cm;1960s—1980s最大冻深变化不大,1990s之后开始显著减少。C区年代最大均值出现在1960s,最大值为153.34 cm,1990s的均值最小,为123.44 cm。B区和C区减少速率均为-5.67 mm/a。

2.1.2 最大冻土深度的空间分布特征 通过1960—2019年最大冻土深度均值的空间分布可以看出,长白山区年最大冻深整体呈现由西南向东北逐渐增加的趋势(图3)。年最大冻土深度的最大值出现在C区,深度 $> 160$  cm;最小值出现在长白山区A区,冻土深度 $< 80$  cm。柳河站、东岗站、和龙站和伊通站附近区域年最大冻深略低于周边区域,磐石站附近区域年最大冻深略高于周边区域。年最大冻深为80~100 cm和120~140 cm的区域面积最大。

表 1 各区最大冻深年代均值

Table 1 The mean value of the maximum freezing depthin each area								
分区	多年均值/cm	1960s/cm	1970s/cm	1980s/cm	1990s/cm	2000s/cm	2010s/cm	变化率/(mm·a <sup>-1</sup> )
A	88.13	86.15	97.74	95.61	80.22	82.12	86.81	-1.60
B	121.94	131.77	134.36	132.48	111.12	111.60	109.01	-5.67
C	139.42	153.34	151.68	143.97	123.44	134.02	129.04	-5.67

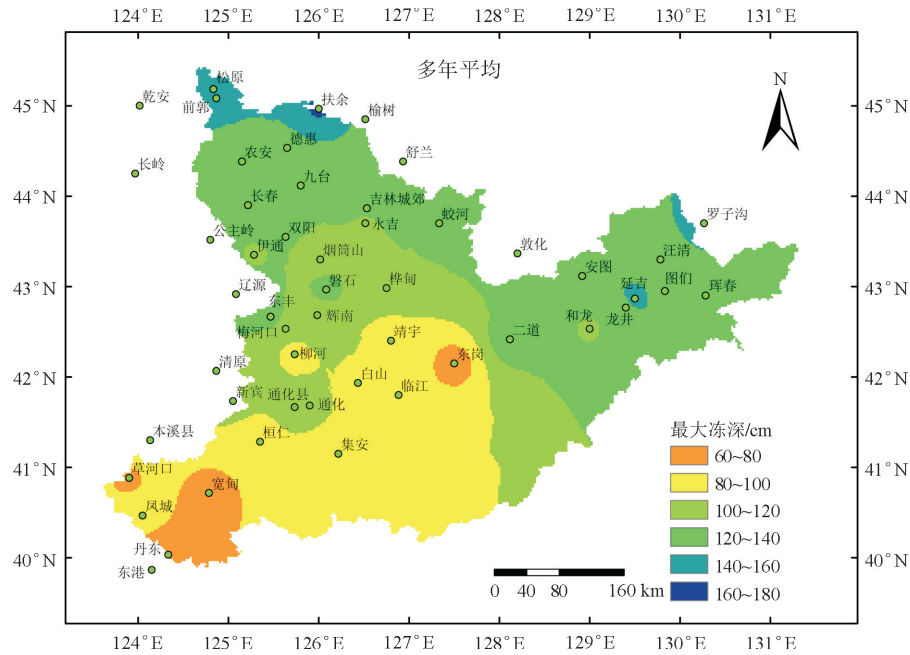


图 3 最大冻土深度多年均值分布

Fig. 3 Multi-year mean value of maximum frozen soil depth in space

年最大冻深年代均值基本呈现减小的趋势(图 4)。主要表现为,随着年代的增加,出现了年代均值为 40~60 cm 区域,>160 cm 的冻土区域逐渐消失;冻土区域南北范围边界北移;<120 cm 的冻土区面积有增加的趋势,>120 cm 的冻土区面积有减小的趋势。

2.2 温度要素时空变化

2.2.1 温度要素演变趋势 长白山区温度要素均为增加的趋势(图 5)。各区年均温均为显著增加的趋势( $P<0.01$ ),A 区变化趋势最小( $\text{slope}=0.02$ ),B 区和 C 区变化趋势一致( $\text{slope}=0.03$ )。长白山区负积温具有明显的纬度效应,随着纬度的增高,负积温减小,A 区最大,C 区最小。各区负积温均呈现显著增加的趋势( $P<0.01$ ),A 区年负积温变化趋势最小( $\text{slope}=3.78$ ),B 区变化趋势最大( $\text{slope}=5.43$ )。C 区最低温度呈显著增加的趋势( $P<0.05$ ),变化趋势最小( $\text{slope}=2.07$ ),A 区和 B 区均为显著减小的趋势( $P<0.05$ ),虽然两者年际变化有差别,但两者的变化趋势一致( $\text{slope}=0.08$ )。

年均温多年均值最大为 A 区(表 2),为 3.69℃,在 1990s 时年均温最大值为 4.15℃,在 1960s 时年均温为最小值,从 1990s 后开始不断减小。B

区年均温最小,为 1.67℃,在 2000s 时达到最大值,为 2.27℃,在 1960s 时为最小值,为 0.83℃,从 2000s 后有减小的趋势。C 区多年均温略大于 B 区为 1.72℃,在 1990s 达到年最低温度的最大值为 2.37℃,在 1960s 达到年最低温度的最小值为 0.79℃。年负积温多年均值最小值为 C 区,为 -1 568℃,在 1996s 时达到最大值为 -1 576℃,从 1960s 开始有升温趋势,1990s 后略有降温趋势。B 区年负积温小于 C 区,在 2010s 达到最大值。从 1960s 开始,出现逐步升温的趋势。年负积温多年均值最大的为 A 区,为 -1 056.83℃,在 1990s 达到最大值,为 -940.01℃,从 1960s 开始有增温趋势,在 1990s 之后有升温趋势。年最低温度年均值最小值在 B 区,1960s 时年最低温度达到最小值,最大值出现在 1990s,因此从 1960s 开始出现升温趋势,1990s 之后略有降温趋势。C 区年最低温度均值略大于 B 区,在 1960s 时为最小值,最大值出现在 1990s,因此从 1960s 开始有增温趋势,并在 1990s 之后有微小的增温趋势。

2.2.2 温度要素空间分析 长白山区大部分区域的年均温在 0~3℃,西南部地区温度较高,>3℃,图们站和珲春站附近区域,年均温略高于周边地区。

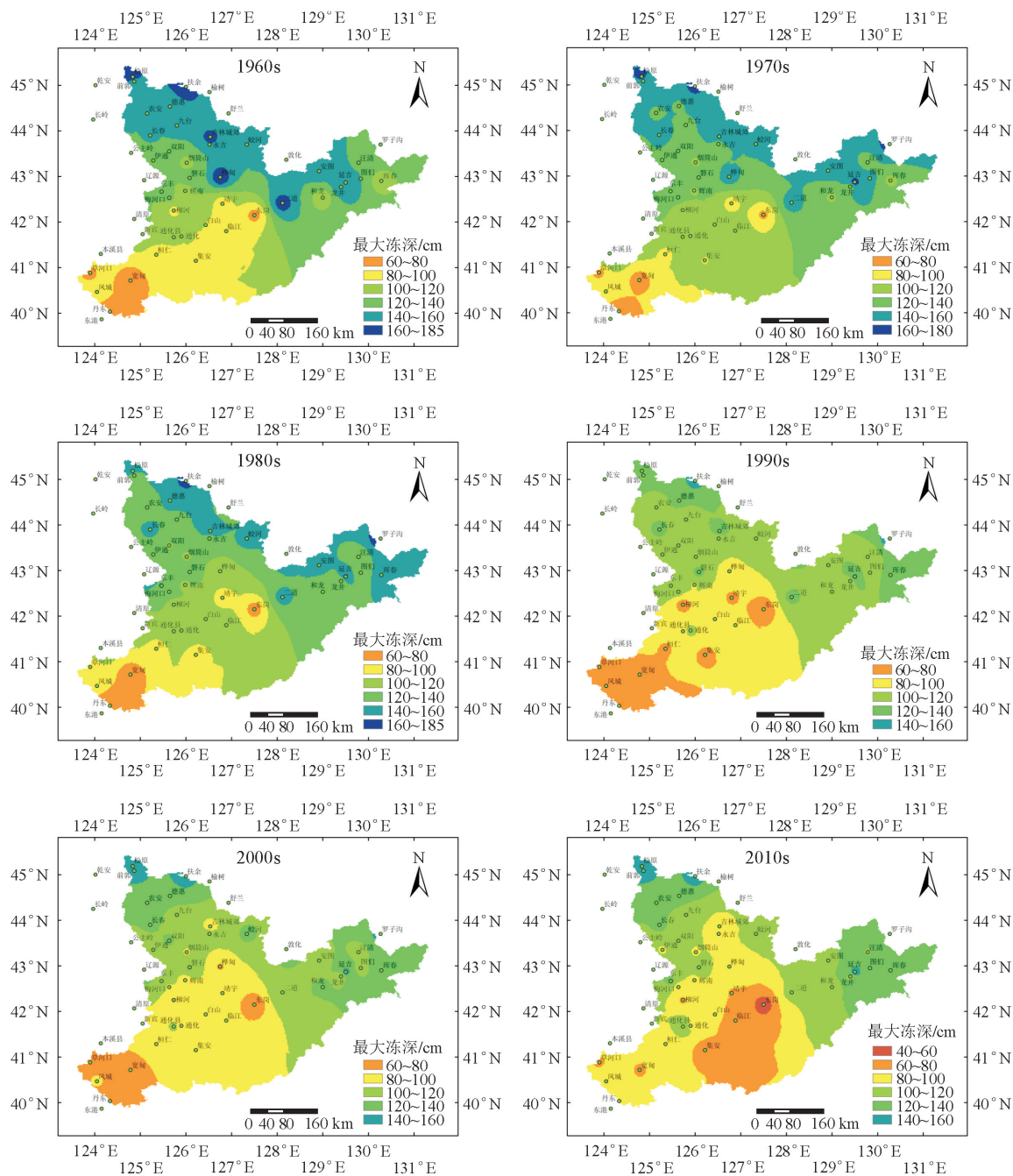


图 4 最大冻深年代均值分布

Fig. 4 Spatial value of the maximum frozen soil depth in different ages

表 2 各区温度要素年代均值

Table 2 The mean value of temperature elements in each area

类别	分区	多年均值 /℃	1960s /℃	1970s /℃	1980s /℃	1990s /℃	2000s /℃	2010s /(℃·a <sup>-1</sup> )	变化率 /(10 <sup>-1</sup> ×℃·a <sup>-1</sup> )
年均温	A	3.69	3.15	3.44	3.39	4.15	4.12	3.94	0.20
	B	1.67	0.83	1.17	1.48	2.18	2.27	2.17	0.31
	C	1.72	0.79	1.14	1.49	2.37	2.34	2.22	0.34
负积温	A	-1 056	-1 204	-1 064	-1 091	-940	-1 000	-1 038	35.6
	B	-1 439	-1 619	-1 496	-1 449	-1 307	-1 368	-1 391	49.5
	C	-1 568	-1 757	-1 622	-1 576	-1 400	-1 514	-1 538	46.3
最低温	A	-27.20	-30.15	-27.25	-28.06	-25.45	-25.96	-26.22	0.78
	B	-31.13	-33.80	-31.67	-32.01	-29.25	-29.92	-30.00	0.76
	C	-30.10	-32.09	-30.25	-30.58	-27.98	-29.34	-30.36	0.40

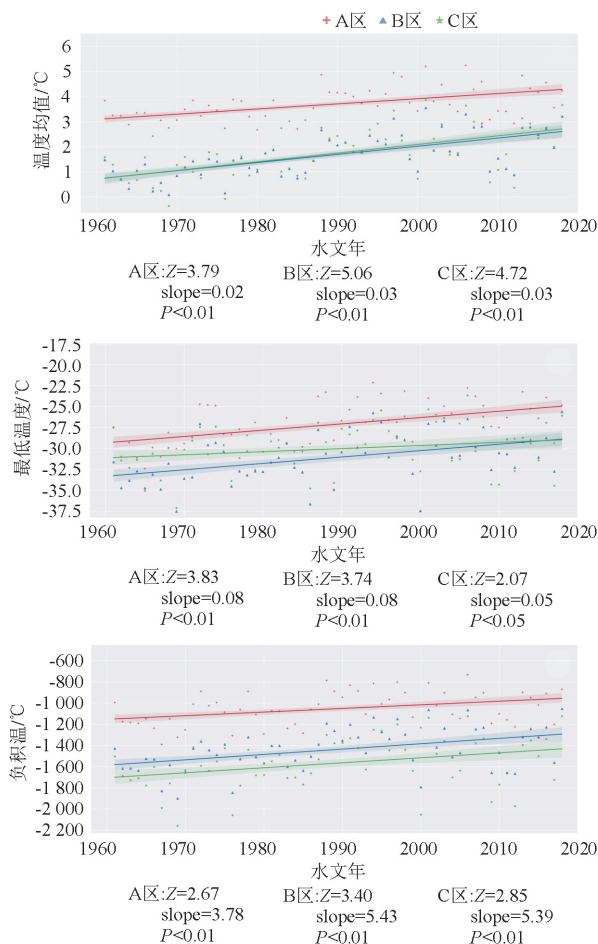


图5 温度要素年际变化趋势

Fig. 5 Interannual variation trend of temperature elements

年负积温在西部地区,具有由南向北增加的趋势,B区东部地区的年负积温略大于中西部地区,和龙站、图们站和珲春站附近的区域年负积温略大于周围地区,靖宇站、二道站和汪清站附近的冻深区域略高于周围地区。年最低温度 $<-30^{\circ}\text{C}$ 的地区大部分在山区中部和2区西部地区, $>-30^{\circ}\text{C}$ 的地区分布在山区西南部,西北部和东部地区;年最低温度的最小值靖宇站、二道站和桦甸站, $<-35^{\circ}\text{C}$ 。

年均温呈现增温的趋势(图7),年均温为 $6.0\sim 7.5^{\circ}\text{C}$ 的地区逐渐出现, $<0^{\circ}\text{C}$ 的地区逐渐消失;年均温 $>1.5^{\circ}\text{C}$ 的地区范围扩大, $<1.5^{\circ}\text{C}$ 的地区范围减小; $1.5\sim 3^{\circ}\text{C}$ 的地区扩大面积最大,到2010s长白山区大部分地区,年均温为 $1.5\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。

年负积温均值呈现增温的趋势(图8),年负积温 $<-1400^{\circ}\text{C}$ 的地区面积逐渐减小, $>-1400^{\circ}\text{C}$ 的地区在不断扩大,前者在1990s时,面积达到最小值,在1960s时为最大值,此温度范围经历了先减小后增大变化趋势,后者反之。

年最低温度均值呈现增温的变化趋势(图9)。年最低温度 $<-30^{\circ}\text{C}$ 的地区总体为减小的趋势, $>-30^{\circ}\text{C}$ 的地区为增加的趋势,前者在1990s达到

最小值,在1960s时为最大值,该温度区域面积变化规律为先减小后增大。

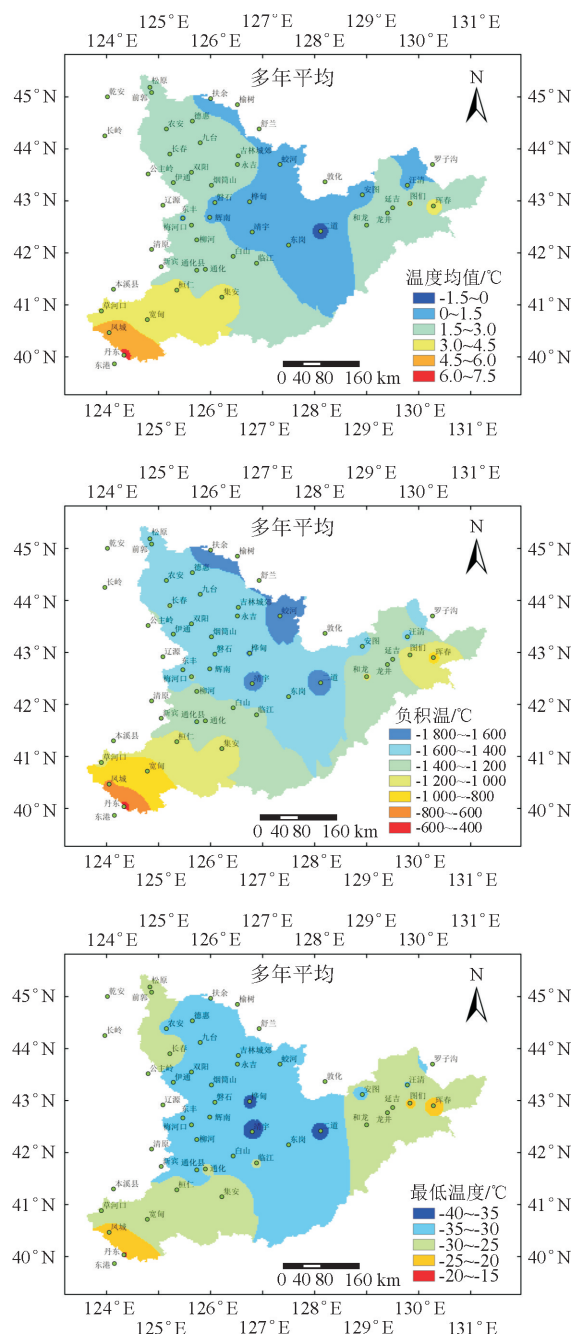


图6 温度要素多年均值空间分布

Fig. 6 Multi-year mean value of temperature elements in space

## 2.3 最大冻深对温度变化的响应

长白山年最大冻深和年均温整体为负相关的关系。其中相关性最大的站点在二道站,相关系数为 $-0.65$ (图10)。年最大冻深和年负积温呈负相关的关系,其中双阳站、磐石站、永吉站、蛟河站和罗子湾站呈正相关的关系,但相关系数均 $<0.25$ 呈不相关的关系,这些站点均分布在B区(图11)。年最大冻深和年最低温度呈正相关的关系,但相关系数均 $<0.25$ 呈不相关的关系,从图12中可以明显看出,年

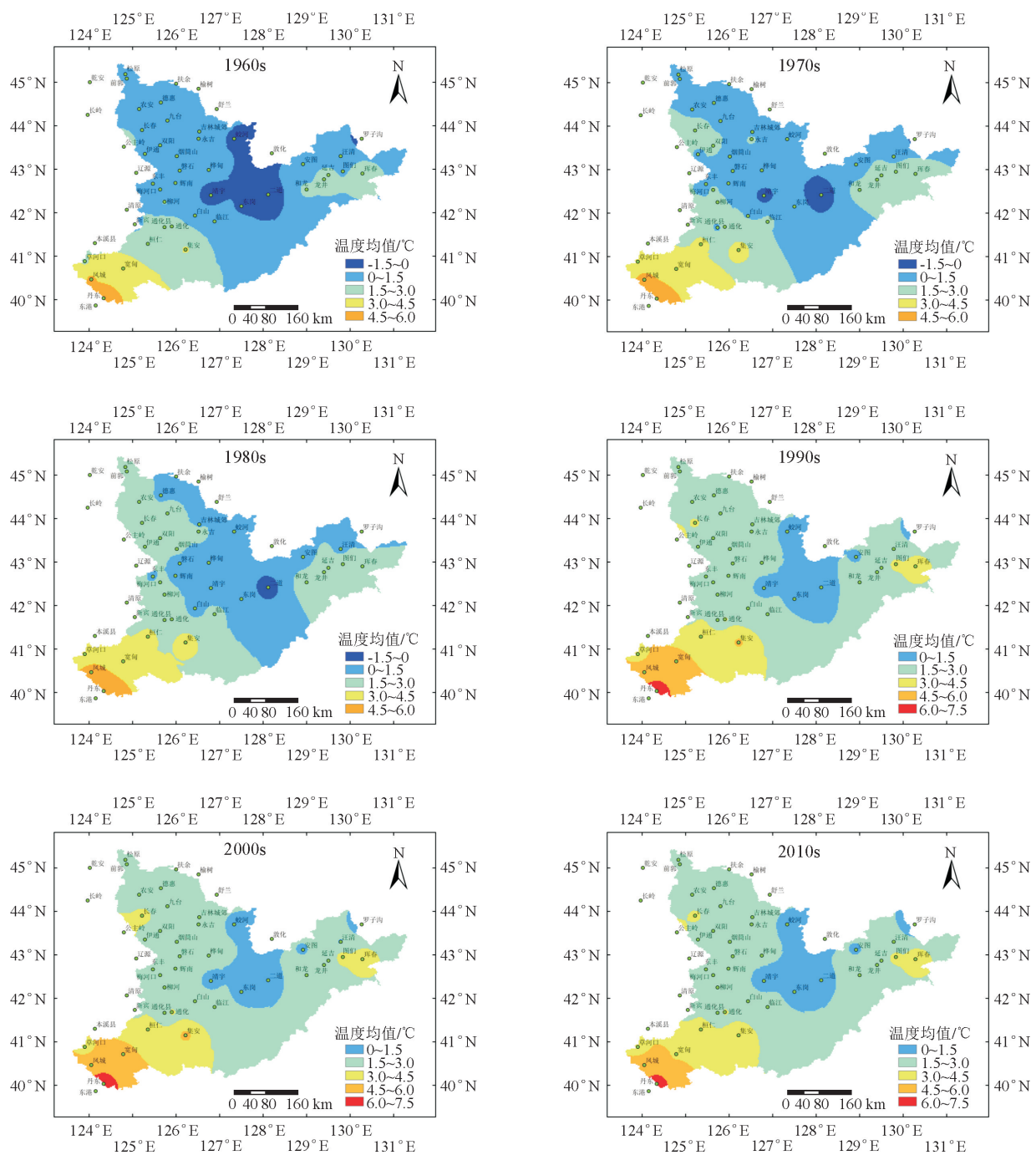


图 7 均温年代均值分布

Fig. 7 Spatial value of the mean temperature in different ages

最大冻深和年最低温度的相关系数的数值均小于年均温和年负积温的相关系数的数值。

根据表 3 可以看出,3 个分区内年最大冻深和年均温度的相关性最高,与年最低温度的相关性最弱,各区年最大冻深和年均温和年负积温均呈显著的负相关的关系,与年最低温度呈不显著负相关的关系。在 B 区,年最大冻深和年均温度的相关性最强,年最大冻深和年负积温的相关性也最强。C 区年最大冻深和年均温的相关性较小,与年负积温的

相关性也较小。

表 3 最大冻深和温度要素的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of maximum freezing depth and temperature

分区	平均温度	负积温	最低温度
A	-0.46 **	-0.35 *	-0.08
B	-0.51 **	-0.36 *	-0.21
C	-0.44 **	-0.31 *	-0.24

注: \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.001$ 。

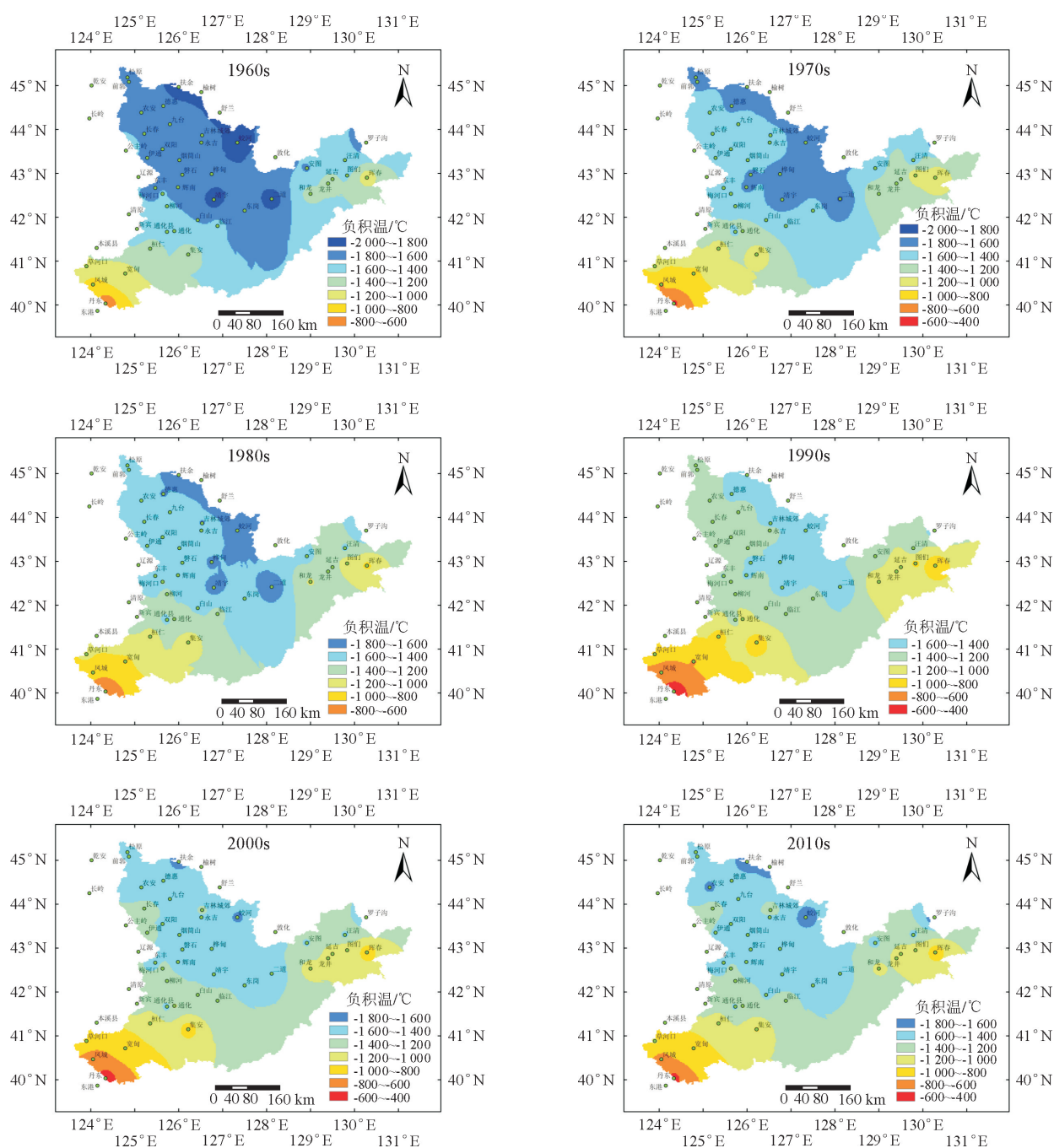


图8 负积温年代均值分布

Fig. 8 Spatial value of the negative accumulated temperature in different ages

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本研究通过长白山及周边 51 个气象站点资料, 统计分析了 1960—2019 年最大冻深时空演变特征及其对温度要素变化的响应机制, 得出以下结论。

长白山区年最大冻土深度具有明显的纬度效应, 随着纬度的增高年最大冻深逐渐增加。最大冻深整体上呈现不断减小的趋势, 在 1980s—1990s 变化最为明显, 在 1990s 各区最大冻深最小。高纬度

地区最大冻深退化最为明显, 低纬度地区退化较缓。随着年代的增加冻土深度  $< 120$  cm 的区域不断增大, 且该区域的范围边界在不断北移。

长白山区西南部温度较高, 中部温度较低, 西北部负积温和最低温度较低。长白山各区均呈现增温的趋势, 年均温的增温变化具有纬度效应, 纬度越高增温趋势越明显。各区温度要素均在 1980s—1990s 变化趋势最大, 在 1990s 各温度要素达到最大值。随着年代的增加, 平均温度  $> 3$  °C, 负积温  $> -1400$  °C, 最低温度  $> -30$  °C 的地区不断扩大。

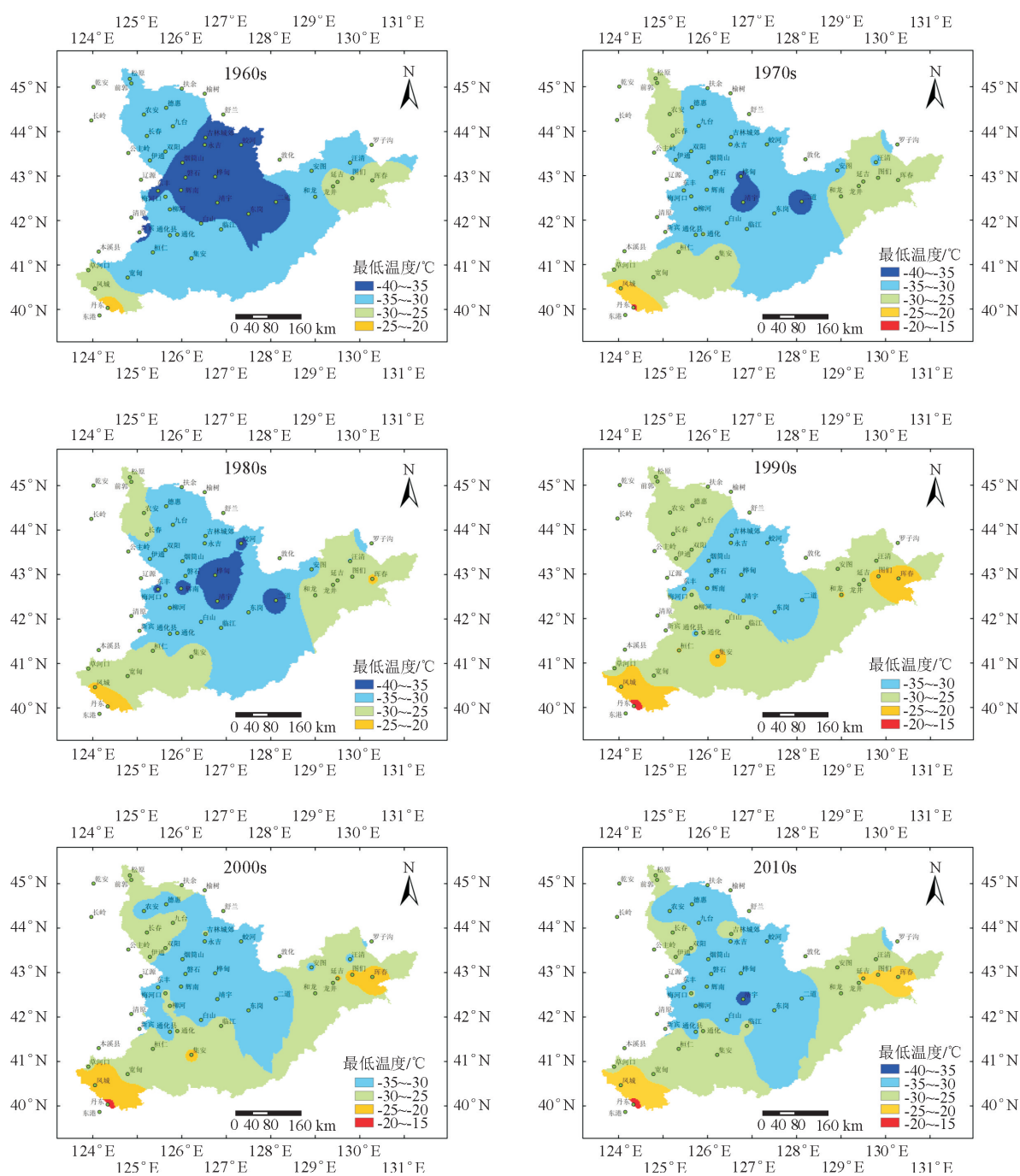


图9 最低温度年代均值分布

Fig. 9 Spatial value of the lowest temperature in different ages

长白山区年最大冻深对年均温的响应最为强烈,其次为年负积温,均为显著负相关的关系,与年最低温度响应最差,为不显著负相关的关系。低纬度地区冻土变化对温度变化响应更为显著。

### 3.2 讨论

受全球气候变暖的影响,季节性冻土均呈现退化的趋势,特别是在中高纬度地区退化趋势更为明显<sup>[8]</sup>。冻土退化对生态水文循环过程产生重要的影响<sup>[9]</sup>。研究表明,冻土退化改变了融雪入渗的过程从而影响地表径流和地下径流<sup>[10]</sup>。长白山区是我

国东北地区重要的“水塔”,区域内冻土退化将会直接影响下游流量,对当地水文循环和生态水文<sup>[17]</sup>产生影响。然而以往研究仅关注长白山局部区域冻土变化,缺乏整体研究。本研究以长白山整体为研究对象,不但包括松花江,还包括图们江和鸭绿江全流域。从空间和时间2个角度重点解析了最大冻土深度的演变特征。结果显示,长白山区年最大冻深和海拔的相关系数为-0.09,与纬度的相关系数可达0.81,因此长白山区年最大冻深空间分布具有明显的纬度效应,北部年最大冻深大,这与先前的研究结

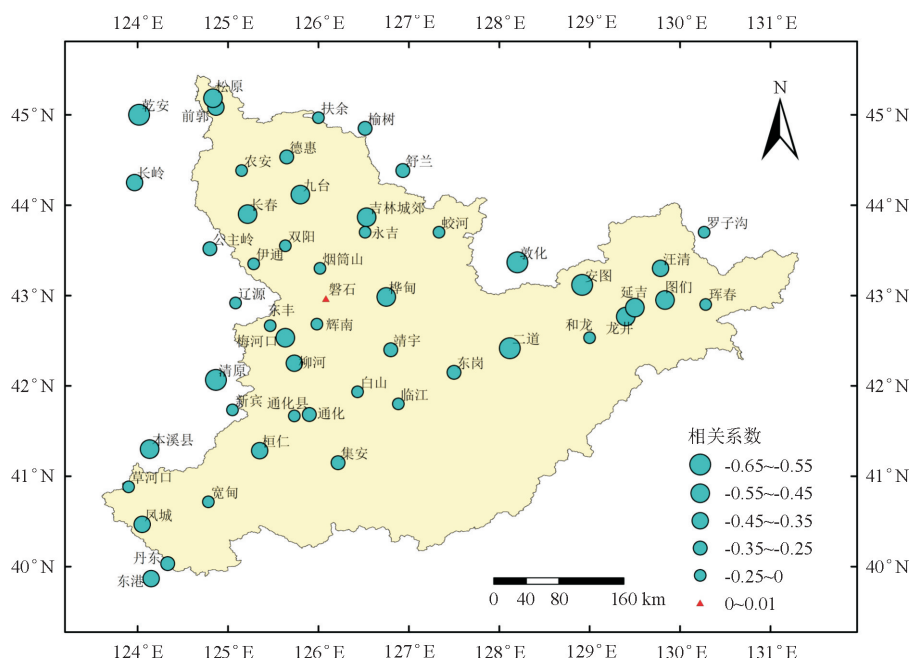


图 10 最大冻深和均温相关系数分布

Fig. 10 Distribution map of correlation coefficient between maximum freezing depth and average temperature

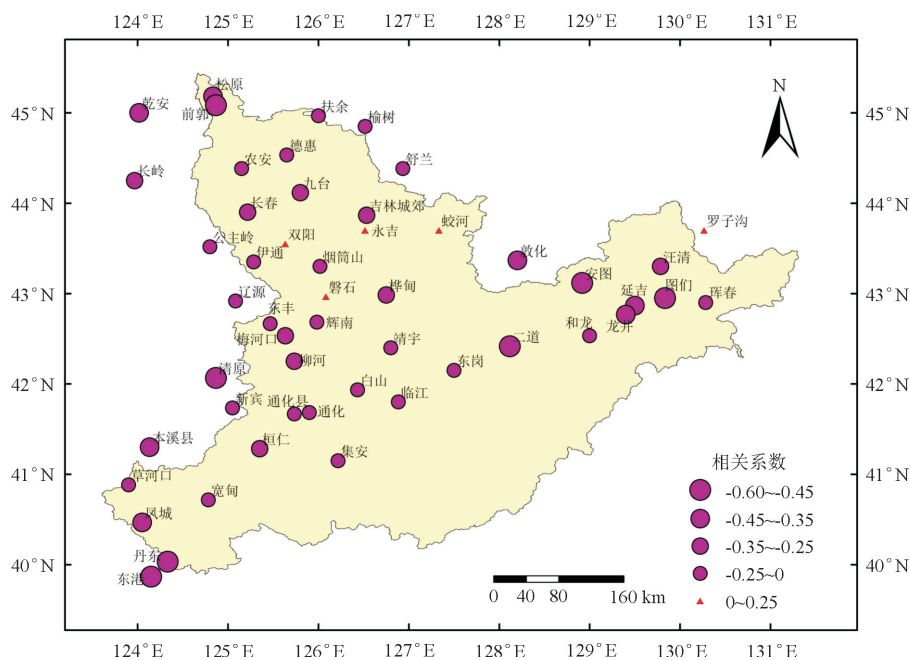


图 11 最大冻深和负积温相关系数分布

Fig. 11 Distribution map of correlation coefficient between maximum freezing depth and accumulated temperature

论一致。结果表明长白山区最大冻土深度整体呈现显著的减小趋势,最大冻深 $<120$  cm 的冻土区域面积在不断扩大,该范围边界在不断北移,随着纬度增高减小趋势越显著,具有明显的纬度效应,这与以往研究具有一致性<sup>[11]</sup>。研究表明,温度<sup>[12]</sup>、植被覆盖类型<sup>[13]</sup>和积雪深度<sup>[14]</sup>等均会对冻土变化产生影响,其中冻融期温度是最主要的影响因素<sup>[15]</sup>。大气温度通过改变土壤的水热条件从而进一步影响冻深发育过程。本研究发现,冻融期平均温度是长白山

最大冻土深度退化的最直接和最主要的影响因素,负积温次之,最低温影响较弱,这一结果与其他类似地区研究结果基本一致<sup>[16]</sup>。全球气候变暖背景下,冻土发生显著退化,这将带来一系列生态环境过程的显著改变,如冻融水循环过程、温室气体的爆发式排放和生态系统改变等<sup>[17]</sup>。冻土退化及其生态环境效应是极其复杂的过程,本研究可为后续气候变化影响下冻融期生态水文演变机理研究奠定基础。

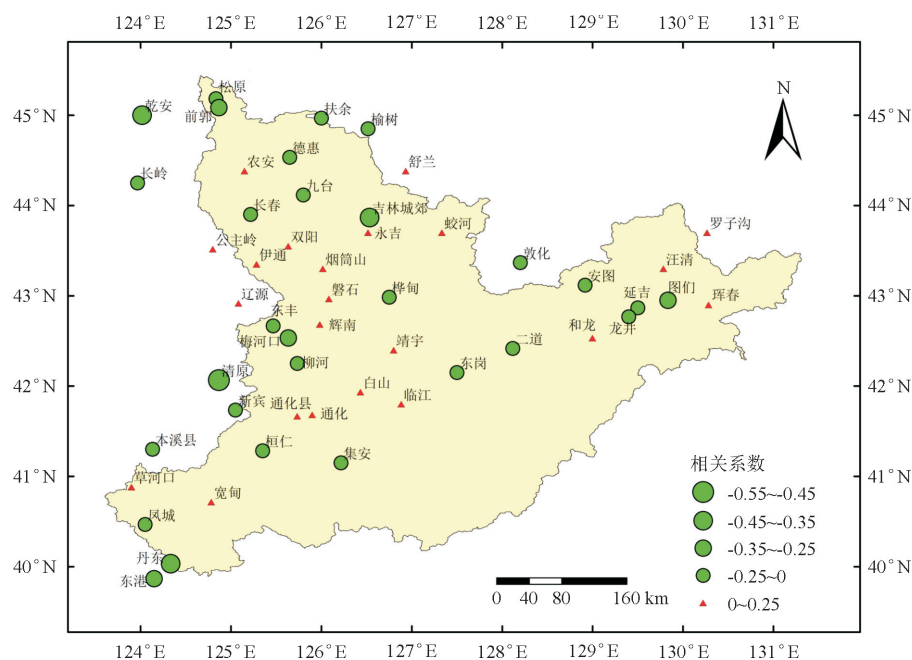


图 12 最大冻深和最低温度相关系数分布

Fig. 12 Distribution map of correlation coefficient between maximum freezing depth and minimum temperature

#### 参考文献:

- [1] HAYASHI M. The cold vadose zone: hydrological and ecological significance of frozen-soil processes[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(4): 37-49.
- [2] SCHUUR E, MCGUIRE A, SCHADEL C, *et al.* Climate change and the permafrost carbon feedback [J]. *Nature*, 2015, 520: 171-179.
- [3] 曾旭婧, 邢艳秋, 单炜, 等. 基于 Mann-Kendall 法的北黑高速沿线岛状冻土区植被退化分析[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(2): 22-29.  
ZENG X J, XING Y Q, SHAN W, *et al.* Vegetation degradation analysis in the island-shaped permafrost areas along Bei'an-Heihe expressway based on the Mann-Kendall Test [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(2): 22-29. (in Chinese)
- [4] LI T, CHEN Y Z, HAN L J, *et al.* Shortened duration and reduced area of frozen soil in the Northern Hemisphere[J]. *The Innovation*, 2021, 2: 100146.
- [5] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2783-2795.  
CHENG G D, ZHAO L, LI R, *et al.* Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795. (in Chinese)
- [6] 黄义强, 赵晶, 佟守正, 等. 延边地区季节冻土变化及其对气温变化的响应[J]. *延边大学学报: 自然科学版*, 2020, 46(4): 339-343, 374.  
HUANG Y Q, ZHAO J, TONG S Z, *et al.* Seasonal frozen soil change and its response to temperature change in Yanbian area [J]. *Journal of Yanbian University: Natural Science Edition*, 2020, 46(4): 339-343, 374. (in Chinese)
- [7] DU H B, LIU J, LI M H, *et al.* Warming-induced upward migration of the alpine treeline in the Changbai Mountains, Northeast China[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24: 1256-1266.
- [8] HU G J, ZHAO L, WU T H, *et al.* Spatiotemporal variations and regional differences in air temperature in the permafrost regions in the Northern Hemisphere during 1980—2018[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 791(14): 148358.
- [9] 王金叶, 康尔泗, 金博文. 黑河上游林区冻土的水文功能[J]. *西北林学院学报*, 2001(Supp. 1): 30-34.  
WANG J Y, KANG E S, JIN B W. Hydrological function of frozen soil in forest area in the upper reach of Heihe River [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001(Supp. 1): 30-34. (in Chinese)
- [10] 常学向, 王金叶, 金博文, 等. 祁连山林区季节性冻土冻融规律及其水文功能研究[J]. *西北林学院学报*, 2001(Supp. 1): 26-29.  
CHANG X X, WANG J Y, JIN B W, *et al.* The freezing and fusion rule of seasonal frozen soil and its hydrological function of forest area in Qilian Mountains. [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001(Supp. 1): 26-29. (in Chinese)
- [11] XIA K, WANG B. Observational variations in the seasonal freezing depth across China during 1965—2013[J]. *Climate Research*, 2020, 80(2): 121-132.
- [12] QIN Y, LEI H M, YANG D W, *et al.* Long-term change in the depth of seasonally frozen ground and its ecohydrological impacts in the Qilian Mountains, Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 204-21.
- [13] QIN Y, YANG D W, GAO B, *et al.* Impacts of climate warming on the frozen ground and eco-hydrology in the Yellow River source region, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 605-606: 830-41.

(下转第 151 页)

- 理及养分积累的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 514-521.
- WANG X, WANG Y L, WEI X L, *et al.* Growth, physiology and nutrient accumulation of *Phoebe bournei* seedlings under different amount of exponential nitrogen fertilization [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(3): 514-521. (in Chinese)
- [25] 张龙, 伍艳芳, 刘新亮, 等. 闽楠苗期适宜施肥量及 DRIS 营养诊断研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 926-931.
- ZHANG L, WU Y F, LIU X L, *et al.* Optimal fertilization amount and DRIS nutritional diagnosis at seedlings stage of *Phoebe bournei* [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(4): 926-931. (in Chinese)
- [26] 彭凌帅. 三种岩性土壤上棕榈施肥效应研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [27] 余常兵, 陈防, 万开元. 杨树人工林营养及施肥研究进展[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(3): 67-71
- YU C B, CHEN F, WAN K Y. Advances in the study of fertilization on poplar plantation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(3): 67-71 (in Chinese)
- [28] JOSHIFL M, BARGALI K, BARGALI S S. Changes in physico-chemical properties and metabolic activity of soil in poplar plantations replacing natural broad-leaved forests in Kumaun Himalaya[J]. Journal of Arid Environments, 1997, 35(1): 161-169.
- [29] HOFMANN-SCHIELLE C, JUG A, MAKESCHIN F, *et al.* Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the federal republic of Germany. I. site-growth relationships[J]. Forest Ecology and Management, 1999, 121: 41-55.
- [30] 张龙, 郑永杰, 伍艳芳, 等. 基于 DRIS 法的樟树人工林营养诊断[J]. 南方农业学报, 2018, 49(2): 313-319.
- ZHANG L, ZHENG Y J, WU Y F, *et al.* Nutrient diagnosis of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl plantation based on DRIS[J]. Journal of South China Agricultural Sciences, 2018, 49(2): 313-319. (in Chinese)
- [31] 刘雪凤, 李凯荣, 时亚坤, 等. 陕西富平杏叶片营养诊断研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 127-130, 169.
- LIU X F, LI K R, SHI Y K, *et al.* Foliar nutritional diagnosis of apricot tree (*Armeniaca vulgaris*) at Fuping in Shaanxi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5): 127-130, 169. (in Chinese)
- [32] SUMNER M E. Interpretation of foliar analyses for diagnostic purposes[J]. Agronomy Journal, 1979, 71(2): 343-348.
- [33] 叶功富, 高伟, 杜林梅, 等. 基于 DRIS 法的短枝木麻黄苗期综合营养诊断[J]. 植物科学学报, 2013, 31(2): 136-142.
- YE G F, GAO W, DU L M, *et al.* Nutrient diagnosis of *Casuarina equisetifolia* seedlings using DRIS [J]. Plant Science Journal, 2013, 31(2): 136-142. (in Chinese)
- [34] AMS ROCHA. Efficiency of the CL, DRIS and CND methods in assessing the nutritional status of *Eucalyptus* spp. rooted cuttings[J]. Forests, 2019, 10: 9.

(上接第 28 页)

- [14] 杨林, 马秀枝, 李长生, 等. 积雪时空变化规律及其影响因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 96-102.
- YANG L, MA X Z, LI C S, *et al.* Research progress in spatial-temporal variation of snow cover and the influencing factors[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 96-102. (in Chinese)
- [15] 郝建盛, 张飞云, 黄法融, 等. 新疆伊犁地区季节冻土沿海拔的分布规律及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1179-1185.
- HAO J S, ZHANG F Y, HUANG F R, *et al.* Altitudinal distribution pattern of seasonally frozen ground and its influencing factors in the Ili basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1179-1185. (in Chinese)
- [16] DE P M, RAMOS M, MOLINA A, *et al.* Thaw depth spatial and temporal variability at the Limnopolar Lake CALM-S site, Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 814-27.
- [17] 刘侦海, 王绍强, 陈斌. 2000—2015 年中蒙俄经济走廊东段冻土时空变化及植被响应[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1231-1244.
- LIU Z H, WANG S Q, CHEN B. Spatial and temporal variations of frozen ground and its vegetation response in the eastern segment of China-Mongolia-Russia economic corridor from 2000 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1231-1244. (in Chinese)