

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0333

ZHANG Wei, JI Ran. Response of maximum seasonally frozen depth and duration of soil frozen to climate change in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 18–25. [张威, 纪然. 辽宁朝阳地区季节冻土最大冻土深度和持续冻结时间与气候变化的响应研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 18–25.]

辽宁朝阳地区季节冻土最大冻土深度和持续冻结时间与气候变化的响应研究

张 威, 纪 然

(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要: 利用辽宁省朝阳市气象站 1960–2015 年的最大季节冻土深度、最长连续冻结时间的起始日和终止日数据, 采用小波分析方法对朝阳地区季节性冻土的年际变化特征进行分析, 并探讨影响季节性冻土发育的影响因素。结果表明: 朝阳地区最大冻土冻结深度存在 4 种尺度上的周期震荡, 其周期分别为 23~32 a、16~22 a、10~15 a 和 4~9 a。冻土年际变化的转折期发生在 20 世纪 90 年代初, 表明朝阳市冬季气候转暖的时间段也发生在 90 年代初。通过对气温与季节性冻土冻结深度以及冻结时间的相关性分析, 得出气候变暖对朝阳市季节冻土影响显著, 冬季平均气温和冬季最低气温是影响朝阳市季节冻土发育的重要因素, 其中冬季气温日较差对其影响尤为明显。冬季最低气温与冻土主冻期时间关系最为密切, 而影响主冻期结束时间的热力因子为冬季平均最高气温。

关键词: 辽宁朝阳; 季节性冻土; 年代际变化; 气候变化; 冻结深度; 冻结时间

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)01-0018-08

0 引言

冻土(frozen ground)一般是指含有水分的土壤由于温度低于 0℃而发生冻结, 可划分为短时冻土(可持续数小时、数日或者半月)、季节性冻土(可持续半月或者数月)以及多年冻土(可持续数年至数万年以上)三种类型^[1]。冻土是在岩石圈–土壤–大气圈系统热力交换过程中形成的, 是一种对气候变化十分敏感并且性质极不稳定的土体。冻土的形成受到自然界诸多地理因素的影响。其中, 气候是最重要的因素^[1–3], 冻土层的季节融化层以及季节性冻结层能快速的对气候变化做出反应。此外, 冻土也是土壤的重要性状, 土壤冻结深度的变化对区域工程地质的稳定性影响很大^[4–5], 一方面可导致冻土区地面的变形, 另一方面可导致冻土区水文地质条件发生改变, 影响区域水循环过程与生态环境^[6–9]。20 世纪至今, 在全球变暖和人类活动加剧的大背景下, 冻土的形成和演变环境也产生了变

化。因此, 冻土对气候变化的响应及其反馈作用方面的研究具有重要意义^[10–15]。近年来, 人们在冻土气候特征及其对相关行业影响方面做了大量的工作, 取得很多研究成果, 尤其是在中国西北地区及东北大小兴安岭地区的多年冻土领域中, 但对于季节性冻土的研究成果却较少。朝阳市位于我国辽宁省西部, 气候类型为温带大陆性季风气候, 尽管东南部受海洋暖湿气候影响, 但由于北部蒙古高原的干燥冷空气经常侵入, 属于半干燥半湿润地区, 四季分明, 区内主要发育季节性冻土。本文利用辽宁省朝阳市气象站 1960–2015 年气象资料, 采用小波变换分析方法对朝阳地区季节冻结的时间变化特征进行分析研究, 并讨论其与气候变化的关系。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

本文原始气象数据来源于朝阳市气象观测站点 1960–2015 年冻土观测记录, 据此建立朝阳市

1960–2015 年季节性冻土随时间的变化序列, 并建立朝阳市 1960–2015 年气温日较差、地气温差、地温、气温、最高气温、最低气温的时间变化序列。以上所有资料均来自辽宁省气象记录。

1.2 主要研究方法

由于传统傅里叶变换只能显示出信号中的频率信息, 却无法显示某一频率出现的具体时刻, 而在实际应用中, 常常需要对频率分量进行时间定位, 即提供信号的时频信息, 因此出现了很多时频分析方法, 短时傅里叶变换即是其中的一种, 但短时傅里叶变换分析只能在一个分辨率上进行, 而小波分析则克服了这种缺陷, 它具有多分辨率分析的特点, 在时域和频域上能够表征信号的局部信息, 并且根据信号的具体形态对时间和频率进行动态调整, 因此, 小波分析可以探测正常信号中的瞬态成分及频率成分^[16]。目前, 小波函数的类型有很多, 例如正交或离散小波以及实小波、复小波等。对于季节冻土冻结深度的变化序列, 由于其受到自然因素的影响呈现出复杂的、非线性且多时间尺度的变化特征, 所以正交或离散小波变换不能够准确的对信号进行分析。同时, 复小波变换相对于实小波变换, 不仅能显示时间序列变化的振幅, 而且能够给出时间序列变化的位相, 使对信号的分析更加深入。此外, 复小波变换可以避免由于虚假震荡而产生的误差, 提高结果的准确性。因此, 本文选用连续 Morlet 复小波变换对冻土冻结深度的多时间尺度特征进行分析^[17–23]。

小波函数是小波分析的重点, 它是指具有震荡性并且可以迅速衰减到零的一类函数, 即小波函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ 且满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

式中: $\psi(t)$ 为基小波函数, 进行小波变换得:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为一个信号或平方可积函数; a 为伸缩尺度; b 平移参数; $\bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。在地学中, 大多数的时间序列数据都属于离散型, 设函数 $f(t) = f(k\Delta t)$, ($k = 1, 2, \dots, N$; Δt 为取样间隔), 对式 (2) 的离散小波进行变换得:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (3)$$

将由小波变换方程得到的不同时间尺度的所有

小波系数在 b 域上积分, 就可得到小波方差, 即:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (4)$$

小波方差图即显示了小波方差随尺度 a 的变化过程。由式 (4) 可知, 它可以体现出信号波动的能量随尺度 a 的分布。因此, 小波方差图可检验出信号中主要时间尺度, 即主周期。

本文通过 Matlab (R2013a) 软件计算得到最大冻土冻结深度小波变换系数, 通过小波系数得到小波方差图。利用 Surfer 12.0 绘制最大冻土冻结深度小波变换系数等值线图和小波变换模等值线图。

为了进一步分析朝阳地区季节性冻土变化与气候之间的关系, 选用皮尔逊 (Pearson) 相关系数法, 定量描述变量间联系的紧密程度。即假设有两组对应数据 $\{(X_i, Y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ (n 为样本量) 是来自二元正态总体 $(X, Y) \sim N(\mu x, \mu y, \sigma^2 x, \sigma^2 y, \rho)$ 的样本, 则样本相关系数为:

$$\begin{aligned} \rho(X, Y) &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \\ &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: \bar{x} , \bar{y} 分别为 X, Y 的样本均值。 ρ 值的范围在 -1 和 $+1$ 之间。 $\rho > 0$ 为正相关, $\rho < 0$ 为负相关。 $\rho = 0$ 表示不相关; ρ 的绝对值越大, 两组数据间的关联程度越高。

2 辽宁朝阳地区季节冻土冻结特征

2.1 辽宁朝阳地区季节冻结深度年代际变化特征

一年中, 冻土主冻层下限记录的最大极值被称为该年的年最大冻土冻结深度^[24]。从图 1 中可以看出, 朝阳地区在 1960–2015 年最大冻土冻结深度整体上表现为减小趋势, 最大冻土冻结深度出现在 20 世纪 70 年代为 105 cm, 到 21 世纪初达到了最小值 79 cm, 平均最大冻土深度减少了 26 cm。此外, 在年代际变化特征方面, 20 世纪 60 至 90 年代最大冻土冻结深度高于 55 年间季节性冻土最大冻结深度的平均值 92 cm, 相对于 90 年代后期, 此阶段冻结层比较深厚, 从 20 世纪 90 年代至 21 世纪 10 年代低于季节性冻土最大冻结深度的平均值, 此阶段冻结层相对变薄, 但后期冻土最大冻结深度有增厚的趋势。

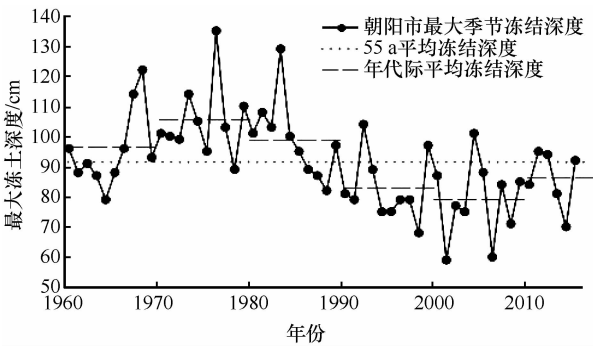


图1 辽宁省朝阳地区最大冻土冻结深度年代际变化过程
Fig.1 Annual variation of the maximum seasonally frozen depth in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

2.2 辽宁朝阳地区季节冻结深度的周期性变化特征

采用 Morlet 复小波变换对最大冻土冻结深度进行多时间尺度分析，其中，小波变换系数实部等值线图可以反映季节冻结深度不同时间尺度的周期变化。朝阳地区最大季节冻结深度随时间的发展存在 4 种尺度的复杂嵌套结构的周期范围变化，周期分别为 23 ~ 32 a、16 ~ 22 a、10 ~ 15 a 和 4 ~ 9 a (图 2)。1960 - 2015 年朝阳地区最大季节冻结深度在 22 ~ 32 a 尺度的周期振荡中，冻土深度经历了从深到浅的 3 个准交替变化，2010 年至今正在向较浅的趋势发展；16 ~ 22 a 尺度的周期振荡主要表现在 20 世纪 90 年代以前；10 ~ 15 a 尺度的周期振荡中，经历了从深到浅的 4 个交替变换，且此时正处在相对较浅阶段；4 ~ 9 a 尺度的短周期振荡基本贯穿 1960 - 2015 年的整个时间序列，在此期间经历了从浅薄到深厚的 14 个交替变化，2015 年开始向深厚趋势发展。可见，最大季节冻结深度的周期变化并

不是只存在一个固定周期，而是以不同尺度周期互相结合的形式出现，大尺度的周期变换反映年代际背景下最大季节冻结深度的变化情况，小尺度的周期变换则反映了大尺度背景下冻结深度的具体情况。

小波系数模值的大小可以反映不同周期性的强弱。分析可知，23 ~ 32 a 时间尺度的模值相对最大，说明该时间尺度的周期性最强，即周期变化明显，而 4 ~ 9 a 时间尺度的周期性最弱(图 3)。

以上分析了季节性冻土冻结变化的周期范围，小波方差则能够反映出冻结深度在时间序列中每个周期的峰值，即主周期。如图 3，第一峰值为 28 a 时间尺度的周期，此周期震荡最强，为朝阳地区最大季节冻结深度随时间变化的第一主周期，18 a、13 a、6 a 分别为第二、三、四周期，即冻结深度在整个时间域内表现为这 4 个周期的变化特征。

2.3 辽宁朝阳地区季节冻结时间的变化特征

冻土的主冻期是指冻土的持续时间，由土壤出现冻结情况的开始日期和冻土完全融化的日期进行统计计算，它能够体现区域气候冷暖的变化特点^[25]。表 1 显示，随着时间的推移，朝阳地区季节冻结的主冻期先保持平稳后逐渐变短，在 20 世纪 60 - 80 年代期间，季节冻结的主冻期基本保持 159 d 左右，随后由 80 年代的 159 d 缩短到 21 世纪 10 年代的 130 d。此外，主冻期的结束时间也越来越提前，自 20 世纪 60 年代的 4 月 6 日提前至 21 世纪 10 年代的 3 月 18 日。在此期间，冻土主冻期最短时间出现在 2015 年，为 107 d，主冻期结束日期也是最早的，为 3 月 7 日。

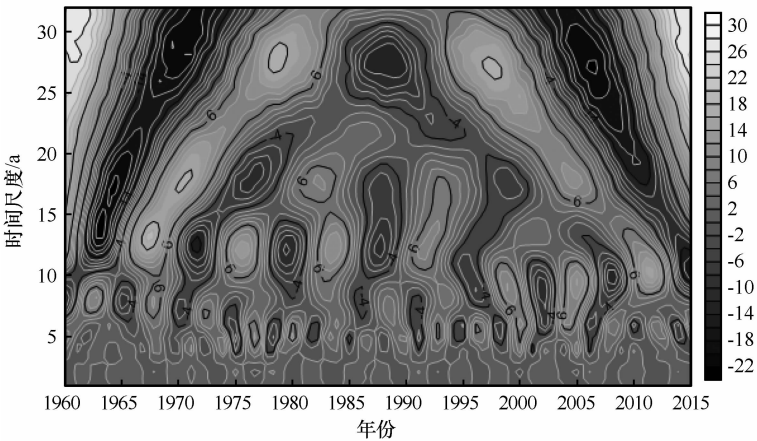


图2 辽西朝阳地区最大冻土冻结深度小波变换系数等值线
Fig.2 Wavelet transform coefficient contour map of maximum seasonally frozen depth in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

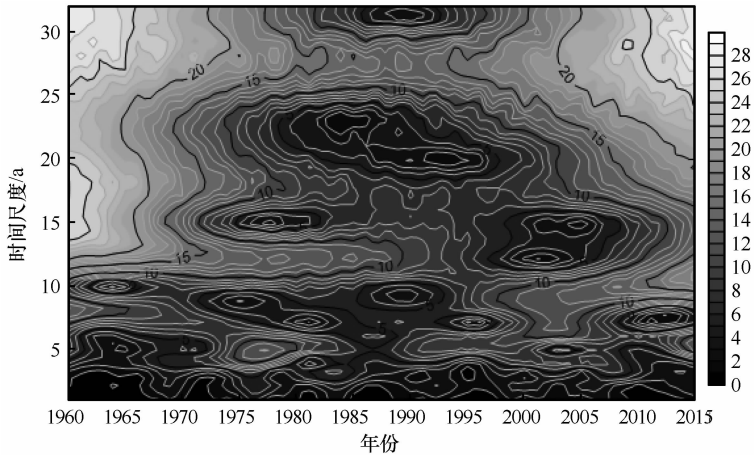


图3 朝阳地区最大冻土冻结深度小波变换系数模值等值线

Fig.3 Wavelet transform coefficient model value contour map of maximum seasonally frozen depth in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

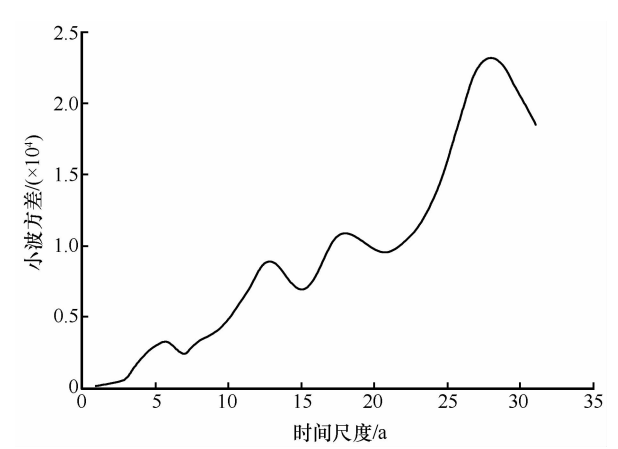


图4 辽宁朝阳地区最大冻土冻结深度小波方差

Fig.4 Wavelet variance of maximum seasonally frozen depth of frozen soil in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

表1 辽宁朝阳地区冻土冻结主冻期和结束时间年代际变化

Table 1 Various decadal main seasonally frozen periods and its ending dates in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

年代	主冻期(日数)/d	主冻期结束时间(平均值)
1960s	158	4月6日
1970s	159	4月5日
1980s	159	3月29日
1990s	148	3月27日
2000s	145	3月21日
2010s	130	3月18日

注：2010年代为6 a平均值，其他年代为10 a平均值。

3 辽宁朝阳地区季节性冻土最大冻结深度与气候变化的关系

由于季节性冻土的冻结层和融化层位于土壤层

的上部，因此可以十分敏感的反映出气候的变化^[26]。已有研究成果表明，影响冻土形成及发展变化的因素很多，包括气温、降水、积雪、地形、地质构造、地面覆盖性质以及土壤含水量等等，其中积雪、气温、降水对冻土影响最大^[1]，本文主要从气温影响方面分析其与朝阳地区季节冻结深度之间的关系。

分析表明，朝阳地区季节性冻土最大冻结深度与该地区冬季平均气温、平均最高气温、平均最低气温、冬季地温等热力因子呈负相关关系(表2)。其中，冬季平均气温与最大冻结深度相关性最高，两者相关系数为-0.7162，说明冬季气温平均水平越低，土壤冻结厚度越厚。图5(a)~5(d)分别给出了朝阳地区冬季平均气温、平均最低气温、地温、平均最高气温与季节性冻土最大冻结深度的时间演变曲线。从图中看出，朝阳地区季节性冻土最大冻结深度与冬季气温呈相反的变化关系，即温度降低，冻土最大冻结深度变深；温度升高，冻土最

表2 辽宁朝阳地区最大季节冻结深度与温度的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between the maximum seasonally frozen depth and various temperature indexes in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

热力因子	相关系数
	冬季最大冻结深度
冬季平均气温	-0.7162 *
冬季最高气温	-0.6198 *
冬季最低气温	-0.6845 *
冬季地温	-0.6503 *

注：表中*表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平。

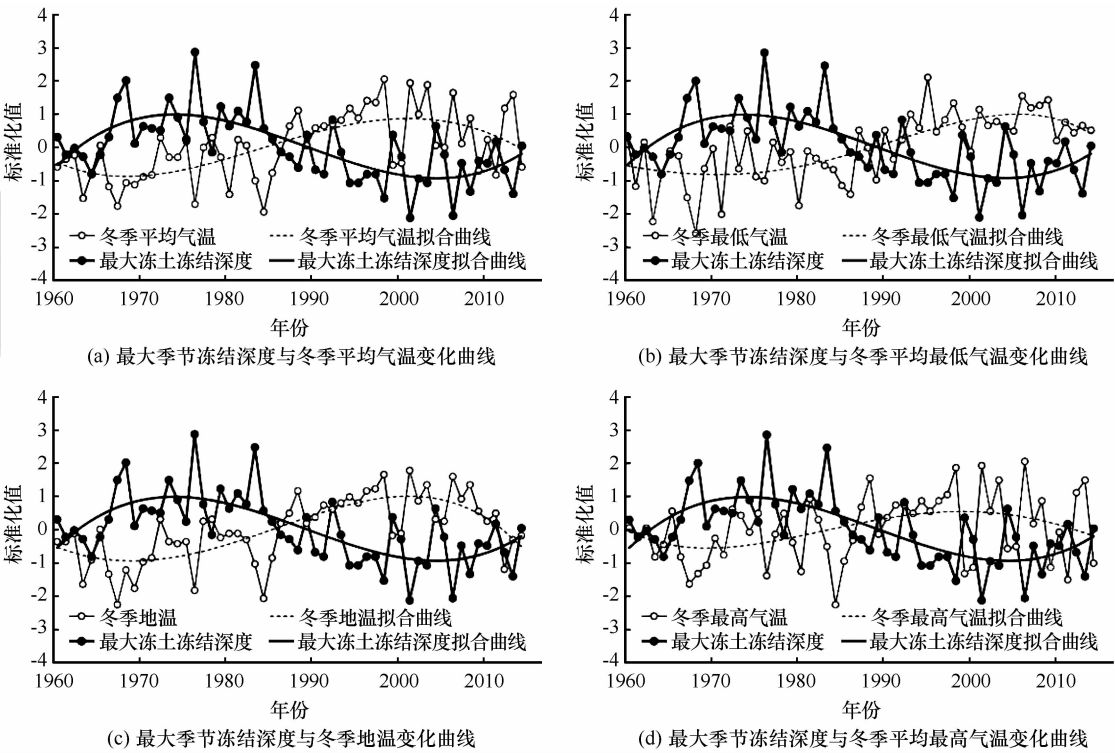


图5 辽宁朝阳地区最大季节冻结深度与冬季平均气温(a)、冬季平均最低气温(b)、冬季地温(c)和冬季平均最高气温(d)变化曲线

Fig. 5 Variations of maximum seasonally frozen depth and average temperature (a), the minimum temperature (b), ground temperature (c) and the maximum ground temperature (d) in winter in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

大冻结深度变薄。此外，在 20 世纪 90 年代初期以前，季节性冻土最大冻结深度较厚，各气温均偏低；随后季节性冻土最大冻结深度开始变薄，各气温升高，说明从 20 世纪 90 年代初期气候开始转暖，影响了冻土冻结深度的相应变化，反映了冻土冻结深度对冬季温度，尤其是冬季平均气温的密切关系。

朝阳地区季节性冻土最大冻结深度与冬季地气温差和气温日较差累积距平时间变化趋势图显示(图 6a、6b)，两者都具有一定的相关性。图 6(a)显示 20 世纪末期以前冬季地气温差处于持续增加状态，说明此时冬季气温比地温低，故此时期冬季热量的传输过程是由地表传向大气，使地表也不断地失去热量，导致这一时期的季节冻土冻结层增

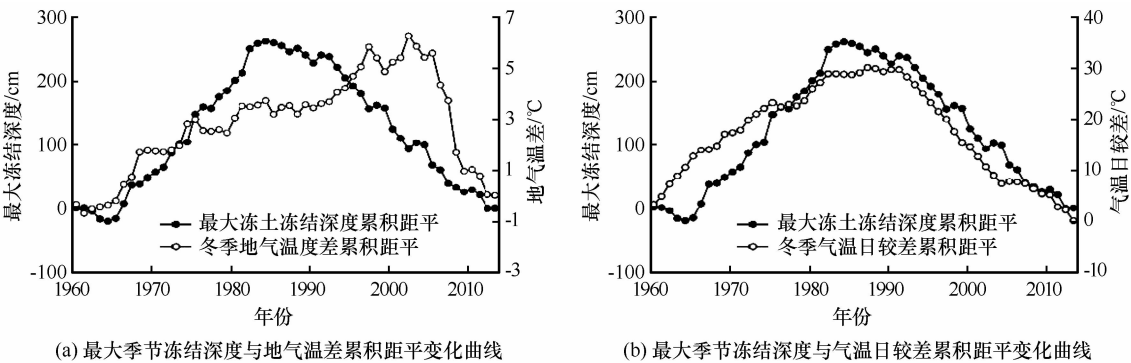


图6 辽宁朝阳地区最大季节冻结深度与地气温差(a)和气温日较差(b)累积距平变化曲线

Fig. 6 Annual variations of the cumulative departure of the difference between the ground temperature and air temperature in winter (a) and the cumulative departure of the daily range of air temperature in winter (b), together with the cumulative departures of the maximum seasonally frozen depth of frozen soil, in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

厚。到 20 世纪末期，冬季地气温差有停止增长的趋势，在平稳一段时间后开始下降，表明地温回升幅度高于气温回升幅度，此时热量的传输过程是由大气传向地表，地表获得热量，使季节性冻土厚度相应变薄，此外，图 6(a) 还反映出季节性冻土最大冻结深度的变化相对于冬季地气温差的变化存在明显的滞后现象，说明气温对冻土冻结情况的影响是连续的变化过程，并且存在一个过渡阶段。图 6(b) 显示，20 世纪 80 年代初期以前，冬季气温日较差不断增加，80 年代初期到 90 年代初期处于平稳状态，随后气温日较差开始减小。说明在 20 世纪 80 年代初期以前冬季冷空气活动频繁，最低气温异常偏冷，因此季节性冻土最大冻结深度相对较厚，当最低气温和地温升高，冬季气温日较差减小，使季节性冻土最大冻结深度变薄。

4 朝阳地区最大冻土冻结主冻期及其结束时间与气候变化的关系

对朝阳地区季节冻结主冻期及主冻期结束时间与朝阳市冬季平均气温、冬季地温、冬季平均最高气温和冬季平均最低气温间进行相关性分析(表 3)，结果表明，冬季平均最低气温和冬季平均气温与季节冻结主冻期的相关性最大，相关系数分别为 -0.5420 和 -0.5043，均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。说明冬季最低气温和平均气温越低，气候越寒冷，季节冻结深厚并且冻结时间越长；此外，冬季平均最高气温与季节冻结主冻期结束时间的相关性最高，表明冬季最高气温高，季节冻结主冻期的结束时间提前。

表 3 辽宁朝阳地区季节冻结主冻期和结束时间与温度的相关系数
Table 3 The relationship between temperature and freezing period, main freezing period and ending time in Chaoyang, Liaoning Province

热力因子	相关系数	
	冻土主冻期	冻土主冻期结束时间
冬季平均气温	-0.5043 *	-0.4702 *
冬季最高气温	0.4744 *	-0.4995 *
冬季最低气温	-0.5420 *	-0.1964
冬季地温	-0.3509 *	-0.2764

注：表中 * 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平。

5 结论

(1) 1960 - 2015 年，辽宁朝阳地区季节性冻土

最大冻结深度整体上呈减小趋势，此期间最大冻结深度的平均值为 92 cm，20 世纪 60 - 90 年代，最大季节冻结深度高于均值，相对冻结深度，冻结主冻期时间长，结束时间晚。90 年代至 21 世纪 10 年代，最大季节冻结深度低于均值，相对冻结浅薄，主冻期时间变短，结束时间明显提前，20 世纪 90 年代为变化的转折点。

(2) Morlet 复小波变换分析结果表明，朝阳地区季节性冻土最大冻结深度具有 23 ~ 32 a、16 ~ 22 a、10 ~ 15 a 和 4 ~ 9 a 的 4 类尺度的周期变化特征，其中 23 ~ 32 a 时间尺度的周期性变化最明显。

(3) 季节性冻土最大冻结深度、冻土主冻期和主冻期结束时间与各热力因子间均有一定的相关关系。冬季平均气温对冻土最大冻结深度的影响最为显著，冬季平均最低气温和冬季平均最高气温分别对冻土主冻期时长和主冻期结束时间影响显著。

参考文献 (References) :

[1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 9 - 19. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 9 - 19.]

[2] Li Shijie, Chen Wei, Jiang Yongjian, et al. Geological records for Holocene climatic and environmental changes derived from glacial, periglacial and lake sediments on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Quaternary Research, 2012, 32(1): 151 - 157. [李世杰, 陈炜, 姜永见, 等. 青藏高原全新世气候环境变化的冰川、冰缘和湖泊沉积记录[J]. 第四纪研究, 2012, 32(1): 151 - 157.]

[3] Cheng Guodong, Zhao Lin. The problems associated with permafrost in the development of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(6): 521 - 531. [程国栋, 赵林. 青藏高原开发中的冻土问题[J]. 第四纪研究, 2000, 20(6): 521 - 531.]

[4] Wu Qingbai, Niu Fujun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(10): 1079 - 1094. [吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. 科学通报, 2013, 58(2): 115 - 130.]

[5] Ren Guoyu. Climate change and the engineering projects of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Engineering Science, 2012, 14(9): 84 - 95. [任国玉. 气候变化与青藏高原工程设计[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 84 - 95.]

[6] Luo Dongliang, Jin Huijun, Lin Lin, et al. Degradation of permafrost and cold-enmronments on the interior and eastern Qinghai Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 538 - 546. [罗栋梁, 金会军, 林琳, 等. 青海高原中、东部多年冻土及寒区环境退化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 538 - 546.]

[7] Wang Genxu, Li Yuanshou, Wu Qingbai, et al. Impacts of permafrost changes on alpine ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China; Series D Earth Sciences, 2006, 9(11): 1156 - 1169. [王根绪, 李元寿, 吴青柏, 等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响[J]. 中国

- 科学: D 辑 地球科学, 2008, 36(8): 743–754.]
- [8] Zhao Yonghua, Du Erji, Liu Guangyue, et al. Study of soil methane production rate from marsh meadow in permafrost regions on Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 999–1005. [赵拥华, 杜二计, 刘广岳, 等. 青藏高原多年冻土区沼泽草甸土壤 CH_4 产生速率研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 999–1005.]
- [9] Li Lin, Wang Zhenyu, Xu Weixin, et al. Response of growth of typical plateau meadow on Tibetan Plateau to climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1006–1013. [李林, 王振宇, 徐维新, 等. 青藏高原典型高寒草甸植被生长发育对气候和冻土环境变化的响应[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1006–1013.]
- [10] Cheng Guodong. Glaciology and geocryology of China in the past 40 years: progress and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(3): 213–226. [程国栋. 中国冰川学和冻土学研究 40 年进展和展望[J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 213–226.]
- [11] Wang Shaoling, Zhao Xiufeng, Guo Dongxin, et al. Response of permafrost to climate change in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl 1): 157–165. [王绍令, 赵秀峰, 郭东信, 等. 青藏高原冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊 1): 157–165.]
- [12] Li Xin, Cheng Guodong. A GIS-aided response model of high altitude permafrost to global change[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 1999, 42(1): 72–79. [李新, 程国栋. 高海拔多年冻土对全球变化的响应模型[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 1999, 29(2): 185–192.]
- [13] Jin Huijun, Li Shuxun, Wang Shaoling, et al. Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2): 161–173. [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.]
- [14] Ni Jian. A simulation of biomes on the Tihetan Plateau and their responses to global climate change[J]. Mountain Research and Development, 2000, 21(1): 80–89.
- [15] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Liu Yongzhi. Mean annual ground temperature distribution on the Tibetan Plateau: permafrost distribution mapping and further application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 142–148. [南卓铜, 李述训, 刘永智. 基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图及应用[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 142–148.]
- [16] Gao Cheng, Dong Changhong, Guo Lei, et al. Wavelet analysis and application[M]. National Detense Industry Press, 2007: 1–28. [高成, 董长虹, 郭磊, 等. 小波分析与应用[M]. 国防工业出版社, 2007: 1–28.]
- [17] Zhang Qiang, Xu Chongyu, Chen Yongqin. Wavelet-based characterization of water level behaviors in the Pearl River estuary, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24: 81–92.
- [18] Liu Delin, Liu Xianzhao, Li Bicheng, et al. Multiple time scale analysis of river runoff using wavelet transform for Dagujia River basin, Yantai, China[J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(2): 158–167.
- [19] Liu Dong, Fu Qiang, Ma Yongsheng, et al. Annual precipitation series wavelet analysis of well-irrigation area in Sanjiang Plain[J]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2009, 293: 563–572.
- [20] Wang Wensheng, Ding Jing, Xiang Honglian. Multiple time scales analysis of hydrological time series with wavelet transform[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2002, 34(6): 14–17. [王文圣, 丁晶, 向红莲. 水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(6): 14–17.]
- [21] Deng Ziwang, Lin Zhenshan, Zhou Xiaolan. Multiple time scales analysis of Xi'an climate for last 50 years[J]. Plateau Meteorology, 1997, 16(1): 81–93. [邓自旺, 林振山, 周晓兰. 西安市近 50 年来气候变化多时间尺度分析[J]. 高原气象, 1997, 16(1): 81–93.]
- [22] Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. Northern hemisphere summer climate jump in the 1960s (I): rainfall and temperature[J]. Science in China: Series B Chemistry, 1990, 33(9): 1092–1101. [严中伟, 季劲钧, 叶笃正. 60 年代北半球夏季气候跃变 (I): 降水和温度变化[J]. 中国科学: B 辑 化学, 1990, 20(1): 97–103.]
- [23] Zheng Zhizhen, Shen Ping, Yang Xuanhui, et al. Wavelet transform and application of Matlab tool[M]. Beijing: Seismological Press, 2001. [郑治真, 沈萍, 杨选辉, 等. 小波变换及其 Matlab 工具的应用[M]. 北京: 地震出版社, 2001.]
- [24] China Meteorology Administration. The meteorologic observation criterion of ground[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1979: 21–27. [中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1979: 21–27.]
- [25] Wang Jianshu, Wang Bomin. Methods of meteorological data processing and statistic[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 134–135. [王树建, 王伯民. 气象资料的整理和统计方法[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 134–135.]
- [26] Lü Jiujun, Li Xiuzhen, Hu Yuanman, et al. Research progress on permafrost in cold region ecosystem[J]. Journal of ecology, 2007, 26(3): 435–442. [吕久俊, 李秀珍, 胡远满, 等. 寒区生态系统中多年冻土研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(3): 435–442.]
- [27] IPCC. The impacts climatic changes climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability-contribution of Working Group II to the IPCC Third Assessment Report[R]. 2001: 223–248. [政府间气候变化专门委员会. 气候变化的影响、适应和脆弱性: 第 II 工作组为政府间气候变化专门委员会准备的第三次评估报告[R]. 2001: 223–248.]
- [28] Li Zhenchun, Diao Rui, Han Wengong, et al. Overview of linear time frequency analysis method[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(4): 239–246. [李振春, 刁瑞, 韩文功, 等. 线性时频分析方法综述[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(4): 239–246.]

Response of maximum seasonally frozen depth and duration of soil frozen to climate change in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province

ZHANG Wei, JI Ran

(College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Using the data of the maximum seasonally frozen depth, the longest frozen duration and the start and end days of the longest continuous freezing time from the meteorological stations in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province from 1960 through 2015, the interannual change characteristics of permafrost in the prefecture were analyzed, , together with the wavelet analysis in this paper, and further discussed the influence factors on the seasonally frozen ground development in the prefecture. The results show that there have been four cycles of the maximum frozen depth, i. e. , 23 ~ 32 a, 16 ~ 22 a, 10 ~ 15 a and 4 ~ 9 a, respectively. There was a shift of the frozen ground depth in the early 1990s, showing a winter temperature warming in the prefecture since the early 1990s. According to correlation analysis between the temperature and frozen ground depth and frozen duration of seasonally frozen soil, it can be concluded that climate warming has a significant impact on the seasonally frozen in the prefecture. Meanwhile, the average temperature in winter and the lowest temperature in winter are closely related to the seasonally frozen depth in the prefecture. The analysis also indicates that the daily range of temperature in winter particularly affects the seasonally frozen depth. The lowest temperature in winter has closely related with the main frozen duration; the thermal factor that affects the end day of the main frozen period is the average maximum temperature in winter.

Key words: Chaoyang Prefecture of Liaoning Province; seasonally frozen ground; interdecadal variation; climate change; frozen depth; frozen duration

(本文编辑：周成林)