

DOI: 10.5846/stxb201308172098

施婷婷, 郑兴波, 张丽波, 杨弘, 李辉东, 李伟莉, 高玉芳. 植被对土壤热扩散特征的影响——以长白山阔叶红松林为例. 生态学报, 2015, 35(12): 3970-3978.

Shi T T, Zheng X B, Zhang L B, Yang H, Li H D, Li W L, Gao Y F. The influence of vegetation on soil thermal properties: a case study of broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 3970-3978.

## 植被对土壤热扩散特征的影响

——以长白山阔叶红松林为例

施婷婷<sup>1</sup>, 郑兴波<sup>2,\*</sup>, 张丽波<sup>1</sup>, 杨弘<sup>2</sup>, 李辉东<sup>2</sup>, 李伟莉<sup>3</sup>, 高玉芳<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学, 应用气象学院, 生态气象环境研究中心, 南京 210044

2 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

3 沈阳市水利建筑勘测设计院, 沈阳 110015

**摘要:** 土壤温度变化及热传递是影响土壤和大气水热交换的重要过程, 而植被是决定这种变化和影响的环境因子之一。通过比较林地与裸地土壤热特性的差异分析植被对土壤热扩散的影响。研究内容包括观测 2007 年长白山阔叶红松林区不同深度的土壤温度以及同期土壤含水量和叶面积指数。分析不同深度林地与裸地土壤温度年周期特征, 根据热传导方程估算各土壤层温度的阻尼深度和热扩散率, 并探讨引起林地与裸地土壤热特性差异的可能原因。结果表明, 林地与裸地的土壤温度有明显的时空变化规律。随着深度的增加, 土壤温度年周期的振幅逐渐减小、相位逐渐增大、平均值逐渐升高。林地土壤温度年平均值低于裸地, 表层年平均温度相差约 0.8℃; 地表以下相同深度处, 林地土壤温度年周期的振幅约低于裸地 2.6—2.9℃, 相位约小于裸地 0.2—0.24 rad(角速度), 这表明林地土壤温度极大值和极小值出现的时间比裸地滞后约 11—14d。土壤温度阻尼深度和热扩散率随深度的增加而逐渐增大, 而在 1.6—3.2m 则略有降低的趋势。林地与裸地土壤温度和热特性的时空特征和差异可能与土壤含水量和叶面积指数有关。

**关键词:** 土壤温度; 热扩散; 阔叶红松林; 阻尼深度

## The influence of vegetation on soil thermal properties: a case study of broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain

SHI Tingting<sup>1</sup>, ZHENG Xingbo<sup>2,\*</sup>, ZHANG Libo<sup>1</sup>, YANG Hong<sup>2</sup>, LI Huidong<sup>2</sup>, LI Weili<sup>3</sup>, GAO Yufang<sup>1</sup>

1 International Center for Ecology, Meteorology and Environment, School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 Shenyang Hydraulic Construction Survey and Design Institute, Shenyang 110015, China

**Abstract:** Vegetation is one of the determining factors for soil temperature variation and thermal transfer, which are important processes for the energy and water exchange on the land-atmosphere interface. This study was to understand the impacts of vegetation on soil thermal diffusivity through comparing observations on forested and bared lands. The observations were made in broadleaved Korean pine forest over Changbai Mountain during 2007. The annual cycle of soil temperature and thermal properties at five depths were measured, together with soil volumetric water content and leaf area index. The soil thermal diffusivity and damping depth of the soil temperature fluctuations were estimated using the heat

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41105112, 41105077); 南京信息工程大学生态气象环境研究中心科研基金; 江苏省自然科学基金面上项目(BK2012859); 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)

**收稿日期:** 2013-08-17; **网络出版日期:** 2014-07-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: carolstt@gmail.com

conduction equation and the sinusoidal-fluctuating temperature at the ground surface. The potential environmental factors for the thermal properties were explored. The results show that soil temperature in both bared land and forest had similar spatial and temporal variations but with different magnitudes. With increasing soil depth, the amplitude of annual temperature variation decreased gradually, while both its phase and annual average temperature itself increased. In comparison with the based soil, the annual average temperature of the surface soil layer in the forest was 0.8°C lower, the annual amplitude of soil temperature was 2.6—2.9°C lower, and the temperature phase was 0.2—0.24 rad lower, suggesting that the maximum and minimum temperatures of the forest lagged by 11—14 days behind those of the bare land. The damping depth and thermal diffusivity increased with the soil depth, with an exception for the 1.6—3.2m layers where slightly decrease with depth was observed. It is indicated that soil moisture and leaf area index are probably responsible for the different characteristics in soil temperature and thermal properties between the forest and bared land.

**Key Words:** soil temperature; thermal diffusivity; broadleaved korean pine forest; damping depth

土壤作为植物生长的媒介,为植物提供水分和矿物营养<sup>[1]</sup>,土壤热环境的变化,必然伴随着土壤微生物和酶的活性改变,影响着土壤质量,对植物的生长发育乃至群落的演替和生态系统的恢复均发挥着直接而深远的影响。土壤温度是计算地表与大气之间辐射与能量交换的重要参数,并且在一定程度上决定了地表的可用能量向能量收支各项的分配,包括显热、潜热、土壤热通量等<sup>[2]</sup>。传统的土壤热量传输过程主要考虑热传导过程,Bhumralkar<sup>[3]</sup>以正弦函数方程作为边界条件,推导出地表以下给定深度的土壤温度。Gao<sup>[4]</sup>则在此基础上还考虑了土壤水分的垂直流动对土壤热量传递的贡献,以包含热传导项和热对流项的土壤热量传输方程来描述一个半干旱草地的土壤热量交换过程。地表以下的土壤温度及其垂直梯度将影响植物根部温度、植被生长速率、初级生产力、分解以及蒸散速率<sup>[5]</sup>,进而对土壤中的热量传递和热量储存产生较强的驱动作用<sup>[6]</sup>。在植被覆盖区,遮荫和植被的热量传输过程较大程度的控制了植被与大气之间的能量交换,因此可大幅降低土壤表面的温度日变化<sup>[7]</sup>。自1980年代开始,植被对土壤热量传递的影响逐渐被学者重视,并被嵌入陆地表面过程模式中,如Sellers等<sup>[8]</sup>的SiB2模型、Versegny<sup>[9]</sup>的CLASS模型、Wang和Leuning<sup>[10]</sup>的CABLE模型、Dai和Zeng<sup>[11]</sup>的IAP94模型、Desborough和Pitman<sup>[12]</sup>的BASS模型等。植被类型对气候和其它环境因子的反应是综合的,主要涉及热量和降水<sup>[13-14]</sup>两大要素。而植被对局地气候状况也有较强的反馈作用,如植被覆盖下的气温和土壤温度的振幅均小于裸地<sup>[15-16]</sup>,植被覆盖对土壤热扩散特征影响的研究仍然较为缺乏。本文主要分析了林地与裸地不同深度的土壤温度变化和热扩散特征,并探究引起林地与裸地土壤热特性差异的可能影响因子,不仅为理解植被覆盖下的土壤热通量的时空变化提供理论支持,也为基于过程的陆面过程模式的土壤热扩散过程提供一定的数据支持。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 研究地概况

本研究在吉林省长白山自然保护区的中国科学院长白山森林生态系统定位站及其西边约1km的阔叶红松林内1号标准地进行(42°24'N,128°6'E,海拔738m)。林内主乔木为红松(*Pinus koraiensis*)、椴树(*Tilia amurensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木槭(*Acer mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等,林分为复层结构,平均株高约26m,立木株数约560株/hm<sup>2</sup>,郁闭度约0.8,下木覆盖度40%<sup>[17]</sup>。阔叶红松林带土壤为白浆化的山地暗棕色森林土,坡降2%—4%,地表0—5cm为枯枝落叶层,5—11cm为深灰色或深灰棕色腐殖质层,粘壤土,疏松,土壤颜色向下过渡明显,根系分布很多,11—32cm为白浆化暗棕色粘土,根系分布较多,但向下明显减少,32—105cm为暗棕色粘土,核块状结构,基本没有根系分布<sup>[18]</sup>。阔叶红松林带的年平均气温约为4.5°C,最冷月为1月(平均气温约-12.9°C),最热月为7月(平均气温约为19.4°C),日平均温度最高和最低值约为24.0°C和-21.8°C。

在阔叶红松林内建有高约 62m 的为气象观测塔,在塔上 32m 高度安装了光合有效辐射探头(Li-190Sb, LiCor Inc., USA),在 2.5 m 高度安装了 5 个杆状光合有效辐射探头(LQS70-10, APOGEE, USA),分别对冠层上方和下方的光合有效辐射进行测定。在气象塔的地表以下 5 个深度(0、0.05、0.2、0.5、1m)设置两套土壤温度传感器(105T 和 107T, Campbell, USA),并与数据采集器(CR23X, Campbell, USA)相连,每 30 分钟记录平均值,并计算日平均温度。在长白山森林生态系统定位站内设有标准气象站自动观测地温,观测系统为 M520,根据地面气象观测规范,气象站土壤温度在面积为 1m<sup>2</sup>左右的裸地下观测,对土壤内部 5 个深度(地表以下 0、0.4、0.8、1.6、3.2m)进行日平均温度的观测和记录。本文中数据采集时间为 2007 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日。

从 5 月 1 日至 10 月 31 日在阔叶红松林内对叶面积指数(LAI)进行人工观测,采用叶面积分析仪(LAI-2000, LiCor Inc., Lincoln, NE, USA)在林内选取 10 个样点进行观测,观测高度为 1m。由于 LAI 是通过植被冠层的辐射传输模型来计算的,要求天空为散射辐射,因而选择早晨日出前或阴天散射辐射较多时进行观测。在生长季初末期(5 月、9 月和 10 月)叶片刚开始展叶或枯黄凋萎时,叶面积变化较大,每隔 3d 观测 1 次。在生长旺盛期(6—8 月)叶面积较为稳定时,每隔 5—10d 观测 1 次。

## 1.2 研究方法

对于水平均质的土壤,设其热量仅在垂直方向上交换,则土壤的热传导方程为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中, $T_s$ 为土壤温度(°C), $t$ 为时间(s), $z$ 为土壤深度(m), $k$ 为土壤的热扩散率(m<sup>2</sup>/s), $k = \lambda/c$ , $\lambda$ 为导热率(W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), $c$ 为土壤的容积热容量(J m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>)。给定土壤表面温度变化的边界条件:

$$T(0, t) = \bar{T}_0 + \Delta T_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi_0) \quad (2)$$

式中, $T(0, t)$ 表示土壤表面在时刻  $t$  的温度(°C), $\bar{T}_0$ 为土壤表面的平均温度(°C), $\Delta T_0$ 为土壤表面温度振幅(°C), $\omega$ 为地球旋转角速度(rad/s, = 2π/周期,日周期为 24h,年周期为 365d), $\varphi_0$ 为初相(rad)。根据方程(1)和(2)可以解出  $z$  深度的土壤在  $t$  时刻的温度  $T_s(z, t)$ :

$$T(z, t) = \bar{T}_z + \Delta T_z \cdot \sin(\omega t - \varphi_z) \quad (3)$$

式中, $\bar{T}_z$ 为  $z$  深度土壤的平均温度(°C), $\Delta T_z$ 为  $z$  深度土壤温度振幅(°C), $\varphi_z$ 为相位,分别由下式计算:

$$\Delta T_z = \Delta T_0 \cdot e^{-z/d} \quad (4)$$

$$\varphi_z = \varphi_0 + z/d \quad (5)$$

式中, $d$ 为土壤温度振荡的阻尼深度(m),即在一定的周期上土壤温度的振幅减少至表层土壤温度振幅 1/e 倍的深度(m), $d = \sqrt{2k/\omega}$ 。由式(4)和(5)可以看出,随着土壤深度  $z$  的增加,土壤温度振幅  $\Delta T_z$  呈指数衰减,而相位  $\varphi_z$  呈线性后移。

根据土壤深度  $z$  处的日平均温度  $T_s$  一年周期的观测资料,利用 SPSS 软件最小二乘法对方程(3)进行曲线回归拟合,即可估算出参数  $\bar{T}_z$ 、 $\Delta T_z$ 、 $\varphi_z$ 。再根据两个不同深度  $z_1$ 、 $z_2$  的土壤温度参数  $\bar{T}_1$ 、 $\Delta T_1$ 、 $\varphi_1$  和  $\bar{T}_2$ 、 $\Delta T_2$ 、 $\varphi_2$ ,代入方程(4),反推出该厚度内土壤温度年尺度的阻尼深度  $d$  和热扩散率  $k$ ,本文中该方法称为由振幅法估算的  $d$  和  $k$ 。相应的,将两个不同深度的参数  $\bar{T}_z$ 、 $\Delta T_z$ 、 $\varphi_z$  代入方程(5),也可反推出该厚度内土壤温度年尺度的  $d$  和  $k$ ,本文中该方法称为由相位法估算的  $d$  和  $k$ 。

由于阔叶红松林的裸地和林内各有五层不同深度的土壤温度观测值,根据相邻两个不同深度的土壤温度资料可分别计算出该厚度土壤温度年尺度的阻尼深度  $d$  和热扩散率  $k$ 。

阔叶红松林叶面积指数的测算采用关德新等<sup>[19]</sup>的方法,根据每 5d 左右人工观测的叶面积指数(LAI),以及冠层上方( $Q_0$ )和下方的光合有效辐射( $Q$ )数据,由 Beer 定律  $Q/Q_0 = \exp(-K_c \cdot LAI)$  可反推出整个生长

季的 LAI, 式中  $K_c$  为林冠消光系数, 其值与植物种类和叶倾角等有关。

### 2 结果分析

#### 2.1 林地与裸地土壤温度的年变化特征

长白山阔叶红松林地区裸地的土壤温度具有明显的时空变化规律(图 1a)。在垂直方向上, 冬季(12 月—次年 2 月)随着深度的增加, 土壤温度逐渐升高, 3.2m 深度处的土壤温度比土壤表面温度月平均值可高达 22.3℃。夏季(6 月—8 月)随着深度的增加, 土壤温度逐渐降低, 3.2m 处深度处的土壤温度比土壤表面温度月平均值可低至 19.0℃。春秋两季为温度随深度变化的过渡季。在年周期上, 土壤表层温度的年变化最明显, 冬季温度较低, 最冷月为 1 月, 温度为 -15.1℃, 日平均温度最低为 -23.7℃(1 月 13 日)。随着春季的来临, 气温逐渐升高, 土壤温度也随之升高, 其表层最热月出现在 7 月, 温度为 24.5℃, 日平均温度最高为 33℃(7 月 26 日)。当进入秋季, 随着气温的降低, 土壤温度也逐渐降低, 土壤表层温度在年周期上呈单峰形。较深层土壤温度的年周期与表层相似, 但年最高温与年最低温的差异比表层小, 且年最高温和最低温出现的日期迟于表层。0.4、0.8、1.6m 和 3.2m 深度处的最高温度及其出现日期分别为 20.6℃(8 月 17 日)、18.6℃(8 月 20 日)、15.8℃(8 月 25 日)、11.4℃(9 月 22 日), 而最低温度及其出现日期分别为 -2.9℃(1 月 29 日)、-0.5℃(2 月 5 日)、1.1℃(4 月 6 日)、4℃(5 月 8 日)。这表明, 与土壤表层温度年变化特征相比, 随着深度的增加,

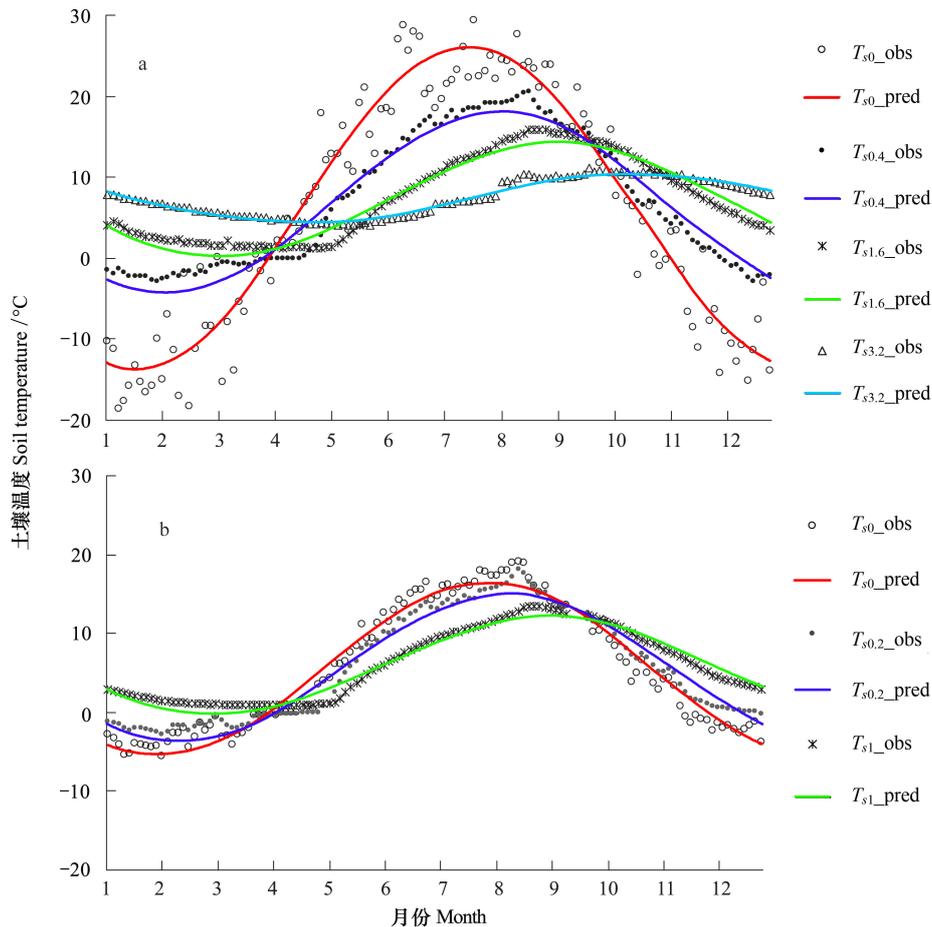


图 1 长白山阔叶红松林裸地(a)与林内(b)地下不同深度的土壤温度  $T_s$  年变化的观测值(点)与拟合曲线(线)

Fig.1 The observed (dot) and predicted (line) soil temperature in the different depths of bare land (a) and broadleaved Korean pine forest (b)

图例中后缀“\_obs”和“\_pred”分别表示观测值和拟合值, (a) 裸地土壤地表以下 0、0.4、1.6、3.2m 的温度, (b) 林内土壤地表以下 0、0.2、1m 的温度

土壤温度年最高值逐渐减小,而年最低值逐渐增大,且极大值和极小值出现的时间依次滞后。

阔叶红松林内土壤温度的时空变化规律与裸地相似但又有一定的差异。在年周期上,林地土壤温度也呈单峰形变化,在空间上,与表层土壤温度相比,随着土壤深度的增加,土壤温度在冬季逐渐升高,而在夏季逐渐降低,且极大值和极小值出现的时间依次滞后(图 1b)。林地 1m 处的土壤温度月平均值与表层温度差值可达 -6.6℃(6 月)至 6.4℃(1 月)。林地土壤表层温度年平均值低于裸地,相差约 0.8℃,且林地土壤表层温度的年较差也明显低于裸地,前者为 21.8℃,后者为 39.6℃,这表明地上植被和地表枯枝落叶层对土壤温度的影响较大。

2.2 林地与裸地土壤温度平均值、振幅与相位的垂直廓线

采用方程(3)可求出裸地和林地相应深度土壤温度年周期的振幅  $\Delta T_z$ 、相位  $\varphi_z$  和平均值  $\bar{T}_z$ 。结果表明,裸地和林地土壤温度的振幅、相位和平均值具有相似的垂直变化趋势,但其数值大小具有较明显的差异(图 2 和表 1)。随着土壤深度的增加,林地和裸地土壤温度年周期的振幅  $\Delta T_z$  皆逐渐减小,3.2m 深度的振幅降至土壤表层温度振幅的 15.9%左右。除表层土壤外,林地与裸地较深层土壤温度振幅降低的速率较为接近,约为 4.1—4.4℃/m,而在相同深度处,裸地土壤温度振幅比林地振幅约高 2.6—2.9℃。两地土壤温度年周期的相位  $\varphi_z$  均随着土壤深度的增加而逐渐增大,裸地由表层的 0.6 $\pi$  相位增加至 3.2m 深度处的 1.1 $\pi$  相位,相当于滞后了约 91d。裸地与林地的相位随深度而增加的速率较为接近,约为 0.12—0.15 rad/m,相当于深度每增加 1 m,极大值和极小值出现的时间滞后约 7—9d。而在地表以下相同深度处,裸地土壤温度年周期的相位比林

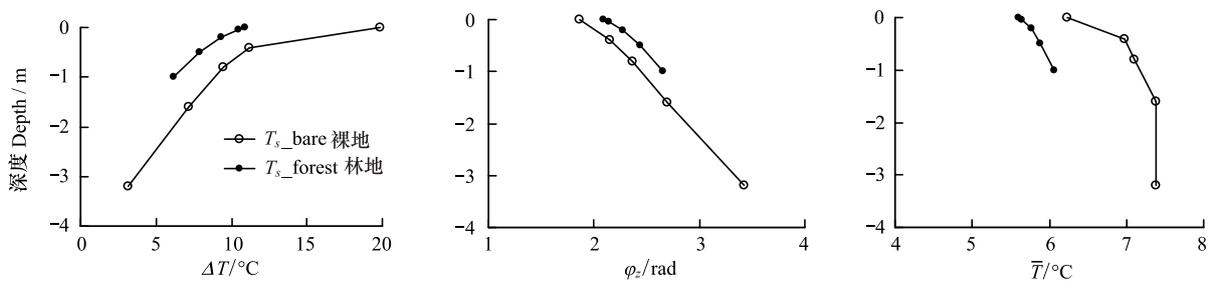


图 2 长白山阔叶红松林裸地与林内地下不同深度的土壤温度  $T_s$  年周期的振幅  $\Delta T$ 、相位  $\varphi$  和平均值  $\bar{T}$

Fig.2 The annual temperature amplitude  $\Delta T$ , phase  $\varphi_z$  and average value  $\bar{T}$  of the bare land ( $T_{s\_bare}$ ) and broadleaved Korean pine forest ( $T_{s\_forest}$ )

纵坐标“0”表示地表处,负值表示为地下,图例中“Ts\_bare”和“Ts\_forest”分别表示裸地和林地

表 1 长白山阔叶红松林裸地与林内地下不同深  $z$  的土壤温度年周期的振幅  $\Delta T_z$ 、相位  $\varphi_z$ 、平均值  $\bar{T}_z$  和决定系数  $R^2$ , 拟合公式为方程(3)

Table 1 The annual temperature amplitude  $\Delta T_z$ , phase  $\varphi_z$ , average value  $\bar{T}_z$  and determination coefficients  $R^2$  in different depths  $z$  (m) of the bare land and broadleaved Korean pine forest, estimated with equation (3)

地表条件 Surface condition	深度 Depth $z$ /m	$\Delta T_z$ /°C	$\varphi_z$ /rad	$\bar{T}_z$ /°C	$R^2$
裸地 Bare land	0	19.85±0.27	1.87±0.01	6.23±0.19	0.94
	0.4	11.2±0.12	2.15±0.01	6.97±0.08	0.96
	0.8	9.44±0.11	2.36±0.01	7.1±0.08	0.95
	1.6	7.15±0.07	2.69±0.01	7.39±0.05	0.96
	3.2	3.15±0.03	3.43±0.01	7.39±0.02	0.96
林内 Forest land	0	10.91±0.11	2.09±0.01	5.59±0.08	0.96
	0.05	10.47±0.11	2.14±0.01	5.6±0.08	0.96
	0.2	9.32±0.1	2.27±0.01	5.77±0.07	0.96
	0.5	7.88±0.08	2.44±0.01	5.88±0.06	0.96
	1	6.17±0.06	2.65±0.01	6.06±0.04	0.97

地相位约大 0.2—0.24 rad, 这表明林地土壤温度极值出现的时间比裸地滞后约 11—14d。土壤温度年平均值  $\bar{T}_z$  在林地与裸地均表现出随深度而逐渐升高的趋势, 但随着深度的增加,  $\bar{T}_z$  增加的速率逐渐减小, 1.6m 与 3.2m 深度处的土壤温度年平均值已较为接近。林地与裸地在 0.5—1.6m 深度的土壤温度年平均值增加的速率较为接近, 约为 0.3—0.4°C/m, 而在相同深度处, 裸地土壤温度振幅比林地振幅约高 1.1°C。

### 2.3 林地与裸地土壤温度的阻尼深度与热扩散率特征

根据方程(3)可得出相应的振幅  $\Delta T_z$  和相位  $\varphi_z$ , 根据振幅和相位与阻尼深度  $d$  和热扩散率  $k$  之间的关系, 可分别由方程(4)(即振幅法)和方程(5)(即相位法)反推出  $d$  和  $k$ 。结果表明, 这两种方法计算出的阻尼深度和热扩散率在林地和裸地都表现出较明显的垂直变化特征(表 2)。从地表至 1.6m 深度的土壤层中, 阻尼深度和热扩散率随着深度的增加而逐渐增大, 而 1.6—3.2m 的土壤层内, 阻尼深度和热扩散率则略有降低的趋势。在裸地, 由振幅法得出的热扩散率从 0—0.4m 土壤层的  $0.49 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  逐渐升高至 0.8—1.6m 土壤层的  $8.25 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , 而由相位法得出的热扩散率由 0—0.4m 土壤层的  $2.06 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  逐渐升高至 0.8—1.6m 土壤层的  $5.82 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。在阔叶红松林内, 由振幅法和相位法得出的热扩散率较为接近, 从表层土壤的  $1.04 \times 10^{-7} \text{—} 1.46 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  逐渐升高至 1m 处的  $4.18 \times 10^{-7} \text{—} 5.64 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。由相位法和振幅法计算出的  $d$  和  $k$  没有显著差异, 且在相同深度处, 林地和裸地的  $d$  和  $k$  也无明显的系统性差异性。

表 2 长白山阔叶红松林裸地与林内地下不同深度的土壤温度在年尺度上的阻尼深度  $d$  和热扩散率  $k$ ,  $d$  和  $k$  分别由振幅法和相位法计算得出  
Table 2 The damping depth  $d$  and thermal diffusivity  $k$  at different depths  $z$  of the bare land and broadleaved Korean pine forest, estimated with amplitude- and phase-equation

地表条件 Surface condition	深度 Depth $z/\text{m}$	由振幅法计算 Estimated with amplitude-equation		由相位法计算 Estimated with phase-equation	
		$d/\text{m}$	$k/(\text{m}^2/\text{s})$	$d/\text{m}$	$k/(\text{m}^2/\text{s})$
裸地 Bare land	0—0.4	0.70	$0.49 \times 10^{-7}$	1.44	$2.06 \times 10^{-7}$
	0.4—0.8	2.34	$5.47 \times 10^{-7}$	1.83	$3.32 \times 10^{-7}$
	0.8—1.6	2.87	$8.25 \times 10^{-7}$	2.42	$5.82 \times 10^{-7}$
	1.6—3.2	1.95	$3.79 \times 10^{-7}$	2.18	$4.75 \times 10^{-7}$
林内 Forest land	0—0.05	1.21	$1.46 \times 10^{-7}$	1.02	$1.04 \times 10^{-7}$
	0.05—0.2	1.29	$1.66 \times 10^{-7}$	1.16	$1.35 \times 10^{-7}$
	0.2—0.5	1.78	$3.17 \times 10^{-7}$	1.74	$3.03 \times 10^{-7}$
	0.5—1	2.04	$4.18 \times 10^{-7}$	2.38	$5.64 \times 10^{-7}$

## 3 讨论

### 3.1 植被覆盖对土壤温度的影响

由于植被对太阳辐射的反射和吸收作用、以及植被的蒸腾作用等, 植被覆盖对局地气温和地表辐射有较大的影响。与裸地相比, 林地提高了夜间气温, 降低了白昼气温, 使气温日振幅变小<sup>[15]</sup>, 主要原因有两方面, 一是太阳辐射经过林冠的反射与吸收, 到达地表时辐射量已大幅降低, 在昼间林内辐射差额的正值有减小的效应, 而在夜间林内辐射差额的负值亦有减小的效应, 因而气温日振幅减小; 二是林冠降低风速和湍流传输, 阻隔水平方向和垂直方向的热量与水汽交换, 同时反射地面长波辐射, 使得林内温度升降幅度趋缓, 导致林地与裸地热量状况差异较大。土壤内部温度变化的驱动力主要来自于土壤表层接受到的辐射和热量。对于特定的植物种类, 地表能接受到的太阳辐射主要受叶面积指数 LAI 的影响, 而叶面积指数同时也反映了其蒸腾能力的大小, 因而叶面积指数对土壤温度的影响较大。裸地与林地不同深度处(0.4、0.5、0.8m 和 1m)土壤温度的差异(裸地土壤温度减去林地土壤温度)都具有明显的季节变化规律(图 3)。在冬季(11 月至翌年 2 月), 裸地土壤温度比林地土壤温度约低 0.8—2.8°C。随着春季的到来, 植被开始展叶, 叶面积指数从 5 月份开始逐渐增加(图 4), 植被对土壤表面接受到的辐射和热量的影响越来越大, 林地土壤温度的日平均值越来越

越低于裸地,至7月份差值达到最大,各深度处林地土壤温度月平均值比裸地低约4.5—5℃。随着秋季枝叶枯黄凋落,叶面积指数逐渐减小,植被对土壤表面辐射和热量的影响也降低,林地和裸地土壤温度的差值也逐渐减小,在10月份左右该差值由正值变为负值,表明到了冬季,林地土壤温度高于裸地。

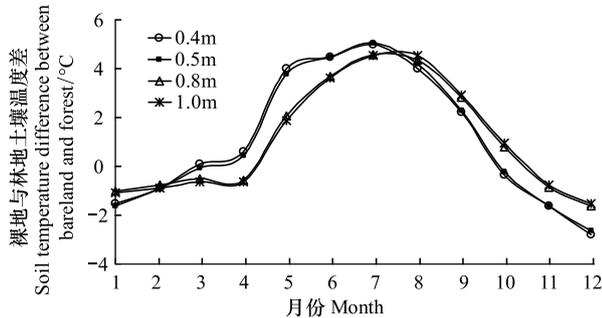


图3 裸地与林地在0.4、0.5、0.8m和1m深度处土壤温度的差值,纵坐标为裸地土壤温度减去林地土壤温度

Fig.3 Soil temperature difference between bare land and forest at the depth of 0.4, 0.5, 0.8m and 1m. The y-axis value indicated soil temperature of the bare land minus that of the forest

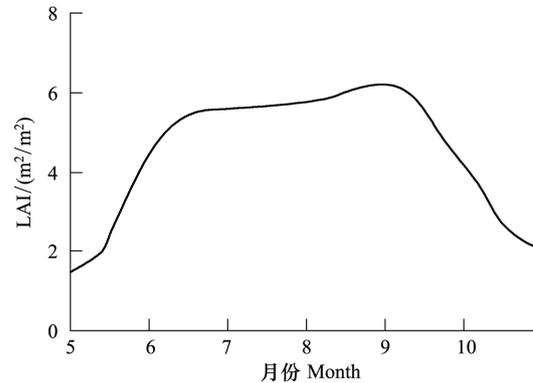


图4 阔叶红松林叶面积指数 LAI 的季节变化

Fig.4 The seasonal cycle of leaf area index (LAI) in broadleaved Korean pine forest

由于裸地与林地对太阳辐射的反射率不同,土壤温度也有一定差异。植被覆盖对不同季节土壤温度的影响机制,已被广泛应用于农业生产。冬季,积雪的土面反射率较大,达75%—95%,植被冠层的反射率则较小,约为5%—25%,用草覆盖地面可减小反射率,有利于提高土壤温度。如,在我国北方寒冷地区,通过地面覆盖,提高春季土壤温度,活化土壤微生物和酶的活性,提高土壤质量,延长作物的生育期<sup>[5]</sup>。

### 3.2 土壤含水量对热扩散率垂直梯度的影响

土壤是由3种物质(固体、液体、气体)组成的介质,热量的传递就通过固体微粒、水和空气进行,土壤导热性能的高低取决于各种微粒相互接触的形态、性质以及土壤含水量的多少<sup>[20]</sup>。对于特定的研究地点,土壤容重和矿物组成变化较小,因而土壤热扩散率主要受到土壤含水(含冰)量和温度的影响。由于冰与水的导热率有较大差异,因而土壤在冻结和融化状态下的热扩散率主导因子不同。在融化状态下,土壤热扩散率主要与土壤含水量有关。在冻结状态下,土壤中总含水量变化不大,土壤热扩散率主要与温度和固液态水的比例有关<sup>[21]</sup>。因而,本研究选取5—10月的数据来讨论土壤含水量对热扩散率垂直梯度的影响(图5),该期间内土壤中无冻结现象,处于融化状态。土壤的热扩散率 $k$ 随着深度的增加而呈逐渐升高,利用SPSS软件进行 $T$ 检验,发现热扩散率随深度而升高的趋势已达到显著性水平(Sig.<0.05),土壤含水量随深度而增加的趋势也达到显著性水平(Sig.<0.05)。在土壤的三相介质中,固相含量相对变化较小,而水的热容量( $4.19 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ )与空气的热容量( $0.0012 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ )有较大差异,水的导热率( $0.58 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )约为空气导热率( $0.026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )的22倍<sup>[22]</sup>,因而土壤热扩散率受其含水量的影响较大,Gao<sup>[4]</sup>的研究表明土壤热扩散率随着土壤含水量的升高而增加。这与本研究中土壤热扩散率与土壤含水量呈正相关关系的结果相似。因而土壤物理学的研究中越来越重视土壤水分运移对热量传递的影响,如Shao等<sup>[23]</sup>在分析土壤热扩散方程时同时考虑了土壤中的热传导和热对流,后者即为由于土壤水分的垂直运动而对土壤温度产生的贡献。

## 4 结论

(1) 植被覆盖对土壤温度的年周期具有较大的影响,长白山阔叶红松林地区与裸地的土壤温度年变化都与正弦曲线相似,表层温度的极大值和极小值分别出现在7月和1月,随着深度的增加,极值出现的时间依次滞后。但林地土壤温度的年平均值低于裸地,表层相差约0.8℃,0.4—1m的土壤层相差约1.1℃;同时,林地土壤温度年较差也明显小于裸地。

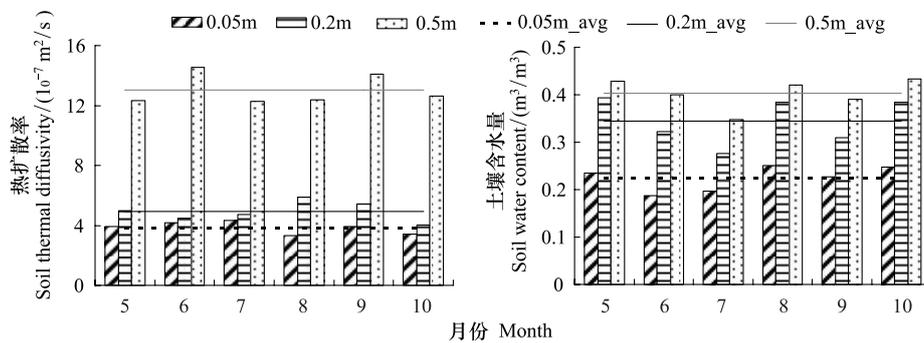


图5 阔叶红松林内地表以下0.05、0.2m和0.5m深度处土壤热扩散率和土壤含水量5—10月的变化

Fig.5 The soil thermal diffusivity and soil volumetric water content at the depths of 0.05m, 0.2m and 0.5m in broadleaved Korean pine forest during May to October

图中的线分别为三个深度5—10月的总体平均值

(2) 林地与裸地土壤温度年周期均有明显的垂直变化特征,同时也受到植被状况的影响。随着深度的增加,土壤温度年周期的振幅逐渐减小、相位逐渐增大、平均值逐渐升高。而在地表以下相同深度处,林地土壤振幅比裸地低2.6—2.9℃,相位比裸地小0.2—0.24 rad,意味着极值出现的时间滞后约11—14d。

(3) 根据振幅法和相位法推算的土壤温度的阻尼深度和热扩散率较为接近,从地表至1.6m深度的土壤层中,阻尼深度和热扩散率随着深度的增加而逐渐增大,而1.6—3.2m的土壤层内,阻尼深度和热扩散率则略有降低的趋势。植被覆盖对阻尼深度与热扩散率无显著影响。

(4) 表征植被状况指标之一的叶面积指数对林地与裸地土壤温度差异具有较为显著的影响,相同深度处林地与裸地土壤温度的差异随着叶面积指数的升高(降低)而增加(减小)。土壤热扩散率随着深度的增加而增加,可能与不同深度处土壤含水量不同有关。

**致谢:**中国科学院沈阳应用生态研究所关德新研究员、南京信息工程大学高志球研究员、澳大利亚联邦科学与工业研究组织王应平老师和美国农业部林业局森林变化研究中心刘永强老师,对本文给予帮助,特此致谢。

#### 参考文献 (References):

- [1] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
- [2] Bateni S M, Entekhabi D. Relative efficiency of land surface energy balance components. *Water Resources Research*, 2012, 48(4), W04510, doi: 10.1029/2011WR011357.
- [3] Bhumralkar C M. Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model. *Journal of Applied Meteorology*, 1975, 14(7): 1246-1258.
- [4] Gao Z Q. Determination of soil heat flux in a Tibetan short-grass prairie. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 114(1): 165-178.
- [5] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 162-166.
- [6] Hirota T, Pomeroy J W, Granger R J, Maule C P. An extension of the force-restore method to estimating soil temperature at depth and evaluation for frozen soils under snow. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D24): ACL 11-1-ACL 11-10, doi: 10.1029/2001JD001280.
- [7] Dickinson R E. The force-restore model for surface temperatures and its generalizations. *Journal of Climate*, 1988, 1(11): 1086-1097.
- [8] Sellers P J, Tucker C J, Collatz G J, Los S O, Justice C O, Dazlich D A, Randall D A. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 706-737.
- [9] Verseghy D L. CLASS—a Canadian land surface scheme for GCMs. I. Soil model. *International Journal of Climatology*, 1991, 11(2): 111-133.
- [10] Wang Y P, Leuning R. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy I: Model description and comparison with a multi-layered model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(1/2): 89-111.
- [11] Dai Y J, Zeng Q C. A Land Surface Model (IAP94) for Climate Studies Part I: Formulation and Validation in Off-line Experiments. *Advances in*

- Atmospheric Sciences, 1997, 14(4): 433-460.
- [12] Desborough C E, Pitman A J. The BASE land surface model. *Global and Planetary Change*, 1998, 19(1/4): 3-18.
- [13] 方精云. 我国森林植被带的生态气候学分析. *生态学报*, 1991, 11(4): 377-387.
- [14] 周广胜, 张新时. 中国气候-植被关系初探. *植物生态学报*, 1996, 20(2): 113-119.
- [15] 吴家兵, 关德新, 代力民, 金明淑, 徐浩. 长白山阔叶红松林夏季温度特征研究. *生态学杂志*, 2002, 21(5): 14-17.
- [16] 孙金伟, 吴家兵, 关德新, 王安志, 袁凤辉, 张新建. 森林与空旷地空气温湿度及土壤温度的长期对比研究. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2685-2691.
- [17] 王战, 徐振邦, 李昕. 长白山北坡主要森林类型及其群落结构特点(之一) // 中国科学院长白山森林生态系统定位站. *森林生态系统研究*. 北京: 林业出版社, 1980, 1: 25-42.
- [18] 程伯容, 许广山, 丁桂芳, 张玉华. 长白山北坡自然保护区主要土壤类型及其基本特性 // 中国科学院长白山森林生态系统定位站. *森林生态系统研究*. 北京: 林业出版社, 1981, 2: 196-206.
- [19] 关德新, 吴家兵, 王安志, 金昌杰, 施婷婷, 韩士杰. 长白山红松阔叶混交林林冠层叶面积指数模拟分析. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 499-503.
- [20] 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 1981: 30-30.
- [21] 李韧, 赵林, 丁永建, 焦克勤, 王银学, 乔永平, 杜二计, 刘广岳, 孙琳婵, 肖瑶. 青藏高原北部活动层土壤热力特性的研究. *地球物理学报*, 2010, 53(5): 1060-1072.
- [22] Oke T R. *Boundary Layer Climates*. 2nd ed. New York: Routledge, 1987: 42-48.
- [23] Shao M A, Horton R, Jaynes D B. Analytical solution for one-dimensional heat conduction-convection equation. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(1): 123-128.