北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

中国天然林和人工林冠层表面温度时空演变分析

牛莉 韩王亚 吴欣月 余振

Spatio-temporal patterns of canopy surface temperature in natural forests and planted forests in China

Niu Li, Han Wangya, Wu Xinyue, Yu Zhen

引用本文:
牛莉, 韩王亚, 吴欣月, 余振. 中国天然林和人工林冠层表面温度时空演变分析[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2):58–69. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250008
Niu Li, Han Wangya, Wu Xinyue, Yu Zhen. Spatio–temporal patterns of canopy surface temperature in natural forests and planted forests in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2):58–69. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250008

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250008

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

晋西黄土区典型人工林与天然林林下植被物种多样性差异及其影响因素
Differences and influencing factors of understory vegetation species diversity between typical plantations and natural forests in the loess area of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 103–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240228

林下植被和凋落物对我国寒温带天然林土壤CO_2通量的短期影响
Short–term effects of understory vegetation and litter on soil CO_2 flux of natural forests in cold temperate zone of China
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 55–65. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200249

黄河下游城市区域绿色空间时空演变的规律与机制
Law and mechanism of spatio–temporal evolution of urban greenspace in the lower reaches of the Yellow River
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 113–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220129

格氏栲天然林林窗对凋落物难降解物质分解的影响
Effects of forest gaps on decomposition of recalcitrant litter substances in *Castanopsis kawakamii* natural forests
北京林业大学学报, 2025, 47(7): 73–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240369

塞罕坝北曼甸林场森林生态功能等级评价
Grade evaluation of forest ecological function for Beimandian Forest Farm of Saihanba, Hebei Province of northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 89–98. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210373

基于无人机激光雷达的天然林林隙识别
Forest gap identification in natural forest based on UAV LiDAR
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 44–53. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210524

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250008

中国天然林和人工林冠层表面温度时空演变分析

牛　莉　　韩王亚　　吴欣月　　余　振
（南京信息工程大学生态与应用气象学院，江苏 南京 210044）

摘要:【目的】森林冠层表面温度是反映森林生态系统对气候变化响应的重要参数，分析中国天然林与人工林在相同气候背景下不同林种的冠层表面温度变化特征及差异，并探讨其在不同气候区的空间分布格局和时序变化趋势，以厘清中国天然林和人工林的冠层表面温度变化特征。**【方法】**基于 MODIS 地表温度数据集结合地面气象数据，采用随机取点的方式，分析相同气候背景下不同林种的天然林和人工林的冠层表面温度差异；以 1 ℃ 和 50 mm 为间隔，基于年均温和年降水量对全国 1 km 分辨率的栅格进行逐像元分组，分析不同气候背景的冠层表面温度。**【结果】**(1)整体上，人工林和天然林的多年平均日间冠层表面温度和日平均冠层表面温度随年份的变化趋势并不显著($P > 0.05$)，但夜间冠层表面温度均显著上升，同时昼夜冠层表面温度差显著下降($P < 0.05$)。(2)不同气候带内，不同林种人工林的日间冠层表面温度、日平均冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差普遍低于天然林。同一气候带内不同林种天然林与人工林冠层表面温度差之间存在差异，阔叶林的冠层表面温度差多大于针叶林，混交林的温度差表现多不显著。(3)在较湿热的区域，森林日间冠层表面温度有下降趋势；但在相对干燥的区域，则呈增加趋势。此外，森林夜间冠层表面温度均有增加趋势，且在较寒冷区域增温趋势更明显。这种格局也导致森林表面昼夜温差在大部分区域呈下降趋势。**【结论】**中国天然林和人工林区域的冠层表面温度变化有明显的区域分异特征，为提升森林与气候之间互馈关系的认知提供了重要参考，并为科学造林提供了理论依据。

关键词：林分起源；天然林；人工林；森林冠层表面温度；时空演变；气候区
中图分类号：S716.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)02−0058−12
引文格式：牛莉，韩王亚，吴欣月，等. 中国天然林和人工林冠层表面温度时空演变分析［J］. 北京林业大学学报，2026，48(2)：58−69. Niu Li, Han Wangya, Wu Xinyue, et al. Spatio-temporal patterns of canopy surface temperature in natural forests and planted forests in China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 58−69.

Spatio-temporal patterns of canopy surface temperature in natural forests and planted forests in China

Niu Li　Han Wangya　Wu Xinyue　Yu Zhen
(School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China)

Abstract:［**Objective**］Forest canopy surface temperature is an essential parameter reflecting the response of forest ecosystems to climate change. This study analyzes the variation characteristics and differences in canopy surface temperature among different forest types of natural and planted forests in China under comparable climatic conditions, and examines their spatial distribution patterns and temporal variation trends across different climatic zones, so as to clarify the variation characteristics of canopy surface temperature in China's natural and planted forests.［**Method**］Using the MODIS land surface temperature dataset and the ground meteorological data, we employ a random point sampling approach to investigate the canopy surface

收稿日期: 2025−01−09　**修回日期:** 2025−03−26
基金项目: 国家自然科学基金项目(32371663、32361143869)，江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BK20231515)。
第一作者: 牛莉。主要研究方向：森林生态学。Email: niustudy123@163.com　地址：210044 江苏省南京市浦口区宁六路 219 号南京信息工程大学生态与应用气象学院。
责任作者: 韩王亚，副教授。主要研究方向：生态系统退化与恢复。Email: wyhan@nuist.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

temperature variations between natural forests and planted forests of three different forest types under similar climatic conditions. Using intervals of 1 ℃ for temperature and 50 mm for precipitation, this study groups national 1 km-resolution grids pixel by pixel based on annual average temperature and annual precipitation, to analyze the canopy surface temperature of forests under different climatic backgrounds. [**Result**] (1) Overall, the multi-year average daytime and daily mean canopy surface temperatures of both plantations and natural forests exhibited no statistically significant interannual trends ($P > 0.05$). However, nighttime canopy surface temperatures showed significant increases, accompanied by a pronounced decline in diurnal canopy surface temperature range ($P < 0.05$). (2) Across climatic zones, daytime, daily mean canopy surface temperature, and diurnal temperature range of planted forests with different forest types were generally lower than those of natural forest. Within identical climatic zones, broadleaf forests displayed greater thermal divergence between natural forests and planted forests than coniferous counterparts, while mixed broadleaf and coniferous forests generally exhibited insignificant differences. (3) Daytime canopy surface temperature was decreasing during the studied period in relatively humid and warm regions, while an increasing trend was found regions with relatively drier climate. Nighttime canopy surface temperatures showed an increasing trend across all regions, with a more significant warming trend in cold areas. Such changes in daytime and nighttime canopy surface temperature have lead to an decreasing diurnal temperature range in most of the forest areas. [**Conclusion**] These findings highlight the significant regional differentiation in canopy surface temperature variation between natural and planted forests in China, which provides important reference for enhancing the understanding of the feedback relationship between forests and climate, and provides a theoretical basis for scientific afforestation.

Key words: stand origin; natural forests; planted forests; forest canopy surface temperature; spatio-temporal pattern; climatic zone

森林在改善生态环境和减缓气候变化方面发挥着重要作用[1]，森林覆盖变化通过改变地表反射率、蒸腾作用和地表粗糙度等一系列生物物理作用，调节陆地与大气之间的能量和水分交换[2]。森林冠层表面温度对于大气下边界层的陆－气能量和物质交换具有关键作用，驱动着森林生态系统生物地球化学循环速率[3]，因此可作为描述森林地表大气环境的交换、水循环以及生态过程研究的重要因子[4]。森林冠层表面温度已经被广泛应用于研究森林的生态服务功能[5]。

森林冠层表面温度是生物与非生物过程共同作用的结果[6]，对土壤–植物–大气连续体的水热交换产生强烈影响[7]。在单木尺度上，单棵树的冠层表面温度（即树冠温度）是净辐射、潜热通量和感热通量之间能量平衡的结果，这些过程受空气湿度、风速等环境条件影响，同时受树木本身外部特征和内部生理代谢活动共同作用的影响[8]。树冠温度升高会增加蒸腾速率，加速叶片水分流失，在较大尺度上，可能造成水分胁迫，尤其是在干旱条件下。由于不同树种的水力特性（如气孔调节）存在种间差异，共生树种的冠层温度具有异质性[9]。在气候变化的影响下，预计未来环境条件将更温暖[10]。在长期的气候变化背景下，树冠温度稳定性更强的树种可能在较温暖的环境中占据优势地位，从而导致森林群落结构的变化。

自 1980 年以来，中国为改善生态环境和应对气候变化，实施了退耕还林（草）、“三北”防护林和天然林保护等大规模造林工程[11]，使我国人工林面积跃居世界首位[12]。1990—2020 年间，我国天然林面积显著减少，人工林面积显著增加，且人工林增加的面积约为天然林减少面积的 2 倍[13]。由此可见，我国在过去几十年经历了剧烈的土地覆被变化。随着遥感技术的飞速发展，森林动态及冠层表面温度监测的研究得到了极大提升，这也使得大尺度上的冠层温度比较分析成为可能。因此，大量研究基于遥感卫星数据（如 MODIS、Landsat）评估分析了土地覆被变化对地表温度的影响。例如，Peng 等[14]使用 MOD11 数据产品，比较了中国人工林和邻近草地或农田的地表温度，发现大面积造林使日间温度下降，夜间温度增加。Alkama 等[15]基于 Landsat 数据，评估了造林/毁林的温度效应，发现森林损失加剧白天地表暖化现象。Zhang 等[16]的研究发现热带森林的增加和减少对地表温度的影响具有显著不对称性，森林减少的升温效应约为同期森林增加的降温效应的 5 倍。然而，当前研究主要集中在造林/毁林等剧烈土地覆被变化对局部温度的影响，对于相对稳定

森林覆盖区域的冠层表面温度长期变化趋势尚不清楚。此外，当前也缺乏不同水热条件下天然林与人工林冠层温度变化的对比评估。稳定覆盖森林的区域通常具有更高的生产力和碳储量[17]。考虑到冠层温度是驱动地气间水热交换的关键因子，其在气候变化情景下的改变可能引发更为剧烈的物质和能量传输变化，因此亟需深入研究。

林分起源是影响林分结构和森林功能特征的重要因素[18]。一般而言，天然林具有较高的生物多样性、复杂的群落结构、丰富的生境特征和较高的生态系统稳定性[19]。与天然林相比，我国人工林普遍存在林分结构单一[20]、自然更新困难[21]、人工抚育任务艰巨[22]以及造林地生态条件不佳[17]等特点。森林对气候变化的响应可能因不同起源而有所差异。人工林对气候变化中的干旱条件更敏感，相比天然林更易受干旱影响，生产力下降更显著[23]。天然林由于其复杂的生物多样性和群落结构，在气候变化下具有更高的生产力稳定性和水分利用效率[24]。进一步研究[25]揭示，天然林和人工林的生长季节长度和物候变化对气候变化的响应也存在差异，人工林的生长季节开始时间更早，结束时间更晚，且对温度的敏感性高于天然林。此外，森林稳定性不仅与其起源有关，也与其所处的空间位置（例如内部或边缘）紧密相关。靠近边缘的森林对气候变化更敏感，尤其是人工林的边缘地带对温度变化表现出极高的敏感性。相比之下，天然林的边缘效应虽然存在，由于其复杂的生态系统功能（如生物多样性和层次结构），物候响应的变化幅度较小[26]。因此，厘清不同水热条件下天然林和人工林的冠层表面温度变化及其空间分异特征，有助于深化理解不同起源的森林与气候之间的互馈关系，还可为造林工程的生态效益优化提供科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究以我国人工林和天然林两大森林体系为研究对象，探究稳定森林区域冠层表面温度的时空变化。根据第九次全国森林资源清查报告，我国天然林面积为 1.4×10^6 km^2，人工林面积为 8.0×10^5 km^2，且空间分布不均匀（图 1）。天然林主要分布在东北、华南、西南地区，人工林主要集中在华东和华北地区。

1.2 数据来源

1.2.1 森林分布数据

中国人工林分布数据来源于国家林草局的人工林矢量分布图，该图描述了我国 2000 年左右的人工林空间分布状况。天然林分布数据则提取自中国科学院植物研究所编制的 1∶100 万植被图（https://www.

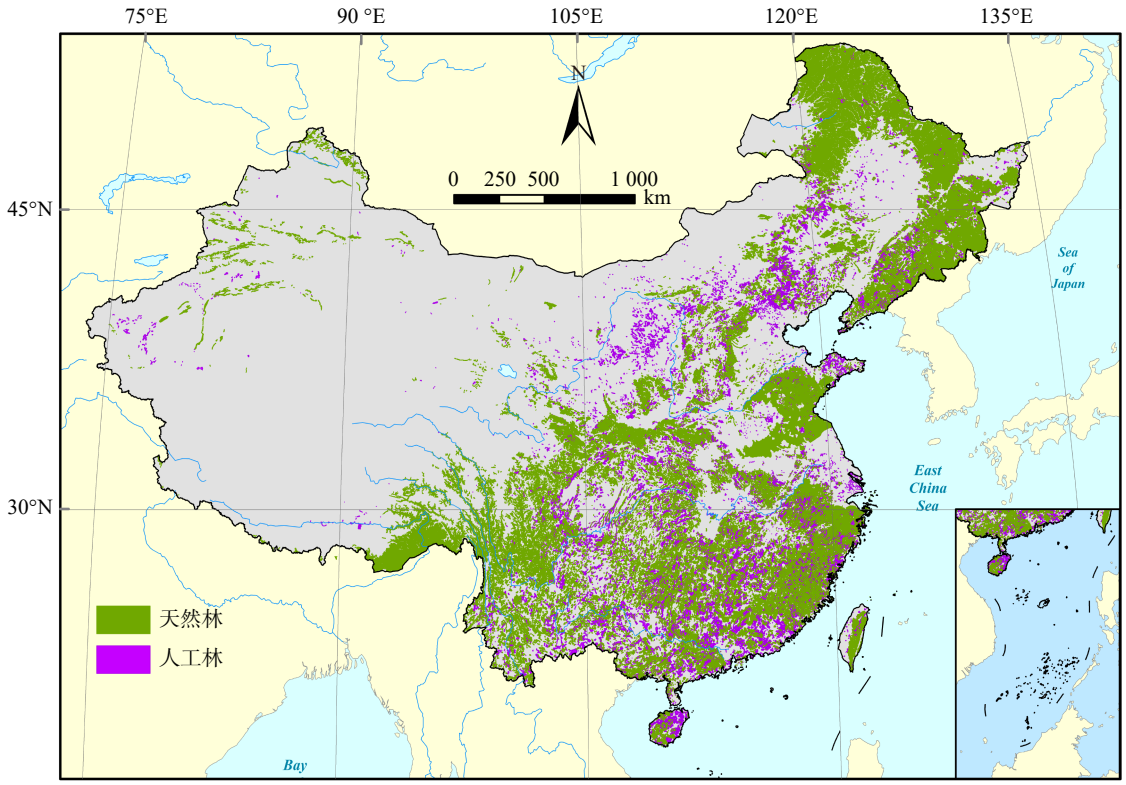


图 1 中国天然林和人工林空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of natural forests and planted forests in China

resdc.cn/data.aspx?DATAID=122）。自 1980 年代起，中国实施了一系列森林保护工程，有效遏制了大范围的人为干扰（例如乱砍滥伐），森林分布因此处于不断扩张之中[27]。鉴于此，人工林矢量图和天然林植被图所反映的森林分布较为稳定，受到的干扰较少，可以作为稳定的研究样本。本研究聚焦于分析稳定森林覆盖区域的冠层表面温度变化，因此采用 10 km 为缓冲距离，进一步排除可能受到干扰的森林边缘区域，仅保留森林内部更为稳定的区域进行数据提取分析。

1.2.2　2003—2020 年森林冠层表面温度数据

森林冠层表面温度提取自全球逐日 1 km 分辨率的表面温度遥感产品数据集（https://doi.org/10.25380/iastate.c.5078492）[28]。该遥感数据集基于标准的 MODIS 地表温度（land surface temperature，LST）产品，采用平滑样条函数插补的方法生成，克服了由于云噪声等因素导致的数据缺失和偏差。在数据插补过程中，该数据集拟合了每个像素中基于年份（自变量）的观测结果的时间趋势（总体均值），然后将观测值和每天的总体平均值进行时空插值，最后通过添加总体平均值和插值残差来估计 LST 的缺失值，有效地填充了原始数据中的缺失值。验证结果表明，改进后的数据产品在像元边界附近没有明显的块效应（block effect），克服了其他 LST 数据集中可能存在的缺陷。该产品在全球尺度上进行了不同缺失率的交叉验证，结果表明其具有较高的精度。

1.2.3　气象数据

为探究不同水热条件下的森林冠层表面温度差异，本研究使用了地面气象观测数据产品（http://loess.geodata.cn）。气象数据集为 1 km 空间分辨率的逐月降水量和气温数据[29]。该气候数据集基于 Climatic Research Unit（https://crudata.uea.ac.uk）发布的全球气候数据，原始空间分辨率为 0.5°。通过 Delta 空间降尺度方案以及双线性插值方法，并参考 World Clim（https://worldclim.org）发布的全球高分辨率气候数据，降尺度生成中国地区气候数据。基于中国 496 个独立于 CRU 数据集的气象站的观测数据进行验证[29]，验证结果表明降尺度后的气象数据集具有较高的准确性。

1.3　数据处理方法

（1）森林冠层表面温度和气象数据提取。表面温度遥感数据产品和气象栅格数据集都统一重采样至 1 km 分辨率。其中，基于森林分布提取了森林表面的逐日昼夜温度，并基于该数据计算了森林表面日均温度、年均温度和昼夜温差等。本研究进一步探索了在不同气候背景和相同气候背景条件下，人工林和天然林的冠层表面温度差别。

（2）相同气候背景下的天然林和人工林的冠层表面温度对比。为了比较相同气候背景条件下天然林与人工林的冠层表面温度差异，本研究主要分析了人工林集中分布的 6 个气候区[30]：热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、暖温带和温带。在这些气候区中，分别对不同林种（阔叶林、针叶林、针阔叶混交林）的天然林与人工林的冠层表面温度进行对比分析。在每个气候区内，随机生成 2.5 km 半径的圆形区域作为样本（图 2），且每个随机采样区域内同时包含不低于 10% 的天然林和人工林覆盖，以确保对比的有效性。对每个随机采样区域内不同林种的天然林和人工林的冠层表面温度进行统计分析。在检验数据是否符合正态分布后，采用配对样本 t 检验或 Wilcoxon 符号秩检验进行显著性分析。

（3）不同气候背景的森林冠层表面温度分析。不同地区森林所在的气候背景条件各不相同，为了排除不同气候背景的影响，本研究进一步采用基于多年平均气温和多年平均降水量的分组方法，对所提取的森林数据进行处理，以比较不同起源森林的冠层表面温度变化差异。具体而言，首先以 1 ℃ 和 50 mm 为间隔，基于年均温和年降水量对全国 1 km 分辨率的栅格进行逐像元分组。该方法将具有相同温度和降水背景的森林栅格归为一组进行统计分析。其次，对天然林和人工林的冠层表面温度随水热条件变化的趋势做秩和检验，以确定两者在不同水热条件下的冠层表面温度分布是否存在显著差异。在比较同一组（即相同水热条件背景）天然林和人工林的年均冠层表面温度变化差异时，使用非参数 Kruskal-Wallis（K-W）检验。

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^{k} \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1) \tag{1}$$

式中：H 为 K-W 统计量，k 为气候背景分组的组数，N 为天然林和人工林的栅格总数，R_j 为气候背景分组第 j 组的秩和，n_j 为气候背景分组第 j 组的栅格数。

矢量数据的缓冲分析在 ArcMap10.8 完成，栅格数据的提取采用了 ENVI Classic5.6 + IDL 软件，显著性检验在 R（v4.3.1）中完成。

2　结果与分析

2.1　天然林和人工林冠层表面温度的年际变化特征

为了比对不同气候区人工林和天然林的冠层表面温度差异，本研究首先根据缓冲分析后得到的核心区森林空间坐标信息，提取两种不同起源森林的冠层表面温度。将不同森林类型的冠层表面温度减

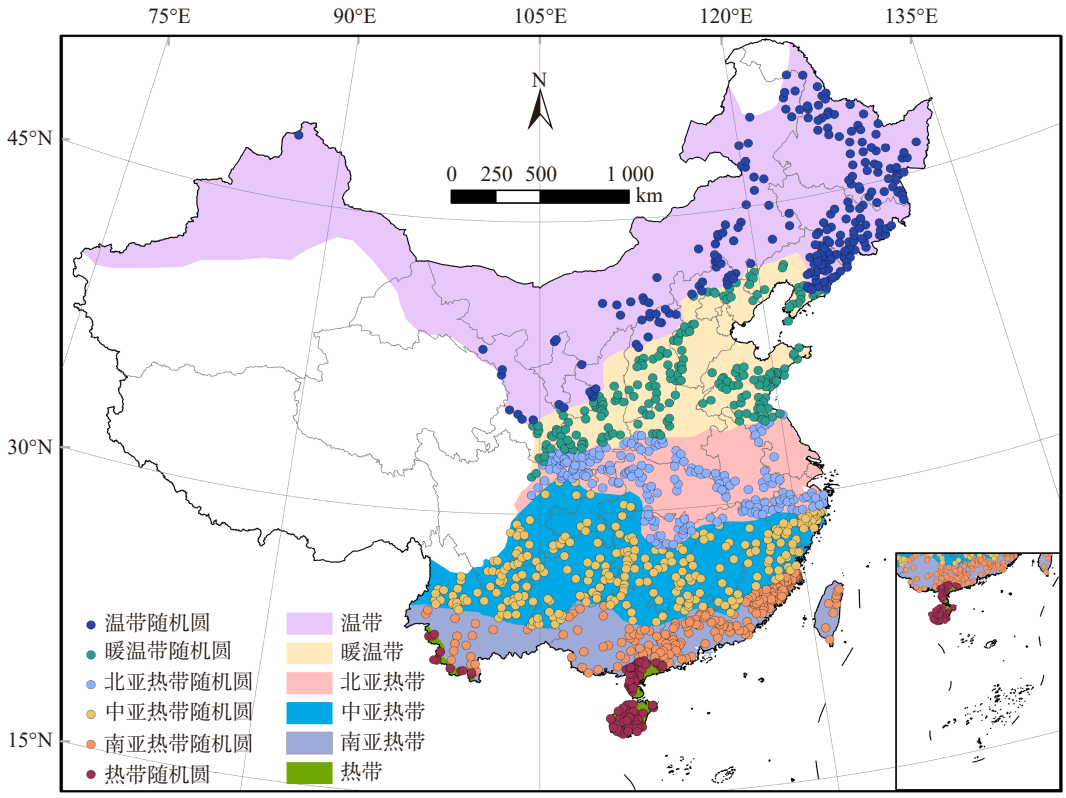


图 2 气候区和随机采样点空间分布

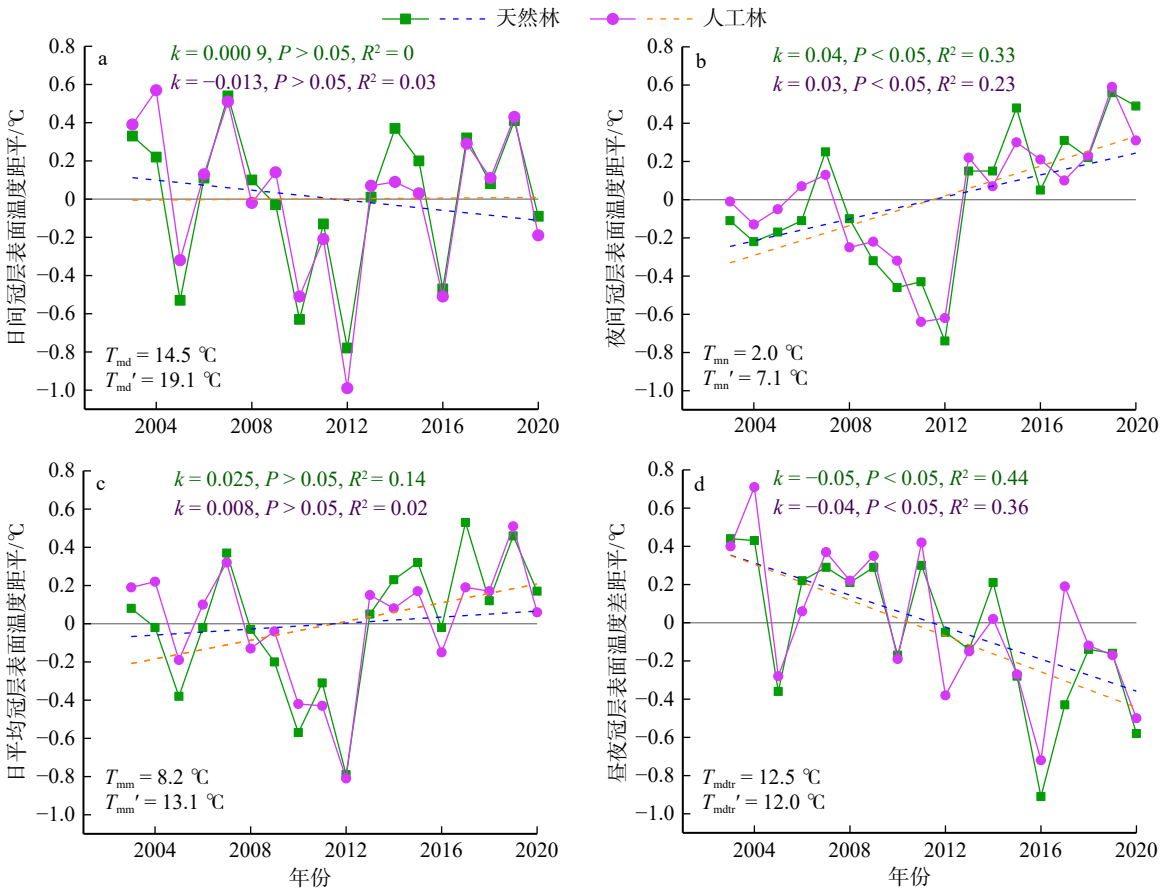
Fig. 2 Spatial distribution of climate regions and the randomly sampled grids

去其 2003—2020 年多年平均值，得到距平值，从而有效消除气候背景带来的干扰，突出森林冠层表面温度的变化趋势，并生成温度距平图(图 3)。结果表明，天然林的多年平均日间冠层表面温度为(14.5 ± 0.4)℃，人工林为(19.1 ± 0.4)℃。同时，人工林日间冠层表面温度呈逐年下降趋势，天然林则呈上升趋势，但其变化趋势都不显著($P > 0.05$，图 3a)。天然林的多年平均夜间冠层表面温度为(2.0 ± 0.4)℃，人工林为(7.1 ± 0.3)℃。人工林的夜间冠层表面温度上升趋势小于 0.1 ℃，但是变化均显著($P < 0.05$，图 3b)。夜间冠层表面温度的显著上升和日间冠层表面温度的下降使得日平均冠层表面温度呈现出微弱的上升趋势，但均不显著($P > 0.05$，图 3c)。此外，天然林和人工林的昼夜冠层表面温度差变化均呈显著下降趋势，主要是由夜间冠层表面温度上升所主导。人工林的多年平均昼夜冠层表面温度差为(12.0 ± 0.4)℃，天然林的多年平均昼夜冠层表面温度差为(12.5 ± 0.3)℃，二者变化趋势均显著下降，但每年下降趋势小于 0.1 ℃($P < 0.05$，图 3d)。

2.2 相同气候条件下天然林和人工林冠层表面温度变化差异

基于 1 050 个随机采样区域内样本的对比研究表明，不同林种的天然林和人工林的冠层表面温度存在差异。在 6 个气候带中，不同林种的人工林的日间冠层表面温度、日平均冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差普遍低于天然林(图 4)。同一气候带内，不同林种之间存在差异，阔叶林的天然林与人工林冠层表面温度差多大于针叶林，而混交林的冠层表面温度差异多不显著。

热带地区多为阔叶林，人工林的日间冠层表面温度、日平均冠层温度和昼夜冠层表面温度差均显著低于天然林，差值均为 0.4 ℃。但夜间冠层表面温度差异小于 0.1 ℃，且不显著(图 4b)。南亚热带以阔叶林和针叶林为主，人工林的日间冠层表面温度、日平均冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差均显著低于天然林。对于阔叶林，冠层表面温度差分别为 0.6、0.3 和 0.6 ℃，温差幅度均大于针叶林(0.4、0.2 和 0.4 ℃)。而对于夜间冠层表面温度，阔叶林和针叶林的温差幅度均小于 0.1 ℃，且不显著。在中亚热带地区，阔叶林、针叶林、针阔混交林的人工林在日间冠层表面温度、日平均冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差方面普遍低于天然林。此外，这些林种夜间冠层表面温度差均小于 0.1 ℃，且不显著。但不同林种之间略有差异，天然针叶林与人工针叶林的日间冠层表面温度、日平均冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差的温差幅度均最大，分别为 0.7、0.4 和 0.7 ℃，混交林次之，其相应指标的温差分别为 0.5、0.3 和 0.4 ℃，但其天然林与人工林昼夜冠层表



T_{md}、T_{md}'分别为天然林和人工林多年平均日间冠层表面温度，T_{mn}、T_{mn}'分别为天然林和人工林多年平均夜间冠层表面温度，T_{mm}、T_{mm}'分别为天然林和人工林多年平均日平均冠层表面温度，T_{mdtr}、T_{mdtr}'分别为天然林和人工林多年平均昼夜冠层表面温度；k. 斜率。

图 3　2003—2020 年中国森林区域冠层表面温度的年际变化

Fig. 3　Temporal variation of canopy surface temperature in China forests during 2003−2020

面温度差的差异并不显著，阔叶林的温差幅度最小，分别为 0.4、0.2 和 0.4 ℃。

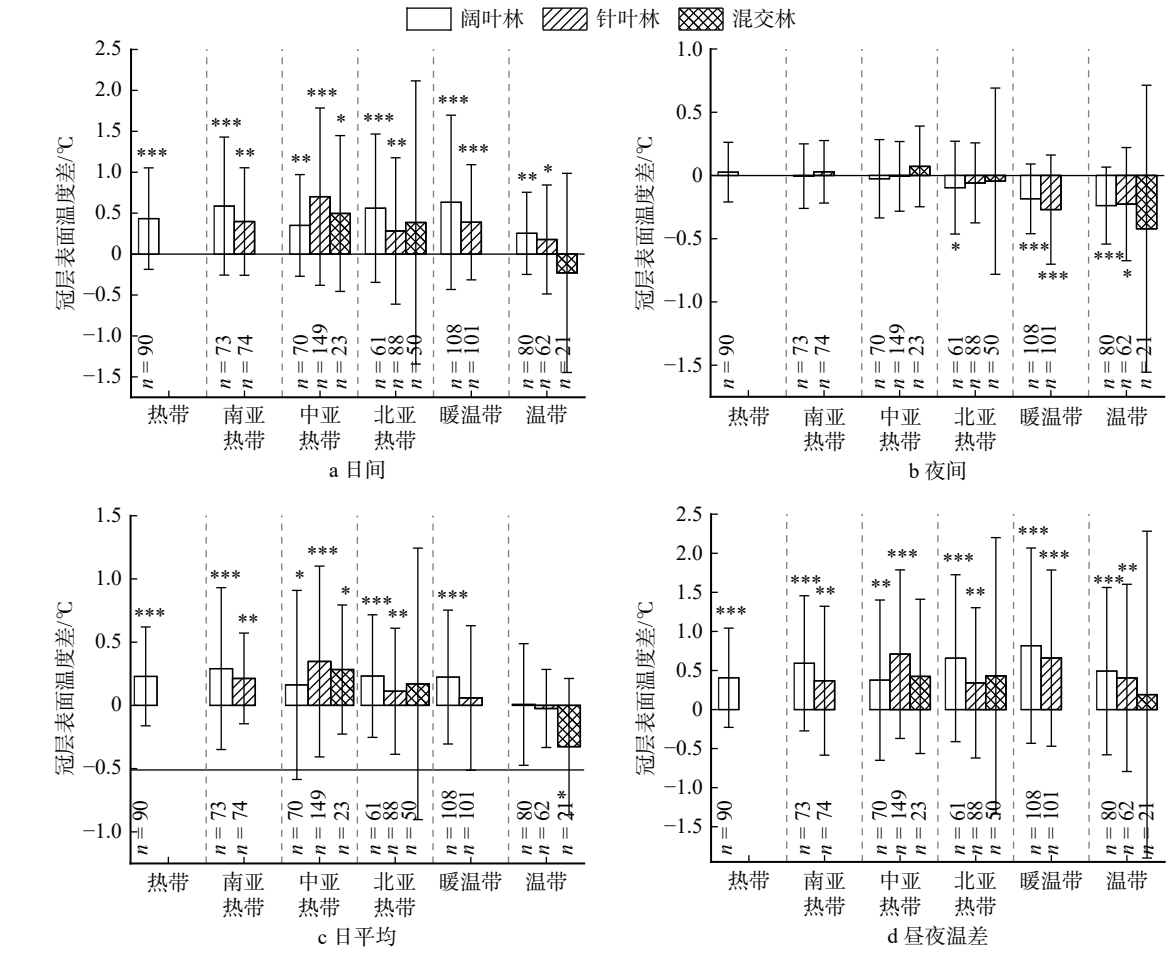
北亚热带人工林的日间冠层表面温度、日平均冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差普遍低于天然林。但与中亚热带不同，北亚热带阔叶林的温差幅度最大(0.6、0.2 和 0.7 ℃)，针叶林的温差幅度最小(0.3、0.1 和 0.3 ℃)，混交林的温差均不显著。在夜间冠层表面温度上，人工阔叶林的夜间冠层表面温度显著高于天然阔叶林($P < 0.05$)，对于针叶林和混交林，人工林与天然林之间的温差幅度均小于 0.1 ℃，且不显著。在暖温带地区，除针叶林的日平均冠层表面温度外，人工林的日间冠层表面温度、日平均冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差均显著低于天然林。阔叶林的温差幅度(0.7、0.2 和 0.8 ℃)大于针叶林(0.4 ℃、< 0.1 ℃、0.7 ℃)。但人工林的夜间冠层表面温度显著高于天然林，且针叶林的温差幅度(0.3 ℃)大于阔叶林(0.2 ℃)。在温带地区，阔叶林和针叶林的天然林与人工林在日间冠层表面温度、夜间冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差的表现上均显著，且阔叶林的差异幅度(0.3、0.2 和 0.5 ℃)大于针叶林(0.2、0.2 和 0.4 ℃)，且阔叶林和针叶林的日平均冠层表面温度差均小于 0.1 ℃，差异不显著。而混交林则仅在日平均冠层表面温度差的表现上显著，且人工林的温度高于天然林，差异为 0.3 ℃。

2.3　不同水热条件下天然林和人工林冠层表面温度变化格局

本研究进一步比较了天然林和人工林的冠层表面温度随水热条件变化的格局。以年均温为横坐标，年降水量为纵坐标绘图，每个栅格则代表了一个以 1 ℃ 和 50 mm 为间隔所划分的、水热条件(背景环境条件)相近的小气候区。基于每一个小气候区栅格所限制的水热条件范围，提取相应区域天然林或人工林像元的冠层表面温度，并分析其 2003—2020 年多年平均变化趋势。

2.3.1　不同水热条件下天然林和人工林的昼夜冠层表面温度的变化格局

本研究发现，在年均温度超过 10 ℃ 的地区，天然林和人工林的日间冠层表面温度随着降水量的不同呈现分化现象(图 5)。其中，在年均降水量超过 1 000 mm 的地区，日间冠层表面温度表现出明显的降温特征，且降温趋势随着降水量和温度的增加而增强。而在年均降水量低于 1 000 mm 的地区，日间



*表示 $P < 0.05$，**表示 $P < 0.01$，***表示 $P < 0.001$。

图 4 各气候区天然林与人工林的冠层表面温度差

Fig. 4 Differences of canopy surface temperature between natural and planted forests across different climate regions

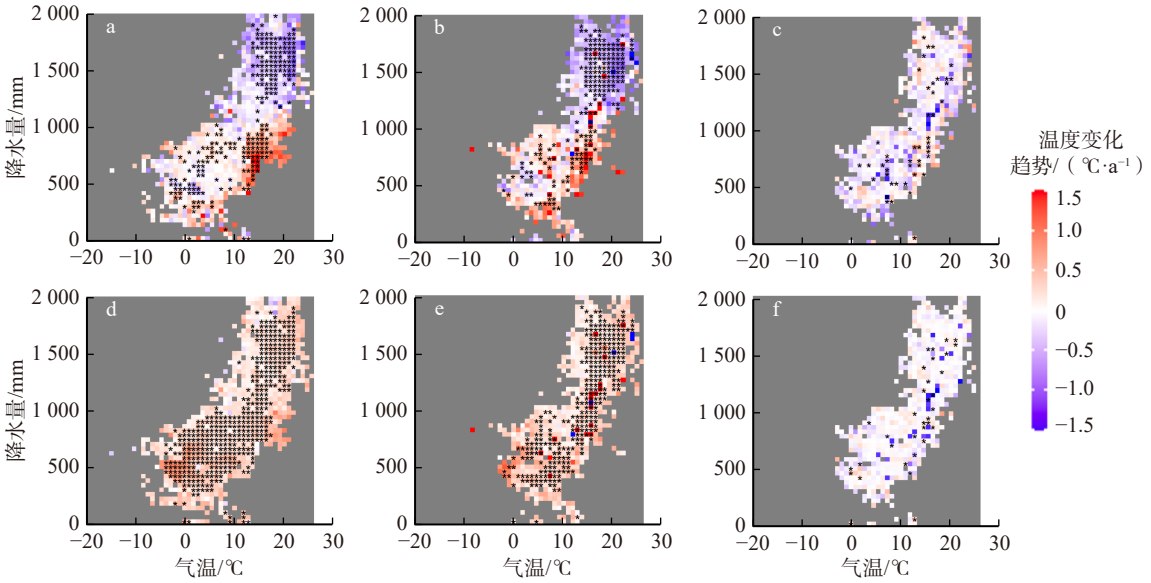
冠层表面温度有明显的上升趋势，并随着降水量的减少而增强。比较每个小气候区天然林和人工林的日间冠层表面温度变化幅度的差异(图 5c)，图中栅格以紫色为主，说明天然林的年均日间冠层表面温度变化整体上低于人工林。

天然林的年均夜间冠层表面温度在研究期间普遍呈现显著上升趋势，且在年均气温 0 ℃ 以下的小气候区内增温趋势更明显(图 5d ~ f)。人工林的年均夜间冠层表面温度与天然林相似，但在年均温大于 10 ℃ 的气候区内，人工林存在一些夜间冠层表面温度增温趋势明显偏高的栅格，这些栅格也体现在天然林和人工林的夜间冠层表面温度变化的差值图中(图 5f)。比较每个小气候区天然林和人工林的夜间冠层表面温度的变化趋势，差异并不明显。

2.3.2 不同水热条件下天然林和人工林的日平均冠层表面温度及昼夜冠层表面温度差的变化格局

在年均降水量低于 1 000 mm 的地区，天然林的年均日平均冠层表面温度呈上升趋势；而在年均降水量超过 1 000 mm 的地区，天然林的年均日平均冠层表面温度则呈下降趋势(图 6a)。整体上，人工林的变化趋势与天然林相似：在年均降水量低于 1 000 mm 的地区，人工林的年均日平均冠层表面温度呈上升趋势；而在年均降水量超过 1 000 mm 的地区，人工林的年均日平均冠层表面温度则呈下降趋势(图 6b)。比较天然林和人工林的日平均冠层表面温度变化幅度，在年均降水量低于 1 000 mm 且年均温度低于 10 ℃ 的小气候区，栅格以紫色为主，表明该气候范围内天然林的日平均冠层表面温度变化幅度整体低于人工林；而在年均降水量超过 1 000 mm 且年均温度超过 10 ℃ 的小气候区，栅格以红色为主，表明该气候范围内天然林的日平均冠层表面温度变化幅度整体高于人工林(图 6c)。

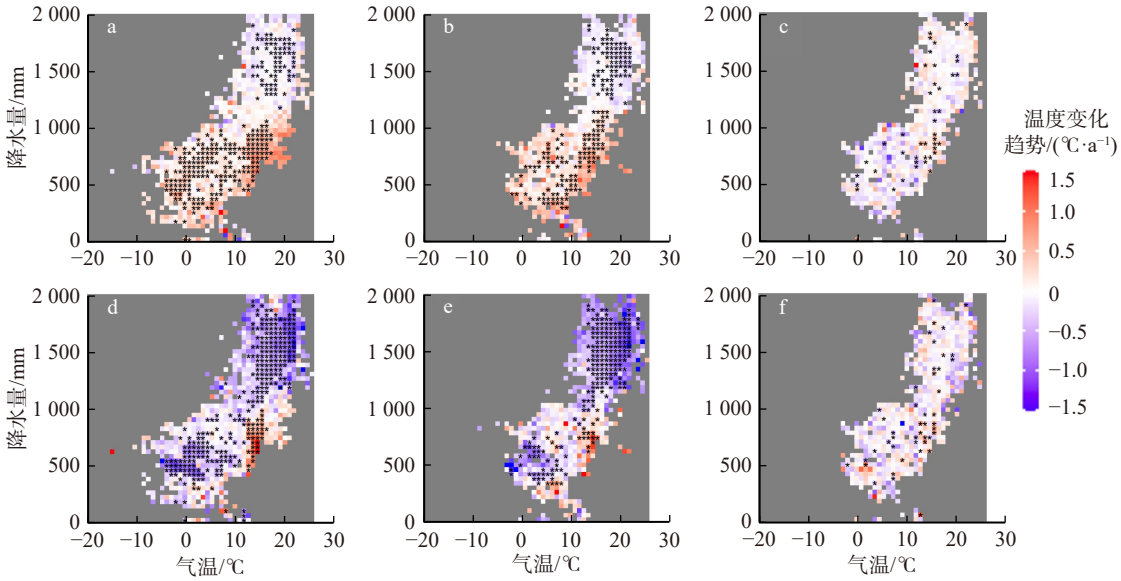
此外，在年均气温高于 10 ℃ 且年均降水量低于 1 000 mm 的地区，天然林的昼夜冠层表面温度差在研究期间呈上升趋势；而在年均降水量超过 1 000 mm 的地区，天然林的昼夜冠层表面温度差呈现逐年下降趋势，并随着气温升高，下降趋势更明显。而在年均气温低于 10 ℃ 的地区，天然林的昼夜冠层表面温度差也在研究期间呈现下降趋势，并随着气温降低，下降趋势更为显著(图 6d)。整体上，人工



a～c 表示日间冠层表面温度，其中 a 为天然林，b 为人工林，c 为天然林和人工林的差值。d～f 为夜间冠层表面温度，d 为天然林，e 为人工林，f 为天然林和人工林的差值。在图 a、b、d、e 中，负值表示研究期间冠层表面温度呈下降趋势，正值表示冠层表面温度呈上升趋势。图 c 与 f 中，负值表示天然林的温度变化幅度低于人工林，正值表示天然林的温度变化幅度高于人工林。星号表示栅格内的森林样点的变化趋势显著（$P < 0.05$）。

图 5　天然林和人工林的昼夜冠层表面温度随水热条件的变化格局

Fig. 5　Patterns of day and night surface temperature changes in natural and planted forests under different climatic backgrounds



a～c 表示日平均冠层表面温度，其中 a 为天然林，b 为人工林，c 为天然林和人工林的差值。d～f 为昼夜冠层表面温度差，d 为天然林，e 为人工林，f 为天然林和人工林的差值。正负值和星号含义同图 5。

图 6　天然林和人工林的日平均冠层表面温度和昼夜温差随水热条件的变化格局

Fig. 6　Patterns of daily average surface temperature and diurnal temperature range in natural and planted forests under different climatic background

林的变化趋势与天然林相似(图 6e)。本研究也比较了相同水热条件下天然林和人工林之间的昼夜冠层表面温度差变化幅度(图 6f)。总体而言，天然林的昼夜冠层表面温度差变化幅度高于人工林(图 6f 红色区域)。

3　讨　　论

3.1　天然林与人工林的冠层表面温度的区域差异

天然林和人工林在多年平均冠层表面温度上的显著差异，主要反映了二者的分布区域及生态背景条件的不同。我国人工林多集中于气候温暖湿润的地区，如热带和亚热带的低海拔区域，而天然林则多留存于高海拔或纬度较高的寒冷地区。该地理分布格局直接导致了二者多年平均冠层表面温度的显著差异。森林冠层通过遮阴作用减少太阳短波辐射的到达量，从而降低冠层下的温度[31]；此外，植物通过蒸腾释放水蒸气，带走热量，从而显著降低温度[32]。与周边其他植被相比，白天森林通常表现出降温效

应，夜间森林在日间吸收的长波辐射和积累的热量逐步释放，提升了温度。同时，森林冠层还通过减少地表长波辐射的散失，起到了保温作用[33]。需要注意的是，由于本研究主要关注森林不同起源类型之间冠层表面温度的差异，因此未探讨森林对局部和周边气候条件的影响。

相较于天然林，人工林通常具有较高的水分消耗总量[34−36]，尤其是在水资源受限的地区[24]。这种高水分消耗通过增强蒸散作用降低了森林日间冠层表面温度。在热带、亚热带和温带等大部分地区，人工纯林，尤其速生树种占据较大的比例。这些速生树种由于生长速度快，根系发达，叶面积指数大和蒸腾速率较高，在湿润条件下能够快速消耗水分，表现出更强的蒸散能力[37−38]。此外，有研究[24]表明我国人工林单位水分消耗产生的碳固定量低于天然林。这些因素可能是导致我国人工林日间冠层表面温度普遍低于天然林的主要原因。但是，在南亚热带、北亚热带和暖温带区域，天然林的夜间冠层表面温度普遍高于人工林。这种昼夜温差的不对称性，导致我国人工林表面的昼夜温差显著低于天然林。然而，人工林日间冠层表面温度较低可能降低了白天的光合总量，而夜间的高温则又可能促进了人工林的呼吸作用，这种昼夜温差格局可能是人工林净光合低于天然林的原因之一，但是其具体影响机制还需进一步研究验证。

此外，天然林和人工林冠层表面温度的动态变化还受到诸多其他因素的影响，包括地形地貌、林地规模、树种组成以及区域背景气候条件等。本研究具体考虑了不同树种组成之间林冠表面温度的差异。阔叶林的叶片宽大，颜色较亮，而针叶林的叶片小，颜色较暗。因此阔叶林具有更高的反照率[39]、较低的蒸发阻力[40]、更高的蒸散比[41]、较低的水分利用效率[42]和更高的蒸散速率[43]，这些特性使得阔叶林表面温度通常低于针叶林，这可能是造成阔叶林的温度差异多大于针叶林的原因。混交林的蒸散比[41]和水分利用效率[42]均介于阔叶林和针叶林之间，具有更高的生物多样性和冠层结构[44]，表现出较强的适应性，可以提供更好的温度缓冲效应，减少温度的剧烈波动[45]，这可能解释了不同起源混交林的冠层表面温度差异多不显著。

3.2 日间和夜间温度变化的区域不对称性及其生态影响

研究期间，天然林和人工林的夜间冠层表面温度有明显的上升趋势，且在寒冷干燥的地区，这种上升趋势更加明显。越来越多的证据[46−48]表明，全球气候变暖普遍存在昼夜不对称的趋势，即全球陆地表面在夜间变暖的速度比白天更快。庞博等[49]研究发现，1982—2015 年，中国自然植被的昼夜增温显著，且夜间增温速率是白天的 1.6 倍。白天和夜间温度变化的区域不对称性主要源于光合作用、呼吸作用和水资源利用等因素影响植被生长和碳循环。在北半球的植被生态系统中，白天温度升高通常对湿润寒冷地区（如西伯利亚和北美北部）的植被光合作用和碳汇有正向影响。然而，夜间温度的升高在这些地区可能增强植物的呼吸作用，导致碳损失。相反，在干旱地区（如温带草原），夜间温度的升高可减轻蒸腾压力，提高水分利用效率，从而促进植被生长[50]。这表明，夜间升温对北半球湿润寒冷地区和干旱地区的植被可能产生相反效应。对于森林生态系统，寒冷地区的森林受白天和夜间升温的正向影响显著。但在温暖地区，北半球森林生产力与温度的正相关关系已经显著降低[51]，预计到 2070 年之前，在纬度低于 60°N 的地区可能会呈现显著负相关[52]。尤其是在高温干旱区域，白天进一步升温既可能通过加剧干旱胁迫和蒸散需求影响树木径向生长，也会由于温度超过光合作用的最适温度范围，降低碳同化能力，从而限制生长。相比之下，夜间升温的影响相对较弱，但可能通过提高呼吸作用进一步加剧碳损失[53]。

3.3 日均温与昼夜温差的区域不对称性及其生态影响

1950 年以来，由于白天和夜晚温度的不对称变化，全球森林的昼夜温差呈现显著下降趋势[54−56]。本研究发现，在中国年均温较低（ < 10 ℃）和年降水量较高（ > 1 000 mm）的森林区域，昼夜温差也呈现下降的趋势（图 5）。这些昼夜温差下降的区域主要是由于白天温度下降，夜晚温度上升导致的。尤其在水分较为充足（ > 1 000 mm）的森林区域，白天降温趋势更为显著。白天温度的下降可能抑制了森林的日间光合作用[57]，而夜间温度的上升意味着森林的呼吸作用增强[58−59]，这种昼夜温差的下降可能导致该区域森林的总光合量与净光合量的下降。

然而，在中国气候较温暖干旱森林区域，昼夜温差却呈上升趋势。这种昼夜温差的上升趋势主要是由于白天增温趋势高于夜晚增温趋势。尽管日间增温有助于提升森林的光合作用，但是夜间增温也提升了呼吸作用，其对固碳作用的净效应有待进一步研究。有研究[60]表明，昼夜温差的提升可能加剧树木生长带来的干旱胁迫，且增加干旱导致的树木生长损失。但是，不同树种对昼夜温差变化的响应也存在差异。对于抗旱树种，昼夜温差缩小能够有效缓解干旱导致的生长损失，而对于不耐旱树种，这种缓解作用不显著[61]。因此，在气候变化背景下，温暖

干旱地区的人工林经营中可能也需要考虑逐步引入抗旱树种以应对昼夜温差的提升。

前人的研究多集中于土地覆被变化剧烈的区域，探究造林前后的气候效应，多使用“空间代时间”的方法[3]。Alkama 等[15]优化了这一方法，在像元尺度上，将森林的温度变化分解为森林覆盖变化效应和气候变化引起的森林背景温度变化两部分，通过选取目标像元周围森林覆盖稳定的区域，估算森林背景温度变化，从而更精确地评估森林覆盖变化的效应大小。然而，由于本研究的重点在于稳定森林区域，难以直接同邻近开阔地进行对比，因此，本研究得到的人工林与天然林冠层表面温度的变化趋势主要受到气候变化的驱动。在稳定的森林分布区，冠层表面温度的持续增加可能指示森林受到的水分胁迫压力在持续增强，这将改变不同树种的竞争优势。长期的冠层表面温度升高可能导致森林内部不同树种的更新率和死亡率的变化，进而重塑森林的组成结构，这也将改变森林生长和固碳等服务功能。

4　结　　论

本研究基于 2003—2020 年的数据，比较分析了中国天然林和人工林冠层表面温度的年际变化，并探讨了相同气候带中天然林与人工林冠层表面温度的差异及其随水热条件的变化格局。基于随机采样方法剔除背景气候差异后发现，不同气候带内，不同林种的人工林的日间冠层表面温度、日平均冠层表面温度和昼夜冠层表面温度差普遍低于天然林。同一气候带内，不同林种之间冠层表面温度差存在差异，阔叶林的温度差多大于针叶林，不同起源混交林的冠层表面温度差异多不显著。

研究进一步分析表明，2003—2020 年间，天然林和人工林的夜间冠层表面温度均呈显著上升趋势，而昼夜冠层表面温度差显著下降。天然林的夜间温度上升趋势更大，昼夜冠层表面温度差下降幅度也更大。此外，分区域的比较发现，在年均温度 10 ℃以上，年均降水量 1 000 mm 以下的区域，日间森林冠层表面温度有增温趋势；而年均降水量在 1 000 mm 以上的区域，日间森林冠层表面温度则有降温趋势。森林夜间冠层表面温度普遍有增加趋势，并在年均气温 0 ℃ 以下地区更明显。在年均气温高于 10 ℃ 且年均降水量低于 1 000 mm 的地区，昼夜冠层表面温度差呈上升趋势，其余地区呈下降趋势。森林在调节气候、缓解气候变化方面具有重要作用，厘清天然林与人工林的冠层表面温度差异对准确模拟评估森林光合、呼吸和蒸腾等碳水循环过程和能量收支具有重要参考意义。

审图号：GS 京（2026）0319 号

参　考　文　献

[1] Cooper L, MacFarlane D. Climate-smart forestry: promise and risks for forests, society, and climate[J]. PLoS Climate, 2023, 2(6): e0000212.

[2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.

[3] Li Y, Zhao M, Motesharrei S, et al. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6603.

[4] 冯瑞, 杨丽萍, 侯成磊, 等. 基于随机森林的陕西省西安市近地表气温估算 [J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(1): 102−113.
Feng R, Yang L P, Hou C L, et al. Estimation of near-surface air temperature in Xi’an City of Shaanxi Province, China based on random forest[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 102−113.

[5] Shen W, He J, He T, et al. Biophysical effects of afforestation on land surface temperature in Guangdong Province, southern China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2022, 127(8): e2022JG006913.

[6] Still C J, Rastogi B, Page G F M, et al. Imaging canopy temperature: shedding (thermal) light on ecosystem processes[J]. New Phytologist, 2021, 230(5): 1746−1753.

[7] Wang L, Yu M, Ye S, et al. Seasonal patterns of carbon and water flux responses to precipitation and solar radiation variability in a subtropical evergreen forest, South China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 342: 109760.

[8] Gautam A, Sai Prasad S V, Jajoo A, et al. Canopy temperature as a selection parameter for grain yield and its components in durum wheat under terminal heat stress in late sown conditions[J]. Agricultural Research, 2015, 4: 238−244.

[9] Yi K, Smith J W, Jablonski A D, et al. High heterogeneity in canopy temperature among co-occurring tree species in a temperate forest[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2020, 125(12): e2020JG005892.

[10] IPCC. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Geneva: IPCC, 2023.

[11] Bryan B A, Gao L, Ye Y, et al. China’s response to a national land-system sustainability emergency[J]. Nature, 2018, 559: 193−204.

[12] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告 (2014—2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 3.
National Forestry and Grassland Administration. Ninth national forest resource inventory report(2014−2018)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 3.

[13] Cheng K, Yang H, Guan H, et al. Unveiling China’s natural and planted forest spatial-temporal dynamics from 1990 to 2020[J].

ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, 209: 37−50.

[14] Peng S S, Piao S, Zeng Z, et al. Afforestation in China cools local land surface temperature[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(8): 2915−2919.

[15] Alkama R, Cescatti A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover[J]. Science, 2016, 351: 600−604.

[16] Zhang Y, Wang X, Lian X, et al. Asymmetric impacts of forest gain and loss on tropical land surface temperature[J]. Nature Geoscience, 2024, 17: 426–432 .

[17] Yu Z, Dong Y, Lu C, et al. China's forestation on marginal land was less efficient in carbon sequestration compared with non-marginal land[J]. One Earth, 2023, 6(12): 1692−1702.

[18] 张克胜, 尚晴, 刘彦春, 等. 中国不同气候带人工林与天然林的土壤呼吸差异 [J]. 生态科学, 2017, 36(6): 49−56.
Zhang K S, Shang Q, Liu Y C, et al. Differences in soil respiration between plantation and natural forest among different climate zones in China[J]. Ecological Science, 2017, 36(6): 49−56.

[19] 刘世荣, 马姜明, 缪宁. 中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术 [J]. 生态学报, 2015, 35(1): 212−218.
Liu S R, Ma J M, Miao N. Achievements in natural forest protection, ecological restoration, and sustainable management in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 212−218.

[20] 陆元昌, 张守攻, 雷相东, 等. 人工林近自然化改造的理论基础和实施技术 [J]. 世界林业研究, 2009, 22(1): 20−27.
Lu Y C, Zhang S G, Lei X D, et al. Theoretical basis and implementation techniques on close-to-nature transformation of plantations[J]. World Forestry Research, 2009, 22(1): 20−27.

[21] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营 [J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1−10.
Liu S R, Yang Y J, Wang H. Development strategy and management counter measures of planted forests in China: Transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 1−10.

[22] 王云霖. 我国人工林发展研究 [J]. 林业资源管理, 2019(1): 6−11.
Wang Y L. Review on China's plantation development since the reform and opening up[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2019(1): 6−11.

[23] Zhong Z, He B, Chen Y, et al. Higher sensitivity of planted forests' productivity than natural forests to droughts in China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(10): e2021JG006306.

[24] Yu Z, Liu S, Wang J, et al. Natural forests exhibit higher carbon sequestration and lower water consumption than planted forests in China[J]. Global Change Biology, 2019, 25(1): 68−77.

[25] Xian Z, Yu Z, Agathokleous E, et al. Trends and climate-sensitivity of phenology in China's natural and planted forests[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2024, 129(6): e2023JG007955.

[26] You W, Xian Z, Zhou G, et al. Sensitivity of forest phenology in China varies with proximity to forest edges[J]. Forest Ecosystems, 2023, 10: 100144.

[27] Yu Z, Ciais P, Piao S, et al. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 5374.

[28] Zhang T, Zhou Y, Zhu Z, et al. A global seamless 1 km resolution daily land surface temperature dataset (2003–2020)[J]. Earth System Science Data Discussions, 2022, 14(2): 651−664.

[29] Peng S, Ding Y, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931−1946.

[30] Zheng J, Yin Y, Li B. A new scheme for climate regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 3−12.

[31] Schultz N M, Lawrence P J, Lee X. Global satellite data highlights the diurnal asymmetry of the surface temperature response to deforestation[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(4): 903−917.

[32] Bright R M, Davin E, O'Halloran T, et al. Local temperature response to land cover and management change driven by non-radiative processes[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(4): 296−302.

[33] 黄麟. 造林气候调节效应及其影响机理研究进展 [J]. 生态学报, 2021, 41(2): 469−478.
Huang L. A review on the climatic regulation effects of afforestation and its impact mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 469−478.

[34] Farley K A, Jobbágy E G, Jackson R B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy[J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1565−1576.

[35] 曹恭祥, 王绪芳, 熊伟, 等. 宁夏六盘山人工林和天然林生长季的蒸散特征 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2089−2096.
Cao G X, Wang X F, Xiong W, et al. Evapotranspiration characteristics of artificial and natural forests in Liupan Mountains of Ningxia, China during growth season[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2089−2096.

[36] 杨静学, 黄本胜, 陈亮雄, 等. 基于 PT-T 和 SBDART 模型的桉树人工林蒸散量研究 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2014, 46(4): 103−109.
Yang J X, Huang B S, Chen L X, et al. Application of PT-T and SBDART model to estimate evapotranspiration of eucalyptus[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2014, 46(4): 103−109.

[37] 左海军, 徐庆, 高德强, 等. 桉树人工林对水文过程的调控作用研究进展 [J]. 西部林业科学, 2024, 53(5): 133−139.
Zuo H J, Xu Q, Gao D Q, et al. Current Researches on Regulation of Hydrological Processes by Eucalyptus Plantations[J]. Journal of West China Forestry Science, 2024, 53(5): 133−139.

[38] 邓聪, 吴志祥, 谭正洪, 等. 海南岛西部橡胶人工林冠层温度变化及其与微气象要素的关系 [J]. 热带作物学报, 2020, 41(7):

1490−1497.
Deng C, Wu Z X, Tan Z H, et al. Variations of canopy temperature in a rubber plantation in Western Hainan Island and their relations with micrometeorological factors[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(7): 1490−1497.

[39] Chapin Iii F S, Mcguire A D, Randerson J, et al. Arctic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system[J]. Global Change Biology, 2000, 6(Supp.1): 211−223.

[40] Kim J E, Laguë M M, Pennypacker S, et al. Evaporative resistance is of equal importance as surface albedo in high-latitude surface temperatures due to cloud feedbacks[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(4): e2019GL085663.

[41] 仇宽彪, 贾宝全, 张志强. 基于遥感的中国植被蒸散比时空分布及其对气候因素的响应 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 151−158.
Qiu K B, Jia B Q, Zhang Z Q. Spatio-temporal patterns of evaporative fraction in vegetation ecosystem based on remote sensing data and its responses to climatic factors in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 151−158.

[42] Liu Z, Ji X, Ye L, et al. Inherent water-use efficiency of different forest ecosystems and its relations to climatic variables[J]. Forests, 2022, 13(5): 775.

[43] Ouyang L, Wu J, Zhao P, et al. Consumption of precipitation by evapotranspiration indicates potential drought for broadleaved and coniferous plantations in hilly lands of South China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 252: 106927.

[44] Jia J, Wang L, Yao Y, et al. Nonlinear relationships between canopy structure and cooling effects in urban forests: Insights from 3D structural diversity at the single tree and community scales[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 118: 106012.

[45] Schnabe F, Beugnon R, Yang B, et al. Tree diversity increases forest temperature buffering via enhancing canopy density and structural diversity[J]. Ecology Letters, 2025, 28(3): e70096.

[46] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.

[47] Vose R S, Easterling D R, Gleason B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: an update through 2004[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(23): L23822.

[48] Davy R, Esau I, Chernokulsky A, et al. Diurnal asymmetry to the observed global warming[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(1): 79−93.

[49] 庞博, 张鹏岩, 逯承鹏, 等. 1982—2015 年昼夜不对称增温下中国自然植被动态响应及差异 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2362−2372.
Pang B, Zhang P Y, Lu C P, et al. Dynamic response and variance of vegetation in China from 1982 to 2015 under the asymmetric rate of temperature fluctuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2362−2372.

[50] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation[J]. Nature, 2013, 501: 88−92.

[51] Piao S, Nan H, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 5018.

[52] Zhang Y, Piao S, Sun Y, et al. Future reversal of warming-enhanced vegetation productivity in the Northern Hemisphere[J]. Nature Climate Change, 2022, 12(6): 581−586.

[53] Tao W, Mao K, He J, et al. Daytime warming triggers tree growth decline in the Northern Hemisphere[J]. Global Change Biology, 2022, 28(16): 4832−4844.

[54] Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe[J]. Science, 1997, 277: 364−367.

[55] Sun X, Ren G, You Q, et al. Global diurnal temperature range (DTR) changes since 1901[J]. Climate Dynamics, 2019, 52: 3343−3356.

[56] Thorne P W, Donat M G, Dunn R J H, et al. Reassessing changes in diurnal temperature range: Intercomparison and evaluation of existing global data set estimates[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(10): 5138−5158.

[57] Liu J, Wennberg P O. An emergent constraint on the thermal sensitivity of photosynthesis and greenness in the high latitude northern forests[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 6189.

[58] Crous K Y, Uddling J, De Kauwe M G. Temperature responses of photosynthesis and respiration in evergreen trees from boreal to tropical latitudes[J]. New Phytologist, 2022, 234(2): 353−374.

[59] Gustafson E J, Miranda B R, De Bruijn A M G, et al. Do rising temperatures always increase forest productivity? Interacting effects of temperature, precipitation, cloudiness and soil texture on tree species growth and competition[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 97: 171−183.

[60] Duffy K A, Schwalm C R, Arcus V L, et al. How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere?[J]. Science Advances, 2021, 7(3): eaay1052.

[61] Zhang X, Rademacher T, Liu H, et al. Fading regulation of diurnal temperature ranges on drought-induced growth loss for drought-tolerant tree species[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 6916.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　孟　平）