

中国区域植树造林对地表温度的影响

王丽平^{1,2}, 段四波², 张霄羽¹, 常胜³, 刘向阳², 黄成², 钱永刚³

1. 山西大学 环境与资源学院, 太原 030006;

2. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101

摘要: 近些年随着中国植树造林计划的持续进行, 植被覆盖不断增长, 进而影响中国地表环境。地表温度是表征地表物理过程的重要参数, 是地表一大气能量交换中的驱动因子, 广泛应用于气候、水文、生态及气象等研究中, 是众多基础学科研究的关键参数之一。为了分析植树造林战略对局地 and 区域尺度的影响, 以指导相应政策的制定, 本文采用 IBM (Intrinsic Biophysical Mechanism) 方法研究了中国区域植树造林对地表温度的影响, 并讨论了辐射效应与非辐射效应以及不同林地类型对地表温度的影响。结果表明: (1) 植树造林对地表温度的影响在高纬度地区的寒冷季节表现为增温作用, 而在温暖季节各纬度均表现为降温作用。(2) 寒冷季节高纬度地区植树造林对地表温度的辐射效应较为强烈, 而在其他季节各纬度植树造林对地表温度的非辐射效应占主导作用, 辐射效应较为微弱。(3) 开阔地转为林地时, 不同林地类型对地表温度有不同的影响特征。开阔地转为落叶阔叶林时对地表温度的影响与植树造林对地表温度的总体影响变化具有相似特征, 表现为在寒冷季节高纬度地区为增温作用, 在低纬度地区均表现为降温作用, 开阔地转为常绿针叶林、常绿阔叶林时对地表温度的影响均表现为降温作用。

关键词: 地表温度, IBM 方法, 植树造林, 非辐射效应

引用格式: 王丽平, 段四波, 张霄羽, 常胜, 刘向阳, 黄成, 钱永刚. 2021. 中国区域植树造林对地表温度的影响. 遥感学报, 25(8): 1862-1872

Wang L P, Duan S B, Zhang X Y, Chang S, Liu X Y, Huang C and Qian Y G. 2021. The influence of afforestation on land surface temperature in China. National Remote Sensing Bulletin, 25 (8) : 1862-1872 [DOI: 10.11834/jrs.20211284]

1 引言

为了解决水土流失和土地沙漠化等严重的生态和环境退化问题, 中国实施了几十年的大规模植树造林计划, 2014年已拥有世界上最大的绿化面积 (Peng 等, 2014)。2021-03-12, 国家林草局、国家统计局联合发布中国森林资源核算, 揭示了中国是目前世界上人工林面积最大的国家, 全球增绿四分之一来自中国。地表温度 LST (Land Surface Temperature) 是表征地表物理过程的重要参数, 是地表一大气能量交换中的驱动因子, 广泛应用于气候、水文、生态及气象等研究中 (Lee 等, 2011; 段四波等, 2021; 朱金顺等,

2021)。由于地表的能量收支受到地表生物地球物理属性的强烈影响, 地表控制着大气中水分、动量和能量的交换 (Pielke 等, 2011; Mahmood 等, 2014; He, 2016), 因此大规模植被增长对地表能量平衡产生了直接影响, 进而对局地乃至区域的地表温度都产生影响 (Pielke 等, 2002; Betts 等, 2007)。研究植树造林对气候的生物物理影响, 特别是在正在实施造林战略的局地和区域尺度上, 以指导相应政策的制定 (Bonan, 2008; Anderson 等, 2010)。

新增植被的气候效应取决于植被的生物物理属性以及辐射和湍流能量通量对地表温度的影响。虽然一般来说植树造林对当地生态环境产生良好

收稿日期: 2021-05-10; 预印本: 2021-07-15

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2016YFB0500400); 国家自然科学基金(编号:41871275)

第一作者简介: 王丽平, 1995年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为定量遥感。E-mail: wlpn123@163.com

通信作者简介: 段四波, 1983年生, 男, 研究员, 研究方向为定量热红外遥感。E-mail: duansibo@caas.cn

的反馈作用,但植树造林对地表温度的影响仍然知之甚少。研究表明,植被增加,反照率减小,造成地表温度升高(辐射效应),而植被覆盖增长,蒸发蒸腾作用增强,可能造成地表温度降低(非辐射效应)。在低纬度地区,植被对地表温度的影响作用主要为降温作用,这是由于植树造林对地表温度的非辐射作用占主导地位,而非辐射作用主要起降温作用(Li等,2015)。在高纬度地区植树造林对地表温度起增温作用,这是由于高纬度地区植树造林对地表温度的辐射作用起主导作用,辐射作用对地表温度主要起增温作用(Li等,2015)。而中纬度地区,反照率驱动的辐射效应和能量再分配驱动的非辐射效应的重要性尚不确定。尽管存在这些不确定性,但仍有众多学者研究植树造林地表覆盖变化对地表温度的影响(Li和Wang,2019;Shen等,2020)。气候模型和地面观测经常被用来估计森林变化的气候影响(Bonan,2008),这两种方法在解决这一特定问题方面存在重大限制。首先,在大多数情况下,毁林发生在难以通过粗分辨率气候模型捕捉到的小斑块中,或在缺乏长期可靠气象数据的地区(Lee等,2011;Lawrence和Vandecar,2014)。其次,在建模方法中,由于全球气候模型的粗空间分辨率与物理过程、参数化和输入数据的不确定性(Oleson等,2004),全球气候模型仍然不能可靠地再现局部气候效应(Mahmood等,2014)。区域气候模型可以提高局地 and 区域层面的空间分辨率和物理表征,但由于计算能力有限,使用区域气候模型进行大尺度模拟尚不可行。气候模型在物理过程、参数化和输入数据方面具有很大的不确定性,而地面观测在大尺度上相对稀疏,因此空间采样不足。Wang等(2016)利用WRF(Weather Research and Forecasting)气候模型研究中国北方农牧交错带地表覆盖的变化对地表温度的影响,该研究中模型较为复杂的参数输入造成误差传递且研究范围相对较小。除此之外,基于气候模型的植树造林对地表温度影响的研究中,其内在机理即辐射效应和非辐射效应并不能界定。

在区域气候条件下,利用植被对地表通量影响的物理机理以及植被生物物理过程变化的模拟计算,既避免上述模型研究的不足之处,又从物理学角度分析其变化的内在机理,具有比传统统计学角度更深刻的生物物理意义。部分学者使用基于来自具有不同土地覆盖的相邻样本点的观测

结果进行研究,并对该结构进行地表能量平衡方程的分解(Lee等,2011;Juang等,2007;Mahmood等,2014)。目前有两种主要理论将对地表温度变化的贡献与土地利用变化的个别生物物理因素隔离开来。第一个理论称为直接分解温度度量DTM(Direct Decomposed Temperature Metric theory)理论,是由Juang等(2007)首次提出的,后来由Luysaert(2014)等进一步完善。第二个理论称为内在生物物理机制IBM(Intrinsic Biophysical Mechanism)理论(Chen等,2020),是由Lee等(2011)首次提出,用于调查造林对温度的影响,后来由Zhao等(2014)进一步改进用于研究造林对局地气候影响。IBM方法将植树造林对地表温度的影响量化为地表长波辐射反馈、气动阻力和地表蒸发变化带来的能量再分配的结果。

Wang等(2018)利用IBM方法计算造林对地表温度的影响,但都是基于点尺度研究,且研究区域较小。Ge等(2019)虽然研究了中国区域植树造林对地表温度的非辐射影响,但由于数据限制,时间尺度较短。近些年国家生态环境保护的持续进行对现今地表环境影响尚未可知。本研究采用IBM方法以空间代替时间的思想研究中国区域植树造林对地表温度的影响。本研究分析中国植被对地表温度的影响,覆盖范围更广,时间尺度较长,样本点较多更能反映目前植被增长后的影响,对今后国家生态战略具有一定指导意义。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

本研究采用的数据包括遥感数据和再分析数据。遥感数据具有长时间尺度以及空间连续观测的优点。使用的再分析数据精度优于现有国际再分析数据,数据质量良好。

2.1.1 遥感数据

地表温度数据为是MODIS/Aqua地表温度数据产品MYD11A1。MODIS地表温度数据产品根据不同地表温度反演算法以降低各种因素的影响,包括发射率和大气的影晌等(Duan等,2019),数据精度良好。MODIS/Aqua过境时间近似对应一天中的最大地表温度时刻,而地表温度最大值与植被生物物理机制密切相关,能够表征土地利用转移等信息。MYD11A1数据可在NASA官方数据网站

(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov> [2021-05-10]) 下载。本文使用的是最新地表温度 V006 版本, 采用广义分裂窗算法反演地表温度。数据集中包含白天地表温度数据 (LST_Day_1 km)、夜间地表温度数据 (LST_Night_1 km) 以及质量控制数据 (QC_Day、QC_Night) 等, 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 1 d。本研究将数据质量良好 (即 QC=0) 的地表温度数据计算 2003 年—2018 年共 16 年的月均值, 并将其聚合为 0.1°。该数据主要用于分析植树造林对地表温度的影响。

地表覆盖类型数据采用的是 2003 年—2018 年 MCD12Q1 产品, 其土地覆盖数据产品包含多个分类方案。本研究利用国际地圈生物圈计划分类数据集 MCD12Q1 中的 LC_Type1 数据, 其空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 1 年, 共有 17 个地表覆盖分类 (Friedl 等, 2010)。由于地表覆盖类型数据空间分辨率为 500 m, 在植树造林对地表温度影响的研究中为匹配其他数据分辨率, 将地表覆盖数据聚合为 0.1°, 将 0.1°×0.1° 范围内地表类型比重超过 90% 的定义为该像元地表类型。该数据主要用于开阔地与森林地表的分类, 并选取样本点。

积雪覆盖数据采用 MYD10A2 产品, 该产品由 Maximum_Snow_Extent 和 Eight_Day_Snow_Cover 数据组成, 时间分辨率为 8 d, 空间分辨率为 500 m。本研究选取 Eight_Day_Snow_Cover 数据, 积雪覆盖值的范围为 0—255, 该数据记录看到雪的天数, 将数据转化为二进制, 若第 0 位数据为 1 则表示第 1 天看到雪, 若为 0 则无雪覆盖, 之后第 1—7 位数字以此类推。通过将数据转为二进制还原出积雪日数的检测信息。将 0.1°×0.1° 范围内雪覆盖像元超过 70% 则认为该像元为雪覆盖像元。该数据用于确定像元有无积雪覆盖。

本研究采用 MODIS 反照率产品 MCD43A3 数据集, 该数据集中共有 30 个数据, 其中包括 7 个波段的半球反照率以及白空反照率、黑空反照率, 除此之外, 还包括红光、近红外以及短波红外的黑空、白空以及半球反照率等数据 (Guan 等, 2015)。本研究中反照率数据所用时间为 2003 年—2018 年, 提取 Albedo_BSA_shortwave 与 Albedo_WSA_shortwave 数据, Albedo_BSA_shortwave 为短波黑空反照率, Albedo_WSA_shortwave 为短波白空反照率, 将 DN 值与尺度因子 (0.001) 转换获取

白空、黑空反照率, 然后将白空反照率和黑空反照率均值作为近似蓝空反照率 (Li 等, 2015)。由于 MCD43A3 的反照率数据产品是 16 d 移动窗口获取的反照率值, 因此将月中值视为月均值作为本研究的月均反照率值, 获取 2003 年—2018 年 16 年的月均反照率值, 并将其空间分辨率聚合为 0.1°, 将 0.1°×0.1° 范围内所有值的均值作为该 0.1° 像元的值。

本研究使用 MCD15A2H 4 级 MODIS 全球叶面积指数 (LAI) 产品, 该产品时间分辨率为 8 d, 空间分辨率为 500 m。本研究将 2003 年—2018 年叶面积指数获取 16 年的月均值, 并将其空间分辨率聚合为 0.1°, 将 0.1°×0.1° 范围内所有值的均值作为该 0.1° 像元的值。该数据只用于拟合能量再分配因子。

2.1.2 再分析数据

2003 年—2018 年的下行短波辐射、下行长波辐射、近地面气温以及近地面降水量产品都来源于青藏高原数据研究中心 (<http://data.tpdac.ac.cn> [2021-05-10]) 中国区域地面气象要素驱动数据集 (1979 年—2018 年)。该数据集包括近地面气温、近地面气压、近地面空气比湿、近地面全风速、地面向下短波辐射、地面向下长波辐射、地面降水量共 7 个要素, 数据为 NETCDF 格式, 时间分辨率为每月, 空间分辨率为 0.1° (Wang 等, 2018), 可为中国区域陆面过程模拟提供驱动数据。该数据集精度介于气象局观测数据和卫星遥感数据之间, 优于国际上现有再分析数据的精度 (Gao 等, 2014)。中国区域地面气象要素驱动数据集中的下行短波辐射、下行长波辐射、近地面气温以及近地面降水量产品等都为 NETCDF 格式数据, 表 1 为本研究所用各数据的尺度因子与偏移量, 表 2 是 IBM 方法所用数据。

表 1 ITPCAS 中国区域地面气象要素驱动数据集中数据的尺度因子和偏移量

Table 1 The scale factor and offset of the data in the ITPCAS surface meteorological element-driven data set in China

变量	尺度因子	偏移量
下行短波辐射 (srad)	0.2500	685.00
下行长波辐射 (lrad)	0.2500	685.00
气温 (temp)	0.0100	273.15
降水 (prec)	0.0025	50.00

表2 IBM方法所用数据
Table 2 Data used in the IBM method

数据	数据产品	时间分辨率	空间分辨率	时间跨度/年	数据来源
地表覆盖类型	MCD12Q1	1 a	500 m	2003—2018	MODIS
地表温度	MYD11A1	1 d	1000 m	2003—2018	MODIS
叶面积指数	MCD15A2H	8 d	500 m	2003—2018	MODIS
反照率	MCD43A3	16 d	500 m	2003—2018	MODIS
积雪覆盖	MYD10A2	8 d	500 m	2003—2018	MODIS
下行长波辐射	中国区域气象要素驱动数据集	1月	0.1°	2003—2018	青藏高原数据研究中心
下行短波辐射	中国区域气象要素驱动数据集	1月	0.1°	2003—2018	青藏高原数据研究中心
气温	中国区域气象要素驱动数据集	1月	0.1°	2003—2018	青藏高原数据研究中心
降水	中国区域气象要素驱动数据集	1月	0.1°	2003—2018	青藏高原数据研究中心

2.2 植树造林对地表温度影响的研究方法

由于相邻像元除下垫面以外其他地理环境都较为类似，因此下垫面不同是造成了相邻像元地表温度不同的主要原因。本研究将相邻的林地类型（常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶针叶林等）与开阔地类型（农田和草地）假定具有相同的气候背景，其地表温度的变化主要是由地表覆盖变化引起的。

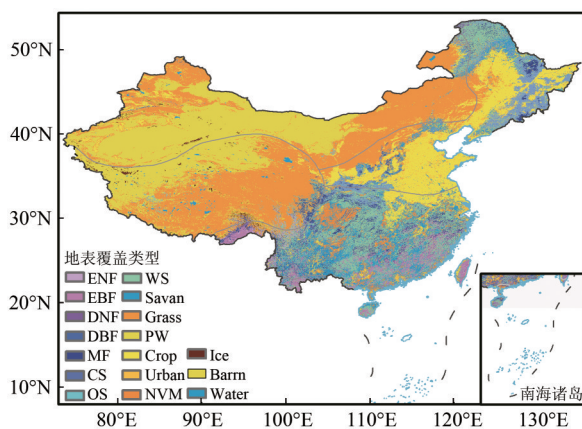
地表覆盖数据用于选取研究中的样本点，为上述MCD12Q1的LC_Type1国际地圈生物圈计划地表类型（图1（a），审图号：GS（2021）第3828号），空间分辨率为500 m，将地表类型聚合到0.1°。2003年—2018年的地表覆盖类型逐像元检索。土地覆盖的逐年变化在MODIS产品中很常见，这是

由于实际土地覆盖变化或分类错误（Mark等，2010）。本研究将16年中超过9年地表类型一致的数据认为是该地表类型（Ge等，2019），将0.1°×0.1°范围内地表类型比重超过90%的定义为该像元地表类型（He等，2015）。为了选取样本点，本研究以开阔地地表类型（草地和农田）为中心，0.2°为半径选取研究样本。将中国作为检索区域共产生531个研究样本（1个林地像元与1个开阔地像元之差）（图1（b），审图号：GS（2021）等3828号）。

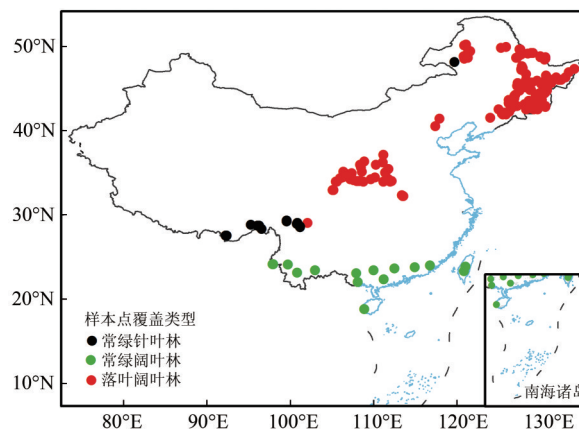
地表能量平衡方程表示为

$$(1 - \alpha)SW_{\downarrow} + \varepsilon LW_{\downarrow} - \varepsilon\sigma T_s^4 = R_n = H + LE + G \quad (1)$$

式中， R_n 为净辐射， LW_{\downarrow} 为下行长波辐射， SW_{\downarrow} 为下行短波辐射， ε 为地表发射率， α 为地表反照率， T_s 为地表温度， H 为显热通量， LE 为潜热通量， G 为地表热通量。



(a) 中国地表覆盖类型图
(a) China's land cover map



(b) 选取的地表覆盖样本点
(b) Selected land cover sample points

图1 研究区域地表覆盖类型和选取的样本点

Fig. 1 Land cover map and selected sample points in the study area

IBM方法假定相邻林地和开阔地接收到相同的向下短波和长波辐射且空气在边界层内充分混合, 这样林地和开阔地之间的气温是相同的 (Lee等, 2011)。基于地表能量平衡方程, 地表温度表示为 (Lee等, 2011):

$$T_s = T_a + \frac{\lambda_0}{1+f} (R_n^* - G) \quad (2)$$

式中, λ_0 为由长波辐射引起的气候敏感性因子, $\lambda_0 = 1/(4\sigma T_s^3)$, T_a 为气温, R_n^* 为表观净辐射, f 为能量再分配因子:

$$f = \frac{\rho C_p}{4r_a \sigma T_s^3} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3)$$

忽略气温的影响和地表发射率的微小变化 (Juang等, 2007; Lee等, 2011), 土地覆盖变化引起的地表温度的变化分解为3个部分 (Ge等, 2019):

$$\Delta T_s = \frac{\partial T_s}{\partial R_n^*} \Delta R_n^* + \frac{\partial T_s}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial T_s}{\partial G} \Delta G \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial R_n^*} = \frac{\lambda_0}{1+f} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial f} = \frac{-\lambda_0}{(1+f)^2} (R_n^* - G) \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial G} = \frac{-\lambda_0}{1+f} \quad (7)$$

月均尺度的植树造林对地表温度的影响表示为

$$\Delta T_s = \Delta T_{s,\alpha} + \Delta T_{s,f} + \Delta T_{s,G} = \frac{\lambda_0}{1+f} \Delta R_n^* + \frac{-\lambda_0}{(1+f)^2} (R_n^* - G) \Delta f + \frac{-\lambda_0}{1+f} \Delta G \quad (8)$$

式中, $\Delta T_{s,\alpha}$, $\Delta T_{s,f}$, $\Delta T_{s,G}$ 分别为地表反照率、能量再分配因子和地表热通量的变化引起的地表温度的变化。

为了计算月均尺度的植树造林对地表温度的影响, Bright等 (2017) 假定 $R_n^* = (1 - \alpha)SW_{\downarrow} + LW_{\downarrow} - \sigma T_s^4$ 和 $\Delta R_n^* = -SW_{\downarrow} \Delta\alpha$ 。此外, 考虑到月均空气动力学阻抗 r_a 难以获取, Bright等 (2017) 利用经验公式对能量再分配因子 f 进行参数化:

$$f_v = k_1 + \frac{1/(4\sigma T_a^3)}{k_2 \exp(\alpha_v) + k_3 P} \quad (9)$$

$$\left((1 - \alpha_v)SW_{\downarrow} + LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow,v} - G_v \right)$$

式中, k_1 , k_2 , k_3 为经验参数 (取值见表3), P 为月均降水量 (mm/month), 下标 v 代表植被相关的

变量, α_v , $LW_{\uparrow,v}$ 和 G_v 计算公式为

$$\alpha_v = \alpha_{sc}(F_{sc}) + \alpha_{sf}(1 - F_{sc}) \quad (10)$$

$$LW_{\uparrow,v} = a + b(T_a) + c(LAI) \quad (11)$$

$$G_v = m + n(1 - \alpha_v)SW_{\downarrow} \quad (12)$$

式中, F_{sc} 为积雪覆盖百分比, α_{sc} 和 α_{sf} 分别为积雪覆盖和无积雪覆盖情况下的地表反照率, 其值通过多尺度气候反照率查找表获得 (Gao等, 2014), a , b , c , m , n 为经验系数 (取值见表3)。图2显示了植树造林对地表温度影响的计算流程图。

表3 不同地表类型下估计能量再分配因子的经验系数的值 (Bright等, 2017)

Table 3 Values of empirical parameters used to estimate the energy redistribution factor for different land cover types (Bright et al., 2017)

系数	常绿针叶林	常绿阔叶林	落叶阔叶林	草地	农田
k_1	-0.49	-0.72	1.04	-0.52	-0.52
k_2	3.89	3.29	4.22	5.80	5.12
k_3	-3.2×10^{-3}	-9.4×10^{-5}	-8.7×10^{-3}	-8.5×10^{-3}	-6.8×10^{-3}
a	315	327	324	323	312
b	5.2	5.4	5.3	5.3	5.8
c	-0.53	-3.4	-2.1	-0.02	0.26
m	-3.98	-5.29	-5.9	-7.19	-6.85
n	0.030	0.044	0.032	0.054	0.058

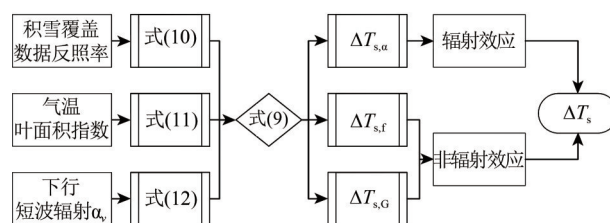


图2 植树造林对地表温度影响的计算流程图

Fig. 2 Flowchart for calculation the impact of afforestation on land surface temperature

式 (8) 中第2项和第3项之和称为植树造林对地表温度的非辐射效应。非辐射效应的占比成为非辐射效应因子:

$$NRFI = \frac{|\Delta T_{s,f}| + |\Delta T_{s,G}|}{|\Delta T_{s,\alpha}| + |\Delta T_{s,f}| + |\Delta T_{s,G}|} \quad (13)$$

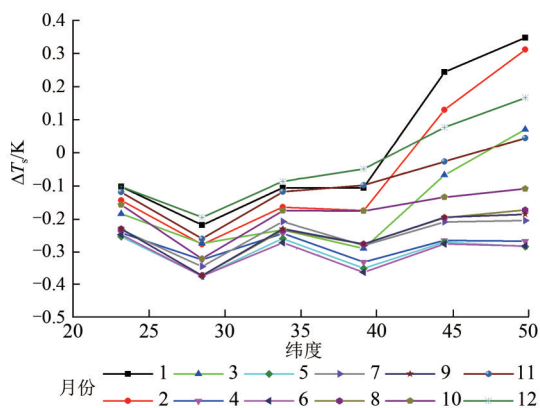
$$= \frac{\Delta T_{s,NRF}}{\Delta T_{s,RF} + \Delta T_{s,NRF}}$$

式中, NRFI为植树造林非辐射效应因子, $\Delta T_{s,RF}$ 为植树造林对地表温度的辐射效应, $\Delta T_{s,RF} = \Delta T_{s,\alpha}$, $\Delta T_{s,NRF}$ 为植树造林对地表温度的非辐射效应。

3 结果与讨论

3.1 不同纬度下植树造林对地表温度的影响

图3(a)显示了不同月份下植树造林对地表温度的影响(ΔT_s)随纬度的变化。不同月份表现出不同的特征, 春冬季节随纬度的升高其地表温度的影响不同, 在低纬度地区则为降温作用, 在高纬度地区表现为升温作用, 而夏秋季节在各纬度均表现为降温作用。其他月份植被对地表温度的影响随纬度变化均表现为降温作用。研究表明, 除高纬度寒冷季节植树造林对地表温度的影

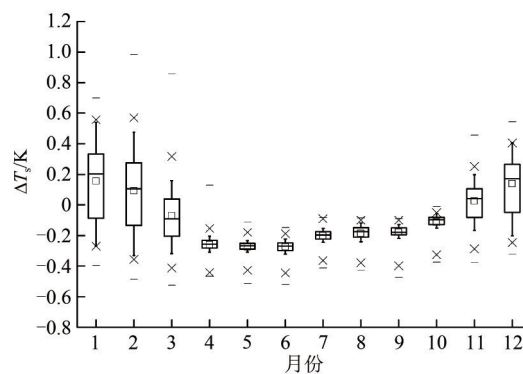


(a) 不同月份下植树造林对地表温度的影响(ΔT_s)随纬度的变化

(a) The latitudinal distribution of the influence of afforestation on land surface temperature in each month

响为增温作用外, 其他季节各纬度均表现为降温作用。

图3(b)显示了不同月份下植树造林对地表温度的影响(ΔT_s)的四分位图。在1、2、3、11、12月份存在增温现象, 且在月内样本点值差异较大, 1、2、12月的植树造林对地表温度的影响均值表现为增温作用, 且增温作用按12、1、2月时间变化逐渐增大, 而3、11月份虽存在部分增温样本, 但均值为负值, 因此总体表现为降温作用。除此之外, 其他月份的 ΔT_s 值均小于0 K, 表明该月份在任意纬度植树造林对地表温度的影响均表现为降温作用。



(b) 不同月份下植树造林对地表温度的影响(ΔT_s)的四分位图

(b) A quartile diagram of the influence of afforestation on land surface temperature in each month

图3 不同纬度下植树造林对地表温度的影响

Fig. 3 The influence of afforestation on land surface temperature over different latitudes

3.2 不同林地类型下植树造林对地表温度的影响

从图1(b)可知, 样本点中林地的类型主要包括落叶阔叶林、常绿针叶林和常绿阔叶林。图4显示了由开阔地转为这3种林地类型在不同月份下对地表温度的影响(ΔT_s)。如图4(a)所示, 由于由开阔地转为落叶阔叶林的样本点较多且分布比较广泛, 表现为1、2、3、11、12月份存在部分升温样本点, 而其他月份对地表温度的影响均表现为降温作用。这主要是由于春冬季节落叶阔叶林辐射效应占主导地位, 而辐射效应对地表温度的影响主要为升温作用, 随着气候的变化在其他季节植被蒸发蒸腾作用逐渐增强, 因此非辐射效应占主导作用, 降温作用逐渐增强, 在6月份降温最为强烈。由图1(b)可知, 由开阔地转为常绿针叶林的样本点主要分布在横断山脉, 植树造林

对地表温度的影响变化并不明显, 各月份植树造林对地表温度的影响均值主要在-0.4—-0.2 K, 且均表现为降温作用。由于当地垂直地带性明显, 气候分布多样, 且有很明显的干湿季, 因此图中1—5月份的 ΔT_s 值差异较大, 而其他月份差异较小。由开阔地转为常绿阔叶林的样本点分布在热带、亚热带季风气候区, 样本点较少, 因此 ΔT_s 值分布较其他林地类型月内各样本点值更集中, 植树造林对地表温度的影响均为降温作用, 且总体地表温度的影响主要在-0.2—0.0 K, 季节变化并不明显。

3.3 植树造林对地表温度的辐射效应

图5(a)显示了不同月份下植树造林对地表温度的辐射效应($\Delta T_{s, RF}$)随纬度的变化。如图所示, 植树造林对地表温度的辐射效应主要表现为

升温作用，但是升温作用强度随月份变化各有不同。4—10月份在各纬度均为升温作用，但升温作用并不强烈，而其他月份在北纬40°以后表现为强烈的升温作用。其原因为植树造林对地表温度的辐射效应主要是由地表反照率的变化引起的，而高纬度地区寒冷季节样本点中开阔地与林地反照

率差值增大，因此在北纬40°以后增温作用增强，其增温作用均超过0.1 K。相比其他低纬度地区，北纬25°—30°的 $\Delta T_{s, RF}$ 值异常高，这可能是该纬度范围内选取样本点的主要植被地表覆盖类型为常绿针叶林，其环境与寒冷季节高纬度地区类似，因此表现出不同于其他低纬度的变化特征。

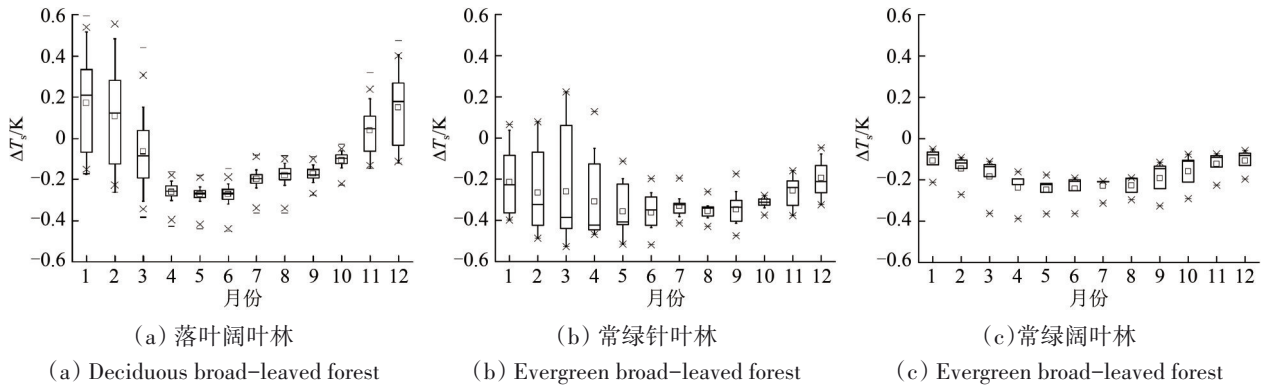
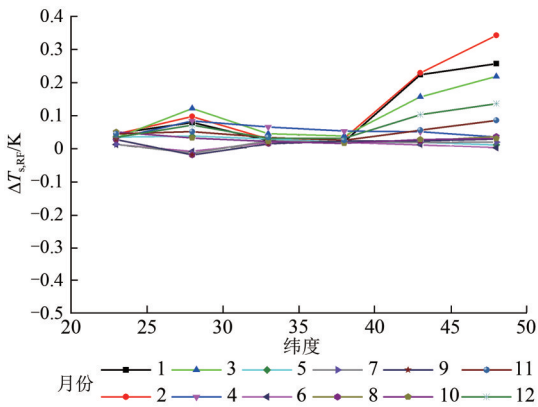


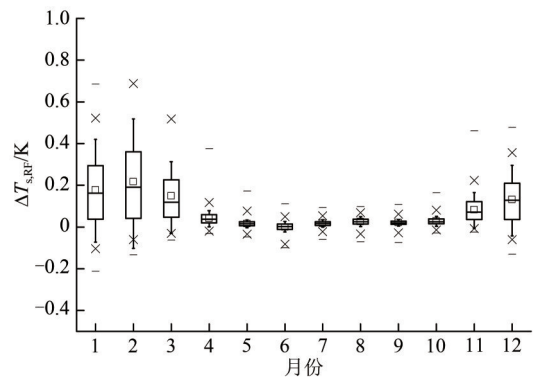
图4 不同林地类型、不同月份下植树造林对地表温度的影响

Fig. 4 The influence of afforestation on land surface temperature over different forest types in each month



(a) 不同月份下植树造林对地表温度的辐射效应($\Delta T_{s,RF}$)随纬度的变化

(a) The latitudinal distribution of the radiative effect of afforestation on land surface temperature in each month



(b) 不同月份下植树造林对地表温度的辐射效应($\Delta T_{s,RF}$)的四分位图

(b) A quartile diagram of the radiative effect of afforestation on land surface temperature in each month

图5 植树造林对地表温度的辐射效应

Fig. 5 Radiative effect of afforestation on land surface temperature

图5 (b) 显示了不同月份下植树造林对地表温度的辐射效应 ($\Delta T_{s, RF}$) 的四分位图。由图5可知，1、2、3、11、12月份的 $\Delta T_{s, RF}$ 值较高，且月内各样本点值差异较大，但均值均小于0.2 K。除此之外，其他月份的 $\Delta T_{s, RF}$ 值都接近0 K，且月内各样本点值差异并不明显。由图5可知，植树造林对地表温度的辐射效应表现为增温作用，但是高纬度寒冷季节林地与开阔地的反照率差值较大，因此由公式 $\Delta R_n^* = -SW_{\downarrow} \Delta \alpha$ 可知，在高纬度寒冷

季节月均净辐射差值较大，与其他月份相比植树造林辐射效应的增温作用较为强烈。

3.4 植树造林对地表温度的非辐射效应

图6 (a) 显示了不同月份下能量再分配因子主导的植树造林对地表温度的影响 ($\Delta T_{s, r}$) 随纬度的变化。能量再分配因子主导的植树造林对地表温度的影响除高纬度个别月份呈现升温作用外，其他月份各纬度均为降温作用。 $\Delta T_{s, r}$ 主要为量化的由农田或草地转为林地后表现出的由于地表类型

变化而引起的地表温度变化。 $\Delta T_{s,f}$ 实际上是取决于对流和蒸散的能量再分配，由于林地有较大的空气动力学阻抗，其与开阔地相比能更有效地散热到大气边界层 (Rotenberg, 2010)。图6 (b) 显示了地表热通量主导的植树造林对地表温度的影响 ($\Delta T_{s,c}$)，在温暖季节林地比开阔地能去除更多

的潜热，通过云凝结在大气边界层上方释放出来。如图所示，在冬季和秋季部分月份的高纬度地区主要为降温作用，而其他季节表现为升温作用，但是在各月份各纬度地表温度变化均不明显，其值均接近于0 K。

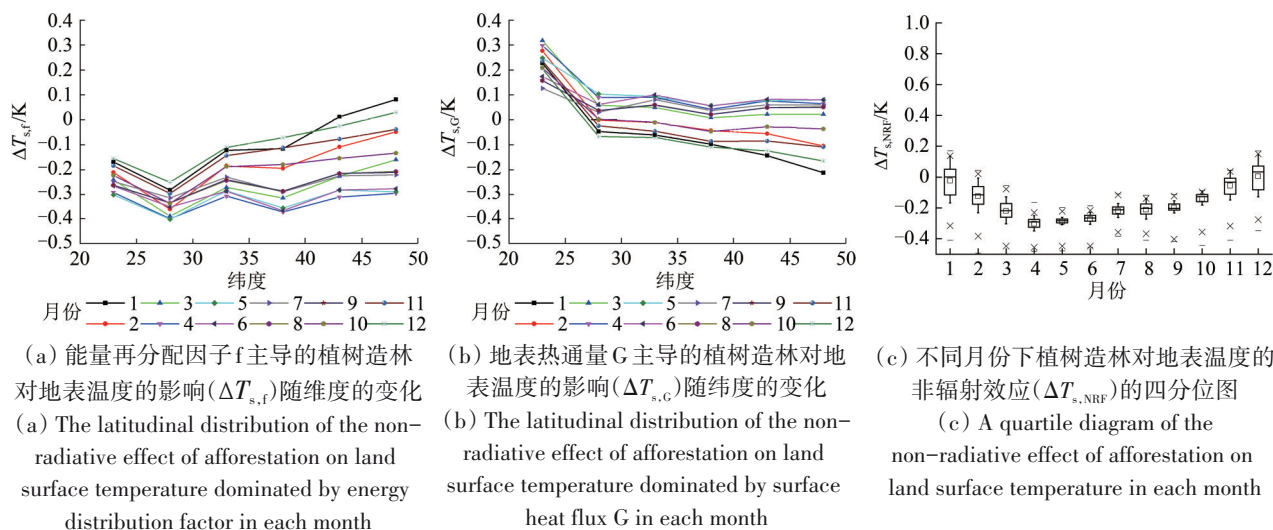


图6 植树造林对地表温度的非辐射效应

Fig. 6 Non-radiative effect of afforestation on land surface temperature

图6 (c) 显示了不同月份下植树造林对地表温度的非辐射效应 ($\Delta T_{s,NRF}$) 的四分位图。 $\Delta T_{s,NRF}$ 在1、2、11、12月份有部分值为正值，表现为升温作用，而其他月份均表现为降温作用。除12月份之外，其他月份的均值都为负值，表明全国总体而言降温作用更为强烈。其原因因为林地比开阔地具有更高的空气动力学阻抗，能够有效地将热量散发到大气中，再加上地表热通量在林地的散热作用，因此植树造林对地表温度的非辐射效应主要为降温作用。

由于植树造林对地表温度的辐射效应和非辐射效应在各纬度的影响不同，本研究将植树造林对地表温度的非辐射效应的百分比作为其各纬度各季节不同影响的量化。由图7可知，春、夏以及秋季各纬度植树造林对地表温度的非辐射效应的百分比均超过50%，表明植树造林非辐射效应对地表温度的影响作用中起主导地位，但是在冬季的高纬度地区非辐射效应占比较小，辐射效应居主导地位。结果表明在寒冷季节的高纬度地区由于辐射效应起主要作用，所以植树造林对地表温度的影响为增温作用，而其他季节则由于非辐射效应占主导地位，因此降温作用更加强烈。这与

图3 (a) 不同月份下植树造林对地表温度的影响 (ΔT_s) 随纬度变化的研究结果一致。这可能与植被生长过程有关，在生长季节蒸发蒸腾作用较为强烈，因此非辐射影响较为强烈。而在冬季高纬度地区树木生长较为缓慢，植被生长活动并不活跃，因此辐射作用占主导作用。由于中国幅员辽阔，南北纬度差异较大，在研究植树造林对地表温度的影响时兼具低纬度降温以及高纬度增温作用的影响，因此在具体政策实施时应考虑当地气候生态环境做到因地制宜。

3.5 对比IBM方法计算的 ΔT_s 与卫星观测的 ΔT_{ss}

对比图8和图3 (b) 可以看出，卫星观测的植树造林对地表温度的影响 (ΔT_{ss}) 比IBM方法计算的植树造林对地表温度的影响 (ΔT_s) 更大，而IBM方法从物理学的角度将造林区地表温度的变化归因于植被的影响，这是因为该方法排除其他地表温度的影响因素，例如植被冠层对地表温度值的影响，而卫星观测的开阔地与森林之间的地表温度差异有可能是其他因素综合影响下的结果。除此之外，卫星观测的地表温度变化趋势与IBM方法计算的地表温度变化趋势相似，在温暖季节

比寒冷季节降温作用更加强烈,其中5—6月份值最低,其月均值可达 -5 K ,表明除植被对地表温度产生影响外,其他因素对地表温度也会产生一定的影响。而1—2月份卫星观测的值与IBM方法计算的值差别更大,这可能是由于样本点较多分布在辽东、华北以及长江流域各省,而该地区冬小麦广泛种植,农田地表温度较高,而样本点植被类型大部分为落叶阔叶林,地表温度较低,因此在1—2月份值异常低。因此,卫星观测的植树造林对地表温度的影响比IBM方法计算的植树造林对地表温度的影响更大,这是由于其他地表温度影响因子的综合影响,但其月变化趋势相似。

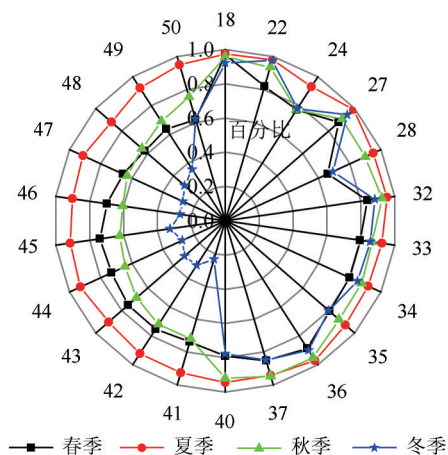


图7 植树造林对地表温度的非辐射效应的百分比

Fig. 7 Percentage of the non-radiative effect of afforestation on land surface temperature

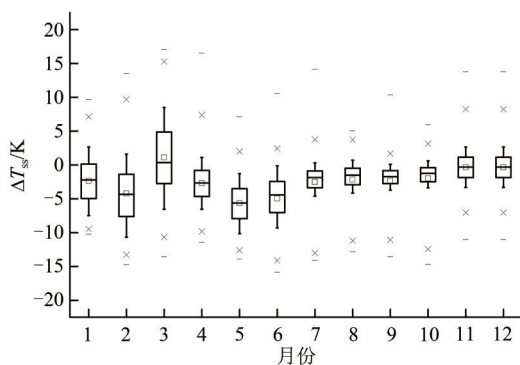


图8 卫星观测的植树造林对地表温度的影响

Fig. 8 Satellite observation of the impact of afforestation on land surface temperature

4 结论

本文利用IBM方法,以空间代替时间的思想研究了中国区域植树造林对地表温度的辐射效应和非辐射效应,分析了不同纬度和不同林地类型下植树造林对地表温度的影响。主要结论如下:

(1) 植树造林对地表温度的影响以降温作用为主,寒冷季节的高纬度地区存在增温现象。这与植被的生物物理属性有关,高纬度寒冷季节林地与开阔地之间的反照率差值较大,林地反照率小于开阔地反照率,而温暖季节由于农田与草地下垫面发生变化,反照率差值较小,反照率增温作用减弱。同时叶面积指数也会影响植树造林对地表温度的作用。叶面积指数越大,植被的蒸腾蒸发作用越强烈,对地表温度降温作用增强。因此在寒冷季节的高纬度地区为增温作用,而在温暖季节的所有纬度均表现为降温作用。

(2) 植树造林对地表温度的辐射效应主要为增温作用,但是该影响随纬度、月份变化增温作用变化并不明显。植树造林对地表温度的非辐射效应主要为降温作用,降温作用随纬度增高而减小,且在寒冷季节的高纬度地区表现为增温作用。总体而言,在寒冷季节高纬度地区植被增长对地表温度的辐射效应占主导地位,而其他季节各纬度对地表温度的影响占主导地位的是非辐射效应。

(3) 开阔地转为落叶阔叶林时植树造林对地表温度的影响与植树造林对地表温度的总影响变化相似,在高纬度寒冷季节表现为增温作用,在其他季节各纬度均表现为降温作用。而开阔地转为常绿针叶林、常绿阔叶林时植树造林对地表温度的影响在各纬度各季节均表现为降温作用,但影响特征有所不同,若开阔地转为常绿针叶林则月内值波动较大,而转为常绿阔叶林则月内值则较为集中,在均值上下浮动。

(4) 卫星观测的植树造林对地表温度的影响与IBM方法计算的植树造林对地表温度的影响更大。但其月变化趋势相似,在温暖季节较寒冷季节降温作用更加强烈。研究表明IBM方法能将其其他影响地表温度的因素剥离,对植树造林影响下的地表温度计算更加科学。

在中国持续造林的背景下研究植树造林对地表温度的影响,对现行的造林政策具有重要的现实意义,为完成2060年国家实现碳中和目标以及其他环境问题具有战略理论指导意义。由于中国疆域辽阔,因此在研究中国植树造林政策中并不能单纯判断增温或者降温作用,而应根据本地区气候生态环境制定相应政策。本研究采用1979年—2018年青藏高原科学数据研究中心发布的数据。该数据相比其他国际同类数据精度更好,但是由于该数据空间分辨率为 0.1° ,植树造林对地表温度

的影响为大尺度模式下的研究, 因此在小区域范围内植树造林对地表温度的影响还需进一步研究。此外, 由于选取的样本点筛选标准较为严格, 损失较多样本点, 造成样本点大部分集中在东部, 未来还需制定较为合适的样本筛选标准, 对包括西部地区植树造林的影响进行进一步研究。

参考文献(References)

- Anderson R G, Canadell J G, Randerson J T, Jackson R B, Hungate B A, Baldocchi D D, Ban-Weiss G A, Bonan G B, Caldeira K, Cao L, Diffenbaugh N S, Gurney K R, Kueppers L M, Law B E, Luysaert S and O'halloran T L. 2011. Biophysical considerations in forestry for climate protection. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(3): 174-182 [DOI: 10.1890/090179]
- Betts R. 2007. Implications of land ecosystem-atmosphere interactions for strategies for climate change adaptation and mitigation. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59(3): 602-615 [DOI: 10.1111/j.1600-0889.2007.00284.x]
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882): 1444-1449 [DOI: 10.1126/science.1155121]
- Bright R M, Davin E, O'halloran T, Pongratz J, Zhao K G and Cesca-ti A. 2017. Local temperature response to land cover and management change driven by non-radiative processes. *Nature Climate Change*, 7(4): 296-302 [DOI: 10.1038/nclimate3250]
- Chen C, Wang L, Myneni R B and Lin D. 2020. Attribution of land-use/land-cover change induced surface temperature anomaly: how accurate is the first-order Taylor series expansion?. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(9): e2020JG005787 [DOI: 10.1029/2020JG005787]
- Duan S B, Li Z L, Li H, Frank-M. Götttsche, Wu H, Zhao W, Leng P, Zhang X and César Coll. 2019. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 225, 16-29
- Duan S B, Ru C, Li Z L, Wang M M, Xu H Q, Li H, Wu P H, Zhan W F, Zhou J, Zhao W, Ren H Z, Wu H, Tang B H, Zhang X, Shang Guo F and Qin Z H. 2021. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1591-1617 (段四波, 茹晨, 李召良, 王猛猛, 徐涵秋, 历华, 吴鹏海, 占文凤, 周纪, 赵伟, 任华忠, 吴骅, 唐伯惠, 张霞, 尚国玮, 覃志豪. 2021. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展. *遥感学报*, 25(8): 1591-1617) [DOI: 10.11834/jrs.20211296]
- Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, Schneider A, Ramankutty N, Sibley A and Huang X M. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 168-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.016]
- Gao F, He T, Wang Z S, Ghimire B, Shuai Y M, Masek J G, Schaaf C and Williams C. 2014. Multiscale climatological albedo look-up maps derived from moderate resolution imaging spectroradiometer BRDF/albedo products. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 083532 [DOI: 10.1117/1.JRS.8.083532]
- Ge J, Guo W D, Pitman A J, Kauwe M G D, Chen X L and Fu C B. 2019. The nonradiative effect dominates local surface temperature change caused by afforestation in China. *Journal of Climate*, 32(14): 4445-4471 [DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0772.1]
- Guan Y L, Wang R H, Yao J, Qin J K and Zhu M. 2015. Features of surface albedo of Tianshan Mountains area under the background of climate change. *Arid Land Geography*, 38(2): 351-358 (管延龙, 王让会, 姚建, 秦晋凯, 朱旻. 2015. 气候变化背景下天山区域地表反照率特征分析. *干旱区地理*, 38(2): 351-358) [DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.02.019]
- He T. 2016. Effects of Afforestation on Land Surface Energy Balance and Regional Temperature Based on Surface Remote-Sensing Model. Beijing: Graduate Department of Chinese Academy of Sciences (贺添. 2016. 基于地面-遥感-模型的造林对地表能量平衡及区域温度的影响研究. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所)
- He T, Shao Q Q, Cao W, Huang L and Liu L L. 2015. Satellite-observed energy budget change of deforestation in northeastern China and its climate implications. *Remote Sensing*, 7(9): 11586-11601 [DOI: 10.3390/rs70911586]
- Juang J Y, Katul G, Siqueira M, Stoy P and Novick K. 2007. Separating the effects of albedo from eco-physiological changes on surface temperature along a successional chronosequence in the southeastern United States. *Geophysical Research Letters*, 34(21): L21408 [DOI: 10.1029/2007GL031296]
- Lawrence D and Vandecar K. 2015. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change*, 5(1): 27-36 [DOI: 10.1038/nclimate2430]
- Lee X H, Goulden M L, Hollinger D Y, Barr A, Black T A, Bohrer G, Bracho R, Drake B, Goldstein A, Gu L H, Katul G, Kolb T, Law B E, Margolis H, Meyers T, Monson R, Munger W, Oren R, Kyaw T P U, Richardson A D, Schmid H P, Staebler R, Wofsy S and Zhao L. 2011. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature*, 479(7373): 384-387 [DOI: 10.1038/nature10588]
- Li D and Wang L. 2019. Sensitivity of surface temperature to land use and land cover change-induced biophysical changes: the scale issue. *Geophysical Research Letters*, 46(16): 9678-9689 [DOI: 10.1029/2019GL084861]
- Li Y, Zhao M S, Motesharrei S, Mu Q Z, Kalnay E and Li S C. 2015. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 6(1): 6603 [DOI: 10.1038/ncomms7603]
- Luyssaert S, Jammot M, Stoy, P C, Estel S, Pongratz J, Ceschia E, Churkina G, Don A, Erb K, Ferlicoq M, Gielen B, Grünwald T, Houghton R A, Klumpp K, Knohl A, Kolb T, Kuemmerle T, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Mcgrath M J, Meyfroidt P, Moors E J, Naudts K, Novick K, Otto J, Pilegaard K, Pio C A, Rambal S, Rebmann C, Ryder J, Suyker A E, Varlagin A, Wattenbach M and Dolman A J. 2014. Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature. *Nature Climate Change*, 4(5): 389-393 [DOI: 10.1038/nclimate2196]
- Mahmood R, Pielke P A, Hubbard K G, Niyogi D, Dirmeyer P A, Mcalpine C, Carleton A M, Hale R, Gameda S, Beltrán-Przekurat A, Baker B, Mcnider R, Legates D R, Shepherd M, Du J Y, Blanken P D, Frauenfeld O W, Nair U S and Fall S. 2014. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, 34(4): 929-953 [DOI: 10.1002/joc.3736]
- Oleson K W, Bonan G B, Levis S and Vertenstein M. 2004. Effects of land use change on North American climate: impact of surface datasets and model biogeophysics. *Climate Dynamics*, 23(2): 117-132 [DOI: 10.1007/s00382-004-0426-9]
- Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, Ciais P, Zhou L, Li L Z X, Myneni R B, Yin Y and Zeng H. 2014. Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of Sci-*

- ences of the United States of America, 111(8): 2915-2919 [DOI: 10.1073/pnas.1315126111]
- Pielke R A, Marland G, Betts R A, Chase T N, Eastman J L, Niles J O, Niyogi D D S and Running S W. 2002. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 360(1797): 1705-1719 [DOI: 10.1098/rsta.2002.1027]
- Pielke R A, Pitman A, Niyogi D, Mahmood R, Mcalpine C, Hossain F, Goldewijk K K, Nair U, Betts R, Fall S, Reichstein M, Kabat P and Noblet N D. 2011. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 2(6): 828-850 [DOI: 10.1002/wcc.144]
- Rotenberg E and Yakir D. 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science*, 327(5964): 451-454 [DOI: 10.1126/science.1179998]
- Shen W J, He J Y, Huang C Q and Li M S. 2020. Quantifying the actual impacts of forest cover change on surface temperature in Guangdong, China. *Remote Sensing*, 12(15): 2354. [DOI: 10.3390/rs12152354]
- Wang L, Lee X, Schultz N, Chen S, Wei Z, Fu C, Gao Y, Yang Y and Lin G. 2018. Response of surface temperature to afforestation in the Kubuqi Desert, Inner Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(2):948-964
- Wang M N, Hang Z and Zhang Q Y. 2016. Impact of land use and cover change in the semi-arid regions of China on the temperature in the early 21st century. *Climatic and Environmental Research*, 21(1): 65-77 (王明娜, 韩哲, 张庆云. 2016. 21世纪初中国北方半干旱区土地利用变化对地表温度的影响. *气候与环境研究*, 21(1): 65-77) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15197]
- Wang Y S. 2018. Inter-decadal and interannual change of precipitation in the Qiangtang Plateau and possible mechanism. Nanjing: Nanjing University (王彦双. 2018. 羌塘高原年代际和年际降水变化及原因探究. 南京: 南京大学)
- Zhao K G and Jackson R B. 2014. Biophysical forcings of land-use changes from potential forestry activities in North America. *Ecological Monographs*, 84(2): 329-353.
- Zhao W X, Du H M, Dong T X and Hu L L. 2018. Temporal-spatial characteristics of the vegetation net primary production in the farming-pastoral eco-tone of Southern China during 2005-2014. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(6): 236-241 (赵唯茜, 杜华明, 董廷旭, 胡利利. 2018. 2005-2014年南方农牧交错带净初级生产力时空分布特征. *水土保持研究*, 25(6): 236-241) [DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.035]
- Zhu J S, Ren H Z, Ye X, Zeng H, Nie J, Jiang C C and Guo J X. 2021. Ground validation of land surface temperature and surface emissivity from thermal infrared remote sensing data: A review. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1538-1566 (朱金顺, 任华忠, 叶昕, 曾晖, 聂婧, 蒋晨琛, 郭金鑫. 2021. 热红外遥感地表温度与发射率地面验证进展. *遥感学报*, 25(8): 1538-1566) [DOI: 10.11834/jrs.20211299]

The influence of afforestation on land surface temperature in China

WANG Liping^{1,2}, DUAN Sibon², ZHANG Xiaoyu¹, CHANG Sheng³, LIU Xiangyang², HUANG Cheng², QIAN Yonggang³

1. School of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: In recent years, as China's afforestation plan continues, vegetation cover has continued to increase, which in turn affects China's surface environment. Land Surface Temperature (LST) is an important parameter that characterizes the physical processes of the surface, and is the driving factor for the energy exchange between the surface and the atmosphere. It is widely used in the research of basic subjects such as climate, hydrology, ecology and meteorology, and is one of the key parameters in many basic researches. To study the impact of afforestation strategies on local and regional scales and guide the implementation of corresponding policies, this study uses the IBM (Intrinsic Biophysical Mechanism) method to investigate the impact of afforestation in China on LST, and discusses the effects of radiative and non-radiative forcing and different vegetation cover types on LST. The results show that: (1) the influence of afforestation on LST is shown as a warming effect in the cold season in high latitudes, but as a cooling effect at all latitudes in the warm season. (2) The radiative effect of afforestation on LST in high latitude areas in cold season is relatively strong, while in other seasons, the non-radiative effect of afforestation on LST at various latitudes is dominant, and the radiative effect is relatively weak. (3) When open land is converted to forest land, different types of forest land cover have different characteristics of impact on LST. When open land is converted to deciduous broad-leaved forest, the impact on LST is similar to the overall impact of afforestation on LST, showing a warming effect in high latitude areas in the cold season, and a cooling effect in low latitude areas. The effect of open land into evergreen coniferous forests and evergreen broad-leaved forests on LST is shown as a cooling effect. This study analyzes the impact of afforestation on LST in the context of continuous afforestation in China. The research has practical significance for current afforestation policies and provides theoretical guidance for future afforestation strategies.

Key words: land surface temperature, IBM method, afforestation, non-radiative effect

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0500400); National Natural Science Foundation of China (No.41871275)