

中国温带昼夜增温的季节性变化及其对 植被动态的影响

赵 杰¹, 杜自强¹, 武志涛¹, 张 红², 郭 娜³, 马志婷¹, 刘雪佳²

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006;

3. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059)

摘要: 结合 1982-2015 年归一化植被指数(NDVI)、植被类型和气象数据, 分别利用一元线性回归和二阶偏相关分析方法, 揭示了中国温带地区的生长季不同季节昼夜增温的时空格局以及昼夜增温的不对称性对各类型植被活动的影响。结果表明: ① 近 34 年来中国温带大部分地区季节性昼夜气温都存在显著的上升趋势; 生长季昼夜增温速率呈现出不对称性, 春季、夏季白天气温上升速度略快于夜间, 秋季夜间增温快于白天; ② 不同季节的昼夜增温对植被活动的影响呈现出明显的分异特征, 相对于夜间增温, 白天增温对植被活动影响程度更大, 影响区域更为广泛; 相比夏季和秋季, 春季昼夜增温对植被活动的影响范围更广; ③ 不同类型植被对昼夜增温速率的不对称性产生了不同的响应, 并且在不同季节上的响应程度存在差异。

关键词: 昼夜增温; 植被动态; 季节性变化; 中国温带

DOI: 10.11821/dlxb201803001

1 引言

植被作为陆地生态系统的核心组成部分, 是全球变化与陆地生态系统变化的“指示器”, 在连接大气圈、水圈、土壤圈的物质循环和能量流动方面扮演着重要角色^[1-2]。归一化植被指数(Normal difference vegetation index, NDVI)能够在较大时空尺度上客观反映植被动态状况, 是表征植被活动和生产力的常用指标^[1-2]。温度、降水等气候因素的变化是植被活动的重要影响因素^[3-7]。国内外关于植被动态与气候因子变化关系的研究^[3-7]表明, 植被生长与气候条件的关系随着植被类型、时间和空间等的不同而有所差异。然而, 这些研究大多集中在揭示气候因子的平均状态对植被变化的影响, 而忽略了季节性不对称变化对植被活动的影响。

目前, 越来越多的研究表明全球变暖具备昼夜增温速率不一致和季节增温速率不一致的特征^[8-11]。例如, 全球变暖存在夜间增温快于白天增温的趋势^[9-10], 北半球高纬度地区夏季增温速率快于春季和秋季, 且季节温度差异呈现缩小趋势^[11]。相应地, 这种不对称的昼夜增温对植被活动的影响也引起了部分学者的关注^[12-15]。例如, Wan 等^[12]的增温控制实验显示在中国北方温带草原白天增温抑制植被的生长, 而夜间增温则能够促进植被生

收稿日期: 2017-06-11; 修订日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161066, 41401643, 41401053) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41161066, No.41401643, No.41401053]

作者简介: 赵杰(1993-), 男, 山东临沂人, 硕士生, 中国地理学会会员(S110011580A), 主要从事植被与生态遥感、全球变化生态学等方面的研究。E-mail: sxuzhaojie@163.com

通讯作者: 杜自强(1974-), 男, 陕西宝鸡人, 副教授, 研究生导师, 主要从事植被与生态遥感、土地变化科学与全球变化生态学方面的研究工作。E-mail: duzq@sxu.edu.cn

产力的提高。Peng 等^[13]研究表明白天温度的升高有利于北半球寒温带湿润地区植被的生长,但并不利于温带干旱和半干旱地区植被生长,而夜间温度的上升对植被生长的影响与之相反。Rossi 等^[14]发现,相对于白天增温,夜间增温更易促使黑云杉发芽期提前。赵杰等^[15]发现在新疆地区白天增温利于针叶林的生长,夜间增温对针叶林、农业植被、草原等表现出显著的积极影响。然而,上述研究普遍基于整个生长季尺度,可能掩盖植被对昼夜增温响应的季节性差异。在温带地区,植被的光合作用特性往往表现出明显的季节性周期^[16],植被生长对温度变化的响应也因季节的不同而有所差异^[16-18]。尽管 Tan 等通过遥感数据和气象数据分析了北半球植被对昼夜增温的季节性响应特征,但目前对昼夜增温的季节性差异以及对植被活动影响的研究仍然较为匮乏^[17]。

中国温带地区(30°N 以北的中国全部地区^[19])受东部季风气候和西北干旱气候的共同影响^[20],水热条件具有显著的季节变化和空间差异,适于进行大尺度、长时间序列的植被对气候变化响应关系研究^[20-21]。鉴于此,本文利用 1982-2015 年新一代 NDVI 数据集以及植被分类数据和气象数据,分析中国温带地区的生长季不同季节昼夜增温的时空格局以及不对称的昼夜增温性对不同类型植被活动的影响,以期增强全球气候变化背景下季节性昼夜温度变化对中国温带陆地地区植被活动影响的认识,为不同类型植被对全球不对称增温响应研究提供案例。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 遥感数据 植被 NDVI 数据集是由美国国家航空航天局的全球观测模拟与制图研究组提供的第 3 代 NOAA/AVHRR 遥感数据(GIMMS NDVI3g)(<http://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>),其空间分辨率约为 8 km,时间分辨率为 15 d,时间跨度是 1982-2015 年。该数据集消除了太阳高度角、传感器灵敏度随时间变化等影响,并结合交叉辐射定标的方法,增强了数据的精度,已被广泛应用于大区域与全球尺度植被覆盖研究中^[7, 22]。为进一步去除云层干扰,并减少月内物候循环的影响^[23],采用最大值合成法重建中国温带生长季各月 NDVI 数据集。根据相关研究^[13, 18],将每年的 4-10 月定义为该年的生长季,并进一步将年生长季 NDVI 均值大于 0.1 的区域定义为植被区域。

2.1.2 气象数据 同期的月最高气温(T_{\max})、月最低气温(T_{\min})、降水量等气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料月值数据集。通过反距离权重法对各个气象因子进行空间插值^[24],生成与 NDVI 数据具有相同投影方式和空间分辨率的栅格数据。考虑到中国温带地区植被生长规律,将 4-5 月、6-8 月、9-10 月分别作为中国温带地区的春季、夏季和秋季,其分别大致对应着植被从变绿到成熟,成熟到衰老,衰老到休眠 3 个生理过程^[17]。

2.1.3 植被类型数据 植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心《1:100 万中国植被图集》。该数据包含 11 个植被类型组、54 个植被型的 796 个群系和亚群系植被单位的分布状况、水平地区性和垂直地区性分布规律。据此植被图集,本文主要植被类型包括:草丛、草甸、草原、灌丛、高山植被、荒漠、阔叶林、栽培植被、针叶林和沼泽。这 10 种类型的植被面积占中国温带植被覆盖面积的 99% 以上。

2.2 研究方法

2.2.1 气候要素趋势分析 采用最小二乘法拟合气候要素的变化速率^[2],即气候要素 y 随时间 t 变化的线性回归系数,可采用一元一次方程表示:

$$y = at + b + \varepsilon \quad (1)$$

式中: t 表示时间序列的年份; a 为回归系数; b 为回归常数项; ε 为残差。通过 t 检验来检验线性回归系数的显著性, $P < 0.05$ 表示回归系数显著, $P < 0.01$ 表示回归系数极显著。本文基于 1982-2015 年各季节 T_{\max} 、 T_{\min} 的每一像元逐年均值, 逐像元分析各季节昼夜温度变化趋势, 用以说明中国温带植被覆盖地区昼夜温度变化的时空格局。

2.2.2 偏相关分析法 采用二阶偏相关分析法, 消除其他变量的干扰来研究昼夜增温的不对称性对植被 NDVI 的影响^[13, 15]。基于各季节植被 NDVI、 T_{\max} 、 T_{\min} 和降水量的逐像元年均值, 逐像元计算 NDVI 和 T_{\max} 、 T_{\min} 的偏相关系数。其中, 通过限制 T_{\min} 和降水量计算生长季 NDVI 与 T_{\max} 的偏相关系数; 限制 T_{\max} 和降水量计算生长季 NDVI 和 T_{\min} 的偏相关系数。

二阶偏相关系数通过一阶偏相关系数计算得到, 而计算一阶偏相关系数需要首先计算相关系数。相关系数的计算公式为^[15]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

一阶偏相关系数的计算公式为:

$$r_{xy \cdot 1} = \frac{r_{xy} - r_{x1}r_{y1}}{\sqrt{1 - r_{x1}^2} \sqrt{1 - r_{y1}^2}} \quad (3)$$

二阶偏相关系数的计算公式为:

$$r_{xy \cdot 12} = \frac{r_{xy \cdot 1} - r_{x2 \cdot 1}r_{y2 \cdot 1}}{\sqrt{1 - r_{x2 \cdot 1}^2} \sqrt{1 - r_{y2 \cdot 1}^2}} \quad (4)$$

式中: x 、 y 为需要进行偏相关系数计算的要素; 1、2 为控制变量; $r_{xy \cdot 12}$ 为二阶偏相关系数; $r_{xy \cdot 1}$ 、 $r_{x2 \cdot 1}$ 、 $r_{y2 \cdot 1}$ 均为一阶偏相关系数。偏相关系数的显著性检验, 一般采用 t 检验法^[25]。

3 结果与分析

3.1 季节性昼夜增温的时空格局

从季节性昼夜增温随时间变化的特征来看 (图 1): T_{\max} 在春、夏、秋三季的线性增长率分别为 $0.44 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($R^2 = 0.30$, $P < 0.01$)、 $0.45 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($R^2 = 0.40$, $P < 0.01$) 和 $0.34 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($R^2 = 0.21$, $P < 0.01$)。 T_{\min} 在这三个季节的线性增长率分别为 $0.41 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($R^2 = 0.34$, $P < 0.01$)、 $0.45 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($R^2 = 0.48$, $P < 0.01$) 和 $0.47 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($R^2 = 0.30$, $P < 0.01$)。显然, 春、夏、秋三季昼夜都呈现出显著的增温趋势。除夏季外, 春季白天的增温速率快于夜间, 秋季夜间的增温速率大于白天, 季节性昼夜增温呈现出不对称特征。

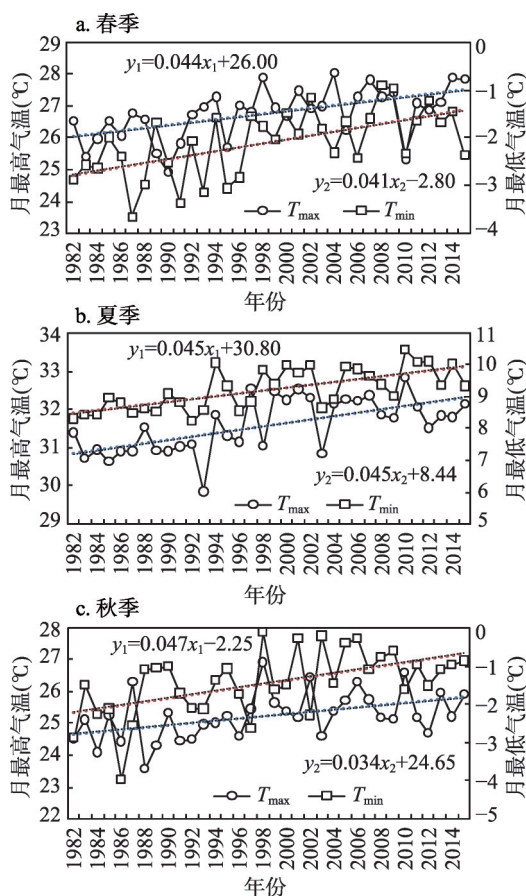


图1 中国温带地区各季节 T_{\max} 、 T_{\min} 变化趋势
Fig. 1 Trends of T_{\max} and T_{\min} by season in China's temperate zone

春季昼夜增温的空间分布(图2)显示,约有98.36%的地区 T_{\max} 呈现上升趋势,约27.57%的地区表现为显著上升,主要位于新疆北部、西藏中部、青海东部、甘肃、黄土高原南部及东北平原南部。 T_{\max} 呈现为下降趋势的地区较少,且皆未通过显著性检验(图2a)。约93.55%的区域 T_{\min} 呈现为上升趋势,通过显著性检验的区域占温带地区的37.31%。 T_{\min} 呈现显著上升的地区主要位于新疆西部、西藏中部、青海西南部、四川北部、华北平原及东北平原北部,下降趋势的地区主要位于黄土高原中部及黑龙江西北部,通过显著性检验的地区仅占温带地区的0.16%(图2b)。

夏季昼夜增温的空间分布(图3)显示,约占温带99.38%的地区 T_{\max} 呈现上升趋势,其中,62.67%的温带地区表现出显著上升趋势,主要集中在新疆北部、内蒙古中东部、华北平原南部、长江中下游平原及温带中部内陆地区。 T_{\max} 呈现为下降趋势的地区较少,且皆未通过显著性检验(图3a)。绝大部分地区 T_{\min} 表现为上升趋势,显著上升的地区占温带总面积的70.56%,主要分布于新疆、西藏、内蒙古中部、东北平原北部、东部沿海及华北平原以西的大部分地区。 T_{\min} 呈现为显著下降趋势的地区集中分布在黑龙江西北部,且仅占温带地区的0.27%(图3b)。

秋季昼夜增温的空间分布(图4)显示, T_{\max} 主要呈现为上升趋势,占温带地区的91.6%。其中约占温带29.89%的地区通过显著性检验,主要位于西藏中部、青海、甘肃及东北地区中部。 T_{\max} 呈现下降趋势的地区仅占温带地区的8.40%,且皆未通过显著性检验(图4a)。 T_{\min} 呈现上升趋势的地区占温带地区的93.64%,且通过显著性检验的地区高达44.47%,该地区主要位于新疆西部、西藏西部、青海南部、河南、山西北部、吉林西

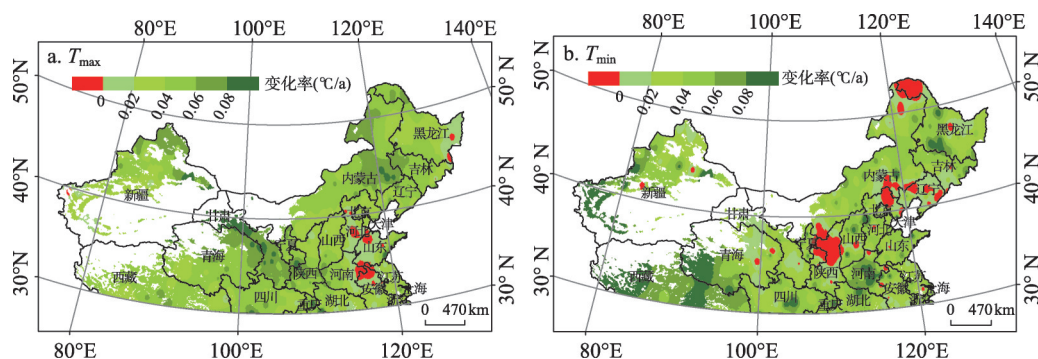


图2 中国温带地区春季 T_{\max} 、 T_{\min} 增温速率分布

Fig. 2 Spatial patterns of warming rate in spring in China's temperature zone

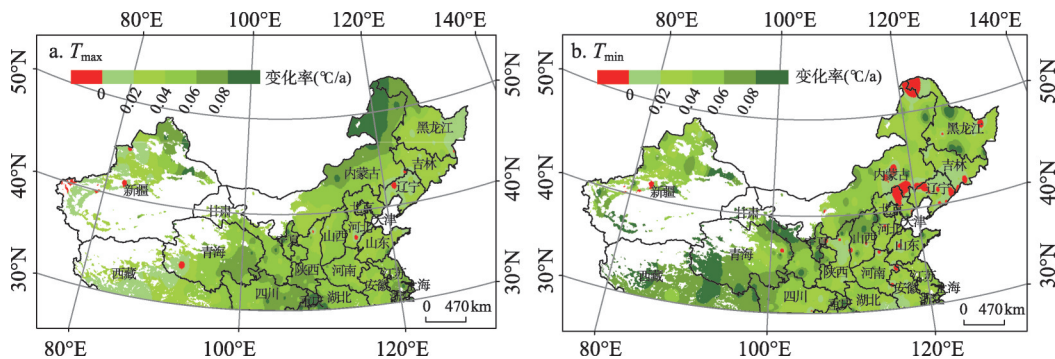


图3 中国温带地区夏季 T_{\max} 、 T_{\min} 增温速率分布

Fig. 3 Spatial patterns of warming rate in summer in China's temperature zone

北部及江苏南部地区。 T_{\min} 呈现为显著下降趋势的地区仅占温带地区的0.10%,该地区零星分布在河北省及辽宁省(图4b)。

3.2 植被NDVI同季节性昼夜温度的相关性

近34年来,春、夏、秋各季节植被NDVI与 T_{\max} 的偏相关系数均为正值。春、夏、秋各个季节的偏相关系数分别为0.453、0.345、0.327,其中春季为极显著相关($P < 0.01$),其他季节相关性均不显著。春、夏、秋三个季节植被NDVI与 T_{\min} 的偏相关系数分别为0.333、-0.091、0.311,均未通过显著性检验。

从春季植被与昼夜气温的相关性空间分布(图5)来看,NDVI与 T_{\max} 呈现正相关的区域占温带总面积的71.23%,其中通过显著性检验的区域占温带总面积的24.31%,主要分布于新疆北部、青海东部、甘肃南部、陕西南部、四川北部及东北地区。NDVI同 T_{\max} 呈现负相关的地区较少,通过显著性检验的面积仅占温带总面积的1.79%,主要分布在河南北部及山东中西部地区。NDVI同 T_{\min} 呈现正相关的地区面积比例为65.44%,通过显著性检验的面积占温带总面积的9.03%,主要分布在新疆北部、四川东北部、陕西西南部、山西北部及东北地区北部。NDVI同 T_{\min} 呈现显著负相关的区域仅占温带总面积的3.07%,其零星分布于新疆西南部、西藏北部、青海西部及东北平原地区。

从夏季植被与昼夜气温的相关性空间分布(图6)来看,NDVI与 T_{\max} 呈现正相关的面积比例为57.38%,通过显著性检验的区域占温带总面积的5.08%,主要分布在西藏东

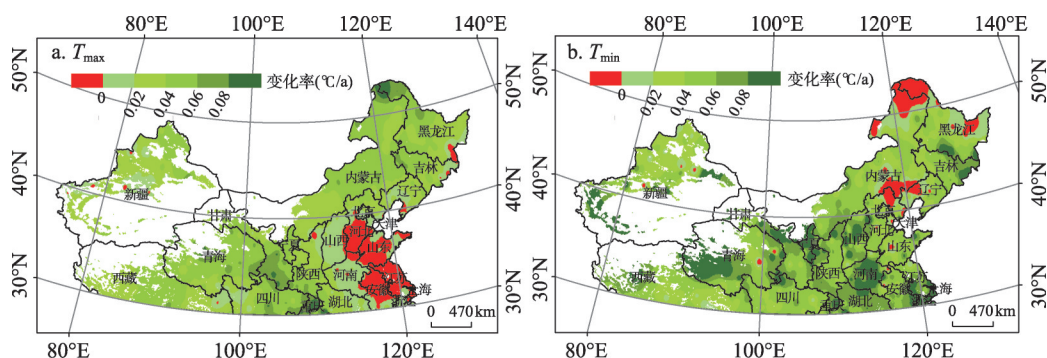
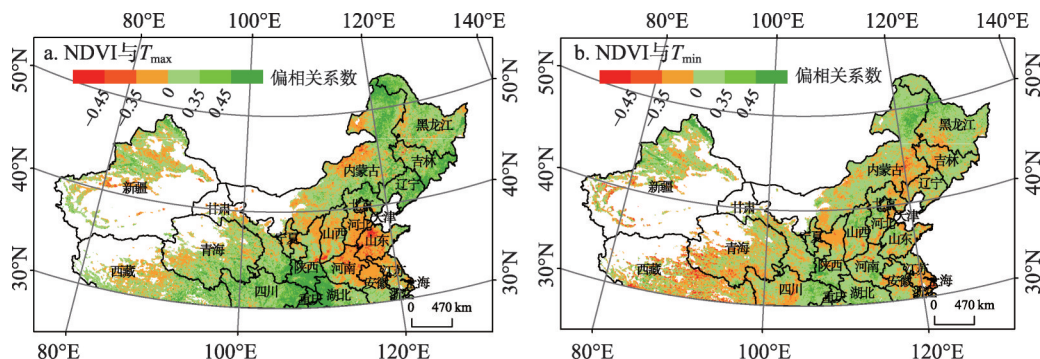


图4 中国温带地区秋季 T_{\max} 、 T_{\min} 增温速率分布

Fig. 4 Spatial patterns of warming rate in autumn in China's temperature zone



注: ± 0.45 和 ± 0.35 分别表示 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 显著性水平的阈值,下同。

图5 中国温带地区春季NDVI与 T_{\max} 、 T_{\min} 偏相关系数空间分布

Fig. 5 Spatial patterns of the partial correlation coefficients in spring for NDVI and T_{\max} and NDVI and T_{\min} in China's temperature zone

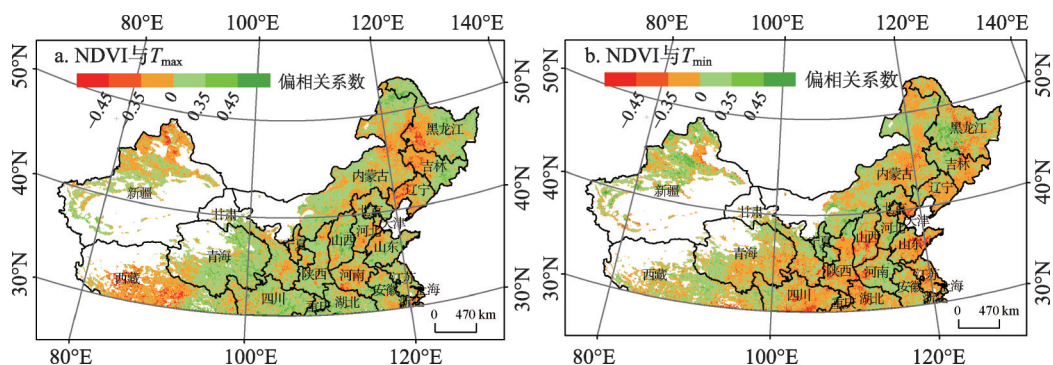


图6 中国温带地区夏季NDVI与 T_{\max} 、 T_{\min} 偏相关系数空间分布

Fig. 6 Spatial patterns of the partial correlation coefficients in summer for NDVI and T_{\max} and NDVI and T_{\min} in China's temperature zone

北部、青海东部、四川北部、湖北中部、山西、山东中部及东北地区北部。NDVI与 T_{\max} 呈现显著负相关的区域占温带面积的比值仅为3.21%，主要分布在新疆西北部、西藏中部、河南中部及东北平原地区。NDVI与 T_{\min} 呈现正相关的面积比值为46.90%。其中通过显著性检验的区域占温带总面积的4.52%，主要零星分布在新疆北部及黑龙江西南部。NDVI同 T_{\min} 呈现显著负相关的面积占温带地区4.33%，主要分布在甘肃南部、四川北部、陕西中部、山西、山东及黑龙江中部地区。

从秋季植被与昼夜气温的相关性空间分布(图7)来看,NDVI与 T_{\max} 呈现正相关的区域占温带总面积的62.78%,通过显著性检验的区域占温带总面积的7.55%,主要位于新疆西部、青海东北部、四川东北部、重庆北部、湖北西部及东北地区北部。NDVI与 T_{\max} 呈现显著负相关的地区主要零星分布于河南西南部、河北南部及呼伦贝尔高原地区,面积仅为温带总面积的0.91%。NDVI同 T_{\min} 呈现为正相关的面积占温带总面积的52.75%。其中,呈现显著正相关的区域占温带总面积的3.37%,主要分布在塔里木盆地北侧、西藏东北部、青海西南部、山西东部、江苏中部及辽宁中东部地区。NDVI与 T_{\min} 呈现为显著负相关的区域占温带总面积的2.62%,主要零星分布在青海东部、湖北中西部、长江中下游平原北部及东北地区北部。

3.3 不同类型植被NDVI对季节性昼夜增温的响应

不同类型植被NDVI与季节 T_{\max} 、 T_{\min} 的偏相关系数(表1)显示:春季灌丛、针叶林、阔叶林、草甸、沼泽植被NDVI与 T_{\max} 表现为极显著正相关($P < 0.01$),高山植被

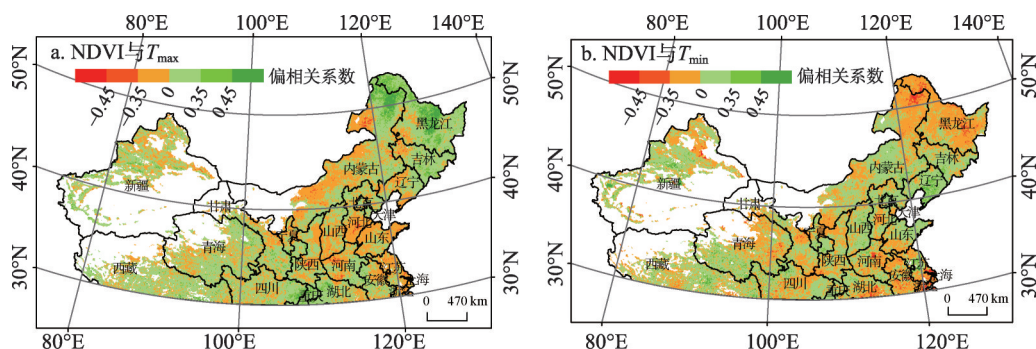


图7 中国温带地区秋季NDVI与 T_{\max} 、 T_{\min} 偏相关系数空间分布

Fig. 7 Spatial patterns of the partial correlation coefficients in autumn for NDVI and T_{\max} and NDVI and T_{\min} in China's temperature zone

NDVI与 T_{\max} 为显著正相关 ($P < 0.05$)。春季各类型植被 NDVI 同 T_{\min} 之间的相关性水平较弱, 仅沼泽和草原植被 NDVI 与 T_{\min} 表现为显著正相关 ($P < 0.05$)。夏季草丛和灌丛植被 NDVI 与 T_{\max} 表现为显著正相关。夏季各类型植被 NDVI 同 T_{\min} 之间的相关性程度较弱, 除草丛表现为显著负相关 ($P < 0.05$) 外, 其余类型植被均未能通过显著性检验。秋季沼泽、阔叶林、针叶林植被 NDVI 与 T_{\max} 表现为极显著正相关 ($P < 0.01$)。秋季各类型植被 NDVI 与 T_{\min} 之间的相关性较弱, 未能通过显著性检验。

表1 不同类型植被 NDVI 与季节 T_{\max} 、 T_{\min} 的偏相关系数

Tab. 1 Partial correlation coefficients of vegetation types for seasonal NDVI and T_{\max} , and seasonal NDVI and T_{\min}

植被类型	春季		夏季		秋季	
	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}
草丛	0.334	0.253	0.511**	-0.415*	0.099	0.231
草甸	0.557**	0.105	0.233	-0.106	0.231	0.321
草原	0.269	0.384*	0.265	0.049	0.046	0.160
灌丛	0.646**	0.171	0.360*	-0.263	0.121	0.267
荒漠	0.063	0.032	-0.068	0.289	0.044	0.142
沼泽	0.467**	0.430*	0.066	0.066	0.527**	-0.203
阔叶林	0.596**	0.248	0.275	-0.205	0.533**	0.015
针叶林	0.602**	0.283	0.235	-0.127	0.509**	-0.016
高山植被	0.437*	-0.305	0.095	0.001	0.044	0.138
栽培植被	0.241	0.155	0.230	-0.030	0.118	0.275

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

4 讨论与结论

4.1 讨论

中国温带地区不同季节昼夜气温都呈现出显著的上升趋势, 季节性昼夜增温存在不对称特征, 且增温趋势在各季节的地域分布差异较为明显。该结论与中国温带部分地区昼夜增温的季节演变特征^[26]基本一致。这种不对称的季节性昼夜增温无疑增加植被对季节温度变化响应的复杂性^[17-18]。例如, Tan 等^[17]在季节尺度上分析北半球昼夜增温对植被光合能力的影响时发现北半球大部分地区 T_{\min} 的变化对春、夏两季植被 NDVI 会产生积极的影响, 但对秋季植被生长不利; T_{\max} 的升高不利于北半球温带干旱地区夏季植被的生长, 但却对寒带地区春季植被产生积极的影响。本文同样发现昼夜增温对中国温带植被的影响程度存在季节性和空间差异。例如, 从三个季节昼夜增温的影响程度来看, 春季昼夜增温对中国温带植被的影响程度高于夏季和秋季, 并且昼夜增温对草甸、草原、灌丛、沼泽、阔叶林和针叶林、高山植被等的影响显著; 从影响空间范围来看, 春、夏、秋三季白天增温的显著影响区域明显大于夜间增温。

本文发现中国温带地区植被对白天增温的响应表现出季节分异特征。例如, 春季大部分地区 T_{\max} 和 NDVI 呈现为正相关关系。这可能与全球变暖引起的大部分地区春季生长期普遍提前有关^[27], 也可能是由于白天增温对植被展叶期、返青期的提前起到了积极作用^[28]。与春季相比, 秋季 T_{\max} 与 NDVI 的相关程度较低, 且植被对白天增温产生积极响应的地区面积较少。这可能由于秋季日均光照时数及太阳辐射量低于春季, 秋季植被生长周期每延长一天增加的生长力低于春季^[29]; 另一方面, 秋季光合作用持续时间及植被生产力对温度的敏感程度低于春季^[29-30]。相比春季和秋季, 夏季 T_{\max} 对植被 NDVI 产生积极影响的区域面积最小, 这可能是由于夏季 T_{\max} 在大部分地区已接近植被生长的最适温度, 使得 NDVI 对 T_{\max} 的敏感程度较低^[31]。除了白天增温能够在春、夏、秋季对植被活动产生促进作用外, 还有一小部分地区植被活动受到白天增温的抑制性影响, 特别夏季 T_{\max} 上升对植被产生不利影响的面积比例最大。其原因可能在于 T_{\max} 的上升会通过增强植被蒸腾作用、降低土壤水分含量及土壤水分的可利用性, 从而对植被活动带来不利影响。例如, Williams 等^[32]发现随着 T_{\max} 的升高, 饱和水汽压差 (VPD) 将以指数方式上升, 而 VPD 的

上升又会通过增加蒸腾作用进一步降低土壤含水量。而且, VPD 升高与土壤含水量降低的耦合作用致使中国温带草原植被叶片气孔导度和冠层光合能力的降低, 进而导致增温背景下净生态系统生产力的下降^[33]。

尽管夜间气温对植被活动产生显著影响的区域所占比例较小, 但类似于白天增温, 夜间增温仍可通过两种方式影响植被生产力: 一方面 T_{\min} 的上升能够通过调节叶片中碳水化合物的含量^[12, 34]、减少霜冻灾害^[35-36]、增强植物群落对干旱的抵抗力^[37], 从而对植被生产力产生积极影响; 另一方面夜间自养呼吸的增加也可能会通过提升植被自养呼吸速率^[38-39]、缩短植物灌浆期^[40-41]、降低成熟阶段胚乳细胞的大小^[42], 对植被生产力造成不利影响。

本文在分析生长季昼夜增温时空格局的基础上, 揭示了中国温带季节性昼夜增温对植被的影响, 有助于深化植被活动对全球变暖响应特征的认识。但是由于数据的可获得性等因素, 本文未能将太阳辐射等其他的气候因子和人为因素作为控制变量考虑。所以, 在以后的研究中需要综合各种因素, 采用控制试验或模型模拟研究等多种方法相互补充, 以进一步厘清季节性昼夜增温对不同植被的影响机理。

4.2 结论

本文利用中国温带地区 1982-2015 年的气象及卫星遥感观测数据集, 分析了生长季不同季节昼夜增温的时空格局, 强调了昼夜季节性不对称变化对植被活动的影响。主要结论为: ① 近 34 年来中国温带地区季节性昼夜增温趋势显著; 昼夜增温速率具有不对称性, 春季、夏季白天气温上升速度略快于夜间, 秋季夜间增温快于白天; 昼夜增温速率在空间格局上也存在明显差异。② 中国温带地区昼夜增温对植被的影响在季节和空间尺度上呈现出明显差异: 总体上, 相对于夜间增温, 白天增温对植被活动影响程度更大, 影响区域更为广泛, 且多呈现为积极的影响; 相比夏季和秋季, 更多的地区植被对春季昼夜增温展现出积极的响应。③ 中国温带地区季节性昼夜增温对各类型植被产生不同的影响: 从影响的程度来看, 春季白天增温对草甸、灌丛、沼泽、阔叶林和针叶林影响显著, 夜间增温对草原和沼泽影响显著; 夏季白天增温对草丛和灌丛的影响显著, 夜间增温对草丛影响显著; 秋季白天增温对沼泽、阔叶林和针叶林影响显著, 夜间增温对各类型植被的影响都不显著。

参考文献(References)

- [1] Gong Z, Zhao S, Gu J. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(2): 143-160.
- [2] Piao S, Wang X, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [3] Piao Shilong, Fang Jingyun. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 119-125. [朴世龙, 方静云. 1982-1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. *地理学报*, 2003, 58(1): 119-125.]
- [4] He Bin, Chen Aifang, Jiang Weiguo, et al. The response of vegetation growth to shifts in trend of temperature in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(7): 801-816.
- [5] Zhang B, Cui L, Shi J, et al. Vegetation dynamics and their response to climatic variability in China. *Advances in Meteorology*, 2017(14): 1-10.
- [6] Cong N, Shen M, Yang W, et al. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(8): 1433-1444.
- [7] Kong D, Zhang Q, Singh V P, et al. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982-2013). *Global and Planetary Change*, 2017, 148: 1-8.
- [8] Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 1997, 277(5324): 364-367.
- [9] Vose R S, Easterling D R, Gleason B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through

2004. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(23): L23822.
- [10] Davy R, Esau I, Chernokulsky A, et al. Diurnal asymmetry to the observed global warming. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(1): 79-93.
- [11] Xu L, Myneni R B, Chapin Iii F S, et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nature Climate Change*, 2013, 3(6): 581-586.
- [12] Wan S, Xia J, Liu W, et al. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration. *Ecology*, 2009, 90(10): 2700-2710.
- [13] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature*, 2013, 501(7465): 88-92.
- [14] Rossi S, Isabel N. Bud break responds more strongly to daytime than night-time temperature under asymmetric experimental warming. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 446-454.
- [15] Zhao Jie, Liu Xuejia, Du Ziqiang, et al. Effect of the asymmetric diurnal-warming on vegetation dynamics in Xinjiang. *China Environmental Science*, 2017, 37(6): 2316-2321. [赵杰, 刘雪佳, 杜自强, 等. 昼夜增温速率的不对称性对新疆地区植被动态的影响. *中国环境科学*, 2017, 37(6): 2316-2321.]
- [16] Xia J, Chen J, Piao S, et al. Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming. *Nature Geoscience*, 2014, 7(3): 173-180.
- [17] Tan J, Piao S, Chen A, et al. Seasonally different response of photosynthetic activity to daytime and night-time warming in the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 377-387.
- [18] Wu X, Liu H, Li X, et al. Seasonal divergence in the interannual responses of Northern Hemisphere vegetation activity to variations in diurnal climate. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 19000.
- [19] Liu Q, Fu Y H, Zeng Z, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 644-655.
- [20] Chen Xiaoqi, Pang Cheng, Xu Lin, et al. Spatiotemporal response of *Salix matsudana*'s phenophases to climate change in China's temperate zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3625-3635. [陈效逯, 庞程, 徐琳, 等. 中国温带旱柳物候期对气候变化的时空响应. *生态学报*, 2015, 35(11): 3625-3635.]
- [21] Xu L, Chen X. Spatial modeling of the *Ulmus pumila* growing season in China's temperate zone. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(4): 656-664.
- [22] Wu X, Liu H, Li X, et al. Higher temperature variability reduces temperature sensitivity of vegetation growth in Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(12): 6173-6181.
- [23] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends: Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 131-147.
- [24] He Yue, Fan Gaofeng, Zhang Xiaowei, et al. Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4352-4362. [何月, 樊高峰, 张小伟, 等. 浙江省植被NDVI动态及其对气候的响应. *生态学报*, 2012, 32(14): 4352-4362.]
- [25] Zhang Geli, Xu Xingliang, Zhou Caiping, et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 47-58. [张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 47-58.]
- [26] Sun Fenghua, Yuan Jian, Guan Ying. Asymmetric change of maximum and minimum temperature in the Northeast China from 1959-2002. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(4): 532-536. [孙凤华, 袁健, 关颖. 东北地区最高、最低温度非对称变化的季节演变特征. *地理科学*, 2008, 28(4): 532-536.]
- [27] Piao S, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): B3018.
- [28] Piao S, Tan J, Chen A, et al. Leaf onset in the Northern Hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 2015, 6: 6911.
- [29] Richardson A D, Black T A, Ciais P, et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1555): 3227-3246.
- [30] Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, 451(7174): 49-52.
- [31] Wan S, Hui D, Wallace L, et al. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): B2014.
- [32] Park Williams A, Allen C D, Macalady A K, et al. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 2012, 3(3): 292-297.

- [33] Niu S, Wu M, Han Y, et al. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 2008, 177: 209-219.
- [34] Turnbull M H, Murthy R, Griffin K L. The relative impacts of daytime and night-time warming on photosynthetic capacity in *Populus deltoides*. *Plant Cell Environment*, 2002, 25(12): 1729-1737.
- [35] Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, 387: 484-485.
- [36] Todisco F, Vergni L. Climatic changes in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 1-11.
- [37] Yang Z, Jiang L, Su F, et al. Nighttime warming enhances drought resistance of plant communities in a temperate steppe. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23267.
- [38] Peng S, Huang J, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(27): 9971-9975.
- [39] Alward R D, Detling J K, Milchunas D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming. *Science*, 1999, 283(5399): 229-231.
- [40] Tan Kaiyan, Fang Shibo, Ren Sanxue, et al. Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature in global warming and its effects on agriculture ecosystems. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5): 634-641. [谭凯炎, 房世波, 任三学, 等. 非对称性增温对农业生态系统影响研究进展. *应用气象学报*, 2009, 20(5): 634-641.]
- [41] Welch J R, Vincent J R, Auffhammer M, et al. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(33): 14562-14567.
- [42] Morita S, Yonemaru J, Takanashi J. Grain growth and endosperm cell size under high night temperatures in rice (*Oryza sativa* L.). *Annals of Botany*, 2005, 95(4): 695-701.

Seasonal variations of day- and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone

ZHAO Jie¹, DU Ziqiang¹, WU Zhitao¹, ZHANG Hong², GUO Na³, MA Zhiting¹, LIU Xuejia²

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. College of Environmental & Resource Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: Based on normalized difference vegetation index (NDVI), vegetation type, and meteorological data, this study revealed the seasonal variations of the day- and nighttime warming in growing seasons using unitary linear regression analysis. It examined different effects of asymmetric seasonal warming on vegetation activities in China's temperate zone using the two-order partial correlation analysis method. The results are as follows. (1) The day- and nighttime warming trends from 1982 to 2015 in growing seasons were extremely significant. The day- and nighttime warming rates were featured by asymmetry; daytime warming was slightly faster than nighttime warming in spring and summer. Contrarily, in autumn, nighttime warming was faster than daytime warming. (2) The effects of the day- and nighttime warming on vegetation activity were obviously different; daytime warming had significantly greater and more extensive effects on vegetation than nighttime warming did, and the areas impacted by diurnal warming were broader in spring than in summer and autumn. (3) Different vegetation types responded differently to the seasonal asymmetry in day- and nighttime warming, and the degree of responses showed distinct variations by season.

Keywords: day- and nighttime warming; vegetation dynamics; seasonal variation; China's temperate zone