

引用格式: 马利群, 秦奋, 孙九林, 等. 黄土高原昼夜不对称性增温及其对植被NDVI的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(8): 1684-1692. [Ma L Q, Qin F, Sun J L, et al. Diurnal asymmetry of temperature and its effect on NDVI in Loess Plateau[J]. Resources Science, 2018, 40(8): 1684-1692.] DOI: 10.18402/resci.2018.08.17

黄土高原昼夜不对称性增温及其对植被NDVI的影响

马利群¹, 秦 奋¹, 孙九林², 王 浩³, 夏浩铭¹

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 河南大学土木建筑学院, 开封 475004)

摘 要: 本文选取1982—2015年黄土高原及周边地区102个气象站点的气象观测资料, 结合归一化植被指数(NDVI)和植被类型数据, 采用Mann-Kendall(M-K)非参数检验法和二阶偏相关分析法, 分析了黄土高原植被生长季日最高气温(T_{\max})和夜间最低气温(T_{\min})的时间序列变化趋势和空间格局, 并分植被类型探讨昼夜不对称性增温对植被的影响。研究表明: ①1982—2015年间黄土高原植被生长季 T_{\max} 及 T_{\min} 都存在极为显著的上升趋势($P < 0.01$), 植被生长季 T_{\min} 的增温速率约为 T_{\max} 增温速率的1.6倍, 昼夜增温呈不对称性; ②昼夜不对称性增温对植被动态的影响呈现明显的分异特征, 植被生长季植被NDVI与 T_{\min} 表现出比 T_{\max} 更显著的相关性, 即相对于白天增温, 夜间增温的变化对黄土高原植被的影响程度更加显著; ③不同植被类型的NDVI与昼夜增温的偏相关分析可知, 除草原、农作物外其他植被类型均与 T_{\max} 表现为显著偏正相关($P < 0.05$); 不同植被类型与 T_{\min} 的偏相关关系差异明显, 农作物与 T_{\min} 表现为显著偏负相关($P < 0.01$), 其他植被类型与 T_{\min} 均呈偏正相关性($P < 0.05$)。

关键词: 黄土高原; 生长季; 日最高气温; 夜最低气温; 不对称增温; NDVI; 植被动态响应; 昼夜增温; 气候变暖

DOI: 10.18402/resci.2018.08.17

1 引言

植被是全球陆地生态系统的重要组成部分, 在大气圈、水圈、生物圈、土壤圈的物质和能量流动过程中起着重要的作用^[1]。研究植被动态的变化及其对气候变化的响应, 对深入理解地表水热过程、碳收支过程及预测陆地生态系统的动态变化具有重要意义^[2]。植被的生长与水、热等气候因子密切相关^[3-6], 不同植被类型本身生理生态特性的差异性将导致它们对气象因子的响应也具有显著的差异性^[7-10]。不同区域水热条件的差异性及时空动态, 导致不同区域相同植被类型对其气象因子的敏感程度不一致^[10, 11]。目前, 植被动态对气象因子响应研究主要集中于气象因子的平均状态^[12-15]对植被动态影响,

而极端气象因子对植被动态影响的研究较少。

有研究显示, 与1980—1999年相比, 21世纪末全球平均温度仍将升高约1.1℃~6.4℃^[16]。在空间上, 全球增温存在显著的空间异质性, 如两极附近地区增温幅度约为平均增温值的两倍^[16-18]。全球变暖不仅表现为平均温度的升高, 还体现出昼夜极端温度变化的不对称性。IPCC2007报告显示, 1957—2007年近50年全球夜间增温是白天增温速率的1.4倍^[19-21]。温度是大多数植物生长发育的主要气象因子, 全球温度上升且昼夜不对称的变化特点必然会对作物的生长发育、产量和品质产生影响^[22]。因此, 有必要进一步研究昼夜不对称增温对植被动态的影响。

目前, 不同的学者通过地面控制实验、模型模

收稿日期: 2018-04-21 修订日期: 2018-07-04

基金项目: 教育部基地重大项目(16JJD770019); 河南省高等学校重点科研项目(18A170002); 河南省高校科技创新团队支持计划(16IRT-STHN012)。

作者简介: 马利群, 女, 山东泰安人, 博士生, 主要从事植被定量遥感研究。E-mail: mayifan18@163.com

通讯作者: 夏浩铭, E-mail: xiahm2002@163.com

2018年8月

拟及遥感数据分析,发现植被动态对昼夜不对称增温的响应模式。昼夜不对称性增温对同一植被的不同要素影响显著。例如,昼夜不对称性增温情境下大豆养分产量降低很多,对大豆的生长和产量造成不利影响^[23];昼夜不对称性增温更能影响冬小麦 LAI、叶绿素质量分数、细胞结构和衰老程度^[24];不对称增温处理下小麦叶片蒸腾速率变大^[25],冬小麦营养生长期的速率显著提高^[26];昼夜不对称性增温对水稻生长发育和产量的影响差异显著^[27]。

不同区域的不同植被类型对昼夜不对称性增温具有不同的响应。例如,已有学者^[20,22]研究发现白天增温有利于大部分寒带和温带湿润地区植被生长,但并不利于温带干旱和半干旱地区植被生长及其碳汇,而生长季夜间最低气温升高对植被生长起相反的作用;同时,还发现夜间最低气温增温对高寒草地和草甸起促进作用,对位于湿润区的森林起抑制作用^[21]。

不同区域昼夜不对称性增温对不同植被类型 NDVI 的影响具有差异性,例如,夜间增温使得北方典型草原生态系统的固碳能力增加^[28],能够促进内蒙古草原草地样地 NDVI 增长^[29],夜间增温对新疆地区植被有更广泛的影响^[30]。但是也有研究表明,南四湖湿地夜间最低气温与 NDVI 的偏相关在任何时间段均不显著^[31]。

上述研究表明不同区域对昼夜不对称性增温响应的强度和方向不尽相同。因此,由于空间异质性、植被类型差异性和水热气候条件差异性,致使相同区域的不同植被类型、不同区域的不同植被类型和不同区域的相同植被类型对昼夜不对称性增温的响应具有显著的差异性。

黄土高原水热气候分布的差异,导致黄土高原不同区域相同植被类型对气象因子的敏感度不同,不同植被类型本身生理生态特性的差异性也将导致它们对水热气候因子的响应具有显著的差异。此外,黄土高原位于半湿润和半干旱气候区的过渡带^[32],是气候变化敏感区,又是生态环境脆弱带,还是黄河中上游水土保持重点区^[33]。因此研究黄土高原昼夜不对称性增温对植被动态的影响非常有必要性和重要性。同时,黄土高原特殊的自然环境也是局地尺度验证更大尺度植被与水热气候变化相

互关系良好的研究场所。

植被动态能够反映黄土高原生态环境的整体状况,而植被 NDVI 是表征植被活力、覆盖度和生产力的有效手段,能够在较大时空尺度上客观反映植被生长状况^[34]。目前, GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) 3g NDVI 数据由于其覆盖范围最完整和时间序列最长,被广泛应用于区域或全球植被动态监测和气候变化对植被影响的研究。因此,本文基于 1982—2015 年 GIMMS3g NDVI 和气象因子(气温和降水)数据,采用 Mann-Kendall (M-K) 非参数检验法、二阶偏相关分析方法,研究并分析了黄土高原植被生长季日最高气温(T_{\max})、夜最低气温(T_{\min})的时间序列变化趋势和空间格局,以及不同植被类型对昼夜不对称性增温的响应,研究结果有助于评估黄土高原植被动态变化对气候变化的响应。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄土高原界于 100°54'E—114°33'E, 33°43'N—41°16'N 之间,东西长约 1000km,南北长约 750km,总面积约 64.1 万 km²(图 1)。自南向北跨暖温带和中温带两个热量带,自东向西跨半湿润、半干旱两个干湿区。气候属于典型的大陆性季风气候,根据研究区气象站点资料^[35],1982—2015 年年均温 9~12℃,气温年较差和日较差较大,东西部温度变化较大;黄土高原呈现夏秋季多雨、冬春季少雨的特征,降水集中在 7—9 月,多年平均降水量从西北到东南变化于 100~800 mm 之间。



图1 黄土高原气象站分布示意

Figure 1 The spatial distribution of meteorological stations in the Loess Plateau

2.2 数据来源与处理

2.2.1 气象数据

本文气象数据源于中国气象科学数据共享服务平台^[35]。根据观测年限及资料完整性,选用1982—2015年黄土高原及周边地区102个站点(图1)的气象观测数据,所有数据均经过了严格的质量控制和错误值修正。本文选取的气象因子为日最高气温、夜最低气温、降水数据。根据已有季节划分方法^[36],一年四季可划分为:春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12月—次年2月)。本文的植被生长季涵盖春季、夏季和秋季,基于已有的气象数据,可以获得植被生长季白天最高气温(T_{\max})、夜间最低气温(T_{\min})和降水数据。

2.2.2 NDVI 数据

NDVI数据来源于美国航空航天局(NASA)全球监测与模型研究组发布的第三代GIMMS NDVI数据集^[37],其时间分辨率为15天,空间分辨率为8km,选用的时段为1982—2015年。为了消除大气、云、太阳高度等因素的干扰,采用最大值合成法对半月NDVI数据进行处理以合成月NDVI数据。此外,考虑到空间尺度的差异,通过计算气象站点为中心周围3×3的栅格值来计算每种植被类型的月NDVI数据。

2.2.3 植被类型数据

植被类型数据为中国1:100万植被数据集,来源于中国科学院资源环境科学数据中心^[38]。该数据集包含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、水平地带性、垂直地带性分布,以及2000多个植物优势种、主要农作物、经济作物的实际分布状况,优势种与土壤和地面地质的密切关系。本文采用的主要植被类型包括草甸、草原、灌木丛、荒漠、农作物和阔叶林。

2.3 研究方法

2.3.1 M-K 方法

M-K非参数检验法常用于降水、气温等要素的时间序列变化分析,其优点在于样本不需要遵循某一特定的分布,而且很少受到异常值的干扰^[39-43]。原理如下:假设有 n 个样本 X_1, \dots, X_n 的时间序列,对于所有 $k, j \leq n$,且 $k \neq j$, x_k 和 x_j 的分布是不同的,计算检验统计量 $S^{[43]}$:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

S 呈正态分布,均值为0; Sgn 为秩序列;方差为 $V_{ar}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当 $n > 10$ 时,标准正态系统变量 Z 通过公式(3)计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_{ar}(S)}} & S > 1 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_{ar}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

双边趋势检验中,在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设是不可接受的,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或是下降趋势。对统计量 Z ,大于0是上升趋势,小于0是下降趋势。 Z 的绝对值在大于等于1.28、1.64和2.32时,分别表示通过了置信度90%、95%和99%的显著性检验。

2.3.2 偏相关分析法

二阶偏相关分析法可以消除其他变量的干扰来研究剩余两个变量的相互关系。本文在研究昼夜不对称性增温对植被NDVI的影响时,首先,通过限制 T_{\min} 和降水量的影响,分析植被生长季 T_{\max} 与植被NDVI的偏相关关系。再次限制 T_{\max} 和降水量的影响,分析植被生长季 T_{\min} 和植被NDVI的偏相关关系。二阶偏相关系数在一阶偏相关系数基础上计算得到,而计算一阶相关系数首先计算相关系数^[44]。相关系数的计算原理为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中 x, y 为进行相关系数计算的要素; \bar{x}, \bar{y} 分别是要素 x, y 的平均值; r_{xy} 为相关系数。

一阶偏相关系数的计算公式为:

$$r_{xy \cdot 1} = \frac{r_{xy} - r_{x1}r_{y1}}{\sqrt{1 - r_{x1}^2} \sqrt{1 - r_{y1}^2}} \quad (5)$$

式中 $r_{xy \cdot 1}$ 为剔除变量1的 x 与 y 之间的偏相关系数; r_{x1} 为 x 和1相关系数; r_{y1} 为 y 和1的相关系数; r_{xy} 为 x 与 y 的相关系数。

2018年8月

二阶偏相关系数的计算公式为:

$$r_{xy \cdot 12} = \frac{r_{xy \cdot 1} - r_{x2 \cdot 1} r_{y2 \cdot 1}}{\sqrt{1 - r_{x2 \cdot 1}^2} \sqrt{1 - r_{y2 \cdot 1}^2}} \quad (6)$$

式中1、2为控制变量; $r_{xy \cdot 12}$ 为剔除变量1、2的 x 与 y 的偏相关系数; $r_{x2 \cdot 1}$ 、 $r_{y2 \cdot 1}$ 为剔除1后 x 、 y 与2的一阶偏相关系数。

t 检验法用于偏相关系数的显著性检验, t 检验法的原理为:

$$t = \frac{r \sqrt{n - q - 1}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (7)$$

式中 r 为偏相关系数; n 为样本数; q 为自由度个数。

3 结果及分析

3.1 昼夜增温趋势分析

1982—2015年黄土高原植被生长季日最高气

温和夜间最低气温均呈现显著性上升趋势($P < 0.01$)。植被生长季日最高气温和夜间最低气温平均每10年分别增加 0.3°C 和 0.5°C ,即近34年黄土高原植被生长季夜间最低气温增加速率是日最高气温增加速率的1.6倍(图2)。昼夜温差($T_{\max} - T_{\min}$)呈现显著性的减小趋势,昼夜增温存在不对称性。

3.2 植被生长季植被NDVI与昼夜增温的偏相关分析

降水是黄土高原植物生长的主要水热气象因子之一,因此在进行偏相关分析研究时,降水作为控制变量之一。依次对研究区102个气象站点分别进行植被生长季NDVI与 T_{\max} 、 T_{\min} 的偏相关分析(图3)。首先,通过控制生长季降水、 T_{\min} ,计算生长季植被NDVI和 T_{\max} 的偏相关系数,其次,通过控制生长季降水、 T_{\max} ,计算生长季植被NDVI和 T_{\min} 的偏相关系数。

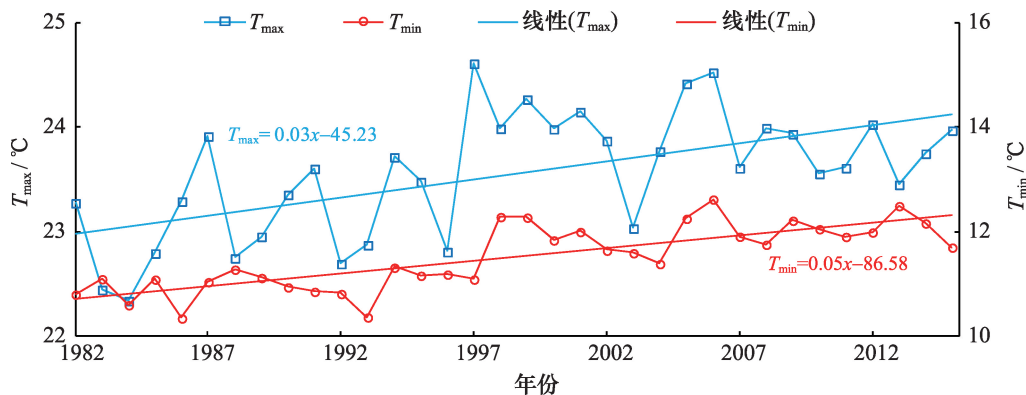


图2 1982—2015年黄土高原植被生长季 T_{\max} 和 T_{\min} 变化趋势

Figure 2 Variations of T_{\max} and T_{\min} in growing seasons in the Loess Plateau from 1982 to 2015

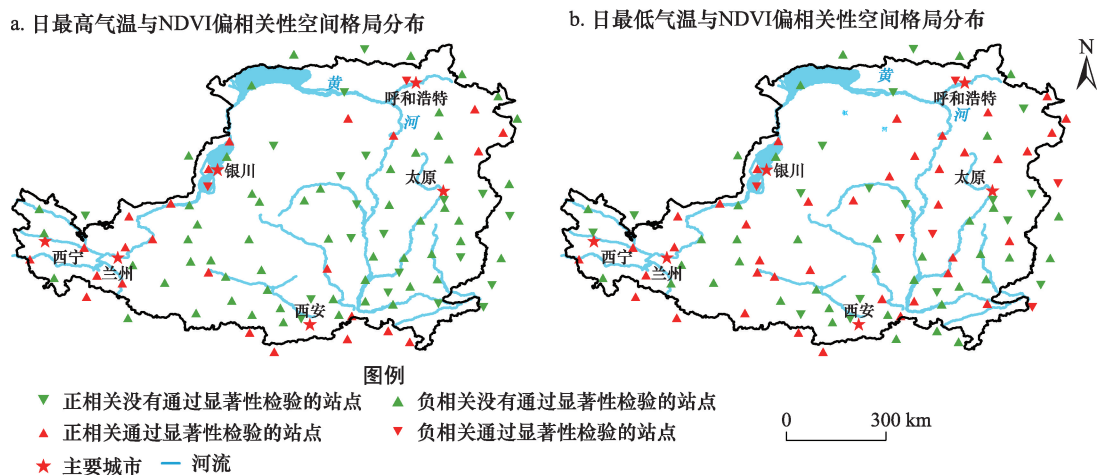


图3 1982—2015年黄土高原植被生长季气温与植被NDVI的偏相关性空间格局分布示意

Figure 3 Spatial patterns of the correlations between growing season NDVI and T_{\max} or T_{\min} in the Loess Plateau from 1982 to 2015

去除植被生长季 T_{\min} 与降水的影响后,研究区 102 个气象站点中约 78% 的气象站点植被生长季 NDVI 与 T_{\max} 之间呈现正相关关系,其中约有 23% 的气象站点表现为极显著正相关 ($P < 0.01$), 9% 的气象站点表现为显著性正相关 ($P < 0.05$)。同样约有 22% 的气象站点表现为负相关关系 ($P < 0$), 其中 5% 的气象站点表现为极显著性负相关 ($|P| < 0.01$), 5% 的气象站点表现为显著负相关 ($|P| < 0.05$) (图 3)。

在去除植被生长季 T_{\max} 与降水的影响后,约有 77% 的气象站点植被生长季 NDVI 与 T_{\min} 呈现正相关,其中约有 35% 的气象站点表现为极显著正相关 ($P < 0.01$), 约有 16% 的气象站点表现为显著正相关 ($P < 0.05$)。同样约有 23% 的气象站点呈现负相关 ($P < 0$), 其中 13% 的气象站点表现为极显著负相关 ($|P| < 0.01$), 13% 的气象站点表现为显著性负相关 ($|P| < 0.05$)。

植被生长季植被 NDVI 与 T_{\min} 的相关性通过显著性检验的气象站点是 47%, 通过显著性检验 ($|P| < 0.05$) 的站点中约有 66% 通过了 99% 的显著性检验。植被生长季 NDVI 与 T_{\max} 通过显著性检验的气象站点是 27%, 通过显著性检验的站点约有 8% 通过了 99% 的显著性检验。通过上述分析,由此可知黄土高原植被对昼夜增温具有不同的响应特征,其中植被 NDVI 对夜间增温的响应更加显著,受夜间气温变化影响的植被分布区更广。

从空间上看,植被生长季植被 NDVI 与 T_{\max} 的偏相关性通过显著性检验的站点主要分布在海拔相对较高的区域,如研究区西南部、南部和西北部,而 T_{\min} 与 NDVI 的相关性表现较为复杂,植被生长季植被 NDVI 与 T_{\min} 的偏相关性通过显著性检验的站点没有表现出明显空间分区,已有的研究也显示 T_{\min} 对植被动态的影响较为复杂^[20,21]。

3.3 不同植被类型 NDVI 与昼夜增温的偏相关分析

通过对黄土高原植被生长季不同类型植被的 NDVI 与 T_{\max} 、 T_{\min} 的偏相关分析 (表 1), 发现不同植被类型 NDVI 与 T_{\max} 、 T_{\min} 的相关性有差异。不同植被类型的 NDVI 与 T_{\max} 整体表现为正相关,除草原、农作物外其他植被类型的 NDVI 均与 T_{\max} 表现为显著性正相关 ($P < 0.05$), 其中荒漠和阔叶林 NDVI 与 T_{\max} 呈现极显著性正相关 ($P < 0.01$)。黄土高原各植

表 1 1982—2015 年黄土高原不同植被类型 NDVI 与 T_{\max} 及 T_{\min} 的偏相关系数

Table 1 Partial correlation coefficients between NDVI and T_{\max}/T_{\min} for different vegetation types in the Loess Plateau from 1982 to 2015

植被类型	T_{\max}	T_{\min}
草甸	0.63**	0.66**
草原	0.31	0.32
灌丛	0.40*	0.45**
荒漠	0.46**	0.50**
农作物	0.33	-0.48**
阔叶林	0.62**	0.70**

注: *、** 分别表示通过 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 统计学显著性检验。

被类型与 T_{\min} 偏相关性差异明显,除农作物 NDVI 与 T_{\min} 表现为显著性偏负相关外 ($P < 0.01$), 其它植被类型 NDVI 与 T_{\min} 均呈偏正相关,其中草原 NDVI 与 T_{\min} 呈不显著正相关 ($P > 0.05$)。通过研究表明,黄土高原总体上昼夜气温的升高对各植被类型产生了积极作用。夜间最低气温的升高对植被的积极作用更为显著,特别对阔叶林、草甸。

4 讨论

黄土高原 1982—2015 年植被生长季日最高气温和夜间最低气温均呈显著性上升趋势,植被生长季夜间最低气温增速是日最高气温增速的 1.6 倍。这与已有研究结果较一致,例如,赵安周等^[45]发现 1965—2013 年黄土高原年最高气温和年最低气温增稳趋势显著,且年最低气温增速是年最高气温增速的 2 倍。本文研究结果是低温增速是高温增速的 1.6 倍,低于赵安周等^[45]研究的增速倍数,是因为本文研究的是植被生长季 (4—10 月),不包含冬季,冬季气温的增速最快。已有研究表明过去 50 年全球地表温度在夜间增温幅度明显快于白天,夜间增温是白天增温速率的 1.4 倍^[46]。黄土高原的增温趋势与全球具有一致性,且增温速率高于世界平均水平。

由于大部分植物的光合作用发生在白天,而植物的呼吸作用贯穿全天,因此,这种不对称性增温必然影响植被的碳吸收和碳消耗^[47]。黄土高原灌木与温度表现为偏正相关,研究发现落叶灌木的增加有利于植物碳储量增加,原因是灌木会将很大一部分光合产物分配到茎部,茎部的分解速率较慢^[48]。

在 102 个气象站点中,植被生长季植被 NDVI 与 T_{\max} 呈显著性 ($P < 0.05$) 相关的站点占 27%, 其中

2018年8月

8%的站点是极显著相关($P < 0.01$),而植被生长季植被NDVI与 T_{\min} 通过显著性检验的气象站点是47%。其中有66%是极显著相关($P < 0.01$)。黄土高原的昼夜增温对植被总体上表现为积极作用,植被白天进行光合作用,半湿润地区比较充足的水分条件及 T_{\max} 的升高能够促进植被叶片气孔张开,使植被在增加蒸腾的同时,也增加 CO_2 进入叶片参与光合作用的机率,因此促进植被生长,表现为NDVI升高^[31]。黄土高原干旱区植被NDVI与气温在多数区域呈负相关,气温增加会加快植被叶片蒸腾作用,导致蒸散发增加,从而使得土壤水分减少,反过来抑制植被生长和光合作用^[49]。这与Peng等^[20]的研究结果一致,Peng等^[20]发现白天温度升高有利于大部分寒带、温带湿润地区植被生长及其生态系统碳汇功能,但并不利于温带干旱、半干旱地区植被生长。夜晚温度升高对植被的影响正好与白天相反。农作物与 T_{\min} 表现为偏负相关,夜间温度的升高会加剧农作物同化产物的呼吸消耗,从而导致农作物的干物质积累过程受到限制^[27]。

植被动态是对气候变化的综合响应,本文重点探讨了水热气候条件中的降水和温度,未来的研究可以综合考虑湿度、蒸发、日照时间等其他气象因子对植被动态的影响。近年来,黄土高原实施了退牧还草等生态工程,这将导致土地覆被的变化,进而导致植被NDVI的变化^[50,51]。如何定量剔除土地覆被变化所引起的植被动态变化是下一步研究的重要问题之一。本文采用的是8km的NDVI数据,该类数据是8km×8km混合像元内所有土地覆被光谱的综合反映,下一步可以结合MODIS NDVI等其他更高分辨率的影像数据,采用数据融合技术,对1982—2000年期间的影像进行数据融合,进而结合2000—2015年高分辨率遥感影像数据,获取近34年高分辨率的影像数据集,进而更加精细地研究植被动态对昼夜不对称增温的响应。同时,可以结合地面站点观测实验数据、模型模拟分析等多种手段,进一步量化昼夜不对称增温的影响,以便为生态环境监测和对气候变化的适应性提供更加可靠的科学依据。

5 结论

本文根据1982—2015年黄土高原及周边逐日

观测数据,选取植被生长季内与植被生长发育紧密相关的温度、降水气象数据和GIMMS3g NDVI数据,采用Mann-Kendall (M-K))非参数检验法、二阶偏相关分析方法,研究分析了黄土高原昼夜不对称性增温对植被动态的影响,得出以下结论:

(1)黄土高原1982—2015年间植被生长季夜间最低气温的增速是白天最高气温增速的1.6倍,昼夜增温存在不对称性,昼夜温差呈减小的趋势,且不对称性增温速率高于世界平均水平,说明黄土高原对全球气候变暖这一响应异常敏感。

(2)黄土高原植被NDVI对昼夜增温具有不同的响应特征,其中植被NDVI对夜间增温的响应更加显著,受夜间气温变化影响的植被分布区更广。

(3)黄土高原总体上昼夜气温的升高对各植被类型产生了积极作用。从昼夜不对称性增温对不同植被类型影响程度来看,白天增温对草甸、灌丛、荒漠、阔叶林的影响显著。除草原外夜间增温对研究区所有植被类型的影响都很显著,夜间最低气温的升高对植被的积极作用更为显著,特别对阔叶林、草甸。

参考文献(References):

- [1] 易浪,任志远,张翀,等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 166–174. [Yi L, Ren Z Y, Zhang C, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 166–174.]
- [2] 夏浩铭,李爱农,赵伟,等. 2001–2010年秦岭森林物候时空变化遥感监测[J]. 地理科学进展, 2015, 34(10): 1297–1305. [Xia H M, Li A N, Zhao W, et al. Spatiotemporal variations of forest phenology in the Qinling zone based on remote sensing monitoring, 2001–2010[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(10): 1297–1305.]
- [3] Cong N, Shen M, Yang W, et al. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(8): 1433–1444.
- [4] He B, Chen A, Jiang W, et al. The response of vegetation growth to shifts in trend of temperature in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(7): 801–816.
- [5] Kong D D, Zhang Q, Singh V P, et al. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982–2013) [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 148: 1–8.
- [6] Zhang B, Cui L, Shi J, et al. Vegetation dynamics and their response to climatic variability in China[J]. *Advances in Meteorology*, 2017, (14) 1–10.

- [7] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983~1992年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720. [Chen Y H, Li X B, Shi P J. Variation in NDVI driven by climate factors across China, 1983-1992[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(6): 716-720.]
- [8] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 898-902. [Li B G, Tao S. Correlation between AVHRR NDVI and climate factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 898-902.]
- [9] 付新峰, 杨胜天, 刘昌明. 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与主要气候因子的关系[J]. 地理研究, 2007, 26(1): 60-65. [Fu X F, Yang S T, Liu C M. Changes of NDVI and their relations with principal climatic factors in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(1): 60-65.]
- [10] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379-382. [Li X B, Shi P J. Sensitivity analysis of variation in NDVI temperature and precipitation in typical vegetation types across China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 379-382.]
- [11] Li J, Lewis J, Rowland J, *et al.* Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(3): 463-480.
- [12] 张翀, 任志远, 韦振锋. 近 12 年来黄土高原植被覆盖对年内水热条件的响应[J]. 资源科学, 2013, 35(10): 2017-2023. [Zhang C, Ren Z Y, Wei Z F. Vegetation responses to intra-annual hydro-thermal conditions on the loess plateau[J]. *Resources Science*, 2013, 35(10): 2017-2023.]
- [13] 苏虹. 黄土高原地区植被覆盖变化及其原因分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2016. [Su H. Analysis of Vegetation Dynamics and Its Causes of Loess Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2016.]
- [14] 王学春, 李军, 王红妮, 等. 黄土高原冬小麦土壤水分与小麦产量对降水和气温变化响应的模拟研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1398-1410. [Wang X C, Li J, Wang H N, *et al.* Simulation of the response of soil water in winter wheat field and winter wheat yield to rainfall and temperature change on the loess plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1398-1410.]
- [15] 何远梅. 黄土高原植被覆盖变化与区域气候变化的相互效应[D]. 北京: 北京林业大学, 2015. [He Y M. Interaction between Vegetation Cover and Region Climate on the Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.]
- [16] Stocker T F, Qin G K, Plattner M, *et al.* The Working Group I Contribution to the IPCC's Fifth Assessment Report[R]. Cambridge: 2013 Climate Change the Physical Science Basis, 2013.
- [17] Ji F, Wu Z, Huang J, *et al.* Evolution of land surface air temperature trend[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 462-466.
- [18] Pepin N C, Seidel D J. A global comparison of surface and free-air temperatures at high elevations[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(D3): 1-15.
- [19] Harvey L D D, Warm days, hot nights[J]. *Nature*, 1995, 377(6544): 15-16.
- [20] Peng S, Piao S, Ciais P, *et al.* Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation[J]. *Nature*, 2013, 501 (7465): 88-92.
- [21] Xia H M, Li A N, Feng G, *et al.* The effects of asymmetric diurnal warming on vegetation growth of the Tibetan Plateau over the past three decades[J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1-14.
- [22] Ju H, Velde M, Lin E, *et al.* The impacts of climate change on agricultural production systems in China[J]. *Climatic Change*, 2013, 120(1): 313-324.
- [23] 王丹, 乔匀周, 董宝娣, 等. 昼夜不对称性与对称性升温对大豆产量和水分利用的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(8): 827-833. [Wang D, Qiao Y Z, Dong B D, *et al.* Differential effects of diurnal asymmetric and symmetric warming on yield and water utilization of soybean[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40 (8): 827-833.]
- [24] 江晓东, 刘诚, 徐家平, 等. 昼夜不对称增温对冬小麦花后冠层反射光谱特性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 115-122. [Jiang X D, Liu C, Xu J P, *et al.* Effects of asymmetric warming in daytime and nighttime on canopy spectral reflectance of post-anthesis winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(12): 115-122.]
- [25] 江晓东, 苏海报, 王晓梅, 等. 昼夜不对称增温对麦田土壤水分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4-5): 283-286. [Jiang X D, Su H B, Wang X M, *et al.* Effect of asymmetric between day and night warming on soil moisture in wheat field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(4-5): 283-286.]
- [26] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 开放式增温下非对称性增温对冬小麦生长特征及产量构成的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 681-686. [Tian Y L, Chen J, Deng A X, *et al.* Effects of asymmetric warming on the growth characteristics and yield components of winter wheat under free air temperature increased[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 681-686.]
- [27] 董文军, 邓艾兴, 张彬, 等. 开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2169-2177. [Dong W J, Deng A X, Zhang B, *et al.* An experimental study on the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased (FATI) facility[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2169-2177.]
- [28] 张谦. 中国北方典型草原水分利用效率对昼夜不对称性增温的特异性响应[D]. 开封: 河南大学, 2013. [Zhang Q. The Effects of Day and Night Warming on Water-Use Efficiency in a Typical Steppe in Northern China[D]. Kaifeng: Henan University, 2013.]
- [29] Wan S, Xia J, Liu W, *et al.* Photosynthetic overcompensation un-

2018年8月

- der nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration[J]. *Ecology*, 2009, 90(10): 2700–2710.
- [30] 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[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(6): 2316–2321. [Zhao J, Liu X J, Du Z Q, *et al.* Effects of the asymmetric diurnal-warming on vegetation dynamics in Xinjiang[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(6): 2316–2321.]
- [31] 梁春玲, 于泉洲, 刘煜杰, 等. 昼夜增温对南四湖湿地植被NDVI的影响差异[J]. *热带地理*, 2015, 35(3): 422–426. [Liang C L, Yu Q Z, Liu Y J, *et al.* Effects of air temperature circadian on the NDVI of Nansi Lake wetland vegetation[J]. *Tropical Geography*, 2015, 35(3): 422–426.]
- [32] 晏利斌. 1961–2014年黄土高原气温和降水变化趋势[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(5): 276–282. [Yan L B. Characteristics of temperature and precipitation on the Loess Plateau from 1961 to 2014 [J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(5): 276–282.]
- [33] 张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. *资源科学*, 2011, 33(11): 2143–2149. [Zhang C, Ren Z Y. Temporal and spatial differences and its trends in vegetation cover change over the loess plateau [J]. *Resources Science*, 2011, 33(11): 2143–2149.]
- [34] 钟莉娜, 赵文武. 基于NDVI的黄土高原植被覆盖变化特征分析[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(5): 57–62. [Zhong L N, Zhao W W. Detecting the dynamic changes of vegetation coverage in the Loess Plateau of China using NDVI data[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(5): 57–62.]
- [35] 中国气象科学数据共享服务网. 中国地面气象站逐小时观测资料[EB/OL]. (2017–11–20) [2018–04–21]. <http://data.cma.cn/data/detail/DataCode/A.0012.0001.html>. [China Meteorological Data Service Center. Hourly Observation Data from China Ground Weather Station [EB/OL]. (2017–11–20) [2018–04–21]. <http://data.cma.cn/data/detail/DataCode/A.0012.0001.html>.]
- [36] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3960–3968. [Zhang H Y, Fang N F, Shi Z H. Spatio-temporal patterns for the NDVI and its responses to climatic factors in the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3960–3968.]
- [37] Nemani R, Votava P, Michaelis A, *et al.* Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GIMMS[EB/OL]. (2016–03–04)[2017–10–20]. <https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms>.
- [38] 中科院资源环境科学数据中心. 资源环境数据云平台[EB/OL]. (2017–11–22) [2018–04–21]. <http://www.resdc.cn>. [Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences (RESDC). Resource and Environment Data Cloud Platform [EB/OL]. (2017–11–22)[2018–04–21]. <http://www.resdc.cn>.]
- [39] Mann H B. Non-parametric tests against trend[J]. *Econometrics*, 1945, 12(2): 245–249.
- [40] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. *British Journal of Psychology*, 1955, 25(1): 86–91.
- [41] Zar J H. Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1972, 67(339): 578–580.
- [42] Mahajan D R, Dodamani B M. Trend analysis of drought events over upper Krishna basin in Maharashtra[J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 1250–1257.
- [43] Kisi O, Ay M. Comparison of Mann–Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513(5): 362–375.
- [44] Cleophas T J, Zwinderman A H. Partial Correlations[A]. Cleophas T J, Zwinderman A H. *Regression Analysis in Medical Research* [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [45] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 1965–2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 639–652. [Zhao A Z, Liu X F, Zhu X F, *et al.* Trend variations and spatial difference of extreme air temperature events in the Loess Plateau from 1965 to 2013[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 639–652.]
- [46] Tan J G, Piao S L, Chen A, *et al.* Seasonally different response of photosynthetic activity to daytime and night-time warming in the Northern Hemisphere[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 377–387.
- [47] Atkin O K, Turnbull M H, Zaragoza-Castells J, *et al.* Light inhibition of leaf respiration as soil fertility declines along a post-glacial chronosequence in New Zealand: an analysis using the Kok method[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1): 163–182.
- [48] Hobbie S E. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan Tundra[J]. *Ecological Monographs*, 1996, 66(4): 503–522.
- [49] 信忠保, 许炯心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(6): 770–778. [Xin Z B, Xu J X. Response of spatial-temporal evolution of vegetation cover to climate in the loess plateau [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(6): 770–778.]
- [50] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 449–460. [Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for Green Project in the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 449–460.]
- [51] 刘秀丽, 张勃, 郑庆荣, 等. 黄土高原土石山区退耕还林对农户福祉的影响研究—以宁武县为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 397–405. [Liu X L, Zhang B, Zheng Q R, *et al.* Impacts of converting farmland into forests on farmer well-being in the Earth-Rock Mountain Areas of the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2014, 36(2): 397–405.]

Diurnal asymmetry of temperature and its effect on NDVI in Loess Plateau

MA Liqun¹, QIN Fen¹, SUN Jiulin², WANG Hao³, XIA Haoming¹

(1. The College of Environment and Planning of Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture of Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In this paper, the meteorological observation data of 102 meteorological stations in the Loess Plateau and its surrounding areas in 1982-2015 were selected. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and vegetation type data were used. And the Mann-kendall (m-k) Non-parametric test method and the second-order partial correlation analysis were adopted. The time series change trend and spatial pattern in the growing seasonal minimum temperature (T_{\min}) and maximum temperature (T_{\max}) over the Loess Plateau between 1982 and 2015 were analyzed, and the effects of asymmetric warming on different vegetation type were discussed. The results show that: ① We found a persistent increase ($P<0.01$) in the growing seasonal T_{\min} and T_{\max} over the Loess Plateau between 1982-2015, whereas the rate of increase of T_{\min} was 1.6 times that of T_{\max} . ② The influence of diurnal asymmetry on vegetation dynamics showed an obvious difference, and NDVI and T_{\min} showed a more significant correlation than NDVI and T_{\max} in vegetative growth season. The effect of nighttime warming on NDVI in the Loess plateau is more significant than that of daytime warming. ③ We also found diverse responses of vegetation type to daytime and night-time warming across the Loess Plateau. We found that the partial correlation between NDVI and T_{\max} was positive ($P<0.05$) except grassland and crop. The partial correlation between T_{\min} and NDVI of crop was negative ($P<0.01$), and the partial correlation between T_{\min} and NDVI of other vegetation was positive ($P<0.05$). Our results provide a demonstration for studying regional responses of vegetation to climate extremes under global climate change.

Key words: Loess Plateau; growing season; maximum temperature; minimum temperature; asymmetric warming; NDVI; vegetation dynamics; day and nighttime warming; global warming