

DOI: 10.5846/stxb202107272040

董庆栋, 陈超男, 殷浩然, 周源珂, 朱连奇. 秦巴山地植被绿度特征及其对地表水热的响应. 生态学报, 2023, 43(3): 1090-1101.

Dong Q D, Chen C N, Yin H R, Zhou Y K, Zhu L Q. Vegetation greenness characteristics in Qinling-Daba Mountains and its response to surface hydrothermal. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1090-1101.

秦巴山地植被绿度特征及其对地表水热的响应

董庆栋, 陈超男, 殷浩然, 周源珂, 朱连奇*

河南大学地理与环境学院, 开封 475004

摘要: 地表水热通过影响土壤和大气间的水分交换以及植被生长用水对植被格局起关键作用。使用 2000—2020 年 MODIS 叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 作为秦巴山地植被绿度的评价指标, 基于遥感技术获取同时段地表温度 (Land surface temperature, LST) 和温度植被干旱指数 (Temperature vegetation drought index, TVDI), 用于指示地表水热状况。结合坡向和海拔等地形因素, 使用均值和趋势法分析了秦巴山地植被绿度的时空特征; 采用时滞相关性分析、主导因素分析探究了植被绿度与地表水热的相关关系, 以及影响植被绿度变化的主导因素; 借助广义可加模型, 结合植被类型探讨了植被绿度与地表水热的非线性关系。结果表明: (1) 秦巴山地 LAI 集中在 1—5 之间, LAI 均值随海拔先增后减, 不同坡向 LAI 差异较大, 表现为大巴山北坡 > 大巴山南坡 > 秦岭南坡 > 秦岭北坡 > 西秦岭。秦巴山地 LAI 高值区与地表水热较好的地区在空间分布上具有一致性, LAI 低值区与 LST 低值区或 TVDI 高值区较为一致。(2) 秦巴山地 LAI 以由增变减趋势为主, 变化趋势的海拔分异大于坡向分异。在 LAI 由增变减区, 地表水热以由增变减为主, 其次是持续增加。(3) 秦巴山地 LAI 与 LST 主要为显著正相关, 与 TVDI 主要为显著负相关。LAI 对地表水热的时滞响应不明显, LAI 受 TVDI 的影响较受 LST 的影响面积广。(4) 除 LST 增加导致落叶阔叶林和混交林 LAI 单调递增外, 地表水热对各植被类型 LAI 均为非线性影响, 即存在一定阈值, 阈值两侧 LAI 的响应规律不同, 不同植被类型对地表水热响应的阈值差异较大。

关键词: 植被绿度; 地表水热; 时滞效应; 非线性; 秦巴山地

Vegetation greenness characteristics in Qinling-Daba Mountains and its response to surface hydrothermal

DONG Qingdong, CHEN Chaonan, YIN Haoran, ZHOU Yuanke, ZHU Lianqi*

The college of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Surface hydrothermal plays a key role in vegetation pattern by affecting soil-atmosphere water exchange and vegetation growth water use. MODIS Leaf area index (LAI) from 2000 to 2020 was used as the evaluation index of vegetation greenness in Qinling-Daba Mountains. Land surface temperature (LST) and temperature vegetation drought index (TVDI) in the same period were obtained based on remote sensing technology to indicate surface hydrothermal conditions. Combined with terrain factors such as aspect and altitude, the temporal and spatial characteristics of vegetation greenness in Qinling-Daba Mountains were analyzed by mean and trend methods. The correlation between vegetation greenness and surface hydrothermal, as well as the leading factors affecting the change of vegetation greenness were explored by time-delay correlation analysis and dominant factor analysis. The nonlinear relationship between vegetation greenness and surface hydrothermal was discussed with the help of the generalized additive model and vegetation types. The results showed that: (1) the LAI of Qinling-Daba Mountains was concentrated in the range of 1—5. The average value of LAI increased first and then decreased with altitude, while the LAI varied greatly in different aspects, which was shown as the north slope of Daba

基金项目: 科技基础资源调查专项-中国南北过渡带综合科学考察 (2017FY100902)

收稿日期: 2021-07-27; **网络出版日期:** 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

Mountains>the south slope of Daba Mountains>the south slope of Qinling Mountains>the north slope of Qinling Mountains>the west Qinling Mountains. The LAI high value area in the Qinling-Daba Mountains was consistent with the area with good surface hydrothermal in terms of spatial distribution. The LAI low value area was consistent with LST low value area or TVDI high value area. (2) The LAI of the Qinling-Daba Mountains mainly changed from increase to decrease, and the change trend of altitude differentiation was larger than aspect differentiation. In the area of LAI from increase to decrease, surface hydrothermal was mainly from increase to decrease, followed by continuous increase. (3) The LAI of Qinling-Daba mountains was significantly positive correlation with LST, but significantly negative correlation with TVDI. The time lag effect of surface hydrothermal on LAI was not obvious, and LAI was more affected by TVDI than LST. (4) Except for the increase of LST which led to monotonous increase in LAI of deciduous broad-leaved forest and mixed forest, the surface hydrothermal had nonlinear effects on the LAI of various vegetation types. There was a certain threshold, and the response law of LAI on both sides of the threshold was different, and the thresholds of different vegetation's response to surface hydrothermal were quite different.

Key Words: vegetation greenness; surface hydrothermal; time lag effect; nonlinearity; Qinling-Daba Mountains

全球变化与陆地生态系统的关系是全球变化科学研究中的核心内容之一^[1]。植被作为陆地生态系统的重要组成部分,不仅在大气圈、生物圈和全球碳循环中扮演着重要的角色,也是连接土壤、水分和能量等自然要素的纽带,同时对全球变化具有重要指示作用^[2-3]。探究植被绿度时空变化规律及其对气候变化的响应,可为全球变化研究提供科学依据。其中,叶面积指数(Leaf area index, LAI)对植被绿度具有良好的表征作用,它指单位土地面积上植物叶片面积占土地面积的倍数,能够反映出水平覆盖状况和垂直结构,且 LAI 与植被光合、蒸腾和碳氮循环等生态过程关系密切^[4-5]。因此 LAI 评估对于全球变化背景下物质循环与能量流动研究具有重要意义。

影响植被绿度的气候要素主要是气温和降水^[6-9],植被绿度对气候变化的响应具有一定的时滞效应与非线性特征^[10-15],且影响过程与机理研究已相对成熟。越来越多的研究表明地表温度和土壤湿度在植被生长及格局变化中起着关键作用:一方面,地表温度的升降影响土壤和大气水分交换;另一方面,土壤湿度变化直接影响土壤对植被生长用水的补给^[16]。相较于气温和降水,地表温度和土壤湿度作用于植物根部,对植物种子萌发与植株生长的作用更加直接^[17]。植被绿度受到地表水热综合作用,这种作用是正向的,还是负向的?是即时的,还是滞后的?是线性的,还是非线性的?这些问题尚不十分清楚。

秦岭-大巴山是中国北亚热带向暖温带过渡的重要地段,兼具两种气候带自然地理特征,地表水热差异悬殊,加之地形起伏较大,随着地形的变化,气候也会发生明显变化^[18],加剧了地表水热条件的不确定性和复杂性。且以往对于地表水热要素的研究主要集中在样方尺度和点尺度,在区域尺度植被对地表水热的响应过程有待进一步研究^[17]。因此,在全球变化大背景下,以地形地貌特征为基础,探讨地表水热如何影响山地植被变化过程及未来空间格局,成为全球变化和山地地理共同关注的问题^[7]。

本文采用 MODIS-LAI 数据集,结合 DEM、坡向、植被覆盖、地表温度数据,以及基于温度植被干旱指数法反演的土壤湿度数据,运用均值、趋势分析和 Hurst 指数分析了秦巴山地植被绿度空间格局与变化趋势,并探讨了植被绿度与地表水热在不同地形上的空间关系,借助相关性分析、主导因素分析、时滞性及广义可加模型(Generalized additive models, GAM),进一步探究了 LAI 对地表水热的时滞及非线性响应过程等。本研究利于加深对秦巴山地气候和植被变化机理的认识,对了解南北过渡带植被对全球变化的响应以及防范山地生态风险具有一定价值。

1 数据处理与研究方法

1.1 研究区概况

秦巴山地地跨甘肃、四川、陕西、重庆、河南、湖北六省市,东西长约 1000 km,南北宽约 300 km,总面积约

为 30 万 km^2 , 是北亚热带和暖温带的分界线(图 1)。地理位置的特殊性使得研究区植被区系复杂, 秦岭南坡主要为混有常绿树种的落叶阔叶林, 北坡则主要为暖温带落叶阔叶林, 具有明显过渡特点。研究区年平均气温为 12—16 $^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量为 709—1500 mm, 由于受大陆性气候和季风气候的双重影响, 该地区气候对全球变化较为敏感。秦巴山地也是生物物种东西向和南北向迁移的通道, 物种分布具有明显的多样性、复杂性和过渡性^[19], 该地区在气候、植被、土壤等诸多自然地理要素方面都表现出垂直地带性、经度地带性、纬度地带性、坡向分异等特点。

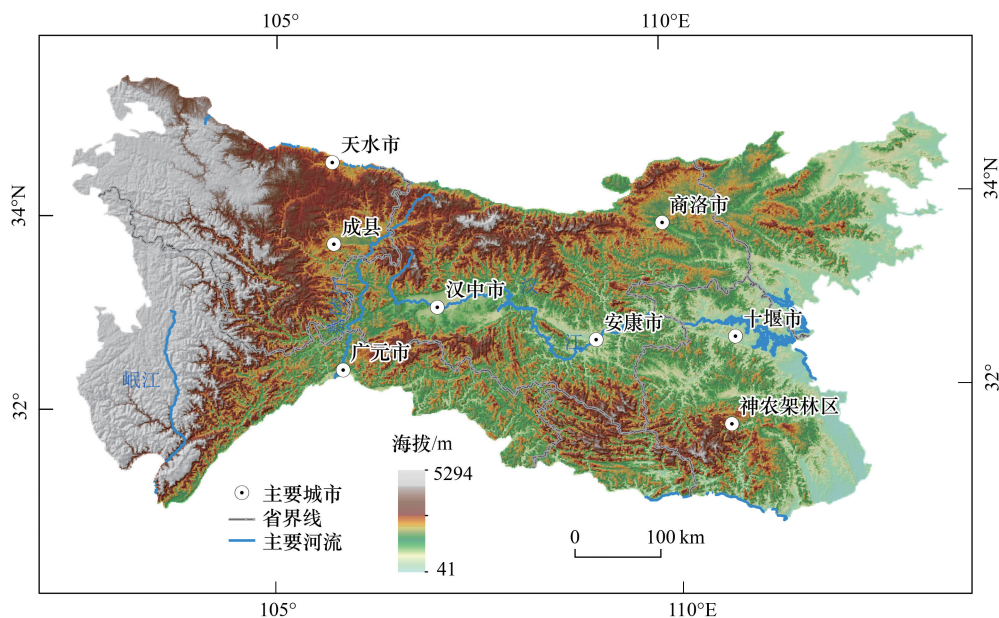


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源及处理

本研究使用的 LAI 数据为 MOD15A2H 产品, 其空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 d (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>), 研究时段跨度为 2000—2020 年, 研究区涉及 h26v05 和 h27v05 两个影像分带。研究表明该数据集在全球主要的六套 LAI 产品的交叉验证中显示不确定性最低^[20], 且其时空分辨率较其它植被指数产品更具优势。数据预处理上, 首先使用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 工具进行拼接和提取单波段处理, 然后进行最大值合成 (Maximum Value Composition, MVC) 以最大程度消除云遮挡^[21], 随后在 ArcGIS 中进行裁剪、单位换算、重采样、投影、格式转换等处理, 最终生成空间分辨率为 1000 m、投影为 WGS1984 Albers 的逐月 LAI 数据。秦巴山地植被在冬季大多处于休眠状态, 并且有时被积雪覆盖, 这一时段 LAI 值对植被动态指示意义不大, 参照以往有关秦岭地区植被的研究^[22], 本文选取每年 4—10 月份作为植被生长季, 其均值作为年 LAI 数据。

LST 数据为 2000—2020 年 MOD11A2 产品, 空间分辨率为 1000 m, 时间分辨率为 8 d (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)。在 ArcGIS 中将其处理成与 LAI 数据具有相同分辨率与投影的 2000—2020 年逐月 LST 数据。归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 数据为 2000—2020 年 MOD13A2 产品, 空间分辨率为 1000 m, 时间分辨率为 16 d (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)。NDVI 数据结合 LST 数据用来反演温度植被干旱指数 TVDI, 作为土壤湿度的衡量指标, 具体反演方法见 1.3.1。为与 LAI 数据相对应, 计算 4—10 月份 LST 及 TVDI 数据均值, 分别作为 LST 和 TVDI 的年值数据。

使用 2000—2018 年气象站点地表温度日值数据集作为 MODIS 地表温度的验证数据, 站点数据来源于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>)。将秦巴山地 75 个气象站点的多点月均数据与 MODIS 月均地表

温度数据绘制散点图(图2),使用曲线拟合优度 R^2 和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)表征两组数据的差异程度, R^2 越高, RMSE 越低,表示两组数据差异越小,即 MODIS 地表温度数据的精度越高。结果表明, R^2 为 0.9442, RMSE 为 2.56,说明 MODIS 数据能很好地反映秦巴山地地温状况,可用于后续分析。RMSE 计算方法见相关文献^[23]。

植被类型数据为 2001 和 2019 年 MCD12Q1 产品,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)。该数据基于国际地圈生物圈计划(IGBP)17类全球植被分类方案,包括 11 个自然植被类型、3 个土地开发和镶嵌的地类和 3 个非草木土地类型定义类^[24]。数据经过严格的质量控制,对地表覆被变化反应敏感且空间连续性较好,适用于较大空间尺度的植被类型变化监测^[25]。在 ArcGIS 中筛选出两期数据中未变化部分作为本文植被类型数据,此方法能够有效消除单期数据的偶然性和不确定性。相较于自然植被,作物对地表水热的响应受人干扰较大,因此在后续分析时剔除作物及作物和自然植被体的镶嵌体,保留落叶阔叶林、常绿和落叶混交林(以下简称混交林)、多树草原、稀树草原、草原 5 种植被类型(图3)。植被类型数据用来分析地表水热对不同植被类型 LAI 的影响程度。

参考赵芳等基于秦岭、大巴山主山脊线和主要河流(嘉陵江、汉江)位置的划分方法,将秦巴山地按坡向分为秦岭南坡、秦岭北坡、大巴山南坡、大巴山北坡、西秦岭^[26],坡向数据用于分区统计秦巴山地不同坡向 LAI 与地表水热的分布特征。DEM 数据来源于地理空间数据云平台 STRM DEM 90 m 分辨率高程数据(<http://www.gscloud.cn>)。为反映秦巴山地植被绿色度与地表水热的垂直分布规律,本文将 DEM 以 500 m 为间隔划分海拔梯度:<500 m、500—1000 m、1000—1500 m、1500—2000 m、2000—2500 m、2500—3000 m、3000—3500 m、3500—4000 m 及 >4000 m,由于 4000 m 以上面积较小,因此将 >4000 m 区域分为同一海拔梯度。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 NDVI-LST 特征空间的 TVDI 模型构建

Sandholt^[27]等基于植被指数和地表温度之间的二维特征空间模型提出了温度植被干旱指数(Temperature vegetation drought index, TVDI),它是一种基于光学与热红外遥感通道数据进行植被覆盖区域表层土壤水分反演的方法^[28]。其公式为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{T_{s_{max}} - T_{s_{min}}}$$

$$T_{s_{max}} = a_1 + b_1 NDVI$$

$$T_{s_{min}} = a_2 + b_2 NDVI$$

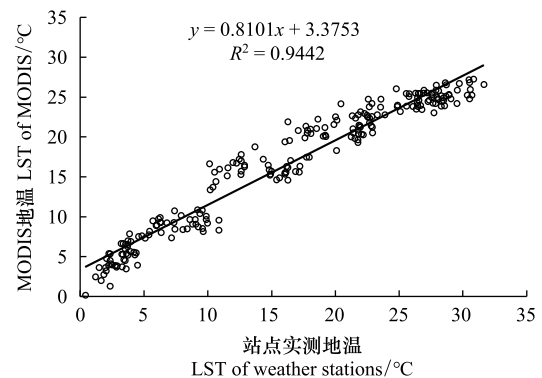


图2 站点实测地温与 MODIS 地温对比

Fig.2 Comparison of land surface temperature of the weather stations and MODIS land surface temperature

LST: 地表温度 Land surface temperature

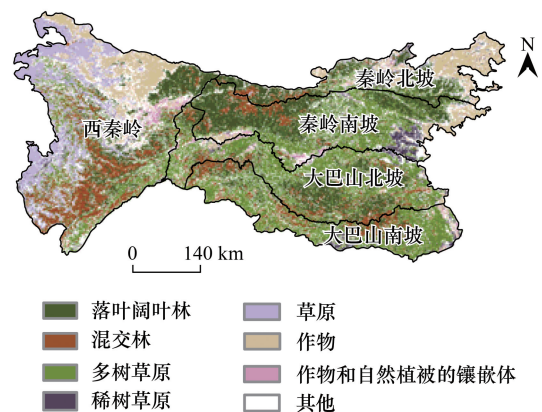


图3 2001—2019 年秦巴山地主要植被类型分布

Fig.3 Distribution of main vegetation types in Qinling-Daba Mountains from 2001 to 2019

式中, T_s 为地表温度; $T_{s_{\max}}$ 为 NDVI 对应的最高地表温度, 即干边; $T_{s_{\min}}$ 为 NDVI 对应的最低地表温度, 即湿边; a_1, b_1, a_2, b_2 分别为干、湿边线性拟合方程的系数。

本研究筛选相同 NDVI 下研究区内所有像元对应的最高和最低地表温度, 得到 252 个 (每年 12 个, 共 21 年) 时间段的 LST-NDVI 特征空间。TVDI 取值范围为 $[0, 1]$, 湿边 TVDI 值为 0, 干边 TVDI 值为 1。土壤湿度与 TVDI 值呈负相关关系, TVDI 越小土壤湿度越大, TVDI 越大土壤湿度越小。以第 230 期为例 (图 4), 干边拟合 $R^2 = 0.5937$, 湿边拟合 $R^2 = 0.6530$, 模型拟合效果良好, 可用于后续分析。

1.3.2 秦巴山地 LAI 变化趋势分析

Slope 趋势分析可反映某一时段植被变化趋势, $S > 0$ 代表植被呈改善趋势, $S < 0$ 代表植被呈退化趋势^[29]。Hurst 指数是定量描述时间序列长程依赖性的主要方法之一, 可以反映现在与未来变化的一致性^[30], $0.5 < H < 1$,

代表时间序列是一个持续性序列, 即未来变化趋势与过去趋势保持一致; 如果 $H = 0.5$, 代表时间序列为随机序列, 即未来变化趋势与过去无关; 如果 $0 < H < 0.5$, 代表时间序列是反持续性序列, 即未来变化趋势与过去趋势相反。两者结合可反映秦巴山地 LAI 现在及未来变化趋势, 将秦巴山地植被趋势分为 5 类: 持续改善区 ($S > 0, 0.5 < H < 1$)、由增变减区 ($S > 0, 0 < H < 0.5$)、由减变增区 ($S < 0, 0 < H < 0.5$)、持续退化区 ($S < 0, 0.5 < H < 1$) 和随机变化区 ($H = 0.5$)。Slope 和 Hurst 的计算方法见相关参考文献^[29-30]。

1.3.3 秦巴山地 LAI 影响因素分析

(1) 相关性分析。通过像元尺度的皮尔森相关性分析, 探究地表水热对 LAI 的影响。参考相关文献^[10], 设置当月 (即生长季同期)、提前 1 个月 (3—9 月份)、提前 2 个月 (2—8 月份) 3 种地表水热情景, 分别与生长季 (4—10 月份) LAI 计算相关系数, 探讨 LAI 对地表水热是否存在时间滞后响应。

(2) 主导因子分析。以 LAI 为因变量, LST、TVDI 为自变量建立像元尺度的多元线性回归方程, 然后对回归系数进行标准化, 标准化回归系数绝对值最大的因素即为该像元影响 LAI 的主导因素, 计算方法见相关参考文献^[17]。

(3) 广义可加模型 (Generalized additive models, GAM)。传统的归因分析假设自变量与因变量为线性关系, 然而实际中因变量往往不随自变量而单调变化, 而是呈现非线性相关。GAM 模型是由数据驱动而非统计分布模型驱动的非参数回归模型, 可对部分解释变量进行线性拟合, 对其他因子进行光滑函数拟合。模型不需要预先设定参数模型, 模型通过解释变量的平滑函数建立, 能够自动选择合适的多项式, 适用于响应变量与解释变量之间的关系是非线性或非单调的数据分析^[31-32]。本研究基于 Rstudio 中的 mgcv 包, 探讨响应变量 LAI 与解释变量 LST 和 TVDI 的非线性关系。

2 结果与分析

2.1 秦巴山地植被绿度时空分布及其与地表水热的关系

2.1.1 植被绿度空间分布及其与地表水热的关系

LAI、LST 以及 TVDI 年均值在不同海拔、坡向上具有空间差异 (图 5)。秦巴山地 LAI 值范围在 0—7, 其中 LAI 值在 1—5 的区域面积占比 94.67%。LST 范围在 2.4—32.9℃, TVDI 范围在 0.13—0.95。从不同海拔分析, 随海拔升高 LAI 均值先增后减, <1500 m 区域 LAI 随海拔升高而增加, >1500 m 区域 LAI 随海拔升高而减少, LST 及 TVDI 均随海拔升高呈减少趋势。<500 m 地区 LAI 值较低, LST 和 TVDI 值较高; 500—3000 m 地

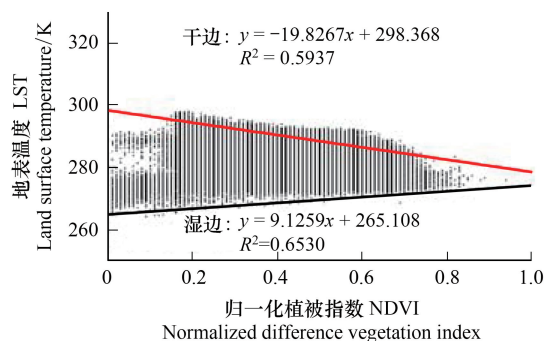


图 4 TVDI 干湿边拟合

Fig.4 The fitting of wet and dry edge of the TVDI

TVDI: 温度植被干旱指数 Temperature vegetation drought index

区 LAI 值相对较高,其中 1000—1500 m 地区 LAI 值达到最大,该区域 LST 和 TVDI 值适中; >3000 m 地区 LAI、LST 和 TVDI 值均较低。从不同坡向分析,LAI 均值大小为:大巴山北坡>大巴山南坡>秦岭南坡>秦岭北坡>西秦岭。大巴山为 LAI 高值区,该区域的 LST 值相对较高,TVDI 值相对较低;西秦岭为 LAI 低值区,对应 LST 和 TVDI 的低值区。因此,LAI 的分布格局并不是单一地表水热要素作用的结果,而是水热组合的综合调控的产物。LAI 高值往往出现在地表水热条件较好(LST 较高/适中,TVDI 适中/较低)的地区。

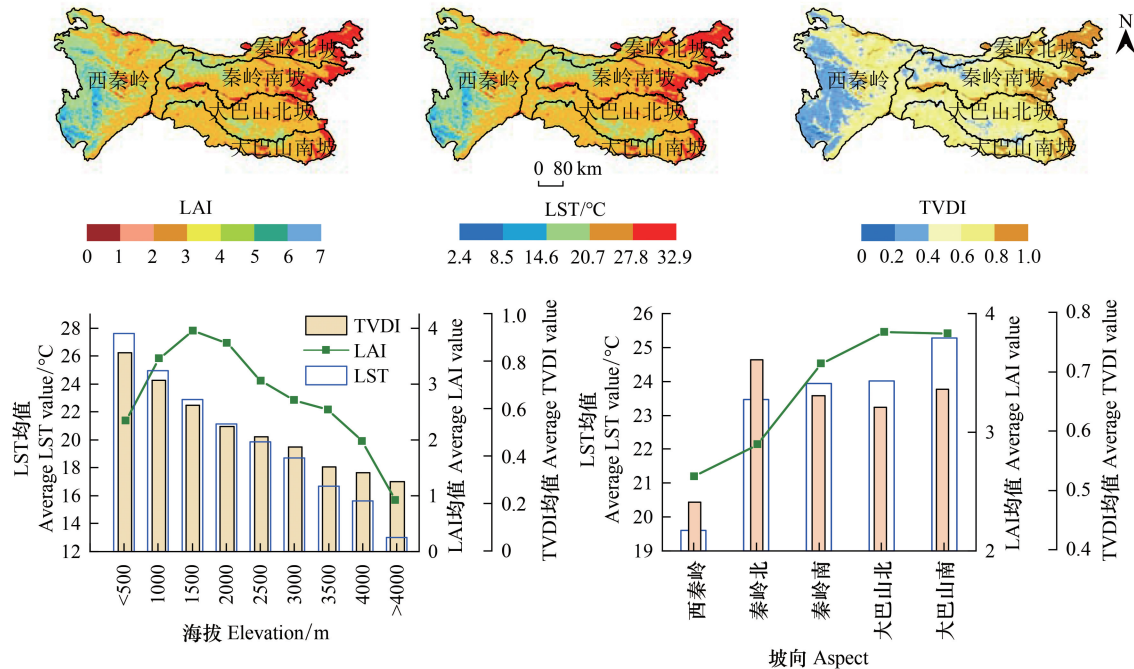


图5 秦巴山地 LAI 及地表水热空间分布及海拔、坡向分异

Fig.5 Spatial distribution, elevation and slope variations of LAI and surface hydrothermal in Qinling-Daba Mountains

LAI: 叶面积指数 Leaf area index; LST: 地表温度 Land surface temperature; TVDI: 温度植被干旱指数 Temperature vegetation drought index

2.1.2 植被绿色变化趋势及其与地表水热的关系

秦巴山地 LAI 由增变减区占比最大(72.99%),其次为持续改善区(21.14%),持续退化,由减变增和随机变化区累计占比不到 6%(图 6)。表示目前秦巴山地大部分区域 LAI 处于增加趋势,但未来变化的反向特征强于同向特征,以减少为主。不同海拔带 LAI 变化趋势存在明显差异(图 6): <2500 m 及 3500—4000 m 地区 LAI 以由增变减为主,持续改善次之;2500—3500 m 及 >4000 m 地区以由减变增为主。从不同坡向分析(图 6),各坡向 LAI 均以由增变减最多,持续改善次之,两者加和超过 90%,说明 LAI 变化趋势的坡向分异不明显。

为阐释秦巴山地 LAI 趋势与地表水热趋势的关联性,统计了 LAI 趋势面积占比最大区域(由增变减区)的同期地表水热变化情况(图 6)。结果表明,LST 以由增变减(56.04%)和持续增加(28.18%)为主,TVDI 以由减变增(59.25%)和持续减少(35.23%)为主。表明当前大部分地区的地表水热呈现增加趋势,但未来变化的反向特征强于同向特征(以减少为主),这与 LAI 趋势具有较好的一致性。但小部分区域的地表水热呈现持续增加趋势,即增加趋势在未来具有可持续性,这与 LAI 未来的趋势相反,说明该区域未来地表水热不断增加,但 LAI 却有所减少。

2.2 秦巴山地 LAI 与地表水热的相关性及其主导因子

在像元尺度上计算了 LAI 与地表水热的相关性系数,并进行显著性检验。结果表明 LAI 与同期 LST(当月 LST)以正相关为主(图 7),正相关通过 0.05 显著性检验的区域占研究区面积的 88.38%,正相关均值为 0.52,两者呈负相关面积较少,零星分布在研究区。LAI 与提前 1 个月、提前 2 个月的 LST 主要呈正相关

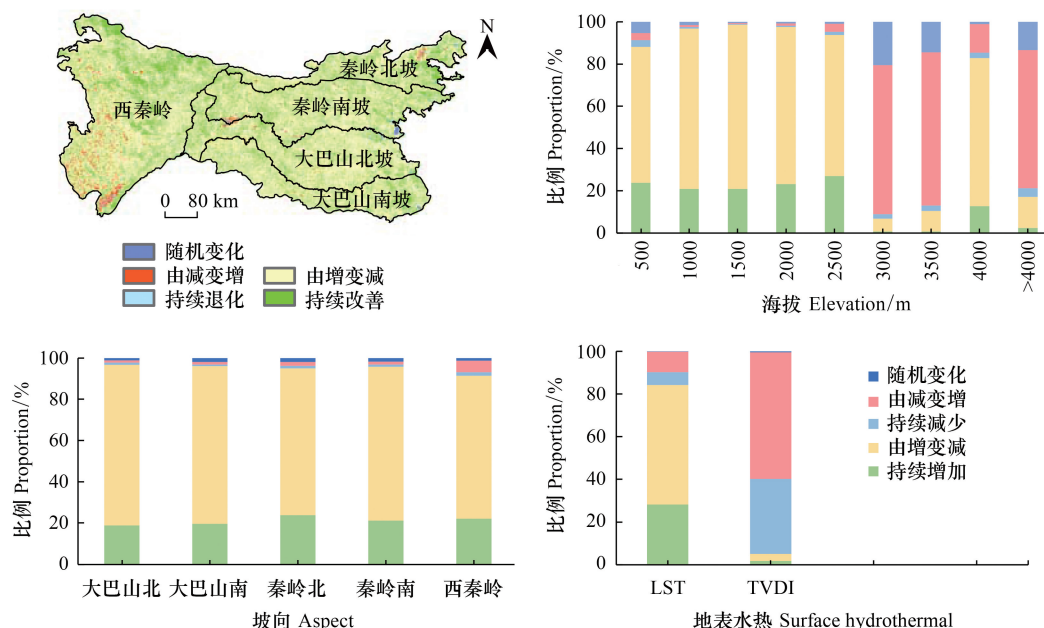


图6 秦巴山地 LAI 及地表水热趋势空间分布及海拔、坡向分异

Fig.6 Spatial distribution, elevation and slope variations of the LAI and surface hydrothermal trends in Qinling-Daba Mountains

(图7), 正相关均值均为 0.28, 通过 0.05 显著性检验的面积占比分别为 47.52%、35.20%。说明 LST 对秦巴山地 LAI 影响的时滞性不明显。

LAI 与同期 TVDI(当月 TVDI)以负相关为主(图7), 通过 0.05 显著性的负相关像元占比 45.45%, 负相关均值为 -0.33。LAI 与提前 1 个月 TVDI 的负相关像元占比 44.03% ($P < 0.05$), 负相关均值为 -0.28, 低于与当月 TVDI 的相关性(图7)。LAI 与提前 2 个月 TVDI 相关系数则以正值为主 (10.87%, $P < 0.05$), 但面积较小, 正相关均值为 0.19, 负相关占比 2.73%(图7)。因此, TVDI 与 LAI 以负相关为主, 即土壤湿度越高, 植被生长状况越好, LAI 与同期 TVDI 相关性最好, 强于与提前 1 个月与提前 2 个月的相关性, 表明 TVDI 对 LST 影响的时滞效应不明显。

地表水热对秦巴山地绝大部分地区 LAI 均有较大影响, 相比之下, TVDI 对 LAI 影响范围更加广泛, 主导的区域占比 72.22%, LST 主导区域仅占 25.49%(图8)。地表水热对不同植被类型的主导面积有一定差异(图8)。TVDI 在落叶阔叶林、混交林、多树草原、稀树草原和草原中主导面积的比例分别为 78.87%、57.34%、87.09%、74.90%、49.15%。LST 在落叶阔叶林、混交林、多树草原、稀树草原和草原中主导面积比例分别为 21.13%、42.66%、12.91%、25.10%、50.85%。表明 TVDI 对落叶阔叶林、混交林、多树草原和稀树草原的 LAI 占主导地位, TVDI 和 LST 对草原 LAI 的主导面积接近。

2.3 LAI 对地表水热的非线性响应

通过对地表水热与 LAI 间建立 GAM 模型, 获得解释变量的平滑回归函数, 得到影响因素对 LAI 影响效应图(图9)。GAM 模型检验结果如表 1 所示, 各植被类型模型调整判定系数均在 0.7 以上, 方差解释率均超过 70%, 说明建模结果良好, 模型具有很好的解释效果。自由度接近 1 时, 表示是线性关系, 自由度越大时, 则表示曲线关系越强。另外, 为消除自变量共线性的影响, 计算了 LST 与 TVDI 的相关系数, 结果表明相关系数绝对值在各植被类型中均小于 0.4, 自变量之间不存在共线性, 建模结果可靠。

LST 和 TVDI 对各植被类型 LAI 变化影响显著 ($P < 0.001$)。(表 1、图 9), 结果表明, 在落叶阔叶林地区, LAI 与 LST 呈线性正向关系 (自由度 = 1), LAI 随 LST 增加而单调递增。LAI 与 TVDI 呈非线性负向关系 (自由度 = 2.670): TVDI < 0.45 时, 随 TVDI 增加 LAI 变化平缓, TVDI > 0.45 时, LAI 对 TVDI 响应的敏感性增强, 随

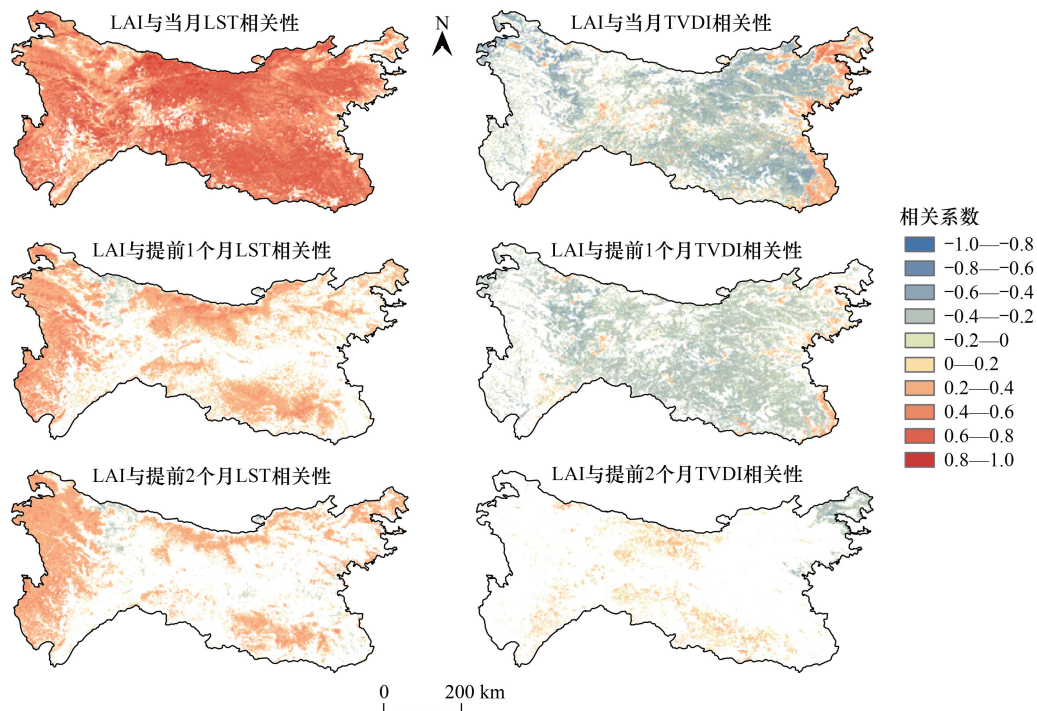


图7 秦巴山地 LAI 与地表水热相关性空间分布

Fig.7 Spatial distribution of correlation between LAI and surface hydrothermal in Qinling-Daba Mountains

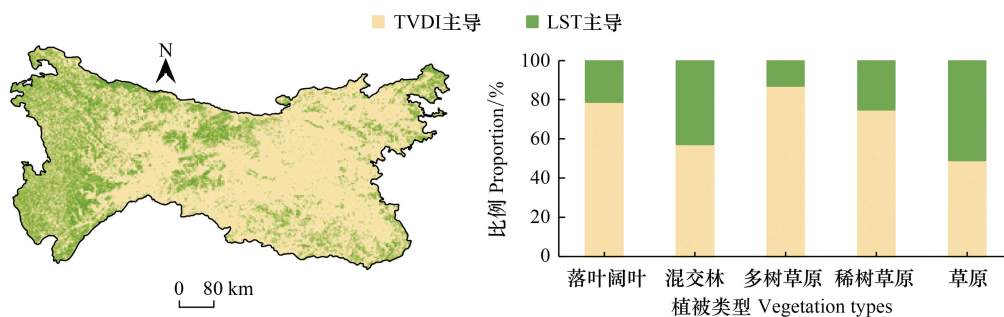


图8 影响秦巴山地 LAI 的主导因子

Fig.8 Leading factors affecting LAI in Qinling-Daba Mountains

TVDI 增加迅速降低。说明落叶阔叶林 LAI 对 TVDI 的响应存在一定阈值,使得 LAI 的响应规律在阈值两侧呈现明显差异。在混交林地区, LAI 与 LST 大致呈线性正相关(自由度=1.845),与 TVDI 呈非线性负相关(自由度=2.750), TVDI<0.35 时,随 TVDI 增加 LAI 变化平缓,有轻微增加趋势, TVDI>0.35 时,随 TVDI 增加 LAI 迅速降低。在多树草原地区, LAI 对 LST 和 TVDI 具有非线性的响应特征,当 LST 和 TVDI 达到一定阈值, LAI 变化不再明显, LST 的阈值在 25℃ 左右, TVDI 的阈值在 0.6 左右。在稀树草原地区, LAI 对 LST 和 TVDI 具有非线性的响应特征,当 LST>27℃, TVDI<0.7 时, LAI 变化较为平缓。在草原地区, LAI 对 LST 和 TVDI 为非线性响应,随 LST 增加,曲线斜率增大,说明 LST 对 LAI 的影响增强,而 TVDI 与 LAI 为波动负相关(自由度=5.731), TVDI 在 0.4 左右出现拐点。

综上所述,除落叶阔叶林和混交林 LAI 随 LST 增加而线性递增外,各植被类型 LAI 对地表水热均为非线性响应。 LAI 随 LST 增加主要呈非线性增加趋势,随 TVDI 增加呈非线性降低趋势,存在一定阈值界限,使得

阈值两侧 LAI 的响应规律呈现明显差异,且不同植被类型的阈值不同。

表 1 不同植被类型 GAM 模型检验结果
Table 1 GAM model test results for different vegetation types

模型检验结果 Model test results	落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	混交林 Mixed forest	多树草原 Woody savannas	稀树草原 Savannas	草原 Grasslands
调整判定系数 Judgment coefficient	0.796	0.837	0.759	0.707	0.803
方差解释率 Deviance explained/%	80.1	84.3	77.7	72.2	81.5
显著性 Significance	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
LST 自由度 Estimated degrees of freedom for LST	1.000	1.845	6.145	4.568	2.433
TVDI 自由度 Estimated degrees of freedom for TVDI	2.670	2.750	4.676	2.667	5.731
LST 与 TVDI 相关系数 Correlation coefficient between LST and TVDI	-0.28	-0.28	-0.34	-0.30	-0.10

GAM: 广义可加模型 Generalized additive models; LST: 地表温度 Land surface temperature; TVDI: 温度植被干旱指数 Temperature vegetation drought index

3 讨论

秦巴山地 LAI 具有海拔和坡向分异,一方面是因为地形不同直接导致植被类型的差异^[33],另一方面,地形分异导致了地表水热条件的再分配,从而对植被绿度起到间接的调控作用。LAI 高值分布于地表水热较好的 1000—1500 m 中海拔段以及大巴山地区。其中 1000—1500 m 海拔段植被类型以混交林、落叶阔叶林和多树草原为主,且地表水热状况较好,无极端地表水热条件制约,植被覆盖度较高^[34],该区域为 LAI 高值中心。另外,大巴山作为南北过渡带的南部,植被条件更接近亚热带地区,优于位于北部的秦岭^[35],且大巴山的地表温度和土壤湿度高于秦岭地区,因此该地区 LAI 值也相对较高。LAI 低值区分布在<500 m 海拔段、>3000 m 海拔段以及西秦岭地区,造成这种分布的原因有所不同:<500 m 的低海拔区植被受人类活动影响较大,城镇化水平较高,建筑及道路等基础设施建设占用了大量生态用地^[34];此外该海拔地区 TVDI 值较高,即土壤湿度较低,受水分胁迫,该地区植被生长状况较差。而西秦岭和>3000 m 高海拔地区以草原为主,植被条件较差,虽然土壤湿度条件较好,但地表温度较低,极大程度上限制了植被生长,这与陈超男等基于 NDVI 的结果较为一致^[34]。因此,地表温度和土壤湿度均影响植被生长,但两者交互叠加对驱动植被动态响应具有更重要意义^[36]。

秦巴山地 LAI 以由增变减为主,未来变化的反向特征强于同向特征,这与刘宪峰等的研究结果一致^[29]。在 LAI 的由增变减区,大部分区域地表水热也呈由增变减趋势,两者的变化趋势具有较好的一致性,小部分区域地表水热呈现持续增加趋势,这表明一定程度的增温和增湿有利于植被活动增强,但超过一定幅度则可能会对植被产生不利影响^[14]。

植被对气温和降水往往存在时滞效应^[10, 37—38],而本文结果表明 LAI 对地表水热的时滞效应不明显,与同期地表水热的相关性更强。表明相比气温和降水,地表水热对植被生长的作用更具直接性。秦巴山地 LAI 受土壤湿度的主导范围大于地表温度,在蒙古高原地区也有同样的结论^[39],而在青藏高原等高寒地区,地温则为植被生长的主导因素^[17]。造成这种差异的原因是高海拔地区的地表温度较低,对植被生长的限制作用尤为突出,在本研究中西部高海拔地区地温主导面积明显上升,也印证了这一点。

研究发现植被动态对气候具有非线性响应且存在响应阈值,在阈值两侧响应规律不同^[14],该结论已在天津地区^[40]、长江流域上游^[41]和海河上游^[36]等地的研究中得到证实。本文结果表明,秦巴山地各植被类型 LAI 对地表水热同样以非线性响应为主。首先,气温和地温适当升高可以增加净光合速率、蒸腾速率和气孔导度^[42],但增温过高可能会加速土壤水分蒸发,形成干旱趋势,植被还可能通过减小叶面积和降低光饱和点等方式防止自身失水,对植被生长的促进作用消失,甚至限制植被生长^[43]。其次,土壤中许多养分和矿物质

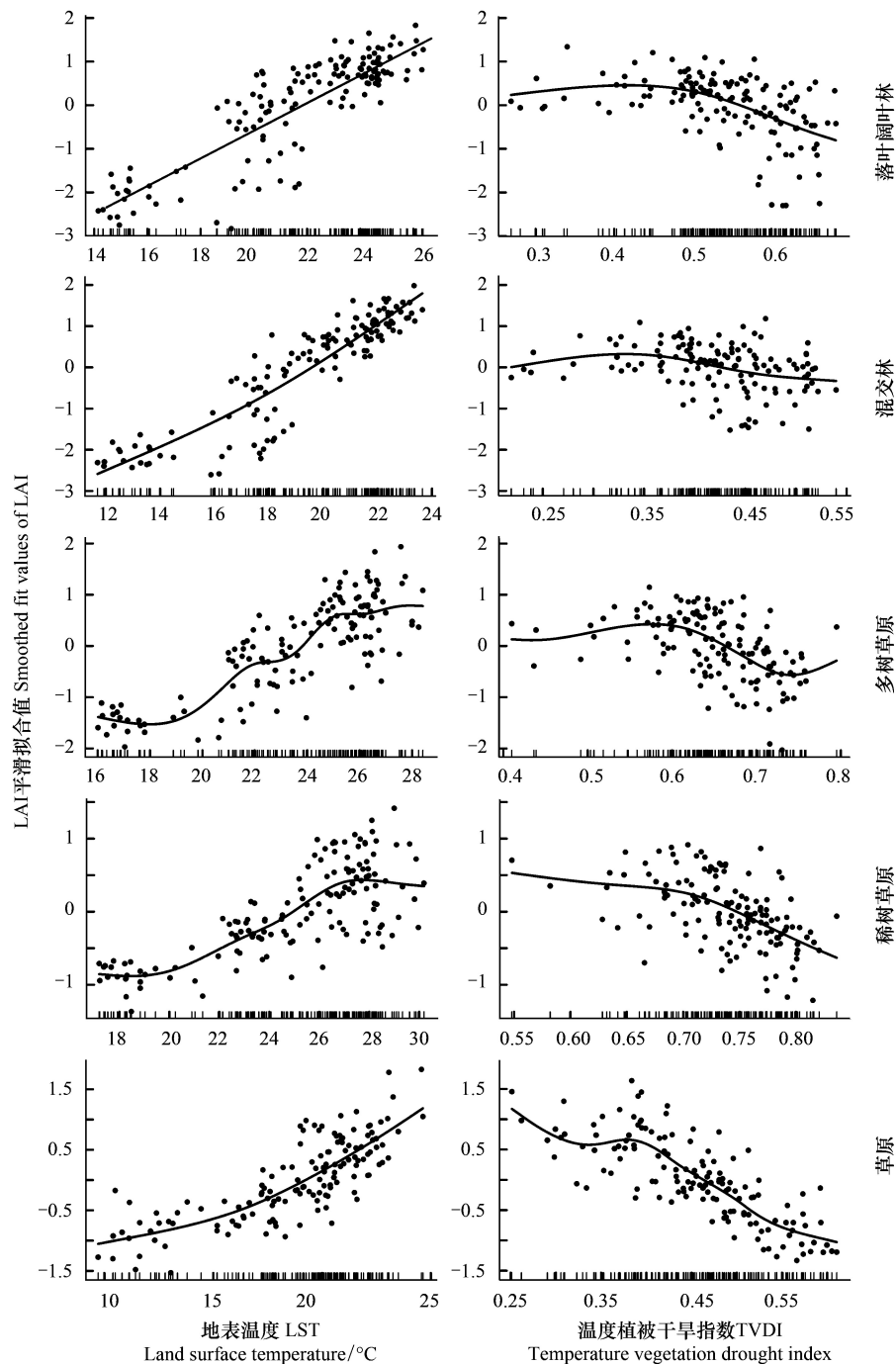


图9 不同植被类型 LAI 对地表水热的非线性响应

Fig.9 LAI' nonlinear response to surface hydrothermal for different vegetation types

阴影部分的上下边表示拟合可加函数的逐点标准差,即 95%置信区间的上下限;实线表示 LAI 的平滑拟合曲线

要在溶于水的条件下才能被植物吸收,因此适宜的土壤水分对植被生长起促进作用^[44],然而,当水分的增加超过植被所需时,会影响根系呼吸,对植被的生长正向作用减弱^[45]。

本文主要探讨了秦巴山地 LAI 对地表水热的响应。但随着人类活动的加剧,剥离出人类活动和气候因素对植被的影响成为未来需要解决的问题。此外,植被变化对地表水热的反馈作用也是今后研究的主要内容。

4 结论

本文首先分析了秦巴山地 LAI 均值和趋势在海拔、坡向等尺度的空间分布格局,探讨了 LAI 与地表水热在空间格局上的关联性,然后分析了 LAI 与不同时滞情景下地表水热的相关性以及影响 LAI 变化的主导因素,最后进一步探究了不同植被类型 LAI 对地表水热的非线性响应情况。主要得到以下几点结论:

(1) 秦巴山地 LAI 集中在 1—5,在海拔分布上,LAI 均值随海拔先增后减,最大值出现在 1000—1500 m 地区,在坡向分布上,大巴山南北坡>秦岭南北坡>西秦岭。LAI 高值区与地表水热条件较好的区域具有较好的空间一致性,LAI 低值区主要分布在 LST 较低或 TVDI 较高的地区。

(2) 秦巴山地 LAI 的变化趋势以由增变减为主。除 2500—3500 m 及 4000 m 以上地区以由减变增为主外,其他海拔均以由增变减为主,持续改善次之,坡向对 LAI 趋势的影响差异不明显。在 LAI 由增变减区,地表水热均以由增变减为主,持续增加次之。

(3) 秦巴山地 LAI 与 LST 为显著正相关,与 TVDI 为显著负相关。LAI 对地表水热以同期响应最为显著,时滞效应不明显。在主导因素上,相较于 LST,TVDI 对 LAI 影响范围更加广。在混交林、落叶阔叶林、多树草原和稀树草原地区,TVDI 主导面积广,在草原区,LST 与 TVDI 主导面积接近。

(3) 非线性分析结果显示,除落叶阔叶林和混交林 LAI 与 LST 呈线性正向关系外,各植被类型 LAI 与地表水热均为非线性关系。随 LST 增加,LAI 主要呈现非线性增加的特征,随 TVDI 增加,LAI 则呈非线性降低趋势。存在一定阈值,使得阈值两侧 LAI 对地表水热的响应存在差别,且响应阈值因植被类型不同而存在差别。

参考文献 (References):

- [1] 郑度, 吴绍洪, 尹云鹤, 杨勤业, 赵东升, 张雪芹. 全球变化背景下中国自然地域系统研究前沿. 地理学报, 2016, 71(9): 1475-1483.
- [2] Zhang Y L, Song C H, Band L E, Sun G, Li J X. Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 145-155.
- [3] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.
- [4] 杨敏, 林杰, 顾哲衍, 佟光臣, 翁永兵, 张金池, 鲁小珍. 基于 Landsat 8 OLI 多光谱影像数据和 BP 神经网络的叶面积指数反演. 中国水土保持科学, 2015, 13(4): 86-93.
- [5] 姚雄, 余坤勇, 杨玉洁, 曾琪, 陈樟昊, 刘健. 基于随机森林模型的林地叶面积指数遥感估算. 农业机械学报, 2017, 48(5): 159-166.
- [6] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.
- [7] 张静静, 郑辉, 朱连奇, 崔耀平, 张晓东, 叶露培. 豫西山地植被 NDVI 及其气候响应的多维变化. 地理研究, 2017, 36(4): 765-778.
- [8] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [9] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [10] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438.
- [11] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 杨艳昭. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1425-1435.
- [12] 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. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [13] 陆晴, 吴绍洪, 赵东升. 1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系. 地理科学, 2017, 37(2): 292-300.
- [14] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [15] 贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2019, 39(14): 5058-5069.
- [16] Xia L, Song X N, Leng P, Wang Y W, Hao Y B, Wang Y F. A comparison of two methods for estimating surface soil moisture based on the triangle model using optical/thermal infrared remote sensing over the source area of the Yellow River. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(5/6): 2120-2137.
- [17] 夏龙, 宋小宁, 蔡硕豪, 胡容海, 郭达. 地表水热要素在青藏高原草地退化中的作用. 生态学报, 2021, 41(11): 4618-4631.
- [18] 张静静, 朱文博, 赵芳, 朱连奇, 李茂娟, 朱明, 张晓东. 山地平原过渡带地形起伏特征及其对景观格局的影响——以太行山淇河流域为例. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(4): 476-486.
- [19] 姚永慧, 寇志翔, 胡宇凡, 张百平. 秦巴山区马尾松林和油松林的空间分布及亚热带与暖温带界线划分. 地理学报, 2020, 75(11): 2298-2306.

- [20] Fang H L, Jiang C Y, Li W J, Wei S S, Baret F, Chen J M, Garcia-Haro J, Liang S L, Liu R G, Myneni R B, Pinty B, Xiao Z Q, Zhu Z C. Characterization and intercomparison of global moderate resolution leaf area index (LAI) products: analysis of climatologies and theoretical uncertainties. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(2): 529-548.
- [21] 翟雅倩, 张翀, 周旗, 常宵移. 秦巴山区植被覆盖与土壤湿度时空变化特征及其相互关系. *地球信息科学学报*, 2018, 20(7): 967-977.
- [22] 赵婷, 白红英, 邓晨晖, 孟清, 郭少壮, 齐贵增. 2000—2016 年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应. *生态学报*, 2019, 39(12): 4499-4509.
- [23] 王慧, 肖登攀, 赵彦茜, 柏会子, 张可慧, 唐建昭, 刘剑锋, 郭风华, 刘德立. 基于 CMIP6 气候模式的华北平原极端气温指数评估和预测. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(5): 86-94, 142.
- [24] Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, Zhang X Y, Muchoney D, Strahler A H, Woodcock C E, Gopal S, Schneider A, Cooper A, Baccini A, Gao F, Schaaf C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 287-302.
- [25] 贾明明, 刘殿伟, 宋开山, 王宗明, 姜广甲, 杜嘉, 曾丽红. 基于 MODIS 时序数据的澳大利亚土地利用/覆被分类与验证. *遥感技术与应用*, 2010, 25(3): 379-386.
- [26] 赵芳, 张久阳, 刘思远, 王增艳, 王黎欢, 顾浩婷, 李万隆. 秦巴山地 NPP 及对气候变化响应的多维地带性与暖温带-亚热带界线. *生态学报*, 2021, 41(1): 57-68.
- [27] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 213-224.
- [28] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子锦, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖, 孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述. *遥感学报*, 2020, 24(6): 618-671.
- [29] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.
- [30] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素. *生态学报*, 2017, 37(3): 788-797.
- [31] 张莹, 张婕, 王式功, 康平, 张家熙, 张小玲, 李运超. 基于 GAMs 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响—以成都为例. *中国环境科学*: 1-18[2022-4-23]. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210526.006.
- [32] 邓建明, 秦伯强, 王博雯. 广义可加模型在 R 中的快捷实现及蓝藻水华预测分析中的应用. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 835-842.
- [33] 朱林富, 谢世友, 杨华, 马明国. 基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2023-2033.
- [34] 陈超男, 朱连奇, 田莉, 李新鸽. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析. *生态学报*, 2019, 39(9): 3257-3266.
- [35] 赵芳, 张百平, 朱连奇, 姚永慧, 崔耀平, 刘俊杰. 秦巴山地垂直带谱结构的时空分异与暖温带—亚热带界线问题. *地理学报*, 2019, 74(5): 889-901.
- [36] 万思成, 曾瑞, 张建国, 王国庆. 海河上游典型流域植被动态演变规律及其对气候因子的响应. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2019, 40(6): 25-31.
- [37] 武正丽, 贾文雄, 赵珍, 张禹舜, 刘亚荣, 陈京华. 2000—2012 年祁连山植被覆盖变化及其与气候因子的相关性. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1241-1252.
- [38] 刘宪锋, 任志远. 西北地区植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *中国农业科学*, 2012, 45(10): 1954-1963.
- [39] 温都日娜, 包玉海, 银山, 王永芳. 2000—2014 年蒙古高原植被覆盖时空变化特征及其对地表水热因子的响应. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1345-1356.
- [40] 郭军, 李明财, 刘德义. 天津地区归一化植被指数时间动态及其与气候因子的关系. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1055-1059.
- [41] 韩继冲, 喻舒琳, 杨青林, 邵怀勇, 刘恩勤. 1999—2015 年长江流域上游植被覆盖特征及其对气候和地形的响应. *长江科学院院报*, 2019, 36(9): 51-57.
- [42] 徐振锋, 胡庭兴, 张力, 张远彬, 鲜骏仁, 王开运. 青藏高原东缘林线交错带糙皮桦幼苗光合特性对模拟增温的短期响应. *植物生态学报*, 2010, 34(3): 263-270.
- [43] Zhang K, Kimball J S, Nemani R R, Running S W, Hong Y, Gourley J J, Yu Z. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15956.
- [44] Gourdji S M, Sibley A M, Lobell D B. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 024041.
- [45] Ukkola A M, Prentice I C, Keenan T F, van Dijk A I J M, Viney N R, Myneni R B, Bi J. Reduced streamflow in water-stressed climates consistent with CO₂ effects on vegetation. *Nature Climate Change*, 2016, 6(1): 75-78.