

DOI: 10.5846/stxb201807231575

李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 黄铝文, 高义民. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析. 生态学报, 2019, 39(22): - .
Li J K, Yang Y T, Zhang H R, Huang L W, Gao Y M. Spatio-temporal variations of net primary productivity and its natural and human factors analysis in Qinling-Daba Mountains in the past 15 years. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): - .

秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析

李金珂¹, 杨玉婷¹, 张会茹¹, 黄铝文¹, 高义民^{1,2,*}

1 西北农林科技大学 a. 资源环境学院, b. 信息工程学院, 杨凌 712100

2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100

摘要: 植被 NPP 作为衡量陆地生态系统的关键指标和地表碳循环的重要组成部分, 能够合理地评价生态系统变化及其可持续性。基于 MOD17A3 数据, 借助 GIS 空间分析、相关性分析及地理探测器模型等方法, 本文探讨了 2000—2014 年秦巴山区 NPP 时空格局及演变特征, 并对影响 NPP 的自然和人为因子进行量化研究。结果表明: (1) 秦巴山区近 15 年 NPP 总量整体呈波动增加趋势, 增速 0.65 TgC a^{-1} , 单位面积 NPP 均值为 $493.09 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 呈“西高东低”空间特征, 地域差异明显; (2) 不同植被类型的 NPP 总量存在差异, 阔叶林和栽培植被是对秦巴山区生态系统最具贡献的植被类型; (3) NPP 随高程、坡度均呈阶段性变化特征, 其中坡度影响 NPP 变化的幅度弱于高程, NPP 与降雨、气温、实际蒸散量均呈显著正相关关系; (4) 自然因子对 NPP 贡献率存在显著差异 ($P < 0.01$), 依次排序为: 实际蒸散量 > 降雨 > 气温 > 高程 > 坡度, 且研究区 NPP 受多种自然因子的交互影响; (5) 人为因子对 NPP 的影响表现为土地利用类型变化造成 NPP 总量的损益, 可分为还林还草的积极效应及城市发展和人类破坏等的消极效应。

关键词: NPP; 时空演变; 自然与人为因子; 地理探测器; 秦巴山区

Spatio-temporal variations of net primary productivity and its natural and human factors analysis in Qinling-Daba Mountains in the past 15 years

LI Jinke¹, YANG Yuting¹, ZHANG Huiru¹, HUANG Lvwen¹, GAO Yimin^{1,2}

1 Northwest A & F University, a. College of Natural Resources and Environment, b. College of Information Engineering, Yangling 712100, China

2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China

Abstract: As a key indicator for measuring terrestrial ecosystems and an important part of the surface carbon cycle, net primary productivity (NPP) can reasonably assess ecosystem changes and sustainability. Based on MOD17A3 data and using GIS spatial analysis, correlation analysis, and geodetector model, this paper discussed the spatio-temporal pattern and dynamic variations of NPP in Qinling-Daba Mountains from 2000 to 2014. At the same time, the quantitative analysis on the natural and human factors affecting NPP were carried out in order to identify the main influence factors. The results showed that: (1) in the past 15 years, the growth rate of total NPP in Qinling-Daba Mountains was 0.65 TgC a^{-1} with a fluctuating increase trend. The average NPP per unit area was $493.09 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ with obviously regional differences. The NPP was higher in the west and lower in the east part of study area. (2) The total NPP of different vegetation types was different. Broad-leaved forest and cultivated vegetation were the most important types contributing to the ecosystems of Qinling-Daba Mountains. (3) The NPP changes in stages with elevation and slope, among which the extent of slope's influence on NPP

基金项目: 陕西省重大农技推广服务试点项目 (2016XXPT-00)

收稿日期: 2018-07-23; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoyim@nwsuaf.edu.cn

was weaker than that of elevation, and NPP had a significant positive correlation with rain, temperature, and evapotranspiration. (4) There were significant differences in the contribution rate of the natural factors to the NPP ($P < 0.01$) with the order of $ET > \text{rain} > \text{temperature} > \text{elevation} > \text{slope}$. The contribution rate of interaction between any two natural factors was higher than that of single factor, that is, the NPP in the study area was affected by interaction of multiple natural factors. (5) The impact of human factors on the NPP was manifested as the profit and loss of total NPP caused by the change of land use type, which can be divided into the positive effect of returning forest and grassland and the negative effects of urban development and human destruction.

Key Words: NPP; spatio-temporal variations; natural and human factors; geodetector; Qinling-Daba Mountains

植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)是绿色植物通过光合作用,在单位时间、面积上将光能转化为化学能所积累的干物质总量——即从有机物总量(GPP)中扣除自养呼吸(RA)后剩余的部分。它是表征陆地生态系统质量状况、评价区域生态系统功能协调性及可持续发展的重要指标^[1]。

研究 NPP 对于探明陆地生态系统的作用机制和制定可持续发展战略具有重要的理论和实践意义,因此多年来一直是生态学等领域研究的热点,并成为国际研究计划的核心内容之一^[2]。

随着空间探测技术的不断进步,利用遥感观测数据结合生态过程模型(BIOME-BGC)开展陆地 NPP 监测和变化趋势分析已成为研究 NPP 的有效手段^[3-5],并在全球不同区域得到验证^[6-7]。国内学者应用 MOD17A3 数据对国内众多区域如横断山区^[8]、长江源生态脆弱区^[9]、西北干旱区^[10]、黄土高原^[11]、锡林郭勒盟草原^[12]、中国东南部^[13]及全国农田^[14]等不同空间尺度的 NPP 时空格局及影响因子进行分析,均发现 NPP 与降雨、气温存在相关性,但影响 NPP 变化的主要气候因子存在明显的区域差异性。此外 NPP 时空分异除与上述气候因素相关外,还可能受到地形、植被类型等其他自然因子^[15-16]和人为因子^[12,17]的影响;地形可引起植被垂直分带现象,不同植被类型 NPP 存在差异,人为活动造成土地利用方式转变进而影响 NPP 变化。因此,区域尺度 NPP 变化的影响机制尚未完全清晰^[18]。

秦巴山区作为我国地理重要南北分界线,生态脆弱、气候敏感,自然过渡特征明显,一直以来都是生态环境变化研究的热点区域^[19]。目前,有关该地区的 NPP 研究多集中于狭义的秦岭山地或陕西境内^[20-21],研究内容多为模型估测、时空演变及与气温、降雨的相关性^[22-23],而对秦岭-大巴山广大区域 NPP 的地形、植被等自然因子和人为因子的贡献率以及因子交互作用的定量研究还有待补充。基于此,本文运用 MOD17A3 数据,分析 2000—2014 年秦巴山区 NPP 时空演变特征,并对 NPP 的自然和人为因子量化研究,以期查明 NPP 变化的主要影响因素,为深入探索区域生态系统与环境因子的内在联系和改善生态环境、合理开发利用自然资源提供理论依据。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

秦巴山区位于我国中部($30^{\circ}30' - 34^{\circ}37'N$, $103^{\circ}44' - 113^{\circ}13'E$),总面积 22.5 万 km^2 ,地跨甘、蜀、陕、渝、豫、鄂 5 省 1 市 80 个县/区(图 1),地势西高东低,海拔高度悬殊。地貌类型以山地丘陵为主,间有盆地,形成“三山夹两川”格局。全区受季风气候影响,兼有暖温带和亚热带特征,水资源丰富,是汉江、嘉陵江、丹江等主要河流的发源地,年均降水量 450—1300mm,年均温度 12—16℃。植被类型多样且地带特征明显,秦岭主体为暖温带落叶阔叶林为优势的植被类型,秦岭以南的大巴山区为北亚热带常绿—落叶阔叶混交林^[24],是我国人文、地理、气候、生物等南北过渡区,也是气候变化的敏感区和生态环境的脆弱区^[25]。

1.2 数据来源及处理

本文使用的 NPP 为 2000—2014 年 MOD17A3 数据,空间分辨率 1km,是美国蒙大拿大学数字地球动态研

究组 (NTSG) 提供的遥感数据产品 (<http://files.ntsg.umd.edu/data/>), 秦巴山区在正弦曲线投影中的产品号为 h26v05、h27v05。该数据的估算采用 BIOME-BGC 模型^[8], 纠正云层和气溶胶影响, 精度得到提高。产品中的质量控制数据 (NPP_QC) 可检验不同地区 NPP 可靠性^[16], 经统计研究区 NPP 数据质量为高、中等级区域达 96.2%, 表明数据质量较好, 在该区域 NPP 的研究中具有可靠性, 反演失败面积仅 0.56% (集中于湖泊水库等非陆地区), 为突出陆地 NPP 变化规律将其剔除。

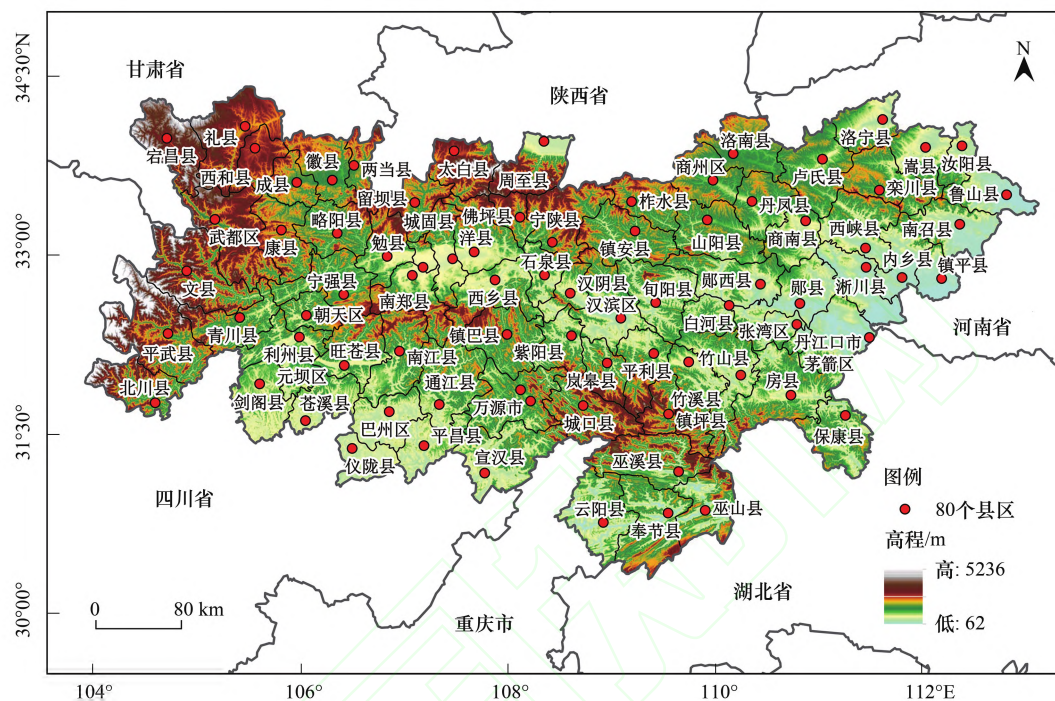


图 1 秦巴山区高程及地理区位图

Fig.1 The elevation and geographical location of Qingling-Daba Mountains

气候数据包括降雨、气温和蒸散量数据。其中, 2000—2014 年降雨和气温数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 空间分辨率 1km, 基于全国 2400 多个气象站点日观测数据, 应用 ANUSPLIN 软件由平滑样条函数法分析插值生成^[26], 按区域特征划分类型区。蒸散量 (Evapotranspiration, ET) 采用 2000—2014 年 MOD16A3 产品, 下载地址: <http://files.ntsg.umd.edu/data/>。该数据集包括 4 个子数据, 基于 Penman-Monteith 遥感模型估算^[27], 空间分辨率 1km。利用 MOD16A3 数据对蒸散量进行研究已得到广泛应用和验证^[27-28], 故该数据在秦巴山区的研究中符合精度要求, 具有可靠性。本文选取按年合成实际蒸散量 ET, 按自然间断点法^[29]分类。

地形数据采用 SRTM 90m DEM 产品, 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。从高程数据中提取坡度, 并根据区域特征^[15]及水土保持坡度分级标准 (GB_T15772—1995) 划分为 6 类。

植被类型采用 1:100 万栅格数据, 研究区包括阔叶林、针叶林、灌木、草丛、草甸、栽培植被 6 种植被类型; 土地利用数据为 2000 和 2010 年两期, 按分类体系划分耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个一级类。以上数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。

上述数据均按研究区范围进行镶嵌、裁剪, 定义投影为 WGS—1984; 因 MODIS 数据以 HDF 格式存储, 利用 MCTK 工具转换为 tiff 格式, 得到逐年 NPP 和 ET 栅格数据; 地形数据重采样为 1km。

2 研究方法

2.1 GIS 空间分析

针对连续的时间序列数据, 本文采用 GIS 空间分析的线性拟合法对 NPP 变化趋势进行逐栅格分析, 并进

行显著性 F 检验^[9], 计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NPP}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中, Slope 为 NPP 的拟合斜率, NPP_i 为第 i 年 NPP 值, i 为年变量, n 为样本数。Slope 反映某一时段总体变化趋势, Slope > 0 呈增加趋势, 反之呈减少趋势。查 F 分布临界值表, 显著性水平为 95% 和 99% 时, 其临界值为 4.667 和 9.074。据此将变化趋势划分为 5 类: 极显著减少 (Slope < 0, $P < 0.01$)、显著减少 (Slope < 0, $0.01 \leq P < 0.05$)、变化不显著 ($P \leq 0.05$)、显著增加 (Slope > 0, $0.01 \leq P < 0.05$)、极显著增加 (Slope > 0, $P < 0.01$)。

2.2 相关性分析

地理要素之间相互关系密切程度的测定, 主要是通过对相关系数的计算和检验来完成^[14]。本文通过逐格的空分析对 NPP 及其驱动因子的相关性进行探讨, 计算公式为:

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

式中, r_{xy} 为 NPP 与驱动因子的相关系数, x_i 为第 i 年 NPP 值, y_i 为第 i 年的因子值, $\bar{x}$ 为 15 年间 NPP 平均值, $\bar{y}$ 为 15 年间因子的平均值, n 为样本数, 采用 t 检验法对相关系数进行显著性检验。

2.3 地理探测器分析

地理探测器是探测空间分异性, 以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法, 包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测^[30]。本文选用地理探测器的因子探测和交互作用探测。其中, 因子探测可用来解析某种因子是否是形成 NPP 空间分异主要原因, 计算公式为:

$$P = 1 - \frac{1}{n\sigma_H^2} \sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{H_{D,i}}^2 \quad (3)$$

式中, n 和 σ^2 为区域样本数和方差, m 为 D 的分区个数, $n_{D,i}$ 为 D 在 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 级区域样本数。 P 取值范围 $[0, 1]$, P 值越大表明该因子对 NPP 的影响越大, 根据 P 值大小可判断各因子的贡献率。

交互作用探测, 用来识别两个因子间的交互作用, 是否会减弱或增强对 NPP 影响, 或者因子间的交互作用是独立的^[31]。计算方法: 首先, 运用公式 (3) 分别计算单因子 X_1 和 X_2 的 P 值: $P(X_1)$ 和 $P(X_2)$; 再用公式 (3) 计算双因子交互 (即 X_1 和 X_2 两个图层叠加相交成一个新图层 $X_1 \cap X_2$) 的 P 值: $P(X_1 \cap X_2)$ 。

交互探测结果如下: $\min(P(X_1), P(X_2)) < P(X_1 \cap X_2) < \max(P(X_1), P(X_2))$, 则交互后单因子非线性减弱; $P(X_1 \cap X_2) < \min(P(X_1), P(X_2))$, 则交互后非线性减弱; $P(X_1 \cap X_2) > \max(P(X_1), P(X_2))$, 则交互后双因子增强; $P(X_1 \cap X_2) > P(X_1) + P(X_2)$, 则交互后非线性增强; $P(X_1 \cap X_2) = P(X_1) + P(X_2)$, 则交互后独立。

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 时间演变特征

秦巴山区 2000—2014 年 NPP 总量的年际变化呈波动增加趋势 (图 2a), 增速 0.65 TgC a^{-1} , 波动范围 $87.31 \sim 121.15 \text{ TgC}$ ($1 \text{ TgC} = 10^{12} \text{ gC}$), 多年平均值 110.74 TgC , 其中, 2008 年 NPP 总量最高达 121.15 TgC , 超出平均值 10.41 TgC , 2001 年 NPP 总量最低仅 87.31 TgC , 低于平均值 23.43 TgC 。逐年对比 NPP 总量偏离平均值的程度, 其中 2001 年和 2011 年偏离平均值程度较大, 2003—2007 年期间 NPP 总量在平均值周围波动, 变化不明显, 从 2012 年起 NPP 总量均高于多年平均值。

将秦巴山区单位面积的 NPP 均值划分为 6 个等级并统计面积百分比, 图 2b 结果显示: 2001 年 NPP 均值

最低为 $388.76 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 2008 年 NPP 均值最高为 $539.40 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其余年份的 NPP 均值均处于 $300\text{—}600 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 范围内, 面积百分比介于 $48\text{—}83\%$ 之间, 是研究区 NPP 均值的主要类型区。NPP 均值 $\leq 150 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的面积百分比, 仅 2001 年为 9% , 其余年份均小于 4% ; NPP 均值在 $150\text{—}300 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的面积百分比, 除 2000 年外整体呈波动减少趋势; NPP 均值在 $600\text{—}750 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的面积百分比介于 $8\text{—}26\%$ 之间; NPP 均值 $\geq 750 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的面积百分比基本在 5% 以上, 但 2001 年和 2011 年不足 1% 。

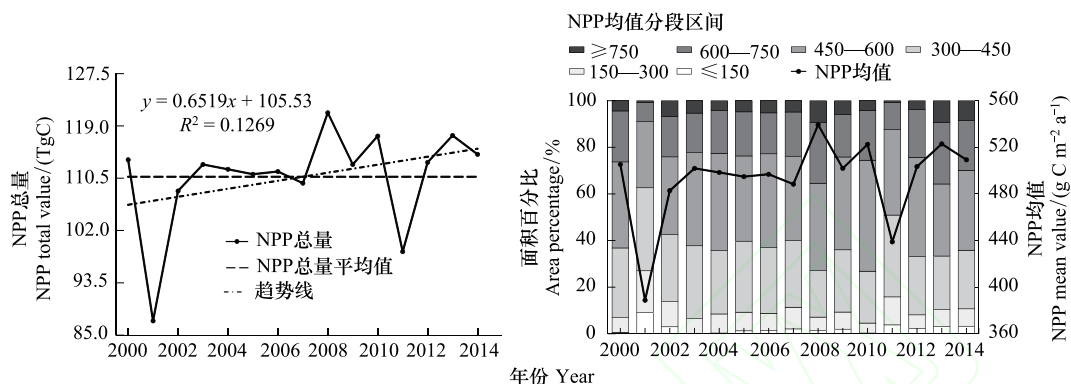


图 2 秦巴山区 2000—2014 年 NPP 总量 (a) 及均值 (b) 年际变化

Fig.2 The annual variation of NPP total (a) and mean (b) value in Qinling-Daba Mountains during 2000—2014

3.2 植被 NPP 空间演变特征

秦巴山区 2000—2014 年 NPP 均值空间分布整体呈“西高东低”特征(图 3), 高值区域位于秦岭山脉西段、大巴山脉绵延区, 低值区域位于渭河流域东南部、南阳盆地及汉江平原; 在行政区划上, 高值集中于四川、重庆及甘肃东南部, 低值集中于河南、湖北及陕西东南部。统计结果表明, 研究区 NPP 均值 $493.09 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 变化范围 $29.83\text{—}1305.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 变异系数 0.26 , 平均标准差 121.44 , 表现出较强的空间分异性, 各省/市 NPP 均值由大到小排序为: 四川区域 > 甘肃区域 > 重庆区域 > 陕西区域 > 湖北区域 > 河南区域 (统计表略)。

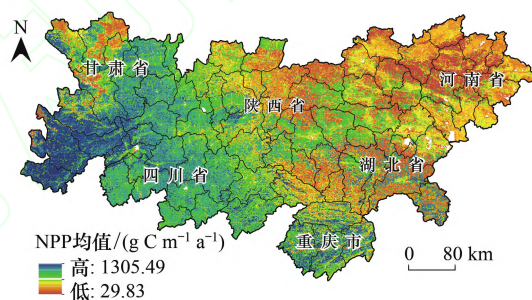


图 3 秦巴山区 2000—2014 年 NPP 均值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of NPP mean value in Qinling-Daba Mountains during 2000—2014

NPP 均值拟合斜率介于 $-28.83\text{—}28.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间, 斜率为正的区域面积占比 79.96% , 表明 NPP 整体呈增加趋势(图 4a)。其中, 极显著增加区域面积占比 9.46% , 主要位于秦巴山区甘肃片区的北部、陕西片区的东部(图 4b), 该类型区内拟合斜率的平均值为 $7.91 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 显著增加区域斜率范围介于 $1.66\text{—}14.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间, 面积占比 8.98% 。斜率为负的区域主要位于秦巴山区河南中部、湖北东南部、四川的部分地区, 面积占比 20.04% , 极显著和显著减少区域呈零星状分布, 面积占比仅 0.56% 。变化不显著区域的面积占比 80% , 该类型区内拟合斜率的平均值为 $2.03 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

3.3 不同植被类型 NPP 演变特征

秦巴山区不同植被类型的 NPP 总量存在较大差异(图 5a), 栽培植被和阔叶林最高, 均在 23.2 TgC 以上; 其次是灌丛和针叶林, 介于 $9.27\text{—}19.71 \text{ TgC}$ 之间; 最低为草丛、草甸类型。其中, 阔叶林和栽培植被的 NPP 总量共计 68.23 TgC , 占区域 NPP 总量的 63% , 是对秦巴山区生态系统最具贡献的植被类型。各植被类型 NPP 总量的年际变化幅度存在差异, 栽培植被、阔叶林变化幅度明显, 草甸植被变化微弱。统计不同植被类型 NPP 总量的拟合斜率, 图 5b 显示: 斜率为正均呈增加趋势, 阔叶林增速最大为 0.22 TgC a^{-1} , 草甸最小仅 0.02 TgC a^{-1} , NPP 总量增速依次为: 阔叶林 > 栽培植被 > 针叶林 > 灌丛 > 草丛 > 草甸。

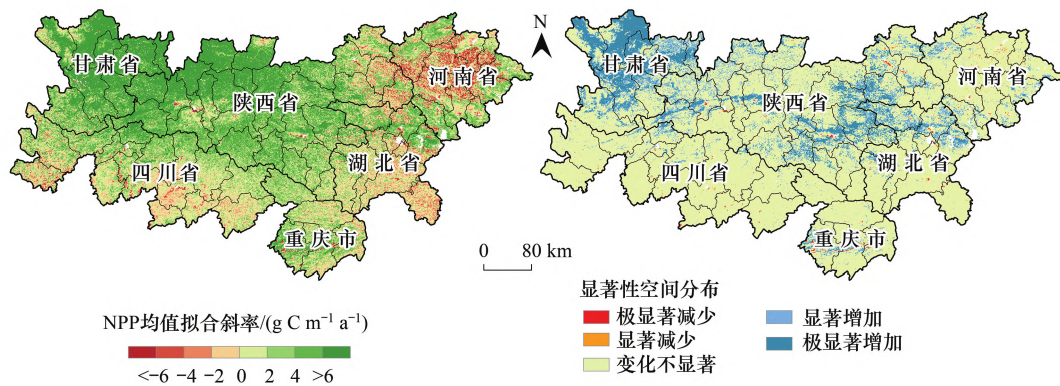


图4 秦巴山区 2000—2014 年 NPP 均值拟合斜率 (a) 与显著性空间分布 (b)

Fig.4 The regression slope of NPP mean value (a) and significant distribution (b) in Qinling-Daba Mountains during 2000—2014

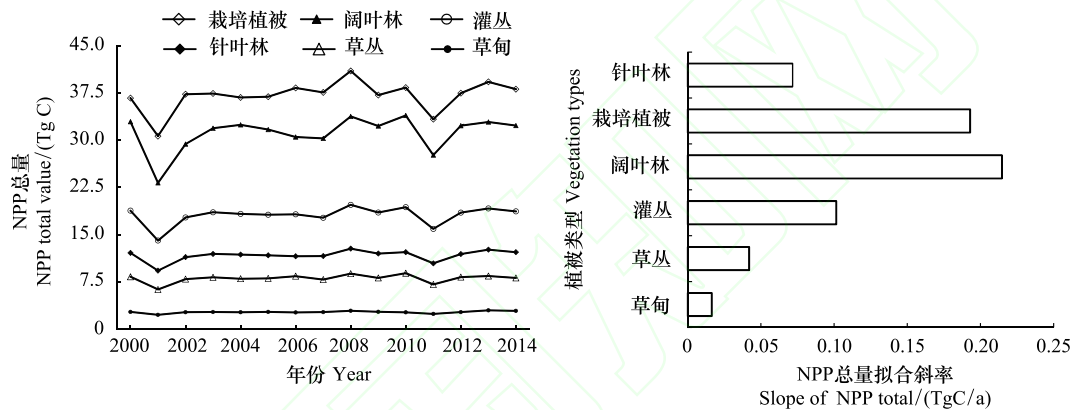


图5 秦巴山区 2000—2014 年不同植被类型的 NPP 总量 (a) 及拟合斜率 (b)

Fig.5 The annual variation of NPP total value (a) and slope (b) over different vegetation types in Qinling-Daba Mountains during 2000—2014

3.4 植被 NPP 的自然因子解析

根据秦巴山区的自然特征,借鉴已有研究^[10,19,23],本文从地形、气候两方面入手,分析 NPP 与高程、坡度、降雨、气温、实际蒸散量 5 个自然因子的相关性,并引入地理探测器模型进一步分析自然因子对 NPP 的贡献率。

3.4.1 植被 NPP 与自然因子的相关性

选取 50m 高程和 2°坡度为间隔,分别统计研究区 NPP 均值,借助分段函数予以显示(图 6),分析 NPP 随高程和坡度的变化特征,并用标准差反映变化幅度。

NPP 与高程相关性可划分四个阶段(图 6a):阶段一(150—650m),迅速上升,高程每升高 100m, NPP 均值增加 $25.4\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$;阶段二(700—1250m),微弱下降,高程每升高 100m, NPP 均值减少 $7.6\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$;阶段三(1300—3150m),波动上升,高程每升高 100m, NPP 均值增加 $7.7\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$;阶段四($\geq 3200\text{m}$),急剧下降,高程每升高 100m, NPP 均值减少 $35.3\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。张静等^[15]认为,低海拔植被垂直分带不明显,高海拔植被稀少且环境恶劣,故高程 $\leq 100\text{m}$ 和高程 $\geq 4600\text{m}$ 时 NPP 值未统计。随 NPP 均值的阶段变化,其标准差也呈现“由小变大—缓慢变小—平稳波动—剧烈变化至减小”特征。

NPP 与坡度的相关性,图 6b 显示:在 0—9°时,随坡度增加, NPP 均值及标准差均增大;在 11—47°时, NPP 均值在波动中缓慢上升,标准差无明显变化;当坡度 $\geq 49^\circ$ 时, NPP 均值波动剧烈、逐渐减小,标准差也随之减小,此过程由于极陡坡出现, NPP 均值可能产生无规律的异常值;当坡度 $\geq 63^\circ$ 时,像元数仅占 0.03%,

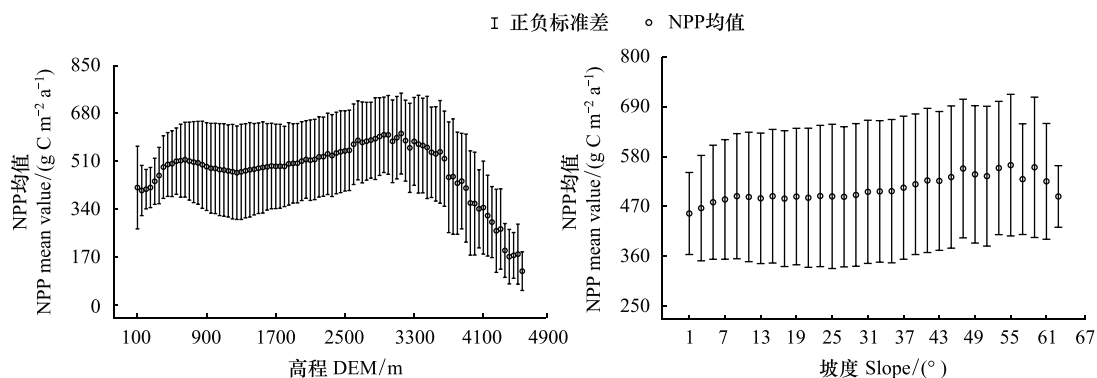


图 6 秦巴山区 2000—2014 年 NPP 均值与高程(a)、坡度(b)的关系

Fig.6 The relationship of mean NPP, DEM (a) and slope (b) in Qinling-Daba Mountains during 2000—2014

NPP 值未进行统计。与高程相比,NPP 均值的极大值与极小值在坡度影响下仅相差 $151.45 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,远小于前者 $537.38 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的差距。

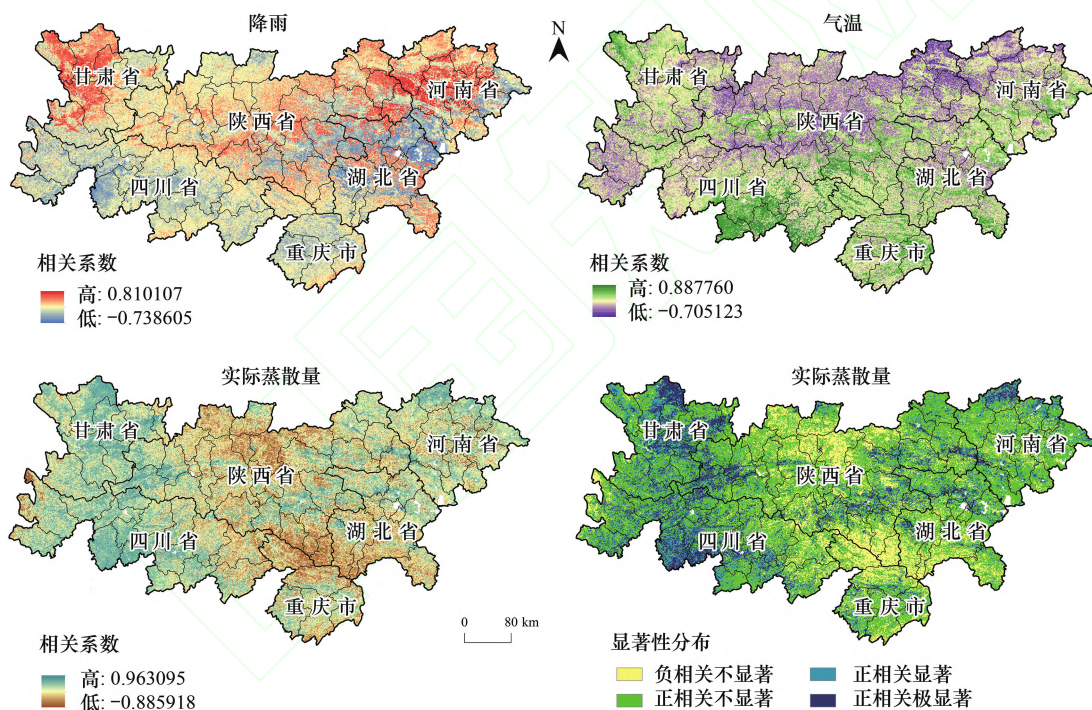


图 7 秦巴山区 2000—2014 年 NPP 与气候因子间相关性(a,b,c)及显著性(d)的空间分布

Fig.7 Distribution of correlation (a,b,c) and signification (d) between NPP and climate factors in Qinling-Daba Mountains during 2000—2014

逐栅格分析 NPP 与降雨、气温相关性,图 7a、b 结果显示:NPP 与降雨相关系数介于 -0.73 – 0.81 之间,在空间上,正、负相关区域分别沿秦岭山脉以北和以南分布,这与我国 800 mm 年等降水量线形成的半湿润和湿润区相吻合。正相关区域占 68.42% ,其中 4.72% 区域通过 $P < 0.05$ 显著性检验,分布于秦巴山区甘肃区域西北部和河南区域中部,无显著负相关区域。NPP 与气温相关系数介于 -0.71 – 0.89 之间,正相关区域占 63.89% ,其中显著正相关占 2.35% ,主要位于秦巴山区四川区域内。NPP 与降雨、气温均呈正相关区域占 36.79% ,均呈负相关区域仅 4.48% ,因此 NPP 与降雨、气温呈显著正相关性。

本文运用表征水热循环特征^[32]的实际蒸散量数据,分析降雨、气温耦合作用与 NPP 的相关性。图 7c 结果显示,NPP 与实际蒸散量的相关系数介于 -0.86 – 0.96 之间,正相关区域占 77.95% ;图 7d 结果显示, 13.39%

区域呈显著正相关,12.84%区域呈极显著正相关,该范围集中于秦巴山区的甘肃、四川区域;秦岭北部、汉江谷地东南部的 NPP 与实际蒸散量呈负相关性,该区域均未通过 $P < 0.05$ 显著性检验。

3.4.2 自然因子对植被 NPP 的贡献率

为进一步确定上述自然因子对 NPP 的贡献率,查明影响秦巴山区 NPP 变化的主要因素,对高程、坡度、降雨、气温、实际蒸散量 5 个因子作因子探测和交互作用探测分析,将公式(3)计算得到的因子探测 P 值作为各自然因子的贡献率,表 1 为因子探测和交互作用探测的结果。

表 1 秦巴山区 2000—2014 年 NPP 自然因子探测及其交互作用探测结果

Table 1 The result of factor and interaction detector for natural factors of NPP in Qinling-Daba Mountains during 2000—2014

因子/Factors	高程 DEM /m	坡度 Slope /°	降雨 Rain /mm	气温 Temperature /°C	实际蒸散量 ET /mm
高程 DEM /m	0.0192	—	—	—	—
坡度 Slope /°	0.0298 *	0.0072	—	—	—
降雨 Rain /mm	0.1014 *	0.0557 *	0.0408	—	—
气温 Temperature/°C	0.1085 *	0.0564 *	0.0789 *	0.0323	—
实际蒸散量 ET /mm	0.1311 *	0.0993 #	0.1354 #	0.1465 *	0.0946

“#”表示交互作用为双因子增强,“*”表示交互作用为非线性增强,“—”表示无数据

因子探测结果显示,秦巴山区自然因子对 NPP 的贡献率存在显著差异($P < 0.01$),由大到小依次排序为:实际蒸散量(0.0946) > 降雨(0.0408) > 气温(0.0323) > 高程(0.0192) > 坡度(0.0072)。其中,气候因子中连接水热综合效应的实际蒸散量对 NPP 贡献率最大,是影响 NPP 变化的主要因子;就降雨、气温的单因子贡献率而言,NPP 变化受前者影响明显,这与上述相关性分析结果相吻合;在地形因子中,坡度对 NPP 空间分异特征的影响明显弱于高程。

根据交互作用探测结果,实际蒸散量∩降雨(0.0993),实际蒸散量∩坡度(0.1354),交互作用 P 值大于二者最大值 0.0946,表现为双因子增强;其他因子两两交互 P 值大于 $P(X_1) + P(X_2)$ 之和,表现为非线性增强。对 NPP 贡献率排在前三位的主导交互作用为:实际蒸散量分别与气温、降雨和高程因子的耦合;与单因子的贡献率不同,气温与实际蒸散量交互作用的贡献率略大于降雨;区域多起伏山地,实际蒸散量与高程交互作用增强,可能与地形导致植被地带性及降雨、气温的空间再分配有关^[17]。

3.5 植被 NPP 的人为因子解析

人类在生产、生活及其他方式中改变土地利用方式,会直接影响植物光合作用和呼吸作用,进而导致 NPP 发生变化^[19]。朱文泉等^[33]学者认为,土地利用/覆被变化(LUCC)是最具人类特征活动形式。

统计秦巴山区 LUCC 面积变化情况,表 2 结果显示:2000—2010 年研究区土地利用面积变化共计 1227.28km²;其中,耕地转移到草地的面积最多,为 350.87km²,占耕地转移总面积 42.77%;其次是耕地转移为林地,转移面积为 202.42km²;草地主要转出方式为林地,占草地转移总面积 56.26%;未利用地转移面积最少且主要转向水域。从整体上看,经 10 年土地利用方式变化,林地、草地、水域和建设用地的面积明显增加,而耕地则显著减少,土地利用转移方式主要为耕地的转出和其他用地类型的转入。

不同土地利用面积变化的 NPP 损益值可借助 NPP 总量变化进行衡量。当林地等 NPP 较高的土地类型转移到水域等 NPP 较低的土地利用类型时,NPP 总量降低;反之,当未利用地、水域、建设用地等 NPP 值较低的土地类型转为林地、草地等 NPP 较高的区域时,NPP 总量增加^[17]。本文统计秦巴山区土地利用类型转移的 NPP 总量,以期解析 NPP 时空演变的人为因子。表 3 结果表明:LUCC 造成 NPP 总量变化 2012.49×10^{-5} TgC;其中,耕地转化为林地、草地情况下 NPP 总量变化最为明显,增加值达 772.68×10^{-5} TgC;耕地转向水域、建设用地导致 NPP 总量减少 375.11×10^{-5} TgC;林地在转为其他地类时 NPP 总量均有减少;草地转为耕地 NPP 总量损失 221.81×10^{-5} TgC,转为林地增加 195.08×10^{-5} TgC。

表 2 秦巴山区 2000—2010 年土地利用面积变化转移矩阵/ km^2

Table 2 Land use transition matrixes in Qinling-Daba Mountains during 2000—2010

		2010						
		耕地 Farmland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	行变化量 Total in row
2000	耕地 Farmland	*	202.42	350.87	154.02	111.11	2.02	820.44
	林地 Forest	27.01	*	62.19	22.99	18.01	11.09	141.30
	草地 Grassland	59.08	140.40	*	32.03	16.02	2.01	249.54
	水域 Water area	5.00	2.00	—	*	1.00	—	8.00
	建设用地 Construction land	—	—	—	7.01	*	—	7.01
	未利用地 Unused land	—	—	—	1.00	—	*	1.00
	列变化量 Total in column	91.10	344.82	413.07	217.04	146.14	15.12	1227.28

映出生态系统的稳定性易受气候变化的扰动;在空间分布上,秦巴山区 NPP 具有较强的植被类型、地形地貌和地域分异特征,这是由该区域复杂的植被、地形、气候分布特征所致,同时人类生产、生活的方式及过程也对植被产生间接影响。本研究发现 NPP 与气温、降雨的相关性在秦岭南北存在显著差异:秦岭以北与降雨呈正相关、与气温呈负相关,而秦岭以南则完全相反。这与秦岭对气流的阻滞作用引起的南北气候差异有关,秦岭以北年均降水量和气温均明显低于秦岭以南地区,因此,秦岭以北区域在夏季高温季节植被生长更易遭受干旱威胁,该条件下水热条件的组合不利于其生长^[36]。

表 4 秦巴山区植被 NPP 均值与其他模型模拟均值的对比

Table 4 Comparison of mean NPP in Qinling-Daba Mountains and that by other different methods

数据/模型 Data/Methods	MOD17A3	MOD17A3	MOD17A3	CASA 模型	CASA 模型	CASA 模型	MusyQ-NPP	C-FIX 模型
研究时间 Study periods	2000—2014	2000—2013	2000—2012	2003—2012	2000—2009	2001—2010	2001—2014	1998—2009
研究范围 Study range	秦巴山区	秦岭林区	汉江流域	陕西省	秦岭山地	全国	全国	秦岭山区
NPP 均值 Mean NPP/(gC m ⁻² a ⁻¹)	493.09	400—600	344.6—488.1	>400 (陕南地区)	471.8—718.8	500—900 (秦巴山区)	400—900 (秦巴山区)	709.3—852.2
文献 References	本研究	王娟 ^[20]	张静 ^[15]	石志华 ^[21]	袁博 ^[23]	仲晓春 ^[34]	刘刚 ^[35]	许明子 ^[22]

气候因子在某一地区的水热组合效应可借助实际蒸散量得以体现^[32]。本研究发现实际蒸散量对 NPP 时空变化的贡献率最大,是秦巴山区 NPP 的主要影响因素,反映出 NPP 与气候因子的组合关系十分密切。当土壤下垫面比较干旱时,蒸散量多受降雨影响,而下垫面水分充足时,温度等因素成为蒸散量变化的主要因素^[28]。秦巴山区甘肃区域气候干旱、温度偏低、土壤水分少,因而地表蒸发量与植被蒸腾产生的水汽含量较少,实际蒸散量下降,植被处于不利的生态环境,NPP 累积量低;秦巴山区四川区域降雨量充足、温度适宜,NPP 与实际蒸散呈显著正相关性,因而 NPP 均值较高。本研究还发现 NPP 与高程、坡度间阶段性特征明显且在高程影响下变化幅度更大,这是由于高程直接影响植被类型分布和气温状况,而坡度通过坡面侵蚀强度起着间接作用的结果^[21]。因此,地形也是通过控制水热和土壤条件,影响其他环境变化进而对植被格局产生影响^[10]。

上述现象均表明 NPP 的自然影响因子间存在耦合关系。分析交互探测量化结果进一步证明:任意两种自然因子间共同作用的贡献率均高于单因子水平,即秦巴山区 NPP 受多种自然因子交互作用的影响。其中,地形与气候因子交互效应明显:气温随海拔升高逐渐降低,降雨在一定高度会导致空间再分配^[15]。NPP 与气温在高海拔的相关性强于低海拔,可能由于高海拔地区乔木林覆盖率高,对气温变化较敏感;而 NPP 与降水的相关性则完全相反,这可能与低海拔地区人为因素干扰严重,多为草甸、草丛或栽培植被,受水分影响较大有关。

人为因子对 NPP 影响表现为土地利用方式变化造成 NPP 总量的损益。截止 2010 年,转入到林地、草地的 NPP 总量增加 $975.77 \times 10^{-5} \text{ TgC}$,这是由于国家实施水土保持和还林还草政策以来,秦巴山区植被覆盖度整体呈增加趋势^[36],故植被固碳能力有所增强;但由于城市扩张及人类不合理利用方式,建设用地增加同时导致耕地、林地和草地减少,造成 NPP 总量损失 $186.21 \times 10^{-5} \text{ TgC}$ 。因此,LUCC 对 NPP 的影响可分为还林还草积极效应及城市发展和人类破坏等消极效应,这与张珺等^[12]研究相吻合。

综上所述,由于影响 NPP 的自然和人为因子种类众多、内部关系错综复杂,加之人类活动方式多样、难以量化,导致对于 NPP 时空变化的自然和人为因子相互效应判断仍存在很大的不确定性。本研究仅从土地利用方式转移方面初步分析了研究区 NPP 的人为因子,进一步寻求人类活动的定量化方法以及细化衡量指标,仍是今后探索的研究方向之一。

4.2 结论

本文基于 MOD17A3 的 NPP 数据,以及气候、地形、植被类型和土地利用数据,对秦巴山区近 15 年 NPP 的时空演变特征及其自然与人为因子进行研究,主要结论如下:

(1) 秦巴山区 2000—2014 年 NPP 均值 $493.09\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$,波动范围 $29.83\text{—}1305.49\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$,地域差异明显,空间异质性强。NPP 均值呈增加趋势(即拟合斜率 >0)面积占 80%,表明区域生态环境质量改善。不同植被类型 NPP 总量存在差异,其中阔叶林和栽培植被是对区域生态系统最具贡献的类型。

(2) NPP 与自然因子存在相关性。其中,随高程、坡度增加,NPP 均值呈阶段性变化趋势,坡度影响 NPP 变化幅度弱于高程,降雨、气温、实际蒸散量与 NPP 呈显著正相关性,实际蒸散量对 NPP 影响程度(包括显著性面积及相关系数)大于降雨和气温。

(3) NPP 时空演变受自然和人为等因子的综合作用。其中,各自然因子对 NPP 的贡献率存在显著差异,实际蒸散量是秦巴山区 NPP 变化的主要自然影响因子,任意两种自然因子交互作用的贡献率高于单因子,即区域 NPP 变化受多种自然因子的交互影响。人为因子对 NPP 的影响为土地利用类型的转变,体现在耕地的转出和林地、草地、建设用地的转入,表明研究区 NPP 变化主要受到还林还草的积极影响及城市发展和人类破坏等的消极影响。

参考文献(References):

- [1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [2] IGBP. Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto protocol. *Science*, 1998, 280(5368): 1393-1394.
- [3] Crabtree R, Potter C, Mullen R, Sheldon J, Huang S L, Harmsen J, Rodman A, Jean C. A modeling and spatio-temporal analysis framework for monitoring environmental change using NPP as an ecosystem indicator. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(7): 1486-1496.
- [4] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [5] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly H, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [6] Mao D H, Wang Z M, Wu C S, Song K S, Ren C Y. Examining forest net primary productivity dynamics and driving forces in northeastern China during 1982-2010. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(6): 631-646.
- [7] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [8] 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.
- [9] 吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 王蕊, 刘兆飞. 基于 MODIS 的长江源植被 NPP 时空变化特征及其水文效应. *自然资源学报*, 2016, 31(1): 39-51.
- [10] 姬盼盼, 高敏华, 杨晓东. 中国西北部干旱区 NPP 驱动力分析——以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例. *生态学报*, 2019, 39(8): 1-12. [2019-04-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20190118.0923.008.html>.
- [11] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 常庆瑞. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 244-253.
- [12] 张珺, 任鸿瑞. 人类活动对锡林郭勒盟草原净初级生产力的影响研究. *自然资源学报*, 2017, 32(7): 1125-1133.
- [13] 崔林丽, 杜华强, 史军, 陈昭, 郭巍. 中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究. *地理科学*, 2016, 36(5): 787-793.
- [14] 王轶虹, 史学正, 王美艳, 赵永存. 2001—2010 年中国农田生态系统 NPP 的时空演变特征. *土壤学报*, 2017, 54(2): 319-330.
- [15] 张静, 任志远. 汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因. *生态学报*, 2016, 36(23): 7667-7677.
- [16] 王芳, 汪左, 张运. 2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. *生态学报*, 2018, 38(8): 2754-2767.
- [17] 姜春, 吴志峰, 程炯, 钱乐祥. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 961-972.
- [18] 张锋, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 786-797.
- [19] 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.
- [20] 王娟, 卓静, 何慧娟, 董金芳. 2000—2013 年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. *西北林学院学报*, 2016, 31(5):

- 238-245.
- [21] 石志华, 刘梦云, 吴健利, 常庆瑞, 谢宝妮, 闻熠. 基于 CASA 模型的陕西省植被净初级生产力时空分析. 水土保持通报, 2016, 36(1): 206-211.
- [22] 许明子. 基于 C-FIX 模型的秦岭山区森林生态系统 NPP、NEP 时空模拟研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [23] 袁博. 秦岭山地植被净初级生产力及其对气候变化的响应[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- [24] 白红英. 秦巴山区森林植被对环境变化的响应. 北京: 科学出版社, 2014:1-3.
- [25] 章金城, 周文佐. 2006—2015 年秦巴山区植被光合有效辐射吸收比例的时空变化特征. 生态学杂志. (2019-01-31) [2019-04-22]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201905.018>.
- [26] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines-I: two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 139-151.
- [27] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 秦岭南北潜在蒸散量时空变化及突变特征分析. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 573-581.
- [28] 王娟, 何慧娟, 卓静, 董金芳. 基于 MODIS 数据的陕西省植被净初级生产力与实际蒸散的变化关系分析. 水土保持通报, 2017, 37(3): 264-269.
- [29] Cao F, Ge Y, Wang F J. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment. *GIScience & Remote Sensing*, 2013, 50(1): 78-92.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因. 地理学报, 2018, 73(9): 1674-1686.
- [32] Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, de Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Rouspard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-954.
- [33] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [34] 仲晓春, 陈雯, 刘涛, 郝心宁, 李哲敏, 孙成明. 2001—2010 年中国植被 NPP 的时空变化及其与气候的关系. 中国农业资源与区划, 2016, 37(9): 16-22.
- [35] 刘刚, 孙睿, 肖志强, 崔天翔. 2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系. 生态学报, 2017, 37(15): 4936-4945.
- [36] 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.