

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.034.

梁程, 苏惠敏, 张伊琳, 等. 2000—2019年关中平原城市群植被NPP时空变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 293-300.

LIANG Cheng, SU Huimin, ZHANG Yilin, et al. Spatiotemporal Changes and Influencing Factors of Net Primary Productivity of Guanzhong Plain City Cluster from 2000 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 293-300.

2000—2019年关中平原城市群植被 NPP时空变化及影响因素

梁程¹, 苏惠敏¹, 张伊琳¹, 王隽雄^{2,3}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 水利部水土保持监测中心, 北京 100055; 3. 黄河水利委员会晋陕蒙接壤地区水土保持监督局, 陕西 榆林 719000)

摘要: [目的] 分析和探讨关中平原城市群植被 NPP 的时空变化特征, 揭示影响植被 NPP 变化的主要因素, 为区域生态恢复及生态健康评估提供支持。[方法] 运用趋势分析、变异系数和地理探测器等方法, 分析了 2000—2019 年关中平原城市群植被 NPP 的时空变化特征与规律, 并对植被 NPP 的影响因素进行了探测。[结果] 关中平原城市群年均植被 NPP 值介于 340.3~573.5 g C/m², 年均增长率为 9.1 g C/m², 整体呈波动上升趋势, 且不同地貌区 NPP 增长趋势相似。大部分区域植被 NPP 变化速率大于 0, 且变异系数较小, 植被 NPP 以小幅增加为主。空间上, 植被 NPP 南高北低, 西高东低, 具有明显空间分异性, 是自然、社会因素共同作用的结果。植被 NPP 的主要影响因素为降水、地貌及 ≥10℃ 积温, 但因子间的复杂耦合作用对植被 NPP 的影响更为显著, 如降水与气温的交互作用对植被 NPP 的解释力达到 57% 以上, 探测结果表明两两因子的交互作用呈现相互增强效应。[结论] 关中平原城市群大部分地区植被 NPP 有明显增长, 表明区域生态环境有较大改善。

关键词: 植被 NPP; 时空变化; 地理探测器

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0293-08

Spatiotemporal Changes and Influencing Factors of Net Primary Productivity of Guanzhong Plain City Cluster from 2000 to 2019

LIANG Cheng¹, SU Huimin¹, ZHANG Yilin¹, WANG Junxiong^{2,3}

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Soil and Water Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 10005, China; 3. Soil and Water Conservation Supervision Bureau in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia Border Area of YRCC, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to analyze and investigate the temporal and spatial variation characteristics of vegetation NPP in Guanzhong Plain city cluster, to reveal the main factors affecting vegetation NPP change, and to provide support for regional ecological restoration and ecological health assessment. [Methods] Trend analysis, correlation analysis and geographic detectors were used to analyze the characteristics and patterns of the temporal and spatial changes of vegetation NPP in the Guanzhong Plain city cluster from 2000 to 2019, and probe the influence factors of NPP. [Results] The average annual vegetation NPP of the Guanzhong Plain city cluster was between 340.3~573.5 g C/m², and the average annual growth rate was 9.1 g C/m². The overall trend was fluctuating and rising, and the NPP growth trend was similar in different geomorphic areas. In most areas, the vegetation NPP change rate was greater than 0, and the coefficient of variation was small. The vegetation NPP mainly increased slightly. Spatially, the vegetation NPP was high in

收稿日期: 2021-11-17

修回日期: 2021-12-29

资助项目: 国家自然科学基金(42077071, 41871187)

第一作者: 梁程(1993—), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务。E-mail: cccheng_liang@163.com

通信作者: 苏惠敏(1972—), 女, 陕西韩城人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用及生态系统研究。E-mail: suhm@snnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

the south and low in the north, high in the west and low in the east. It had obvious spatial differentiation and was the result of the combined effect of natural and social factors. The main influencing factors on vegetation NPP were precipitation, geomorphic types and $\geq 10^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature, but the complex coupling between factors had a more significant impact on vegetation NPP. For example, the interaction between precipitation and temperature could explain more than 57% of vegetation NPP. The detection results showed that the interaction between the two factors presented a mutually reinforcing effect. [Conclusions] In most areas of Guanzhong Plain city cluster, vegetation NPP increased significantly, indicating that the regional ecological environment has been greatly improved.

Keywords: vegetation NPP; spatiotemporal changes; Geodetector

19世纪以来,受气候变暖影响,全球冰川消融、海平面上升、极端气候事件频发,生态环境及人类社会的可持续发展面临较大压力。IPCC 报告指出,1950年以来的全球地表增温主要是由人类活动排放的大量 CO_2 , CH_4 , N_2O 等温室气体所致 (IPCC, 2014)。陆地生态系统是全球碳循环的重要碳库,对全球碳循环过程有着强烈影响^[1]。而植被作为陆地生态系统的主体,在降低温室气体浓度、维持全球物质和能量循环以及全球碳平衡中具有重要作用。

植被净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 是指绿色植物在单位时间、单位面积上所积累的有机物质量,是植被光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[2]。植被 NPP 是生态系统碳循环、能量流动的关键环节,能够反映陆地生态系统功能状况和可持续发展水平^[3-4],是碳收支和气候变化研究的核心内容^[5]。国内外学者在不同尺度上对植被 NPP 及其影响因素开展了相关研究。大尺度上,学者侧重于研究气候变化对植被 NPP 的影响。Nemani 等^[6]对 1982—1999 年全球植被 NPP 进行估算,认为气候条件变化使全球大部分地区植被 NPP 增加;朱文泉等^[7]对中国植被 NPP 进行了模拟,发现在不同区域制约植被 NPP 的主要气候因素具有差异性。区域环境具有独特性,影响植被 NPP 的因素不只有气候因素,因此也需要关注区域尺度上多种因素对植被 NPP 的影响。高志强等^[8]分析了土地利用和气候变化对中国北方地区植被 NPP 的影响;姬盼盼等^[9]以新疆部分区域为例对干旱地区植被 NPP 的驱动力进行了分析。用于研究植被 NPP 影响因素的方法也在不断发展,而地理探测器作为多因子分析的有力工具,已经得到初步应用^[10-11]。

关中平原城市群北接黄土高原,南临秦岭山脉,处于湿润区向干旱区的过渡地带。随着城镇化、工业化的快速发展,生态环境压力不断增大,并使区域生态系统发生变化^[12]。研究植被 NPP 对于把握区域生态环境健康状况、区域碳循环具有重要意义。目前

对于西北地区、黄河流域植被 NPP 的研究已有一定基础,如焦伟等^[13]对西北地区植被 NPP 进行模拟并分析其时空变化;田智慧等^[14]分析了黄河流域植被 NPP 时空变化特征及驱动因素。但在影响因素选择上多关注于气候因素及土地利用变化,具有一定的局限性,且空间尺度大。本文利用 2000—2019 年植被 NPP 数据,分析关中平原城市群植被 NPP 的时空演变特征,并结合研究区域气候、地形地貌、土壤、人口以及植被类型等数据,探究植被 NPP 影响因素,为区域碳储量和生态恢复研究奠定基础。

1 方法与数据

1.1 研究区概况

关中平原城市群位于中国中部,自西向东横跨甘肃省、陕西省和山西省,包括 11 个市,90 个县级行政区,总面积约 $1.07 \times 10^5 \text{ km}^2$,2016 年底常住人口 3 863 万人。关中平原城市群属温带大陆性气候,年均气温 $10 \sim 12^{\circ}\text{C}$,年降水 $500 \sim 900 \text{ mm}$ 。其东西跨度大,地貌类型多样,包括平原、山地、丘陵等,地形起伏明显,整体地势呈中间低,四周高,海拔在 $210 \sim 3 772 \text{ m}$ (图 1)。根据地形差异,结合地形起伏度和海拔,将研究区划分为 3 个地貌区 (I, II, III)。

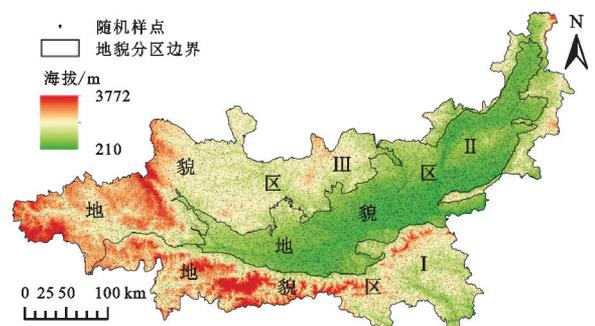


图 1 研究区地形及随机样点分布

1.2 数据来源与验证

1.2.1 数据来源 植被 NPP 数据来源于美国国家航天航空局戈达德航天中心分布式数据档案中心 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 最新的

MODIS MOD17A3HGF 数据产品,该数据在一定程度上消除了因卫星传感器老化造成的数据衰减和失真问题^[15]。本文选用 2000—2019 年的植被 NPP 数据,其空间分辨率为 500 m,时间分辨率为年,单位为 kg C/m^2 ,投影为正弦投影。对数据进行镶嵌、重投影、格式转换,再进行裁剪和比例换算,得到以 g C/m^2 为单位的关中平原城市群植被 NPP 数据。数据中反演失败的区域主要为城市建成区,该部分像元点被舍弃。数据中包含质量控制文件(Npp_QC),经统计,研究区数据质量高、中等级平均可信度达到 99.86%。作为目前时间跨度最长、生理生态机制较清楚、估算结果较精准的全球陆地植被净初级生产力产品,该数据集是全球和区域植被 NPP 与碳循环研究使用最多的数据源之一,得到了广泛应用。

年均气温、年降水数据来源于国家地球科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>),时间跨度均为 2000—2019 年,空间分辨率约 1 km,时间分辨率为年。该数据集是在 CRU(Climatic Research Unit)发布的全球 0.5°C 气候数据以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据基础上,通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成,并用 496 个独立气象观

测点数据进行验证,验证结果可信^[16]。

$\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、植被类型、土壤类型和 DEM 数据均来源于中国科学院资源环境与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。海拔和坡度数据由 DEM 计算获取。地貌类型是在 DEM 数据基础上,根据海拔差异,结合地形起伏划分得到。人口数据来源于美国国家航空航天局社会经济数据和应用中心(Socioeconomic Data and Applications Center, SEDAC)的 GPWV4。该数据集在土地覆盖、城市范围等数据基础上,运用高度模型化的方法将人口统计数据分配到空间格网中,空间分辨率为 $30''$,包括 2000—2020 年的 5 期数据。

1.2.2 植被 NPP 数据验证 由于研究区植被 NPP 实测数据难以获取,本文通过与收集的实测数据及其他模型模拟结果对比来验证数据的可靠性。由表 1 可知,本文各植被类型 NPP 均介于实测值范围内,且与实测平均值较为接近。与其他模型模拟结果相比,除针叶林 NPP 整体偏大,其他类型植被 NPP 均处于模型模拟 NPP 范围内,这是由于模型反演 NPP 的不确定性导致。分析表明,本文植被 NPP 所采用的 MOD17A3 HGF 数据在研究区可靠,可以用于后续研究。

表 1 研究区不同植被类型 NPP 与参考值比较

g C/m^2

| 项目 | 阔叶林 | 针叶林 | 灌丛 | 草丛 | 栽培植物 |
|----------------------------|--------------|--------------|--------|---------|--------------|
| 本文 | 592.1 | 541.8 | 528.5 | 478 | 422.70 |
| 实测值 ^[17] | 259~704(518) | 260~845(566) | 364 | | 239~760(532) |
| 实测值 ^[18] | 250~2500 | 160~1500 | 4~1200 | 100~727 | |
| CASA 模型 ^[19] | 679 | 367 | 382 | 405 | 390 |
| 改进 CASA 模型 ^[17] | 642.9 | 367 | 367.1 | 507.4 | 426 |
| CEVSA 模型 ^[20] | 624 | 486 | | 348 | 606 |
| 孙睿等 ^[21] | 459.7 | 529.4 | 555.4 | | 313.3 |

注:括号内为平均值。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 采用一元线性回归研究 NPP 随时间变化趋势,对 2000—2019 年均植被 NPP 数据逐像元进行计算。公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: θ_{slope} 为某一像元 NPP 在 2000—2019 年期间的变化速率; n 为总的样本数(时间序列为 2000—2019 年,即 $n=20$); x_i 为第 i 年某一像元的 NPP 值。若 $\theta_{\text{slope}} > 0$,则 NPP 呈增加趋势; $\theta_{\text{slope}} < 0$,NPP 呈减少趋势。 θ_{slope} 绝对值越大,表示 NPP 增加或减小的速率越快, θ_{slope} 绝对值接近 0,说明 NPP 较为稳定,变化幅度小。

计算结果显著性采用 T 检验法进行检验,并通

过 p 值进行判断。 $p < 0.01$,则 NPP 变化趋势为极显著水平。 $0.01 \leq p < 0.05$,NPP 变化趋势为显著水平。 $p \geq 0.05$,NPP 变化趋势不明显。

1.3.2 变异系数 变异系数(coefficient of variation,CV)是反映观测值变异程度的一个统计量。采用 CV 衡量 2000—2019 年均植被 NPP 的相对波动程度,计算公式如下:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

式中: σ 为 2000—2019 年 NPP 的标准差; μ 为 2000—2019 年 NPP 平均值。为了更直观地表现植被 NPP 的变化情况,将 CV 值划分为 4 个级别:非常稳定($CV \leq 0.1$)、稳定($0.1 < CV \leq 0.2$)、不稳定($0.2 < CV \leq 0.3$)、很不稳定($CV > 0.3$)。

1.3.3 地理探测器 地理探测器是基于空间方差分析

理论的统计学方法,最早运用于健康风险领域,包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测。地理探测器能够探测地理事物的空间分异性,并揭示其背后的驱动力,作为一种探测地理要素空间格局成因和机理的重要方法在社会经济、生态环境等领域得到广泛应用^[22]。本文运用因子探测和交互探测,对关中平原城市群植被 NPP 空间分异的影响因素进行识别。

(1) 因子探测。用于探测因子 X 在多大程度上解释植被 NPP 的空间分异,用 q 值度量,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中: q 为影响因子对植被 NPP 的解释力,值域为 $[0,1]$,值越大表示影响因子对植被 NPP 的解释力越强; $h=1,2,\dots,L$ 为变量 Y 或者因子 X 的分层(分类或分区); N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和区域的 Y 的方差。

(2) 交互探测。识别不同影响因子 X_s 之间的交互作用,即评估两影响因子共同作用时是否会增加或减弱对植被 NPP 的解释力,或这些因子是否独立。评估方法为:首先,计算分别计算两种因子 X_1 和 X_2 对植被 NPP 的 q 值、 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ 。其次,计算两因子交互的 q 值、 $q(X_1 \cap X_2)$ 。最后比较 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$,存在以下 5 种类型:

① $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$,说明因子 X_1 与 X_2 交互作用为非线性减弱。

② $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$,说明因子 X_1 与 X_2 交互作用为单因子非线性减弱。

③ $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$,说明因子 X_1 与 X_2 交互作用为双因子增强。

④ $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$,说明因子 X_1 与 X_2 相互独立。

⑤ $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$,说明因子 X_1 与 X_2 交互作用为非线性增强。

1.3.4 指标选取及数据提取 已有研究表明,植被 NPP 的主要影响因素为降雨和气温^[6,23],地形、植被类型、土壤类型等与植被 NPP 也具有相关性。但在不同地理环境中,以上因素对植被 NPP 的影响具有差异性,需要进行具体的研究。本文共选取 5 大类、9 个影响因子(表 2),分析关中平原城市群植被 NPP 的影响因素。

利用自然断点法将年降水量、年均气温和坡度分为 10 级,海拔和年均人口密度数据划分为 9 级, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温划分为 8 级。同时,植被类型、土壤类型和地貌类型

分别为 9 类、12 类和 3 类。按照 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 网格,随机生成包含 21 426 个采样点的点属性图层(图 1)。再用该图层提取植被 NPP 及 10 个影响因子的属性信息。由于提取属性中包含 NPP 反演失败的点(主要分布在城市建成区),经整理后剩余 20 708 个随机采样点。

表 2 影响因子指标

| 类型 | 影响因子 | 指标 | 单位 |
|----|-------|----------------------------|------------------|
| 气候 | X_1 | 年降水 | mm |
| | X_2 | 年均气温 | $^\circ\text{C}$ |
| | X_3 | $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 | $^\circ\text{C}$ |
| 地形 | X_4 | 海拔 | m |
| | X_5 | 坡度 | ($^\circ$) |
| 人口 | X_6 | 年均人口密度 | 人/ km^2 |
| 地貌 | X_7 | 地貌类型 | |
| 植被 | X_8 | 植被类型 | |
| 土壤 | X_9 | 土壤类型 | |

2 结果与分析

2.1 植被 NPP 年际变化分析

对关中平原城市群年均植被 NPP 统计分析(图 2),2000—2019 年,年均植被 NPP 值变化范围为 $340.3 \sim 573.5\text{ g C/m}^2$,多年平均值为 474.8 g C/m^2 。年均植被 NPP 整体呈波动上升趋势,增长斜率为 $9.1\text{ g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 。从地貌区看,地貌区 I、地貌区 II 和地貌区 III 年均植被 NPP 均呈上升趋势,其变化范围分别为 $440.7 \sim 691.9, 287.7 \sim 472.7, 309 \sim 578.4\text{ g C/m}^2$,且呈现显著的层级结构,即地貌区 I $>$ 地貌区 III $>$ 地貌区 II,这与地貌区的植被类型、气候条件和地形等因素有关。

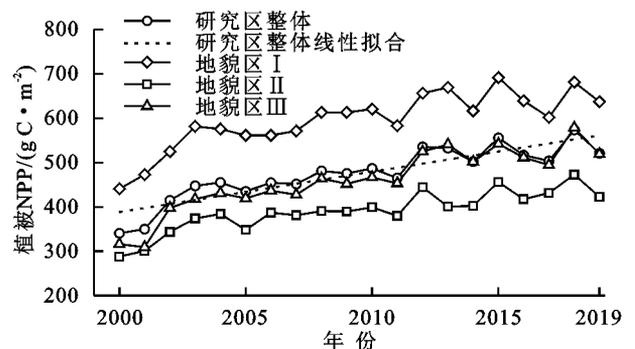


图 2 研究区整体及不同地貌区 2000—2019 年年均植被 NPP 变化

2.2 植被 NPP 空间分布及变化特征

如图 3A 所示,关中平原城市群 2000—2019 年平均植被 NPP 具有明显的空间分异性,总体呈南高北低、西高东低,这与关中平原城市群降水空间分布较为吻合。根据植被 NPP 水平差异,将研究区划分

为以下 3 个区域:(1) 西部的秦岭山区和陇山山区。该区域植被 NPP 水平最高,大部分介于 600~800 g C/m²,少部分在 800~1 050 g C/m²。(2) 东南部的秦岭山区和中北部的渭北旱塬区。该区域植被 NPP 大多数介于 450~600 g C/m²。(3) 中东部的关中平原、汾河盆地和陇山以西。该区域是关中平原城市群人口最稠密的地区,但也是植被 NPP 最低区域,大部分介于 350~450 g C/m²。研究区东部以及西北部分地区低于 350 g C/m²。

如图 3B 所示,2000—2019 年均植被 NPP 的 CV

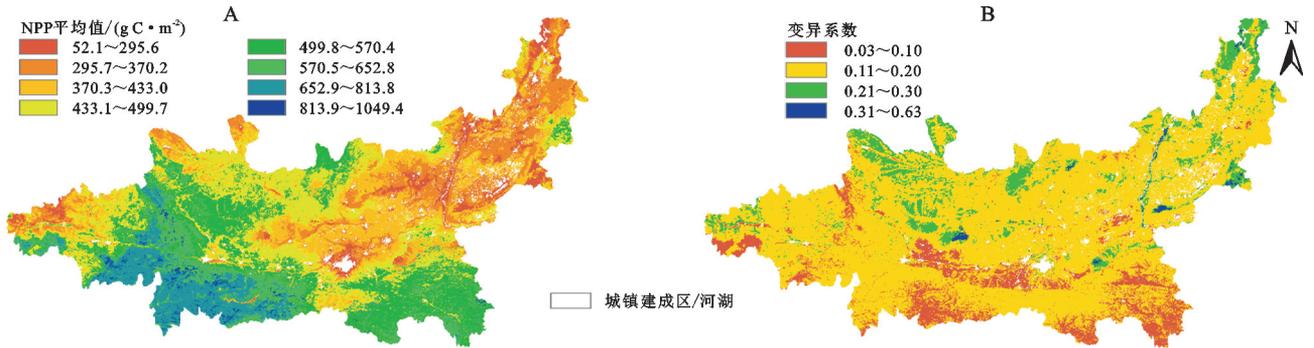


图 3 2000—2019 年关中平原城市群植被平均 NPP 及变异系数空间分布

逐像元计算 2000—2019 年关中平原城市群植被 NPP 变化速率(图 4),结果介于 -21.98~32.19 g C/(m²·a)。其中 $\theta_{slope} > 0$ 的区域占比 98.67%,即大部分区域植被 NPP 呈上升趋势,表明关中平原城市群植被生长状况较好。但高增长区域 [$\theta_{slope} > 15$ g C/(m²·a)] 较少,仅占研究区面积的 6.5%。从空间分布看, $\theta_{slope} > 15$ g C/(m²·a) 主要分布在研究区西部的陇山山区、北部的子午岭区域,地表覆盖以林地为主; θ_{slope} 介于 10~15 g C/(m²·a) 主要分布在研究区西部; θ_{slope} 在 5~10 g C/(m²·a) 分布最广,占研究区面积的 50.9%,集中分布在研究区的中东部; $\theta_{slope} \leq 5$ g C/(m²·a) 多分布在城市周围,表现为从城市向乡村, θ_{slope} 逐渐增大并呈一定的圈层结构,在西安市区和宝鸡市区周边最为显著,表明人类活动是引起植被 NPP 减少的主要因素。变化趋势显著性分析显示,有 95.65% 区域通过了显著性检验,且极显著占比 91.6%,仅有 4.35% 的区域没有通过显著性检验,回归分析质量较高。

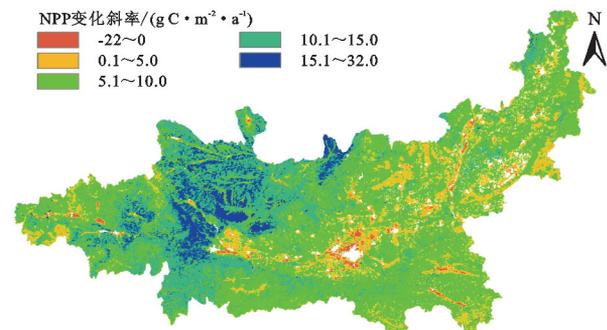


图 4 2000—2019 年关中平原城市群植被 NPP 变化速率

值介于 0.03~0.63,平均值为 0.15。CV 值集中分布在稳定区间 ($0.1 < CV \leq 0.2$),占研究区面积的 76.31%,表明研究期间关中平原城市群大部分区域植被 NPP 较稳定,变化幅度较小。非常稳定 ($CV \leq 0.1$) 区域占研究区面积的 12.68%,主要分布在地貌区 I 东南部和中部、地貌区 II 西部,地表覆盖主要为森林和农作物。不稳定区域 ($0.2 < CV \leq 0.3$) 主要分布在地貌区 III 中部。很不稳定区域 ($CV > 0.3$) 较少,主要分布在研究区中部地貌区 III 向地貌区 II 过渡区,以及研究区东部的中条山部分区域。

2.3 植被 NPP 影响因子探测

2.3.1 因子影响力分析 通过计算各因子的 q 值,比较各因子对关中平原城市群植被 NPP 的影响大小。由表 3 可知,各因子对植被 NPP 的影响程度排序为:年降水>地貌类型> $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温>植被类型>年均人口密度>海拔>年均气温>坡度>土壤类型。各因子 q 值具有明显的层次结构:(1) 年降水、地貌类型和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温的 q 值最大,分别为 0.421 8,0.392 0,0.332 4,对植被 NPP 解释力在 30% 以上,表明年降水、地貌类型和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温是影响植被 NPP 的主要因子。(2) 植被类型、年均人口密度海拔的 q 值接近,分别为 0.299 1,0.294 6,0.278 2,表明其对植被 NPP 的影响程度接近。(3) 年均气温、坡度和土壤类型 q 值最小,分别为 0.239 8,0.232 4,0.200 6,对植被 NPP 解释力在 23% 左右,表明对植被 NPP 影响最小。

2.3.2 因子差异分析

(1) 地貌类型差异。由表 4 可知,在不同地貌类型下,同一因子对植被 NPP 的影响具有显著差异。地貌区 I 年均人口密度 q 值最高,为 0.144 4,但与年均气温、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、海拔 q 值相差较小,均处于较低水平,对植被 NPP 的解释力较小,表明地貌区 I 植被 NPP 受单因子作用较小。地貌区 II 年降水 q 值最高,为 0.331 9,其他因子 q 值均不超过 0.1,表明年降水是影响地貌区 II 植被 NPP 的关键因素。地貌区 III 年降水 q 值最高,为 0.265 1,此外 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、海拔

q 值较高,在 0.2 左右,表明气候条件是影响地貌区 III 植被 NPP 的重要方面。

表 3 各影响因子的 q 值

| 项目 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | 0.4218 | 0.2398 | 0.3324 | 0.2782 | 0.2324 | 0.2946 | 0.3920 | 0.2991 | 0.2006 |
| p | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

表 4 关中平原城市群不同地貌影响因子 q 值

| 地貌区 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_8 | X_9 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| I | 0.0206 | 0.1275 | 0.1211 | 0.1186 | 0.0161 | 0.1444 | 0.0648 | 0.0108 |
| II | 0.3319 | 0.0102 | 0.0658 | 0.0273 | 0.0093 | 0.0533 | 0.0264 | 0.0840 |
| III | 0.2651 | 0.1649 | 0.2192 | 0.1940 | 0.0220 | 0.1458 | 0.1079 | 0.0862 |

(2) 植被类型差异。由表 5 可知,年降水因子 q 值最大,且对草丛、栽培植物分别达到 0.539 1,0.317 6,这与因子探测结果一致,表明年降水对植被 NPP 的影响高于其他因子。针叶林的海拔、年均人口密度、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和年均气温 q 值均大于 0.2,因子解释力超过 20%。

阔叶林的地貌类型与年降水因子 q 值接近,为 0.185 3,表明其对阔叶林 NPP 影响与年降水接近。灌丛、栽培植物其他因子 q 值较小。草丛的地貌类型因子 q 值达到 0.418 4,其他因子远小于年降水和地貌类型,表明地貌区差异对草丛生长状况具有较大影响。

表 5 关中平原城市群不同植被类型影响因子 q 值

| 植被类型 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_9 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 针叶林 | 0.2962 | 0.2019 | 0.2317 | 0.2485 | 0.1567 | 0.2457 | 0.1909 | 0.1559 |
| 阔叶林 | 0.1928 | 0.1178 | 0.1539 | 0.1454 | 0.0555 | 0.1121 | 0.1853 | 0.0634 |
| 灌丛 | 0.2147 | 0.1086 | 0.1614 | 0.1262 | 0.0502 | 0.1050 | 0.1272 | 0.0908 |
| 草丛 | 0.5391 | 0.0868 | 0.1615 | 0.1841 | 0.0833 | 0.1534 | 0.4184 | 0.1451 |
| 栽培植物 | 0.3176 | 0.1294 | 0.1820 | 0.1624 | 0.0834 | 0.1318 | 0.1776 | 0.0607 |

2.3.3 因子交互作用分析 交互作用探测通过识别影响因子 X_i 对植被 NPP 变化的交互作用,分析因子间的相互作用是否会对因子的解释力产生影响,并分析因子间的相互作用过程。由表 6 可知,所有影响因

子交互作用 q 值均大于影响因子独立的 q 值,表明两两因子间存在交互作用,呈现非线性的相互增强效应。与单因子相比,因子交互作用后对关中平原城市群植被 NPP 的解释力进一步增强。

表 6 影响因子交互作用探测结果

| 影响因子 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X_1 | 0.4218 | | | | | | | | |
| X_2 | 0.5726 | 0.2398 | | | | | | | |
| X_3 | 0.5671 | 0.3577 | 0.3324 | | | | | | |
| X_4 | 0.5656 | 0.2979 | 0.3454 | 0.2782 | | | | | |
| X_5 | 0.4829 | 0.3179 | 0.3781 | 0.3353 | 0.2324 | | | | |
| X_6 | 0.5407 | 0.3727 | 0.4260 | 0.4092 | 0.3608 | 0.2946 | | | |
| X_7 | 0.5049 | 0.4652 | 0.4844 | 0.4727 | 0.4026 | 0.4693 | 0.3920 | | |
| X_8 | 0.5049 | 0.3942 | 0.4276 | 0.4204 | 0.3593 | 0.3995 | 0.4380 | 0.2991 | |
| X_9 | 0.4661 | 0.3473 | 0.3994 | 0.3727 | 0.3267 | 0.3773 | 0.4268 | 0.3623 | 0.2006 |

年降水与年均气温交互作用 q 值最高,达到 0.572 6,高于单因子 q 值,表明年降水和年均气温交互作用后对植被 NPP 的影响得到显著增强,这与以往学者对植被 NPP 影响因素的研究结论基本一致^[13,24-25]。此外,因子交互作用 q 值超过 0.5 的还有: $X_1 \cap X_3$ (0.567 1), $X_1 \cap X_4$ (0.565 6), $X_1 \cap X_6$ (0.540 7), $X_1 \cap X_7$ (0.504 9), $X_1 \cap X_8$ (0.504 9),与单因子相比,其交互作用 q 值增长明显。以上交互作用均与年降水因子有关,表明在影响关中平原城市群植被 NPP 的因素中,年降水是关

键因素。交互作用后较单因子 q 值明显增加的还有: $X_2 \cap X_9$ (0.347 3), $X_4 \cap X_6$ (0.409 2), $X_4 \cap X_8$ (0.420 4), $X_6 \cap X_8$ (0.399 5),表明土壤类型与年均气温,海拔与年均人口密度、植被类型,植被类型与年均人口密度之间具有较强的交互作用。

分析表明,因子对植被 NPP 的影响不是独立的,因子间也交互作用也不是简单的叠加作用,而存在复杂的耦合作用,使因子间呈现相互增强的效应,并引起了植被 NPP 在空间上的分异。

3 讨论

根据因子探测结果,年降水、地貌类型以及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是关中平原城市群植被 NPP 的主要影响因素,具体来看:

(1) 年降水。水是植被光合作用的基础,对植被生长过程及 NPP 的积累具有重要意义。2000—2019 年,关中平原城市群年降水量在 543.8~873.3 mm (图 5),呈波动小幅上升趋势,在空间上(图 6)呈南多北少,自南向北逐渐减少的特征,这与植被 NPP 年际上升趋势及空间分布基本一致。将年降水分为 10 个区间,用数字 1—10 表示,并统计每个区间植被 NPP 均值。结果显示,植被 NPP 整体随降水增加呈上升趋势,在 8 降水区(720.6~756.7 mm)达到最大值 611.1 g C/m²。在 1—8 区间,降水每增加 1 区间,植被 NPP 增加约 39 g C/m²。表明植被 NPP 与降水量具有较为明显的相关性,降水增加则在一定程度上能够促进植被生长,有利于 NPP 的进一步增长。

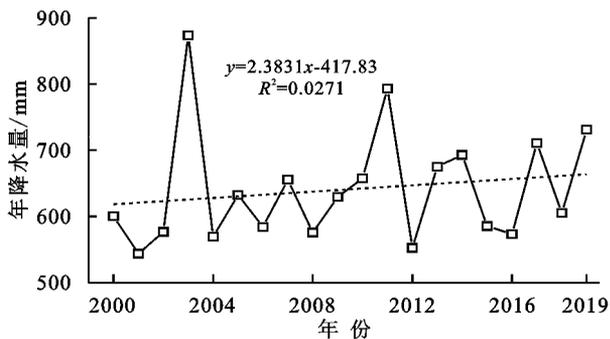


图 5 2000—2019 年关中平原城市群年降水变化

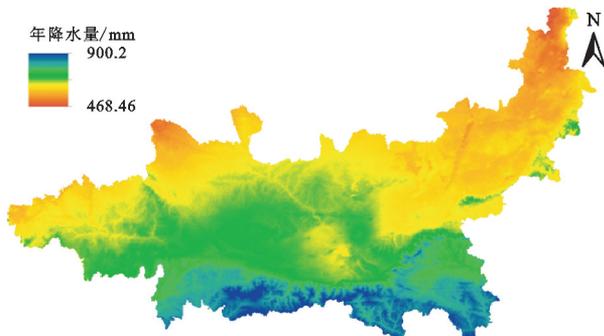


图 6 2000—2019 年关中平原城市群平均降水量空间分布

(2) 地貌类型。地貌类型对水热条件组合、植被类型、人类活动等具有制约作用,进而影响植被 NPP。不同地貌区内各影响因素的组合具有较大区别,使植被 NPP 在空间上表现出异质性。地貌区 I 位于研究区南部,以秦岭山地为主体,谷深坡陡,人口稀少,土地利用以林地为主,主要植被类型为阔叶林、针叶林和灌丛,平均海拔约 1 442 m,年降水约 739.3 mm,年均气温 9.8 $^{\circ}\text{C}$,由于降水丰沛,森林覆盖率高,

其植被 NPP 最高,平均值达到 596.5 g C/m²。但由于海拔、纬度位置等因素限制,植被类型及发育受到一定限制,其 NPP 相较于热带、亚热带林区偏低。地貌区 II 位于研究区中、东部,主要包括关中平原、汾河盆地,地形平坦,城镇聚集,人口密度大,土地利用以耕地和城乡建设用地为主,平均海拔约 526 m,年降水约 608.6 mm,年均气温 13.7 $^{\circ}\text{C}$,平均植被 NPP 约 389.8 g C/m²。虽然该区自然条件优越,但受到人类干扰最大,植被 NPP 最低。地貌区 III 位于研究区西部和北部,属黄土高原沟壑区,受流水侵蚀严重,地形破碎,草地、耕地、林地相间分布,区域平均海拔约 1 334 m,年降水约 607.9 mm,年均气温 9.9 $^{\circ}\text{C}$ 。本区水热组合较好,农业仍然具有相当规模,但也具有较大面积的森林,其植被 NPP 较高,约 459.4 g C/m²。

(3) $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温。积温能够反映区域热量条件,对植被尤其是农作物生长具有特殊意义。由图 7 可知,关中平原城市群 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温呈现东高西低,北高南低,与植被 NPP 的高低值分布相反,整体上与植被 NPP 呈负相关,这与植被类型、人类活动、降水等因素密切相关。具体表现为: $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温较低区域主要分布在研究区南部海拔较高的秦岭山区和西部的陇山山区,植被覆盖率高,植被类型以乔木为主,受人类干扰较少,植被 NPP 较高。而高值区域集中在海拔较低的关中平原至汾河盆地区域,虽然积温较高,但人类活动强度大,植被以农作物为主,导致植被 NPP 整体较低。

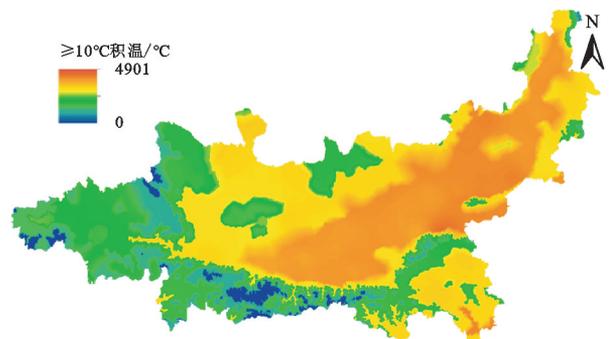


图 7 关中平原城市群 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间分布

4 结论

(1) 2000—2019 年,关中平原城市群年均植被 NPP 变化范围为 340.3~573.5 g C/m²,多年平均值为 474.8 g C/m²,年均增长 9.1 g C/m²,整体呈波动上升趋势。不同地貌区植被 NPP 具有明显差异,表现为地貌区 I 最大,地貌区 II 最小,但增长趋势相似。

(2) 关中平原城市群植被 NPP 具有显著的空间分异特征,高值区集中在西部和南部山区,低值区集中在中东部平原、盆地,总体呈南高北低,西高东低。

大部分区域植被 NPP 变化速率大于 0,但变异系数较小,表明植被 NPP 以小幅增加为主。呈减少趋势的区域主要分布在城市建成区向乡村过渡地带,主要是人类活动的影响。

(3) 植被 NPP 受多种因素的共同作用,其中降水、地貌类型及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是关中平原城市群植被 NPP 的主要影响因素,且年降水对植被 NPP 解释力达到 40%以上,地貌类型和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温对植被 NPP 解释力也达到 30%以上,表明自然因素仍然是植被 NPP 变化的主要驱动力。同时各因子间存在复杂耦合作用,使因子间的交互作用呈现非线性相互增强效应,其中年降水与年均气温交互作用对植被 NPP 的解释力达到 57%,相比单因子得到显著增强。

参考文献:

- [1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998,281(5374): 237-240.
- [2] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. New York: Springer-Verlag,1975.
- [3] Shvidenko A Z, Schepashchenko D G, Vaganov E A, et al. Net primary production of forest ecosystems of Russia: A new estimate[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2008,421(2):1009-1012.
- [4] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993,363:234-240.
- [5] 孙庆龄,冯险峰,肖潇.武陵山区植被净第一性生产力的时空格局及其与地形因子的关系[J].*地球信息科学学报*,2014,16(6):915-924.
- [6] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003,300(5625): 1560-1563.
- [7] 朱文泉,潘耀忠,阳小琼,等.气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析[J].*科学通报*,2007,58(21): 2535-2541.
- [8] 高志强,刘纪远,曹明奎,等.土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响[J].*地理学报*,2004,71(4):581-591.
- [9] 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[J].*生态学报*,2019,39(8):2995-3006.
- [10] 潘洪义,黄佩,徐婕.基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J].*生态学报*,2019,39(20):7621-7631.
- [11] 左丽媛,高江波.基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因[J].*生态环境学报*,2020,29(4):686-694.
- [12] 吴艳霞,罗恒,王彦龙.基于 Lotka-Volterra 共生模型的关中平原城市群生态安全测度研究[J].*水土保持通报*,2019,39(6):230-239,245,322.
- [13] 焦伟,陈亚宁,李稚,等.基于多种回归分析方法的西北干旱区植被 NPP 遥感反演研究[J].*资源科学*,2017,39(3):545-556.
- [14] 田智慧,张丹丹,赫晓慧,等.2000—2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子[J].*水土保持研究*,2019,26(2):255-262.
- [15] Lyapustin A, Wang Y, Xiong X, et al. Scientific impact of MODIS C5 calibration degradation and C6⁺ improvements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014,7(12):4353-4365.
- [16] Peng S, Ding Y, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2019,11(4): 1931-1946.
- [17] 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[J].*植物生态学报*,2007,53(3):413-424.
- [18] Yuan Quanzhi, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng, et al. Modeling net primary productivity of the terrestrial ecosystem in China from 1961 to 2005[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014,24(1):3-17.
- [19] 石志华,刘梦云,吴健利,等.基于 CASA 模型的陕西省植被净初级生产力时空分析[J].*水土保持通报*,2016, 36(1):206-211,345.
- [20] 陶波,李克让,邵雪梅,等.中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J].*地理学报*,2003,70(3):372-380.
- [21] 孙睿,朱启疆.中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J].*地理学报*,2000,67(1):36-45.
- [22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- [23] 刘凤,曾永年.近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响[J].*生态学报*,2019,39(5):1528-1540.
- [24] 国志兴,王宗明,张柏,等.2000—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J].*资源科学*,2008, 32(8):1226-1235.
- [25] 陈晓玲,曾永年.亚热带山地丘陵地区植被 NPP 时空变化及其与气候因子的关系:以湖南省为例[J].*地理学报*,2016,71(1):35-48.