



2000–2019年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析

汲玉河^{1,2} 周广胜^{1,2*} 王树东³ 王丽霞⁴ 周梦子¹

¹中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; ²郑州大学地球科学与技术学院生态气象联合实验室, 郑州 450001; ³中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101; ⁴生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

摘要 为了阐明2000–2019年秦岭地区植被生态质量变化的空间异质性, 以及植被生态质量变化的驱动力, 该文采用模型模拟和卫星观测的方法对植被生态质量演变及其驱动力进行研究。结果显示: (1)秦岭地区植被生态质量整体显著改善, 植被净初级生产力(*NPP*)和植被覆盖度(*VFC*)的平均增加速率分别为 $8 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.0054 \cdot \text{a}^{-1}$ 。空间上, 秦岭地区85%–95%区域的植被生态质量明显改善, 但是以西安市为代表的局部地区植被*NPP*和*VFC*显著下降。(2)秦岭地区80%–85%区域的降水量和气温呈上升趋势, 与植被*NPP*和*VFC*增加的空间范围大体一致, 证实气候暖湿化对改善植被质量有重要驱动作用。(3)人类保护活动(天然林保护、退耕还林还草等)使秦岭地区大范围植被生态系统得到抚育, 林地、草地和水域面积大幅度增加。以秦岭北麓为代表的建设用地扩张是秦岭部分地区植被生态质量恶化的主要原因, 但是人类破坏活动被限制在局部区域。

关键词 秦岭; 生态质量; 气候变化; 归一化植被指数; 植被覆盖度; 净初级生产力

汲玉河, 周广胜, 王树东, 王丽霞, 周梦子 (2021). 2000–2019年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析. 植物生态学报, 45, 617-625. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0253

Evolution characteristics and its driving forces analysis of vegetation ecological quality in Qinling Mountains region from 2000 to 2019

Ji Yu-He^{1,2}, ZHOU Guang-Sheng^{1,2*}, WANG Shu-Dong³, WANG Li-Xia⁴, and ZHOU Meng-Zi¹

¹State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China; ²Joint Laboratory of Eco-meteorology, School of Earth Science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; ³Aerospace Information Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; and ⁴Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

Abstract

Aims This study was conducted to illustrate the spatial heterogeneity of vegetation ecological quality change, and to clarify the driving forces of ecological quality change in Qinling Mountains region from 2000 to 2019.

Methods The methods of model simulation and satellite observation were used.

Important findings The results showed that (1) Vegetation ecological quality in Qinling Mountains region was significantly improved, and the average increase rates of net primary productivity (*NPP*) and vegetation fractional coverage (*VFC*) were $8 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $0.0054 \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. Spatially, 85%–95% of the Qinling Mountains region showed a significant improvement in ecosystem quality, but *NPP* and *VFC* decreased significantly in some areas such as Xi'an City. (2) 80%–85% of the Qinling Mountains region showed an increasing trend in precipitation and temperature, which was consistent with the distribution area increasing *NPP* and *VFC*. These evidence confirmed that warm and humid climate played an important role in improving vegetation ecological quality. (3) Human protection activities (Natural Forest Protection, Grain for Green Project, etc.) have increased the area of woodland, grassland and water area significantly, and a large range of vegetation ecosystems have been nurtured in the Qinling Mountains region. The expansion of construction land represented by the northern slope of Qinling Mountains was the main reason for the deterioration of vegetation ecological quality. However, human destructive activities were limited to local areas.

Key words Qinling Mountains; ecological quality; climate change; normalized difference vegetation index; vegetation fractional coverage; net primary productivity

收稿日期Received: 2020-07-28 接受日期Accepted: 2021-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(41705093, 41571175和31661143028)和国家重点研发计划(2018YFA0606103)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41705093, 41571175 and 31661143028), and the National Key R&D Program of China (2018YFA0606103).

* 通信作者Corresponding author (zhougs@cma.gov.cn)

Ji YH, Zhou GS, Wang SD, Wang LX, Zhou MZ (2021). Evolution characteristics and its driving forces analysis of vegetation ecological quality in Qinling Mountains region from 2000 to 2019. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 617-625. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0253

秦岭是我国最重要的自然地理分界线,是重要的水源涵养区和生物多样性保护优先区,具有重要生态服务价值,对于维护国家和区域生态安全有重要意义(Zhang *et al.*, 2019)。广义的秦岭-淮河线是我国暖温带半湿润季风气候区和北亚热带湿润气候区的分界线,是落叶阔叶林植被带与常绿阔叶、落叶阔叶混交林植被带的分界线,也是古北界动物区系与东洋界动物区系的分界线(黄建军, 2015)。

秦岭地区植被生态系统受到气候变化和人类活动的双重影响。气候是影响植被垂直地带性和水平地带性空间分异的关键因素。气候变化不仅影响植被潜在空间分布,而且影响植被生态质量。1964–2015年间秦岭地区气温呈持续增加趋势,平均升温速率为每10年0.22 °C (Deng *et al.*, 2019a)。秦岭地区降水量年际波动较大,区域差异非常显著(Shao *et al.*, 2019)。气温和降水变化是自然生态系统变化的最重要自然驱动力,对秦岭地区植被生态系统产生了重要影响(陈晓宁和蒋好忱, 2019)。人类保护活动对秦岭地区生态环境的影响也非常显著。秦岭地区是我国天然林保护、退耕还林生态工程的重要实施区,已经建立了保护区网络(Li *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017)。一系列生态保护工程对当地自然生态系统恢复起到积极作用。秦岭北麓西安、东麓洛阳是著名历史古都,历来人类活动十分强烈。近年来城市化进程中,城镇建设和居民点用地迅速增加,尤其是秦岭北麓的大面积非法建设,已经影响了自然生态系统和生态功能的发挥(Zhou & Li, 2017; Li *et al.*, 2019)。

秦岭作为我国自然地理过渡区,本身的气候、地形、地质、地貌和植被类型复杂多变(黄建军, 2015)。气候变化和人类活动的有利和不利影响交织在一起,具有复杂的空间差异性(邓晨晖等, 2018)。自然环境的多样性及其影响因素的时空差异性致使秦岭地区植被生态环境变化十分复杂。目前,国内大多数研究对秦岭地区植被生态环境长时间序列变化的空间异质性,及其主要驱动因子的空间异质性缺乏详细研究。本研究以广义秦岭为研究区,基于遥感和气象实测数据,在1 km × 1 km空间精度上阐述2000–2019年秦岭地区植被生态环境要素的时空

变化特征,气候变化和人为活动等驱动因素的空间差异性,及其对秦岭地区植被生态质量时空变化的制约关系,旨在为秦岭地区的生态保护与建设提供理论基础和科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区为广义的秦岭地区,北至渭河,南至汉江,西起白石山,东到秦岭余脉(北支为崤山,中支为熊耳山,南支为伏牛山)(张珍万和崔友文, 1963)。主要涉及13个地区级行政区,包括定西县、天水市、成县、宝鸡市、汉中市、西安市、安康市、渭南市、商州市、十堰市、三门峡市、洛阳市、南阳市,总面积为121 273 km²。东西走向的秦岭山脉西高东低,跨越了第一、第二和第三阶梯3个梯度带(图1)。

秦岭作为我国最重要的自然地理分界线,其内部自然地理要素存在较大空间异质性。秦岭西部以灌丛和草甸植被为主,植被覆盖度和生产力相对较低;中部以森林植被为主,植被覆盖度和生产力最高;东部除个别地区外植被覆盖度和植被生产力也比较高。秦岭山脉阻碍了水热的交换,东部和南部受东南季风影响,水热条件较好;从东南方向来的暖湿气流翻越高大的秦岭山脉后,形成强烈气流下沉区,在秦岭北麓形成明显焚风效应,因此秦岭西部和北部水热条件较差。秦岭南侧的年降水量一般在600 mm以上,北侧和西侧的年降水量一般低于600 mm。秦岭地区气温受海拔影响非常明显,呈现东部气温高,西部气温低的总体格局,东部大部分区域年平均气温10 °C以上,而西部和中部高山区一般年平均气温10 °C以下。

1.2 数据来源

本研究的数据包括2000–2019年卫星遥感反演数据、气象观测数据、土地利用数据等。其中卫星遥感反演数据为16天合成的全球归一化植被指数(NDVI)产品数据,空间分辨率1 km × 1 km,来源于美国国家航空航天局(NASA)的MODIS网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>)。为了消除云雾、冰雪覆盖等环境因素影响,从MODIS的16天的NDVI产品数据中提取1年内的各个栅格点的最大值

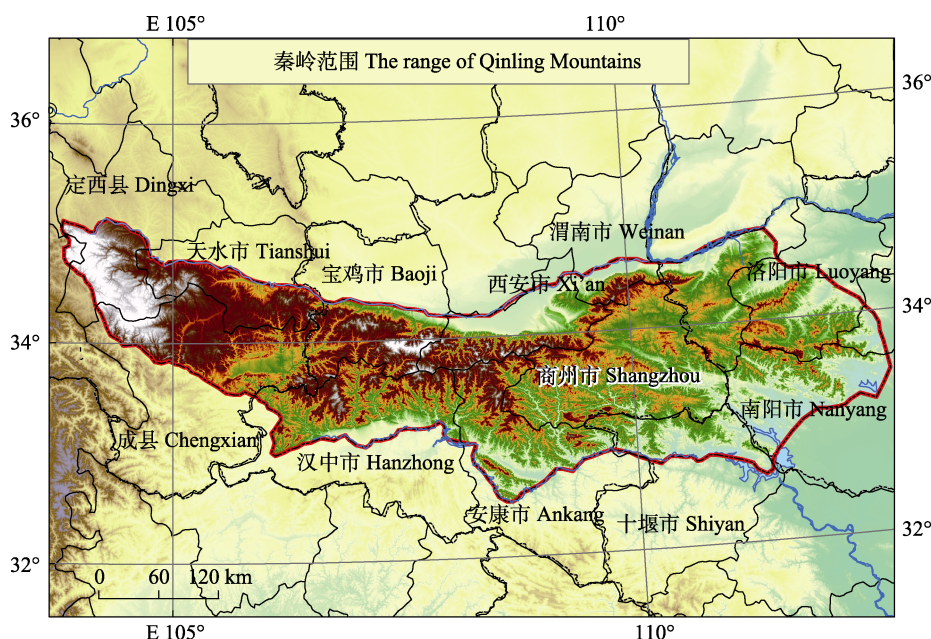


图1 广义秦岭的地理范围。

Fig. 1 Geographical range of Qinling Mountains region in a broad sense.

($NDVI_{\max}$), 用于量化植被生态质量, 计算植被覆盖度(VFC)和净初级生产力(NPP)。

2000–2019年的气象数据主要是年平均气温和年降水量, 来源于国家气象业务内网(<http://data.cma.gov.cn/>)的全国2 400多个气象站点的实测日值数据。针对每一个气象站点, 由日平均气温平均获得月平均气温, 由月平均气温平均获得年平均气温; 由日降水值累积获得月降水量, 由月降水值累积获得年降水量。然后根据2 400多个气象站点的经纬度、年平均气温和年降水量, 利用ArcGIS空间插值方法生成1 km × 1 km的全国的栅格图层, 然后根据矢量边界裁切出秦岭地区的栅格气象数据。

土地利用数据来源于全国的土地利用类型空间分布数据集, 该数据集生产制作是以 Landsat TM/ETM遥感影像为主要数据源, 通过人工目视解译生成。土地利用数据格式为100 m栅格数据, 是在中国1:10万比例尺土地利用现状遥感监测数据基础上通过栅格化处理生成的。根据秦岭地区矢量边界, 裁切出秦岭地区的土地利用分布图。

1.3 植被生态质量指标计算

植被生态质量是植被地理分布、生产力和生态服务的综合体现, 本研究采用 $NDVI_{\max}$ 、 VFC 和 NPP 表征。

(1) $NDVI$ 计算方法

$NDVI$ 采用通用的计算方法, 即近红外波段的

反射值与红光波段的反射值之差与两者之和的比值(皮伟强等, 2018)。由于不同卫星产品的近红外波段、红外波段的带宽和波段命名存在差异, 不同卫星的 $NDVI$ 并不完全相等。本研究采用MODIS的 $NDVI$ 算法公式:

$$NDVI = (\text{Band2} - \text{Band1}) / (\text{Band2} + \text{Band1}) \quad (1)$$

(2) VFC 计算方法

VFC 采用通用的计算方法:

$$VFC = (NDVI_{\max} - NDVI_{\text{soil}}) / (NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}) \quad (2)$$

式中, $NDVI_{\text{soil}}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 $NDVI$, $NDVI_{\text{veg}}$ 代表完全被植被所覆盖的像元 $NDVI$, 即纯植被像元的 $NDVI$ 。

(3) NPP 计算方法

植被 NPP 采用分植被类型和分区计算的方法。秦岭地区的植被主要是草地和林地(乔木林和灌木林)两种类型。其中草地植被 NPP 计算公式采用徐斌等(2007)优选的植被 NPP 模型。林地植被 NPP 采用Ji等(2020)优选的森林 NPP 模型。该模型是根据全国1 000多个森林长期观测站点资料优选得到的模型, 由海拔、 $NDVI_{\max}$ 、年降水量和年平均气温计算得到林地植被 NPP 。

1.4 一元线性回归分析

进行长时间序列的栅格数据分析时, 需要知道每个格点的长期趋势。在ArcGIS中对每个单元格的多年数据进行一元线性回归, 以模拟空间上每个像

元的参数变化趋势。采用最小二乘法来计算的线性回归直线的斜率(*Slope*)。 *Slope*可以表示每个栅格点变化速率。

2 结果和分析

2.1 植被NPP时空变化

空间上看, 在2000–2019年期间秦岭地区85%区域的植被NPP呈持续上升趋势, 尤其是秦岭中段(陕西段)植被NPP增加特别明显。但是在秦岭北麓东麓人口比较集中, 尤其是城市化发展迅速, 导致秦岭北麓的少数地区植被NPP呈明显减少趋势, 减

少幅度为 $10\text{--}100\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 秦岭东麓(河南洛阳和南阳)也呈减少趋势, 减少幅度为 $0\text{--}10\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (图2C)。秦岭地区 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 栅格平均值显示植被NPP由2000年的 $932\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 增加到2019年的 $1\,097\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均增加速率 $8\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (图2E)。

尽管秦岭地区植被NPP存在显著空间差异(图2A), 但是平均值相对较高。在 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 空间精度上, 2000–2019年秦岭地区平均的植被NPP达 $1\,021\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 远远高于全国平均值 $235.2\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (Feng *et al.*, 2007)。

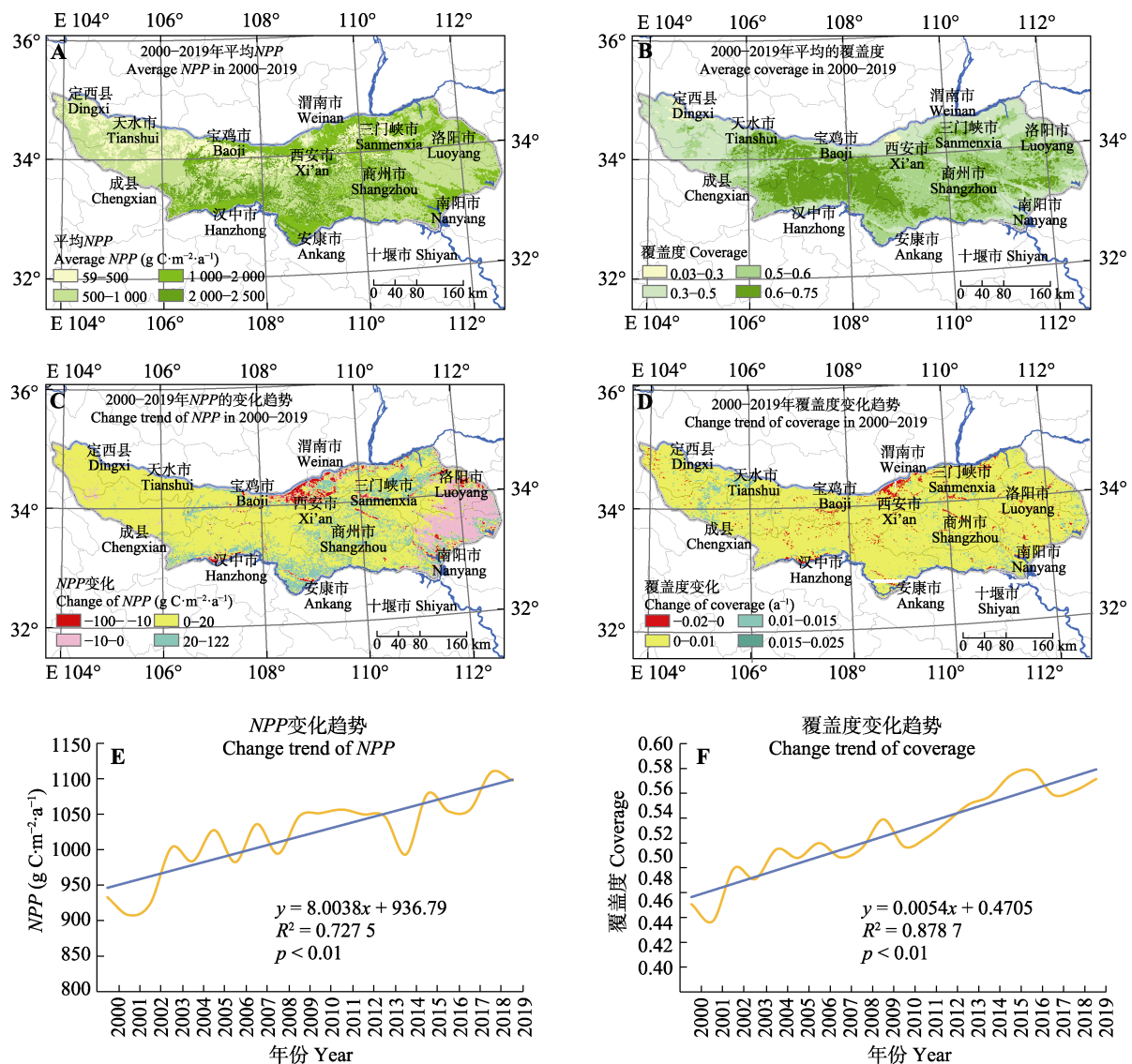


图2 2000–2019年秦岭地区 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 空间精度上多年平均的植被净初级生产力(NPP)(A)、植被覆盖度(VFC)(B), 及其变化趋势(C, D), 以及各栅格平均的变化趋势(E, F)。

Fig. 2 Annual vegetation net primary productivity (NPP)(A), average vegetation coverage (VFC)(B), their change trends (C, D) at spatial resolution of $1\text{ km}\times 1\text{ km}$, and the average change trends from all grids (E, F) in Qinling Mountains region from 2000 to 2019.

2.2 VFC时空变化

2000–2019年秦岭地区平均的VFC为0.527。空间上看, 2000–2019年期间秦岭地区的VFC呈现明显增加趋势, 95%以上区域的VFC呈增加趋势, 绝大部分的VFC增加速率在 $0-0.01 \cdot a^{-1}$ 之间。秦岭地区 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 栅格平均值显示VFC由2000年的0.47增加到2019年的0.57, 平均增加速率为 $0.0054 \cdot a^{-1}$ (图2F)。但是在秦岭北麓(西安市周边), 城市化发展迅速, 大量植被遭到破坏, 造成VFC呈现明显减少趋势(图2D)。VFC是植物累年生长的结果, 秦岭地区大范围的VFC增加反映植被茂密程度增加。但是在秦岭北麓等城市化集中地区, VFC呈减少趋势, 减少速率一般在 $0-0.02 \cdot a^{-1}$ (图2D)。

2.3 植被变化的气候驱动力

2000–2019年秦岭地区平均的年降水量为632 mm, 年平均气温为 10°C 。2000–2019年期间秦岭地区呈现暖湿化趋势, 表现为年降水量和年平均气温都明显增加(图3, 图4)。空间上, 秦岭地区80%左右区域

的气温呈升高趋势, 秦岭北麓和秦岭中段商州地区增温速率超过 $0.05^\circ\text{C} \cdot a^{-1}$, 高于全球平均增温速率($0.02^\circ\text{C} \cdot a^{-1}$)(IPCC, 2018)。秦岭地区85%左右区域的年降水量呈现明显增加趋势, 尤其秦岭山脉中段(陕西段)部分地区的年降水量增加速率超过 $20 \text{ mm} \cdot a^{-1}$ (图4A)。秦岭地区 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 栅格平均值显示2000年以来年平均气温增加速率为 $0.028^\circ\text{C} \cdot a^{-1}$ (图3B), 年降水量平均增加速率为 $6.5 \text{ mm} \cdot a^{-1}$ (图4B)。

理论上, 气温和降水量增加有助于植被生长。增加的气温延长了植被生长期, 有利于提高植被NPP和VFC (Deng *et al.*, 2019b)。增加的降水为植被提供了更充足的水分, 客观上有利于植被生产功能提高。事实上, 降水量和气温升高区与植被NPP和VFC增加区都出现在秦岭中部(陕西段)和西部(甘肃段), 空间分布比较一致(图2C、2D, 图3A, 图4A), 80%–85%秦岭区域的年降水量和年平均气温升高导致80%区域的植被NPP呈现增加趋势, 90%以上区域的VFC呈现增加趋势, 说明秦岭地区气候暖湿化

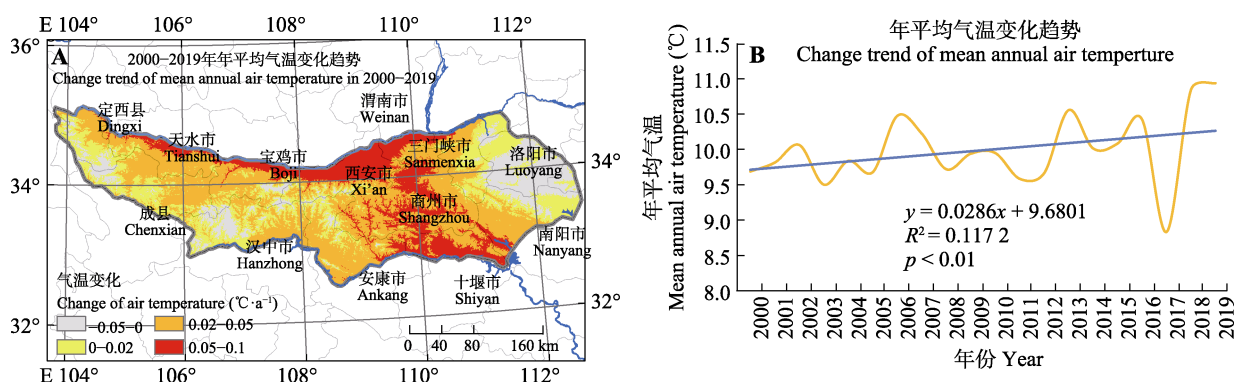


图3 2000–2019年秦岭地区 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 空间精度上的年平均气温变化趋势(A)及各栅格平均的变化趋势(B)。

Fig. 3 Change trends of mean annual temperature (A) at spatial resolution of $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, and the average trend from all grids over Qinling Mountains region from 2000 to 2019 (B).

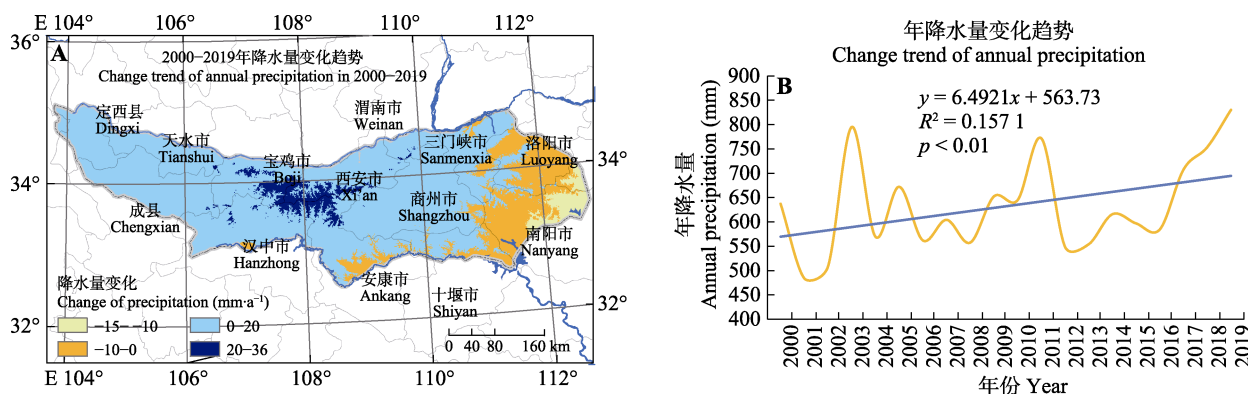


图4 2000–2019年秦岭地区 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 空间精度上的年降水量变化趋势(A)及各栅格平均的变化趋势(B)。

Fig. 4 Change trends of annual precipitation (A) at spatial resolution of $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, and the average trend from all grids over Qinling Mountains region from 2000 to 2019 (B).

(气温和降水增加)促进了植被NPP和VFC增加。

但是秦岭东部(河南洛阳和南阳)年平均气温和年降水量均呈下降趋势(图3A, 图4A), 与秦岭地区暖湿化趋势不一致。而且秦岭东部气温下降和降水减少分布的空间范围与植被NPP减少区范围与大体吻合(图2C, 图3A, 图4A), 说明气候冷干化(气温和降水降低)是植被NPP下降的重要驱动力。

偏相关分析量化了整个秦岭地区植被变化与气候(年平均气温和年降水量)长期变化的关系。数据分析结果表明, 秦岭地区植被NPP与年降水量显著相关, 偏相关系数为0.603 ($p = 0.006$), 说明秦岭地区降水量的增加提高了植被生产功能。但是植被NPP与年平均气温的相关性不显著, 偏相关系数为0.360 ($p = 0.13$)。相对于秦岭地区降水量的年际变化, 年气温变化幅度较小, 可能是造成植被NPP与年平均气温相关性不显著的重要原因。秦岭地区VFC与年平均气温的偏相关系数为0.393 ($p = 0.096$), VFC与年降水量的偏相关系数为0.291 ($p = 0.226$), 偏相关关系都不显著(表1)。年降水量和年平均气温是某年的气候变量, VFC (尤其是森林VFC)是植物生长多年累积的结果, 而且秦岭地区分布大面积的森林, 这可能是造成VFC与年降水量、年平均气温偏相关关系不显著的主要原因。以上结果表明年降水量是制约秦岭地区植被NPP变化的关键因素, 年平均气温对植被NPP和VFC的影响未达到显著水平。

2.4 植被变化的人为驱动力

秦岭地区植被变化的人为驱动力主要包括生态保护工程对植被的改善作用, 以及建设用地扩展对

植被的破坏作用。一方面是退耕还林还草、天然林保护和其他生态保护工程促进了生态环境改善。土地利用图的叠加分析结果显示: 由于一系列生态工程实施, 2000–2015年秦岭地区林地(乔木、灌木、竹类等林业用地)面积增加了25 456 hm^2 , 草地面积增加了18 454 hm^2 , 水域(河渠、湖泊、水库、坑塘、滩涂)面积增加了10 480 hm^2 (表2), 尤其在商洛地区和安康地区林草面积增加最显著(图5)。此外, 秦岭地区还建立了周至、太白山、长青、牛背梁、佛坪、平河梁等保护区, 保护区内违法违规开发活动等威胁因素得到基本遏制。上述一系列保护措施为植被生长发育提供了重要条件, 尤其是退耕还林还草工程使大面积坡耕地转为林地和草地, 促进了大范围的植被NPP和VFC增加(图5)。

另一方面秦岭地区建设用地大面积扩展, 破坏大量植被。土地利用变化图显示2000–2015年秦岭地区建设用地面积由187 831 hm^2 扩展到282 880 hm^2 , 增加了50.6% (表2)。建设用地扩展具有相对集中的特点, 其中秦岭北麓有大量土地转化为建设用地(图5中红色部分)。对比发现建设用地扩展区与植被NPP和VFC显著下降区的空间分布高度吻合, 例如西安市周边地区(图2C、2D, 图5)。上述证据表明秦岭北麓大规模建设是秦岭局部地区植被NPP和VFC显著下降的主要人为驱动力。

3 讨论

本文采用植被NPP和VFC指标, 分别从植被生产力功能和植被宏观分布结构两个侧面量化了植被

表1 2000–2019年秦岭地区1 km × 1 km空间精度上平均的气候变量(年降水量和年平均气温)与植被变量(净初级生产力和覆盖度)的偏相关关系
Table 1 Partial correlations between climate variables (annual precipitation and annual mean air temperature) and vegetation variables (net primary productivity and coverage) from 1 km × 1 km spatial accuracy over Qinling Mountains region from 2000 to 2019

植被变量 Vegetation variables	年降水量 Annual precipitation			年平均气温 Annual mean air temperature		
	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance (Two-tailed)	自由度 df	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance (Two-tailed)	自由度 df
净初级生产力 Net primary productivity	0.603	0.006	17	0.360	0.130	17
覆盖度 Coverage	0.291	0.226	17	0.393	0.096	17

表2 2000–2015年秦岭地区土地利用类型及其变化
Table 2 Land use types and their change in Qinling Mountains region from 2000 to 2015

土地利用变化 Land use change	农田 Farmland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Body of water	建设用地 Construction land
2000年面积 Area in 2000 (hm^2)	3 243 955	4 902 716	3 652 886	107 819	187 831
2015年面积 Area in 2015 (hm^2)	3 092 793	4 928 172	3 671 340	118 299	282 880
增减面积 Increase or decrease area (hm^2)	-151 162	25 456	18 454	10 480	95 049
增减幅度 Range of increase or decrease (%)	-4.66	0.52	0.51	9.72	50.60

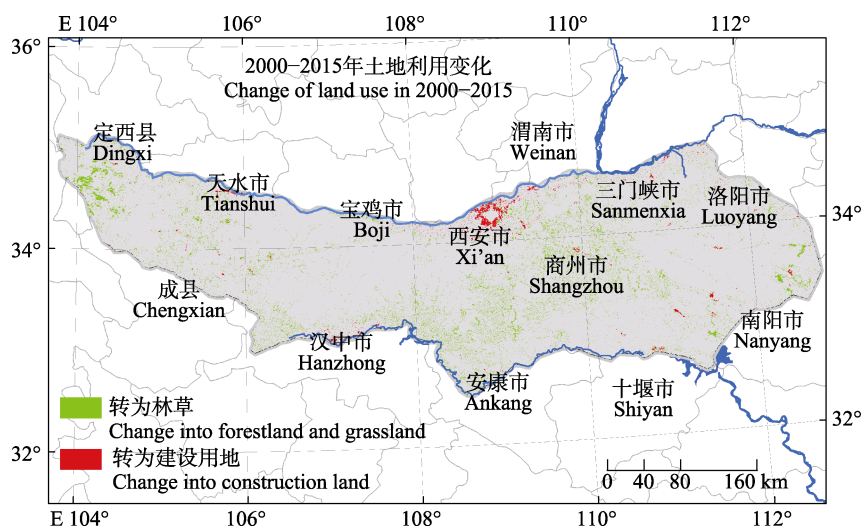


图5 2000–2015年秦岭地区土地利用的变化。

Fig. 5 Change of land use in Qinling Mountains region from 2000 to 2015.

生态质量及其变化。植被 NPP 是植物光合作用在单位时间和单位面积上累积的有机物数量减去自养呼吸消耗后剩余的部分,反映植被生产力功能特征(周广胜和张新时, 1996)。 VFC 刻画地表植被覆盖(贾坤等, 2013)。本研究采用 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 精度的 $NDVI$ 反演 VFC ,是栅格内的植被垂直投影面积占栅格面积的比,能够反映植被水平空间结构特征。尽管一些研究采用主成分分析法或等权重法将多个指标(植被覆盖度、生物量密度、植被面积百分比等)融合为一个生态质量指数(王静等, 2017)。但是融合后的生态质量指数比较笼统,难以区分植被结构和植被功能等详细信息。

气候变化和人类活动是植被生态系统变化的主要驱动力,这已经是人们的共识(Fang *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020)。在气候变化和人类活动复杂作用下,秦岭地区植被生态质量(NPP 和 VFC)变化表现出空间异质性。本研究在 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 精度上分析气候变化和人类活动强度的分布格局,探寻了导致植被 NPP 和 VFC 空间异质性的根本原因。尽管秦岭地区气温和降水年际波动非常大,不可避免出现极端气候事件对植被生态系统造成不利影响(Jiang *et al.*, 2016),但是本研究结果证实气候变化对植被生态系统的综合影响总体上是有益的,极端气候事件没有改变秦岭地区植被生态质量长期持续改善的趋势(图2C、2D)。观测数据显示,2000–2019年期间秦岭地区85%–90%区域的植被 NPP 和 VFC 都呈持续上升趋势。秦岭地区降水量和气温增加发生的空间范围占秦岭地区面积

的80%–85%,大范围区域出现暖湿化气候倾向(图2C、2D)。暖湿化气候为植被提供了更充足的水分条件,延长了植被生长期(Deng *et al.*, 2019b),非常有利于植被生长。降水量和气温升高分布的区域与植被 NPP 和 VFC 增加分布的区域,它们的空间范围大体一致(图3A, 图4A),佐证了气候暖湿化整体上促进了大范围区域的植被生态质量提高。此外,本研究采用偏相关分析方法,量化了植被变量(NPP 和 VFC)与气候变量(年平均气温和年降水量)的定量关系,进一步发现年降水量是制约秦岭地区植被 NPP 年际变化的关键因素。

本研究结果证实秦岭地区大规模人类保护活动对植被生态质量的有利影响是大范围的,而人类破坏活动对植被生态质量的不利影响是局域性的。秦岭地区的生态保护与修复活动包括退耕还林还草、植树造林、封山育林、建立保护区等一系列措施。在退耕还林的工作中,一方面封山,禁止乱砍滥伐,另一方面育林,大面积植树造林,极大地改善了当地自然生态环境(李卫忠等, 2000; 徐祯霞, 2015)。秦岭地区建立的一系列保护区,例如周至、太白山、长青、牛背梁、佛坪、平河梁等保护区,已经形成了保护网络(Zhang *et al.*, 2017)。实施天然林保护工程和全面禁伐,使天然次生林得到快速生长。本研究显示2000–2015年秦岭地区退耕还林还草生态工程扩大的林地、草地和水域面积达到 $54\,390\text{ hm}^2$ (表1),对改善植被生态质量起到了重要作用。人类保护活动涉及秦岭地区的广大区域,在气候暖湿化背景下这些生态保护措施加速了植被生态系统改善,对大

范围的植被生态质量改善起到重要推动作用。

人类对植被生态系统的破坏活动被限制在局部区域。2000–2015年土地利用变化图显示秦岭地区建设用地面积增加了50.6% (表2)。建设用地扩展具有相对集中的特点, 秦岭北麓西安地区的建设用地扩展最明显。对比发现秦岭北麓建设用地扩展区与植被NPP和VFC显著下降区的空间分布高度吻合, 佐证了建设用地扩展对局部植被的极大破坏作用。相对秦岭地区大范围植被质量改善, 人类的破坏活动是属于小范围的, 但是这种小范围的局地破坏程度非常大, 导致植被功能(NPP)和植被结构(VFC)的极大破坏。

4 结论

2000–2019年秦岭地区植被生态质量持续改善, 主要生态指标(NPP和VFC)均呈明显增加趋势。秦岭地区85%–90%区域的植被NPP和VFC均呈持续上升趋势, 大范围植被生态质量明显改善。但是以秦岭北麓为代表的局部地区植被NPP和VFC出现明显下降趋势。2000–2019年秦岭地区80%–85%区域的气候出现明显的暖湿化倾向。暖湿化气候分布区与植被NPP和VFC增加分布区的空间范围大体一致, 证明气候暖湿化促进了秦岭大范围区域的植被生态质量提高。偏相关分析发现年降水量是制约秦岭地区植被NPP年际变化的关键因素。气候暖湿化背景下, 人类保护活动对秦岭地区大范围的植被生态质量改善起到重要推动作用。建设用地大面积扩展(增加了50.6%)是造成秦岭北麓植被生态质量下降的主要人为驱动因素。尽管建设用地的破坏作用属于小范围, 但是破坏程度大, 应适当限制建设用地规模, 以促进秦岭地区植被生态系统的全面改善。

参考文献

Chen XN, Jiang HC (2019). Climate response of NDVI index on Qinling Mountains in 25 years. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (3), 103-107. [陈晓宁, 蒋好忱 (2019). 25年来秦岭NDVI指数的气候响应. 测绘通报, (3), 103-107.]

Deng CH, Bai HY, Gao S, Liu RJ, Ma XP, Huang XY, Meng Q (2018). Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities. *Journal of Natural Resources*, 33, 425-438. [邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清 (2018). 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, 33, 425-438.]

Deng CH, Bai HY, Gao S, Zhao T, Ma XP (2019a). Differences and variations in the elevation-dependent climatic growing season of the northern and southern slopes of the Qinling Mountains of China from 1985 to 2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 1159-1169.

Deng CH, Bai HY, Ma XP, Zhao T, Gao S, Huang XY (2019b). Spatiotemporal differences in the climatic growing season in the Qinling Mountains of China under the influence of global warming from 1964 to 2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 1899-1911.

Fang JY, Song YC, Liu HY, Piao SL (2002). Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 44, 1105-1122.

Feng X, Liu G, Chen JM, Chen M, Liu J, Ju WM, Sun R, Zhou W (2007). Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 85, 563-573.

Huang JJ (2015). Control of Qinling tectonic zone on climate and eco-environment in Shaanxi. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37(3), 81-86. [黄建军 (2015). 秦岭构造带对陕西气候和生态环境的控制作用. 地球科学与环境学报, 37(3), 81-86.]

IPCC (2018). Summary for policymakers//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, et al. *Global Warming of 1.5 °C*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Ji YH, Zhou GS, Luo TX, Dan Y, Zhou L, Lv XM (2020). Variation of net primary productivity and its drivers in China's forests during 2000–2018. *Forest Ecosystems*, 7, 15. DOI: 10.1186/s40663-020-00229-0.

Jia K, Yao YJ, Wei XQ, Gao S, Jiang B, Zhao X (2013). A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing. *Advances in Earth Science*, 28, 774-782. [贾坤, 姚云军, 魏香琴, 高帅, 江波, 赵祥 (2013). 植被覆盖度遥感估算研究进展. 地球科学进展, 28, 774-782.]

Jiang C, Mu XM, Wang F, Zhao GJ (2016). Analysis of extreme temperature events in the Qinling Mountains and surrounding area during 1960–2012. *Quaternary International*, 392, 155-167.

Li CX, Gao X, Xi ZL (2019). Characteristics, hazards, and control of illegal villa (houses): evidence from the Northern Piedmont of Qinling Mountains, Shaanxi Province, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 21059-21064.

Li WZ, Huang CP, Ji WL (2000). A Study on the problems of implementing natural forests conservation programme in Qinling forest area. *Journal of Northwest Forestry University*,

- 15(1), 80-84. [李卫忠, 黄春萍, 吉文丽 (2000). 秦岭林区实施天然林保护工程若干问题的思考. 西北林学院学报, 15(1), 80-84.]
- Li Y, Viña A, Yang W, Chen XD, Zhang JD, Ouyang ZY, Liang Z, Liu JG (2013). Effects of conservation policies on forest cover change in giant panda habitat regions, China. *Land Use Policy*, 33, 42-53.
- Liu HY, Zhang MY, Lin ZS, Xu XJ (2018). Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in Southwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256-257, 10-21.
- Pi WQ, Du JM, Chen C, Zhu XB, Liu H (2018). Identification of vegetation in high-spectral images of desertification grassland based on normalized vegetation index. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 39(4), 75-79. [皮伟强, 杜健民, 陈程, 朱相兵, 刘浩 (2018). 基于归一化植被指数对荒漠化草原地面高光谱影像中植被的识别. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 39(4), 75-79.]
- Shao YT, Mu XM, He Y, Sun WY, Zhao GJ, Gao P (2019). Spatiotemporal variations of extreme precipitation events at multi-time scales in the Qinling-Daba mountains region, China. *Quaternary International*, 525, 89-102.
- Sun YL, Yang YL, Zhang L, Wang ZL (2015). The relative roles of climate variations and human activities in vegetation change in North China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 87-88, 67-78.
- Wang J, Zhou WQ, Xu KP, Yan JL, Li WF, Han LJ (2017). Quantitative assessment of ecological quality in Beijing-Tianjin-Hebei urban megaregion, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 2667-2676. [王静, 周伟奇, 许开鹏, 颜景理, 李伟峰, 韩立建 (2017). 京津冀地区的生态质量定量评价. 应用生态学报, 28, 2667-2676.]
- Xu B, Yang XC, Tao WG, Qin ZH, Liu HQ, Miao JM (2007). Remote sensing monitoring upon the grass production in China. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 405-413. [徐斌, 杨秀春, 陶伟国, 覃志豪, 刘海启, 缪建明 (2007). 中国草原产草量遥感监测. 生态学报, 27, 405-413.]
- Xu WH, Viña A, Qi ZX, Ouyang ZY, Liu JG, Liu W, Wan H (2014). Evaluating conservation effectiveness of nature reserves established for surrogate species: case of a giant panda nature reserve in Qinling Mountains, China. *Chinese Geographical Science*, 24(1), 60-70.
- Xu ZX (2015). Grain for Green, full of green Qinling Mountains. *Environmental Economy*, (21), 33. [徐祯霞 (2015). 退耕还林, 绿满秦岭. 环境经济, (21), 33.]
- Zhang HJ, Gao Y, Hua YW, Zhang Y, Liu K (2019). Assessing and mapping recreationists' perceived social values for ecosystem services in the Qinling Mountains, China. *Ecosystem Services*, 39, 101006. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.101006.
- Zhang W, Wang LC, Xiang FF, Qin WM, Jiang WX (2020). Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 110, 105892. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105892.
- Zhang YB, Wang YZ, Phillips N, Ma KP, Li JS, Wang W (2017). Integrated maps of biodiversity in the Qinling Mountains of China for expanding protected areas. *Biological Conservation*, 210, 64-71.
- Zhang ZW, Cui YW (1963). Vegetation regionalization in Qinling Mountains (draft). *Acta Phytocologia et Geobotanica Sinica*, 1, 161-162. [张珍万, 崔友文 (1963). 秦岭地区的植被区划(草案). 植物生态学与地植物学丛刊, 1, 161-162.]
- Zhou GS, Zhang XS (1996). Study on NPP of natural vegetation in China under global climate change. *Acta Phytocologia Sinica*, 20, 11-19. [周广胜, 张新时 (1996). 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. 植物生态学报, 20, 11-19.]
- Zhou ZX, Li MT (2017). Spatial-temporal change in urban agricultural land use efficiency from the perspective of agricultural multi-functionality: a case study of the Xi'an metropolitan zone. *Journal of Geographical Sciences*, 27, 1499-1520.

责任编辑: 岳明 编辑: 赵航