#### DOI: 10.5846/stxb201911252547

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.

Zhao F, Zhang J Y, Liu S Y, Wang Z Y, Wang L H, Gu H T, Li W L. Assessing the dividing line between warm temperate and subtropical zones based on the zonality discussion on multi-dimensional response of Net Primary Productivity to climate change in the Qinling-Daba Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(1):57-68.

# 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

赵 芳<sup>1,2</sup>,张久阳<sup>1</sup>,刘思远<sup>1</sup>,王增艳<sup>1,2,\*</sup>,王黎欢<sup>1</sup>,顾浩婷<sup>1</sup>,李万隆<sup>1</sup>

1河南大学环境与规划学院,开封 475004

2 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

摘要:秦巴山地位于我国的南北过渡带,对我国生态地理格局产生重要影响。为了探索秦巴山地植被净第一性生产力(NPP, Net Primary Productivity)的时空格局及其气候响应的多样性和复杂性,为我国暖温带-亚热带界线的具体分布提供新的佐证,基于 2000—2015 年的 MOD17A3 的地表植被 NPP 数据和秦巴山地 93 个气象站点数据,从经度、纬度、海拔、坡向多个维度研究了秦巴山地地表植被 NPP 的分布及与气候因子的关系。结果表明:从 2000—2015 年,①秦巴山地中低山地区,自北向南随纬度降低,地表植被多年平均 NPP 呈现增加的趋势,体现了纬度地带性;年均 NPP 与温度的关系由负相关变为正相关,转折点出现在汉江;与降水的相关性减弱。②自西向东多年平均 NPP 值先增加后减少,秦岭一线地表植被年均 NPP 与温度由正相关变为负相关,与降水主要呈正相关,相关性先增加后减少。③随高度的增加,秦巴山地多年 NPP 值及增长率均呈现先增加后减少的趋势。④秦岭和大巴山多年平均 NPP 均呈现增加趋势,但是秦岭增长较大巴山更明显;2000m 以下,秦岭南坡增长率明显高于北坡,大巴山北坡增长率明显高于南坡;2000—3000m,秦岭南北坡差异较小,但是大巴山差异明显;中山地区(1000—2500m),秦岭年均 NPP 与气温呈负相关,而大巴山则呈现正相关或弱相关;秦岭地区年均 NPP 与降水的相关性整体强于大巴山地区。这就意味着全球变暖、气温升高对秦岭植被尤其是中低山地区的植被产生不利影响,但是对大巴山则有利,而前者植被生长主要与降水增加有关。这也说明了基于汉江为界的秦岭和大巴山无论是地表植被 NPP 的均值还是其南北坡差异以及对气候因子的响应呈现了明显的差异,而汉江作为中山地区植被 NPP 与气温相关性由正相关性到负相关的转折点,与降水的关系由弱相关到正相关的转折点,更合适作为南北分界线。

关键词:秦巴山地; 植被净第一生产力; 气候变化; 南北分界线

# Assessing the dividing line between warm temperate and subtropical zones based on the zonality discussion on multi-dimensional response of Net Primary Productivity to climate change in the Qinling-Daba Mountains

ZHAO Fang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiuyang<sup>1</sup>, LIU Siyuan<sup>1</sup>, WANG Zengyan<sup>1,2,\*</sup>, WANG Lihuan<sup>1</sup>, GU Haoting<sup>1</sup>, LI Wanlong<sup>1</sup>

1 College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions (Henan University), Ministry of Education, Kaifeng 475004, China

Abstract: Situated in the north-south transition zones and being part of the division between the Yangtze River and the

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41601091);中国南北过渡带综合科学考察项目(2017FY100900);河南大学地理学优势学科建设经费 收稿日期:2019-11-25; 网络出版日期:2020-11-19

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

Yellow River, the Qinling-Daba Mountains (QDM) play a key role in affecting the distribution of ecological and geographic patterns in China. The Net Primary Productivity (NPP) in forest ecosystem is being affected by changing climate from regional to global scale. To explore the spatial-temporal distribution patterns of NPP and assess the effect of temperature and precipitation on NPP in the QDM, as well as to provide new proof about the detailed locations of the dividing line between warm temperate and subtropical zones in China, historical NPP data of MOD17A3 and the temperature and precipitation data at 93 weather stations surrounding the QDM from 2000 to 2015 were acquired, and then kriging method, pearson correlation and topographic factor analysis were applied for developing spatial map of stations based on temperature and precipitation and assessing the effects of temperature and precipitation on NPP at different dimensions, including the latitudinal, longitudinal altitudinal gradients and aspect, etc. The results indicate that: ① as the latitudes decrease from north to south, an increasing trend of the multi-year (2000 to 2015) averaged NPP is observed within the homogeneous lowmiddle altitude zones in the QDM, which reflects the latitudinal zonality of NPP distribution. Correlation between annual vegetation NPP and precipitation tends to decrease and correlation between annual vegetation NPP and air temperature changes from negative to positive with the turning point at the Han Jiang river valley from north to south, which implies that Han Jiang could be the important dividing line between the Qinling and Daba Mountains. 2) From west to east as the longitudes increase, the multi-year (2000 to 2015) averaged NPP increases first and then decrease, correlation between annual vegetation NPP and air temperature is first positive and then nagative in the Qinling Mountains where the relationship between annual vegetation NPP and precipitation is positive. 3 With the increase of altitude, the multi-year (2000 to 2015) averaged NPP and its change rate increase first and then decrease in the QDM. ④ From different aspects, variation and response of annual vegetation NPP to temperature and precipitation differ greatly between the northern and southern slopes in the OMD. Below an elevation of 2000 m, the annual change rate of NPP is obviously higher in the southern slope than in the northern slope in the Qinling Mountains, whereas it is vice versa in case of the Daba Mountains. At the elevation of 2000-3000 m, the difference in the change rate of average annual vegetation NPP between the northern and southern slopes is smaller in the Qinling Mountains than that in the Daba Mountains. Correlation between annual vegetation NPP and temperature is negative in the mid-altitude zone from 1000 to 2500 m in the Qinling Mountains, while the positive or weak correlations are observed in the Daba Mountains, and correlation of annual vegetation NPP with precipitation is much stronger in the Qinling Mountains than that in the Daba Mountains. It implies that global warming has negative effect on vegetation growth in the Qinling Mountains, especially at the low-middle elevation whereas it is vice versa for the Daba Mountains. On the contrary, wetter climate contributes more to vegetation growth in the Qinling Mountains than in the Daba Mountains. Han Jiang river valley, as the dividing line between the Qinling Mountains and the Daba Mountains, is a turning point of the relationship between annual vegetation NPP and temperature from positive to negative, and a tipping point between annual vegetation NPP and precipitation from weak to significantly positive from south to north at middle altitudes in the QDM. Consequently, it is more suitable to be applied in determining north-south dividing line. Our finding will help to understand productivity in these complex QDM areas and thereby contribute to sustainable forest management and policy making in the QDM.

Key Words: the Qinling-Daba Mountains; net primary productivity; climate change; north-south dividing line

秦岭-大巴山(秦巴山地)地处我国中部,承接青藏高原与东部平原,连接长江流域与黄河流域,是我国的 南北过渡带。作为连接中国东西部的唯一一条大尺度生态廊道,秦巴山地影响我国生态地理格局、生物区系 演化、自然资源分布<sup>[1]</sup>。受地理位置、山系分布等综合作用,秦巴山地形成了复杂多样且具有过渡性质的植 被体系和气候类型<sup>[2-4]</sup>,导致植被对气候变化响应的复杂性。

植被净第一性生产力(Net Primary Productivity, NPP),是在单位面积单位时间上绿色植被固定的总能量

与自身呼吸消耗掉的有机物之差,反映了自然环境条件下植被群落的生产能力<sup>[5-6]</sup>。研究发现,秦巴山地地 表 NPP 分布及气候响应随经度、纬度等的变化在不同地段呈现一定的规律性<sup>[7-8]</sup>,可表征秦巴山地复杂的生 态地理格局。秦岭山地气候和植被区系由南向北发生了明显的变化,气候由亚热带向暖温带过渡,地带性植 被从常绿阔叶林逐渐转变为落叶阔叶林<sup>[9-13]</sup>,而地表植被 NPP 呈现减少的趋势,其中南段大巴山区雨水丰 沛、气候适宜,为 NPP 高值区<sup>[14]</sup>。秦巴山地植被 NPP 数值呈现出西高东低的分布,年际变化以上升趋势为 主,且大部分地区在波动中表现出较为显著的增长趋势<sup>[15-17]</sup>。伏牛山 NPP 东部数值较小,中西部数值较大, 随时间推移数值增大<sup>[18]</sup>。秦巴山地 NPP 及气候响应随纬度、经度、高度、坡向等多种分异因素的变化呈现的 规律性也叫做多维地带性,体现了秦巴山地复杂的地域分异,是造成我国南北分界线位置存在争议,比如秦岭 主脊<sup>[10,19]</sup>、秦岭南坡<sup>[9,13]</sup>和秦岭北坡<sup>[11,20-21]</sup>的因素之一。

但是现有关于秦巴山地 NPP 及其气候响应的研究多集中在单一山体、单一流域,如蒋冲等对陕南汉江流 域及大巴山植被 NPP 变化的分析<sup>[14]</sup>、李敏等对神农架林区生态系统 NPP 的估算<sup>[22]</sup>及陈志超等对伏牛山两 侧 NPP 的分析<sup>[18]</sup>等,冠名秦巴山地的文献几乎都局限于陕西境内的秦巴山地<sup>[23-24]</sup>,极少将其作为整体进行 分析,导致对秦巴山地植被 NPP 的变化认识不够全面。实际上秦巴山地是一个完整的、由南向北过渡的地域 单元,其南部是亚热带,北部是暖温带,植被具有天然的南北过渡性质,研究秦巴山地 NPP 时空分异及其对气 候变化响应的多维地带性,对探索秦巴山地复杂的生态地理格局、评价中国陆地生态系统的复杂性和多样性 具有重要的意义<sup>[25-26]</sup>,也可为解决亚热带与暖温带分界线具体位置在哪里的问题提供新的研究思路。

近年来,随着现代对地观测、GIS 和遥感技术的发展,秦巴山地的生物地理研究由过去的样点和样区的调查逐渐发展到使用遥感技术对整个区域生物生产力和生物量的调查。基于此,本文使用 2000—2015 年秦巴山地地表植被 NPP 遥感数据和气象站点数据,从经度、纬度、高度和坡向等角度分析秦巴山地地表植被 NPP 及其对气候变化的响应的多维地带性,深入讨论我国南北过渡地带的复杂生态地理格局,为暖温带-亚热带界线的界定提供新的佐证。

#### 1 数据和方法

#### 1.1 数据及处理

#### 1.1.1 DEM 数据

本研究采用的数字高程模型(DEM)数据(来源于 https://earthexplorer.usgs.gov/)空间分辨率为 30m,分 块下载获取秦巴山地不同区域数据,将原始 DEM 拼接为一幅完整的秦巴山地高程数据,如图 1 所示。

#### 1.1.2 NPP 数据

研究采用的 2000—2015 年植被 NPP 数据源于美国 NASA EOS/MODIS 的 MOD17A3 产品(http://www.nasa.gov/)。该数据基于的 BIOME-BGC 生态模型,将卫星获得的土地覆盖、部分光合有效辐射(FPAR)和叶 面积指数(LAI)数据作为输入的地表植被信息,模拟获得的全球年 NPP 数据。该数据与同期 MODIS NDVI 数 据的对比分析显示,二者整体变化趋势一致,且相关性较强,证明该 NPP 数据和 NDVI 数据一样具有反映区 域内植被覆盖状况和生长情况的能力。其时间分辨率为年,空间分辨率为 1km×1km<sup>[27]</sup>。该数据已在不同区 域 NPP 估算、植被长势、环境评价等研究中得到验证和广泛应用<sup>[28-30]</sup>。在 MRT 软件的支持下,将 MOD17A3 数据进行格式转换(HDF 转化为 TIFF)、重投影、裁剪、比例换算等,得到单位为 gC/m<sup>2</sup>的年均 NPP 数据。不 过需要说明的是该 NPP 模拟数据只包括植物地上生产力部分而未包含地下生产力部分,未来仍需要进一步 修订。

#### 1.1.3 气象站点数据

气象数据来自国家气象信息中心(http://data.cma.cn/)的秦巴山地 1951—2017 年 118 个气象站点每日 气温和降水数据,经过月均计算得到月均温、月均降水数据,舍去数据缺测的部分站点,实际使用 93 个气象站 点数据,气象站点主要分布在甘肃、陕西、河南、四川、湖北、重庆 6 个省市(如图 1)。



图 1 秦巴山地 DEM 和气象站点的分布



#### 1.2 方法

1.2.1 相关分析

相关性分析方法可以直观反映要素间的相关关系。将 NPP 与气温和降水进行相关分析,根据每个像元的 NPP 值与气象因子的相关系数 R<sub>x</sub>确定 NPP 与气温和降水之间的关系:

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

式中, $R_{xy}$ 为变量x,y之间的相关系数; $x_i,y_i$ 分别为第i年的 NPP 值和气象数据(气温、降水); $\bar{x},\bar{y}$ 分别表示年均 NPP 及相应的年均气象数据;i为年变量, $i=1, 2, 3, \cdots 16$ ;n=16为监测年数。

#### 1.2.2 趋势分析

通过一定时间段内(2000—2015年)NPP 像元的数值变化,建立基于像元的一元线性回归方程,NPP 年 际变化速率可以通过该方程的趋势线斜率 K 来确定,其中:

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

*K* 为趋势线斜率,即 NPP 的年际变化速率,单位为 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; *y*<sub>i</sub>表示第*i* 年的 NPP 值; *i*=1, 2, 3, …, 16; *n*=16 为监测年数。当 *K*>0 时,表示秦巴山地 NPP 呈增加趋势,反之则呈减少趋势。

#### 1.2.3 地形因子分析

为了展示秦巴山地 NPP 与经纬度和地形的关系,本研究选取 33.95°N(经过迭山、太白山、蟒岭、伏牛山)、32.67°N(经过雪宝顶、米仓山、十堰市等地区),107.81°E(经过米仓山、汉江、太白山)和 110.53°E(经过

神农架、武当山、汉江等地区)4条剖面线(如图1)对应像元点的 DEM 数据和 NPP 数据,制作出秦巴山地 NPP 典型剖面线分布图,反映 NPP 随地形和经纬度的变化。

#### 1.2.4 空间统计分析

对气象站点数据进行 Kriging 空间插值,获得与植被 NPP 栅格大小一致(1km×1km)、投影方式(D\_WGS\_ 1984)相同的气象栅格数据,与秦巴山地 NPP 进行相关分析研究秦巴山地 2000—2015 年 NPP 变化与气温、降水的关系。

为了分析 NPP 与海拔关系,将秦巴山地 DEM 数据基于不同海拔进行重分类,分为 0—500、500—1000、1000—1500、1500—2000、2000—2500、2500—3000、3000—3500、>3500m 共 8 个级别,统计各分段 NPP 均值,研究 NPP 沿海拔梯度的变化。

为了分析秦巴山地 NPP 及气候响应的地域分异,基于秦岭、大巴山主山脊线和主要河流(嘉陵江、汉江) 的位置,将秦巴山地划分为秦岭南坡、秦岭北坡、大巴山南坡、大巴山北坡、西秦岭,分区统计秦巴山地 NPP 及 与气温和降水的相关在秦岭南坡、秦岭北坡,大巴山南坡和大巴山北坡的变化(由于西秦岭复杂的地理结构, 本文不做讨论),为南北分界线的确定提供佐证。

### 2 结果与分析

# 2.1 秦巴山地地表植被 NPP 时空格局

根据 2000—2015 年多年年均 NPP 分布图(图 2), 秦巴山地 NPP 值存在明显的区域差异,总体表现为南 高北低,中部高,东西低的特征。其中在岷山以东 104° E—105°E之间达到最高值(约 700—900 gC/m<sup>2</sup>),在秦 巴山地中部 105°E—107°E 之间 NPP 值出现高值集聚 区,而在秦岭山脉以东的华山、崤山、伏牛山、熊耳山等 地区 NPP 值仅为 100—300gC/m<sup>2</sup>,以及西部的羊拱山、 岷山、迭山等地区 NPP 值也较低(约 200—400gC/m<sup>2</sup>)。 时间尺度上,秦巴山地 NPP 值随时间变化如表 1 所示, 2000—2015 年以轻微变动、基本不变及中度增长为主, 占比达 92.5%。NPP 值中度减少和严重减少的区域主 要分布在东部的豫西山地、神农架、武当山地区,而 NPP 值增加区域主要在秦岭山脉的中段地区。





NPP: 净初级生产力 Net primary productivity

表 1	秦巴山地	NPP 年变化率	分级统计

Tuble 1 Subabas of change face of a strage annual segundon first subaba on his summon degree in the seming basa mountains								
NPP 变化率 Change rate of annual NPP/(g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	变化程度 Variation degree	数量占比 Proportion	NPP 变化率 Change rate of annual NPP/(g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	变化程度 Variation degree	数量占比 Proportion			
-10030	严重减少	0.3%	5—15	轻微增加	32.9%			
-30	中度减少	2.2%	15—30	中度增加	27.8%			
-155	轻微减少	7.2%	30—100	明显增加	5.0%			
-5-5	基本不变	24.6%						

Table 1 Statistics of change rate of average annual vegetation NPP based on its variation degree in the Qinling-Daba Mountains

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity

# 2.2 秦巴山地地表 NPP 及其对气候响应的纬向分异

为了更加突出表现 NPP 及其对气候响应的纬向分异,本文选取两条穿越秦岭大巴山主要山脊线的典型 经线 107.81°E(西线)和 110.53°E(东线),分析秦巴山地 NPP 的纬向变化,结果如图 3 所示, NPP 总的趋势

为:从北向南,随着纬度的降低而逐渐增加。具体来说,西线从 34.13°N 降低到 31.46°N, NPP 值由 442gC/m<sup>2</sup> 增加到 647gC/m<sup>2</sup>;东线从 34.51°N 降低到 31.03°N, NPP 值由 220gC/m<sup>2</sup>增加到 576gC/m<sup>2</sup>。



图 3 秦巴山地 107.81°E、110.53°E 剖面线 NPP 变化图 Fig.3 Variation of average annual vegetation NPP along 107.81°E and 110.53°E from north to south

沿东西两条经线分别提取 NPP 与气温、降水的相关系数,其纬向变化如图 4、图 5 所示,西线(107.81°E) 从北向南,随着纬度的降低,NPP 与降水的相关性逐渐减弱,NPP 与气温的关系由负相关逐渐转变为正相关, 分界点位于汉江地区,这与汉江两侧山地垂直带结构、类型和分布模式的变化有关<sup>[31]</sup>。东线(110.53°E)NPP 与气温和降水分别呈现弱负相关和正相关,但是在神农架南坡 NPP 与降水的关系突变为负相关,气温突变为 正相关关系。



图 4 秦巴山地 107.81°E 降水、气温与年均 NPP 的相关系数变化图

Fig.4 Variation of correlation coefficient between annual vegetation NPP and precipitation and temperature along 107.81°E from north to south

2.3 秦巴山地 NPP 及对其气候响应的经向分异

为了突出秦巴山地 NPP 与气候响应的经向分异,本文对秦巴山地沿 33.96°N 和 32.67°N 两条纬线的年均 NPP 与经度的关系进行了研究,由图 6 可以看出,随着经度的升高,NPP 值先增加后减少,在白水江处 (105°E)达到峰值,最低值则出现在极高山区、秦岭和大巴山东部。根据两条剖面线上 NPP 与气温、降水的 相关系数分布图,在大巴山一线(图 7),除大巴山的西部以及东部的十堰市部分地区,NPP 与降水呈正相关, 与气温相关性较弱,其中 85.0%地区的相关系数都在 0.2 以下。秦岭一线(图 8)除伏牛山以东和西秦岭的部 分地区以外,NPP 与降水在大部分地区(78.26%)呈正相关,相关性先增加后减少,在蟒岭附近达到峰值 (0.49)。而 NPP 与气温的相关系数随着经度升高由正相关逐渐变为负相关,转折点位于两当县。

#### 2.4 秦巴山地 NPP 及其对气候响应的高程分异

对 NPP 值按不同海拔进行重分类,发现各海拔分区的年均 NPP 值随高程的增加,呈现先增加后降低的趋

相关系数 ----- 趋势线 地形剖面 2500 2500 1.0 1.0 降水与NPP 相关系数 Correlation coefficient 相关系数 Correlation coefficient 气温与NPP 2000 2000 0.5海拔 Altitude/m 梅拔 Altitude/m 1500 1500 1000 1000 500 500 0.0 0 0 0 31.29°N 31.29°N 34.51° 33.70° 32.90 32.099 34.51° 33.70° 32.90 32.09°



Fig.5 Variation of correlation coefficient between average vegetation NPP and precipitation and temperature along 110.53°E from north to south









Fig.7 Variation of correlation coefficient between annual vegetation NPP and precipitation and temperature along 32.67°N from west to east

势,NPP 均值从 453.96gC/m<sup>2</sup>增加到海拔 3000—3500m 处达到最大值,为 539.87gC/m<sup>2</sup>,而后开始逐渐降低,至海 拔 3500—5528m 处达到最小值,为 435.32gC/m<sup>2</sup>。将秦巴山地各海拔 NPP 年均变化率(K)值进行统计分析,发现 NPP 值在各海拔均呈升高趋势,并且随着海拔升高 K 值先升高后降低,在海拔 0—1500m 内 K 值为 1.87gC m<sup>-2</sup>

a<sup>-1</sup>—3.01gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,在1500—2000m 达到最大值(5.07gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),2500m 以上K值降低至1.50—2.62gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。

图 8 秦巴山地 NPP 与降水和气温的相关系数沿 33.96°N 的变化

Fig.8 Variation of correlation coefficient between annual vegetation NPP and precipitation and temperature along 33.96°N from west to east

秦巴山地 NPP 均值和变化率随海拔变化统计

#### 2.5 秦巴山地 NPP 及其对气候响应的坡向分异

对秦岭南北坡和大巴山南北坡年均 NPP 值随高度分布的统计结果表明,在不同坡向 NPP 值随高程的变 化存在明显的差异,如图 9 所示。随高度的增加,大巴山年均 NPP 值呈现先增加后降低的趋势。比如,大巴山南坡年均 NPP 值先由 500m 以下的 530.72gC/m<sup>2</sup>增加到 500—1000m 的 568.70gC/m<sup>2</sup>,再降低至 2000m 以上的 450—460gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;大巴山北坡先由 470.20gC/m<sup>2</sup>增加至 503.47gC/m<sup>2</sup>再降低至 426.33gC/m<sup>2</sup>;秦岭则呈现 更复杂趋势。秦岭 NPP 先由 0—500m 的 373.96—421.71gC/m<sup>2</sup>降低至 1000—1500m 的 307.84—384.33gC/m<sup>2</sup>,再增加到 437.44—478.01gC/m<sup>2</sup>,再降低至 274.27—422.72gC/m<sup>2</sup>。

在海拔 2000m 以下,从大巴山南坡到秦岭北坡,NPP 呈现递减趋势,由 494.59—568.70gC/m<sup>2</sup>降低至 373.96—307.84gC/m<sup>2</sup>;2000m 以上,秦岭与大巴山之间的 NPP 值差异明显减少,比如 2000—2500m,大巴山南 北坡分别为 454.75、429.32gC/m<sup>2</sup>,秦岭南坡和北坡分别为 444.91、379.09gC/m<sup>2</sup>,各坡向之间 NPP 值较为 相近。

为了突出秦巴山地 NPP 值的坡向分异,将各坡向 NPP 变化率均值进行统计,结果如图 9 所示,2000—2015 年秦巴山地各坡向 NPP 值均呈增加趋势但存在明显的差异,大巴山南北坡增长率分别为 2.63、1.72gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,秦岭南北坡增长率分别为 3.45gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、2.03gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,秦岭增长较大巴山更为明显。

在海拔 2000m 以下,大巴山北坡增长率明显高于南坡,其中北坡为 1.29—3.34gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,南坡为 0.12— 2.29gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;秦岭南坡增长率明显高于北坡,其中南坡为 2.58—6.59gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,北坡为 1.34—6.32gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。在海拔 2000—3000m,大巴山南北坡差异明显,南坡为 1.59—1.85gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,北坡为 2.66—3.34gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;但秦岭南北坡的差异较小,南坡为 6.02—6.59gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,北坡为 6.32—6.45gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。



Table 2 Statistics of average annual vegetation NPP and its change rate at different altitudes								
海拔 Altitude/m	NPP 均值 Mean NPP/ (gC/m <sup>2</sup> )	NPP 变化率 Change rate of NPP/(gC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	海拔 Altitude/m	NPP 均值 Mean NPP/ (gC/m <sup>2</sup> )	NPP 变化率 Change rate of NPP/(gC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>			
0—500	453.96	1.87	2000—2500	490.52	4.49			
500—1000	473.83	2.62	2500—3000	533.52	2.62			
1000—1500	441.46	3.01	3000—3500	539.87	1.50			
1500—2000	450.91	5.07	3500—5528	435.32	1.75			





Fig.9 Statistics of change rate of average annual vegetation NPP on different slopes in the Daba Mountains and Qinling Mountains





Fig.10 Statistics of correlation coefficient between annual vegetation NPP and temperature and precipitation during 2000—2015 based on different slopes and altitudes

http://www.ecologica.cn

对 NPP 与气候因子的相关系数按海拔进行分坡向统计得到图 10,结果表明,1000m 以下,大巴山地表 NPP 和气温呈现正相关;在 1000—2500m 范围内,秦岭地表 NPP 值与气温呈现负相关,大巴山地区 NPP 值和 气温相关性较弱。秦岭和大巴山地表 NPP 与降水均呈正相关的关系,且秦岭地区 NPP 值与降水的相关性整体强于大巴山地区。

3 讨论

3.1 秦巴山地地表 NPP 及对气候变化响应的多维地带性

秦巴山地地表 NPP 时空分布及对气候变化的响应在纬向、经向、海拔和坡向等方面具有多维地带性。 2000m 以下,由南向北,从大巴山南坡到秦岭北坡地表 NPP 呈现逐渐递减规律,存在明显的纬度地带性。这 主要是由于由南向北秦巴山地基带由大巴山南坡的常绿阔叶林,逐渐过渡到大巴山北坡的常绿—落叶阔叶混 交林、秦岭北坡的落叶阔叶林<sup>[32-33]</sup>,生物量与叶面积指数的关系在一定范围内成比例正相关,常绿林 NPP 值 一般大于落叶林 NPP 值<sup>[34]</sup>。自西向东随经度的增加,NPP 值先增加后减少,在白水江自然保护区达到顶峰, 呈现经度地带性规律。这与白水江自然保护区的位置有关,这一区域位于青藏高原高寒区、中国东部季风湿 润区和西北干旱区三大地理分区的过渡带,既具有亚热带特征带—亚热带常绿阔叶林,又具有青藏高原东缘 成分如岷江冷杉为主的暗针叶林及高山灌丛草甸<sup>[31,35]</sup>,加上自然历史的变迁,该地区物种极为丰富,使得秦 巴山地白水江自然保护区是山地垂直带分带最多的地区。

随海拔增加,秦巴山地整体 NPP 值和变化率整体呈先增大后减少的规律,呈现垂直地带性。这与植被垂 直分异有关。秦巴山地 1000m 以下的地区大多被开垦为农耕植被带,植被 NPP 较少,1000—3500m 为山地森 林带,植被 NPP 增多,到 3500m 以上以高山灌丛、矮曲林和草甸为主<sup>[31]</sup>,植被稀少,植被 NPP 减少。2000— 2015 年,秦巴山地各坡向 NPP 均呈增加趋势,但是秦岭增长较大巴山更为明显。2000m 以下,秦岭南坡增长 率明显高于北坡,但是大巴山北坡增长率明显高于南坡,2000—3000m,秦岭南北坡差异较小,但是大巴山南 北坡差异明显,这与赵芳等<sup>[31]</sup>提出的大巴山比秦岭对秦巴山地植被的地带性分异的影响更强的结论一致。 3.2 暖温带-亚热带界线问题

以汉江为界,秦岭和大巴山无论是 NPP 均值分布、南北坡对比,还是对气候因子的响应都呈现明显的差异。中山地区(1000—2500m),秦岭 NPP 与气温呈负相关,而大巴山则呈现正相关或弱相关;秦岭地区 NPP 与降水的相关性整体强于大巴山地区。这与先前蒋冲<sup>[14]</sup>、李敏<sup>[22]</sup>、陈志超<sup>[18]</sup>等作者在陕南、神农架、伏牛山等地的研究结果对应。汉江作为中山地区 NPP 与气温相关性由正相关性到负相关的转折点,降水由弱相关到正相关的转折点,是秦巴山地极为重要的界线,即暖温带-亚热带界线。这就意味着一方面全球变暖将对中山地区秦岭植被产生不利影响,而对大巴山有利,另一方面降水的增多则更有助于秦岭植被的生长。这也暗示了降水是秦岭植被的限制性因子,降水对秦岭的影响强于温度,这与方精云等<sup>[36]</sup>提出的秦岭是因为降水的不足而形成的假定的南北分界线的结果一致。这也使得汉江成为气温影响的重要界限,汉江以南气温变暖有利于植被生长,汉江以北则相反,而降水的增多则对汉江以北植被生长起到较大的促进作用。

之前的研究者多使用气候和植被来界定这一界线问题,而本文则为其提供了一种新的方法、新的佐证。 由于地带性是大尺度问题,先前的研究常使用大尺度指标,比如水平地带的植被和气候的分异来界定,而本文 将地表植被 NPP 值引入秦巴山地气候响应研究,从多维角度分析 NPP 的时空格局与气候变化的关系,揭示 秦巴山地地理和生态的过渡性和复杂性,为暖温带-亚热带分界线的确定提供了一种新的方法和新的论据。 未来还需要结合南北过渡地带不同尺度植被、气候和土壤等分异进行系统的研究。

4 结论

本研究基于 GIS 与遥感技术,利用 MODIS 遥感影像及气象站点数据,对秦巴山地 2000—2015 年 NPP 时 空变化进行动态监测,利用气温、降水数据对秦巴山区 NPP 的时空特征进行分析,以此研究秦巴山区 NPP 对

气候变化的多维响应,主要研究结论如下:

(1)秦巴山地地表 NPP 存在明显区域差异,整体表现为南高北低,中部高东西低。2000—2015 年秦巴山 地 NPP 在秦岭山脉中段的大部分地区增加明显,而在豫西山地、神农架、武当山地区 NPP 存在一定程度的 减少。

(2)自南向北随着纬度的增加,秦巴山地地表 NPP 值呈递减趋势,其中 2000m 以下的中低山地区表现更为显著,呈现纬度地带性。地表 NPP 与温度的关系由负相关变为正相关,转折点出现在汉江。自西向东随经度的增加,NPP 值先增加后减少,秦岭一线地表植被 NPP 与温度由正相关变为负相关,与降水主要呈正相关,相关性先增加后减少。

(3)随海拔增加,秦巴山地 NPP 值和变化率均呈先增大后减少的趋势,但秦岭和大巴山不同坡向地表 NPP 时空分布及对气候变化的响应呈现明显的差异。2000—2015 年,秦巴山地各坡向 NPP 均呈增加趋势, 但是秦岭增长较大巴山更为明显。2000m 以下,秦岭南坡增长率明显高于北坡,大巴山北坡增长率明显高于 南坡;2000—3000m,秦岭南北坡差异较小,但是大巴山差异明显。中山地区(1000—2500m),秦岭 NPP 与气 温呈负相关,而大巴山则呈现正相关或弱相关;秦岭地区 NPP 与降水的相关性整体强于大巴山地区。

#### 参考文献(References):

- [1] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. 地理科学进展, 2019, 38(3): 305-311.
- [2] 傅志军, 张行勇, 刘顺义, 陶铭. 秦岭植物区系和植被研究概述. 西北植物学报, 1996, 16(5): 93-106.
- [3] 张秦伟. 秦岭南坡植被的区系地理成分分析——以湑水流域为例. 地理研究, 1992, 11(2): 83-92.
- [4] 莫申国. GIS 支持下的秦岭植被景观梯度分析. 环境科学研究, 2008, 21(2): 105-108.
- [5] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300.
- [6] 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.
- [7] 卢玲, 李新, Veroustraete F. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. 生态学报, 2005, 25(5): 1026-1032.
- [8] 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.生态学报,2019,39(20):7621-7631.
- [9] 张学忠, 张志英. 从秦岭南北坡常绿阔叶木本植物的分布谈划分亚热带的北界线问题. 地理学报, 1979, 46(4): 342-352.
- [10] 竺可桢. 中国的亚热带. 科学通报, 1958, (17): 524-526.
- [11] 侯学煜. 试论历次中国植被分区方案中所存在的争论性问题. 植物生态学与地植物学丛刊, 1963, 1(S1): 1-23.
- [12] 应俊生. 秦岭植物区系的性质、特点和起源. 植物分类学报, 1994, 32(5): 389-410.
- [13] 张养才, 谭凯炎. 中国亚热带北界及其过渡带. 地理研究, 1991, 10(2): 85-91.
- [14] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 气候变化对陕南汉江流域植被净初级生产力的影响. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 51-57.
- [15] 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.
- [16] 王钊,李登科. 2000-2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [17] 袁博,白红英,章杰,马新萍.秦岭山地植被净初级生产力及对气候变化的响应.植物研究,2013,33(2):225-231.
- [18] 陈志超,郝成元,刘昌华,丁效东.伏牛山阻隔作用下水热因子、土地覆被与 NPP 的时空特征. 生态环境学报, 2013, 22(5): 761-766.
- [19] 刘华训. 我国山地植被的垂直分布规律. 地理学报, 1981, 48(3): 267-279.
- [20] 廓生舜,裴元蓉,王兴華,洪錫璋.河南地植物带,北亚热带向南暖温带过渡界线的探讨.河南师范大学学报:自然科学版,1961,(2): 1-10.
- [21] 侯学煜. 论中国植被分区的原则、依据和系统单位. 植物生态学与地植物学丛刊, 1964, 2(2): 153-179.
- [22] 李敏,姚顽强,任小丽,张黎,徐文婷,顾峰雪,何洪林. 1981—2015 年神农架林区森林生态系统净初级生产力估算.环境科学研究, 2019, 32(5):749-757.
- [23] 李晶,孙根年,任志远.陕西秦巴山区植被第一性生产物质量与价值量测评研究.生态学报,2002,22(12):2254-2259.
- [24] 梁瑞,任志远.陕南地区植被净第一性生产力时空动态演变.水土保持通报,2014,34(2):86-90,94-94.
- [25] 周广胜,张新时.自然植被净第一性生产力模型初探.植物生态学报,1995,19(3):193-200.
- [26] 赵俊芳, 延晓冬, 朱玉洁. 陆地植被净初级生产力研究进展. 中国沙漠, 2007, 27(5): 780-786.

#### http://www.ecologica.cn

- [27] 刘玉红,张筠,张春华,肖蓓,刘璐,曹煜. 2000—2015 年山东省植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1464-1471.
- [28] Zhao M S, Running S W, Nemani R R. Sensitivity of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2006, 111(G1): G01002.
- [29] Peng D L, Zhang B, Wu C Y, Huete A R, Gonsamo A, Lei L P, Ponce-Campos G E, Liu X J, Wu Y H. Country-level net primary production distribution and response to drought and land cover change. Science of the Total Environment, 2017, 574: 65-77.
- [30] Jones M O, Running S W, Kimball J S, Robinson N P, Allred B W. Terrestrial primary productivity indicators for inclusion in the National Climate Indicators System. Climatic Change, 2018. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2155-9
- [31] 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空间分异与暖温带——亚热带界线问题.地理学报,2019, 74(5):889-901.
- [32] 邝生舜. 河南植被水平地带性的分布规律. 武汉植物学研究, 1991, 9(2): 153-160.
- [33] 宋永昌. 中国东部森林植被带划分之我见. 植物学报, 1999, 41(5): 541-552.
- [34] 罗天祥.中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型[D].北京:中国科学院研究生院(国家计划委员会自然资源综合考察委员会),1996.
- [35] 孙国钧, 冯虎元. 白水江自然保护区植被区系特征分析. 兰州大学学报, 1998, 34(2): 92-97.
- [36] 方精云. 我国森林植被带的生态气候学分析. 生态学报, 1991, 11(4): 377-387.