

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

王娟,卓静,何慧娟,董金芳

(陕西省农业遥感信息中心,陕西 西安 710014)

摘要:秦岭林地是我国南北气候分水岭同时也是陕西省重要林区,研究秦岭地区植被 NPP 变化有助于了解该区域植被生长状况及固碳能力。使用 MODIS17A3 数据及各环境因子数据,通过应用 GIS 及数学统计等方法,分析了秦岭林区植被 NPP 的时空变化格局及其与环境因子间关系。结果表明,秦岭林地植被 NPP 均值呈现西高东低的特征,2000—2013 年植被 NPP 均值在 $400\sim 600\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间;研究区内 NPP 年际变化上升趋势;在具有地理意义的区间上,200~1 500 m 的高程区间及 $2^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 坡度区间内植被 NPP 均值及总量较高,1 500 m 以上及 25° 以上区间植被 NPP 均值与总量均呈下降趋势;阔叶林及灌丛占植被类型的 60.36%,所占 NPP 总量达 $162.38\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$,粘土及粘壤土所占 NPP 总量达 $151.39\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$,所有植被类型及土壤类型 NPP 年际变化均呈上升趋势;NPP 与年均气温相关性较与年降雨量高,但 65.55% 的区域未通过显著性检验。

关键词:NPP;秦岭林地;时空格局;驱动因子

中图分类号:S718.556 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)05-0238-08

Changes of Vegetation Net Primary Productivity and Its Driving Factors from 2000 to 2013 in Qinling Mountainous Area

WANG Juan,ZHUO Jing,HE Hui-juan,DONG Jin-fang

(Remote Sensing Information Center for Agriculture in Shaanxi Province,Xi'an ,Shaanxi 710014,China)

Abstract: Qinling mountainous area is the climate watershed in north and south China,also an important forest region in Shaanxi Province. Changes of vegetation net primary productivity (NPP) in Qinling mountainous area are very important to understand the regional vegetation growth and carbon sequestration ability. By using the data of MODIS17A3 and various environmental factors,and the methods of GIS and mathematical statistics,the spatial and temporal variations of vegetation NPP in Qinling forests and its relationship with environmental factors were investigated. The results indicated that: The mean value of NPP in Qinling mountainous area showed a trend of high in west and low in east,and the NPP ranged from 400 to $600\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in 2000—2013. NPP interannual variability showed a rising trend in the study area. The mean vegetation NPP and the total amount were higher in the altitudinal range of 200—1 500 m,and $2^{\circ}\sim 25^{\circ}$ slope range; while,the NPP displayed a downtrend in the range above 1 500 m and up 25° . Broad-leaved forest and scrub accounted for 60.36% of vegetation types,accounted for the total NPP was $162.38\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$; Clay and clay loam accounted for the total NPP was $151.39\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$; all the interannual variability of NPP in vegetation and soil types was on rising. The correlation between NPP and annual average temperature was higher than the annual rainfall,but 65.55% of the area did not pass the significance test.

Key words:NPP; Qinling Mountainous area; spatio-temporal pattern; drving factor

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指植物在单位时间和单位面积上所积累的有机干物质总量^[1],它不仅可以在自然环境条件下植被对 CO₂ 固定能力,同时也是判断生态系统健康状况和可持续发展的重要因素^[2]。开展区域尺度的生态系统 NPP 动态监测有着十分重要的意义,它有助于阐述全球气候变化对陆地植被影响的作用机理^[3],并与人类生活所需要的物质及生态环境保护、土地覆被变化、气候变化等其他重要问题均有着密切联系^[4-5]。随着遥感和计算机技术的发展深入到许多领域,广大学者利用遥感数据对 NPP 进行估算及分析。其中美国航天局(NASA)提供的 MOD17A3 数据产品已在全球不同区域对植被生长状况、生物量的估算、环境监测和全球变化等研究中得到验证和广泛应用^[6],国内外应用 MOD17A3 产品进行不同尺度的 NPP 时空变化特征的研究^[6-7]。国内学者应用 MOD17A3 数据对我国许多地区进行了较长时间序列的 NPP 时空特征分析,并对该数据进行了验证^[8-13]。在众多研究中植被 NPP 主要受植被本身特性、气候、土壤、地形条件及土地利用等环境因子的影响。不同区域中不同环境因子对植被 NPP 的影响存在很大差异。关于秦岭林区的 NPP 研究主要集中在分析时空变化特征及其与气候因子的关系或根据地形因子的变化进行分析,极少有较全面分析 NPP 与众多驱动因子的报道。

森林生态系统是自然生态系统中功能最完善的生态系统,他不仅能提供人类生存所必须的很多重要资源并且对生态环境的可持续发展起着至关重要的作用^[14],秦岭是我国最大的森林生态系统,并是重要的地理分界线及南北方气候的分水岭。秦岭林区地处我国暖温带和亚热带的生态过渡带,气候和地形地貌复杂多变^[15],特殊的地理位置及复杂多样的地貌地质类型和丰富的生物资源使其在众多科学领域具有极其特殊和重要的研究意义,同时秦岭地区丰富的植物资源使秦岭林区成为天然的氧吧,对缓解大气中 CO₂ 浓度及促进生态系统中碳循环过程起到了重要作用。因此,研究分析秦岭林地的植被净初级生产力及其驱动因素,有利于了解该区域植被 NPP 的分布格局及变化趋势并可全面了解该区域碳循环特征。

1 研究区背景与数据预处理

1.1 研究区概况

秦岭山势雄伟,由东向西逐渐升高,陕西境内岭脊海拔约 2 000 m,高峰都在 2 000~3 000 m,本研究区为陕西境内的秦岭主要林区,位于 32.8—

34.4°N、105.5°—111.1°E 之间,总面积约 6.68 万 km²,包括宁强、略阳、勉县、留坝、汉中、城固、洋县、佛坪、西乡、宁陕、石泉、汉阴、安康、镇安、旬阳、柞水、山阳、商洛、丹凤、商南、凤县、太白等 18 个县(市、区)的区域全境;以及宝鸡、岐山、周至、户县、长安、蓝田、华县、华阴、洛南等 11 个县(市、区)的部分地区。具体分布位置如图 1(a)所示。秦岭山脉位于中国大陆中部,西与祁连山、东昆仑、巴颜喀拉衔接,东延至大别山,以山地和盆地为主;秦岭林地天然林保护是陕西省退耕还林工程的一个重要组成部分,该区域是陕西省最大的天然林区,生物种类复杂多样,一年四季降雨偏多,年总降雨量在 700~800 mm 之间,日照较少,森林覆被主要以针叶林和草甸为主,是长江黄河两大水系的主要支流的发源地和主要水源涵养地。

1.2 数据来源与预处理

本研究所用的数据为美国蒙大拿大学 2000—2013 年的 NPP 数据(ftp://ftp.ntsg.umn.edu/),空间分辨率 1 km×1 km,该数据运用生物地球化学模式(Biome-BGC)估算出全球陆地植被年净初级生产力。

植被类型数据及地形数据应用中科院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供的 1:100 万全国植被类型空间分布数据集。

土壤类型数据应用中国科学院计算机网络信息中心科学数据中心提供的基于世界土壤数据库的中国土壤数据集(V1.1),其空间分辨率为 1 km。

温度、降水量、日照时数据来自陕西省气象局,包括 29 个周边的气象站点。

数据预处理:NPP 数据利用 MRT 工具进行镶嵌、格式转换和重投影;植被类型数据及地形数据均重采样为 1 km,且利用地形数据在 arcgis 中应用空间分析模块计算得到坡度数据;温度、降雨量数据在 arcgis 软件中利用 IDW 插值得到相应栅格图层,并将其转换成与 NPP 相同的投影与分辨率;平均气温应用气象站点海拔高度基础上进行订正后的平均气温。

2 研究方法

2.1 NPP 年际变化率计算

应用一元线性回归分析法对陕西省 NPP 时间趋势进行分析,单个像元多年回归方程中趋势线斜率即为年际变化率,其计算公式为^[16]:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \tag{1}$$

式中, β 为年际变化率, n 为监测时间段的年数, $n =$

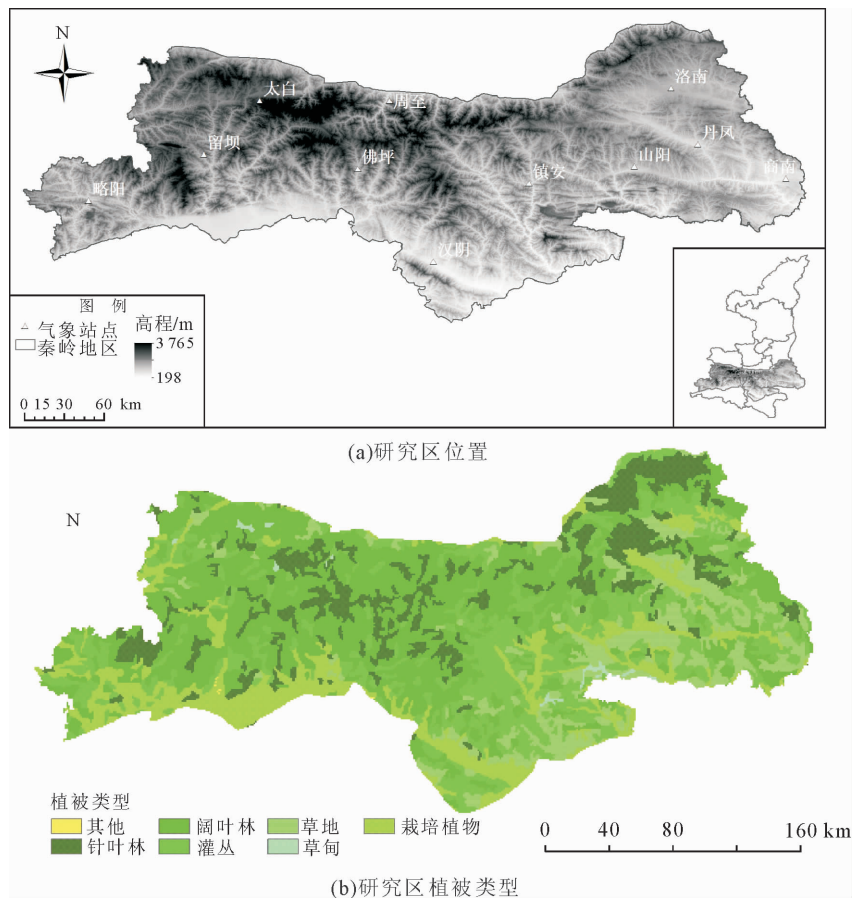


图 1 研究区位置及植被类型

Fig. 1 Location and vegetation cover types of the study area

14, x_i 为第 i 年的植被 NPP, β 值大小反映了 NPP 年际变化趋势线的斜率, β 为负表示 NPP 下降, 反之则表示上升。

2.2 NPP 与气候因子的相关性计算

采用逐像元空间分析法, 分析 NPP 对降水量、平均气温及日照时数的相关系数, 本文使用 (pearson 系数法) 公式为^[16]:

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

式中, R_{xy} 为 x 、 y 变量的相关系数, x_i 为第 i 年 NPP, y_i 为第 i 年的降水量、平均气温或日照时数, \bar{x} 为 NPP 多年平均值, \bar{y} 为多年降水量、平均温度值或年总日照时数, n 为监测年份。

根据相关系数表, 显著性检验结果分为如下等级: $P > 0.05$ 未通过显著性检验, 不显著; $P \leq 0.05$ 、 $P \leq 0.01$ 时, 分别为显著与极显著。

2.3 NPP 与地形因子的相关性计算

通过相应划分依据^[18-22]对秦岭林地海拔及坡度进行区间划分, 可宏观的了解不同地理意义区间范围内 NPP 的变化情况。根据表 1 所划分的高程和

坡度, 统计计算各高程和坡度等级下植被 NPP 均值和总量及占面积百分比。

3 结果与分析

3.1 秦岭林区植被 NPP 时空变化特征

秦岭林地植被 NPP 空间分布见图 2, 研究区植被 NPP 均值呈现西高东低的特征。研究区 2000—2013 年植被 NPP 均值在 400~600 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 主要低值在 200~300 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间集中分布在东北部地区, 高值区分布较为分散。由图 3 可知, 林区内栽培植物 NPP 的平均值为 578.49 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其次为草甸 510.38 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 针叶林 NPP 均值为 459.61 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 区域内所有植被类型 NPP 均值为 480.99 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 栽培作物在生长过程中其生产力较高, 且本研究应用的植被类型数据中, 栽培植物中的各种类型并未分出, 各种栽培作物由于物候特征不同, 因此年均 NPP 较高; 阔叶林 NPP 年净增长量最高为 102.49 $\text{TgC} \cdot \text{a}^{-1}$, 由于研究区阔叶林所占植被类型比例达 38.78%, 并且区域内生态环境较适宜阔叶林的生长, 因此阔叶林生产力较高, 草甸的 NPP 年净增长量为 1.13 $\text{TgC} \cdot \text{a}^{-1}$, 由于其所占植被类

表 1 秦岭林地划分高程及坡度的等级标准

Table 1 Interval divisions of elevation and slope with in Qinling Mountainous area

地形因子	等级划分	等级含义	划分依据
高程/m	≤200	平原	对高程的划分标准,并结合秦岭林地的实际情况 ^[18-19]
	200~500	丘陵	
	500~1 000	低山	
	1 000~1 500	中山	
	1 500~2 500	高山	
	>2 500	海拔较高地区	
坡度/(°)	≤2	平原	国际地理学会地貌调查与制图委员会对坡度的分级标准 ^[20-22]
	2~5	缓坡地	
	5~15	斜坡地	
	15~25	陡坡地	
	25~35	急坡	
	35~50	急陡坡	
	> 50	垂直坡	

型比例仅为 0.40%，主要分布在大白山海拔较高的区域,分布及其有限。

由图 4 可知,研究区 2000—2013 年 NPP 年际变化趋势以上升趋势为主。NPP 年际变化率均值为 0.22,大部分地区 NPP 变化趋势在 0.15~0.30 之间。研究区内大部分地区 NPP 的增加趋势明显,

但东部地区 NPP 主要变化趋势集中在-0.15~0.15 之间,个别区域下降趋势最低达到<-0.15,西南部分地区 NPP 主要变化趋势也集中在-0.15~0.15 之间。参考研究区 DEM 数据,发现年际变化率增加较少或呈减少趋势的区域分布在海拔较低的地区,而 NPP 年际变化率增加较多的区域大多分布在海拔高的地区。可能的原因是海拔较低的地区植被类型及生长状况都容易受到外界条件的影响,因此随着人为活动日趋严重的今天,海拔低的地区植被 NPP 变化率增加较少或呈增长。分析其显著性检验结果发现,研究区 97.40%的区域未通过年际变化的显著性检验,只有 1.97%的区域年际变化呈显著正相关,研究区东部零星分布了 0.51%的区域为显著负相关。

3.2 地形因子对秦岭林区植被 NPP 的影响

根据表 1 对秦岭山地高程及坡度的划分,计算不同高程及坡度带的 NPP 均值、总量及 NPP 变化趋势(表 2、表 3)。

由表 2 可以看出,秦岭林地主要海拔集中在 500~1 500 m 的低山丘陵地带,这些区域占研究区面积的 69.19%,NPP 均值 519.82 gC·m⁻²·a⁻¹,且年际变化趋势均呈增加趋势。<200 m 的区域主

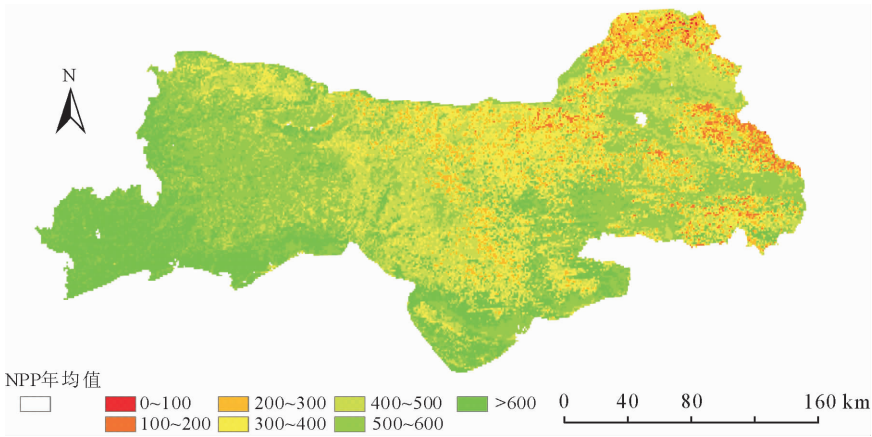


图 2 2000—2013 年秦岭林地植被 NPP 均值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of mean NPP in Qinling Mountainous area during 2000—2013

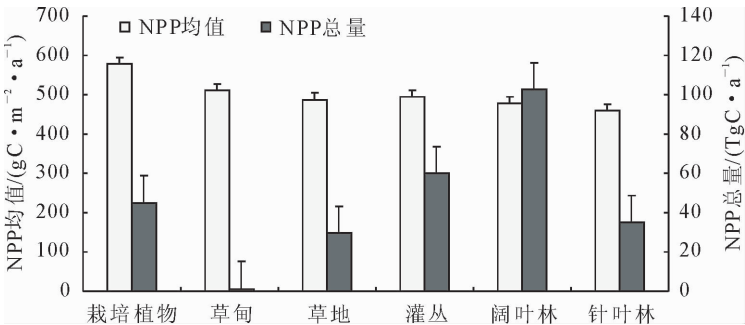


图 3 秦岭林区不同植被类型的年均 NPP 与年均总量

Fig. 3 Mean and total annual NPP for different vegetation types in Qinling Mountainous area

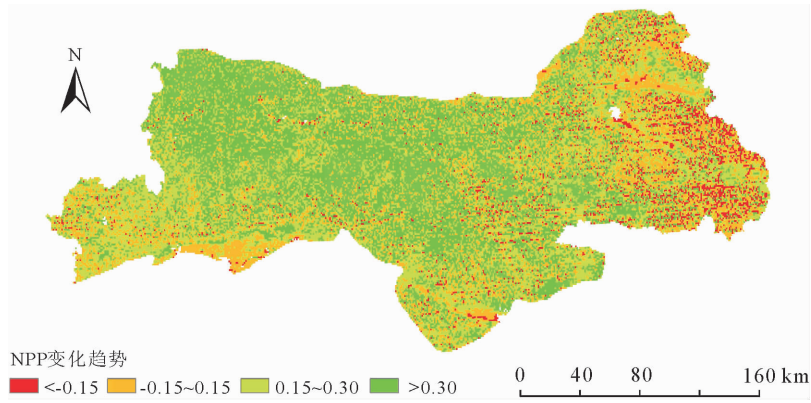


图 4 2000—2013 年秦岭林区 NPP 年际变化率

Fig. 4 Spatial pattern of total annual NPP interannual variability in Qinling Mountainous area from 2000—2013

表 2 秦岭林地高程区间的植被 NPP 比较

Table 2 Comparison of NPPs in different elevation ranges in Qinling Mountainous area

高程/m	≤200	200~500	500~1 000	1 000~1 500	1 500~2 500	>2 500
面积比/%	0.02	3.87	29.42	39.77	5.74	1.14
NPP 均值/(gC·m ⁻² ·a ⁻¹)	513.26	557.37	533.18	475.49	487.28	433.84
NPP 总量/(TgC·a ⁻¹)	0.86	11.84	86.11	103.83	15.37	3.23
NPP 变化趋势	0.16	0.16	0.18	0.21	0.29	0.29

表 3 秦岭林地坡度区间的植被 NPP 比较

Table 3 Comparison of NPPs in different slope ranges in Qinling Mountainous area

坡度/(°)	≤2	2~5	5~15	15~25	25~35	35~50	>50
面积比/%	1.84	1.92	8.76	21.70	35.61	28.35	1.82
NPP 均值/(gC·m ⁻² ·a ⁻¹)	572.27	539.98	513.16	501.26	492.42	480.61	465.23
NPP 总量/(TgC·a ⁻¹)	5.79	5.68	24.68	59.73	96.26	74.82	4.64
NPP 变化趋势	0.08	0.15	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24

要植被类型为草地与灌丛,且该区域受人为影响较大,因此 NPP 均值偏低仅为 513.26 gC·m⁻²·a⁻¹,该区域所占面积较少,NPP 总量也为各区域内最少,与此同时 NPP 的年变化率最低;200~500 m 区域内植被覆盖类型增多,草地、灌丛及农田都大幅增加,其 NPP 均值为 557.37 gC·m⁻²·a⁻¹,500~1 500 m 区域所占面积最大,植被类型较多且较为固定,因此该区域所占年均 NPP 总量最大为189.94 TgC·a⁻¹;海拔 1 500 m 以上随着海拔逐渐增高,年均气温偏低,直接影响了植被光合作用所产生生物量的多少,因此该区域植被 NPP 均值在 475.49~533.18 gC·m⁻²·a⁻¹之间;海拔 1 500~2 500 m 区域内植被类型主要由阔叶林与针叶林组成,但所占区域面积比仅为 5.74%,因此 NPP 均值与 NPP 总量均较低;>2 500 m 区域植被类型单一,且所占面积比例少,因此植被 NPP 均值仅为 433.84 gC·m⁻²·a⁻¹,NPP 总量为 3.23 TgC·a⁻¹,但该区域 NPP 年际变化率最大为 0.29。由表 3 可知,秦岭林区 25°以上的坡地占总面积的 65.78%,但 NPP 均值较 25°以下区域低近 100 gC·m⁻²·a⁻¹,NPP 总

量较 25°以下地区高出 79.84 TgC·a⁻¹,25°以下坡地 NPP 年际变化率较 25°以上高。陕西省实施 16 a 之久的退耕还林还草工程,为保护秦岭天然林地区生态环境对坡度>25°的耕地实行还林还草,草地和林地的大面积增加,使该区域植被 NPP 均值及 NPP 总量大幅提高。

3.3 植被类型对 NPP 的影响

应用植被类型图对研究区植被 NPP 均值、NPP 总量及变化趋势进行分析(表 4)。由表 4 可知,研究区阔叶林及灌丛占植被类型的 60.36%,所占 NPP 总量达 162.38 TgC·a⁻¹;所有植被类型 NPP 年际变化趋势均呈上升趋势。栽培植物与草甸 NPP 均值最高,针叶林 NPP 均值最低,阔叶林及草甸 NPP 年际变化率最大,均为 0.25,针叶林和灌丛的变化率最小,针叶林作为常绿植物,其一年当中植被生长变化不大,且针叶林为高大的乔木,根系较为庞大,受逐年间气候因子的影响并不显著,因此针叶林变化趋势较小。

3.4 土壤类型对 NPP 的影响

根据土壤类型数据集对研究区植被 NPP 均值、

NPP 总量及变化趋势进行分析(表 5)。由表 5 可知,研究区主要土壤类型为粘土及粘壤土,占研究区面积的 62.13%,所占 NPP 总量达 151.39 TgC·a⁻¹;不同土壤类型的 NPP 年际变化趋势均呈上升趋势。土壤肥力直接影响到植被生长情况,不同土

壤类型所产生的土壤的肥力不同,砂质粘壤土与砂壤土植被 NPP 均值最大分别为 537.53 gC·m⁻²·a⁻¹和 530.42 gC·m⁻²·a⁻¹;壤土的年际变化率最大达 0.21。

表 4 秦岭林地各植被类型的植被 NPP 比较

Table 4 Comparison of NPPs in different vegetation types in Qinling Mountainous area						
植被类型	栽培植物	草甸	草地	灌丛	阔叶林	针叶林
面积比/%	14.45	0.41	11.01	21.83	38.53	13.76
NPP 均值/(gC·m ⁻² ·a ⁻¹)	578.49	510.38	487.28	493.57	478.87	459.61
NPP 总量/(TgC·a ⁻¹)	44.84	1.13	29.51	59.89	102.49	34.95
NPP 变化趋势	0.22	0.25	0.21	0.16	0.25	0.18

表 5 秦岭林地各土壤类型的植被 NPP 比较

Table 5 Comparison of NPPs in different soil types in Qinling Mountainous area							
土壤类型	粘土	粘壤土	壤土	砂质粘壤土	砂质壤土	砂壤土	砂土
面积比/%	2.33	22.84	39.29	12.43	12.06	0.71	10.35
NPP 均值/(gC·m ⁻² ·a ⁻¹)	492.82	482.95	483.03	537.53	512.00	530.42	497.99
NPP 总量/(TgC·a ⁻¹)	5.79	55.64	95.75	33.71	31.14	1.89	26.00
NPP 变化趋势	0.19	0.21	0.24	0.21	0.21	0.13	0.21

3.5 降雨与气温对 NPP 的影响

逐像元分析秦岭林地年降雨量和年均气温与 NPP 的相关性特征(图 5)。由图 5 可知,NPP 与年降雨量、年均气温有一定相关性,年均气温与 NPP 的相关性较年降雨量高。研究区 65.55%的区域年均气温与 NPP 的相关性不明显,11.71%的区域年均气温与 NPP 呈极显著负相关,主要分布在秦岭林地的南部安康市、旬阳县及汉阴县大部分地区,城固县、洋县及勉县的部分地区及丹凤县、商南县及山阳县的少部分地区,并且在宝鸡市辖区有零星分布,7.83%的区域呈显著负相关。造成这种现象的原因可能是这些区域的降水主要集中在春夏两季,降雨较多,日照时间偏少,这样会直接影响植被光合作用效率,而这一时期往往是一年中植被积累生物量最

重要的时期,因此,植被 NPP 与年均气温呈负相关。与平均气温呈显著正相关的区域主要零星分布在研究区北部地区的洛南、柞水、镇安等县,占研究区面积的7.98%,呈极显著正相关的区域占总面积的 6.93%,与显著正相关分布区域基本一致,尤其是太白山大部分区域呈极显著正相关,除了考虑水热较为同步的因素以外,太白山海拔较高,垂直气温的递减对植被生长有很大影响,因此与年均气温呈极显著正相关。

研究区 98.62%的区域年降雨量与 NPP 相关性不明显,仅有 1.17%的区域呈显著正相关,零星分布在研究区的东部及北部地区。在海拔差异较大的地区,气温可能是对植被 NPP 影响最大的气候因子。

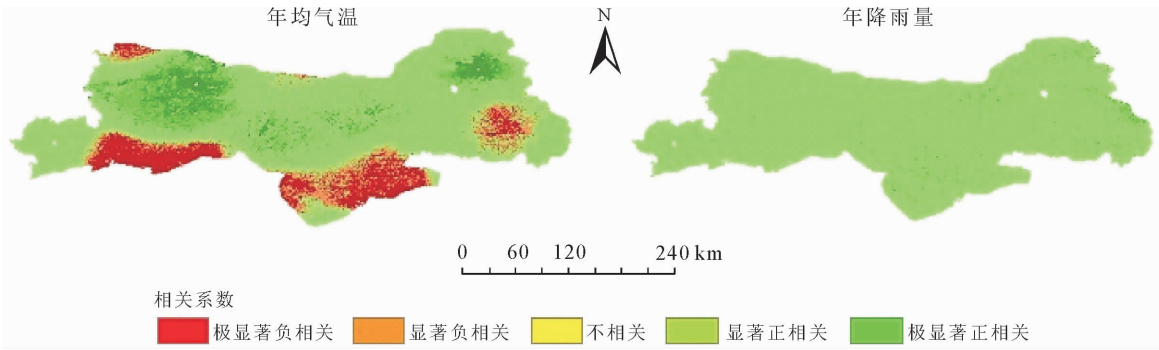


图 5 2000—2013 年秦岭林地年均 NPP 与气候因子的相关系数

Fig. 5 Correlation relationship between annual NPP and climate factors in Qinling Mountainous area

4 结论与讨论

基于 MOD17A3 数据集探讨了秦岭林地 2000—2013 年植被净初级生产力(NPP)时空变化特征,并分析了地形因子、植被类型、土壤类型及气候因子(年降雨量、年均气温)对 NPP 变化的影响。

秦岭林地植被 NPP 呈现西高东低的特征,研究区 2000—2013 年植被 NPP 均值在 $400\sim 600\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上,栽培植物的 NPP 均值最高为 $578.49\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,阔叶林的 NPP 年均总量最高达 $102.49\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$,草甸 NPP 年均总量仅为 $1.13\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

NPP 年际变化趋势以上升趋势为主,NPP 年际变化率均值为 0.22,大部分地区 NPP 变化趋势在 $0.15\sim 0.30$ 之间,研究区 97.40% 的区域未通过年际变化的显著性检验,只有 1.97% 的区域年际变化呈显著正相关,研究区东部零星分布了 0.51% 的区域为显著负相关。

研究区主要海拔高度集中在 $500\sim 1\,500\text{ m}$ 的低山丘陵地带,占研究区面积的 69.19%,NPP 均值 $519.82\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,且年际变化趋势均呈增加趋势。 $>1\,500\text{ m}$ 以上区间植被类型相对单一,植被 NPP 呈递减趋势。研究区 25° 以上的坡地占总面积的 65.78%,但 NPP 均值较 25° 以下区域低近 $100\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,NPP 总量较 25° 以下地区高出 $79.84\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$, 25° 以下坡地 NPP 年际变化率较 25° 以上变化率高。

研究区阔叶林及灌丛占植被类型的 60.36%,所占 NPP 总量达 $162.38\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$;所有植被类型 NPP 年际变化趋势均呈上升趋势。研究区主要土壤类型为粘土及粘壤土,占研究区面积的 62.13%,所占 NPP 总量达 $151.39\text{ TgC}\cdot\text{a}^{-1}$;不同土壤类型的 NPP 年际变化趋势均呈上升趋势。

NPP 与年降雨量、年均气温有一定相关性,年均气温与 NPP 的相关性较年降雨量高。65.55% 的区域年均气温与 NPP 的相关性不明显,11.71% 的区域年均气温与 NPP 呈极显著负相关,呈极显著正相关的区域占总面积的 6.93%;98.62% 的区域年降雨量与 NPP 相关性不明显,仅有 1.17% 的区域呈显著正相关。

参考文献:

[1] 穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报,2013,33(12):3752-3764.
MU S J,LI J L,ZHOU W, *et al.* Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate

factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2013,33(12):3753-3764. (in Chinese)

[2] 孙庆玲,冯险峰,肖潇. 武陵山区植被净第一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.
SUN Q L,FENG X F,XIAO X. Spatio-temporal pattern of NPP and related analyses with terrain factors in Wuling Mountainous Area[J]. *Journal of Geo-information Science*,2014,16(6):916-924. (in Chinese)

[3] 袁博,白红英,章杰,等. 秦岭山地植被净初级生产力及对气候变化的响应[J]. 植物研究,2013,33(2):225-231.
YUAN B,BAI H Y,ZHANG J, *et al.* Vegetation net primary productivity in Qinling Mountains and its response to climate change[J]. *Bulletin of Botanical Research*,2013,33(2):225-231. (in Chinese)

[4] 李红梅,周秉荣,李林,等. 青海高原植被净初级生产力变化规律及其未来变化趋势[J]. 生态学杂志,2011,30(2):215-220.
LI H M,ZHOU B R,LI L, *et al.* Change pattern and its future trend of vegetation net primary productivity on Qinghai Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*,2011,30(2):215-220. (in Chinese)

[5] 赵东升,吴绍洪,尹云鹤. 气候变化情况下中国自然植被净初级生产力分布[J]. 应用生态学报,2011,22(4):897-904.
ZHAO D S,WU S H,YIN Y H. Variation trends of natural vegetation net primary productivity in China under climate change scenario[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2011,22(4):897-904. (in Chinese)

[6] 李登科,范建忠,王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志,2011,30(12):2776-2782.
LI D K,FAN J Z,WANG J. Variation characteristics of vegetation net primary productivity in Shaanxi Province based on MO17A3[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2011,30(12):2776-2782.

[7] 李军玲,陈怀亮,邹春辉,等. 1994—2008 年河南省植被净第一性生产力及其时空变化[J]. 生态环境学报,2011,20(10):1424-1429.
LI J L,CHEN H L,ZOU C H, *et al.* Vegetation net primary productivity and its temporal-spatial changes in Henan Proveduring 1994—2008 [J]. *Ecologyand Environmental Sciences*,2011,20(10):1424-1429. (in Chinese)

[8] 刘琳,李月臣,朱翠霞,等. 2001-2010 年重庆地区植被 NPP 时空变化特征及其与气候因子的关系[J]. 遥感信息,2013,28(5):99-108.
LIU L,LI Y C,ZHU C X, *et al.* The spatio-temporal variation characteristics of vegetation NPP in Chongqing and its relation with climatic factors from 2001 to 2010[J]. *Remote Sensing Information*,2013,28(5):99-108. (in Chinese)

[9] 李传华,赵军. 2000—2010 年石羊河流域 VRR 时空变化及驱动因子[J]. 生态学杂志,2013,32(3):712-718.
LI C H,ZHAO J. Spatiotemporal variations of vegetation NPP and related driving factors in Shiyang river basin of northwest China in 2000—2010[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2013,32(3):712-718. (in Chinese)

[10] 李燕丽,潘贤章,王昌昆,等. 2000—2011 年广西省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报,2014,34

(18):5223-5228

LI Y L,PAN X Z,WANG C K. *et al.* Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2011 in Guangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (18):5220-5228. (in Chinese)

[11] 王新闯,王世东,张合兵. 基于 MODIS17A3 的河南省 NPP 时空格局[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10):2797-2805.

WANG X C,WANG S D,ZHANG H B. Spatiotemporal pattern of vegetation net primary productivity in Henan Province of China based on MOD17A3[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10):2797-2805. (in Chinese)

[12] 罗玲,王宗明,毛德华,等. 松嫩平原西部草地净初级生产力对气候变化及人类活动的响应[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(6):1533-1540.

LUO L,WANG Z M,MAO D H, *et al.* Responses of grassland net primary productivity in western Songnen plain of northeast China to climate change and human activity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(6):1533-4540. (in Chinese)

[13] 蒋蕊竹,李秀启,朱永安,等. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(22):6708-6716.

JIANG R Z,LI X Q,ZHU Y A, *et al.* Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River delta based on MODIS data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22):6708-6716. (in Chinese)

[14] 刘小林,张宋智,李惠萍,等. 小陇山森林生态系统服务功能价值评估[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(6):69-74.

LIU X L,ZHANG S Z,LI H P, *et al.* Assessment on forest ecosystem services value of Xiaolongshan region[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(6):69-74. (in Chinese)

[15] 李林昊,张延龙,牛立新,等. 秦岭地区‘凤丹’牡丹居群果期相关性状的表型多样性研究[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(4):127-131.

LI L H,ZHANG Y L,NIU L X, *et al.* Phenotypic variations of Fruiting-related traits of populations in *Paonia ostii* ‘Feng Dan’ Native to Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(4):127-131. (in Chinese)

[16] 何慧娟,卓静,王娟,等. 陕西省退耕还林植被覆盖度与湿润指数的变化关系[J]. *生态学报*, 2016, 36(2):439-447.

HE H J,ZHUO J,WANG J, *et al.* Relationship between fractional vegetation cover and humidity index after returning farmland to forest in Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(2):439-447. (in Chinese)

[18] 张朝忙. 中国地区 SRTM3 DEM 与 ASTER GDEM 高程精度质量评价[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.

[19] 詹蕾. SRTM DEM 的精度评价及其适用性研究[D]. 南京:南京师范大学, 2008.

[20] 朱梅,李发源. 坡度分级对地面坡谱的影响研究[J]. *测绘科学*, 2009, 34(6):165-167.

ZHU M,LI F Y. Influence of slope classification on slope spectrum[J]. *Scinnce of Surveying and Mapping*, 2009, 34(6):165-167.

[21] 吴成基. 自然地理学[M]. 北京:科学出版社, 2008:141-142.

[22] 黄秉维,郑度,赵名茶,等. 现代自然地理[M]. 北京:科学出版社, 1999:319-320.

(上接第 95 页)

[28] 黄承玲,陈训,高贯龙. 3 种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. *林业科学*, 2011, 47(6):48-55.

HUANG C L,CHEN X,GAO G L. Physiological response of seedling of three azalea species of drought stress and evaluation of drought resistance[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(6):48-55.

[29] 董明,苏德荣,刘泽良,等. 干旱胁迫对阿诺红鞑靼忍冬生理指标的影响[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(4):8-13.

DONG M,SUD R,LIU Z L, *et al.* Effect of drought stress on physiological indices of *Lonicera tatarica* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(4):8-13. (in Chinese)

[30] NYACHIRO J M,BRIGGS K G,HODDINOTT J, *et al.* Chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and water deficit in spring wheat [J]. *Cereal Research Communication*, 2001, 29:135-142.

[31] 丁红,张智猛,戴良香,等. 干旱胁迫对花生根系生长发育和生理特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6):1586-1592.

DING H,ZHANG Z M,DAI L X, *et al.* Effects of drought stress on the root growth and development and physiological characteristics of peanut[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6):1586-1592. (in Chinese)

[32] JIA W S,ZHANG J H. Stomatal movements and long distance signaling in plants[J]. *Plant Signaling and Behavior*, 2008(3):772-777.

[33] 李云飞,李彦慧,王中华,等. 土壤干旱胁迫及复水对紫叶矮樱生理特性的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2008, 31(6):78-82.

LI Y F,LI Y H,WANG Z H, *et al.* Effect of soil drought stress and rewatering on physiological characteristics of *Prunus×cistenena* ‘Pissardii’ [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2008, 31(6):78-82. (in Chinese)