

# 基于 CASA 模型的陕西省植被净初级生产力时空分析

石志华<sup>1,3</sup>, 刘梦云<sup>1,2</sup>, 吴健利<sup>2</sup>, 常庆瑞<sup>2</sup>, 谢宝妮<sup>2</sup>, 闻熠<sup>4</sup>

(1. 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 黄石市国土资源局, 湖北 黄石 435000; 4. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 探明陕西省近年来植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)的变化及评估植被的生长条件。[方法] 基于 CASA(Carnegie Ames Stanford Approach)模型估算陕西省 2003—2012 年逐月 NPP, 并分析其年际、年内的时空变化特征及趋势。[结果] (1) 陕西省 2003—2012 年植被 NPP 总体呈增长趋势( $p < 0.01$ ), 年均增量为  $3.9406 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (以 C 含量计); 年总 NPP 从 2003 年的  $84.44 \text{ Tg}$  ( $1 \text{ Tg} = 1012 \text{ g}$ ) 增加到 2012 年的  $91.98 \text{ Tg}$ 。(2) NPP 年内变化明显, 夏季 NPP 占年总量的比例最高, 达到  $52.43\%$ , 7、8 两月占比最高, 分别为  $18.52\%$  和  $18.41\%$ 。只有 3 和 8 月 NPP 增长趋势显著或极显著, 其他月份 NPP 变化不显著。(3) 不同植被 NPP 的年际变化比较平稳, 除永久湿地外, 其他植被类型的 NPP 呈增长趋势, 耕地的 NPP 增长最快( $p < 0.01$ ), 年均增量为  $5.89 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。(4) NPP 整体呈南高北低、高低相间的分布特征, 全省  $78.53\%$  的区域 NPP 呈增长趋势,  $24.47\%$  的区域增长显著或极显著; NPP 降低显著/极显著的面积仅占  $2.27\%$ , 主要分布在陕西中部和西安周边地区。[结论] 陕西植被生长条件总体在改善, 但局部在恶化。

**关键词:** NPP; CASA 模型; 时空分析; 陕西省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0206-06

中图分类号: P966.1, TP79

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.037

## Spatial-temporal Analysis of Vegetation Net Primary Productivity in Shaanxi Province Based on CASA Model

SHI Zhihua<sup>1,3</sup>, LIU Mengyun<sup>1,2</sup>, WU Jianli<sup>2</sup>, CHANG Qingrui<sup>2</sup>, XIE Baoni<sup>2</sup>, WEN Yi<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory for Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, P. R. China, Beijing 100081, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Huangshi Municipal Bureau of Land and Resources, Huangshi, Hubei 435000, China; 4. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to verify variation of vegetation net primary productivity(NPP) in Shaanxi Province in recent years in order to evaluate vegetation growing conditions. [Methods] Based on the Carnegie Ames Stanford approach(CASA) model, this study estimated the monthly NPP from 2003 to 2012 in Shaanxi Province. The annual and inter-annual variation of NPP were analyzed at both spatial and temporal scale. [Results] (1) The NPP in Shaanxi Province showed an increasing trend and increased ( $p < 0.01$ ) at a rate of  $3.9406 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . The total annual NPP increased from  $84.44 \text{ Tg}$  ( $1 \text{ Tg} = 1012 \text{ g}$ ) in 2003 to  $91.98 \text{ Tg}$  in 2012(in terms of carbon content). (2) The NPP varied greatly in different seasons. The highest NPP occurred in summer, which accounted for  $52.43\%$  of the total NPP, and NPP in July, August accounted for  $18.52\%$ ,  $18.41\%$  respectively. NPP in March or August increased significantly or extremely significantly, while no significant change of NPP was found in the other months. (3) Annual variation of NPP for different vegetation types was comparatively stable, and showed an increasing tendency except the permanent wetlands. The fastest increase of NPP was crop land ( $p < 0.01$ ), with an average annual increment rate of  $5.89 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . (4) The NPP in Southern Shaanxi was higher than the northern,  $78.53\%$  of the area showed a growing trend in NPP, and  $24.47\%$  of the area increased significant or extremely significant. Only

收稿日期: 2014-12-29

修回日期: 2015-09-28

资助项目: 农业部农业环境重点实验室开放基金“黄土高原沟壑区不同土地利用方式碳汇价值量研究”; 陕西省自然科学基金研究计划“黄土高原沟壑区土地利用方式转变的土壤呼吸与碳汇研究”(2013JQ5012); 国家高技术研究发展计划“农田生态环境信息获取与作物长势监测技术研究”(2013AA102401); 西北农林科技大学博士科研启动基金

第一作者: 石志华(1989—), 男(汉族), 湖北省阳新县人, 硕士, 研究方向为土地资源监测与信息可视化。E-mail: zhiqizhonghua@163.com。

通讯作者: 刘梦云(1973—), 女(汉族), 陕西省蒲城县人, 博士, 副教授, 主要从事土地生态恢复研究。E-mail: lmy471993@163.com。

2.27% of the area showed a significantly or extremely significantly decreasing trend in NPP, those areas were mainly distributed in the central Shaanxi Province and surrounding area of Xi'an City. [Conclusion] The vegetation growing conditions in Shaanxi Province was generally improved, but the local region were deteriorating.

**Keywords:** NPP; CASA model; spatial-temporal analysis; Shaanxi Province

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指在植物光合作用所固定的光合产物或有机碳(gross primary productivity, GPP)中,扣除植物自身呼吸消耗部分(autotrophic respiration,  $R_a$ )后,真正用于植物生长和生殖的光合产物量或有机碳量,也称净第一性生产力<sup>[1]</sup>。陆地生态系统在全球碳循环过程中发挥着主要碳汇的作用,可以大量吸收人为活动排放的碳,而植被系统是其重要组成部分之一;且碳是通过植物光合作用固定的,所以 NPP 不仅反映了生态系统的生产能力和质量,也是决定其碳源/汇属性的主要指标,在全球碳循环中起着重要作用<sup>[2-3]</sup>,Zhang 等<sup>[3]</sup>研究表明植树造林和森林保护可以显著增强陆地生态系统生产力,延缓全球变暖。传统的 NPP 估算方法,如样本统计、样方测量虽然精度较高,但费时、费力,且由于测量网络较稀疏,无法估算较大尺度的 NPP。遥感技术被看做是区域和大尺度 NPP 估算的有效方法<sup>[4]</sup>。文中选用的 CASA (Carnegie Ames Stanford approach)模型是一个充分考虑环境条件和植被本身特征的光能利用率模型,由 Potter 等<sup>[5]</sup>于 1993 年提出,广泛应用于不同时空范围的 NPP 研究<sup>[6-9]</sup>。

陕西省地形复杂、气候多样,北部的黄土高原地区,水土流失严重,生态环境脆弱。近年来,一系列植树造林、退耕还林(草)政策的实施对生态环境改善有重要影响。陈学兄等<sup>[10]</sup>研究显示 1998 年以来,陕西植被覆盖逐渐提高,其中陕北黄土高原地区增长显著,其过程会直接影响 NPP 的变化,因此对本区 NPP 进行动态研究具有一定的生态学意义。此外,以往学者对陕西进行的 NPP 研究,重点主要集中在黄土高原或省内县市等局部地区,且多使用现成的 Modis17 NPP 数据产品<sup>[11-12]</sup>,而 Modis 数据集主要应用于全球、大陆等宏观尺度,区域研究精度存在争议。本研究拟基于 CASA 模型,使用国内的气象站点、植被类型等精度较高的数据对陕西 2003—2012 年逐月 NPP 进行估算,结果可作为前人研究的补充。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕西省(105°29'—111°15'E, 31°42'—39°35'N)位于中国西北地区,地域狭长,南北长约 870 km,东西宽约 200~500 km,总面积  $2.06 \times 10^5$  km<sup>2</sup>。地势南北高、中间低,海拔 675~1 351 m,境内有高原、山

地、平原和盆地等多种地形。自北向南分为陕北高原、关中盆地、秦巴山地 3 大地形区。陕西南北气候差异较大,由北向南依次为温带、暖温带、北亚热带气候。年均温 7~16 °C,年均降水量 340~1 240 mm,均呈现由南向北递减的趋势,纬度地带性明显。复杂的地形和多样的气候使陕西植物资源种类繁多,植被分布也具有明显的地带性。此外,陕西是全国土地沙化和荒漠化危害最为严重的省份之一,也是阻止中国西北风沙东越南扩的重要防线。多年来,陕西采取封沙禁牧、飞播造林与人工造林等措施,使全省特别是陕北地区植被状况有了明显好转。2013 年,全省荒山荒(沙)地造林 341 196 hm<sup>2</sup>,其中人工造林 220 391 hm<sup>2</sup>,飞播造林 50 202 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率提高到 41.42%;累计水土流失治理面积 6 784 900 hm<sup>2</sup>,沙区植被覆盖率提升至 55.2%<sup>[13]</sup>。

### 1.2 数据来源与预处理

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),为 2003—2012 年逐月数据,包含月平均气温、月总降水量、月总太阳辐射 3 项指标及各个站点的坐标信息。气温、降水数据为陕西省及周边地区 88 个具有连续数据的气象站点;太阳辐射数据为全国 88 个具有连续数据的太阳辐射站点。对比普通克里金法(ordinary Kriging, OK)、协同克里金法(cokriging, CK)、反距离权重法(inverse distance weighting, IDW)和径向基函数法(radial basis functions, RBF)进行数据插值的精度,最终选用 IDW 法对气温数据进行插值,OK 法对降水、月总太阳辐射数据进行插值,最终得到气温、降水、太阳辐射的空间栅格数据。

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)使用比利时弗莱芒技术研究所(flemish institute for technological research, Vito)发布的 SPOT VGT 数据集(<http://www.vgt.vito.be/>),空间分辨率为 0.008 928 571 4°。数据已经过几何校正、辐射校正、大气校正等处理,并已采用最大值合成法(maximum value composites, MVC)<sup>[14]</sup>,生成旬最大值数据。获取数据后,为降低大气影响,再次利用 ENVI 的 Band math 工具,合成月最大值数据。

植被分类图,采用寒区旱区科学数据中心的《基于多源数据融合方法的中国 1 km 土地覆盖图》<sup>[15]</sup>,数据采用 IGBP 分类系统,中国地区总体精度为 71%,高于其他数据分类产品,可以用于重要陆面模

型的输入数据<sup>[16]</sup>。

最后,对所有数据进行重采样,将分辨率统一设置成 1 km。使用北京 1 954 坐标系,Albert 投影系统,北偏移和东偏移为 0 m,中央经线为 105°E,标准纬线为 25°N,47°N,起始纬度为 0°。

### 1.3 研究方法

1.3.1 NPP 估算模型概述 本研究采用 CASA 模型估算陕西省 2003—2012 年逐月植被净初级生产力(NPP),其所估算的 NPP 用植物所吸收的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率( $\epsilon$ )来表示。公式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中:APAR( $x, t$ )——像元  $x$  在  $t$  月吸收的光合有效辐射 $[g/(m^2 \cdot 月)]$ ,以 C 计; $\epsilon(x, t)$ ——像元  $x$  在  $t$  月的实际光能利用率( $g/MJ$ )。

$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times a$  (2)  
式中: $SOL(x, t)$ ——像元  $x$  在  $t$  月的太阳总辐射量 $[(MJ/(m^2 \cdot 月))]$ ;  $FPAR(x, t)$ ——植被层对入射的光合有效辐射的吸收比例; $a$ ——可以被植被利用的太阳有效辐射占总太阳辐射的比例。

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon_1}(x, t) \times T_{\epsilon_2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (3)$$

式中: $T_{\epsilon_1}(x, t), T_{\epsilon_2}(x, t)$ ——高温、低温对光能利用率的胁迫作用系数; $W_{\epsilon}(x, t)$ ——水分胁迫的影响系数; $\epsilon_{\max}$ ——理想条件下的最大光能利用率( $g/MJ$ )。模型中数据计算方法及参数来源详见文献<sup>[17-18]</sup>。

1.3.2 均值法 对估算的 NPP 结果取平均值,可以反映 NPP 的总体特征,公式为<sup>[9]</sup>:

$$\overline{NPP} = \frac{\sum_{i=1}^n NPP_i}{n} \quad (4)$$

式中: $NPP_i$ ——第  $i$  年的 NPP 值; $n$ ——年份跨度,在此为 10。

1.3.3 一元线性回归分析法 一元线性回归分析法,基于最小二乘理论,拟合出 NPP 数据与时间的线性趋势,其斜率能反映时间序列数据的整体变化趋势,公式为<sup>[19]</sup>:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (NPP_i \times i) - \sum_{i=1}^n NPP_i \sum_{i=1}^n i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

式中: $n$ ——年份跨度,在此为 10; $I$ ——年份变量,从 1~ $n$ ;  $NPP_i$ ——第  $i$  年的 NPP 值; Slope——拟合趋势线的斜率。当 Slope > 0 时,表明随时间推移, NPP 整体呈增长趋势;如 Slope < 0,表示随时间推移, NPP 整体呈递减趋势。同时,进行基于像元的 NPP 与年份的相关分析,得到 Pearson 相关系数,根据相关系数的显著性判断变化趋势的显著性<sup>[20]</sup>。

1.3.4 NPP 估算结果验证 数据准确是数据可用的前提,因此在分析数据之前需对估算数据进行精度验证。实测 NPP 数据较难以获取,且陕西省实测 NPP 数据较少,本研究采用间接验证的方式对估算的 NPP 结果进行精度验证。将本研究中 CASA 模型估算的不同植被类型的 NPP 均值与其他模型估算的对应植被类型的 NPP 均值和部分实测数据进行比较,如果数据偏差不大,即认为数据较合理<sup>[2]</sup>。由表 1 可见,本研究利用 CASA 模型估算的不同植被类型的 NPP 均值都在实测值范围之内;且与前人估算的结果较为一致,都表现为乔木类 NPP 偏高、低矮稀疏植被偏低,说明本研究估算的 NPP 数据基本可靠,可以作为区域 NPP 研究的基本数据。而不同模型估算结果存在差异是由于研究时段、模型参数、数据处理方法、地域差异等因素造成的,这也反映了模型反演 NPP 的不确定性。

表 1 NPP 估测值与实测值比较

方法	不同植被类型 NPP 值与实测值/ $(g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1})$								时期	区域
	常绿 针叶林	常绿 阔叶林	落叶 阔叶林	混交林	灌丛	草地	耕地	裸地 稀疏植被		
本研究	382	956	679	458	382	405	390	132	2003—2012	陕西省
MOD17	—	—	343	401	274	330	278	—	2000—2010	黄土高原
DGVM	408~678	1072~1 243	501	582	75~214	203	—	3~9.8	1961—2005	中国大陆
CASA	486	873	624	423	—	348	606	—	1981—1998	中国大陆
CASA	367	985	642	—	367	—	426	—	1989—1993	中国大陆
实测值	179~806 <sup>[17]</sup>	407~1 913 <sup>[17]</sup>	114~1 669 <sup>[17]</sup>	250~1 000 <sup>[21]</sup>	364 <sup>[17]</sup>	—	—	—	—	—
	160~1 500 <sup>[22]</sup>	600~3 500 <sup>[22]</sup>	250~2 500 <sup>[22]</sup>	250~2 500 <sup>[22]</sup>	4~1 200 <sup>[22]</sup>	100~727 <sup>[22]</sup>	239~760 <sup>[17]</sup>	0~250 <sup>[22]</sup>	—	中国大陆

## 2 结果与分析

### 2.1 陕西省 NPP 时间变化特征

2.1.1 NPP 年际变化整体特征 通过计算陕西省

2003—2012 年逐年 NPP 平均值,得到本地区 10 a 植被净初级生产力的变化曲线(图 1)。陕西省 10 a NPP 的平均值为 418.59  $g/(m^2 \cdot a)$ ,极大值出现在 2012 年为 446.69  $g/(m^2 \cdot a)$ ,极小值出现在 2007 年为

394.36  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 极差为 52.33  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2003—2007 年 NPP 波动较大, 呈波动下降的趋势, 但不显著 ( $p > 0.1$ ); 2008—2012 年 NPP 波动较小, 线性增长趋势显著 ( $p < 0.05$ )。出现年际波动主要是由于影响植被生长的自然因子年际变化所致, 如气温、降水、太阳辐射、植被生长状况等。总体而言, 陕西省 2003—2012 年 NPP 呈显著的增加趋势 ( $p < 0.01$ ), 年均增量为 3.940 6  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。年总 NPP 从 2003 年的 84.44 Tg (1 Tg = 1 012 g) 增加到 2012 年的 91.98 Tg, 表明植被固碳能力增强, 也一定程度上反映了陕西省植被覆盖增加、生态环境改善, 与刘宪锋等<sup>[22]</sup>结论基本一致。

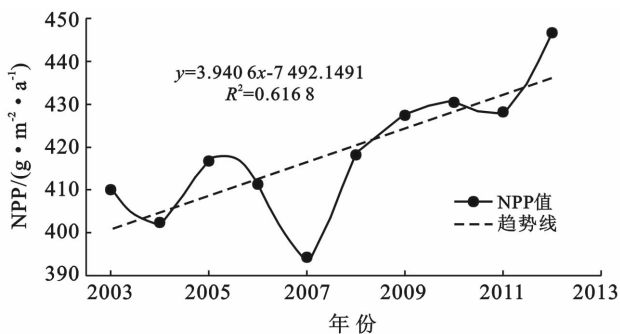
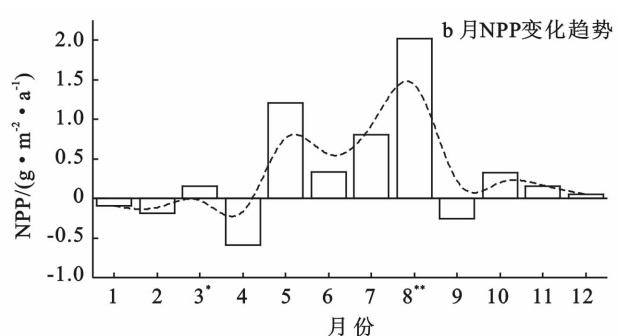
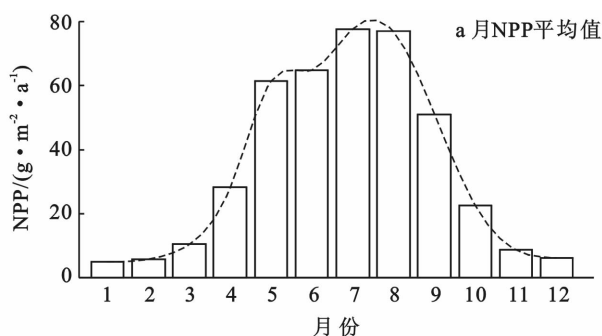


图 1 陕西省 2003—2012 年 NPP 年际变化



注: \* 表示 0.05 的显性水平 (双侧); \*\* 表示 0.01 的显著水平 (双侧)。下同。

图 2 陕西省 2003—2012 年植被净初级生产力 (NPP) 逐月变化

2.1.3 不同植被类型 NPP 的变化特征 陕西省不同植被 NPP 的年际变化比较平稳 (图略), 整体表现为乔木类植被 NPP 偏高, 灌木类偏低 (图 3a), 具有一定的分层特征, NPP 均值排序为: 常绿阔叶林 > 落叶阔叶林 > 混交林 > 草地 > 耕地 > 灌丛 > 常绿针叶林 > 永久湿地 > 裸地与稀疏植被。除永久湿地以外, 其余植被类型的 NPP 均呈增长趋势 (图 3b), 其中耕地 NPP 增长最快, 年均增量为 5.89  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 且  $p < 0.01$ , 增长趋势极显著。这是因为实行了退耕还林还草政策之后, 部分耕地向林地、草地转换, 致使其 NPP 增加显著。裸地与稀疏植被增量为 3.92  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

2.1.2 NPP 年内变化特征 陕西省月 NPP 年际变化比较平稳 (图略), 但 NPP 分层比较明显, 夏半年 (4—9 月) NPP 整体处于高位, 其中 5—9 月 NPP 均高于 40  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 半年 NPP 总量占到全年的 86.03%。冬半年 (10 月至翌年 3 月) NPP 整体偏低, 其中 11—3 月 NPP 只有 10  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  左右, 半年 NPP 总量仅占全年的 13.97%。由图 2a 可知, 夏季 (6—8 月) NPP 占全年 NPP 的 52.43%; 春季 (3—5 月)、秋季 (9—11 月) 较低, 分别占全年的 23.93% 和 19.64%; 冬季 (12—2 月) 最低, 仅占全年 NPP 的 4.00%。从月分布来看, 7、8 两月占年 NPP 总量比例最高, 分别为 18.52%, 18.41%; 12 月和 1 月最低, 仅为 1.45%, 1.18%。逐月 NPP 呈现如此年内分布特征, 主要由于陕西省主要植被覆盖区的气候以温带、亚热带气候为主, 雨热同期, 夏半年高温多雨, 冬半年低温少雨, 从而导致植被在夏半年生长加速, 冬半年生长趋缓。图 2b 的月 NPP 年际变化趋势, 表示的是各个月份每年的平均变化量, 由图 2 可见, 各月份整体呈现增长趋势, 月平均增量最多的是 8、5 和 7 月; 减量最多的是 4、2 和 9 月。但只有 3 和 8 月通过显著性检验, 说明 3、8 月增加的趋势显著, 其他月份年际变化较大, 增加或降低趋势不显著。

( $p < 0.05$ ), 主要反映了陕北风沙地植被覆盖的提高, 植被生长显著加速。混交林、灌丛、草地增量超过 2  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 通过  $p < 0.05$  检验, 增加趋势显著。常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林虽然呈增长趋势, 但并不显著, 表明这些植被覆盖范围基本稳定, 植被生长呈现轻微的年际波动。永久湿地的 NPP 呈现不显著的轻微降低趋势, 是因为水体污染、围垦等, 破坏了植被的生长环境。

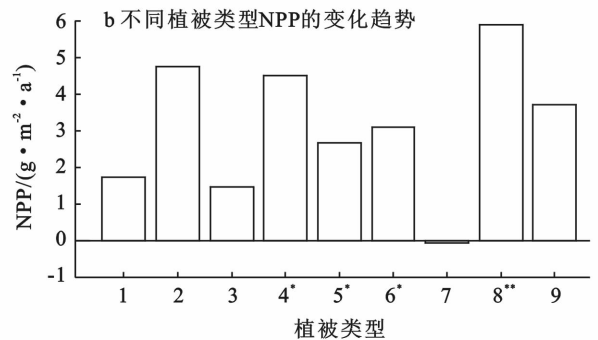
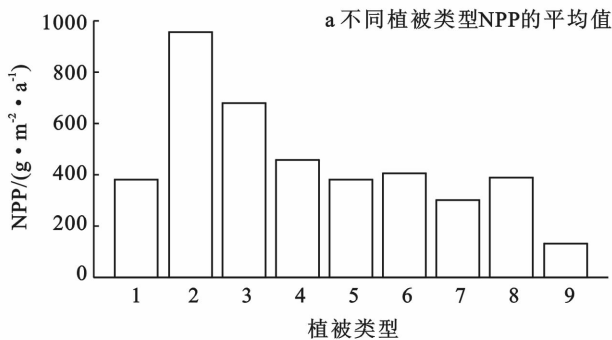
## 2.2 陕西省 NPP 空间变化特征

2.2.1 NPP 整体空间分布特征 将 2003—2012 年 10 a NPP 分布图取平均值得到附图 6, 能够反映陕西

10 a 间 NPP 的整体空间分布特征。陕西省 NPP 分布空间差异较大,整体而言,以延安市为界,以北的高原地区,NPP 偏低,大部分地区低于  $300 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;延安以南地区,NPP 较高,大部分地区高于  $400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,但在关中和汉中、安康盆地出现两个低值区,主要是因为城市和水体的 NPP 较低所致。

陕西省 NPP 整体呈现南高北低、高低相间的分布,具有一定的纬度地带性特征。NPP 在  $0 \sim 100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间的面积为  $913 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的  $0.44\%$ , 主要分布在榆林市西北靠近毛乌素沙漠的黄土高原风沙区。NPP 在  $100 \sim 200 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间的面积为  $32948 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的  $16\%$ , 主要分布在榆林市西部的风沙高原地区。NPP 在  $200 \sim 300 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间的面积为  $30345 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的  $14.74\%$ , 主要分布在延安北部及榆林东部地区, 关中盆地北缘、西安市周边也有少量分布。NPP 在

$300 \sim 400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间的面积为  $27344 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的  $13.28\%$ , 分布范围比较分散, 主要分布在城市边缘、山麓、沟谷的边缘地区。NPP 在  $400 \sim 500 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间的面积为  $39354 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的  $19.11\%$ , 主要分布在关中盆地、汉中安康盆地及秦岭的山麓地带。NPP 在  $500 \sim 600 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间的面积为  $39224 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的  $17.11\%$ , 分布比较破碎, 主要分布在子午岭、黄龙山、秦巴山地的沟谷地区, 关中也有少量分布。NPP 在  $600 \sim 700 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间的面积为  $28456 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的  $13.82\%$ , 主要分布在子午岭、黄龙山、秦岭地区。NPP 在  $700 \sim 800 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  之间的面积为  $11062 \text{ km}^2$ , 占总面积的  $5.37\%$ , 主要分布在子午岭、黄龙山、秦岭的中部地区。NPP 大于  $800 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的面积为  $271 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的  $0.13\%$ , 主要分布在秦岭太白山南麓地区, 米仓山局部有少量分布。



注:1 常绿针叶林; 2 常绿阔叶林; 3 落叶阔叶林; 4 混交林; 5 灌丛; 6 草地; 7 永久湿地; 8 耕地; 9 裸地与稀疏植被

图 3 陕西省 2003—2012 年不同植被类型 NPP 变化趋势

2.2.2 NPP 年际空间变化特征 采用一元线性回归法, 计算得到陕西省 2003—2012 年 10 a 逐像元的变化趋势(附图 7a)。陕西省近 10 a 有  $78.53\%$  的面积 NPP 呈现增加趋势,  $24.47\%$  的区域增长显著或极显著(附图 7b), 主要分布在延安、榆林东部以及汉中西部地区, 这与<sup>[11-12]</sup>的结论类似。其中延安以北的黄土高原地区 NPP 增长趋势最为明显, 榆林东部、延安北部大部分地区增量超过了  $5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 说明本地区植被生长环境得到改善, 植被生长加速。陕北地区植被 NPP 的提高主要是由于在陕北开展的一系列退耕还林、防护林建设、水土保持工程促进了植被的生长和蓄积。陕西省  $21.47\%$  的面积 NPP 呈下降趋势, 仅有  $2.72\%$  的区域降低显著/极显著, 主要分布在西安周边及子午岭、黄龙山局部地区。如西安市 NPP 降低趋势明显是因为人口增加、城市扩张破坏了市区周边的植被。而子午岭、黄龙山部分地区的 NPP 递减趋势明显, 可能是由于这些地区 NPP 整体水平已

经很高(附图 6), 对气候变化更为敏感所致。整体而言, 陕西省植被的生长状况在改善, 但局部在恶化。

### 3 结论

(1) 陕西省 2003—2012 年植被净初级生产力呈现极显著的增长趋势, 年均增量为  $3.9406 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ; 年总 NPP 从 2003 年的  $84.44 \text{ Tg}$  增加到 2012 年的  $91.98 \text{ Tg}$ , 表明植被固碳能力在增强, 也一定程度上反映了植被覆盖的提高, 生态环境的改善。

(2) 陕西省植被 NPP 的年内变化明显, 夏季 NPP 占年总量的比例最高, 达到  $52.43\%$ , 7, 8 两月占比最高, 分别为  $18.52\%$ ,  $18.41\%$ ; 春季和秋季 NPP 占比较低, 为  $23.93\%$ ,  $19.64\%$ ; 冬季最低, 仅占全年 NPP 的  $4.00\%$ 。但只有 3 和 8 月通过显著性检验, 说明 3, 8 月增加的趋势显著, 其他月份年际变化较大, 增加或降低趋势不显著。

(3) 陕西省不同植被 NPP 的年际变化比较平

稳,均值排序为:常绿阔叶林>落叶阔叶林>混交林>草地>耕地>灌丛>常绿针叶林>永久湿地>裸地与稀疏植被。除永久湿地外,其他植被类型的 NPP 呈增长趋势,耕地的 NPP 增长最快( $p<0.01$ ),年均增量为  $5.89 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;裸地与稀疏植被、混交林、灌丛、草地年均增量超过  $2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ( $p<0.05$ )。

(4) 陕西省 NPP 分布空间差异较大,呈现南高北低、高低相间的分布,具有一定的纬度地带性特征。延安以北的黄土高原地区 NPP 整体偏低,大部分地区低于  $300 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;延安以南地区 NPP 整体偏高,大部分地区高于  $400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。全省 78.53% 的面积 NPP 呈增长趋势,24.47% 的区域增长显著/极显著;21.47% 的面积 NPP 呈降低趋势,显著或极显著仅占 2.27%,主要分布在陕西中部及西安周边地区。结果表明陕西省植被的生长状况整体在改善,局部在恶化。

植被 NPP 的变化是一个长期、动态的过程。由于数据所限和工作量较大,本研究仅探讨了陕西省 2003—2012 年逐月的 NPP 变化。但不同的 NPP 估算模型、数据来源以及处理方法会对估算结果造成较大的影响,因此结合地域特征优化 NPP 估算模型,采用精度更高的植被、气象数据,研究本地区更长时间序列的 NPP 动态变化,并分析 NPP 对各种自然、人文要素的响应是后续工作的重点。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 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.
- [3] Zhang Yulong, Song Conghe, Zhang Kerong, et al. Effects of land use/land cover and climate changes on terrestrial net primary productivity in the Yangtze River Basin, China, from 2001 to 2010[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014,119(6):1092-1109.
- [4] Pachavo G, Murwira A. Remote sensing net primary productivity(NPP) estimation with the aid of GIS modelled shortwave radiation (SWR) in a Southern African Savanna[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014,30(8):217-226.
- [5] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycle*, 1993,7(4):811-841.
- [6] 董丹,倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J]. *生态学报*, 2011,31(7):1855-1866.
- [7] 张娜,毛飞跃,龚威. 2009 年武汉市植被净初级生产力估算[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2011,36(12):1447-1450.
- [8] 韩艳飞,柯长青,李晶. 近 30 a 关天经济区植被净初级生产力对土地利用变化的动态响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2014,28(6):68-74.
- [9] 张禹舜,贾文雄,赵一飞,等. 基于 CASA 模型研究祁连山地区植被净初级生产力的时空变化[J]. *西北植物学报*, 2014,34(10):2085-2091.
- [10] 陈学兄,张小军,陈永贵,等. 陕西省 1998—2008 年植被覆盖度的时空变化研究[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2013,38(6):674-678.
- [11] 谢宝妮,秦占飞,王洋,等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2014,30(11):244-253.
- [12] 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.
- [13] 陕西省统计局,国家统计局陕西调查总队. 陕西统计年鉴 2014[M]. 北京:中国统计出版社,2014.
- [14] Pan Yi, Li Xin, Gong Peng, et al. An integrative classification of vegetation in China based on NOAA AVHRR and vegetation-climate indices of the Holdridge life zone[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003,24(5):1009-1027.
- [15] 冉有华,李新,卢玲. 基于多源数据融合方法的中国 1 km 土地覆盖分类制图[J]. *地球科学进展*, 2009,24(2):192-203.
- [16] Ran Youhua, Li Xin, Lu Ling, et al. Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012,26(1):169-191.
- [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*, 2007,31(3):413-424.
- [18] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京:北京师范大学资源学院,2005.
- [19] 马明国,王建,王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. *遥感学报*, 2006,10(3):421-431.
- [20] 罗玲,王宗明,毛德华,等. 松嫩平原西部草地净初级生产力时空格局[J]. *中国草地学报*, 2012,34(1):5-11.
- [21] 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*, 2003,58(3):372-380.
- [22] 刘宪锋,杨勇,任志远,等. 2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J]. *中国沙漠*, 2013,33(4):1244-1249.