引文格式：赵月帅,张秀红,范田禾,等. 西安市植被碳汇时空演变特征及影响因素解析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(2): 30–33. doi:10. 3969/j.issn. 1672–4623.2024.02.007

西安市植被碳汇时空演变特征及影响因素解析

赵月帅[1]，张秀红[1]，范田禾[1]，王　锐[1]，宁　博[1]
（1. 陕西华地勘察设计咨询有限公司，陕西 西安 710018）

摘　要：基于2001–2015年MOD17A3 NPP数据，运用土壤呼吸模型，计算出植被NEP值，以植被NEP值作为估算碳汇的重要指标，借助GIS空间分析、相关性分析，研究了2001–2015年西安市碳汇时空格局及演变特征，分析了气温、降水、高程、坡度对植被碳汇变化的影响，为西安市生态环境调控提供了一定参考。研究结果表明：如果不考虑人为干扰条件影响，西安市除建设用地之外均属于碳汇用地。2001–2015年西安市植被碳汇整体呈上升趋势，显著增加区域面积占比达44.49%；植被NEP与高程、坡度间存在阶段性变化特征，且高程影响幅度较大；植被碳汇与降水呈正相关，与气温呈负相关关系，但局部存在较大差异。

关键词：NPP；NEP；植被碳汇；时空演变；西安市
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672–4623（2024）02–0030–04

Spatio–temporal Evolution Characteristics of Vegetation Carbon Sink in Xi'an City and Its Influence Factors

ZHAO Yueshuai[1], ZHANG Xiuhong[1], FAN Tianhe[1], WANG Rui[1], NING Bo[1]
(1. Shaanxi Huadi Survey and Design Consulting Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Based on the MOD17A3 NPP data from 2001 to 2015, we used the soil respiration model to calculate NEP value of vegetation. Taking NEP value of vegetation as an important index for estimating carbon sink, with the help of GIS spatial analysis and correlation analysis, we studied the spatio-temporal pattern and evolution characteristics of carbon sink in Xi'an from 2001 to 2015, and analyzed the effects of temperature, precipitation, elevation, slope and NDVI on the change of vegetation carbon sink, which could provide a certain reference for the regulation of ecological environment in Xi'an. The results show that if the influence of human interference conditions is not considered, Xi'an belongs to carbon sink land except for construction land. From 2001 to 2015, the vegetation carbon sink in Xi'an showed an overall upward trend, with a significant increase in the area accounting for 44.49%. There are periodic changes between vegetation NEP and elevation and slope, and the influence of elevation is large. Vegetation carbon sink is positively correlated with precipitation and negatively correlated with temperature, but there are great differences in some parts.

Key words: NPP, NEP, vegetation carbon sink, spatio-temporal evolution, Xi'an City

随着碳达峰碳中和目标的提出，学术界对植被碳汇的研究受到空前的重视。影响植被固碳能力的一大关键因素为植被净初级生产力（NPP）[1–3]，是反映植被生长变化的重要指标。在NPP基础上扣掉土壤和凋落物分解（Rh）的部分为植被净生态系统生产力（NEP），通常将NEP作为估算碳源、碳汇的重要指标，尽管在区域尺度上NEP不等于碳汇，但常常作为碳汇大小的量度[4–5]。基于此，本文以MOD17A3 NPP数据为基础，结合气象数据，运用土壤微生物呼吸模型，动态模拟西安市2001—2015年NEP的时空分布格局，研究其变化规律，探讨市域碳汇空间分布差异、年际变化特征，并对植被碳汇影响因子进行解析，探索驱动因素，以期为该区经济发展决策、生态系统保护修复提供科学依据。

1　研究区及数据

1.1　研究区概况

西安市地处关中平原中部，南至秦岭主梁，北至黄河最大支流渭河，地势南高北低，海拔高度悬殊。地形地貌丰富多样且界限清晰，分布有秦岭山地、骊山丘陵、黄土台塬、渭河冲积平原。境内河流水系发达，森林资源丰富，优质农田集中连片发展，基本形

收稿日期：2022–07–27。
项目来源：西安市国土空间生态修复调查和规划编制项目（HMZB–21044）。
第一作者简介：赵月帅（1990—），硕士，工程师，主要从事国土空间规划、生态保护修复工作，E–mail: 575608180@qq.com。

呈“一山横亘，九塬环抱、八水绕城、林田共生”的自然地理格局。受季风气候影响，全市冷暖干湿四季分明。西安地处暖温带落叶阔叶林带，植被垂直分布规律明显，南部山地、丘陵区天然次生林集中分布，北部平原、台塬区多为耕地或园地，植被长势良好。从全国地理空间格局来看，西安市位于我国南北方过渡区，生态环境相对敏感[6]。

1.2　数据来源及处理

植被净初级生产力（NPP）数据来自美国蒙大拿大学提供的2001—2015年MOD17A3数据集（http://www.ntsg.umt.edu/），空间分辨率为1 km；气候气象数据包括2001—2015年年均降水量、年均气温等，数据来源于西安市气象主管部门，通过整理和计算，空间插值处理生成；高程数据、坡度数据、影像数据、土地利用数据均来源于第三次全国国土调查成果；生态系统植被类型数据来源于《基于多源数据融合方法的中国1公里土地覆盖图》，该数据采用IGBP分类系统，精度相对较高。

2　研究方法

2.1　植被NEP估算模型

植被净初级生产力与土壤微生物呼吸碳排放量之间的插值为植被净生态系统生产力（NEP），在不考虑其他因素影响下，可将植被净生态系统生产力表示为碳汇，计算公式为：

$$\mathrm{NEP}=\mathrm{NPP}-R_H \tag{1}$$

式中，NEP为植被净生态系统生产力；NPP为植被净初级生产力；R_H为土壤微生物呼吸量。当NEP>0时，说明固碳能力大于碳排放能力，表现为碳汇，反之为碳源[7]。

基于此，裴志永[8]研究了高寒地区碳排放与环境因子的关系，在此基础上建立了温度、降水与碳排放的回归方程，估测土壤微生物呼吸的分布情况；汤洁[5]、袁倩文[9]、许明子[10]分别在吉林西部、北部湾城市群、秦岭山区的碳汇研究中将该方程予以应用，该方程已适用于全国范围内碳相关研究，计算公式为：

$$R_H=0.22\times\left(\mathrm{Exp}(0.091\,3T)+Ln(0.314\,5R+1)\right)\times30\times46.5\% \tag{2}$$

式中，R_H为土壤微生物呼吸；T为气温；R为降水量。

2.2　植被NEP变化趋势分析

采用一元线性回归方法，分析西安市2001—2015年植被NEP变化趋势的空间分布特征，以时间t为自变量，对NEP值和年份进行回归分析，线性回归斜率即为NEP变化速率[11]，公式为：

$$S=\frac{\sum_{i=1}^{N}x_it_i-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i\sum_{i=1}^{N}t_i}{\sum_{i=1}^{N}t_i^2-\frac{1}{N}(\sum_{i=1}^{N}t_i)^2} \tag{3}$$

式中，S为NEP变化速率；$N=15$，为年数；x_i为第i年的NEP值；t为年份。当$S>0$时，表示随着t增加，NEP呈上升趋势；反之，NEP呈下降趋势，S值的大小反映上升或下降的速率，即表示上升或下降的倾向程度。

用F检验法检验NEP变化趋势的显著性，检验结果能够反映变化趋势的可信程度，检验公式为：

$$F=\frac{\sum_{i=1}^{N}(\hat{x}_i-\bar{x})^2/1}{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\hat{x}_i)^2/(N-2)} \tag{4}$$

式中，$\hat{x}_i$为第i年NEP的回归值；$\bar{x}$为15 a NEP的平均值；x_i为第i年的NEP值。查F分布临界值表检验显著性，结合NEP变化趋势，可将NEP变化分为3个等级：显著减少（$S<0, P<0.05$），显著增加（$S>0, P<0.05$），变化不显著（$p>0.05$）。

2.3　植被NEP变化相关性分析

分别计算植被NEP与降水、气温的相关系数，计算公式为：

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{N}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{5}$$

式中，R_{xy}为x、y两变量的相关系数；x_i和y_i分别为x、y变量第i年的值；N为样本数；$\bar{x}$为变量x的均值；$\bar{y}$为变量y的均值。

3　植被碳汇时空变化分析

3.1　西安植被碳汇空间变化特征

基于2001—2015年MOD17A3 NPP数据，运用土壤呼吸模型，可计算出西安市历年植被NEP值。取15 a NEP均值，可以反映西安市15 a间植被碳汇的整体空间分布，整体分布呈“西高东低，北高南低”的特征，多年平均值为374.4 gC·m^{-2}·a^{-1}，最小值为72.9 gC·m^{-2}·a^{-1}，最大值为916.41 gC·m^{-2}·a^{-1}，说明市域内植被均表现为碳汇。

计算不同NEP范围的面积及百分比，NEP在0~200 gC·m^{-2}·a^{-1}之间的面积是518.22 km^2，占全市面积的5.13%，主要分布在城镇周边及市域东南秦岭山地，城镇周边植被类型以人工植被为主，市域东南秦岭山地幼龄林占比大，植被生产力水平较低，导致碳汇能力不高；NEP在200~400 gC·m^{-2}·a^{-1}之间的面积是

4 430.87 km²，占全市面积的43.88%，主要分布在台塬地区及秦岭山地区，表现出一定的碳汇能力；NEP在400~600 gC·m⁻²·a⁻¹之间的面积是4 509.49 km²，占全市面积的44.66%，主要分布在渭河平原，该地区主要用地类型为耕地、园地，土壤肥沃，气候适宜，灌溉条件良好，植被生产力水平较高，碳汇能力较大；NEP大于600 gC·m⁻²·a⁻¹的面积是19.99 km²，占全市面积的0.20%，零星分布在周至县境内秦岭山地，碳汇能力最高。整体而言，高值区位于市域西北部平原地区，该区域耕地条件较好，植被生产力比区域内其他自然植被更好，低值区位于市域东南部秦岭山地区域，说明市域内林地的生产力相对较弱。

植被NEP变化速率空间分布图（图1）中可以看出，NEP变化速率大部分介于−15~15 gC·m⁻²·a⁻¹，变化速率为正的区域面积占89.54%，正值区远远大于负值区，表明NEP整体呈增加趋势。从NEP变化显著性检验结果（图2）中可知，显著增加区域面积占比44.48%，主要位于周至县、鄠邑区境内秦岭山地区及骊山丘陵地区，说明植被生长环境得到改善；显著减少区域面积占比2.57%，主要位于城区周边，主要与人口增加、城市扩张对城区周边植被造成破坏存在较大关联；增加和减少不明显区域面积占比52.95%，主要位于平原地区及长安区、蓝田县境内秦岭山地区。

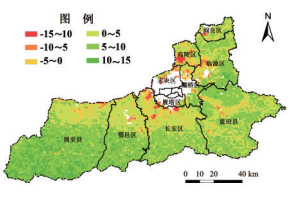


图1 2001–2015年西安市植被NEP变化速率空间分布

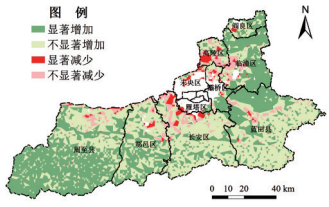


图2 2001–2015年西安市植被NEP变化显著性空间分布

3.2 西安植被碳汇年际变化特征

西安市2001—2015年植被碳汇量多年均平均值为3.55 TgC，呈现年际波动升高趋势，波动范围在2.46~4.18 TgC之间。其中，2001年植被碳汇量最低，仅2.46 TgC，为平均值的69.3%，2010年植被碳汇量最高，达4.18 TgC，超出平均值17.7%。2001年、2002年、2010年、2012年植被碳汇量离散程度较高，其余年份围绕平均值上下浮动，变化较小。植被NEP年均增量为0.11 TgC，表明西安市植被固碳能力增强，也在一定程度上反映了西安市植被覆盖增加、生态环境改善。

3.3 不同生态系统类型植被碳汇变化特征

西安市不同生态系统类型的碳汇总量存在较大差异，农田生态系统最高，均在1.31 TgC以上；其次是森林生态系统，介于0.51~1.31 TgC；草地生态系统、荒漠生态系统、湿地生态系统最低。经统计，农田生态系统和森林生态系统的年均NEP总量共计2.52 TgC，占市域NEP总量的73%，是对西安市生态系统碳汇最具贡献的生态系统，其他三类年均NEP总量为0.95 TgC，占市域NEP总量的27%，碳汇贡献能力较低。

4 植被碳汇影响因素分析

从目前学者的研究成果看，影响碳汇能力的因素主要包括高程、坡度、降水、气温、经纬度、土壤、群落结构、经营管理、人类活动等[13]，本次研究结合西安市区域尺度及数据掌握情况，重点分析高程、坡度、降水、气温与植被碳汇能力的相关关系。

4.1 碳汇能力与地形因子的关系

选取200 m高程和3°坡度为间隔，分别统计区域内NEP均值，分析NEP随高程和坡度的变化特征。植被NEP与高程相关性可划分四阶段：阶段一（600 m以下），西安市最低海拔为336 m，在高程336~600 m区间内，NEP均值相对平稳，呈微弱上升趋势；阶段二（600~1600 m），缓慢下降，高程每升高100 m，NEP均值减少11.8 gC·m⁻²·a⁻¹；阶段三（1 600~3 200 m），平稳上升阶段，高程每升高100 m，NEP均值增加6.9 gC·m⁻²·a⁻¹；阶段四（3 200 m以上），急剧下降，高程每升高100 m，NEP均值减少31 gC·m⁻²·a⁻¹。随着海拔上升，NEP均值变化呈现“相对平稳–缓慢下降–平稳上升–急剧下降”的变化特征。由此可见，研究区内，中低海拔区域植被碳汇能力受高程因素影响较小，高海拔区域植被碳汇能力受高程因素影响较大。

根据植被NEP与坡度的相关性（图3）可知：0~3°时，NEP均值最大；6~21°时，NEP均值呈现微弱下降趋势，坡度每增加1°，NEP均值减少3.5 gC·m⁻²·a⁻¹；21~51°时，NEP均值呈现微弱上升趋势，坡度每增加1°，NEP均值增加1.5 gC·m⁻²·a⁻¹。总体而言，与高程相比，NEP均值受坡度因素影响较小。

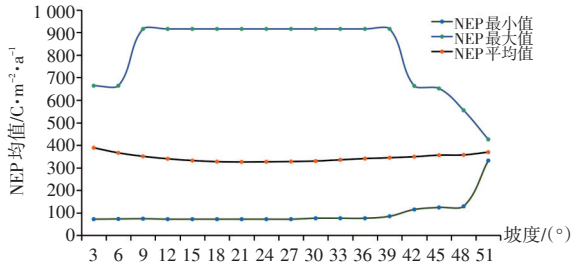


图3 2001–2015年西安市植被NEP均值与坡度的关系

4.2　碳汇能力与气候因子的关系

植被生长与气候变化密切相关，二者之间的相关关系是国内外全球变化研究的主要内容[14]，为定量分析气候因子对植被碳汇的影响，逐栅格计算2001—2015年植被NEP与降水、气温之间的相关系数。

植被NEP与降水的相关性分析显示（图4），两者相关系数介于–0.81~0.99之间，统计结果表明植被NEP对降水因子的相应表现出显著的空间差异性，呈正相关的区域占总面积的80.7%，主要分布在秦岭山区、骊山丘陵地区，主要原因是该区域海拔较高，植被类型多为林地，降水对其影响植被NEP影响较大；呈负相关的区域主要位于平原地区，植被类型多为耕地、园地，具有相对完善的灌溉设施，降水对其植被NEP影响较小。该区域有4.05%的区域通过 $P<0.05$ 显著性检验。整体而言，植被碳汇与降水呈正相关性特征。分析植被NEP与气温的相关性可知（图5），两者相关系数在–0.71~0.48之间，呈正相关区域占研究区规模的25.7%，主要分布在西北部平原地区及东部台塬地区、骊山丘陵地区，呈负相关区域占研究区规模的74.3%，集中分布在秦岭山地及东北部平原地区。该区域均未通过 $P<0.05$ 显著性检验。整体而言，植被碳汇与气温呈负相关性特征。

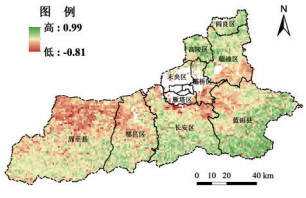


图4　2001–2015年植被NEP与降水相关系数空间分布

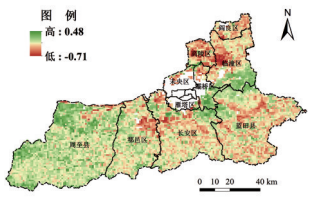


图5　2001–2015年植被NEP与气温相关系数空间分布

5　讨论与结论

5.1　讨　论

1）统计分析西安市植被碳汇量表明，如果不考虑其他自然和人为干扰条件影响，西安市除建设用地之外的所有用地均属于碳汇用地。

2）西安市2001—2015年植被NEP整体呈增加趋势，但远低于全国平均增速[15]。

3）从地形地貌特征来看，植被NEP与高程、坡度间存在阶段性变化特征，且高程影响幅度较大。

4）本研究发现NEP整体与降水呈正相关，与气温呈负相关关系，但局部存在较大差异。

5.2　结　论

植被碳汇是一个长期、动态的变化过程，本文研究了西安市2001—2015年共15 a的NEP变化，能否准确反映西安市植被生态系统碳汇能力规律有待商榷，以后研究中可延长时间段，以反映更长时间尺度的变化情况。影响碳汇的因素众多，关系错综复杂，本次研究仅从高程、坡度、降水、气温等方面初步分析了影响碳汇的因素，除此之外还有很多因子对NEP有潜在影响，比如人类活动、管理方式，今后研究中可以加入。另外，不同的数据来源、不同的模型计算方法会对估算结果造成较大差异，因此采用科学性更高的数据、多模型对比选择最优估算模型也是后续研究的重点内容。

参考文献

[1]　熊光宏. 关中降水与气温时空动态演变特征研究[D]. 西安:长安大学,2015

[2]　康铭敏. 西安市碳排放峰值预测及控制策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020

[3]　李秀娟,周涛,何学兆. NPP驱增长驱动下的中国森林生态系统碳汇[J]. 自然资源学报,2009(3):491-497

[4]　Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. Berlin Heidelberg : Springer,1975

[5]　汤洁,蒋毅,李昭阳,等. 基于CASA模型的吉林西部植被净初级生产力及植被碳汇量估测[J]. 干旱区资源与环境,2013(4):1-7

[6]　章金城,周文佐. 2006-2015年秦巴山区植被光合有效辐射吸收比例的时空变化特征[J]. 生态学杂志,2019(5):1 453-1 463

[7]　李传华,周敏,王玉涛,等. 西北干旱区植被净初级生产力年际变化及其时空和气候因子的贡献:以河西走廊为例[J]. 生态学杂志,2020,39(10):3 265-3 275

[8]　裴志永,周才平,欧阳华,等. 青藏高原高寒草原区域碳估测[J]. 地理研究,2010,30(1):102-110

[9]　袁倩文. 增汇目标下北部湾城市群碳汇用地格局优化研究[D]. 南宁:广西大学,2018

[10]　许明子. 基于C-FIX模型的秦岭山区森林生态系统NPP、NEP时空模拟研究[D]. 西安:西北大学,2016

[11]　刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等. 青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及驱动因素[J]. 生态学报,2020,40(15):5 306-5 317

[12]　阿斯姆古丽·阿纳耶提,师庆东,刘曼,等. 长时间序列遥感数据回归分析支持下的植被变化分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版),2014,31(3):341-344

[13]　石志华. 基于CASA与GSMSR模型的陕西省植被碳汇时空模拟及影响因素研究[D]. 西安:西北农林科技大学,2015

[14]　王海云,陈媛,于洋. 基于地理国情普查的佛山植被碳汇能力评估[J]. 地理空间信息,2016,14(7):30-38

[15]　刘刚,孙睿,肖志强,等. 2001-2014年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系[J]. 生态学报,2017,37(15):4 936-4 945