

DOI: 10.5846/stxb201706201119

孙滨峰, 赵红, 逯非, 王效科. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(14): - .

Sun B F, Zhao H, Lu F, Wang X K. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration in the Northeastern Forest Regions and its impact factors analysis. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): - .

东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素

孙滨峰^{1,*}, 赵 红², 逯 非³, 王效科³

1 江西省农业科学院农业工程研究所, 南昌 330200

2 江西省交通科学研究院, 南昌 330200

3 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 东北森林带作为国家主体生态区划“两屏三带”国家生态安全格局中的重要组成部分, 在全球碳平衡中发挥着重要的碳汇作用。以东北森林带为研究区域, 采用净生态系统生产力 (NEP) 评估其森林固碳服务, 通过 Anselin Local Moran's I 算法识别固碳服务的“热点”、“冷点”和“异常点”, 并分析探讨其空间格局与影响因素。结果表明: (1) 东北森林带森林生态系统整体上是碳汇。2014 年东北森林带森林固碳总量为 36.41 Tg C a⁻¹, 单位面积固碳量为 89.57 gC m⁻² a⁻¹。(2) 固碳服务的热点区主要分布在大兴安岭北部和长白山中北部, 冷点区主要分布在大兴安岭东部、小兴安岭和长白山南部, 固碳服务的高值异常区域主要分布在森林边缘的农林交错带, 低值异常区域主要分布在人为干扰严重的城市蔓延区。(3) 东北森林带森林生态系统整体上受人为因素的影响小, 其固碳服务与 NDVI 显著正相关。(4) 城市扩张等人为干扰是固碳服务异常降低的根本原因, 植被本身生长状况不佳和较高的温度是导致固碳服务的异常降低的重要影响因素。

关键词: 固碳服务; 净生态系统生产力 (NEP); 森林生态系统服务; Anselin Local Moran's I 算法; 东北森林带

Spatial and temporal patterns of carbon sequestration in the Northeastern Forest Regions and its impact factors analysis

SUN Binfeng^{1,*}, ZHAO Hong², LU Fei³, WANG Xiaoke³

1 Institute of Agricultural Engineering, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China

2 Transportation Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330020, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The northeastern forest zone (NFZ) is a vital part of national strategic landscape of ecological security-Two Barriers and Three Belts of China, which has significant implications for carbon sink in global carbon balance. This study used net ecosystem production (NEP) as an indicator to evaluate carbon sequestration by forests in NFZ. Anselin Local Moran's I analysis was conducted to discern hotspots, coldspots, and outliers. The effects of natural and anthropogenic factors on carbon sequestration were explored by stepwise regression analysis and path analysis. Results indicated: (1) Overall, the forest ecosystem in NFZ acted as a carbon sink. The total amount of sequestered carbon was 36.41 Tg C a⁻¹, with an average of 89.57 g C m⁻² a⁻¹. (2) Hotspots of NEP were mainly located in the northern part of the Daxing'an Mountains, the northern and central parts of the Changbai Mountains. Coldspots of NEP were mainly located in the eastern part of the

基金项目: 江西省农业科学院创新基金 (2017CBS001); 国家重点研发计划项目子课题 (2016YFC0503403-2)

收稿日期: 2017-06-20; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: binfengsun@sina.com

Daxing'an Mountains, the Xiaoxing'an Mountains, and the southern part of the Changbai Mountains. Outliers of high NEP were mainly distributed in Agroforestry ecotones, while outliers of low NEP were mainly distributed in the areas of urban sprawl. (3) NEP of forest ecosystems in the northeastern forest zone positively correlated with NDVI; no significant relationships between anthropogenic factors and NEP were found. (4) Abnormally low values of NEP were primarily caused by anthropogenic factors (i.e., expansion of urban area). Simultaneously, a state of poor vegetation growth, as well as higher environmental temperature, could also prompt a decrease in carbon sequestration by forest patches.

Key Words: carbon sequestration; net ecosystem production (NEP); forest ecosystem services; Anselin Local Moran's I; Northeastern Forest Regions (NFZ)

生态系统的固碳服务是生态系统通过植被、土壤动物和微生物固定碳素的服务,取决于碳输入过程和碳输出过程。碳输入过程通过净光合作用实现,碳输出主要是生态系统中土壤和动物的异养呼吸过程以及凋落物矿质化过程。生态系统固碳服务是生态系统服务研究的热点问题^[1-3],当前学界从生态系统服务管理的角度,对固碳服务的空间分布格局和影响机制开展了广泛的研究,并取得了较好的研究成果^[4-7]。然而,这些研究主要关注于固碳服务的“热点”-“冷点”分析,往往忽略了对空间异常点/异常区域的研究。地理现象的空间异常研究对于揭示其变化和发展的特殊规律具有重要意义,是当前空间数据挖掘的重要内容^[8],因此,开展固碳服务的空间格局研究,识别其空间异常区域,对于全面揭示固碳服务驱动机制具有重要的理论和现实意义。

森林生态系统是陆地生态系统中最重要碳库,目前全球森林的碳储量约为 $861 \pm 66 \text{ Pg C}^{[9]}$,每年固碳量约占全球陆地生物固碳量的 $2/3^{[10]}$ 。东北森林具有高碳储存密度、长时间滞留的特点,其碳储量平均为 $12.37 \text{ Pg C}^{[11]}$,是我国固碳研究的重要区域^[12]。东北森林带作为国家主体生态区划“两屏三带”国家生态安全格局中的重要组成部分,是东北地区具有高保护价值的森林区域^[13],在全球碳平衡中发挥着重要的碳吸收汇作用,科学的评估东北森林带森林生态系统固碳服务的分布特征和影响因素,是研究森林碳汇潜力和应对气候变化的关键,对分析和制定区域生态管理政策具有重要现实意义。本文通过构建 NEP 计算模型,评价东北森林带森林生态系统固碳服务,深入分析其空间分布的“热点”-“冷点”-“异常点”及其影响因素,以期对东北森林带森林保护和固碳服务的保育与管理提供科学指导。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

东北森林带的范围是根据东北地区具有高保护价值的森林格局^[14-15],结合县级行政边界确定(图 1),位于 118.80° — 134.37°E 、 40.87° — 53.56°N 之间,总面积约为 61.60 万 km^2 ,其中森林面积约 40 万 km^2 ,占总面积的 66%。东北森林带作是我国重要的木材生产基地,土地利用以森林为主,植被覆盖度、生产力水平高,生态系统结构稳定^[13]。作为国家主体生态区划“两屏三带”国家生态安全格局中的重要组成部分,东北森林带发挥着东北地区生态安全屏障作用,对我国乃至全球生态环境的影响至关重要。

1.2 研究数据

本研究使用的降雨、温度等气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);DEM(30m 分辨率)来自

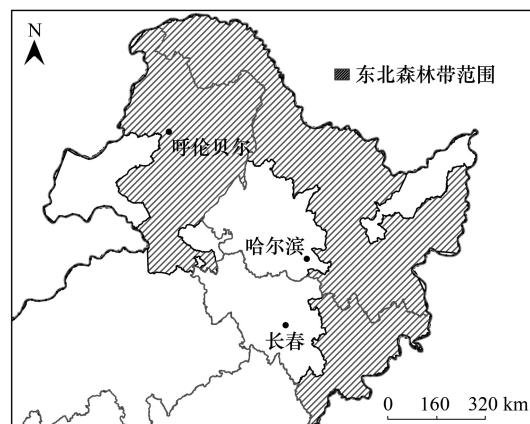


图 1 东北森林带范围

Fig.1 Area of Northeastern Forest Regions

地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);土壤数据来自中国土壤属性数据库(<http://globalchange.bnu.edu.cn/research/data>);2014 年的土地利用数据来源于中国科学院遥感与数字地球研究所。

1.3 研究方法

森林生态系统的 NEP 可由植被净初级生产力(NPP)与土壤异养呼吸(R_h)差值表示。模型形式如下:

$$NEP = NPP - R_h \quad (1)$$

式中,NPP 为 MODIS MOD17A3 数据。MOD17A3 是由 BIOME-BGC 模型计算出的全球陆地植被净初级生产力年际变化数据。

R_h 的计算采用谢薇等^[16]的计算模型(公式 3)。

$$R_h = 0.592 \times R_s^{0.714} \quad (3)$$

$$R_s = R_0 e^{Q \times T} \times \frac{P}{P + K} \times \frac{SOC}{SOC + M} \quad (4)$$

式中, R_s 为年土壤呼吸速率($\text{kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),根据 Chen 等^[17]提出的土壤呼吸计算方法计算(公式 4), R_0 为 0°C 时无降水和碳储量限制时年土壤呼吸速率($\text{kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), Q 为土壤呼吸与温度之间的指数方程关系的系数, T 为年平均温度, P 为年降水量, K 为表征土壤呼吸与年降水量之间“Michaelis-Menten”方程关系的半饱和常数, SOC 表层土壤(0—20 cm)有机碳储量, M 为表征土壤呼吸与有机碳储量之间“Michaelis-Menten”方程关系的半饱和常数^[18-19]。

1.4 数据分析

本研究采用 Anselin Local Moran's I 算法(公式 5)识别固碳服务的“热点”-“冷点”-“异常点”,并分析其空间分布特征。

$$I_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{X}) \quad (5)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (6)$$

式中, x_i 是要素 i 的一个属性,是该属性的均值, w_{ij} 是要素 i, j 的空间权重, n 为要素总数量。

Anselin Local Moran's I 算法的结果包括 HH、HL、LH、LL 和不显著的聚类区域 5 个子集。其中,HH 表示具有统计学意义的高值聚类区,即“热点”;HL 表示由低值区域围绕的高值像元,即高值“异常点”;LH 表示由高值区域围绕的低值像元,即低值“异常点”;LL 表示统计学意义的低值聚类区,即“冷点”。

驱动因子分析在 R 软件中完成。以像元为统计单元,采用逐步回归分析建立 NEP 对各影响因素的多元回归方程,识别显著影响因子,再由通径分析确定各因子对固碳异常区域的影响程度和相对重要性。所选择的因子主要有年降水(P)、年均温度(T)、海拔(E)、NDVI、坡度(S)、距离人工表面的最近距离(D)和最近人工表面斑块的面积(A)。 S 、 E 、 D 和 A 能够反映人为干扰, D 和 A 也反映了城市化对森林固碳服务的影响。 S 、 D 越大,人为干扰就越小, A 越大,人为干扰强度就越大。

2 结果与分析

2.1 固碳服务的空间特性

为了验证模型的模拟效果,本研究采用研究范围内 11 个实测点地面 NEP 值对模型模拟结果进行验证(图 2),11 个实测点 NEP 均值为 $160.76 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,根据实测点坐标提取的模拟结果为 $166.67 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,拟合的一元线性方程的 R^2 为 0.847,说明模型模拟结果与实测值具有较高的吻合度。同时,本研究将模型模拟的 NEP 结果与已有研究进行了比较,结果表明,东北森林带 NEP 均值为 $89.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,略高于李洁等^[20]对该区域 NEP 的估算结果,低于张璐等^[21]和王萍^[22]对该区域 NEP 的估算结果,且空间格局与上述研究结果

一致,这表明本研究 NEP 模拟值能较好地反映东北森林带森林生态系统的固碳服务。

根据 NEP 计算结果,2014 年东北森林带森林生态系统总固碳量为 $36.41 \text{ Tg C a}^{-1}$,整体上表现为碳汇^[23], NEP 空间分布见图 3a。通过 Anselin Local Moran's I 聚类分析获取 NEP 空间聚类分布(图 3b)。图 3b 中,东北森林带森林固碳的“热点”区域主要分布在大兴安岭北部和长白山中北部,其 NEP 均值为 $201.19 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,明显高于其他区域,是固碳服务保护的重要生态区域。固碳服务的“冷点”区域包括大兴安岭东部、小兴安岭和长白山南部,其 NEP 均值为 $-4.66 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中小兴安岭是碳汇,其他区域为碳源。NEP 低值异常点/区域主要分布在长白山东部、人为干扰严重的居民区边缘,NEP 均值为 $33.63 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,多为城市的蔓延区。NEP 高值异常点/异常区域主要分布在森林边缘的农林交错带,NEP 均值为 $197.67 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,受到植树活动和施肥的影响,其 NEP 值高于临近森林斑块。

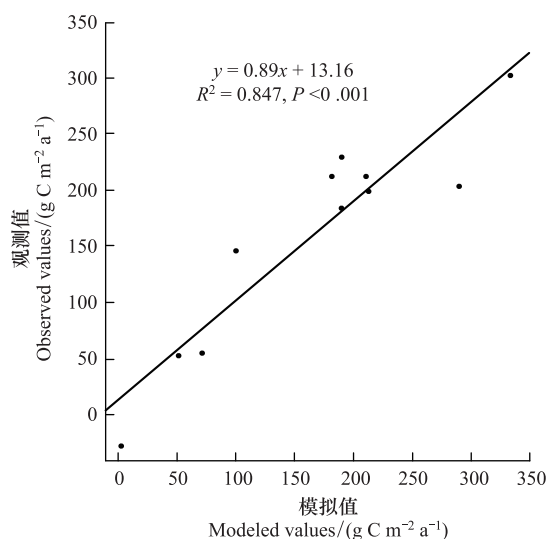


图 2 NEP 模拟值与观测值比较

Fig.2 Comparison of modeled NEP with the observed values

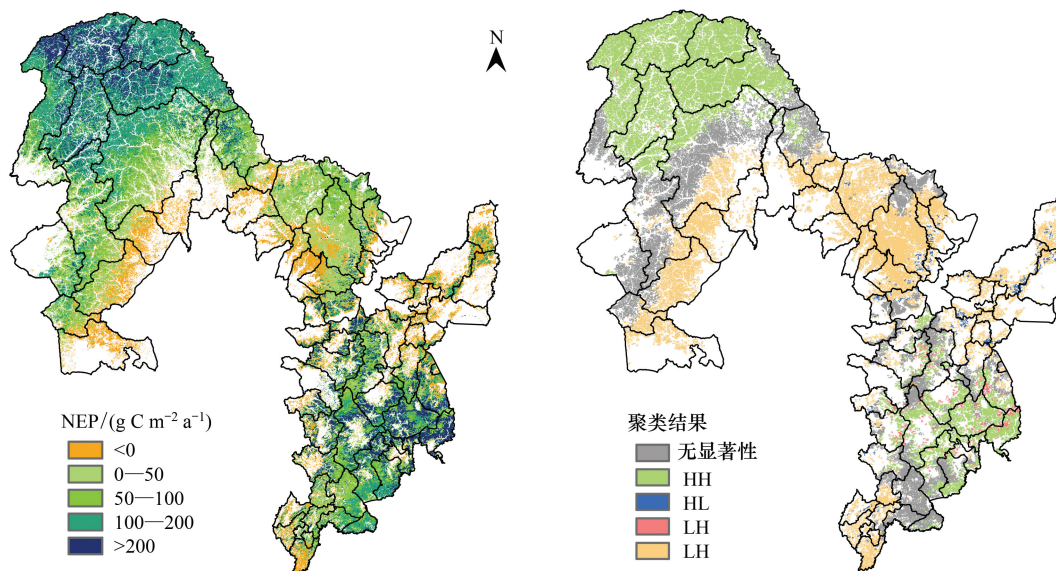


图 3 东北森林带森林 NEP 分布和 Anselin Local Moran's I 聚类结果

Fig.3 NEP and Anselin Local Moran's I of Northeastern Forest Regions

2.2 影响因素分析

通过逐步回归分析得到 NEP 与各影响因素的统计回归方程($r^2=0.51, p<0.0001$),见公式 7。

$$\text{NEP} = -12.66 \times T - 0.23 \times P + 452.52 \times \text{NDVI} - 131.43 \quad (7)$$

从总体上看,所选择的影响因子解释了东北森林带的 NEP 变化的 0.51,其中温度、降水、NDVI 对 NEP 变化的影响显著($P<0.001$),其他因素对 NEP 影响不显著($P>0.05$),在逐步回归过程中被剔除,说明东北森林带森林固碳服务主要受自然因素影响。本研究发现东北森林带 NEP 与降水和温度均呈现显著负相关,与 NDVI 显著正相关(公式 7)。NEP 在空间上与降水负相关,与赵俊芳等^[11]的研究相一致。NPP 和 R_h 共同作用决定了 NEP 的空间特征,降水和温度导致了 NPP 的增加,同时也促进了土壤的异养呼吸作用^[24]。为此,随

机选择 200 个样点,建立 NPP、 R_h 和降水的散点图(图 4),随着降水的增加,NPP 和 R_h 均呈现上升趋势,但 R_h 与降水的斜率大于 NPP 与降水的斜率,降水增加会导致 NEP 的减少。NEP 与温度负相关,结果与李洁等研究相一致^[20],NPP 和 R_h 共同决定了 NEP 的变化,温度升高促进 R_h 增加,从而导致 NEP 的减少^[20]。

NDVI 可以较好地反映植被的生长状况,而植被的生长状况对于生态系统的固碳能力有重要的影响^[25]。本研究发现森林生态系统的 NEP 与 NDVI 呈现正相关关系,植被生长状况对其光合作用具有重要的影响,植被生长状况越良好,NEP 就越高。东北森林带森林生态系统的固碳格局受到植被生长状况的影响。

2.2.1 NEP 热点/冷点区影响因素分析

根据 Anselin Local Moran's I 聚类分析的结果,本文分别对大兴安岭北部、长白山中北部、大兴安岭东部、小兴安岭和长白山南部采用逐步回归分析,识别不同区域驱动因子对 NEP 的影响,分析结果见表 1。

大兴安岭北部和长白山中北部是东北森林带森林 NEP 的热点区域。通过逐步回归分析得到 NEP 与影响因子的回归方程 ($R^2 = 0.32, P < 0.001$ 和 $R^2 = 0.60, P < 0.001$),分别解释了 NEP 变化的 0.32 和 0.60。年降水、年均温度和 NDVI 是大兴安岭北部 NEP 的显著影响因子,其他因素对该区域 NEP 的影响不显著。年均温度是长白山中北部 NEP 的显著影响因子,其他因素对该区域 NEP 的影响不显著。

大兴安岭东部、小兴安岭和长白山南部是森林 NEP 的冷点区域。所选的影响因子分别解释了 NEP 变化的 0.62、0.58 和 0.46,3 个区域的显著性影响因子分别为年均温度、NDVI,年降水、年均温度、NDVI 和 NDVI。

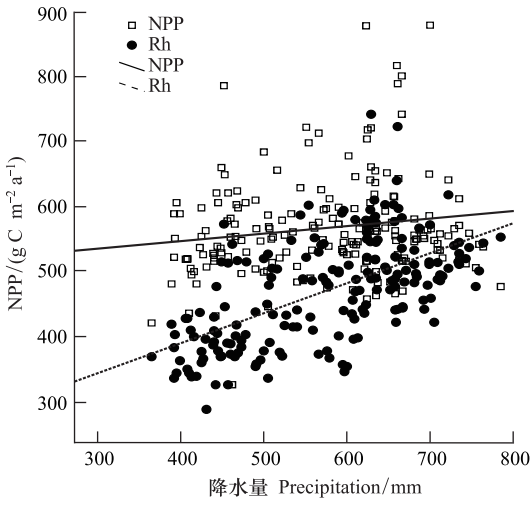


图 4 森林 NPP 和 R_h 与降水散点图
Fig. 4 NEP and Anselin Local Moran's I of Northeastern Forest Regions

表 1 各区域逐步回归分析结果
Table 1 Result of stepwise regression analysis

区域 Region	冷点/热点 Hotspot/coldspot	判定系数 R^2	回归方程 Regression equation	显著影响因子 Significant factors
大兴安岭北部	NEP 热点区	0.32	$NEP = -9.48 \times T - 0.21 \times P + 195.28 \times NDVI + 90.13$	年降水、年均温度、NDVI
长白山中北部	NEP 热点区	0.60	$NEP = 14.15 \times T + 194.30$	年均温度
大兴安岭东部	NEP 冷点区	0.62	$NEP = -21.76 \times T + 448.74 \times NDVI - 331.88$	年均温度、NDVI
小兴安岭	NEP 冷点区	0.58	$NEP = -0.17P - 23.35 \times T + 448.95 \times NDVI - 224.68$	年降水、年均温度、NDVI
长白山南部	NEP 冷点区	0.46	$NEP = 551.10 \times NDVI - 473.80$	NDVI

T:年均温度, Temperature; P:年降水, Precipitation; NDVI:归一化植被指数, Normalized Difference Vegetation Index

大兴安岭北部和小兴安岭 NEP 与降水呈现负相关。积雪融水是该区域植被生长所需水分的重要来源,降水不是植被生长所必需的因子,反而会增加大气中的云层覆盖,减少日照时数和太阳辐射,进而影响植被的光合作用^[26]。大兴安岭北部和小兴安岭 NEP 与温度呈现负相关,温度升高促进了土壤的呼吸作用,导致 NEP 的降低^[20]。东部长白山区域,森林生态系统固碳服务与温度、NDVI 等因素影响,尤其是长白山南部区域,NDVI 对森林固碳影响显著,说明该区域森林固碳受到植被生长状况的影响,植被生长的越好,其固碳能力就越强。

不同区域固碳的主要影响因子不同,除了长白山中北部,其他区域 NEP 主要与 NDVI 正相关。各区域的 NEP 与 D、A 和 S 均无显著相关性,说明人为干扰不是各区域森林生态系统的显著影响因素,森林生态系统的固碳服务主要受自然因素影响。

2.2.2 异常点 NEP 影响因素分析

NEP 高值异常点主要分布在森林边缘的农林交错带,逐步回归分析的结果显示,其 NEP 与所选影响因素无显著相关性,需要开展进一步研究。

NEP 低值异常点是本研究的主要关注点。通过逐步回归分析得到低值异常点 NEP 与自然和人为因素的统计回归方程($R^2=0.61, P<0.001$),见公式 8。

$$\text{NEP} = -3.78 \times T - 0.31 \times A - 0.78 \times S + 0.38 \times D + 211.17 \times \text{NDVI} - 133.92 \quad (8)$$

所选择的影响因子解释了低值异常点 NEP 变化的 0.61,其中温度、坡度、NDVI、距离人工表面的最近距离(D)和最近人工表面斑块面积(A)对 NEP 的影响显著($P<0.001$),人为干扰(S、D 和 A)可以解释 NEP 变化的 0.34,降水和海拔对 NEP 的影响不显著($P>0.05$)。在逐步回归过程中被剔除。

各影响因子与 NEP 的相关性依次为: $D>\text{NDVI}>A>T>E>S>P$ (图 5)。各影响因子之间存在较强的相关性,回归分析存在较强的共线性,例如距离人工表面的最近距离(D)和最近人工表面斑块面积(A)两个影响因子间具有较高相关性($r=-0.33$),海拔与坡度间具有较高的相关性($r=-0.91$),采用王淑芳等^[27]的分析方法,通过标准化回归系数的方法计算通径系数,并将相关系数分解为直接通径系数与间接通径系数的代数和,能直观地反映各因子对低值异常点 NEP 的影响作用。

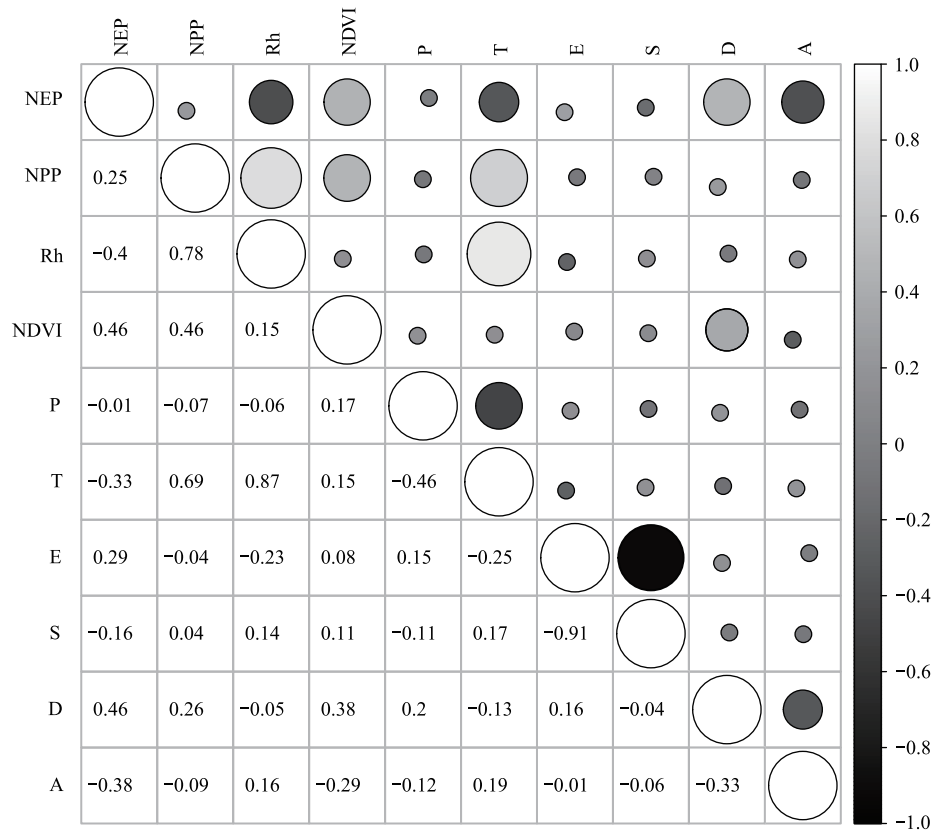


图 5 低值异常点 NEP 与影响因子相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between NEP of HL and factors

NEP: 净生态系统生产力, Net ecosystem production; NPP: 净初级生产力, Net primary production; R_h : 土壤异养呼吸, Soil heterotrophic respiration; NDVI: 归一化植被指数, Normalized Difference Vegetation Index; P: 年降水, Precipitation; T: 年均温度, Temperature; E: 海拔, Elevation; S: 坡度, Slope; D: 距离人工表面的最近距离, Distance; A: 最近人工表面斑块面积, Area

通径分析的结果表明(表 2),在影响 NEP 的显著因子中,NDVI 的直接通径系数最高,NDVI 对 NEP 的影响起主导作用,说明植被本身情况不佳是导致低值异常点 NEP 的主要因素。其次是温度,表现为负效应。间接通径系数最大的是 T,主要是通过 NDVI 对 NEP 起正效应,其次是 NDVI 和 S,表现为正效应。

表 2 NEP 与影响因子相关系数的分解

Table 2 Decomposition of correlation coefficients between NEP and influence factors

影响因子 Influence factors	与 NEP 的相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficients	间接通径系数 Indirect path coefficients					合计
			D	NDVI	A	T	S	
D	0.46	0.21	0	0.08	-0.05	-0.04	-0.01	-0.02
NDVI	0.46	0.39	0.04	0	-0.04	0.05	0.02	0.07
A	-0.38	0.15	-0.07	0.06	0	0.06	-0.01	0.04
T	-0.33	0.31	-0.03	0.06	0.03	0	0.03	0.09
S	0.29	0.16	-0.01	0.04	-0.01	0.05	0	0.07

D:距离人工表面的最近距离,Distance;NDVI:归一化植被指数,Normalized Difference Vegetation Index;A:最近人工表面斑块的面积,Area;T:年均温度,Temperature;S:坡度,Slope

D、A 和 S 反映了人为因素对低值异常点 NEP 的影响。低值异常点 NEP 与 S、D 呈正相关,与 A 呈负相关,说明人为干扰越大低值异常点的 NEP 就越低,人为干扰解释了固碳低值异常点 NEP 变化的 0.34。其总的通径系数 0.61,大于植被本身作用(总通径系数=0.46)和自然因素的作用(总通径系数=0.40)。因此人为因素是固碳的异常变化的根本原因^[28]。多项研究证明,城市扩张导致了其周边森林景观的破碎化,改变了城市周边森林的植被类型、种类组成和结构^[29],导致森林生态系统的固碳服务的降低^[7]。A 和 D 可以反映城市扩张对森林固碳的影响。本研究中,A 越大、D 越小,森林系统受到城市扩张影响越大,NEP 值就越小,因此,城市化是东北森林带森林生态系统固碳异常变化的根本原因。

此外,本研究所选择的影响因子对 NEP 低值异常点的决定系数为 0.61,剩余因子的通径系数 $e=0.62$,说明其他没有考虑到的影响因素也会导致 NEP 的异常低值,如森林管理^[30]、CO₂浓度^[31-32]、病虫害害^[24]等。同时,本研究也缺乏对不同人为干扰类型对固碳服务影响的分析,需做进一步的研究。

3 结论与讨论

本文采用 NEP 评估东北森林带森林生态系统固碳服务,分析讨论其空间格局及其与自然、人为因素的关系,结论如下:

(1)2014 年东北森林带森林固碳总量为 36.41 Tg C a⁻¹,单位面积固碳量为 89.57 g C m⁻² a⁻¹,东北森林带森林生态系统整体上是碳汇。

(2)固碳的热点区主要分布在大兴安岭北部和长白山中北部,固碳的冷点区主要分布在大兴安岭东部、小兴安岭和长白山南部。固碳服务的高值异常区域主要分布在森林边缘的农林交错带,固碳低值异常区域主要分布在人为干扰严重的城市蔓延区。

(3)东北森林带固碳服务整体上受人为因素影响较小,NEP 与年降水和年均温度呈负相关,与 NDVI 正相关,植被本身状况是区域固碳格局形成的最重要原因。大兴安岭北部、长白山南部和小兴安岭地区,NEP 与 NDVI 正相关,长白山中北部,温度是 NEP 的决定因素。

(4)固碳的低值异常点受到温度、坡度、NDVI、距离人工表面的最近距离和最近人工表面斑块的面积的显著影响。距离人工表面的最近距离与低值异常点 NEP 相关性最大,NDVI 的通径系数最大,人为活动解释了低值异常点 NEP 变化的 0.34,总通径系数为 0.61,大于植被本身和自然因素的总通径系数。研究结果表明人为因素是固碳异常变化的根本原因,植被本身生长状况不佳和较高的温度是导致固碳服务的异常降低的主要因素。

当前生态学界对生态服务的空间格局研究往往采用“热点”-“冷点”分析,而忽略了生态服务的空间异常点。生态系统服务的空间异常探测对于揭示其变化、发展的特殊规律具有重要意义。地理现象的空间异常研究是当前空间数据挖掘的研究热点^[33],因此,笔者认为生态系统服务空间异常分析必将引起生态学家的关注。本研究采用 Anselin Local Moran's I 算法,识别森林生态系统固碳服务具有统计学意义的“热点”、“冷点”和“异常点”,并分析人为干扰对固碳服务的影响,结果表明固碳低值异常点主要分布在人为干扰严重的城市

蔓延区,高值异常点主要分布在森林边缘的农林过渡带,人为干扰导致了森林生态系统固碳服务的异常变化。因此,加强东北森林带森林保护,减少人为干扰对固碳服务的负影响,对于固碳服务的保育与管理具有重要的现实意义。

参考文献(References):

- [1] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846.
- [2] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, Fisher B, Green R E, Lehner B, Malcolm T R, Ricketts T H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495-9500.
- [3] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [4] Deng L, Shanguan Z P, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7039.
- [5] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, Zhang C H, Wang J, Yue Y M, Qi X K. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of vegetation carbon sequestration in the karst area of northwest Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 5307-5317.
- [6] 马长欣, 刘建军, 康博文, 孙尚华, 任军辉. 1999—2003 年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估. *生态学报*, 2010, 30(6): 1412-1422.
- [7] 庞瑞, 顾峰雪, 张远东, 侯振宏, 刘世荣. 西南高山地区净生态系统生产力时空动态. *生态学报*, 2012, 32(24): 7844-7856.
- [8] 李德仁, 王树良, 李德毅, 王新洲. 论空间数据挖掘和知识发现的理论与方法. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2002, 27(3): 221-233.
- [9] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [10] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *BioScience*, 1981, 31(1): 29-33.
- [11] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. *生态学报*, 2008, 28(1): 92-102.
- [12] 刘军会, 高吉喜, 王文杰, 马苏, 刘洋. 我国典型陆地生态系统固碳重要区范围界定. *环境科学研究*, 2016, 29(12): 1782-1789.
- [13] 孙滨峰. 东北森林带生态系统格局、质量、服务功能和胁迫十年变化研究(2000-2010)[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [14] 董珂, 邓华峰. 高保护价值森林理论研究和应用现状及发展趋势. *世界林业研究*, 2007, 20(5): 7-11.
- [15] 吴波, 贾子毅. 高保护价值森林的定义与内涵. *世界林业研究*, 2006, 19(1): 6-9.
- [16] 谢薇, 陈书涛, 胡正华. 中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素. *环境科学*, 2014, 35(1): 334-340.
- [17] Chen S T, Huang Y, Zou J W, Shen Q R, Hu Z H, Qin Y M, Chen H S, Pan G X. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 590-605.
- [18] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. *Global Change Biology*, 2010, 8(8): 800-812.
- [19] Janssen P H M, Heuberger P S C. Calibration of process-oriented models. *Ecological Modelling*, 1995, 83(1/2): 55-66.
- [20] 李洁, 张远东, 顾峰雪, 黄玫, 郭瑞, 郝卫平, 夏旭. 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态. *生态学报*, 2014, 34(6): 1490-1502.
- [21] 张璐, 王静, 施润和. 2000—2010 年东北三省碳源汇时空动态遥感研究. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 2015(4): 164-173.
- [22] 王萍. 大小兴安岭森林生态系统碳平衡模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [23] 杨延征, 马元丹, 江洪, 朱求安, 刘金勋, 彭长辉. 基于 IBIS 模型的 1960—2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究. *生态学报*, 2016, 36(13): 3911-3922.
- [24] 于颖. 基于 InTEC 模型东北森林碳源/汇时空分布研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [25] Law B E, Falge E, Gu L, Baldocchi D D, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman A J, Falk M, Fuentes J D, Goldstein A, Granier J A, Grelle A, Hollinger D, Janssens I A, Jarvis P, Jensen N O, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw U. K T, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 97-120.
- [26] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Guo Q H, Henderson M, Ji W, Li Y, Tao S. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference

- vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4401.
- [27] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 环境因素对密云水库上游流域土壤有机碳和全氮含量影响的通径分析. *生态环境学报*, 2014, 23(8): 1378-1383.
- [28] 张金屯, Pickett S T A. 城市化对森林植被、土壤和景观的影响. *生态学报*, 1999, 19(5): 654-658.
- [29] 达良俊, 杨珏, 霍晓丽. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(VII): 上海浦东近自然森林十年间的动态变化及模式优化. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 2011(4): 15-23.
- [30] Noormets A, Epron D, Domec J C, McNulty S G, Fox T, Sun G, King J S. Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: a review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*, 2015, 355: 124-140.
- [31] Peng J, Dan L. Impacts of CO₂ concentration and climate change on the terrestrial carbon flux using six global climate-carbon coupled models. *Ecological Modelling*, 2015, 304: 69-83.
- [32] Zhang Z, Jiang H, Liu J X, Ju W M, Zhang X Y. Effect of heterogeneous atmospheric CO₂ on simulated global carbon budget. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 33-51.
- [33] 邓敏, 刘启亮, 李光强. 采用聚类技术探测空间异常. *遥感学报*, 2010, 14(5): 944-958.