

DOI: 10.5846/stxb202110072771

曹云, 张称意, 孙应龙, 刘昌义, 胡琦, 赵子健, 王晓晨, 潘学标, 王世坤. 2000—2020 年华北地区植被固碳能力时空变化特征及其气象影响分析. 生态学报, 2023, 43(9): 3488–3499.

Cao Y, Zhang C Y, Sun Y L, Liu C Y, Hu Q, Zhao Z J, Wang X C, Pan X B, Wang S K. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration and their responses to climatic factors in North China from 2000 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3488–3499.

2000—2020 年华北地区植被固碳能力时空变化特征及其气象影响分析

曹 云¹, 张称意^{2,*}, 孙应龙¹, 刘昌义³, 胡 琦⁴, 赵子健³, 王晓晨⁴, 潘学标⁴, 王世坤⁵

1 国家气象中心, 北京 100081

2 国家气候中心, 北京 100081

3 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031

4 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

5 黑龙江省大兴安岭地区气象局, 加格达奇 165100

摘要:净生态系统生产力(NEP)是估算植被生态系统碳源/汇的重要指标,开展区域 NEP 时空变化特征分析,对科学评估植被生态系统固碳能力及其气候变化应对措施具有重要意义。研究基于土壤呼吸模型和 TEC 模型,利用 2000—2020 年气象数据和遥感数据,采用线性趋势分析、Hurst 指数和相关分析等统计方法,对华北地区固碳能力时空变化特征、影响因素及其未来变化趋势进行分析。结果表明:2000—2020 年,华北地区年均 NEP 为 228.8 gC/m²,在空间分布上呈现从西北向东南逐步递增的趋势,总体上表现为净固碳。从变化趋势来看,华北地区生态系统的固碳能力总体呈增加趋势,分布面积占比达到 88.8%,达到显著增加趋势的面积比例为 54.5% ($P < 0.05$),其中河北北部、北京北部、山西西北部、山东西部等地 NEP 每年每平方米增加 9.0 gC 以上。华北大部地区 NEP 年际波动较小,有 79.6% 的区域多处于较高稳定、高稳定的等级。从变化趋势来看,华北地区有 84.9% 区域 NEP 具有强持续性,且 NEP 未来仍将持续增加的区域面积占比达到 51.4%。华北地区 NEP 的空间分布和年际变化主要受降水的影响,达到显著相关的区域面积占总面积的 44.7%,但与气温、日照呈弱正相关,而且不同区域相关性差异明显。其中降水影响空间格局差异极为明显,华北中北部 NEP 与降水呈显著正相关,南部呈负相关。

关键词:净生态系统生产力;碳汇;时空分布;变化趋势;气候因子;华北地区

Spatial and temporal patterns of carbon sequestration and their responses to climatic factors in North China from 2000 to 2020

CAO Yun¹, ZHANG Chengyi^{2,*}, SUN Yinglong¹, LIU Changyi³, HU Qi⁴, ZHAO Zijian³, WANG Xiaochen⁴, PAN Xuebiao⁴, WANG Shikun⁵

1 National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2 National Climate Center, Beijing 100081, China

3 Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (GEIDCO), Beijing 100031, China

4 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

5 Meteorological Bureau of Jiagedaqi Region, Heilongjiang Province, Jiagedaqi 165100, China

Abstract: Net ecosystem productivity (NEP) is an important index for estimating carbon source/sink of regional vegetation system. Analyzing the distribution characteristics and changing trend of net ecosystem productivity spatially is of great

基金项目:以清洁能源淡化海水促进生态修复和应对气候变化的可行路径及综合效益研究(SGGEIG00JYJS2000053);国家重点研发计划项目(2019YFC1510204);国家气象中心预报员专项(Y202116)

收稿日期:2021-10-07; 网络出版日期:2022-10-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangchy@cma.cn

significance to scientifically assess carbon sequestration capacity of ecosystems and formulate policies and measures to cope with climate change. Using the soil respiration model and terrestrial ecosystem carbon flux model (TEC model), combined with MODIS and meteorological data, this paper estimated the NEP in North China from 2000 to 2020. And its spatial distribution characteristics and changing trend were analyzed, using methods of linear regression, the Hurst index, coefficient of variation and other methods. Results showed that: from 2000 to 2020, the annual average NEP in North China was about 228.8 gC/m^2 . In spatial distribution, the NEP showed an increasing trend from northwest to southeast, representing carbon sink as a whole. From spatial distribution of change trend, the carbon sequestration capacity of North China ecosystems was increasing, especially in the north of Hebei, the north of Beijing, the northwestern Shanxi, the western Shandong with increase of NEP over 9.0 gC/m^2 . The area of increasing trend with the NEP accounted for 88.8% of the research area, of which 54.5% showed a significantly increasing trend ($P < 0.05$). As for the coefficient of variation (CV), the NEP status in North China presented slight fluctuations with 79.6% of the area in higher stability and the highest stability. From the NEP change trend analysis, 84.9% of the area in North China was persistent in the future. The NEP in 51.4% of the regions will continue to increase in the future. The spatial distribution and interannual variation of the NEP values were mainly influenced by the values of precipitation, of which 44.7% showed a positive correlation with precipitation. The changes of NEP were slightly positively associated with temperature and sunshine. The responses of NEP in North China to the meteorological factors were diverse in spatial difference of the North China, especially differences by the influence of precipitation. There is a significantly positive correlation between NEP and precipitation in the northern part of North China, and a negative correlation in the south.

Key Words: net ecosystem productivity; carbon sink; spatio-temporal dynamics; changing trends; meteorological factors; North China

陆地生态系统固碳能力主要依靠森林、草地、农田等生态系统通过光合作用过程,吸收和固定 CO_2 ,是碳循环过程中相对安全有效的固碳措施^[1-2],尤其陆地生态系统对人为碳排放吸收、碳平衡调节、以及气候变化减缓具有极其重要作用和意义^[3-6]。因而,开展生态系统固碳能力及其对气候变化的响应动态监测评估,成为人类应对气候变化、实现碳中和研究热点^[7-9]。作为陆地生态系统的碳汇/碳源主要指标之一,净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP),代表生态系统的净碳通量,是反映陆地生态系统对气候变化响应的重要指标^[10-12]。在气候变化背景下,生态系统 NEP 对气候变化的敏感性和脆弱性问题,引起研究人员的重视,有关生态系统固碳能力的时空变化及其影响机制研究也日益增多^[1,8,13-15]。目前,主要通过两类方法开展生态系统固碳能力研究,一种利用森林、草地等野外调查观测数据,对生态系统固碳能力进行估算,并进一步分析不同植被类型间碳密度差异^[14,16-18];另一种,利用 CEVSA、IBIS 等不同生态模型的方法,开展碳汇能力时空分布特征及其气候响应的研究^[19-20]。

从全球植被碳汇能力来看,北半球碳库尽管时空分布的变化差异较大,但生态系统碳汇能力显著,是全球陆地植被碳库的重要组成部分之一,其中仅占全球陆地面积的 6.4% 的中国陆地生态系统 CO_2 吸收量,达到全球陆地碳汇的 8%—11%,成为陆地生态碳汇能力及其模式研究的重点区域^[7,21-23]。中国植被生态系统碳储量约为 97.95—118.93 PgC,年均碳汇量为 0.096—0.106 PgC/a,其中森林碳汇能力显著,达到 0.101 PgC/a^[14,22,24]。从多年演变规律来看,中国植被生态系统碳汇能力整体呈增加趋势。特别 2000 年以来,森林、灌木、农田等主要植被类型固碳量均有所提高^[19-20,24]。从气候影响方面来看,温度、降水和太阳辐射是影响生态系统碳汇的重要气象因子,一般充沛的降雨、充足的太阳辐射,加之气温的升高,有利于促进植物生长发育以及碳汇能力的增强^[24]。在全国尺度,温度和降水是影响中国陆地生态系统碳储量及其空间格局主要气候因素,其中 NEP 与降水多呈正相关^[19-20,22]。然而区域尺度 NEP 变化趋势的强度及其影响机制仍存在较大差异^[25],研究显示东北林区 NEP 与年降水和年均温度呈负相关^[10],西南地区 and 青藏高原 NEP 却与年降水量呈正相关^[26-27]。综上所述,不同时期植被固碳能力变化趋势、以及气候因子对 NEP 影响程度,均存在明显时空分布差

异^[23,25,28]。因而,有必要针对区域尺度,结合时空动态演变分析,从多维尺度上来揭示区域生态系统 NEP 变化的气候驱动影响机制。

目前尽管围绕生态系统碳循环已开展大量研究,但是在生态系统固碳领域,我国研究起步较晚、基础相对薄弱,加之我国地形地貌复杂、气候类型多样,导致区域碳汇能力在评估过程中存在着多方面不确定性^[28-30]。以往研究多集中于 NEP 大空间尺度的时空变化探索,在区域碳循环方面的研究相对薄弱,缺乏深入分析^[7,12,31-32]。华北地区由于地处半干旱、半湿润气候带,受大陆性季风气候的影响,年降水量 500—800 mm 不等,属于水资源总量性承载力弱的地区,缺水严重^[35]。而这里又是我国政治、经济、文化中心和主要粮食生产基地,有北京、天津、济南、石家庄、郑州、太原、洛阳等超大城市、大城市多个。遥感监测发现:近年来华北地区的城乡、农村居民点及工交建设用地增加显著,而林地减少;未利用土地面积减少明显^[36]。华北地区地势自西北向东南倾斜,从高山到平原,分布森林、灌丛、草地、农田等多种植被生态系统类型,具有我国北方陆地生态系统的典型分布特征。然而在华北地区,植被固碳功能的时空格局研究相对缺乏、变化特征分析不够细致,从而影响对华北地区碳源/汇的时空分布差异及其影响因素的全面、精细化探索。因此,针对碳循环时空格局变化的复杂性以及评估结果不确定性,有必要对华北区域在气候干旱和土地利用影响下的 NEP 开展定量评估,明确区域 NEP 变化规律及其影响因素,丰富我国陆地生态系统碳循环研究的成果,进一步加强气候背景下固碳功能在不同时空尺度上变化规律的探索^[12,26,33-34]。

本研究采用陆地生态系统碳通量 TEC(Terrestrial Ecosystem Carbon flux model, TEC)模型和土壤呼吸模型,利用 2000—2020 年 MODIS 遥感资料和气象数据,对华北地区植被 NEP 进行了估算,探讨华北六省 NEP 时空分布格局、趋势动态及其对气候变化的响应,深入揭示华北地区植被碳源/汇时空格局及其影响因素差异,以期科学评估区域植被固碳能力、制定气候变化应对措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为华北 6 省(市),包括北京市、天津市、河北省、河南省、山东省和山西省,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,光照充足^[35]。

1.2 数据来源

气象数据,来自国家气象信息中心,选择华北地区记录相对完整的 520 个站点(图 1),2000—2020 年逐日平均气温、日最高(低)气温、日降水量等气象数据。遥感数据,为 NASA 提供 MOD13A3 级植被指数产品,空间分辨率 1 km;省区地图、土地覆盖类型、海拔高程、土壤质地等基础数据来自国家基础地理信息中心和中国科学院南京土壤研究所等单位。

1.2 研究方法

1.2.1 植被 NEP 估算模型

植被生态系统的 NEP 由植被净初级生产力(NPP)与土壤异养呼吸(R_h)差值来计算。计算公式如下:

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

式中,NEP 为净生态系统生产力,NPP 为净初级生产力, R_h 为土壤异养呼吸,以上参数单位均为 gC/m^2 。当 $NEP > 0$,说明植被吸收的碳多于呼吸排放碳,表现为碳汇;反之,则为碳源^[27,36]。

植被净初级生产力(NPP),采用 TEC 模型进行估算,主要公式如下:

$$NPP = GPP - R_g - R_m \quad (2)$$

式中,NPP、GPP、 R_g 和 R_m 分别表示植被净初级生产力、总初级生产力、生长和维持呼吸消耗量;GPP 具体计算方法见参考文献^[37-38]; R_g 、 R_m 具体计算方法见参考文献^[39-40]。

土壤异养呼吸(R_h),采用 Chen 等^[41]建立基于年平均气温、降水量和土壤表层有机碳的土壤呼吸(R_s)模型,以及 Bond-Lamberty 等^[42]建立土壤呼吸与异养呼吸的关系模型,对生态系统 R_h 进行估算,主要公式如下:

$$\ln(R_h) = 1.22 + 0.73 \times \ln(R_s) \quad (3)$$

$$R_s = R_0 e^{QT} \left(\frac{P}{P+K} \right) \left(\frac{SOC}{SOC+\psi} \right) \quad (4)$$

式中, R_h 为土壤异质呼吸, R_s 为土壤呼吸, T 为年平均气温, P 为年降水量, SOC 为土壤表层有机碳, R_0 , Q , K , ψ 为模型参数, 具体计算方法见参考文献^[41—43]。

1.2.2 数据统计分析方法

(1) 趋势分析, 本研究采用一元线性回归方法, 对 2000 年以来华北地区 NEP 等指标变化趋势进行时间序列分析, 以趋势率表示变化趋势的特征。趋势率正负表示增加或减少趋势, 其值的大小反映增加或减少的速率。趋势率计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times X_i) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中, n 是研究时间序列的长度; i 为第 i 年; X_i 表示第 i 年的 NEP; θ_{slope} 为趋势率, 表示指数随时间变化的速率。

(2) 波动分析, 采用变异系数 (Coefficient of Variation, CV), 反映 NEP 等指标年际间波动程度, CV 数值越小, 表示 NEP 变化稳定。并采用几何间隔法将稳定性分为高稳定、较高稳定、中等稳定、较低稳定、低稳定 5 类^[44—46]。CV 计算公式为:

$$CV = \frac{1}{\overline{NEP}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (NEP_i - \overline{NEP})^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中: CV 为变异系数; n 是研究时间序列的长度; i 代表第 i 年; NEP_i 表示第 i 年的 NEP 值; $\overline{NEP}$ 为 NEP 的 n 年平均值。

(3) Hurst 指数, 利用 R/S 分析法计算植被 NEP 的 Hurst 指数, 表明 NEP 时间序列变化趋势的可持续性特征, 具体计算过程参见文献^[47—49]。Hurst 指数 (H 值) 在 0—1 之间, H 值越接近 0, 其反持续性越强, 表示未来趋势与过去趋势呈负相关; 越接近 1, 其持续性越强, 表示未来变化趋势与过去的一致。根据 Hurst 指数的变化定义如下 4 个等级: 强反持续性 ($0 < H \leq 0.35$), 弱反持续性 ($0.35 < H < 0.5$), 弱持续性 ($0.5 < H \leq 0.65$), 强持续性 ($0.65 < H \leq 1$)^[50]。

(4) 相关分析, 采用 Pearson 相关系数, 基于区域像元尺度, 分析 NEP 与气象要素的相关性; 采用 t 检验进行相关显著性检验, $P < 0.05$ 为显著性水平, $P < 0.01$ 为极显著水平。

(5) 聚类分析, 采用 ArcGIS 软件中 Anselin Local Moran's I 模块, 对 NEP 空间分布进行聚类 and 异常值分析, 聚类关系包括高高聚类 (HH)、高低聚类 (HL)、低高聚类 (LH) 和低低聚类 (LL) 以及不显著 (NS) 聚类^[51]。其中, HH, LL 表示具有统计学意义的高值或低值聚类区, 即“热点”、“冷点”; HL, LH 表示高值“异常点”、低值“异常点”^[10]。

在以上数据统计方法中, 趋势分析、波动分析、Hurst 指数、相关分析的算法采用编程实现; 聚类分析和空间分布图, 采用 ArcGIS 软件功能模块实现。

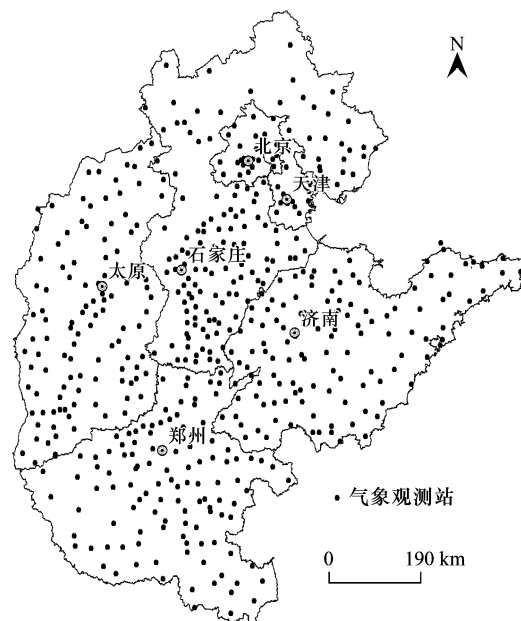


图 1 华北地区气象监测站点分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of the meteorological observation stations in North China

2 结果与分析

2.1 NEP 时空变化趋势特征

2000—2020 年,华北地区年均 NEP 为 228.8 gC/m^2 ,在空间分布上受到地形、植被以及气候等多因素综合影响,总体上呈现从西北向东南逐步递增的趋势。其中河北西北部、山西北部 NEP 相对偏低,不足 100 gC/m^2 ,而河南东南部部分地区 NEP 高达 400 gC/m^2 以上(图 2)。华北地区 NEP 空间聚类结果显示(图 2),有 55.9% 区域 NEP 空间分布存在显著的聚集分布特征,其中 29.0% 区域存在高值聚类(HH),主要分布在山东西部、河南南部以及北京北部等地,该区域 NEP 明显高于其他区域,是华北地区发挥固碳功能的重要生态区域;26.6% 的区域存在低值聚类(LL),主要分布在山西北部、河北北部等地。

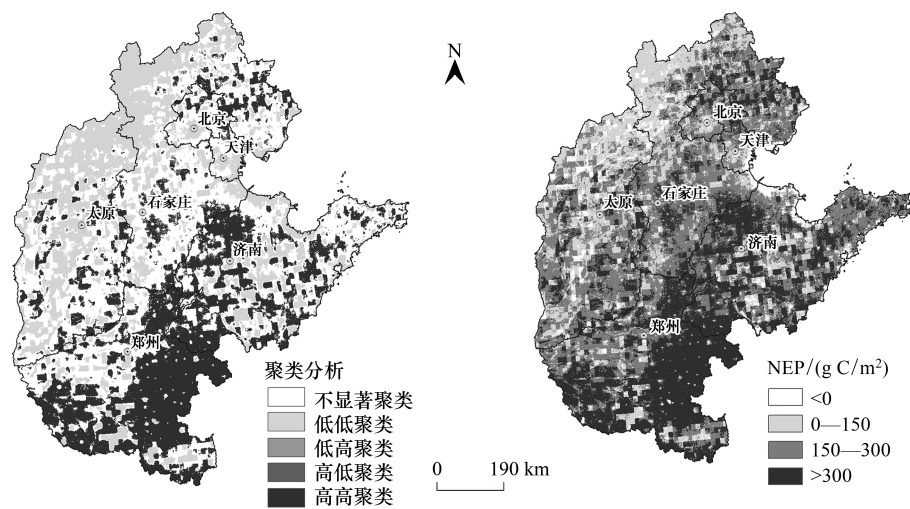


图 2 净生态系统生产力 (NEP) 均值空间分布和 Anselin Local Moran's *I* 聚类结果

Fig.2 Spatial distribution of annual average value of NEP and Anselin Local Moran's *I* in North China

NS、LL、LH、HL、HH 分别表示不显著聚类、低低聚类、低高聚类、高高聚类、高高聚类

2000 年以来,华北地区 NEP 整体呈显著增加趋势($P<0.05$),其中北京、河北、山西、山东 NEP 增加趋势达到显著性水平,但天津、河南 NEP 增加趋势不显著。从分省逐年变化来看(图 3),2000 年以来河南年均 NEP 要明显高于其他省份,多年均值为 318.7 gC/m^2 ,最高值出现在 2015 年,达到 416.8 gC/m^2 ;天津年均 NEP

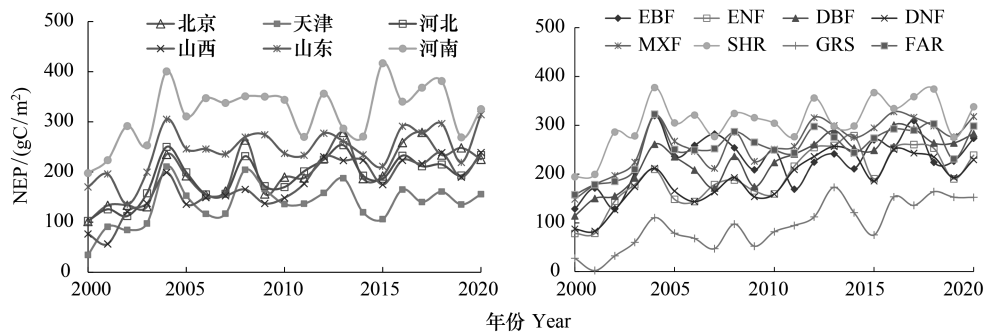


图 3 2000—2020 年华北六省及其不同植被类型 NEP 逐年变化

Fig.3 The change of annual average value of NEP from 2000 to 2020 for six provinces and different vegetation types in North China

ENF:常绿针叶树 Evergreen Needleleaf Forest;EBF:常绿阔叶树 Evergreen Broadleaf Forest;DNF:落叶针叶树 Deciduous Needleleaf Forest;DBF:落叶阔叶树 Deciduous Broadleaf Forest;MXF:混交林 Mixed Forest;SHR:灌丛 Shrublands;FAR:农田 Farmland

最低为 136.8 gC/m^2 。但各省区 2000 年以来 NEP 整体均呈增加趋势,山西和北京 NEP 增速最高,平均每年增加 6.0 gC/m^2 以上;天津 NEP 增速最低,平均每年增加 2.7 gC/m^2 。从不同植被类型来看(图 3),不同植被类型 NEP 逐年也呈增加趋势,其中区域灌丛和混交林平均 NEP 最大,达到 $260\text{--}300 \text{ gC/m}^2$,变异系数最小,NEP 相对稳定;草地 NEP 最低,不足 100 gC/m^2 ,年际间波动最大。

从变化趋势空间分布来看,2000 年以来华北大部地区植被 NEP 呈增加趋势(图 4),占总面积的 88.8%,达到显著增加趋势的面积比例为 54.5% ($P<0.05$),其中河北北部、北京北部、山西西北部、山东西部等地 NEP 平均每年每平方米增加 9.0 gC 以上,增加趋势达到极显著水平 ($P<0.01$)。仅有 1.6% 的地区 NEP 减少趋势达到显著水平,主要分布于石家庄和郑州等地周边地区,年均 NEP 下降 3.0 gC/m^2 ,可能与城市扩张等人类活动有关。在华北六省中(图 5),山西和北京有 97%—98% 的区域 NEP 呈增加趋势,其中有 80% 以上区域增加趋势达到显著水平,平均每年增加 6.0 gC/m^2 以上,区域固碳效率明显提高,但天津和河南 NEP 显著增加的区域面积仅有 33%—35%,明显低于其他省区。从不同植被类型统计来看(图 5),仅灌丛和农田地区 NEP 呈减少趋势的区域面积达到 11%—12% 区域,其他植被类型覆盖的大部地区 NEP 均呈增加趋势。

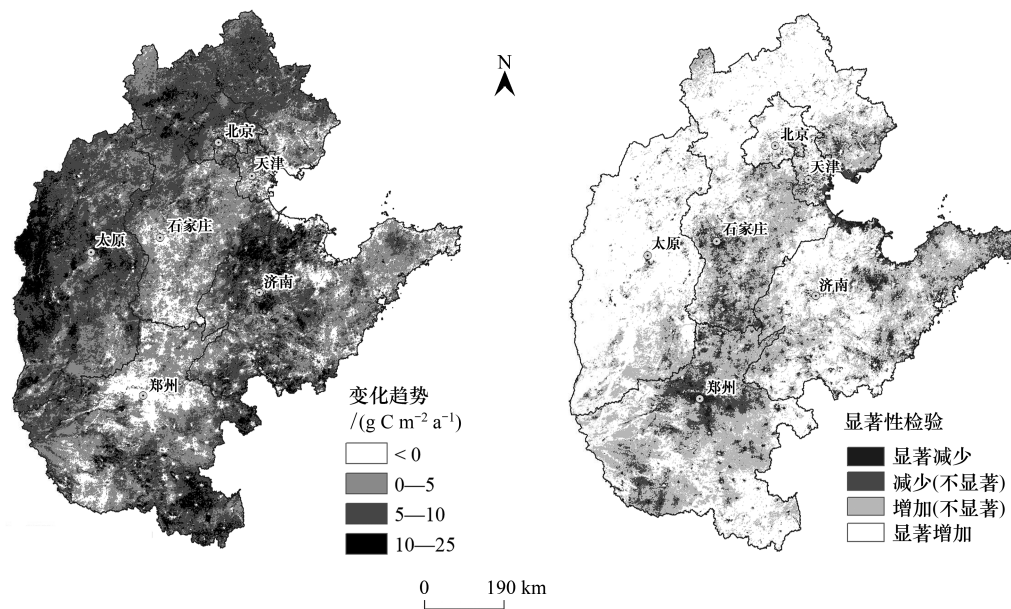


图 4 植被 NEP 变化趋势及其显著性检验

Fig.4 Trends of NEP changes and its significance level

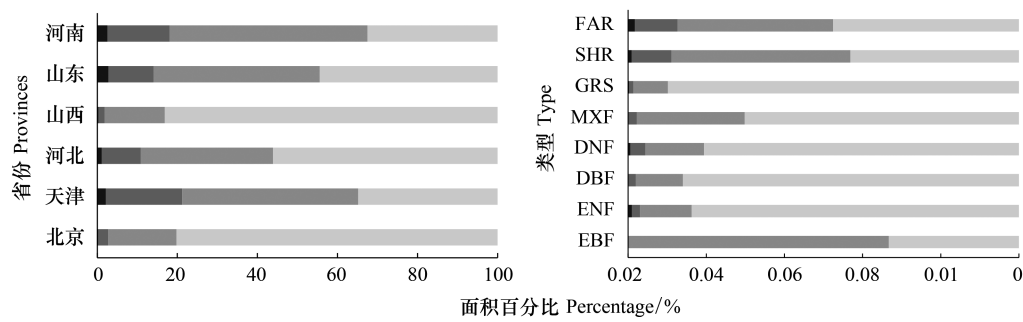


图 5 华北六省区及其不同植被类型 NEP 变化趋势的面积统计

Fig.5 The proportion of area of different NEP trade for six provinces and different vegetation types in North China

2.2 NEP 波动性特征

2000 年以来,华北大部地区 NEP 波动较小,多处于较高稳定、高稳定的等级,面积比例达到 79.6%;NEP 较低稳定、低稳定等级的区域主要分布河北西北部、山西东北部等地高海拔地区,面积相对较少,仅占 17.8% (图 6、表 1)。在华北六省中,河南 NEP 波动最小,稳定性最高,一半以上区域 NEP 处于高稳定等级,主要归因于该地区多分布农田,年际间作物生长变化总体波动较小。而山西和河北 NEP 波动相对较大,处于低稳定等级的面积比例较高,分别达到 14.5%、12.5%。

2.3 NEP 变化的未来趋势预测

在 Hurst 指数空间分布上(图 7),华北地区 NEP 总体上具有强持续性,Hurst 指数平均为 0.81,有 84.9% 的区域 Hurst 指数>0.65,达到强持续性,加之 2000 年以来大部地区 NEP 呈增加趋势(图 4),表明华北大部地区 NEP 变化具有强持续性,多保持过去变化趋势,也就是区域 NEP 仍有可能呈现增加的趋势,固碳效率将持续提高。其中,NEP 达到显著增加趋势、Hurst 指数>0.65 达到强持续性的区域面积比例达到 51.4%,表明华北地区至少有一半以上的区域 NEP 仍有可能呈明显的增加趋势。但有 0.8% 的 NEP 呈增加趋势的地区,具有弱反持续性,表明这些区域未来 NEP 可能呈减少的趋势,主要分布河北南部、山东东南部等地。

表 1 NEP 稳定性面积变化

Table 1 Classification of NEP stability level and corresponding proportions of area in North China

变异系数 Coefficient of variation	稳定性 Stability	面积 Area/%						
		华北	北京	天津	河北	山西	山东	河南
< 0.25	Highest stability	38.1	26.3	30.9	30.4	23.6	46.6	55.4
0.25—0.48	Higher stability	41.5	54.3	51.5	44.5	44.6	40.7	33.5
0.48—0.52	Moderate stability	2.7	2.9	3.2	3.0	4.3	1.7	1.4
0.52—0.75	Lower stability	7.9	7.6	7.0	9.6	12.9	4.8	3.8
> 0.75	Lowest stability	9.8	8.8	7.4	12.5	14.5	6.2	5.9

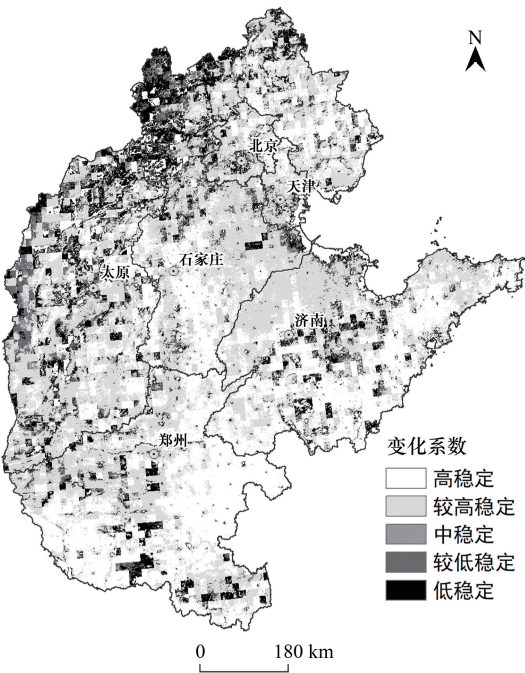


图 6 NEP 变异系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of NEP variation in North China

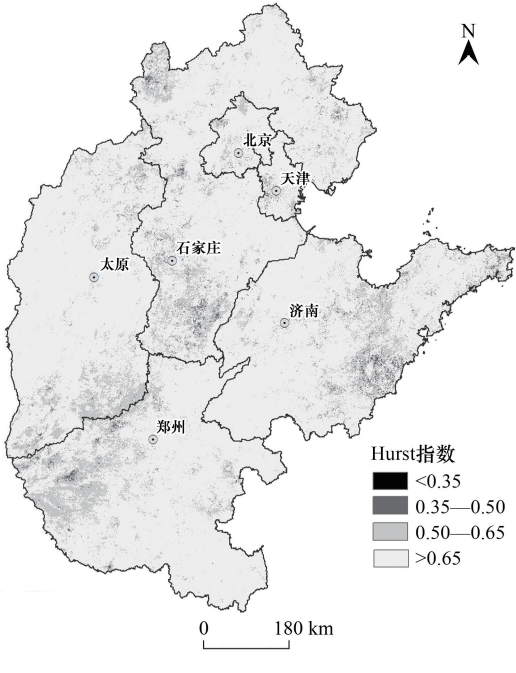


图 7 NEP 变化的持续性

Fig.7 The NEP persistence in North China

2.4 NEP 变化气象影响分析

华北地区 2000—2020 年光温水气象要素变化趋势存在明显空间差异(图 8)。在降水方面,山西、河北以及山东中部等地降水 2000 年以来大多呈增加趋势,山西西北部、河北北部等地平均每年增加 5—20 mm;仅河南大部地区降水明显偏少,中部部分地区平均每年偏少 10 mm 以上。华北大部地区气温升高明显,平均每年升高 0.04—0.10℃;大部日照时数也呈增加趋势,尤其河南南部、北京南部、天津西北部平均每年增加 10 h 以上。表明 2000 年以来,华北大部地区气候呈现降水偏多、光温增加的暖湿化态势。

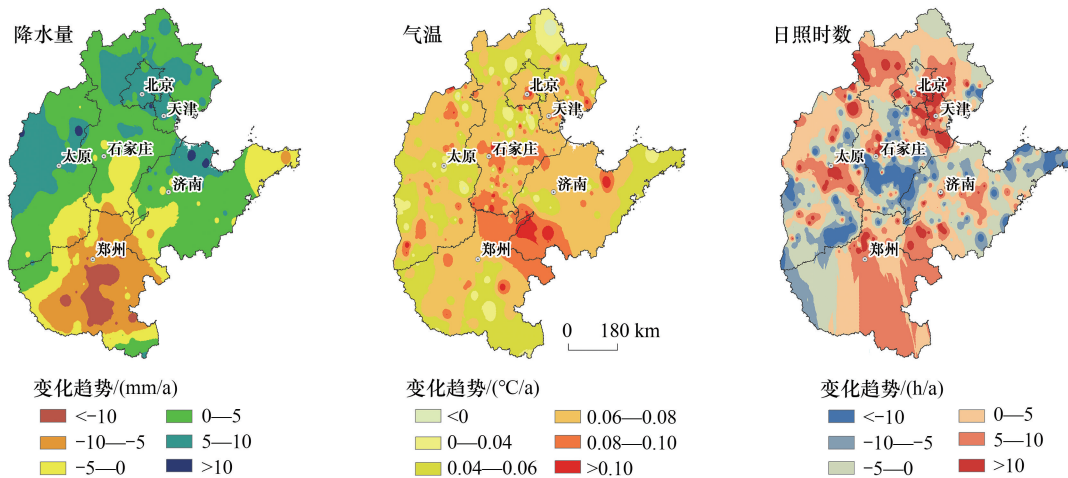


图 8 2000—2020 年华北地区降水量、气温和日照时数的变化趋势

Fig.8 Trend of precipitation, temperature and sunshine hours in North China from 2000 to 2020

与 NEP 相关分析结果显示(图 9),2000—2020 年大部地区降水、气温、日照与 NEP 呈正相关性,面积比例分别为 82.7%、58.0%、61.5%,气象条件总体有利于华北地区 NEP 增加。其中,降水与 NEP 变化正相关性较强,达到显著相关的区域面积占总面积的 44.7%;气温、日照达到显著相关的面积比例较低,分别为 4.9%、4.2%,表明华北地区降水是影响 NEP 变化的重要气候因子。此外,气候变化对 NEP 影响存在明显的空间差异性,其中降水影响空间格局差异极为明显,达到显著正相关的区域主要分布在华北中北部,呈负相关的区域主要位于南部地区;与气温达到显著正相关的区域主要分布在华北南部地区;与日照达到显著正相关的区域空间差异不太明显,整个区域均有分布。

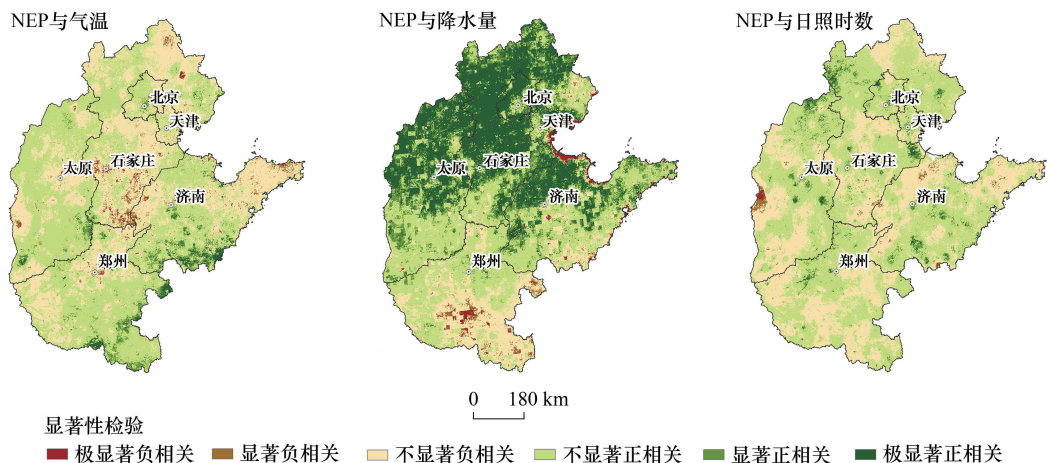


图 9 2000—2020 年华北地区 NEP 与降水量、气温和日照时数的相关性分析

Fig.9 Correlation between NEP and precipitation, temperature and sunshine hours in North China from 2000 to 2020

3 讨论

中国陆地生态系统近年来大部地区都表现出碳汇能力,NEP 总体呈上升趋势,其中西藏南部、四川南部等部分地区 NEP 增加趋势最为明显^[19–20,24]。但不同时期变化趋势存在一定差异,其中 1982—2000 年中国陆地生态系统 NEP 呈下降趋势,2000—2010 年 NEP 呈上升趋势^[23]。本研究显示,2000 年以来华北地区 NEP 整体上升趋势,与全国 NEP 总体变化趋势相似,其中有 54.5% 区域 NEP 呈显著增加趋势。

在气候响应方面,NEP 的空间分布和年际变化主要受气温和降水影响^[22–33]。从全国尺度来看,碳吸收年际增减的分布区域基本上与降水量增减区域基本保持一致,大部地区 NEP 与降水呈正相关,是 NEP 空间格局变化的主导气候因子,而 NEP 与气温的相关性明显偏弱^[19–20]。而在华北大部地区,NEP 与降水、气温等因子均呈正相关,其中与降水的相关性要明显高于其他气候因子,具有显著正相关的区域面积占比达到 44.7%。西北干旱区石羊河流域的研究也发现,降水是影响流域 NEP 空间格局变化的关键气象因子^[12]。但 NEP 对降水、气温等气候因子的响应在不同时空存在明显差异,甚至出现相悖结论^[19,28]。在东北地区,森林 NEP 与年降水和年均温度总体呈负相关,这可能由于区域温度升高促进了土壤呼吸,导致 NEP 降低;而多雨会减少日照时数和太阳辐射,降低植被的光合作用^[10,52]。而在西南地区 and 青藏高原,有 50% 以上的区域 NEP 与年降水量呈显著正相关、与温度呈显著负相关,其中气温对区域植被 NEP 的影响占主导地位^[26–27]。气象因子在不同树龄间的影响也存在差异,温度是影响幼林固碳能力的关键气候因子,而中龄林和成熟林固碳能力对降水更为敏感^[28]。

生态系统固碳能力,主要取决于碳输入过程和碳输出过程^[10]。因此作为 NPP 和 R_h 的差值,NEP 时空格局变化主要是由自然、人为等因素所引起的 NPP 和 R_h 的变化所导致,其中 NEP 年际变化在北方地区与 NPP 基本一致,南方地区则与 R_h 相关较高^[19,26]。在华北西部和北部地区(图 10),尽管土壤呼吸增强, R_h 呈增加趋势,但是 NPP 增加速率高于土壤呼吸,导致 NEP 总体呈增加趋势。华北南部地区,尤其河南中北部地区 R_h 呈下降趋势,利于碳汇增加,但是由于区域 NPP 多呈下降趋势,导致区域 NEP 也呈下降。因此从整体变化来看,华北地区 NEP 年际变化特征与 NPP 变化趋势基本一致,说明区域碳汇功能增加主要依赖于 NPP 显著提高。但在西南地区,由于土壤异养呼吸 R_h 的增长速度大于 NPP 的增长速度,导致部分地区由碳汇转为碳源,因而西南 NEP 变化与 R_h 密切相关,NPP 影响偏弱^[26]。

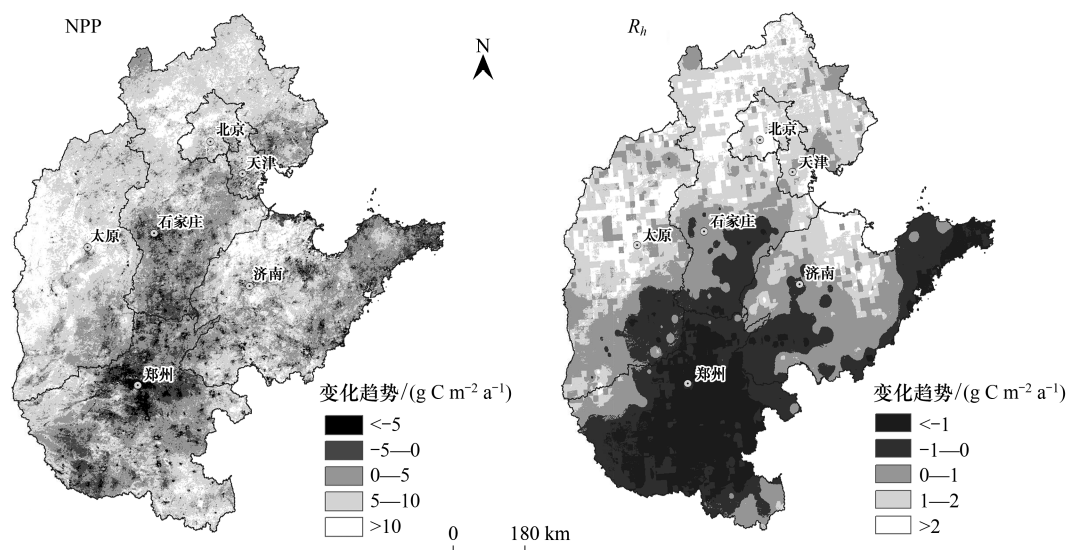


图 10 2000—2020 年华北植被 NPP 和 R_h 的变化趋势

Fig.10 Trends of NPP changes and R_h changes in North China from 2000 to 2020

当前,NEP 相关研究仍处于发展阶段,生态系统碳汇估算需要更准确、有效的观测技术,诸多估算方法及其评估结果仍存在明显不一致性,人类活动、极端气候、土壤有机碳等影响因素加大了不确定性^[19,33,53]。特别是在人为干扰方面,城市扩张、放牧和牲畜饲养、森林采伐和燃料使用等人为因素强烈影响生态系统的碳排放,作为生态系统消费者,人为干扰造成的碳排放占 NEP 的 42% 以上,成为影响固碳能力的重要原因之一^[17,54—56]。但是退耕还林、植树造林和植被保护与恢复以及适度采伐等营林措施可提高区域碳汇能力,表明人类活动对陆地植被碳循环具有较大影响,在增加碳汇能力和减缓气候变化方面可以发挥重要作用^[22,56—57]。因此在后续碳汇影响研究中,需充分考虑人类活动影响,进一步加强生态系统固碳功能的影响机理的探索和研究。

4 结论

本文围绕固碳能力,分析了华北地区 2000—2020 年 NEP 时空分布规律及其气候变化的响应特征,得出以下结论:

(1) 华北地区年均 NEP 为 228.8 gC/m²,呈现从西北向东南逐步递增的趋势,具有显著空间聚集分布特征,总体表现为碳汇,其中 29.0% 区域存在高值聚类(HH),是华北地区发挥固碳功能的重要生态区域。

(2) 2000 年以来华北地区 NEP 整体均显著上升趋势,有 54.5% 区域增加趋势达到显著水平;华北大部地区 NEP 年际波动较小,多处于较高稳定、高稳定的等级,其面积比例达到 79.6%。

(3) 在变化持续性方面,华北 NEP 的 Hurst 指数平均为 0.81,有 84.9% 的区域 NEP 的 Hurst 指数>0.65,具有强持续性。其中,NEP 达到显著增加趋势、且 Hurst 指数>0.65 的区域面积比例达到 51.4%,表明正向持续性序列占据主导地位,大部分区域的 NEP 在未来一段时间仍有可能持续增加。

(4) 在气候影响方面,2000 年以来华北地区降水、气温和日照总体呈增加趋势,与 NEP 多呈正相关性,区域气候条件有利于华北碳汇能力的提高。其中,NEP 与降水相关性要明显高于其他气候因子,具有显著正相关的区域面积占比达到 44.7%,是影响华北 NEP 变化关键气候因子。

参考文献(References):

- [1] 高扬,何念鹏,汪亚峰. 生态系统固碳特征及其研究进展. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1264-1274.
- [2] 高艳妮,王维,刘鑫,张林波,邓富亮,杨春艳,孙倩莹. 厦门市森林生态系统固碳服务评估. 环境科学研究, 2019, 32(12): 2001-2007.
- [3] Barr A G, Black T A, Hogg E H, Griffis T J, Morgenstern K, Kljun N, Theede A, Nesic Z. Climatic controls on the carbon and water balances of a boreal aspen forest, 1994—2003. *Global Change Biology*, 2007, 13(3): 561-576.
- [4] 徐小锋,田汉勤,万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, 2007, 31(2): 175-188.
- [5] Zhao J F, Liu D S, Cao Y, Zhang L J, Peng H W, Wang K L, Xie H F, Wang C Z. An integrated remote sensing and model approach for assessing forest carbon fluxes in China. *Science of the Total Environment*, 2022, 811: 152480.
- [6] Keenan T F, Prentice I C, Canadell J G, Williams C A, Wang H, Raupach M, Collatz G J. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature Communications*, 2016, 7: 13428.
- [7] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [8] 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.
- [9] 位贺杰,张艳芳,董孝斌,胡晓欢,王雪超,鲁纳川,赵亚楠. 2000—2013 年无定河流域植被覆盖变化及其固碳效应. 水土保持通报, 2016, 36(1): 44-50.
- [10] 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): 4975-4983.
- [11] 周夏飞,於方,曹国志,杨威杉,周颖. 2001—2015 年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系. 水土保持研究, 2019, 26(1): 76-81.
- [12] 张新中,李育,张成琦,刘和斌. 2000—2014 年石羊河流域净生态系统生产力变化分析. 兰州大学学报: 自然科学版, 2020, 56(4):

- 486-492.
- [13] Schimel D, Melillo J, Tian H, McGuire A D, Kicklighter D, Kittel T, Rosenbloom N, Running S, Thornton P, Ojima D, Parton W, Kelly R, Sykes M, Neilson R, Rizzo B. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 2000, 287: 2004-2006.
- [14] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981—2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [15] 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.
- [16] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [17] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16.
- [18] 刘迎春, 高显连, 付超, 于贵瑞, 刘兆英. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力. *生态学报*, 2019, 39(11): 4002-4010.
- [19] 陶波, 曹明奎, 李克让, 顾峰雪, 季劲钧, 黄玫, 张雷明. 1981—2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2006, 36(12): 1131-1139.
- [20] 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.
- [21] Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320-2322.
- [22] 于贵瑞, 李轩然, 王秋风, 李胜功. 中国陆地生态系统的碳储量及其空间格局. *资源与生态学报(英文版)*, 2010, 1(2): 97-109.
- [23] He H L, Wang S Q, Zhang L, Wang J B, Ren X L, Zhou L, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Yu S Y, Yang Y H, Wang M M, Niu Z E, Ge R, Yan H M, Huang M, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Zhang L M, He N P, Wang Q F, Yu G R. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [24] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋珺, 丁键浠, 迟永刚. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. *生态学报*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [25] Peng J, Dan L, Tang X B, Yang F Q. Trends in carbon sink along the Belt and Road in the future under high emission scenario. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2022, 15(3): 100149.
- [26] 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.
- [27] 刘凤, 曾永年. 2000—2015 年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化. *生态学报*, 2021, 41(14): 5792-5803.
- [28] Mao F J, Du H Q, Zhou G M, Zheng J L, Li X J, Xu Y X, Huang Z H, Yin S Y. Simulated net ecosystem productivity of subtropical forests and its response to climate change in Zhejiang Province, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 155993.
- [29] 于贵瑞, 王秋风, 朱先进. 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 103-113.
- [30] 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.
- [31] Dai A G, Fung I Y. Can climate variability contribute to the “missing” CO₂ sink?. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(3): 599-609.
- [32] Goodale C L, Apps M J, Birdsey R A, Field C B, Heath L S, Houghton R A, Jenkins J C, Kohlmaier G H, Kurz W, Liu S R, Nabuurs G J, Nilsson S, Shvidenko A Z. Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications*, 2002, 12(3): 891-899.
- [33] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 解宪丽, 朱振宇, 汪煜. 中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(2): 69-74.
- [34] 赵俊芳, 曹云, 马建勇, 姜月清. 基于遥感和 FORCCHN 的中国森林生态系统 NPP 及生态服务功能评估. *生态环境学报*, 2018, 27(9): 1585-1592.
- [35] 赵其国, 沈仁芳, 滕应, 李秀华. 我国地下水漏斗区耕地轮作休耕制度试点成效及对策建议. *土壤*, 2018, 50(1): 1-6.
- [36] 赵晓丽, 张增祥, 邹亚荣, 周全斌. 中国华北地区土地利用动态变化特点分析. *国土资源遥感*, 2002, 14(2): 23-28.
- [37] 张永生, 欧阳芳, 袁哲明. 华北农田生态系统景观格局的演变特征. *生态科学*, 2018, 37(4): 114-122.
- [38] Tian H Q, Melillo J, Lu C Q, Kicklighter D, Liu M L, Ren W, Xu X F, Zhang C, Pan S F, Liu J Y, Running S. China's terrestrial carbon balance: contributions from multiple global change factors. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25: 222-240.
- [39] Yan H, Wang S Q, Billesbach D, Oechel W, Bohrer G, Meyers T, Martin T A, Matamala R, Phillips R P, Rahman F, Yu Q, Shugart H H. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants. *Ecological Modelling*, 2015, 297: 42-59.
- [40] Yan H, Wang S Q, Wang J B, Cao Y, Xu L L, Wu M X, Cheng L, Mao L X, Zhao F H, Zhang X Z, Liu Y F, Wang Y F, Chen S P, Li Y N, Han S J, Zhou G Y, Zhang Y, Shugart H. Multi-model analysis of climate impacts on plant photosynthesis in China during 2000—2015.

- International Journal of Climatology, 2019, 39: 5539-5555.
- [41] Goward S N, Dye D G. Evaluating North American net primary productivity with satellite observations. *Advances in Space Research*, 1987, 7(11): 165-174.
- [42] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329: 940-943.
- [43] 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.
- [44] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration?. *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [45] 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.
- [46] Cao R, Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Lv Z L, Chen Z. Inter-annual variations in vegetation and their response to climatic factors in the upper catchments of the Yellow River from 2000 to 2010. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(6): 963-979.
- [47] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 罗瑶, 董永波, 王梅芳. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力. *生态学报*, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [48] 曹云, 钱永兰, 孙应龙, 钱拴, 张晔萍, 延昊. 基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析. *生态环境学报*, 2020, 29(5): 857-865.
- [49] 李双双, 延军平, 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(7): 960-970.
- [50] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [51] 王晓利, 侯西勇. 1982—2014 年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应. *地理研究*, 2019, 38(4): 807-812.
- [52] 徐浩杰, 杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 398-409.
- [53] 梁发超, 刘诗苑, 起晓星, 刘黎明. 近 30 年闽南沿海乡村聚落用地空间演化过程研究. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 18-26.
- [54] 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.
- [55] Wang S, Xu L, Zhuang Q L, He N P. Investigating the spatio-temporal variability of soil organic carbon stocks in different ecosystems of China. *Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143644.
- [56] 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.
- [57] Wang Q F, Zheng H, Zhu X J, Yu G R. Primary estimation of Chinese terrestrial carbon sequestration during 2001—2010. *Science Bulletin*, 2015, 60(6): 577-590.