



引文格式:王楠楠,刘耀林,尹峰,等.顾及地形校正的生态系统碳汇估算与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(12):2485-2500.DOI:10.13203/j.whugis20230174

Citation: WANG Nannan, LIU Yaolin, YIN Feng, et al. Estimation and Analysis of Net Ecosystem Carbon Sink Considering Topographical Correction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(12): 2485-2500. DOI: 10.13203/j.whugis20230174

## 顾及地形校正的生态系统碳汇估算与分析

王楠楠<sup>1</sup> 刘耀林<sup>1,2,3</sup> 尹峰<sup>4</sup> 石永阁<sup>4</sup> 刘艳芳<sup>1</sup>

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 昆山杜克大学,江苏 昆山,215316

4 湖北省空间规划研究院,湖北 武汉,430071

**摘要:**净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)是衡量陆地生态系统碳汇的重要指标,准确计算陆地碳汇对于区域碳收支及土地利用类型结构调控具有重要作用,故使用高分辨率影像并考虑地形效应的影响是精准计算NEP的必然选择。以湖北省为研究区域,基于CASA(Carnegie-Ames-Stanford approach)及土壤呼吸地理统计模型计算碳汇NEP,并从气象因子地形校正和地表面积校正两方面优化NEP计算结果;对比了地形校正前后NEP的差异,并分析了区域内NEP的时空演变特征。结果表明,地形校正可以有效提升NEP计算的精度,对比全国通量站点数据,绝对误差由校正前 $153.69 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 降低为 $150.73 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,湖北省全年的NEP总量为2 112万吨。对比显示,以往研究结果低估了林地的碳汇量,经过地形校正,林地NEP相比于校正前增加约22%;其次为草地,其他类型用地相比校正前增幅较小。地形校正对高海拔和地形起伏较大区域的优化效果较为明显,能够明显改善NEP计算精度。校正后空间自相关趋势有所降低,Moran's I指数由1.24降至1.18,春秋两季地形校正后重心明显由西向东移动。上述结果表明,在山地丘陵地区引入地形校正能够有效提高NEP估算精度,这不仅优化了区域碳收支的定量评估结果,也为今后在中高海拔地区开展精细化碳汇核算和土地利用结构优化配置提供了重要科学依据,对支撑区域双碳目标实现具有现实意义。

**关键词:**净生态系统生产力;CASA;土壤呼吸地理统计模型;地形校正;碳汇

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2024-12-09

DOI:10.13203/j.whugis20230174

文章编号:1671-8860(2025)12-2485-16

### Estimation and Analysis of Net Ecosystem Carbon Sink Considering Topographical Correction

WANG Nannan<sup>1</sup> LIU Yaolin<sup>1,2,3</sup> YIN Feng<sup>4</sup> SHI Yongge<sup>4</sup> LIU Yanfang<sup>1</sup>

1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Duke Kunshan University, Kunshan 215316, China

4 Hubei Spatial Planning Research Institute, Wuhan 430071, China

**Abstract: Objectives:** Net ecosystem productivity (NEP) is a key indicator of carbon sinks in terrestrial ecosystem. To accurately estimate NEP, it is essential to use high-resolution remote sensing images and account for topographic effects, especially in mountainous areas, which have important implications for regional carbon budget and land use structure. **Methods:** We first calculate NEP based on Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) and geostatistical model of soil respiration (GSMSR) for Hubei Province, then optimize the NEP results by applying two types of topographic correction, including meteorological factor correction and surface area correction. We compare the NEP values before and after correction and analyze their spatiotemporal pattern. **Results:** The results show that topographic correction can effectively improve

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42230107);湖北省自然资源科技项目(ZRZY2022KJ13)。

第一作者:王楠楠,博士,主要研究方向为陆地生态系统碳循环研究。a100wxc@126.com

通信作者:刘耀林,博士,教授。yaolin610@163.com

the accuracy of NEP calculation. Compared with the data of national flux stations, the mean absolute error decreases from  $153.69 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  before correction to  $150.73 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  after correction, and the total NEP of Hubei Province is 21.12 million tons. Furthermore, the previous studies underestimated the carbon sequestration of forest land. After topographic correction, the NEP of forest land increases by about 22% compared with that before correction, followed by grassland, while other land use types showed less increase after topographic correction. Finally, the topographic correction significantly improves the accuracy of NEP in the areas with high altitude and large terrain variations. The spatial autocorrelation trend also decreases after correction, as indicated by the reduction of Moran's  $I$  index from 1.24 to 1.18. Moreover, the topographic correction causes a noticeable west-to-east shift of the center of gravity in spring and autumn.

**Conclusions:** Compared with NEP before topographic correction, NEP results after correction have higher accuracy, and the carbon sink distribution of different land use types also differs. But because the influence of terrain on carbon sink estimation is reflected in multiple aspects. Hence, in future work, we will continue to explore the influence of topography on vegetation factors, meteorology, and remote sensing images, to improve the simulation accuracy of the model.

**Key words:** net ecosystem productivity (NEP); Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA); geostatistical model of soil respiration (GSMSR); topographic correction; carbon sink

自18世纪60年代以来,人类活动导致温室气体排放大幅增长,二氧化碳、甲烷浓度分别提升47%及156%,引发了一系列生态问题<sup>[1]</sup>。陆地生态系统对大气中二氧化碳的吸收有效减缓了气候变暖,2010—2019年,全球陆地生态系统吸收了人类活动31%的碳排放<sup>[2-3]</sup>。因此,准确估算陆地碳循环过程是当前全球气候变化研究的核心问题<sup>[4-5]</sup>。

净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)为生态系统光合作用固定的碳与异养呼吸作用消耗的碳 $R_h$ 之间的差值<sup>[6]</sup>,被认为是衡量区域尺度生态系统碳源汇规模的重要指标<sup>[7]</sup>,其中植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)表示植被光合作用积累的碳。目前,陆地生态系统碳汇的估算方法总体可以分为自上而下和自下而上两大类<sup>[8]</sup>,其中以CASA(Carnegie-Ames-Stanford approach)为代表的光能利用率模型由于结构较为简单且精度较高,被广泛应用于植被碳循环的计算。文献[9]使用CASA估算了中国2002—2017年年均NPP为3.98 PgC,文献[10]则估算了中国湿地生态系统的NPP,约为 $202.03\sim 222.58 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。文献[6, 11-12]在计算得到NPP的基础上,考虑土壤碳密度、气温、降水对 $R_h$ 的影响,使用土壤呼吸地理统计模型(geostatistical model of soil respiration, GSMSR)得到区域范围内NEP结果。上述研究为区域碳汇的计算提供了理论基础及方法,但却忽视了地形起伏所导致的气象及植被空间异质性变化,必然影响到区域碳汇计算的准确性<sup>[13-14]</sup>。

地形对生态系统碳循环计算的影响体现在两个方面:(1)地形通过改变气象因子的分布规律间接改变植被碳利用。不同地形条件下气温、降水、太阳辐射有所不同,植被长势差异显著<sup>[15-16]</sup>。尤其随着影像分辨率的提升,气象因子的地形敏感性也更加显著<sup>[17]</sup>。在中高海拔地区,气温随地势升高逐渐降低,不同地形区的降水条件各异,导致了植被生长的垂直分异性<sup>[18-20]</sup>,进而影响植被光能利用率的强度;在山区丘陵地带,因地形和云雾遮蔽,光照条件较差,太阳辐射偏低,地表倾斜也导致不同坡度、坡向处地表太阳辐射不同<sup>[21-23]</sup>。显然,不考虑地形对气象因子的影响将导致碳汇计算中存在较大的不确定性。基于此,文献[24-25]引入地形因子对降水、气温数据进行插值,结果表明,考虑地形效应的气象插值误差显著低于全局插值误差。有学者进一步将地形属性合并到植被生产力模型中的绿度、温度、太阳辐射等变量中,其结果精度明显提升<sup>[26-28]</sup>。文献[29]使用遥感影像替代气象数据反演水分胁迫变量,模拟得到的NPP值与实测值具有良好的 consistency。因此,准确计算山地气象因子的分布格局,并将其运用到生态系统碳汇的计算过程中,是准确计算生态系统碳汇的必然选择。(2)地形起伏直接改变植被结构。地形起伏导致真实地表与地球椭球体之间存在一定差异,二维表面下的投影面积可能远低于实际地表面积,由此产生的植被组成和林分密度差异显著影响了生物碳循环反演的准确性。文献[30]根据地表面积计算得全球NPP增加了270 Gt C/a;文献

[31]对比了投影面积和实际地表面积下的全国植被碳储量,结果由 6.944 PgC 增至 7.620 PgC,西南山地地区的变化率显著高于其他地区;文献[32-33]等学者的研究也反映了相同的增长趋势。文献[34]使用地形因子改进了粗分辨率下 NPP 的计算,校正后估计值有明显改善,决定系数提高了 0.38。然而,在目前国内外的研究中,鲜少使用真实地表面积量算区域碳汇,近年来,覆盖全球范围的高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据为地表面积计算提供了基础数据支持,对于真实掌握区域内碳汇量具有重要意义。

湖北省境内地貌类型丰富,由西向东分别为山地、平原、丘陵的阶梯型地貌。本文以湖北省为研究区,基于 CASA 与 GSMSR 模型,利用地形、经纬度对气象因子进行校正,结合地表面积计算模型,构建生态系统碳汇地形校正模型,提高复杂地形下碳汇的计算精度,定量分析地形起伏引起对碳汇估算的影响及机理,分析其时空演变规律。研究结果可为区域碳收支提供数据支持,也可为优化研究区域的土地利用类型结构调控方向提供依据。

## 1 研究区域概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

湖北省处于长江中游沿岸,其经纬度范围为 108.4°E~116.1°E, 29.0°N~33.1°N,地理位置如图 1 所示。湖北省位于亚热带典型季风区内,大部分地区太阳年均辐射量为  $(3.6\sim 4.8)\times 10^9$  J/m<sup>2</sup>, 年均气温为 15~17℃, 平均降水量在 800~1 600 mm 之间,降水由西南、东南向北递减。地势方面,鄂东、鄂中、鄂西差异较大,山地、丘陵、平原区各占全省总面积的 56%、24% 和 20%。鄂西地区海拔较高,高程多在 500 m 以上,区域植被以乔木、灌木为主;鄂东、鄂北为岗地地貌,土地利用主要以林地、耕地为主;鄂中江汉平原区海拔较低,土壤肥沃、水网密集,是重要的农业生产区。根据湖北省第三次国土调查成果显示,全省呈五分林地三分田、一分城乡一分水的土地利用结构。

### 1.2 数据来源及预处理

本文使用的数据包括影像数据、气象数据、土地利用数据、土壤数据及高程数据,数据详情如表 1 所示。为统一空间尺度,将 MODIS 数据及土壤数据使用双线性内插至 30 m 分辨率,研究时间节点为 2019 年全年。

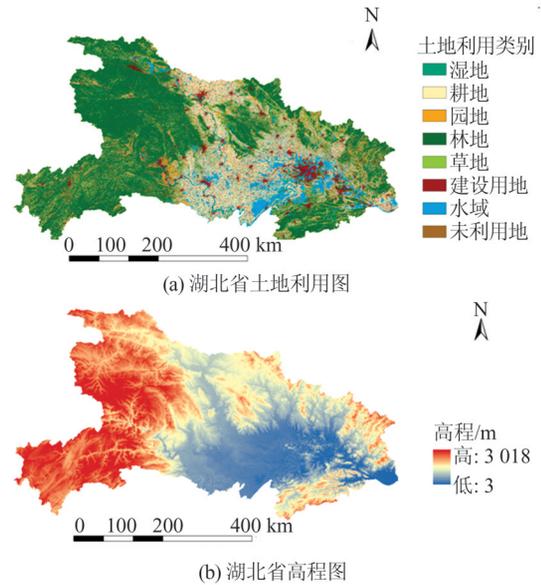


图 1 湖北省区位图

Fig. 1 Location of Hubei Province

### 1) 影像数据

影像数据为哨兵 2 号遥感影像,经过正射及大气校正得到地表反射率。使用最大值合成法获取每个月的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)以减少云雾影响。蒸散量数据来源于中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)MOD16A2.006 数据集,同样使用最大值合成法方法获取月度蒸散量。

### 2) 气象数据

由于气象站点数据较为稀疏,难以适应地形校正需求,本文使用精细分辨率数据集和粗分辨率两种气象再分析数据集,其中精细分辨率数据集作为精度验证使用。首先,对 2018 年粗分辨率数据进行地形校正,得到降尺度 0.1°气象数据集,并与精细分辨率数据集之间进行对比验证;然后,将 2019 年粗分辨率数据使用上述方法降尺度到 30 m,供后续 NEP 计算使用。

### 3) 土地利用数据

土地利用数据为 2019 年湖北省第三次国土调查数据,依据各植被类型与第三次国土调查成果中土地利用分类的对照关系,将其主要归纳为湿地、林地、草地、耕地、园地、建设用地、水域及其他用地,并转换为空间分辨率为 30 m 的栅格数据。

### 4) 土壤数据

土壤数据为 OpenLandMap 全球土壤属性数据集。选取 0、10、30 cm 深度的土壤有机碳含量(soil organic carbon, SOC)数据和土壤容量数据

计算得到土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD), 计算式为:

$$f_{\text{SOCD}} = \sum_j^m \frac{f_{\text{SOC}_j} \times D_j \times E_j}{1000} \quad (1)$$

式中,  $f_{\text{SOCD}}$  为剖面的 SOCD, 单位为  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $f_{\text{SOC}_j}$  为第  $j$  层的 SOC, 单位为  $\text{g}/\text{kg}$ ;  $D_j$  为第  $j$  层的土壤容重, 单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $E_j$  为第  $j$  层的土壤厚度, 单位

为  $\text{m}$ 。

### 5) 高程数据

DEM 数据来自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA), 该数据相比于 SRTM(shuttle radar topography mission) 数据改善了 DEM 的精度和数据覆盖范围。

表 1 数据来源

Table 1 Data Sources

数据类别	数据集名称	原始分辨率	时间	来源
影像数据	哨兵 2 号 2A 产品	30 m	2019 年	<a href="https://scihub.copernicus.eu/">https://scihub.copernicus.eu/</a>
	MODIS MOD16A2.006	500 m	2019 年	<a href="https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/">https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/</a>
气象数据	中国区地面气象要素驱动数据集	0.1°	2018 年	<a href="https://doi.org/10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file">https://doi.org/10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file</a>
	IMERG	0.5°	2018—2019 年	<a href="https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/">https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/</a>
	NASA/POWER	0.5°	2018—2019 年	<a href="https://power.larc.nasa.gov">https://power.larc.nasa.gov</a>
土壤数据	OpenLandMap	250 m	—	<a href="https://doi.org/10.5281/zenodo.1475457">https://doi.org/10.5281/zenodo.1475457</a>
高程数据	NASA DEM	30 m	—	<a href="https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_shhvp001/">https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_shhvp001/</a>
土地利用	湖北省第三次国土调查数据	矢量	2019 年	湖北省空间规划研究院

## 2 研究方法

本文碳汇计算分析流程图如图 2 所示。首先对气象数据进行地形校正, 作为碳汇计算模型的输入数据; 然后使用 CASA 与 GSMSR 模型分别得到 NPP 与  $R_h$ , 得到投影面积下 NEP; 最后使用地表面积计算模型对 NEP 进行校正, 得到最终地形校正后 NEP。

### 2.1 气象数据地形校正

在陆地生态系统中, 气温随高程及经纬度变化趋势明显<sup>[35]</sup>, 因此首先使用地形数据对气象因子进行校正, 并作为碳汇计算模型的输入, 以提升碳汇计算精度。以随机森林回归为代表的机器学习方法将地理位置和海拔作为自变量, 其插值结果显著优于其他方法<sup>[36]</sup>。故首先使用随机森林算法建立气象因子与地形因子之间的回归模型, 确定气象因子与高程、经度、纬度之间的变化关系。其次, 由于气象变量在区域间存在极强的自相关性, 机器回归算法未能考虑气象变量的空间效应, 其残差空间自相关性仍需要进一步分解, 对回归模型预测的残差进行普通克里格插值可以显著提高预测精度, 计算式分别为<sup>[37]</sup>:

$$Y(x) = \hat{P}(x) + \hat{e}(x) \quad (3)$$

$$\hat{P}(x) = \frac{\sum_{n=1}^N h_n(M_x)}{N} \quad (4)$$

$$\hat{e}(x) = \sum_{k=1}^K \lambda_k e(x_k) \quad (5)$$

式中,  $Y(x)$  为像元  $x$  处气象变量估计值, 作为后续 CASA 及 GSMSR 模型的输入变量;  $\hat{P}(x)$  为随机森林估算的趋势项;  $\hat{e}(x)$  为气象因子的残差值;  $h_n(M_x)$  为基学习器结果;  $N$  为基学习器个数;  $\lambda_k$  为残差  $\hat{e}(x)$  的权重, 用来表示各空间样本的贡献程度, 由克里格方程组进行无偏估计得到。

### 2.2 地表面积计算

二维投影下, 植被覆盖区的投影面积与单位投影面积碳汇量之积为二维平面碳汇量; 而三维结构下, 实际地表面积取代了投影面积。基于 8 邻域规则三角网(triangular regular network, TRN)模型的地表面积计算如图 3 所示。由图 3 可知, 单位投影面积下  $S_1$  地表面积明显大于  $S_2$ , 其 NPP、 $R_h$  值均将随之增高, NEP 值也随之改变, 故本文使用 DEM 和 TRN 计算三维地表面积以进行地形改正。以三角形 I 为例, 其面积可以采用海伦公式获得, 最终地表面积可以根据像元内 8 个三角形之和计算得到:

$$S_R = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (6)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别表示三角形的三边长度;  $p = (a + b + c)/2$ 。

为了验证 TRN 模型的地表面积计算精度, 本文以湖北省仙桃、罗田、神农架作为验证区, 分

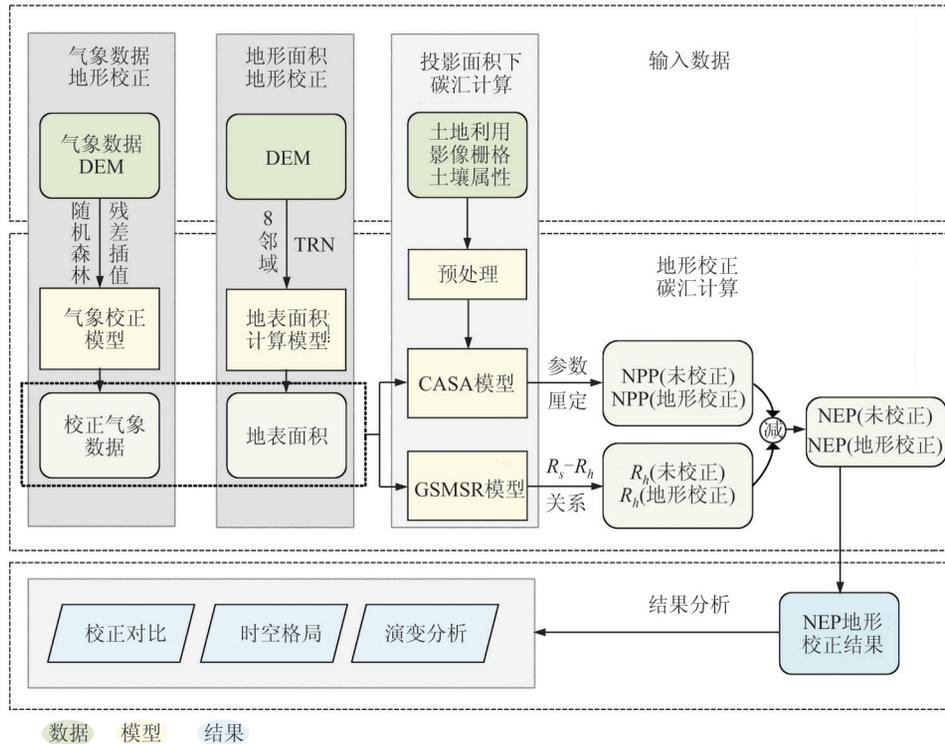


图 2 碳汇计算分析流程图

Fig. 2 Flowchart of NEP Calculation and Analysis

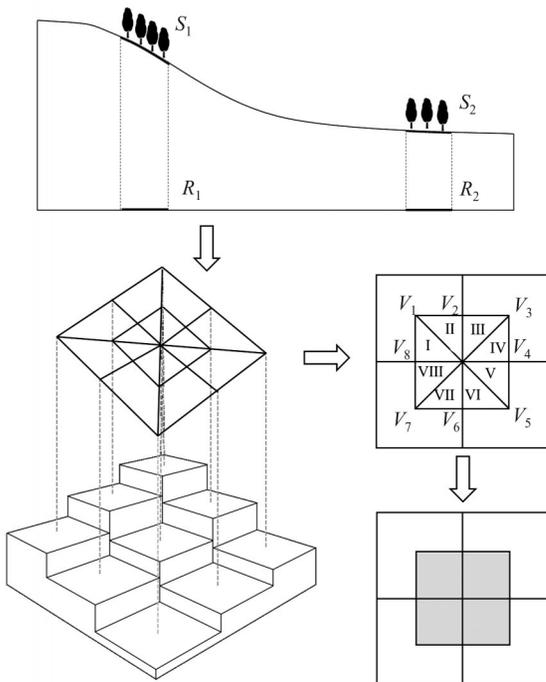


图 3 基于 8 邻域 TRN 模型的地表面积计算

Fig. 3 Illustration of 8-Neighborhood-TRN

别代表平原、丘陵、山地地貌特征,将其与不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)模型地表面积对比,结果见表 2。TRN 模型与 TIN 模型的地表面积平均误差分别为 6.04 km<sup>2</sup>、26.09 km<sup>2</sup>,尤其是在山区,其精度提升更为明显,可用于分析地表面积校正对 NEP 结果的影响。

表 2 不同模型在不同地貌中的地表面积/km<sup>2</sup>

Table 2 Surface Area Evaluations of TIN Model and TRN Model in Different Landform Types/km<sup>2</sup>

指标	仙桃	罗田	神农架
模拟真实地表面积	2 603.32	2 281.01	3 952.59
TIN 模型地表面积	2 591.21	2 262.36	3 905.09
TRN 模型地表面积	2 598.86	2 276.23	3 943.70

### 2.3 基于地形校正的生态系统碳汇计算模型

#### 2.3.1 植被 NPP 计算

CASA 是一种基于光能利用率计算植被 NPP 的模型,由植被吸收光合有效辐射( absorbed photosynthetically active radiation, APAR)和光能利用率共同确定,模型表达式为:

$$f_{NPP}(x, t) = f_{APAR}(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (7)$$

式中,  $f_{NPP}(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月份的 NPP, 单位为  $gC \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$ ;  $f_{APAR}(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月份的 APAR, 单位为  $MJ \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$ ;  $\epsilon(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月份的实际光能利用率, 单位为  $gC \cdot MJ^{-1}$ 。

#### (1) APAR 的计算

APAR 是植物冠层吸收的总光合有效辐射, 计算式为:

$$f_{APAR}(x, t) = 0.5 f_{TSR}(x, t) \times f_{FPAR}(x, t) \quad (8)$$

式中,  $f_{TSR}(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的太阳总辐射(total solar radiation, TSR), 单位为  $MJ \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$ ;

$f_{\text{FPAR}}(x, t)$ 为植被层对入射的光合有效辐射的吸收比例(fraction of photosynthetically active radiation, FPAR);0.5指植被能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

### (2)光能利用率计算

光能利用率为植被单位时间单位面积所生产的干物质化学能与光合有效辐射能量之比,理想水热条件下植被具有最大光能利用率,在现实生长环境中,植被受到气温与水分胁迫的共同影响<sup>[39]</sup>,计算式为:

$$\epsilon_2(x, t) = \frac{1.184}{[1 + \exp(0.2(T_{\text{max}}(x) - 10 - T(x, t)))] \times [1 + \exp(0.3(-T_{\text{max}}(x) - 10 + T(x, t)))]} \quad (11)$$

$$W_\epsilon(x, t) = 0.5 + 0.5 \frac{f_{\text{ET}}(x, t)}{f_{\text{PET}}(x, t)} \quad (12)$$

式中,  $T_{\text{max}}(x)$ 为植被生长最适宜温度,为该像元年内NDVI值达到最高时的月平均气温;  $T(x, t)$ 为月平均温度;  $f_{\text{ET}}(x, t)$ 为实际蒸散量(evapotranspiration, ET);  $f_{\text{PET}}(x, t)$ 为潜在蒸散量(potential evapotranspiration, PET);  $W_\epsilon(x, t)$ 反映了水分胁迫条件对植物光能利用率的影响,随着环境中有效水分的增加,该值逐渐增大,依据上述公式,其取值范围为0.5(极端干旱)到1(非常湿润)之间。

### 2.3.2 土壤异养呼吸计算

土壤呼吸  $R_s$  包括土壤根系的自养呼吸  $R_a$  和微生物、动物等的异养呼吸  $R_h$ , 是陆地碳循环的主要组成部分。本文使用文献[41]构建的土壤异养呼吸模型,  $R_s$  计算式为:

$$R_s(x, t) = (0.588 + 0.118 \times f_{\text{SOC}_{20}}) \times \frac{e^{\frac{T(x, t)}{10} \ln(1.83 \times e^{-0.0067})}}{P + 2.657} \times \frac{P + 2.972}{P + 2.657} \quad (13)$$

式中,  $R_s$  为日土壤呼吸量, 单位为  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $f_{\text{SOC}_{20}}$  为 0~20 cm 的 SOC, 单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $T(x, t)$  为月平均气温, 单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;  $P$  为月降水总量, 单位为 cm。

基于中国实测数据<sup>[42]</sup>, 进一步构建了  $R_s$ - $R_h$  关系模型, 计算式为:

$$R_h(x, t) = -0.0009R_s^2(x, t) + 0.6011R_s(x, t) + 4.8874 \quad (14)$$

依据上述计算的 NPP 及  $R_h$ , 得到投影面积下的生态系统碳汇结果 NEP:

$$f_{\text{NEP}}(x, t) = f_{\text{NPP}}(x, t) - R_h(x, t) \quad (15)$$

### 2.3.3 基于地形校正的 NEP 计算

由于地形的起伏同时作用于植被及土壤表面, 地表表面积的增加会导致 NPP、 $R_h$  的同比增

$$\epsilon(x, t) = \epsilon_1(x, t) \times \epsilon_2(x, t) \times W_\epsilon(x, t) \times \epsilon_{\text{max}} \quad (9)$$

式中,  $\epsilon_1(x, t)$  和  $\epsilon_2(x, t)$  分别为低温和高温对植被光能利用率的胁迫系数;  $W_\epsilon(x, t)$  为水分胁迫系数;  $\epsilon_{\text{max}}$  为理想条件下各植被类型的最大光能利用率, 参照全国范围内的典型植被统计值<sup>[40]</sup>。

低温、高温、水分胁迫系数的计算式分别为:

$$\epsilon_1(x, t) = 0.8 + 0.02T_{\text{max}}(x) - 0.0005[T_{\text{max}}(x)]^2 \quad (10)$$

加, 使用上述计算得到的地表表面积对 NPP、 $R_h$  进行进一步的校正, 计算式分别为:

$$f'_{\text{NPP}}(x, t) = \frac{S_R(x)}{S(x)} \times f_{\text{NPP}}(x, t) \quad (16)$$

$$R'_h(x, t) = \frac{S_R(x)}{S(x)} \times R_h(x, t) \quad (17)$$

式中,  $f'_{\text{NPP}}(x, t)$  表示像元  $x$  地形校正后的 NPP, 单位为  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ ;  $R'_h(x, t)$  为像元  $x$  地形校正后的  $R_h$ , 单位为  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ ;  $S(x)$  为  $x$  像元的地表面积, 单位为  $\text{m}^2$ ;  $S_R(x)$  为  $x$  像元的投影面积, 单位为  $\text{m}^2$ 。

依据上述计算得到地形校正下的生态系统碳汇 NEP 结果:

$$f'_{\text{NEP}}(x, t) = f'_{\text{NPP}}(x, t) - R'_h(x, t) \quad (18)$$

## 3 结果分析

### 3.1 NEP 精度评价

为验证 NEP 计算精度, 分别使用实测数据验证与相对数据集验证两种方法进行对比。由于 NEP 数据测量较为困难, 湖北省内 NEP 实测数据较少, 因此本文使用全国通量站点 NEP 同化值进行对比, 使用湖北省范围内公开数据集及其他研究人员成果进行相对数据集验证。

#### 3.1.1 实测数据验证

实测验证采用全国通量站点经过数据同化后生成的中国典型碳循环数据集<sup>[43]</sup>作为参考值, 其结果如表 3 所示。大部分通量站点位于中高海拔的山地丘陵地带, 下垫面植被主要为各类林地, 分布于全国各气候区, 具有一定的代表性。通量站点通过记录下垫面生态系统碳交换量得到站点周边的 NEP 值<sup>[44]</sup>, 其有效观测范围一般在 1~5 km 左右, 可为山地碳循环精度验证提供数据支撑<sup>[45]</sup>。其中地形校正前各站点平均误差为

153.69  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,地形校正后各站点平均误差为 150.73  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,精度提升约 1.90%,除 HSF 和 SNF 站点外,其余站点校正后误差均小

于校正前。其中由于站点部分月份云雾遮挡及蒸散量数据的缺失,QYF 及 SNF 站点误差值较高。

表 3 全国通量站点年均 NEP 值及误差

Table 3 NEP Value and Error of Different Flux Stations

站点	站点属性		NEP/( $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )			平均误差/( $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	
	海拔高度/m	下垫面植被	中国典型碳循环数据集	地形校正前	地形校正后	地形校正前	地形校正后
BJF	1 259~1 269	温带落叶阔叶林	357.99	291.01	311.79	66.98	46.20
CBF	784	温带落叶针叶林	284.43	214.48	215.12	69.96	69.32
DHF	230~360	亚热带常绿阔叶林	232.24	133.85	149.19	98.39	83.05
HSF	58	亚热带常绿阔叶林	227.03	333.45	340.77	106.42	113.75
HTF	300~415	亚热带常绿阔叶林	182.11	202.04	215.06	19.93	32.95
MXF	1 816	温带落叶针叶林	228.43	188.41	211.90	40.02	16.53
QYF	102	亚热带常绿针叶林	511.44	171.29	172.54	340.14	338.90
SNF	1 750	亚热带混交林	370.71	-116.99	-134.48	487.70	505.18

3.1.2 相对数据验证

相对验证使用与公开数据集及其他研究人员成果比较的方式,由于 NEP 相关公开数据较少,故增加与之密切相关的 NPP 数据之间的精度比较。本文方法估算的 NEP、NPP 与公开数据集的结果对比分别如表 4、表 5 所示。

GLASS 数据集采用贝叶斯算法集成 8 种光能利用率,能够较好反映不同植被类型的 NPP,本文结果与该数据集在不同地类和总体均值均最为接近,校正前、后 NPP 的均方根误差分别为 212.13  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、152.14  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。BEPS 数据集为植被机理模型<sup>[46]</sup>采用多种植被生长参数、二氧化碳浓度等数据计算生成,本文不同地类结果与该数据集一致,校正后 NEP 的均方根误差为 209.35  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,校正后 NPP 的均方根误差为 237.85  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。MOD17A3 数据集在全球范围内对不同植被类型使用相同的最大光能利用率,使得不同地类计算结果差异较小,但其误差较高,与本文结果有一定差异。与其他研究对比分析发现,文献[47]利用 CASA 估算湖北省 2000—2019 年 NPP 为 800~1 300  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;文献[48]估算湖北省 2010—2018 年林地 NPP 和省域平均 NPP 分别为 950  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、598  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;文献[49]计算湖北省大部分地区 NEP 在 -16~40  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  之间,与本文计算结果大致相同。

3.2 气象及地形因子校正结果

3.2.1 气象因子地形校正结果

将气温、降水、太阳辐射分别进行地形校正,并使用 30% 数据进行精度验证,其决定系数  $R^2$  分别为 0.923、0.974、0.989,直接进行克里格插值

后的  $R^2$  分别为 0.808、0.958、0.987,说明气象因子地形校正后的结果显著优于直接插值的结果。

表 4 NEP 估算结果与其他研究结果对比/( $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )

Table 4 Comparison of NEP Estimation Results with Other Research/( $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )

土地利用类型	参考数据集	本文方法	
	BEPS	地形校正前	地形校正后
湿地	11.06	-92.43	-91.92
耕地	17.35	-3.17	-2.97
园地	33.37	39.27	39.46
林地	74.39	171.81	209.46
草地	12.25	2.04	9.07
均值	50.99	92.74	114.10

表 5 NPP 估算结果与其他研究结果对比/( $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )

Table 5 Comparison of NPP Estimation Results with Other Researches/( $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )

土地利用类型	参考数据集			本文方法	
	BEPS	GLASS	MOD17A3	地形校正前	地形校正后
湿地	312.07	405.21	409.00	428.08	445.97
耕地	424.34	534.97	438.52	503.38	525.04
园地	558.20	627.26	564.16	546.13	580.55
林地	732.85	769.86	592.72	723.05	806.32
草地	460.30	532.65	492.73	518.58	549.07
均值	608.58	673.90	530.38	631.57	690.40

图 4 为 2019 年地形校正前后气象因子分布图。由图 4 可以看出,经过地形与位置的校正后,不同海拔出现了明显的温度差异化分层现象。海拔高值区(如鄂西山地区)气温明显低于江汉平原区,而山脊河谷(如长江沿岸)由于海拔较低,气温也比周围山脉更高。高程变化对于降水影响

较小,全省大部分地区属亚热带季风性湿润气候,山脉对于降水的阻隔作用显著,造成了湖北省域内南部降水多、北部降水少的格局。夏、秋两季降水高值区主要集中在湖北省南部,夏季鄂西南与鄂东南两地降水明显高于其他地区,冬季降水则呈现明显的经度差异,鄂东地区高于鄂西

地区。由于太阳短波辐射空间分辨率较粗,插值后结果出现明显的分块现象,经过验证,其 $R^2$ 仍可以达到0.989,符合高精度碳汇量估算的需求。由于南部地区降水较多,云雾对太阳辐射的遮挡作用较强,太阳辐射的空间分布呈现东北高、西南区域低的格局。

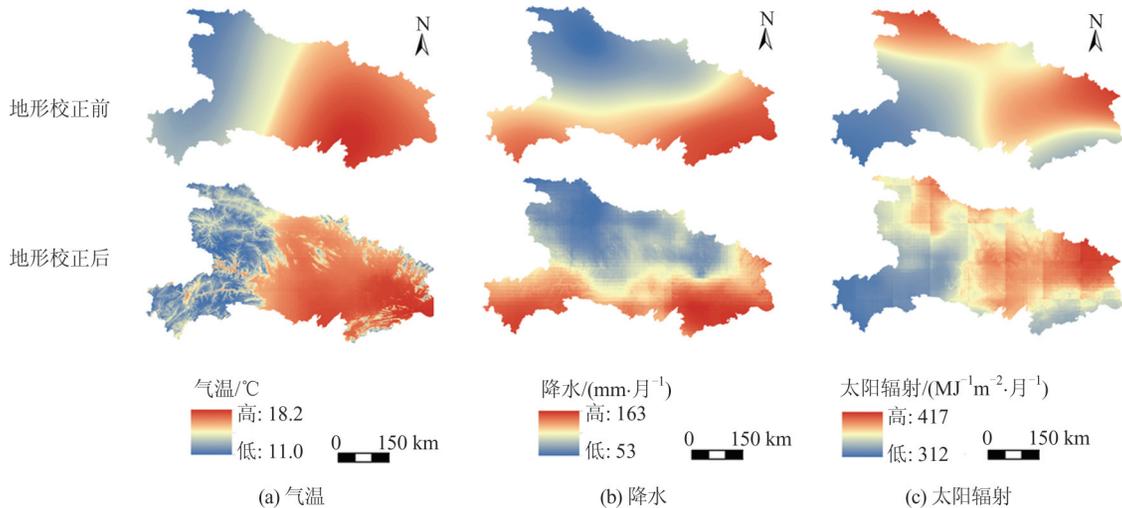


图4 2019年地形校正前后气象因子分布图

Fig. 4 Meteorological Map Before and After Topographic Correction in 2019

### 3.2.2 地表面积计算结果

本文使用30 m分辨率DEM数据,当地表不存在起伏时,其地表面积约为900 m<sup>2</sup>,然而,最终计算得到实际地表面积在874~6 715 m<sup>2</sup>之间,如图5所示。在鄂中地势平坦地区,地表面积与投影面积相差不大,单个像元面积值约为900 m<sup>2</sup>,在鄂东山地,由于海拔较高,地形崎岖程度较高,地表面积与投影面积的差值较大,最高值出现在神农架。在鄂西及鄂北地区,岗地丘陵造成的地形差异弱于鄂东,地表面积在1 000~2 000 m<sup>2</sup>之间。依据地表面积计算结果,湖北省投影面积为18.59万 km<sup>2</sup>,地表面积为19.78万 km<sup>2</sup>,地表面积比投影面积高6.41%。

对地表面积与投影面积的面积差值进行统计,直方图如图6所示。由于湖北省中部地区平原面积较大,其地表面积与投影面积间差值较小,大部分区域的像元差值在10 m<sup>2</sup>以内。其中投影面积与地表面积完全相同像元占比2.71%,面积差在10 m<sup>2</sup>以内像元占比46.74%,面积差在100 m<sup>2</sup>以上像元占比19.04%,主要分布在鄂西山区。

## 3.3 NEP地形校正结果

### 3.3.1 地形校正前后NEP空间分布格局

地形表面积与投影面积之间的差异与其所导致的NEP差异如图7所示。湖北省地表面积

相比于投影面积高6.41%,相较之下,地形校正前年均NEP为92.74 gC·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,地形校正后年均NEP为114.10 gC·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,地形校正后NEP值较校正前高23.03%。这一差异主要是因为鄂西山地区地形起伏较大,其地表面积显著高于投影面积,山区适于林木的生长,贡献了全省较多的NEP,造成NEP增量差异比相较于面积差异比更高。具体而言,鄂西山区与鄂东部分县区(如神农架林区、黄石市阳信县等)由于林木种植较为旺盛,单位面积碳汇量较高,其增量处于全省中等水平,一般在11%~39%之间;鄂中平原地区大部分为碳源区,地表面积的增加加大了单位面积二氧化碳的排放,其增量差异比为负值。

### 3.3.2 地形校正前后NEP地类差异

地形校正前后各植被类型月均NEP变化曲线如图8所示。由图8可以看出,不同植被类型NEP变化趋势大致相同,均在8月达到最高值,在11月至次年3月处于最低值-20 gC·m<sup>-2</sup>·月<sup>-1</sup>以下。对于不同植被类型,林地NEP远高于其他植被类型,8月NEP峰值达到100 gC·m<sup>-2</sup>·月<sup>-1</sup>以上;草地、耕地NEP值也较高,且草地的生长曲线较为平缓,7月、8月的NEP差异较小,均约为50 gC·m<sup>-2</sup>·月<sup>-1</sup>;湖北省湿地大部分为内陆滩涂,碳固定量较小,8月NEP峰值为20 gC·m<sup>-2</sup>·月<sup>-1</sup>。

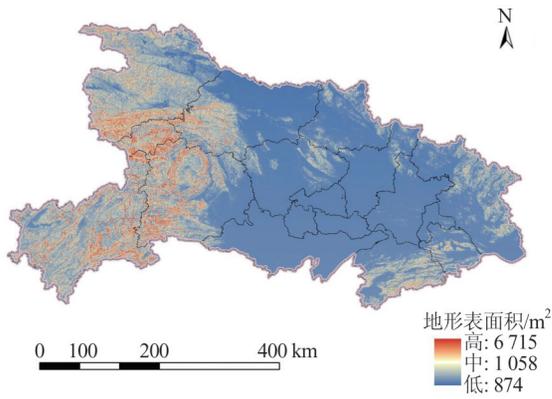


图 5 湖北省地表面积分布图

Fig. 5 Surface Area Map in Hubei Province

地形校正前后不同地类 NEP 对比见表 6。由表 6 可以看出,气象数据校正后,仅林地 NEP 上升,其他地类 NEP 均下降,这是由于植被及气象数据垂直分异所导致的。气象数据校正后,林地 NEP 比校正前提升了  $11.24 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;园地下降最多,降低了  $8.71 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;NEP 均值提

升了  $3.22 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。由于地表表面积与投影面积之间的差异,地形校正后的 NEP 显著高于校正前 NEP。其中林地地形校正后 NEP 变化最多,增加了  $37.65 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其次为草地,为  $7.03 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,湿地、耕地、园地变化量较小,均在  $1 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  以下。

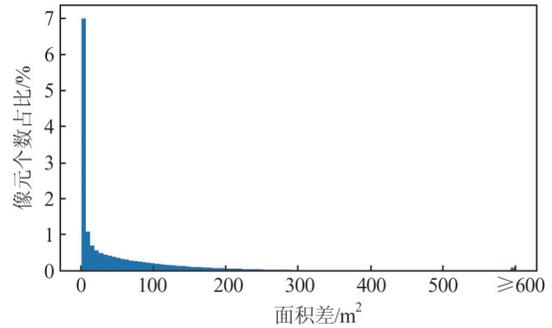


图 6 湖北省地表面积与投影面积差值

Fig. 6 Difference Between Surface Area and Projected Area in Hubei Province

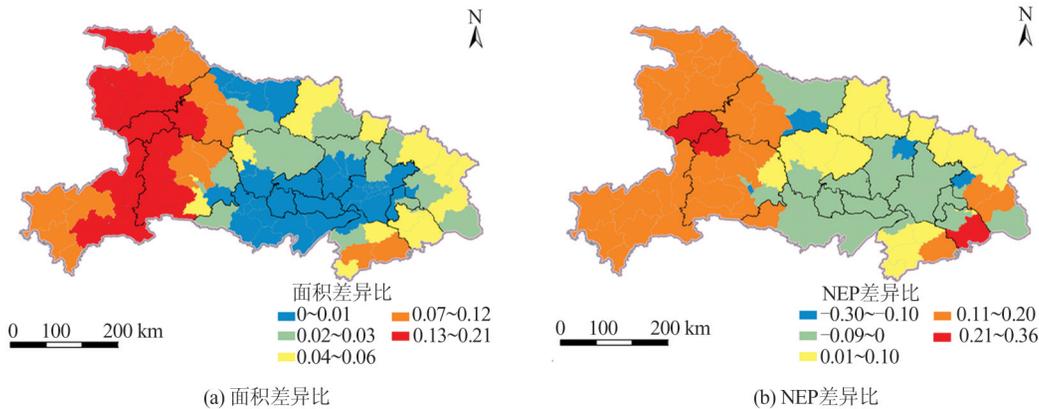


图 7 湖北省地表面积与 NEP 差异比空间分布图

Fig. 7 Difference Ratio of Surface Area and NEP in Hubei Province

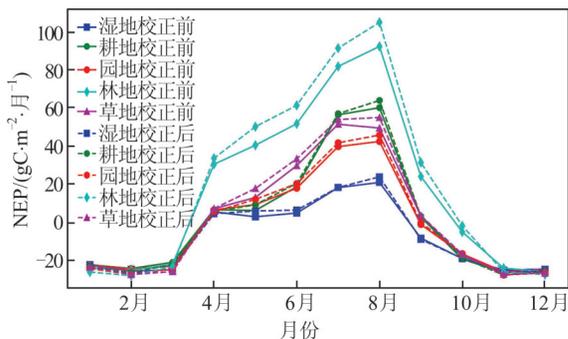


图 8 地形校正前后不同地类月均 NEP 变化

Fig. 8 Monthly NEP Variations of Different Land Use Types Before and After Topographic Correction

### 3.4 NEP 时空分布特征

#### 3.4.1 2019 年年均 NEP 空间分布特征

湖北省 2019 年年均 NEP 为  $9.51 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ ,

折合为  $114.10 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,全省全年的 NEP 总量 2112 万吨碳,其空间分布如图 9 所示。湖北省年度 NEP 空间分布差异较大,整体呈现东西高、中间低的分布特征。山区 NEP 较高,城区等植被覆盖度低或者无植被区域 NEP 偏低。神农架及周边地区 NEP 可达  $480 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,恩施由于云雾遮挡的影响,其 NEP 值稍低。江汉平原区 NEP 值较低,其中长江沿岸潜江、仙桃、武汉市由于河网密布,且开发程度较高,其 NEP 值仅在  $-384\sim-120 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  之间。鄂中地区碳汇值均较低,在全省内属于碳源区,鄂东及鄂西部分县区贡献了大部分碳汇。

#### 3.4.2 2019 年各季度 NEP 空间分布特征

湖北省 2019 年春、夏、秋、冬 4 个季节的 NEP 总量分别为 425 万吨碳、3472 万吨碳、-312 万吨

表6 地形校正前后不同地类NEP对比/(gC·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)  
Table 6 NEP of Different Land Use Types Before and After Topographical Correction/(gC·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)

土地利用类型	NEP			NEP变化量	
	校正前	气象数据		校正后	校正后
		校正后	地表面积校正后		
湿地	-92.43	-97.21	-91.92	-4.78	0.51
耕地	-3.17	-9.87	-2.97	-6.70	0.20
园地	39.27	30.56	39.46	-8.71	0.19
林地	171.81	183.05	209.46	11.24	37.65
草地	2.04	1.75	9.07	-0.29	7.03
均值	92.74	95.96	114.10	3.22	21.36

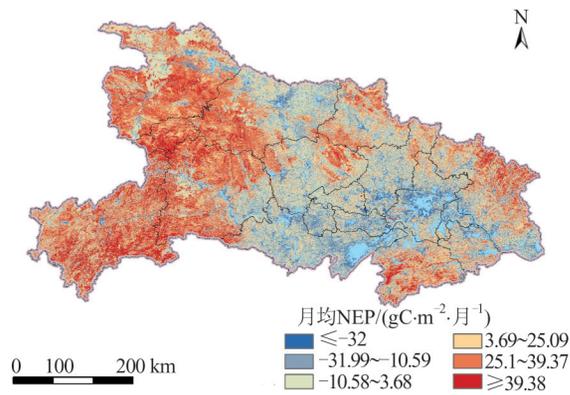


图9 2019年全年月均NEP分布图  
Fig. 9 Monthly NEP Map in Hubei Province in 2019

碳、-1 473万吨碳。冬季植被所固定的碳低于土壤生物异养呼吸所排放的二氧化碳,为碳源季节;夏季植被的迅速生长固定了大部分碳,使得全年碳汇量略有盈余;春季与秋季植被生长与土壤异养呼吸的消耗大致相当。

湖北省2019年四季月均NEP空间分布如图10所示。由图10可以看出,春季林地碳汇量明显高于其他用地;夏季全省范围内NEP值均处在较高水平,其中林地NEP仍最高,草地、园地、耕地NEP也均在30 gC·m<sup>-2</sup>·月<sup>-1</sup>以上,建设用地由于植被生长较少,其NEP小于0,武汉及其周边地区最为明显;秋季鄂西南地区NEP明显高于其他地区,此时除部分林地外,其他各地类均转变为碳源;冬季全省各地类均处于碳源区,鄂西部分地区由于土壤异养呼吸较为强烈、地形起伏较大,其NEP值略低于其他地区。

### 3.4.3 2019年NEP格局演变

使用空间自相关与重心分析解释湖北省NEP的整体空间分布状况及格局演变特征。湖北省地形校正前后各季度NEP全局Moran's I指数见表7。由表7可以看出,2019年各季度校正前后NEP的Z值都大于2.58(即对应p<0.01),

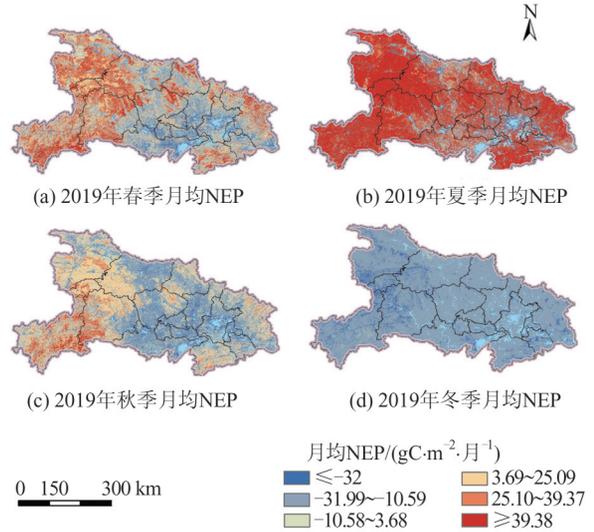


图10 2019年湖北省四季的月均NEP分布图  
Fig. 10 Monthly NEP Distribution of Four Seasons in Hubei Province in 2019

表7 地形校正前后空间自相关指数  
Table 7 Moran's I Index Before and After Topographic Correction

季节	地形校正前		地形校正后	
	Moran's I指数	Z值	Moran's I指数	Z值
春季	1.10*	17.79	1.06*	17.19
夏季	1.33*	21.43	1.23*	19.92
秋季	0.95*	15.43	0.92*	14.94
冬季	0.67*	11.13	0.49*	8.11
年均	1.24*	19.98	1.18*	19.10

注:\*表示p<0.01,空间自相关呈强显著性。

Moran's I指数均呈现强显著性,表明湖北省全年生态系统碳汇存在极为显著的空间集聚分布模式。从全局Moran's I指数来看,冬季明显低于其他季度,表明在冬季NEP空间集聚效应最低,夏季NEP空间集聚效应最高,年均均为1.24。地形校正后,各季节空间相关性均有所降低,其中春秋两季降低较小,冬季降低最多,年均均为1.18。

湖北省四季NEP重心轨迹如图11所示。不同季节之间的NEP重心移动距离较大,其中春季由于林地碳汇远高于其他地区,NEP重心位于鄂西林地中心处;夏季由于各植被生长均较为旺盛,NEP向东移动至宜昌东部;秋、冬两季大部分植被NEP由正转负,此时重心表现为全省范围内生态系统碳源的分布趋势,由于耕地、园地等生态系统碳排放量高于林地,秋季重心则大幅度向东偏移,位于孝感境内;冬季不同植被类型NEP极为接近,其重心位于荆门境内,即湖北省的几何重心处。春季地形校正前后的重心更多表现

为鄂西林地区区域地表面积的重心,校正后相比于校正前其重心略向东偏;夏季由于鄂西地形起伏程度更高,校正后的重心不可避免地向西偏移;鄂东丘陵区相比于鄂西山区,其林地 NEP 更低,由于地形效应的影响,校正后的秋季重心向鄂东丘陵区处靠近。

## 4 讨论

### 4.1 地形因子与生态系统碳汇的关系

地形对于植被生长影响较大,不同地形处气象条件的胁迫形成了植被种类及长势的垂直差异性<sup>[15]</sup>。使用部分依赖图<sup>[50]</sup>,探究海拔高度、坡向、地表表面积差异对最终 NEP 结果的边际影

响,如图 12 所示。

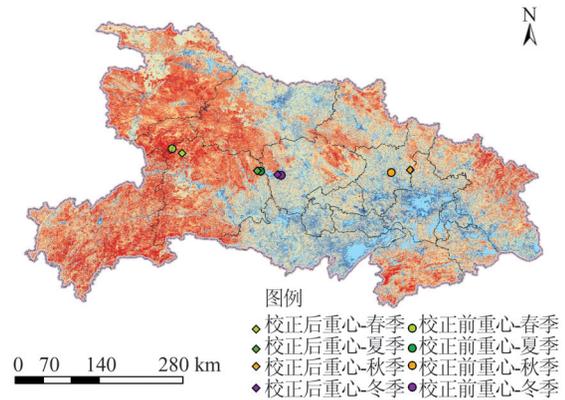


图 11 地形校正前后四季 NEP 重心变化

Fig. 11 NEP Gravity Center Changes in Four Seasons Before and After Topographic Correction

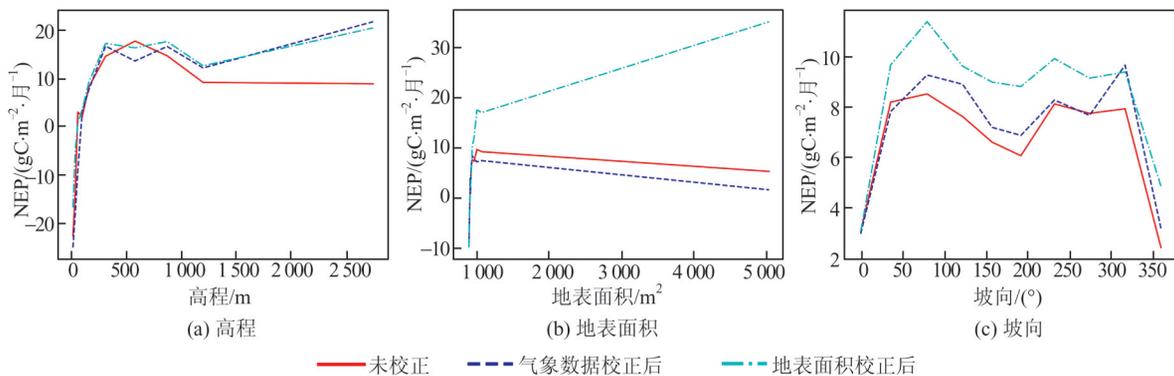


图 12 地形校正前后不同地形因子与 NEP 间关系

Fig. 12 Effect of Topographical Correction on the Relationship Between Terrain Factors and NEP

湖北省大部分区域海拔高度在 3 000 m 以下,对比图 9 与图 12 可知,在低海拔处,即鄂中平原向鄂东、鄂西延伸处,随着高程增加,NEP 呈现快速上升趋势。这是由于地势的改变造成植被类型剧烈变化,由耕地、水域及建设用地向园地、草地再向林地转变。在 500~800 m 处,降水、太阳辐射在低山丘陵处地形校正前后有所差异,NEP 随着气象因子改变而发生变化<sup>[51]</sup>。在 1 200~3 000 m 处,NEP 随高程变化幅度较小,由于地形效应的原因,采用地形校正得到的温度更能反应该区域内的实际气温,植被生长最适宜温度  $T_{max}$  更能反应高山植被的情况,气温胁迫值相比于校正前有所提升,从而造成校正前后 NEP 的趋势差异。

不同坡向处由于水热条件的不同<sup>[52]</sup>,植被生长情况也有所不同。本文结果中东坡(90°坡向)、西坡(270°坡向)NEP 最高,北坡(0°坡向)最低,南坡(180°坡向)其次。校正后大部分坡向高于校正前,其中东-南坡向的提升高于其他坡向,约  $3 \text{ gC} \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。阳坡土壤异养呼吸更高,同时土壤水分较低,其 NEP 值较低<sup>[53-54]</sup>,北坡由于太阳辐射较低,植被长势较弱,与文献<sup>[55]</sup>的分析一致。

地形起伏直接影响了地表面积的大小,地形起伏变化更大的区域,坡度越高,其地表面积也随之变大。在地表面积大于  $950 \text{ m}^2$  的地区,其坡度较高,在重力影响下土壤水分向低处流失,NEP 随坡度增加而降低<sup>[56-57]</sup>。地形校正后,植被生物量与土壤生物量均随地形起伏有所增加。在鄂中、鄂东过渡地带,地形的变化导致地表面积上升,植被类型改变导致植被 NPP 快速升高<sup>[58]</sup>, $R_h$  变化速率则较缓,该区域由碳源变为碳汇地;在地形起伏急剧变化的山地,NPP 与  $R_h$  均随表面积的增加呈线性增加,最终 NEP 结果也呈现相同的增长趋势。

### 4.2 地形校正对生态系统碳汇时空格局的影响

本文将地形影响纳入进碳汇的模拟过程中,与传统的模型相比,其计算精度更高。研究表明,由于林地对光能的综合利用率更高,NEP 值

也最高,是最大的碳汇来源地,地形校正后相比地形校正前NEP增高约 $37.65 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,草地其次,耕地、湿地NEP增加最少。与文献[52]结果类似,除林地外,气象因子校正前与校正后相比植被生产力有所高估;林地主要生长在海拔较高的鄂东、鄂西地区,不同海拔区由于水热条件不同,其优势植被也有所不同,其垂直带谱从常绿阔叶林到针叶林、灌丛逐渐过渡<sup>[15]</sup>。在鄂东山区,其大部分水分胁迫值在0.9以上,植被生长限制因素主要为气温,在地形校正后,温度胁迫值增高,其碳汇值有所增高。经过地表面积校正后,鄂西由于地形起伏更大,林地、草地等自然类型植被多分布于此区域,地表面积远高于投影面积,地形校正后生物量的增高<sup>[59]</sup>使得NEP值升高,重心西移;耕地、园地则由于土地利用方式不同以及人为的平整,坡度较小,地形校正所带来的影响较小;湿地所处区域邻近各类湖泊水域,地形几乎没有起伏,地形校正前后变化较小。

在相同水热条件下,不同植被其生长物候也会呈现大致相同的趋势。一方面,气温升高有利于植被的碳固定<sup>[60]</sup>,在植被生长季节(春夏),随着植被光合作用的逐渐加强,地形对NEP的影响也逐渐升高,并在夏季达到顶峰。另一方面,温度又会加强生物呼吸作用<sup>[60]</sup>,秋季温度、太阳辐射均有所下降,植被光合作用产物仅用于维持自身呼吸消耗;冬季植被光合作用停止,土壤异养呼吸大于植被NPP,地形效应对 $R_h$ 的影响高于对NPP的影响,造成其NEP值略低于地形校正前。不同植被类型中,林地NEP变化幅度最大,农作物最小。与其他植被有所不同,耕地由于人为劳作,在6月—7月进入生长旺盛季,农作物有机质得到迅速积累<sup>[61]</sup>,其NEP也随着快速上升。

在与其他数据的对比中,NEP结果具有较高的一致性,但不同植被间差异更加显著。原因主要有以下几点:(1)现有的大尺度研究一般采用MODIS或AVHRR等影像数据,其空间分辨率较粗,弱化了地形对结果的影响<sup>[34]</sup>。(2)气象、植被覆盖、遥感影像等数据源之间的差异也会造成最终结果的误差累积,如气象台站稀疏导致和地表覆盖不确定性所导致差异是碳汇差异的重要来源之一<sup>[62]</sup>。因此,本文使用同化气象数据集以尽可能填补山区气象台站空白,在土地覆盖数据中,使用了第三次全国国土调查结果的一部分,在目前所有可用数据中准确度最高。(3)各算法间存在的差异,由此导致的结果差异最多可以达

2~3倍<sup>[8]</sup>,如MODIS算法中,限制所有植被最大光能力为 $0.389 \text{ gC}/\text{MJ}$ ,造成估算结果普遍偏小<sup>[63]</sup>。

## 5 结 语

本文使用CASA及GSMSR模型计算碳汇NEP,从气象因子地形校正及地表面积校正两方面优化NEP计算结果。结果显示:

1)地形校正可以有效提升NEP估算的精度,对比全国通量站点数据,校正前、后的平均误差分别为 $153.69 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $150.73 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,精度提升约1.90%。地形校正后年均NEP为 $114.10 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,比校正前提高了23.03%。夏季的碳汇量最高,达到3472万吨碳,冬季最低,为-1473万吨碳。

2)地形校正对植被生长期的影响大于其他季节,经过地形校正的气象因子数据显著优于直接进行插值得到的结果,更符合该区域内的实际分布。以往研究结果低估了林地的碳汇量,经过地形校正,林地NEP较未校正结果增加约22%,其次为草地,湿地、耕地、园地由于地表起伏变化较小,其NEP变化量也较小。

3)地形校正对高海拔和地形起伏较大区域影响较大,能够明显改善山地地区NEP精度。随着高程的增加,NEP先快速上升,之后呈现波动态势并趋于稳定;就坡向而言,东坡NEP最高,北坡最低。地形校正后,大部分坡向的NEP高于校正前,其中东-南坡向提升高于其他坡向,同时NEP随地表面积的增加呈线性增加趋势。地形校正对于趋于空间自相关有一定影响,校正后Moran's  $I$ 指数由1.24降为1.18,春秋两季地形校正后重心由西向东移动,夏冬两季重心差别较小。

本文通过地形对气象及地表面积以实现碳汇的更准确计算,其中仍存在一些缺点和不确定性:首先,在现有的植被生产力计算中,使用遥感影像计算的植被指数反演植被长势,但由于阳坡、阴坡处太阳入射角、传感器观测角的不同,其引起的地物光谱失真会导致植被指数的偏差。其次,对地表上植被生长假设偏于理想化,假设生物量随地表面积线性变化。最后,当前实测数据验证仅限于林地,缺少更多植被类型的验证数据。需要在以后的工作中进一步改进。

## 参 考 文 献

- [1] 樊星, 秦圆圆, 高翔. IPCC第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(S2): 44-48.  
FAN Xing, QIN Yuanyuan, GAO Xiang. Interpretation and Suggestions on the Main Conclusions of the Report of Working Group I of IPCC Sixth Assessment Report [J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(S2): 44-48.
- [2] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.  
YANG Yuanhe, SHI Yue, SUN Wenjuan, et al. Terrestrial Carbon Sinks in China and Around the World and Their Contribution to Carbon Neutrality [J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2022, 52(4): 534-574.
- [3] 李寒雨, 毛春梅. 碳中和目标下长三角城市群碳收支时空分异与碳补偿量化研究[J]. 环境保护科学, 2024, 50(5): 67-75.  
LI Hanyu, MAO Chunmei. Quantifying Spatial and Temporal Divergence of Carbon Balance and Carbon Offset in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration Under the Carbon Neutrality Goal [J]. *Environmental Protection Science*, 2024, 50(5): 67-75.
- [4] WANG Y L, WANG X H, WANG K, et al. The Size of the Land Carbon Sink in China [J]. *Nature*, 2022, 603(7901): E7-E9.
- [5] CHEN J M, JU W M, CIAIS P, et al. Vegetation Structural Change Since 1981 Significantly Enhanced the Terrestrial Carbon Sink [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4259.
- [6] ZHANG D N, ZHAO Y H, WU J S. Assessment of Carbon Balance Attribution and Carbon Storage Potential in China's Terrestrial Ecosystem [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: 106748.
- [7] CAO S P, HE Y, ZHANG L F, et al. Spatiotemporal Dynamics of Vegetation Net Ecosystem Productivity and Its Response to Drought in Northwest China [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2023, 60(1): 2194597.
- [8] PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Estimation of China's Terrestrial Ecosystem Carbon Sink: Methods, Progress and Prospects [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(4): 641-651.
- [9] LI C H, LIU Y F, ZHU T B, et al. Considering Time-Lag Effects Can Improve the Accuracy of NPP Simulation Using a Light Use Efficiency Model [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(5): 961-979.
- [10] ZHANG C, ZHEN H B, ZHANG S H, et al. Dynamic Changes in Net Primary Productivity of Marsh Wetland Vegetation in China from 2005 to 2015 [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 110970.
- [11] LIANG L, GENG D, YAN J, et al. Remote Sensing Estimation and Spatiotemporal Pattern Analysis of Terrestrial Net Ecosystem Productivity in China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1902.
- [12] 贡银娟, 赵军. 基于MODIS-NDVI数据的植被碳汇空间格局研究: 以石羊河流域为例 [J]. 山地学报, 2018, 36(4): 644-653.  
YUN Yinjuan, ZHAO Jun. Spatial Pattern of Vegetation Carbon Sinks Based on MODIS-NDVI Data: A Case Study in Shiyang River Basin, China [J]. *Mountain Research*, 2018, 36(4): 644-653.
- [13] YUAN Y, SHI X Y, ZHAO Z Q. Land Use Types and Geomorphic Settings Reflected in Soil Organic Carbon Distribution at the Scale of Watershed [J]. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3490.
- [14] HE Q S, ZENG C, XIE P, et al. An Assessment of Forest Biomass Carbon Storage and Ecological Compensation Based on Surface Area: A Case Study of Hubei Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 392-400.
- [15] 乔秀娟, 姜庆虎, 徐耀粘, 等. 湖北自然植被概况: 植被研究历史、分布格局及其群落类型 [J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(3): 254-263.  
QIAO Xiujuan, JIANG Qinghu, XU Yaoshan, et al. Natural Vegetation in Hubei Province: History, Distribution Pattern, and Vegetation Types [J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2021, 51(3): 254-263.
- [16] 牛全福, 刘明志, 张曼, 等. 近20年来新疆阿勒泰地区植被动态变化及其对气候与地形的响应 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(9): 1522-1530.  
NIU Quanfu, LIU Mingzhi, ZHANG Man, et al. Vegetation Dynamic Change and Its Response to Climate and Topography in Altay Region of Xinjiang in Recent 20 Years [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(9): 1522-1530.
- [17] 李显风, 袁正国, 邓卫华, 等. 融合多种机器学习模型的2 m气温空间降尺度方法 [J]. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 57-65.  
LI Xianfeng, YUAN Zhengguo, DENG Weihua, et al. Spatial Downscaling Methods for the 2-Meter Air Temperature Grid Data Based on Multiple Machine Learning Models [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2023, 35(1): 57-65.

- [18] LI X J, DU H Q, ZHOU G M, et al. Spatiotemporal Patterns of Remotely Sensed Phenology and Their Response to Climate Change and Topography in Subtropical Bamboo Forests During 2001–2017: A Case Study in Zhejiang Province, China[J]. *GI-Science & Remote Sensing*, 2023, 60(1): 2163575.
- [19] ZHAO C X, LIU J R, MOU W B, et al. Topography Shapes the Carbon Allocation Patterns of Alpine Forests [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165542.
- [20] LIN N, LI J X, JIANG R Z, et al. Quantifying the Spatiotemporal Variation of NPP of Different Land Cover Types and the Contribution of Its Associated Factors in the Songnen Plain[J]. *Forests*, 2023, 14(9): 1841.
- [21] 秦慧平, 易维宁, 黄红莲, 等. 山区地表太阳辐射度随时空变化的模拟分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(7): 793-796.  
QIN Huiping, YI Weining, HUANG Honglian, et al. Simulation of the Irradiance Changing with the Temporal and Spatial Distribution on the Terrain Surface [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(7): 793-796.
- [22] 夏丽, 林爱文, 覃文敏, 等. 1980—2013年湖北省地表太阳辐射时空特征及其驱动因子分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(4): 29-33.  
XIA Li, LIN Aiwen, QIN Wenmin, et al. Spatio-Temporal Characteristics of Solar Radiation and Its Driving Factors in Hubei Province During 1980–2013 [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(4): 29-33.
- [23] WANG W, YIN G F, ZHAO W, et al. Spatial Downscaling of MSG Downward Shortwave Radiation Product Under Clear-Sky Condition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(5): 3264-3272.
- [24] 江芸, 李同文, 程青, 等. 利用时空神经网络模型的长江经济带气温反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 325-332.  
JIANG Yun, LI Tongwen, CHENG Qing, et al. Air Temperature Estimation in the Yangtze River Economic Zone Using Geographically and Temporally Neural Networks[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 325-332.
- [25] 聂磊, 舒红, 刘艳. 复杂地形地区月平均气温(混合)地理加权回归克里格插值[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10): 1553-1559.  
NIE Lei, SHU Hong, LIU Yan. Interpolation of Monthly Average Temperature by Using (Mixed) Geographically Weighted Regression Kriging in the Complex Terrain Region [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1553-1559.
- [26] XIE X Y, LI A N, GUAN X B, et al. A Practical Topographic Correction Method for Improving Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Gross Primary Productivity Estimation over Mountainous Areas [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103: 102522.
- [27] CHEN R, YIN G F, ZHAO W, et al. TCNIRv: Topographically Corrected Near-Infrared Reflectance of Vegetation for Tracking Gross Primary Production over Mountainous Areas [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4409310.
- [28] XIE X Y, TIAN J, WU C L, et al. Long-Term Topographic Effect on Remotely Sensed Vegetation Index-Based Gross Primary Productivity (GPP) Estimation at the Watershed Scale [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 108: 102755.
- [29] BAO G, BAO Y H, QIN Z H, et al. Modeling Net Primary Productivity of Terrestrial Ecosystems in the Semi-Arid Climate of the Mongolian Plateau Using LSWI-Based CASA Ecosystem Model [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46: 84-93.
- [30] BLAKEMORE R J. Non-Flat Earth Recalibrated for Terrain and Topsoil [J]. *Soil Systems*, 2018, 2(4): 64.
- [31] HE Q S, TAN S K, XIE P, et al. Re-assessing Vegetation Carbon Storage and Emissions from Land Use Change in China Using Surface Area [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(4): 601-613.
- [32] 刘蔚秋, 余世孝, 王永繁, 等. 广东黑石顶森林生物量的三维估算[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(4): 66-69.  
LIU Weiqiu, YU Shixiao, WANG Yongfan, et al. Estimation of the Forest Biomass with 3-Dimensional Model at Heishiding Nature Reserve, Guangdong [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(4): 66-69.
- [33] 刘星雨. 地表面积计算方法及其在横断山区的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.  
LIU Xingyu. Research on Calculation Method of Surface Area and Its Application in the Hengduan Mountains [D]. Taiyuan: Taiyuan University of

- Technology, 2022.
- [34] XIE X Y, CHEN J M, GONG P, et al. Spatial Scaling of Gross Primary Productivity over Sixteen Mountainous Watersheds Using Vegetation Heterogeneity and Surface Topography[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(5): e2020JG005848.
- [35] 樊子德, 李佳霖, 邓敏. 顾及多因素影响的自适应反距离加权插值方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(6): 842-847.
- FAN Zide, LI Jialin, DENG Min. An Adaptive Inverse-Distance Weighting Spatial Interpolation Method with the Consideration of Multiple Factors [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6): 842-847.
- [36] 贺倩, 汪明, 刘凯. 基于机器学习的气温要素空间插值[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 733-748.
- HE Qian, WANG Ming, LIU Kai. Spatial Interpolation of Air Temperature Based on Machine Learning [J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(3): 733-748.
- [37] 许珊, 邹滨, 王敏, 等. PM<sub>2.5</sub>浓度空间估算的神经网络与克里格方法对比[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(10): 1642-1650.
- XU Shan, ZOU Bin, WANG Min, et al. Performance Comparison of Artificial Neural Network and Kriging in Spatial Estimation of PM<sub>2.5</sub> Concentration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10): 1642-1650.
- [38] XIE P, LIU Y L, HE Q S, et al. An Efficient Vector-Raster Overlay Algorithm for High-Accuracy and High-Efficiency Surface Area Calculations of Irregularly Shaped Land Use Patches [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(6): 156.
- [39] CHEN Y Z, FENG X M, FU B J, et al. Improved Global Maps of the Optimum Growth Temperature, Maximum Light Use Efficiency, and Gross Primary Production for Vegetation[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(4): e2020JG005651.
- [40] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 700-706.
- ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, HE Hao, et al. Simulation of Maximum Light Utilization Efficiency of Typical Vegetation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 700-706.
- [41] YU G R, ZHENG Z M, WANG Q F, et al. Spatiotemporal Pattern of Soil Respiration of Terrestrial Ecosystems in China: The Development of a Geostatistical Model and Its Simulation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(16): 6074-6080.
- [42] 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]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- SHI Zhihua. Spatial-Temporal Simulation of Vegetation Carbon Sink and Its Influential Factors Based on CASA and GSMSR Model in Shaanxi Province [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [43] HE H L, GE R, REN X L, et al. Reference Carbon Cycle Dataset for Typical Chinese Forests via Colocated Observations and Data Assimilation [J]. *Scientific Data*, 2021, 8: 42.
- [44] PASTORELLO G, TROTTA C, CANFORA E, et al. The FLUXNET2015 Dataset and the ONE-Flux Processing Pipeline for Eddy Covariance Data [J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 225.
- [45] ZHOU H Q, BAO G, LI F, et al. Integration and Comparison of Multiple Two-Leaf Light Use Efficiency Models Across Global Flux Sites [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 3116-3130.
- [46] HE Q N, JU W M, DAI S P, et al. Drought Risk of Global Terrestrial Gross Primary Productivity over the Last 40 Years Detected by a Remote Sensing-Driven Process Model [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(6): e2020JG005944.
- [47] 徐勇, 周清华, 窦世卿, 等. 基于ZGS和TW模型的长江流域植被NPP时空演变特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 225-232.
- XU Yong, ZHOU Qinghua, DOU Shiqing, et al. Spatiotemporal Characteristics of Vegetation Net Primary Productivity in Yangtze River Basin Based on ZGS and Thornthwaite Memorial Models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1): 225-232.
- [48] 陈晓杰, 张长城, 张金亭, 等. 基于CASA模型的植被净初级生产力时空演变格局及其影响因素: 以湖北省为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 253-261.
- CHEN Xiaojie, ZHANG Changcheng, ZHANG Jinting, et al. Analysis of the Spatiotemporal Evolution Patterns of Vegetation Net Primary Productivity and Its Influencing Factors Based on CASA Model - A Case Study of Hubei Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 253-261.
- [49] 杨延征, 马元丹, 江洪, 等. 基于IBIS模型的1960-2006年中国陆地生态系统碳收支格局研究[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3911-3922.

- YANG Yanzheng, MA Yuandan, JIANG Hong, et al. Evaluating the Carbon Budget Pattern of Chinese Terrestrial Ecosystem from 1960 to 2006 Using Integrated Biosphere Simulator[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3911-3922.
- [50] 邵平, 杨健颖, 苏思达, 等. 可解释机器学习: 模型、方法与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022. SHAO Ping, YANG Jianying, SU Sida, et al. Interpretable Machine Learning [M]. Beijing: China Machine Press, 2022.
- [51] CHEN S S, MA M H, WU S J, et al. Topography Intensifies Variations in the Effect of Human Activities on Forest NPP Across Altitude and Slope Gradients[J]. *Environmental Development*, 2023, 45: 100826.
- [52] 李传华, 曹红娟, 范也平, 等. 基于校正的CASA模型NPP遥感估算及分析: 以河西走廊为例[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1616-1626. LI Chuanhua, CAO Hongjuan, FAN Yeping, et al. Remote Sensing Estimation and Analysis of Net Primary Productivity (NPP) Based on Corrected CASA Model: A Case Study of Hexi Corridor[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [53] SUN Q L, FENG X F, GE Y, et al. Topographical Effects of Climate Data and Their Impacts on the Estimation of Net Primary Productivity in Complex Terrain: A Case Study in Wuling Mountainous Area, China[J]. *Ecological Informatics*, 2015, 27: 44-54.
- [54] YANG W J, WANG Y H, WEBB A A, et al. Influence of Climatic and Geographic Factors on the Spatial Distribution of Qinghai Spruce Forests in the Dryland Qilian Mountains of Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 1007-1017.
- [55] 张兴航, 张百平, 王晶, 等. 神农架林区植被分布与地形的关系研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 482-493. ZHANG Xinghang, ZHANG Baiping, WANG Jing, et al. Study on the Relationship Between Terrain and Distribution of the Vegetation in Shennongjia Forestry District [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(3): 482-493.
- [56] CHEN X F, CHEN J M, AN S Q, et al. Effects of Topography on Simulated Net Primary Productivity at Landscape Scale [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 585-596.
- [57] 熊雪婷, 李传华, 陈佳豪. 植被对气候变化响应的地形调控作用[J]. 地理学报, 2023, 78(9): 2256-2270. XIONG Xueting, LI Chuanhua, CHEN Jiahao. Topographic Regulatory Role of Vegetation Response to Climate Change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(9): 2256-2270.
- [58] 王丽霞, 张海旭, 刘招, 等. 一种净初级生产力格局模拟及预测耦合模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1756-1765. WANG Lixia, ZHANG Haixu, LIU Zhao, et al. A Coupling Model of Net Primary Productivity Pattern Simulation and Prediction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1756-1765.
- [59] 宋巍巍, 管东生, 王刚. 地形对植被生物量遥感反演的影响: 以广州市为例[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7440-7451. SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang. Influence of Terrain on Plant Biomass Estimates by Remote Sensing: A Case Study of Guangzhou City, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7440-7451.
- [60] 王菲, 曹永强, 周姝含, 等. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2501-2514. WANG Fei, CAO Yongqiang, ZHOU Shuhan, et al. Estimation of Vegetation Carbon Sink in the Yellow River Basin Ecological Function Area and Analysis of Its Main Meteorological Elements [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2501-2514.
- [61] TAO J B, WU W B, LIU W B. Spatial-Temporal Dynamics of Cropping Frequency in Hubei Province over 2001-2015[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2622.
- [62] XIE X Y, LI A N. Development of a Topographic-Corrected Temperature and Greenness Model (TG) for Improving GPP Estimation over Mountainous Areas [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 295: 108193.
- [63] 苏胜涛, 曾源, 赵旦, 等. 中国陆地植被净初级生产力估算模型优化与分析: 基于中国生态系统研究网络数据[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1276-1289. SU Shengtao, ZENG Yuan, ZHAO Dan, et al. Optimization of Net Primary Productivity Estimation Model for Terrestrial Vegetation in China Based on CERN Data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4): 1276-1289.