doi: 10.6046/zrzyyg.2023151
引用格式: 赵海溶, 莫宏伟. 湖南省植被碳汇动态及其自然驱动因子分析[J]. 自然资源遥感, 2024,36(4): 304-313.(Zhao H R, Mo H W.Dynamic and natural driving factors of vegetation carbon sink in Hunan Province[J].Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(4): 304-313.)

湖南省植被碳汇动态及其自然驱动因子分析

赵海溶, 莫宏伟
(湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院,湘潭 411201)

摘要: 净生态系统生产力(net ecosystem productivity,NEP)是生态系统极为重要的特征量,也是陆地生态系统与大气之间碳交换的物理量。该文基于 MODIS NPP 和气象数据,利用土壤微生物呼吸模型估算 2000—2020 年湖南省的植被 NEP,并结合趋势拟合、变异系数和标准差椭圆等方法对植被碳汇动态变化特点进行分析,进而利用地理探测器和相关分析等方法定量分析自然因子对植被碳汇的影响。结果表明: 湖南省植被碳汇多年平均值为 603.01 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,呈现出南高北低、西高东低,由西南向东北逐步降低的空间分布格局; 2000—2020 年,植被碳汇平均趋势系数为 2.97 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,整体呈现增加趋势; 变异系数以低波动和较低波动为主,高波动地区主要分布于部分城市周边容易受到自然或人为因素干扰的区域; 植被碳汇变化是多因子共同作用的结果,各因子解释力依次为: 海拔>坡度>气温>降水量>坡向,海拔和坡度对湖南省植被碳汇的时空分布具有较强的解释力,气温和降水对植被碳汇的解释力较弱,植被碳汇与气温、降水量正相关的区域分别占植被总面积的 75.13%和 73.11%。研究结果可为该区域生态文明建设和实现“双碳”目标提供科学参考。

关键词: 植被碳汇; 净生态系统生产力(NEP); 动态变化; 驱动因子; 湖南省
中图法分类号: TP 79 **文献标志码**: A **文章编号**: 2097-034X(2024)04-0304-10

0 引言

CO_2浓度的持续升高使得全球气温不断上升[1],2021 年联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出,全球平均气温相较于工业化前水平已经升高了 1.1 ℃,全球变暖成为人类发展面临的最大非传统安全挑战[2]。因此,碳循环成为了全球变化研究中的核心和热点内容之一,其中陆地生态系统是碳循环的重要组成部分,在减缓全球气候变化中发挥着重要的作用[3]。当生态系统固定的碳量大于排放的碳量,称之为碳汇,反之则为碳源[4]。作为陆地生态系统中最重要的碳库,植被是增加温室气体吸收和实现碳中和的有效方法,在全球碳平衡中起着重要作用[5]。因此,测算植被碳汇能力、分析植被碳汇的时空分布格局及其驱动因子至关重要。

19 世纪 60 年代,国外开始了关于植被碳汇的研究,我国则于 70 年代后期陆续开展[6],90 年代后出现了大量研究成果。目前,利用遥感技术估算植被碳汇已经从研究总初级生产力(gross primary productivity,GPP)和净初级生产力(net primary productivity,NPP)发展到估算净生态系统生产力(net ecosystem productivity,NEP)、确定区域碳收支、估算碳源/汇、定量评估气候变化和人类活动等对植被碳汇的影响[7-8]。冯艾琳等[9]结合 GPP 数据对辽宁陆地生态系统碳源/汇强度及其空间格局分布展开研究; 张继平等[10]基于 MODIS NPP 数据分析了三江源地区草地生态系统的碳储量和碳汇量的时空变化特征; 潘竟虎等[6]、刘凤等[7]、王川等[11]和贠银娟等[12]利用 NEP 和土壤微生物呼吸模型依次分析了青藏高原、塔里木河下游、石羊河流域和中国西北干旱区植被碳汇的时空格局。这些研究也进一步证明 NEP 是表征生态系统碳收支的重要指标[13],对碳循环的研究具有重要意义。但植被碳汇的研究大多都是针对大尺度区域的主要植被类型,而对小尺度区域植被碳汇的全面评估较少。

我国提出力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和的“双碳”目标[14],并把“双碳”目标纳入生态文明建设整体布局[15]。湖南省位于《全国

收稿日期: 2023-05-23; **修订日期**: 2023-08-10
基金项目: 湖南省自然科学基金项目“湘江下游城乡交错带土地生态安全时空动态研究”(编号: 2018JJ2115)资助。
第一作者: 赵海溶(1998-),女,硕士,研究方向为基于 GIS 的植被碳汇及生态价值评估。Email: zhaohr2028@163.com。
通信作者: 莫宏伟(1968-),男,博士,副教授,研究方向为 GIS 与城乡国土资源评价。Email: 1100028@hnust.edu.cn。

重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》提出的长江重点生态区及南方丘陵山地带内,在我国实现“双碳”目标中具有重要作用,同时也肩负着沉重的责任。目前,已有研究更多的是对湖南省的植被 NPP 进行了评估和分析[16-17],但关于植被 NEP 及碳汇的研究较少,尚未明确湖南省植被碳汇变化特征及影响机制。因此,本文利用 MODIS NPP 数据、气象数据和土壤微生物呼吸模型,估算了 2000—2020 年湖南省植被碳汇,分析其动态变化特征及驱动因素。以期明确湖南省植被碳汇能力及其内在影响机制,为该区域生态文明建设和实现“双碳”目标提供科学参考。

1　研究区概况及数据源

1.1　研究区概况

湖南省位于长江中游南部(N24°38′~30°08′,E108°47′~114°15′),区域总面积为 21.18 万 km^2。全省东(罗霄山脉)、南(南岭山脉)、西(武陵山脉和雪峰山脉)三面山地环绕,逐渐向中部湘中丘陵、盆地和东北部的洞庭湖平原倾斜,呈现出向东北部开口的不对称马蹄形地形[18],湘、资、沅、澧四水呈扇形汇入洞庭湖;气候类型属大陆性亚热带季风湿润气候,水热条件差异较大,降水量丰沛,年平均气温为 16~18 °C,年降雨量为 1 200~1 700 mm;处于云贵高原向江南丘陵、南岭山脉向江汉平原过渡的地带,在自西向东呈梯级降低的云贵高原东延部分和东南山丘转折线的南端,地貌类型多样,生境条件复杂多样,孕育着典型的中亚热带常绿阔叶林,是中国植被资源较为丰富的省份之一[19](图 1)。

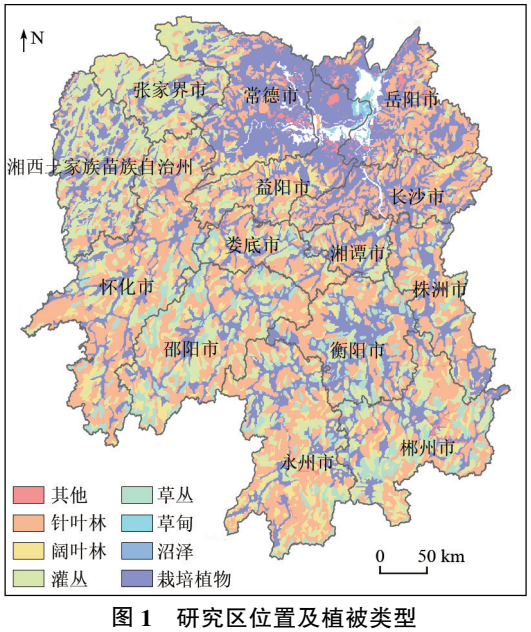


图 1　研究区位置及植被类型

Fig.1　Location of the study area and vegetation type

1.2　数据源及处理

研究数据源主要包括遥感数据、气象数据、地形数据、植被类型数据及其他数据。

1)遥感数据。研究所用数据主要是 MODIS NPP 产品 MOD17A3HGF.006 数据集,涉及分幅影像网格为 h27v05,h27v06 和 h28v06,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a,下载于美国国家航空航天局戈达德航天中心用来存放数据的网站接口 LAADS DAAC(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)。运用 MRT(MODIS reprojection tool)工具对原始数据进行拼接、格式转换、投影变换及重采样,再利用 ArcGIS10.5 软件进行影像的剪裁、剔除无效值、乘以转换因子等操作,得到研究区 NPP 年度数据集。

2)气象数据。气象数据包括年平均气温和年降水量数据,空间分辨率为 1 000 m,来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn),其中年平均气温数据是根据逐月平均数据集进行年度计算得到的。

3)地形数据。数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据(空间分辨率为 90 m)来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘(Shuttle Radar Topography Mission,SRTM)数据,下载于资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/),并通过 ArcGIS10.5 软件提取研究区的坡度和坡向数据。

4)植被类型数据。植被类型数据由中科院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)的 1∶100 万中国植被类型空间分布图(2000 年)合并处理获得,依据分类标准将湖南省主要植被类型归纳为针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、草甸、沼泽、栽培植被及其他 8 个植被大类。

5)行政边界数据。湖南省行政边界数据下载于资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)。

在数据处理方面,利用湖南省矢量边界数据裁剪得研究区所需数据,空间分辨率统一为 500 m,坐标系统一为 WGS_1984/Albers Equal Area Conic。

2　研究模型与方法

2.1　NEP 估算模型

生态系统的碳汇储量包含了绿色植物生物量、凋落物生物量以及土壤有机质呼吸量[6,12]。NPP 即单位面积和单位时间内绿色植物通过光合作用,将光能转化为化学能并积累的有机物数量[16],NPP 减去异养生物(土壤)呼吸作用所消耗的光合作用产

物剩下的部分即为 NEP[20]。NEP 扣除自然和人为干扰等非生物呼吸的碳损耗所剩余的部分,称为净生物群区生产力(net biome productivity,NBP),NBP 在数值上就是陆地碳源/汇[21]。在不考虑各种扰动因素的情况下,NEP 的数值反映了陆地生态系统的净碳交换量,可以将其作为碳汇大小的度量[8,22-23],计算公式为:

$$NEP(x,t) = NPP(x,t) - R_H(x,t) , \quad (1)$$

式中:$NEP(x,t)$ 为 t 年 x 像元的植被 NEP;$NPP(x,t)$ 为 t 年 x 像元的植被 NPP;$R_H(x,t)$ 为 t 年 x 像元的土壤微生物呼吸量。当 $NEP(x,t)>0$,表示植被固定的碳大于土壤微生物呼吸排放的碳,表现为碳汇,反之则为碳源[9]。

裴志永等[23]建立了土壤微生物呼吸量估算模型,汤洁等[22]、潘竟虎等[6]和王川等[11]分别将其应用于吉林省西部、西北干旱区、塔里木河下游的植被碳汇估算中。本文亦采用该模型估测湖南省土壤微生物呼吸状况,计算公式为:

$$R_H(x,t) = 0.22\{Exp[0.0913T(x,t)] + \ln[0.3145R(x,t) + 1]\} \times 30 \times 46.5\% , \quad (2)$$

式中:$T(x,t)$ 为 t 年 x 像元的平均气温;$R(x,t)$ 为 t 年 x 像元的平均降水量。

2.2 NEP 分析方法

2.2.1 年际变化趋势分析

采用一元线性回归分析法,通过计算每个像元的趋势线斜率来反应湖南省 2000—2020 年 NEP 的年际变化趋势,计算公式为:

$$Slope = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(i\,Y_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} Y_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2}, \quad (3)$$

式中:$Slope$ 为趋势线的斜率,即 NEP 年际变化的趋势;n 为监测年数,本文取 21;i 为年变量;Y_i 为第 i 年的 NEP。当 $Slope>0$ 时,表明 NEP 呈增加趋势,反之则 NEP 呈下降趋势。采用 F 检验对 NEP 年际变化趋势进行逐像元显著性检验,若 $P<0.05$,表明其通过显著性检验,反之则未通过。

2.2.2 稳定性分析

变异系数可以反映观察值的变异程度。利用基于像元的变异系数探索湖南省 2000—2020 年植被 NEP 的稳定性,计算公式为:

$$C_V = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(NEP_i - \overline{NEP})^2}}{\overline{NEP}}, \quad (4)$$

式中:C_V 为植被 NEP 的变异系数;NEP_i 为第 i 年的各个像元的植被 NEP;$\overline{NEP}$ 为各个像元多年植被 NEP 平均值。C_V 值越小,表明植被 NEP 的稳定性就越高,数据随时间序列波动小;反之则表示植被 NEP 稳定性低,波动大。

2.2.3 相关性分析

采用基于像元的相关分析法,分析 2000—2020 年湖南省植被 NEP 与驱动因子的相关性,计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

式中:r_{xy} 为变量 x 与 y 的相关系数;x_i 为第 i 年的 NEP;y_i 为第 i 年驱动因子的值;$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 NEP 和驱动因子的 n 年平均值。r_{xy} 值介于[-1,1]之间,$r_{xy}>0$ 表示正相关,$r_{xy}<0$ 表示负相关。相关系数的检验,是在给定的置信水平下,通过查询相关系数检验的临界值表来完成。

2.2.4 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性的工具,能够揭示空间分异性背后的驱动力[24],包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测 4 个模块。本文采用地理探测器对湖南省植被 NEP 空间分异的驱动因子进行探测。

1)因子探测。该模块能够探测驱动因子 X 对于 Y,即 NEP 的影响程度,结果用 q 值度量[25],表达式为:

$$q = 1 - \frac{1}{f\sigma^2}\sum_{h=1}^{L} f_k\,\sigma_k^2 , \quad (6)$$

式中:L 为因子 X 或变量 Y 的分类;f 和 f_k 分别为在整个研究区和类型 h 内的样本数;σ^2 和 σ_k^2 分别为在整个研究区和类型 h 内 Y 值的离散方差。q 的值域为[0,1],q 值越大表示驱动因子 X 对 NEP 的解释力越强,反之则越弱。

2)交互作用探测。该模块能够评估驱动因子两两共同作用时,其对植被 NEP 的影响力是否会增加或减弱,或者这些因子对 NEP 的影响是相互独立的。

2.3 NPP 数据适用性分析

通过与湖南省其他研究成果的比较,分析 NPP 数据的适用性。利用 MODIS 17A3HGF 数据计算得到 2000—2020 年湖南省植被 NPP 多年平均值为 636.53 gC · m^{-2} · a^{-1},闫妍等[17]基于朱文泉改进的

CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型反演得出湖南省 2000—2019 年植被 NPP 多年平均值为 566.92 gC · m^{-2} · a^{-1},两者处于同一范围内(550~650 gC · m^{-2} · a^{-1});陈晓玲等[16]利用相同的模型计算得到 2000—2013 年湖南省植被 NPP 数据,其空间分布呈现出西高东低、南高北低,从西南向东北逐渐递减趋势,这与 MODIS 17A3HGF 数据分析得出的结果一致。综上,利用 MODIS 17A3HGF 数据开展湖南省植被碳汇研究具有较高的可信度。

3　结果与分析

3.1　植被碳汇时空变化特征

2000—2020 年湖南省平均植被碳汇为 603.01 gC · m^{-2} · a^{-1},年均固碳量约为 1.22×10^{14} gC,空间分布格局呈现出南高北低、西高东低,由东北向西南逐步增加(图 2)。植被碳汇高值区(> 800 gC · m^{-2} · a^{-1})占区域总面积的 5.93%,主要分布在南部罗

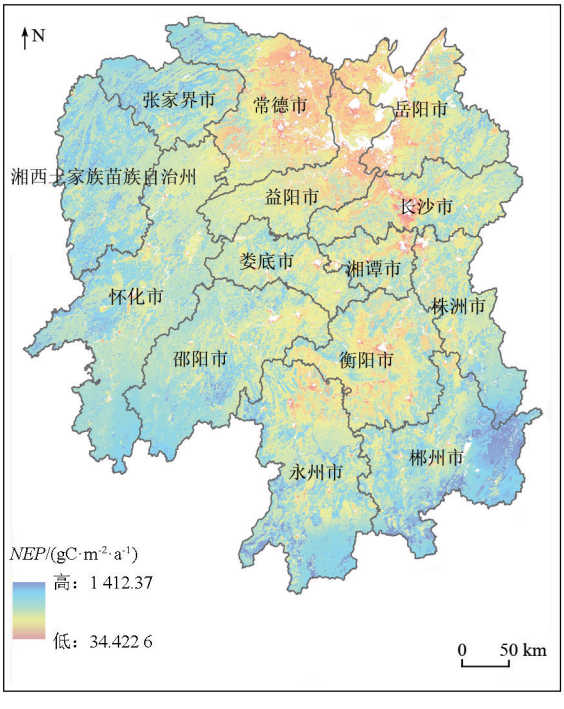


图 2　2000—2020 年湖南省植被碳汇均值空间分布

Fig.2　Spatial distribution of mean vegetation carbon sink in Hunan Province from 2000 to 2020

霄山脉地区;低值区(≤500 gC · m^{-2} · a^{-1})占区域总面积的 22.92%,集中分布于东北部洞庭湖平原地区。从各行政单位来看,郴州市植被碳汇多年平均值最大,为 703.46 gC · m^{-2} · a^{-1},益阳市最小,为 495.88 gC · m^{-2} · a^{-1},其余各地区植被碳汇在 500~700 gC · m^{-2} · a^{-1}之间。植被类型的差异是造成湖南省植被碳汇空间差异性的重要原因。从时间变化上来看(图 3),湖南省植被碳汇从 2000 年的 547.45 gC · m^{-2} · a^{-1}增长到 2020 年的 623.48 gC · m^{-2} · a^{-1},增幅为 13.89%,年均植被碳汇量在波动中逐渐上升。自 20 世纪 90 年代开始实施封山育林、天然林保护工程、自然保护区建设工程等措施以来,湖南省植被总体上发生了巨大的变化,森林覆盖率由 2000 年的 52.44%增加到 2019 年的 59.90%,植被固碳能力也随之上升。

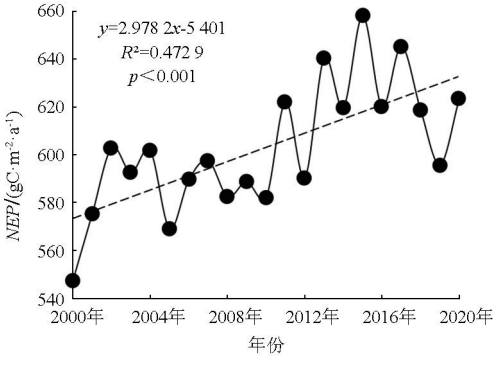
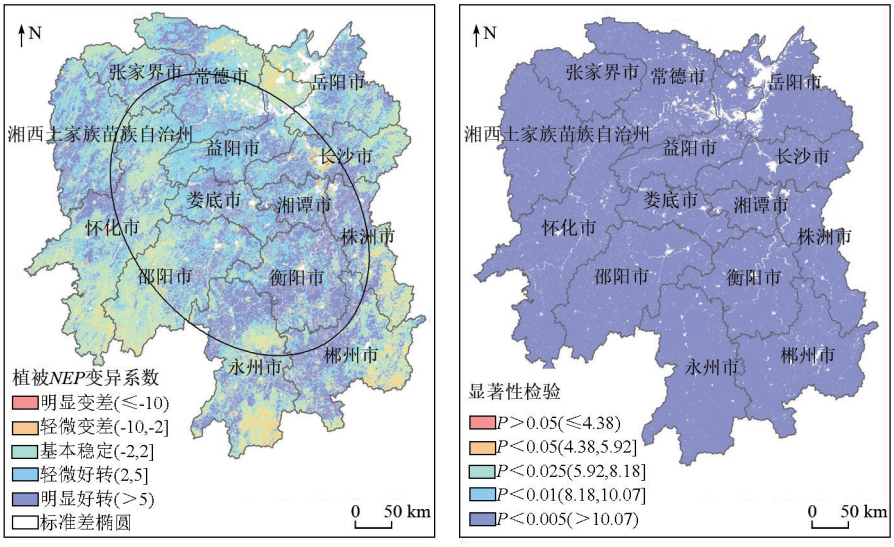


图 3　植被碳汇均值时序变化趋势

Fig.3　Temporal variation trend of annual mean vegetation carbon sink

2000—2020 年湖南省植被碳汇变化趋势及其显著性检验如图 4 所示。湖南省植被碳汇平均趋势系数为 2.97 gC · m^{-2} · a^{-1},整体呈现出增加的趋势。植被碳汇呈增长趋势的面积占 79.53%,呈下降趋势的面积占 20.47%,其中明显变差(≤10 gC · m^{-2} · a^{-1})、轻微变差((-10,-2] gC · m^{-2} · a^{-1})、基本稳定((-2,2] gC · m^{-2} · a^{-1})、轻微好转((2,5] gC · m^{-2} · a^{-1})和明显好转(>5 gC · m^{-2} · a^{-1})的区域占湖南省植被面积的比例依次为 1.13%,9.14%,28.02%,31.50%和 30.20%。植被碳汇变化趋势标准差椭圆的长轴和短轴分别为 210.18 km 和 152.87 km,主轴保持在东南—西北方向,明显好转的区域主要集中在娄底市、湘潭市和衡阳市。

湖南省植被碳汇变异系数空间分布如图 5 所示,植被碳汇低波动、较低波动、中等波动、较高波动、高波动的区域占湖南省植被总面积的比例分别为 37.20%,44.57%,13.50%,4.14%和 0.60%,其中,以低波动和较低波动为主。变异系数的标准差椭圆分析发现,方向分布保持在东南—西北方向,高波动地区分布散乱,主要分布于部分城市周边,在长株潭城市群核心区形成一个明显聚集区,说明这些区域植被碳汇稳定性低,容易受到自然或人为因素的干扰。结合图 2 和图 4 可知,这些区域植被碳汇量低,并且呈现明显的变差趋势,表明在城市化迅速扩张、人类活动的干扰下,其植被碳汇功能减弱。



(a) 植被 NEP 变化趋势 (b) 显著性检验

图 4 植被碳汇变化趋势及显著性空间分布

Fig.4 Trends and significant spatial distribution of vegetation carbon sink

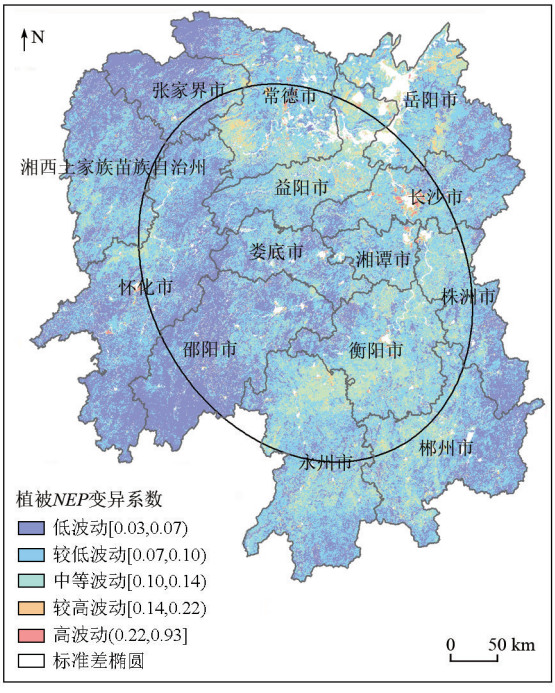


图 5 植被碳汇变异系数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of variation coefficient of vegetation carbon sink

利用标准差椭圆计算出每年湖南省植被碳汇的重心(图 6),结果显示 2000—2020 年植被碳汇的重心均落在邵阳市东北部,其迁移轨迹较为混乱,但变化较小,整体上呈现出微弱的东移趋势(1.50 km)。从迁移距离上看,2000—2004 年、2011—2014 年和 2018—2020 年迁移距离较长,在 3.57~7.12 km 之间,迁移方向为西北—东南或南—北方向,表明以上时期在该方向轴线两端植被碳汇出现了较大的差距。而在 2004—2011 年和 2014—2018 年之间,湖南省植被碳汇重心迁移距离较短,均小于 3.39 km,且迁移方向混乱,反映出这 2 个阶段区域环境扰动较小。

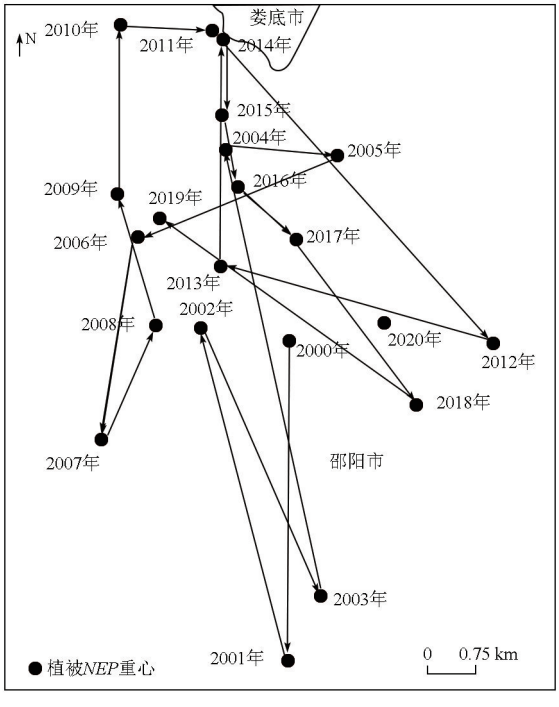


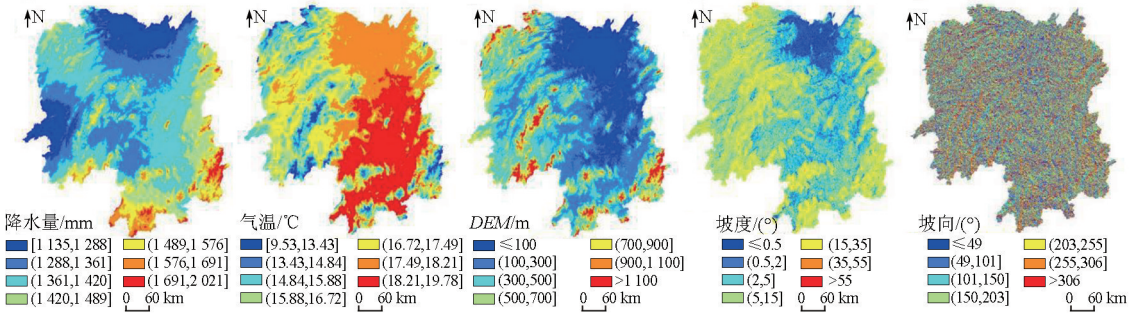
图 6 植被碳汇重心迁移规律

Fig.6 Migration law of vegetation carbon sink gravity center

3.2 自然因子对 NEP 影响的定量分析

植被固碳受到多种因素的影响,总体可分为以下 3 类:气候因子,如降水量和温度;其他自然因子,包括地形、植被类型和土壤性质等;人类活动相关的土地规划措施[26]。参考前人的研究[27],考虑到研究区的具体情况、数据的可获得性及指标的空间化程度,选取降水量、气温、海拔、坡度、坡向 5 个

自然因子,分析它们对湖南省植被碳汇的影响。运用 ArcGIS 软件对各因子进行地理处理,得到其空间分布(图 7),并将各驱动因子重分类转化为类型量,然后利用创建渔网工具创建 4 000 m×4 000 m 的格网,再用采样工具将各因子及 NEP 的值赋予至点,有效采样点共计 12 577 个,最后导入到 Geo Detector 软件中。



(a) 降水量　(b) 气温　(c) 高程　(d) 坡度　(e) 坡向

图 7　湖南省自然驱动因子空间分布

Fig.7　Spatial distribution of natural driving factors in Hunan Province

因子探测和交互探测结果如表 1 所示,2000—2020 年湖南省植被碳汇自然驱动因子的解释力如下:海拔(0.271 6)>坡度(0.190 1)>气温(0.130 5)>降水量(0.105 9)>坡向(0.002 2)。海拔和坡度对湖南省植被碳汇的时空分布具有较强的解释力,而气温和降水量对植被碳汇的解释力较弱,坡向的解释力极低。海拔是导致植被生境空间异质性的重要因素,而坡度对植被碳汇变化的影响在于坡度大不利于水分汇集,植被覆盖度随坡度的增加而降低[28]。任何 2 种驱动因子对植被碳汇影响力的交互作用都强于一种因子的独自作用,显示双因子增强或非线性增强,表明因子中有一个协同互动作用,湖南省植被碳汇的空间变化不是由单一因素决定的,而是多种因素的共同影响。海拔与降水量、气温,坡度与降水量、气温、海拔之间的相互作用属于双因子增强,说明在海拔和坡度适宜的情况下,配合恰当的降水量和气温更有利于植被的生长;坡向与其余自然因子的相互作用均属于非线性增强,除了因为坡度本身对植被碳汇的影响力较小,还说明坡向与其他因子的协同作用不强。

表 1　植被碳汇自然驱动因子探测及交互探测结果

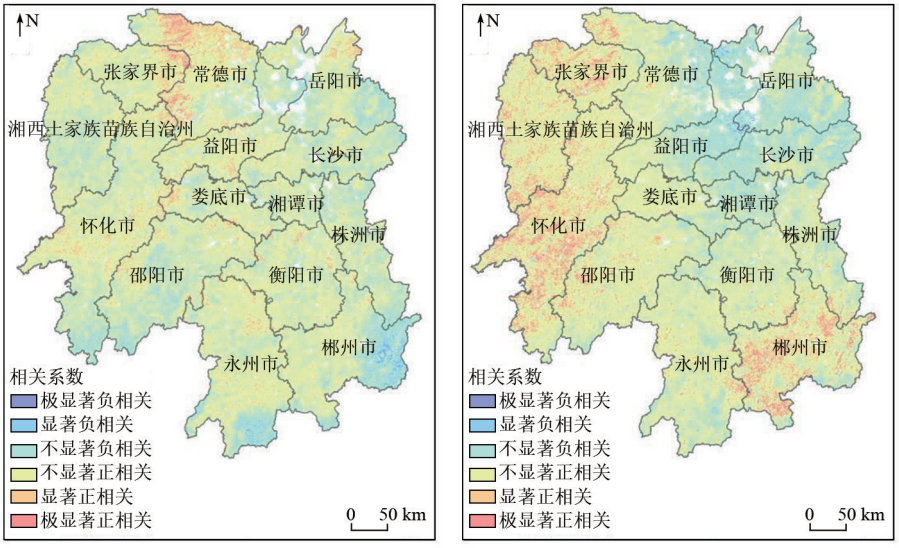
Tab.1　Results of factor and interaction detector for natural driving factors of vegetation carbon sink

驱动因子	降水量	气温	海拔	坡度	坡向
降水量	0.105 9＊＊＊①				
气温	0.276 6＊	0.130 5＊＊＊			
海拔	0.321 1#	0.289 9#	0.271 6＊＊＊		
坡度	0.265 1#	0.243 6#	0.298 8#	0.190 1＊＊＊	
坡向	0.111 3＊	0.137 1＊	0.276 8＊	0.196 9＊	0.002 2＊＊＊

①＊＊＊表示通过 0.001 的显著性检验(P<0.001);#表示交互作用为双因子增强;＊表示交互作用为非线性增强。

2000—2020 年湖南省植被碳汇与降水量的相关系数介于-0.76~0.85 之间(图 8(a)),平均相关系数为 0.11,整体上呈现正相关关系。植被碳汇与降水量呈正相关的区域占 73.11%,呈负相关的区域占 26.89%,其中显著正相关(P<0.05)的区域占 8.34%,极显著正相关(P<0.01)区域占 0.84%,极显著负相关(P<0.01)区域占 0.16%。呈显著负相关的区域主要分布在郴州市东南部和永州市南部,即罗霄山脉和南岭所在区域,结合图 7 可知,这些区域降水量丰沛,随着降水量的增加,土壤微生物呼吸增加,并且长时间的降水导致日照时数与温度条件不够充分,不利于植被的生长。2000—2020 年湖南省植被 NEP 与气温的相关系数介于-0.78~0.89 之间(图 8(b)),平均相关系数为 0.17,整体上呈现正相关关系。植被碳汇与气温呈正相关的区域占 75.13%,呈负相关的区域占 24.87%,其中显著正相关(P<0.05)区域占 9.90%,极显著正相关(P<0.01)区域占 4.25%,极显著负相关(P<0.01)区域占 0.12%。呈极显著正相关和显著正相关的区域主要分布在郴州市、怀化市、湘西土家族苗族自治州和张家界,即罗霄山脉、雪峰山脉和武陵山脉所在区域。结合图 7 可知,这些区域气温较低,影响了植被的光合作用,从而抑制了植被的生长发育,温度的升高能够延长植物的生长周期,增强植被光能利用效率,有

利于植被 NEP 的积累。

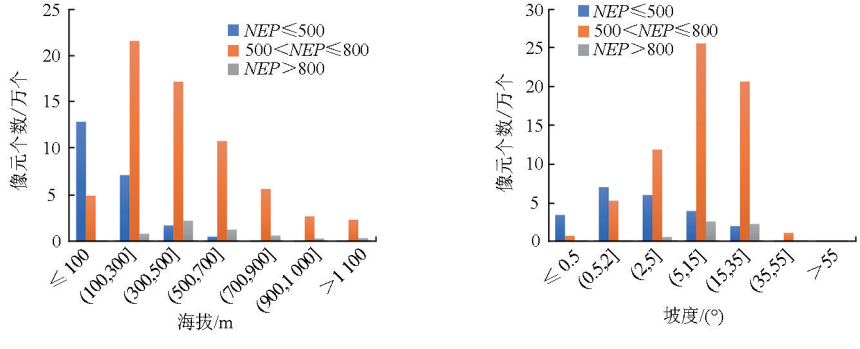


（a）植被碳汇与降水量 （b）植被碳汇与气温

图 8 植被碳汇与降水量和气温的相关系数显著性空间分布

Fig.8 Spatial distribution of correlation and signification between vegetation carbon sink and precipitation and temperature

依据湖南省地形特征对海拔进行分级，然后将其与多年植被 NEP 平均值空间分布叠加，得到不同海拔范围内各等级碳汇的像元数量（图 9（a））。低碳汇（$NEP \leqslant 500$）区域主要集中在 300 m 以下，中等碳汇区域（$500 < NEP \leqslant 800$）主要分布在 100～300 m 之间，随着海拔的增加逐渐减少；高碳汇（$NEP > 800$）像元数随海拔呈峰型变化，高峰区出现在 300～500 m 之间。海拔的变化改变局地气候条件及水热条件的分配，随着海拔的升高，人类活动减少，温度降低，植被蒸腾作用减少，降水量逐渐增加，植被覆盖度也增加，而海拔超出一定的范围后，植被的生长受到低温抑制，碳汇面积逐渐减少。依据国际地理学联合会的分类标准将坡度划分为 7 个等级，叠加在研究区多年植被 NEP 平均值空间分布图上，图 9（b）显示了各个坡度范围内各等级碳汇的像元数量，可以看出，高碳汇（$NEP > 800$）区域主要分布在斜坡（5,15］°和陡坡（15,35］°，中等碳汇区域（$500 < NEP \leqslant 800$）主要分布在缓斜坡（2,5］°、斜坡（5,15］°和陡坡（15,35］°，低碳汇（$NEP \leqslant 500$）区域分布微斜坡（0.5,2］°和缓斜坡（2,5］°，在峭坡（35,55］°和垂直壁（>55°）区域，由于土壤侵蚀和地形陡峭，碳汇面积极少。



（a）海拔 （b）坡度

图 9 植被碳汇空间分布与海拔/坡度的关系

Fig.9 Relationship between spatial distribution of vegetation carbon sink and altitude/slope

4 讨论

土壤微生物呼吸是一个非常复杂的生态学过程，很难准确估算，且本文土壤微生物呼吸量的计算采用的是裴志永等[23]通过分析青海省五道梁实验点建立的经验模型，该模型在区域上有一定的实用性和差异性，而湖南省自然环境条件和青海省具有明显的差异，故采用该模型可能导致植被碳汇的测算偏离真实值。选取的 NPP 数据时间分辨率为年，

无法更为精确的从季或月的尺度分析植被碳汇的时间变化。地理探测器仅能从结果层面来分析各驱动因素对植被碳汇的影响程度,故本文借助相关分析的方法从像元层面揭示植被碳汇与气候因子相关关系,考虑的主要是自然因子,但值得注意的是,放牧、人工围栏、植树造林和生态修复工程等人类活动也对植被碳收支及其空间分布产生重要影响。在今后的研究中,将进一步提高数据质量和研究模型的准确性,并进一步分析其他驱动因子对湖南省植被碳汇的影响。

5　结论

1)2000—2020 年间湖南省平均植被碳汇值为 603.01 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,空间分布格局呈现南高北低、西高东低,由东北向西南逐步增加,高值区主要分布在南部罗霄山脉地区,低值区集中分布于东北部洞庭湖平原。

2)2000—2020 年湖南省植被碳汇整体呈逐步增加的趋势,平均趋势系数为 2.97 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,呈增长趋势的面积占 79.53%,呈下降趋势的面积占 20.47%,明显好转的区域主要集中在娄底市、湘潭市和衡阳市; 变异系数以低波动和较低波动为主; 植被碳汇的重心均落在邵阳市东北部,整体上呈现出微弱的东移趋势。

3)自然因子对植被碳汇的解释力差异明显,海拔(0.271 6)>坡度(0.190 1)>气温(0.130 5)>降水量(0.105 9)>坡向(0.002 2),并且任何 2 种驱动因子对 NEP 影响力的交互作用都强于一种因子的独自作用,显示双因子增强或非线性增强。

参考文献(References):

[1] Rogelj J,Schaeffer M,Meinshausen M,et al.Zero emission targets as long-term global goals for climate protection[J].Environmental Research Letters,2015,10(10):105007.

[2] 胡鞍钢.中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.
Hu A G.China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J].Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition),2021,21(3):1-15.

[3] Wang Q F,Zheng H,Zhu X J,et al.Primary estimation of Chinese terrestrial carbon sequestration during 2001 - 2010[J].Science Bulletin,2015,60(6):577-590.

[4] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D 辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
Fang J Y,Guo Z D,Piao S L,et al.Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000[J].Science in China (Series D (Earth Sciences)),2007,37(6):804-812.

[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(1):4259.

[6] 潘竟虎,文 岩.中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局[J].生态学报,2015,35(23):7718-7728.
Pan J H,Wen Y.Estimation and spatial-temporal characteristics of carbon sink in the arid region of Northwest China[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(23):7718-7728.

[7] 刘 凤,曾永年.2000—2015 年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化[J].生态学报,2021,41(14):5792-5803.
Liu F,Zeng Y N.Analysis of the spatio-temporal variation of vegetation carbon source/sink in Qinghai Plateau from 2000—2015[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(14):5792-5803.

[8] Yang H F,Chen W.Spatio-temporal pattern of urban vegetation carbon sink and driving mechanisms of human activities in Huaibei,China[J].Environmental Science and Pollution Research International,2022,29(21):31957-31971.

[9] 冯艾琳,武晋雯,孟 莹,等.基于 MODIS GPP 数据产品的辽宁省碳源/汇空间格局分布研究[J].遥感技术与应用,2019,34(4):857-864.
Feng A L,Wu J W,Meng Y,et al.Research on spatial distribution of carbon source/sink of Liaoning Province based on MODIS GPP data products[J].Remote Sensing Technology and Application,2019,34(4):857-864.

[10] 张继平,刘春兰,郝海广,等.基于 MODIS GPP/NPP 数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J].生态环境学报,2015,24(1):8-13.
Zhang J P,Liu C L,Hao H G,et al.Spatial-temporal change of carbon storage and carbon sink of grassland ecosystem in the three-river headwaters region based on MODIS GPP/NPP data[J].Ecology and Environmental Sciences,2015,24(1):8-13.

[11] 王 川,刘永昌,李 稚.塔里木河下游生态输水对植被碳源/汇空间格局的影响[J].干旱区地理,2021,44(3):729-738.
Wang C,Liu Y C,Li Z.Effects of ecological water conveyance on the spatial pattern of vegetation carbon sources/sinks in the lower reaches of Tarim River[J].Arid Land Geography,2021,44(3):729-738.

[12] 贠银娟,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 Y J,Zhao J.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] 何 源,李星锐,杨晓帆,等.内蒙古锡林郭勒盟典型草原固碳量及固碳潜力估算[J].草地学报,2021,29(10):2274-2285.
He Y,Li X R,Yang X F,et al.The estimation of actual and potential carbon sequestration in typical steppe in Xilingol Country,Inner Mongolia[J].Acta Agrestia Sinica,2021,29(10):2274-2285.

[14] 陈 迎.碳中和概念再辨析[J].中国人口·资源与环境,2022,32(4):1-12.
Chen Y.A re-analysis of the concept of carbon neutrality[J].China Population,Resources and Environment,2022,32(4):1-12.

[15] 苏利阳.碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局的战略设计研究[J].环境保护,2021,49(16):6-9.

Su L Y. Research on the strategy of integrating carbon peak and carbon neutrality into the overall layout of ecological civilization construction[J]. Environmental Protection, 2021, 49(16): 6-9.

[16] 陈晓玲,曾永年.亚热带山地丘陵区植被 NPP 时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例[J].地理学报,2016,71(1):35-48.
Chen X L, Zeng Y N. Spatial and temporal variability of the net primary production (NPP) and its relationship with climate factors in subtropical mountainous and hilly regions of China: A case study in Hunan Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 35-48.

[17] 闫 妍,覃金华,房 磊,等.湖南省植被净初级生产力时空动态及其与气候因素的关系[J].生态学杂志,2022,41(8):1535-1544.
Yan Y, Qin J H, Fang L, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation net primary productivity and its relationships with climatic factors in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(8): 1535-1544.

[18] 李家湘,游健荣,徐永福,等.湖南植被研究:植被类型、组成和分布格局[J].中国科学:生命科学,2021,51(3):275-288.
Li J X, You J R, Xu Y F, et al. Vegetation research in Hunan Province: Vegetation types, composition, and distribution pattern [J]. Scientia Sinica (Vitae), 2021, 51(3): 275-288.

[19] 刘正才,屈瑶瑶.基于 SPOT-VGT 数据的湖南省植被变化及其对气候变化的响应[J].北京林业大学学报,2019,41(2):80-87.
Liu Z C, Qu Y Y. Vegetation change and its response to climate change based on SPOT-VGT in Hunan Province of Southern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(2): 80-87.

[20] 陈雪娇,周 伟,杨 晗.2001—2017 年三江源区典型草地群落碳源/汇模拟及动态变化分析[J].干旱区地理,2020,43(6):1583-1592.
Chen X J, Zhou W, Yang H. Simulation and dynamic change of carbon source/sink in the typical grassland communities in the Three River Source Area from 2001 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1583-1592.

[21] Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J]. Science China Life Sciences, 2022, 65(5): 861-895.

[22] 汤 洁,姜 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,2013,27(4):1-7.
Tang J, Jiang Y, Li Z Y, et al. Estimation of vegetation net primary productivity and carbon sink in western Jilin Province based on CASA model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(4): 1-7.

[23] 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,2010,29(1):102-110.
Pei Z Y, Zhou C P, Ouyang H, et al. A carbon budget of alpine steppe area in the Tibetan Plateau [J]. Geographical Research, 2010, 29(1): 102-110.

[24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.

[25] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.

[26] Sha Z Y, Bai Y F, Li R R, et al. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management[J]. Communications Earth and Environment, 2022, 3: 8.

[27] Luo X, Jia B, Lai X. Contributions of climate change, land use change and CO_2 to changes in the gross primary productivity of the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020, 13(1): 8-15.

[28] 刘 月,安德帅,徐丹丹,等.垂直带谱上植被群落对气候变化响应的研究进展[J].生态科学,2022,41(3):245-251.
Liu Y, An D S, Xu D D, et al. Review on the vegetation response to climate change in vertical zone spectrum[J]. Ecological Science, 2022, 41(3): 245-251.

Dynamic and natural driving factors of vegetation carbon sink in Hunan Province

ZHAO Hairong, MO Hongwei

(*School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan* 411201, *China*)

Abstract: Net ecosystem productivity (NEP) is recognized as an important characteristic quantity of ecosystems and a physical quantity of carbon exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Utilizing MODIS NPP and meteorological data, this study estimated the vegetation NEP in Hunan Province from 2000 to 2020 using a soil microbial respiration model. Furthermore, this study analyzed the dynamic characteristics of vegetation carbon sink through trend analysis, variation coefficient, and standard deviation ellipse methods, followed by a quantitative assessment of the impacts of natural factors on vegetation carbon sink using geographical detectors and correlation analysis. The results indicate that the annual multiyear average of vegetation carbon sink in Hunan Province was 603.01 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$. The vegetation carbon sink presented a spatial distribution pattern of higher values in the south and west and lower values in the north and east, decreasing gradually from southwest to northeast. From 2000

to 2020, the average trend coefficient of vegetation carbon sink was 2.97 gC · m^{-2} · a^{-1}, trending upward overall. The coefficient of variation was primarily characterized by small fluctuations and fairly small fluctuations, while areas of great fluctuations are mainly scattered around certain cities, which are more susceptible to natural or anthropogenic disturbances. The variations in vegetation carbon sink in Hunan Province result from multiple factors, with the explanatory power of various factors decreased in the order of altitude, slope, temperature, precipitation, and slope. Both altitude and slope exhibited strong explanatory power regarding the spatiotemporal distribution of vegetation carbon sink in Hunan Province, while temperature and precipitation demonstrated weaker explanatory power. Areas where vegetation carbon sink was positively correlated with temperature and precipitation accounted for 75.13% and 73.11% of the total vegetation area, respectively.

Keywords: vegetation carbon sink; net ecosystem productivity (NEP); dynamic change; driving factors; Hunan Province

(责任编辑：陈昊旻)