

呼伦贝尔林草交错带植被固碳释氧功能变化及其驱动力研究

乔亚军¹, 张 慧^{1,2}, 刘 坤¹, 王 智¹, 徐网谷¹

(1.生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042;

2.南京信息工程大学 大气环境与装备技术协同创新中心, 地理与遥感学院, 南京 210044)

摘 要:为了探究呼伦贝尔林草交错带固碳释氧功能的变化特征及其对气候和土地利用变化的响应,基于 NDVI、气象和土地利用数据,采用 CASA 模型估算了交错带植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP),通过 Pearson 相关分析和地理加权回归分析探究了固碳释氧功能变化的主要驱动因素。结果表明:2000—2018 年固碳释氧总量增加 21.38%,其中新巴尔虎左旗(43.40%)和鄂温克族自治旗(27.41%)增加最显著。基于 2000 年、2010 年、2018 年土地利用数据进行统计,林地、草地、耕地、湿地和沙地的固碳释氧总量和单位面积平均值均增加,尤其是沙地(总量 37.36%,均值 36.53%)最为显著,其次为草地(总量 27.86%,均值 26.51%)。研究表明,沙化土地封禁等保护措施对沙化地区固碳释氧功能的提升有着重要的推动作用。而气候变化是整个研究区固碳释氧服务功能提升的主要驱动力,且林区和草原区主要驱动因子分别是气温和降水。

关键词:净初级生产力; 固碳释氧功能; 呼伦贝尔林草交错带; 地理加权回归模型

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0164-07

Study on the Change of Function of Vegetation Carbon Fixation and Oxygen Release and Its Driving Force in Hulunbuir Forest-Steppe Ecotone

QIAO Yajun¹, ZHANG Hui^{1,2}, LIU Kun¹, WANG Zhi¹, XU Wanggu¹

(1.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2.Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, College of Geography and Remote, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of change in function of carbon fixation and oxygen release in the Hulunbuir forest-steppe ecotone and its response to climate and land use changes, based on NDVI, meteorological and land use data, we estimated the net primary productivity (NPP) using the CASA model, and investigated the trend of the function of carbon fixation and oxygen release and its driving factors using Pearson correlation analysis and geographical weighted regression model in the Hulunbuir forest-steppe ecotone. The results showed that the total amount of carbon fixation and oxygen release in the study area had increased by 21.38% in the past 19 years, particularly in Xinbaerhu (43.40%) and Ewenke (27.41%). Based on the land use data of 2000, 2010, and 2018, the total amounts of carbon fixation and oxygen release and the average values per unit area in woodland, grassland, cultivated land, wetland and sandy land increased, especially in sandy land (total 37.36%, average 36.53%) and grassland (total 27.86%, average 26.51%). These results indicated that protection measures such as the closure of desertified land played an essential role in promoting the function of carbon fixation and oxygen release in desertified regions, climate change was the main driving force for the improvement of service function of carbon fixation and oxygen release in the whole study area, and the main driving factor of the forest and the steppe was temperature and precipitation, respectively.

收稿日期:2021-08-19

修回日期:2021-10-19

资助项目:生态环境部财政拨款项目“生物多样性调查、观测和评估项目”(2019—2023 年)

第一作者:乔亚军(1991—),女,河南确山人,博士,助理研究员,研究方向为生态服务功能评估。E-mail:643890513@qq.com

通信作者:张慧(1968—),女,河南开封人,博士,研究员,主要从事生态安全与生态服务功能方面的研究。E-mail:zhanghui@nies.org

Keywords: NPP; function of carbon fixation and oxygen release; Hulunbuir forest-steppe ecotone; geographical weighted regression model

生态交错带受气候、土壤、生物等因素影响具有过渡性和波动性的特点,对气候变化和人类活动反应敏感。气候变化会改变生态交错带的生物地球化学循环过程,进而影响生态服务功能。人类活动干扰会改变交错带环境,例如农作物种植和过度放牧等社会经济因素会导致植被变化,使交错带对气候变化的响应复杂化^[1-2]。研究生态交错带生态服务功能对气候变化和人类活动的响应,对管理和改善区域生态环境具有重要意义^[2]。

固碳释氧功能是生态服务功能的重要组成部分,对于调节碳平衡、维护全球气候、缓解温室效应和改善人居环境生活质量具有重要作用。森林生态系统的净初级生产力(Net Primary Production, NPP)比其他生态系统类型高,其固碳释氧功能受到的关注较多。许多研究首先估算森林植被净初级生产力,再根据《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721-2008)中的方法评估森林生态系统的固碳释氧量^[3]。在区域尺度上,目前普遍基于 GIS 利用遥感影像通过模型估算植被 NPP,再根据光合作用方程式来估算区域固碳释氧物质质量^[4-5]。例如,周自翔等^[6]通过光能利用率模型估算了关中一天水经济区的 NPP,进而基于光合作用方程式评估了区域固碳释氧量。也有学者直接通过 CITYGREEN 模型对深圳市绿地的碳存储量进行了评估^[7]。以往对固碳释氧功能变化的驱动力研究通常采用回归分析、主成分分析等方法,但不能反映影响因子随着空间变化对因变量作用程度的不同^[8]。而地理加权回归(Geographical weighted regression, GWR)模型将空间相关性和线性回归相结合,自变量的回归参数与空间位置相关,可展现影响因子与因变量关系的空间变化特征^[9]。目前该模型在社会经济学、城市地理、气象学等领域的应用已取得良好效果^[9-10],但在生态服务功能方面的应用尚不多见。

呼伦贝尔林草交错带是大兴安岭林区向呼伦贝尔草原区过渡的地带,是我国生态系统结构保存最完整和健康状况最良好的林草交错带,是我国北方地区重要的生态屏障^[1]。许多学者对其植被空间分布特征、气候变化和景观格局变化等展开了研究,但对其固碳释氧功能的研究较少,特别是对 2015 年以来该区域的植被固碳状况鲜有研究。因此,本研究结合最新的土地利用现状,基于 NPP 遥感估算该区域近 20 年的固碳释氧功能变化,并通过相关性分析和 GWR 模型探讨该区域固碳释氧功能变化的主要驱动因子。不仅对维护区域生态

安全和保护我国北方森林草原具有重要意义,而且可为碳减排、碳达峰以及碳中和背景下我国交错带地区的碳交易以及可持续发展提供支撑。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

呼伦贝尔林草交错带植被上属于大兴安岭林区向呼伦贝尔草原区的过渡地带,位于中国内蒙古自治区呼伦贝尔市中部,地理位置处于东经 117°33′—122°55′和北纬 46°10′—53°26′,行政区域涉及呼伦贝尔市的额尔古纳市、根河市、牙克石市、陈巴尔虎旗、海拉尔区、鄂温克族自治旗和新巴尔虎左旗共 7 个旗市。地势由东南向西北倾斜,地形以高平原为主,由绵延起伏的低山丘陵、孤立的残丘和冲击平原组成,局部地区有零星沙地分布。研究区由东向西从寒温带大陆季风气候向中温带大陆性气候过渡,冬季长而冷,夏季短而凉,春季大风、寒潮天气多,夏季降水变率大,年平均气温 -2.2~2.4℃,年降水量为 290~450 mm^[1]。呼伦贝尔林草交错带典型草原和温带森林两种植被类型共存,其重要植被类型为:寒温带针叶林、温带针阔混交林、夏绿阔叶林等森林植被,以及林缘草甸、草甸草原、典型草原、低地草场、沙地草场等草原植被^[11]。

1.2 数据来源与处理

根据 2000 年、2010 年 Landsat5TM 遥感影像(空间分辨率 30 m),以及 2018 年 Landsat8TM 遥感影像(空间分辨率 30 m)(<https://glovis.usgs.gov/>),通过面向对象分类法,并结合目视解译,获得研究区 2000 年、2010 年、2018 年土地覆被类型数据,总体分类精度达 85% 以上,一级分类精度达 95% 以上,变化检测总体精度达 85% 以上。

归一化植被指数(NDVI)月值数据(空间分辨率 500 m),来源于资源环境科学与数据中心网站(<http://www.resdc.cn/>)。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括月总降水量(mm)、月平均温度(℃)和月太阳总辐射量(MJ/m²);在 ArcGIS 中,根据气象站点的经纬度信息,对研究区及其周围气象站点的气象数据进行 Kriging 插值得到气象要素栅格数据,空间分辨率设置为 250 m。在 ENVI 中分别对上述 2000 年、2010 年、2018 年逐月 NDVI、降水量、平均温度和太阳总辐射量栅格数据进行合成,得到研究区 2000 年、2010 年、2018 年月 NDVI、月总降水量、月平均温度和月太阳总辐射量的时间序

列数据。以上所涉及的数据均转换到同一坐标系,空间分辨率均统一转换为 250 m。

1.3 NPP 估算

利用朱文泉植被净初级生产力软件模块对 NPP 进行评估,该软件模块 V1.0 是基于改进的 CASA 模型在 IDL 软件平台下开发而成,将该模型在 ENVI 5.3 进行运算。

模型原理:植被 NPP 由植物吸收的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ϵ)两个因子来决定,其估算公式^[12]如下:

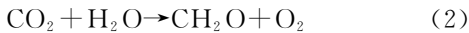
$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中:APAR(x, t)表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射(MJ/m^2); $\epsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率(gC/MJ)。APAR(x, t)和 $\epsilon(x, t)$ 的计算过程请参考朱文泉等^[12]。

模型需要配置静态参数文件:本研究根据朱文泉植被净初级生产力(NPP)软件模块说明手册和朱文泉等^[12]研究成果,结合文献资料确定 NDVI 和比值植被指数(SR)的最大值和最小值,以及最大光能利用率(ϵ_{max})。植被类型按照各植被类型的编码来设置。

1.4 固碳释氧功能评估

在生态系统中,有机物吸收空气中二氧化碳,通过光合作用生成碳水化合物并释放出氧气,其化学式为:



本次测算是以净初级生产力(NPP)为基础,根据光合作用方程式,每生产 1.00 kg 干物质能固定 1.63 kg CO_2 ,释放 1.20 kg 的 O_2 ,以此为基础,根据生态系统的 NPP 测算出生态系统固定 CO_2 的质量及释放 O_2 的质量^[6,13]。

1.5 相关性分析

本研究采用 Pearson 相关系数,在 ArcGIS 中通过“栅格计算器”计算每个像元的年均固碳释氧量与气候因子(年降水量和年均气温)之间的相关系数,来分析固碳释氧量对气候因子的响应,Pearson 相关系数的计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: r_{xy} 是变量 x 和变量 y 之间的相关系数; n 为研究年数; x_i 为第 i 年的固碳释氧量; y_i 为第 i 年气候因子(年降水量和年均气温)的值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别是变量 x 和 y 的均值。

1.6 地理加权回归分析

本研究以乡(镇、苏木、街道)为单元,基于 ArcGIS 的“空间统计(Spatial Statistics Tool)”—“空间关系建模工具集(Modeling Spatial Relationships)”,采用“地理加

权回归(Geographically Weighted Regression)”工具分析固碳释氧功能变化的驱动因子。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) x_{i1} + \beta_2(u_i, v_i) x_{i2} + \dots + \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (4)$$

式中: y_i 表示 i 乡(镇、苏木、街道)的因变量; (u_i, v_i) 表示 i 乡(镇、苏木、街道)的地理坐标; x_{ik} 表示 i 乡(镇、苏木、街道)的第 k 个自变量; ϵ_i 表示 i 乡(镇、苏木、街道)的随机误差项; β_0 表示常数项; β_k 表示第 k 个自变量的回归系数。本研究中因变量为某一时间段呼伦贝尔林草交错带镇域 NPP 变化量;自变量为某一时间段镇域年降水量变化量和气温变化量。

模型参数的设置:因变量字段为归一化(最大值最小值法)后的 NPP 变化量,自变量字段为归一化(最大值最小值法)后的年降水量和年均气温变化量。核的类型选择“固定距离法”,核带宽选择“AIC(最小信息准则)”^[9]。

2 结果与分析

2.1 固碳释氧功能时空变化特征

2.1.1 固碳释氧功能空间分布特征 由图 1 可以看出,2000 年、2010 年不同行政区的固碳释氧能力大小排序均为:额尔古纳市>牙克石市>根河市>鄂温克族自治旗>陈巴尔虎旗>新巴尔虎左旗>海拉尔区,而 2018 年陈巴尔虎旗<新巴尔虎左旗,其他排序不变。本研究直接根据 NPP 估算得到植被固碳释氧量,固定 CO_2 物质量与释放 O_2 物质量之间只存在简单的倍数关系,在此仅以固定 CO_2 的物质量为例进行阐述(下同)。从空间分布情况来看,年平均固定 CO_2 900 g/m^2 分界线大体沿着林草交错地带(即山地丘陵与高平原交错带)分布,年平均固定 CO_2 大于 900 g/m^2 的区域(以下简称高值区)主要集中在林区的额尔古纳市、根河市和牙克石市;而年平均固定 CO_2 小于 900 g/m^2 且大于 600 g/m^2 的区域(以下简称中值区)主要集中在林草交错区和草原区的陈巴尔虎旗、海拉尔区、鄂温克族自治旗和新巴尔虎左旗;年平均固定 CO_2 小于 600 g/m^2 的区域(以下简称低值区)主要分布在陈巴尔虎旗南部和新巴尔虎左旗地区。

2.1.2 固碳释氧功能时空变化特征 2018 年整个呼伦贝尔林草交错带吸收 CO_2 的总量比 2000 年增加 $2.30 \times 10^7 t$,提高了 21.38%。各市(区)旗吸收 CO_2 的物质量都明显增加,增加率 10.41%~43.40%(图 2),尤其是草原区的新巴尔虎左旗、陈巴尔虎旗西南部和鄂温克族自治旗西部,其单位面积固定 CO_2 的物质量较 2000 年增加了 50%以上(图 1)。

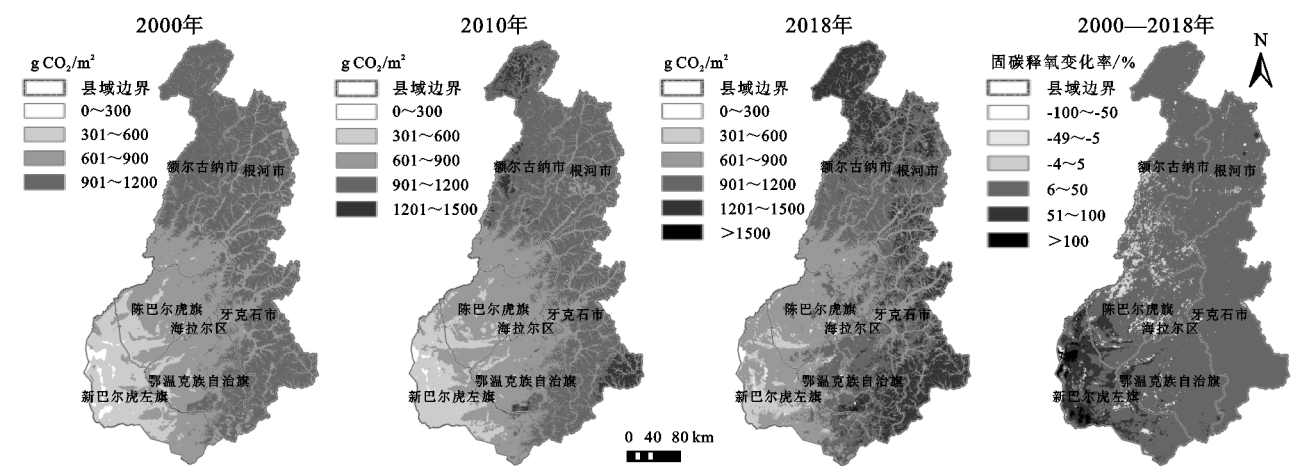


图1 2000年、2010年、2018年研究区固定CO₂物质质量及其变化的空间分布特征

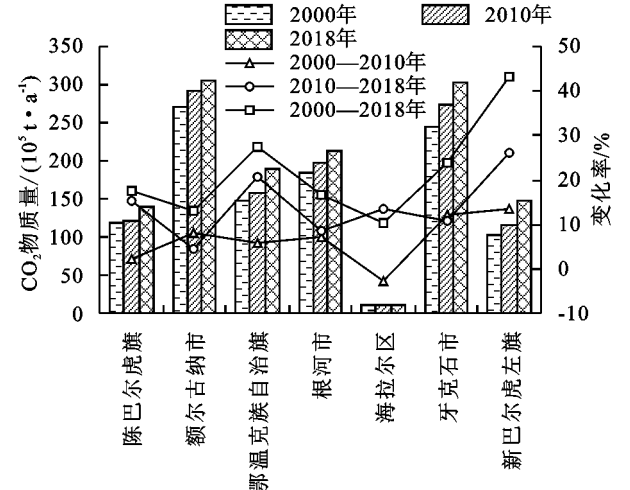


图2 各市(区)旗固定CO₂的物质总量及其变化

2.2 土地覆被变化对固碳释氧功能的影响

2000—2018年研究区土地覆被面积变化不大,林地、草地、湿地、沙地的面积变化仅为-0.28%~0.88%,耕地面积减少3.69%,但2018年整个研究区的固碳释氧总量较2000年提高了21.38%,并且各土地覆被类型的固碳释氧总量和单位面积平均值均有所增加,尤其是沙地(总量37.36%,均值36.53%)、草地(总量27.86%,均值26.51%)和林地(总量20.01%,均值19.62%)(图3),说明各土地覆被类型的面积变化对其固碳释氧功能的影响有限。因此土地覆被类型的变化不是研究区整体固碳释氧功能变化的主要原因。

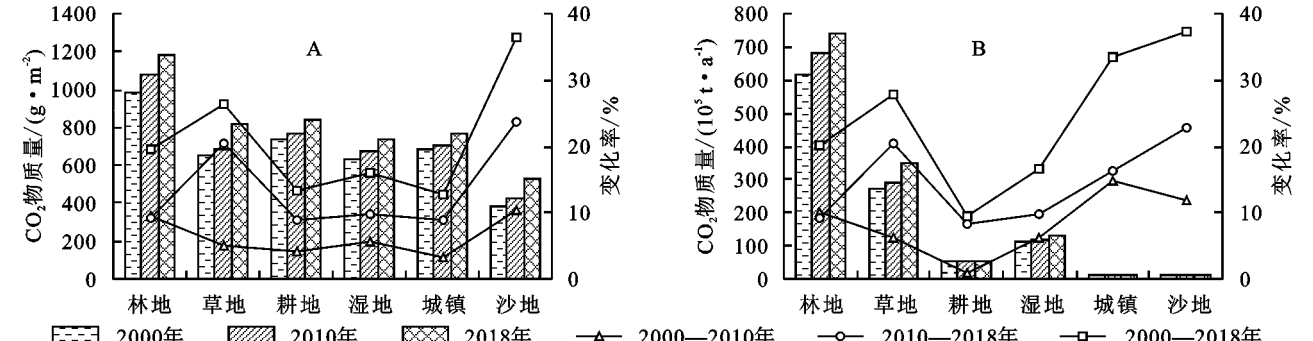


图3 不同土地覆被类型单位面积固定CO₂物质质量和固定总量及其变化

表1 2000—2018年土地利用转移矩阵								km ²
土地利用方式		2018年						
		林地	草地	耕地	湿地	城镇	沙地	其他
2000年	林地	62835.58	188.62	0.00	18.89	24.80	0.46	20.57
	草地	2.80	41885.75	5.98	0.00	126.05	60.86	0.00
	耕地	2.64	201.38	6677.37	9.95	64.45	0.00	0.00
	湿地	5.59	108.58	15.21	17724.54	16.68	19.26	0.00
	城镇	0.00	0.00	0.00	0.00	1354.24	0.25	0.00
	沙地	1.72	62.80	0.49	18.15	8.04	2668.83	0.00
	其他	63.57	6.05	0.00	0.68	0.01	23.49	0.17

2.3 气候变化对固碳释氧功能的影响

根据气象站点资料,2000—2018 年研究区内图里河、额尔古纳、海拉尔和新巴尔虎左旗站点的年降水量整体上均呈现出波动增加的趋势,除了海拉尔站点,其他 3 个站点的年均气温均呈现出缓慢上升趋势(图 4)。

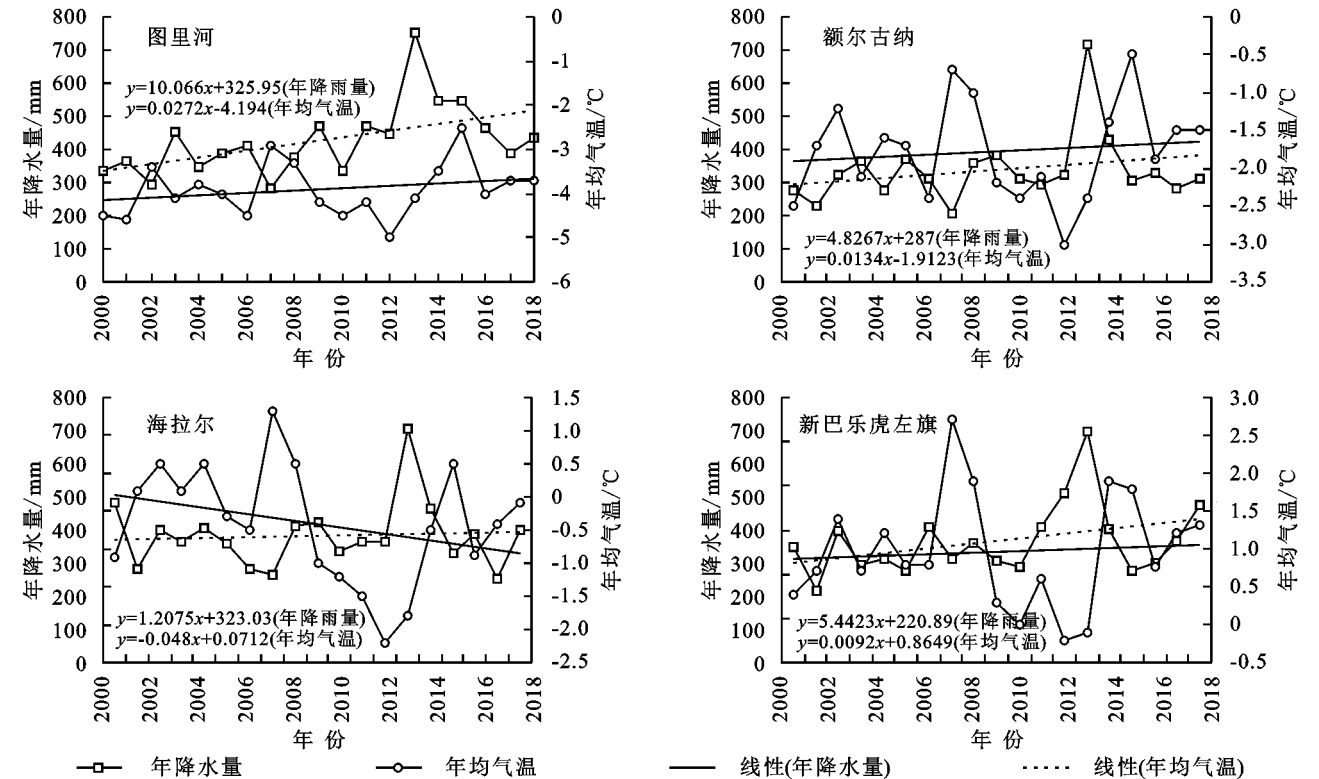


图 4 2000—2018 年研究区内主要气象站点年降水量和年均气温变化趋势

为了分析研究区固碳释氧量对气候变化的响应关系,在栅格像元尺度上采用 Pearson 相关系数分析探究固碳释氧量与年降水量和年平均气温之间的关系,并在乡镇尺度上通过地理加权回归分析探究固碳释氧量与气候变化的响应关系。Pearson 相关性分析结果表明:大部分区域固碳释氧物质量与年降水量和年均气温呈正相关关系,尤其是草原区、林草交错区域的南部和林区的南部其固碳释氧量与年降水量的 Pearson 相关系数在 0.8 以上,林草交错区域的南部和林区的中部、北部其固碳释氧量与年平均气温的 Pearson 相关系数也在 0.8 以上(图 5)。

地理加权回归分析结果表明:年降水量和年均气温可解释固碳释氧变化量空间分布差异的 58% (调整后 $R^2=0.58$)。模型在新巴尔虎左旗、鄂温克族自洽旗南部、牙克石市南部比其他区域的拟合度好(图 6)。林草交错带林区固碳释氧变化量与气温和降水正相关,与气温之间的回归系数大于降水,主要影响因子是气温;而草原区固碳释氧变化量与降水正相关,与气温负相关,与降水之间的回归系数

根据气候因子插值结果,在栅格像元尺度上,2000 年研究区年降水量均值为 280.3 mm,年平均气温均值为 -2.3°C ;2010 年年降水量均值为 340.0 mm,年平均气温均值为 -2.4°C ;而 2018 年年降水量均值为 416.1 mm,研究区年平均气温均值为 -1.3°C 。

大于气温,主要影响因子是降水;林草交错区域固碳释氧变化量与降水之间的回归系数大于气温,主要影响因子是降水。

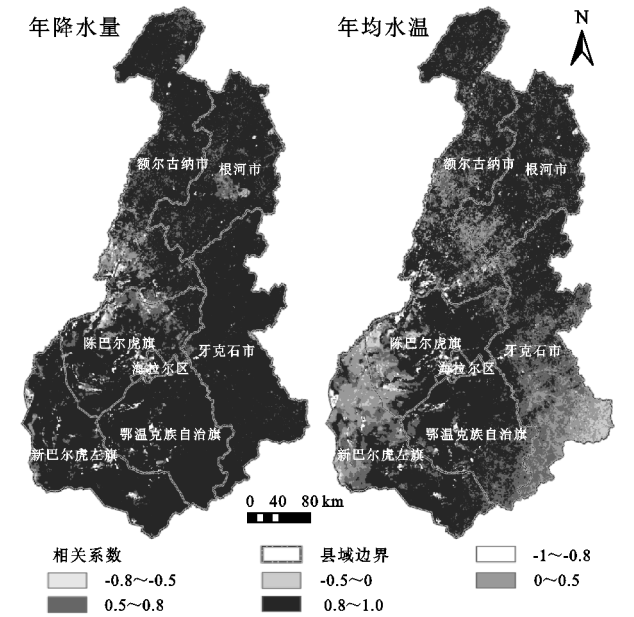


图 5 固定 CO_2 物质质量与气候因子(年降水量及年均气温)的相关性

3 讨论

本研究基于改进的光能利用率模型对呼伦贝尔林草交错带 NPP 进行了遥感估算,由于 NPP 实测数据未能获得,通过与其他模型 NPP 模拟值比较来进行验证。数值地形动态模拟组(NTSG)开发的 MOD17A3 NPP 数据(<https://www.ntsug.umt.edu>),是基于 MODIS 卫星遥感数据,通过 Biome-BGC 模型估算出的全球陆地植被

NPP 年际数据^[14]。将 2000 年、2010 年、2018 年 MODIS NPP 与本研究估算 NPP 值进行比较,结果显示两者之间呈显著正相关关系($R^2=0.84, p<0.01$)。与 Miami, Thornthwaite 和 CEVSA 等模型比较,不同土地覆被类型 NPP 值均在正常范围内。以上说明本研究 NPP 估算值是可靠的。需指出,模型所需的气象网格数据是基于观测站点的实测气候数据进行空间内插得到的,插值过程会引入误差,对 NPP 评估精度产生影响。

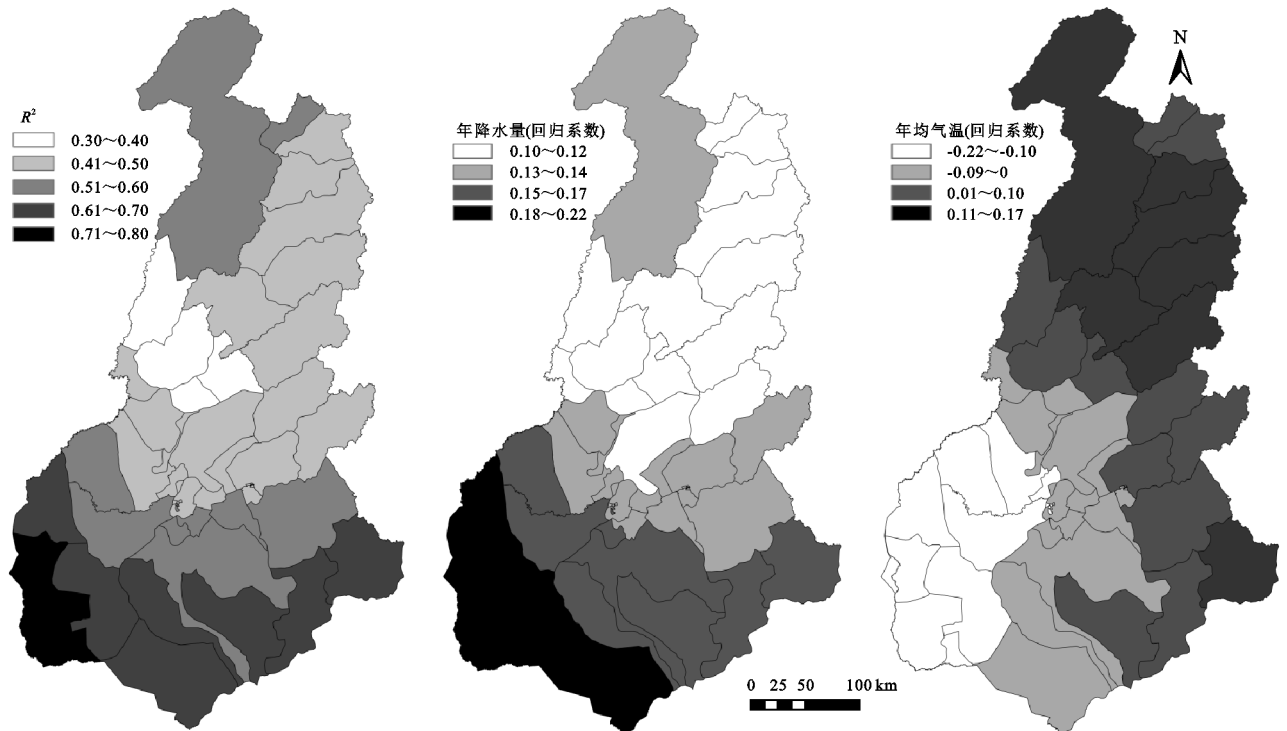


图6 2000—2018年研究区固定CO₂物质量的变化量与气候因子变化量之间的地理加权回归分析结果

对于整个呼伦贝尔林草交错带,本研究发现2000—2018年土地覆被类型的变化并非固碳释氧功能变化的主要驱动因素。但在局部地区,生态保护的实施使植被覆盖度提高,对固碳释氧功能的提升起到了积极的作用。如陈巴尔虎旗、新巴尔虎左旗、海拉尔区、鄂温克族自治旗和新巴尔虎右旗,是呼伦贝尔草地沙化的主要发生区域^[15],为抑制草地沙化退化的扩展,该区域实施了退牧还草、退耕还草和沙化土地封禁等项目,植被盖度明显增加^[16-18]。2010—2018年期间沙地面积减少,沙地固碳释氧总量和单位面积固碳释氧量明显提高,分别增加了22.88%和23.56%;特别是过去沙化较为严重的新巴尔虎左旗固碳释氧功能显著提升(图1),整个新巴尔虎左旗吸收CO₂的物质质量较2010年提高了26.21%(图2)。因此呼伦贝尔林草交错带沙化地区固碳释氧功能的提升与该区域的生态保护修复成效密不可分。

气温和降水的变化往往会影响植被的固碳能力。

本研究相关性分析显示,绝大多数像元的固碳释氧量与其年降水量和年平均气温正相关,且大部分 Pearson 相关系数达到0.8以上。地理加权回归模型分析显示,不同区域的固碳释氧量对两个气候因子变化的响应有所不同:林区主要驱动因子是气温,而草原区和林草交错区的主要驱动因子是降水。这与其他学者的研究结果基本一致,森林 NPP 与气温有显著正相关关系,草原 NPP 与降水有显著正相关关系^[11,19]。气温(尤其最低气温)升高会使植物生长季提前或导致生长季延迟结束,从而促进植被 NPP 的积累^[20]。生长季降水量的增加,使草原秋季物候推迟,从而提高草原的固碳能力^[21-22]。但考虑到气候的多变性和林草交错带植被对极端气候反应的敏感性,仅靠年累积降水量和平均气温可能无法精准指示气候的变异程度,难以清晰地反映气候变化对林草交错带固碳能力的影响,后续研究将关注温度极值、降水均匀度、降水月值数据变化等对植被固碳释氧功能的影响。

4 结 论

(1) 2000—2018 年期间,呼伦贝尔林草交错带吸收 CO₂ 的总量增加了 21.38%,各市(区)旗吸收 CO₂ 的物质质量均有所增加,尤其是草原区的新巴尔虎左旗北部和西部、陈巴尔虎旗西南部和鄂温克族自治旗西部,其单位面积固定 CO₂ 的物质质量增加了 50%以上。

(2) 沙地、草地和林地的固碳释氧总量和单位面积平均值明显提高,其中沙地上升幅度最为明显,分别增加 37.36%和 36.53%。尤其是过去沙化严重的新巴尔虎左旗地区,由于沙化土地封禁等系列生态修复措施,固碳释氧功能得到快速提升,是研究区内变化最明显的地区。整体上,气候变化是研究区固碳释氧服务功能提升的主要驱动力。其中林区固碳释氧变化的主要影响因子是气温;而草原区和林草交错区域固碳释氧功能提升的主要影响因子是降水。

参考文献:

- [1] 丁书萍.呼伦贝尔森林—草原生态交错带气候变化特征研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [2] You G, Liu B, Zou C, et al. Sensitivity of vegetation dynamics to climate variability in a forest-steppe transition ecozone, north-eastern Inner Mongolia, China[J]. Ecological Indicators, 2021,120:1-9.
- [3] 马长欣,刘建军,康博文,等.1999—2003 年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估[J].生态学报, 2010,30(6):1412-1422.
- [4] 张翀,任志远.陕北地区土地生态系统固碳释氧价值量动态测评[J].地理研究,2015,34(8):1522-1534.
- [5] Zhao M, Peng J, Liu Y, et al. Mapping watershed-level ecosystem service bundles in the pearl river delta, China [J]. Ecological Economics, 2018,152:106-117.
- [6] 周自翔,李晶,冯雪铭.基于 GIS 的关中—天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价[J].生态学报,2013,33(9):2907-2918.
- [7] 陈莉,李佩武,李贵才,等.应用 CITYGREEN 模型评估深圳市绿地净化空气与固碳释氧效益[J].生态学报, 2009,29(1):272-282.
- [8] 游惠明,韩建亮,潘德灼,等.泉州湾河口湿地生态系统服务价值的动态评价及驱动力分析[J].应用生态学报,

2019,30(12):4286-4292.

- [9] 刘彦文,刘成武,何宗宜,等.基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素[J].应用生态学报,2020,31(3):987-998.
- [10] 陈强,朱慧敏,何溶,等.基于地理加权回归模型评估土地利用对地表水质的影响[J].环境科学学报,2015,35(5):1571-1580.
- [11] 沈贝贝,丁蕾,李振旺,等.呼伦贝尔草原净初级生产力时空变化及气候响应分析[J].草业学报,2019,28(5): 1-14.
- [12] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [13] 李晶,任志远.基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统固碳释氧价值评价[J].中国农业科学,2011,44(14): 2943-2950.
- [14] 李肖,袁金国,孟丹.河北省 2005—2014 年植被 NPP 时空演变及其与气候因子的关系[J].水土保持研究, 2018,25(6):109-114.
- [15] 张德平,冯宗炜,王效科,等.呼伦贝尔草原风蚀沙化的机理研究成果综述[J].中国沙漠,2006,26(2):300-306.
- [16] 梁慧杰.国家林业局对我旗嵯岗国家沙化土地封禁保护区项目建设情况进行核查[EB/OL].(2018-04-28)[2021-08-18]. <http://www.xzq.gov.cn/Item/14661.aspx>.
- [17] 国家林业局.国家沙化土地封禁保护区[EB/OL].(2017-01-09)[2021-08-18]. <http://www.forestry.gov.cn/main/4170/20170109/988762.html>.
- [18] 张惜伟,汪季,高永,等.近 15 年呼伦贝尔沙质草原植被覆盖变化对气候因子的响应[J].草地学报,2018,26(1):62-69.
- [19] 穆少杰,李建龙,杨红飞,等.内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系[J].草业学报, 2013,22(3):6-15.
- [20] Chen X, Xu L. Temperature controls on the spatial pattern of tree phenology in China's temperate zone[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2012, 154/155: 195-202.
- [21] 俎佳星,杨健.东北地区植被物候时序变化[J].生态学报,2016,36(7):2015-2023.
- [22] 同琳静,刘洋洋,王倩,等.西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J].水土保持研究,2019,26(4): 367-374.