

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0699

李朝晖,单楠,王琪,等.2013—2020年呼伦湖流域植被碳源/汇估算及影响因子分析[J].生态与农村环境学报,2022,38(11):1437-1446.

LI Zhao-hui, SHAN Nan, WANG Qi, et al. Estimation of Vegetation Carbon Source/Sink and Analysis of Its Influencing Factors in Hulun Lake Basin from 2013 to 2020[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(11): 1437-1446.

2013—2020年呼伦湖流域植被碳源/汇估算及影响因子分析

李朝晖^{1,2}, 单楠^{1,2①}, 王琪^{2,3②}, 李文静^{1,2}, 王增龙^{2,3}, 包萨茹^{2,3}, 窦华山^{2,3}, 敖文^{2,3}, 庞博^{2,3}, 王文林^{1,2} (1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042; 2. 国家环境保护呼伦湖湿地生态环境科学观测研究站, 内蒙古呼伦贝尔 021000; 3. 呼伦贝尔市北方寒冷干旱地区内陆湖泊研究院, 内蒙古呼伦贝尔 021000)

摘要: 陆地生态系统碳循环是气候变化和全球碳循环研究的重要组成部分。植被净生态系统生产力(NEP)是定量描述植被生态系统碳源/汇能力的重要指标。草地生态系统是全球陆地生态系统重要组成部分,呼伦湖流域是以草地生态系统为主的混合农田、森林和湿地等生态系统的多生态系统区域,其碳源/汇时空规律及其影响机制对该区域生态环境保护和修复以及区域气候变化研究具有重要意义。基于 Landsat 8 OLI 高分辨率卫星遥感影像以及 ERA5 气候再分析数据和地表覆盖分类数据,采用光能利用率模型和土壤呼吸模型估算呼伦湖流域不同植被类型碳汇时空变化规律及对气候因子的响应差异。结果表明,2013年以来,呼伦湖流域生态系统整体发挥碳汇功能,但植被固碳能力降低,58.29%的区域植被 NEP 呈减少趋势,36.77%的区域植被 NEP 呈微弱增加趋势;区域月均 NEP(以 C 计)呈现先减少后增大的年际变化特征,变化区间为 8.41~16.44 g·m⁻²·月⁻¹;流域内草地生态系统具有最高碳汇总量(以 C 计),约为 37 Tg·月⁻¹;流域内农田 NEP 受温度影响最大,森林 NEP 受温度、降水量和辐射共同影响,草地 NEP 主要受温度和降水量共同影响,而湿地 NEP 与气候因子相关不明显。

关键词: 净生态系统生产力; 碳源/碳汇; 呼伦湖流域; GEE; ERA5 气候再分析数据

中图分类号: X87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)11-1437-10

Estimation of Vegetation Carbon Source/Sink and Analysis of Its Influencing Factors in Hulun Lake Basin from 2013 to 2020. LI Zhao-hui^{1,2}, SHAN Nan^{1,2①}, WANG Qi^{2,3②}, LI Wen-jing^{1,2}, WANG Zeng-long^{2,3}, BAO Sa-ru^{2,3}, DOU Hua-shan^{2,3}, AO Wen^{2,3}, PANG Bo^{2,3}, WANG Wen-lin^{1,2} (1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. National Environmental Protection Hulun Lake Wetland Ecological Environment Scientific Observation and Research Station, Hulun Buir 021000, China; 3. Hulunbuir Inland Lake Research Institute of Northern Cold and Arid Areas, Hulun Buir 021000, China)

Abstract: The terrestrial carbon cycle is an important component for researches on climate change and global carbon cycle. Net ecosystem productivity (NEP) is an essential indicator to quantitatively describe the carbon source/sink capacity of vegetated ecosystems. The grassland ecosystem is an important part of the global terrestrial ecosystem, and the Hulun Lake Basin is a multi-ecosystem area dominated by grassland ecosystem and mixed with farmland, forest and wetland ecosystems. The spatiotemporal variations and drivers of its carbon source/sink are of great significance in the study of ecological environmental protection and restoration as well as the local climate change in this region. Based on Landsat 8 OLI high-resolution satellite remote sensing images, ERA5 climate reanalysis data and land cover data, the spatiotemporal patterns of carbon sinks of different vegetation types in the Hulun Lake basin from 2013 to 2020 and their differences in response to climate factors were estimated using a light use efficiency model and a soil respiration model. The results show that since 2013, the Hulun Lake Basin has been functioning as a carbon sink, while the carbon sequestration capacity decreased, with 58.29% of the regional vegetation NEP showing a decreasing trend and 36.77% of the regional vegetation NEP showing a weak increasing trend. The regional monthly average NEP showed inter-annual variation characteristics of

收稿日期: 2021-11-14

基金项目: 内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目; 呼伦湖生态安全调查评估项目; 中央级公益性科研院所基本科研业务专项

① 通信作者 E-mail: dannan333@163.com

② 共同通信作者 E-mail: wangqi907291797@163.com

firstly decreasing and then increasing, with a variation range of $8.41-16.44 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mo}^{-1}$. In the watershed, the grassland ecosystem had the highest total carbon sink, about $37 \text{ Tg} \cdot \text{mo}^{-1}$, and the farmland NEP was mostly affected by temperature, and the forest ecosystem was influenced by the combination of temperature, precipitation, and radiation. The grassland ecosystem is concurrently affected by temperature and precipitation, while the wetland NEP is not significantly correlated with climate factors.

Key words: net ecosystem productivity; carbon source/sink; Hulun Lake Basin; GEE; ERA5

人类活动导致大气中 CO_2 、 CH_4 等温室气体浓度不断上升,逐渐影响人类生活,因此全球变暖问题受到越来越多的关注。植被净生态系统生产力 (net ecosystem productivity, NEP) 指单位时间、单位面积内植物将无机物合成为有机物的总量或固定的总能量与植被呼吸以及土壤异养呼吸 (heterotrophic respiration, R_H) 之间的差值,表示植被生态系统碳的净吸收或净存储,通常用来定量表征植被生态系统碳源/汇能力。当 NEP 值 >0 时,表示生态系统为碳汇,反之为碳源^[1-3]。碳汇 (carbon sink) 指森林和草地吸收大气中的 CO_2 ,从而降低大气 CO_2 浓度的机制,碳汇在减缓气候变化方面有重要作用^[4]。NEP 不仅与陆地生态系统多种要素循环紧密相关,还对全球气候系统有重大影响,是表征陆地生态系统碳循环的一个重要指标,对于全球碳循环研究具有重要意义,因此准确监测其时空变化格局成为区域碳收支研究的关键问题之一^[4]。

草地生态系统具有防风固沙、水源涵养、水土保持和生物多样性保护等重要生态功能,是中国陆地生态系统重要组成部分。草原碳汇作为生物固碳重要组成部分,对于减缓全球气候变暖具有重要意义。草原碳汇研究是保护草原、恢复退化草地的关键所在。同时,草原面积广阔,通过碳固定措施开展可持续管理,既可以实现草原保护,又可以实现草原碳汇价值增收。目前,已有学者结合遥感及地面观测数据估算了青海高原、青藏高原、三江源和内蒙古等区域植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 和 NEP,分析了不同区域植被生态系统碳源/汇时空格局变化及影响因素^[1-2,5-7]。然而,目前针对呼伦湖流域碳源/汇的研究较少,区域碳汇功能时空格局仍不明晰。呼伦湖流域是北方防沙带和东北森林带交汇的重要节点,同时也是生物多样性重要保护区,东北亚鸟类迁徙的重要通道和集散地。但呼伦湖流域生态环境较为脆弱,生态系统植被变化对区域碳汇功能具有重要影响。基于 30 m 高分辨率遥感数据和气象再分析数据,采用光能利用率遥感模型和土壤呼吸模型估算呼伦湖流域不同生态系统植被 NEP,并分析 NEP 时空分

布格局与变化趋势,评估各生态系统碳库及其动态变化,揭示呼伦湖流域碳源/汇时空格局以及不同生态系统碳源/汇功能对气候变化的响应,研究结果可为呼伦湖流域的生态环境保护和修复、区域生态安全评估等提供支撑^[8-9]。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区域为呼伦湖流域,包括呼伦湖以及流域内主要河流(克鲁伦河和乌尔逊河)、草原和林地。流域属于中温带大陆性草原气候区,流域东南部为阿尔山区域。呼伦湖流域海拔在 497~1 660 m 之间,呈现中心区域海拔较低、呼伦湖及河流周围海拔逐渐升高的地势特征,流域生态系统类型以草原和湿地为主(图 1)。

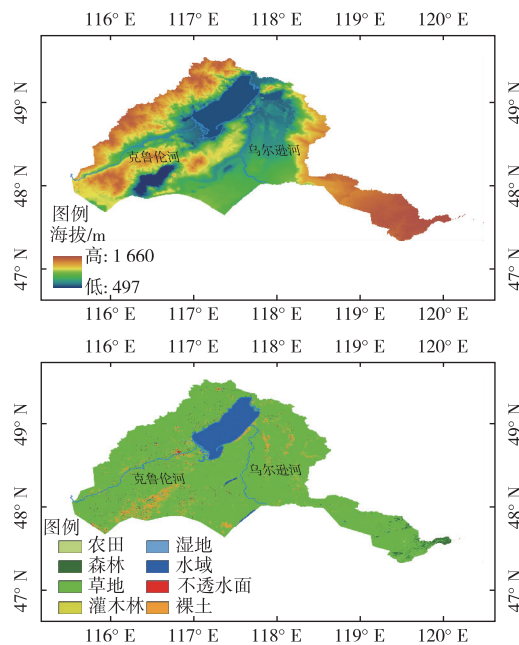


图 1 呼伦湖流域地理位置以及 DEM 和地物覆盖类型
Fig. 1 DEM and land cover of Hulun Lake Basin

1.2 数据来源与处理

1.2.1 Landsat 8 遥感影像数据

Landsat 8 卫星重访周期为 16 d,成像宽幅为 $185 \text{ km} \times 185 \text{ km}$,覆盖呼伦湖流域约需要 6 景。

Google Earth Engine (GEE) 是由 Google 公司、卡内基梅隆大学与美国地质调查局共同开发的用于处理卫星遥感图像和其他地球观测数据的云计算平台。该研究采用 GEE 平台提供的 30 m 空间分辨率 Landsat 8 地表反射率产品 LANDSAT_LC08_C01_T1_SR。由于 Landsat 8 重访周期以及呼伦湖流域云、冰雪的限制, Landsat 8 对研究区不能实现有效且完整的覆盖。已有研究^[10]表明, 对于高纬度且受云层影响较大区域, 可以通过采用连续多月反射率中值 (median) 影像来有效解决。同时, 由于 7—9 月夏季良好的水热条件为植被创造良好生长条件, 植被以生殖生长为主, 光合作用能力强^[11]。故相比于其他月份, 7—9 月植被固碳能力较强, 有助于呼伦湖流域植被高固碳能力期碳汇能力的量化和描述。因此采用 2013—2020 年呼伦湖流域 7—9 月反射率中值影像作为各年反射率数据。

1.2.2 MODIS 数据

MOD17A2 是使用 1 km 范围内每日 MODIS 土地覆盖数据 f_{APAR}/LAI 和表面气象数据来为陆地植被提供精确且定期测量的生态系统生产力估算产品。该产品基于光能利用率模型计算得到。基于 GEE 平台获取 2013—2020 年呼伦湖流域 7—9 月均值 MOD17A2 产品, 并提取 NPP (代码为 PsnNet) 作为 NPP 估算模型的验证数据。

1.2.3 气象与辐射数据

气象与辐射数据包括月平均气温 (temperature, T)、月总降水量 (total precipitation, TP) 和月总辐射量 (surface solar radiation downwards, SSRD), 均来自 ECMWF ERA5 气候再分析数据集。ERA5 数据集是利用物理定律将模型数据与来自世界各地的观测数据整合成一个全球完整且一致的数据集, 提供了对过去气候的准确描述。采用 ERA5 月均值数据 (ERA5 - Land monthly averaged data from 1981 to present), 提取 2013—2020 年 7—9 月的 2 m 高度处气温、总降水量和地表下行太阳辐射均值分别作为气温、降水量和太阳辐射月均值数据。

1.2.4 地表覆盖数据 FROM-GLC

FROM-GLC 为清华 2017 年发布的 10 m 分辨率全球地表覆盖制图数据集^[12]。该数据集将全球地表覆盖分为 10 类, 呼伦湖流域共有 8 种覆盖类型 (图 1), 其中, 植被类型主要包括农田、森林、草地和湿地 4 类。以上述 4 类植被类型为基础, 将流域非植被类型 (包括水体、不透水面和裸土) 区域和面积极小的灌木林归为其他。经统计, 农田、森林、草地、湿地和其他覆盖类型面积分别为 5 513.54、

28 951.17、2 780 043.79、3 205.99 和 468 323.52 km², 其占流域面积比例分别为 0.17%、0.88%、84.60%、0.10% 和 14.25%。地表覆盖数据可用于分析呼伦湖流域 2013—2020 年不同生态系统类型碳源/汇时空动态。

2 模型与方法

2.1 NEP 估算模型

植被 NEP 为表征区域植被碳汇/源的重要指标, NEP 可以表示为植被 NPP 与土壤异养呼吸消耗碳量的差值, 计算公式为

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

式(1)中, $NEP(x, t)$ 为像元 x 在时间段 t 内的植被净生态系统生产力 (以 C 计), $g \cdot m^{-2}$; $NPP(x, t)$ 为像元 x 在时间段 t 内的植被净初级生产力 (以 C 计), $g \cdot m^{-2}$; $R_H(x, t)$ 为像元 x 在时间段 t 内的土壤微生物呼吸量 (以 C 计), $g \cdot m^{-2}$ 。

2.1.1 光能利用率模型

采用 CASA (Carnegie-Ames-Stanford approach) 模型估算 NPP^[13], 其计算公式为

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (2)$$

式(2)中, $APAR(x, t)$ 为像元 x 在时间段 t 内吸收的光合有效辐射, $MJ \cdot m^{-2}$; $\varepsilon(x, t)$ 为像元 x 在时间段 t 内的实际光能利用率 (以 C 计), $g \cdot MJ^{-1}$ 。 $APAR(x, t)$ 计算公式为

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (3)$$

式(3)中, $SOL(x, t)$ 为像元 x 在时间段 t 内的太阳入射总辐射, $MJ \cdot m^{-2}$; $FPAR(x, t)$ 为植被对入射光合有效辐射的吸收比例, 其值采用归一化植被指数 (NDVI) 进行估算, 并假设在时间段 t 内保持不变; 0.5 为植被所能利用的太阳有效辐射 (波长范围为 400~700 nm) 占太阳总辐射的比例估算值。

$\varepsilon(x, t)$ 计算公式为

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon_0 \times f_1(x, t) \times f_2(x, t) \times w(x, t) \quad (4)$$

式(4)中, f_1 和 f_2 为温度对光能利用率的 2 个影响系数, $f_1(x, t)$ 和 $f_2(x, t)$ 表示温度对光能利用率的影响; $w(x, t)$ 为水分条件对光能利用率的影响; ε_0 为理想状态下植被最大光能利用率, 其值参照朱文泉等^[14-15] 对全国植被 NPP 计算结果。 $f_1(x, t)$ 、 $f_2(x, t)$ 和 $w(x, t)$ 计算公式为

$$f_1(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x, t) - 0.0005 \times T_{opt}(x)^2 \quad (5)$$

$$f_2(x, t) = \left[\frac{1.184 \times (1 + e^{0.3 \times [-T_{opt}(x, t) - 10 + T(x, t)]})}{1 + e^{0.2 \times [T_{opt}(x, t) - 10 - T(x, t)]}} \right], \quad (6)$$

$$w(x, t) = 0.5 + 0.5 \times E / E_p. \quad (7)$$

式(5)~(7)中, $T(x, t)$ 为平均气温, $^{\circ}\text{C}$; $T_{opt}(x, t)$ 为植被生长最适温度, $^{\circ}\text{C}$; E 和 E_p 分别为实际蒸散发量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 和潜在蒸散发量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2.1.2 土壤呼吸模型

$R_H(x, t)$ 计算公式^[16]为

$$\ln R_H(x, t) = 0.22 + 0.87 \times \ln R_s(x, t). \quad (8)$$

式(8)中, $R_s(x, t)$ 为土壤呼吸速率, 其值采用土壤呼吸模型^[17]进行估算。

$$R_s(x, t) = 1.250 \times e^{[0.054 \cdot 52 \times T(x, t)]} \times P(x, t) / [4.259 + P(x, t)]. \quad (9)$$

式(9)中, $T(x, t)$ 为像元 x 在时间段 t 内的平均气温, $^{\circ}\text{C}$; $P(x, t)$ 为像元 x 在时间段 t 内的降水量, cm 。

2.2 时空变化与气候因子分析

年际变化率采用 NEP 趋势斜率表示, NEP 年际变化显著性采用 NEP 值与时间序列的相关关系表示。趋势斜率大于 0 表示 NEP 增加, 反之表示 NEP 减少。2013—2020 年 NEP 波动特征采用 NEP 变异系数 CV 表示。CV 值越小, 表示数据分布越集中, 数据随时间的波动小, 稳定性较高; 反之, 则表示数据随时间序列波动大, 稳定性低。此外, 温度、降水和辐射对 NEP 的影响采用像元尺度的偏相关分析方法得到。由于该研究有 4 个变量, 因此采用二阶偏相关系数 (partial correlation coefficient, PCC) 进行分析。

3 结果与分析

3.1 呼伦湖流域典型气候因子与植被指数年际变化

如图 2 所示, 2013—2020 年呼伦湖流域气温总体呈现先升高后降低趋势, 在 2016 年达到最高。2013—2020 年流域降水量总体呈现先减少后增加趋势, 在 2016 年达到最低。2014—2017 年研究区月总辐射量明显高于平均值, 表明该时期太阳入射辐射较强, 且 2014 年为最大太阳入射辐射 (图 2)。2013—2020 年流域 NDVI 值呈现先降低后升高趋势, 在 2016 年达到最低值, 这与降水量变化趋势大体一致 (图 2)。

3.2 呼伦湖流域植被碳源/汇时空变化特点

2013—2020 年呼伦湖流域植被碳汇年际变化和时空变化见图 3~4。在时间尺度上, 碳汇总体呈现先减少再增大的年际变化特征 (图 3), 最大值和

最小值分别为 16.44 和 8.41 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ (图 3), 碳汇年际变化率为 $-0.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$, 植被固碳呈轻微下降趋势。这与研究区降水量变化趋势相似 (图 2), 与月平均气温变化趋势相反 (图 2)。在空间尺度上, 2013—2020 年呼伦湖流域碳汇高值区主要位于呼伦湖北部及西北部、克鲁伦河消落带、乌尔逊河消落带和东南部阿尔山森林区域, 低值区主要位于呼伦湖西南部、克鲁伦河两岸、乌尔逊河两岸和阿尔山附近区域 (图 4)。

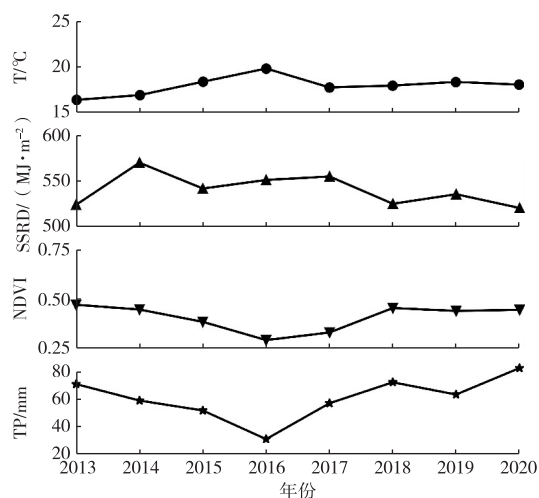


图 2 2013—2020 年 7—9 月呼伦湖流域平均气温 (T)、降水量 (TP)、月总辐射量 (SSRD) 和归一化植被指数 (NDVI) 的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of average T, TP, SSRD, and NDVI of Hulun Lake Basin from July to September during 2013–2020

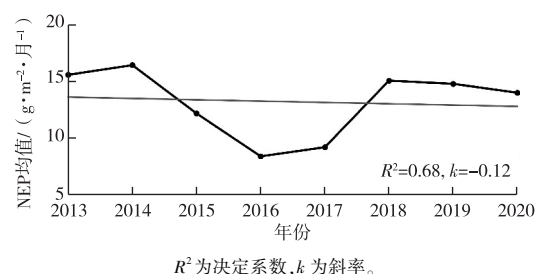


图 3 呼伦湖流域植被多年平均 NEP 年际变化

Fig. 3 Interannual variation of mean vegetation NEP in Hulun Lake Basin from 2013 to 2020

呼伦湖流域东南部为阿尔山森林区域, 西北部为呼伦湖及其周边的湿地和草原。研究区内存在气候差异, 温度和降水量空间分布不均匀。由图 5 可知, 就 NEP 经向变化而言, 呼伦湖流域碳汇功能呈现明显经度地带性, 植被类型由西向东表现为由草地向森林转变, NEP 值逐渐上升, 碳汇增大; 就

NEP 纬向变化而言,呼伦湖流域 NEP 随纬度增加呈现先减小后增大特征,其主要原因为东南部低纬度地区森林为碳汇高值区。

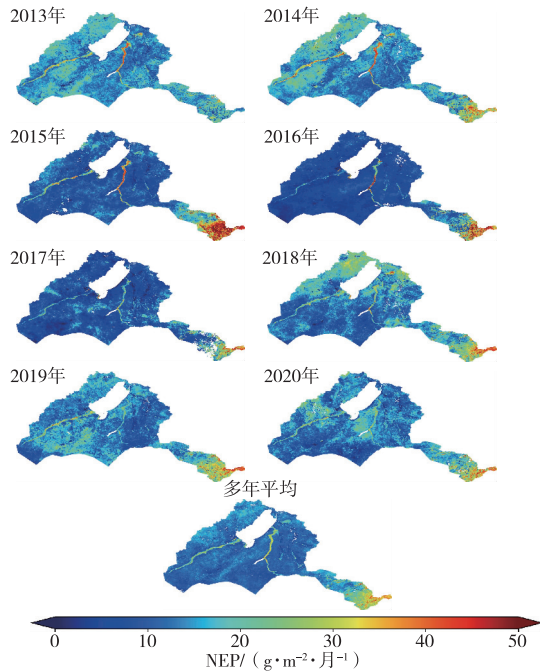


图 4 呼伦湖流域 2013—2020 年 7—9 月和多年平均 NEP 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of NEP value of Hulun Lake Basin from July to September during 2013–2020 and the multi-year mean NEP value

基于像元尺度,采用一元线性回归分析法进一步分析 2013—2020 年碳汇年际变化情况,以期获得呼伦湖流域不同空间位置上植被碳循环在近 8 a 变化的区域差异性规律。如图 6 所示,2013—2020 年

呼伦湖流域碳汇整体上呈现相对稳定且轻微减少趋势。58.29% 的区域植被 NEP 呈减少趋势,36.77% 的区域植被 NEP 斜率在 $0 \sim 1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 之间,呈微弱增加趋势,而斜率高于 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 的区域面积仅占 4.94%,且主要分布在东南部森林区域。从 NEP 变异系数计算结果可知,呼伦湖流域植被 NEP 年际变化变异系数主要集中在 $0.2 \sim 0.5$ 之间,其区域面积占比为 82.52%。呼伦湖流域大部分区域碳循环状态年际变化波动较小,总体上保持碳汇功能,但植被固碳能力总体呈下降趋势。

3.3 不同植被类型的碳源/汇年际时序变化

研究区不同植被类型碳循环状态有较大差异(图 7)。从 NEP 年际变化来看,农田生态系统平均 NEP 表现为升高—降低—升高—降低趋势,碳汇功能波动变化,NEP 均值最低和最高分别为 21.29 和 $37.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$;森林生态系统平均 NEP 值最高,碳汇功能最大,年际变化从 2013 年的 $23.88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 增大至 2015 年的最高值 $44.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$,然后稳定在约 $40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$;草地生态系统碳汇功能显著低于农田和森林生态系统,2014 年最高 ($16.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$),2016 年最低 ($8.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$);湿地生态系统碳汇总体高于草地,低于农田和森林,最高值为 $17.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ (图 7)。对于碳汇总量,草地生态系统远高于其他生态系统碳汇总量。结果表明,2013—2020 年呼伦湖流域农田和森林均为高固碳功能区,草地为低固碳功能区。流域内农田和森林面积较小,固碳总量较少,草地面积最大,碳汇总量较高。

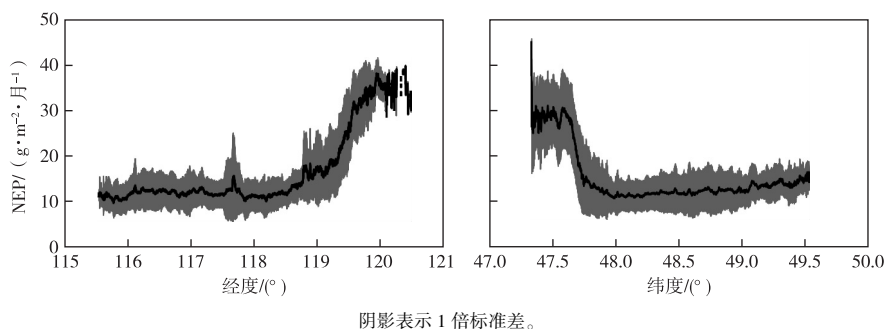


图 5 2013—2020 年呼伦湖流域平均 NEP 的经向和纬向变化规律

Fig. 5 Variations of mean NEP with longitude and latitude in Hulun Lake Basin during 2013–2020

2013—2020 年研究区不同植被类型碳汇多年均值和总量以及频数分布见图 7。从频数分布图[图 7(d)]可以看出,农田生态系统 NEP 主要分布

在 $20 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 之间;森林生态系统 NEP 则主要分布在 $30 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 之间,因此森林碳汇功能 ($38.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$) 最高;草地面积最广,

其 NEP 频数分布的波峰范围为 $5 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$, 因此草地碳汇总量 ($37.00 \text{ Tg} \cdot \text{月}^{-1}$) 最高; 湿地生态系统 NEP 则主要分布在小于 $14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 区间, 碳汇总量为 $0.04 \text{ Tg} \cdot \text{月}^{-1}$ 。总体上, 农

田、森林和草地碳汇功能和总量均为正数, 表现为碳汇, 碳汇能力由大到小依次为森林、农田和草地。流域内植被碳循环以碳汇为主, 仅湿地生态系统少量植被表现为碳源 [图 7(d)]。

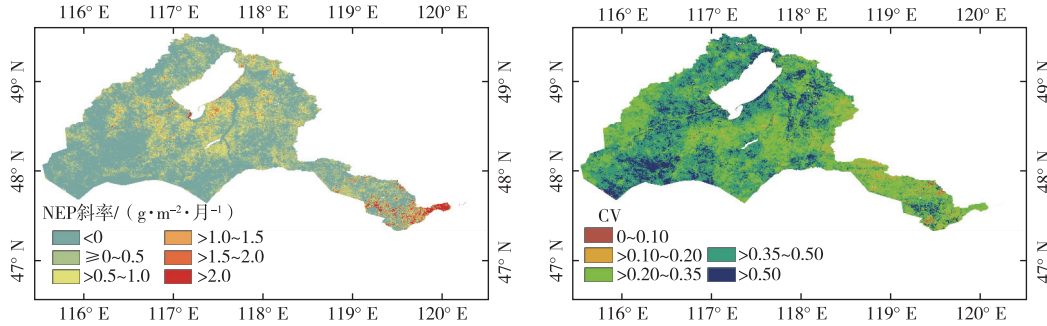
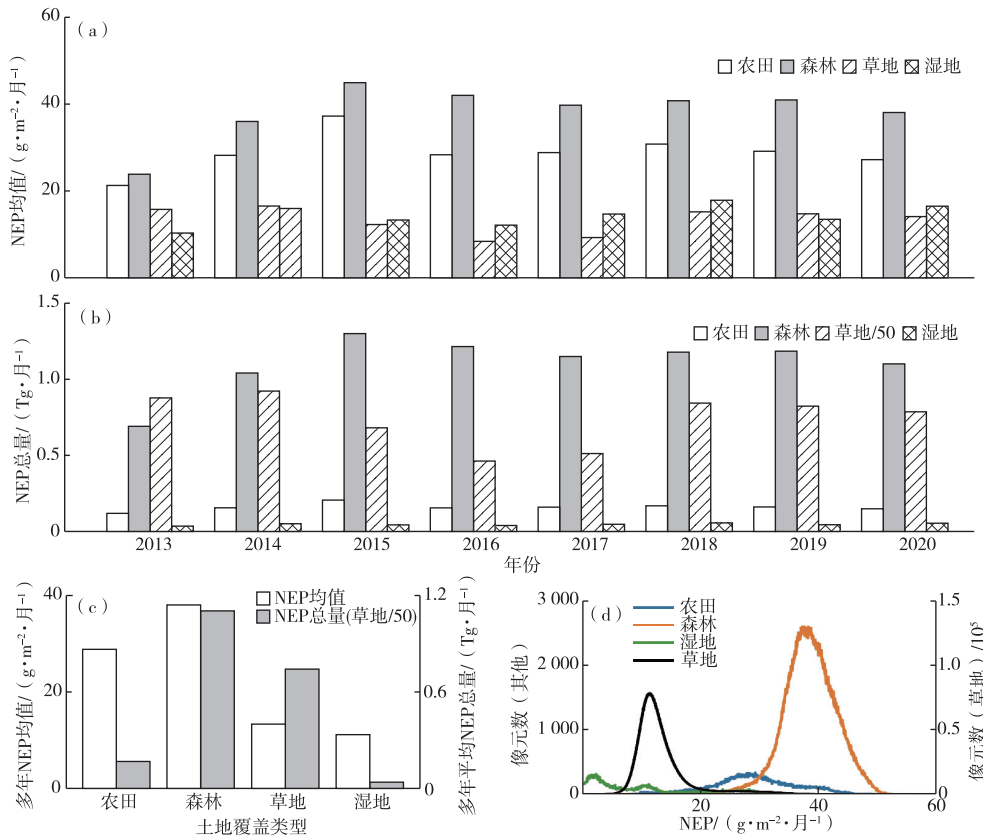


图 6 2013—2020 年呼伦湖流域 NEP 变化斜率空间分布和变异系数 (CV) 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of slope and coefficient of variation of NEP in Hulun Lake Basin from 2013 to 2020



(a) 不同植被类型的碳汇功能年际时序变化; (b) 不同植被类型的碳汇总量年际时序变化;

(c) 不同植被类型的多年平均 NEP 与 NEP 总量; (d) 不同植被类型的 NEP 频数分布。草地/50 表示草地 NEP 总量值除以 50。

图 7 呼伦湖流域不同植被类型植被碳源/汇时序变化

Fig. 7 Time series variation of carbon source /sink of different plants in Hulun Lake Basin

3.4 呼伦湖流域植被碳源/碳汇对气候因子的响应

植被生长与气候变化密切相关, 对 2013—2020 年呼伦湖流域 NEP 与温度、降水量和太阳入射辐射的偏相关系数逐像元进行计算 (图 8)。如图 8 所

示, 呼伦湖流域植被 NEP 与温度主要呈负相关, 相关系数在 $-0.25 \sim -1.0$ 之间, 部分区域呈正相关关系, 如呼伦湖南部草原 (相关系数在 $0 \sim 0.5$ 之间) 和东南部森林 (相关系数在 $0.25 \sim 1.0$ 之间)。如图 8

所示,呼伦湖流域植被 NEP 与降水量主要呈正相关,相关系数在 0.25~1.0 之间,这些区域分布在呼伦湖、克鲁伦河和乌尔逊河周边草原地区以及流域东南部森林地区。呼伦湖流域植被 NEP 与辐射的相关性较弱,相关系数主要在-0.5~0.5 之间。

为了分析不同植被类型 NEP 对气候因子的响应差异,统计不同植被类型 NEP 与气候因子的偏相关系数频数(图 9)。由于草地像元数远多于其他 3 种植被类型,其频数分布曲线较平滑。如图 9 所示,农田 NEP 受温度影响最大,偏相关系数主要位于-0.25~-0.75 和 0.25~0.5 之间;其受降水量和辐射影响较小,偏相关系数主要分布在-0.4~0.25 之间。如图 9 所示,森林 NEP 与温度、降水量和辐射主要呈正相关,与各气候因子偏相关系数在 0.25~1.0 之间的像元数占比分别为 74.03%、67.86% 和 66.23%。如图 9 所示,草地 NEP 对气候因子响应表现出明显差异,与温度呈负相关(偏相关系数在-1.0~-0.25 之间)的像元数占草地像元总数的 75.80%;与降水量呈正相关关系,偏相关系数分布在 0.25~1.0 之间的像元数占草地像元总数的 58.91%;草地 NEP 与辐射相关性不明显,偏相关系数分布在大于 0.5 或小于 0.5 的像元数占比为 78.15%。如图 9 所示,湿地生态系统 NEP 对温度和降水的响应不明显,其与温度和降水量呈正相关

和负相关的像元数占比相差不大,其与辐射主要呈正相关,偏相关系数分布在 0~0.5 之间的像元数占比相对较高。

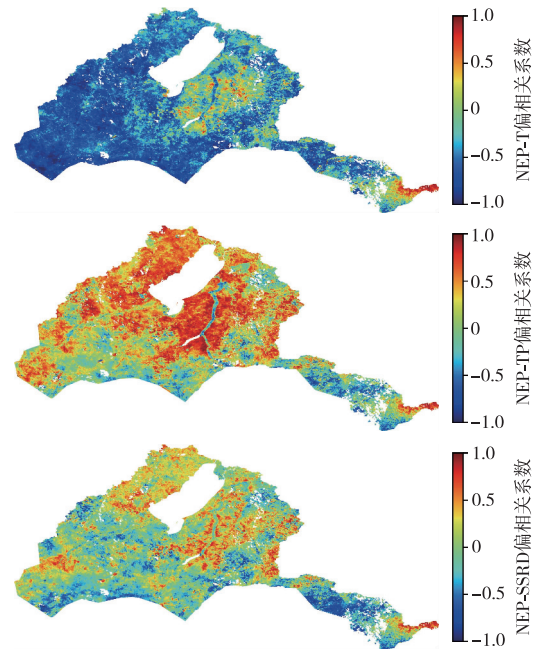


图 8 2013—2020 年呼伦湖流域 NEP 与温度 (T)、降水量 (TP) 和太阳入射辐射 (SSRD) 变化的偏相关系数
Fig. 8 PCC between NEP and T, TP, and SSRD in Hulun Lake Basin from 2013 to 2020

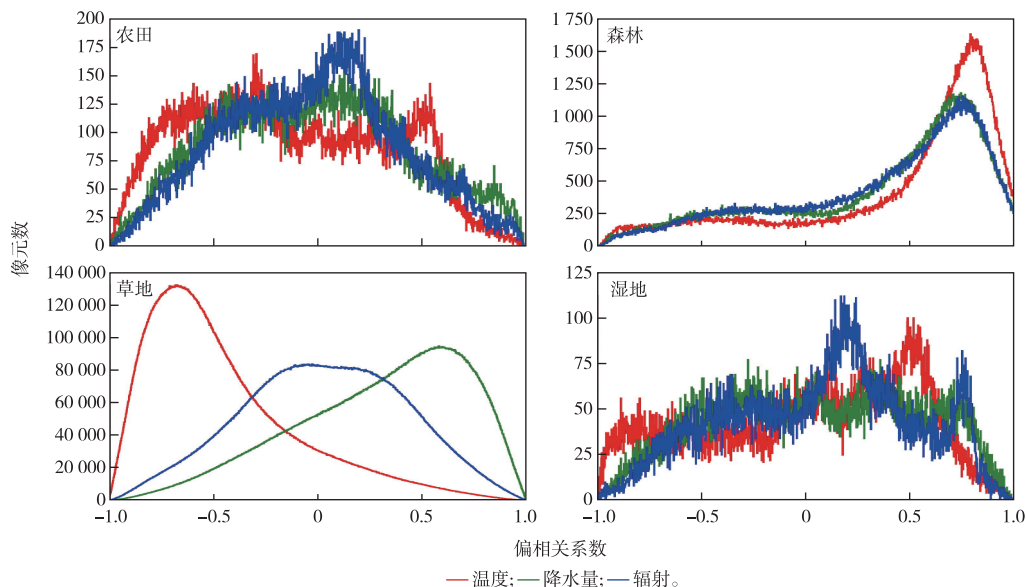


图 9 不同植被类型 NEP 对温度、降水量和辐射的响应频数分布
Fig. 9 Frequency by pixels of partial correlation coefficients between NEP of different vegetation types and climate factors (T, TP, and SSRD)

从呼伦湖流域植被 NEP 对温度、降水量和辐射 3 种气候因子的偏相关系数分布(图 10)来看,呼伦

湖流域植被生长主要受温度和降水量影响。呼伦湖四周和乌尔逊河两岸主要为受降水量影响区域,

而呼伦湖流域西南部、南部和阿尔山附近区域则主要为受温度影响区域。

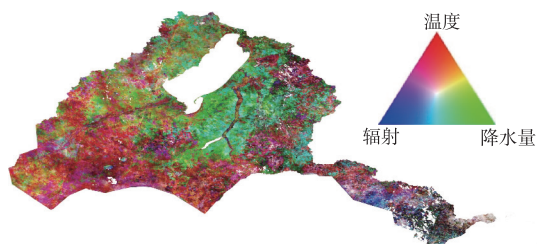


图10 影响呼伦湖流域植被生长的气候主导因子分布
Fig. 10 Climatic constraints to plant growth in Hulun Lake Basin from 2013 to 2020

3.5 NEP估算模型精度

目前,已有研究中 NEP 估算模型的验证主要是基于植被地上生物量观测数据或研究区涡度相关通量观测数据^[1-2,5,7]。由于缺乏碳通量实测值,该研究基于 MODIS NPP 产品对模型估算结果进行对比分析。如图 11 所示,2013—2020 年呼伦湖流域估算的 NPP 与 MODIS NPP 间呈显著正相关,且相关性较高,皮尔逊相关系数分布在 0.47~0.81 之间。如图 11 所示,2013—2020 年估算 NPP 与 MODIS NPP 之间均方根误差 (RMSE) 均小于 $7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。总体来看,该研究得到的估算 NPP 变化趋势与 MODIS NPP 具有较好一致性。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 气候因子对不同植被类型 NEP 的影响

热量和水分是决定植被呈地带性分布的控制条件,不同植被类型对热量和水分变化的敏感性存在较大差异^[2,18-19]。该研究结果表明森林生态系统 NEP 受温度、降水量和辐射 3 种气候因子共同影响,且 3 者影响程度无明显差异,均对森林植被生长有促进作用。农田生态系统 NEP 主要受温度变化控制,而草地生态系统受降水量和温度共同影响。该研究结果与以往相关研究结论^[19-21]相似,均表明气温和降水量是植被生长主导因子,但其对不同植被类型的影响程度存在差异。然而大部分研究结果表明,存在对特定植被类型的影响程度高于其他气候因子的单个特定气候因子,笔者研究发现 2 种或 3 种气候因子呈耦合影响的结论与之存在差异。多种气候因子耦合影响可能是高纬度区域植被对气候因子的响应特征,较低的温度和较少的降水量导致植被未达到最佳光合功能。此外,呼伦湖对流

域内植被碳汇也具有不可忽视的作用。呼伦湖流域水热变化受流域中呼伦湖的影响和调控,区域植被生长所需的气温、降水与呼伦湖湖水蒸发关系密切。此外,相比于草地、森林等生态系统,笔者研究发现呼伦湖流域湿地生态系统 NEP 年际波动较小,表明研究区湿地生态系统对气候因子响应不明显,这可能与湿地生态系统水热补充有关。

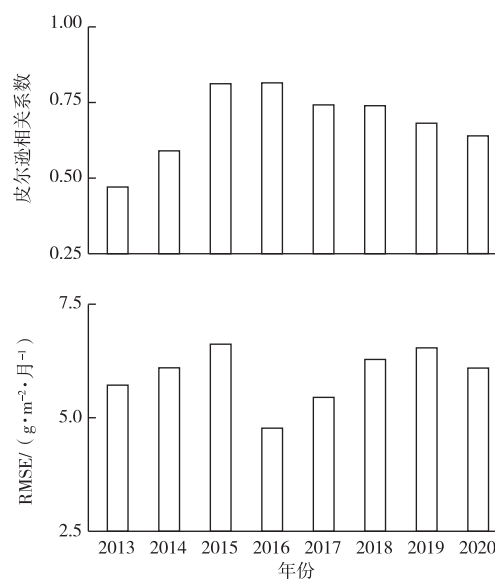


图11 2013—2020年呼伦湖流域估算NPP与MODIS NPP皮尔逊相关系数与均方根误差 (RMSE)
Fig. 11 Pearson correlation coefficient and RMSE between estimated NPP and MODIS NPP in Hulun Lake Basin during 2013–2020

4.1.2 NEP模拟结果比较与不确定性分析

采用相同模型估算不同区域相同植被类型 NEP,其结果存在一定差异。如表 1 所示,笔者研究估算的 2013—2020 年呼伦湖流域植被 NEP 月均值为 $8.41 \sim 16.44 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$,多年月均值为 $13.22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。刘凤等^[1]估算 2000—2015 年青藏高原多年 NEP 月均值为 $10.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$,戴尔阜等^[7]估算 2001—2012 年内蒙古草原生态系统 NEP 月均值在 $4.2 \sim 12.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 之间,与笔者研究区域相近的呼伦贝尔平原草原区多年 NEP 月均值为 $9.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。上述研究结果均低于笔者研究,这可能是研究区域植被类型、气候条件和估算时段的差异导致。青藏高原以常绿针叶林、落叶阔叶林、高寒灌丛、高寒草原和草甸以及高寒荒漠等植被类型为主,平均海拔 3 000 m 以上,冬季漫长寒冷^[1]。因此,青藏高原特殊地理位置和气候条件可能导致植被光合条件严峻,植被固碳能力

小于呼伦湖流域。而戴尔阜等^[7]研究中植被类型为草地,笔者研究的多种生态系统混合(包含森林等高固碳能力植被)与之存在差异,由此导致植被固碳较低。此外,笔者研究估算月份为 7—9 月,植被生长旺盛,这降低了其他植被生长状态低的月份对 NEP 月均值估算结果的影响,因此笔者研究结果高于其他研究。潘竞虎等^[4]估算中国西北干旱区

植被碳汇多年 NEP 月均值为 $49.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$, 远高于其他研究,这可能是因为其研究区域包括大兴安岭等森林资源丰富区域,碳汇功能强于其他生态系统,因此多年 NEP 均值高于以草地生态系统为主的其他研究模拟结果。此外,空间分辨率差异可能也是 NEP 估算结果存在一定差异的原因。

表 1 笔者研究 NEP 模拟结果与其他研究模拟结果的比较

Table 1 Comparison of simulated NEP in this study with that in other paper

模型	多年 NEP 月均值/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1})$	研究区域	时间范围	分辨率/m	来源文献
改进 CASA 模型	10.70	青藏高原	2000—2015 年	250	[1]
改进 CASA 模型	4.2~12.5(其中呼伦贝尔平原草原区为 9.00)	内蒙古	2001—2012 年	250	[7]
改进 CASA 模型	49.33	中国西北干旱区	2001—2012 年	1 000	[4]
改进 CASA 模型	13.22	呼伦湖流域	2013—2020 年	30	笔者研究

笔者研究模型估算结果有效描述了呼伦湖流域植被碳汇时空格局,但仍存在一定不确定性,主要体现在 3 个方面:(1)使用的数据来自遥感观测和模型模拟。由于缺少实测数据,在利用 NDVI 数据估算植被吸收光合有效辐射(FPAR)时可能存在误差。用于计算实际光能利用率的气温、降水量和太阳入射辐射等数据来自 ECMWF 模型气候再分析结果,因此估算所用的实际光能利用率也存在模拟误差。(2)光能利用率模型假设呼伦湖流域各生态系统植被最大光能利用率均为固定值,且保持一致。然而,已有研究^[22-25]发现研究区植被类型、空间位置和水分胁迫等因素均会影响最大光能利用率。因此,笔者研究中最大光能利用率的估算是实际光能利用率的误差来源之一。(3)土壤呼吸受到多种因素影响,而笔者研究土壤呼吸模型对不同生态系统土壤类型、植被类型和土壤微生物均采用相同的模型参数,这可能影响土壤呼吸估算的准确性。

4.2 结论

基于 Landsat 8 遥感数据、ERA5 气候再分析数据和地表覆盖分类数据,通过光能利用率模型估算 2013—2020 年呼伦湖流域碳汇时空分布特征,并分析不同植被类型碳汇时空变化规律及气候影响因子。研究结论如下:

(1)时间尺度上,2013—2020 年呼伦湖流域植被年均碳汇总体呈减少趋势,碳汇减少区域面积占比为 58.29%。空间尺度上,呼伦湖流域植被碳循环以碳汇为主。

(2)不同植被类型表现为不同碳汇/源功能。农田和森林生态系统具有高固碳效率,呈高碳汇功能,草地具有较低固碳效率,呈低碳汇功能。

(3)呼伦湖流域不同生态系统对气候因子响应不同。农田生态系统碳汇受温度影响最大;森林生态系统碳汇受温度、降水量和辐射共同影响,但 3 种气候因子影响程度相近;草地生态系统碳汇主要受温度和降水量共同影响;湿地生态系统碳汇对气候因子的响应不明显。

参考文献:

- [1] 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 Feng, ZENG Yong-nian.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.]
- [2] 穆少杰,李建龙,周伟,等.2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J].生态学报,2013,33(12):3752—3764.[MU Shao-jie,LI Jian-long,ZHOU Wei,et al.Spatial-temporal Distribution of Net Primary Productivity and Its Relationship with Climate Factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J].Acta Ecologica Sinica,2013,33(12):3752—3764.]
- [3] ZHOU W, HUANG L, YANG H, et al. Interannual Variation in Grassland Net Ecosystem Productivity and Its Coupling Relation to Climatic Factors in China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(3): 1583—1597.
- [4] 潘竞虎,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 Jing-hu,WEN Yan.Estimation and Spatial-temporal Characteristics of Carbon Sink in the Arid Region of Northwest China[J].Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7718—7728.]
- [5] 许洁,陈惠玲,商沙沙,等.2000—2014 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应[J].干旱区地理,2020,43(3):592—601.[XU Jie,CHEN Hui-ling,SHANG Sha-sha,et al.Response of Net Primary Productivity of Tibetan Plateau Vegetation to Climate Change Based on CEVSA Model[J].Arid Land Geography,2020,43(3):592—601.]

- [6] 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 Ji-ping, LIU Chun-lan, HAO Hai-guang, *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.]
- [7] 戴尔阜,黄宇,吴卓,等.内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J].地理学报,2016,71(1):21-34.[DAI Er-fu, HUANG Yu, WU Zhuo, *et al.* Spatial-temporal Features of Carbon Source-sink and Its Relationship with Climate Factors in Inner Mongolia Grassland Ecosystem[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 21-34.]
- [8] 曹秉帅,徐德琳,窦华山,等.北方寒冷干旱地区内陆湖泊生态安全评价指标体系研究:以呼伦湖为例[J].生态学报,2021,41(8):2996-3006.[CAO Bing-shuai, XU De-lin, DOU Hua-shan, *et al.* Index System of Ecological Security of Inland Lakes in Cold Arid Region: A Case Study of Hulun Lake, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(8): 2996-3006.]
- [9] 曹秉帅,单楠,顾羊羊,等.呼伦湖流域生态安全评价及时空分布格局变化趋势研究[J].环境科学研究,2021,34(4):801-811.[CAO Bing-shuai, SHAN Nan, GU Yang-yang, *et al.* Evaluation of Ecological Security in Hulun Lake Watershed and Its Spatio-temporal Distribution Trend[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(4): 801-811.]
- [10] PHAN T N, KUCH V, LEHNERT L W. Land Cover Classification Using Google Earth Engine and Random Forest Classifier: The Role of Image Composition[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2411.
- [11] 张戈丽,徐兴良,周才平,等.近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J].地理学报,2011,66(1):47-58.[ZHANG Ge-li, XU Xing-liang, ZHOU Cai-ping, *et al.* Responses of Vegetation Changes to Climatic Variations in Hulun Buir Grassland in Past 30 Years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 47-58.]
- [12] GONG P, LIU H, ZHANG M N, *et al.* Stable Classification with Limited Sample: Transferring a 30-m Resolution Sample Set Collected in 2015 to Mapping 10-m Resolution Global Land Cover in 2017[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373.
- [13] 朱文泉,潘耀忠,龙中华,等.基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算:以中国内蒙古为例[J].遥感学报,2005,9(3):300-307.[ZHU Wen-quan, PAN Yao-zhong, LONG Zhong-hua, *et al.* Estimating Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation Based on GIS and RS: A Case Study in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 300-307.]
- [14] 朱文泉,陈云浩,潘耀忠,等.基于 GIS 和 RS 的中国植被光利用率估算[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):694-698,714.[ZHU Wen-quan, CHEN Yun-hao, PAN Yao-zhong, *et al.* Estimation of Light Utilization Efficiency of Vegetation in China Based on GIS and RS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(8): 694-698, 714.]
- [15] 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.
- [16] BOND-LAMBERTY B, WANG C K, GOWER S T. A Global Relationship between the Heterotrophic and Autotrophic Components of Soil Respiration? [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [17] RAICH J W, POTTER C S, BHAGAWATI D. Interannual Variability in Global Soil Respiration, 1980-94[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 800-812.
- [18] 龙慧灵,李晓兵,王宏,等.内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系[J].生态学报,2010,30(5):1367-1378.[LONG Hui-ling, LI Xiao-bing, WANG Hong, *et al.* Net Primary Productivity (NPP) of Grassland Ecosystem and Its Relationship with Climate in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1367-1378.]
- [19] 牛建明.内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究[J].应用生态学报,2000,11(1):48-53.[NIU Jian-ming. Relationship between Main Vegetation Types and Climatic Factors in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1): 48-53.]
- [20] 李刚,周磊,王道龙,等.内蒙古草地 NPP 变化及其对气候的响应[J].生态环境,2008,17(5):1948-1955.[LI Gang, ZHOU Lei, WANG Dao-long, *et al.* Variation of Net Primary Productivity of Grassland and Its Response to Climate in Inner Mongolia[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 1948-1955.]
- [21] 张学珍,戴君虎,葛全胜.1982—2006 年中国东部春季植被变化的区域差异[J].地理学报,2012,67(1):53-61.[ZHANG Xue-zhen, DAI Jun-hu, GE Quan-sheng. Spatial Differences of Changes in Spring Vegetation Activities across Eastern China during 1982-2006[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 53-61.]
- [22] 高德新,王帅,李琰,等.植被光能利用率:模型及其不确定性[J].生态学报,2021,41(14):5507-5516.[GAO De-xin, WANG Shuai, LI Yan, *et al.* Light Use Efficiency of Vegetation: Model and Uncertainty [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5507-5516.]
- [23] FEI X H, SONG Q H, ZHANG Y P, *et al.* Patterns and Controls of Light Use Efficiency in Four Contrasting Forest Ecosystems in Yunnan, Southwest China[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(2): 293-311.
- [24] BALZAROLO M, VALDAMERI N, FU Y H, *et al.* Different Determinants of Radiation Use Efficiency in Cold and Temperate Forests [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, 28(11): 1649-1667.
- [25] WANG H B, LI X, MA M G, *et al.* Improving Estimation of Gross Primary Production in Dryland Ecosystems by a Model-data Fusion Approach[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 225.

作者简介: 李朝晖(1995—),男,江西上饶人,硕士,主要研究方向为植被遥感、全球碳循环与气候变化。E-mail: lizhao2015@gmail.com

(责任编辑:王昌群)