

# 内蒙古自治区植被碳利用效率时空动态 及其与水热因子的关系

皇彦<sup>1</sup>, 宋海清<sup>2</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 胡琦<sup>3</sup>

(1. 乌兰察布市气象局, 内蒙古 乌兰察布 012000; 2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** [目的] 探讨内蒙古植被碳利用效率(CUE)动态变化及其与水热因子的关系, 为评估该地区植被碳汇能力提供科学依据。[方法] 基于 MOD17A2H 数据, 采用趋势分析、Hurst 指数、相关性分析等方法, 研究 2000—2022 年内蒙古生长季植被 CUE 时空动态及水热因子的影响作用。[结果] ① 2000—2022 年内蒙古生长季植被 CUE 显著增加( $p < 0.05$ ), 增长率为 0.012/10 a; 各重点生态功能区植被 CUE 增速由大到小为: 大小兴安岭 > 呼伦贝尔 > 浑善达克 > 科尔沁 > 阴山北麓。② 内蒙古生长季植被 CUE 呈西高东低的空间分布特征, 多年平均值为 0.60; 各重点生态功能区中, 浑善达克植被 CUE 最高, 科尔沁植被 CUE 最低。③ 研究区 83.53% 的区域生长季植被 CUE 呈增加趋势, 且变化稳定; 未来 72.14% 的区域生长季植被 CUE 将趋于下降, 各重点生态功能区植被 CUE 呈减少趋势的面积比例均高于呈增加趋势。④ 总体上, 内蒙古生长季植被 CUE 与同期平均气温呈负相关, 与累计降水量和平均土壤湿度呈正相关, 且与累计降水量的相关性更强; 科尔沁生长季植被 CUE 与同期平均气温的相关性强于累计降水量和平均土壤湿度。[结论] 2000—2022 年, 内蒙古植被固碳能力明显提升, 未来将趋于减弱, 降水是影响植被 CUE 变化的主要因素, 但科尔沁生态功能区植被 CUE 变化主要受气温控制。

**关键词:** 碳利用效率(CUE); 时空动态; 水热因子; 内蒙古自治区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)05-0358-11

**中图分类号:** P49, Q148

**文献参数:** 皇彦, 宋海清, 吴昊, 等. 内蒙古自治区植被碳利用效率时空动态及其与水热因子的关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 358-368. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.038; Huang Yan, Song Haiqing, Wu Hao, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation carbon use efficiency and its relationship with hydrothermal factors in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 358-368.

## Spatiotemporal Dynamics of Vegetation Carbon Use Efficiency and Its Relationship with Hydrothermal Factors in Inner Mongolia Autonomous Region

Huang Yan<sup>1</sup>, Song Haiqing<sup>2</sup>, Wu Hao<sup>1</sup>, Li Min<sup>1</sup>, Hu Qi<sup>3</sup>

(1. Ulanqab Meteorological Bureau, Ulanqab, Inner Mongolia 012000,

China; 2. Ecological and Agricultural Meteorology Center of Inner Mongolia

Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China; 3. College of

Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamic changes in vegetation carbon use efficiency (CUE) and its relationship with hydrothermal factors in the Inner Mongolia Autonomous Region was investigated to provide a scientific basis for evaluating vegetation carbon sequestration capacity. [Methods] Vegetation CUE was calculated

收稿日期: 2024-05-04

修回日期: 2024-08-19

**资助项目:** 中国气象局气象能力提升联合研究专项“基于智能网格和陆气耦合模式的内蒙—东北土壤水监测预报技术”(23NLTSQ008); 内蒙古自治区自然科学基金项目“基于多源雪深数据和机器学习的锡林郭勒草原雪深重建(2023QN05021)”; 内蒙古自治区气象局科技创新项目“内蒙古植被碳利用效率动态及驱动力研究”(nmqkxjcx202423)

**第一作者:** 皇彦(1989—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为应用气象与气象服务。Email: yan304@163.com。

**通信作者:** 宋海清(1988—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 博士, 高级工程师, 主要从事资料同化与数值模拟研究。Email: haiqingsong@imau.edu.cn。

using MOD17A2H data. Trend analysis, Hurst index, and correlation analysis were employed to investigate the spatiotemporal dynamics of vegetation CUE from 2000 to 2022 and the influence of hydrothermal factors on vegetation CUE. [Results] ① During 2000—2022, vegetation CUE increased significantly, with a growth rate of 0.012 per decade ( $p < 0.05$ ). The CUE values of key ecological functional areas in Inner Mongolia followed this order: Daxinganling and Xiaoxinganling Mountains > Hulun Buir > Hunshandake > Khorchin > Northern Yinshan. ② The spatial distribution of vegetation CUE in Inner Mongolia was higher in the west and lower in the east during the growing season, with an average annual value of 0.60. Among the key ecological functional areas, the highest vegetation CUE was observed in Hunshandake, while the lowest was in Khorchin. ③ Vegetation CUE exhibited an increasing trend in 83.53% of the study area, and this trend remained constant during the growing season. However, 72.14% of the study area would experience a decreasing trend in vegetation CUE in the future, with a higher proportion of key ecological functional areas showing a declining trend compared to those with an increasing trend. ④ Overall, vegetation CUE was negatively correlated with average temperature and positively correlated with cumulative precipitation and average soil moisture, with a stronger correlation observed with cumulative precipitation during the growing season. In contrast, vegetation CUE had a stronger correlation with average temperature than with cumulative precipitation and average soil moisture in Khorchin. [Conclusion] The carbon sequestration capacity of vegetation in Inner Mongolia increased significantly from 2000 to 2022 but would decline in the future. Precipitation was the main factor affecting changes in vegetation CUE in key ecological functional areas, while temperature was the dominant influencing factor in Khorchin.

**Keywords:** carbon use efficiency; spatial and temporal variations; hydrothermal factors; Inner Mongolia Autonomous Region

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第6次评估报告指出,以 $\text{CO}_2$ 为代表的温室气体浓度剧增,已成为全球气候变暖的关键原因<sup>[1]</sup>。因此,当前亟须对生态系统的碳循环过程及固碳能力进行深入研究。植被作为陆地生态系统的主要组成部分,在调节气候和碳循环方面具有重要作用。植被碳利用效率(carbon use efficiency, CUE)被定义为植被净初级生产力(NPP)与总初级生产力(GPP)的比值<sup>[2]</sup>,是表征陆地生态系统碳循环的关键指标<sup>[3]</sup>,其值越大表明植被的固碳潜力越大,碳同化能力越强<sup>[4]</sup>。研究植被 CUE 能够为评估生态系统碳汇能力提供科学依据,对于区域乃至全球陆地生态系统碳平衡具有重要意义。

国内外诸多碳循环学者开展了大量关于陆地生态系统植被 CUE 的研究工作。早期的研究认为,在长时间内光合作用与呼吸作用的总量相对恒定,因此在多数植被生产力模型中将 CUE 作为一个恒定值<sup>[5]</sup>。然而,随着研究的不断深入,越来越多的数据表明,植被 CUE 对环境变化的敏感性高,具有较大的变异性,CUE 被认定为恒定值受到许多研究者的质疑<sup>[6]</sup>。近年来,一些学者基于遥感数据对植被 CUE 进行了研究,并取得了卓越的成绩。时空动态方面,既有对过去几十年植被 CUE 变化规律的分

析<sup>[7-8]</sup>,也有对未来一段时期植被 CUE 变化趋势的预测<sup>[9]</sup>;关于植被 CUE 空间变化的结果呈现多样化,驱动因子也不一致<sup>[8,10-11]</sup>。不同植被类型 CUE 表现方面,已有研究发现植被 CUE 大小不仅与土地覆盖类型相关,同时也随着区域变化而变化。例如,粤港澳大湾区农田的 CUE 高于森林和草地<sup>[12]</sup>;而鄱阳湖流域草地 CUE 最高,农田其次,林地 CUE 最低<sup>[13]</sup>。气候影响方面,研究表明植被 CUE 对气候变化较为敏感<sup>[11]</sup>。在全球尺度,降水增加有助于 CUE 上升,气温的升高导致 CUE 降低<sup>[6]</sup>;在中国区域,多数研究表明植被 CUE 与气温和降水的关系与全球一致<sup>[7-8,13]</sup>,认为降水是影响植被 CUE 变化的主要因素<sup>[7-8,10]</sup>,但在青海湖流域植被 CUE 与气温和降水均呈负反馈,气温对植被 CUE 的影响更显著<sup>[4]</sup>。人类活动对植被 CUE 的影响研究相对较少,以灌溉、施肥、禁牧管理等方面的干预研究为主<sup>[14]</sup>。鉴于植被 CUE 变化受自然因素和人类活动的共同影响,部分学者进一步探讨了二者的作用区分,并量化了自然因素和人类活动对植被 CUE 的贡献<sup>[8,14]</sup>。

内蒙古自治区地处干旱半干旱区,生态系统非常脆弱,在气候和人类活动的共同作用下,出现植被退化加剧、土地沙化严重等生态环境问题。自 2010 年国家重点生态功能区建立以来,内蒙古多个旗县和集

团所属林业局被纳入名单。虽然前期的生态建设成果显著,但由于基础薄弱,水土流失、风蚀沙化等现象依然存在。因此,研究内蒙古植被 CUE 有助于认识和理解区域植被生态系统碳汇功能,同时对合理调控植被生态系统碳循环、实施生态保护工程及促进生态环境健康发展具有重要的意义。目前,针对内蒙古地区生态系统植被 CUE 的研究比较少,其变化特征分析得不够细致,尤其是以区域内国家重点生态功能区为单元的研究尚且缺乏;同时,以往的相关研究只考虑了气温和降水,土壤湿度作为影响植被生长的重要因素,其对植被 CUE 的影响并没有考虑在内。综上,在内蒙古地区,植被 CUE 时空特征及其与水热因子的关系还不明确。为此,本研究利用 2000—2022 年 MODIS 遥感影像和气象数据,分析内蒙古及其区内 5 个国家重点生态功能区生长季植被 CUE 时空动态,并在此基础上探讨植被 CUE 与同期气温、降水和土壤湿度的关系,以明确内蒙古植被 CUE 时空动态特征及水热因子的影响作用,为评估该地区植被碳汇能力提供数据支撑和科学参考。

## 1 研究区概况

内蒙古自治区位于东经  $97^{\circ}12'—126^{\circ}04'E$ ,北纬  $37^{\circ}24'—53^{\circ}02'N$ ,是中国北部重要的生态安全屏障。其地域广袤,东西长约 2 400 km,南北跨度约 1 700 km,地形整体以高原为主,大部分地区海拔 1 000 m 以上<sup>[15]</sup>。气候属温带大陆性季风气候,年均气温  $-4.65\sim 9.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年降水量在  $100\sim 500\text{ mm}$ <sup>[16]</sup>。阴山北麓草原生态功能区、浑善达克沙漠化防治生态功能区、科尔沁草原生态功能区、呼伦贝尔草原草甸生态功能区、大小兴安岭森林生态功能区 5 个国家重点生态功能区,以下分别简称阴山北麓、浑善达克、科尔沁、呼伦贝尔、大小兴安岭,共涉及内蒙古境内 8 个盟市,35 个旗县,面积约  $55.37\text{ km}^2$ ,占全区面积的  $48.42\%$ <sup>[17]</sup>。这些生态功能区承担了防风固沙和水源涵养的重要生态功能,关系较大范围区域乃至全国的生态安全。

## 2 数据及方法

### 2.1 数据来源及预处理

(1) NPP 和 GPP 数据。来源于美国国家航空航天局的 MOD17A2H 产品,获取网址为 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>,时空分辨率为 8 d,500 m。利用 MODIS Reprojection Tools (MRT) 进行拼接、投影、格式转化, ArcGIS 中累加、裁剪后得到 2000—2022 年内蒙古生长季(5—9 月)

植被 NPP 和 GPP 数据,用于计算植被 CUE。

(2) 气温、降水数据。来源于彭守璋等<sup>[18]</sup>研发的 中国区域逐月气温和降水数据,空间分辨率为 1 km,时间段为 1901—2023 年。该数据集根据 CRU 发布的全球  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  气候数据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集,通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成,并使用中国 1951—2016 年的 496 个独立气象站观测数据进行评估验证,结果可信,精度可靠<sup>[18]</sup>。本研究选取 2000—2022 年 5—9 月的气温、降水数据。

(3) 0—20 cm 土壤湿度数据。来源于内蒙古自治区气象局,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为  $0.03^{\circ}\times 0.03^{\circ}$ 。该数据由 CMFD 资料驱动改进土壤质地和陆地覆盖等下垫面的 NCAR 陆面过程模式 CLM 3.5 获得,质量优于 CLDAS 产品和 GLDAS 产品<sup>[19]</sup>。本研究采用 2000—2022 年 5—9 月的土壤湿度数据,将土壤湿度逐日数据计算平均值得到逐月数据。

为确保所有数据能够在空间上匹配,利用 ArcGIS 将 CUE 和土壤湿度数据进行重投影、重采样,获取与气温、降水数据分辨率大小一致的栅格数据,用于空间相关性分析。

### 2.2 研究方法

2.2.1 植被 CUE 估算 植被碳利用效率(CUE)采用净初级生产力(NPP)与总初级生产力(GPP)比值表示<sup>[2]</sup>,计算公式为:

$$\text{CUE} = \frac{\text{NPP}}{\text{GPP}} \quad (1)$$

式中:CUE 表示植被碳利用效率(无量纲);NPP 表示植被净初级生产力( $\text{g}/\text{m}^2$ );GPP 表示植被总初级生产力( $\text{g}/\text{m}^2$ )。

2.2.2 年际变化分析 采用一元线性回归方程<sup>[10]</sup>分析生长季植被 CUE 及同期平均气温、累计降水量、平均土壤湿度的年际变化趋势,并采用  $t$  检验方法进行显著性检验<sup>[20]</sup>。

2.2.3 趋势分析与检验 Sen 分析方法和 M-K 检验相结合能够有效减少数据异常值对结果的干扰,采用此方法分析生长季植被 CUE 及同期平均气温、累计降水量、平均土壤湿度的空间变化趋势并进行显著性检验<sup>[12]</sup>,Sen 趋势计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (2)$$

式中:以 CUE 为例(下同); $\beta$  为 CUE 变化趋势; $x_j$ ,  $x_i$  分别为第  $j$  年和第  $i$  年生长季的 CUE 像元值。当  $\beta < 0$  时,表示时 CUE 呈减少趋势;当  $\beta > 0$  时,表示 CUE 呈上升趋势。M-K 显著性检验公式<sup>[12]</sup>为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{其中, } \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中:  $S$  为检验统计量;  $n$  为 CUE 样本总数;  $x_j, x_i$  分别为第  $j$  年和第  $i$  年生长季的 CUE 像元值;  $Z$  为标准化后的检验统计量;  $\text{var}(S)$  为方差。

当  $|Z| > Z_{(1-\alpha)/2}$  时, 表示 CUE 存在显著的变化趋势。结合  $\beta$  值和  $|Z|$  值, 将 CUE 变化趋势分为 6 个等级: 0.01 置信水平下, 极显著减少 ( $\beta < 0, |Z| > 2.58$ ), 极显著增加 ( $\beta \geq 0, |Z| > 2.58$ ); 0.05 置信水平下, 显著减少 ( $\beta < 0, |Z| > 1.96$ ), 显著增加 ( $\beta \geq 0, |Z| > 1.96$ ); 不显著减少 ( $\beta < 0, |Z| \leq 1.96$ ) 和不显著增加 ( $\beta \geq 0, |Z| \leq 1.96$ )。

**2.2.4 稳定性分析** 变异系数可以反映一组数据的相对波动程度, 采用变异系数 ( $C_v$ ) 来分析生长季植被 CUE 的稳定性<sup>[21]</sup>, 计算公式为:

$$C_v = \frac{\sigma_x}{x} \quad (7)$$

式中:  $C_v$  为变异系数;  $\sigma_x$  为 CUE 标准差;  $\bar{x}$  为 23 a 间生长季 CUE 平均值。  $C_v$  值越小, 表示 CUE 随时间波动越小, 稳定性越好; 反之 CUE 波动越大, 相对越不稳定。将结果划分为低波动 ( $0 < C_v \leq 0.1$ )、较低波动 ( $0.1 < C_v \leq 0.15$ )、较高波动 ( $0.15 < C_v \leq 0.2$ ) 和高波动 ( $C_v > 0.2$ ) 共 4 个等级<sup>[22]</sup>。

**2.2.5 Hurst 指数** Hurst 指数可以定量判断时间序列信息的长期依赖性<sup>[23]</sup>, 本研究采用基于重标极差 ( $H/S$ ) 分析的 Hurst 指数预测生长季 CUE 未来变化趋势, 具体公式参照文献[12]。Hurst 值大小分 3 类: 若  $0 < H < 0.5$ , 表明 CUE 序列具有反持续性, 未来趋势与过去相反; 若  $H = 0.5$ , 表明 CUE 序列完全独立, 未来趋势与过去无关; 若  $H > 0.5$ , 表明 CUE 序列具有持续性, 未来趋势与过去一致。

**2.2.6 相关性分析** 采用相关系数分析生长季植被 CUE 与同期平均气温、累计降水量、平均土壤湿度在空间上的相关性<sup>[24]</sup>, 计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中:  $r$  为相关系数;  $x_i$  为第  $i$  年生长季的 CUE 值;  $y_i$  为第  $i$  年同期的平均气温或累计降水量或平均土壤湿度数据;  $\bar{x}$  为 23 a 生长季的 CUE 平均值;  $\bar{y}$  为 23 a 生长季的气温或降水或土壤湿度平均值。  $r$  绝对值越高表示两者的关系越密切,  $r > 0$  时, 表示两者呈正相关, 反之呈负相关。

采用  $t$  检验方法检验两者相关性是否显著<sup>[10]</sup>, 结果划分为: 极显著正相关 ( $p < 0.01, r > 0$ )、显著正相关 ( $p < 0.05, r > 0$ )、不显著正相关 ( $p > 0.05, r > 0$ )、不显著负相关 ( $p > 0.05, r < 0$ )、显著负相关 ( $p < 0.05, r < 0$ )、极显著负相关 ( $p < 0.01, r < 0$ ) 共 6 种类型。以上数据统计方法中, 年际变化分析、植被 CUE 估算、趋势分析与检验、稳定性分析、Hurst 指数、相关性分析的算法采用 Matlab 编程实现, 空间分布图和统计图分别采用 ArcGIS 功能模块和 Excel 实现。

## 3 结果与分析

### 3.1 植被 CUE 的时空分布特征

2000—2022 年内蒙古生长季植被 CUE 呈显著增加 ( $p < 0.05$ ) 趋势, 增长率为 0.012/10 a。5 个国家重点生态功能区生长季植被 CUE 均呈现波动增加趋势, 增速由大到小依次为: 大小兴安岭 (0.02/10 a,  $R^2 = 0.251$ )、呼伦贝尔 (0.019/10 a,  $R^2 = 0.606$ )、浑善达克 (0.011/10 a,  $R^2 = 0.348$ )、科尔沁 (0.01/10 a,  $R^2 = 0.118$ )、阴山北麓 (0.006/10 a,  $R^2 = 0.144$ ); 其中, 大小兴安岭的变化趋势通过了 0.05 显著性水平检验, 呼伦贝尔和浑善达克的变化趋势通过了 0.01 显著性水平检验。内蒙古生长季植被 CUE 大体呈现西高东低的分布趋势, 空间异质性相对较小。CUE 值介于 0.60~0.75 的区域占 57.20%, 主要分布在内蒙古中西部大部分地区及东部的呼伦贝尔市西部; CUE 值介于 0.45~0.60 的区域占 42.21%, 主要分布在河套灌区一带及内蒙古东部大部分地区; CUE 值在 0.45 以下的区域所占比例很小 (图 1)。统计表明, 2000—2022 年内蒙古生长季植被 CUE 均值为 0.60; 各重点生态功能区生长季植被 CUE 均值依次为: 浑善达克 (0.641) > 阴山北麓 (0.638) > 呼伦贝尔 (0.629) > 大小兴安岭 (0.561) > 科尔沁 (0.559)。

内蒙古生长季植被 CUE 呈增加趋势 (83.53%) 的面积所占比例远高于呈减少趋势 (16.47%)



(图 2a),表明研究期内植被固碳能力不断提高。CUE 呈极显著和显著增加的区域占 41%,主要分布在锡林郭勒盟大部、赤峰市西部和东北部、通辽市北部及呼伦贝尔市西部;CUE 呈极显著和显著减少的区域仅占 2.55%,零散分布在呼和浩特市中部、通辽市西南部和大兴安岭北部等少数地区(图 2a)。各重点生态功能区生长季植被 CUE 均以增加趋势为主,其中呼伦贝尔呈极显著和显著增加的区域面积所占比例最大(80.22%),其次为浑善达克(67.83%),阴山北麓、科尔沁及大小兴安岭比例均在 50%以下(图 2b)。

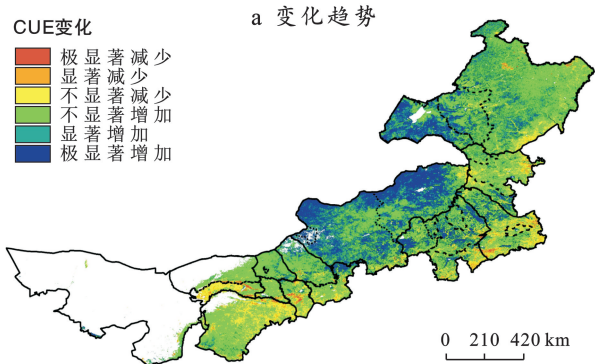


图 2 2000—2022 年内蒙古自治区生长季植被碳利用效率空间变化趋势及显著性统计  
Fig.2 Spatial variation and significance level of carbon use efficiency in Inner Mongolia Autonomous Region during growing season from 2000 to 2022

3.2 植被 CUE 的稳定性特征

2000—2022 年,内蒙古生长季植被 CUE 变化稳定,变异系数平均值为 0.04。由图 3 可以看出,具体来看,全区大部分地区以低波动为主,面积占 97.09%;较低波动区域占 2.61%,零散分布在呼伦贝尔市东南部、通辽市中部和河套灌区中部;较高波动

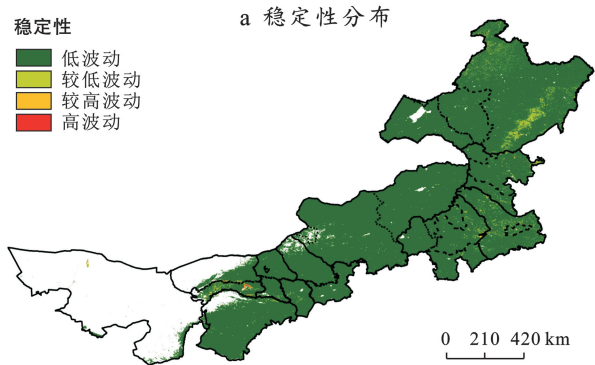


图 3 2000—2022 年内蒙古自治区生长季植被碳利用效率稳定性空间分布及稳定性统计  
Fig.3 Spatial distribution of carbon use efficiency stability and statistics in Inner Mongolia Autonomous Region during growing season from 2000 to 2022

3.3 植被 CUE 的可持续分析

2000—2022 年内蒙古生长季植被 CUE 的 Hurst

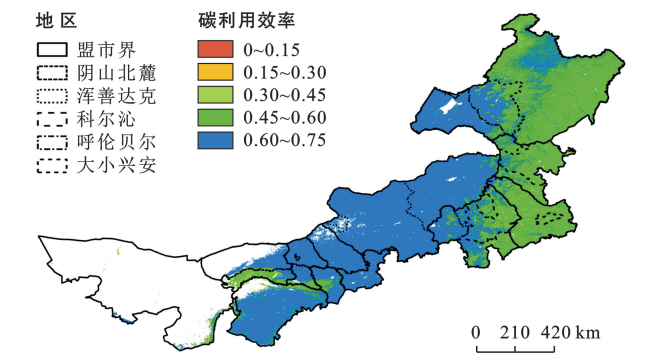
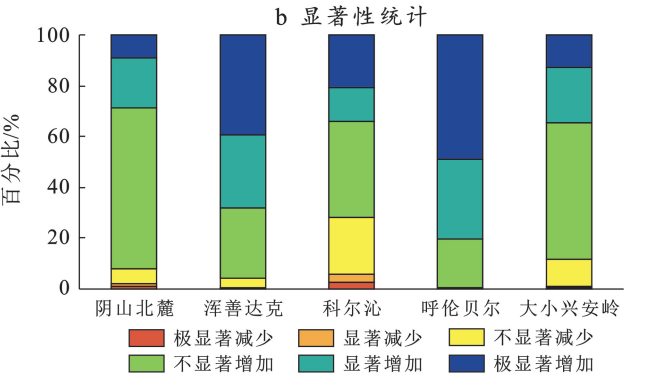
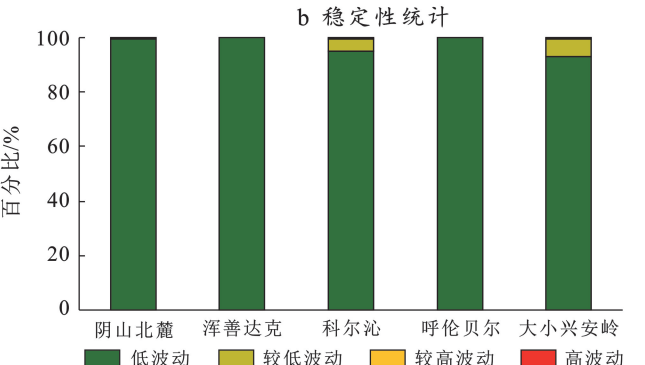


图 1 2000—2022 年内蒙古自治区生长季植被碳利用效率空间分布  
Fig.1 Spatial distribution of carbon use efficiency in Inner Mongolia Autonomous Region during growing season from 2000 to 2022



和高波动区域只占 0.30%(图 3a)。各重点生态功能区中,浑善达克植被 CUE 稳定性最好,低波动区域比例高达 99.99%;其次为呼伦贝尔和阴山北麓,低波动区域分别占 99.88%,99.27%;科尔沁和大小兴安岭低波动区域所占比例分别为和 95.13%和 92.89%(图 3b)。



指数均值为 0.43,表明具有较强的反持续性,即未来植被 CUE 总体呈下降趋势。Hurst 指数小于 0.5 的

区域面积占 80.17%，广泛分布于内蒙古西部、中部偏北和东部的呼伦贝尔市和兴安盟(图 4a)。将生长季植被 CUE 变化趋势与 Hurst 指数叠加耦合(图 4b,图 4c),未来植被 CUE 呈减少趋势的区域面积占 72.14%，持续减少仅占 4.22%，67.92%的区域以反持续增加(增加变为减少)为主，其中极显著和显著增加区域主

要分布在锡林郭勒盟及呼伦贝尔市西部。植被 CUE 未来呈增加趋势的区域面积占 27.86%，持续增加和反持续减少(减少变为增加)区域比例分别为 15.61%和 12.25%，其中持续极显著和显著增加区域主要分布在锡林郭勒盟南部和赤峰市北部，反持续极显著和显著减少布较为零散。

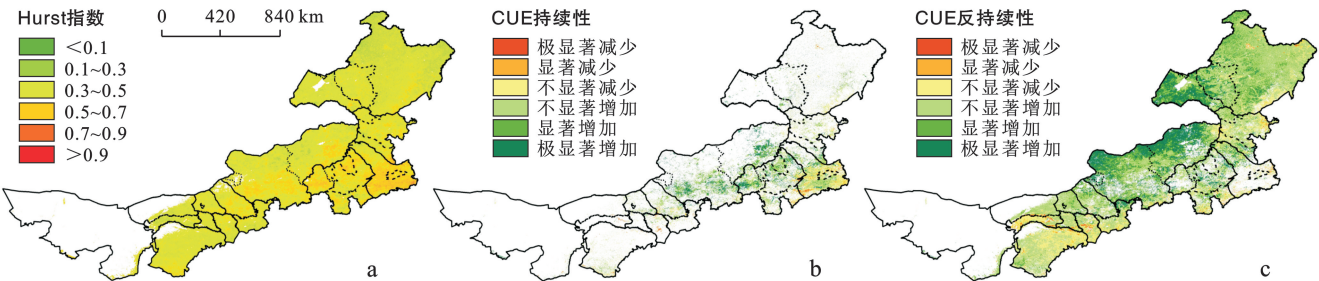


图 4 内蒙古自治区生长季植被碳利用效率的 Hurst 指数及未来变化空间分布  
Fig.4 Distribution of carbon use efficiency Hurst index and vegetation CUE change in future in Inner Mongolia Autonomous Region during growing season

5 个重点生态功能区生长季植被 CUE 未来呈减少趋势的面积比例均高于呈增加趋势，呼伦贝尔未来呈减少趋势面积比例高达 95.48%，阴山北麓、浑善达克、大小兴安岭未来呈减少趋势面积比例均超过了 70%，科尔沁未来呈减少趋势面积比例为 55.08% (表 1)。

表 1 内蒙古自治区生长季重点生态功能区植被碳利用效率未来变化趋势  
Table 1 Carbon use efficiency change trend in key ecological function area of Inner Mongolia Autonomous Region in future

变化趋势	比例/%				
	阴山北麓	浑善达克	科尔沁	呼伦贝尔	大小兴安岭
持续性增加	15.60	27.26	34.36	3.87	5.77
持续性减少	2.27	1.44	17.48	0.11	1.62
反持续性增加	76.17	68.74	37.60	95.37	82.72
反持续性减少	5.96	2.56	10.56	0.65	9.89

3.4 内蒙古地区水热因子时空变化特征

2000—2022 年内蒙古生长季平均气温整体呈不显著增加趋势( $p>0.05$ ),增速为 0.045  $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ; 累计降水量和平均土壤湿度整体呈显著增加趋势( $p<0.01$ ),增速分别为 47.33  $\text{mm}/10\text{ a}$ , 0.006  $\text{m}^3/[\text{m}^3 \cdot (10\text{ a})]$ 。各重点生态功能区生长季平均气温表现不同,阴山北麓、浑善达克和科尔沁呈增加趋势,其他重点生态功能区呈减少趋势,均未通过显著性检验;各重点生态功能区生长季的累计降水量和平均土壤湿度均呈增加趋势,其中科尔沁、呼伦贝尔、大小兴安岭显著增加( $p<0.05$ )(表 2)。

表 2 2000—2022 年内蒙古自治区生长季重点生态功能区水热因子变化趋势  
Table 2 Temporal trends of hydrothermal factors in key ecological function area of Inner Mongolia Autonomous Region during growing season from 2000 to 2022

重点生态功能区	变化趋势		
	平均气温 [ $^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ]	累计降水量 [ $\text{mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ]	平均土壤湿度 [ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ]
阴山北麓	0.135	21.453	0.003
浑善达克	0.079	27.453	0.003
科尔沁	0.024	79.647 **	0.01 **
呼伦贝尔	-0.012	35.569 *	0.012 **
大小兴安岭	-0.017	67.244 **	0.006 **

注: \*, \*\* 分别表示在  $p<0.05$  和  $p<0.01$  水平显著相关。

空间尺度上,70.32%的区域生长季平均气温呈增加趋势,其中极显著和显著增加的区域占 15.45%，集中分布在阿拉善盟中西部;29.68%的区域平均气温呈不显著减少趋势,主要分布在锡林郭勒盟西北部、兴安盟大部及呼伦贝尔市南部等地(图 5a)。生长季累计降水量变化趋势较为一致,99.56%的区域累计降水量增加,极显著和显著增加的区域占 43.77%，主要分布在内蒙古东部地区和锡林郭勒盟东部(图 5b)。生长季平均土壤湿度变化表现出较明显的空间差异,增加和减少的区域分别占 85.64%和 14.36%，极显著和显著增加的区域占 38.75%，主要分布在阿拉善盟中部偏西、通辽市中部、兴安盟大部和呼伦贝尔市南部等地;极显著和显著减少的区域仅占 14.36%，零散分布于锡林郭勒盟西南部、呼伦贝尔市中部偏北等地(图 5c)。各重点生态功能区中,

呼伦贝尔、大小兴安岭生长季平均气温以不显著减少为主,比例分别达 93.49%和 66.03%,其他重点生态功  
能区平均气温以增加趋势为主;5 个生态功能区生长季  
累计降水量和平均土壤湿度均以增加趋势为主(图 5)。

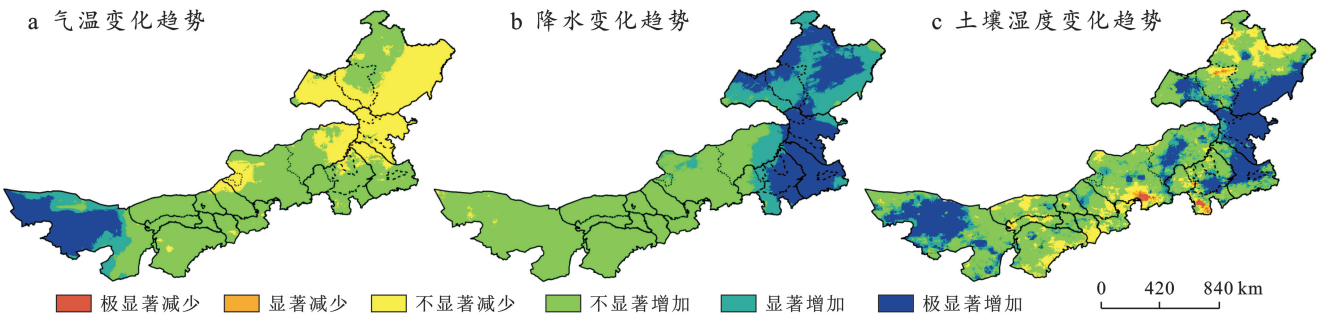


图 5 2000—2022 年内蒙古自治区生长季水热因子空间变化趋势

Fig.5 Spatial variation of hydrothermal factors in Inner Mongolia Autonomous Region during growing season from 2000 to 2022

3.5 内蒙古植被 CUE 与水热因子的关系

由图 6a—6c 可知,大部分地区生长季植被 CUE 与同期平均气温呈负相关,与累计降水量和平均土壤湿度呈正相关,面积比例分别为 91.90%,86.26%,71.47%。生长季植被 CUE 与同期平均气温呈极显著和显著负相关的区域占 21.43%,主要分布在锡林郭勒盟西部和大兴安岭以东;呈正相关的区域主要位于乌兰察布市中北部、锡林郭勒盟中部偏东、兴安盟西部及呼伦贝尔市中部偏西。生长季植被 CUE 与同期累计降水量呈极显著和显著正相关的区域占 29.50%,主要分布在巴彦淖尔市南部、包头市大部、呼伦贝尔市东部等地;呈极显著和显著负相关的区域集中分布在兴安盟部分地区。生长季植被 CUE 与同期平均土壤湿度呈极显著和显著正相关的区域比例不足 20%,主要位于大兴安岭以东部分地区;呈极显著和显著负相关的区域分布于呼伦贝尔市中部偏西、赤峰市北部等地区。各重点生态功能区中,科尔沁、大小兴安岭生长季植被 CUE 与同期平均气温呈极显著和显著负相关的区域比例最高均为 42.60%,其他生态功能区比例均在 11%以下;大小兴安岭生长季

植被 CUE 与同期累计降水量和平均土壤湿度呈极显著和显著正相关的区域比例最高,分别为 71.48%和 36.87%,其他生态功能区植被 CUE 与累计降水量和平均土壤湿度达到显著正相关的比例均不足 36%(图 7a—7b)。统计植被 CUE 与水热因子的平均相关系数(表 3),全区生长季植被 CUE 与同期平均气温、累计降水量和平均土壤湿度的相关系数分别为 -0.25,0.27,0.12;可见生长季植被 CUE 与累计降水量的相关系数更大;各重点生态功能区生长季植被 CUE 与水热因子的相关系数存在差异,其中大小兴安岭生长季植被 CUE 与同期平均气温、累计降水量和平均土壤湿度的相关系数均高于其他生态功能区,相关系数分别为 -0.36,0.50 和 0.28,科尔沁生长季植被 CUE 与同期平均气温的相关系数高于累计降水量和平均土壤湿度,相关系数分别为 -0.35,0.17,0.13。综上,由显著相关分布及相关系数统计可知,总体上内蒙古植被 CUE 受降水影响更为明显,气温其次,土壤湿度影响程度最小。科尔沁生态功能区植被 CUE 变化主要受气温控制,其他 4 个生态功能区则与全区总体表现一致。

表 3 2000—2022 年内蒙古自治区生长季植被碳利用效率与水热因子的平均相关系数  
Table 3 Correlation coefficients of carbon use efficiency with hydrothermal factors in Inner Mongolia Autonomous Region during growing season from 2000 to 2022

水热因子	生长季 CUE					
	内蒙古	阴山北麓	浑善达克	科尔沁	呼伦贝尔	大小兴安岭
平均气温	-0.25	-0.15	-0.23	-0.35	-0.23	-0.36
累计降水量	0.27	0.30	0.27	0.17	0.24	0.50
平均土壤湿度	0.12	0.11	-0.07	0.13	0.01	0.28

4 讨论

本研究发现内蒙古生长季植被 CUE 多年均值为

0.60,各重点生态功能区生长季植被 CUE 多年均值介于 0.559~0.641,高于中国平均水平(0.391)<sup>[25]</sup>,说明研究区植被固碳水平较高。同时,研究发现



2000—2022 年内蒙古生长季植被 CUE 增加范围广、趋势显著。这一结果与尹超华等<sup>[8]</sup>的研究结论相一致,表明研究期内内蒙古植被固碳能力明显提升。植被固碳能力参与了全球气候变化,固碳能力增强不仅有助于降低大气中的碳浓度、减少温室气体排放,还有助于防止干旱、沙尘暴等极端气天气现象发生,进而达到保护环境的效果。

在本研究中,各重点生态功能区生长季植被 CUE 也呈增加趋势,其中大小兴安岭、呼伦贝尔和浑善达克显著增加( $p<0.05$ )。大小兴安岭功能区森林覆盖率高,承担了水源涵养的重要生态功能;其他生

态功能区土地沙化严重,承担了防风固沙的艰巨任务。为发挥重点生态功能区保障国家生态安全的重要功能,近些年国家在这些生态功能区大力推进实施天然林保护、植树造林、退牧还草等生态工程项目<sup>[26-27]</sup>,生态质量提升的同时对植被固碳能力增强也起到了促进作用。另外,大小兴安岭和呼伦贝尔生态功能区研究期内降水和土壤湿度显著增加( $p<0.05$ ),水热条件匹配良好(表 2,图 5),这也有助于植被 CUE 增加。值得一提的是,重点生态功能区内植被 CUE 增加对涵养水源、防风固沙功能的发挥也会产生积极的正面反馈作用。

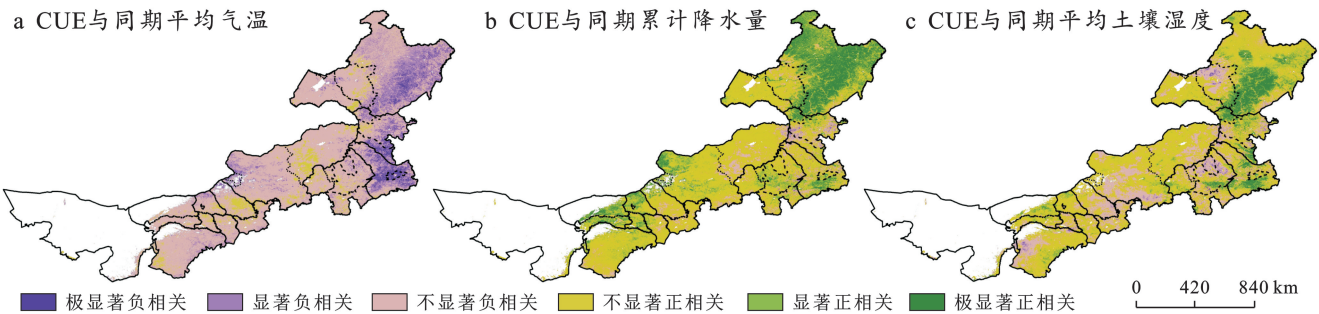


图 6 2000—2022 年内蒙古自治区生长季植被碳利用效率与水热因子的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between vegetation carbon use efficiency and hydrothermal factors in Inner Mongolia Autonomous Region during growing season from 2000 to 2022

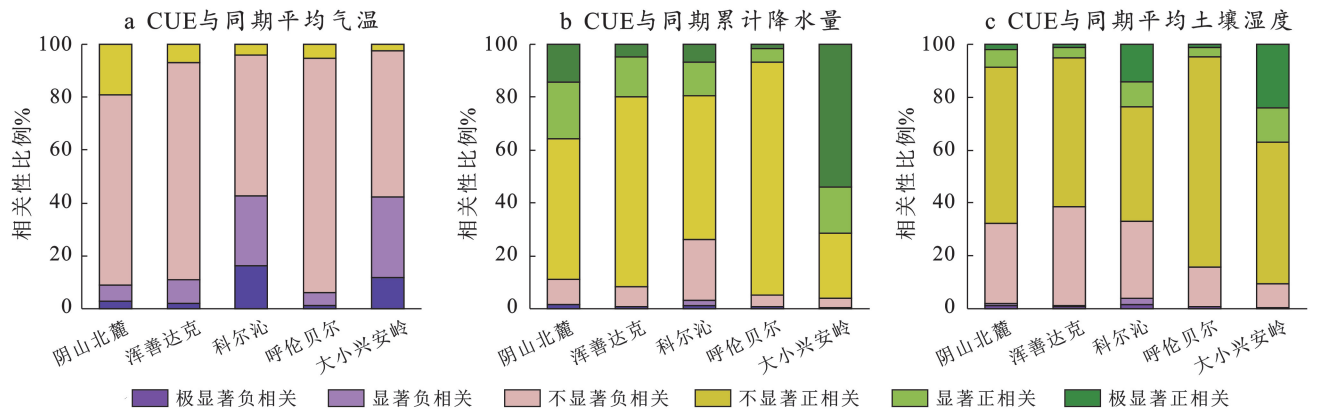


图 7 2000—2022 年内蒙古自治区生长季植被 CUE 与水热因子的相关性

Fig.7 Spatial distribution of correlation coefficients between CUE and hydrothermal factors in Inner Mongolia Autonomous Region during growing season from 2000 to 2022

植被 CUE 代表了大气—植物—土壤—土壤生物等因素的交互作用<sup>[28]</sup>,其变化较为复杂。水热条件的变化可以调节植被的光合作用和自养呼吸速率<sup>[29]</sup>,导致植被 CUE 发生变化。在本研究中,2000—2022 年内蒙古大部分地区生长季植被 CUE 与同期平均气温呈负相关,而与累计降水量和平均土壤湿度呈正相关。生长季植被 CUE 与同期水热因子的相关系数及显著相关分布,反映了降水是影响内蒙古植被 CUE 变化的主要影响因素,气温为次要因素,

土壤湿度影响程度最小。各重点生态功能区生长季植被 CUE 与水热因子的相关关系与全区一致,但相关性大小表现不同。与其他重点生态功能区相比,大小兴安岭生长季植被 CUE 与同期平均气温、累计降水量及平均土壤湿度的相关系数更大、显著相关分布范围更广,表明其与水热因子的相关性更强,也从侧面反映了其对水热因子的敏感性更高。这与大小兴安岭生长季植被 CUE 的稳定性低于其他重点生态功能区恰好相吻合。此外,科尔沁生长季植被 CUE 与



同期平均气温的相关性强于累计降水量和平均土壤湿度,说明科尔沁植被 CUE 变化主要受气温控制。研究期间,此重点生态功能区水分条件充沛、气温升高(表 2,图 5),气温越高对植被 CUE 的抑制作用越强,进而会造成植被 CUE 的增加速度减缓,增速相对较慢。其他重点生态功能区则与全区表现一致,植被 CUE 变化主要受降水控制。造成这种差异的主要原因,一方面与各重点生态功能区内生物群落自身的生物和生态学特性差异不同有关<sup>[29]</sup>,另一方面可能是重点生态功能区受人为因素扰动较大,对植被 CUE 与水热因子的相关性有所混淆<sup>[4]</sup>。

Hurst 指数表明,未来内蒙古生长季植被 CUE 总体呈现下降趋势,这一现象与 Du Lingtong 等<sup>[30]</sup>对干旱半干旱地区植被 CUE 的未来趋势预估一致。各重点生态功能区生长季植被 CUE 呈下降趋势的面积比例均在 1/2 以上,其中呼伦贝尔植被 CUE 呈下降趋势的面积比例高达 95.48%。仅考虑气候因素,未来一段时期内蒙古年平均气温显著增加<sup>[31]</sup>,气候变暖会延长植被生长季<sup>[32]</sup>,光合作用时间增加的同时自养呼吸也增强,故而植被 CUE 将下降。这一现象将对维护生态安全与稳定产生不利影响。因此,未来需加强重点生态功能区的环境保护与管理,持续采取植被恢复、禁止商业性采伐、围栏禁牧等有效措施,以增强生态服务功能。

本研究只探讨了内蒙古地区生长季植被 CUE 与同期平均气温、累计降水量、平均土壤湿度的关系,在全球变暖日益加剧的背景下,强降水、干旱等极端气候事件不断增加<sup>[33]</sup>,探究极端气候变化对植被 CUE 的影响也变得尤为重要。其次,水热因子对植被生长的影响作用通常具有滞后性<sup>[34]</sup>,这可能会影响 CUE 值,但本研究并没有考虑水热因子造成的滞后效应。以上局限性可能会影响对植被生态系统 CUE 的全面理解,今后有待进一步探究。

## 5 结 论

(1) 近 23 a 内蒙古全区及 5 个重点生态功能区生长季植被 CUE 均呈增加趋势,固碳能力有所提升。内蒙古生长季植被 CUE 整体呈西高东低的空间分布特征,浑善达克植被 CUE 最高,科尔沁植被 CUE 最低。

(2) 内蒙古全区及 5 个重点生态功能区生长季植被 CUE 呈增加趋势的面积比例均高于呈减少趋势,植被 CUE 变化稳定。未来内蒙古生长季植被 CUE 将呈下降趋势,固碳能力减弱。

(3) 内蒙古大部分地区生长季植被 CUE 与同期平均气温呈负相关,与累计降水量和平均土壤湿度呈

正相关。总体上,降水是影响内蒙古植被 CUE 变化的主要因素,气温其次,土壤湿度影响程度最小。科尔沁植被 CUE 变化主要受气温控制,而其他 4 个重点生态功能区与全区总体一致。

## 参考文献(References)

- [1] 王卓妮,袁佳双,庞博,等. IPCC AR6 WGⅢ 报告减缓主要结论、亮点和启示[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 531-537.  
Wang Zhuoni, Yuan Jiashuang, Pang Bo, et al. The interpretation and highlights on mitigation of climate change in IPCC AR6 WGⅢ report [J]. Climate Change Research, 2022, 18(5): 531-537.
- [2] Dillaway D N, Kruger E L. Trends in seedling growth and carbon-use efficiency vary among broadleaf tree species along a latitudinal transect in Eastern North America [J]. Global Change Biology, 2014, 20(3): 908-922.
- [3] 吴建平,王思敏,蔡慕天,等. 植物与微生物碳利用效率及影响因子研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7771-7779.  
Wu Jianping, Wang Simin, Cai Mutian, et al. Review on carbon use efficiency of plants and microbes and its influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7771-7779.
- [4] 兰焱,曹生奎,曹广超,等. 青海湖流域植被碳利用效率时空动态研究[J]. 生态科学, 2020, 39(4): 156-166.  
Lan Yao, Cao Shengkui, Cao Guangchao, et al. Temporal and spatial dynamics of vegetation carbon use efficiency in Qinghai Lake basin [J]. Ecological Science, 2020, 39(4): 156-166.
- [5] Gifford R M. Plant respiration in productivity models: Conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbon-cycle research [J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(2): 171-186.
- [6] Zhang Yangjian, Xu Ming, Chen Hua, et al. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: Effects of ecosystem type, geographical location and climate [J]. Global Ecology and Biogeography, 2009, 18(3): 280-290.
- [7] 刘洋洋,王倩,杨悦,等. 2000—2013 年中国植被碳利用效率(CUE)时空变化及其与气象因素的关系[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 278-286.  
Liu Yangyang, Wang Qian, Yang Yue, et al. Spatio-temporal dynamic of vegetation carbon use efficiency and its relationship with climate factors in China during the period 2000—2013 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 278-286.
- [8] 尹超华,罗敏,孟凡浩,等. 蒙古高原植被碳水利用效率时空变化特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2022, 41(6):

- 1079-1089.
- Yin Chaohua, Luo Min, Meng Fanhao, et al. The spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation carbon and water use efficiency in the Mongolian Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(6):1079-1089.
- [9] 袁旻舒,李明旭,程红岩,等.基于CMIP5模型结果的中国陆地生态系统未来碳利用效率变化趋势分析[J].中国科学院大学学报,2017,34(4):452-461.
- Yuan Minshu, Li Mingxu, Cheng Hongyan, et al. Future trends in carbon use efficiency for Chinese terrestrial ecosystem based on CMIP5 model results [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34 (4):452-461.
- [10] 郑飞鸽,易桂花,张廷斌,等.三江源植被碳利用率动态变化及其对气候响应[J].中国环境科学,2020,40(1):401-413.
- Zheng Feige, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. Study on spatio-temporal dynamics of vegetation carbon use efficiency and its response to climate factors in Three-River headwaters region [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):401-413.
- [11] Yang Yue, Wang Zhaoqi, Li Jianlong, et al. Assessing the spatiotemporal dynamic of global grassland carbon use efficiency in response to climate change from 2000 to 2013 [J]. Acta Oecologica, 2017,81:22-31.
- [12] 罗赵慧,朱璐平,张晓君,等.粤港澳大湾区植被CUE变化及与气候变化的关系[J].中国环境科学,2021,41(12):5793-5805.
- Luo Zhaohui, Zhu Luping, Zhang Xiaojun, et al. Spatiotemporal variation of CUE and its correlation with climate change in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area [J]. China Environmental Science, 2021,41 (12):5793-5805.
- [13] 刘福红,叶许春,郭强,等.鄱阳湖流域不同土地覆被碳水利用效率时空变化及其与气候因子的相关性[J].生态学报,2021,41(2):694-706.
- Liu Fuhong, Ye Xuchun, Guo Qiang, et al. Spatiotemporal variation of carbon and water use efficiency of different land cover in the Poyang Lake Basin and their correlations with climate factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(2):694-706.
- [14] 孙丰华,王玉刚,孙金金,等.天山北坡山地生态系统植被碳利用效率时空动态及其影响因素[J/OL].生态学报,1-13[2024-09-07].http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230524.0951.004.html.
- Sun Fenghua, Wang Yugang, Sun Jinjin, et al. Spatial-temporal variation and influencing factors to vegetation carbon use efficiency in mountain ecosystem on the northern slope of Tianshan Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 1-13[2024-09-07].http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230524.0951.004.html.
- [15] 内蒙古自治区人民政府.区域概况[EB/OL].(2024-04-23)[2024-07-01].https://www.nmg.gov.cn/asnmg/yxnmg/qgqk/202003/t20200304\_235646.
- Inner Mongolia Autonomous Region People's Government. Regional Overview [EB/OL]. (2024-04-23) [2024-07-01]. https://www.nmg.gov.cn/asnmg/yxnmg/qgqk/202003/t20200304\_235646.
- [16] 皇彦,宋海清,胡琦,等.2000—2020年内蒙古NDVI时空动态及其对水热条件的响应[J].水土保持研究,2024,31(4):197-204.
- Huang Yan, Song Haiqing, Hu Qi, et al. Spatial-temporal dynamics of NDVI and its response to hydrothermal conditions in Inner Mongolia from 2000 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):197-204.
- [17] 白力军,王玉华,布仁图雅,等.基于生态功能区评价的国家重点生态功能区县域生态功能状况指数变化探究[J].环境与发展,2017,29(4):209-210.
- Bai Lijun, Wang Yuhua, Bu R, et al. Study on the change of the ecological function index of the state key ecological function areas based on the evaluation of ecological function area [J]. Environment and Development, 2017,29(4):209-210.
- [18] Peng Shouzhong, Ding Yongxia, Liu Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019,11(4):1931-1946.
- [19] 宋海清,李云鹏,师春香,等.内蒙古地区下垫面变化对土壤湿度数值模拟的影响[J].大气科学,2016,40(6):1165-1181.
- Song Haiqing, Li Yunpeng, Shi Chunxiang, et al. Impact of underlying surface change on the numerical simulation of soil moisture in Inner Mongolia of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016,40 (6):1165-1181.
- [20] 朱飙,李春华,马鹏里,等.甘肃省风速变化趋势分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(12):90-96.
- Zhu Biao, Li Chunhua, Ma Pengli, et al. Analysis of wind speed changing trends in Gansu Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(12):90-96.
- [21] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.
- Liu Xianfeng, Pan Yaozhong, Zhu Xiufang, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors

- [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 705-716.
- [22] 秦格霞, 芦倩, 孟治元, 等. 1982—2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 101-108.
- Qin Gexia, Lu Qian, Meng Zhiyuan, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NDVI and its response to climate change in Northern China from 1982 to 2015 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 101-108.
- [23] 刘兆羽, 盛虎, 董莹莹. 基于加权平均值的时变 Hurst 指数估计方法研究[J]. *信息技术*, 2019, 43(11): 1-4.
- Liu Zhaoyu, Sheng Hu, Dong Yingying. Research on self-similarity time-varying Hurst index estimation method based on weighted average method [J]. *Information Technology*, 2019, 43(11): 1-4.
- [24] 刘晓婉, 彭定志, 徐宗学. 雅鲁藏布江流域 NDVI 对高程与降水的相依性研究[J]. *高原气象*, 2018, 37(2): 349-357.
- Liu Xiaowan, Peng Dingzhi, Xu Zongxue. Variability of NDVI with elevation and precipitation in Yarlung Zangbo River Basin [J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(2): 349-357.
- [25] 王娟, 王钊, 郭斌, 等. 陕西黄河流域植被碳利用率时空特征及对气候的敏感性研究[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(12): 1959-1968.
- Wang Juan, Wang Zhao, Guo Bin, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation carbon use efficiency and its sensitivity to climate in the Yellow River basin in Shaanxi Province [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(12): 1959-1968.
- [26] 中华人民共和国中央人民政府. “十四五”大小兴安岭林区生态保护与经济转型行方案[EB/OL]. (2022-01-05) [2024-07-01]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/14/content\\_5668171.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/14/content_5668171.htm).
- The Central People's Government of the People's Republic of China. Ecological Protection and Economic Transformation Plan for the Greater and Lesser Xing'an Mountains Forest Areas during the 14th Five Year Plan Period [EB/OL]. (2022-01-05) [2024-07-01]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/14/content\\_5668171.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/14/content_5668171.htm).
- [27] 祝萍, 黄麟, 翟俊, 等. 农牧交错带重点生态功能区草地载畜压力演变特征[J]. *草业科学*, 2022, 39(6): 1269-1279.
- Zhu Ping, Huang Lin, Zhai Jun, et al. Changing trends in grazing pressure in key ecological function area of the agro-pastoral zone [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(6): 1269-1279.
- [28] 林子琦, 温仲明, 刘洋洋, 等. 基于遥感数据的植被碳水利用效率时空变化和归因分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(1): 377-391.
- Lin Ziqi, Wen Zhongming, Liu Yangyang, et al. Spatiotemporal variation and attribution of carbon and water use efficiency in the Yellow River basin based on remote sensing data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(1): 377-391.
- [29] Gentine P, Green J K, Guérin M, et al. Coupling between the terrestrial carbon and water cycles: A review [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(8): 083003.
- [30] Du Lingtong, Zeng Yijian, Ma Longlong, et al. Effects of anthropogenic revegetation on the water and carbon cycles of a desert steppe ecosystem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 300: 108339.
- [31] 王素仙, 张永领, 郭灵辉, 等. 1981—2010 年内蒙古气温变化特征及未来趋势预估[J]. *气象与环境科学*, 2017, 40(4): 114-120.
- Wang Suxian, Zhang Yongling, Guo Linghui, et al. Variation characteristics and future trend estimation of temperature in Inner Mongolia during 1981—2010 [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2017, 40(4): 114-120.
- [32] 国志兴, 王宗明, 张柏, 等. 2000—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J]. *资源科学*, 2008, 30(8): 1226-1235.
- Guo Zhixing, Wang Zongming, Zhang Bai, et al. Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006 [J]. *Resources Science*, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [33] 苏日罕, 郭恩亮, 王永芳, 等. 1982—2020 年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(1): 419-431.
- Su Rihan, Guo Enliang, Wang Yongfang, et al. Extreme climate changes in the Inner Mongolia and their impacts on vegetation dynamics during 1982—2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 419-431.
- [34] 肖碧琴. 中国喀斯特地区植被碳—水利用效率对气候和土地利用变化的响应[D]. 贵州 贵阳: 贵州师范大学, 2023.
- Xiao Biqin. Responses of vegetation carbon and water use efficiencies to climate and land use changes in China's karst [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou Normal University, 2023.