

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.005.

胡信熹, 周清华, 徐勇. 东北地区植被碳利用率时空变化及其影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 274-283.

Hu Jixi, Zhou Qinghua, Xu Yong. Spatiotemporal Variation of Vegetation Carbon Use Efficiency and Its Influencing Factors in Northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 274-283.

# 东北地区植被碳利用率时空变化及其影响因子分析

胡信熹<sup>1</sup>, 周清华<sup>2</sup>, 徐勇<sup>3</sup>

(1.萍乡学院 商学院, 江西 萍乡 337055; 2.玉林市福绵区自然资源技术信息中心,

广西 玉林 537000; 3.桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006)

**摘要:** [目的]揭示东北地区植被碳利用率的时空分布特征, 探明植被 CUE 与影响因子间的关系, 为监测区域生态环境质量和植被生态系统状况提供参考。[方法]基于 MODIS GPP 和 NPP 数据, 结合气象数据, 采用一元线性回归分析、Mann-Kendall 显著性检验和偏相关分析等方法, 探讨了 2000—2020 年东北地区植被 CUE 的时空变化特征, 分析了植被 CUE 与气候因子的相关关系及时滞效应, 揭示了影响植被 CUE 变化的气候驱动机制的空间分布特征。[结果]2000—2020 年东北地区多年平均植被 CUE 为 0.64, 在空间上呈现东高西低的分布格局。近 21 年, 东北地区植被 CUE 呈缓慢上升趋势, 变化斜率为 0.002/a。变化斜率大于 0 的区域占 69.22%, 植被 CUE 呈极显著上升和极显著下降的占比分别为 6.28%, 1.11%, 极显著下降区域主要位于黑龙江省的东北部地区。植被 CUE 与气温、日照时数和相对湿度整体呈负相关, 与降水整体呈正相关, 且降水对植被 CUE 的影响强于其他气候因子。东北地区植被 CUE 主要响应于当月气温、降水、日照时数和相对湿度的变化, 且植被 CUE 主要受气温、降水、日照时数、相对湿度弱驱动。[结论]东北地区植被 CUE 总体呈上升趋势, 且主要受当月气候因子的影响。研究结果可为制定东北地区植被生态系统可持续发展方针提供参考依据。

**关键词:** 东北地区; 植被碳利用率; 气候驱动机制

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0274-10

## Spatiotemporal Variation of Vegetation Carbon Use Efficiency and Its Influencing Factors in Northeast China

Hu Jixi<sup>1</sup>, Zhou Qinghua<sup>2</sup>, Xu Yong<sup>3</sup>

(1. School of Business, Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi 337055, China;

2. Technology Information Center, Natural Resources Bureau of Fumian District, Yulin, Guangxi 537000, China;

3. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the temporal and spatial distribution characteristics of vegetation carbon use efficiency in northeast China, as well as the relationship between vegetation CUE and influencing factors, they can provide a reference for monitoring regional ecological environment quality and vegetation ecosystem status. [Methods] Based on MODIS GPP and NPP data, combined with meteorological data, the linear regression analysis, Mann-Kendall significance test, and partial correlation analysis were used to explore the spatiotemporal variation of vegetation CUE, to analyze the correlation and lag effect of vegetation CUE with climate factors, and to reveal the spatial distribution characteristics of the climate-driven mechanism affecting vegetation CUE variation in northeast China from 2000 to 2020. [Results] The annual average vegetation CUE was 0.64 in northeast China from 2000 to 2020, displaying a spatial distribution pattern of high in the east and low in the west. In the past 21 years, the vegetation CUE showed a slow

收稿日期: 2022-10-10

修回日期: 2022-11-09

资助项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ212701); 广西自然科学基金 (2020GXNSFBA297160)

第一作者: 胡信熹 (1981—), 男, 江西萍乡人, 博士研究生, 研究方向为土地资源管理。E-mail: hjx198118@163.com

通信作者: 徐勇 (1988—), 男, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化和植被覆盖反演研究。E-mail: yongxu@glut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

upward trend in northeast China with an increasing magnitude of 0.002/a. The areas with an increasing magnitude greater than 0 accounted for 69.22% of the study area, and the areas with extremely significant increase and extremely significant decrease accounted for 6.28% and 1.11% of the study area, respectively. The areas with extremely significant decrease were mainly located in the northeastern part of Heilongjiang Province. Vegetation CUE was negatively correlated with temperature, sunshine duration, and relative humidity, and positively correlated with precipitation as a whole. In addition, precipitation had a stronger impact on vegetation CUE than other climatic factors. The vegetation CUE mainly responded to the changes of current month of precipitation, air temperature, sunshine duration, and relative humidity in northeast China, and the vegetation CUE was mainly driven by weak combination effect of air temperature, precipitation, sunshine duration, and relative humidity. [Conclusion] The vegetation CUE in northeast China had generally increased, and was mainly affected by the concurrent month of the climate factors. The research results can provide the reference for formulating sustainable development policies for vegetation ecosystems in northeast China.

**Keywords:** northeast China; vegetation carbon use efficiency; climate-driven mechanism

植被作为地球表层生态系统的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>, 因其对气候变化响应较为敏感, 且作为陆地表面主要的碳库, 具有较高的碳密度和较快的碳积累速度, 在减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高和全球气候变暖方面发挥着关键的作用<sup>[3-5]</sup>。植被碳利用率(carbon use efficiency, CUE), 即植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)与植被总初级生产力(gross primary productivity, GPP)的比值, 可反映植被将初级生产力转化为植被生物质储存在生态系统中的效率, 是碳循环研究的核心主题<sup>[6-9]</sup>。

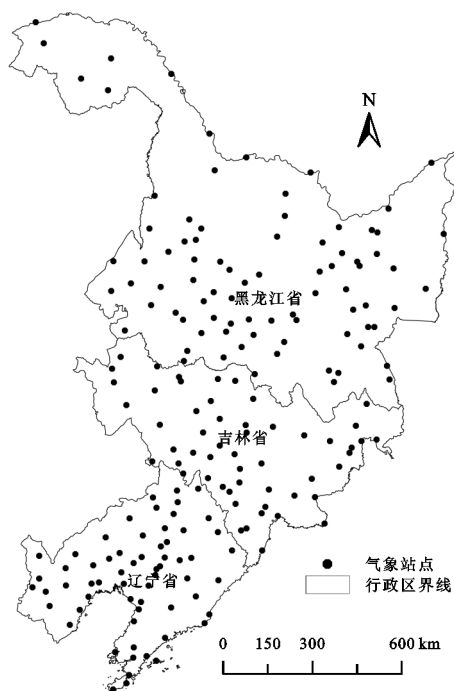
随着遥感技术的快速发展, 学者在不同时空尺度上研究了植被碳利用率的时空变化特征及其影响因素, 并取得了丰硕的成果。在全球尺度上, He 等<sup>[7]</sup>基于遥感影像和过程模型研究了全球植被 CUE 时空变化特征, 结果表明, 全球植被 CUE 呈现明显的纬度地带性, 高纬度地区植被 CUE 较高。植被 CUE 随气温的上升呈非线性下降趋势, 但对降水的增加表现较为稳定。Mäkelä 等<sup>[10]</sup>研究发现在 60°—70°N, 随着纬度的上升, 由于碳通量和存量的下降, 针叶林 CUE 和 NEP 均呈梯度下降趋势。在中国, Chuai 等<sup>[11]</sup>研究表明 2000—2015 年中国植被 CUE 呈微弱上升趋势, 寒冷干燥地区植被 CUE 通常较高, 而温暖湿润地区植被 CUE 通常较低。Gang 等<sup>[12]</sup>研究发现中国北方同一时期草地的 CUE 比森林的 CUE 高, 并且森林 CUE 受近期干旱的影响比草地更大。兰垚等<sup>[13]</sup>研究表明青海湖流域中部地区在生长季初期和末期 CUE 值偏高, 生长旺盛期较低, 青海湖边界地区与中部地区相反。郑飞鸽等<sup>[14]</sup>研究表明降水量是影响植被 CUE 变化的主要因素, 并且月均植被

CUE 与年均植被 CUE 存在较大的差异。此外, 罗赵慧<sup>[15]</sup>、安相<sup>[16]</sup>和刘福红<sup>[17]</sup>等分别对粤港澳大湾区、东亚森林和草地、鄱阳湖流域的植被 CUE 进行了深入的研究, 研究结果表明不同地区和不同植被类型的植被 CUE 存在较大差异。以上研究主要分析植被 CUE 时空变化特征, 及其与降水和气温的相关关系, 但植被 CUE 除受气温和降水影响外, 还受其他气候因子的影响, 且植被 CUE 对气候变化存在滞后效应, 因此, 在研究中应当充分考虑其他气候因子对植被 CUE 的影响、植被 CUE 对气候变化的滞后效应以及各气候因子对植被 CUE 变化的综合驱动作用。

东北地区作为我国生态敏感区之一, 研究其植被 CUE 的时空动态变化及其对气候变化的响应有着重大意义。因此, 本文以东北地区作为研究区, 探讨 2000—2020 年东北地区植被 CUE 的时空变化特征, 分析植被 CUE 与气候因子的相关关系及时滞效应, 揭示影响植被 CUE 变化的气候驱动机制的空间分布特征, 以期对东北地区生态建设与保护提供理论参考和科学依据。

## 1 研究区概况

东北地区包括吉林、黑龙江和辽宁 3 个省份, 地理位置为 118°—135°E, 48°—55°N, 北面与俄罗斯相邻, 东面与朝鲜接壤, 隔日本海和黄海与日本、韩国相望, 南濒渤海与华北区相邻(图 1)。东北地区总面积为  $7.89 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, 约占全国总面积的 8.3%, 受纬度、海陆位置、地势等因素的影响, 东北地区属大陆性季风型气候, 自北而南由温带向暖温带过渡, 年平均气温约为 4℃, 年累积降水量约为 1 183 mm, 年平均湿度约为 65%, 蕴含着丰富的森林资源, 总蓄积量约占全国的 1/3, 主要以栽培植被、阔叶林和针叶林为主。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)600 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 研究区气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the meteorological stations in the study areas

## 2 数据源及研究方法

### 2.1 数据源

植被 GPP 和 NPP 数据来源于美国国家航空航天局发布 MODIS 系列产品数据集,其中,GPP 来自 MOD17A2HGF 产品数据集,NPP 来自 MOD17A3HGF 产品数据集,空间分辨率均为 500 m,为剔除缺失值、水、云、重气溶胶和云影对试验结果的影响,本文采用最大值合成法得到 2000—2020 年植被 GPP 时间序列,并对 GPP 和 NPP 数据进行投影变换、掩膜、裁剪和重采样等处理,得到覆盖研究区空间分辨率为 1 km 的 GPP 和 NPP 时间序列,然后计算 NPP 和 GPP 的比值,得到研究区植被 CUE 栅格数据集。

气象数据资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的 1999—2020 年 2 416 个气象站点的逐日气温、降水、日照时数和相对湿度数据,其中东北地区覆盖站点数为 200 个,在考虑高程、经度和纬度的基础上,经过 Anusplin 模型插值后得到空间分辨率为 1 km 的东北地区的气温、降水、日照时数和相对湿度栅格数据集。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 一元线性回归分析** 一元线性回归分析可用于估算变量在长时间序列上的变化趋势,本文采用一元线性回归分析在区域和像元尺度上计算植被 CUE

的变化斜率<sup>[18]</sup>,以探究东北地区植被 CUE 的变化特征,计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{CUE}_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n \text{CUE}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:slope 为变化斜率; $\text{CUE}_i$  为第  $i$  年的植被 CUE; $n$  为研究年限,当  $\text{slope} > 0$  时,表示植被 CUE 在该时段内处于上升趋势,反之,则为下降趋势。

**2.2.2 Mann-Kendall 显著性检验** Mann-Kendall 显著性检验<sup>[18-19]</sup>作为常用的非参数检验法,不需要样本遵循一定的分布规律。本文运用该方法对 2000—2020 年植被 CUE 时间序列的变化趋势进行显著性检验,计算公式如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^i \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (2)$$

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (3)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (4)$$

$$\text{UF}_k = \frac{|S_k - E(S_k)|}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (5)$$

$$\text{UB}_k = -\text{UF}_k \quad (k = n+1-k) \quad (6)$$

式中: $x_i$  和  $x_j$  分别为第  $i$  个和  $j$  个样本的值; $S_k$  为第  $i$  个样本的累积量; $E(S_k)$  为  $S_k$  的均值; $\text{var}(S_k)$  为  $S_k$  的方差; $\text{UF}_k$  为  $S_k$  的标准差, $\text{UB}_k$  是对  $\text{UF}_k$  进行倒置再取负。在给定显著性水平  $\alpha$  下,在正态分布表中查临界值  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ ,当  $|Z| < Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  时,趋势不显著;当  $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ ,则认为趋势显著。本文给定当  $|Z| > 2.58$  时,为极显著变化;当  $|Z| > 1.96$  时,为显著变化,否则,为轻微变化。

**2.2.3 相关分析和偏相关分析法** 相关分析法可用于表征两个因子之间的相关程度。本文采用相关分析<sup>[20]</sup>探究植被 CUE 与影响因子间的相关关系。计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: $n$  为研究年限; $i$  为年序号; $y$  为植被 CUE 对应像元 21 a 平均 CUE 值; $x$  为气候因子。

当多个因子同时与植被 CUE 存在相关关系时,使用偏相关分析<sup>[21-22]</sup>可以在控制其他影响因素的条件下,衡量 2 个因子间的相关关系(表 1)。本文采用偏相关分析法,计算植被 CUE 与气温、降水、日照时数和相对湿度的偏相关关系,计算公式如下:

$$r_{xy.z_1 z_2 \dots z_n} = \frac{r_{xy.z_1 z_2 \dots z_{n-1}} - r_{xz_n.z_1 z_2 \dots z_{n-1}} r_{yz_n.z_1 z_2 \dots z_{n-1}}}{\sqrt{(1-r_{xz_n.z_1 z_2 \dots z_{n-1}}^2)(1-r_{yz_n.z_1 z_2 \dots z_{n-1}}^2)}} \quad (8)$$

式中: $r_{xy,z_1z_2\cdots z_n}$  为控制自变量  $z_1,z_2,\cdots,z_n$  时,变量  $x$  和  $y$  的偏相关系数。采用 t 检验法对最大偏相关系数进行显著性检验,定义  $p<0.01$  为极显著相关; $0.01\leq p<0.05$  为显著相关; $p\geq 0.05$  为不显著相关。

表 1 植被 CUE 变化气候驱动类型判定

Table 1 Determination of climate-driven type of vegetation CUE change

气候驱动类型	偏相关系数				复相关系数
	CUE_Tem	CUE_Pre	CUE_Sd	CUE_Rh	CUE_TPSR
气温驱动	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$
降水驱动	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$
日照时数驱动	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$
相对湿度驱动	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
气温、降水驱动	$p<0.05$	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$
气温、日照时数驱动	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$
气温、相对湿度驱动	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
降水、日照时数驱动	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$
降水、相对湿度驱动	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
日照时数、相对湿度驱动	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
气温、降水、日照时数驱动	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$
气温、降水、相对湿度驱动	$p<0.05$	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
气温、日照时数、相对湿度驱动	$p<0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
降水、日照时数、相对湿度驱动	$p\geq 0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
气温、降水、日照时数、相对湿度强驱动	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
气温、降水、日照时数、相对湿度弱驱动	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p<0.05$
非气候因子驱动	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$	$p\geq 0.05$

注:CUE\_Tem 表示植被 CUE 与气温;CUE\_Pre 表示植被 CUE 与降水;CUE\_Sd 表示植被 CUE 与日照时数;CUE\_Rh 表示植被 CUE 与相对湿度;CUE\_TPSR 表示植被 CUE 与气温、降水、日照时数和相对湿度。

3 结果与分析

3.1 植被 CUE 时间变化特征

由图 2 可知,东北地区植被 CUE 总体呈现波动上升趋势,上升速率为 0.002 3/a。近 21 a 来,研究区植被 CUE 平均值为 0.64,其中,最高值出现在 2003 年、2009 年、2014 年,为 0.68,最低值出现在 2000 年,为 0.57。总体来看,2000—2020 年东北地区植被 CUE 的变化大致经历了 4 个阶段:2000—2003 年植被 CUE 呈上升趋势,上升幅度为 0.11,并且在 2003 年达到最大值;2004—2007 年植被 CUE 呈下降趋势,并且在 2007 年出现波谷,下降幅度为 0.04~0.05;2008—2009 年呈上升趋势,上升幅度为 0.07,并在 2009 年出现波峰;2010—2020 年呈波动上升趋势,波动幅度为 0.02~0.04,总体变化较为平稳。

省级尺度上看,近 21 a 辽宁省多年平均植被 CUE 最高,为 0.72,黑龙江省最低,为 0.61。黑龙江省植被 CUE 年际变化趋势与东北地区植被 CUE 变化趋势较为一致,辽宁省和吉林省植被 CUE 年际变化斜率与东北地区植被 CUE 变化斜率差异较大。辽宁省植被 CUE 上升斜率为 0.003 2/a,高于东北地

区植被 CUE 变化斜率,而吉林省植被 CUE 上升斜率仅为 0.001 4/a,远低于东北地区植被 CUE 变化斜率。总体而言,东北地区及其 3 个省份的植被 CUE 年际变化趋势均表现为上升趋势,其中,辽宁省植被 CUE 的上升速率最快,且多年平均植被 CUE 最高,吉林省植被 CUE 的上升速率最慢,而黑龙江省的多年平均植被 CUE 最低。

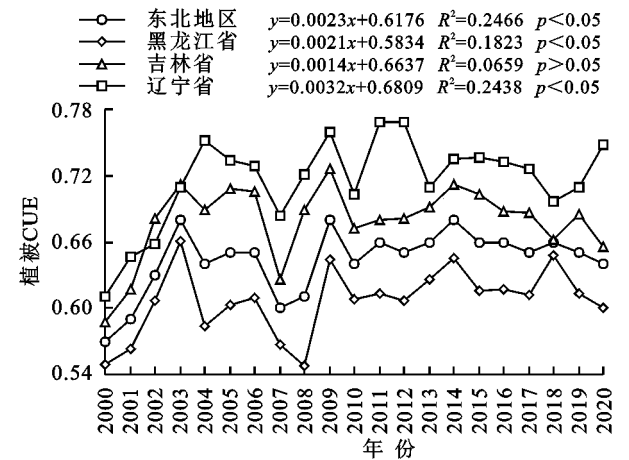


图 2 2000—2020 年东北地区植被 CUE 时间变化  
Fig. 2 Temporal variation of vegetation CUE in Northeast China from 2000 to 2020



### 3.2 植被 CUE 空间变化特征

采用自然间断点法将东北地区植被 CUE 分成 5 类,以揭示 2000—2020 年东北地区多年平均植被 CUE 空间分布特征。由图 3A 可知,2000—2020 年东北地区植被 CUE 空间分布差异显著。总体来说,植被 CUE 整体的空间分布呈“东高西低”的空间分布格局,均值在 0.26~1.00,平均植被 CUE 为 0.64,植被净收 CO<sub>2</sub> 的能力中等,总体的标准差为 0.11,反映了东北地区局部碳利用率的水平差异较大。其中,植被 CUE 高值区域(0.71~1)占 25.37%,主要分布在东北地区的东南部;植被 CUE 低值区域(0~0.53)占 18.08%,主要分布在东北地区的西部和东北部区域。

由图 3B 可知,东北地区植被 CUE 的变化斜率为  $-0.030 \sim 0.039/a$ ,变化斜率呈东南低、西北高的空间分布格局。由图 3C 可知,东北地区植被 CUE 呈上升趋势的面积占 69.39%,其中,呈显著和极显著上升趋势的面积占 18.09%,主要位于黑龙江省中部和辽宁省西部。

东北地区植被 CUE 呈下降趋势的面积占 30.61%,其中,呈极显著下降趋势的面积占 1.00%,主要分布在黑龙江省东北部。省级尺度上,黑龙江省、辽宁省和吉林省植被 CUE 呈上升趋势的面积分别占 72.03%,74.57%,59.12%,其中,黑龙江省和辽宁省植被 CUE 呈显著和极显著上升趋势的面积分别占 20.07%,23.62%,而吉林省植被 CUE 呈显著和极显著上升趋势的面积仅占 8.86%。此外,黑龙江省、辽宁省和吉林省植被 CUE 呈下降趋势的面积分别占 27.97%,25.43%,40.88%,其中,呈显著和极显著下降趋势的面积占比均较低,分别为 3.70%,1.65%,1.79%。

整体而言,东北地区植被 CUE 呈“东高西低”的空间分异特征。在区域和省级尺度上,植被 CUE 呈上升趋势的面积均大于呈下降趋势的面积,其中,黑龙江省和辽宁省植被 CUE 呈上升趋势的面积占比大于吉林省。

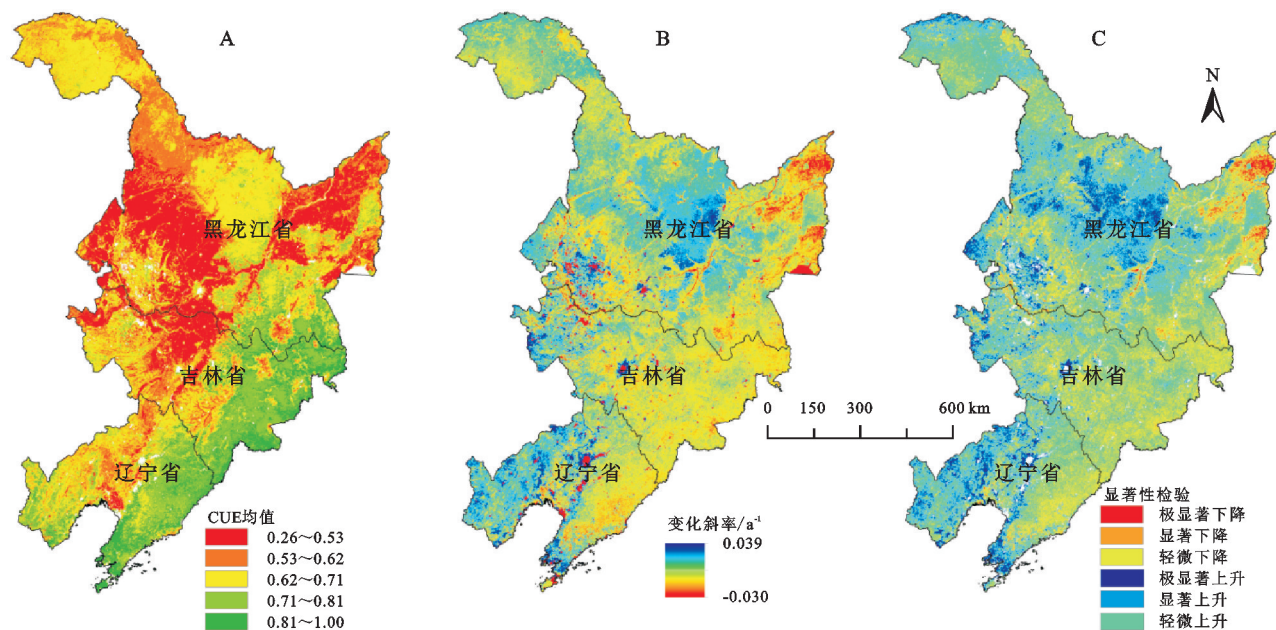


图 3 2000—2020 年东北地区植被 CUE 空间变化

Fig. 3 Spatial distribution of the dynamic variation of vegetation CUE in Northeast China from 2000 to 2020

### 3.3 植被 CUE 与气候因子的相关关系

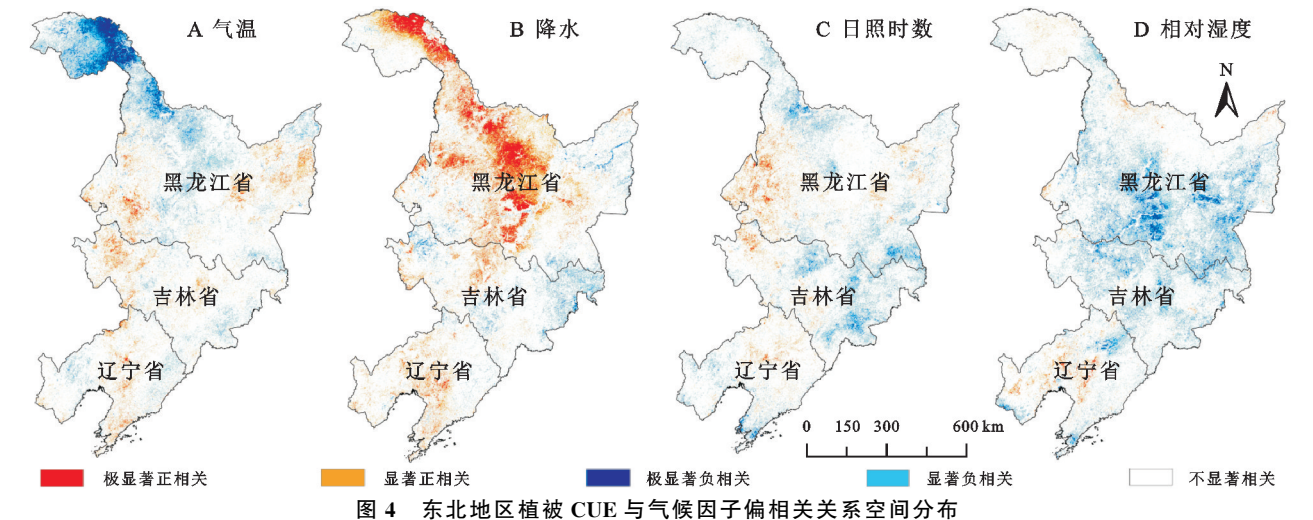
如图 4A—D 所示,整体上,东北地区植被 CUE 与降水和气温呈正相关关系的面积大于呈负相关关系的面积,与日照时数和相对湿度呈负相关关系的面积大于呈正相关关系的面积。东北地区植被 CUE 与降水的最大偏相关系数平均值为 0.12,呈南北强、东西弱的响应特征,呈正相关关系的区域占总面积的 63.93%,其中,呈极显著正相关关系的区域占 6.45%,主要分布在黑龙江省中部和西北部。研究区内 45.59% 的植被 CUE 与气温呈负相关关系,主要零散分布在东北地区的东部和西部区域,植被 CUE 与气温的最大偏

相关系数的平均值为 0.03。对比植被 CUE 与降水和气温的偏相关关系可以发现,植被 CUE 与降水和气温的响应特征存在较大的空间差异,植被 CUE 与降水呈极显著正相关关系的区域,与气温却呈极显著负相关关系,这说明不同的气候因子对植被 CUE 的影响存在明显空间分异特征。

植被 CUE 与日照时数最大偏相关系数的平均值为  $-0.14$ ,植被 CUE 与日照时数呈不显著相关关系占比最大,为 85.64%;仅有 0.37% 呈极显著正相关关系,主要分布在辽宁省的东部地区。东北地区植被 CUE 与相对湿度呈微弱的负相关关系,最大相关系

数的平均值为-0.05,研究区内 57.94%的植被 CUE 与相对湿度呈负相关关系,极显著负相关关系占 1.61%,主要分布在黑龙江省与吉林省的交界处;极显著正相关关系和显著正相关关系占 3.54%,主要分布在黑龙江省西部、吉林省西部和辽宁省中部。

综上可知,东北地区植被 CUE 对各气候因子变化的最大响应呈明显地域差异。总体上,日照时数、降水、相对湿度和气温对东北地区植被 CUE 的响应强弱程度依次降低。植被 CUE 与降水和气温呈正相关的面积大于日照时数和相对湿度。

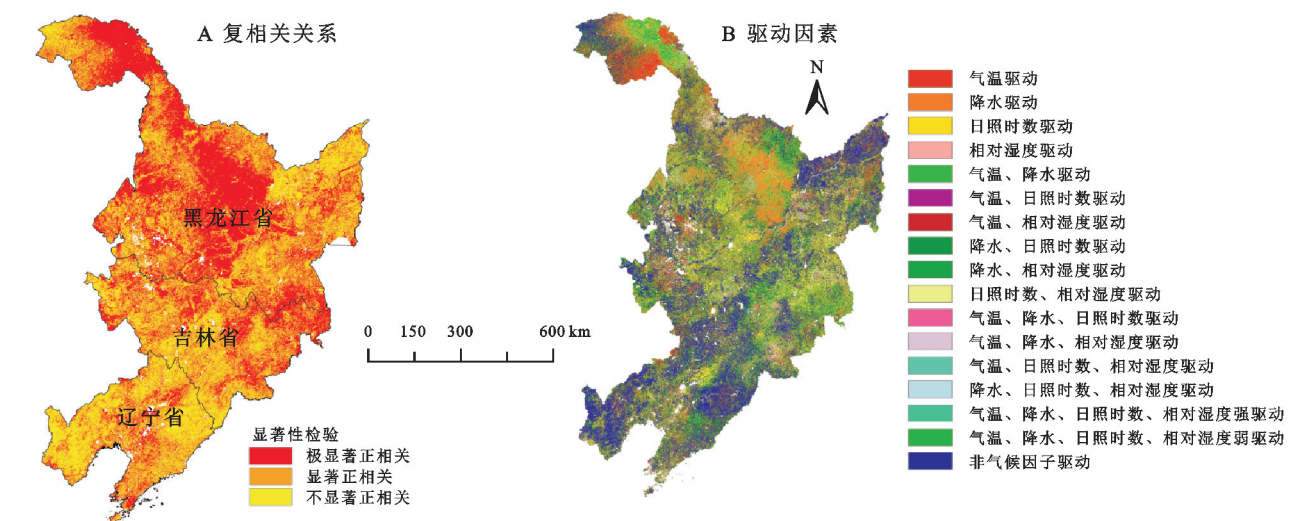


**图 4 东北地区植被 CUE 与气候因子偏相关关系空间分布**

Fig. 4 Spatial distribution of partial correlation between vegetation CUE and climate factors in Northeast China

由图 5A 可知,东北地区的植被 CUE 复相关关系均为正相关,且极显著正相关面积占比最大,为 38.73%,主要分布在黑龙江省中部。根据表 1 气候因素驱动机制分类准则,耦合植被 CUE 与各气候因子的偏相关和复相关结果可得图 5B。由图 5B 可知,东北地区植被 CUE 变化受气候因素和非气候因素驱动的占比分别为 69.41%,30.59%。单因子驱动中,东北地区植被 CUE 受降水、日照时数、气温和相对湿度单独驱动的面积占比依次下降,分别为 9.76%,7.91%,6.55%,4.65%,其中,降水对植被 CUE 的影响最强,主要分布在黑龙江省

的中部地区。在多因子联合驱动中,受气温、降水、日照时数、相对湿度弱驱动面积占比为 27.36%,主要分布在黑龙江省的北部和吉林省的东部区域。东北地区植被 CUE 变化受非气候因子驱动占比为 30.59%,主要分布在东北区域的东北部以及南部地区。综上可知,西南地区植被 CUE 变化受气候因素的驱动大于受非气候因素的驱动。单因子驱动中,东北地区植被 CUE 受降水的影响强于其他气候因子;多因子联合驱动中,东北地区植被 CUE 主要受气温、降水、日照时数和相对湿度弱驱动。



**图 5 东北地区植被 CUE 与气候因子的复相关关系和驱动因素分区**

Fig. 5 Multiple correlation between vegetation CUE and climate factors and the division of driving factors in Northeast China

### 3.4 植被 CUE 与气候因子的时滞效应

计算植被 CUE 与气温、降水、日照时数和相对

湿度 0—3 个月的相关系数,然后根据最大相关系数得到植被 CUE 对各气候因子最大响应的滞后期。



如图 6A—D 所示,东北地区植被 CUE 最大响应于当月气温、降水、日照时数和相对湿度的变化的面积最大,分别占 49.10%,48.51%,52.70%,48.98%。对降水响应滞后 0 个月主要分布在黑龙江省西北部和辽宁省的西南部、吉林省的东部地区;对日照时数响应滞后 0 个月主要分布在东北地区的东部;对气温响应滞后 0 个月主要分布黑龙江省和吉林省的东部地区;

对相对湿度响应滞后 0 个月主要分布在黑龙江省,有少部分零散分布在辽宁省和吉林省。总体而言,植被 CUE 最大响应于当月气候因子的变化。不同影响因子的时滞效应有着相似之处,从图 6A—D 可以看出,气温、降水、日照时数和相对湿度这 4 个气候因子对东北地区植被 CUE 响应滞后各气候因子 1 个月和 2 个月均分布在东北地区的西北部以及中部区域。

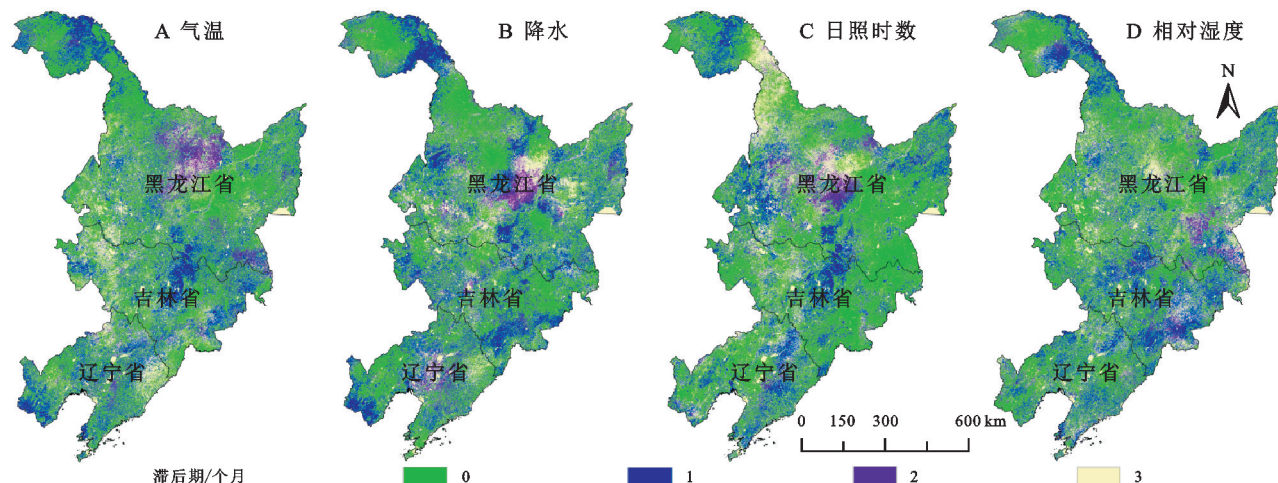


图 6 东北地区植被 CUE 与气候因子最大响应滞后期空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the maximum time-lag effects of vegetation CUE in response to climate variation in Northeast China

## 4 讨论

### 4.1 东北地区植被 CUE 时空变化特征

研究表明,时间尺度上,2000—2020 年东北地区植被 CUE 呈显著上升趋势,上升斜率为 0.002 3/a;空间尺度上,东北地区植被 CUE 呈上升趋势的面积大于呈下降趋势的面积,其中,呈显著和极显著上升趋势的面积占 18.09%,主要分布在黑龙江省中部和辽宁省西部。一方面,黑龙江省中部主要为大小兴安岭地区,植被覆盖以林地为主,植被群落较为稳定。由图 7 可知,研究时段内该地区降水主要呈显著和极显著上升趋势,气温呈轻微上升趋势,而日照时数和相对湿度分布有轻微上升和轻微下降,且由图 4 可知,该地区植被 CUE 与降水主要呈极显著正相关关系,因此,东北地区降水的增加导致了区域植被 CUE 的上升,这与已有研究结果一致,已有研究结果表明,降水与植被 CUE 呈正相关关系,降水的增加能有效提高区域植被 CUE<sup>[9,17,24-25]</sup>。辽宁省西部主要土地利用类型为农田,区域内气温、降水、日照时数和相对湿度主要以轻微变化为主,但是得益于近年来农业水利设施的修建,节约型农业的发展,人为灌溉、施肥和杀虫等科学田间管理的开展,削弱了气候变化对植被自养呼吸作用的影响,使得植被同化和固定大气 CO<sub>2</sub>

的能力增强,从而增加了植被 CUE<sup>[9]</sup>。另一方面,以上地区为天然林保护工程实施区,有效的森林资源的保护、培育和发展,使得环境得到改善,植被生长情况较好,提高了植被 CUE<sup>[22-23,26]</sup>。

### 4.2 东北地区植被 CUE 与气候因子的相关性

研究表明,植被 CUE 与降水整体呈正相关,而与气温、日照时数和相对湿度整体呈负相关,这与已有研究结果一致<sup>[17,21,24-25]</sup>。这与陈智<sup>[21]</sup>研究发现降水与东北森林植被 CUE 呈正相关关系,且降水是影响东北森林植被 CUE 变化的主要气候驱动因素这一结果高度一致。由图 8 可知,研究时段内东北地区气温、降水、日照时数和相对湿度呈上升趋势。降水的增加会减弱植被根系活力与根系呼吸作用,自养呼吸作用降低,从而导致植被 CUE 升高,而气温、日照时数和相对湿度的增加会显著影响植被光合作用的能力和呼吸作用的速率,而呼吸作用的速率对以上 3 个因子的敏感程度高于光合作用,导致植被 NPP 增加的速率会低于植被 GPP 的增加的速率,从而导致植被 CUE 下降,因此,植被 CUE 降水整体呈正相关,与气温、日照时数和相对湿度整体呈负相关<sup>[15,27-28]</sup>。

东北地区植被 CUE 对气温、降水、日照时数和相对湿度的变化存在一定的时滞效应,滞后月份均以 0 个月为主,滞后期为 0 个月的区域主要分布在东北地区西

部,以上地区主要土地利用类型为农田。相较于其他植被生态系统,农田植被生态系统对气候变化的响应更为敏感<sup>[29-30]</sup>,主要响应于当月气候变化。滞后 1 个月和 2 个月的分布情况较为相似,主要呈条带状从中部由南

北方向贯穿整个东北地区以及东北地区西部。以上地区主要土地利用类型为林地,林地生态系统相较于其他植被生态系统更加稳定,对气候变化的响应存在一定滞后期,这与已有研究结果一致<sup>[29-30]</sup>。

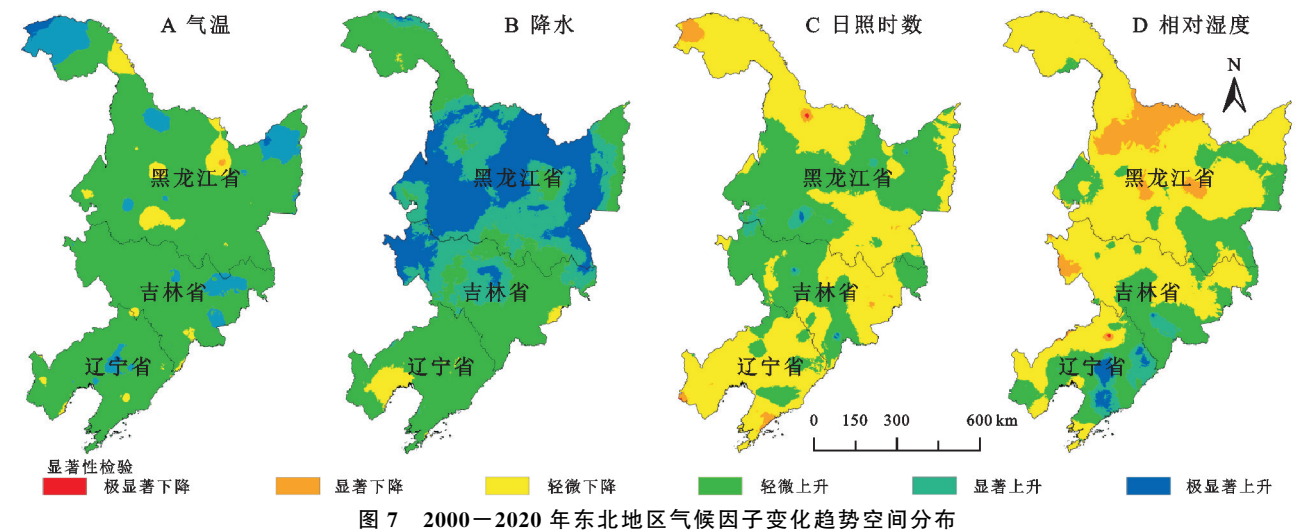


Fig. 7 Spatial distribution of changing trend of climate factors in Northeast China from 2000 to 2020

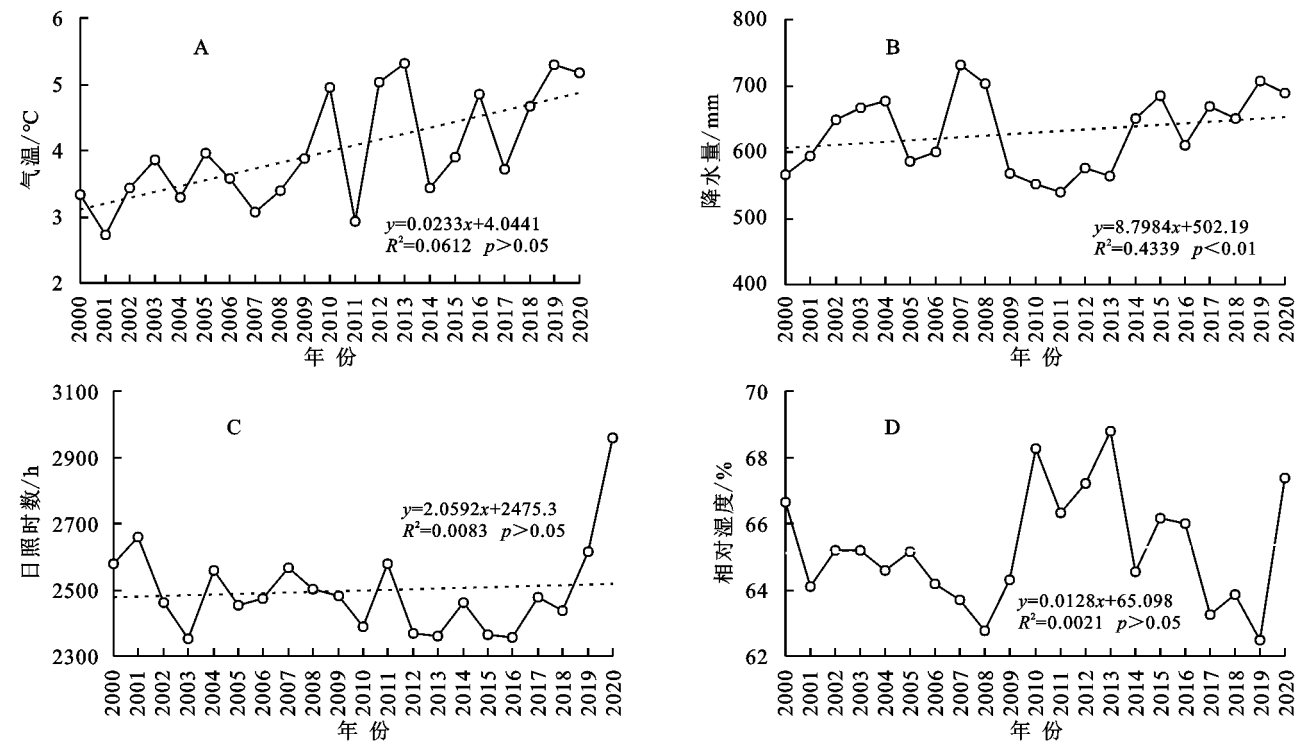


Fig. 8 Temporal variation of climate factors in Northeast China from 2000 to 2020

5 结论

(1) 时间上,2000—2020 年东北地区植被 CUE 呈显著上升趋势,上升斜率为 0.002 3/a( $p<0.05$ ),且辽宁省植被 CUE 上升斜率高于黑龙江省和吉林省。空间上,东北地区植被 CUE 变化斜率呈东南低、西北高的空间分布格局。植被 CUE 呈上升趋势

的面积占 69.39%,主要分布在黑龙江省中部和辽宁省西部。

(2) 整体上,东北地区植被 CUE 与降水呈正相关,与气温、日照时数和相对湿度呈负相关。但东北地区植被 CUE 与降水和气温呈正相关关系的面积大于呈负相关关系的面积,而植被 CUE 与日照时数和相对湿度呈正相关关系的面积小于呈负相关关系



的面积。东北地区植被 CUE 变化受非气候因子驱动占比最大,为 30.59%,主要分布在东北区域的东北部以及南部地区。

(3) 东北地区植被 CUE 主要响应于当月气温、降水、日照时数和相对湿度的变化,分别占 49.10%, 48.51%, 52.70%, 48.98%。东北地区植被 CUE 响应滞后各气候因子 1 个月和 2 个月均分布在东北地区的西北部以及中部区域。

#### 参考文献:

- [1] Chapela-Oliva C, Winter S, Ochoa-Hueso R. Edapho-climatic drivers of the effect of extensive vegetation management on ecosystem services and biodiversity in vineyards [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 339: 108115.
- [2] García-Pardo K A, Moreno-Rangel D, Domínguez-Amarillo S, et al. Remote sensing for the assessment of ecosystem services provided by urban vegetation: A review of the methods applied [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 74: 127636.
- [3] Yu Z, Ciais P, Piao S, et al. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980 [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-12.
- [4] Piao S, Wang X, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [5] 张春华,王莉媛,宋茜薇,等.1973—2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 4678-4686.  
Zhang C H, Wang L Y, Song X W, et al. Biomass carbon stocks and dynamics of forests in Heilongjiang Province from 1973 to 2013 [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(12): 4678-4686.
- [6] 舒树森,朱万泽,冉飞,等.贡嘎山峨眉冷杉成熟林碳利用效率季节动态及其影响因子 [J]. *植物生态学报*, 2020, 44(11): 1127-1137.  
Shu S M, Zhu W Z, Ran F, et al. Season dynamics of carbon use efficiency and its influencing factors in the old-growth *Abies fabri* forest in Gongga Mountain, western Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(11): 1127-1137.
- [7] He Y, Piao S, Li X, et al. Global patterns of vegetation carbon use efficiency and their climate drivers deduced from MODIS satellite data and process-based models [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256: 150-158.
- [8] Choudhury B J. Carbon use efficiency, and net primary productivity of terrestrial vegetation [J]. *Advances in Space Research*, 2000, 26(7): 1105-1108.
- [9] Ye X, Liu F, Zhang Z, et al. Spatio-temporal variations of vegetation carbon use efficiency and potential driving meteorological factors in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(8): 1959-1973.
- [10] Mäkelä A, Tian X, Repo A, et al. Do mycorrhizal symbionts drive latitudinal trends in photosynthetic carbon use efficiency and carbon sequestration in boreal forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 520: 120355.
- [11] Chuai X, Guo X, Zhang M, et al. Vegetation and climate zones based carbon use efficiency variation and the main determinants analysis in China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 105967.
- [12] Gang C, Zhang Y, Guo L, et al. Drought-induced carbon and water use efficiency responses in dryland vegetation of northern China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 00224.
- [13] 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 Y, Cao S K, Cao G H, et al. Temporal and spatial dynamics of vegetation carbon use efficiency in Qinghai Lake Basin [J]. *Ecological Science*, 2020, 39(4): 156-166.
- [14] 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 F G, Yi G H, Zhang Y B, 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.
- [15] 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 Z H, Zhu L P, Zhang X J, 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.
- [16] 安相,陈云明,唐亚坤.东亚森林、草地碳利用效率及碳通量空间变化的影响因素分析 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 79-87.  
An X, Chen Y M, Tang Y K. Factors affecting the spatial variation of carbon use efficiency and carbon fluxes in east Asian forest and grassland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 79-87.
- [17] 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 F H, Ye X C, Guo Q, et al. Spatio-temporal 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.
- [18] Wang Y, Chen X, Gao M, et al. The use of random forest to identify climate and human interference on vegetation coverage changes in southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2022,144:109463.
- [19] 徐勇,黄雯婷,窦世卿,等.2000—2020年西南地区植被NDVI对气候变化和人类活动响应特征[J].环境科学,2022,43(6):3230-3240.
- Xu Y, Huang W T, Dou S Q, et al. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in Southwest China from 2000 to 2020[J]. *Environmental Sciences*,2022,43(6):3230-3240
- [20] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.2000—2013年中国植被碳利用率(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 Y Y, Wang Q, Yang Y, et al. Spatiotemporal 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
- [21] 陈智.2000—2015年中国东北森林生产力和碳素利用率的时空变异[J].应用生态学报,2019,30(5):1625-1632.
- Chen Z. Spatiotemporal variation of productivity and carbon use efficiency of forests in Northeast China from 2000 to 2015[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2019,30(5):1625-1632.
- [22] Cai Y, Zhang F, Duan P, et al. Vegetation cover changes in China induced by ecological restoration-protection projects and land-use changes from 2000 to 2020[J]. *Catena*, 2022,217:106530.
- [23] Chuai X, Xia M, Xiang A, et al. Vegetation coverage and carbon sequestration changes in China's forest projects area[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 38:e02257.
- [24] 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].生态学报,2022,41(6):1079-1089.
- Yin C H, Luo M, Meng F H, et al. The spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation carbon and water use efficiency in the Mongolian Plateau[J]. *Journal of Ecology*, 2022,41(6):1079-1089.
- [25] Zhang Y, Yu G, Yang J, et al. Climate-driven global changes in carbon use efficiency[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014,23(2):144-155.
- [26] 杨师帅,逯非,张路.天然林资源保护工程综合效益评估[J].环境保护科学,2022,48(5):18-26.
- Yang S S, Lu F, Zhang L. Comprehensive benefit assessment of natural forest protection project[J]. *Environmental Protection Science*, 2022,48(5):18-26.
- [27] Collalti A, Trotta C, Keenan T F, et al. Thinning can reduce losses in carbon use efficiency and carbon stocks in managed forests under warmer climate[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(10):2427-2452.
- [28] Curtis P S, Vogel C S, Gough C M, et al. Respiratory carbon losses and the carbon-use efficiency of a northern hardwood forest, 1999—2003[J]. *New Phytologist*, 2005,167(2):437-456.
- [29] Li P, Wang J, Liu M, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015[J]. *Catena*, 2021,203:105331.
- [30] 徐虹,刘琴.2001—2019年云南省植被NDVI变化及其气候因子的关系[J].水土保持研究,2022,29(1):162-168.
- Xu H, Liu Q. Analysis of vegetation NDVI dynamic and its relationship with climatic factors in Yunnan Province during 2001—2019[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2022,29(1):162-168.