姚侠妹,李蕙竹,陆瑶涵,等.淮河生态经济带植被碳水利用效率时空变化及其影响因子分析[J].华中农业大学学报,2026,45(1):103-116.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.010

淮河生态经济带植被碳水利用效率时空变化及其影响因子分析

姚侠妹[1],李蕙竹[1],陆瑶涵[1],偶春[2],姚晓洁[1],冀凤全[1]

1.安徽建筑大学建筑与规划学院,合肥 230601; 2.阜阳师范大学生物与食品工程学院,阜阳 236037

摘要 为明确区域植被碳-水利用效率的时空演变及其气候响应机制,揭示典型生态过渡带碳-水过程的动态机制,基于2000—2020年MODIS遥感数据,依托Google Earth Engine平台,结合趋势分析、变异系数、重标极差分析(R/S)及偏相关方法,解析淮河生态经济带植被碳利用效率(carbon use efficiency,CUE)与水分利用效率(water use efficiency,WUE)的时空演变特征及其对气候因子的响应机制。结果显示:研究区域的CUE与WUE年均值分别为0.51和0.75 g/(m²·mm),CUE总体呈波动下降趋势,WUE则波动上升,空间上CUE呈东高西低格局,WUE高值区与CUE相似,低值区域主要分布于中北部与中南部。WUE改善区域占比(32.91%)显著高于CUE(13.87%)。R/S分析预测未来63.41%的区域CUE将呈良性发展趋势,WUE良性发展区占比为36.43%。CUE与气温、日照时数呈负相关关系,与降水和土壤湿度呈正相关关系;WUE则与气温呈正相关关系,与降水、日照时数和土壤湿度呈负相关关系,降水和温度的影响存在显著的空间异质性。

关键词 碳利用效率; 水利用效率; 气候响应; 时空演变; 生态过渡带; 淮河生态经济带

中图分类号 Q948;X171.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0103-14

在气候变化深刻重塑地球表层过程的时代背景下,陆地生态系统作为碳汇和水分调节的重要载体,其碳-水循环的耦合机制及对气候变化的响应特性,现已成为生态学研究的热点方向之一[1-2]。植被作为连接生物地球化学循环与大气过程的关键界面,通过碳同化和水分蒸散过程共同调节着生态系统功能,并可能对区域乃至全球气候系统产生潜在反馈[3-4]。研究表明,陆地生态系统每年可吸收约30%的全球人为碳排放[5],但其长期稳定性正受到极端气候频发和人类干扰增强等因素的挑战。

碳利用效率(carbon use efficiency,CUE)和水分利用效率(water use efficiency,WUE)是衡量生态系统碳水过程的重要参数,分别反映光合产物的分配特征与单位蒸散水分的碳固定能力。二者不仅各自能够揭示碳循环和水循环的动态特征,还在相互作用中影响生态系统碳汇效应的强弱与区域水热格局的稳定性。因此,同时探究CUE与WUE的变化规律,可从碳与水双重维度理解生态系统对气候变化的响应机制,避免单一指标研究的片面性,对于提升碳-水协同调控认知具有重要意义。

在研究手段方面,已有学者从站点尺度的涡度协方差观测,到过程模型(如CEVSA、CASA等)模拟,再到遥感数据的大尺度反演开展探索。涡动通量观测精度高,但受限于站点分布,难以推广至大范围区域;模型模拟能够覆盖较广的空间范围,但参数不确定性强[6-7]。相比之下,遥感数据在时间连续性与空间完整性方面具有明显优势[8],已成为碳水效率研究的重要数据来源。基于不同数据手段的实证研究表明,CUE与WUE在时间序列和空间格局上均呈现出一定规律性及显著差异。例如,袁旻舒等[9]基于CMIP5情景分析指出未来气温升高可能降低CUE,而降水增加则有利于其提升;张远东等[10]揭示西南地区WUE长期下降趋势;刘宪锋等[11]结合遥感与模型发现黄土高原WUE整体呈增长态势。空间分布方面,Marjanovic等[12]利用MODIS数据揭示了森林生态系统CUE的差异性;路浩等[13]、李肖娟

收稿日期:2025-07-18
基金项目:安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKY2023D023)
姚侠妹,E-mail:yaoxiamei@126.com
通信作者:冀凤全,E-mail:jifq@ahjzu.edu.cn

等[14]、仇宽彪等[15]、Xia等[16]发现WUE在不同区域和植被类型中差异显著，干旱半干旱区普遍偏低，而水热条件较优的地区则相对较高。然而，当前多数研究仍以单一指标为主，系统探讨CUE与WUE耦合特征及其协同变化机制的研究仍较少，区域尺度的长期综合评估尚不充分。

淮河生态经济带是我国东部重要的生态过渡带，不仅连接南北气候区，也是国家推进绿色发展和生态文明建设的重点区域。在气候变化与人类活动的共同作用下，该区域虽生态系统类型丰富、植被修复基础较好，但其生态系统服务功能仍承受着一定压力。具体表现为干旱、高温等极端天气增多、水源涵养能力下降，碳储潜力出现波动[17]。近年来，区域内相继实施了退耕还林、人工造林和草地修复等生态修复工程，这些措施在增强植被覆盖率和固碳能力[18]的同时，也可能扰动水分利用过程，从而影响碳水关系的稳定性[19-21]。本研究以淮河生态经济带为研究对象，利用2000—2020年MODIS遥感数据获取该区域GPP、NPP与ET等关键生态变量，结合气象、水文及地形等多源驱动因子，探究植被碳水利用效率的时空变化规律及其控制机制，以期揭示典型生态过渡带碳-水过程的动态机制，为区域生态管理与可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

淮河生态经济带地处长江与黄河两大流域之间（30°55′～36°36′N，111°55′～121°25′E），区域的总面积约为26.3万km²，整体海拔较低，地形以平原为主，约占区域总面积的2/3；东北部、西部及西南部边缘则以丘陵和山区为主，约占1/3。在土地利用类型中，耕地占比最高，达80.1%；林地和草地主要分布于南部与西部，分别占2.1%和8.2%；建设用地广泛分布，占比约6.3%；而水域主要分布于东部，该部分未利用土地面积不足2.5%。该区域位于南北气候过渡带，南部气温与降水相对较高，北部则偏低。多年平均气温为15.5 ℃，降水集中于夏季，多年平均累计降水量744.57 mm。流域东北部为植被覆盖低值区，而高值区多分布在东南部与中部区域，西部区域次之，整体植被覆盖情况较好。

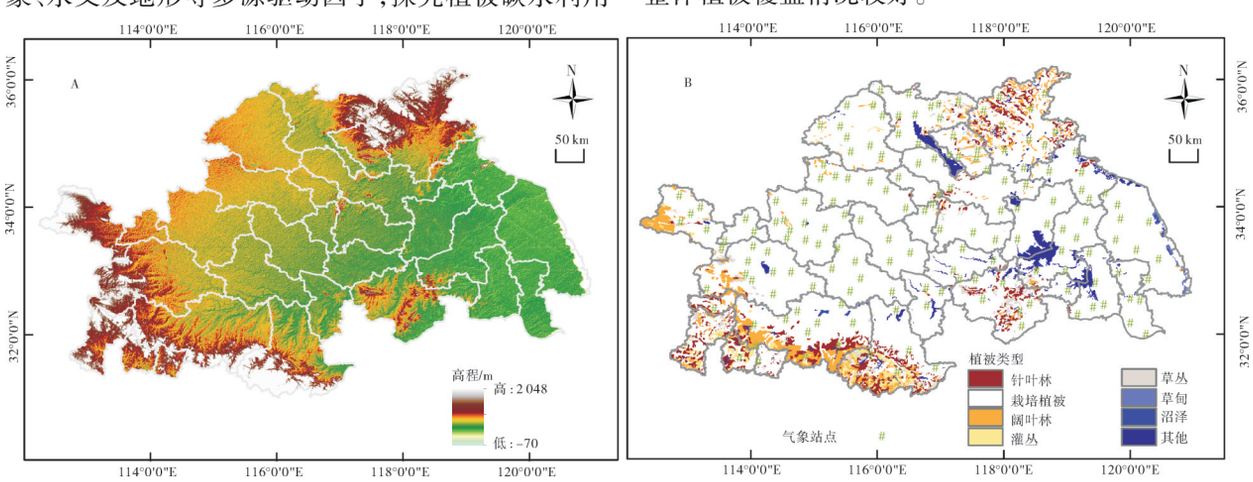


图1 淮河生态经济带数字高程模型（A）和植被类型、气象站点分布（B）

Fig.1 Digital elevation model (A) and vegetation types and meteorological station distribution (B) of the Huaihe River Ecological Economic Belt

1.2 数据来源及处理

1）GPP、NPP和ET数据及植被类型数据。采用的植被总初级生产力（gross primary productivity，GPP）、净初级生产力（net primary productivity，NPP）与蒸散发（evapotranspiration，ET）遥感数据，分别来源于MODIS产品MOD17A2、MOD17A3与MOD16A2，具有500 m空间分辨率和8 d时间分辨率，时间范围涵盖2000—2020年。所有数据提供格式为GeoTIFF，并均使用WGS-84地理坐标系统。为避免传统遥感数据下载过程中常见的重投影与镶嵌等繁琐处理流程，借助Google Earth Engine（GEE）平台，本研究完成了数据的获取、异常值的剔除，以及GPP与ET的年尺度聚合处理，所得结果通过Google Drive以GeoTIFF格式导出。随后，利用ArcGIS 10.8软件，依据研究区矢量边界开展批量掩膜运算，提取研究区空间子集，为后续分析提供数据支撑。

中国科学院资源与环境科学数据中心（http://

www.resdc.cn)所提供的1∶100万植被类型数据集，是本研究植被类型数据的来源。经投影转换、重采样及栅格转矢量等处理，并结合淮河生态经济带的实际植被特征，提取并分类得到研究区内主要的植被类型。

2)气象数据及DEM数据。选取气温、降水、日照时数、土壤湿度共4个气候因子，作为影响植被碳水利用效率变化的变量，数据来源于国家气象信息中心(http://data.cma.cn/)，然后将2000—2020年有缺失或异常值的站点采用线性回归的方式进行插补或剔除。DEM数据来源于GEE平台提供的NASA-DEM 30 m数据集，该数据集在SRTM数据的基础上融合了多源辅助信息并进行了误差校正，高程数据的精确度和可靠性能由此得到大幅提高。为确保其与MODIS数据在行列号、投影方式及空间分辨率上的一致性，原始DEM数据通过ArcGIS开展掩膜提取、投影转换和重采样处理后，最终被规整为1 km的空间分辨率。

1.3　研究方法

1)CUE和WUE计算方法[22]。GPP和NPP分别用于表征植被光合作用产生的总碳量和可供生态系统利用的净碳量，g/m²；本研究GPP和NPP均以碳质量计量。ET表示植被蒸腾作用及土壤蒸发产生的总蒸散量，mm。CUE定义为NPP与GPP的比值，为无量纲指标；WUE定义为NPP与ET的比值，g/(m²·mm)。

2)趋势分析法。采用Theil-Sen斜率估计与Mann-Kendall(MK)检验相结合的方法(Sen+MK法)定量分析近20 a来淮河生态经济带植CUE和WUE的变化趋势。其中，Theil-Sen斜率具有良好的稳健性，能够有效降低数据缺失与异常值对趋势判断的干扰，相较于传统的线性回归与最小二乘法更具可靠性[23]。MK检验作为常用的非参数检验方法，对测量误差不敏感，能够进一步剔除极端值的影响，广泛应用于时间序列趋势识别中[24]。通过MK检验判定CUE与WUE变化趋势的显著性水平，并结合Sen斜率估计其变化速率。具体计算方法如下：

$$\beta=\mathrm{Median}\left(\frac{X_j-X_i}{j-i}\right),\forall j>i \tag{1}$$

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sign}(X_j-X_i) \tag{2}$$

$$\mathrm{sign}(X_j-X_i)=\begin{cases}1, & X_j-X_i>0\\ 0, & X_j-X_i=0\\ -1, & X_j-X_i<0\end{cases} \tag{3}$$

$$z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}} & S>0\\ 0, & S>0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S<0\end{cases} \tag{4}$$

$$\mathrm{var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{5}$$

式(1)～(5)中，β表示所有样本对斜率的中位数，用于衡量序列整体变化趋势。β的计算是基于每个栅格(像元)的多年时间序列，而非区域均值。当β>0时，表明研究对象呈增长趋势；当β<0时，则表示呈下降趋势。X_i与X_j为第i年与第j年的时间序列值(对应CUE或WUE年度值)，Median为中位数函数，n为样本数据长度，sign为符号函数。

在Mann-Kendall检验中，当标准化统计量z的绝对值满足$|z|>1.65$、1.96或2.58时，序列的变化趋势分别通过了90%、95%和99%置信水平下的显著性检验。本研究采用95%的置信水平作为判断标准[25]。根据检验结果，可将趋势变化划分为5类：极显著增加、显著增加、不显著、显著减少和极显著减少。其中，$|z|\geqslant1.96$与$|z|\geqslant2.58$分别对应0.05与0.01的显著性水平，超过相应阈值时认为原假设不再适用，认为序列存在显著趋势。

3)稳定性分析。变异系数(coefficient of variation，CV；公式中用C_V表示)属于表征数据相对离散程度的统计指标，常用于不同数据序列间变异性的比较。采用CV指标评估淮河生态经济带植被CUE和WUE的时空波动特征，以量化其稳定性水平。

$$C_V=\frac{\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})}{n-1}}}{\bar{x}} \tag{6}$$

式(6)中，$\bar{x}$为CUE或WUE均值，n为时间序列长度，x_i为第i年的CUE或WUE值。CV值越小，意味着时间维度上的波动程度越低，系统稳定性越强；反之，波动则较为显著，稳定性也相对较差。

4)变化持续性及未来发展趋势分析。Hurst指数(H)常用于衡量时间序列变化趋势的可持续性，可用于植被动态的未来演变预测，且与实地监测或长期序列变化趋势具有一致性。本研究引入重标极差(R/S)分析方法，计算CUE与WUE的Hurst值，以预测淮河生态经济带植被碳水利用效率未来的变化趋势。若H值小于0.5，序列便具有反持续性，其未来变化方向或许与当前趋势相悖；H值等于0.5时，

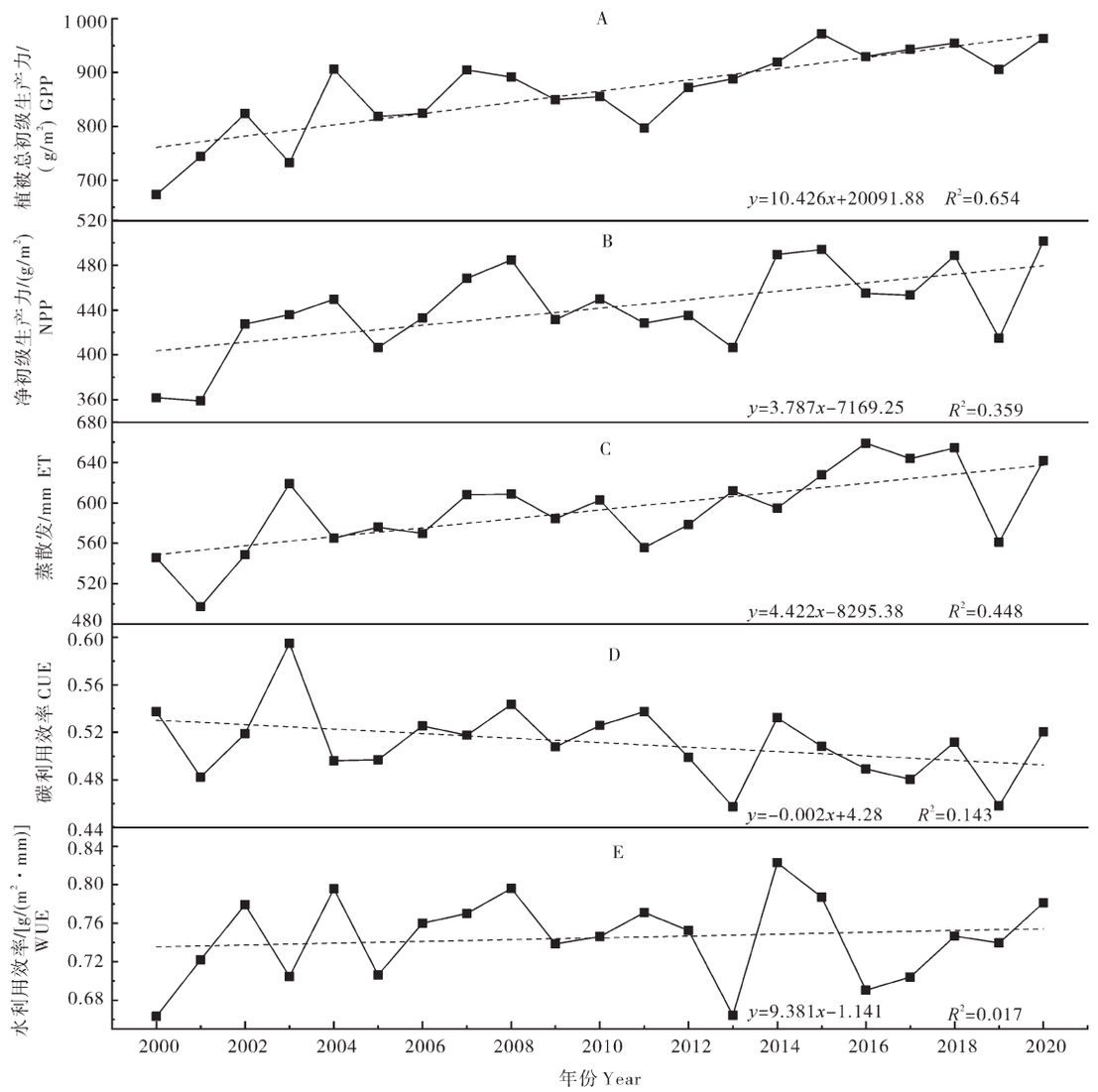
序列呈现出随机过程的特征；当H值大于0.5，意味着序列具备持续性，未来趋势很可能延续当前的变化方向。相关计算方法参见文献[26]。

5)相关性分析。在多变量相关性分析中，各因素间往往存在复杂的相互作用，单一变量的变化可能受到其他多个变量的共同影响，则变量之间的真实联系难以通过简单的线性相关系数进行表征。为更客观地识别气象因子对植被碳水利用效率(CUE与WUE)的独立作用，引入偏相关分析进行深入探讨。偏相关分析法作为揭示变量间本质关联的重要工具[27]，能够在排除其他变量线性效应的前提下，度量目标变量间的纯线性关系。本研究将CUE和WUE设为响应变量，在依次控制气温、降水、日照时数及土壤湿度等变量后，计算其偏相关系数，从而定量评估各气象因子对植被碳水利用效率变化的独立影响程度，并通过双侧t检验判断其显著性水平。具体计算方法参见文献[28]。

2 结果与分析

2.1 淮河生态经济带植被碳水利用效率时空演变特征

1)时间变化特征。2000—2020年淮河生态经济带GPP、NPP与ET，在年际尺度上的年增长速率分别为10.43 g/(m²·a)、3.79 g/(m²·a)和4.42 mm/a，整体呈上升趋势，这一特征可在图2中得到体现。其中，GPP与NPP分别增加290.05、139.54 g/m²，ET增加96.18 mm。这说明淮河生态经济带生态修复措施得到有效推进，植被生长状况良好。



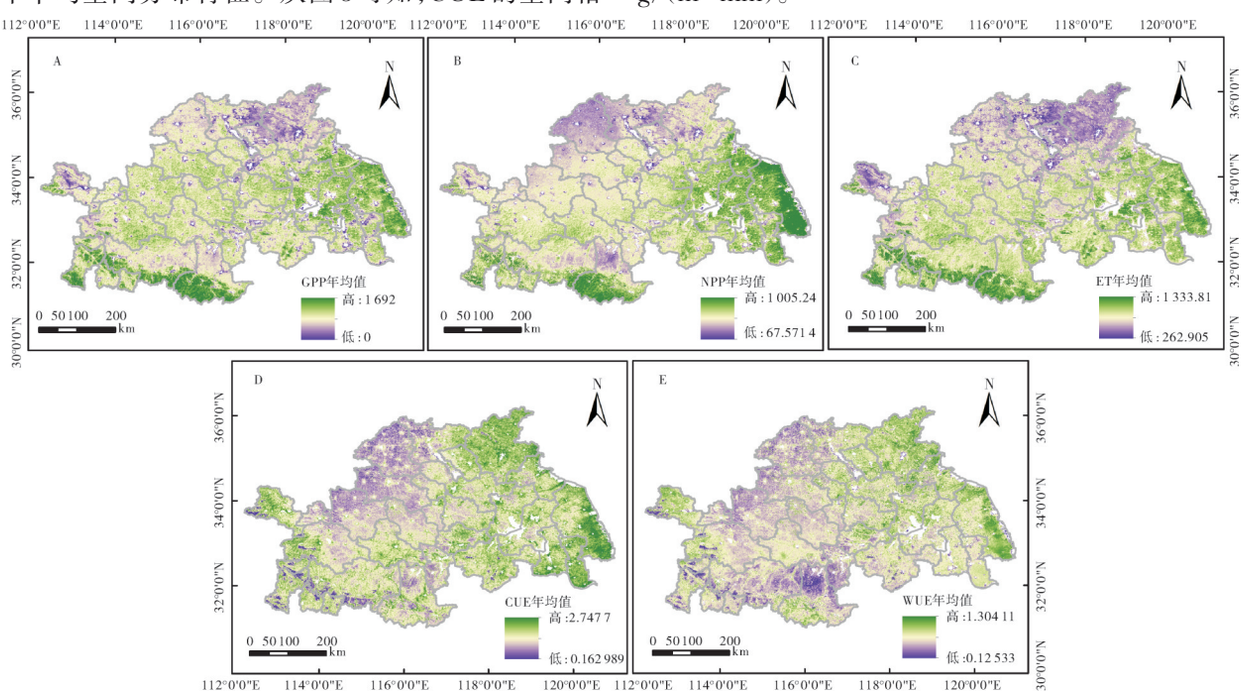
A:GPP;B:NPP;C:ET;D:CUE;E:WUE.

图2 淮河生态经济带2000—2020年植被GPP、NPP、ET、CUE、WUE线性变化趋势

Fig.2 Variation of NPP, GPP, ET, CUE and WUE in the Huaihe River Ecological Economic Belt from 2000 to 2020

统计 2000—2020 年淮河生态经济带 CUE 与 WUE 的多年平均值(图 2)显示，CUE 整体呈波动下降趋势，其年均变化率为－0.0017/a，均值为 0.51；WUE 则表现为波动上升，线性递增率为 6.57 g/(m²·mm·a)，年均值为 0.75 g/(m²·mm)。综合分析可知，二者年际变化均不显著，整体呈现相对稳定状态。

2)空间分布特征。淮河生态经济带在 2000—2020 年间的 NPP、GPP 和 ET 的总均值分别为 441.61 g/m²、865.24 g/m²、593.00 mm，3 个植被因子具有相似的空间分布特征，其低值区主要位于北部山东段，高值区主要位于东南部江苏段和西南部湖北段。图 3 呈现了 2000—2020 年淮河生态经济带植被碳利用效率(CUE)与水分利用效率(WUE)的多年平均空间分布特征。从图 3 可知，CUE 的空间格局整体表现为“东高、中部低、西侧交错分布”，具体来看，CUE 值超过 0.5 的区域集中分布在研究区东部及西部边缘，占总面积的 58%；CUE 介于 0.3～0.5 的区域主要位于中部地区，占比约 41%；统计数据显示，研究期内淮河生态经济带植被 CUE 的平均值达 0.51，空间分异特征相对较弱；其中，CUE 值低于 0.3 的区域占比尚不足 1%，属于极少数分布。相较于 CUE，WUE 的空间分布差异性则更为突出。图 3 显示，WUE 低值区集中于中北部及中南部地区，多年平均值低于 0.68 g/(m²·mm)；高值区则多分布于东部边缘地带，WUE 普遍高于 0.77 g/(m²·mm)，与 CUE 的高值区分布基本一致。整体来看，研究期内淮河生态经济带植被 WUE 的区域平均值为 0.75 g/(m²·mm)，最大值与最小值之间的差异可达 1.1 g/(m²·mm)。



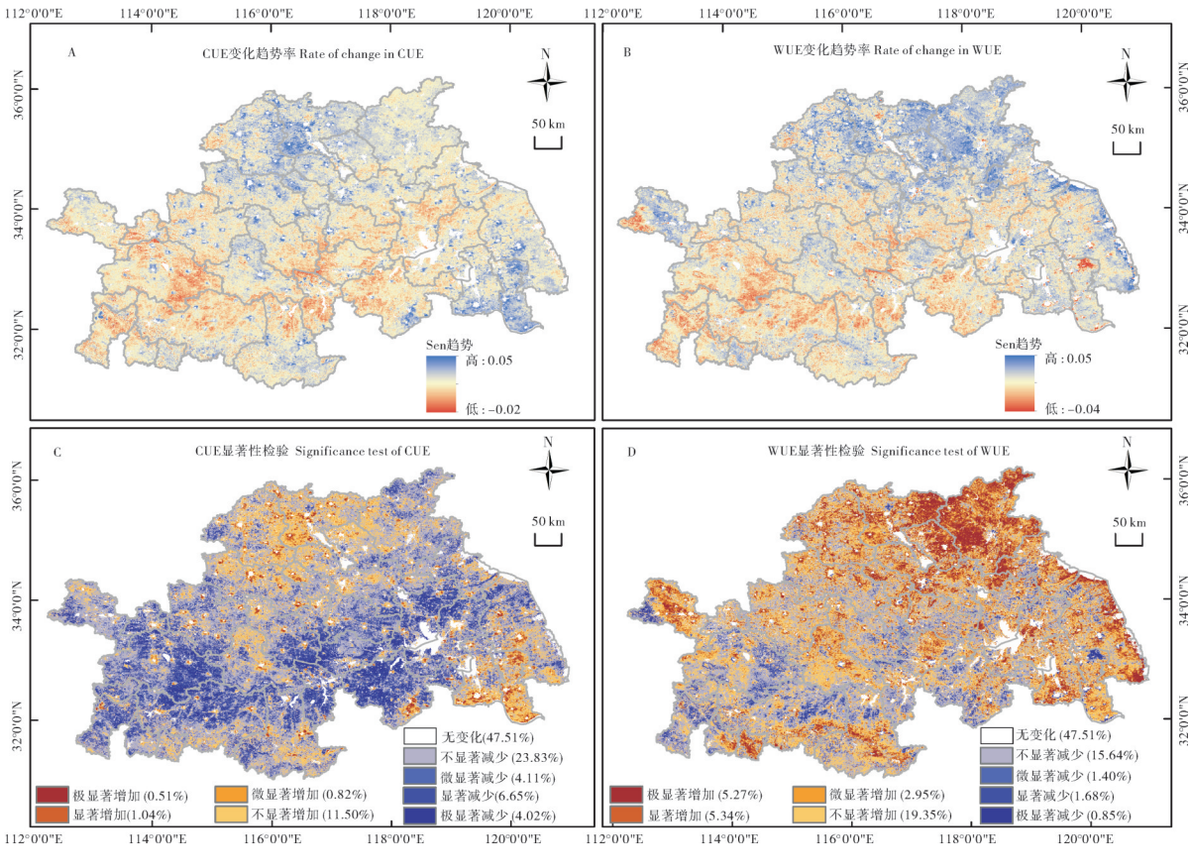
A：GPP；B：NPP；C：ET；D：CUE；E：WUE.

图 3　淮河生态经济带 2000—2020 年植被 GPP、NPP、ET、CUE、WUE 年均值空间分布

Fig.3　Spatial distribution of the average annual values of vegetation GPP，NPP，ET，CUE and WUE in the Huaihe River Ecological Economic Belt from 2000 to 2020

3)空间变化特征。植被 CUE 和 WUE 的线性变化速率(β)，通过 Sen 趋势分析方法开展统计后的结果(图 4)表明，CUE 的趋势变化范围为－0.02～0.05/a，区域平均速率为－0.002/a，整体呈微弱下降趋势。相比之下，WUE 的变化幅度分布在－0.04～0.05 g/(m²·mm·a)，其中超过 90% 的区域 β 值集中在－0.009～0.009 g/(m²·mm·a)。

借助 Mann-Kendall 检验对淮河生态经济带植被 CUE 与 WUE 的变化趋势进行显著性分析。同时，为开展空间对比研究，将研究区域划分为 9 个子区(表 1)，相应分析结果表明，植被 CUE 在空间上呈现出明显的异质性特征，其中 13.87% 的区域表现为上升趋势，43.61% 则呈现下降趋势(图 4)。淮河生态经济带中北部和东南部区域 CUE 增加趋势较为突



A：CUE变化趋势率 Rate of change in CUE；B：WUE变化趋势率 Rate of change in WUE；C：CUE显著性检验 Significance test of CUE；D：WUE显著性检验 Significance test of WUE.

图4 淮河生态经济带2000—2020年植被CUE、WUE空间动态（A，B）及显著性检验（C，D）

Fig.4 Spatial dynamics（A，B）and significance test（C，D）of vegetation CUE and WUE in the Huaihe River Ecological Economic Belt from 2000 to 2020

表1 Mann-Kendall检验方法显著性统计

Table 1 Mann-Kendall test method significance statistics

β	z	趋势类别 Trend categories	趋势特征 Trend characteristics
>0	>2.58	4	极显著增加 Extremely significant increase
	(1.96,2.58]	3	显著增加 Significant increasing
	(1.65,1.96]	2	微显著增加 Slightly significant increase
	≤1.65	1	不显著增加 Non-significant increase
0	z	0	无变化 No change
<0	≤1.65	−1	不显著减少 Non-significant decrease
	(1.65,1.96]	−2	微显著减少 Slightly significant decrease
	(1.96, 2.58]	−3	显著减少 Significant decrease
	>2.58	−4	极显著减少 Extremely significant decrease

出，其中极显著增加（$P<0.01$）和显著增加（$P<0.05$）的区域主要集中于山东段和江苏段，总面积分别为1 341.3、2 753.2 km^2。流域南侧集中分布着植被CUE极显著减少（$P<0.01$）与显著减少（$P<0.05$）的区域，其中，安徽段和河南段的减少趋势表现最为突出。植被CUE呈极显著减少和显著减少总面积分别约为10 572.6、17 489.5 km^2。植被WUE的增加区域在研究区总面积中占比32.91%，相较于植被CUE，其改善趋势更为显著。空间分布上，植被WUE极显著增加和显著增加的区域主要集中于山东段，同时在安徽段南侧、江苏段东侧和河南段西北部呈零星分布，总面积分别为13 860.1、14 044.2 km^2。值得注意的是，极显著减少与显著减少的植被WUE区域，在总面积中占比分别为0.85%和1.68%，这类减少区域数量相对有限，面积分别为2 235.5、4 418.4 km^2，主要零散分布于河南、湖北、安徽和江苏等区段。

2.2　淮河生态经济带植被 CUE 和 WUE 稳定性分析

2000—2020 年淮河生态经济带植被 CUE 与 WUE 的波动特征及其变异系数(CV)分析结果见图 5。由图 5 可知，CUE 的 CV 值范围为 0.024～1.634，平均值为 0.101，整体呈现中等波动水平。从空间分布看，CUE 变异系数低于 0.15 的区域约占 91.35%，这类区域的主要植被类型为栽培植被；研究区西侧及西南部大部分地区的 CV 值为 0.15～0.20，植被类型以阔叶林和栽培植物为主；淮河生态经济带西南部主要有呈零星分布的 CV 值大于 0.20 的高波动区域，这类区域在研究区总面积中占比仅为 1.49%，总面积约为 3 918.7 km^2。

WUE 变异系数小于 0.10 的区域占比 38.32%，这类区域集中分布于淮河生态经济带东、西、南三侧边缘地带；植被 WUE 变异系数的平均值为 0.118，空间分异特征较为明显，面积约为 100 781.6 km^2；WUE 变异系数处于 0.10～0.15 的区域占比 44.29%，呈现中等波动状态，主要分布于研究区北部和中部地区，面积为 116 490.6 km^2；WUE 变异系数大于 0.15 的区域占比 17.39%，这类区域为高波动区域，其面积约达 45 733.1 km^2。

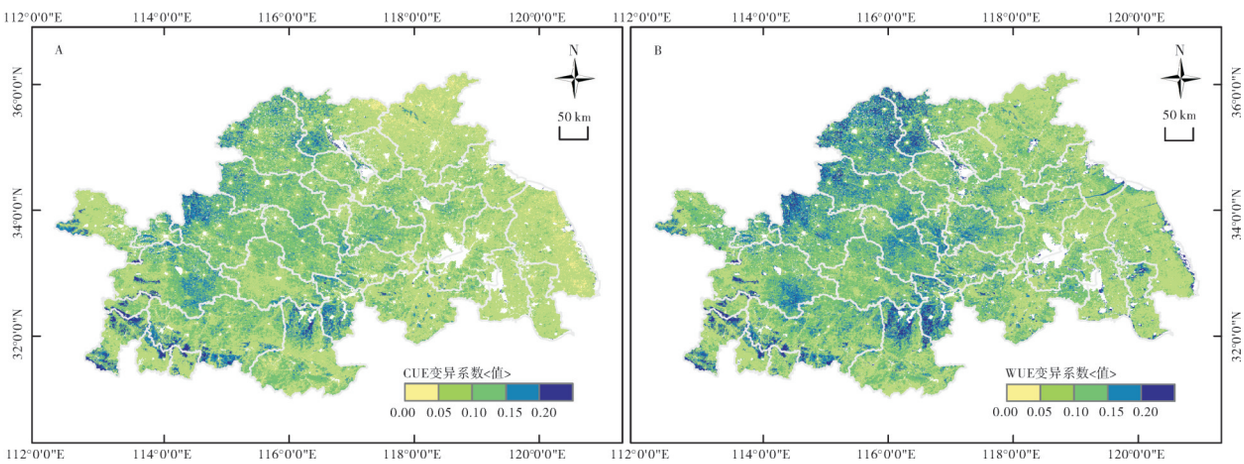


图 5　淮河生态经济带 2000—2020 年植被碳利用效率(A)和水利用效率(B)变异程度

Fig.5　Variation degrees of CUE(A) and WUE(B) in the Huaihe River Ecological Economic Belt from 2000 to 2020

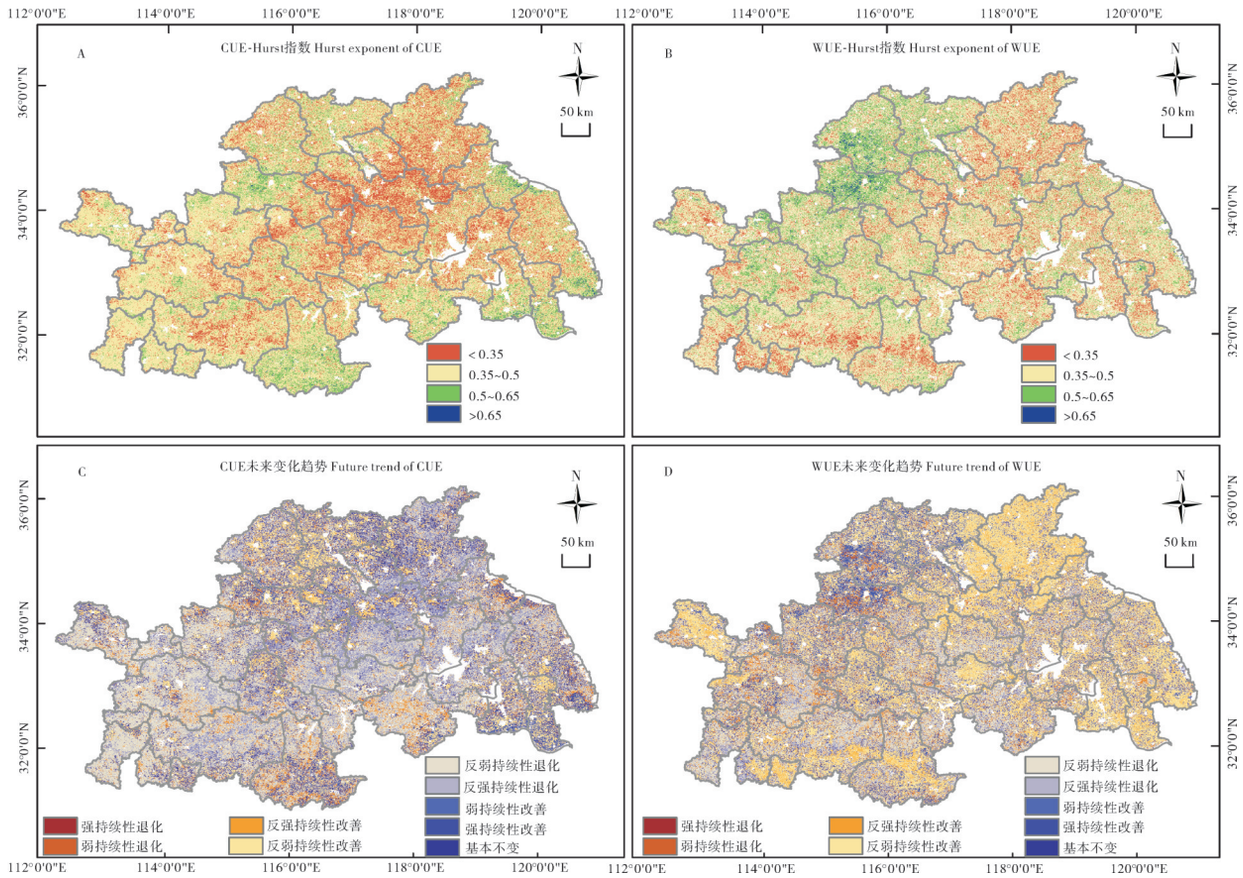
2.3　淮河生态经济带植被 CUE 和 WUE 可持续性分析

通过逐像元计算 Hurst 指数并结合 Sen 趋势分析结果，研究系统评估了淮河生态经济带植被 CUE 和 WUE 的未来变化方向及其与历史趋势的关系(图 6)。由图 6 可知，植被 CUE 的 Hurst 指数均值为 0.412，其中 87.78% 的区域小于 0.5；植被 WUE 的均值为 0.429，其中 82.65% 的区域小于 0.5，表明研究区植被碳水利用效率整体上具有反向持续发展特征。根据 Hurst 指数数值特性，时间序列的持续性可分为 4 个等级：强反向持续性($0<H\leqslant0.35$)、弱反向持续性($0.35<H\leqslant0.50$)、弱同向持续性($0.50<H\leqslant0.65$)和强同向持续性($0.65<H\leqslant1$)。结合 Hurst 指数与 Sen 趋势分析的叠加结果，进一步明确了 CUE 与 WUE 的未来演变趋势及其持续强度(表 2)。

空间分布格局显示，淮河生态经济带植被 CUE 未来整体呈现良性发展趋势(占 63.41%)。其中，持续改善的区域占 3.64%，过去退化但未来转为改善的区域占 59.77%，主要分布在淮河流域两侧及研究区西部；而持续退化(6.92%)及由改善转为退化(16.80%)的区域则集中于研究区中北部和东南部。相较之下，植被 WUE 的改善趋势主要分布在流域南北两侧及中北部地区，其中持续改善区域占 9.40%，过去退化但未来转为改善的区域占 27.03%；而持续退化(6.68%)及由改善转为退化(49.67%)的区域多集中于研究区东北部，其空间分布与改善区域形成鲜明对比。

2.4　淮河生态经济带植被 CUE 和 WUE 与气象因子的关系

1)气候因子的年际变化特征。研究证实，气候条件是调控陆地生态系统碳利用效率(CUE)与水分利用效率(WUE)的核心环境要素[30-31]。因此，本研究将气温、降水量、日照时数及土壤湿度确定为淮河生态经济带的主要气候驱动因子，分析其 2000—2020 年间变化趋势，以探讨气候变化对区域植被 CUE 与 WUE 的潜在影响，结果如图 7 所示。由图 7 可知，研究期内，年均气温为 14.89～16.10 ℃，呈上升趋势，增温速率为 0.021 1 ℃/10 a，年均值为



A：CUE-Hurst指数 Hurst exponent of CUE；B：WUE-Hurst指数 Hurst exponent of WUE；C：CUE未来变化趋势 Future trend of CUE；D：WUE未来变化趋势 Future trend of WUE.

图6 淮河生态经济带植被CUE、WUE的Hurst指数与未来变化趋势空间分布图

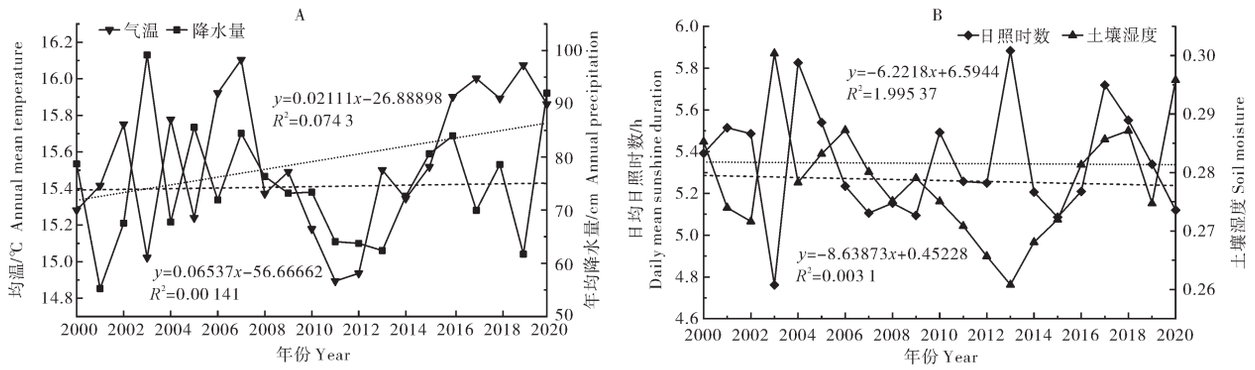
Fig.6 Spatial distribution of Hurst exponents and future trend classification of vegetation CUE and WUE in the Huaihe River Ecological Economic Belt

表2 Hurst指数可持续性分析

Table 2 Hurst exponent sustainability analysis

Sen	Hurst	发展方向 Development direction	未来变化趋势 Future change trend
＜－0.000 5	(0.65,1)	持续退化 Continuous degradation	强持续性退化 Strong persistent degradation
	(0.5,0.65]		弱持续性退化 Weak persistent degradation
≥0.000 5	(0,0.35]	过去改善但未来是退化趋势 Improvement in the past but degradation in the future	反强持续性改善 Strong anti-persisent improvement
	(0.35,0.5]		反弱持续性改善 Weak anti-persistent improvement
＜－0.000 5	(0.35,0.5]	过去退化但未来是改善趋势 Degradation in the past but improvement in the future	反弱持续性退化 Weak anti-persistent degradation
	(0,0.35]		反强持续性退化 Strong anti-persistent degradation
≥0.000 5	(0.5,0.65]	持续改善 Continuous improvement	弱持续性改善 Weak persistent improvement
	(0.65,1)		强持续性改善 Strong persistent improvement
[－0.000 5,0.000 5)		基本不变 Nearly stable	基本不变 No obvious change

注：Hurst指数的分级依据相关研究对时间序列持续性特征的划分标准；Sen趋势用于表征历史变化方向，二者结合可用于推断未来发展趋势[29]。Note：The classification of the Hurst exponent follows criteria reported in previous studies for characterizing the persistence of time series. Sen's slope is used to represent the direction of historical change, and the combination of the two methods can be applied to infer future development trends[29].



A：气温、降水量趋势特征 Trend characteristics of temperature and precipitation；B：日照时数、土壤湿度趋势特征 Trend characteristics of sunshine duration and soil moisture.

图 7　2000—2020 年淮河生态经济带气候变化趋势特征

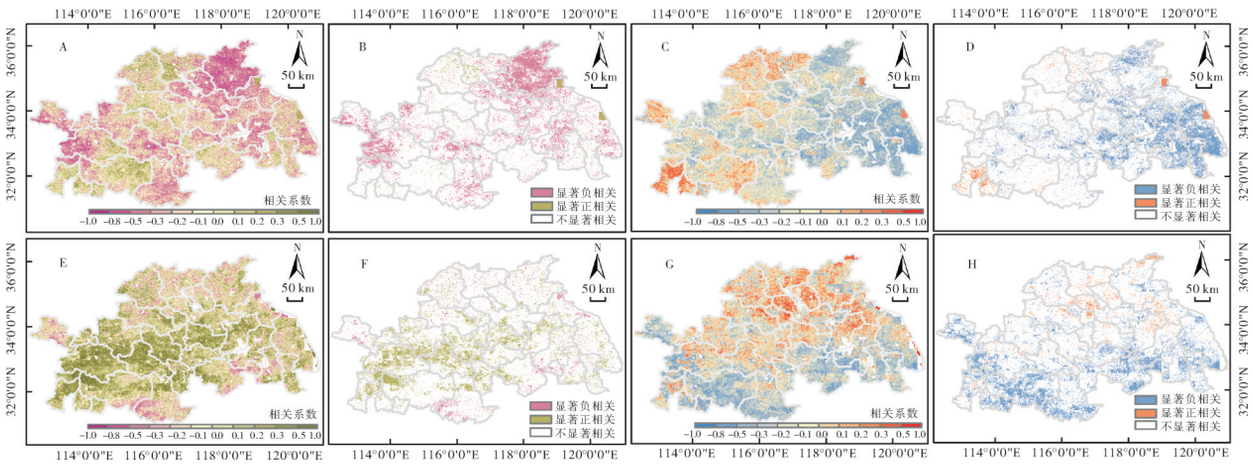
Fig.7　Trends of climate change in Huaihe River Ecological Economic Belt from 2000 to 2020

15.547 ℃。年降水量变化相对平缓，波动范围为552.52～991.63 mm，均值为744.18 mm，变化速率为0.653 7 mm/10 a。其中，2001年降水量最低，2011—2013年降水持续偏低，与同期植被CUE与WUE的低值阶段相一致。2003年为降水峰值年份，是1961年以来全国第2个显著多雨年，淮河流域及安徽、江苏等地区降水量较常年同期偏多1～2倍。日照时数作为影响植物光合作用的重要气候因子，研究区日均日照时数在4.762～5.883 h，多年平均值为5.352 h，呈显著下降趋势，变化速率为－6.221 8 h/10 a。其中，2002—2006年波动较为剧烈。土壤湿度亦表现出下降趋势，变化速率为－8.638 7，21年间平均值为0.279，高值年份分别为2003年(0.300)与2020年(0.296)。从空间格局来看，气温与降水总体呈西南高、东北低分布趋势；日照时数由东南向西北递减，土壤湿度则表现为东北高、西南低的特征。综合气温、降水、日照时数与土壤湿度多个气候要素的变化趋势，表明研究区整体气候环境正逐步向“暖湿化”方向发展。

2)植被碳水利用率与气候因子的相关性。由图8可知，CUE与气温主要呈显著负相关($P<0.05$)，偏相关系数范围为－0.995～－0.985，平均值为－0.484。呈显著负相关区域主要分布于淮河生态经济带东南部区域，如盐城、泰州、扬州、淮安、宿迁、滁州、蚌埠、宿州、淮南等地，面积约为120 020 km²；显著正相关区域较少，面积不足5%，主要分布于西部及北部零星区域，约2 167 km²。WUE与气温间的偏相关系数取值范围介于－0.995～0.990，平均值为0.386，整体呈现以正相关为主的特征。显著正相关($P<0.05$)区域主要集中在淮河生态经济带东北部的山东省临沂市，其他各省份也均有分布，总面积约为54 780 km²。而显著负相关区分布较分散，总面积约为5 858 km²。

植被CUE的偏相关系数取值介于－0.895～0.927，平均值为0.473。显著正相关($P<0.05$)区域集中于淮河生态经济带中高纬度地区，如山东段的山地丘陵地带、平顶山市、桐柏山腹地、随县丘陵区等地，总面积约为84 490 km²；显著负相关地区零星分散于研究区各地，面积约1 818 km²。植被WUE与降水的偏相关系数介于0.895～0.895，区域平均值为－0.105。显著正相关区域主要集中于淮河生态经济带西南部，植被类型为针叶林和阔叶林的地区，以及零星分布于西北部地区，总面积为19 780 km²；显著负相关区域总面积约30 920 km²，其核心分布区为淮河生态经济带平原地区，植被以栽培植物为主，东北部山地亦有分布(图8)。

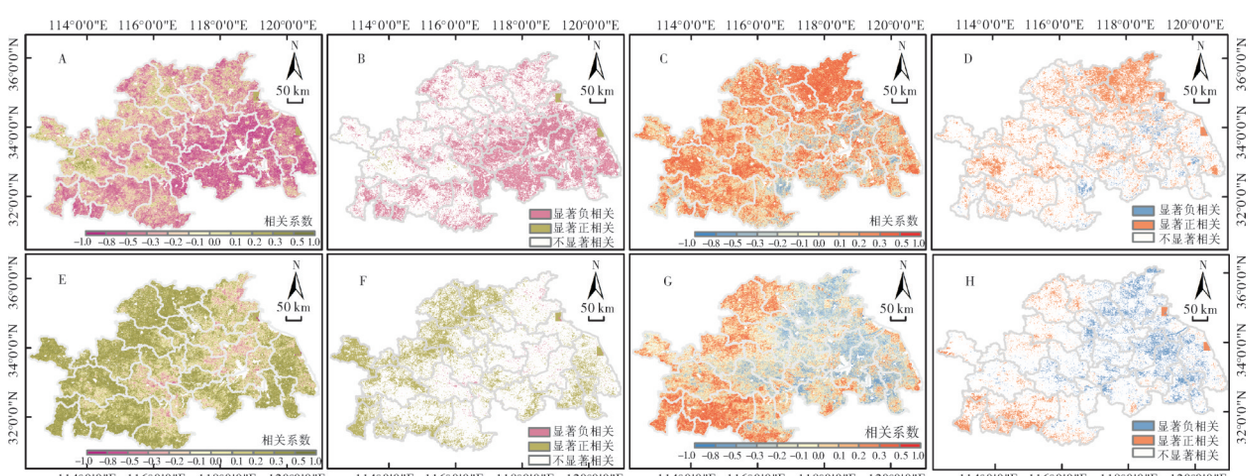
日照时数与植被CUE的偏相关系数介于－0.986～0.974，平均值为－0.413，以显著负相关关系为主，其空间特征呈现为“东北强，中部和西南弱”(图9)。植被CUE与日照时数呈显著负相关区域面积为61 330 km²，集中于山东省临沂市、河南省桐柏县和平顶山市南部。植被WUE与日照时数的偏相关系数在－0.986～0.987波动，平均值为－0.408，整体以显著负相关为主，其空间特征呈现为“东部强，中北部和中南部弱”。而呈显著正相关的区域占比相对较少，面积达4 240 km²，在研究区内呈零星分布。其中，呈显著负相关区域面积为60 320 km²，主要分布于江苏段盐城市、泰州市、扬州市，安徽段滁州市北部和蚌埠市，山东段临沂市北部等地。呈显著正相关区域集中分布于湖北段随州市等地，面积为4 970 km²。



A:CUE与气温偏相关系数 Partial correlation coefficient between CUE and temperature;B:CUE与气温偏相关显著性 Significance of the partial correlation between CUE and temperature;C:WUE与气温偏相关系数 Partial correlation coefficient between WUE and temperature;D:WUE与气温偏相关显著性 Significance of the partial correlation between WUE and temperature;E:CUE与降水偏相关系数 Partial correlation coefficient between CUE and precipitation;F:CUE与降水偏相关显著性 Significance of the partial correlation between CUE and precipitation;G:WUE与降水偏相关系数 Partial correlation coefficient between WUE and precipitation;H:WUE与降水偏相关显著性 Significance of the partial correlation between WUE and precipitation.

图8 2000—2020年淮河生态经济带植被CUE、WUE与气温、降水的偏相关系数及显著性分析

Fig.8 Partial correlation and significance analysis between vegetation CUE, WUE and temperature/precipitation in the Huaihe River Ecological Economic Belt from 2000 to 2020



A:CUE与日照时数偏相关系数 Partial correlation coefficient between CUE and sunshine duration;B:CUE与日照时数偏相关显著性 Significance of the partial correlation between CUE and sunshine duration;C:WUE与日照时数偏相关系数 Partial correlation coefficient between WUE and sunshine duration;D:WUE与日照时数偏相关显著性 Significance of the partial correlation between WUE and sunshine duration;E:CUE与土壤湿度偏相关系数 Partial correlation coefficient between CUE and soil moisture;F:CUE与土壤湿度偏相关显著性 Significance of the partial correlation between CUE and soil moisture;G:WUE与土壤湿度偏相关系数 Partial correlation coefficient between WUE and soil moisture;H:WUE与土壤湿度偏相关显著性 Significance of the partial correlation between WUE and soil moisture.

图9 2000—2020年淮河生态经济带植被CUE、WUE与日照时数、土壤湿度的偏相关系数及显著性分析

Fig.9 Partial correlation and significance analysis between vegetation CUE, WUE and sunshine duration/soil moisture in the Huaihe River Ecological Economic Belt from 2000 to 2020

土壤湿度与植被CUE的偏相关系数范围为−0.804～1.000,平均偏相关系数为0.336,整体以显著正相关为主要特征,其空间分布呈现“中部强,南北弱”的特征。呈显著正相关的面积为45 900 km^2,主要分布于淮河上端北部和中段两侧地区。呈显著负相关面积为8 250 km^2,零星分布于各个省市。植被WUE与土壤湿度之间的偏相关系数分布范围为−0.883～1,平均值为−0.345,整体表现为显著负相

关关系。其中，空间分布特征呈现出“南强北弱”的格局，即南部地区的负相关性更为显著。此外，植被CUE与土壤湿度呈显著负相关的区域面积达55 670 km²，主要分布于淮河流域南部。呈显著正相关区域面积为7 032 km²，零星分布于淮河生态经济带东北部及中部地区。

3　讨　论

3.1　淮河生态经济带植被CUE和WUE的分布特征及其变化

基于2000—2020年MODIS遥感数据对淮河生态经济带CUE和WUE进行分析发现，NPP、GPP和ET作为驱动CUE与WUE变化的重要生态参数，其长期演变趋势对碳水利用效率具有关键作用。研究期内，CUE整体呈轻微下降趋势，主要归因于GPP增长幅度普遍高于NPP，导致单位GPP所转化的NPP比例下降，从而削弱了碳利用效率。与此同时，在干旱或养分受限等生态胁迫条件下，植被倾向于采取资源保存策略，优先积累非结构性碳水化合物和营养物质，抑制新组织合成和光合作用效率，进一步降低了CUE水平。

与CUE不同，WUE的整体上升趋势可能与近年来退耕还林、湿地恢复、水土保持等生态修复工程的持续推进密切相关，这些措施有效改善了植被覆盖状况与生态系统水分调控能力，从而提升了单位耗水所获取的碳收益。相关研究亦指出，生态恢复是促进区域尺度WUE提升的重要途径[32]。

空间分布上，淮河生态经济带CUE呈现“东部较高—中部较低—西部分布不均”的格局，超过90%的区域CUE值高于0.3，表明区域整体具有较强的碳同化潜力。东北部地区受较低气温条件制约，自养呼吸作用相对较弱，CUE水平较高；东南部则因光、热、水资源配置较为协调，形成了稳定的高值区。相较之下，西南部部分高海拔区域在2009—2013年干旱事件影响下，CUE空间异质性增强。趋势持续性分析显示，63.41%的区域CUE具有正向延续性，高值区变异系数较低，反映出较强的生态系统稳定性，与全国尺度研究结论一致。

WUE在空间上表现为“东部偏高—中部偏低—西部交错分布”的特征，其中东部生态工程密集WUE提升尤为显著。未来趋势预测表明，约36.43%的区域WUE仍将保持增长态势，主要分布于流域南北两侧及中北部地区，可能受到适宜水热条件与大气CO_2浓度升高的共同影响。相反，东北部局地WUE下降趋势明显，主要源于气温和降水同步升高导致ET增强，而NPP增长相对滞后，从而降低了单位耗水的碳收益。

3.2　淮河生态经济带植被CUE、WUE对气候因子的响应

气候因子对植被CUE与WUE的影响表现出显著差异。总体来看，2000—2020年间淮河生态经济带植被CUE与气温呈显著负相关，这一结果与已有研究结论一致[33-35]。气温升高不仅增强植被呼吸消耗，还可能在超过生理阈值后抑制光合作用效率，限制生物量积累[36]；在城市化程度较高的区域，热岛效应进一步放大了CUE对高温的敏感性[37]。同时，CUE与降水在约32.13%的区域呈显著正相关，主要分布于中北部和西部水分受限地区，表明适度降水可有效缓解水分胁迫并提升碳利用效率。

相比之下，植被WUE与气温在大多数区域呈正相关关系。这可能与淮河生态经济带降水条件较好、河网密集及集约化灌溉体系覆盖率较高（约56%）有关，高温条件下水分供给相对充足，有效缓解了蒸腾胁迫[38]。而WUE与降水总体呈负相关，主要由于雨季降水高度集中且强度较大，持续阴雨条件降低了太阳辐射和光合有效辐射，抑制GPP增长，同时ET维持在较高水平，从而降低了WUE。这一现象揭示了湿润农业区生态系统对极端降水事件的敏感性。

进一步分析发现，CUE与日照时数总体呈负相关，而与土壤湿度呈正相关。长日照往往伴随高温条件，易引发光抑制效应并增强呼吸消耗，从而降低CUE；较高的土壤湿度则有助于缓解水分胁迫、提升气孔导度和光合效率。相较之下，WUE在多数区域与日照时数和土壤湿度均呈负相关，可能与气孔调节、根系缺氧及养分吸收受限等生理过程有关。

需要强调的是，单一气候因子在不同情境下可能对CUE与WUE产生相反效应。例如，大气CO_2浓度升高通常通过降低气孔导度减少蒸散，从而提升WUE，但其诱发的增温效应可能在一定程度上抵消这一正向作用[39-40]。这表明植被碳水利用效率的变化是多因子耦合调控的结果，具有显著的非线性与不确定性。

总体而言，2000—2020年间淮河生态经济带植被CUE呈轻微下降趋势，而WUE表现为波动上升，二者在时空格局及对气候因子的响应方向上存在显

著差异。研究结果深化了对气候变化与人类活动共同作用下植被碳水耦合机制的认识，并对区域生态管理具有重要启示：一是针对中北部和东南部CUE退化区域，应加强水肥调控与土壤改良；二是对东北部WUE下降区，应优化水资源利用和农田排水体系；三是通过退耕还林、湿地修复等措施提升“固碳-节水”协同效应；四是推进流域尺度的综合治理与气候适应型管理，以增强区域生态系统的稳定性与可持续发展能力。

参考文献 References

[1] CHAKRABORTY A, SEKHAR M, BHANJA S N, et al. Linking groundwater variability to ecosystem carbon and water use efficiencies across India[J/OL]. Ecological informatics, 2025, 91: 103411 [2025-07-18]. https://doi. org/10.1016/j.ecoinf.2025.103411.

[2] 夏炜祁，张明辉，张安录. 绿色低碳视域下长江经济带耕地生态外溢价值评估及时空变化分析[J]. 华中农业大学学报，2024，43(3)：51-64. XIA W Q, ZHANG M H, ZHANG A L, et al. Assessment of ecological spillover value of cultivated land and its temporal and spatial changes in Yangtze River Economic Belt from a green and low-carbon perspective[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(3): 51-64(in Chinese with English abstract).

[3] BEER C, REICHSTEIN M, TOMELLERI E, et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate[J]. Science, 2010, 329(5993): 834-838.

[4] ZHANG K, KIMBALL J S, NEMANI R R, et al. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration[J/OL]. Scientific reports, 2015, 5: 15956[2025-07-18]. https://doi.org/10.1038/srep15956.

[5] PIERRE F, MICHAEL O S, MATTHEW-W J, et al. Global carbon budget 2022[J]. Earth system science data, 2022, 14(11): 4811-4900.

[6] HEINSCH F A, ZHAO M S, RUNNING S W, et al. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2006, 44(7): 1908-1925.

[7] 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(in Chinese with English abstract).

[8] LI B, HUANG F, QIN L J, et al. Spatio-temporal variations of carbon use efficiency in natural terrestrial ecosystems and the relationship with climatic factors in the Songnen Plain, China [J/OL]. Remote sensing, 2019, 11(21): 2513[2025-07-18]. https://doi.org/10.3390/rs11212513.

[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 M S, LI M X, CHENG H Y, 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(in Chinese with English abstract).

[10] 张远东，庞瑞，顾峰雪，等. 西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应[J]. 生态学报，2016，36(6)：1515-1525. ZHANG Y D, PANG R, GU F X, et al. Temporal-spatial variations of WUE and its response to climate change in Alpine area of southwestern China[J]. Acta ecologica sinica, 2016, 36(6): 1515-1525(in Chinese with English abstract).

[11] 刘宪锋，胡宝怡，任志远. 黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素[J]. 中国农业科学，2018，51(2)：302-314. LIU X F, HU B Y, REN Z Y. Spatiotemporal variation of water use efficiency and its driving forces on the Loess Plateau during 2000—2014[J]. Scientia agricultura sinica, 2018, 51(2): 302-314(in Chinese with English abstract).

[12] MARJANOVIC H, ANIC M, MASA Z O S, et al. Assessing forest productivity (NPP/GPP) estimates from remote sensing, flux measurement and field observations[C]//Egu General Assembly Conference. EGU general assembly conference abstracts. Vienna, Austria: EGU General Assembly, 2015: 11678.

[13] 路浩，安志超，王丽娜，等. 陕西省植被水分利用效率的时空变化特征及影响因素[J]. 水土保持学报，2025，39(4)：91-99. LU H, AN Z C, WANG L N, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of vegetation water use efficiency in Shaanxi Province[J]. Journal of soil and water conservation, 2025, 39(4): 91-99(in Chinese with English abstract).

[14] 李肖娟，张福平，王虎威，等. 黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其与气候因子的关系[J]. 中国沙漠，2017，37(4)：733-741. LI X J, ZHANG F P, WANG H W, et al. Analysis of the spatio-temporal characteristics of water use efficiency of vegetation and its relationship with climate in the Heihe River Basin[J]. Journal of desert research, 2017, 37(4): 733-741(in Chinese with English abstract).

[15] 仇宽彪. 中国植被总初级生产力、蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D]. 北京：北京林业大学，2015. QIU K B. Estimating regional vegetation gross primary productivity (GPP), evapotranspiration (ET), water use efficiency (WUE) and their spatial and temporal distribution across China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015(in Chinese with English abstract).

[16] XIA L, WANG F, MU X M, et al. Water use efficiency of net primary production in global terrestrial ecosystems[J]. Journal of earth system science, 2015, 124(5): 921-931.

[17] 邹泽铎.淮河生态经济带土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[D].开封:河南大学,2023. ZOU Z D.Study on the impact of land use change on the value of ecosystem services in the Huaihe Ecological and Economic Zone[D].Kaifeng:Henan University,2023(in Chinese with English abstract).

[18] FANG J,CHEN A,PENG C,et al.Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J].Science,2001,292(5525):2320-2322.

[19] SUN G,ZHOU G Y,ZHANG Z Q,et al.Potential water yield reduction due to forestation across China[J].Journal of hydrology,2006,328(3/4):548-558.

[20] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water resources research, 2001, 37 (3): 701-708.

[21] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2021.

[22] GENTINE P,GREEN J K,GUÉRIN M,et al.Coupling between the terrestrial carbon and water cycles:a review[J/OL]. Environmental research letters, 2019, 14(8): 083003[2025-07-18].https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab22d6.

[23] YE X C,LIU F H,ZHANG Z X,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.

[24] YIN Y X,XU C Y,CHEN H S,et al.Trend and concentration characteristics of precipitation and related climatic teleconnections from 1982 to 2010 in the Beas River Basin, India[J]. Global and planetary change,2016,145:116-129.

[25] 田智慧,任祖光,魏海涛.2000—2020年黄河流域植被时空演化驱动机制[J].环境科学,2022,43(2):743-751. TIAN Z H,REN Z G,WEI H T.Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J].Environmental science,2022,43(2):743-751(in Chinese with English abstract).

[26] CHAMBERS J Q,TRIBUZY E S,TOLEDO L C,et al.Respiration from a tropical forest ecosystem:partitioning of sources and low carbon use efficiency[J].Ecological applications,2004,14(sp4):72-88.

[27] ZHAO J X,FENG H Z,XU T R,et al.Physiological and environmental control on ecosystem water use efficiency in response to drought across the Northern Hemisphere[J/OL]. Science of the total environment,2021,758:143599[2025-07-18].https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143599.

[28] 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 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].Chinese journal of ecology,2022,41(6):1079-1089(in Chinese with English abstract).

[29] 刘智源,李继红.2000—2020年黑龙江省植被时空变化对气候因子响应[J].森林工程,2024,40(1):85-97.LIU Z Y,LI J H.Responses of temporal and spatial changes of vegetation to climate factors in Heilongjiang Province from 2000 to 2020[J]. Forest engineering,2024,40(1):85-97(in Chinese with English abstract).

[30] DELUCIA E H,DRAKE J E,THOMAS R B,et al.Forest carbon use efficiency:is respiration a constant fraction of gross primary production?[J].Global change biology,2007,13(6):1157-1167.

[31] ZHANG Y J,YU G R,YANG J,et al.Climate-driven global changes in carbon use efficiency[J].Global ecology and biogeography,2014,23(2):144-155.

[32] OGUTU B O,D'ADAMO F,DASH J.Impact of vegetation greening on carbon and water cycle in the African Sahel-Sudano-Guinean region[J/OL].Global and planetary change,2021,202:103524[2025-07-18].https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103524.

[33] 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 Z Q,WEN Z M,LIU Y Y,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(in Chinese with English abstract).

[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].贵阳:贵州师范大学,2023. XIAO B Q. Responses of vegetation carbon and water use efficiencies to climate and land use changes in China's Karst areas[D].Guiyang:Guizhou Normal University,2023(in Chinese with English abstract).

[35] HUANG M T,PIAO S L,CIAIS P,et al.Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes[J].Nature ecology & evolution,2019,3(5):772-779.

[36] 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 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(in Chinese with English abstract).

[37] 杨玉盛.全球环境变化对典型生态系统的影响研究:现状、挑战与发展趋势[J].生态学报,2017,37(1):1-11. YANG Y S. The impacts of global environmental changes on typical ecosystems:status,challenges and trends[J].Acta ecologica sinica,2017,37(1):1-11(in Chinese with English abstract).

[38] KANG S Z,HAO X M,DU T S,et al.Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under

changing environment: from research to practice[J]. Agricultural water management, 2017, 179: 5-17.

[39] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,等.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J].生态学报,2018,38(23):8296-8305. DU X Z, ZHAO X, WANG H Y, et al. Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: a review[J]. Acta ecologica sinica, 2018, 38(23): 8296-8305(in Chinese with English abstract).

[40] 刘玉洁,陶福禄.作物水分利用效率对温度和CO_2浓度升高的响应研究进展[J].地理科学进展,2013,32(3):416-424. LIU Y J, TAO F L. Response of crop water use efficiency to elevated temperature and CO_2 concentration: a review[J]. Progress in geography, 2013, 32(3): 416-424(in Chinese with English abstract).

Spatiotemporal evolution and driving factors of vegetation carbon-water use efficiency in Huaihe River Ecological Economic Belt

YAO Xiamei[1], LI Huizhu[1], LU Yaohan[1], OU Chun[2], YAO Xiaojie[1], JI Fengquan[1]

1. *School of Architecture and Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China*;
2. *College of Biology and Food Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, China*

Abstract Studying the spatiotemporal dynamics of vegetation carbon-water use efficiency and their responses to climatic factors in the context of the "dual-carbon" strategy is essential to enhance the sequestration capacity of carbon in ecosystem. The Google Earth Engine (GEE) platform was used in combination with trend analysis, coefficient of variation, rescaled range (R/S) analysis, and partial correlation methods to investigate the spatiotemporal evolution of vegetation carbon use efficiency (CUE) and water use efficiency (WUE) in the Huaihe River Ecological Economic Belt and the mechanisms of their responses to climate based on MODIS remote-sensing data from 2000 to 2020. The results showed that the multi-year mean value of CUE and WUE in the areas studied was 0.51 and 0.75 g/(m^2·mm). CUE exhibited a fluctuating downward trend, whereas WUE showed a fluctuating upward trend. Spatially, CUE displayed a pattern of higher value in the east and lower value in the west, while the high-value areas of WUE largely coincided with those of CUE, and low-value areas were mainly distributed in the central-northern and central-southern regions. The proportion of areas improved by WUE (32.91%) was significantly higher than that of CUE (13.87%). R/S analysis predicts that 63.41% of regional CUE will show a positive trend of development in the future, while the proportion of areas with favorable development of WUE will be 36.43%. The CUE was negatively correlated with the air temperature and sunshine duration but positively correlated with the precipitation and moisture in soil, whereas the WUE was positively correlated with the air temperature and negatively correlated with the precipitation, sunshine duration, and moisture in soil. It is indicated that there is significant spatial heterogeneity in the effects of precipitation and temperature.

Keywords carbon use efficiency (CUE); water use efficiency (WUE); response to climate; spatiotemporal evolution; ecological transition zone; Huaihe River Eco-economic Belt

(责任编辑:陆文昌)