DOI: 10.20103/j.stxb.202207232112

林子琦,温仲明,刘洋洋,姚宏斌,周荣磊,任涵玉,袁浏欢.基于遥感数据的植被碳水利用效率时空变化和归因分析.生态学报,2024,44(1): 377-391.

Lin Z Q, Wen Z M, Liu Y Y, Yao H B, Zhou R L, Ren H Y, Yuan L H.Spatiotemporal variation and attribution of carbon and water use efficiency in the Yellow River Basin based on remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1):377-391.

基于遥感数据的植被碳水利用效率时空变化和归因 分析

林子琦1,温仲明1,2,*,刘洋洋1,姚宏斌1,周荣磊1,任涵玉1,袁浏欢1

1 西北农林科技大学草业与草原学院,杨凌 712100

2 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,杨凌 712100

摘要:植被碳水利用效率是表征生态系统碳水循环的重要指标。采用 MODIS 数据,利用 Google Earth Engine 平台计算植被碳利 用效率(Carbon Use Efficiency, CUE)与水利用效率(Water Use Efficiency, WUE)。采用趋势分析、变异系数、R/S 分析及偏相关 分析等方法,对 2000—2020 年黄河流域植被 CUE 与 WUE 的时空动态进行分析,并探究水热条件对碳水利用效率的影响。结 果表明:(1)2000—2020 年黄河流域植被碳水利用效率年均值分别为 0.61 和 0.68 gC m⁻² mm⁻¹;研究时限内,植被 CUE 呈波动 下降趋势,而 WUE 呈波动上升趋势。(2)空间上,植被 CUE 呈西高东低分布,WUE 相反。不同土地覆被类型的 CUE 表现为草 地>农田>灌丛>森林;WUE 表现为:农田>森林>草地>灌丛。(3)总体上,黄河流域植被 CUE 与温度呈负相关,与降水呈正相 关;黄河流域北部植被 WUE 与温度和降水均呈正相关关系,黄河流域西南部植被 WUE 与降水负相关;(4)不同土地利用类型 中,草地、森林、农田 CUE 与温度主要呈负相关响应,灌丛 CUE 主要呈正相关响应;黄土高原西北部地区草地 CUE 与降水呈正 相关关系,而在黄河源区草地 CUE 与降水呈负相关关系,农田 CUE 对降水呈现正向反馈。(5)植被 WUE 与温度和降水的关系 存在较强的空间异质性。降水是影响干旱,半干旱地区的草地 WUE 的主导因素,而高海拔地区草地 WUE 与温度、降水均呈负 相关关系;灌丛 WUE 与温度成负相关关系,与降水呈正相关关系;受人类活动影响,农田 WUE 与温度有正相关关系。研究结 果对于深入理解黄河流域植被恢复与气候变化双重背景下区域的植被碳水耦合机理有重要意义。 关键词:碳利用效率;水利用效率;气候变化;土地利用类型;黄河流域

Spatiotemporal variation and attribution of carbon and water use efficiency in the Yellow River Basin based on remote sensing data

LIN Ziqi¹, WEN Zhongming^{1,2,*}, LIU Yangyang¹, YAO Hongbin¹, ZHOU Ronglei¹, REN Hanyu¹, YUAN Liuhuan¹

1 College of Grassland Agriculture, North West Agriculture and Forest University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: The carbon and water use efficiency of vegetation is an important indicator to characterize the carbon-water cycle. In this study, we calculated the vegetation carbon use efficiency (CUE) and water use efficiency (WUE) based on the MODIS products from the Google Earth Engine (GEE) platform. The methods of trend analysis, coefficient of variation, R/S analysis, and partial correlation were used to study the spatiotemporal variations of the CUE and WUE of the Yellow River Basin from 2000 to 2020, as well as how they correlate with temperature and precipitation. The findings show that: (1) In the past 2 decades, the average annual CUE and WUE were 0.61 and 0.68 gC $m^{-2} mm^{-1}$ in the Yellow River Basin; the

基金项目:西北农林科技大学博士科研启动项目(Z1090220148);国家自然科学基金项目(41977077);国家自然科学基金青年基金项目 (42107512)

收稿日期:2022-07-23; 网络出版日期:2023-10-12

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zmwen@ms.iswc.ac.cn

http://www.ecologica.cn

vegetation CUE showed a non-significant decreasing trend, while the WUE showed a non-significant increasing trend. (2) Spatially, the vegetation CUE showed a trend of high in the west and low in the east, while WUE was the opposite. For different land cover types, the values of CUE descended in the order of grassland>cropland>shrub>forest; whereas the values of WUE descended in the order of cropland > forest > grassland > shrub. (3) Generally, the vegetation CUE of vegetation in the Yellow River Basin was negatively correlated with temperature and positively correlated with precipitation. The WUE was positively correlated with both temperature and precipitation in the northern Yellow River Basin, and it was negatively correlated with precipitation in the southwestern Yellow River Basin. (4) Among different land use types, the CUEs of grassland, forest, and cropland were mainly negatively correlated with temperature, and the CUE of shrubs was mainly positively correlated with temperature. The grassland CUE was positively correlated with precipitation in the northwest Loess Plateau, while showed a negative relationship in the source region of the Yellow River; for croplands, CUE was positively correlation with precipitation. (5) The relationships between the WUE and hydrothermal factor had strong spatial heterogeneity. Precipitation was the dominant factor affecting grassland WUE in the arid and semi-arid regions, while grassland WUE had negative correlations with both temperature and precipitation in the alpine regions; for shrubs, the WUE had negative correlations with temperature and positive correlations with precipitation; and farmland WUE had positive correlations with temperature due to the influence of human activities. The research results provide significant information for understanding the vegetation carbon-water coupling mechanism in the Yellow River Basin under the background of vegetation restoration and climate change.

Key Words: carbon use efficiency; water use efficiency; climate change; land use type; the Yellow River Basin

水-碳循环是陆地生态系统中的重要环节^[1]。在气候变化背景下,陆地生态系统水-碳循环机制及其对气 候条件的响应成为生态学界高度关注的问题^[2]。碳水利用效率作为表征陆地生态系统水-碳循环的重要指 标,也是全球变化研究的热点^[3]。

陆地生态系统的碳利用效率(Carbon Use Efficiency,CUE)是反映植被固碳能力的重要参数^[4]与分析生态 系统碳分配模式的关键指示因子^[5]。许多研究将其定义为净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)与 总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)的比率^[6]。水利用效率是生态系统功能的一个关键特征,也 是水碳耦合的连接桥梁^[1]。在生态系统层面,水利用效率(Water Use Efficiency,WUE)是指以蒸散发 (Evapotranspiration, ET)形式出现的碳增加与水分损耗的比率^[2]。

近年来,遥感技术的发展为有关水碳循环的研究带来了新的思路,众多学者利用遥感产品开展相关研究。 如,植被 CUE 并非恒定值^[7],不同植被类型之间的 CUE 差别也较大^[8]。区域尺度上,刘福红等^[9]对鄱阳湖流 域不同土地利用类型碳水利用效率进行统计分析,发现草地及农田 CUE 较高,森林及灌丛 CUE 较低。时空 动态方面,2000—2013 年中国植被 CUE 大体呈现西部高东部低的状态^[10];袁旻舒等^[11]利用 CMIP5 模型对模 拟未来中国陆地生态系统的 CUE 并分析其变化潜力,结果表明未来 CUE 变化范围在 0.332—0.617 之间且随 时间略微降低;刘宪锋等^[12]发现黄土高原 WUE 整体呈现上升趋势;常娟等^[13]发现西北地区草地 WUE 呈现 由东南向西北递减的空间变化规律。

植被碳、水利用效率对环境及气候变化较为敏感^[14–15]。Zhang 等^[16]在全球碳利用效率的气候驱动因素的研究中发现温度的升高使 CUE 降低,而降水增加导致 CUE 上升;高寒环境以气温为主要驱动因素^[7]。在海拔较高的区域,植被 WUE 与降水及温度均呈正相关^[17];而干旱条件下,植被 WUE 对气温、降水呈负反馈^[18]。

植被动态也对碳水循环有很强的控制作用^[19],植被绿化可能会影响生态系统碳封存潜力及水循环过程。 随着全球变暖及大规模植被恢复工程的实施,植被碳汇作用明显提升^[20]。研究表明,WUE 的减少可能与生 态系统的退化有关,而生态系统恢复则会促进 WUE 的增加^[21]。区域尺度上,王辰露等^[22]探究了黄河流域植 被变化对水碳耦合的影响策略,但针对碳循环的研究不够深入,缺少植被固碳能力的系统评估。

黄河流域是我国植被恢复工程的重点区域,其生态环境脆弱敏感,属典型的干旱半干旱气候[23]。

近 20 年来,为改善黄河流域生态退化状况,促进流域高质量发展,国家相继实施一系列如退耕还林还草等的 生态恢复工程,并初步取得成效^[23]。尽管已经认识到逆转荒漠化、防止土壤侵蚀和增加地表生物量的好处, 但植被增加也产生了植被蒸散耗水加剧的问题。人为植被恢复对陆地生态系统水和碳循环关键过程的影响 仍然知之甚少^[20],揭示陆地生态系统在区域植被恢复背景下的碳水循环动态及其对气候变化的响应仍是生 态学研究中的一大挑战。探究黄河流域碳水循环特征及其与水热条件之间的联系,以及生态恢复工程如何改 变水碳平衡则显得尤为必要。现阶段的多数研究局限于区域尺度的单一指标(CUE 或 WUE),将碳、水利用 效率综合考虑的相关研究还较为少见。

本研究基于 MODIS 数据产品,分析黄河流域植被碳水利用效率变化的时空模式及其在不同植被类型之间的差异,并探究水热条件对碳水利用效率变化的相对贡献,以期为黄河流域水碳耦合机制的研究与流域植被恢复的可持续发展提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流域(32°10′—41°50′E,95°53′—119°05′E)幅员辽阔,地处我国中北部地区,西起青藏高原的巴颜喀 拉山脉,东入渤海,北抵阴山,南达秦岭,途经青、川、甘、宁、蒙、陕、晋、豫、鲁9省份。流域地势西高东低横跨 三大阶梯,地形丰富多样,自西向东横穿青藏高原、内蒙古高原、黄土高原及黄淮海平原,全长5464 km,总面 积约79.5×10⁴ km²。流域自西向东气候变化悬殊,降水与气温均呈由南向北、由东向西递减的特征。流域多 年平均降水量440 mm,多年平均气温为7℃^[24]。根据流域实际情况,将黄河流域土地利用类型概括为森林、 灌丛、农田、水体及湿地、城市、草地和裸地等7类,其中主要植被类型为耕地、森林、草地、灌丛,面积分别占黄 河流域总面积的19.97%,4.55%,69.91%,0.10%(图1)。





Fig.1 Location of study area and the distribution of different landcover types

1.2 数据来源及处理

1.2.1 GPP、NPP、ET数据及土地覆盖类型数据

本研究所使用的 GPP、NPP、ET 遥感数据来自于 MODIS 数据产品: MOD17A2H、MOD17A3H 和 MOD16A2。其空间分辨率为 500 m,时间分辨率 8 d,时间跨度为 2000—2020 年,地理坐标投影系均为 WGS-84,数据格式为 TIF。为避免传统研究中下载数据遇到的重投影、镶嵌等步骤,本研究使用 Google Earth Engine (GEE)平台(https://earthengine.google.com/)进行数据下载工作。本研究在 GEE 平台对原始数据去除异常 值,并对 GPP 与 ET 数据进行年值计算。经由 Google drive 导出 GeoTIFF 格式数据,利用 ArcGIS 10.8 基于研 究区矢量边界进行批量掩膜,得到可分析数据。

土地利用类型数据采用 MCD12Q1 地表覆盖栅格数据,空间分辨率为 500 m。根据 IGBP (International Geosphere-Biosphere Program)分类系统,结合本研究实际情况,将数据重新划分为草地、森林、农田、灌丛、水体、城市及裸地等 7 类,重点分析草地、森林、农田与灌丛的碳水利用效率时空变化特征。

1.2.2 气象数据

气象数据源自黄土高原科学数据中心(http://loess.geodata.cn)提供的中国 722 个标准气象站点 2000—2020 年的逐月平均降水与气温数据集。为确保计算数据的匹配,运用 ANUSPLIN 软件结合各站点的高程与 经纬度信息对气象数据进行空间插值处理,以获取与研究区 CUE、WUE 影像分辨率相同且投影一致的气象栅 格影像。基于黄河流域矢量边界,利用 ArcGIS 10.8 掩膜,并计算研究区气象年尺度栅格数据。

1.3 研究方法

1.3.1 CUE 和 WUE 计算方法

本研究将黄河流域植被的碳利用效率(CUE)与水利用率(WUE)计算公式如下:

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

$$WUE = \frac{NPP}{ET}$$
(2)

式中,NPP 和 GPP 是植被净初级生产力和总初级生产力,单位为 gC/m²,ET 是植被蒸散发,单位为 mm。CUE 值无量纲,WUE 单位为 gC m⁻² mm⁻¹。

1.3.2 趋势分析法

本研究采用 Sen+MK 检验定量分析近 20 年黄河流域植被碳水利用效率的变化趋势。Theil-Sen 斜率^[25] 可以有效避免数据缺值与异常值对时间序列的干扰,较之简单的线性回归与传统的最小二乘法更加准确^[6]。

MannKandell(MK)检验对测量误差不敏感,能够有效剔除异常值^[26],在时间序列的趋势分析中被广泛使用^[23]。通过MK检验进一步确定研究区CUE、WUE变化趋势的显著性。

Sen+MK 检验具体公式参照文献^[23],根据该方法,在 0.05 和 0.01 显著性水平下标准化统计量分别为 |Z| ≥1.96 和 |Z| ≥2.58 时,则拒绝无趋势的原假设,将变化趋势分为五类:极显著增加,显著增加,变化不显著, 显著减少和极显著减少。

1.3.3 稳定性分析

变异系数(Coefficient of variation, CV)是数据系列中数据点在平均值附近离散度的统计量度。CV表示标准偏差与平均值的比率,它是比较一个数据系列与另一个数据系列变异程度的有用统计量。本研究使用 CV 来检查黄河流域 CUE 的空间和时间可变性程度。

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})}{n - 1}}}{\frac{\bar{x}}{\bar{x}}}$$
(3)

式中,*CV*为变异系数; *x*为 CUE 或 WUE 平均值; *n*为时间序列年数; *x_i*表示在第*i*年黄河流域的植被 CUE 或 WUE。变异系数越小说明数据随时间变化的波动性越小,即具有较高的稳定性;反之则波动性大,数据不稳定。

1.3.4 变化持续性及未来发展趋势分析

Hurst 指数(H)被广泛利用于反映时间序列变化趋势的可持续性,本文采用重标极差(R/S)分析方法的 Hurst 指数,对黄河流域植被 CUE 和 WUE 的未来变化趋势进行分析预测。当 H<0.5 时,表示时间序列的反持 续性;H=0.5,表示时间序列随机;H>0.5,表示时间序列的正向持续性。具体公式参考文献^[4]。

1.3.5 相关性分析

在多元相关分析中,不同变量之间的关系非常复杂,它们可能同时受多个变量的影响。因此,简单的线性

相关系数并不能真实反映两个变量之间的本质关系。为了排除温度与降水彼此之间的影响,以便更加直观、 准确地观察研究区植被 CUE、WUE 与气象因子的关联性,本研究采用偏相关进一步分析降水和气温对植被的 单独作用。偏相关分析是一种用于在控制其他变量的线性影响的情况下,分析两个变量之间的线性相关性的 分析方法^[6]。本研究采用偏相关分析法研究不同气象因子对黄河流域 CUE、WUE 变化的影响,并通过双边 *t* 检验判定显著性。具体公式参考文献^[17]。

2 结果与分析

2.1 黄河流域植被 CUE 和 WUE 的年际变化特征

如图 2 所示,2000—2020 年黄河流域 NPP、GPP、ET 均呈显著上升趋势(P<0.01)。GPP、NPP 与 ET 在年际尺度分别以每年 8.33 和 4.64 和 7.56 gC/m²的速率显著增加。其中,GPP 与 NPP 分别增加 186.08 gC/m²与 98.05 gC/m²,ET 增加 149.32 mm。



图 2 2000—2020 年黄河流域植被净初级生产力(NPP)、总初级生产力(GPP)和蒸散发(ET)的变化趋势 Fig.2 Variation of NPP, GPP and ET from 2000 to 2020 in the Yellow River Basin

统计黄河流域年 CUE 与 WUE 的均值(图 3)。结果表明:2000—2020 年研究区植被 CUE 波动下降,线性 递减率为-0.0005 a⁻¹,均值为 0.61;WUE 波动上升,线性递增率为 0.0019 gC m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,均值 0.68 gC m⁻² mm⁻¹。二者变化均不显著(P>0.05),总体均趋于稳定。如图 4 所示,不同植被类型碳水利用效率的年际变化 特征与黄河流域整体变化基本一致,但植被 CUE 大小差异明显。其中草地 CUE 最高,均值为 0.63,森林 CUE 最低,均值为 0.47;不同植被的 WUE 值 gC m⁻² mm⁻¹依次为:农田(0.87)>森林(0.82)>草地(0.63)>灌丛 (0.54)。

2.2 黄河流域植被 CUE 和 WUE 的空间分布

研究区植被 CUE 有明显的空间异质性,总体呈现西高东低。高值区主要分布在黄土高原西北部及黄河 源区,低值区集中分布在黄河下游(图5)。黄河流域超过 90%的地区 CUE 值大于 0.5;9%的地区在 0.3—0.5 之间,零星分布于流域下游地区,面积约为 7.2×10⁴ km²;小于 0.3 的区域不足 1%。WUE 的空间分布与 CUE 相反,表现为东高西低。研究区 10.00%的植被 WUE 在 0—0.4 gC m⁻² mm⁻¹间,分布于黄河源区,面积约为 8.0×10⁴ km²;58.98%的地区 WUE 值为 0.4—0.8 gC m⁻² mm⁻¹,其分布范围与黄河上游分区大体一致,面积约





为 46.9×10⁴ km²;此外,陕西省中南部,山西省大部分地区及河南省北部区域的植被 WUE 范围在 0.8—1.0 gC m⁻² mm⁻¹,面积约为 20.6×10⁴ km²,占研究区面积的 25.94%;黄河流域仅有 5%的区域植被 WUE 大于 1.0 gC m⁻² mm⁻¹。

2.3 黄河流域植被 CUE、WUE 变化趋势

采用 Sen 趋势分析对植被 CUE、WUE 的线性变化率(β)的进行统计(图 6)。黄河流域植被 CUE 的线性 趋势率在-0.02—0.02 a⁻¹之间,总体呈现正态分布趋势,超过 90%的地区线性变化率在-0.003—0.003 a⁻¹。植 被 WUE 的变化趋势率在-0.05—0.04 gC m⁻² a⁻¹之间,平均变化率为 0.002 gC m⁻² a⁻¹。

结合 Mann-Kendall 检验方法,对研究区植被 CUE、WUE 变化趋势进行显著性检验,并将研究区划分为七个分区(图6)。流域 77.22%的地区植被 CUE 呈下降趋势,22.78%呈上升趋势。具体表现为:植被 CUE 呈极显著(P<0.01)增加与显著增加(P<0.05)区域在关中盆地和子午岭一带零星分布,面积约为 4.2×10⁴ km²和 2.9×10⁴ km²,研究时限内该区域植被 CUE 极显著增量约为 0.032,显著增量为 0.023。植被 CUE 极显著减少 (P<0.01)和显著减少(P<0.05)区域集中于黄河流域西南部及黄土高原东部,面积约为 9.5×10⁴ km²和 4.3× 10⁴ km²,极显著减少量约为 0.044,显著减少量约为 0.051。与植被 CUE 相反,植被 WUE 以增加趋势为主,占研究区面积的 57.85%。植被 WUE 呈极显著增加或显著增加地区集中于黄土高原东北部,面积约为 15.2×10⁴ km²和 7.5×10⁴ km²,极显著增量约为 0.373 gC m⁻² mm⁻¹,显著增量约为 gC m⁻² mm⁻¹;植被 WUE 极显著减少和显著减少的区域分别占总体的 9.18%和 5.81%,面积约为 7.3×10⁴ km²和 4.6×10⁴ km²,分布于青、甘、川三省内,极显著和显著减少量分别约为 0.148 gC m⁻² mm⁻¹和 0.131 gC m⁻² mm⁻¹。

2.4 黄河流域植被 CUE、WUE 稳定性分析

分析研究区植被 CUE、WUE 波动状态与其变异系数 CV(图7)。植被 CUE 变异系数值为 0.004—1.116, 平均值为 0.036,以低波动为主。研究区 84.59%的区域变异系数小于 0.05,草地是其主要植被构成;流域北侧 及东南部地区的 CV 在 0.05—0.10 之间,植被类型以森林及农田为主;CV 大于 0.1 的区域仅占研究区面积的 3.8%,属中高波动状态,零星分布于黄河下游周边及流域北部边缘,面积约为 3.0×10⁴ km²。

研究区植被 WUE 变异系数的均值为 0.114。41.3% 的地区 WUE 变异系数以小于 0.10, 主要分布在黄河 源区及黄土高原东南部, 面积约为 32.8×10⁴ km²;43.74% 的区域 WUE 变异系数在 0.10—0.15 之间, 处中等波 动状态, 布于黄土高原北部和黄河源区, 面积约为 34.8×10⁴ km²; 14.96% 的研究区 *CV* 大于 0.15, 属高波动, 面 积约为 11.35×10⁴ km²。

2.5 黄河流域植被 CUE、WUE 可持续性分析

统计黄河流域植被 CUE 与 WUE 的 Hurst 指数(*H*)(图 8)。结果表明:植被 CUE 与 WUE 的 *H* 均值分别 为 0.48 和 0.45。对植被 CUE 而言,*H* 大于 0.5 的区域集中在黄河源区,*H* 小于 0.5 的区域分布在黄土高原北 部及黄河下游周边。植被 WUE 的 *H* 大于 0.5 的区域集中在黄土高原东部地区,小于 0.5 的区域分布于黄河

44 卷







002

上游分区。

结合 Sen 趋势分析与 H 对黄河流域未来植被 CUE 与 WUE 的变化趋势进行分析(图 8)。研究区植被 CUE 呈现上升持续区域的面积约为 11.1×10⁴ km²,约占研究区总面积的 13.96%,上升且反持续变化区的面积 约为 20.1×10⁴ km²,约占研究区总面积的与 25.26%,主要集中于阴山南麓、陇中黄土高原及关中盆地。黄河 流域 30.96% 的地区植被 CUE 下降且持续,该区域主要位于黄河源区,面积约为 24.6×10⁴ km²;29.82% 的地区 植被 CUE 未来趋向于下降且反持续变化,集中分布于黄河流域东部与黄河下游地区,面积约为 23.7× 10^4 km^2



图 5 2000—2020 年黄河流域植被 CUE、WUE 年均值分布图

Fig.5 Distribution of average annual CUE and WUE in the Yellow River Basin during 2000-2020



图 6 2000—2020 年黄河流域植被 CUE、WUE 空间动态及显著性检验

Fig.6 Spatial dynamics of CUE, WUE in the Yellow River Basin and significance test during 2000-2020



Fig.7 Variation degrees of CUE and WUE in the YRB from 2000 to 2020

植被 WUE 的未来预测显示:流域 20.42% 的地区 WUE 呈现上升且持续状态,面积约为 16.2×10⁴ km²; 40.82% 的区域呈现上升且反持续状态,面积约为 32.5×10⁴ km²。该区域主体分布在黄土高原北部,黄河流域

44 卷

西南部边缘及黄河下游地区也有少量分布。呈现下降反趋势的区域主要位于黄河流域西南部,面积约有 24.8×10⁴ km²,约占总体的 31.18%。



2.6 黄河流域植被 CUE、WUE 和气象因子的关系

降水和气温是影响陆地生态系统 CUE 和 WUE 变化的重要环境因素。分析温度对植被 CUE 及 WUE 的 偏相关关系(图 9)。温度与植被 CUE 以负相关关系为主,偏相关系数在-0.89—0.74 之间,平均偏相关系数 为-0.30。植被 CUE 与温度呈显著负相关(P<0.05)区域主要分布在巴颜喀拉山附近及黄土高原东部地区,面 积约为 24.6×10⁴ km²;而正相关区域不足 10%,集中在宁夏平原中部地区,面积约为 7.95×10⁴ km²。植被 WUE 与气温的偏相关关系如图 9 所示。其偏相关系数在-0.85—0.88 之间,平均偏相关系数为 0.007。黄河流域植 被 WUE 与温度偏正相关区域主要分布在黄土高原东北部,面积约为 40.6×10⁴ km²,其中显著正相关区域集中 在山东省莱芜市,面积约为 1.96×10⁴ km²。负相关区域分布在黄河流域西部,面积约为 39.0×10⁴ km²,显著负 相关区域较为分散,面积约为 2.3×10⁴ km²。

降水对植被 CUE 及 WUE 的偏相关关系如图 10。植被 CUE 偏相关系数在-0.84—0.89 之间,平均偏相关 系数为-0.03。正相关区域集中于黄土高原西北部及黄河下游农田地区,面积约为 32.9×10⁴ km²,其中显著正 相关区域面积约为 4.47×10⁴ km²;负相关地区集中于黄河源区,面积约为 46.4×10⁴ km²,其中显著负相关区域 面积约为 3.33×10⁴ km²。

植被 WUE 的偏相关系数在-0.84—0.89,平均偏相关系数为-0.03。植被 WUE 与降水呈显著正相关的区域主要分布在山西省北部及陕晋蒙接壤区,面积约为 11.34×10⁴ km²;无显著正相关区域,主要分布在黄土高原北部,面积约为 34.14×10⁴ km²;显著负相关地区集中在四川阿坝州与甘肃平凉市内,面积约为 8.01×10⁴ km²;无显著负相关区域,分布在黄河源区及研究区南部,面积约为 26.01×10⁴ km²。

不同植被类型 CUE 与 WUE 对水热因素的响应也不相同。降水与森林 CUE 的偏相关性不显著,与灌丛、 农田、草地 CUE 偏正相关(图 11)。其中,38.12%的灌丛、12.06%的草地、10.80%的农田以及 8.70%的森林与 降水显著偏正相关(P<0.05)。温度与草地、森林、农田 CUE 主要为负相关关系,与灌丛 CUE 为正相关关系 (图 11)。黄河流域 92.53%的草地、78.96%的森林以及 91.28%的农田 CUE 与温度呈偏负相关,其中呈显著负





Fig.9 Correlation coefficients and significant test between CUE, WUE and temperature (control precipitation) in the Yellow River Basin





Fig.10 Correlation coefficients and significant test between CUE, WUE and precipitation (control temperature) in the Yellow River Basin

相关(P<0.05)的区域分别占各植被类型总体的 30.18%、6.17%、17.77%。温度与灌丛 CUE 呈显著正相关和 无显著正相关的面积分别占灌丛总体的 6.30%和 59.30%。

不同类型植被 WUE 对降水和温度反馈如图 11。灌丛、森林 WUE 主要受到降水的正向反馈,农田 WUE 与降水呈负相关关系的比例较大,草地 WUE 与降水相关性差别较大。17.06%的草地,5.62%的灌丛与 9.68% 的森林,其 WUE 与降水呈显著正相关,而 14.54%的农田呈显著负相关,面积约为 6.7×10⁴ km²。

灌丛对温度的负响应较为敏感,农田、森林与草地 WUE 对温度产生正/负相关的面积相近(图 11)。灌丛与温度偏负相关,其中显著负相关占 6.45%,面积约为 1.57×10⁴ km²,无显著负相关占比 76.40%,面积约为

18.63×10⁴ km²;草地无显著负相关(47.56%),无显著正相关(47.39%);森林无显著负相关(47.56%),无显著 正相关(44.58%)。农田为无显著正相关区域占比 52.52%,为无显著负相关区域占比 40.68%(P > 0.05)。



图 11 黄河流域不同植被类型 CUE/WUE 与温度、降水的偏相关分析 Fig.11 Correlation coefficients of different land use types between CUE/WUE and temperature and precipitation

为进一步具体比较黄河流域不同植被类型 CUE 与 WUE 间的差异,本研究以 CV 值、均值及变化趋势率等 3 个因子作为表征 4 种主要植被 CUE 与 WUE 变化状况的指标(图 12)。黄河流域植被 CUE 的 CV 值:森林 (0.089)>灌丛(0.051)>农田(0.047)>草地(0.029);不同植被 CUE 变化趋势率差别不大,农田、灌丛与草地的变 化趋势率为±0.0005,森林 CUE 趋势率值略高为0.0013。对 WUE 而言,森林和灌丛 WUE 的变异系数略高于草地 和农田,分别为 0.133 和 0.138。农田、灌丛和草地的 WUE 变化率并不显著,森林变化趋势率为 0.0046。



图 12 黄河流域主要植被类型 CUE 及 WUE 的均值、CV 值和变化趋势率

Fig.12 The average value, CV value and variation rate of CUE and WUE for main vegetation types in the Yellow River Basin CV: 变异系数 Coefficient of Variation

3 讨论

3.1 黄河流域植被 CUE 和 WUE 的分布特征及其变化 本研究基于 MODIS 遥感数据计算 2000—2020 年黄河流域碳利用效率(CUE)与水利用效率(WUE)。 NPP、GPP 与 ET 是影响植被 CUE 与 WUE 变化的重要因素,分析其变化趋势有助于加强对黄河流域碳水 利用效率长时间趋势特征理解。研究时限内,植被 CUE 呈微弱下降趋势,WUE 处于微弱上升状态。黄河流 域 GPP 增幅大于 NPP,间接导致植被 CUE 值的降低。同时,干旱条件下植物为适应缺水、养分供应不足等环 境压力会优先保存临时碳水化合物和营养储备而非生长新组织,叶片生长速度减慢,进而影响光合速率,导致 CUE 降低。而 WUE 的上升可能与退耕还林工程对黄河流域植被状况的改善有关^[27]。有关全球规模的研究 表明,人为活动和重新绿化可能会导致生态系统用水效率的提高^[20]。此外,受地形、气候等因素影响,植被 CUE 与 WUE 变化趋势具有地域性差别。如鄱阳湖流域 CUE、WUE 呈下降^[9];蒙古高原 CUE 显著上升而 WUE 不显著下降^[17]等。

空间上,植被 CUE 分布西高东低,超过 90%的地区植被 CUE 大于 0.5。黄河源区海拔较高,气温相对较低,植被自养呼吸作用相对降低,植被固碳效率相对更高,因此 CUE 高值区主要在该区域分布^[7]。黄河流域 植被 CUE 未来趋势及持续性的分析得出,研究区内 60.78%的地区呈下降状态。该现象与 Du 等人^[21]对干旱 半干旱地区长时间序列下植被碳利用效率(CUE)的趋势变化及未来趋势相一致。同时,黄河流域 CUE 值较 高的区域,其变异系数均较低,处于低波动状态,同样的结果在刘洋洋等^[10]关于中国植被 CUE 的研究中也有 体现。

植被 WUE 则呈现东高西低状态,一方面,黄河流域东部是植被恢复的重点区域,近年来在各生态保护措施的实施下,该地区植被覆盖度增加^[24],植被水源涵养能力上升,致使 WUE 较高;另一方面,这也反映了中度 干旱缺水地区的植被具有更高的干旱适应能力^[19];对植被 WUE 的未来预测显示:流域 61.24%的地区 WUE 呈现上升状态,该域主体分布在黄土高原北部,这可能是受到未来气候持续变暖、CO₂浓度增加的影响,植被 固碳效率增强,WUE 也随之增加^[28]。而位于黄河流域西南部的大部分地区植被 WUE 未来将呈现下降趋势 的地区,这可能是由于降水和温度的共同升高导致 ET 升高,而 NPP 增加幅度相对较小,植被 WUE 因而 降低^[29]。

3.2 不同植被类型 CUE 特征及其对水热因子的响应

植被 CUE 代表了大气-植物-土壤-微生物等因素的相互作用,变化较为复杂。温度变化可以影响光合作 用与自养呼吸速率,使得植被 CUE 发生变化^[2]。黄土高原超过 90%的地区,植被 CUE 与气温呈负相关关系。 当温度上升时,植被用于支持组织生活的能量消耗将增加,自养呼吸随之增强,进而导致植被 CUE 的降低^[7]。 同时,MODIS 产品中用于计算 Ra 温度敏感性的参数相对较高,这可能也是导致 CUE 随温度升高而下降的 原因^[3]。

黄河流域植被 CUE 与温度呈正相关的区域主要集中在宁夏平原中部,该区域主要分布草地与灌丛。对 草地生态系统而言,其 CUE 主要与温度呈现负相关关系,然而 CUE 的变化是由多种因素共同作用产生的。 由于诸如氮沉降、饱和水汽压等因素共同作用,植被 CUE 与温度的相关性可能受到混淆^[7]。对于灌丛而言, 本研究中其 CUE 与温度却呈现正相关关系,这可能是由于数据精度较低引起的。本研究中所使用的土地利 用数据对地表真实植被类型的反映不够精确,且灌丛的面积较少,不能很好的反映其对 CUE 的调控作用, CUE 的不确定性更高。因此,在未来的研究中在可以在考虑多种因素共同作用的同时,采用更高高精度的土 地覆被产品,对灌丛生态系统进行更加深入的分析,以进一步完善 CUE 的区域评估。

草地生态系统由面积产生的相对贡献成为影响草地 CUE 与气象因子相关性的重要因素。黄土高原西北 部水分条件较为恶劣,这里以灌丛与草地为主要植被类型,水分成为限制植被生长的主要因素。降水减少会 升高温度和蒸散量,在这里分布的草地和灌丛会随降水的减少而降低其生态系统生产力^[15]。而在降水相对 丰沛的黄河源区,草地 CUE 与降水呈负相关关系。这可能是包括辐射减少,土壤养分淋溶增强等多种因素在 内的综合结果^[30]。同时,过多水分会限制土壤中的氧气扩散,使得土壤有机质的分解速率下降,养分供应减 慢,进而导致植被固碳效率的下降^[7]。

黄河下游流经黄淮海平原,这里地势平坦,气候相对温暖潮湿,农田生态系统主要分布于此。本研究中,

389

农田 CUE 对降水呈现正向反馈。一方面,黄河下游地区水分较为充沛,自然降水的增加会影响农田作物的根 系活力,导致植物根系的产量的降低与呼吸作用的减弱,进而引起农田 CUE 的升高^[27]。另一方面,全球收集 的田间地块数据表明农田 CUE 也随着养分梯度升高而升高^[31],受到人为施肥、灌溉等农艺措施的影响,研究 区农田生态系统土壤养分含量可能成为主导农田 CUE 增减的另一重要因素^[32]。

比较不同指标下的植被 CUE(图 12),进一步确定不同植被类型对水热因子的响应。多数植被 CUE 一般 保持稳定状态,但森林和灌丛 CV 值高于其他植被类型。这表明森林和灌丛对于气候因子的敏感性更高,这 与 CUE 与降水的偏相关关系所反映的森林与灌丛对降水的响应状况相一致。农田、草地及灌丛 CUE 在研究 时段内的年际波动状况较为平缓。研究时段内,森林 CUE 变化趋势率高于其他三种植被类型,这说明退耕还 林工程在黄河流域生态恢复效益明显,森林固碳能力逐年增加,固碳效率有所提升。

3.3 不同植被类型 WUE 变化特征及其对水热因子的响应

不同植被类型的 WUE 大小表现为:农田>森林>草地>灌丛。黄河流域的农田生态系统多集中分布于下游的黄淮海平原,水分是制约该处农田 WUE 的主要因素^[33]。人为灌溉和施肥满足了作物生长所需的水分和养分,提高其水碳循环效率,同时充足的水分弥补了蒸散发带来的影响,因此农田 WUE 相对较高^[32]。森林生态系统中,树种间相互促进且充分利用外界环境条件,使其光合效率相对较高,在同一时段内积累有机物的能力更强,生物量相对其他植被类型更高^[15]。此外,林间具有地温和气温变幅小的特点,且相对较低的风速度导致其地表蒸发量小,因此其 WUE 相对较高^[34]。灌丛 WUE 在四种主要植被类型中最低。从生物量视角出发,灌丛 WUE 理论应高于草地,但草本植物生长对水分的需求量不高,在干旱条件下也能维持其正常生长,灌木的生长却受到水分条件的制约。

本研究中研究区草地生态系统 WUE 对温度和降水的反馈在不同区域存在较大差异。黄土高原北部植被 WUE 与温度和降水均呈正相关关系,这与常晓格等^[35]在黄土高原的研究结果相同。温度会同时影响植物的光合作用和蒸腾作用,其对 WUE 的作用较为复杂^[14]。黄河流域东北部地区植被 WUE 与气温呈正相关关系。这是由于干旱胁迫下的植物为适应水分亏欠的胁迫,会随着温度的升高降低其叶片的气孔导度,以提高自身 WUE^[33]。在黄土高原西南部地区,草地 WUE 与降水呈正相关关系,与温度呈现不显著的负相关关系。这表明降水是干旱半干旱区域的草地 WUE 的主导因素。同时,对于草地 WUE 与温度产生的不显著负相关性,可能与该区域的土壤养分含量有关。土壤有机质的增加对于形成土壤团聚体至关重要,土壤团聚体可以增加土壤植物的可用水量,而后者控制 ET 速率^[34]。研究表明,土壤有机质与 WUE 呈负相关,并影响土壤持水能力^[36]。此外,这也可能是由于该区域的沙地和灌溉农业用地共存而产生的偶然偏差所导致。

黄河源区的大部分草地生态系统 WUE 与温度和降水均成负相关关系。黄河上游高海拔较高,降水相对 丰沛,雨水此时降水和温度的升高共同导致由蒸散发产生的水分的流失加剧,而其生产力变化相对较小,使得 该地区 WUE 下降^[14]。

研究区灌丛 WUE 与温度成负相关关系,与降水呈正相关关系,这与黄土高原西南部地区植被对温度和 降水的反馈相同。灌丛植被 WUE 与温度的相关性对干旱指数更为敏感,且随着干旱指数的增加,与降水的 相关性呈现负-正-负的变化^[35]。研究区植被恢复工程常以灌丛作为主要栽种类型,其立地条件大多较为恶 劣,地表覆盖物少,土壤蒸发水分占比过大,温度上升使得 ET 的增长速率大于 NPP 增加速率,进而使灌丛 WUE 下降。

黄河流域下游地区的农田植被 WUE 对温度存在正向反馈。农田受人类活动影响严重,其对气象因素的 响应与自然植被相比更加稳定,在考虑气候因素的同时也应考虑到施肥、灌溉、放牧等农田管理和土壤条件对 其的影响^[32]。

4 结论

2000—2020年黄河流域植被 CUE 处于波动下降趋势, 植被 WUE 波动上升, 但变化幅度较小, 均不显著。

空间上,黄河流域植被 CUE 呈现西高东低状态,大部分区域 CUE 大于 0.5,植被固碳能力较强;在近 20 年生态保护措施的影响下,黄河流域东部水源涵养能力上升,植被 WUE 呈现出东高西低状态。受其生理特征的影响黄河流域植被 CUE,草地最高,森林最低;而由于灌溉和立地条件等因素,黄河流域农田 WUE 最高,灌丛WUE 最低。

黄河流域植被 CUE 与水热条件的关系分析表明:超过 90% 的地区,植被 CUE 与气温负相关。黄河流域 西北部干旱地区,降水与植被 CUE 呈正相关关系;然而,在降水相对丰沛的黄河源区,植被 CUE 与降水呈负 相关关系。不同植被类型中,草地、森林、农田 CUE 与温度主要呈负相关响应,灌丛 CUE 主要呈正相关响应。 森林和灌丛 CUE 的 CV 值高于其他植被类型,这表明森林和灌丛对于气候因子的敏感性更高。

植被 WUE 与降水及温度的相关性具有较高的空间异质性。本研究中,植被 WUE 与水热关系的相关性显示为:黄土高原北部植被 WUE 与温度和降水均呈正相关关系,黄河源区及黄河流域南部地区植被 WUE 与降水的负相关关系。不同植被类型中,面积对草地 WUE 的变化相对贡献较为明显,在干旱,半干旱地区降水 是影响草地 WUE 的主导因素,而高海拔地区草地 WUE 与温度、降水均呈负相关关系;灌丛 WUE 与降水呈正 相关关系,与温度呈负相关关系。此外,农田受人类干扰严重,还应考虑到施肥、灌溉、放牧等人为因素带来的 影响。

参考文献(References):

- [1] Gang C C, Wang Z Q, Chen Y Z, Yang Y, Li J L, Cheng J M, Qi J G, Odeh I. Drought-induced dynamics of carbon and water use efficiency of global grasslands from 2000 to 2011. Ecological Indicators, 2016, 67: 788-797.
- [2] Gentine P, Green J K, Guérin M, Humphrey V, Seneviratne S I, Zhang Y, Zhou S. Coupling between the terrestrial carbon and water cycles—a review. Environmental Research Letters, 2019, 14(8): 083003.
- [3] He Y, Piao S L, Li X Y, Chen A P, Qin D H. Global patterns of vegetation carbon use efficiency and their climate drivers deduced from MODIS satellite data and process-based models. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256/257: 150-158.
- [4] Chambers J, Tribuzy E, Toledo L C, Crispim B F, Higuchi N, Santos J, Araújo A, Kruijt B, Nobre A, Trumbore S. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. Ecological Applications, 2004, 14: 72-88.
- [5] DELUCIA E H, Drake J E, Thomas R B, Gonzalez-Meler M. Forest carbon use efficiency: is respiration a constant fraction of gross primary production? Global Change Biology, 2007, 13(6): 1157-1167.
- [6] Ye X C, Liu F H, Zhang Z X, Xu C Y, Liu J. Spatio-temporal variations of vegetation carbon use efficiency and potential driving meteorological factors in the Yangtze River Basin. Journal of Mountain Science, 2020, 17(8): 1959-1973.
- [7] 兰垚,曹生奎,曹广超,李晓东,杨羽帆,雷义珍.青海湖流域植被碳利用效率时空动态研究.生态科学,2020,39(4):156-166.
- [8] 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.水土保持研究,2017,24(5):79-87,92.
- [9] 刘福红,叶许春,郭强,李相虎,刘佳. 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. 生态学报, 2021, 41 (2): 694-706.
- [10] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 同琳静, 李建龙, 章钊颖, 王振乾. 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. 水 土保持研究, 2019, 26(5): 278-286, 2.
- [11] 袁旻舒,李明旭,程红岩,丁菊花,李函微,彭长辉,朱求安.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. 中国科学院大学学报,2017,34(4):452-461.
- [12] 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.中国农业科学,2018,51(2):302-314.
- [13] 常娟,张增信,田佳西,陈喜,陈奕兆.西北地区草地水分利用效率时空特征及其对气候变化的响应.南京林业大学学报:自然科学版, 2020,44(3):119-125.
- [14] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,何斌.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展.生态学报,2018,38(23):8296-8305.
- [15] 朱万泽.森林碳利用效率研究进展.植物生态学报, 2013, 37(11): 1043-1058.
- [16] Zhang Y J, Xu M, Chen H, Adams J. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate. Global Ecology and Biogeography, 2009, 18(3): 280-290.
- [17] 尹超华, 罗敏, 孟凡浩, 萨楚拉, 包玉海. 蒙古高原植被碳水利用效率时空变化特征及其影响因素. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1079-1089.
- [18] Zhao J X, Feng H Z, Xu T R, Xiao J F, Guerrieri R, Liu S M, Wu X C, He X L, He X P. Physiological and environmental control on ecosystem

water use efficiency in response to drought across the Northern Hemisphere. The Science of the Total Environment, 2021, 758: 143599.

- [19] Zhang T, Peng J, Liang W, Yang Y T, Liu Y X. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000—2010. Science of the Total Environment, 2016, 565; 105-122.
- [20] Ogutu B O, D'Adamo F, Dash J. Impact of vegetation greening on carbon and water cycle in the African Sahel-Sudano-Guinean region. Global and Planetary Change, 2021, 202: 103524.
- [21] Du L T, Zeng Y J, Ma L L, Qiao C L, Wu H Y, Su Z B, Bao G. Effects of anthropogenic revegetation on the water and carbon cycles of a desert steppe ecosystem. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 300: 108339.
- [22] 王辰露,余钟波,刘娣,杨传国.黄河流域植被变化对区域水碳耦合的影响.水电能源科学,2022,40(1):150-154.
- [23] 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. 环境科学, 2022, 43(2): 743-751.
- [24] 郝家田, 胡云云, 杜一尘, 侯晓巍, 向安民. 基于 NDVI 的 2009—2018 年黄河流域林草植被覆盖变化. 林业科学, 2022, 58(3): 10-19.
- [25] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.
- [26] Yin Y X, Xu C Y, Chen H S, Li L, Xu H L, Li H, Jain S K. Trend and concentration characteristics of precipitation and related climatic teleconnections from 1982 to 2010 in the Beas River Basin, India. Global and Planetary Change, 2016, 145: 116-129.
- [27] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, Wimberly M C, Zhang X Z, Tao J, Jiang Y B, Zhu J T. Climate-driven global changes in carbon use efficiency. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(2): 144-155.
- [28] 邵蕊,李垚,张宝庆.黄土高原退耕还林(草)以来植被水分利用效率的时空特征及预测.科技导报,2020,38(17):81-91.
- [29] 史晓亮,吴梦月,张娜.中国典型陆地生态系统水分利用效率及其对气候的响应.农业工程学报,2020,36(9):152-159.
- [30] Chen Z, Yu G R. Spatial variations and controls of carbon use efficiency in China's terrestrial ecosystems. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-10.
- [31] Zhang Y J, Huang K, Zhang T, Zhu J T, Di Y P. Soil nutrient availability regulated global carbon use efficiency. Global and Planetary Change, 2019, 173; 47-52.
- [32] 徐同庆,陶健,王程栋,刘光亮,陈爱国,董建新,王树声,徐宜民.中国农田生态系统水分利用效率的格局与成因.中国农学通报, 2018,34(16):83-91.
- [33] Zhao F B, Wu Y P, Yao Y Y, Sun K, Zhang X S, Winowiecki L, Vågen T G, Xu J C, Qiu L J, Sun P C, Sun Y Z. Predicting the climate change impacts on water-carbon coupling cycles for a loess hilly-gully watershed. Journal of Hydrology, 2020, 581; 124388.
- [34] 张继,周旭,蒋啸,杨江州,罗雪.贵州高原不同地貌区和植被类型水分利用效率的时空分异特征.山地学报,2019,37(2):173-185.
- [35] 常晓格,王志慧,肖培青,魏峰远,张攀,马力.黄土高原生态系统水分利用效率演变及驱动因素空间分异规律.水土保持研究,2022, 29(5):244-252.
- [36] El Masri B, Stinchcomb G E, Cetin H, Ferguson B, Kim S L, Xiao J F, Fisher J B. Linking remotely sensed carbon and water use efficiencies with *in situ* soil properties. Remote Sensing, 2021, 13(13): 2593.