

DOI: 10.5846/stxb202201040020

王乐, 朱求安, 张江, 刘佳, 朱超凡, 瞿莉莎. 黄河流域植被格局变化对水分利用效率的影响. 生态学报, 2023, 43(8): 3103-3115.

Wang L, Zhu Q A, Zhang J, Liu J, Zhu C F, Qu L S. Characteristics of water use efficiency during the changing process of vegetation in the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3103-3115.

## 黄河流域植被格局变化对水分利用效率的影响

王 乐<sup>1</sup>, 朱求安<sup>1,2,\*</sup>, 张 江<sup>3</sup>, 刘 佳<sup>1</sup>, 朱超凡<sup>1</sup>, 瞿莉莎<sup>1</sup>

1 河海大学水文水资源学院, 南京 210009

2 国家地球系统科学数据中心, 国家科技基础条件平台, 北京 100101

3 西北农林科技大学林学院, 生态预测与全球变化研究中心, 杨凌 712100

**摘要:**黄河流域横跨 3 个气候带, 是全球人类活动最为强烈的地区之一, 特殊的地理位置和复杂的下垫面导致其碳-水循环过程较为复杂。研究黄河流域碳水循环不仅是区域水资源利用的基础, 也是实现气候变化条件下双碳目标的关键。水分利用效率 (WUE) 作为表征碳水过程的重要指标, 可用于反映生态系统碳水耦合规律及其相互作用关系。基于此, 利用全球陆表特征参量数据 (GLASS) 的净初级生产力 (NPP) 和蒸散 (ET) 产品以及中国逐年土地利用与覆盖数据集 (CLUD-A), 分析了黄河流域植被格局变化背景下 WUE 在 1990—2018 年的时空变化特征及其驱动力。结果表明: (1) 黄河流域全域 WUE 在 29 a 的均值处在 0.18—1.53 g C/kg H<sub>2</sub>O 之间, 存在明显的空间异质性, 上游地区 WUE 明显高于中下游地区, 分别在 0.66—0.92 g C/kg H<sub>2</sub>O 和 0.43—0.62 g C/kg H<sub>2</sub>O 之间波动, 二者均存在波动上升态势。(2) 黄河流域全域 WUE 在以 2000 年为中间点的 10 a 的增速达到近 29 a 的峰值, 流域植被格局变化所带来的流域内 NPP 与 ET 变化速率的异步性主导了 WUE 变化的空间异质性, 其中 81.10% 的区域中 WUE 所呈现的增加趋势是由 NPP 增速高于 ET 增速所导致。(3) 黄河流域全域 WUE 在未来会继续保持增加态势, 且上游 WUE 增加的持续性强于中下游地区。

**关键词:**碳水耦合; 蒸散; 净初级生产力; 植被结构; 赫斯特指数

## Characteristics of water use efficiency during the changing process of vegetation in the Yellow River Basin

WANG Le<sup>1</sup>, ZHU Qian<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Jiang<sup>3</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, ZHU Chaofan<sup>1</sup>, QU Lisha<sup>1</sup>

1 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210009, China

2 National Earth System Science Data Center, National Science & Technology Infrastructure of China, Beijing 100101, China

3 Center for Ecological Forecasting and Global Change, College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**Abstract:** The Yellow River Basin spans three climatic zones and is one of the regions of the most intense human activities in the world. The carbon-water cycle is complicated due to its special geographical location and the underlying surface. The study of the carbon-water cycles in the Yellow River Basin is not only the basis of regional water resource utilization but also the key to achieve dual carbon targets in the context of climate change. However, there are few reports about the carbon-water cycle at the whole basin scale. Water use efficiency (WUE), as an important indicator of carbon and water processes, can reflect the coupling law of carbon and water and their interaction in an ecosystem. Based on Net Primary Productivity (NPP) and Evapotranspiration (ET) data from GLASS and China's annual land-use/cover datasets, the temporal and spatial variation characteristics of WUE in the Yellow River Basin from 1990 to 2018 were analyzed, and the relationship between WUE, NPP and ET was discussed. The results are as follows: (1) the mean value of WUE in the Yellow River

**基金项目:**国家自然科学基金专项项目 (42041005, U2243203); 第二次青藏高原科学考察研究项目 (2019QZKK0304)

**收稿日期:**2022-01-04; **网络出版日期:**2022-12-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuq@hhu.edu.cn

Basin was between 0.18 and 1.53 g C/kg H<sub>2</sub>O in 29 years. There was obviously spatial heterogeneity. The WUE in the upper reaches of the Yellow River Basin fluctuated in 0.66—0.92 g C/kg H<sub>2</sub>O and 0.43—0.62 g C/kg H<sub>2</sub>O in the middle and lower reaches, and both of them had a rising trend of fluctuation. (2) In the Yellow River Basin, the growth rate of WUE reached a peak during 1995—2014, which is the decade with the year 2000 as the midpoint. The spatial heterogeneity of WUE was generated by the desynchrony of NPP and ET changes. Over 81.10% of the Yellow River Basin showed an increasing trend of WUE because the growth rate of NPP was higher than that of ET. (3) WUE in both the upper, middle and lower reaches will continue to grow in the future. In addition, the increase of WUE in the upper reaches is more persistent than that in the middle and lower reaches.

**Key Words:** carbon-water coupling; evapotranspiration; net primary productivity; vegetation structure; Hurst index

陆地生态系统碳-水循环是能量传输和水分运移的重要过程,也是连接大气圈和生态系统的重要桥梁<sup>[1]</sup>。水分利用效率(WUE)作为可深入理解生态系统碳水循环间耦合关系的重要指标<sup>[2]</sup>,既能反映生态系统碳水循环及其相互作用的关系,还能够揭示植被对全球变化的响应<sup>[3]</sup>。WUE 表征植被消耗单位质量的水分所固定的碳含量,最初应用在叶片或个体尺度的研究,目的是提高农作物产量<sup>[4–6]</sup>。随着遥感、地信技术的发展,关于 WUE 的研究上升到生态系统及区域尺度<sup>[7]</sup>。自此,WUE 的时空变化规律受到国内外学者的关注<sup>[8–10]</sup>,此时的 WUE 由区域总初级生产力(GPP)或净初级生产力(NPP)与蒸散(ET)的比值确定<sup>[11]</sup>。

近年来,气候变化问题日益突出。水资源的有效管理为实现全球温室气体减排目标、应对气候挑战提供了思路。然而,从 1995 年第一次举办的联合国气候变化框架公约(UNFCCC)会议到 2015 年的巴黎气候公约中发现,全球气候政策长期以来都主要集中在缓解由人类活动和土地利用方式改变引起的气候变化上<sup>[12]</sup>，“水”在干预政策中很大程度上被忽视了。同时,为减少气候变化带来的风险与影响,国际社会提出了全球 CO<sub>2</sub> 排放需实现“碳达峰”、“碳中和”的气候治理目标,中国科学家也深入探讨了“双碳”背景下的可行性方案<sup>[13, 14]</sup>。有研究表明,在气候变化背景下植被 WUE 的微小变化都可能对大区域碳水循环产生重大影响<sup>[15]</sup>。因此,关注区域 WUE 变化不仅是对碳水耦合过程规律的把握,更是应对气候变化挑战的关键。全球范围内已使用树木年轮碳同位素<sup>[16–19]</sup>、涡流通量测量<sup>[20, 21]</sup>、大气碳同位素组成分析<sup>[22]</sup>和地球系统建模技术<sup>[23]</sup>等方法分别从个体尺度、生态系统尺度发现了 WUE 增加的趋势。同时,有研究发现生态系统下垫面的差异可能会对 WUE 产生重大影响<sup>[24]</sup>,因而揭示不同区域 WUE 的时空变异特征及机制有助于预测未来气候变化对生态系统水、碳循环过程的影响<sup>[25, 26]</sup>。

黄河流域东西横跨我国半湿润区、半干旱区、干旱区等多个气候区。受人类活动影响,流域生态系统结构和水资源特征发生显著变化<sup>[27]</sup>。作为黄河源区的主要生态系统类型,高寒草地出现了不同程度的退化,自 2000 年来实施的生态保护和恢复工程也并未从根本上扭转这一局面<sup>[28]</sup>。但退耕还林草工程实施以来,位于黄河中游的黄土高原超过 62% 的区域呈现植被恢复态势,植被覆盖度上升至 65%<sup>[29]</sup>。由此可见,黄河流域上游与中下游地区的植被格局变化特征迥异,这势必会对二者的水分利用效率产生不同影响。目前有研究通过模型模拟、遥感估算等方法分析了陕北黄土高原<sup>[30]</sup>、黄河流域内渭河流域<sup>[31]</sup>、宁夏全域<sup>[7]</sup>和黄河中游秦岭等地区 WUE<sup>[32]</sup>的影响因素和时空变化规律。可以发现以往的工作大多集中在流域不同部位和特定生态系统类型上,关于流域整体的认识不足,尚未见到对黄河全域 WUE 进行的长时序分析。基于此,本文利用全球陆表特征参量数据集(GLASS)中的 NPP 和 ET 产品计算黄河流域 WUE,并结合中国逐年土地利用/覆盖数据集(CLUDE-A)<sup>[33]</sup>研究黄河流域植被结构变化背景下上游和中下游地区 WUE 的时空变化规律,讨论了其与 NPP 和 ET 变化率的关系,以期加深对黄河流域 WUE 变化规律的认识,为区域生态保护、应对气候变化提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区

黄河流域是连接青藏高原、黄土高原和华北平原的生态廊道,也是我国“一带一路”发展的重要经济廊道,是覆盖和辐射东、中、西部省区经济社会发展的重要纽带,维持黄河的健康对国家经济社会发展和生态安全都具有十分重要的作用<sup>[34]</sup>。黄河作为世界第五大河流,跨越 3 个气候带、8 个气候区和 15 个气候副区<sup>[35]</sup>,海拔落差大,生态系统脆弱,是全球人类活动最为强烈的地区之一。黄河约 60% 的水来自于兰州以上的黄河源区<sup>[28]</sup>;黄河中游穿越黄土高原,是全球水土流失最为严重的区域之一(图 1)。黄河流域不同区域气候、地理、生态条件的差异使得针对流域各部位的 WUE 研究结果可比性较低。例如,陕北黄土高原地区 WUE 多年均值是  $1.37 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$ <sup>[30]</sup>,渭河流域春、夏、秋、冬四季 WUE 分别为 0.57、1.05、0.66、0.12  $\text{g C/kg H}_2\text{O}$ <sup>[31]</sup>,宁夏全域 WUE 的值域为 0.55—2.98  $\text{g C/kg H}_2\text{O}$ <sup>[7]</sup>,而黄河中游秦岭等地的 WUE 在未来会呈现出增加趋势<sup>[32]</sup>。由此可见,黄河流域不同区域碳水耦合规律研究难以综合统筹形成共识。

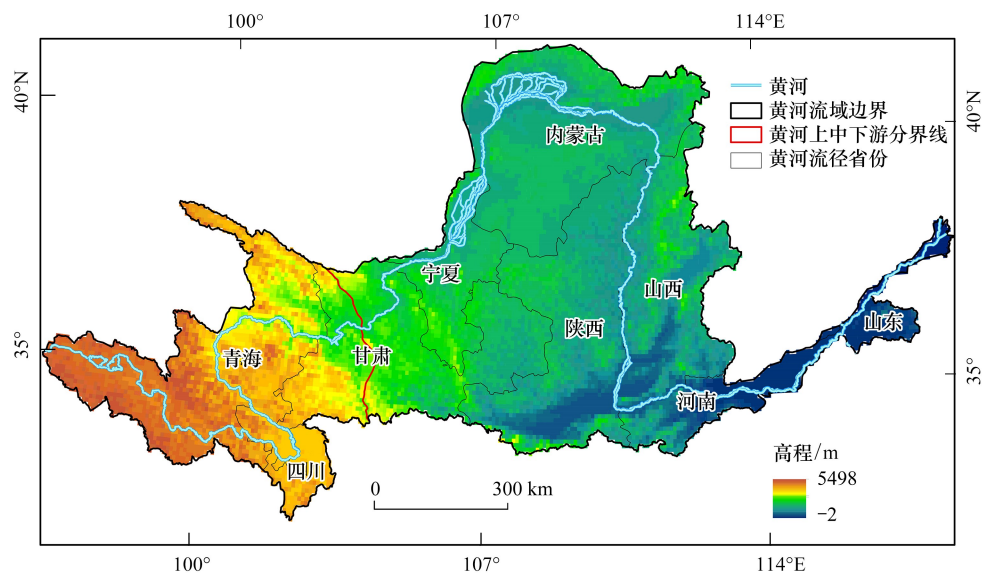


图 1 黄河流域位置示意图

Fig.1 Location and elevation of the Yellow River basin

### 1.2 数据

本研究使用的 1990—2018 年 NPP 和 ET 数据均来源于全球陆表特征参量数据产品,保证了 NPP 和 ET 数据时空分辨率的一致性(<http://www.glass.umd.edu/Download.html>)。GLASS 产品是基于多源遥感数据和地面实测数据反演得到的长时间序列、高精度的全球地表遥感产品。这些产品为研究全球环境变化提供了可靠的依据,已广泛应用于大气、植被覆盖、水体等方面的全球变化分析<sup>[36]</sup>。土地利用数据来源于中国逐年土地利用/覆盖数据集<sup>[33]</sup>,该数据集包含了 1980—2015 年全国土地利用变化的逐年栅格数据,以 GeoTiff 格式(.tif)共享。该数据集将土地利用类型划分为 11 类,分别是:农业用地、森林、草地、灌丛、湿地、水体、建筑物(住宅与其他类型)、未利用地(裸地与非裸地)和冰雪覆盖,其每个栅格的数值表示该土地利用类型面积的单位占比,一个栅格可包含多种土地利用类型<sup>[33]</sup>。为与 NPP 和 ET 数据保持时间的一致性,本研究选取 1990—2015 年土地利用逐年数据进行分析(表 1)。

### 1.3 研究方法

本研究基于 GLASS 的 NPP 和 ET 产品计算黄河流域 WUE,分析了其时空变化规律。根据三者间变化的异步性将其进行分类,结合 CLUD-A 数据分析了黄河流域植被格局变化过程中 WUE 的动态变化过程,同时对

三者的未来趋势变化进行预测。

表 1 数据集信息汇总

Table 1 Dataset information in this study

| 数据名称<br>Datasets                                             | 单位<br>Units       | 时间<br>Time  | 空间分辨率<br>Spatial resolution | 时间分辨率<br>Temporal resolution | 产品来源<br>Sources          |
|--------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 净初级生产力 Net Primary Production (NPP)                          | g                 | 1990—2018 年 | 0.05°                       | 年                            | GLASS 产品 <sup>[36]</sup> |
| 蒸散发 Evapotranspiration (ET)                                  | kg/m <sup>2</sup> | 1990—2018 年 | 0.05°                       | 年                            | GLASS 产品 <sup>[36]</sup> |
| 土地利用类型<br>China's Annual Land-Use/cover Datasets<br>(CLUD-A) | —                 | 1990—2015 年 | 0.0083°                     | 年                            | 参考文献 <sup>[33]</sup>     |

### 1.3.1 线性回归趋势分析

从空间上量化黄河流域 WUE 的时间变化规律,对 1990—2018 年黄河流域 WUE 的时间序列进行逐像元最小二乘法回归分析,得到黄河流域 WUE 逐年变化斜率。公式如下<sup>[7]</sup>:

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times WUE_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n WUE_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

式中, $k$  为回归斜率, $n$  为时间序列; $WUE_i$  是第  $i$  年的 WUE; $k > 0$  表明 WUE 呈增加趋势, $k < 0$  则表明 WUE 呈减小趋势。并对 WUE 变化趋势进行显著性分析, $P < 0.01$  表示变化极显著, $0.01 < P < 0.05$  表示变化显著, $P > 0.05$  表示变化不显著。

### 1.3.2 重标极差法

基于重标极差 ( $R/S$ ) 分析方法的 Hurst 指数是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法,它最早是由英国水文学家 Hurst 提出<sup>[37]</sup>,其基本原理是:给定一时间序列  $\xi(t)$ ,  $t = 1, 2, \dots$ , 对于任意正整数  $\tau = 1$ , 定义均值序列  $\langle \xi \rangle_\tau$ <sup>[38]</sup>:

$$\begin{aligned} \langle \xi \rangle_\tau &= \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi(i) \\ X(t, \tau) &= \sum_{u=1}^{\tau} (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau) \\ R(\tau) &= X(t, \tau)_{\max} - X(t, \tau)_{\min} \\ S(\tau) &= \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi(i) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$X(t, \tau)$  是对原始序列  $\xi(t)$  与均值序列  $\langle \xi \rangle_\tau$  的差值求和,  $R(\tau)$  是  $X(t, \tau)$  的极差,  $S(\tau)$  是对原始序列  $\xi(t)$  与均值序列  $\langle \xi \rangle_\tau$  差值平方和的均值进行开方运算。若存在  $R/S \propto \tau^H$ , 则说明该时间序列存在 Hurst 现象,  $H$  值称为 Hurst 指数。Hurst 指数主要有 3 种形式: (1) 当  $0.5 < H < 1$  时, 表明该时间序列是一个持续性序列, 即未来变化趋势与过去趋势一致, 且  $H$  越接近于 1, 持续性越强; (2) 当  $H = 0.5$  时, 表明该时间序列为随机序列, 即未来变化趋势与过去趋势无关; (3) 当  $0 < H < 0.5$  时, 表明该时间序列具有反持续性, 即未来的变化趋势与过去趋势相反, 且  $H$  越接近于 0, 反持续性越强。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河流域植被结构与变化

通过对 CLUD-A 数据进行逐年分析和面积统计后发现, 黄河流域的主要植被类型为草地、耕地、灌丛和森林 4 类, 占据黄河流域大部分地区。黄河上游地区上述 4 种主要植被类型占比超过流域总面积的 80%, 中游

地区占比超过 90%。总体上 4 种植被类型存在不同的变化趋势(图 2),上游与中下游地区的耕地面积均在 26 a 存在下降趋势,并于 2001 年骤降;中下游地区森林面积于 2001 年后显著抬升,随后由 4.7 万  $\text{km}^2$  逐年递增至 2015 年的 4.98 万  $\text{km}^2$ ,但上游地区的森林面积于 2004 年达到峰值后逐年下降,并于 2015 年重返 1990 年森林面积水平;黄河流域的草地面积变化规律与耕地较为相似,整体在 26 a 呈现下降趋势且于 2002 年左右骤降;中下游地区的灌丛面积在 2001 年突增并随后保持稳定,而上游灌丛面积自 1990 年波动增加至 1998 年后保持稳中下降的态势(图 2)。总体来看,虽然上游地区草地面积表现出逐年下降趋势,但其占比一直大于 68%;中下游地区耕地面积超过流域总面积的 32%,与草地生态系统(占比>38%)一起成为黄河中下游地区的主要植被类型(占比>70%)。由此可见,黄河流域不同植被类型的面积在上游与中下游之间存在不同的变化规律,因此除分析时间序列上的变化规律外,还应对 4 种植被的空间变化率进行分析。

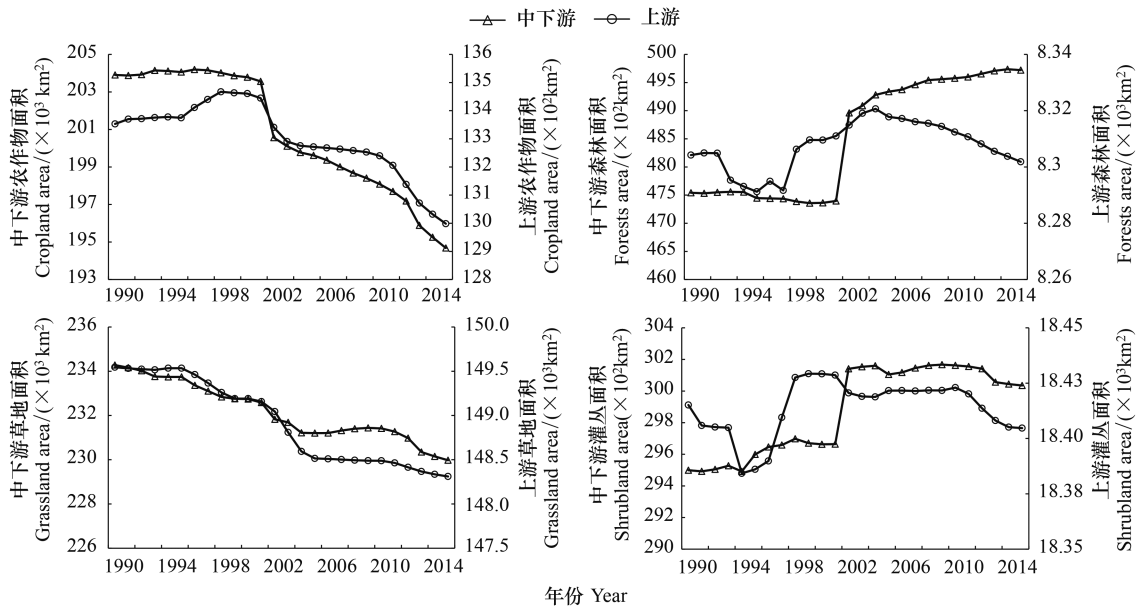


图 2 黄河流域上游与中下游植被结构与组成的对比

Fig.2 Comparison of vegetation structure and composition in the upper and middle-low reaches of the Yellow River Basin

对 1990—2015 年的 4 种主要植被面积进行线性变化趋势分析可知,耕地、灌丛、草地和森林土地利用类型均表现出明显的空间分布差异性。黄河流域的耕地主要分布在中下游地区(图 3),尽管如上文所述,上中下游耕地面积总体呈现下降趋势,但从空间上来看耕地面积增加的区域也存在,并分布在上游北部和中游东南部地区,耕地减小区域以带状形式集中在黄河中游东南部以及下游等平原地区(图 3)。由图 3 可知,黄河流域草地分布较广,其面积增加区与减少区相间分布,但在上游西部和中游西北部地区存在较为集中的面积下降区,总体上草地面积呈现下降趋势。灌丛与森林植被类型的分布如图 3 所示,二者的面积增加区均明显多于减少区,且在黄河中游北部地区存在集中分布情况。综上所述,黄河流域农田与草地的面积在 26 a 表现为减小趋势,灌丛和森林面积呈增加态势。

## 2.2 黄河流域 WUE 的时空变化特征

黄河流域 29 a 的 WUE 均值在 0.18—1.53  $\text{g C/kg H}_2\text{O}$  波动。其空间分布如图 4 所示,由图可知黄河流域不同区域的 WUE 空间差异较大。WUE 的高值区域(0.94—1.53  $\text{g C/kg H}_2\text{O}$ )主要分布在黄河流域上游地区东部、中游地区的黄土高原东南部、关中平原中部以及下游部分地区。低值区(0.02—0.33  $\text{g C/kg H}_2\text{O}$ )分布在黄河中游黄土高原西北部、内蒙古中部、宁夏北部以及黄河上游西部地区。总体上,黄河流域上游地区 WUE 显著高于中下游地区,且呈现出北低南高的分布态势。

基于 1990—2018 年 WUE 数据在空间尺度上进行趋势分析。黄河流域 WUE 变化率的值域处于 -0.02—

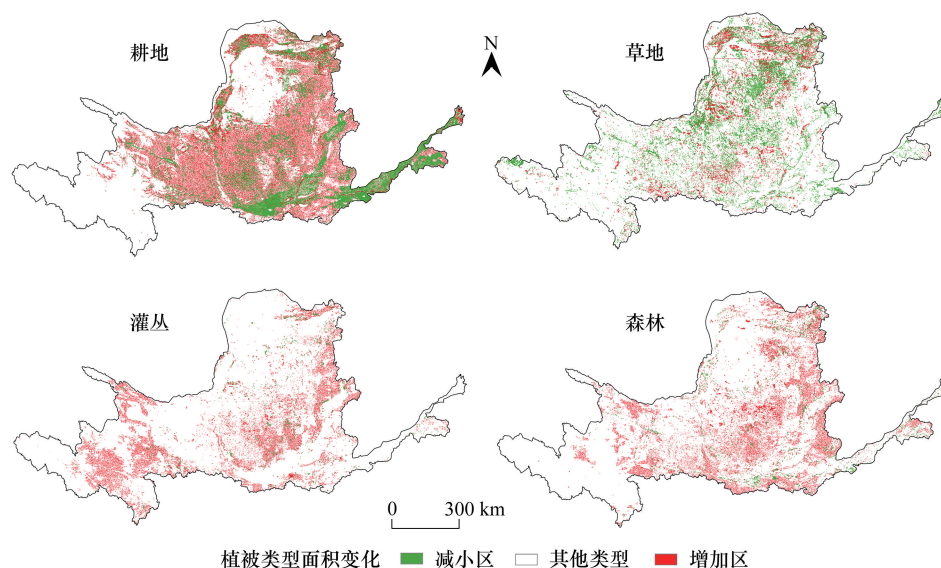


图3 黄河流域不同植被类型面积变化的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of area change of different vegetation types in the Yellow River Basin

0.03 g C/kg H<sub>2</sub>O 之间,在 29 a 呈现明显的空间异质性。利用自然断点法原则进行重分类,并用增长显著性栅格数据进行叠加分析后得到 6 类 WUE 变化地区,分别为:极显著增长/下降区、显著增长/下降区、不显著增长/下降区(图 4)。如图 4 所示:黄河流域 WUE 变化率>0 的区域占比高达 81.93%,总体呈现增加趋势,其中显著增加地区涵盖了黄河流域 54.64%的面积区域,且集中在黄河上游西部地区以及黄土高原中部和关中平原北部地区。WUE 变化率<0 的区域占比仅为 18.07%,其显著下降区集中在黄河中游东南部及下游部分地区,仅占黄河流域面积的 5.56%。由此可见,黄河流域 WUE 在大部分地区呈现出增加态势,WUE 显著增加区域与其 29 a 的均值的低值区具有空间分布的一致性;WUE 不显著变化区域与 29 a 均值的高值区具有空间分布的一致性。

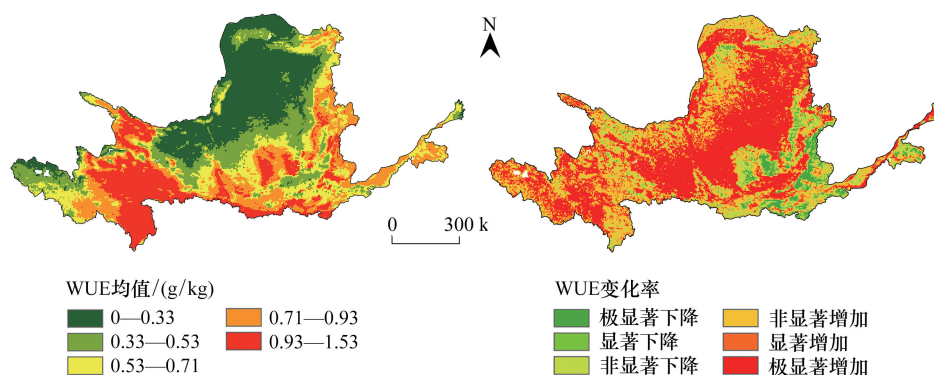


图4 黄河流域 WUE 的 29 年均值空间分布及其变化率

Fig.4 Spatial distribution of WUE and its change rate over the Yellow River Basin in 29 years

WUE:水分利用效率 Water use efficiency

此外,分别对 1990—2018 年黄河流域上游与中下游 WUE 求取均值发现,上游与中下游地区的 WUE 均存在波动上升趋势(图 5)。上游地区在 29 a 的 WUE 在 0.66—0.92 g C/kg H<sub>2</sub>O 波动,并以每年 0.007 g C/kg H<sub>2</sub>O 的速率增加;中下游地区 WUE 在 0.43—0.62 g C/kg H<sub>2</sub>O 之间,增速为每年 0.004 g C/kg H<sub>2</sub>O。由此可见,虽然

上游逐年 WUE 数值均显著高于中下游地区,且在 29 a 的增加速率也明显高于中下游地区,但上游与中下游地区的 WUE 在年际间的波动变化形态较为相似。同时,对上游 WUE 与中下游 WUE 之间做皮尔逊相关分析发现(图 5),二者呈现出显著相关性( $R=0.74$ )。这表明,即使上游与中下游之间 WUE 的数值不同,但二者存在变化的一致性。

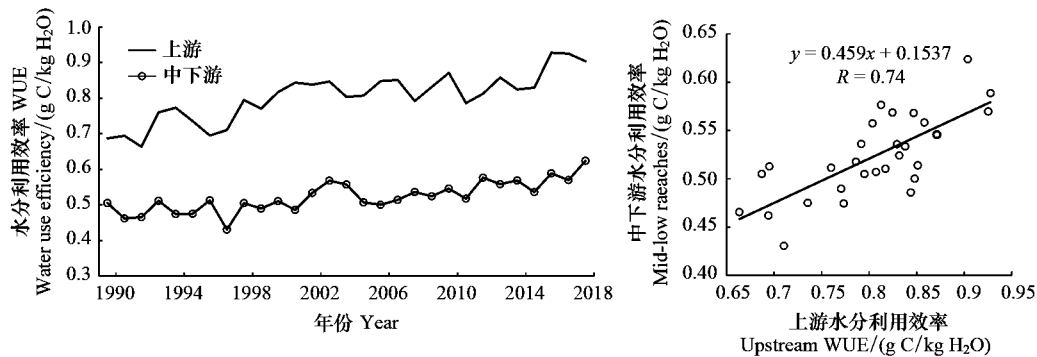


图 5 黄河流域上游与中下游 WUE 的对比

Fig.5 Comparison of WUE between the upper and middle-low reaches of the Yellow River Basin

### 2.3 植被格局变化条件下黄河流域 WUE 时空变化驱动力分析

黄河流域 WUE 由 NPP 与 ET 计算得到,两者空间分布情况和数值大小直接决定 WUE 的时空变化特征。黄河流域植被格局的变化过程势必导致 NPP 与 ET 的波动,而 NPP 与 ET 变化的异步性导致了 WUE 变化率的动态变化趋势。黄河流域 NPP 和 ET 在 29 a 存在明显的空间异质性(图 6),NPP 变化率值域为 $-14.56$ — $16.44$  g C/a,NPP 增加区域分布在黄河上游中南部、中游西部、关中平原北部以及中游黄河河道附近;NPP 下降区域集中分布在黄河流域中游东南部 and 下游大部分地区。ET 变化率处在 $-6.44$ — $19.31$  mm/a 之间,速率增加区大面积集中在黄河中游北方的中部地区,同时在关中平原西部和东部也存在小区域分布;ET 变化减小区域以“牛眼”形态集中分布在各城市群,如以西安为核心的关中城市群、以郑州大都市区为主的中原城市群。

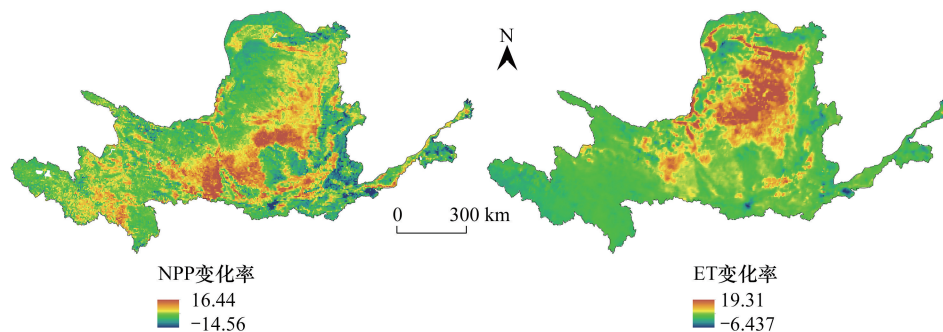


图 6 黄河流域 NPP 和 ET 在 29 a 的变化情况

Fig.6 Changes of NPP and ET in the Yellow River Basin during 29 years

NPP: 净初级生产力 Net primary production; ET: 蒸散发 Evapotranspiration

为从时间尺度探究黄河流域 WUE 与 NPP 和 ET 的变化关系,本文以 10 a 为滑动窗口,计算得到 1990—2018 年 WUE、NPP 和 ET 每 10 a 的变化率。如图 7 所示,WUE、NPP 和 ET 每 10 a 变化率波动形态在上游与中下游存在差异。上游地区 WUE、NPP 和 ET 在 1990—2007 年内每 10 a 的变化率均为正,三者在此时段存在增加趋势,但增加幅度先快后慢,即从第一个 10 a(1990—1999 年)开始快速增加,于 1995—2004 年的时段

均达到增速峰值,之后放缓。在1999—2015年这8个10 a期间NPP与ET变化均呈现增加趋势,但由于NPP的增幅小于ET,因此在这一阶段内WUE变化率一直为负。随后,WUE于2007—2016年时段转负为正(图7),这是由于ET减小而NPP依然增加,二者变化的异步性导致了WUE增加幅度迅速加大(图7)。中下游地区WUE、NPP和ET的增长率也存在先快后慢的特征,峰值同样出现在1995—2004这10 a,但与上游不同,中下游地区WUE变化率在1990—2010年内均呈增加态势,仅在2002—2011这10年内出现29 a的唯一负值,这是由于NPP在该时段内减少,而ET在增加,所以导致WUE减少程度更剧烈。同时,对比图7上游与中下游WUE的变化率发现,中下游地区WUE增长期比上游WUE增长期跨度大,其减小期明显短于上游地区。

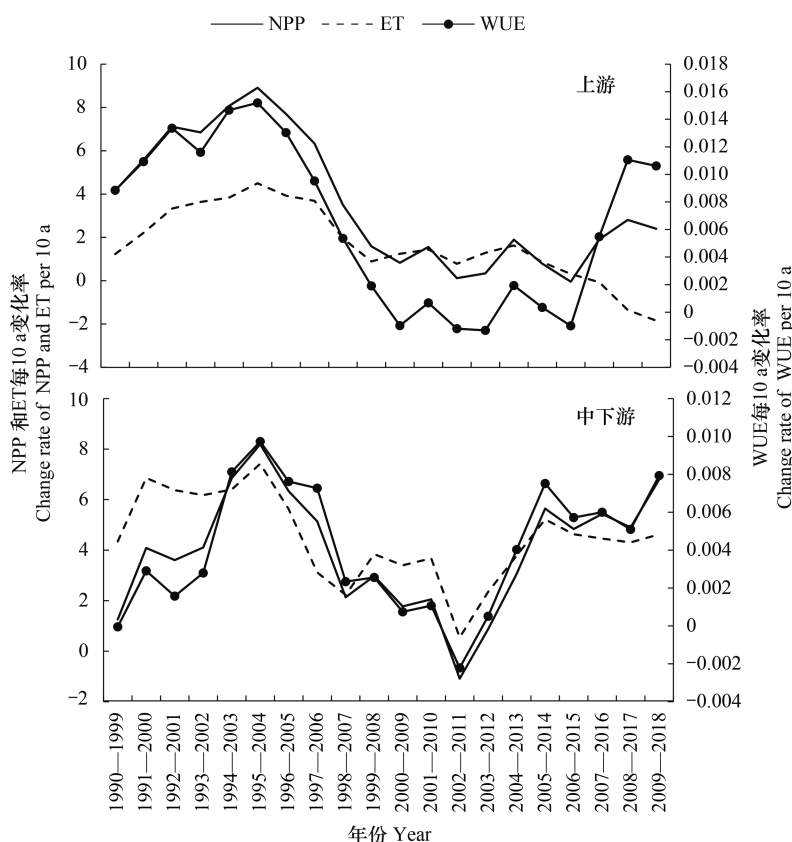


图7 黄河流域WUE与NPP、ET每10 a变化规律分析及上游与中下游之间的对比

Fig.7 Analysis of WUE, NPP and ET variation every 10 years in the Yellow River Basin and comparison between the upper and middle-low reaches

为探究植被变化背景下整个流域内NPP、ET和WUE的变化过程,首先对三者29 a的变化率进行空间叠加分析,根据其变化的不同步性可将WUE划分为6类区域,如表2所示:A、B、C分别代表NPP减小幅度小于ET、NPP增加ET减小、NPP增幅大于ET所导致WUE增加的区域;D、E、F分别代表NPP降幅大于ET、NPP增幅小于ET、NPP减小ET增加导致WUE下降的区域。

6类WUE区域空间分布如图8所示,其中C类( $NPP > 0$ ,  $ET > 0$ ,  $WUE > 0$ )所占比例最大,这表明黄河流域大部分地区的NPP和ET均呈增加趋势,且由于NPP增加速率大于ET,导致WUE也在逐年增加。同时,前文述及黄河流域4种主要植被面积在26 a存在不同的时空变化特征(图2和图3),而植被结构与分布的变化过程势必导致NPP与ET波动,进而影响黄河流域WUE的变化。为分析植被变化过程中WUE的特征,本研究以占比最高的C类WUE为基准提取出区域内4种植被面积变化,其统计结果表明该区域内农田与草地面积呈现逐年递减趋势,分别减少了 $4.52 \times 10^3 \text{ km}^2$ 和 $3.17 \times 10^3 \text{ km}^2$ ;而区域内森林与灌丛面积在26 a分别增

加至  $2.13 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $1.79 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 8)。总体上,26 a 的草地、农田面积在 C 类地区内均呈现减小态势,二者均在 2001 年左右断崖式下跌,但农田面积减小幅度大于草地面积变化(图 8);灌丛和森林面积在 C 类区域上呈现增加态势,并于 2002 年突增(图 8)。由此可见,黄河流域超过 81.10% 的区域所呈现出的 WUE 增加态势与区域内植被格局的变化密切相关。

表 2 WUE 分区表  
Table 2 WUE partition table

| 变化率<br>Change rate | A 类<br>Class A | B 类<br>Class B | C 类<br>Class C | D 类<br>Class D | E 类<br>Class E | F 类<br>Class F |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| NPP                | <0             | >0             | >0             | <0             | >0             | <0             |
| ET                 | <0             | <0             | >0             | <0             | >0             | >0             |
| WUE                | >0             | >0             | >0             | <0             | <0             | <0             |

WUE:水分利用效率 Water use efficiency

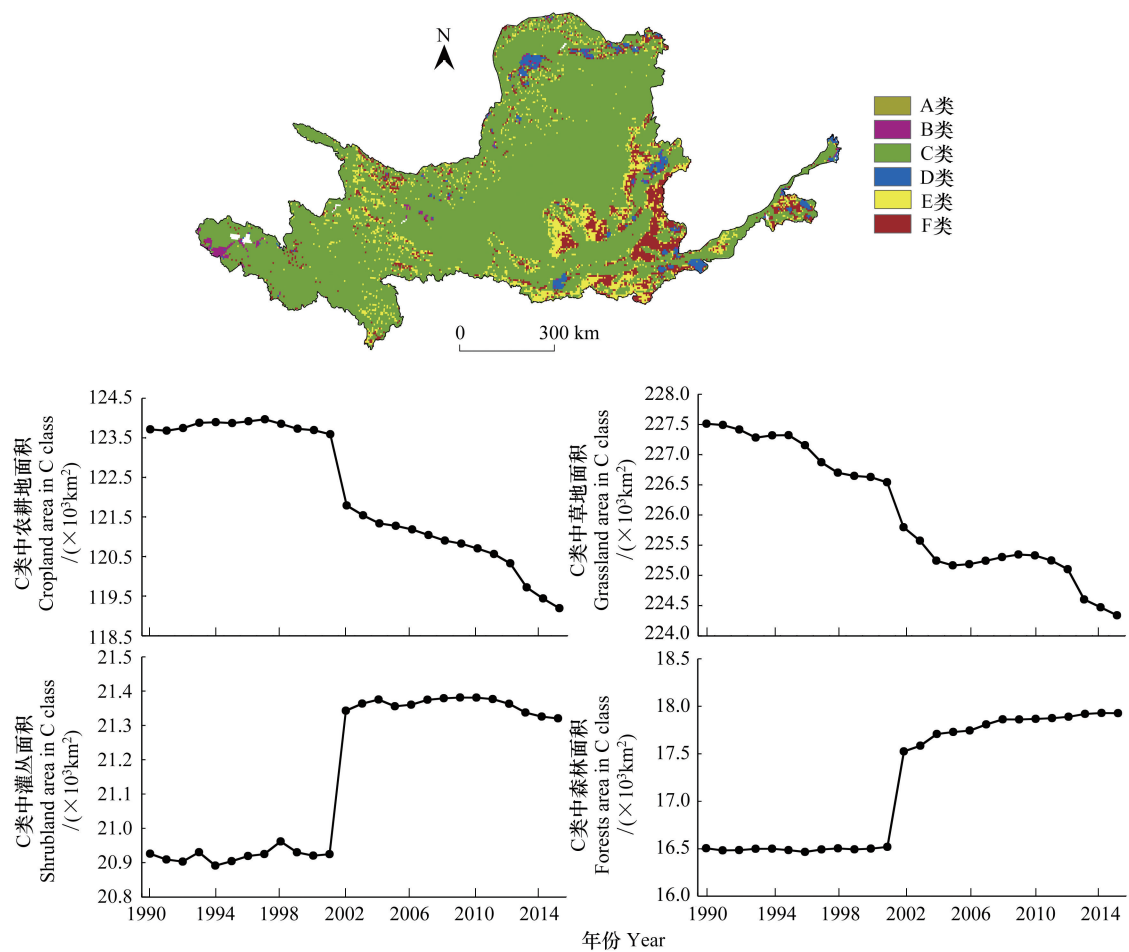


图 8 WUE 分区图及 C 类中 4 种植被面积变化规律

Fig.8 Spatial distribution map of WUE and the 4 kinds of vegetation area change in class C

A 类: NPP<0,ET<0,WUE>0; B 类: NPP>0,ET<0,WUE>0; C 类: NPP>0,ET>0,WUE>0; D 类: NPP<0,ET<0,WUE<0; E 类: NPP>0,ET>0,WUE<0; F 类: NPP<0,ET>0,WUE<0

2.4 黄河流域 WUE 未来变化趋势分析

利用重标极差法分别对上游与中下游地区的 WUE 进行预测后发现二者均存在 Hurst 现象。上游地区 WUE 的 Hurst 指数为 0.80(>0.5),中下游 WUE 的 Hurst 指数为 0.78(>0.5)。这表明 WUE 的未来变化可能与

过去保持一致,即:黄河流域全域 WUE 将会保持增加的态势,并且由于上游地区 Hurst 指数相较于中下游更接近 1,意味着上游 WUE 保持增加状态的持续性更强。此外,分别对黄河上游和中下游 NPP、ET 的 29 a 逐年均值进行线性回归分析后发现上游 NPP 和 ET 逐年变化率为  $3.57 \text{ g C/m}^2 \text{ a}$  和  $1.48 \text{ kg/m}^2 \text{ a}$ ,相差约 2.5 倍;中下游地区 NPP 变化率为  $3.795 \text{ g C/m}^2 \text{ a}$ ,略小于中下游 ET 的变化率  $4.22 \text{ kg/m}^2 \text{ a}$ 。由此可见,黄河流域 NPP 和 ET 在 29 a 均存在上升趋势但增速间存在差异(图 9)。同样基于重标极差法分别对上游与中下游地区的 NPP、ET 进行预测后发现,上游与中下游 NPP 的 Hurst 指数分别为 0.85 和 0.84,上游与中下游 ET 的 Hurst 指数分别为 0.88 和 0.86,均大于 0.5 且接近 1。这表明黄河流域 NPP 和 ET 在未来均存在持续增加的趋势,且由于未来上游地区 NPP 增长速率可能显著大于 ET 增速,中游地区 NPP 增速略小于 ET,最终将导致上游 WUE 增加的持续性强于中下游地区。

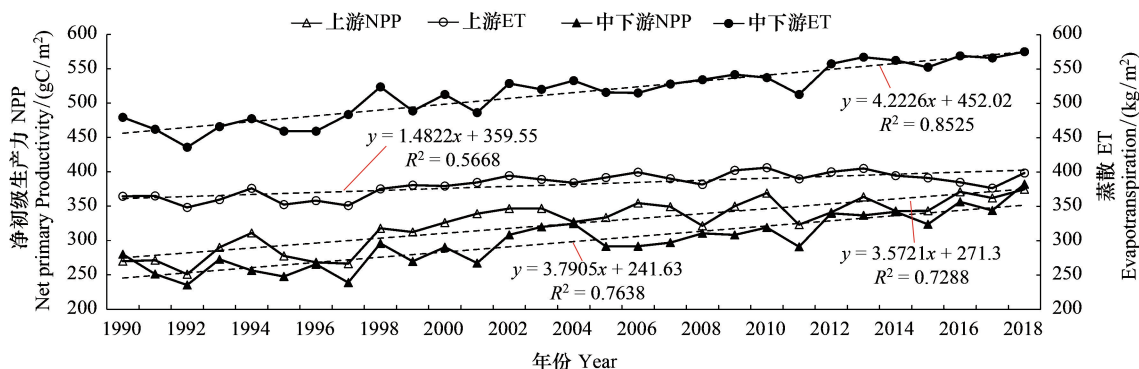


图 9 黄河流域上游与中下游 NPP 与 ET 逐年变化

Fig.9 Annual variation of NPP and ET in the upper and middle-low reaches of the Yellow River Basin

### 3 讨论

本研究从长时间序列讨论了黄河流域 WUE 的时空变化规律及其与决定因子 NPP、ET 和植被格局变化的关系。整体上,黄河流域 WUE 呈现逐年波动增加的趋势,这与前人关于全球尺度 WUE 的研究结果一致<sup>[15]</sup>。从流域尺度看,黄河上游地区 WUE( $0.66—0.92 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$ )明显高于中下游 WUE( $0.43—0.62 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$ ),这是由上游地区与中下游地区植被结构的差异导致的。不同的下垫面特征势必会对 WUE 产生不同的影响,通过对 CLUD-A 数据进行分析可看出黄河流域上游到中下游地区的依次相间分布着草地、灌丛、农田和森林,全流域自西向东总体呈现草原向森林生态系统过渡的趋势。

从空间尺度看,植被格局变化过程中的黄河流域内大部分地区 NPP、ET 均呈现增加态势,且由于 NPP 增加速率大于 ET,导致 WUE 也在逐年增加(图 8)。这是由 2000 年开始实施的退耕还林还草工程使得黄河中游地区森林、灌丛面积骤增、农田面积减小导致的(图 8)。上述结果与李艳忠<sup>[39]</sup>等人关于黄河中游植被面积变化的研究结果一致,同时揭示了自退耕还林还草工程实施以来黄河流域的上游与中下游地区草地面积在逐年减小,印证了黄河源区草地退化日趋严重,且加速土地荒漠化程度<sup>[40]</sup>的观点。由前人已发表的结果可知,森林生态系统 WUE>农田 WUE>草地 WUE<sup>[41]</sup>,且稠密灌丛 WUE 与森林生态系统 WUE 水平较为接近<sup>[42]</sup>。以上结果表明,黄河流域不同 WUE 水平植被的面积变化是导致该区域内 WUE 整体水平的变化的主要原因之一,即:以退耕还林还草工程为主的人类活动使高 WUE 水平的森林和灌丛面积增加,低 WUE 水平的农田和草地面积显著减少,进而提升了整个流域尺度 WUE 水平。由此可见,生态恢复工程的实施会一定程度提高黄河流域生态系统水分利用效率。

从时间尺度看,黄河流域上游及中下游 NPP、ET 与 WUE 每 10 a 的变化率峰值均出现在以 2000 年为中间点的 1995—2004 内(图 7),且草地、农田、灌丛和森林的面积也均在 2000 年左右出现明显拐点,具体表现

为草地、农田面积骤降,灌丛与森林面积显著抬升(图 2),这可能是由于我国 2000 年开始实施的退耕还林还草工程使植被结构与组成产生巨大变化,进而导致流域内大部分地区 NPP、ET 的显著增加,最终致使 WUE 在 1995—2004 年增速加快并达到近 29 a 的峰值。同时,由于中游地区是退耕还林还草工程主要的实施区域,且植被分布面积较广,退耕还林还草工程等人为活动影响相比于上游更剧烈,从而使中下游地区 NPP 和 ET 增加的持续时间更长,这可能是导致中下游地区 WUE 增长期比上游 WUE 增长期跨度大的原因(图 7)。由此可见,生态恢复工程的实施可能会延长 WUE 增长的态势,使得工程主要实施区黄河中游 WUE 的增长期更长。

黄河流域上游与中下游地区 NPP、ET 增速的差异是致使未来上游地区 WUE 增加的持续性强于中下游地区的原因,且不同 WUE 水平的植被面积变化是导致黄河流域 WUE 产生变化的主要原因,因此可推测未来黄河流域 NPP 和 ET 变化的异步性是由植被格局变化引起的,故如何量化未来植被格局变化下黄河流域 WUE 的变化规律是本研究下一步需开展的工作。同时,本研究未考虑 WUE 与其它影响因素的相互作用关系,已有大量研究从不同尺度、利用不同方法对 WUE 的影响因素进行分析,并就降水<sup>[43]</sup>、气温<sup>[44]</sup>、CO<sub>2</sub><sup>[45]</sup>、臭氧浓度<sup>[46]</sup>、辐射<sup>[3]</sup>、氮沉降<sup>[47]</sup>等因素对其影响进行了详实讨论,但这些因素如何影响黄河流域 WUE 还需进一步分析,也是下一步需要深入的工作。综上所述,探究黄河流域植被格局变化背景下 WUE 变化特征,不仅是对流域尺度碳水耦合规律的把握,表明黄河流域植被格局变化对提升 WUE 水平的作用,为未来退耕还林草工程的实施对生态系统 WUE 的影响研究提供了理论指导。

#### 4 结论

基于 GLASS 的 NPP 和 ET 产品定量分析得到了黄河流域不同区域 WUE 时空变化规律,并对其决定因素进行分析后得到如下结论:(1)黄河流域 29 a WUE 总体呈现波动上升态势,其均值域为 0.18—1.53 g C/kg H<sub>2</sub>O,黄河流域不同的植被结构与组成导致 WUE 存在明显的空间异质性,总体上由西向东递减。(2)黄河上游 WUE 均显著高于中下游地区,二者差值在 0.23—0.30 g C/kg H<sub>2</sub>O 之间,但年际间波动变化一致,二者具有较强相关性;中下游地区 WUE 增长期比上游 WUE 增长期跨度大,其减小期明显短于上游地区。(3)在黄河流域植被结构的显著变化下,流域内 NPP 与 ET 变化的异步性提高了流域内绝大部分区域(81.10%) WUE,并且其增速在 2000 年左右达到峰值。(4)利用重标极差法对黄河上游和中下游地区 WUE 进行趋势预测后发现二者 Hurst 指数分别为 0.80 和 0.78,即黄河流域全域 WUE 在未来将会继续保持增加趋势,且上游增加趋势的持续性更强。

#### 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] 胡中民,于贵瑞,王秋风,赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展. *生态学报*, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [3] 王庆伟,于大炮,代力民,周莉,周旺明,齐光,齐麟,叶雨静. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3255-3265.
- [4] 王会肖,刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展. *水科学进展*, 2000, 11(1): 99-104.
- [5] 张岁岐,山仑. 植物水分利用效率及其研究进展. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(4): 1-5.
- [6] 李荣生,许煌灿,尹光天,杨锦昌,李双忠. 植物水分利用效率的研究进展. *林业科学研究*, 2003, 16(3): 366-371.
- [7] 宫菲,杜灵通,孟晨,丹杨,王乐,郑琪琪,马龙龙. 宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子. *生态学报*, 2019, 39(24): 9068-9078.
- [8] Huang G, Li Y, Mu X H, Zhao H M, Cao Y F. Water-use efficiency in response to simulated increasing precipitation in a temperate desert ecosystem of Xinjiang, China. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(6): 823-836.
- [9] Ito A, Inatomi M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(2): 681-694.

- [10] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 王安志, 金昌杰, 吴家兵, 李峥, 井艳丽. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素. 生态学报, 2015, 35(2): 478-488.
- [11] Tian H Q, Chen G S, Liu M L, Zhang C, Sun G, Lu C Q, Xu X F, Ren W, Pan S F, Chappelka A. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895—2007. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [12] Miralles-Wilhelm F. Water is the middle child in global climate policy. *Nature Climate Change*, 2022, 12(2): 110-112.
- [13] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434.
- [14] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 何念鹏. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501.
- [15] Mathias J M, Thomas R B. Global tree intrinsic water use efficiency is enhanced by increased atmospheric CO<sub>2</sub> and modulated by climate and plant functional types. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(7): e2014286118.
- [16] Frank D C, Poulter B, Saurer M, Esper J, Huntingford C, Helle G, Treydte K, Zimmermann N E, Schleser G H, Ahlström A, Ciais P, Friedlingstein P, Levis S, Lomas M, Sitch S, Viovy N, Andreu-Hayles L, Bednarz Z, Berninger F, Boettger T, D' Alessandro C M, Daux V, Filot M, Grabner M, Gutierrez E, Haupt M, Hiltunen J, Jungner H, Kalela-Brundin M, Krapiec M, Leuenberger M, Loader N J, Marah H, Masson-Delmotte V, Pazdur A, Pawelczyk S, Pierre M, Planells O, Pukiene R, Reynolds-Henne C E, Rinne K T, Saracino A, Sonninen E, Stievenard M, Switsur V R, Szczepanek M, Szychowska-Krapiec E, Todaro L, Waterhouse J S, Weigl M. Water-use efficiency and transpiration across European forests during the Anthropocene. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 579-583.
- [17] Guerrieri R, Belmecheri S, Ollinger S V, Asbjornsen H, Jennings K, Xiao J F, Stocker B D, Martin M, Hollinger D Y, Bracho-Garrillo R, Clark K, Dore S, Kolb T, Munger J W, Novick K, Richardson A D. Disentangling the role of photosynthesis and stomatal conductance on rising forest water-use efficiency. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(34): 16909-16914.
- [18] Peñuelas J, Canadell J G, Ogaya R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(4): 597-608.
- [19] van der Sleen P, Groenendijk P, Vlam M, Anten N P R, Boom A, Bongers F, Pons T L, Terburg G, Zuidema P A. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO<sub>2</sub> fertilization but water-use efficiency increased. *Nature Geoscience*, 2015, 8(1): 24-28.
- [20] Knauer J, Zaehle S, Reichstein M, Medlyn B E, Forkel M, Hagemann S, Werner C. The response of ecosystem water-use efficiency to rising atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: sensitivity and large-scale biogeochemical implications. *The New Phytologist*, 2017, 213(4): 1654-1666.
- [21] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, Dragoni D, Munger J W, Schmid H P, Richardson A D. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. *Nature*, 2013, 499(7458): 324-327.
- [22] Keeling R F, Graven H D, Welp L R, Resplandy L, Bi J, Piper S C, Sun Y, Bollenbacher A, Meijer H A J. Atmospheric evidence for a global secular increase in carbon isotopic discrimination of land photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(39): 10361-10366.
- [23] Cernusak L A, Haverd V, Brendel O, Le Thiec D, Guehl J M, Cuntz M. Robust response of terrestrial plants to rising CO<sub>2</sub>. *Trends in Plant Science*, 2019, 24(7): 578-586.
- [24] Adams M A, Buckley T N, Turnbull T L. Diminishing CO<sub>2</sub>-driven gains in water-use efficiency of global forests. *Nature Climate Change*, 2020, 10(5): 466-471.
- [25] Ponton S, Flanagan L B, Alstad K P, Johnson B G, Morgenstern K, Kljun N, Black T A, Barr A G. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 294-310.
- [26] Yu G R, Wang Q F, Zhuang J. Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(3): 303-318.
- [27] Wang H J, Wu X, Bi N S, Li S, Yuan P, Wang A M, Syvitski J P M, Saito Y, Yang Z S, Liu S M, Nittrover J. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): a review. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 93-113.
- [28] 王艳芬, 陈怡平, 王厚杰, 吕一河, 郝彦宾, 崔晓勇, 王玉哲, 胡容海, 薛凯, 傅伯杰. 黄河流域生态系统变化及其生态水文效应. 中国科学基金, 2021, 35(4): 520-528.
- [29] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
- [30] 段艺芳, 任志远, 孙艺杰. 陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应. 生态学报, 2020, 40(10): 3408-3419.
- [31] 位贺杰, 张艳芳, 董孝斌, 鲁纳川, 王雪超. 渭河流域植被 WUE 遥感估算及其时空特征. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1275-1288.
- [32] 李明旭, 杨延征, 朱求安, 陈槐, 彭长辉. 气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率变化趋势. 生态学报, 2016, 36(4): 936-945.

- [33] Xu Y D, Yu L, Peng D L, Zhao J Y, Cheng Y Q, Liu X X, Li W, Meng R, Xu X L, Gong P. Annual 30-m land use/land cover maps of China for 1980-2015 from the integration of AVHRR, MODIS and Landsat data using the BFAST algorithm. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(9): 1390-1407.
- [34] 樊杰, 王亚飞, 王怡轩. 基于地理单元的区域高质量发展研究——兼论黄河流域同长江流域发展的条件差异及重点. *经济地理*, 2020, 40(1): 1-11.
- [35] 周广胜, 周莉, 汲玉河, 吕晓敏, 周梦子. 黄河水生态承载力的流域整体性和时空连通性. *科学通报*, 2021, 66(22): 2785-2792.
- [36] Liang S L, Cheng J, Jia K, Jiang B, Liu Q, Xiao Z Q, Yao Y J, Yuan W P, Zhang X T, Zhao X, Zhou J. The global land surface satellite (GLASS) product suite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, 102(2): E323-E337.
- [37] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.
- [38] 张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势. *资源科学*, 2011, 33(11): 2143-2149.
- [39] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 梁康, 白鹏, 冯异星. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2005-2020.
- [40] 郭婧, 张骞, 宋明华, 师燕, 周秉荣, 王文颖, 李以康, 赵新全, 周华坤. 黄河上游草地生态现状及功能提升技术. *草地学报*, 2020, 28(5): 1173-1184.
- [41] Lu X L, Zhuang Q L. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 1924-1939.
- [42] 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.
- [43] 高聚林, 赵涛, 王志刚, 郭改玲, 范磊. 高丹草水分利用效率与叶片生理特性的关系. *作物学报*, 2007, 33(3): 455-460.
- [44] 刘贤赵, 王国安, 李嘉竹, 王文文, 赵丽丽, 李宝江. 中国北方农牧交错带 C3 草本植物  $\delta^{13}\text{C}$  与温度的关系及其对水分利用效率的指示. *生态学报*, 2011, 31(1): 123-136.
- [45] 王建林, 于贵瑞, 房全孝, 姜德锋, 齐华, 王秋风. 不同植物叶片水分利用效率对光和  $\text{CO}_2$  的响应与模拟. *生态学报*, 2008, 28(2): 525-533.
- [46] Handley T, Grulke N E. Interactive effects of O<sub>3</sub> exposure on California black oak (*Quercus kelloggii* Newb.) seedlings with and without N amendment. *Environmental Pollution*, 2008, 156(1): 53-60.
- [47] Chen S P, Bai Y F, Zhang L X, Han X G. Comparing physiological responses of two dominant grass species to nitrogen addition in Xilin River Basin of China. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53(1): 65-75.