

广东省陆地生态系统水分利用效率的时空变化及其归因分析

刘林鑫^{1,2}, 张珂³, 李曦⁴

(1. 唐山师范学院资源管理系; 2. 唐山市城市生态系统仿真重点实验室; 3. 河海大学水文水资源学院;
4. 北京大学碳中和研究院)

摘要:为揭示广东省陆地生态系统水分利用效率(WUE)的时空特征及环境因子变化所造成的影响,基于MODIS卫星遥感数据计算了2000–2020年广东省陆地生态系统WUE。结合精细化降水量、温度和土壤湿度数据产品,采用趋势分析、偏相关性分析、最大值合成等方法,识别了广东省陆地生态系统WUE的6种年际变化类型,评估了WUE主要变化类型中环境因子引发的生态系统碳水通量变化对WUE的潜在影响。结果表明:广东省陆地生态系统WUE上升趋势主要位于粤西和珠三角南部,下降趋势主要位于粤东、粤北及珠三角部分地区,趋势的差异主要是由于总初级生产力(GPP)和实际蒸散发(AET)增长速率不同所致;UUU和DUU为两种主要的WUE年际变化类型,UUU变化类型中,温度因子驱动稀树草原和农田生态系统的GPP,使其增长速率大于AET,导致WUE呈整体上升趋势,而DUU变化类型中,降水和土壤湿度因子驱动森林、多树草原和稀树草原等生态系统的AET,使其增长速率大于GPP,导致WUE呈整体下降趋势。

关键词:水分利用效率;陆地生态系统;总初级生产力;蒸散发;归因分析;广东省

Spatiotemporal variations and attribution analysis of water use efficiency in terrestrial ecosystem of Guangdong Province//Liu Linxin^{1,2}, Zhang Ke³, Li Xi⁴ (1. College of Resource Management, Tangshan Normal University; 2. Tangshan Key Laboratory of Simulation of Urban Ecosystem; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 4. Institute of Carbon Neutrality, Peking University)

Abstract: To investigate the spatiotemporal variability of water use efficiency (WUE) in the terrestrial ecosystem of Guangdong Province and its response to environmental changes, WUE in the terrestrial ecosystem of Guangdong Province from 2000 to 2020 was calculated based on satellite remote sensing data from MODIS. With refined rainfall, temperature, and soil moisture data products, six interannual change types of WUE in Guangdong Province were identified, and the potential impacts of ecosystem carbohydrate flux changes on WUE of the major change types caused by environmental factors were evaluated using trend analysis, partial correlation analysis, and the maximal value composite method. The results demonstrate that WUE in the terrestrial ecosystem of Guangdong Province shows different trends across the region, with increasing trends dominating in western Guangdong and the southern Pearl River Delta, and decreasing trends dominating in eastern Guangdong, northern Guangdong, and some areas of the Pearl River Delta. The differences in the trends of WUE are mainly due to different growth rates of gross primary productivity (GPP) and actual evapotranspiration (AET). UUU and DUU are the two main interannual change types of WUE. For the UUU change type, the temperature factor drives GPP of savanna and farmland ecosystems, making its growth rate greater than that of AET, resulting in an overall increasing trend in WUE. For the DUU change type, the precipitation and soil moisture factors drive AET of forest, woody savanna, and savanna ecosystems, making its growth rate greater than that of GPP, resulting in an overall decreasing trend in WUE.

Key words: water use efficiency; terrestrial ecosystem; gross primary productivity; evapotranspiration; attribution analysis; Guangdong Province

温室气体排放导致全球不断升温,极端气候频发,影响了陆地碳、水循环的耦合过程,加剧了区域水资源的不平衡^[1-4]。陆地生态系统与气候变化存在着紧密联系,植树造林是减缓全球变暖、抵消人为

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006500);国家自然科学基金项目(52009028);唐山师范学院校内基金项目(20255130070)
作者简介:刘林鑫(1994—),男,讲师,博士,主要从事生态水文研究。E-mail:130070@tstc.edu.cn
通信作者:张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:kzhang@hhu.edu.cn

碳排放的有效手段^[5-6]。中国和印度陆续实施了一系列林业工程,成为地球“变绿”的主要驱动力^[7]。然而植被扩张会导致生态用水增多,可能会加剧水资源匮乏地区生态系统和人类社会的用水矛盾^[8-10]。量化生态系统水消耗与碳增益之间的关系,对于揭示生态系统应对环境变化的反馈机制具有重要意义。

水分利用效率(water use efficiency, WUE)定义为整个生态系统损耗单位质量水分所生产干物质的量,是连接陆地生态系统碳、水循环的重要变量,也是研究陆地生态系统应对环境变化响应的重要指标^[11-12]。遥感技术的发展为大尺度揭示陆地生态系统 WUE 的时空变化规律提供了新的途径。张珂等^[13]、刘宪锋等^[14]利用 MODIS 数据分别对中国云南省和黄土高原地区进行了陆地生态系统 WUE 的时空分布研究和归因分析。Huang 等^[15]基于 MODIS 产品探究了全球生态系统 WUE 对于干旱的响应关系。研究表明,降水、温度及土壤湿度的变化都会对 WUE 造成影响^[16-17]。WUE 机理较为复杂,其时空影响机制有待进一步研究。

广东省是中国的第一经济大省,其 GDP 连续多年位居全国第一。然而,中国碳预算数据库的统计结果显示,2019 年广东省全省碳排放量达到 56 898 万 t,位居全国前三,面临较大的减排压力^[18]。近年来广东省开展了一系列生态修复工程,取得了显著的生态和碳汇效益^[19-20]。在此背景下,本文基于广东省 2000—2020 年 MODIS 陆地生态系统总初级生产力(gross primary productivity, GPP)和实际蒸散发(actual evapotranspiration, AET)年际数据产品,计算广东省陆地生态系统 WUE,讨论 WUE 分布特征和时空变化趋势,以揭示环境因子(气温、降水和土壤湿度)引发的生态系统碳水通量变化对广东省陆地生态系统 WUE 的潜在影响,为相关部门制定科学合理的水资源管理政策和应对区域环境变化挑战提供理论支撑和决策依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

广东省(20°09'N~25°31'N, 109°45'E~117°20'E)位于中国大陆南部,陆地面积 17.98 万 km²。地形总体呈东北高、西南低的特点,以丘陵和山地为主。全省属典型的亚热带和热带季风气候,年平均气温为 15~25℃,年降水量为 1 500~2 000 mm。受热带环流影响,广东省降水时空分布不均匀,降水量由南向北逐渐增加^[21-22]。全省生物多样性丰富,植被覆

盖率高,生态需水量较大^[23]。根据地理位置,自西南向东北可将广东省划分为粤西、珠三角、粤北和粤东四大区域,如图 1 所示。其中,粤西地区以农田、草地等生态系统为主,而珠三角地区则以城市等非植被用地为主。

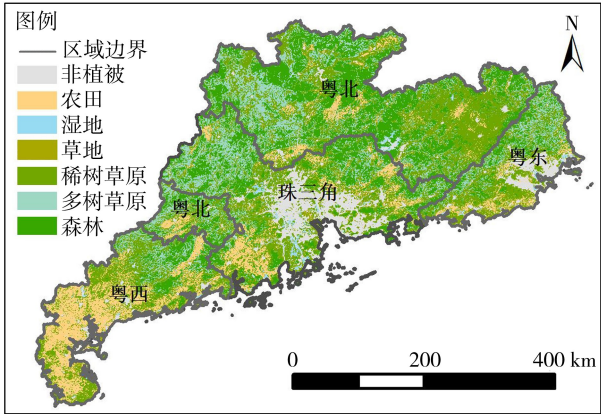


图 1 广东省土地覆盖类型和地理区划

Fig. 1 Land cover types and administrative districts of Guangdong Province

1.2 数据来源

采用的 GPP 和 AET 数据来自美国航空航天局(NASA)发布的 2000—2020 年 MOD17A3HGF 和 MOD16A3GF 影像产品,时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 500 m。两个产品均经过缺失值填补处理,具有较为可靠的评估精度,目前已广泛应用于全球碳、水循环研究^[24-26]。土地覆盖数据来源于 NASA 平台的 MCD12Q1 影像产品,空间分辨率为 500 m。采用国际地圈生物圈计划(IGBP)分类体系进行土地覆盖类型识别^[27]。在此基础上,对部分覆盖类型进行合并处理,例如:将常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶针叶林、混交林归类为森林,将裸地、冰雪水体、城市等归类于非植被覆盖,最终划分为 6 种植被类型(图 1),这 6 种植被类型占广东省陆地面积的 91.24%。

本文涉及的环境因子主要包括气温、降水和土壤湿度。其中,月降水量和月均气温数据来源于国家青藏高原科学数据中心([https://data. tpdc. ac. cn/](https://data.tpdc.ac.cn/)),数据空间分辨率为 1 km,均采用 Delta 空间降尺度方案生成,并在全国 496 个气象站进行了精度验证。土壤湿度数据来自国家青藏高原科学数据中心基于站点观测的日尺度数据集,空间分辨率为 1 km。该数据集利用机器学习方法,基于全国 1 648 个土壤湿度观测站的资料获得,模拟精度较好^[28]。利用双线性插值方法,对以上 3 种数据降尺度处理,生成与 GPP 和 AET 时空分辨率相同的数据,为后续分析提供了数据基础。

2 研究方法

2.1 WUE 时空变化分析

将陆地生态系统 WUE 定义为单位时间内(本文时间尺度为年)GPP 与 AET 的比值^[29]。采用线性回归方法计算广东省 2000—2020 年陆地生态系统 GPP、AET 和 WUE 的年际变化趋势,并通过 t 分布在 5% 显著性水平上进行检验($p<0.05$)。结合 GPP、AET 和 WUE 趋势上升和下降差异,识别出广东省陆地生态系统 WUE 的 6 种年际变化类型^[16],结果如表 1 所示。以 UUU 变化类型为例,GPP 的上升趋势幅度大于 AET 的上升趋势幅度,导致 WUE 呈增长趋势。

表 1 WUE 变化类型
Table 1 Classification of WUE change types

变化类型	WUE 趋势	GPP 趋势	AET 趋势
UUU	上升	上升	上升
UUD	上升	上升	下降
UDD	上升	下降	下降
DUU	下降	上升	上升
DDU	下降	下降	上升
DDD	下降	下降	下降

利用变异系数(C_v)衡量数据的变异程度。 C_v 反映数据分布的波动性和离散性,数值越大说明数据波动性越大,数据更加离散;数值越小说明数据分布更加集中,随时间变化更加稳定。在栅格单元尺度分别计算 GPP、AET、WUE 的变异系数,用于评估各变量年际变化的稳定性

2.2 驱动因子分析

为了厘清影响陆地生态系统碳-水相互作用指标 GPP、AET 和 WUE 的主导环境因子,采用偏相关分析法逐栅格计算各指标与环境因子的相关系数,并基于 t 检验($p<0.05$)评价所计算相关系数的显著性水平。该方法可以消除其他控制变量潜在的混淆效应,量化两个变量之间的相关性^[30]。本文采用最大值合成计算每个栅格单元最大偏相关系数,并将对应的环境因子认定为影响碳-水相互作用指标的主导环境因子,采用相似分析方法确定 WUE 碳水通量驱动因子。具体计算公式为:

$$r_{xyz} = (r_{xy} - r_{xz}r_{yz}) / \sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)} \quad (1)$$
$$r_{\max,x} = \max r_{xyz} \quad (2)$$

式中: r_{xyz} 为控制因子 z 的影响后,因子 x 与 y 之间的偏相关系数,取值范围为 $-1\sim1$; r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为因子 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 之间的皮尔逊相关系数^[31]; $r_{\max,x}$ 为对于给定的因子 x ,所有可能的 x 、 y 组合中最大的偏相关系数,反映因子 x 与 y 之间强烈的相互作用。

式(2)中, x 表示陆地生态系统碳-水相互作用指标(GPP、AET、WUE), y 、 z 表示环境因子(温度、降水、土壤湿度),对于每个碳-水相互作用指标,计算其与各环境因子之间的偏相关系数。对于给定的碳-水相互作用指标,采用 $r_{\max,x}$ 反映其与主导环境因子之间强烈的相互作用。进行偏相关分析前,首先需要对式(1)中的变量进行最小-最大值标准化处理,以消除不同量纲的影响。

考虑到陆地生态系统 WUE 时空分布与生态系统类型和环境因子密切相关,需要进一步对 WUE 的环境因子进行分类,实现对 WUE 年际变化的综合归因分析。本文采用 Liu 等^[16]构建的 WUE 驱动因子评估框架,针对广东省陆地生态系统主要 WUE 年际变化类型,统计 WUE 相应环境因子,并根据下垫面主要生态系统类型和 WUE 碳水通量驱动因子分布进行再分类,从而揭示不同 WUE 变化类型中环境因子引发的碳水通量变化对特定生态系统 WUE 的潜在影响。

3 结果与分析

3.1 GPP、AET 和 WUE 时空分布特征

如图 2 所示,2000—2020 年广东省陆地生态系统 GPP 和 AET 年际均值均呈显著上升趋势,其中 GPP 增长速率为 $10.63\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ($R^2=0.65$, $p<0.001$),AET 增长速率为 $6.69\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ($R^2=0.69$, $p<0.001$),这表明广东省外界环境变化可能促进了生态系统植被的光合作用和蒸散发过程^[14]。而陆地生态系统 WUE 年际均值未呈现显著变化趋势,增长速率为 $-0.0015\text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ ($R^2=0.01$, $p=0.93$),由于 GPP 与 AET 的区域均值均呈增长趋势,且二者变化速率相对一致,其产生的抵消效应使得 WUE 的年际变化率维持在较低水平。变异系数可以反映样本的离散性,进一步反映数据的稳定性。广东省陆地生态系统 WUE、GPP 和 AET 的变异系数分别为 0.026、0.044 和 0.047。与 WUE 相比,GPP 与 AET 在年际尺度上均表现出较强的变异特征,易受外界环境变化影响。

广东省陆地生态系统 GPP、AET 和 WUE 年际均值存在相似的空间分布特征(图 3),并且与土地覆盖类型密切相关。全省 GPP 年际均值为 $1877.38\text{ g}/\text{m}^2$,其中 $2400\text{ g}/\text{m}^2$ 以上的高值区面积占比达到 28.91%。全省 AET 年际均值为 $1059.41\text{ kg}/\text{m}^2$,其中 $1200\text{ kg}/\text{m}^2$ 以上的高值区面积占比达到 21.73%。全省 WUE 年际均值为 $1.74\text{ g}/\text{kg}$,其中 $2\text{ g}/\text{kg}$ 以上的高值区面积占比达到 29.54%。GPP、AET、WUE 高值区主要分布在珠三

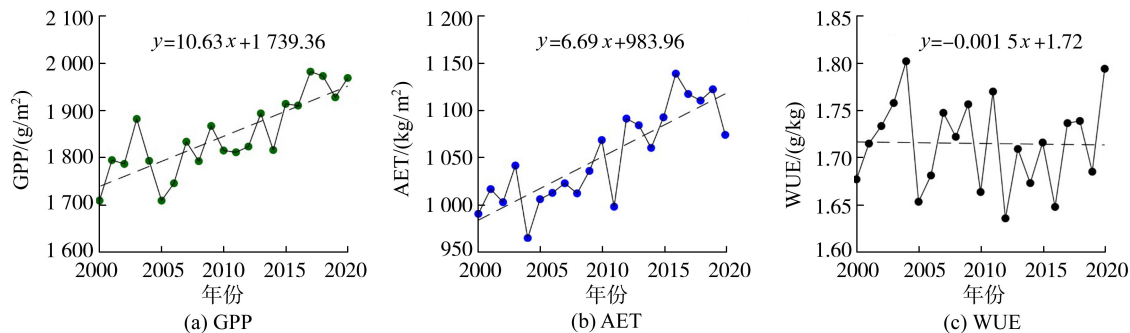


图 2 GPP、AET 和 WUE 年际均值时间序列
Fig. 2 Time series of interannual average GPP, AET, and WUE

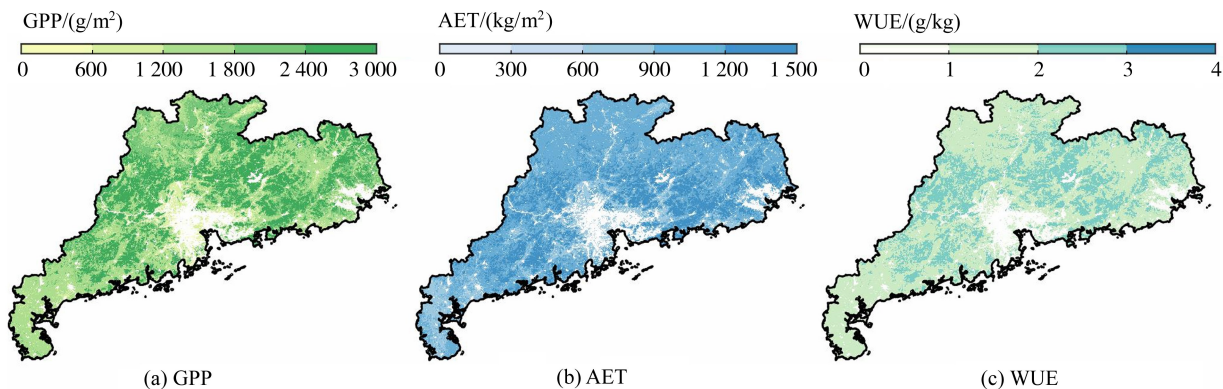


图 3 2000—2020 年 GPP、AET 和 WUE 年际均值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of interannual average GPP, AET, and WUE from 2000 to 2020

角及其周边区域,以森林、多树草原等生态系统为主。低值区主要分布在粤西南部、粤北北部及粤东的部分地区,以农田、草地等生态系统为主。珠三角中心和粤东部分地区分布着大量的城市,因此,在进行相关分析时未考虑非植被类型区域。

3.2 WUE 空间趋势和变化类型

对 2000—2020 年广东省陆地生态系统 WUE 进行趋势分析,识别其年际变化类型,结果如图 4 所示。广东省 47.52% 的区域趋势分析结果通过了 5% 显著性检验 (图 4 (a) 中黑点覆盖区域)。19.48% 的区域 WUE 呈显著上升趋势,主要分布在粤西和珠三角南部;28.04% 的区域 WUE 呈显著下降趋势,主要分布在粤北地区。

降趋势,主要分布在粤东、粤北及珠三角部分地区。根据表 1 对 WUE 年际趋势呈显著变化的区域进行分类,结果表明,WUE 上升趋势主要为 UUU 变化类型,占研究区面积的 41.75% (图 4 (b)),该类型是由于 GPP 增长速率大于 AET 增长速率,进而导致 WUE 呈上升趋势;WUE 下降趋势主要为 DUU 变化类型,占研究区面积的 47.68%,该类型是由于 GPP 增长速率小于 AET 增长速率,进而导致 WUE 呈下降趋势。UUD 和 UDD 变化类型分别占研究区面积的 1.26% 和 0.33%,零星分布在粤西和珠三角地区;DDU 和 DDD 变化类型分别占研究区面积的 6.25% 和 2.73%,主要分布在粤北地区。

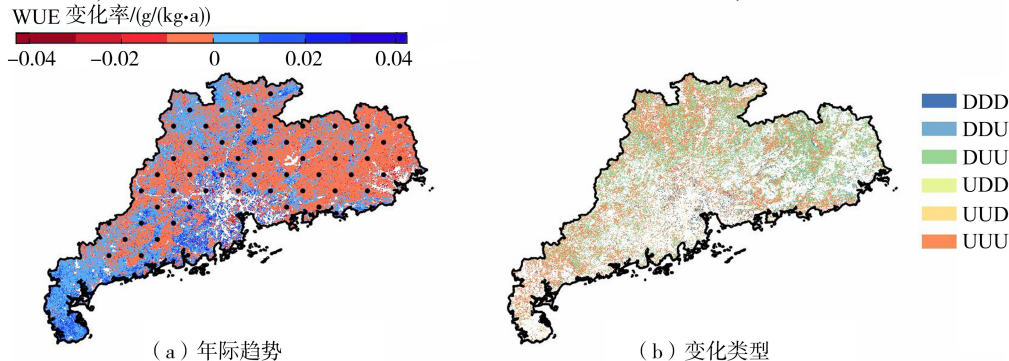


图 4 2000—2020 年 WUE 年际趋势和变化类型空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of interannual trend and change types of WUE from 2000 to 2020

3.3 驱动因子分析

为了探究广东省陆地生态系统 GPP、AET 和 WUE 变化的主要驱动因子与内在机制,基于偏相关分析法逐栅格计算 3 个指标与环境因子(温度、降水和土壤湿度)的偏相关性,并选取相关系数较大的因子作为对应栅格的主导环境因子。图 5 为 GPP、AET 和 WUE 主导环境因子空间分布,黑点覆盖区域为相关性分析结果通过 5% 显著性检验。GPP 的主导环境因子为温度,面积占比为 67.82%;其次为土壤湿度和降水,面积占比分别为 20.83% 和 11.35%。通过 5% 显著性检验的区域主要为温度因子主导,大多分布在粤北地区。温度升高通常有利于植被 GPP 的增长,特别是对于水分限制较弱的湿润地区。AET 的主导环境因子为温度,面积占比为 53.39%;其次为土壤湿度和降水,面积占比分别为 39.52% 和 7.10%。通过 5% 显著性检验的区域主要为温度和土壤湿度因子主导,分布在粤北和粤东地区。可以发现,GPP 和 AET 相当大面积占比受相同环境因子控制,这显然与碳、水循环的强耦合有关^[10]。由于 GPP 和 AET 可能存在不同的环境因

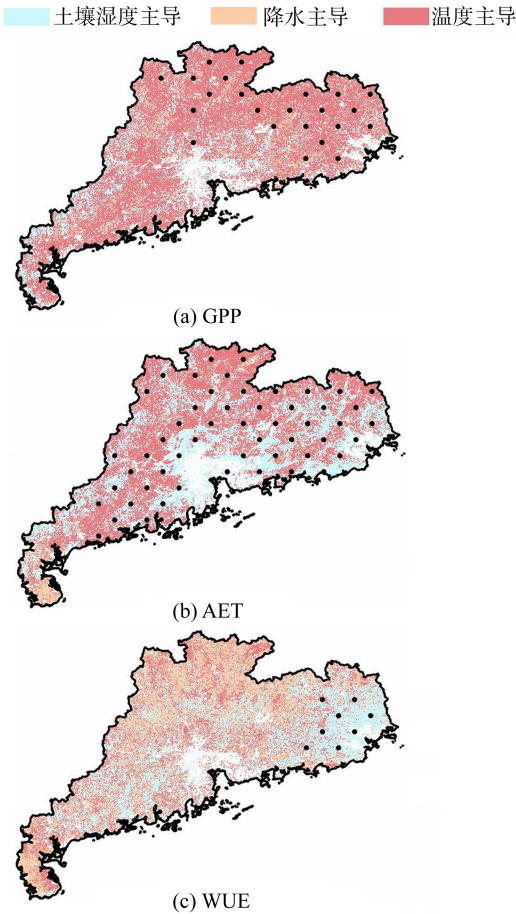


图 5 GPP、AET 和 WUE 主导环境因子空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of dominant environmental factors of GPP, AET, and WUE

子响应,WUE 的主导环境因子空间分布与 GPP 和 AET 存在差异。WUE 的主导环境因子为土壤湿度,面积占比为 36.65%;其次为降水和温度,面积占比分别为 33.36%和 29.98%。通过 5%显著性检验的区域主要受土壤湿度影响,分布在粤东地区。与 GPP 和 AET 相比,WUE 的主导环境因子区域分布较为离散。

GPP 和 AET 的年际变化会对 WUE 时空特征造成影响,因此理清各自边际效应非常重要。基于偏相关分析,分别计算 WUE 与 GPP 和 AET 的偏相关性系数,并选取偏相关系数较大值所对应的碳-水相互作用指标作为 WUE 碳水通量驱动因子。如图 6 所示,广东省陆地生态系统 WUE 碳水通量驱动因子有明显的地域特征,近 71.32%的区域 WUE 碳水通量驱动因子为 GPP(GPP 主导),主要分布在粤北和粤西地区;28.68%的区域 WUE 碳水通量驱动因子为 AET(AET 主导),主要分布在粤东、粤北和珠三角部分地区。此外,还统计了 6 种 WUE 变化类型中 GPP 和 ET 主导面积占比(表 2),结果显示,除 DUU 变化类型外,其余 5 种 WUE 变化类型以 GPP 主导,特别是 UUU 和 DDD 变化类型,GPP 主导面积占比分别为 92.05%和 90.66%。对于 DUU 变化类型,AET 主导面积占比略高于 GPP,分别为 50.99%和 49.01%。

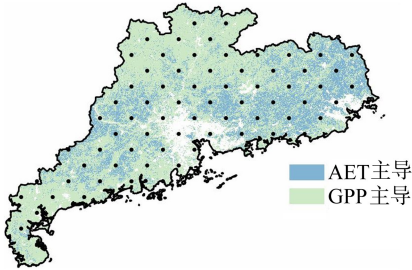


图 6 WUE 碳水通量驱动因子空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of carbohydrate flux driving factors of WUE

表 2 不同 WUE 变化类型碳水通量驱动因子面积占比
Table 2 Proportion of dominant areas of carbohydrate flux driving factors for different WUE change types

变化类型	GPP 主导面积占比/%	AET 主导面积占比/%
UUU	92.05	7.95
UUD	85.26	14.74
UDD	74.71	25.29
DUU	49.01	50.99
DDU	76.37	23.63
DDD	90.65	9.35

3.4 环境因子和生态系统类型对 WUE 变化的潜在影响

由图 4 可知,广东省陆地生态系统 WUE 年际

变化类型主要为 UUU 和 DDU 类型。针对这 2 种 WUE 变化类型,进一步探究环境因子对 WUE 的潜在影响。图 7 给出了 UUU 和 DDU 变化类型环境因子分类直方图,通过土地覆盖类型和 WUE 碳水通量驱动因子对直方图进一步分层。

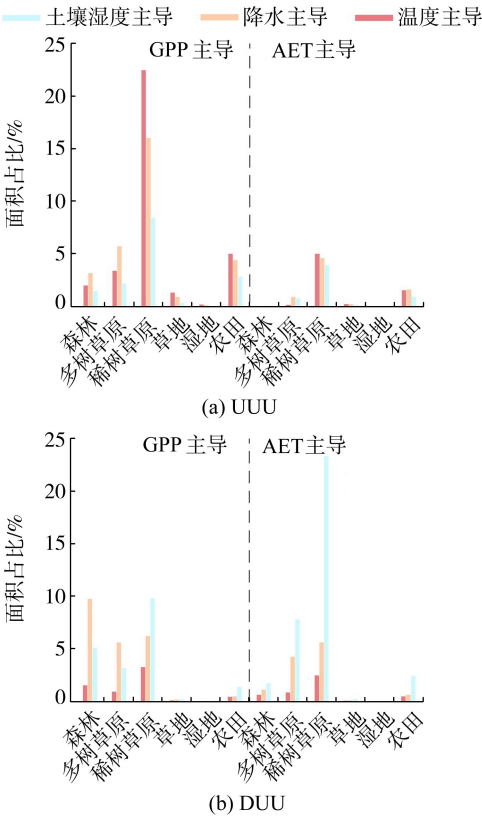


图 7 不同 WUE 变化类型环境因子分类直方图

Fig.7 Histograms of environmental factors for different WUE change types

UUU 变化类型主要由 GPP 变化引起,在稀树草原和农田等生态系统中表现突出,温度是该变化类型限制植物生长的关键因子(图 7(a)),气温通过调控植被的潜在光合作用,进而影响生长季的长度^[32-33]。研究表明,当温度超过特定阈值时,植被的光合作用通常比蒸腾作用更为显著^[34],这一现象对于农田和稀树草原等以草本植物为主的生态系统尤为突出^[16]。UUU 变化类型中只有 7.95% 的范围由 AET 主导(表 2),下垫面类型主要以稀树草原和多树草原等生态系统为主,降水是影响 AET 的主导环境因子。随着降水的增加,土壤湿度也会增加,为植被蒸腾作用提供充足的水分^[35]。整体来看,对于 UUU 变化类型,GPP 上升趋势比 AET 上升趋势更明显,进而导致 WUE 呈整体上升趋势。

DDU 变化类型由 GPP 和 AET 共同控制(图 7(b)),下垫面类型以森林、多树草原和稀树草原为主。在 GPP 主导的区域,降水和土壤湿度为主导环境因子;而在 AET 主导的区域,土壤湿度则为

主导环境因子。降水量增加导致云量增加,净辐射减少,进而对植被光合作用有一定限制^[36]。Nie 等^[33]研究表明,生态系统 WUE 与土壤湿度之间存在显著负相关关系,在生长旺季,随着土壤湿度的增加,AET 的增长速率大于 GPP,导致 WUE 随着土壤湿度的增加而降低;Zhu 等^[37]研究发现,在土壤湿度较高的地区,气温升高会减少蒸发潜热,从而显著增加生态系统 AET,这种对 AET 的促进作用,超过了对 GPP 的提升效应。因此,对于 DDU 变化类型,AET 的增长趋势超过 GPP,导致 WUE 呈整体下降趋势。

4 结 论

a. 广东省陆地生态系统 WUE 年际趋势变化存在空间差异,上升趋势主要位于粤西和珠三角南部,下降趋势主要位于粤东、粤北及珠三角部分地区。WUE 年际趋势差异主要是由于 GPP 和 AET 上升趋势幅度不同所致。

b. 广东省陆地生态系统 GPP 和 AET 主导环境因子为温度,而 WUE 主导环境因子为土壤湿度;WUE 变化由 GPP 主导,主导面积占比为 71.32%。

c. 广东省陆地生态系统 WUE 年际变化主要为 UUU 和 DDU 两种类型。UUU 变化类型中,温度因子驱动稀树草原和农田生态系统的 GPP,使其增长速率大于 AET,导致 WUE 呈整体上升趋势。DDU 变化类型中,降水和土壤湿度因子驱动森林、多树草原和稀树草原的 AET,使其增长速率大于 GPP,导致 WUE 呈整体下降趋势。

参考文献:

[1] 杨石岭,陈祚伶,黄晓芳,等. 全球变暖对水循环的影响:回顾与展望[J]. 第四纪研究,2024,44(5):1079-1092. (Yang Shiling, Chen Zuoling, Huang Xiaofang, et al. The impact of global warming on hydrological cycle: retrospect and prospect[J]. Quaternary sciences,2024,44(5):1079-1092. (in Chinese))

[2] Du Xiaozheng, Zhao Xiang, Zhou Tao, et al. Effects of climate factors and human activities on the ecosystem water use efficiency throughout Northern China [J]. Remote Sensing,2019,11(23):2766.

[3] Gentine P, Green J K, Guérin M, et al. Coupling between the terrestrial carbon and water cycles: a review [J]. Environmental Research Letters,2019,14(8):083003.

[4] 左其亭,吴青松,马军霞,等. “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J]. 水资源保护,2023,39(1):8-14. (Zuo Qiting, Wu Qingsong, Ma Junxia, et al. Research framework and prospect of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Water Resources Protection,2023,39

- (1):8-14. (in Chinese))
- [5] Griscom B W, Adams J, Ellis P W, et al. Natural climate solutions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(44): 11645-11650.
- [6] 郭珈源, 孙旭杨, 刘金涛, 等. 基于 Budyko 理论的高寒山区流域径流演变归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 22-29. (Guo Jiayuan, Sun Xuyang, Liu Jintao, et al. Attribution analysis of runoff evolution in cold alpine catchment based on Budyko theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 22-29. (in Chinese))
- [7] Chen Chi, Park T, Wang Xuihui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [8] Cao Shixiong, Chen Li, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 104(4): 240-245.
- [9] 薛联青, 肖颖, 刘远洪, 等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 32-41. (Xue Lianqing, Xiao Ying, Liu Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 32-41. (in Chinese))
- [10] 张珂, 戴钰, 刘林鑫, 等. 考虑植被根系深度动态变化的 VIC 径流模拟模型[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 28-34. (Zhang Ke, Dai Yu, Liu Linxin, et al. VIC model for runoff simulation considering dynamic changes of vegetation root depth [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 28-34. (in Chinese))
- [11] 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 Xiaozheng, Zhao Xiang, Wang Haoyu, 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))
- [12] Yang Yuting, Guan Huade, Batelaan O, et al. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 23284.
- [13] 张珂, 刘林鑫, 晁丽君, 等. 2000—2014 年云南省陆地生态系统水分利用效率的时空变化[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 1-5. (Zhang Ke, Liu Linxin, Chao Lijun, et al. Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency in Yunnan Province from 2000 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 1-5. (in Chinese))
- [14] 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 XianFeng, Hu Baoyi, Ren Zhiyuan. 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))
- [15] Huang Ling, He Bin, Han Le, et al. A global examination of the response of ecosystem water-use efficiency to drought based on MODIS data [J]. Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 1097-1107.
- [16] Liu Linxin, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Recent seasonal variations in ecosystem water use efficiency in China's key tropical-subtropical transitional zones in response to climate change [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2022, 36(11): e2022GB007635.
- [17] Liu Xianfeng, Feng Xiaoming, Fu Bojie. Changes in global terrestrial ecosystem water use efficiency are closely related to soil moisture [J]. Science of the Total Environment, 2020, 698: 134165.
- [18] Guan Yuru, Shan Yuli, Huang Qi, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts [J]. Earth's Future, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [19] 马向明, 邱衍庆, 黄本胜等. 万里碧道: 习近平生态文明思想的广东生动实践[J]. 南方建筑, 2021(5): 1-12. (Ma Xiangming, Qiu Yanqing, Huang Bensheng, et al. An academic conversation on a long green channel: XI Jinping's practices of ecological civilization in Guangdong [J]. South Architecture, 2021(5): 1-12. (in Chinese))
- [20] 贡力, 董洲全, 贾治元, 等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 1-9. (Gong Li, Dong Zhouquan, Jia Zhiyuan, et al. Low carbon technology research hot spots and frontier trends in the water conservancy industry [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4): 1-9. (in Chinese))
- [21] Zhu Hai, Chen Kejie, Chai Haishan, et al. Characterizing extreme drought and wetness in Guangdong, China using global navigation satellite system and precipitation data [J]. Satellite Navigation, 2024, 5(1): 1.
- [22] 李深林, 洪昌红, 邱静等. 广东省不同区域污水资源化建设需求分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 43-47. (Li Shenlin, Hong Changhong, Qiu Jing, et al. Demand analysis of sewage reclamation construction in different regions of Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 43-47. (in Chinese))
- [23] 宋松, 吴志峰, 程利分等. 基于 SDGs 的广东省水资源可持续性评价[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 179-187. (Song Song, Wu Zhifeng, Cheng Lifan, et al. Water resources sustainability evaluation in Guangdong Province based on SDGs [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 179-187. (in Chinese))

(下转第 200 页)

- Wenfu, et al. Analysis of the water temperature evolution of long and narrow reservoir from impoundment to first operating period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11):1412-1422. (in Chinese))
- [30] 肖洋,姚晨欣,张涛涛,等. 交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 1-11. (Xiao Yang, Yao Chenxin, Zhang Taotao, et al. Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 1-11. (in Chinese))
- [31] 任玉峰,胡光洋,杨中华,等. 溪洛渡水库分层取水对向家坝库区水温的影响分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(4): 128-132. (Ren Yufeng, Hu Guangyang, Yang Zhonghua, et al. Analysis of effect of stratified water withdrawal in Xiluodu reservoir on water temperature in Xiangjiaba reservoir area [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(4): 128-132. (in Chinese))
- (收稿日期:2025-03-21 编辑:徐娟)
-
- (上接第 190 页)
- [24] Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [25] Anav A, Friedlingstein P, Beer C, et al. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: a review [J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53(3): 785-818.
- [26] Zhang Ke, Kimball J S, Running S W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation [J]. WIREs Water, 2016, 3(6): 834-853.
- [27] Loveland T R, Belward A. The IGBP-DIS global 1km land cover data set, DISCover; first results [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3289-3295.
- [28] Li Qingliang, Shi Gaosong, Wei Shangguan, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5267-5286.
- [29] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Publications of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [30] Xu Haojie, Zhao Chuanyan, Wang Xinping. Spatiotemporal differentiation of the terrestrial gross primary production response to climate constraints in a dryland mountain ecosystem of northwestern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 276-277: 107628.
- [31] 陈永喆,崔艳红,张才金,等. 变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的时空协同演变[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 141-149. (Chen Yongzhe, Cui Yanhong, Zhang Caijin, et al. Spatio-temporal co-evolution of vegetation and hydrological elements under a changing environment in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 141-149. (in Chinese))
- [32] Kang Xiaoming, Hao Yanbin, Cui Xiaoyong, et al. Variability and changes in climate, phenology, and gross primary production of an alpine wetland ecosystem [J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 391.
- [33] Nie Chong, Huang Yuefei, Zhang Shuo, et al. Effects of soil water content on forest ecosystem water use efficiency through changes in transpiration/evapotranspiration ratio [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308: 108605.
- [34] Zhang Jingting, Ren Wei, An Pingli, et al. Responses of crop water use efficiency to climate change and agronomic measures in the semiarid area of northern China [J]. PLoS One, 2015, 10(9): e0137409.
- [35] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.
- [36] 焦珂伟,高江波,吴绍洪等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238. (Jiao Kewei, Gao Jiangbo, Wu Shaohong, et al. Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2229-2238. (in Chinese))
- [37] Zhu Qian, Jiang Hong, Peng Chuanghui, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China [J]. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2414-2429.
- (收稿日期:2025-03-14 编辑:施业)

