

文章编号: 1008-2786-(2019)2-173-13

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000411

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

张继, 周旭*, 蒋啸, 杨江州, 罗雪

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

摘 要: 贵州高原具有少日照、多云雨和复杂下垫面的山地特殊气候和地形, 准确探究该区域生态系统水分利用效率(WUE)的时空分异特征对进一步了解喀斯特地区碳水循环过程具有重要意义。本文气象站点数据用 ANUSPLIN 软件进行插值处理, 与使用时间序列谐波分析法和质量控制文件重新构建高质量的 MODIS-NDVI 数据作为 CASA 模型的输入数据模拟植被 NPP, 再结合 MOD16-ET 数据估算 WUE。综合利用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验和稳定性分析等统计方法, 对贵州高原 2000—2014 年各地貌区、植被类型 WUE 的时空分异特征进行对比分析。研究表明: (1) 研究区近 15 年来 WUE 均值和趋势的空间格局都呈西部高于东部的特点, WUE 趋势呈显著增加态势 ($R^2 = 0.63$, $P < 0.001$)。 (2) 从各地貌区来看, 多年 WUE 均值排序为: 断陷盆地 > 岩溶峡谷 > 峰丛洼地 > 非喀斯特地貌 > 岩溶高原 > 岩溶槽谷, 其中断陷盆地和岩溶峡谷呈显著 ($P < 0.05$) 增加趋势。 (3) 从不同植被类型来看, WUE 大小呈混交林 > 阔叶林 > 耕地 > 针叶林 > 草地 > 灌丛排序。针叶林和灌丛变异系数(CV)值较高, 但前者对气候波动的抵挡能力更强, 增加速率更快。草地 CV 值最低, 变化速率最慢, 不易受气候波动的影响。由于退耕还林等生态工程的实施效果显著, 使耕地 WUE 的变化速率最快。

关键词: 水分利用效率; 时间序列谐波分析法; 贵州高原; 喀斯特地貌区; 时空特征

中图分类号: Q948

文献标志码: A

全球气候变化和土地利用/覆被变化日益加剧, 对陆地生态系统碳水循环造成了可辨识的影响。如气候变化对中国南部地区的水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)造成负面影响, 而在高纬度和高海拔地区产生积极影响^[1]; 基于遥感卫星数据的研究结果表明, 近年来受人为干扰引起的土地利用/覆被变化影响, 全球 WUE 呈下降趋势^[2]。WUE 作为叶片光合与水分生理过程的耦合因子, 是联系生态系统碳水循环的重要变量和评价植物生长适宜程

度的综合生理生态指标^[3]。因此, 通过相关研究来揭示区域尺度生态系统 WUE 的时空分异特征及其控制机制, 有助于评价和预测全球变化对生态系统碳水过程的影响^[4]。

最初主要利用气体交换法和田间测定法对 WUE 进行观测, 集中于植物叶片生理过程或个体植株水平^[5-7]。随着观测技术的发展和全球气候变化等环境问题的日益突出, WUE 的研究尺度逐渐扩展到草地^[8]、森林^[9]和湿地^[10]等自然生态系统水平。

收稿日期 (Received date): 2018-10-01; **改回日期** (Accepted date): 2019-04-10

基金项目 (Foundation item): 贵州省科技支撑项目([2017]2855); 贵州省科学技术项目([2017]1195); 贵州师范大学 2016 年博士科研启动项目。[Science and Technology Project of Guizhou Province ([2017]2855); Science and Technology Foundation Project of Guizhou Province ([2017]1195); Guizhou Normal University 2016 doctoral research startup project]

作者简介 (Biography): 张继(1993-), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统与遥感研究。[ZHANG Ji (1993-), male, born in Zunyi, Guizhou province, M. Sc. candidate, research on geographic information system and remote sensing] E-mail: zhangji0324@163.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 周旭(1981-), 男, 四川古蔺人, 博士, 副教授, 主要从事遥感水文与流域管理研究。[ZHOU Xu (1981-), male, born in Gulin, Sichuan province, Ph. D., associate professor, research on remote sensing hydrology and watershed management] E-mail: zxzy8178@163.com

生态系统涡度相关通量观测数据的积累和同位素示踪技术的应用^[11-12],使人们对叶片和生态系统水平的 WUE 及其与环境因子的相互作用有较深的理解。然而,由于在区域尺度上地貌形态类型和气候特征的差异,导致生态系统类型复杂多样,传统的点尺度观测已无法满足大范围碳水耦合过程的研究要求。遥感技术的出现,为在大时空尺度上研究碳水循环之间的相互作用提供了基础。中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)提供的遥感数据,在很大程度上推进了地球科学的发展,包括对 WUE 的研究。例如,众多学者^[13-16]利用 MODIS 数据对全球及区域尺度生态系统的 WUE 进行研究,这些研究为量化生态系统 WUE 提供了不可或缺的经验。尽管如此,大尺度生态系统 WUE 研究仍处于发展阶段,通过遥感数据进行 WUE 的量化研究在区域尺度上仍然较少,尤其是在喀斯特地区。然而,中国西南喀斯特地区多云雨,导致难以获得高质量时空连续的遥感数据,限制了对该区域 WUE 的研究。基于此,本文运用时间序列谐波分析法(Harmonic Analysis of Time Series, HANTS)对 NDVI 数据进行序列重构,结合 MODIS 产品质量控制文件进行订正,消除云和噪声对遥感数据的影响,使得 WUE 估算结果更为科学可信。

贵州高原是中国南方喀斯特的中心区域,石漠化面积广,生态环境脆弱。在亚热带季风气候、特殊地形地貌与水文地质结构综合作用下,造成喀斯特

地区水资源短缺,表现出工程性、季节性、局部性缺水 and 水质恶化等问题^[17],严重影响植被生态用水。针对该地区由石漠化导致的水土流失问题,政府实施了一系列重要的生态系统恢复措施,如退耕还林还草、石漠化综合治理、长江和珠江防护林等生态工程。自开展各项生态工程以来,植被逐年稳定恢复^[18]。因此,深入研究生态系统用水量与固碳之间的权衡关系,了解生态恢复计划的实施对 WUE 的影响是目前亟待解决的问题。本研究基于遥感、气象数据和运用多种统计方法,分析 2000—2014 年贵州高原植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)、蒸散发(Evapotranspiration, ET)和 WUE 的时空分布,并探究不同地貌区、植被类型的 WUE 时空分异特征。研究结果有助于加深对喀斯特地区碳水循环过程的理解,同时以期为未来贵州省生态建设提供科学依据。

1 研究区概况

贵州高原介于东经 103°36′~109°35′、北纬 24°37′~29°13′之间,位于中国地势第二级阶梯,高起于广西丘陵和四川盆地间的亚热带喀斯特化高原,山地居多,素有“八山一水一分田”之说,平均海拔 1100 m(图 1a)。碳酸盐岩出露面积约占贵州国土面积的 73%,是全球三大喀斯特集中分布区的东亚片区中心。地貌以喀斯特地貌分布为主,根据《岩溶地区水土流失综合治理技术标准 SL 461-

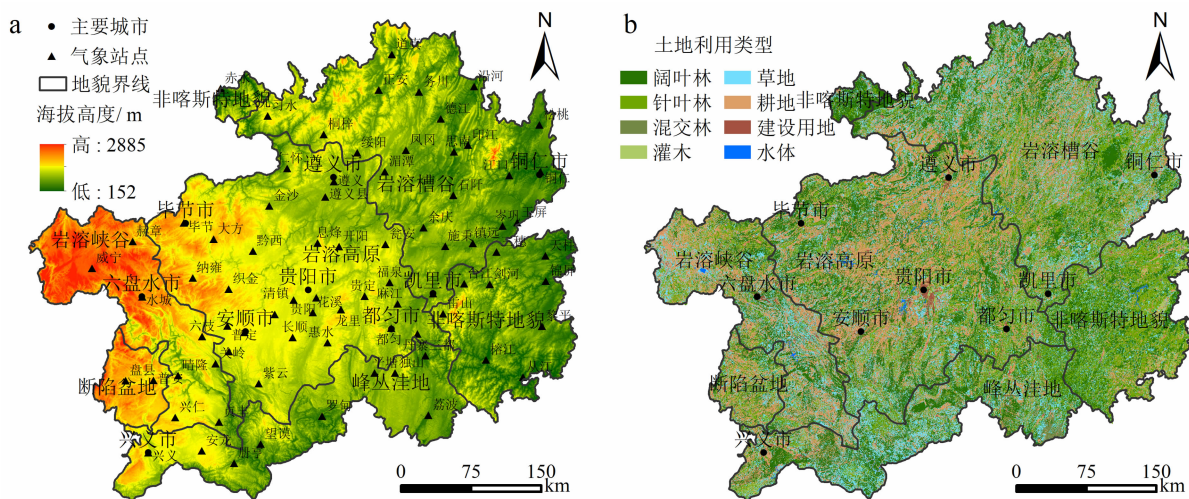


图 1 研究区地势(a)及 2010 年土地利用现状图(b)

Fig. 1 Topography map (a) and 2010 land use status map (b) in the study area

2009》和前人划分标准^[19],按岩溶地貌类型及水土流失特点,在贵州境内分为断陷盆地、岩溶峡谷、岩溶高原、峰丛洼地、岩溶槽谷和非喀斯特6种地貌区。气候为亚热带季风气候,多年平均气温和降水分别为10~20℃、1100~1300 mm,但降水时空分布不均,地表储水弱是造成“工程性缺水”的主要原因;常年多云雾,日照较少,多年平均日照为1100~1160 h/a,为我国年日照时数最少的地区之一。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,发育红壤、黄壤。但由于地形起伏较大,气候分异明显,生态环境复杂,故植被分布因地制宜,植被类型多样(图1b)。为治理石漠化、防治水土流失和保护生物多样性等,研究区已开展大量生态工程建设。得益于长期大量的生态工程建设,区内生态环境逐渐变好,贵州已被批准为首批国家生态文明试验区。

2 研究数据与方法

2.1 数据获取与处理

2000—2014年NDVI、土地利用数据来源于美国国家航空航天局的MOD13Q1、MCD12Q1数据产品。NDVI每16 d合成,空间分辨率为250 m;土地利用数据空间分辨率为500 m,采用马里兰大学植被分类标准。ET数据来源于蒙大拿大学地球动态数值模拟研究组制作的MOD16A2产品,其中还包含了潜在蒸散发量(Potential Evapotranspiration, PET),其算法基于Penman-Monteith公式改进后得到,时间为月尺度,空间分辨率为1000 m。将HDF格式的MODIS数据运用MRT软件转为GeoTIFF,并重投影为WGS84_Albers投影。对MOD16数据产品中的填充值进行剔除,用NoData值替代,使其不参与运算和统计。在交互式数据语言(Interactive Data Language, IDL)中用HANTS法对NDVI数据进行序列重构,进一步结合质量控制文件对NDVI进行订正,对受云和噪声影响的像元用重构后的数据填补^[20]。最后采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)将每月中两期NDVI影像提取最大值,作为月的NDVI值。为了便于计算,将以上数据的分辨率重采样为250 m。

月均气温、月总降水和月总太阳辐射为气象站点数据,来源于中国气象数据网(<http://www.data.cma.cn>)。DEM数据来源于美国地质勘探局,将空

间分辨率为90 m的SRTM3 DEM采用双线性内插法重采样为250 m。用ANUSPLIN软件薄板样条法(Thin Plate Splines, TPS)以经度、纬度为自变量,对气温、降水和太阳辐射进行插值,同时对气温引入重采样后的DEM数据作为协变量进行插值,空间插值分辨率为250 m。

2.2 研究方法

2.2.1 WUE的估算

本文选用的CASA模型是基于光能利用率的过程模型,适用于模拟西南喀斯特地区的植被NPP^[21-22],具体计算方法详见文献[23],其中植被最大光能利用率的取值参照中国典型植被类型的最大光利用率^[24]。

由于生态系统中表示碳增益和水分损失的指标数据众多,目前学术界对WUE存在不同的定义与理解,其结果表达也有差别。本文采用NPP与ET之比来表征WUE:

$$WUE = \frac{NPP}{ET} \quad (1)$$

式中,WUE为水分利用效率($\text{gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$),NPP为生态系统净初级生产力($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$),ET为生态系统蒸散发(mm)。

2.2.2 分析方法

Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验相结合的方法,在分析长时间序列数据的变化趋势及趋势显著性检验方面具有很好的效果,已经成功应用于气象、水文、植被等长时间序列分析中^[25-27]。两者都是稳健的非参数统计方法,能减少数据异常值的影响,计算公式详见文献^[28]。其中Mann-Kendall检验不需要方差正态性假设,对于显著性水平检验具有较为坚实的统计学理论基础,使得结果更为科学可信^[29]。用Theil-Sen Median趋势分别计算NPP、ET和WUE的变化速率,当Theil-Sen Median趋势的斜率大于0时反映要素呈改善趋势,反之则呈退化趋势。Mann-Kendall检验用来判断趋势的显著性,统计量Z值为标准正态分布,当 $|Z| > 1.65$ 、1.96和2.58时分别表示通过了置信度90%、95%和99%的显著性检验。

稳定性分析采用变异系数(Coefficient of Variation, CV),CV是反映观测值变异程度的一个统计量,是标准差与平均值之比。它可以消除数据中因观测值的单位或平均数的不同而对结果比较产生

的影响,能够准确地表示单位均值的离散程度^[30]。通过逐像元计算 2000—2014 年 WUE 的 CV 值来评估其时序上的稳定性,计算式为:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

式中, CV 、 \bar{x} 和 σ 分别为变异系数、平均值和标准差。 CV 值越小,表示数据随时间序列波动小,数据分布越集中,具有较好的稳定性;反之则表示数据随时间序列波动较大,数据分布较离散。

2.3 NPP 模拟结果的比较与 MOD16 产品验证

NPP 验证一般采用实测数据或其他估算模型的结果进行对比,由于 NPP 实测数据难以获取,故将本文的模拟结果与前人所做研究作对比。董丹等^[31]基于 CASA 模型和王冰等^[32-33]运用光能利用率模型得到 2001 年贵州喀斯特地区植被 NPP 为 325.69 和 407.18 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,非喀斯特地区为 336.13 和 461.63 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。本文所模拟 2001 年喀斯特和非喀斯特地区植被 NPP 分别为 364.04 和 408.95 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,研究结果处于两者之间。和董丹等相比,均采用 CASA 模型估算 NPP,但本文结果较大,其原因是 NDVI 中受云影响的像元 DN 值较低,直接运用会导致模拟的 NPP 也较低,而本文 NDVI 经过了质量控制,去除了云和噪声的影响。王冰等估算 2001 年贵州省 NPP 均值为 421.26 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,本文结果为 409.16 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,结果相差 12.1 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,NPP 的空间分布两者基本一致。说明本文模拟的 NPP 具有一定可信度,可作为求取 WUE 的基本数据。

为验证 MOD16 产品的可靠性,采用相关性检验分析气象站点蒸发皿观测数据与 MOD16-PET 数据的相关性。按 2000—2014 年各气象站点蒸发皿观测数据多年平均值与对应 MOD16-PET 数据进行相关性检验,结果表明(图 2):MOD16-PET 与蒸发皿的相关系数 R 为 0.66,通过了 0.01 的信度检验。说明 MOD16 产品与气象站点观测的蒸发量在研究区范围内保持了较好的一致性,精度总体符合要求,可满足本文对 ET 的研究需求。

3 结果分析

3.1 NPP、ET 和 WUE 的时空动态

3.1.1 NPP、ET 和 WUE 的空间分布格局

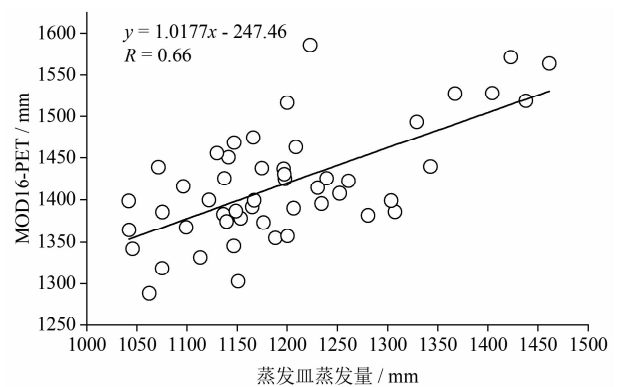


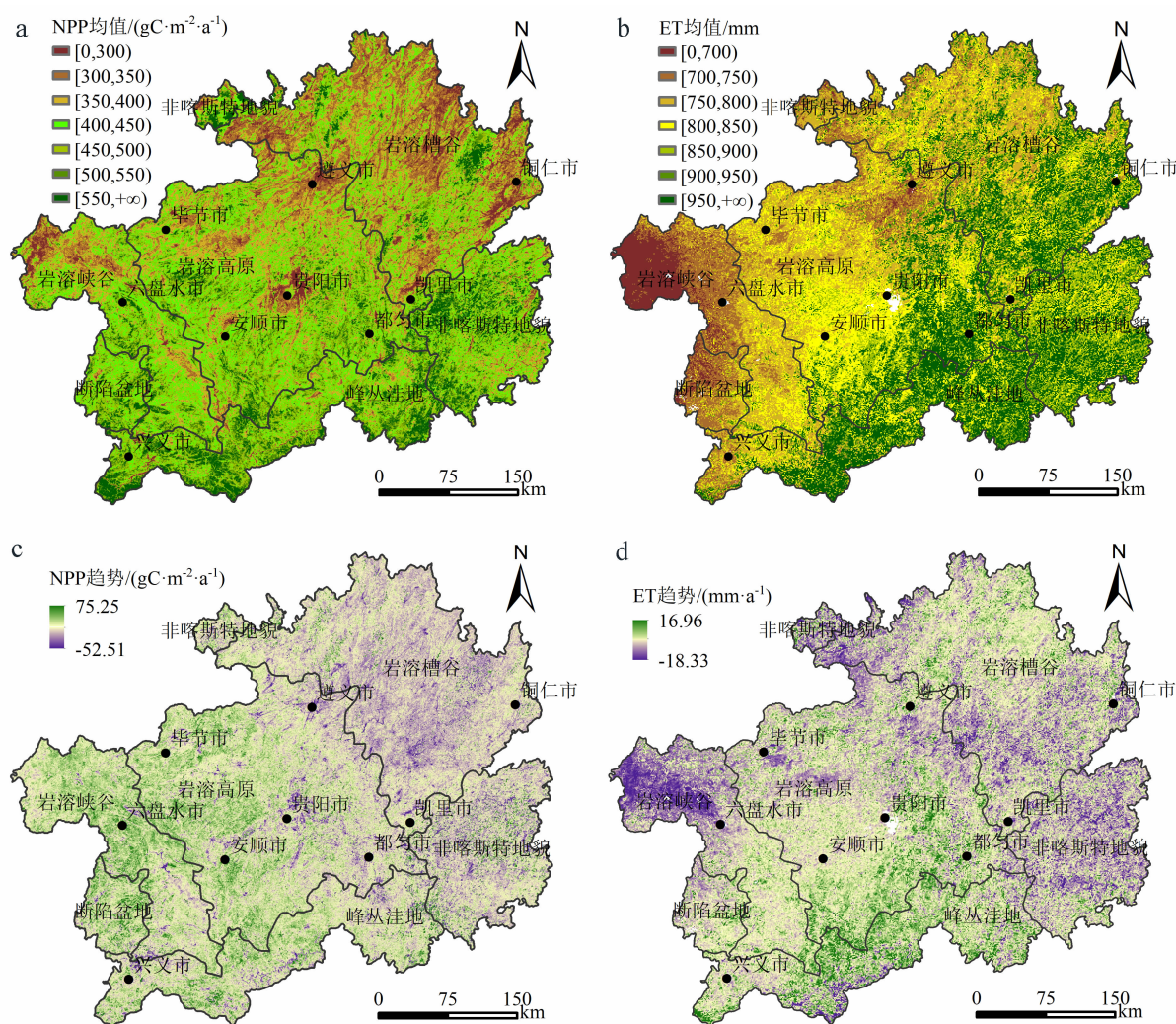
图 2 MOD16-PET 与气象站点的观测蒸散量相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient between MOD16-PET and evapotranspiration observed at meteorological stations

研究期间贵州高原 NPP 总量为 0.75 Pg ($1\text{Pg} = 10^{15}\text{g}$),NPP 均值和变化趋势在空间上均有明显的分布差异。NPP 均值在空间分布上受纬度地带性影响,大致呈南高北低的特征(图 3a)。由于贵州北部水热条件比南部差,北部大部分地区 NPP 呈低值;仅有赤水 and 印江表现为明显的高值区,是因为赤水和印江大多分布生态林和经济林,森林资源丰富,植被生产力大。贵阳、遵义等建成区及周边 NPP 较小,可能与黔中城市群经济快速发展,受城市化进程加快和人口压力加大等因素影响导致。15 年间贵州 NPP 变化趋势呈西南高东北低(图 3c),土地利用覆被变化和气候变化是影响生态系统生产力的主要因素^[18],相关研究表明^[18, 34-35],贵州自开展退耕还林工程以来,大量耕地转为林地,植被恢复速率西部高于东部。尽管贵州东部植被有所恢复,但本底植被较好,恢复程度有限,加之某些年份受极端寒冷、干旱等灾害的影响,贵州东部局地 NPP 呈下降趋势。

地势高低差异,制约水、热和光等分布不均,影响到下垫面和气候等各要素的分布,从而导致 ET 分布差异明显。贵州西北部气温较低、气压和日照时数较大,而东南部降水量和相对湿度大^[36],气象要素的分布差异,使 ET 呈东南高、西北低、中部居中的经度地带性分布(图 3b)。结合图 1a 发现,ET 值和高程呈负相关关系,高海拔地区(黔西北)蒸散低,低海拔地区(黔东南)蒸散高。ET 年际变化空间分布大致呈东西两侧减少中部增加的趋势(图 3d),其中威宁减少速率最快。

WUE 均值(图 4a)和趋势(图 4b)的空间格局



注:图中空白区域为 NoData 值,下同。

图3 2000—2014年贵州高原NPP(a)、ET(b)均值及NPP(c)、ET(d)变化趋势空间分布格局

Note: the blank area in the figure is NoData value, the same as below.

Fig. 3 Spatial pattern of average NPP (a), ET (b) and change trends of NPP (c), ET (d) in Guizhou Plateau from 2000 to 2014

受NPP与ET共同影响,在空间上都呈西高东低的分布特征,与NPP变化趋势的分布格局极为相似,可能因其受NPP的影响更大。西部WUE值高,因NPP较高而ET低所导致;东北部WUE值较低是NPP低而ET高导致。贵州东南部分布着乔木林,其根系发达、树体高大,植被截留和生产力较强,对水的利用效率高。图4c显示了WUE变化趋势的显著性P值,P值越低,表明变化趋势更可信,由图可知,WUE增加趋势越大与P值越小的空间分布大致对应。贵州西部的WUE增加趋势更快,其增加趋势的显著性更强;而东部呈减少趋势,但并不显著。15年间WUE的波动状况可由CV值来衡量(图4d),CV高值区分布在贵州北部、集中分布于遵义

建成区及其周边,据实地调研,这些地区植被稀疏,立地条件常受到破坏而不均匀变化,导致WUE稳定性较差。

3.1.2 NPP、ET和WUE的时间变化趋势

贵州15年间NPP均值为 $426.77 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,从2000年的 $392.20 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 到2014年 $507.94 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2003和2010年表现为低谷(图5a),后者由于中国西南地区2008—2011年期间,极端寒冷天气、旱灾持续发生^[37-38],不利于NPP积累。为进一步说明NPP的变化,通过线性回归拟合方程,发现研究时段内NPP上升趋势显著($R^2 = 0.61, P < 0.001$),平均每年上升 $6.33 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。研究时段内ET多年均值为 855.46 mm ,从2000年

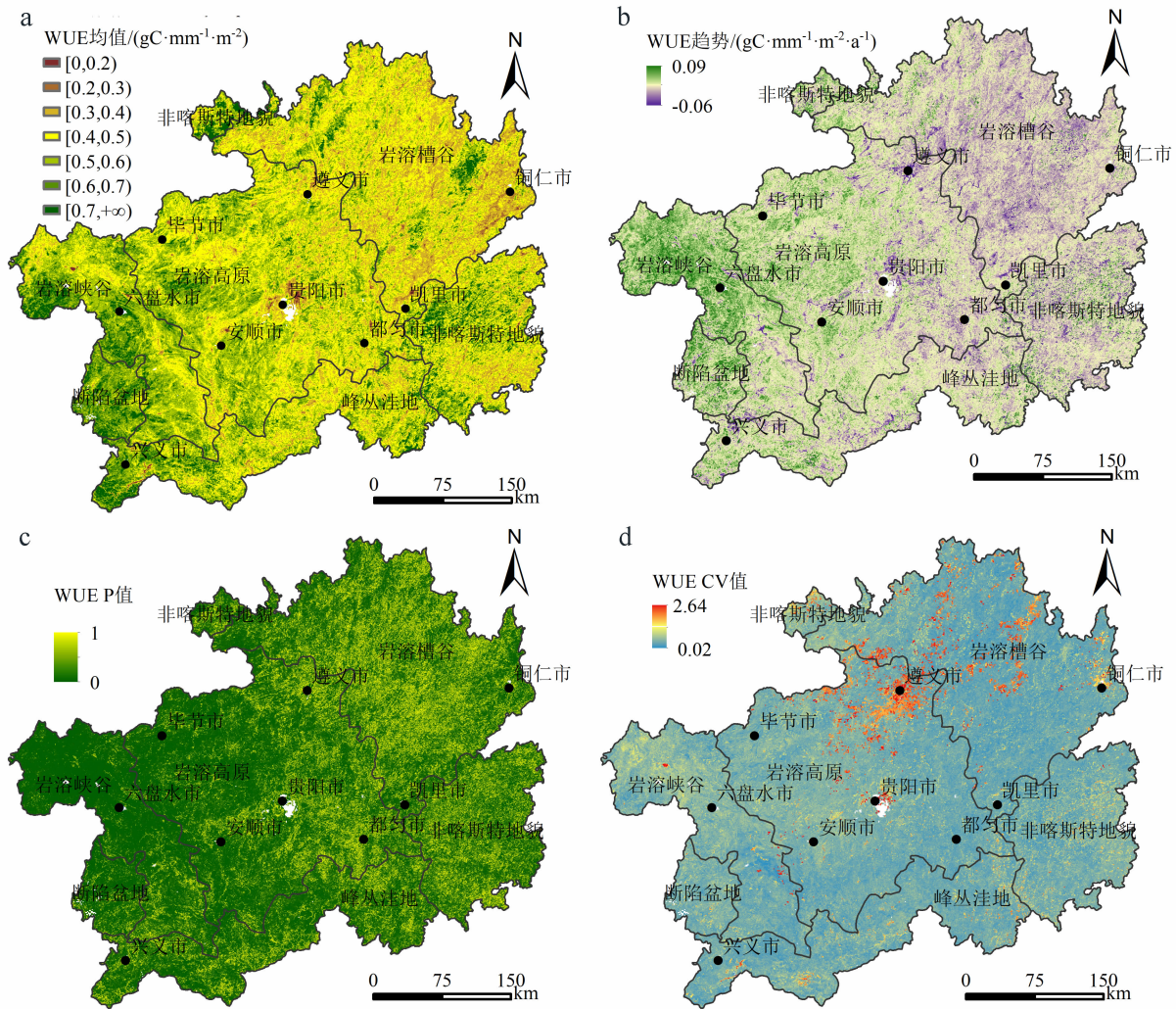


图4 2000—2014年贵州高原WUE均值(a)、变化趋势(b)、趋势的显著性P值(c)和CV值(d)空间分布格局

Fig. 4 Spatial patterns of average WUE (a), change trends (b), P value of WUE trend (c), CV value (d) in Guizhou Plateau from 2000 to 2014

的843.68 mm到2014年的859.10 mm,期间2010年(干旱年)表现为明显的低谷期(图5b)。整体呈平稳的态势,但大多数年份的ET均值高于多年平均值,平均每年上升0.21 mm。贵州多年WUE均值为 $0.51 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, WUE呈显著增加趋势($R^2 = 0.63, P < 0.001$) (图5c)。从时间上看,从2000年的 $0.47 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到2014年的 $0.60 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,相差百分比为27.66%,平均每年增加 $0.0075 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。据图5d可知,2003年WUE减少是由气温升高,降水减少导致NPP变小,ET变大,从而形成2003年是WUE的低谷期;WUE在2010过后持续增加是由降水量和气温均增大,其植被NPP亦增加,致使2013年WUE达到最大。

3.2 不同地貌区的WUE变化

贵州地形复杂,地貌变化很大,不同地貌区域的岩性、土壤、水分等影响植被WUE的大小均存在显著差别,因此,本部分主要分析不同地貌区对植被WUE的影响。为了更好地理解WUE在各地貌区的分布,先了解NPP、ET在各地貌区的分布,其统计结果见表1。非喀斯特地貌与其他喀斯特地貌相比,具备适合植物生长所需的下垫面环境,所生产的NPP理应更高,实际上峰丛洼地地貌更高。原因在于,植被NPP除了受下垫面环境因素影响外,还受气候条件影响,峰丛洼地位于黔南,离赤道和海岸线更近,能获得更充足的热量和降水,有利于植被固碳。岩溶槽谷位于研究区东北,受人类活动和气候条件的影响,植被NPP最低。NPP在各地貌区均呈

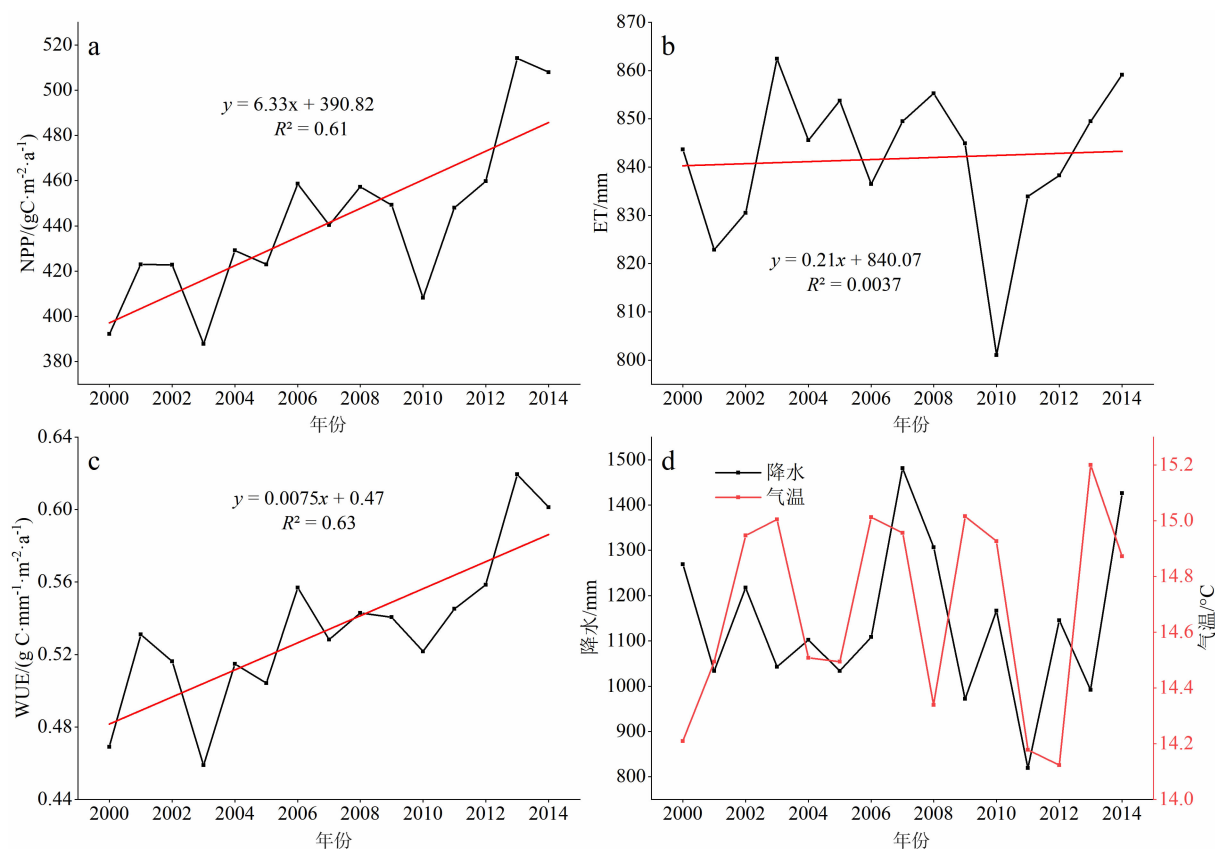


图5 贵州高原2000—2014年NPP(a)、ET(b)、WUE(c)、气温和降水(d)的年际变化

Fig. 5 Interannual variation of NPP (a), ET (b), WUE (c), temperature and precipitation (d) in Guizhou Plateau from 2000 to 2014

增加趋势,其中断陷盆地、岩溶峡谷、岩溶高原的变化趋势通过了95%显著性检验。

峰丛洼地、非喀斯特地貌、岩溶槽谷的多年ET均值比整个研究区均值高,而岩溶峡谷、断陷盆地、岩溶高原比其均值低。ET在峰丛洼地最高为930.3 mm,岩溶峡谷最低为744.08 mm。峰丛洼地地处研究区南部,受更高的气温和日照时数影响,其ET表现出最大;岩溶峡谷地处研究区西北,海拔较高,热量较低,降雨量偏少,植被覆盖较低,导致ET偏低。岩溶峡谷和非喀斯特地貌ET呈减少趋势,其余地貌区呈增加趋势,但各地貌区ET变化趋势均不显著。

贵州多年WUE均值大小在各地貌区排序为:断陷盆地>岩溶峡谷>峰丛洼地>非喀斯特地貌>岩溶高原>岩溶槽谷。综合NPP和ET来看,断陷盆地位于贵州西南,有较大的NPP和较小的ET,WUE表现为最大。峰丛洼地和非喀斯特地貌的NPP和ET都较大,其WUE和断陷盆地、岩溶峡谷相比并不高,高ET值驱使WUE变得较低。岩溶高

原ET值较低,但NPP也不高,其WUE仅比岩溶槽谷大。岩溶槽谷ET虽然不是最高,但NPP最低导致WUE最低。WUE在各地貌区的增速排序为:断陷盆地>岩溶峡谷>岩溶高原>峰丛洼地>非喀斯特地貌>岩溶槽谷,断陷盆地和岩溶峡谷的增加趋势通过了95%显著性检验。研究贵州NPP对极端寒冷天气事件的响应及恢复过程发现^[38],不同喀斯特地貌区受损植被恢复能力强弱排序和本文NPP的增速相吻合,进一步证明本研究结果的可靠性。NPP增速排序和WUE相比,仅峰丛洼地和岩溶高原相反,其余地貌区增速排序不变,说明大多数地貌区WUE增加都是由NPP增速决定的。在WUE增速排序中,峰丛洼地增速比岩溶高原低,是由峰丛洼地ET高导致,峰丛洼地ET在各地貌区中最大。

为了对不同地貌区WUE动态变化进行更具体的分析,采用Mann-Kendall检验计算每个像元的Z值,Z值按-1.96、0和1.96为临界值分为显著增加($Z \geq 1.96$)、不显著增加($0 \leq Z < 1.96$)、不显著减少($-1.96 < Z < 0$)、显著减少($Z \leq -1.96$)4个

表 1 NPP、ET 和 WUE 在各地貌区的均值及变化速率

Tab. 1 average value and change rate for NPP, ET and WUE in each landform regions

地貌区	NPP 均值/ ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	NPP 变化速率/ ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	ET 均值/ mm	ET 变化速率/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	WUE 均值/ ($\text{gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	WUE 变化速率/ ($\text{gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
断陷盆地	471.14	8.87 * *	748.95	0.80	0.63	0.0117 * *
岩溶峡谷	417.47	8.10 * *	744.08	-0.47	0.57	0.0115 * *
峰丛洼地	483.96	6.85 *	930.30	1.75	0.53	0.0069 *
岩溶高原	420.48	6.62 * *	845.58	0.88	0.50	0.0074 *
岩溶槽谷	384.13	3.61 *	863.03	0.09	0.45	0.0042
非喀斯特地貌	471.36	4.63 *	918.75	-0.73	0.52	0.0056 *

注: * 为显著性水平 $P < 0.1$; * * 为显著性水平 $P < 0.05$ 。

等级。显著增加区域集中在贵州西北部,不显著增加主要分散于研究区东部(图 6a)。研究区 WUE 呈增加趋势的像元占 89.95%,其中显著增加($P < 0.05$)占 45.30%;呈减少趋势的像元占 10.05%,显著减少仅占 1.07%。从图 6b 可以看出,各地貌区 WUE 大部分面积都呈增加趋势。显著增加、增加趋势区域(显著增加和不显著增加)两类变化类型的面积在各地貌区占比大小排序一致:岩溶峡谷 > 断陷盆地 > 岩溶高原 > 峰丛洼地 > 非喀斯特地貌 > 岩溶槽谷,和 WUE 的增速排序较为一致。

3.3 不同植被类型间的 WUE 变化

将土地利用数据剔除非植被像元,植被类型重归类为针叶林(常绿针叶林、落叶针叶林)、阔叶林(常绿阔叶林、落叶阔叶林)、混交林、灌丛(郁闭灌

丛、稀疏灌丛)、草地(多树的草地、稀树的草地)和耕地(包括耕地中混含自然植被)。各植被类型 WUE 表现出不同的范围和变化趋势(图 7a),多年 WUE 均值排序为:混交林 > 阔叶林 > 耕地 > 针叶林 > 草地 > 灌丛。混交林较之单纯林,林内气温、地温变幅小,风速降低,蒸发量减少,且能够充分利用外界环境条件和树种间相互促进的有利作用,使光合作用效率变高,在同一时段内积累较多有机物,因而总蓄积量和生物量比单纯林高,所以 WUE 最高。阔叶林与针叶林相比,阔叶林叶片面积大,单位时间内能接收更多阳光,且叶绿体数量多,使得更强的光合作用有了能量的输入和发生场所的支持,在相同 ET 条件下,阔叶林 WUE 比针叶林高。从生物量视角研究,灌丛 WUE 理应比草地高,但草本植物生长需水量较少,极少量的降雨就足以维持草本植物生

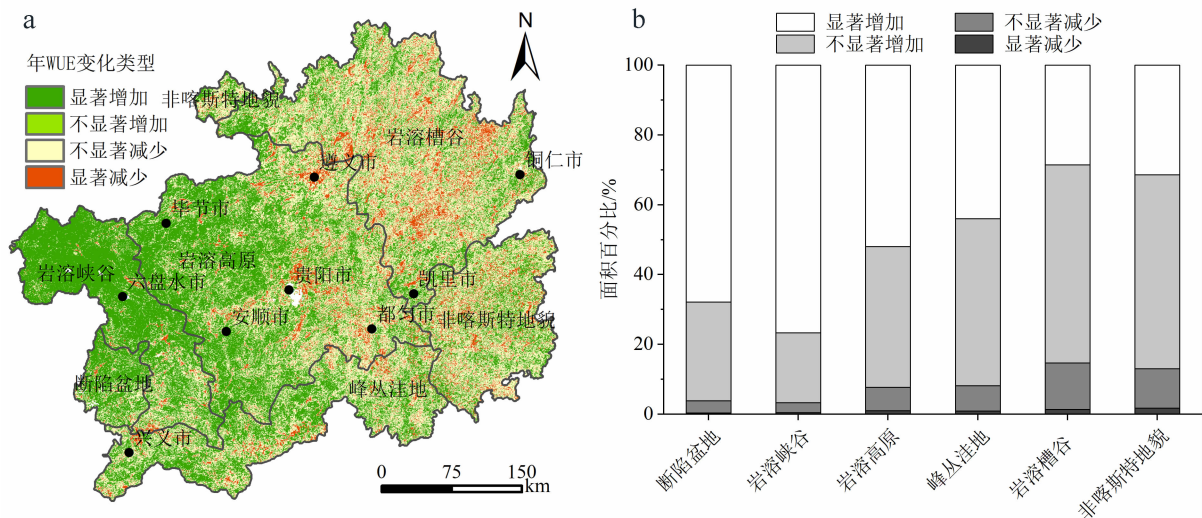


图 6 WUE 年际变化趋势类型空间分布(a)及各地貌区中变化趋势类型的面积比例(b)

Fig. 6 Spatial distribution of WUE interannual change trend types (a) and area ratio of change trend types in each landform regions (b)

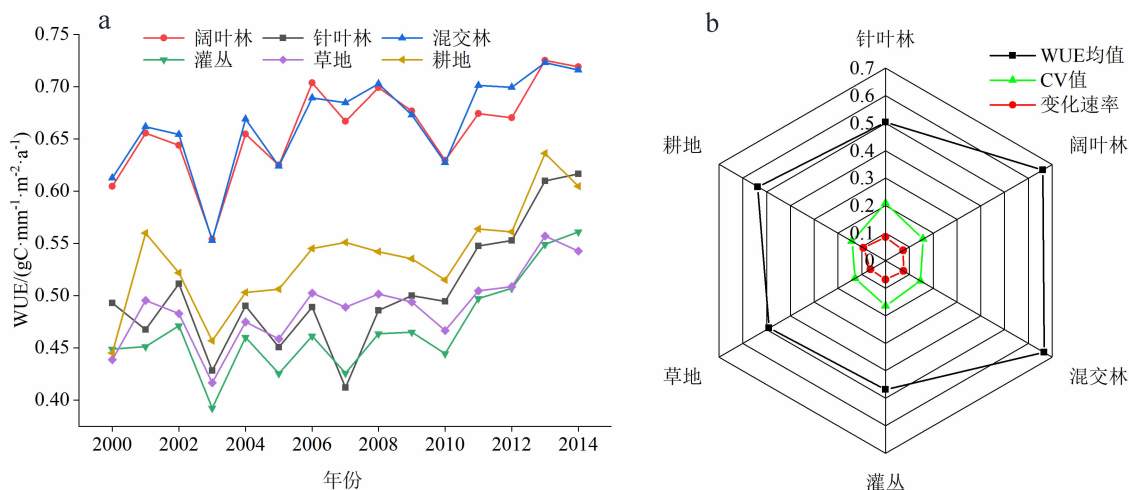


图7 2000—2014年贵州高原主要植被类型WUE的年际变化(a)及WUE均值、CV值和变化速率(b)

Fig. 7 Inter-annual variation (a), average value, CV value and variation rate (b) for main vegetation types in Guizhou Plateau during 2000 – 2014

长,却无法满灌丛生长的需水量。此外,地表覆盖的草本植物,有效减少了土壤蒸发,使得干旱时期少量的降水能够保存在土壤中维持草本植物生长^[39];而灌丛由于枯落物层较薄,地表覆盖物少,土壤水蒸发迅速^[40],因此草地WUE要高于灌丛。耕地有着充足的施肥、灌溉等营养物质、水分的输入,保证了作物生长,同时充足的水分不惧蒸散发影响,所以WUE仅低于阔叶林,这和大多数的研究结果较为一致^[41]。

图7a显示不同植被类型间WUE的年际波动差异,但为了对各种植被类型进行具体比较,使用3个指标(WUE均值、CV值和变化速率)来表征6种植被类型间的WUE变化状况(图7b)。WUE波动差异与各种植被类型对气象因子的敏感性响应有关。一般来说,大多数植被类型的WUE保持稳定,但针叶林和灌丛的CV值较高,说明针叶林和灌丛对气象因子敏感性较高。从年际波动来看,各植被类型都呈波动上升趋势,但灌丛变化速率小于针叶林。原因在于针叶林植株高大,根系较深,抗旱和吸水能力较强,可知15年间气候条件更适宜针叶林生长,或者说针叶林相比于灌丛,对气候波动的抵挡能力更强。耕地WUE变化速率最快,表明研究时段内,随着退耕还林工程把坡耕地退为林地的生态工程效应明显,而剩余耕地大多在水分保持较为充足、土层较厚且相对肥沃的平缓处,是土地利用变化导致了WUE升高;此外,坡改梯工程将不利于保土、保水、

保肥的坡耕地改造成梯田,使作物生产力提高。综合以上,退耕还林等生态工程的开展和种植技术的提升,使得WUE在各种植被类型中,耕地的增速最高。草地的变化速率和CV值最低,WUE均值也较低,由于草地生物量较低,进行光合作用的能力也较弱,其NPP不高,所以WUE值较低;CV值最低表明草地不易受气候条件影响,所以草地变化速率基本保持不变。

4 讨论

遥感信息从成像到遥感产品输出,由于环境干扰、信息获取设备和处理设备的限制等各种影响,在此过程引入了各种误差,最终对遥感产品产生不确定性^[42]。贵州地区多云雾、少日照的山地气候特征,难以获得高质量时空连续的NDVI。为了解决该问题,本文用IDL语言,采用HANTS方法,结合MODIS质量控制文件,去除受云和噪声影响的低质量像元,同时继承了原始数据中的高质量像元。气象站点数据外推的不确定性选用合适的插值方法进行规避,ANUSPLIN软件TPS插值法在复杂地表的插值表现较好^[43, 44],根据气象要素的分布特征,以经度、纬度为自变量,对气温、降水和太阳辐射进行插值,其插值结果通过广义交叉验证。

生态系统中表示碳增益和水分损失的指标数据众多,WUE估算选取的指标不同,得出的结果会有

差异。由于站点尺度的实测数据难以获取,而本研究 WUE 的精度取决于所模拟的 NPP 和 MOD16 产品的可靠性,且前文对模拟的 NPP 与 MOD16 产品的可靠性检验说明了本文 WUE 的可信度。但众多中间过程估算模型难以避免 WUE 的模拟结果有一定误差,尽管如此,本文力求使用合理的数据与模型方法,来分析贵州高原 WUE 的时空分异,不足之处有待进一步研究。

本文只分析了贵州高原不同地貌、植被类型 WUE 的时空分异特征,而没有深入分析其 WUE 与下垫面环境、气候条件的关系。贵州地区下垫面复杂,未来需要进一步深入研究不同地貌、植被类型间 WUE 的具体差异原因,以便更好地理解复杂地理环境下区域的碳水循环特点。如用结构方程模型、主成分分析和弹性系数等定量分析方法,来分析 WUE 在地貌、植被间与不同驱动因子的关系,和各因子对其 WUE 的贡献率。

5 结论

本研究基于遥感数据及气象观测数据,采用趋势分析和稳定性分析方法,对贵州高原 WUE 进行估算,并分析不同地貌、植被类型的 WUE 变化特征,得出以下结论:

(1)2000—2014 年 WUE 均值和趋势的空间格局受 NPP 与 ET 共同影响,与 NPP 的趋势空间分布极为相似,整体上都呈西高东低的特征。WUE 在西部呈增加趋势,且随着增加趋势的加快,其显著性更强;在东部局地呈减少趋势,但这种趋势并不显著。贵州北部的遵义建成区及其周边地区植被稀疏,立地条件常受到破坏,使得 WUE 稳定性较差。

(2)研究时段内,贵州多年 WUE 均值为 $0.51 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,年际 WUE 呈显著增加趋势 ($R^2 = 0.63, P < 0.001$)。2003 年气温升高、降水减少,导致 ET 变大、NPP 变小,WUE 为明显的低谷期;2010 年后随着降水量和气温的增加,植被 NPP 变大,WUE 亦增加,2013 年 WUE 达到最大。

(3)不同地貌区 WUE 多年均值大小关系为:断陷盆地 > 岩溶峡谷 > 峰丛洼地 > 非喀斯特地貌 > 岩溶高原 > 岩溶槽谷,增速排序为:断陷盆地 > 岩溶峡谷 > 岩溶高原 > 峰丛洼地 > 非喀斯特地貌 > 岩溶槽谷。各地貌区 WUE 大部分面积都呈增加趋势,其

中断陷盆地和岩溶峡谷呈显著 ($P < 0.05$) 增加趋势。NPP、ET 增速排序和 WUE 增速排序相比表明,在 WUE 逐年增加的过程中,大多数地貌区 WUE 都是由 NPP 增速决定。

(4)对于不同的植被类型,WUE 均值排序为:混交林 > 阔叶林 > 耕地 > 针叶林 > 草地 > 灌丛。由于植被自身的生理特性差异,混交林 WUE 在各植被类型间最高,为 $0.67 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$;灌丛最低为 $0.47 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。WUE 波动差异与各种植被类型对气象因子的敏感性有关,针叶林和灌丛的 CV 值较高,草地 CV 值最低;耕地和针叶林的变化速率较快,草地变化速率最慢。

参考文献 (References)

- [1] ZHU Qiuan, JIANG Hong, PENG Changhui, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO_2 on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China [J]. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2414–2429.
- [2] TANG Xuguang, LI Hengpeng, DESAI A R, et al. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? [J]. Scientific reports, 2014, 4(1): 7483.
- [3] 曹生奎,冯起,司建华,等. 植物水分利用效率研究方法综述 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 853–858. [CAO Shengkui, FENG Qi, SI Jianhua, et al. Summary on research methods of water use efficiency in plant [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5): 853–858]
- [4] 张良侠,胡中民,樊江文,等. 区域尺度生态系统水分利用效率的时空变异特征研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 691–699. [ZHANG Liangxia, HU Zhongmin, FAN Jiangwen, et al. Advances in the spatiotemporal dynamics in ecosystem water use efficiency at regional scale [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 691–699]
- [5] 张岁岐,山仑. 植物水分利用效率及其研究进展 [J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1–5. [ZHANG Suiqi, SHAN Lun. Research progress on water use efficiency of plant [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 1–5]
- [6] 王会肖,刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展 [J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99–104. [WANG Huixiao, LIU Changming. Advances in crop water use efficiency research [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 99–104]
- [7] 李荣生,许煌灿,尹光天,等. 植物水分利用效率的研究进展 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(3): 366–371. [LI Rongsheng, XU Huangcan, YIN Guangtian, et al. Advances in the water use efficiency of plant [J]. Forest Research, 2003, 16(3): 366–371]
- [8] HU Zhongmin, YU Guirui, FU Yuling, et al. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four

- grassland ecosystems in China [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(7): 1609–1619.
- [9] WANG Mengjie, CHEN Yunhao, WU Xiuchen, et al. Forest-Type-Dependent water use efficiency trends across the Northern Hemisphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(16): 8283–8293.
- [10] LI J H, ERICKSON J E, PERESTA G, et al. Evapotranspiration and water use efficiency in a Chesapeake Bay wetland under carbon dioxide enrichment [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(1): 234–245.
- [11] DONOVAN L A, DUDLEY S A, ROSENTHAL D M, et al. Phenotypic selection on leaf water use efficiency and related ecophysiological traits for natural populations of desert sunflowers [J]. *Oecologia*, 2007, **152**(1): 13–25.
- [12] RAMBAL S, OURCIVAL J M, JOFFRE R, et al. Drought controls over conductance and assimilation of a Mediterranean evergreen ecosystem: scaling from leaf to canopy [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(12): 1813–1824.
- [13] XIA Lei, WANG Fei, MU Xingmin, et al. Water use efficiency of net primary production in global terrestrial ecosystems [J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, **124**(5): 921–931.
- [14] LU Xiaoliang, ZHUANG Qianlai. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(9): 1924–1939.
- [15] TANG Xuguang, MA Mingguo, DING Zhi, et al. Remotely monitoring ecosystem water use efficiency of grassland and cropland in China's arid and semi-arid regions with MODIS data [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(6): 616.
- [16] 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 Yuandong, PANG Rui, GU Fengxue, 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]
- [17] 蒋斌, 赵玉金, 岑启林, 等. 黔西南 2010 年干旱及季节性缺水的气候特征分析 [J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(4): 2045–2047. [JIANG Bin, ZHAO Yujin, CEN Qilin, et al. Analysis on climatic characteristics of drought and seasonal water shortages in 2010 in Southwest Guizhou [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(4): 2045–2047]
- [18] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 等. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(12): 3255–3264. [LI Hao, CAI Yunlong, CHEN Ruishan, et al. Effect assessment of the project of grain for green in the karst region in Southwestern China: a case study of Bijie Prefecture [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(12): 3255–3264]
- [19] 王世杰, 张信宝, 白晓永, 等. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点 [J]. *山地学报*, 2013, **31**(1): 18–24. [WANG Shijie, ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong, et al. Discussion on nomenclature of the karst desertification regions and illustration for their environment characteristics in southwest China [J]. *Mountain Research*, 2013, **31**(1): 18–24]
- [20] 李月臣, 何志明. 重庆 MODIS/NDVI 时间序列数据优化研究 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2015, **32**(2): 32–37. [LI Yuechen, HE Zhiming. Research on reconstructing of time-series MODIS/NDVI data of Chongqing [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2015, **32**(2): 32–37]
- [21] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(7): 1855–1866. [DONG Dan, NI Jian. Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in southwestern China using the CASA model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(7): 1855–1866]
- [22] GUAN Xiaobin, SHEN Huanfeng, GAN Wenxia, et al. A 33-year NPP monitoring study in southwest China by the fusion of multi-source remote sensing and station data [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(10): 1082.
- [23] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 413–424. [ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(3): 413–424]
- [24] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟 [J]. *科学通报*, 2006, **51**(6): 700–706. [ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, HE Hao, et al. Simulation of maximum light utilization rate of typical vegetation in China [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2006, **51**(6): 700–706]
- [25] 高志永, 汪有科, 姜鹏. 黄土高原露日数变化趋势分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(11): 1718–1730. [GAO Zhiyong, WANG Youke, JIANG Peng. Spatiotemporal analysis of dew days in China's Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(11): 1718–1730]
- [26] 张范平, 方少文, 周祖昊, 等. 鄱阳湖水位多时间尺度动态变化特性分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(1): 126–133. [ZHANG Fanping, FANG Shaowen, ZHOU Zuhao, et al. Research on multi-time-scale dynamic characteristics of water-level fluctuation of the Poyang Lake in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(1): 126–133]
- [27] WU Donghai, WU Hao, ZHAO Xiang, et al. Evaluation of spatiotemporal variations of global fractional vegetation cover based on GIMMS NDVI data from 1982 to 2011 [J]. *Remote Sensing*, 2014, **6**(5): 4217–4239.
- [28] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(24): 7798–7806. [YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al. The

- spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33** (24): 7798–7806]
- [29] 马志婷, 武志涛, 卫洁. 京津风沙源区干旱时空特征及对植被变化的影响 [J]. *山地学报*, 2018, **36** (4): 536–546. [MA Zhiting, WU Zhitao, WEI Jie. Spatial and temporal variations of droughts over the Beijing-Tianjin sand source region and their effects on vegetation change [J]. *Mountain Research*, 2018, **36** (4): 536–546]
- [30] 潘竟虎, 黄克军, 李真. 2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系 [J]. *生态学报*, 2017, **37** (6): 1888–1899. [PAN Jinghu, HUANG Kejun, LI Zhen. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule River basin from 2001 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37** (6): 1888–1899]
- [31] 王冰, 杨胜天, 王玉娟. 贵州省喀斯特地区植被净第一性生产力的估算 [J]. *中国岩溶*, 2007, **26** (2): 98–104. [WANG Bing, YANG Shengtian, WANG Yujuan. Estimation on net primary productivity of vegetation in karst area of Guizhou Province [J]. *Carsologica Sinica*, 2007, **26** (2): 98–104]
- [32] WANG Bing, YANG Shengtian, Lü Changwei, et al. Comparison of net primary productivity in karst and non-karst areas: a case study in Guizhou Province, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **59** (6): 1337–1347.
- [33] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素 [J]. *农业工程学报*, 2014, **30** (11): 244–253. [XIE Baoni, QIN Zhanfei, WANG Yang, et al. Spatial and temporal variation in terrestrial net primary productivity on Chinese Loess Plateau and its influential factors [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30** (11): 244–253]
- [34] 王一凡, 杨广斌. 贵州省 2000—2010 年耕地动态变化遥感调查与分析 [J]. *贵州师范大学学报 (自然科学版)*, 2015, **33** (2): 7–11. [WANG Yifan, YANG Guangbin. Dynamic change of cultivated land in Guizhou Province from 2000 to 2010 [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2015, **33** (2): 7–11]
- [35] 王丹, 郭砾, 赵松婷, 等. 退耕还林工程对黔东南山区植被覆盖变化的影响 [J]. *山地学报*, 2015, **33** (2): 208–217. [WANG Dan, GUO Luo, ZHAO Songting, et al. Influences of the project of returning cropland to forest on vegetation cover changing in Qiongnan mountain region [J]. *Mountain Research*, 2015, **33** (2): 208–217]
- [36] 田雷, 杨胜天, 王玉娟. 应用遥感技术研究贵州春季蒸散发空间分异规律 [J]. *水土保持研究*, 2008, **15** (1): 87–91. [TIAN Lei, YANG Shengtian, WANG Yujuan. Research on the spring evapotranspiration of karst area based on RS and GIS in Guizhou Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, **15** (1): 87–91]
- [37] 赵志平, 吴晓蕾, 李果, 等. 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力的影响 [J]. *生态学报*, 2015, **35** (2): 350–360. [ZHAO Zhiping, WU Xiaopu, LI Guo, et al. Drought in southwestern China and its impact on the net primary productivity of vegetation from 2009–2011 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35** (2): 350–360]
- [38] 李盼龙, 白晓永, 李阳兵. 植被净初级生产力对极端寒冷天气事件的响应—以 2008 年贵州省凝冻为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24** (Z1): 98–108. [LI Panlong, BAI Xiaoyong, LI Yangbing. Vegetation net primary productivity for the extreme cold weather events-taking the freezing disaster of Guizhou Province in 2008 year as an example [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24** (Z1): 98–108]
- [39] 杨胜天, 王玉娟, 温志群, 等. 典型喀斯特灌丛草坡类型区土壤水变化规律研究 [J]. *水土保持通报*, 2007, **27** (4): 100–106. [YANG Shengtian, WANG Yujuan, WEN Zhiqun, et al. Research on soil moisture in the typical shrub-grass zone in karst regions [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, **27** (4): 100–106]
- [40] ZHOU Qiuwen, LUO Ya, ZHOU Xu, et al. Response of vegetation to water balance conditions at different time scales across the karst area of southwestern China—A remote sensing approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 460–470.
- [41] 仇宽彪, 成军锋. 陕西省植被水分利用效率及与气候因素的关系 [J]. *水土保持研究*, 2015, **22** (6): 256–260. [CHOU Kuanbiao, CHENG Junfeng. Vegetation water use efficiency and its relationship with climate in Shaanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, **22** (6): 256–260]
- [42] 葛咏, 王劲峰, 梁怡, 等. 遥感信息不确定性研究 [J]. *遥感学报*, 2004, **7** (4): 339–348. [GE Yong, WANG Jingfeng, LIANG Yi, et al. Study on the uncertainty of remote sensing information [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **7** (4): 339–348]
- [43] 谭剑波, 李爱农, 雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析 [J]. *高原气象*, 2016, **35** (4): 875–886. [TAN Jianbo, LI Ainong, LEI Guangbin. Contrast on Anusplin and Cokriging meteorological spatial interpolation in southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, **35** (4): 875–886]
- [44] 徐翔, 许瑶, 孙青青, 等. 复杂山地环境下气候要素的空间插值方法比较研究 [J]. *华中师范大学学报 (自然科学版)*, 2018, **52** (1): 122–129. [XU Xiang, XU Yao, SUN Qingqing, et al. Comparison study on meteorological spatial interpolation approaches in Kangdian region of China [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2018, **52** (1): 122–129]

Spatial and Temporal Variability Characteristics of Water Use Efficiency in Different Landform Regions and Vegetation Types of Guizhou Plateau, China

ZHANG Ji, ZHOU Xu^{*}, JIANG Xiao, YANG Jiangzhou, LUO Xue

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: There are special climate and terrain in mountain areas of Guizhou Plateau including less sunshine, more cloud, rain and complex underlying surface. It is important for further understanding the process of carbon and water cycle in Karst area if we accurately explore the spatio-temporal differential characteristics of ecosystem water use efficiency (WUE) in this area. The data of meteorological stations in this paper were handled with interpolation by ANUSPLIN software. Meanwhile, high-quality MODIS-NDVI data had been reconstructed by time series harmonic analysis and quality control file as common input data of the CASA model to simulate NPP and estimated WUE with MOD16-ET data. With statistical method including Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall test and stability analysis, the spatial and temporal differential characteristics of WUE in different landform regions and vegetation types of Guizhou Plateau from 2000 to 2014 were compared and analyzed. The following were the results: (1) The spatial pattern for trend and WUE average value in the researching area during past 15 years was higher in western part than eastern and the trend of WUE was increasing significantly ($R^2 = 0.63$, $P < 0.001$). (2) From the point of view of various landform regions, the order of WUE average value for many years was: fault depression basin > karst canyon > peak-cluster depression > non-karst landform > karst plateau > karst trough valley, among which fault depression basin and karst canyon showed a significant increase trend ($P < 0.05$). (3) Viewing from different vegetation types, WUE value size ranked as mixed forest > broadleaf forest > cultivated land > coniferous forest > grassland > shrub. Coniferous forest and shrub coefficient variation (CV) were higher, but the former one had stronger resistance to climate fluctuations with faster growth rate. The CV value for grassland was lowest and change rate was slowest which was not easily affected by climate fluctuations. Because of the remarkable effect of ecological projects such as returning farmland to forests, the variation rate of WUE for cultivated land was the fastest.

Key words: water use efficiency; Harmonic Analysis of Time Series; Guizhou Plateau; karst landform regions; spatio-temporal characteristics