

DOI: 10.5846/stxb202008212184

彭大为,周秋文,韦小茶,李洪广,唐欣,严卫红.中国西南岩溶区水分利用效率变化及其对气象要素的响应.生态学报,2021,41(23):9470-9480.
Peng D W, Zhou Q W, Wei X C, Li H G, Tang X, Yan W H. Change of water use efficiency and its response to meteorological factors in karst area of Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23): 9470-9480.

中国西南岩溶区水分利用效率变化及其对气象要素的响应

彭大为,周秋文*,韦小茶,李洪广,唐欣,严卫红

贵州师范大学地理与环境科学学院,贵阳 550025

摘要:水分利用效率(WUE, Water use efficiency)是衡量水资源利用率的重要指标,对气候变化有明显响应,中国西南岩溶区生态缺水严重,水资源利用问题亟需解决,但该区域水分利用效率对气象要素的响应仍不明确。利用 MODIS 总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)和蒸散发(Evapotranspiration, ET)数据集计算中国西南岩溶区的水分利用效率,结合气象数据和归一化植被指数(NDVI, Normalized difference vegetation index)数据,采用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Pearson 相关分析,揭示了其水分利用效率的时空变化特征及对气象要素的响应。结果表明:2000—2014 年中国西南岩溶区年水分利用效率与植被生长期水分利用效率(AGS-WUE)时间序列变化趋势相近,春、秋季水分利用效率呈上升趋势,夏季呈下降趋势;年水分利用效率呈上升趋势,与降水呈负相关,喀斯特地区与气温呈正相关,非喀斯特地区呈负相关,NDVI 增长是主要驱动因素;年水分利用效率和 AGS-WUE 从东南到西北逐渐升高;非喀斯特地区水分利用效率高于大部分喀斯特地区;总体上高海拔地区水分利用效率高于低海拔地区。气温、海拔及喀斯特发育程度综合影响喀斯特地区水分利用效率。本研究结果能为提高喀斯特生态系统水分利用效率提供理论参考。

关键词:水分利用效率;中国西南;岩溶;MODIS;气象要素

Change of water use efficiency and its response to meteorological factors in karst area of Southwest China

PENG Dawei, ZHOU Qiuwen*, WEI Xiaocha, LI Hongguang, TANG Xin, YAN Weihong

School of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

Abstract: Water use efficiency(WUE) is an important indicator to measure utilization ratio of water resources, which has obvious response to climate change. Ecological water shortage is serious in karst area of Southwest China, and water resource utilization problem needs to be solved urgently. However, the response of water use efficiency to meteorological factors is still unclear. In this paper, MODIS gross primary productivity (GPP) and evapotranspiration (ET) data sets were used to calculate water use efficiency in karst area of Southwest China. Combined with meteorological and normalized difference vegetation index (NDVI) data, the temporal and spatial variation characteristics of water use efficiency and its response to meteorological factors were revealed by using the Theil-Sen Median trend analysis and Pearson correlation analysis. The results showed that the change trend of the annual water use efficiency was similar with the active growing season water use efficiency (AGS-WUE) in the karst area of Southwest China from 2000 to 2014. In spring and autumn, water use efficiency demonstrated an upward trend and a downward trend in summer. The annual water use efficiency showed an upward trend, which was negatively correlated with precipitation, positively correlated with temperature in karst areas, while negatively correlated with temperature in non-karst areas. The growth of NDVI was the main driving factor. Annual water use efficiency and AGS-WUE increased gradually from southeast to northwest. The water use efficiency in non karst areas was higher than

基金项目:国家自然科学基金(41761003);贵州省科学技术基金(黔科合基础[2019]1433);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726号)

收稿日期:2020-08-21; 网络出版日期:2021-07-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zouqiuwen@163.com

that in most karst areas. In general, water use efficiency in high altitude areas was higher than that in low altitude areas. Temperature, altitude and the degree of karst development affected water use efficiency in karst areas comprehensively. The results of this study can provide theoretical reference for improving the water use efficiency of karst ecosystem.

Key Words: water use efficiency; Southwest China; karst; MODIS; meteorological factors

水分利用效率(Water use efficiency, WUE)是衡量生态系统对气候及水资源利用率变化敏感性的重要指标^[1-4]。喀斯特地貌是全球地貌类型的重要组成部分,其中中国西南岩溶区是全球三大连片发育喀斯特的东亚片区中心^[5],是典型的生态环境脆弱地区^[6-8],水资源利用问题一直是该地区的热点问题之一^[8-9]。

水分利用效率对气象变化有着非常明显的响应^[10-11]。在全球尺度上,水分利用效率在 20 世纪有所增加,但在过去 30 年中随气候变化而降低^[12]。由于全球尺度的研究难以准确反映各区域的具体情况,针对水资源问题较为突出的区域进行研究,更能够对区域发展提供更有利的建议。比如在典型的地中海气候的北尼罗河三角洲地区^[13]、在温带、亚热带季风气候地区^[14-17]、以及较为缺水的干旱和半干旱区的水分利用效率对气候变化的响应得到了较全面的阐述^[18-21]。喀斯特地区因为独特的地貌、岩性、土壤和植被等条件,导致其蒸散发及 GPP(总初级生产力, Gross primary productivity)情况与这些区域相比存在差异。因此这些研究结果并不能够说明喀斯特地区水分利用效率的情况。

不少学者针对喀斯特地区的水分利用效率进行了研究。比如研究了喀斯特地区蒸散发情况及其对气候变化的响应机制^[22-23],这种响应机制对水分利用效率与气候之间的关系有着重要影响。黄甫昭等人通过设置实验样地对喀斯特地区季节性雨林植物的水分利用效率进行了研究,发现喀斯特地区从洼地到山顶,植被的水分利用效率会随海拔升高而逐渐提高^[24];张继等人探究了中国西南岩溶区的贵州省的不同地貌类型和植被类型区水分利用效率的时空分异特征,发现 2000—2014 年贵州省的水分利用效率值显著升高,部分喀斯特地貌类型水分利用效率均值会高于非喀斯特地区,并且由于不同植被类型对于气候变化的响应程度不同而导致其水分利用效率年际变化速率不一致^[25]。以上研究很好地揭示了喀斯特地区的水分利用效率不同于非喀斯特地区的特性,但是小范围的样点以及单个省份的研究无法充分反映整个中国西南岩溶区的情况,且该地区水分利用效率对于气候变化的响应特征仍然不明确。

因此,本文的目的是分析中国西南岩溶区 2000—2014 年水分利用效率在不同时间尺度变化特征和空间分布特征,并探讨水分利用效率与气象要素的关系。本文首先分析了不同时间尺度上水分利用效率的变化情况,即年水分利用效率、植物生长期(Active growing season, AGS)水分利用效率(AGS-WUE)和不同季节水分利用效率值(即春、夏、秋)的年际变异性,然后探讨了年水分利用效率和 AGS-WUE 的空间分布格局及其与地貌类型区的关系,最后探讨了水分利用效率变化趋势与气象要素以及归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)之间的关系。通过本研究,能够为认识中国西南岩溶区水分利用效率及其对气候变化的响应提供参考,为该地区提高水分利用效率提供决策建议。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

本文中的中国西南岩溶区指中国西南三省(贵州省、云南省、广西壮族自治区)(图 1),总面积约为 796773 km²。研究区内绝大部分地区为亚热带湿润季风气候,全年雨热同期,年均气温约为 16.92—17.87 °C,年均降水量约为 1067.9—1485.13 mm。地形以高原山地为主,地势东北高,西南低。喀斯特地区岩性主要为灰岩和白云岩,非喀斯特地区由非碳酸盐岩组成;区内土壤以黄棕壤、红壤和石灰土为主,土质松散易蚀。植被类型多样,主要有常绿针叶林、常绿阔叶林、灌丛及灌草丛等。

根据研究区地形、岩性和地质条件将其划分为 8 个地貌类型区,分别为:峰丛洼地(20.1%)、峰林平原(7.9%)、喀斯特高原(6.8%)、喀斯特峡谷(8.7%)、喀斯特槽谷(6.2%)、喀斯特盆地(9.0%)、中高山区

(5.5%) 和非喀斯特区(33.3%)(图 1)^[26]。

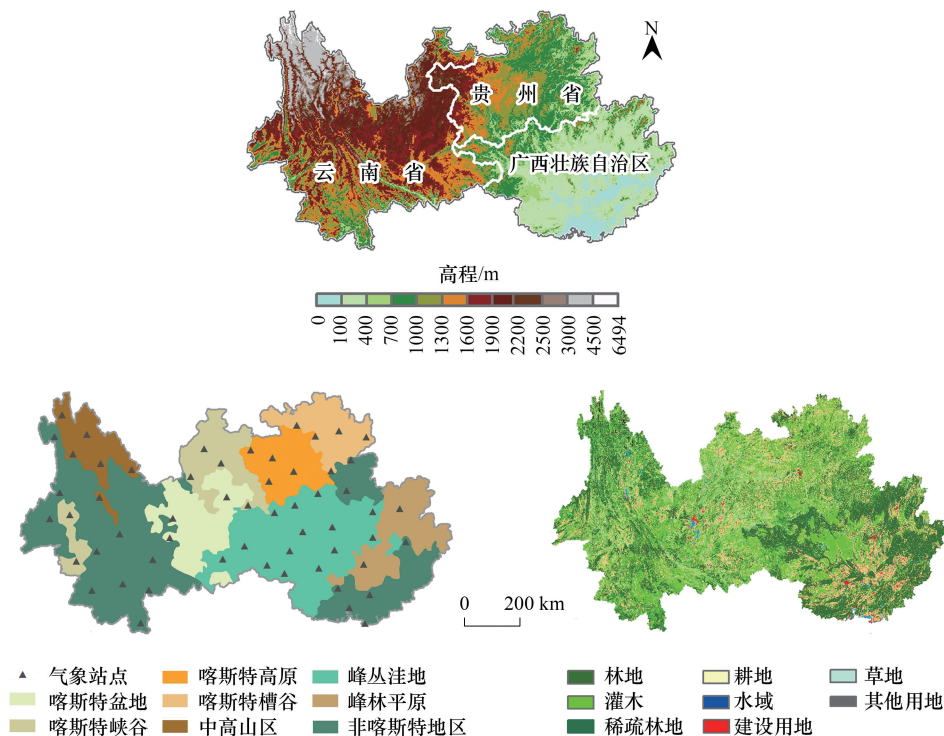


图 1 研究区高程、地貌分区及土地利用类型图

Fig.1 Elevation, geomorphic division and land use type map of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 MODIS GPP、ET 和 NDVI 数据集

目前 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)数据是水分利用效率研究中遥感手段最常用的数据^[4]。水分利用效率通常被定义为总初级生产力(GPP)或净初级生产力(Net primary productivity, NPP)与蒸散发(ET, Evapotranspiration)的比值^[18, 27-28]：

$$WUE = GPP/ET \text{ (或 } WUE = NPP/ET \text{)} \quad (1)$$

GPP、ET 和 NDVI 数据源自 MODIS 产品(MOD17 A2/A3、MOD16 A2/A3 和 MOD13 A3, <http://www.nts.g.umn.edu/>), GPP 和 ET 时间分辨率为月, NDVI 时间分辨率为 16 d, 空间分辨率都为 1 km, 时间跨度为 2000—2014 年, 采用 MRT、IDL 软件对下载的影像进行影像拼接、合成和去除误差值等预处理工作。

本文分别研究了不同时间尺度上的水分利用效率, 包括年水分利用效率, 春、夏、秋季水分利用效率和 AGS-WUE。其中, AGS-WUE 是指研究时间段内植物生长期(4 月至 9 月份为植物生长期)的 GPP 值(时段内 GPP 值之和, 以 $\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 为单位)与 ET 值(时段内 ET 值之和, 以 mm/a 或者 $\text{kgH}_2\text{Om}^{-2}\text{a}^{-1}$ 为单位)的比值; 研究区春季(3—5 月份)、夏季(6—8 月份)、秋季(9—11 月份)水分利用效率值计算方法同上^[18]。并将 12 个月数据取平均值, 分别计算每个 1 km^2 网格每年所对应的年值, 最后分别计算出 AGS 值和季节值。

1.2.2 气象数据

研究区气温和降水数据来源于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>), 降水数据为中国 1980 年以来逐年年降水量空间插值数据集, 气温数据为中国 1980 年以来逐年平均气温空间插值数据集, 分辨率都为 1 km。

1.3 研究方法

采用 Theil-Sen Median 趋势分析计算研究区 2000—2014 年内逐像元的年水分利用效率、年 GPP、年 ET 的

斜率。使用 *Pearson* 相关分析研究像元尺度上年水分利用效率与气温和降水在时间序列上的相关性,为了更进一步阐述水分利用效率的时间变化,又对水分利用效率在年、植被生长季、春、夏、秋时间尺度上与 NDVI 的时间序列相关性进行了研究。同样,对于 GPP 和 *ET* 也进行了上述相同的 *Pearson* 相关分析,由于 GPP 与 NDVI 关系密切,因此 GPP 与 NDVI 的相关性不做阐述。

计算中国西南岩溶区 15 a(2000—2014 年)的年水分利用效率、AGS-WUE、GPP 和 *ET* 像元的平均值,从而分析各指标的空间格局。并结合中国西南岩溶区的地貌类型分区,统计了不同地貌区的平均水分利用效率,用 R 软件的 TukeyHSD 函数对各地貌的平均水分利用效率进行多重比较,检验各组之间的差异显著性。

2 结果分析

2.1 中国西南岩溶区水分利用效率的时间变化特征

从图 2 可以看出,2000—2014 年研究区内超 70% 区域的水分利用效率呈上升趋势,仅东北部和西南部少数地区的水分利用效率下降,面积占整个研究区的 35.4%。AGS-WUE 的趋势分布与年水分利用效率相近,但

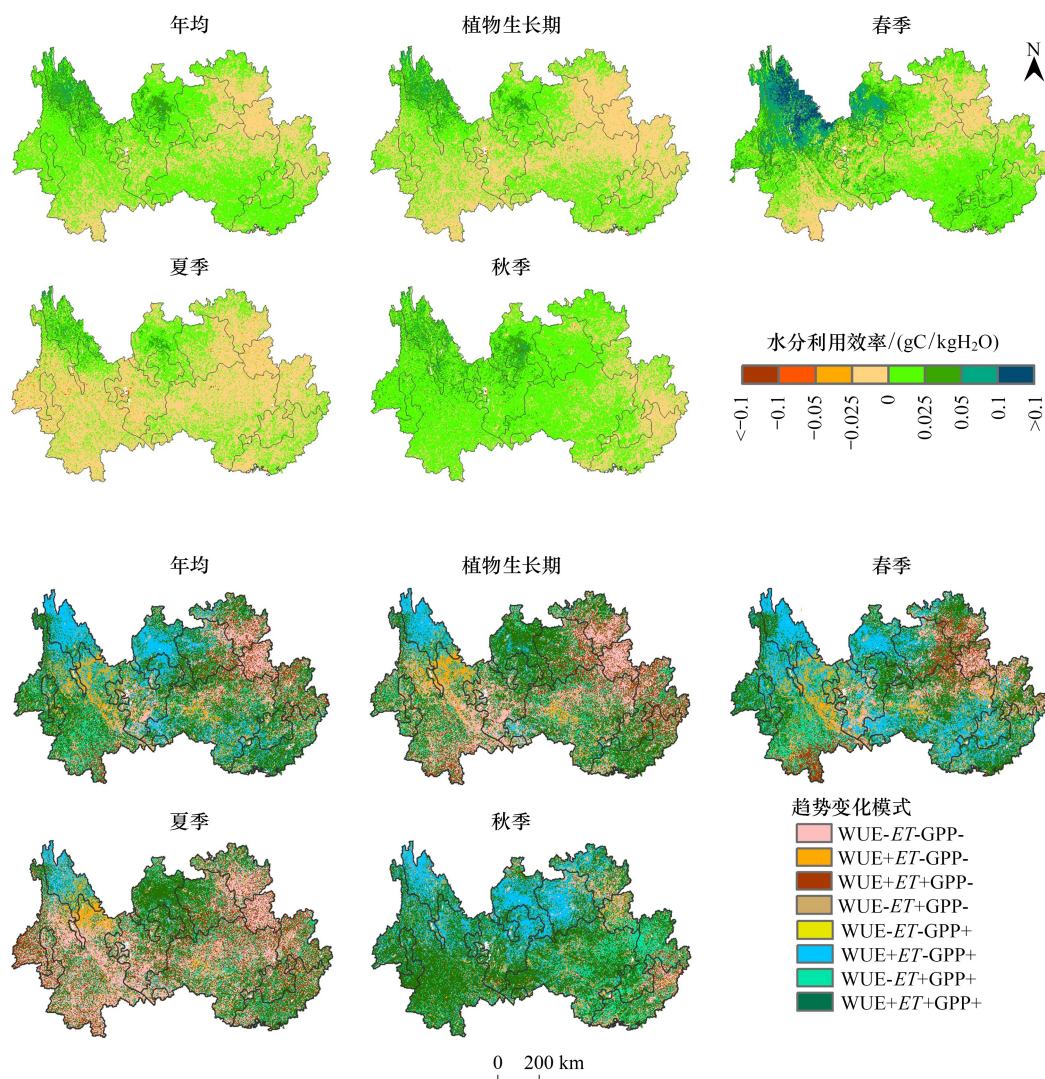


图 2 2000-2014 年不同时间尺度水分利用效率变化趋势空间分布格局及趋势变化模式

Fig.2 Spatial distribution pattern and trend change pattern of water use efficiency in different time scales from 2000 to 2014

WUE; 水分利用效率 Water use efficiency; *ET*; 蒸散发 Evapotranspiration; GPP; 总初级生产力 gross primary productivity. 趋势变化模式中“+”代表变量呈上升趋势,“-”代表呈下降趋势;图中空白区域为无值区

呈下降趋势的区域面积较大,占研究区面积的 52.9%,集中在东北部的非喀斯特地区和中南部的喀斯特盆地,变化模式为水分利用效率、*ET* 和 *GPP* 都降低。研究区各季平均水分利用效率增长趋势从大到小排序为春季>冬季>夏季。春季水分利用效率稳定增长,水分利用效率上升区域主要分布在西北部的中高山区,其变化模式为 *ET* 减少和 *GPP* 上升导致的水分利用效率上升;研究区夏季水分利用效率大面积下降,占总面积的 66.4%,集中在东北部、南部和中西部地区,其变化模式大部分为水分利用效率、*ET* 和 *GPP* 都下降;秋季的水分利用效率值整体上呈增长趋势,但是增长幅度较小,大部分在 0—0.025 之间,变化模式为水分利用效率、*ET* 和 *GPP* 都上升。而下降区域主要分布在东部的峰林平原区与非喀斯特地区交界处,是由于 *ET* 值上升所导致。

从图 3 可以看出,研究区绝大部分地区气温主要呈上升趋势,下降趋势区域主要分布在东南部非喀斯特地区,其分布趋势为离海越近下降程度越大,下降区域占总面积的 18.6%;降水呈现大面积下降趋势,分布于研究区中部、东北部及西部,占研究区总面积 72.2%,上升区域主要分布在东南部地区 and 北部,上升趋势的高值区集中分布在非喀斯特地区;*NDVI* 在大部分区域呈上升趋势,占研究区总面积的 88.7%。

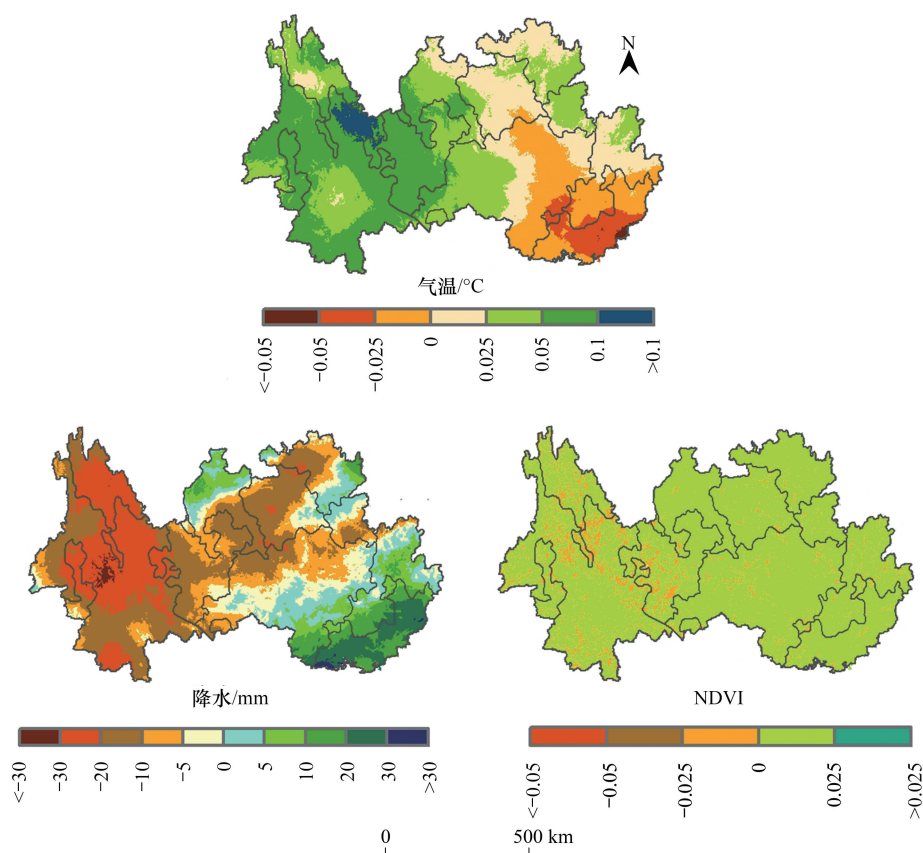


图 3 2000-2014 年气温、降水及 *NDVI* 变化趋势空间分布

Fig.3 Spatial distribution of temperature, precipitation and *NDVI* change trend from 2000 to 2014

2.2 中国西南岩溶区水分利用效率的空间分布特征

中国西南岩溶区 2000—2014 年的年水分利用效率与 AGS-WUE 空间变化较为明显(图 4)。年水分利用效率呈从东向西递增的趋势,数值分布区间为 0.09—3.67 gC/kgH₂O,均值为 (2.04±0.42) gC/kgH₂O(表 1);从 AGS-WUE 来看,总体的分布格局与年平均水分利用效率相近,分布区间为 0.11—4.00 gC/kgH₂O,均值为 (2.06±0.41) gC/kgH₂O(表 1),总体上北部区域 AGS-WUE 略高于年水分利用效率,东南部区域则为年水分利用效率较高(图 4)。

年水分利用效率值最低为喀斯特槽谷 (1.36 ± 0.23) $\text{gC/kgH}_2\text{O}$,最高的地貌类型是非喀斯特地区 (2.28 ± 0.39) $\text{gC/kgH}_2\text{O}$;AGS-WUE 的最低为峰林平原 (1.74 ± 0.26) $\text{gC/kgH}_2\text{O}$,最高值为中高山区 (2.39 ± 0.69) $\text{gC/kgH}_2\text{O}$ 。非喀斯特区的年水分利用效率值和 AGS-WUE 值都高于大部分喀斯特地貌类型区(表 1)。各地貌类型的年水分利用效率均值进行多重比较,仅喀斯特高原与喀斯特槽谷之间的均值差异不明显($P>0.05$)(图 5)。

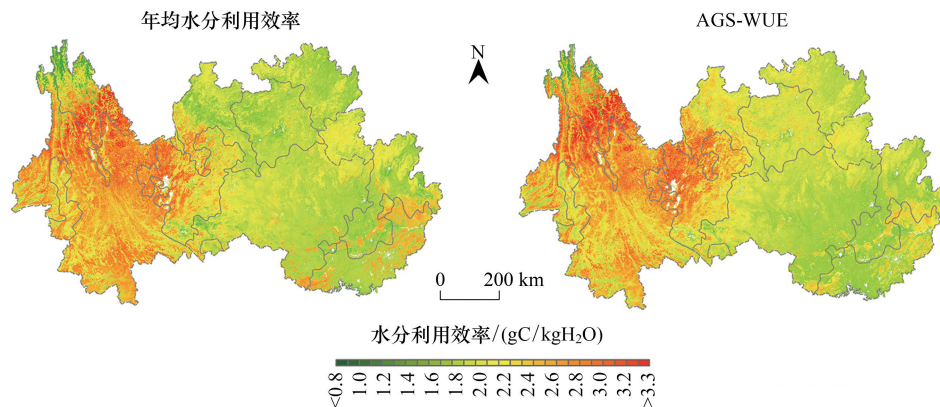


图 4 年水分利用效率和 AGS-WUE 空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of annual water use efficiency and AGS-WUE

AGS-WUE: 植物生长期水分利用效率

表 1 地貌类型区水分利用效率情况表

Table 1 Water use efficiency in geomorphologic types area

地貌类型 Geomorphologic types	年水分利用效率 Annual WUE/ ($\text{gC/kgH}_2\text{O}$)	植物生长期水分利用效率 AGS-WUE/ ($\text{gC/kgH}_2\text{O}$)	平均高程 Average elevation/m
峰丛洼地 Peak cluster depression	1.84 ± 0.22	1.79 ± 0.20	715.16
峰林平原 Peak forest plain	1.80 ± 0.30	1.74 ± 0.26	351.32
喀斯特高原 Karst plateau	1.74 ± 0.19	1.94 ± 0.16	1226.13
喀斯特峡谷 Karst gorge	1.96 ± 0.36	2.17 ± 0.29	1763.93
喀斯特槽谷 Karst trough valley	1.36 ± 0.23	1.86 ± 0.15	876.69
喀斯特盆地 Karst basin	2.24 ± 0.37	2.37 ± 0.34	1828.86
中高山区 Middle-high hill	2.17 ± 0.75	2.39 ± 0.69	3020.18
非喀斯特区 Non-karst region	2.28 ± 0.39	2.21 ± 0.41	1343.77
总体平均 Overall average	2.04 ± 0.42	2.06 ± 0.41	1274.69

WUE:水分利用效率 Water use efficiency;AGS-WUE:植物生长期水分利用效率 Active growing season water use efficiency

2.3 水分利用效率与气象要素和 NDVI 的关系

研究时段内中国西南岩溶区年水分利用效率与气温时间序列的相关性 R 值在空间上的分布呈现出较为明显的南北差异,自南向北 R 值逐渐由负值转为正值,正相关区域主要分布于喀斯特高原、喀斯特峡谷和中高山区这些高海拔喀斯特地区,负相关区域主要分布于非喀斯特地区。整体上 R 值为正的区域占 69.2%,其中 R 值大于 0.5 的区域占正值区的 27.6%(图 6);而年水分利用效率的趋势与降水呈负相关的区域占研究区面积的 48.2%,主要分布在中高山区,喀斯特峡谷及喀斯特高原交界处也有部分分布,正相关区域集中于东北部的非喀斯特地区(图 6);大部分区域气温与 ET 呈正相关,区域占总面积的 78.9%,大部分区域降水与 ET 呈负相关,占总面积的 74.4%(图 7);从气象要素对 GPP 的影响来看,气温与 GPP 的相关系数 R 值为正,占 73.2%的区域,降水对 GPP 的影响正值与负值分布面积相近,正值约占 51.5%(图 8)。

西南喀斯特地区年水分利用效率与 NDVI 呈正相关的面积占 76.9%,其中 R 值大于 0.5 的区域占正相关

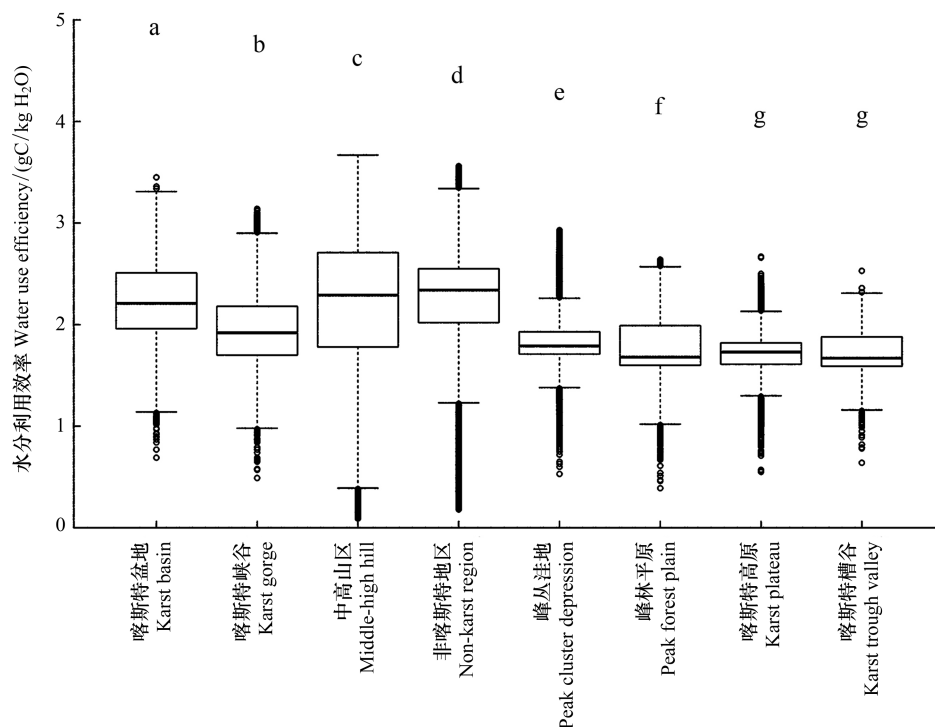


图5 各地貌类型水分利用效率均值差异显著性图

Fig.5 Significance of mean difference of water use efficiency among different geomorphic types

图中有相同字母的地貌类型说明均值差异不显著($P > 0.05$),字母不相同则说明均值差异显著($P < 0.05$)

区域的 25.4%,集中分布于北部喀斯特峡谷区与喀斯特高原区交界区(图 6)。AGS-WUE 与 AGS-NDVI 的呈负相关区域占 61.0%;春季正相关地区主要分布于北部和东部,负相关地区分布于中部偏西部地区;夏季的相关系数空间差异不大;秋季的相关系数正值集中分布于北部(图 6)。大部分地区年 ET 与 NDVI 呈正相关关系,AGS- ET 与 AGS-NDVI 也呈现相近的情况(图 7)。春、夏及秋季 ET 与 NDVI 正相关区域(图 7)与各季水分利用效率和 NDVI 负相关区域(图 6)相近。

3 讨论

3.1 气候要素对水分利用效率的影响过程

本文发现研究区内水分利用效率与气温负相关区域主要分布在非喀斯特地区,正相关区域主要分布在高海拔的喀斯特地区(图 6)。因为水分利用效率对气象要素的响应取决于驱动植物光合作用和生态系统失水的主导过程,也就是 GPP 之于 ET 的相对变化^[18],所以水分利用效率与气温的相关性主要由植被生态系统的发育程度决定。虽然更温暖的气候通常会使得植被生长更好,但研究区中非喀斯特地区大多位于低纬度地区,温度相对较高,过高的温度会导致植物呼吸作用强于光合作用,使得植物生长发育受阻甚至死亡。同样温度升高也会导致植被蒸腾加剧, ET 上升速度高于 GPP,因此温度上升不利于提高非喀斯特地区水分利用效率。而喀斯特高原、喀斯特峡谷及中高山区海拔较高,气温相对较低,且因喀斯特地貌发育,植被生长较差,多为灌木及草地,温度上升会有利其植物生长。峰丛洼地和峰林平原同样也是喀斯特地貌,但是其海拔都相对较低,温度较高,导致水分利用效率与气温的相关性 R 值不高(图 6)。史晓亮等人发现高寒草甸、农田及草原生态系统 WUE 与气温呈正相关,森林生态系统 WUE 与气温呈负相关,而本文发现喀斯特地区与非喀斯特地区的差异所导致的植被生态系统差异确实会导致其水分利用效率对温度的响应不同,但本文还发现该地区海拔所导致的气温差异也会使其水分利用效率对气温的响应有所差异。

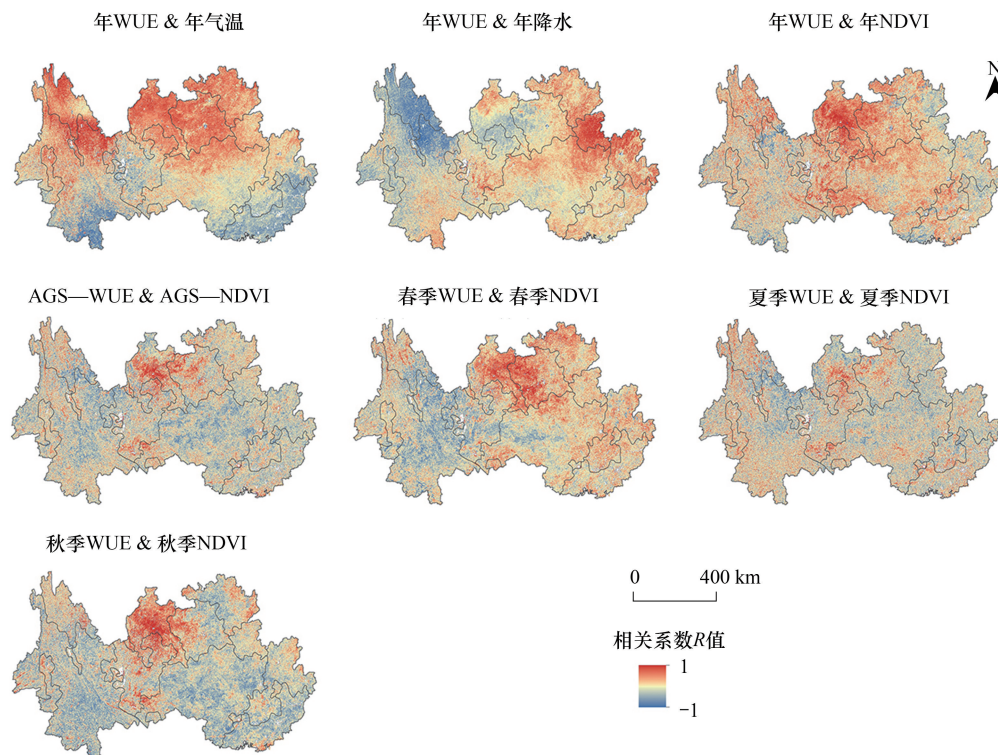


图 6 年水分利用效率与气象要素及不同时间尺度水分利用效率与 NDVI 相关系数空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of correlation coefficients between annual water use efficiency and meteorological elements; correlation coefficients between water use efficiency and NDVI at different time scales

2000—2014 年,西南喀斯特地区的水分利用效率与降水负相关地区主要集中于中高山区(图 6),这是由于中高山区植被受其高海拔所导致的低温影响生长较差,植被需水量有限,降水的增加对植被生长意义不大,反而会增加该地蒸发量,所以在这个区域水分利用效率与降水负相关。而在喀斯特峡谷和喀斯特高原交界处部分分布的负相关区域则是因为西南喀斯特地区存在着石漠化等生态问题^[29-30],大量基岩裸露,土层稀薄难以储水,且该地区也分布着干热河谷,温度较高,降水会快速蒸发。且降水的增加会导致光照时间减少从而对植被生长不利^[18],GPP 减少,水分利用效率也随之下降。水分利用效率与降水呈正相关的区域集中分布于研究区东北部的非喀斯特地区,该区域底部基岩为非碳酸盐岩,能够更好地将水分保存在土壤中供给植物生产 GPP,降水的增加会让植物长势更好。相比于研究区东南部的非喀斯特地区,该地区离海更远,更难得到东南季风或西南季风的补给,因此同样为非喀斯特地区,东北部的非喀斯特地区对降雨更加敏感,正向反馈更集中。

为了进一步探究西南喀斯特地区水分利用效率时间变化的原因,本文研究了 NDVI 与水分利用效率的相关性。水分利用效率与 NDVI 的正相关区域主要集中于喀斯特峡谷与喀斯特高原的交界处,非喀斯特区水分利用效率对 NDVI 的响应程度相对较低(图 6)。由于喀斯特地区基岩透水性强,土层稀薄,导致植被发育程度较低^[31],植被发育是该区域提高水分利用效率的关键因素,因此其响应更强;而非喀斯特地区的岩性及土壤状况则相反,植被已经发育较好,使其响应较弱。总体上研究区水分利用效率与 NDVI 在较大面积上呈正相关(图 6),因为近年来中国政府积极治理石漠化及对森林资源的保护使得西南喀斯特地区的植被盖度逐年上升^[32-33],而植被生态系统的改善是提高水分利用效率的关键一环,因此西南喀斯特地区 NDVI 上升对提升水分利用效率具有积极影响。在非喀斯特地区的研究结果也发现近似的结果^[18],因此今后在进行水分利用效率研究时不仅要把握气候变化,还应考虑 NDVI,甚至更多的生态环境因素,以对水分利用效率变化机制分析

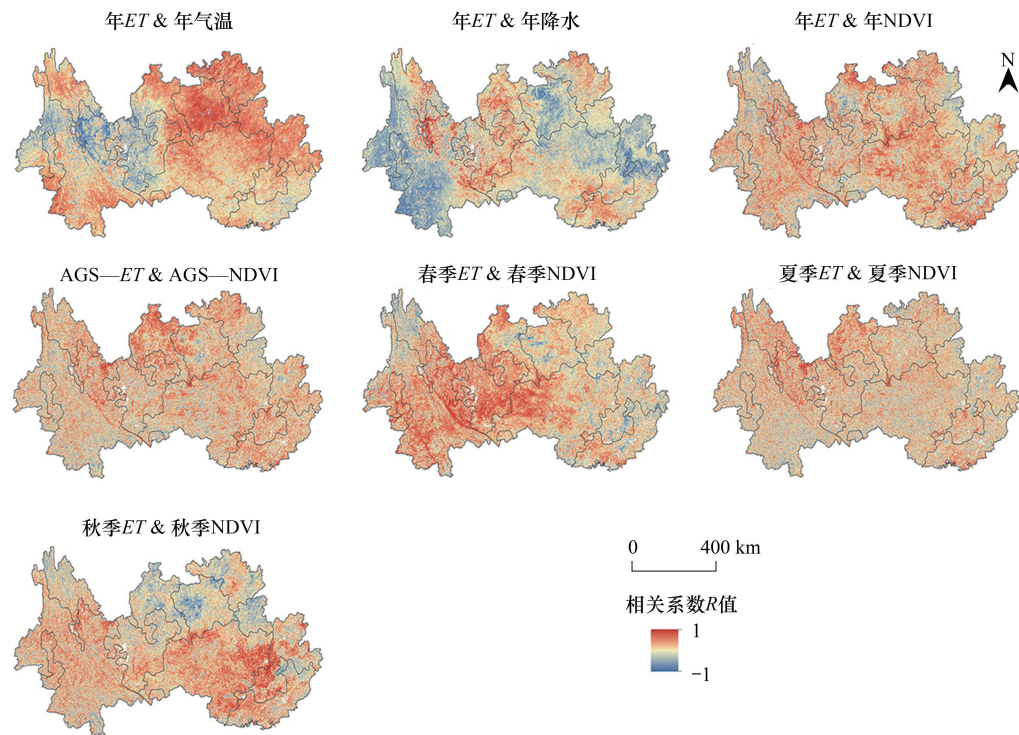


图7 年ET与气象要素及不同时间尺度ET与NDVI相关系数空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of correlation coefficients between annual ET and meteorological elements; correlation coefficients between ET and NDVI at different time scales

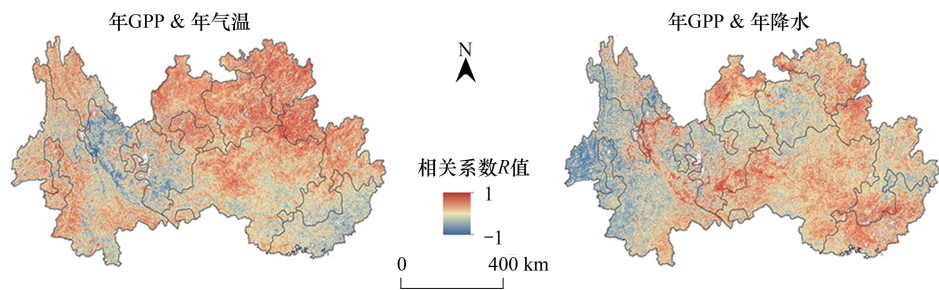


图8 年GPP与气象要素相关系数空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of correlation coefficients between annual GPP and meteorological elements

更为透彻。

3.2 水分利用效率空间分布的原因

2000—2014 年研究区内的年水分利用效率和 AGS-WUE 空间分布相似,整体上从东南向西北递增(图4),水分利用效率的空间分布整体与高程(图1)相近,且西北部的水分利用效率出现了明显的山体脉络,随着海拔的升高,气温和地表温度的下降使 ET 减少。虽然海拔升高也会使植被减少,但是植被减少的速度低于气温下降的速度,其导致的 GPP 下降速度低于 ET,从而提高了水利用效率。因此,西南喀斯特地区水分利用效率整体在空间上会随海拔的升高而升高。

从局部来看,地貌类型会对水分利用效率的空间分布产生影响。研究区内非喀斯特地区水分利用效率高 于绝大部分喀斯特地区(表1)。因为非喀斯特地区的基岩为非碳酸盐岩,土层深厚,土壤储水能力强,且所处地理位置受西南季风和东南季风影响,良好的水热条件使植被生长较好,GPP 更高,所以其水分利用效率高

于喀斯特地区。在喀斯特地貌内部,年水分利用效率均值较高的地区为喀斯特盆地和中高山区,这是海拔最高的两个地区(表 1),虽然中高山区植被较差,但其温度低蒸散发弱,使其水分利用效率较高。而较低水分利用效率的地区,如峰丛洼地、峰林平原地区和喀斯特槽谷均海拔较低,气温较高导致水分利用效率不高。这印证了前文海拔提高会提高水分利用效率的结论,也与黄甫昭等人在喀斯特地区的研究相近^[24]。但本文发现海拔爬升到一定程度后水分利用效率会有所降低,这是由于过高的海拔会使植被减少甚至消失,植被类型会从林地向草地转变,导致 GPP 快速下降,因此海拔最高的中高山区水分利用效率并非最高。本文还发现喀斯特地貌发育所导致的地表破碎程度也会影响水分利用效率,喀斯特高原区海拔远高于峰林平原,但是其年水分利用效率反而低于峰林平原(图 4)。这与之前海拔升高会提高水分利用效率的结论相悖,这是因为喀斯特高原目前为喀斯特发育的中期(第二阶段),该地貌区位于西南岩溶区的贵州省,大量岩石裸露,石漠化现象严重^[34],导致喀斯特高原地表破碎程度高,岩石裂缝多,水分多下渗到地下水文系统,植被生长受阻。而峰林平原的喀斯特地貌则已经发育到了晚期(第三阶段或第四阶段),该地区的侵蚀已经接近其岩溶基准面,水分无法再继续下渗,从而得以保存在土壤中供给植物生长,因此其水分利用效率会高于喀斯特高原。

综上所述,在西南喀斯特地区,水分利用效率在整体会上会随海拔的升高而升高,但达到一定海拔高度后会降低水分利用效率,并且喀斯特地貌发育所导致的地表破碎程度严重影响其水分利用效率,对前人研究理论进行了扩充。因此在喀斯特进行水分利用效率的相关研究时应关注喀斯特地貌区独特的地貌因素对其的影响。

4 结论

本研究利用 2000—2014 年的 MODIS GPP 和 ET 数据集,分析了中国西南岩溶区水分利用效率的时空分布特征及其对气候和 NDVI 的响应,同时还探索了不同地貌类型条件对水分利用效率空间分布的影响。结果表明,在时间上,年水分利用效率与 AGS-WUE 差异不大,季节上春季和秋季的水分利用效率呈上升趋势,夏季水分利用效率呈下降趋势。2000—2014 年中国西南岩溶区的水分利用效率有所提升,水分利用效率与降水呈负相关区域集中于喀斯特地区,正相关区域集中于非喀斯特地区;喀斯特地区水分利用效率与气温主要呈正相关,非喀斯特地区与气温主要呈负相关,NDVI 增长对水分利用效率提升起重要作用。在空间上,研究区的年水分利用效率和 AGS-WUE 空间分布相近,整体上水分利用效率随海拔升高而升高,达到一定高度后则开始下降。受碳酸盐岩的影响,喀斯特地区水分利用效率低于非喀斯特地区,喀斯特内部地区在水分利用效率受海拔高度影响,同时喀斯特地貌发育所导致的地表破碎程度严重影响其水分利用效率。本文对前人的研究理论进行了扩充,为喀斯特地区提升水分利用效率提供了理论指导。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 王世杰,刘再华,倪健,闫俊华,刘秀明. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展. 地球与环境, 2017, 45(1): 2-9.
- [3] Ahmadi B, Ahmadalipour A, Tootle G, Moradkhani H. Remote sensing of water use efficiency and terrestrial drought recovery across the contiguous united states. Remote Sensing, 2019, 11(6): 731.
- [4] 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.
- [5] 揭国民,邵学栋,陈洪松. 西南岩溶地区的主要生态环境问题及其防治对策. 农业现代化研究, 2005, 26(5): 374-377.
- [6] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120-126.
- [7] 张信宝,王世杰,曹建华,王克林,孟天友,白晓永. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.
- [8] 杜文鹏,闫慧敏,甄霖,胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [9] 张殿发,欧阳自远,王世杰. 中国西南喀斯特地区人口、资源、环境与可持续发展. 中国人口·资源与环境, 2001, 11(1): 77-81.
- [10] Conaty W C, Mahan J R, Neilsen J E, Tan D K Y, Yeates S J, Sutton B G. The relationship between cotton canopy temperature and yield, fibre quality and water-use efficiency. Field Crops Research, 2015, 183: 329-341.

- [11] 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.
- [12] El Masri B, Schwalm C, Huntzinger D N, Mao J F, Shi X Y, Peng C H, Fisher J B, Jain A K, Tian H Q, Poulter B, Michalak A M. Carbon and water use efficiencies: a comparative analysis of ten terrestrial ecosystem models under changing climate. Scientific Reports, 2019, 9(1): 14680.
- [13] Ali M G M, Ibrahim M M, El Baroudy A, Fullen M, Omar E S H, Ding Z L, Kheir A M S. Climate change impact and adaptation on wheat yield, water use and water use efficiency at North Nile Delta. Frontiers of Earth Science, 2020, 14(3): 522-536.
- [14] 赵安周, 张安兵, 冯莉莉, 王冬利, 承达瑜. 海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析. 生态学报, 2019, 39(4): 1452-1462.
- [15] 王芳, 张运, 黄静, 汤志, 何好, 王银银. 基于 MODIS 数据的安徽省植被水分利用效率时空变化及影响因素. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1314-1323.
- [16] 邵辉, 张远东, 顾峰雪, 缪宁, 刘世荣. 长江经济带水分利用效率变化及与温度和降水的关系. 生态学报, 2020, 40(16): 5579-5590.
- [17] Wang F, Jiang H, Cheng M, Zhang L J, Liu J, Yu K Y. Estimation of water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the Yangtze River Delta region, China. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2019, 30(2): 247-264.
- [18] Zheng H, Lin H, Zhou W J, Bao H, Zhu X J, Jin Z, Song Y, Wang Y Q, Liu W Z, Tang Y K. Revegetation has increased ecosystem water-use efficiency during 2000-2014 in the Chinese Loess Plateau: Evidence from satellite data. Ecological Indicators, 2019, 102: 507-518.
- [19] 李肖娟, 张福平, 王虎威, 雷声剑, 高张. 黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其与气候因子的关系. 中国沙漠, 2017, 37(4): 733-741.
- [20] 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.
- [21] Tian F, Zhang Y, Lu S H. Spatial-temporal dynamics of cropland ecosystem water-use efficiency and the responses to agricultural water management in the Shiyang River Basin, northwestern China. Agricultural Water Management, 2020, 237: 106176.
- [22] Gao X L, Peng S Z, Wang W G, Xu J Z, Yang S H. Spatial and temporal distribution characteristics of reference evapotranspiration trends in Karst area: a case study in Guizhou Province, China. Meteorology and Atmospheric Physics, 2016, 128(5): 677-688.
- [23] 王飞宇, 占车生, 胡实, 贾仰文, 牛存稳, 邹靖. 典型山地蒸散发时空变化模拟研究. 资源科学, 2017, 39(2): 276-287.
- [24] 黄甫昭, 李冬兴, 王斌, 向悟生, 郭屹立, 文淑均, 陈婷, 李先琨. 喀斯特季节性雨林植物叶片碳同位素组成及水分利用效率. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1833-1839.
- [25] 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.
- [26] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 54: 105-113.
- [27] Yang S S, Zhang J H, Zhang S, Wang J W, Bai Y, Yao F M, Guo H D. The potential of remote sensing-based models on global water-use efficiency estimation: An evaluation and intercomparison of an ecosystem model (BESS) and algorithm (MODIS) using site level and upscaled eddy covariance data. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 287: 107959.
- [28] 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. 水土保持研究, 2015, 22(6): 256-260.
- [29] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.
- [30] 李阳兵, 王世杰, 容丽. 关于中国西南石漠化的若干问题. 长江流域资源与环境, 2003, 12(6): 593-598.
- [31] 倪隆康, 顾大彤, 何文, 黄玉清, 陈中义. 岩溶区植物生态适应性研究进展. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2210-2217.
- [32] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.
- [33] 熊康宁, 朱大运, 彭韬, 喻理飞, 薛建辉, 李坡. 喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7109-7113.
- [34] 王培彬, 安裕伦. 2000—2010 年贵州喀斯特地区石漠化时空特征分析. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2014, 32(3): 10-15, 46-46.