

DOI:10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2019. 05. 001

2000—2014 年云南省陆地生态系统水分利用效率的时空变化

张 珂^{1,2}, 刘林鑫^{1,2}, 晁丽君^{1,2}, 杨 婧²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:基于 MODIS 卫星遥感数据, 计算了云南省 2000—2014 年陆地生态系统水分利用效率 (WUE), 结合国家气象站点的观测数据, 采用趋势分析、EOF 分析和相关性分析等方法, 获取了云南省陆地生态系统 WUE 时空变化规律和主要驱动因子。结果表明: 云南省陆地生态系统 WUE 空间分布差异明显, 呈现南北低、中间高的格局, WUE 在大部分地区呈现了明显的季节变化, 而在低值区变化不显著; WUE 年际变化趋势存在明显的南北差异, 北方主要呈增加的趋势, 南方主要呈减少的趋势, 蒸散发是其变化的主导因素; WUE 空间模态呈现南北反向分布模式, 北方增加, 南方减少, 反之亦然; WUE 驱动因子自北向南依次为相对湿度、最高温度和日照时数, 相关关系呈现南北差异。

关键词:水分利用效率; 陆地生态系统; 时空变化; 驱动因子; 云南省

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)05 - 0001 - 05

Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency in Yunnan Province from 2000 to 2014 //
ZHANG Ke^{1,2}, LIU Linxin^{1,2}, CHAO Lijun^{1,2}, YANG Jing² (1.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the satellite remote sensing data of MODIS, water use efficiency (WUE) in Yunnan Province from 2000 to 2014 was calculated. Combined with the observation data of national meteorological stations, the spatiotemporal variations law of WUE and its main driving factors in Yunnan Province were got by adopting trend analysis, EOF analysis and correlation analysis. The results show that WUE shows apparent spatial gradients across Yunnan Province with lower values in the north and south and higher values in the middle. WUE also shows a clear seasonality in most of the areas, but it does not show strong seasonality in these areas with low WUE values. WUE shows differential trends over the past 15 years across the region with increasing trends dominating in the north and decreasing trends dominating in the south. Evapotranspiration is the dominant factor of its change. WUE spatial mode presents a reverse distribution pattern from north to south, increasing in the north and decreasing in the south, and vice versa. The driving factors of WUE are relative humidity, highest temperature and sunshine hours from north to south, and the correlation shows north-south difference.

Key words: water use efficiency; terrestrial ecosystem; spatiotemporal variation; driving factors; Yunnan Province

水分利用效率(water use efficiency, WUE)是度量生态系统碳-水循环关联的重要变量,也是衡量生态系统对气候变化敏感性的重要指标^[1-2]。研究 WUE 的时空变化规律对深入理解生态系统变化规律,解释生态系统对气候和水资源变化的响应具有重要意义。

当前,开展不同尺度的 WUE 的研究已经成为热点。站点尺度通常以涡动通量塔的观测数据估算 WUE,冯朝阳等^[3-4]分别对中国北方植被和科尔沁草甸评估了其 WUE 的变化。遥感技术的发展为区域尺度 WUE 的研究提供了便利。Sun 等^[5-6]利用 MODIS 数据在全球尺度上分析了 WUE 的时空分布

和变化特征。WUE 机理复杂,目前尚未厘清其影响机制。在全球气候变化的背景下,寻找驱动因子对 WUE 的响应尤为关键。

云南省气候类型丰富,地形地貌复杂,植被覆盖度高,这些因素导致云南省水资源量的季节和空间分布不均,加剧了水资源的供需矛盾^[7-9],水资源问题成为制约区域发展的主要因素。本文利用云南省 2000—2014 年的 MODIS 8 d 陆地生态系统总初级生产力(gross primary productivity,GPP)和实际蒸散发 ET_a 数据产品,计算云南省陆地生态系统 WUE,讨论其 WUE 时空分布和变化趋势,定量分析其 WUE 和气象驱动因子的关联性,旨在为政府部门制定生态系统保护、水资源管理政策和区域应对气候变化的挑战提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省位于中国西南部,总面积 39.4 万 km^2 ,处于 $97^{\circ}31'E \sim 106^{\circ}11'E$ 、 $21^{\circ}08'N \sim 29^{\circ}15'N$ 之间,包括 8 个地级市和 8 个自治州。云南地形地貌复杂,以山地、高原和盆地为主;气候类型丰富,主要有亚热带季风、热带季风和高原山地气候^[10];年平均气温 $6 \sim 25^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $700 \sim 1\,700\text{ mm}$,自南向北递减(图 1);植被类型多样,覆盖率高,生态需水量大。

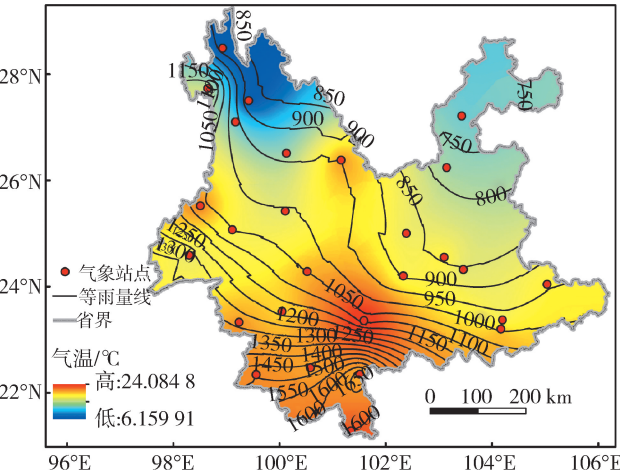


图 1 云南省多年平均气温与降水分布

1.2 数据来源与处理

基于卫星遥感反演的 GPP 和 ET_a 数据来自美国 NASA 数据中心 2000—2014 年的 MOD17 和 MOD16 Collection 6 的影像数据集,时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。GPP 和 ET_a 数据产品经验证具有较可靠的精度,已经广泛应用于全球和区域的研究^[11-12]。利用 MODIS reprojection tool(MRT)对上述数据进行拼接和投影转换。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)

2000—2014 年云南省 28 个气象站点的月数据,包括风速、日照时数、相对湿度、降水量、平均气温、最高气温、最低气温。利用 Arcgis10.1 工具对气象数据进行克里金插值,获取与遥感影像空间尺度一致的数据。

2 研究方法

2.1 WUE 计算

WUE 定义为单位时间内(本研究时间尺度为季度和年)陆地生态系统总初级生产力 GPP 与实际蒸散量的比值:

$$n = \frac{A}{E} \tag{1}$$

式中: n 为陆地生态系统水分利用效率, g/kg ; A 为单位时间陆地生态系统总初级生产力, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$; E 为单位时间陆面实际蒸散量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

2.2 趋势分析

本研究采用非参数趋势度(SEN)^[13]方法来计算云南省 2000—2014 年 WUE 的变化趋势,并通过 Mann-Kendall 统计检验法对其进行显著性检验。运用 SEN 进行趋势分析,其特点是样本不需要服从一定的分布规律,并且不受异常值的干扰,对离群数据的测量误差具有较强的规避能力。SEN 值计算公式为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (\forall j > i) \tag{2}$$

式中: β 为像元 WUE 变化趋势值;Median 为中位数函数; i,j 为时间序数; x_i,x_j 分别为第 i,j 时间的像元 WUE 值。当 $\beta > 0$ 时,表明该栅格内 WUE 呈上升趋势;当 $\beta < 0$ 时,表明该栅格内 WUE 呈下降趋势。

2.3 经验正交函数分析

经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)法,即时空数据的主成分分析法,是一种提取主要数据特征量的方法^[14-15],其原理是通过源数据矩阵提取其空间模态和时间系数,进而对原始场进行解释。可表示为

$$X = ZV \tag{3}$$

式中: X,Z,V 分别为原始场矩阵、空间模态矩阵、时间系数矩阵,通过空间模态反映原始场的空间分布特点,通过时间模态寻找主要驱动因子。

2.4 相关分析法

研究区域内 WUE 与主要驱动因子的空间相关性,选择相关系数作为量化指标,对栅格点处的 WUE 时间序列和驱动因子的时间序列做相关性分析,计算相关系数并做显著性分析。相关系数显著性检验用 t 检验法,选 $p = 0.05$ 作为显著性水平。

3 结果分析

3.1 云南省陆地生态系统 WUE 的空间变化特征

3.1.1 空间分布特征

云南省陆地生态系统 WUE 空间分布差异明显,高值区主要分布在丽江地区,低值区主要分布在迪庆、昭通、文山等地区,WUE 多年平均值为 1.76 g/kg,呈现南北低、中间高的格局。在季节尺度上,春季 WUE 最大(图 2(a)),值域主要介于 1.5~2.0 g/kg,频率达到了 29.33%,WUE 值域区间较大,空间差异明显。夏季和秋季的 WUE 分布相似(图 2(b)(c)),值域主要介于 1~2.5 g/kg,频率分别达到了 93.02% 和 81.12%。冬季 WUE 在低值区分布明显增加(图 2(d)),这可能与植被进入冬眠有关,值域主要介于 2.5~3 g/kg 之间。

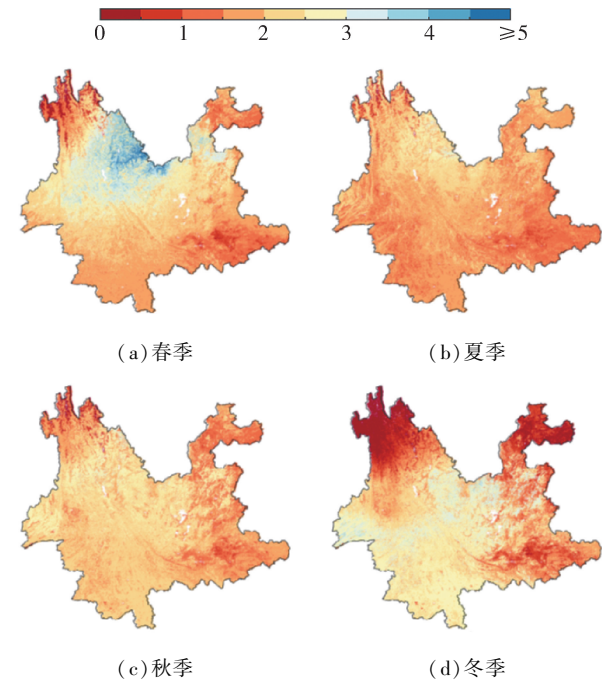
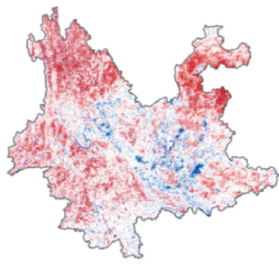


图2 云南省四季 WUE 空间分布特征(单位:g/kg)

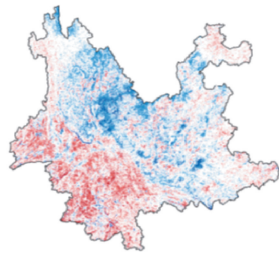
3.1.2 空间变化趋势

分别对 2000—2014 年云南省 GPP、 ET_a 和 WUE 进行趋势分析。GPP 区域均值年际变化趋势为 3.9233 g/(m²·a²),31% 的区域通过了 5% 显著性分析(图 3(a)),整体呈增加趋势,中部地区呈减少的趋势。 ET_a 年际变化趋势为 0.181 kg/(m²·a²),28% 的区域通过了 5% 显著性分析(图 3(b)), ET_a 北部呈显著减少的趋势,南部呈显著增加的趋势。WUE 年际变化趋势为 0.012 g/(kg·a),全省 54.2% 的区域呈现显著变化趋势($p < 0.05$)(图 3(c)),和 ET_a 相反,WUE 北方部分呈现显著增加趋势而南方部分呈现显著减少趋势。对比 GPP 和 ET_a ,云南省北方的变化趋势均满足 WUE 增加的条件,

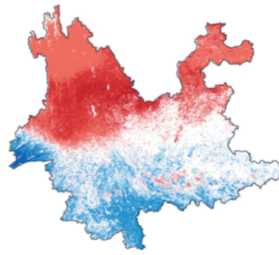
而南方由于 ET_a 增加的趋势大于 GPP,导致 WUE 减少。



(a) GPP 趋势(单位:g/(m²·a²))



(b) ET_a 趋势(单位:kg/(m²·a²))



(c) WUE 趋势(单位:g/(kg·a))

图3 2000—2014 年云南省 GPP、 ET_a 、WUE 空间变化趋势($p < 0.05$)

3.2 EOF 分析

对云南省 WUE 和气象因子进行标准化处理,应用 EOF 法对标准化的 WUE 进行时空分解,寻找主要模态和驱动因子。2000—2014 年 WUE 前两个空间模态如图 4(图中 δ 表示 WUE 经标准化处理后的模态系数,图 5~6 同)所示。

第一模态解释了 WUE 年际变异的 42.61%,模态特征值为正值的区域所占空间面积为 77.89%,表明云南省大部分地区 WUE 变化趋势具有高度一致性,西双版纳、思茅、德宏等部分地区为负值,呈现相反的震荡类型(图 4(a));第一模态的特征值南北高、中间低,表明云南的北部和南部地区 WUE 的波动程度比中部地区大,高值区主要分布在昭通、丽江和西双版纳等地区。

第二模态解释了 WUE 年际变异的 23.89%(图 4(b)),模态特征值为正值的区域所占空间面积为

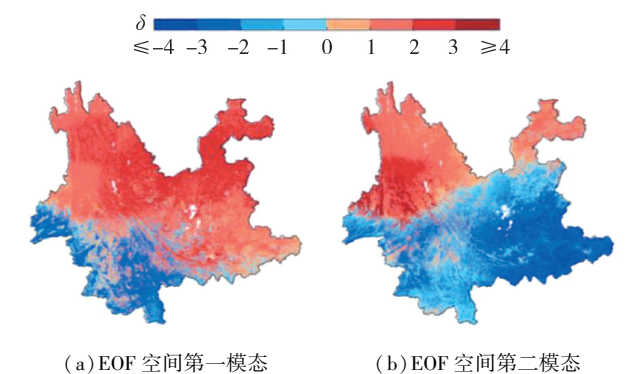


图 4 2000—2014 年云南省 WUE 正交经验函数前两个特征向量的空间模式

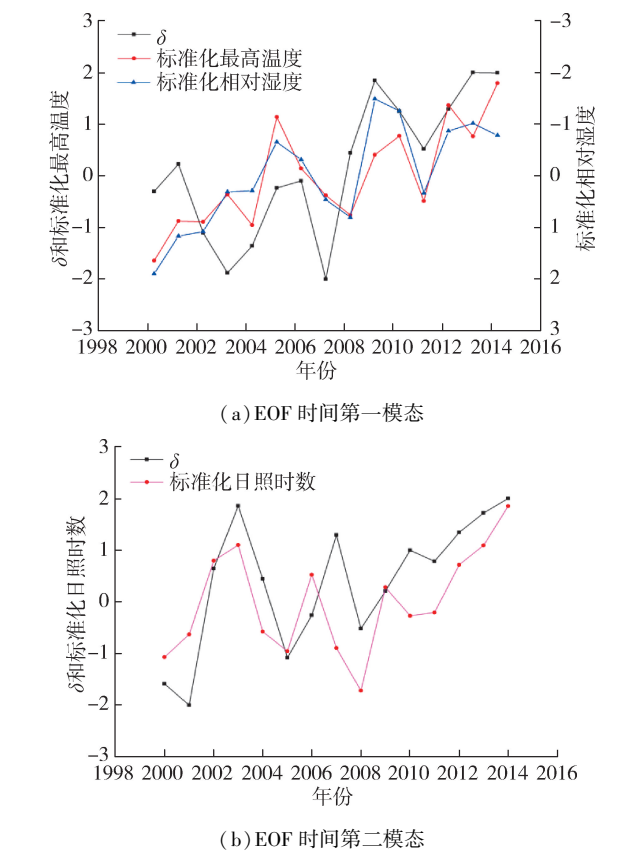


图 5 2000—2014 年云南省 WUE 正交经验函数前两个特征向量的时间模式及驱动因子

41.14%, 负值所占空间面积为 58.86%, 南北分布较为明显, 峰值区向中部偏移, 高值区出现在德宏、保山、文山等地区, 第二模态特征值的空间分布与 WUE 年际趋势较为接近。总体来说, EOF 空间模式表明云南省 WUE 南北呈现不同的震荡类型。

利用标准化的气象因子与时间系数的相关性确定 WUE 的主要驱动因子, 第一模态时间系数与标准化的最高温度呈显著正相关关系 ($r = 0.62, p < 0.05$), 表明随着日最高温度的增加会增强该区域的 WUE, 原因可能是日最高温度在北部气温相对较低地区的增加趋势对 GPP 的增长促进作用超过了对 ET_a 的作用 (图 5(a)), 进而促进了 WUE 的增加。相对湿度的影响正好相反, 与 WUE 呈显著负相关 ($r = -0.62, p < 0.05$), 表

明空气湿润的增加会降低该区域的 WUE。研究表明, 大气湿度增加会促进植被蒸腾作用, 对光合作用影响相对较弱^[16], 进而会降低 WUE。

第二模态时间系数与标准化的日照时数呈显著正相关关系 ($r = 0.69, p < 0.01$), 表明日照时间的延长会让该区域的 WUE 增加 (图 5(b)), 可能是由于太阳辐射促进了 GPP 的增长, 对 ET_a 影响相对较小所致。

3.3 相关性分析

通过以上 EOF 分析可见, 影响云南省陆地生态系统 WUE 的主要驱动因子包括相对湿度、最高温度和日照时数。利用相关性分析, 探寻其空间分布特征, 可以发现自北向南驱动因子发生转变, 云南省西北部主要分布以相对湿度为主的负相关关系 (图 6(a)), 东北部和中部主要分布以最高温度为主的正相关关系 (图 6(b)), 南部主要分布以日照时数为主的负相关关系 (图 6(c)), 三者均通过了 5% 的显著性检验, 驱动因子对云南省陆地生态系统 WUE 相关关系呈现南北差异, 这可能是导致 WUE 空间趋势分布的重要原因, 有待进一步查明。

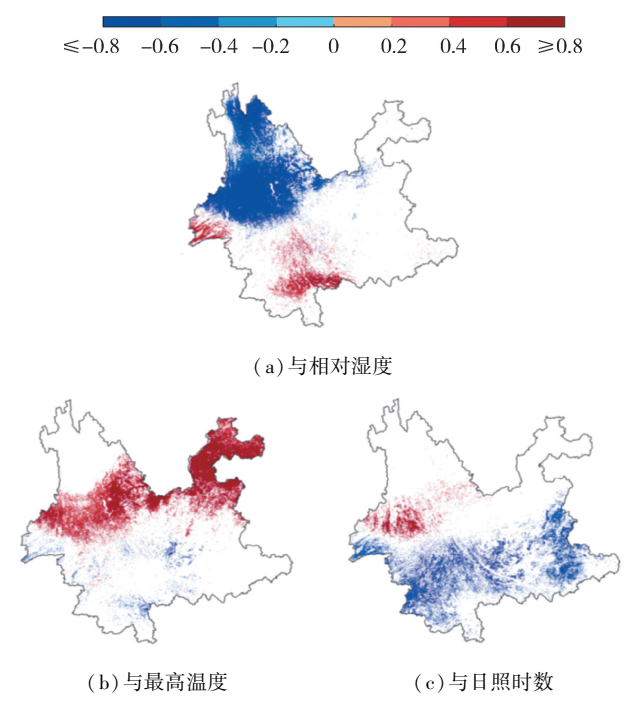


图 6 云南省陆地生态系统 WUE 与驱动因子空间相关性 ($p < 0.05$)

4 结 论

- a. 云南省陆地生态系统 WUE 空间分布明显, 自北向南递增, 其低值区主要集中在云南省北部; WUE 在大部分地区呈现了明显的季节变化, 而在低值区变化规律不明显。
- b. 云南省 WUE 年趋势变化存在南北差异, 北方主要呈增加的趋势, 南方主要呈减少的趋势, 蒸散

发的影响是其变化的主要原因。

c. 云南省陆地生态系统 WUE 空间模式呈现南北反向分布模式,北方增加,南方减少,反之亦然。

d. 云南省陆地生态系统 WUE 主要驱动因素为相对湿度、最高温度和日照时数,驱动因子对云南省陆地生态系统 WUE 相关关系呈现南北差异,且自北向南驱动因子发生转变。

参考文献:

[1] 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))

[2] 崔东文. 文山州近 10 年水资源利用效率评价 SLC-PP 模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):129-136. (CUI Dongwen. SLC-PP model and its application to evaluation of water use efficiency in Wenshan Prefecture in last ten years [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(2):129-136. (in Chinese))

[3] 冯朝阳,王鹤松,孙建新,等. 中国北方植被水分利用效率的时间变化特征及其影响因子[J]. 植物生态学报,2018,42(4):453-465. (FENG Chaoyang,WANG Hesong,SUN Jianxin,et al. Temporal changes of vegetation water use efficiency and its influencing factors in Northern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2018,42(4):453-465. (in Chinese))

[4] 李辉东,关德新,袁凤辉,等. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素[J]. 生态学报,2015,35(2):478-488. (LI Huidong,GUAN Dexin,YUAN Fenghui,et al. Water use efficiency and its influential factor over Horqin Meadow[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(2):478-488. (in Chinses))

[5] SUN Y,PIAO S,HUANG M,et al. Global patterns and climate drivers of water use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite based datasets and carbon cycle models[J]. Global Ecology & Biogeography 2016,25(3):311-323.

[6] TANG X,LI H,DESAI A R, et al. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on earth? [J]. Scientific Reports,2014,4:7483-7493.

[7] 伍文琪,罗贤,黄玮,等. 云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(7):1517-1523. (WU Wenqi,LUO Xian,HUANG Wei,et al. Research on the water resources carrying capacity and its temporal spatial distribution characteristics in Yunnan Province,China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(7):1517-1523. (in Chinese))

[8] 马平森,雷艳娇,卯昌书,等. 基于用水总量与效率控制的云南省水资源配置[J]. 水利水电科技进展,2015,35

(1):49-53. (MA Pingsen,LEI Yanjiao,MAO Changshu,et al. Water resources rational allocation based on total water consumption and water efficiency control in Yunnan Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(1):49-53. (in Chinese))

[9] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护,2017,33(1):52-56. (YUAN Yanmei,SHA Xiaojun,LIU Yuqing,et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Resources Protection,2017,33(1):52-56. (in Chinese))

[10] 荣艳淑,巩琳,卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护,2018,34(3):22-29. (RONG Yanshu,GONG Lin,LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014 [J]. Water Resources Protection,2018,34(3):22-29. (in Chinese))

[11] 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))

[12] ZHAO M,RUNNING S W,NEMANI R R. Sensitivity of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences,2015,111(G1):338-356.

[13] 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.

[14] 庞延杰,董林垚,丁文峰,等. 基于 EOF 法的长江流域 1960—2015 年降雨侵蚀力时空变化特征研究[J]. 中国水土保持,2018(10):37-41. (PANG Yanjie,DONG Linyao,DING Wenfeng,et al. The characteristic of spatial temporal variations of rainfall erosivity of the Yangtze River Basin during the period of 1960—2015 based on EOF method[J]. Soil and Water Conservation in China,2018(10):37-41. (in Chinese))

[15] 荣艳淑,石丹丹,吕星玥,等. 拉尼娜事件对长江中下游旱涝的影响[J]. 水资源保护,2019,35(3):14-24. (RONG Yanshu,SHI Dandan,LYU Xingyue,et al. Influence of La Niña events on drought and flood in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2019,35(3):14-24. (in Chinese))

[16] 胡化广,张振铭,吴生才,等. 植物水分利用效率及其机理研究进展[J]. 节水灌溉,2013(3):11-15. (HU Huaguang,ZHANG Zhenming,WU Shengcai,et al. Advance of research on water use efficiency of plant and its mechanism[J]. Water Saving Irrigation,2013(3):11-15. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-14 编辑:彭桃英)