

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.013

淮河流域陆地水储量与干旱指标分析

李晓英, 吴淑君, 王颖, 崔威

(河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要:基于 GRACE 卫星数据、MODIS 数据和降水数据分析了 2003—2016 年淮河流域陆地水储量、植被指数和降水的多年时空变化,并探究标准化陆地水储量指数(SWSI)、标准化降水指数(SPI)与条件植被指数(VCI)对流域干旱的指示性。结果表明:淮河流域陆地水储量呈显著下降趋势,降水量微弱下降,植被覆盖率显著上升;SPI 与 VCI 相关性较高,与 SWSI 变化较为一致;SWSI 与 SPI 指示的不同等级干旱月份数量基本相当,明显小于 VCI;SPI 对淮河流域历史干旱存在漏报,VCI 指示的干旱等级略偏高;SWSI 整体表现较为良好,能够有效监测淮河流域旱情。

关键词:陆地水储量;干旱;标准化降水指数;条件植被指数;标准化陆地水储量指数;淮河流域
中图分类号:TV211.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)06-0080-06

Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin // LI Xiaoying, WU Shujun, WANG Ying, CUI Wei (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The spatio-temporal variations of terrestrial water storage, vegetation index and precipitation in the Huaihe River Basin from 2003 to 2016 were studied based on GRACE satellites data, MODIS data and precipitation data. We further discussed the indication of standardized water storage index (SWSI), standardized precipitation index (SPI) and vegetation condition index (VCI) to the watershed drought. The results show that the terrestrial water storage in the Huaihe River Basin is in a significant trend of decline, and the average annual precipitation shows a slight decline, while the average annual vegetation coverage rises significantly. The correlation between the SPI and VCI is relatively high, which is in a good consistency with the variation of SWSI. The numbers of months with drought at various levels indicated by SPI and SWSI are almost the same and are much less than that indicated by VCI. The historical drought in the Huaihe River Basin is underreported by SPI and the drought level indicated by VCI is slightly higher. The overall performance of SWSI is good, which can monitor the drought situation in the Huaihe River Basin effectively.

Key words: terrestrial water storage; drought; standardized precipitation index; vegetation condition index; standardized water storage index; Huaihe River Basin

干旱作为常见的自然灾害,与人类生活、社会经济发展密切相关^[1-3]。传统干旱灾害定量观测是基于点的观测,难以反映面尺度上的干旱特征。遥感观测覆盖面大,能满足干旱监测的时空分辨率要求,因此广泛应用于旱情监测。随着卫星遥感技术的发展,遥感手段能越来越精确地监测降水、蒸发、土壤水分等水循环要素,成为区域旱涝灾害监测和评估的重要手段^[4-6]。

标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)是气象干旱指标中最常用的表征地区干旱程度

的指标。Byakatonda 等^[7]运用 Mann-Kendall 趋势检验法研究不同时间尺度的 SPI 和标准化降水蒸发指数对区域干旱的指示性。方国华等^[8]选取 SPI 对淮河流域干旱事件的时空连续性进行了判别,结果表明淮河流域春旱、夏旱频繁,流域北部受干旱影响更严重。Caloiero 等^[9]使用 SPI 分析了北半球干旱事件,评估了严重干旱和极端干旱类型的变化。

利用植被覆盖遥感数据可计算得到地区条件植被指数(vegetation condition index, VCI),VCI 常用于生态干旱监测。VCI 在相对少雨地区具有良好的

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2019B71314);江苏省研究生科研与实践创新计划(SJKY19_0499);国家重点研发计划(2016YFC0400909)

作者简介:李晓英(1978—),女,副教授,博士,主要从事水利水电系统规划与工程经济研究。E-mail:lix3@hhu.edu.cn

监测能力,在比较湿润的生态系统中,因土壤湿度对植被长势的限制小,将对 VCI 准确性产生影响^[10-11]。为研究河南省干旱情况,沙莎等^[12]将 VCI 与同期 SPI、PDSI、Pa 等干旱指数进行对比,发现在不同的作物生长阶段 VCI 对气象干旱存在不同的滞后效应。王文等^[13]利用 MODIS 遥感数据和 GLDAS 数据,在云贵高原区对干旱遥感监测的各干旱指数进行了对比。王圆圆等^[14]基于 VCI 和 SPI 间的相关性,评估了植被对气象干旱的响应特征,西藏地区植被生长对降水的响应滞后长达 12 周。李新尧等^[15]探讨了 VCI 在陕西省农业干旱监测中的适用性,发现月尺度 VCI 与降水相关性较差。

陆地水储量变化 (terrestrial water storage anomaly, TWSA) 能够体现地表水、地下水、土壤含水量、冰雪和生物体含水量的综合变化^[16]。水文干旱常伴随气象干旱^[17], GRACE 重力卫星能够有效监测 TWSA, 用于水文干旱监测。曹艳萍等^[18]利用降水数据和 GRACE 数据对新疆地区旱情进行分析,发现利用 TWSA 来反演的干旱特征与近年来新疆干旱灾害实际情况基本吻合,且与 SPI 的结果一致性较好。王文等^[16]构建了长江流域标准化陆地水储量指数 (standardized water storage index, SWSI), 结合标准化土壤含水量指数、标准化径流指数和 SPI 对长江中下游的旱情进行评估,分析了各指数的灵敏度。马柱国等^[19]利用 GRACE 数据、降水等数据对我国东部干旱进行研究,发现长江流域存在显著干旱趋势,华北地区干旱缓解,而 GRACE 反演的陆地水储量显示北方仍处在干旱状态。

目前对干旱指标的研究主要基于降雨和植被等要素,对陆地水储量指标的研究较少, SWSI 在淮河流域干旱的应用研究较为缺乏。本文以淮河流域洪泽湖以上范围为研究对象,分析研究区域多年陆地水储量变化、降水变化及植被变化情况。基于研究区域陆地水储量变化数据生成新的水文干旱指标 SWSI, 选取传统气象干旱指标 SPI 和生态干旱指标 VCI 为典型干旱指标进行多指标对比分析,验证 SWSI 对淮河流域干旱及强度的指示性,以期多指标在淮河流域干旱中的应用提供参考。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

淮河流域位于我国东部,地跨河南、湖北、安徽、江苏、山东 5 省,流域西、南、东北部为山区,其余为平原、湖泊等。淮河流域地处我国南北气候过渡带,南部为亚热带湿润季风气候区,北部为暖温带半湿润季风气候区,流域植被分布具有明显条带性。南

部降水量大于北部,山区降水量高于平原。淮河流域农业自然条件优越,是我国重要的粮棉油生产基地之一,干旱灾害将严重影响我国粮食安全。

1.2 数据来源

1.2.1 GRACE 数据

GRACE 卫星通过监测时变重力场变化得到地表质量变化,并转化为等效水高变化,数据序列最早始于 2002 年 4 月。本文采用 2003—2016 年 CSR、GFZ、JPL 3 家研究机构发布的全球空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐月等效水高变化的均值,对流域进行面积加权平均,得到的各月平均 TWSA 为相对于 2004—2009 年陆地水储量均值的距平值。

1.2.2 降雨数据

降雨数据采用淮河流域 1987—2016 年降雨月值格点数据,数据来源于中国气象数据网,分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,个别缺损数据采用样条法插值。

1.2.3 MODIS 数据

采用 MOD13A 3 月数据生成归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI), 资料时间序列为 2001—2016 年,空间分辨率为 1 km。NDVI 与地表覆盖率呈正相关关系,能够很好反映地表植被覆盖情况。

1.3 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法是一种非参数统计检验方法,能够实现高效率定量化操作,且检测范围广,受人为影响小,在水文气象资料的长期变化趋势预测中得到广泛应用,其计算公式^[20]为

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \quad (1)$$

$$U = \tau \sqrt{\frac{9n(n-1)}{2(2n+5)}} \quad (2)$$

式中: p 为时间序列对偶值 $(x_i, x_j) (j > i)$ 中 $x_i < x_j$ 出现的个数,其中 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为时间序列变量。当 $\tau > 0$, 表示序列有上升趋势; 当 $\tau < 0$, 表示序列有下降趋势。当 $|U| > U_{0.05} = 1.96$ 时, 表示序列趋势变化显著,反之没有显著变化趋势。

2 流域干旱分析指标

2.1 SWSI

SWSI 作为一种水文干旱指标,能够评价陆地水储量的亏损状况^[16,21]。利用正态分布 Q-Q 图评估 GRACE 反演的淮河流域洪泽湖以上范围 TWSA 的实际分布与正态分布偏离度。如图 1 所示,样本点经验分位数与理论分位数分布近似在一条直线上,表明陆地水储量分布接近正态分布,则 SWSI 可表达为

$$I_{\text{SWSI}} = \frac{A_{ij} - \bar{A}_j}{A_{j,\text{std}}} \quad (3)$$

式中: A_{ij} 为第 i 年 j 月的陆地水储量变化值; $\bar{A}_j$ 为 j 月的 TWSA 均值; $A_{j,\text{std}}$ 为 j 月的 TWSA 标准差。参考相应研究资料^[16,21], SWSI 可借鉴 SPI 利用累积频率分布划分干旱等级: $I_{\text{SWSI}} \leq -2.0$, 为极端干旱; $-2.0 < I_{\text{SWSI}} \leq -1.5$, 为严重干旱; $-1.5 < I_{\text{SWSI}} \leq -1.0$, 为中等干旱; $-1.0 < I_{\text{SWSI}} \leq 0$, 为正常范围内轻微干旱。

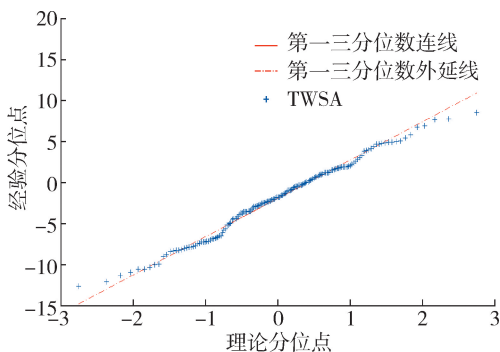


图1 TWSA 正态分布 Q-Q 图

Fig.1 Normal Q-Q plot for TWSA

2.2 SPI

SPI 可以表征某时段降水量出现的概率,被广泛应用于干旱识别。干旱等级划分标准适宜不同时段不同地区,具有良好的时空适应性,通常要求降水数据序列长度达 30 a 以上。采用 Γ 分布概率描述降水变化。

降水量服从 Γ 分布时,概率密度计算公式为

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0) \quad (4)$$

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty x^{\gamma-1} e^{-x} dx \quad (5)$$

式中: x 为降水量样本值; $\beta > 0$ 、 $\gamma > 0$ 分别为尺度参数和形状参数,可采用极大似然估计得到, $\Gamma(\gamma)$ 为 Γ 函数。对概率密度函数进行积分计算 Γ 分布概率 P , 当降水量 $x = 0$ 时, $P = m/n$, m 、 n 分别为降水量为 0 的样本数和总样本数。

对 Γ 分布概率进行正态标准化处理,即得到 SPI 值,再由标准化降水累积频率分布划分干旱等级。近似求解 SPI 值为

$$I_{\text{SPI}} = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \quad (8)$$

其中
$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{p^2}}$$

式中: S 为概率密度正负系数,当 $P > 0.5$ 时, $S = 1$; 当 $P \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。各参数值如下: $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

根据干旱等级标准 GB/T 20481—2017《气象干旱等级》及相应研究^[4,10], $I_{\text{SPI}} \leq -2.0$, 为极端干旱; $-2.0 < I_{\text{SPI}} \leq -1.5$, 为严重干旱; $-1.5 < I_{\text{SPI}} \leq -1.0$, 为中等干旱; $-1.0 < I_{\text{SPI}} \leq 0$, 为正常范围内轻微干旱。

2.3 VCI

NDVI 的年际变化能够反映气象条件差异造成的生态系统生产力的波动。NDVI 长系列年的最值反映了研究系列年份的最极端气象条件,利用这一特性可以将生态系统因素与极端天气因素对植被覆盖的影响剥离,使得 VCI 的变化能够反映植被含水量,评价极端天气对植被的影响,从而监测农业干旱。

$$I_{\text{VCI}} = \frac{I_{\text{NDVI}} - I_{\text{NDVI},\min}}{I_{\text{NDVI},\max} - I_{\text{NDVI},\min}} \quad (9)$$

式中: I_{NDVI} 为某月的 NDVI; $I_{\text{NDVI},\max}$ 、 $I_{\text{NDVI},\min}$ 分别为研究长系列年中月 NDVI 的最大值和最小值。通常 $I_{\text{VCI}} \leq 0.15$ 表示植被生长状况差,发生极端干旱; $0.15 < I_{\text{VCI}} \leq 0.3$ 为严重干旱; $0.3 < I_{\text{VCI}} \leq 0.5$ 为中等干旱; $0.5 < I_{\text{VCI}} \leq 0.7$ 为正常范围内轻微干旱; $I_{\text{VCI}} > 0.7$ 表示植被生长状况良好,无干旱^[14-15]。

3 结果与讨论

3.1 流域降水量、陆地水储量及植被指数变化分析
淮河流域洪泽湖以上区域 2016 年年均 TWSA、降水量和 NDVI 相对于 2003 年年均的变化率如图 2

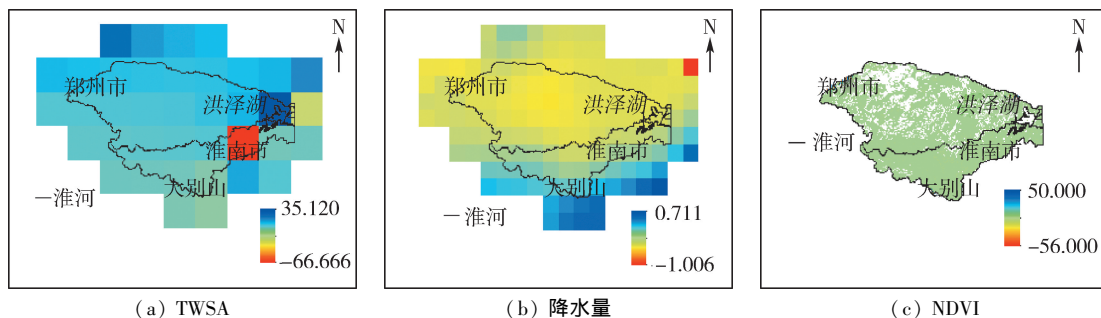


图2 2003 年、2016 年淮河流域 TWSA、降水量及 NDVI 相对变化对比

Fig.2 Comparison of the changes of TWSA, precipitation and NDVI between 2003 and 2016 in the Huaihe River Basin

所示。相对 2003 年,2016 年淮河流域年均降水量整体稍有下降,淮河南部大别山山脉地区降水量略有上升,淮河南部降水量高于北部。GRACE 反演的淮河流域陆地水储量除洪泽湖范围外均呈现下降状态,尤其是淮南市一带。分析原因,应是洪泽湖保护规划等措施的实施,洪泽湖生态保护增强,使得湖区水储量上升。相较 2003 年,淮河流域城市化水平提高,地下水用水量增加,陆地水资源量损耗增大。相较 2003 年,2016 年淮河流域的年均植被指数除个别小范围地区变化较大外,整体较为均匀,略有上升。流域植被覆盖率增加,流域生态环境得到改善。

利用 Mann-Kendall 检验法分析淮河流域 GRACE 反演的 TWSA、降水及 NDVI 的趋势性,发现 2003—2016 年淮河流域降水量存在微弱下降趋势,TWSA 呈现显著下降趋势,但流域 NDVI 有显著上升的趋势。TWSA 受到降水量的影响,一般与降水量变化呈正相关关系^[22-23]。淮河流域陆地水储量的显著下降除受到人类活动用水增加的影响外,还受到流域降水量下降的影响。NDVI 的上升主要受人类活动因素的影响,随着人们环保意识逐步增强,植被保护、城市绿化、退耕还林等一系列措施的实施使得区域植被覆盖率逐步升高,NDVI 显著上升。

3.2 流域干旱指标指示性分析

基于淮河流域 TWSA、降水量及 NDVI 分别构建了流域 2003—2016 年间 SWSI、SPI 和 VCI 3 个指标序列(图 3),从水文干旱、气象干旱和生态干旱角度分析淮河流域洪泽湖以上范围区域性干旱,并评估各指标对淮河流域干旱的表征能力。

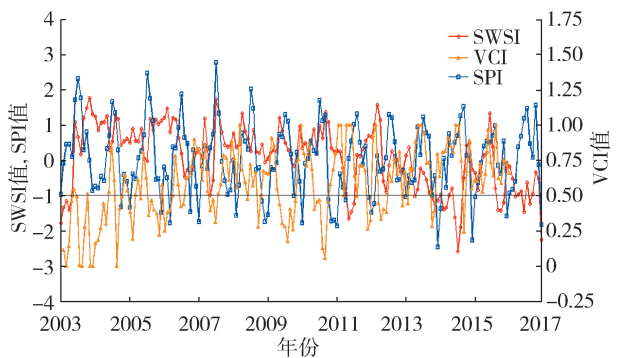


图 3 2003—2016 年淮河流域各干旱指标变化
Fig.3 Variation of drought indices from 2003 to 2016 in the Huaihe River Basin

SPI 和 VCI 的相关性较好,两者相关系数达 0.71 ($P < 0.01$),SWSI 与 SPI、VCI 间整体相关性略差。图 3 中横线为各指标是否发生旱情分界线,分界线以上表示为轻微干旱或无旱状态。从图 3 可见,2004—2010 年 SWSI 变化虽然与 SPI 和 VCI 较为同步,但是变化幅度小,部分月份当 SPI 和 VCI 出

现旱情时,SWSI 整体仍呈现轻微干旱或者无旱状态。2006—2016 年 SWSI 变化与 SPI 和 VCI 变化一致性较好,对旱情的指示较为吻合,但存在 2~3 月的不同步性。SPI 与 VCI 的趋势较为一致,当 SPI 显示存在旱情时,VCI 也同期呈现干旱状态。当 SPI 显示研究区域为湿润状态时,VCI 均表现为植被生长状况良好,无干旱出现。2003 年 VCI 基本小于干旱界限值,较为异常,主要是受 MOD13 卫星提供的原始数据时间序列较短的影响。VCI 监测干旱时要求有较长时间的植被覆盖率资料积累,而由于 MODIS 公开资料最早从 2001 年起,导致 NDVI 最值不具代表性,造成计算 VCI 时存在误差,影响 VCI 干旱监测的准确性。同时由于淮河流域研究区域均处于湿润、半湿润地区而 VCI 具有局限性,在较湿润生态系统中,受植被自身特性影响较大,会出现无法准确识别出干旱事件的情况^[9-10]。

对 3 个指标在 2003—2016 年间的干旱月份进行统计(表 1),发现 SWSI 与 SPI 在极端干旱、严重干旱和中等干旱月份数量基本相当,与 VCI 反映的同等级干旱月份数量差距较大。当 SWSI 与 SPI 指示月份出现短期连续性轻旱,尚未构成旱情时,VCI 对应月份显示为中等干旱或严重干旱。

表 1 2003—2016 年淮河流域各干旱指标干旱月份数
Table 1 Number of dry months of various drought indices in the Huaihe River Basin from 2003 to 2016

干旱等级	干旱月份数		
	SWSI	SPI	VCI
极端干旱	2	2	10
严重干旱	4	11	16
中等干旱	18	13	37
轻微干旱	40	55	50

分别对各干旱研究指标在历史干旱时期对应显示干旱等级进行统计,结果见表 2,旱情资料来源于《中国水旱灾害公报》。淮河流域发生了 5 场较大规模的旱情,其中 SWSI 和 VCI 均全部监测到,SPI 存在一次遗漏。2012 年淮河流域发生短暂旱情,7 月旱情随降水量增多而解除,同期 SWSI 和 SPI 显示

表 2 淮河流域历史干旱事件与各指标干旱结果比较
Table 2 Comparison of historical drought events and drought indices results in the Huaihe River Basin

历史旱情事件	干旱主要持续月份	干旱等级		
		SWSI	SPI	VCI
2006 年秋冬旱	10—11 月	轻微	中等	中等
2009 年冬春连旱	12 月、1—2 月	轻微	严重	严重
2012 年夏伏旱	6—7 月	轻微	轻微	严重
2013 年秋旱	9—10 月	中等	轻微	中等
2014 年夏伏旱	6—8 月	极端	没有发生	严重

为轻微干旱,而 VCI 指示的干旱等级偏高达到严重干旱。2014 年黄淮地区持续高温,淮河上中游来水偏少 6~7 成,导致夏伏旱较为严重,SPI 仅考虑了降水量的影响,未能正确指示旱情。SWSI 除 2009 年受前期水储量较丰影响仅表现为轻微干旱外,整体表现较为良好。

4 结 论

a. 2003—2016 年期间,淮河流域年均降水量整体稍有下降,南部山脉地区降水量上升;流域陆地水储量除洪泽湖范围上升明显外,整体呈现下降状态;年均植被指数略有上升,植被覆盖率增加。淮河流域降水量呈现微弱下降趋势,而陆地水储量显著下降,植被指数显著上升,一定程度上反应了地下水取用、环境绿化等人类活动对流域陆地水储量和植被覆盖率的影响。

b. SPI 与 VCI 相关性较高,与 SWSI 变化较为一致,但 SWSI 变化相对于 SPI 和 VCI 变化存在 2~3 月的滞后性。SWSI 与 SPI 指示的不同等级干旱月份数基本相当,明显少于 VCI。当 SWSI 与 SPI 指示月份仅表现为短期轻微干旱,流域未发生旱情时,VCI 多次显示不准确的严重干旱,进一步验证了 VCI 的局限性。

c. SPI 对 2003—2016 年间淮河流域历史干旱存在漏报,VCI 指示的干旱等级略偏高,SWSI 整体表现较为良好。综合研究结果表明,SWSI 能够有效监测淮河流域旱情,为干旱的监测和防治提供可靠依据,但在其他流域多指标对干旱的指示性仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 栗晓玲,梁箴. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection,2019,35(4):17-23. (in Chinese))
- [2] 张洪泉.“红旗河”调水方案的制约因素与中国西北干旱治理对策[J]. 水资源保护,2018,34(4):8-11. (ZHANG Hongquan. Potential pitfalls in Hongqi River water transfer proposal and drought management in Northwest China[J]. Water Resources Protection,2018,34(4):8-11. (in Chinese))
- [3] 冯怡,薛联青,张敏,等. 基于两种 SPEI 序列的淮河流域干湿特征变化[J]. 水资源保护,2019,35(1):35-40. (FENG Yi,XUE Lianqing,ZHANG Min,et al. Change of dry-wet characteristics in Huaihe River Basin based on

- two SPEI sequences[J]. Water Resources Protection,2019,35(1):35-40. (in Chinese))
- [4] 黄诗峰,辛景峰,杨永民,等. 旱情遥感监测理论方法与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [5] 高宇,冯婧,张诚,等. 干旱评价指标体系研究进展[J]. 安徽农业科学,2012,40(23):11569-11663. (GAO Yu,FENG Jing,ZHANG Cheng,et al. Research progress on drought evaluation index system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40(23):11569-11663. (in Chinese))
- [6] 孙中良,蒋淑娜,王宇飞. 淮河流域行蓄洪区灾害损失评估数据库建设与数据更新[J]. 水利经济,2016,34(5):55-59. (SUN Zhonggen,JIANG Suna,WANG Yunfei. Establishment and data updating of flood damage assessment database system of Huaihe River basin[J]. Journal of Economics of Water Resources,2016,34(5):55-59. (in Chinese))
- [7] BYAKATONDA J,PARIDA B P,MOALAFHI D B,et al. Analysis of long term drought severity characteristics and trends across semiarid Botswana using two drought indices[J]. Atmospheric Research,2018,213:492-508.
- [8] 方国华,涂玉虹,闻昕,等. 1961—2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J]. 水利学报,2019,50(5):598-611. (FANG Guohua,TU Yuhong,WEN Xin,et al. Study on the development process and evolution characteristics of meteorological drought in the Huaihe River Basin from 1961 to 2015[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(5):598-611. (in Chinese))
- [9] CALOIERO T,VELTRI S,CALOIERO P,et al. Drought analysis in Europe and in the Mediterranean basin using the standardized precipitation index[J]. Water,2018,10(8):2073-4441.
- [10] 张强,王劲松,姚玉璧,等. 干旱灾害风险及其管理[M]. 北京:气象出版社,2017.
- [11] FENSCHOLT R,SANDHOLT I,SCHULTZ M S,et al. Evaluation of satellite based primary production modelling in the semi-arid Sahel[J]. Remote Sensing of Environment,2006,105(3):173-188.
- [12] 沙莎,郭铤,李耀辉,等. 条件植被指数 VCI 与几种气象干旱指数的对比:以河南省为例[J]. 冰川冻土,2013,35(4):990-998. (SHA Sha,GUO Ni,LI Yaohui,et al. Comparison of the vegetation condition index with meteorological drought indices: a case study in Henan province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(4):990-998. (in Chinese))
- [13] 王文,黄瑾,崔巍. 云贵高原区干旱遥感监测中各干旱指数的应用对比[J]. 农业工程学报,2018,34(19):131-139. (WANG Wen,HUANG Jin,CUI Wei. Comparison of drought indices for remote sensing drought monitoring in Yunnan-Guizhou Plateau region[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(19): 131-139. (in Chinese))
- [14] 王圆圆, 扎西央宗. 利用条件植被指数评价西藏植被对气象干旱的响应[J]. 应用气象学报, 2016, 27(4): 435-444. (WANG Yuanyuan, ZHAXI Yangzong. Assessing vegetation response to meteorological drought in Tibet autonomous region using vegetation condition index[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(4): 435-444. (in Chinese))
- [15] 李新尧, 杨联安, 聂红梅, 等. 基于条件植被指数的陕西省农业干旱时空动态[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1172-1180. (LI Xinyao, YANG Lianan, NIE Hongmei, et al. Assessment of temporal and spatial dynamics of agricultural drought in Shaanxi Province based on vegetation condition index [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1172-1180. (in Chinese))
- [16] 王文, 王鹏, 崔巍. 长江流域陆地水储量与多源水文数据对比分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 759-768. (WANG Wen, WANG Peng, CUI Wei. A comparison of terrestrial water storage data and multiple hydrological data in the Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 759-768. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 曹艳萍, 南卓铜, 程国栋. GRACE 重力卫星监测新疆干旱特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 87-92. (CAO Yanping, NAN Zhuotong, CHENG Guodong. GRACE gravity satellite monitoring of drought characteristics in Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(8): 87-92. (in Chinese))
- [19] 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 951-961. (MA Zhuguo, FU Congbin, YANG Qing, et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951-2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 951-961. (in Chinese))
- [20] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [21] 阚增辉. 基于 GRACE 卫星的中国区域陆地水储量变化及干旱特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [22] 孙倩, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 2003—2012 年新疆陆地水储量时空变化[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1650-1656. (SUN Qian, TIYIP Tashpolat, DING Jianli, et al. Temporal-spatial changes of water storage in Xinjiang, China during 2003-2012 [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1650-1656. (in Chinese))
- [23] ZHANG Yafeng, HE Bin, GUO Lanlan, et al. The relative contributions of precipitation, evapotranspiration, and runoff to terrestrial water storage changes across 168 river basins[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124-194. (收稿日期: 2019-11-14 编辑: 彭桃英)

(上接第 66 页)

- [27] 宋大平, 左强, 刘本生, 等. 农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评估研究: 以淮河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1219-1231. (SONG Daping, ZUO Qiang, LIU Bensheng, et al. Estimation of spatio-temporal variability and health risks of nitrogen emissions from agricultural non-point source pollution: a case study of the Huaihe River Basin, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1219-1231. (in Chinese))
- [28] KAYA Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios [R]. Paris: IPCC Energy and Industry Subgroup Strategies Working Group, 1989.
- [29] ANG B W, ZHANG F Q, CHOI K. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition [J]. Energy, 1998, 23(6): 489-495.
- [30] ANG B W, LIU F L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation [J]. Energy, 2001, 26(6): 537-547.
- [31] 聂志萍, 吴梦芝, 马海良. 基于 LMDI 和脱钩理论的我国生活用水影响因素研究[J]. 水利经济, 2019, 37(5): 11-15. (NIE Zhiping, WU Mengzhi, MA Hailiang. Affecting factors for domestic water use in China based on LMDI and decoupling theory [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5): 11-15. (in Chinese))
- [32] 章恒全, 覃颖聪, 张陈俊. 中国产业用水量变化驱动效应分解与差异分析[J]. 水利经济, 2019, 37(6): 1-7. (ZHANG Hengquan, QIN Yingcong, ZHANG Chenjun. Decomposition and difference analysis of dynamic driving effect of industrial water use in 31 provinces and cities of China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(6): 1-7. (in Chinese)) (收稿日期: 2020-02-04 编辑: 熊水斌)