

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0270



黄土区人工林地土壤水分 对气候特征的响应



符娜

符娜¹, 宋孝玉^{1*}, 夏露¹, 李蓝君¹, 李怀有², 李垚林²(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 黄河水利
委员会西峰水土保持科学试验站, 甘肃 西峰 745000)

摘要: 选取南小河沟流域油松、刺槐、侧柏人工林地覆盖为研究对象, 对2003—2012年作物生长季土壤含水率进行连续观测, 利用Duncan法对比分析土壤含水率在不同年份、月份、深度的差异性, 同时研究不同人工林地土壤含水率与标准化降水蒸散指数(SPEI)、温度、降水量之间的响应特征。结果表明: 土壤水分随着土层深度的增加而逐渐降低, 并长期维持在较为稳定的范围内, 3种树种在不同深度差异性上体现出不同, 油松林地体现在20, 60 cm, 呈现3个等级变化趋势, 刺槐林地的差异性表现为0—20 cm与40—100 cm, 侧柏林地的不同土层含水率在40 cm深度时出现了差异; 土壤含水率与气温、降水量、SPEI的相关性随土壤深度的增加而变弱, 其中与气温呈负相关, 与降水量、SPEI为正相关, 并且温度、降水量和SPEI对刺槐林地土壤含水率影响最大。

关键词: 南小河沟流域; 人工林地; 土壤水分; Duncan多重比较; 标准化降水蒸散指数

中图分类号: S271; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-8530(2019)02-0160-06

符娜, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土区人工林地土壤水分对气候特征的响应[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(2): 160-165.

FU Na, SONG Xiaoyu, XIA Lu, et al. Response of artificial forests soil moisture on climate characteristics in loess region [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2019, 37(2): 160-165. (in Chinese)

Response of artificial forests soil moisture on climate characteristics in loess region

FU Na¹, SONG Xiaoyu^{1*}, XIA Lu¹, LI Lanjun¹, LI Huaiyou², LI Yaolin²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Xifeng Experiment Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract: The research was based on the Chinese pine, locust and arborvitae in Nanxiaohegou watershed, which was located in Qingyang city, Gansu province. The soil moisture of crop growing season from 2003 to 2012 was continuously observed. The difference of soil moisture content in different years, months and depths was analyzed by Duncan method. The response of soil moisture was researched in different soil depths to precipitation, temperature, SPEI in different artificial forests in Nanxiaohegou watershed. The results show that soil moisture content is decreased with the increase of soil depth, and holds relatively stable ranges for a long time. The difference of Chinese pine woodland reflects at soil depths of 20 cm and 60 cm, showing three levels of variation, that of locust woodland shows at 0–20 cm and 40–100 cm depths, and that of arborvitae soil water content appears at 40 cm depth of the

收稿日期: 2017-12-14 修回日期: 2018-03-03 网络出版时间: 2019-01-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190102.1028.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51239009, 41171034); 陕西省水利科技计划项目(2016slkj-11); 陕西省教育厅省级重点实验室科研计划项目(14JS059)

第一作者简介: 符娜(1990-), 女, 河南洛阳人, 博士研究生(fnsnow@163.com), 主要从事水文学及水资源研究。

通信作者简介: 宋孝玉(1971-), 女, 陕西安康人, 教授, 博士生导师(songxy@xaut.edu.cn), 主要从事水文学及水资源研究。

difference. Moreover the correlation of soil water content and precipitation, temperature and *SPEI* is decreased with the increase of soil depth in the same type of plantation in Nanxiaohegou watersheds. *SPEI* index is influenced by temperature and precipitation, therefore soil moisture content decreases with the increase of the temperature, and increases with the increase of the precipitation and *SPEI* index. The temperature, the precipitation and *SPEI* have the greatest effect on the soil water content of locust in Nanxiaohegou watershed.

Key words: Nanxiaohegou watershed; artificial forests; soil moisture; Duncan multiple comparisons; standardized precipitation evapotranspiration index

中国黄土高原是全球黄土覆盖面积最广、厚度最大、地层最全的高地,也是世界上生态环境最为脆弱的地区之一^[1].20世纪80年代初实施的一系列生态恢复工程,对减少水土流失,改善生态环境起到了一定作用.但由于大部分区域处于干旱半干旱地带,水分条件先天不足^[2],严重的土壤水分匮乏与频繁的干旱并存成为当下制约黄土区生态环境建设的主要因素^[3].因此,如何科学利用土壤水分及协调植被与水分的关系成为关系到黄土高原水土保持植被恢复与重建的关键问题.

土壤水分作为联系降水、地表水与地下水的纽带,通过限制植被蒸散与光合作用影响水、能量以及地球生物化学循环^[4-5].目前,国内外许多学者对土壤水分做了大量研究.ASBJORSEN等^[6]发现农作物蒸腾消耗的水分中45%源自于表层土壤水,而乔木蒸腾消耗的水分主要源于土壤深度60 cm以下的土壤水.WANG等^[7]以黄土高原一个植被修复的流域为例,研究了土壤水分对降雨的响应关系.LIN等^[8]在美国宾州野外试验观测的基础上讨论了土壤含水率随降雨的变化规律以及优势流现象.目前,以人工降雨试验为基础研究土壤水分对降雨响应方面已取得诸多成果,但野外自然降雨条件下的数据积累与分析相对缺乏,并且针对土壤水分与其他

气候条件关系的研究鲜有报道.

文中以南小河沟流域为例,选取油松、刺槐、侧柏3种典型人工林地为研究对象,研究不同人工林地2003—2012年土壤水分的月际与年际变化,计算不同时间尺度下的标准化降水蒸散指数(*SPEI*),基于*SPEI*分析土壤水分与气象因素的关系,旨在为黄土高原区人工促进植被恢复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南小河沟流域(107°30'—107°37'E, 35°41'—35°44'N)位于董志塬腹地的甘肃省庆阳市西峰区境内,系泾河二级支流,总面积36.3 km²,海拔1 050~1 423 m,沟壑密度2.68 km/km²,是典型的黄土高原沟壑区.属中纬度大陆性季风气候带,四季分明,年均降水量552.1 mm,但年内时空分布不均,干旱为主要自然灾害.根据不同土地利用类型,选取3个距离相近的油松、刺槐、侧柏人工林作为测量点,样地种植时间为35 a,表面均为平坦,排水设施较好.各样地信息见表1,包括土壤质地、土层厚度d、密度ρ、覆盖度VFC、胸径Φ、冠幅W、株高h、干容重γ_d、田间持水量f_c、坡度s.

表1 试验样地基本信息
Tab.1 Basic information of experimental sample plots

植被类型	土壤质地	d/cm	ρ/(株·hm ⁻²)	VFC/%	Φ/cm	W/cm	h/cm	γ _d /(g·cm ⁻³)	f _c /%	s/(°)
油松	粉壤土	50—100	1 700	80	57.3	239.5	693.3	1.29	22.00	19.30
侧柏	粉壤土	50—100	1 600	75	34.0	198.4	602.4	1.25	20.40	23.17
刺槐	粉壤土	50—100	2 000	85	19.1	138.8	416.2	1.45	18.82	22.20

1.2 观测数据

1) 土壤含水率:采用烘干法测定,用土钻法在0.7倍冠层平均半径处取土.测量时间为2003—2012年生长季(5—9月),间隔期为10 d,每次测量6个深度(10, 20, 40, 60, 80, 100 cm)的数据,每块样地取土3次取其平均值.为确保其稳定性,每次取土工作在1 d之内完成.

2) 降水量和气温:采用便携式小型自动气象站同步观测2003—2012年南小河沟流域气象状况,包括降水量和气温,测量时段间隔为0.5 h,按月读取并统计数据.

1.3 标准化降水蒸散指数计算

标准化降水蒸散指数*SPEI*是VICENTE-SERRANO针对*SPI*未考虑温度指标的不足提出

的^[9~11],输入变量为月降水量和月平均气温,通过计算月降水量与潜在蒸散量的差值并进行正态标准化处理得到的^[12~13],既保留了PDSI考虑蒸散对温度敏感的特点,又具备SPI计算简单的优点^[14~15].

1.4 数据处理与分析

文中利用Excel和SPSS软件完成所有数据的处理与分析,并利用Duncan多重比较法分析南小河沟流域3种典型人工林地不同月份、年份及土层深度土壤水分的显著性差异,探讨不同人工林地土壤水分对气候特征的响应关系.

2 结果与分析

2.1 不同人工林地土壤水分动态变化分析

2.1.1 月际变化

3种人工林地不同土层深度d的土壤含水率θ月际动态变化分析见图1.油松林地在5,6月份各土层深度的含水率变化差异较小,5月份各土层含水率极差为0.90%,最大值为8,9月份10cm土层的18.60%.刺槐林地土壤含水率7月份下降趋势最为

显著,波动范围为11.00%~18.60%,6月份最为稳定,土壤含水率均值为11.18%.侧柏林地土壤含水率较其他2种人工林地波动较大,8月份各土层土壤含水率极值为7.60%.

3种人工林地5月份土壤含水率变化曲线与其他月份最大不同点是其土壤含水率没有随着土层深度的增加而减小,反而是10cm土层含水率最小,说明此时期内浅层土壤水分消耗最大.在降水集中的7,8月份,其浅层(0~40cm)土壤含水率较大,40cm后含水率较小,由于降雨量大且时间相对集中,容易产生地表径流,不能对全部降水进行储存.

3种人工林地2003—2012年5月1日—9月30日0~100cm土层不同月份土壤含水率的显著性差异分析结果见表2.油松林地在5,6,7月土壤含水率差异性不显著,8,9月差异性显著,其中9月份的土壤含水率达到最大值.刺槐林地5,6月土壤含水率差异性不显著,7,8,9月呈现显著差异性,且含水率呈增长趋势.侧柏林地5,7,8月土壤含水率差异性不显著,6,9月差异性显著.

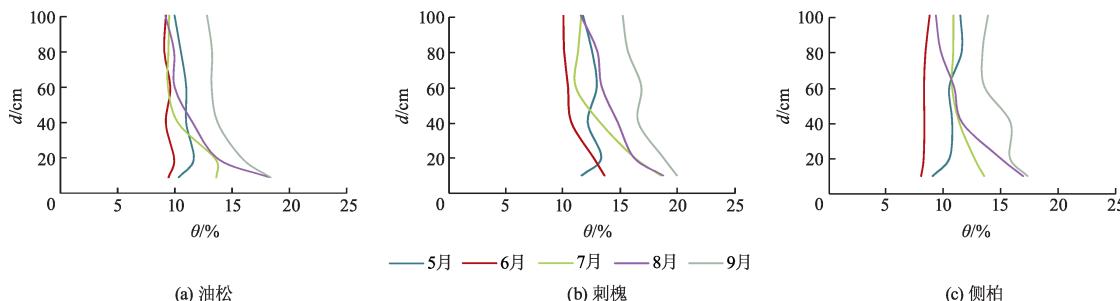


图1 3种人工林不同月份土壤含水率动态变化曲线

Fig.1 Soil water moisture dynamic change curves in different months of three typical artificial forests

表2 不同人工林地在不同月份各土层土壤含水率的Duncan法多重比较

Tab.2 Comparison of monthly soil moisture at different layers of three artificial forests with Duncan method

月份	θ/%		
	油松人工林地	刺槐人工林地	侧柏人工林地
5	11.78±4.61aA	13.13±3.45aB	11.30±5.00aA
6	10.30±4.56aA	12.19±5.33aB	8.84±2.61bA
7	11.35±4.40aA	14.35±5.27bB	12.03±4.94aA
8	12.28±5.18bA	15.06±4.67cB	12.20±4.35aA
9	14.90±4.98cA	17.42±4.61dB	15.15±5.26cA

注:同一列小写字母表示同一林地不同月份土壤含水率的差异显著性;同一行大写字母表示同一月份不同林地土壤含水率的差异显著性,下同

2.1.2 年际变化

3种人工林地不同土层深度的土壤含水率年际

变化曲线见图2.油松林地在历年土壤含水率最大值为2003年的40cm土层深度,其值为16.10%,最小值为2007年的100cm深度6.50%,各年土壤含水率主要集中在8.00%~12.00%.刺槐林地在2005年各土层含水率均大于其他年份,最大值为20cm土层深度,其值为18.50%;同年最小值为60cm土层深度14.50%的含水率.侧柏林地各土层含水率在40cm后波动变小,其中2004年各土层变化幅度最小,2005,2008年表现为土层40cm后土壤含水率开始变大,2003年60cm土层深度土壤含水率为侧柏林地研究期内的最大值,其值为14.10%.

3种人工林地不同年份土壤含水率的显著性差异分析结果见表3.油松林地在2010,2012年时土壤含水率显著大于其他年份,2004,2007,2008年含水

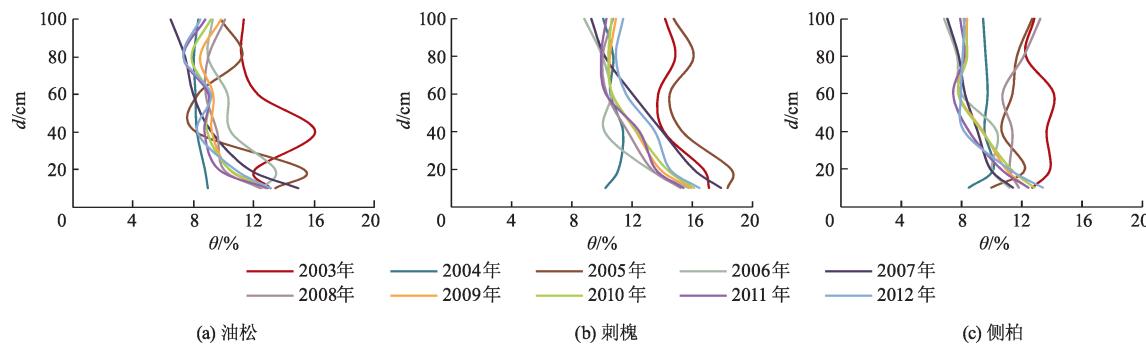


图2 3种人工林不同年份土壤含水率动态变化曲线
Fig.2 Soil water moisture dynamic change curves in different years of three typical artificial forests

率较小;刺槐林地在2012年时土壤含水率明显偏大;侧柏林地在2004—2009年这6 a中含水率变化较小,波动范围为8.92%~11.45%,但是在2010,2012年中,其表现出的差异性较为显著。

表3 不同人工林地在不同年份各土层土壤含水率的Duncan法多重比较

Tab.3 Comparison of annual soil moisture at different layers of different artificial forests with Duncan method

年份	θ/%		
	油松人工林地	刺槐人工林地	侧柏人工林地
2003	12.67±4.54aA	15.09±5.00dA	13.26±4.88cA
2004	8.41±2.40aA	10.66±2.92aB	9.50±3.18aA
2005	11.04±6.13bA	16.23±6.04eB	11.45±5.29aA
2006	12.91±6.24bA	10.82±2.81aA	11.39±3.45aB
2007	9.63±3.42aA	13.22±3.60bB	8.92±1.85aA
2008	9.98±2.72aA	11.86±3.40aA	11.76±6.06bA
2009	11.21±5.29bA	13.96±4.65cA	11.14±5.72aA
2010	16.36±3.90eA	17.62±3.50fA	15.28±4.46eB
2011	13.95±4.43dA	14.26±4.24dA	13.76±4.91dA
2012	17.12±4.81eA	20.02±4.63gB	14.93±3.86eA

2.1.3 不同土层间变化

南小河沟流域3种人工林地2003—2012年5月1日—9月30日0—100 cm不同土层深度土壤含水率的显著性差异分析结果见表4。油松林地在

各土层含水率呈梯级变化,差异性逐渐增大,表层含水率与底层含水率相差24.53%;刺槐林地的差异性表现为0—20 cm与40—100 cm,其余土层含水率差异性较小,表层含水率与底层含水率相差25.81%;侧柏林地的不同土层含水率在40 cm深度时出现了差异,其表层含水率与底层含水率相差16.48%。

表4 不同人工林地土壤含水率在不同土层间的Duncan法多重比较

Tab.4 Multiple comparison of soil moisture of three artificial forests at different depths with Duncan method

d / cm	θ/%		
	油松人工林地	刺槐人工林地	侧柏人工林地
10	14.39±5.79aA	17.28±6.33aB	13.35±6.03aA
20	13.35±5.12aA	15.99±4.26aB	12.76±4.43aA
40	11.57±4.38bA	14.01±4.08bB	11.89±4.51aA
60	11.44±4.87bA	13.70±4.70bB	11.04±4.12bA
80	11.11±4.37cA	12.78±4.0bA	11.23±4.77bA
100	10.86±4.32cA	12.82±4.80bA	11.15±5.31bA

2.2 标准化降水蒸散指数分析

计算2003—2012年不同时间尺度(1, 3, 6, 12个月)南小河沟流域的SPEI,结果见图3。

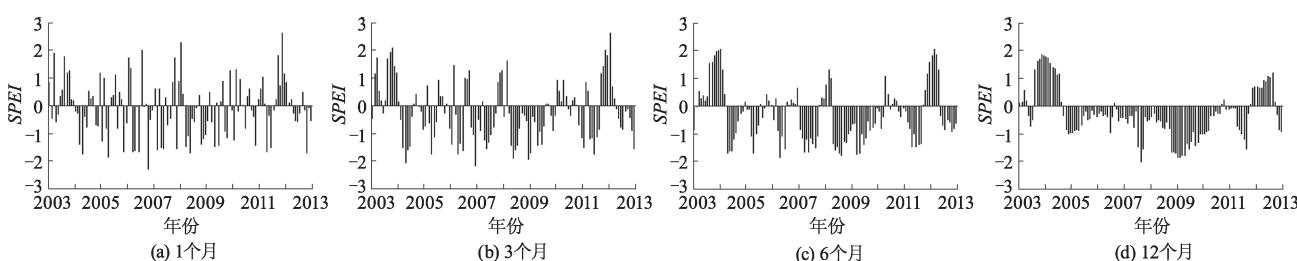


图3 南小河沟流域不同时间尺度SPEI
Fig.3 SPEI of Nanxiaohegou watershed at different time scales

SPEI值小于-1的主要集中在2007—2010年,最小值为-2.01。根据SPEI的取值范围与干湿等级划分使用标准^[13],得出2003年为非常湿润年,2008

为严重干旱,2009为中度干旱,其余年为正常年。

2.3 不同人工林地土壤水分对气候特征的响应

表5统计了2003—2012年降水量P、温度T、

SPEI 指数与不同土层深度土壤含水率的相关系数。油松林地在浅层土壤即 0—20 cm 时 *P* 与土壤含水率呈显著相关, 40 cm 以下土层含水率与 *P* 相关性较弱; 刺槐林地 10 cm 土层的相关系数为 0.626; 侧柏林地随土壤深度的增加, 相关性逐渐下降。

表 5 南小河沟流域降水量、气温、*SPEI* 与不同土层深度土壤含水率的相关性分析

Tab. 5 Correlation between soil water content of different soil depths and precipitation, temperature, *SPEI* in Nanxiaohegou watershed

植被类型	<i>d</i> /cm	Pearson 相关系数		
		<i>P</i>	<i>T</i>	<i>SPEI</i>
油松	10	0.556 **	-0.556 **	0.532 **
	20	0.487 *	-0.474 *	0.471 *
	40	0.13	-0.348	0.269
	60	0.032	-0.273	0.084
	80	0.291	-0.36	0.184
	100	0.334	-0.391	0.203
刺槐	10	0.626 **	-0.721 ***	0.596 **
	20	0.480 *	-0.426 **	0.415 *
	40	0.439 *	-0.459 *	0.403 *
	60	0.243	-0.432 *	0.334
	80	0.156	-0.261	0.105
	100	0.115	-0.066	0.159
侧柏	10	0.595 **	-0.705 ***	0.526 **
	20	0.467 *	-0.667 **	0.454 *
	40	0.463 *	-0.463 *	0.337
	60	0.226	-0.294	0.201
	80	0.198	-0.295	0.112
	100	0.281	-0.343	0.158

注: “*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; “**”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

土壤含水率与 *T* 变化呈负相关。油松林地浅层土壤含水率与 *T* 呈显著相关, 40 cm 以下土层表现为不相关; 刺槐林地的土壤含水率受 *T* 影响较大, 其 10 cm 土层的相关系数为 -0.721, 相关性最强; 侧柏林地在 0—40 cm 处表现为显著性相关, 60 cm 以下表现为不显著相关, 其相关性也是随土壤深度的增加而下降。综上得出, 在 *P* 不变的条件下, *T* 对刺槐林地土壤含水率影响最大。

分析 *SPEI* 指数与 3 种人工林地不同土壤深度的相关性得出, 其与土壤含水率呈正相关。受 *SPEI* 指数影响最为显著的均为 0—10 cm, 10—20 cm 次之, 60—100 cm 与 *SPEI* 指数的相关性较弱。*SPEI* 指数受 *P* 和 *T* 的综合影响, 土壤含水率随 *T* 的升高而降低, 随 *P*, *SPEI* 指数的增加而升高。

3 结 论

本研究基于南小河沟流域 2003—2012 年 3 种典型人工林覆盖条件下 0—100 cm 土层深度土壤含

水率监测资料, 采用 Duncan 法对比分析土壤含水率在不同年份、月份、深度的差异性, 同时基于降水量、气温、标准化降水蒸散指数(*SPEI*)对土壤含水率进行相关性分析, 得到以下结论:

1) 不同时间尺度的 *SPEI* 反映不同的气候特征, 计算周期相对较短的 1, 3 月的 *SPEI* 值表明南小河沟流域干湿时期交替频度较高, 研究尺度为 12 个月的 *SPEI* 值表明南小河沟流域在 2008—2009 期间为干旱, 其中 2008 年为严重干旱。

2) 随土层深度的增加, 土壤含水率逐渐降低, 并长期维持在较稳定范围内。同时受地表植被覆盖类型的影响, 统计期内不同人工林地土壤含水率存在差异, 油松林地平均土壤含水率为 13.73%, 侧柏林地为 12.93%, 刺槐林地为 15.54%, 表明刺槐林地在南小河沟流域的保水能力相对较强。

3) 3 种人工林地土壤含水率与气温、降水量、*SPEI* 的相关性随土壤深度的增加而减弱。土壤含水率随气温的升高而降低, 随降水量、*SPEI* 指数的增加而升高。其中油松林地土壤含水率与降水量的相关性较弱; 降水总量不变的条件下, 温度对刺槐林地土壤含水率影响较大。

参 考 文 献 (References)

- [1] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 166—174.
YI Lang, REN Zhiyuan, ZHANG Chong, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau [J]. Resources science, 2014, 36(1): 166—174. (in Chinese)
- [2] WANG L N, ZHU Q K, ZHAO W J, et al. The drought trend and its relationship with rainfall intensity in the Loess Plateau of China [J]. Natural hazards, 2015, 77(1): 479—495.
- [3] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 31—35.
WANG Guoliang, LIU Guobin, DANG Xiaohu. Effects of land use on soil moisture in loess hilly and gully region of China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 31—35. (in Chinese)
- [4] 符娜, 刘小刚, 李闯, 等. 不同时间尺度元谋灌区小粒咖啡需水变异特征[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(2): 163—171.
FU Na, LIU Xiaogang, LI Chuang, et al. Variation research of coffee arabica water requirement at different

- temporal scale in Yuanmou Irrigation District [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2015, 33(2): 163–171. (in Chinese)
- [5] TAIKAN O, SHINJIRO K. Global hydrological cycles and world water resources [J]. Science, 2006, 313 (5790): 1068–1072.
- [6] ASBJORSEN Heidi, MORA German, HELMERS M J. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Mid-western U.S. [J]. Agriculture ecosystems and environment, 2007, 121: 343–356.
- [7] WANG Shuai, FU Bojie, GAO Guangyao, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a revegetation catchment area of the loess plateau, China [J]. Catena, 2013, 101: 122–128.
- [8] LIN Henry, ZHOU Xiaobo. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hill catchment [J]. European journal of soil science, 2008, 59: 34–49.
- [9] GOCIC Milan, TRAJKOVIC Slavisa. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980–2010 [J]. Journal of hydrology, 2013, 494: 32–42.
- [10] STAGGE James Howard, TALLAKSEN L M, GUDMUDSSON Lukas, et al. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI) [J]. International journal of climatology, 2015, 35 (13): 4027–4040.
- [11] LI Binquan, ZHOU Wei, ZHAO Yangyang, et al. Using the SPEI to assess recent climate change in the Yarlung Zangbo River Basin, South Tibet [J]. Water, 2015, 7 (10): 5474–5486.
- [12] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析[J]. 生态学报, 2017, 37 (11): 3787–3795.
SHEN Guoqiang, ZHENG Haifeng, LEI Zhenfeng. Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China [J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37 (11): 3787–3795. (in Chinese)
- [13] 李翔翔, 居辉, 刘勤, 等. 基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2054–2066.
LI Xiangxiang, JU Hui, LIU Qin, et al. Analysis of drought characters based on the SPEI-PM index in Huang-Huai-Hai Plain [J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37(6): 2054–2066. (in Chinese)
- [14] 韩志慧, 刘小刚, 郝琨, 等. 基于 SPI 指数的内蒙古地区干旱演变特征及趋势预测[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 430–439.
HAN Zhihui, LIU Xiaogang, HAO Kun, et al. Drought evolution characteristics and trend prediction in Inner Mongolia based on standardized precipitation index [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2017, 35(5): 430–439. (in Chinese)
- [15] VICENTE-SERRANO Sergio M, BEGUERÍA Santiago, LÓPEZ-MORENO Juan I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of climate, 2010, 23: 1696–1718.

(责任编辑 徐云峰)