

吴歌, 符素华, 殷兵. 黄土高原不同水平年旱涝时空分布特征[J]. 农业工程, 2022, 12(7): 65-71. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2022.07.013. WU Ge, FU Suhua, YIN Bing. Spatial and temporal distribution of drought and flood in Loess Plateau in different hydrological years[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(7): 65-71.

## 黄土高原不同水平年旱涝时空分布特征

吴歌<sup>1,2</sup>, 符素华<sup>1,3</sup>, 殷兵<sup>4</sup>

- (1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;
4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 全球气候变暖大背景下, 黄土高原总体呈现暖干化趋势, 未来干旱还可能会加剧。为了全面了解黄土高原旱涝时空变化特征, 为黄土高原应对旱涝灾害提供决策依据, 根据黄土高原及周边 263 个气象站的降水数据划分降水水平年, 以标准化降水指数 (SPI) 为指标, 分析了黄土高原地区不同水平年际及年内旱涝特征。结果显示, 黄土高原在丰、平、枯水年均有一定程度的干旱发生。丰水年黄土高原干旱面积占 5.7%, 雨涝面积占 40.9%; 平水年干旱面积占 12.7%, 雨涝面积占 19.3%; 枯水年干旱面积占 44.4%, 雨涝面积占 17.9%。不同水平年的干旱区域存在差异。不同水平年内春旱较重, 丰水年和平水年雨季开始后干旱逐渐缓解, 枯水年雨季不能有效缓解春季以来的干旱, 且秋涝明显, 各水平年年内干旱的时空分布存在显著差异。不同水平年年际和年内旱涝差异大且变化频繁, 为了确保黄土高原农业生产旱涝保收, 应合理建设小型水利工程与田间灌溉设施。

**关键词:** 黄土高原; 干旱; 雨涝; 标准化降水指数

**中图分类号:** S27 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-1795(2022)07-0065-07

**DOI:** 10.19998/j.cnki.2095-1795.2022.07.013

## Spatial and Temporal Distribution of Drought and Flood in Loess Plateau in Different Hydrological Years

WU Ge<sup>1,2</sup>, FU Suhua<sup>1,3</sup>, YIN Bing<sup>4</sup>

- (1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Changes of global climate will lead to more uncertainty of annual precipitations in Loess Plateau, which is a critical factor for causing droughts or floods in that area. In order to design better strategy to manage water resource in different hydrological years, special and temporal distribution of drought and flood in Loess Plateau was analyzed. Precipitation data from 263 meteorological stations were used to identify typical hydrological years, including wet year, normal year and dry year. Then Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated as an indicator for droughts and floods. Results showed that droughts occurred in all kinds of hydrological years. In wet year, drought area, flood area took up 5.7% and 40.9%, respectively. In normal year, drought area and flood area accounted for 12.7% and 19.3%, respectively. However, drought area took up 44.4% and flood area took up 17.9% in dry year. Spatial distribution of droughts in wet year, normal year and dry year was obviously different. Spring was usually dry in all kinds of hydrological years. Drought area in spring would decrease after beginning of rainy season in wet year and normal year, however rainfall in rainy season of dry year could not alleviate spring drought effectively. What's more, autumn in dry year was wet. According to results, drought and flood were frequent in Loess Plateau, allocation of water conservancy facilities and field irrigation facilities in Loess Plateau were critical for agriculture and ecosystem in Loess Plateau.

收稿日期: 2021-10-27 修回日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42130701); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800502)

作者简介: 吴歌, 博士生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究 E-mail: 812537224@qq.com

符素华, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理研究 E-mail: suhua@bnu.edu.cn

在线投稿

www.d1ae.com

**Keywords:** Loess Plateau, droughts, floods, Standardized Precipitation Index

## 0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 6 次评估报告第 1 工作组发布的报告进一步明确指出, 近百年全球气候正在发生广泛而迅速的变化, 人类活动已经使得气候变暖, 几乎全球陆地地区农业生态干旱监测结果都呈现增加趋势<sup>[1-2]</sup>。干旱是指一定区域在某时段内水分供需失衡而出现的水分盈亏现象<sup>[3]</sup>。干旱可以分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱, 其中气象干旱是降水和蒸发不平衡导致的, 进一步发展可引起农业干旱、水文干旱及社会经济干旱<sup>[4-5]</sup>。干旱受灾人数是所有自然灾害中最多的, 据统计, 1900—2011 年全球有超过 1 100 万人因干旱而死亡<sup>[6-7]</sup>。我国黄土高原地处半湿润区向半干旱、干旱的过渡地带, 是生态环境脆弱区和敏感区, 水资源严重短缺, 降水量少、分布不均, 而且多以暴雨形式出现, 导致该地区干旱缺水与暴雨引发的水土流失并存<sup>[8-13]</sup>。过去数十年气象资料分析结果显示, 随着全球气候变化, 黄土高原整体逐渐变干旱, 干旱与热浪同时发生的频率呈增加趋势<sup>[14-15]</sup>。侯青青等<sup>[16]</sup>利用神经网络和 Hurst 指数预测未来黄土高原干旱发生频率空间分布差异大, 干旱次数增加将高于历史时期, 而且干旱等级升高。干旱是限制黄土高原生态恢复的关键因素, 目前关于黄土高原旱涝变化研究主要集中在该地区多年整体旱涝变化趋势分析上<sup>[17]</sup>。李明等<sup>[18]</sup>基于多年降水格点数据和 MODIS/EVI 数据, 探讨了 1961—2017 年黄土高原干旱分布特征和变化趋势, 以及气象干旱和农业干旱相关关系, 研究发现黄土高原干旱频率西高东低, 以标准化降水指数 (SPI) 为指标的气象干旱滞后于以植被状态指数为指标的农业干旱。孙艺杰等<sup>[19]</sup>基于 1960—2016 年黄土高原地区 59 个气象站资料, 以标准化蒸散发指数为指标分析了不同时间尺度下干旱时空变化, 研究结果也显示近 57 年黄土高原呈变旱趋势, 显著变旱区域在山西省、宁夏回族自治区和甘肃省。但是不同水平年下黄土高原旱涝变化特征的研究还不多见, 然而不同水平年尤其是枯水年的干旱面积及程度对黄土高原地区水资源配置有重要影响。如鲍卫锋等<sup>[20]</sup>以中等干旱年为研究情景, 通过建立需水预测模型对延安市需水量增长态势进行了分析, 王小军等<sup>[21]</sup>以 50%、75% 和 95% 来水情况为研究背景对榆林市需水总量进行了预测。本研究选取 1980—2014 年黄土高原 263 个气象站点数据, 以标准化降水指数为干旱指标对不同降雨水平年的旱涝特征进行分析, 为黄土高原地区农业用水管理和水资源调配等提供决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与数据来源

黄土高原 (31°41'~41°16'N, 100°52'~114°33'E) 面积为 64 万 km<sup>2</sup>, 大陆性季风气候, 无霜期 120~250 d, ≥10 °C 积温 2 300~4 500 °C, 日照时数 1 900~3 200 h, 年均温 3.6~14.3 °C, 1980—2014 年平均降水量 425 mm, 年内降水分布不均匀, 每年 7—9 月的降水多以暴雨形式出现且降水量约占全年降水量的 60%<sup>[22-23]</sup>。黄土高原地形破碎, 沟壑纵横, 容易发生水土流失, 据统计, 2000—2010 年平均土壤侵蚀强度为 15.2 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[24]</sup>。国家气象科学数据中心收集到黄土高原及周边 263 个雨量站点日降雨量资料, 其中 187 个站点资料序列为 1980—2014 年, 76 个站点资料序列为 1980—2019 年。263 个站点 1980—2014 年数据序列用于分析黄土高原整个区域的丰、平、枯水年旱涝状况, 1980—2019 年资料序列用于验证长、短数据序列的结果差异。

### 1.2 数据分析方法

#### 1.2.1 标准化降水指数

采用标准化降水指数 (SPI) 作为干旱评价指标。标准化降水指数参数少、计算简单, 时间尺度灵活, 对不同地点和时空尺度极端事件的描述具有可比性<sup>[25-28]</sup>。目前 SPI 已经在伊朗、意大利、美国等多个国家干旱监测中被使用, 在我国黄土高原干旱评价研究中也广泛采用<sup>[8,14-15,29-32]</sup>。SPI 是世界气象组织 (WMO) 推荐使用的气象干旱监测指标<sup>[33]</sup>。

标准化降水指数法是假设某时段内降水量服从 gamma 分布, 经正态标准化处理消除降水时空分布差异, 最后根据标准化降水累积频率分布确定干旱等级。SPI 的正值、负值可用来分别指示雨涝和干旱的发生和发展<sup>[33]</sup>。SPI 具体计算公式可参考文献 [34]。采用 R 语言提供的 SPIE 程序包 (<http://sac.csic.es/spei>) 计算黄土高原 263 个站点的 SPI 值, 然后采用普通克里金插值方法得到整个区域的 SPI 值<sup>[30]</sup>。SPI 旱涝等级根据 MCKEET 等<sup>[35]</sup>的划分标准和我国气象干旱等级标准 (GBT 20 481—2006) 确定 (表 1)。

年时间尺度为 12 个月的 SPI 值可表征河水径流、水库和地下水水位变化<sup>[33,36-37]</sup>。月时间尺度的 SPI 值可以衡量短期内因降水引起的气象干旱, 多用于监测土壤水分变化对农业生产的影响。本文计算了时间尺度为 12、8、7、6 和 3 个月的 SPI 值, 分别记为 SPI-12、SPI-8、SPI-7、SPI-6 和 SPI-3。用丰水年、平水年、枯水年第 12 个月的 SPI-12 指示各水平年旱涝时空分布。用 5 月底的 SPI-3、9 月底的 SPI-4 和 11 月底的 SPI-5 分

表 1 SPI 等级划分  
Tab. 1 SPI classification

旱/涝等级	特旱	重旱	中旱	轻旱	正常	轻涝	中涝	重涝	特涝
SPI	$\leq -2.0$	$(-2.0, -1.5]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-1.0, -0.5]$	$(-0.5, 0.5)$	$[0.5, 1.0)$	$[1.0, 1.5)$	$[1.5, 2.0)$	$\geq 2.0$

别表示春季（3—5月）、汛期（6—9月）和秋季（9—11月）的旱涝时空分布。用6月底SPI-6、7月底SPI-7和8月底SPI-8来分析春季干旱随汛期降水的缓解情况。

### 1.2.2 水平年划分

根据收集到的黄土高原及周边263个站点降水数据，采用普通克里金插值得到1980—2014年黄土高原年平均降雨量序列，然后根据Person-III型曲线把75%、50%和25%年降水量对应的年份分别确定为丰水年、平水年和枯水年，其相应的典型年分别为1996年、1981年和2001年，年降水量分别为462.9、421.9和390.7 mm<sup>[38]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 不同水平年旱涝年际变化特征

丰水年时黄土高原以涝为主，轻涝至中涝面积占总面积的40.9%，其中轻涝占37.0%、中涝占3.9%，轻涝发生于黄土高原西北边缘、中西部、南部边缘及东部边缘，中涝发生于山西省东南部。轻旱至中旱面积占总面积的5.7%，其中轻旱、中旱面积分别占总面积的5.5%和0.2%，主要分布在西部的青海省和西南部的甘肃省南部。平水年时旱涝影响面积较接近，轻涝至中涝面积比例之和为19.3%，其中轻涝和中涝面积比例为15.5%和3.8%，主要发生在黄土高原南部的甘肃省和陕西省。轻旱占总面积的12.7%，主要发生在黄土高原西部的甘肃省和东部的山西省东南部。枯水年以干旱为主，轻旱至重旱面积比例之和为44.4%，其中轻旱、中旱和重旱占总面积比例分别为26.7%、14.7%和3.0%，主要分布于黄土高原西部甘肃省和青海省部分区域、东部山西省的大部分区域，以及东南部陕西省和河南省的局部区域，东部山西省大部分区域干旱较严重。局部区域出现轻涝至中涝，面积比例之和为17.9%，其中轻涝面积比例为17.6%，主要分布于黄土高原西北部内蒙古自治区和宁夏回族自治区的局部区域。

这些结果表明，黄土高原丰、平和枯水年均有一定程度的干旱和雨涝发生，干旱面积占比依次增强，雨涝面积占比依次减弱，不同水平年的旱涝空间分布存在明显差异。

### 2.2 不同水平年旱涝年内变化特征

#### 2.2.1 丰水年

丰水年年内黄土高原春季以轻旱和中旱为主，轻旱、

中旱面积占总面积的比例分别为56.2%和12.1%，轻旱主要分布在黄土高原的大部分区域，中旱主要分布在高原东北部山西省和内蒙古自治区的局部区域。随着雨季到来，黄土高原春旱逐渐缓解。6月底的SPI-6是通过比较平水年1—6月降雨与历史同期（1980—2014年）降雨量得到的，6月底仅内蒙古自治区和山西省的北部还存在干旱。到8月底时，局部区域（山西省中部）出现了雨涝。汛期黄土高原以涝为主，轻涝、中涝和重涝面积占总面积的比例分别为42.8%、12.1%和0.6%，主要分布于黄土高原中部、西北部和东南部，其中宁夏回族自治区、山西省境内出现中涝至重涝。秋季黄土高原旱涝面积接近，轻旱至中旱面积占总面积的20.0%，分布于黄土高原西部的青海省、甘肃省的东南和山西省的中部，轻涝占总面积的17.6%，分布于山西省和陕西省的南部、河南省的西部和内蒙古自治区的北部。

#### 2.2.2 平水年

平水年内黄土高原春季干旱较严重，轻旱至特旱面积占高原总面积的77.5%，其中轻旱、中旱、重旱和特旱分别占42.9%、25.6%、7.2%和1.8%，轻旱主要分布在黄土高原中部陕西省和内蒙古自治区大部分区域，以及西部青海省和甘肃省局部区域，中旱至特旱分布于黄土高原西南部甘肃省局部区域，东部山西省大部分区域和河南省在黄土高原内的全部区域，东部的山西省干旱最严重。6月雨季开始后，干旱开始缓解，到6月底仍存在大面积的干旱区域，轻旱至特旱的面积占全区面积的62.9%。汛期雨涝面积占区域总面积的55.8%，其中轻涝、中涝、重涝面积分别占31.0%、19.6%和5.2%，主要分布在高原中南部甘肃省和陕西省局部区域。秋季高原以旱为主，轻旱至特旱面积占高原总面积的40.3%，高原中东部山西省北部和陕西省北部干旱较严重。

#### 2.2.3 枯水年

黄土高原枯水年春季轻旱至特旱面积占总面积的74.5%，轻旱、中旱、重旱和特旱面积占总面积的比例分别为18.4%、32.4%、12.3%和11.4%，干旱主要分布在除高原西北部之外的大部分区域，其中东南部山西省和河南省干旱最严重。汛期降水对区域干旱的减缓较弱，到6月底、7月底和8月底干旱区域的面积比依次为87.8%、73.4%和67.9%，干旱面积虽然逐渐减小，但是与丰水年和平水年相比干旱比例依然很高，干旱

分布在除黄土高原西北部外的大部分区域,其中东北部和东南部干旱等级较高。枯水年汛期黄土高原的东南部和东北部依然出现干旱,雨涝主要分布在中北部陕西省、内蒙古自治区和宁夏回族自治区的局部区域。秋季黄土高原以涝为主,轻涝至重涝占总面积的62.1%,其中轻涝占32.6%、中涝占28.8%、重涝占0.7%,主要分布在中北部陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区和内蒙古自治区的大部分区域。从上述分析可以看出枯水年黄土高原春旱严重,分布面积广,部分区域(主要在河南省、山西省北部和南部区域、陕西省东南部区域)出现春夏连旱,秋季以涝为主,春旱和秋涝分布的空间位置几乎不重合,即春旱主要分布在西部、南部和东部边缘,秋涝则分布于中北部。

从上述分析可看出,丰、平、枯水年春季都比较干旱,丰水年春旱面积最小、以轻旱为主,平水年和枯水年春旱面积最大,且枯水年比平水年干旱等级高。6月进入雨季后干旱有所缓解,丰水年7月底已经由旱转涝,平水年7月旱、涝面积相当,8月才由旱转涝,枯水年的雨季没有有效缓解春旱,而且秋涝最明显。

### 3 讨论

我国西北地区对全球气候变暖响应敏感<sup>[39]</sup>。气候变化可能会改变水资源空间配置、增加极端雨涝和干旱发生频率,西北地区水资源供给压力增大<sup>[40]</sup>。从丰、平、枯水年的角度分析黄土高原旱涝时空变化特征,可以为未来黄土高原农业供水管理、小型水利工程配置和水资源管理提供决策依据。

结果显示,在年尺度上黄土高原丰水年、平水年和枯水年均有一定范围的干旱发生,丰、平、枯水年干旱面积依次增大。干旱主要发生在黄土高原边缘,这与已有的关于黄土高原易旱地区研究结论基本一致,但是不同水平年易旱区位置不同,这可能与站点密度、资料年限不同有关<sup>[14,34]</sup>。黄土高原各典型水平年下均存在水资源短缺状况,作为我国最主要的旱作雨养农业区,根据2020年《中国水资源公报》和我国第7次人口普查数据,黄土高原地区的山西省、陕西省、河南省、内蒙古自治区、青海省、甘肃省和宁夏回族自治区人均水资源总量仅为全国平均水平的54%,缺水是造成黄土高原作物产量低而不稳定的因素之一<sup>[41-44]</sup>。冯仰强等<sup>[45]</sup>研究结果显示,丰水年小麦产量显著高于平水年和枯水年。但是相比于全生育期降水总量,降水季节分布对作物产量影响更大<sup>[46]</sup>。如5月是当地玉米苗期至7叶期,也是小麦拔节期至抽穗期,而小麦开花期和灌浆期对干旱敏感程度较高,此时干旱会严重影响产量<sup>[47]</sup>。CAO Hanbing等<sup>[48]</sup>研究发现,黄土高原冬小麦产量随夏季休耕期和拔节期降水量增加而成比例增加。

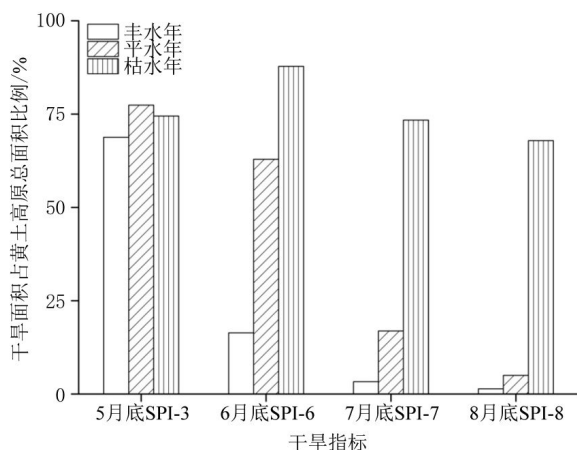


图1 不同水平年干旱面积比例和持续时间

Fig. 1 Drought area and duration in different hydrological years

然而从年内旱涝变化结果来看,丰、平、枯水年均有一定程度的春旱,并且春旱的面积和持续的时间均随年降水量的减少呈增加趋势(图1)。在枯水年的8月底仍有大面积(67.9%)的干旱区域。农作物生长需水的关键季节春季和夏季是黄土高原干旱多发季节,这种水分分配对当地农业生产常常造成不利影响<sup>[49]</sup>。随着全球气候变化,黄土高原整体逐渐变干旱,在这种干旱环境下,黄土高原地区呈现枯水年干旱空间分布和时间持续态势的机会也会增加<sup>[14]</sup>。“有收无收在水”,水是农业的命脉,更是黄土高原生态保护和高质量发展的关键,全面掌握黄土高原不同水平年的旱涝分布状况,可以合理布局黄土高原小型蓄水工程,进行节水灌溉,保障农业用水和粮食产量<sup>[50]</sup>。

本研究为了得到精度更高的旱涝空间分布结果,采用了短资料序列(1980—2014年)数据,但根据单站短资料序列(1980—2014年)和长资料序列(1980—2019年)丰、平、枯水年年降水量的统计结果(图2)来看,二者具有很高的一致性。这表明本研究结果能代表1980年以来黄土高原丰、平、枯水年的旱涝状况。

### 4 结论

(1) 在不同水平年,黄土高原均有不同程度的干旱发生,只是丰水年、平水年和枯水年的干旱面积占比依次增强,雨涝面积占比依次减弱。丰水年、平水年和枯水年的干旱面积比例分别为5.7%、12.7%和44.4%,雨涝面积分别为40.9%、19.3%和17.9%。干旱空间分布存在明显差异,丰水年干旱主要发生在青海省西部和甘肃省东南部,平水年干旱分布于甘肃省西北部、河南省东部和山西省东南部,枯水年干旱主要分布于青海省、河南省、山西省的大部分区域、甘肃省西部和陕西省南部。

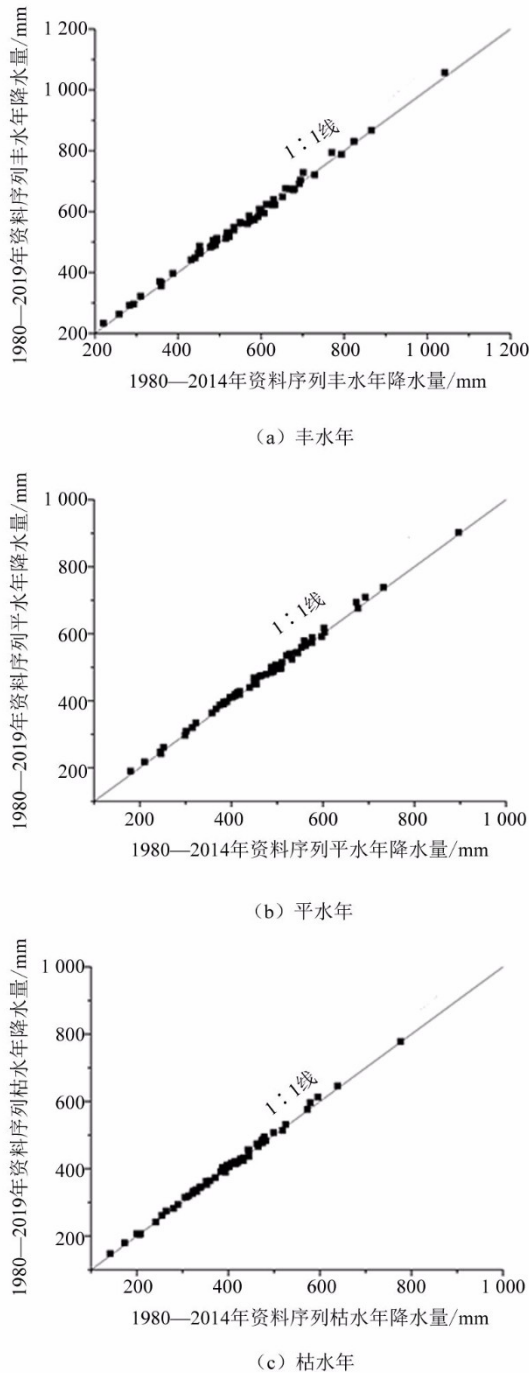


图2 不同资料序列确定的典型水平年年降水量  
Fig. 2 Annual rainfall determined by different data source

(2) 各水平年均均有春旱发生, 丰水年干旱程度轻、范围小, 进入汛期后6月干旱开始缓解, 枯水年春旱影响较大, 而且汛期降雨不能有效缓解干旱, 8月干旱面积仍较大, 且秋涝明显。为了降低年内旱涝分布对作物生长用水需求的不良影响, 建议发展小型灌溉、修建水利工程实现水分跨季节利用, 加强应对区域性、季节性旱涝灾害的能力。

参考文献

[1] 孙颖. 人类活动对气候系统的影响: 解读IPCC第六次评估报告第

一工作组报告第三章[J/OL]. 大气科学学报, 2021. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210816009.

SUN Ying. Impact of human activities on climate system: an interpretation of Chapter III of WGI report of IPCC AR6[J/OL]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210816009.

[2] 姜大勝, 王晓欣. 对IPCC第六次评估报告中有关于旱变化的解读[J/OL]. 大气科学学报, 2021. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210810007.

JIANG Danang, WANG Xiaoxin. A brief interpretation of drought change from IPCC Sixth Assessment Re-port[J/OL]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210810007.

[3] 杜继稳. 陕西省干旱监测预警评估与风险管理[M]. 北京: 气象出版社, 2008.

[4] WILHITE D A, GLANTZ M H. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions[J]. *Water International*, 1985, 10(3): 111-120.

[5] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835-1848.

LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Agricultural drought monitor: progress, challenges and prospect[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1835-1848.

[6] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1): 202-216.

[7] EM-DAT[EB/OL]. 2013. <http://www.emdat.be/disaster-list>.

[8] 李明, 邓宇莹, 葛晨昊, 等. 1961—2017年黄土高原气象干旱特征及其与大尺度气候因子的联系[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(11): 2231-2239.

LI Ming, DENG Yuying, GE Chenhao, et al. Characteristics of meteorological drought across the Loess Plateau and their linkages with large-scale climatic factors during 1961—2017[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(11): 2231-2239.

[9] 王国强, 姜基春, 焦峰. 延安市安塞区极端降水变化特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1417-1423.

WANG Guoqiang, JIANG Jichun, JIAO Feng. Characteristics of extreme precipitation in Ansai District of Yan'an City, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1417-1423.

[10] 刘宝元, 刘晓燕, 杨勤科, 等. 黄土高原小流域水土流失综合治理抗暴雨能力考察报告[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 封2-封4.

[11] 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.

[12] 刘宇峰, 原志华, 李文正, 等. 1961—2013年黄土高原地区旱涝特征及极端和持续性分析[J]. *地理研究*, 2017, 36(2): 345-360.

LIU Yufeng, YUAN Zhihua, LI Wenzheng, et al. Extreme and persistent analysis of drought-flood variation in the Loess Plateau during 1961-2013[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(2): 345-360.

[13] 焦菊英, 王志杰, 魏艳红, 等. 延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 159-167.

JIAO Juying, WANG Zhijie, WEI Yanhong, et al. Characteristics of erosion sediment yield with extreme rainfall storms in Yanhe Watershed

- based on field measurement[J]. *Trancactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 159-167.
- [14] 王佳瑞, 孙从建, 郑振婧, 等. 近57年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5340-5351.  
WANG Jiarui, SUN Congjian, ZHENG Zhenjing, et al. Drought characteristics of the Loess Plateau in the past 60 years and its relationship with changes in atmospheric circulation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5340-5351.
- [15] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960—2016年黄土高原干旱和热浪时空变化特征[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(4): 591-601.  
SUN Yijie, LIU Xianfeng, REN Zhiyuan, et al. Spatiotemporal changes of droughts and heatwaves on the Loess Plateau during 1960-2016[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(4): 591-601.
- [16] 侯青青, 裴婷婷, 陈英, 等. 1986—2019年黄土高原干旱变化特征及趋势[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 649-660.  
HOU Qingqing, PEI Tingting, CHEN Ying, et al. Variations of drought and its trend in the Loess Plateau from 1986 to 2019[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 649-660.
- [17] 上官周平. 黄土区水分环境演变与退化生态系统恢复[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(5): 92-94.  
SHANGGUAN Zhouping. Water-environment evolution and degenerated-ecosystem rehabilitation in Loess Regions[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 92-94.
- [18] 李明, 葛晨昊, 邓宇莹, 等. 黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究[J]. *地理科学*, 2020, 40(12): 2105-2114.  
LI Ming, GE Chenhao, DENG Yuying, et al. Meteorological and agricultural drought characteristics and their relationship across the Loess Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(12): 2105-2114.
- [19] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960—2016年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J]. *地理研究*, 2019, 38(7): 1820-1832.  
SUN Yijie, LIU Xianfeng, REN Zhiyuan, et al. Spatiotemporal variations of multi-scale drought and its influencing factors across the Loess Plateau from 1960 to 2016[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(7): 1820-1832.
- [20] 鲍卫锋, 黄介生, 谢华. 西北干旱区水资源需求预测方法与态势分析: 以陕西省延安市为例[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(1): 29-34.  
BAO Weifeng, HUANG Jiasheng, XIE Hua. Prediction and analysis of water resources demands in the arid areas in northwest China: a case study in Yan'an City, Shaanxi Province[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1): 29-34.
- [21] 王小军, 张建云, 贺瑞敏, 等. 干旱区用水结构变化及趋势探讨: 以陕西省榆林市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(10): 76-81.  
WANG Xiaojun, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Analysis of changes and trend of water consumed structure in Yulin City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(10): 76-81.
- [22] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [23] 杨艳芬, 王兵, 王国梁, 等. 黄土高原生态分区及概况[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7389-7397.  
YANG Yanfen, WANG Bing, WANG Guoliang, et al. Ecological regionalization and overview of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7389-7397.
- [24] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.  
LIU Guobin, SHANGGUAN Zhouping, YAO Wenyi, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1): 11-19.
- [25] HAYES M J, SVOBODA M D, WILHITE D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(3): 429-438.
- [26] 蔡鸿昆, 雷添杰, 程慧, 等. 旱情监测指标体系研究进展及展望[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(1): 77-87.  
CAI Hongkun, LEI Tianjie, CHENG Hui, et al. Advances in drought monitoring index system[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(1): 77-87.
- [27] LAZRI M, AMEUR S, BRUCKER J M, et al. Analysis of drought areas in northern Algeria using Markov chains[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(1): 61-70.
- [28] PRAMUDYA Y, ONISHI T, SENGE M, et al. Evaluation of recent drought conditions by standardized precipitation index and potential evapotranspiration over Indonesia[J]. *Paddy and Water Environment*, 2019, 17(3): 331-338.
- [29] MOGHBELI A, DELBARI M, AMIRI M. Application of a standardized precipitation index for mapping drought severity in an arid climate region, southeastern Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(2): 15-23.
- [30] BUTTAFUOCO G, CALOIERO T. Drought events at different time-scales in southern Italy ( Calabria ) [J]. *Journal of Maps*, 2014, 10(4): 529-537.
- [31] 李常德, 王磊, 李晓霞, 等. 基于SPI指数的黄土高原区域旱涝特征分析[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(5): 524-531.  
LI Changde, WANG Lei, LI Xiaoxia, et al. Temporal and spatial characteristics of droughts and floods in the Loess Plateau based on standardized precipitation index[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2020, 39(5): 524-531.
- [32] 牛亚婷, 王素芬. 基于SPI的黄河流域干旱时空特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(4): 85-90.  
NIU Yating, WANG Sufen. Temporal and spatial characteristics of drought based on standardized precipitation index in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(4): 85-90.
- [33] WMO. Standardized precipitation index user guide[R]. WMO-No. 1090, 2012.
- [34] 李玮, 陈晓俊, 王文君, 等. 1962—2017年典型半干旱草原区不同时间尺度干旱特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(1): 226-232, 240.  
LI Wei, CHEN Xiaojun, WANG Wenjun, et al. Drought characteristics of a typical semi-arid grassland area at different time scales from 1962 to 2017[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2021, 32(1): 226-232, 240.
- [35] MCKEE T, DOESKEN N, KLIEST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[R]. the 8th Conference of Applied Climatology, Boston, MA, 1993.
- [36] 晏红波, 韦晚秋, 卢献健, 等. 基于TRMM数据与SPI指数的广西地区旱涝演变分析[J]. *国土资源遥感*, 2021, 33(1): 158-166.  
YAN Hongbo, WEI Wanqiu, LU Xianjian, et al. A study of drought and flood evolution in Guangxi based on TRMM data and SPI drought in-

- dex[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2021, 33(1): 158-166.
- [37] 山仑. 植物抗旱生理研究与农业抗旱实践: 科学生涯片断[J]. *植物生理学报*, 2013, 49(6): 505-508.
- [38] 魏新光, 王铁良, 刘春成, 等. 基于组合模型的辽宁省玉米水分盈亏量时空分布特征研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 193-202.  
WEI Xinguang, WANG Tieliang, LIU Chuncheng, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water budget based on combined model in Liaoning Province[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 193-202.
- [39] 顾朝军, 穆兴民, 高鹏, 等. 1961—2014年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(3): 136-143.  
GU Chaojun, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Characteristics of temporal variation in precipitation and temperature in the Loess Plateau from 1961 to 2014[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(3): 136-143.
- [40] 任国玉, 彤, 李维京, 等. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 772-779.  
REN Guoyu, JIANG Tong, LI Weijing, et al. An integrated assessment of climate change impact on China's water resources[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 772-779.
- [41] 陆皎云, 熊军波, 张鹤山, 等. 水分胁迫对紫花苜蓿产量、品质和微量元素的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(8): 126-133.  
LU Jiaoyun, XIONG Junbo, ZHANG Heshan, et al. Effects of water stress on yield, quality and trace element composition of alfalfa[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(8): 126-133.
- [42] 2020年中国水资源公报[R]. <http://www.mwrgov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/P020220121618584803376.pdf>.
- [43] 国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 2020年第七次全国人口普查[R]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/pcsj/rkpc/d7c/202111/P020211126523667366751.pdf>.
- [44] 张琼华, 赵景波. 黄土高原地区农业可持续发展的用水模式探讨[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(2): 317-321.  
ZHANG Qionghua, ZHAO Jingbo. Water use model for agricultural sustainable development in the Loess Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(2): 317-321.
- [45] 冯仰强, 聂志刚, 王钧, 等. 基于APSIM模型研究不同降水年型下降水变化对旱地小麦产量的影响[J]. *作物研究*, 2021, 35(2): 108-111.  
FENG Yangqiang, NIE Zhigang, WANG Jun, et al. Based on APSIM model to study the influence of different precipitation years on the yield of dryland wheat[J]. *Crop Research*, 2021, 35(2): 108-111.
- [46] 宁芳, 张元红, 温鹏飞, 等. 不同降水状况下旱地玉米生长与产量对施氮量的响应[J]. *作物学报*, 2019, 45(5): 777-791.  
NING Fang, ZHANG Yuanhong, WEN Pengfei, et al. Responses of maize growth and yield to nitrogen application in dryland under different precipitation conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(5): 777-791.
- [47] 聂志刚, 任新庄, 李广, 等. 基于APSIM的甘肃春小麦干旱致灾风险评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 194-200.  
NIE Zhigang, REN Xinzhuang, LI Guang, et al. Assessment of drought risk on spring wheat in Gansu using APSIM[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 194-200.
- [48] CAO Hanbing, WANG Zhaohui, HE Gang, et al. Tailoring NPK fertilizer application to precipitation for dryland winter wheat in the Loess Plateau[J]. *Field Crops Research*, 2017, 209: 88-95.
- [49] 李猛, 韩清芳, 贾志宽. 西北黄土高原农业节水战略探讨[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(3): 819-822.
- [50] 符素华, 刘宝元, 吴歌, 等. 黄土高原治沟造地水利设施综合配置与管理[J]. *农业工程*, 2021, 11(8): 82-85.  
FU Suhua, LIU Baoyuan, WU Ge, et al. Comprehensive configuration and management of water conservancy facilities for ditch regulation and land reclamation in Loess Plateau[J]. *Agricultural Engineering*, 2021, 11(8): 82-85.