

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.043.

陆静, 汪星, 孙波, 等. 陕北黄土丘陵区主要作物需水量变化趋势及其应对策略[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 64-72.

Lu Jing, Wang Xing, Sun Bo, et al. Research on the Trend and Response Strategies of Water Requirement of Main Crops in the Loess Hilly Region of Northern Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 64-72.

# 陕北黄土丘陵区主要作物需水量变化趋势及其应对策略

陆静<sup>1</sup>, 汪星<sup>2</sup>, 孙波<sup>3</sup>, 高志永<sup>4,5</sup>

(1.杨凌职业技术学院 水利工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.宁夏大学 农学院, 银川 750021; 3.湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司, 武汉 430070; 4.云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 5.云南省智慧农业与水安全国际联合研发中心, 昆明 650201)

**摘要:** [目的] 探讨陕北黄土丘陵区干旱、降雨和主要作物需水量在过去及未来的变化趋势, 以期掌握该区气象干旱变化特征及主要作物水分供需状况, 为该区主要作物合理灌溉及优化种植提供参考。[方法] 基于陕北黄土丘陵区 1980—2017 年日尺度基本气象数据, 采用去趋势预置白处理的 Mann-Kendall 法和 R/S 法分析了过去及未来作物生育期内(4—10 月份)的干旱、降雨及作物需水量变化趋势。[结果] (1) 干旱年发生频率达 56.76%, 干旱在 4—6 月呈现降低趋势, 在 7—10 月份呈现增加趋势; 有效降水量的变化趋势在不同地区的月份表现各异; 作物需水量在 4—8 月呈增加趋势。(2) 作物未来生育期内, 陕北黄土丘陵区有效降水量分别在 5 月、7 月、10 月份呈现降低趋势, 在 8 月、9 月份为增加趋势; 干旱及作物需水量在 4—6 月份延安地区分别呈现增加和降低趋势, 榆林地区同期干旱及作物需水量与延安地区相反。[结论] 陕北黄土丘陵区干旱频发, 有效降雨量难以满足作物需水量。建议控制红枣及苹果种植面积, 加大谷子产业投入, 利用覆盖与集雨补灌结合的方法来满足作物对水分的需求, 达到增产增收目的, 助力新时代乡村振兴。

**关键词:** 黄土丘陵; 干旱; 降雨; 作物需水量; 趋势分析

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0064-09

## Research on the Trend and Response Strategies of Water Requirement of Main Crops in the Loess Hilly Region of Northern Shaanxi Province

Lu Jing<sup>1</sup>, Wang Xing<sup>2</sup>, Sun Bo<sup>3</sup>, Gao Zhiyong<sup>4,5</sup>

(1. Yangling Vocational & Technological College, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Hubei Institute of Water Resources and Design Co., Ltd., Wuhan 430070, China; 4. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 5. Yunnan International Joint R & D Center of Smart Agriculture and Water Security, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the historical and future trends of drought, precipitation, and the water requirement of major crops, to gain insights into the evolving characteristics of meteorological drought and the water balance for key crops in the loess hilly region of northern Shaanxi, and to provide the reference for implementing effective irrigation practices and optimizing crop cultivation in this region. [Method] The daily-scale basic meteorological data from the loess hilly region of northern Shaanxi for the period 1980 to 2017 were utilized. The Mann-Kendall method with pre-whitening and the R/S method were employed to analyze the trend changes in drought, precipitation, and crop water requirement during the crop growing season (April to October) in past and future. [Results] (1) Drought showed a decreasing trend from April to June and an increasing trend from July to October. The variation in effective precipitation

收稿日期: 2024-01-22

修回日期: 2024-03-01

资助项目: 宁夏自然科学基金(2022AAC05019); 国家自然科学基金(32060301); 云南省农业基础研究联合专项面上项目(202301BD070001-181)

第一作者: 陆静(1987—), 女, 陕西武功人, 硕士, 讲师, 主要从事农业水利工程研究。E-mail: 648270476@qq.com

通信作者: 汪星(1984—), 男, 陕西杨凌人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: wangxingstr@163.com

<http://stbcjy.paperonce.org>

exhibited different patterns across the months and regions. Crop water requirement showed an increasing trend from April to August. (2) In the future, the effective precipitation in May, July, and October is projected to decrease, while the effective precipitation in August and September will experience an increasing trend. Drought and crop water requirement in Yan'an will exhibit opposite trends from April to June compared to that in Yulin. [Conclusion] The frequent droughts occur, and the available precipitation is insufficient to meet crop water requirements in the Loess Plateau of northern Shaanxi. The measures to control the cultivation area of jujube and apples, to increase investment in millet cultivation, and to implement a combination of rainwater harvesting and mulching are suggested in order to meet crop water requirements, achieve higher yields and increase income.

**Keywords:** loess hilly region of China; drought; precipitation; crop water requirement; trend analysis

气候变化是世界关注的热点,IPCC 第六次报告指出,受全球变暖影响,陆面温度在未来 20 年内可能会超过  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。黄土高原对气候变化极为敏感,近十年来该区域平均气温显著增加<sup>[2]</sup>,降水呈现上升趋势<sup>[3]</sup>。气候变暖严重影响黄土高原生态系统,易诱发极端自然灾害,缺水型骤旱和热浪型骤旱在近 40 年黄土高原地区植被生长季节(4—9 月)里呈现波动增加趋势<sup>[4]</sup>,干旱往往发生在作物生长期,短时间的高温加速植物蒸腾耗水和土壤水分蒸发,加之缺少降水,土壤水分快速下降,植被光合作用被削减,植被碳汇和绿度减弱,最终导致作物大量减产,对农业和生态系统造成严重影响<sup>[5-7]</sup>。

陕北黄土丘陵沟壑区(北纬  $35^{\circ}20'30''$ — $38^{\circ}24'$ 、东经  $107^{\circ}41'$ — $110^{\circ}47'$ )位于黄土高原中部,属于黄土丘陵沟壑区第二副区,是马铃薯、谷子、玉米和红枣的主产区<sup>[8]</sup>。自陕西省实施“北扩西进”和“3+X”战略,陕北大力发展山地苹果,凸显在乡村振兴中的带动作用,产量约占全国苹果产量的 52%<sup>[9]</sup>。目前,已有研究表明,陕北黄土丘陵区旱作果类作物(红枣和苹果)耗水量高于当地降水量,米脂和洛川成龄苹果园年均水分过度消耗量分别为  $121.15, 167.94\text{ mm}$ <sup>[10]</sup>,8 a 生矮化密植枣树的日平均耗水强度可达  $3.09\text{ mm/d}$ <sup>[11]</sup>,12 龄旱作密植枣林对土壤水分的消耗深度已达  $5.4\text{ m}$ ,土壤难恢复层厚度为  $3.4\text{ m}$ <sup>[12]</sup>。部分研究通过设置不同灌溉方式(滴灌与管灌)与灌溉制度,或保墒措施(覆膜和秸秆覆盖)与滴灌相结合的方法来缓解陕北果园的水分供需矛盾<sup>[13-14]</sup>。已有关于陕北黄土丘陵区粮食类作物(马铃薯、谷子、玉米)研究主要集中在作物需水量特征、作物需水关键期补灌措施、水分利用效率提升等方面<sup>[8,15]</sup>。此外,部分研究已利用黄土高原历史气象数据或陆面高分辨率再分析数据,借助趋势分析和小波分析等气候诊断方法,深入分析了气温、降水、骤旱事件等时空变化特征及其影响因素<sup>[2,4,16]</sup>。但上述已有相关研究分别单独从作物需水和历史气候变化方面进行了剖析,未能将作物需水与气候变化结合

起来,也未详尽解析未来气候变化情况下作物需水变化趋势,作物在面对未来气候变化时,针对作物需水变化所采取的应对策略。

本研究借助陕北黄土丘陵区长时间序列(1980—2017 年)逐日气象资料,分析主要作物(马铃薯、谷子、玉米、红枣和苹果)在历史和未来生育期内干旱分布特征、降雨特性、作物需水规律及其变化趋势;针对未来干旱和降雨变化趋势,提出满足主要作物对水分需求的应对策略,以期对陕北黄土丘陵区旱作合理种植规划及农业水资源高效利用提供事实依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕北黄土丘陵区总面积约  $43\ 578\text{ km}^2$ ,以黄土塬、梁、峁、沟、壑为主,约占陕西省国土面积的 22.2%,主要为榆林市和延安市。榆林市土地面积  $4.29\text{ 万 km}^2$ ,年平均气温  $10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $431\text{ mm}$ ,全年总日照时数  $3\ 080.6\text{ h}$ 。延安市全市总面积  $3.7\text{ 万 km}^2$ ,年平均气温  $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $550\text{ mm}$ ,全年总日照时数  $2\ 418\text{ h}$ 。

### 1.2 数据来源

本文利用典型黄土丘陵区延安和榆林地区 1980—2017 年日尺度气象资料(来源于中国气象局),其主要包括大气温度(最高、最低和平均值)风速、相对湿度和日照时数等数据。

### 1.3 研究方法

1.3.1 作物需水量 利用单作物系数法计算需水量。采用 Penman-Monteith 公式计算小麦、玉米、谷子、苹果和红枣的<sup>[17]</sup>参考作物需水量,借助已有关于陕北作物系数的相关文献<sup>[8,11,13-14,18]</sup>获取 5 种作物的作物系数,具体作物系数见表 1。

Penman-Monteith 公式:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \lambda(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  是参考作物需水量 ( $\text{mm/d}$ );  $R_n$  是净辐射 ( $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ );  $G$  是土壤热通量 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $\Delta$  是饱和水汽压与温度曲线斜率 ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $\gamma$  是温度计常数 ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $u_2$  是 2 m 处风速 ( $\text{m/s}$ );  $e_s - e_a$  是饱和水汽压差 ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ )。

表 1 5 种主要作物的作物系数

Table 1 Crop coefficients of five types of crops in growth period

作物	生育期					
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
玉米		0.75	0.79	1.64	1.68	1.25
谷子		0.45	0.74	1.08	1.00	0.63
马铃薯	0.33	0.69	1.29	1.85	1.88	
苹果	0.50	0.70	0.80	1.00	1.00	0.80
红枣	0.36	0.48	0.65	1.00	1.46	1.26

1.3.2 有效降雨量 有效降雨是指储存在作物根系土壤中且能够被作物利用的水分,有效降雨量受土壤质地、地形、降雨强度等因素的影响,有效降雨量采用经验公式计算<sup>[16]</sup>。

1.3.3 标准化降水蒸散指数 基于降水量和蒸散法的标准化降水蒸散指数 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) 不仅可以全面反映研究区域的干湿情况,而且还能够对气候变化进行综合评估, SPEI 被广泛应用于描述世界各地的干旱状况<sup>[19]</sup>,从而为农业、水资源管理、生态系统监测等领域提供了重要的参考依据。其计算过程是建立在对降水量和蒸散发量进行统计分析的基础上,通过将降水蒸散差异标准化为正态分布,从而能够更准确地揭示干湿变化趋势。详细的计算方法和步骤可以参考相关文献<sup>[16]</sup>。

1.3.4 趋势性分析 去趋势预置白处理的 Mann-Kendall 法是以秩为基础的非参数检验法,能够定量检验时间序列的趋势,它是针对待检序列自相关性问题,产生的前置移除型 Mann-Kendall 趋势检验方法。其优势在于可以对时间序列的趋势进行定量检验,而不受数据分布假设的限制。它通过两个处理步骤,即去趋势和预置白来降低序列中自相关性对检验结果的影响,以确保检验结果的准确性。该方法通常用于分析长时间序列数据中的趋势,特别是在环境科学、农业研究等领域中广泛应用。本研究利用 Hossein 等<sup>[20]</sup>提供的去趋势预置白处理的 Mann-Kendall 法分析玉米、谷子、马铃薯、红枣和苹果需水量的趋势性变化。

1.3.5 R/S 分析法 重标极差法 (R/S) 是一种时间序列统计方法<sup>[21]</sup>。常用于分析时间序列的分型特征与记忆过程,可以全面反映时间序列的可持续性。其计算的关键是 Hurst ( $H$ ) 指数,  $H$  指数用于衡量时间序列的长

期记忆性,其取值范围为 0~1。当  $H=0.5$  时,表明时间序列是随机游走,没有长期记忆效应;  $H>0.5$  时,表示时间序列具有正的长期记忆效应,未来趋势可能会延续过去的趋势;  $H<0.5$  时,表示时间序列具有负的长期记忆效应,未来趋势可能与过去相反。通过计算时间序列的 Hurst 指数判断未来的变化趋势<sup>[16]</sup>。

## 1.4 统计分析

借助 Spass 18.0 和 Excel 2010 进行数据分析,利用 Origin 2019 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱特征

黄土丘陵区标准化降水蒸散指数 (SPEI) 的月平均值在作物生育期约为 0.01 (图 1A), 干旱等级属于正常。但较小的时间尺度无法完全刻画降水与作物需水耦合情况,而年尺度的 SPEI 可全面反映作物全生育期的水分状况<sup>[16]</sup>。年尺度的 SPEI 在延安和榆林变化趋势一致,干旱年 ( $\text{SPEI}<0$ ) 占分别占延安和榆林总监测年数的 48.65% 和 56.76% (图 1B)。因此,陕北黄土丘陵区干旱在作物全生育期内频繁发生。

延安和榆林地区 SPEI 分别在 3 月、4 月、5 月、6 月、11 月份和 1—6 月、11 月、12 月份呈现降低趋势,在其他月份均呈现增加趋势,但降低或增加趋势较小,仅在 3 月份以 0.04/a 显著降低 ( $p<0.01$ , 表 2, 表 3)。就作物的全生育期而言, SPEI 在延安和榆林地区的 4—6 月份均呈现降低趋势,即干旱在此阶段出现减弱;在两地区的 7—10 月份呈现增加趋势,干旱在两地区的该阶段呈现增加趋势 (表 2, 表 3)。

### 2.2 降水量特性

陕北黄土丘陵区延安与榆林降水量在逐月的动态变化规律一致,但延安地区的降水量在逐月均高于榆林地区,陕北黄土丘陵区的主要降水期集中在 6—9 月,该时段的降水量占全年总降水量的 71.15%~74.26% (图 2A)。有效降水是旱作的主要水分来源,但在旱作的主要生育期内 (4—10 月),有效降雨量仅为 1.97~121.31 mm (图 2B)。

黄土丘陵区有效降水量的变化趋势受不同地区影响 (表 4),有效降水在延安地区 3 月、4 月、6 月、8 月份以 0.01~0.37 mm/a 趋势降低 ( $Z<0$ );在其他月份呈现增加趋势 ( $Z>0$ ),2 月份降水以 0.16 mm/a 的趋势显著增加 ( $p<0.001$ ) (表 5);有效降雨量在榆林地区 1 月、3 月、5 月、6 月份表现为降低趋势 ( $Z<0$ ),在其他月份呈现增加趋势,其中在 2 月、4 月、7 月、9 月份显著增加 ( $p<0.01$ ),最大增加率为 0.42 mm/a (表 5)。

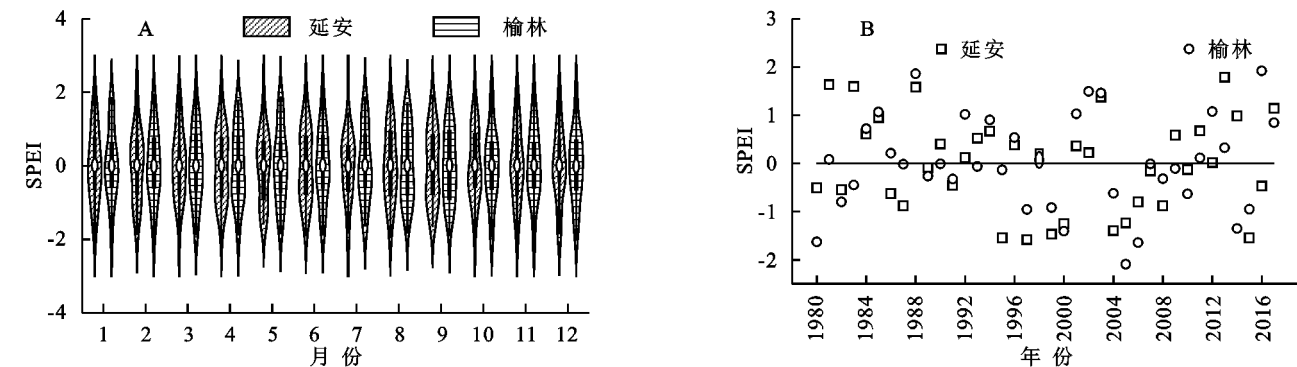


图 1 陕北黄土丘陵区标准化降水蒸散指数的逐月和年动态变化

Fig. 1 Dynamics of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in different months and years in Loess Hilly region of Northern Shaanxi

表 2 标准化降水蒸散指数在不同月份 Mann-Kendall 检验的 Z 统计值

Table 2 Z of Mann-Kendall test of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in different months

地区	月份											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
延安	0.53	1.03	-3.24**	-0.96	-0.05	-1.79	0.28	0.96	0.70	1.01	-0.40	0.73
榆林	-1.99*	-1.11	-2.67**	-0.43	-1.66	-0.85	0.65	1.03	2.09	0.65	-1.66	-2.61*

表 3 标准化降水蒸散指数在不同月份的 Sen 斜率值

Table 3 The Sen's slope of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in different months

地区	月份											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
延安	0.01	0.02	-0.04	-0.02	0.00	-0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	-0.01	0.02
榆林	-0.03	-0.02	-0.04	-0.01	-0.03	-0.01	0.01	0.02	0.04	0.01	-0.03	-0.04

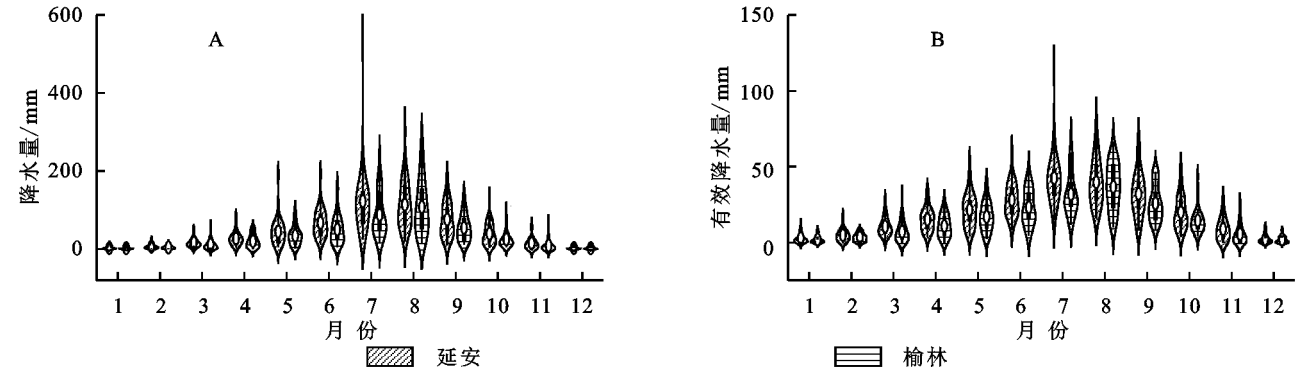


图 2 陕北黄土丘陵区降水量及有效降雨量的逐月 (1980—2017 年) 动态

Fig. 2 Dynamics of month precipitation and effective precipitation in 1980—2017 in Loess Hilly region of Northern Shaanxi

表 4 有效降水量在不同月份的 Mann-Kendall 检验的 Z 统计值

Table 4 Z of Mann-Kendall test of effective precipitation in different months

地区	月份											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
延安	0.00	3.24**	-1.33	-0.13	0.75	-1.43	0.50	-1.48	0.80	1.21	0.41	0.44
榆林	-0.60	2.10*	-1.06	1.73*	-0.10	-0.08	2.06*	0.96	2.01*	1.33	0.72	1.03

注:\*\*\*, \*\*, \* 分别表示在  $\alpha$  为 0.001, 0.01, 0.05 水平下显著, 下同。

表 5 有效降水量在不同月份的 Sen 斜率值

Table 5 The Sen's slope of effective precipitation in different months

地区	月份											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
延安	0.00	0.16	-0.12	-0.01	0.17	-0.23	0.10	-0.37	0.19	0.19	0.03	0.00
榆林	0.00	0.09	-0.09	0.18	-0.01	0.00	0.34	0.24	0.42	0.12	0.02	0.00



### 2.3 主要作物需水量

延安与榆林地区主要粮食和果类作物在生育期的需水量规律相同,全生育期的需水量大小次序为:玉米>马铃薯>红枣>苹果>谷子,但榆林地区主要作物需水量高于延安地区;粮食类作物(玉米、谷子和马铃薯)和果类作物(苹果和红枣)需水量在7月、8月份最大,月最大需水量分别为260.00 mm(玉米),171.22 mm(谷子),243.79 mm(马铃薯),158.53 mm(苹果)和192.39 mm(红枣)(图3);逐月的有效降水量均难以满足作物逐月需水量(图2B、图3)。

粮食和果类作物需水量在4—8月份均呈现增加趋势(表6),其中玉米的需水增加速率高于其他作物(表7);延安地区与榆林地区作物需水量在9—10月份变化趋势相反(表6)。在粮食和果类作物生长的初期阶段(4—6月),各作物需水量增加明显,增加速率为0.10~0.51 mm/a,其中榆林地区粮食和果类作物需水量增加显著( $p<0.001$ ,  $p<0.01$ ),增加速率高于同期延安地区(表6,表7)。

### 2.4 干旱、有效降水量及作物需水量趋势预测

对黄土丘陵区干旱、有效降水量及主要作物生育期的需水量进行R/S预测分析,分析Hurst指数见表8—10。表8表明,延安地区在未来4—6月份及9月份干旱呈现增加趋势,在未来7月、8月及10月份,干旱呈现降低趋势;榆林地区在未来5月、8月、9月份干旱呈现增加趋势,在未来4月、6月、7月、10月份干旱为降低趋势。表9表明,延安和榆林地区有效降水量分别在未来5月、7月、10月份呈现降低趋势,在未来8月、9月份为增加趋势。表10表明,延安地区玉米和马铃薯需水量在未来5月、6月份呈现降低趋势,苹果和红枣需水量在未来4月、5月、6月份也呈现降低趋势;榆林地区玉米、谷子、马铃薯、苹果和红枣需水量在未来4月、5月、6月份变化趋势与延安地区相反;延安地区除马铃薯需水量在未来7月、8月份呈降低趋势外,其他作物需水量在未来7月、8月份趋势不确定;榆林地区玉米、马铃薯、苹果和红枣需水量在未来7月份呈降低趋势,则在8月份需水量趋势相反;延安地区苹果和红枣需水量在未来9月、10月份增加,榆林地区苹果和红枣需水量在未来9月、10月份降低。

## 3 讨论

干旱作为一种复杂的自然灾害,严重制约着农业生产、社会经济和生态环境发展<sup>[16]</sup>。IPCC评估报告显示,近一个世纪以来,全球干旱事件显著增加,干旱事件在水资源短缺的干旱半干旱地区尤为突出<sup>[22]</sup>。

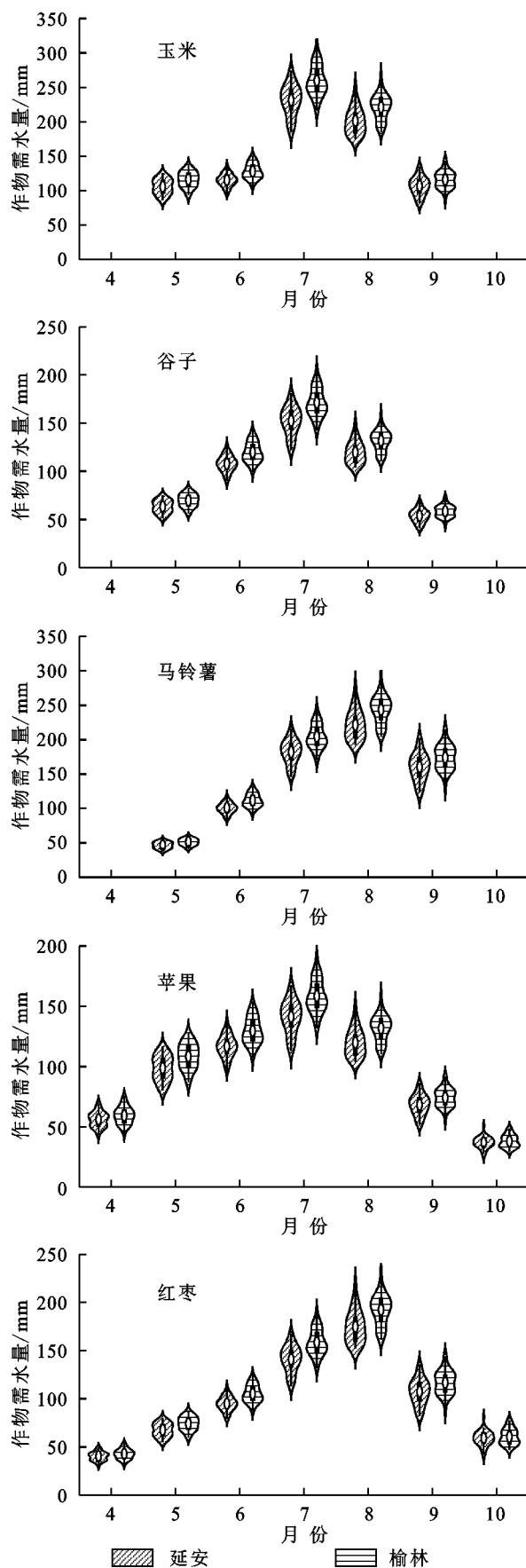


图3 陕北黄土丘陵主要作物需水量动态

Fig. 3 Dynamics of month water demand in Loess Hilly region of Northern Shaanxi

表 6 主要作物需水量在不同月份的 Mann-Kendall 检验的 Z 统计值  
Table 6 Z of Mann-Kendall test of water demand of main crops in different months

作物	地区	月份						
		4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
玉米	延安		0.85	2.10 *	0.65	0.94	−0.77	
	榆林		2.90 * *	2.50 *	0.39	0.19	0.00	
谷子	延安		0.85	2.10 *	0.65	0.94	−0.77	
	榆林		2.90 * *	2.50 *	0.38	0.19	0.00	
马铃薯	延安		0.85	2.10 *	0.65	0.94	−0.77	
	榆林		2.90 * *	2.50 *	0.38	0.19	0.00	
苹果	延安	1.24	0.85	2.10 *	0.65	0.94	−0.77	−0.67
	榆林	1.81 *	2.90 * *	2.50 *	0.38	0.19	0.00	2.49 *
红枣	延安	1.23	0.85	2.10 *	0.65	0.94	−0.77	−0.68
	榆林	1.81 *	2.90 * *	2.50 *	0.38	0.19	0.00	2.49 *

表 7 主要作物需水量在不同月份的 Sen 斜率值  
Table 7 The Sen's slope of water demand of main crops in different months

作物	地区	月份						
		4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
玉米	延安		0.18	0.28	0.28	0.26	−0.16	
	榆林		0.51	0.44	0.13	0.04	0.00	
谷子	延安		0.11	0.26	0.18	0.15	−0.08	
	榆林		0.31	0.41	0.09	0.02	0.00	
马铃薯	延安		0.08	0.24	0.22	0.29	−0.24	
	榆林		0.22	0.38	0.10	0.04	0.00	
苹果	延安	0.14	0.17	0.28	0.17	0.15	−0.10	−0.05
	榆林	0.20	0.48	0.44	0.08	0.02	0.00	0.25
红枣	延安	0.10	0.12	0.23	0.17	0.23	−0.16	−0.07
	榆林	0.14	0.33	0.36	0.08	0.03	0.00	0.40

表 8 标准化降水蒸散指数 SPEI 在不同月份的 Hurst 值  
Table 8 The Hurst index (H) of standardized precipitation  
evapotranspiration index in different months

地区	月份						
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
延安	0.45	0.45	0.47	0.44	0.40	0.57	0.44
榆林	0.54	0.48	0.51	0.47	0.53	0.55	0.35

表 9 有效降雨量在不同月份的 Hurst 值  
Table 9 The Hurst index (H) of effective rainfall  
in different months

地区	月份						
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
延安	0.42	0.49	0.53	0.37	0.41	0.56	0.42
榆林	0.00	0.55	0.50	0.43	0.54	0.55	0.42

陕北黄土丘陵区干旱发生频率高达 56.76%(图 1),黄土丘陵区不仅生态环境脆弱,而且对气候变化异常敏感,频发的干旱严重影响着该区域生态环境和农业活动<sup>[23]</sup>,如在 1951—2012 年中度或极端干旱频繁发生,导致土壤水分亏缺、水质恶化、作物歉收、蝗

灾严重等后果,受旱农田曾达 3 333.3 km<sup>2</sup>,粮食减产 2 亿 kg,给当地经济带来严重创伤<sup>[24]</sup>。

黄土丘陵区旱作的主要水分来源依靠降雨,但在作物生育期内有效降雨量仅为 1.97~121.31 mm,而且在时空上分布不均(图 2),难以满足粮食和果类作物对水分的需求(图 3)。在未来,陕北黄土丘陵区有效降水量分别在 5 月、7 月、10 月份呈现降低趋势,在 8 月、9 月份为增加趋势(表 9);干旱在 4—6 月份延安和榆林分别呈现增加和降低趋势(表 8);作物需水量变化趋势与干旱相同(表 10)。为了满足作物对水分的需求,建议发展集雨补灌技术<sup>[22]</sup>,该技术对天然降水在时空上进行调配,以满足作物在生育期对水分的需求,是提高水分利用效率,解决水分供需错位的有效措施,如对谷子孕穗期采用集雨补灌,能显著提升水分利用效率,谷子产量增幅达 16.7%<sup>[15]</sup>。此外,可以在田间采用秸秆覆盖等农艺措施,以增加拦蓄降雨,提升土壤水分,降低土壤表面蒸发,改善土壤肥力、微生物及土壤理化性状<sup>[25]</sup>,进而提升作物品质、产量及水分利用效率。

表 10 主要作物需水量在不同月份的 Hurst 值

Table 10 The Hurst index ( $H$ ) of water demand of main crops in different months

作物	地区	月份						
		4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
玉米	延安		0.45	0.48	0.50	0.50	0.60	
	榆林		0.53	0.54	0.36	0.53	0.54	
谷子	延安		0.50	0.48	0.50	0.50	0.60	
	榆林		0.52	0.54	0.36	0.53	0.54	
马铃薯	延安		0.49	0.48	0.50	0.50	0.59	
	榆林		0.52	0.54	0.36	0.53	0.54	
苹果	延安	0.45	0.49	0.48	0.50	0.50	0.59	0.34
	榆林	0.58	0.52	0.54	0.36	0.53	0.54	0.49
红枣	延安	0.45	0.49	0.48	0.50	0.50	0.60	0.34
	榆林	0.58	0.52	0.54	0.36	0.53	0.54	0.49

黄土丘陵区粮食作物(玉米,马铃薯)需水量高于果类作物(红枣和苹果)(图 3),陕北粮食作物主要种植于 5—9 月份,粮食作物在生长过程中会引发土壤水分变化,但不同粮食作物会导致土壤剖面的含水量表现出一定的层次性和差异性,玉米和马铃薯对土壤水分主要利用活跃层分别为 0~0.6 m 和 0~0.4 m,对土壤水分利用深度小于 1.2 m<sup>[26,27]</sup>。但多年生的果类作物较粮食作物生育周期长,而且随着其种植年限的增加,树体会持续增长,为了满足树体对水分的需求,根系进一步向深层土壤中生长,进而过度消耗深层土壤水分。黄土高原降雨可补给土层深度范围为 0~2 m,在降雨充足年份,因种植粮食作物导致土壤剖面亏缺的水分会从上到下逐渐恢复,剖面含水量出现波动上升现象<sup>[26]</sup>。果类作物长期消耗的深层土壤水分又无法得到降雨入渗补给,使得土壤出现干层,形成“利用型”土壤干化,这一种特殊水文现象<sup>[28]</sup>。陕北黄土丘陵区 12 龄密植枣林耗水深度已达到 5.4 m,土壤干层厚度为 3.4 m<sup>[12]</sup>,陕北苹果使土壤的干化速率达 68.03 mm/a,苹果种植 7 a 后,可使土壤形成干层<sup>[10]</sup>。此外,陕北黄土丘陵区红枣种植面积为 1 133.3 km<sup>2</sup>,但受病虫害及新疆枣冲击,加之果园管理粗放,品种老化等原因,导致产量和品质下滑,经济效益降低,果农售价 4.61~5.69 元/kg,生产及人工成本不断上涨,果农种植热情受挫,枣园生产资料及劳力不断缩减。陕西省苹果产量达 1 242.46 万 t,约占全国苹果产量的 52%<sup>[9]</sup>。但由于国内苹果产能过剩,价格波动极大,年均出口量仅占产量的 2.38%<sup>[29]</sup>,同时受冷链物流和其他商业模式冲击,其他水果突破了地域流通限制,呈现出季节性产出但全年销售的模式,对苹果市场挤压尤为明显<sup>[9]</sup>。考虑到果类作物需水量高于降雨量,易造成土壤干化。建议对部分高龄、低产、病害严重,经济效益低的枣或苹

果园进行砍伐,使土地进行适当休闲,伐后移除的树根及其产生的腐朽根系均可在土壤中形成大孔隙<sup>[30]</sup>,这些大孔隙主导着土壤中的水和溶质迁移,降水可以通过这些大孔隙快速传输至下层土壤恢复干化土层<sup>[31]</sup>。此外,控制红枣及苹果种植面积,通过调整种植及品种结构,降低生产成本,提升果实品质,加强加工能力,并丰富销售模式。这一系列举措旨在走向生态美、促进产业兴旺、实现百姓富裕的可持续发展之路。

黄土丘陵区谷子需水量最小(图 3),谷子全生育期的需水与降水耦合度高于马铃薯和玉米,甚至可达 0.81<sup>[8]</sup>。结合黄土丘陵区水资源及谷子产业发展现状,建议扩大谷子的种植面积。谷子作为陕北黄土丘陵区主栽培作物之一,其具备抗旱和耐贫瘠的特性,表现出强大的环境适应性,同时水分利用效率高,是建设可持续生态农业及环境友好型粮食作物<sup>[15]</sup>。谷子是一种营养成分丰富、含有高量饲草蛋白的特色作物,不仅是人们调整膳食结构、平衡营养的理想选择,同时也被视为应对未来水资源短缺的首选战略储备作物<sup>[32]</sup>。据研究,随着人民群众对健康的关注,谷子的保健价值被重视起来。自 2014 年后,谷子价格持续上涨,普通谷、绿色认证谷子和有机谷价格分别为 3.4~3.8 元/kg,25~35 元/kg 和 35.9~44.8 元/kg,谷子市场潜力非常可观<sup>[32]</sup>。在未来,建议进一步增加对谷子育种和栽培等方面的科研投入,积极推动流通企业和加工企业的联合,发展和壮大农业服务型经营主体,大力拓展谷子市场,实施“名、优、特”品牌战略,以促使谷子产业不断向区域规模化、种植标准化、无公害化的方向发展<sup>[8]</sup>,助力新时代乡村振兴战略实施。

## 4 结论

陕北黄土丘陵区(1980—2017 年),干旱年发生

频率达56.76%,有效降雨量难以满足作物(玉米、马铃薯、红枣、苹果和谷子)需水量,其中延安地区有效降雨量高于榆林地区,但榆林地区作物需水量高于延安地区。在旱作的生育期内(4—10月份),干旱在4—6月呈现降低趋势,在7—10月份呈现增加趋势;有效降水量的变化趋势在不同地区的月份表现各异;作物需水量在4—8月增加趋势,榆林地区作物需水量增加速率在4—6月显著高于延安地区( $p < 0.001$ ,  $p < 0.01$ )。在未来,陕北黄土丘陵区有效降水量分别在5月、7月、10月份呈现降低趋势,在8月、9月份为增加趋势;干旱及作物需水量在4—6月份延安地区分别呈现增加和降低趋势,榆林地区同期干旱及作物需水量与延安地区相反;干旱及作物需水量在7—10月不同的地区呈现不同变化趋势。建议控制红枣及苹果种植面积,加大谷子产业,采用覆盖与集雨补灌相结合农艺措施来满足作物对水分的需求,以达到作物增产农民增收目的。

#### 参考文献(References):

- [1] 周天军,陈梓明,陈晓龙,等. IPCC AR6 报告解读:未来的全球气候:基于情景的预估和近期信息[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 652-663.  
Zhou T J, Chen Z M, Chen X L, et al. Interpreting IPCC AR6: Future global climate based on projection under scenarios and on near-term information[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 652-663.
- [2] 刘荔昀,鲁瑞洁,丁之勇,等. 黄土高原气候变化特征及原因分析[J]. 地球环境学报, 2021, 12(6): 615-631.  
Liu L Y, Lu R J, Ding Z Y, et al. Analysis of climate change characteristics and circulation factors in the Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2021, 12(6): 615-631.
- [3] Xu X M, Huang T. Spatiotemporal trends and variation of precipitation over China's Loess Plateau across 1957—2018[J]. Atmosphere, 2023, 14(2): 323.
- [4] 任涛涛,李双双,段克勤,等. 黄土高原热浪型和缺水型骤旱时空变化特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 360-370.  
Ren T T, Li S S, Duan K Q, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of heat wave and precipitation deficit flash drought in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 360-370.
- [5] Mo K C, Lettenmaier D P. Heat wave flash droughts in decline[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2823-2829.
- [6] Mo K C, Lettenmaier D P. Precipitation deficit flash droughts over the United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(4): 1169-1184.
- [7] He M Z, Kimball J S, Yi Y H, et al. Impacts of the 2017 flash drought in the US Northern Plains informed by satellite-based evapotranspiration and solar-induced fluorescence [J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(7): 074019.
- [8] 陆静,朱文哲,高志永. 陕北黄土丘陵区主要作物需水与降水耦合分析[J]. 节水灌溉, 2019(12): 72-76, 81.  
Lu J, Zhu W Z, Gao Z Y. Analysis of coupling degree between water demand of main crops and rainfall in Loess Hilly Region of northern Shaanxi [J]. Water Saving Irrigation, 2019(12): 72-76, 81.
- [9] 中国苹果产业协会, 中国农业大学农业规划设计院. 2021 年度中国苹果产业发展报告(总篇)精简版[J]. 中国果菜, 2023, 43(1): 1-8.  
CAIA, CAU-APDI. 2021 China apple industry development report (Summary) condensed version [J]. China Fruit Vegetable, 2023, 43(1): 1-8.
- [10] 温慧娴,赵西宁,高飞. 黄土高原不同降水量区苹果园土壤干燥化效应及生产水足迹模拟[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1927-1936.  
Wen H X, Zhao X N, Gao F. Simulation of soil desiccation effects and production water footprint of apple orchards in different precipitation areas of the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1927-1936.
- [11] 胡永翔,李援农,张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 87-91, 79.  
Hu Y X, Li Y N, Zhang Y. Experiment on crop coefficient and water requirement of drip-irrigation jujube in Loess Plateau of China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 87-91, 79.
- [12] 汪星,周玉红,汪有科,等. 黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 263-270.  
Wang X, Zhou Y H, Wang Y K, et al. Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly Regions of the Loess Plateau in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 263-270.
- [13] 魏群,费良军. 陕北山地滴灌枣树耗水规律与作物系数研究[J]. 亚热带水土保持, 2012, 24(4): 12-16.  
Wei Q, Fei L J. Study on the water consumption rules and crop coefficient of drop-irrigation jujube trees in the mountain areas of North Shaanxi Province [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2012, 24(4): 12-16.
- [14] 宋安利. 陕北山地苹果节水灌溉制度研究: 以绥德县为例[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 219-224.  
Song A L. Water-saving irrigation scheduling of mountain



- tain apples in northern Shaanxi: A case study of Suide County[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021,32(3):219-224.
- [15] 王小林,纪晓玲,张静,等.密度和集雨补灌对黄土旱区谷子产量及水分利用效率的影响[J].*陕西农业科学*, 2019,65(3):10-16.
- Wang X L, Ji X L, Zhang J, et al. Effects of density and rainwater harvesting and supplementary irrigation on millet yield and water use efficiency in loess arid area [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2019,65(3):10-16.
- [16] 郭旭新,赵英,高志永,等.基于 SPEI 的陕北黄土丘陵区干旱特征及影响因素分析[J].*西北林学院学报*, 2019,34(1):69-76.
- Guo X X, Zhao Y, Gao Z Y, et al. SPEI based drought characters and factors in Loess Hilly Regions of northern Shaanxi[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019,34(1):69-76.
- [17] Allen R G. An update for the calculation of reference evapotranspiration[J]. *Icid Bulletin*, 1994,43(2):35-92.
- [18] 康绍忠,张小林,贺正中,等.陕西省玉米需水量等值线图及分区灌溉评价的研究[J].*水资源与水工程学报*, 1990(3):19-34.
- Kang S Z, Zhang X L, He Z Z, et al. Research on the isoline map of corn water requirement and division of irrigation zone in Shanxi province[J]. *Journal of Water resources & Water Engineering*, 1990(3):19-34.
- [19] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010,23(7):1696-1718.
- [20] Tabari H, Hosseinzadeh Talaei P. Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran[J]. *Global and Planetary Change*, 2011,79(1/2):1-10.
- [21] 高志永,冯峰,杨毅.三义寨灌区主要作物需水量变化趋势分析[J].*西北农业学报*, 2017,26(3):477-486.
- Gao Z Y, Feng F, Yang Y. Trend analysis of water requirements of main crops in sanyizhai irrigation area [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017,26(3):477-486.
- [22] Gao C J, Chen H S, Sun S L, et al. A potential predictor of multi-season droughts in Southwest China: Soil moisture and its memory[J]. *Natural Hazards*, 2018, 91(2):553-566.
- [23] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. An overview of the Semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008,25(6):906-921.
- [24] Jiang R G, Xie J C, He H L, et al. Use of four drought indices for evaluating drought characteristics under climate change in Shaanxi, China: 1951—2012 [J]. *Natural Hazards*, 2015,75(3):2885-2903.
- [25] 周子军,郭松,陈琨,等.长期秸秆覆盖对免耕稻-麦产量、土壤氮组分及微生物群落的影响[J].*土壤学报*, 2022,59(4):1148-1159.
- Zhou Z J, Guo S, Chen K, et al. Long-term straw mulching affects rice and wheat yields, soil nitrogen fractions, and microbial community under a no-till system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022,59(4):1148-1159.
- [26] 袁日萍,甘永德,王尚涛,等.不同种植方式下黄土塬区土壤水分变化特征.水利水电技术(中英文),2023,54(10):59-70.
- Yuan R P, Gan Y D, Wang S T, et al. Variation characteristics of soil moisture under different planting patterns in Loess Plateau[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023,54(10):59-70.
- [27] 买自珍,余萍,买娟,等.半干旱区不同覆膜时期、方式与膜色对土壤水分及马铃薯水分利用效率的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2014,32(1):1-10.
- Mai Z Z, She P, Mai J, et al. Effects of mulching timing, pattern and color of plastic film on soil moisture and water use efficiency of potato [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014,32(1):1-10.
- [28] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world[J]. *Nature*, 2005,435(7046):1179-1186.
- [29] 葛玉全,李红锋,王春燕,等.我国苹果产业现状及可持续发展建议[J].*现代食品*, 2021(11):4-6.
- Ge Y Q, Li H F, Wang C Y, et al. Status and sustainable development proposals of apple industry in China [J]. *Modern Food*, 2021(11):4-6.
- [30] Döbert T F, Bork E W, Apfelbaum S, et al. Adaptive multi-paddock grazing improves water infiltration in Canadian grassland soils[J]. *Geoderma*, 2021,401:115314.
- [31] Wu G L, Cui Z, Huang Z. Contribution of root decay process on soil infiltration capacity and soil water replenishment of planted forestland in semi-arid regions [J]. *Geoderma*, 2021,404:115289.
- [32] 李顺国,刘斐,刘猛,等.我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议[J].*农业现代化研究*, 2014,35(5):531-535.
- Li S G, Liu F, Liu M, et al. The current industry situation, development trend, and suggestions for the future of foxtail millet in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014,35(5):531-535.