

黄土旱塬区麦田休闲期降水与土壤贮水的变化特征

贾建英¹, 贺楠², 韩兰英¹, 万信¹, 王兴¹, 梁芸¹, 王小巍¹, 王帆¹, 黄鹏程¹

(1.兰州区域气候中心, 兰州 730020; 2.中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要:为提高休闲期降水资源利用效率和确保区域粮食安全, 利用 1981—2020 年陇东黄土高原旱作麦田定位土壤水分和气象观测资料, 分析了冬小麦田休闲期间降水与土壤水分的变化特征及其影响因素。结果表明: (1) 近 40 年陇东黄土高原休闲期降水以 14 mm/10 a 的速率增加, 降雨总日数和小雨日数呈减少趋势, 中雨、大雨日数呈弱增加趋势; (2) 近 40 年休闲期 1 m 土层平均以 9.5 mm/10 d 的速率充水, 贮水量平均增加 97 mm, 21 世纪以来贮水量增加明显; (3) 休闲期降水与 1 m 土层贮水增量符合二次函数关系, 1 m 土层开始贮存水分的降水阈值为 175 mm, 贮水增量与中、大雨总日数相关性最高, 前期降水主要以土壤蒸发消耗为主, 后期降水则大部贮存于土壤中; (4) 休闲期 1 m 土层平均贮水效率为 0.27, 贮水效率随着麦收时的土壤墒情增加而线性递减, 当麦收时 1 m 土层贮水量小于田间持水量的 45%~48% 时, 贮水效率较高, 1 m 土层水分得到充分补充的降水阈值为 388 mm。该研究成果揭示了近 40 年陇东黄土高原休闲期降水和土壤贮水的转化规律, 同时为指导区域水资源高效利用提供科学依据。

关键词:土壤贮水; 降水阈值; 贮水效率; 休闲期; 黄土高原

中图分类号: S161; S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)06-0097-07

Variation Characteristics of Precipitation and Soil Water Storage in Winter Wheat Field During Fallow Period in Rainfed Area of the Loess Plateau

JIA Jianying¹, HE Nan², HAN Lanying¹, WAN Xin¹, WANG Xing¹,
LIANG Yun¹, WANG Xiaowei¹, WANG Fan¹, HUANG Pengcheng¹

(1. Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China;

2. Public Weather Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the utilization efficiency of precipitation resources in fallow period and ensure regional food security, we collected the soil moisture data of winter wheat fields and meteorological observation data from 1981 to 2020 to analyze the variation characteristics of precipitation and soil moisture in rainfed area of the Longdong in the Loess Plateau. The results showed that: (1) in the past 40 years, the precipitation during the fallow period of the Longdong in the Loess Plateau increased at a rate of 14 mm/decade, but the inter-annual difference was large; the numbers of rainfall days and the light rain days decreased, while the number of moderate and heavy rain days showed a slightly increasing trend; the increase of rainfall intensity had a greater contribution to the increase of precipitation; (2) the obvious water-filling process in 1 m soil layer was observed in the fallow period, increasing at a rate of 9.5 mm/10 days, and the average water storage capacity increased by 97 mm in the past 40 years; the increment of water storage was the lowest in the 1990s, but it increased significantly since this century; (3) there was a quadratic function relation between the precipitation and the soil water storage in 1 m soil layer during the fallow period; the precipitation threshold of 1 m soil layer starting to store moisture during the fallow period was 175 mm; the water storage increment had a high correlation with the total days of moderate and heavy rain; early precipitation during the fallow period was mainly consumed by soil evaporation, and most of the precipitation in the later period was stored in the soil; (4) in recent 40 years, the average soil water storage efficiency of 1 m soil layer

收稿日期: 2021-12-28

修回日期: 2022-01-09

资助项目: 国家自然科学基金(41605090); 甘肃省自然科学基金(20JR10RA452)

第一作者: 贾建英(1984—), 女, 甘肃酒泉人, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业干旱监测及风险评估研究。E-mail: jiajianying2014@163.com

was 0.27 for winter wheat fields during the fallow period, and the water storage efficiency decreased linearly with the increasing of soil moisture during winter wheat harvest; when the water storage of 1 m soil layer during wheat harvest was less than 45%~48% of the soil water holding capacity, the water storage efficiency was higher; there was also a quadratic function relation between precipitation and soil water storage efficiency during the fallow period, and the precipitation threshold for soil moisture fully supplemented in 1 m soil layer was 388 mm. This study reveals the transformation processes of precipitation and soil water storage in the fallow period in Longdong of the Loess Plateau in the past 40 years, and provides a scientific basis for guiding the efficient utilization of regional water resources.

Keywords: soil water storage; precipitation threshold; water storage efficiency; summer fallow period; Loess Plateau

黄土高原是我国重要的旱作粮食生产区,由于地处半干旱气候区和亚洲夏季风影响边缘区,降雨量年际波动较大,有效降雨少且时空分布不均,导致粮食主要生长季干旱频繁发生^[1-2]。塬是黄土高原主体地貌,面积约 5.3 万 km²,以中壤土为主,黄土厚度 50~80 m,最厚达 150~180 m,具有结构疏松、透水、易耕、性熟等特点,深厚的土层有利于土壤水分蓄积^[3-4],降水被蓄存于土体之中,在干旱缺水季节可为作物提供保命水,最终通过土壤深层贮水来应对气候干旱,具备显著的储蓄和调节水分功能,被称为“土壤水库”^[5-6]。深厚的黄土覆盖对稳定当地粮食生产起到了关键作用,“留住天上水,用好地下水”是适宜黄土高原气候特点和土壤蓄水特征的水分利用措施之一^[7-8]。冬小麦是黄土高原旱作农业区的主要粮食作物之一,近 10 a 平均种植面积约占粮食播种面积的 28.2%。冬小麦全生育需水量为 350~500 mm,但全生育期降水大多不足 250 mm,只能满足耗水量的 65%~95%,干旱频繁发生,素有“三年一小旱,十年一大旱”之说^[9-11]。旱作冬小麦收割到下一季播种为夏季休闲期,休闲期(7—9 月)降水占全年降水的 60%以上,而深厚的黄土覆盖为降水资源转化为土壤水分提供了得天独厚的条件,冬小麦有 5%~35%的耗水量就是休闲期土壤贮水补给^[12-14]。李超等^[15]研究表明在黄土塬区降水季节分布特征下,播前底墒对冬小麦产量具有决定性作用,产量随底墒线性增加。Guo 等^[16]在黄土高原雨养区的研究表明,7—9 月降水量与次年冬小麦产量呈显著相关关系。劳动人民在长期生产中也积累了“麦收隔年墒”、“三伏多雨好种麦”等宝贵经验。可见休闲期充足的土壤贮水是黄土高原旱塬区冬小麦生产的重要保障,土壤水库对保障和维持本区旱地冬小麦稳产高产具有重要作用^[17-20]。

黄土高原土壤水分循环是较单一的降水下渗和蒸散上行过程^[21-22],因地下水埋深大部为 50~100 m,一般可以不考虑入渗水分与地下水之间的相互作用^[23]。王

全九等研究表明,休闲期降水量对土壤水分的补给量有极显著的影响。休闲期土壤水库充水占主导地位,土壤贮水量显著增加,即土壤水库“水位”上升;从播种到收割,整个生长期土壤贮水量显著下降,土壤水库放水占主导地位^[5-6,18]。黄土塬区冬小麦田在休闲期降水的转化效率与生长季土壤水的消耗率呈现极显著的指数相关,降水增加使得土壤水分的补给次数增多,减少了土壤水分的时空变异^[19]。土壤水库效应的发挥受降水年型的影响较大,枯水年、平水年降水量虽少,但对土壤水分的补充作用较丰水年明显^[8]。而气候变化背景下的水分时空动态,尤其是脉冲式降水及其他极端天气过程不确定性的增加,成为驱动半干旱地区系统结构和功能变化的关键因子,导致黄土高原的水循环过程产生剧烈的变化^[24-25]。

本研究选取位于陇东黄土高原中北部典型旱塬区的董志塬为研究区域,结合近 40 年田间定位观测试验,重点分析休闲期降水与土壤水分的转化特征及其影响因素,以期对黄土高原旱塬区雨养农业稳定发展提供理论依据。

1 研究区域及方法

1.1 研究区概况

西峰农业气象试验站为国家一级农业气象试验站,位于陇东黄土高原中北部的董志塬。董志塬为黄土高原最大的原面,黄土层厚达 150~200 m,海拔 1 200~1 400 m,地下水位 50~100 m。该区属大陆性半干旱气候,年均气温 8.8℃,无霜期 151.4 d,年日照时数为 2 465 h,多年平均降水量 555.3 mm,降水集中在 7—9 月。土壤类型以黑垆和黄绵土为主,田间持水量在 20.8%~24.2%,萎蔫系数在 4.2%~5.4%。塬区总耕地面积 6.1 万 hm²,基本无灌溉条件,为典型旱作区,主要农作物为冬小麦和春玉米。

1.2 资料及来源

1981—2020 年土壤水分观测资料和冬小麦生育

期观测资料均来源于西峰农业气象试验站固定观测地段,逐日气象资料来源于甘肃省气象信息中心。冬小麦生育期观测时段为 9 月中、下旬(播种)至翌年 6 月下旬、7 月上旬(收获),观测方法均按《农业气象观测规范》。本研究依据冬小麦平均生育期,确定以 6 月 19 日至 9 月 28 日为冬小麦休闲期,并以 8 月 8 日为界将休闲期分割为前期和后期。

1.3 土壤水分测定方法

土壤水分测定时段为每年 3 月上旬至 11 月上

旬,每旬逢 8 日测定(8 日、18 日、28 日)。其中 1981—2014 年采用土钻法进行土壤含水量的测定,测定深度为 100 cm,每间隔 10 cm 取一次样土,测定 4 个重复,烘干法测定土壤含水量(%);2015—2020 年资料为经标定后投入业务应用的自动土壤水分观测仪测定,选取每月逢 8 日 0—100 cm 共 10 个土层观测资料。不同深度土壤水文常数为甘肃省气象局每 10 a 测定 1 次,2000 年以前只测容重和田间持水量,2000 年以后开始测定凋萎湿度(表 1)。

表 1 2000—2020 年西峰 0—100 cm 土壤水文常数

年份	水文常数	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm	90 cm	100 cm
2000	容重/(g·cm ⁻³)	1.3	1.2	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	凋萎湿度/%	7.3	7.1	7	7.7	7.5	8.4	8.2	8.7	9	9.1
	田间持水量/%	22.8	20.9	20.4	22.6	23.3	23.7	24.6	24.6	24.3	23.6
2010	容重/(g·cm ⁻³)	1.28	1.29	1.45	1.38	1.32	1.15	1.14	1.15	1.15	1.16
	凋萎湿度/%	5.4	5.7	6.0	4.9	5.3	6.1	5.4	5.4	5.6	6.5
	田间持水量/%	23.3	24.2	21.8	23.3	23.2	24.9	24.3	24.1	24.3	24.1
2020	容重/(g·cm ⁻³)	1.24	1.29	1.49	1.48	1.50	1.41	1.37	1.21	1.22	1.26
	凋萎湿度/%	5.4	4.3	4.6	5.4	5.0	4.7	5.2	6.6	5.9	4.8
	田间持水量/%	22.2	21.8	21.9	22.6	22.0	23.0	22.4	22.7	22.2	24.3

1.4 土壤水量计算方法

土壤贮水量:

$$W = h \times a \times b \times 10 / 100 \tag{1}$$

式中:W 为土壤贮水量(mm);h 为土壤厚度(cm);a 为土壤容重(g/cm³);b 为土壤含水量(%)。

贮水效率^[5]:

$$WSE = D / R \times 100 \% \tag{2}$$

式中:WSE 为土壤贮水效率(%);D 为某时期一定土层中增加的贮水量(mm);R 为同时期降水量(mm)。

2 结果与分析

2.1 休闲期降水特征

从图 1 可知,1981—2020 年黄土高原典型旱塬区冬小麦休闲期降水平均为 333 mm,以 14 mm/10 a 的速率增加,但年际间差异较大,最多年份(2003 年为 565.5 mm)降水是最少年份(1991 年 132.7 mm)的 4.3 倍。20 世纪 80 年代休闲期平均降水为 341 mm,90 年代最少,平均降水量为 259 mm,21 世纪以来降水呈持续增加趋势,其中 2001—2010 年平均降水为 357 mm,而 2011—2020 年平均降水达到近 40 a 最高值 372 mm,较 20 世纪 90 年代增加 113 mm。近 40 a 休闲期年平均降雨日数为 40 d,其中年平均小雨、中雨、大雨和暴雨日数分别为 29 d,8 d,2 d,1 d,冬小麦休闲期以小雨和中雨为主,占降雨日数的 92.4%。小

雨日数和降雨总日数呈减少趋势,中雨、大雨、暴雨日数均呈弱增加趋势。降雨强度增加是休闲期降水量增加的主要原因。

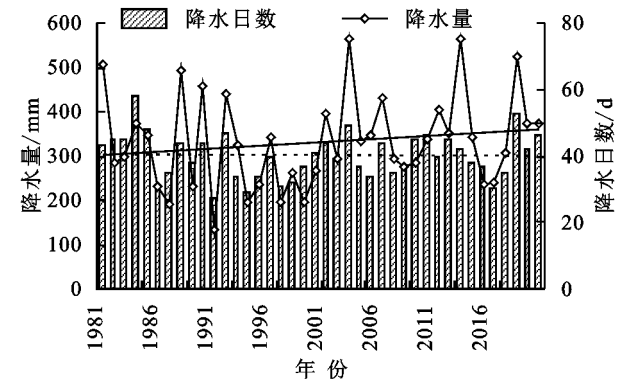


图 1 1981—2020 年休闲期降水量及降水日数

从休闲期内降水分布来看,降水基本呈“双峰型”分布(图 2),分别在 7 月下旬和 8 月下旬达到峰值,同时期降水量分布比较离散,年际间差异较大,与降水年型密切相关。休闲期前期降水(167 mm)略多于后期降水(165 mm)。

2.2 休闲期土壤贮水特征

依据每 10 年测定的土壤水文常数计算,塬区 1 m 土层土壤水分达到凋萎湿度时的土壤贮水量为 69~70.1 mm,达到田间持水量时的土壤贮水量为 291~303 mm,也就是理论上 1 m 土层贮水量最多增加 221~234 mm。由图 3 可知,1981—2020 年黄土旱

塬区冬小麦田休闲期 1 m 土层呈明显的充水过程,以 9.5 mm/10 d 的速率,贮水量平均增加 97 mm。

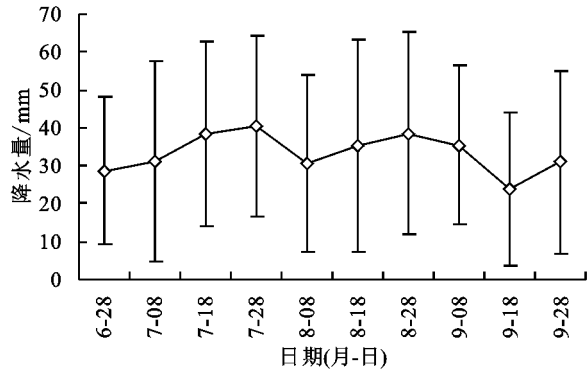


图 2 1981—2020 年休闲期不同时期平均降水量

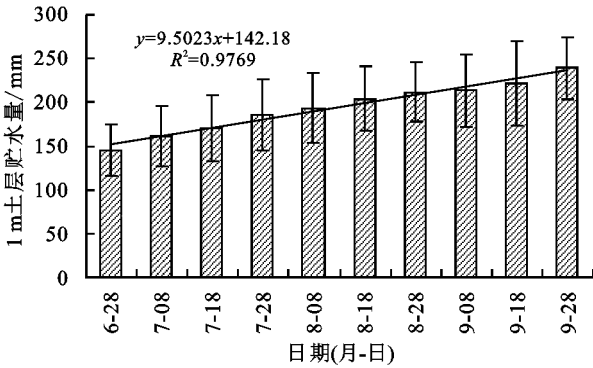


图 3 1981—2020 年休闲期不同时期 1 m 土层平均贮水增量

从图 1,图 4 可以看出,受休闲期降水年型影响,不同年际间土壤贮水增量差异较大,2003 年降水最多为 565.5 mm,休闲期 1 m 土层贮水量从 91.4 mm 增加到 310.1 mm,贮水量增加 218.7 mm,基本达到 1 m 土层贮水量增加极限;而降水最少年 1991 年(132.7 mm),休闲期前 1 m 土层贮水为 249.2 mm,休闲期结束时为 191.2 mm,消耗前期贮水 58 mm。从年代际变化看,由于 20 世纪 90 年代降水最少,休闲期贮水量平均增加 60 mm,而 21 世纪以来随着降水增加,贮水量增加明显,其中 2001—2010 年贮水量

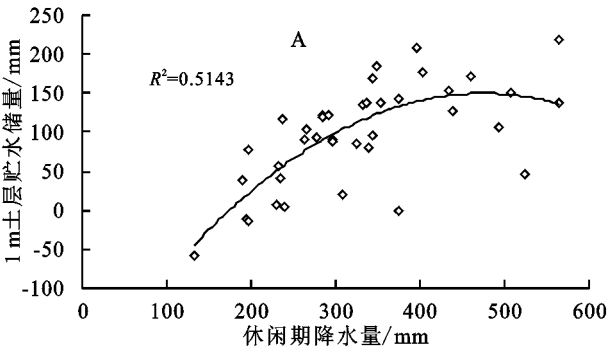


图 5 休闲期降水量(A)、中大雨日数(B)与 1 m 土层贮水增量关系

休闲期 1 m 土层土壤贮水增量不仅与休闲期降水总量关系密切,也与不同强度降水日数和降水时间分布关系较大(图 5B,表 2)。休闲期贮水增量与降

平均增加 146 mm,而近 10 a 由于降水持续增加,休闲期前土壤贮水充足,休闲期内 1 m 土层贮水量增加量有限,多余水分下渗到深层黄土中。休闲期库存的土壤水在冬小麦生长期降水不足时提供保命水,对稳定当地粮食生产起到了关键作用^[17-19]。

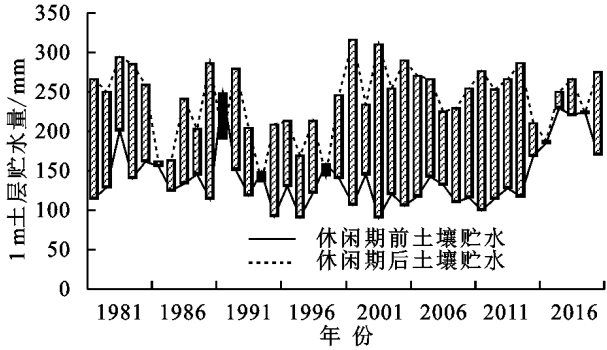
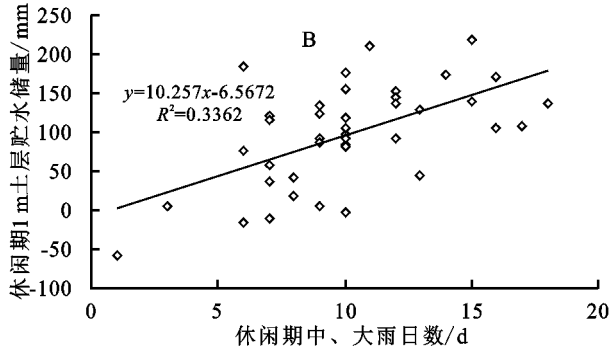


图 4 1981—2020 年休闲期 1 m 土层贮水增量

2.3 休闲期降水与土壤贮水的转化关系

大气降水是黄土高原旱塬区土壤贮水的唯一来源,降水的量级、强度及时间配置均对土壤贮水有较大影响。从近 40 a 的 1 m 土层土壤水分定位观测与同时期降水分析可知(图 5),休闲期降水与 1 m 土层土壤贮水增量的转化关系符合二元一次函数关系,决定系数达到 0.514 3。当休闲期降水量在 175 mm 时,降水较常年同期偏少 5 成左右时,土壤基本无有效水分贮存,按照水量平衡关系原理^[8,22],可认为休闲期土壤平均蒸发量为 175 mm,也可认为休闲期 1 m 土层开始贮存水分的降水阈值为 175 mm;当降水小于该值时,土壤水库通常表现为放水过程,即土壤蒸发消耗前期贮水,这种情况一般出现在极端干旱年。当休闲期降水达到 463 mm,1 m 土层贮水增加可达到理论最高值 146 mm;当休闲期降水大于 463 mm 时,贮水量随降水增加呈缓慢减少趋势,这主要与麦收后土壤墒情和土壤水分下渗有关。



水总日数显著相关,且随降水强度增加相关性增加,与中、大雨总日数相关性最高,即 25~50 mm 日降水最利于土壤贮存水分,而小于 10 mm 的降水大部分

被蒸发,不能被土壤存储;当中、大雨日数 ≥ 10 d 时,降水总日数 ≥ 40 d 时,休闲期贮水增量均在平均值以上。通过不同休闲期降水量与贮水增量的相关分

表 2 不同等级雨量日数、不同时期降水量与休闲期 1 m 土层土壤贮水量的相关性

项目	小雨日数	中雨日数	大雨日数	中大雨日数	降水总日数	前期降水量	后期降水量
贮水增量	0.2640	0.4104*	0.5619**	0.5798**	0.5171**	0.1890	0.7018**

注:*,**表示分别通过 0.01,0.05 水平显著性检验。

2.4 休闲期贮水效率及其影响因素

贮水效率表征休闲期大气降水转化为土壤水的效率特征,休闲期贮水效率主要与麦收后土壤墒情和降水总量有关,同时还与地表覆盖、耕作措施等关系密切。由于固定观测地段休闲期麦田未作任何覆盖或耕作处理,本文主要分析麦收后土壤墒情和休闲期内降水与贮水效率的关系。近 40 a 黄土典型旱塬区冬小麦田休闲期 1 m 土层土壤贮水效率为 0.27,最高可达 0.53(2005 年),最低值为-0.44(1991 年)。

从图 6A 可知,休闲期土壤贮水效率随着麦收时土壤贮水量的增加而线性递减,当麦收时 1 m 土层贮水量

析发现,前期降水和贮水增量相关性不高,后期降水和贮水增量相关性较高,说明休闲期前期降水主要以土壤蒸发消耗,后期降水则大部贮存于土壤中。

大于 215 mm 时,即大于田间持水量的 71%~74%时,贮水效率为负值;麦收时 1 m 土层贮水量小于 136 mm 时,即小于田间持水量的 45%~48%时,贮水效率较高,均在 0.3 以上。休闲期降水量与土壤贮水效率存在二次函数关系(图 6B),当休闲期降水量小于 175 mm 时,贮水效率为负值;当休闲期降水量大于 388 mm 时,1 m 土层贮水效率随降水量增加而降低,表明当休闲期降水大于 388 mm 时,降水向更深层土壤下渗,由此认为休闲期陇东黄土高原 1 m 土层土壤水分得到充分补充的降水阈值为 388 mm。

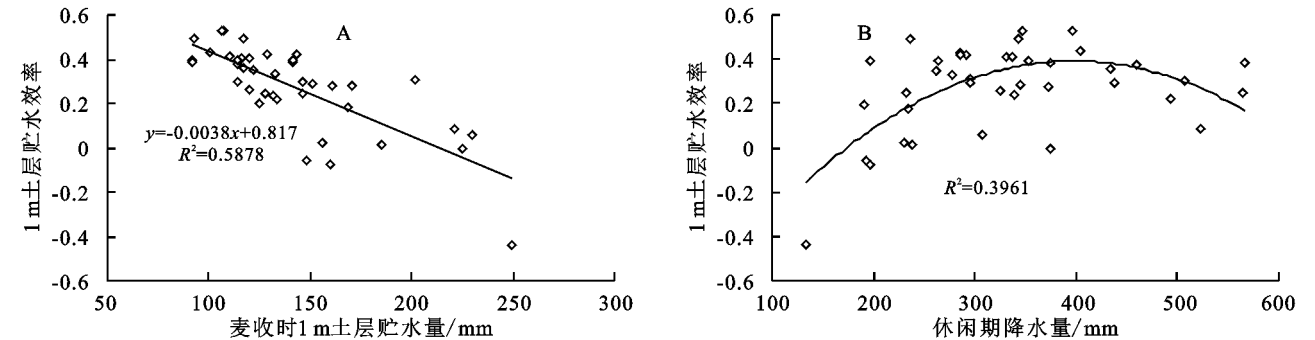


图 6 麦收时 1 m 土层贮水量、休闲期降水量与贮水效率关系

3 讨论

休闲期降水对黄土旱塬区作物生长与土壤贮水有很大影响,所以充分利用夏闲期降水尤其重要。李廷亮等^[26]指出夏闲期降水可补充晋南旱地麦田 2 m 土层冬小麦生长季所消耗的水分,贮水量随降水量增加而增加,195.7 mm 的降水量主要恢复了浅层土壤水分,357~400 mm 的降水量恢复了 0—120 cm 土层土壤水分。廖允成等^[27]研究表明,黄土旱塬夏闲期降水量超过 350 mm 时,可使 2 m 土层土壤水分得到较好恢复。刘朋召等^[18]利用渭北旱塬区连续 3 a 冬小麦定位试验研究表明,休闲期降雨与播前底墒呈线性相关,每增加 1 mm 夏季降雨,2 m 土层底墒增加 0.9 mm,冬小麦籽粒产量与休闲期降雨相关性最高。本研究结果表明,休闲期降水量与 1 m 土层贮水增量存在二次函数关系,贮水增量随着降水增加而增加,降水增幅达到一定程度,贮水增量变小,1 m 土层开始贮存水分的降

水阈值为 175 mm,土壤水分得到充分补充的降水阈值为 388 mm。研究结果趋势基本一致,差异主要与样本资料时序长短和土层厚度不同有关。

休闲期贮水效率与麦收后土壤墒情和休闲期降水总量关系密切。王全九等^[28]研究表明,收获期土壤水分亏缺度在 43.68%~52.63%之间时土壤水分的补给系数较高(51.84%~67.42%),且二者存在良好的幂函数关系。本研究表明,休闲期土壤贮水效率随着麦收时土壤贮水量的增加而线性递减,当麦收时 1 m 土层贮水量小于田间持水量的 45%~48%时,贮水效率较高,整体趋势比较吻合。李廷亮等^[26]研究表明晋南旱地 2009—2011 年麦田 2 m 土层休闲效率为 6%~27%,本研究结果为陇东黄土高原近 40 a 夏季休闲期平均土壤贮水效率为 0.27,变化幅度在-0.44~0.53之间,研究结果较为一致。

休闲期降水对黄土高原冬小麦生产至关重要,如何保蓄天上水,合理用好地下水,是确保旱作冬小麦

可持续生产的关键。许多学者在休闲期地表覆盖^[29]、耕作措施^[30-31]和水肥管理等^[18,32]方面做了大量试验研究^[29-32],研究结果均表明,通过一定的覆盖栽培模式、耕作模式、施肥模式,对土壤蓄水保墒及小麦水分利用效率提高均有显著影响,而这些措施效果均与休闲期降水关系密切。本研究利用陇东黄土高原旱作麦田 40 a 定位观测,分析降水量级、强度及时间配置与土壤贮水的关系,以期为各种覆盖、耕作和水肥管理措施的应用能提供一定的理论支撑。

4 结论

(1) 近 40 a 陇东黄土高原休闲期降水以 14 mm/10 a 的速率增加,但年际间差异较大。降雨总日数和小雨日数呈减少趋势,中雨、大雨日数呈弱增加趋势。降雨强度增加对休闲期降水量增加的贡献较大。

(2) 休闲期 1 m 土层呈明显的充水过程,以 9.5 mm/10 d 的速率增加,贮水量平均增加 97 mm,受休闲期降水年型影响,不同年际间差异较大。从年代际变化看,20 世纪 90 年代降水最少,休闲期贮水增量最少,而 21 世纪以来随着降水增加,贮水量增加明显。

(3) 休闲期降水与 1 m 土层土壤贮水量的转化关系符合二次函数关系模型,休闲期 1 m 土层开始贮存水分的降水阈值为 175 mm,当休闲期降水达到 463 mm 时,1 m 土层贮水增量可达到理论最高值 146 mm。贮水增量与降水总日数显著相关,与中、大雨总日数相关性最高。休闲期前期降水主要以土壤蒸发消耗,后期降水则大部贮存于土壤中。

(4) 近 40 a 黄土旱塬区冬小麦田休闲期 1 m 土层贮水效率为 0.27,主要与麦收后土壤墒情和降水总量有关。贮水效率随着麦收时土壤贮水量的增加而线性递减,当麦收时 1 m 土层贮水量小于 136 mm 时,即小于田间持水量的 45%~48%时,贮水效率较高;休闲期降水量与土壤贮水效率也存在二次函数关系,1 m 土层土壤水分得到充分补充的降水阈值为 388 mm。

参考文献:

- [1] 张强,姚玉璧,李耀辉,等.中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J].气象学报,2020,78(3):500-521.
- [2] Sun W Y, Mu X M, Song X Y, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960—2013 under global warming[J]. Atmospheric Research, 2016,168:33-44.
- [3] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- [4] 邓振镛,张强,王强,等.黄土高原旱作区土壤贮水力和

农田耗水量对冬小麦水分利用率的影响[J].生态学报,2010,30(14):3672-3678.

- [5] 贾建英,赵俊芳,万信,等.黄土高原不同降水区休闲期土壤贮水效率及其对冬小麦水分利用的影响[J].生态学报,2017,37(17):5704-5712.
- [6] 李鹏展,王力,王棣.黄土旱塬区冬小麦土壤水库动态[J].应用生态学报,2017,28(11):3653-3662.
- [7] 安善涛,焦磊,梁伟,等.基于多元数据的黄土高原陆地水循环结构变化分析[J].生态学报,2021,41(17):6800-6813.
- [8] 张瑞,李鹏展,王力.黄土旱塬区土壤水分状况与作物生长、降水的关系[J].应用生态学报,2019,30(2):359-369.
- [9] 贾建英,刘蓉,韩兰英,等.修订后水分盈亏指数在甘肃省冬小麦干旱监测中的应用[J].干旱区地理,2020,43(4):871-879.
- [10] 贾建英,韩兰英,万信,等.甘肃省冬小麦干旱灾害风险评估及其区划[J].干旱区研究,2019,36(6):1478-1486.
- [11] Wang S Y, Huo Z G, Li S K, et al. Risk regionalization of winter wheat loss caused by drought in North of China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005,31(3):267-274.
- [12] 罗俊杰,黄高宝.底墒对旱地冬小麦产量和水分利用效率的影响研究[J].灌溉排水学报,2009,28(3):102-111.
- [13] 罗俊杰,王勇,樊廷录.旱地不同生态型冬小麦水分利用效率对播前底墒的响应[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):61-71.
- [14] 程立平,刘文兆.黄土塬区不同土层土壤水分对旱作冬小麦耗水的贡献[J].应用生态学报,2017,28(7):2285-2291.
- [15] 李超,刘文兆,林文,等.黄土塬区冬小麦产量及水分利用效率对播前底墒变化与生育期差别供水的响应[J].中国农业科学,2017,50(18):3549-3560.
- [16] Guo S L, Zhu H H, Dang T H, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China[J]. Geoderma, 2012,189/190:442-450.
- [17] He G, Wang Z H, Li F C, et al. Soil water storage and winter wheat productivity affected by soil surface management and precipitation in dryland of the Loess Plateau China [J]. Agricultural Water Management, 2016,171:1-9.
- [18] 刘朋召,周栋,郭星宇,等.不同降雨年型旱地冬小麦水分利用及产量对施氮量的响应[J].中国农业科学,2021,54(14):3065-3076.
- [19] 崔亚强,朱元骏.黄土塬区降水变化条件下冬小麦田土壤水分消耗与补给[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):158-164.
- [20] 倪盼盼,朱元骏,巩铁雄.黄土塬区降水变化对冬小麦土壤耗水特性及水分利用效率的影响[J].干旱地区农

业研究,2017,35(4):80-87.

[21] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):513-520.

[22] 丛振涛.冬小麦生长与土壤—植物—大气连续体水热迁移的耦合研究[M].北京:清华大学出版社,2003.

[23] 王润元,杨兴国,张九林.陇东黄土高原土壤贮水量与蒸发和气候研究[J].地球科学进展,2007,22(6):625-635.

[24] 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.

[25] Schwinning S, Sala O E, Loik M E, et al. Thresholds, memory, and seasonality: Understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems[J]. Oecologia, 2004,141(2):191-193.

[26] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等.晋南旱地麦田夏闲期土壤水分和养分变化特征[J].应用生态学报,2013,24(6):1601-1608.

[27] 廖允成,韩思明,温晓霞.黄土台源旱地小麦土壤水分特征及水分利用效率研究[J].中国生态农业学报,2002,10(3):55-58.

[28] 王全九,柴晶,王翔翔.夏闲期降水对黄土旱塬冬小麦水氮利用效率的影响[J].农业工程学报,2015,31(24):82-88.

[29] 邓妍,高志强,孙敏,等.夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J].应用生态学报,2014,25(1):132-138.

[30] 侯贤清,李荣,韩清芳,等.夏闲期不同耕作模式对土壤贮水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2012,28(3):94-100.

[31] 孙敏,温斐斐,高志强,等.苗果园.不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J].作物学报,2014,40(8):1459-1469.

[32] 薛澄,王朝辉,李富翠,等.渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响[J].中国农业科学,2011,44(21):4395-4405.



(上接第 96 页)

[12] 朱楠,马超,王云琦,等.基于 SWAT 模型的不同土地利用结构对流域水沙的影响[J].中国水土保持科学,2016,14(4):105-112.

[13] 李颖曼,焦鹏,张晓华.宁夏清水河流域近 60 年降水量及入黄沙量变化[J].水土保持研究,2021,28(2):184-189.

[14] 李帅,魏虹,刘媛,等.气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J].生态学报,2017,37(4):1252-1260.

[15] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W. SWAT: model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012,55(4):1491-1508.

[16] 武海喆,刘登峰,黄强,等.不同潜在蒸发估算方法对黄土高原渭河径流模拟的影响研究[J].人民珠江,2020,41(10):36-43,65.

[17] 李颖,王康,周祖昊.基于 SWAT 模型的东北水稻灌区水文及面源污染过程模拟[J].农业工程学报,2014,30(7):42-53.

[18] 孟现勇,吉晓楠,刘志辉.SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J].自然资源学报,2014,29(3):528-539.

[19] 王磊,刘亭亭,谢建治.基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J].水土保持研究,2019,26(4):245-251.

[20] 毕直磊,张妍,张鑫,等.土地利用和农业管理对丹江流域非点源氮污染的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):135-141.

[21] 邵辉,高建恩,Claire Baffaut.基于 SWAT 模型新开发梯田模块的中国南方红壤区梯田水沙及养分流失模拟[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(5):147-156.