

DOI: 10.5846/stxb201606061081

贾建英, 赵俊芳, 万信, 韩兰英, 王小巍, 梁芸, 申恩青. 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. 生态学报, 2017, 37(17): 5704-5712.

Jia J Y, Zhao J F, Wan X, Han L Y, Wang X W, Liang Y, Shen E Q. Effects of soil water storage efficiency on winter wheat water use efficiency in different precipitation areas during the fallow period in the Loess Plateau, western China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5704-5712.

## 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

贾建英<sup>1,\*</sup>, 赵俊芳<sup>2</sup>, 万信<sup>1</sup>, 韩兰英<sup>1</sup>, 王小巍<sup>1</sup>, 梁芸<sup>1</sup>, 申恩青<sup>1</sup>

1 西北区域气候中心, 兰州 730020

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘要:** 土壤贮水是影响黄土高原冬小麦生产力的最重要因素, 分析休闲期贮水效率对有效利用水资源具有重要意义。利用黄土高原旱作区 4 个农业气象观测站土壤水分长期观测资料和冬小麦产量资料, 探讨了不同气候区休闲期土壤贮水和耗水特征及对冬小麦水分利用的影响。结果表明: (1) 黄土高原旱作区休闲期 1 m 土层多年平均贮水量半湿润区为 91 mm, 贮水效率为 30.7%, 半干旱区为 32 mm, 贮水效率为 16.5%, 且不同降水年型、不同气候区休闲期贮水量和贮水效率差别较大; (2) 黄土高原旱作区 1 m 土层贮水量从土壤解冻至封冻期间基本呈波谷型分布, 休闲期为主要贮水阶段, 冬小麦返青—开花期为休闲期贮水的主要消耗阶段。半湿润区休闲期土壤贮水量主要消耗在起身至开花期, 半干旱区主要消耗在越冬至拔节期; (3) 黄土高原旱作区播种—越冬前消耗 0—40 cm 土层贮水, 越冬—起身期各土层贮水量都有消耗, 起身—开花期半湿润区主要消耗 0—40 cm 土层贮水量、半干旱区主要消耗 0—60 cm 土层贮水量, 开花—成熟期半湿润区主要消耗 40 mm 以下土层贮水量、半干旱区主要消耗 60 cm 以下土层贮水量; (4) 黄土高原休闲期贮水效率与冬小麦产量显著相关, 半湿润区水分利用效率远高于半干旱区。黄土高原不同区域降水时空分布不均和土壤贮水能力的差异是造成不同气候区休闲期水分贮存差异的主要原因, 通过调整耕作方式、水肥管理、种植结构进一步实现冬小麦增产和水分高效利用。

**关键词:** 黄土高原; 休闲期; 土壤贮水; 冬小麦; 水分利用效率

## Effects of soil water storage efficiency on winter wheat water use efficiency in different precipitation areas during the fallow period in the Loess Plateau, western China

JIA Jianying<sup>1,\*</sup>, ZHAO Junfang<sup>2</sup>, WAN Xin<sup>1</sup>, HAN Lanying<sup>1</sup>, WANG Xiaowei<sup>1</sup>, LIANG Yun<sup>1</sup>, SHEN Enqing<sup>1</sup>

1 Northwest Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract:** Soil water storage is the primary factor affecting crop productivity in the Loess Plateau in western China. It is important to analyze soil water storage efficiency in the fallow period for utilizing water resources efficiently. In the present study, we collected data on soil water content and winter wheat production over multiple years from four agronomic observatory stations located in semi-arid and semi-humid areas. We also analyzed the effects of soil water storage and consumption in the fallow period on winter wheat water use efficiency and yield in different precipitation areas of the Loess Plateau. The results showed that: (1) in semi-humid and semi-arid areas, the average soil water storage and efficiency in

**基金项目:** 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506016); 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406036); 甘肃省气象局气象科研项目(2015-14)

**收稿日期:** 2016-06-06; **网络出版日期:** 2017-04-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiajianying2014@163.com

the fallow period were 91 mm (30.7%) and 32 mm (16.5%) in 1 m depth, respectively, which were very different in different rainfall years. (2) The soil water storage in 1 m depth was trough type distribution from the soil thawed to frozen. The storage was mainly consumed in the fallow period and from standing to flowering in semi-humid areas and from over wintering to jointing in semi-arid areas. (3) Soil water storage in the fallow period of the Loess Plateau was consumed in 0—40 cm depth during the seeding period and was consumed in 1 m depth from over wintering to standing. In semi-humid areas, the storage was mainly consumed in 0—40 cm depth from standing to flowering and below 40 cm depth from flowering to maturity. In semi-arid areas, the storage was mainly consumed in 0—60 cm depth from standing to flowering and below 60 cm depth from flowering to maturity. (4) Soil water storage efficiency in the fallow period was significantly correlated with yield of winter wheat. In semi-humid areas, water use efficiency of winter wheat was higher than that in semi-arid areas. The difference of soil water storage in the fallow period in different climate regions of the Loess Plateau was due to uneven spatial and temporal distribution of precipitation and different soil water storage capacity by adjusting the modes of farming, water and fertilizer management, and planting structure to further increase winter wheat yield and water use efficiency.

**Key Words:** Loess Plateau; fallow period; soil water storage; winter wheat; water use efficiency

黄土高原位于中国中部偏北,横跨青、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫 7 省区,是中国传统的旱作农业区。黄土高原属(暖)温带(大陆性)季风气候,气候较干旱,降水时空分布不均,年平均降水量约为 200—600 mm,且主要集中在夏秋季<sup>[1-2]</sup>。黄土高原土层厚度在 50—80 m 之间,黄土颗粒细,土质松软,是天然的“土壤水库”<sup>[3-5]</sup>,深厚的黄土覆盖为降水资源转化为土壤水分创造了得天独厚的条件<sup>[6-8]</sup>,研究夏秋季黄土高原土壤贮水能力及水分利用特征对有效利用水资源及科学管理有重要意义。

冬小麦是甘肃主要粮食作物之一,分散种植于陇东黄土高原、陇西黄土高原和陇南徽成盆地,其区域横跨半干旱区、半湿润区和湿润区,干旱是最主要的影响因素<sup>[8-9]</sup>。Su 等<sup>[10]</sup>研究表明作物生育期的耗水量一部分来自播前土壤水分,一部分来自生育期降水。Casa 等<sup>[11]</sup>研究表明种植时土壤水分对冬小麦水分利用效率有一定的影响。一些研究者也就黄土高原土壤水分下渗<sup>[12-14]</sup>、蒸发<sup>[15-16]</sup>以及休闲期不同耕作模式<sup>[17-21]</sup>、不同水肥耦合处理<sup>[22-26]</sup>等措施对翌年旱作区冬小麦贮水增产效应进行了研究。李德帅等<sup>[13]</sup>利用 2010 年全年的观测资料,对陇中黄土高原半干旱区土壤水分的年变化和日变化特征进行了研究。邓振镛等<sup>[4-5]</sup>研究认为黄土高原冬小麦全生育期降水量只能满足耗水量的 65%—95%,有 5%—35%的耗水量是从播前土壤贮水量补给的。因此,土壤贮水量是该区域冬小麦生产力最重要因素之一。罗俊杰等<sup>[27-28]</sup>通过夏季休闲期模拟底墒试验得出,播前底墒对陇东旱作农业区冬小麦产量和水分利用效率有显著的影响,通过提高底墒,对于稳定产量有较大贡献。侯贤清等<sup>[18]</sup>通过试验研究表明,夏休闲期保护性耕作模式改善了麦田的土壤水分状况,且显著提高作物产量和水分利用效率。王全九等<sup>[22]</sup>利用不同的水肥耦合处理试验,研究了不同水肥耦合处理下夏休闲期降水对土壤水分补给量以及对翌年作物耗水量、水分利用效率、产量等的影响。以上结果均是在特定区域位点、特定时间取得,而利用长时间序列土壤水分观测资料,针对黄土高原不同气候区休闲期土壤贮水规律及对冬小麦水分利用影响的研究则较少。本文利用黄土高原不同气候区 4 个农业气象试验(观测)站土壤水分长期观测资料,探讨了休闲期土壤贮水和耗水特征及对冬小麦水分利用的影响,以为黄土高原水资源的有效利用和科学管理提供理论依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料及来源

根据年降水量对当地农业满足程度划分水分气候区的标准<sup>[3]</sup>,本文选择黄土高原旱作区半干旱区(年降水量 300—450 mm)、半湿润区(年降水量 450—600 mm)气候区的 4 个冬小麦农业气象试验(观测)站固定观

测地段 1 m 土层实测土壤水分数据,所选测站环县(农业气象观测站,年降水量 409.2 mm)、通渭(农业气象观测站,年降水量 390.6 mm)定为半干旱区,西峰(农业气象试验站,年降水量 527.2 mm)、麦积(农业气象试验站,年降水量 503.3 mm)定为半湿润区,4 个测站均位于黄土高原的甘肃省境内。测定时间:西峰、麦积为 1981—2014 年,环县为 1982—1997 年(1997 年以后,观测地段改种其他作物),通渭为 1984、1985、1990、1991、1993—1996、1998、2004、2010—2012 年(该固定观测地段在其他年份改种其他作物)。

4 测站冬小麦平均发育期资料来源于 4 个农业气象试验(观测)站 1981—2014 年冬小麦发育期观测资料,为了与土壤水分观测日期相对应,均按逢 8 舍入为准(表 1),产量资料来源于《甘肃省农村统计年鉴》。

表 1 4 测站冬小麦平均生育期

Table 1 Average developmental stages of winter wheat at 4 observatory stations

观测站 Observatory station	播种 Sowing	越冬 Overwinter	返青 Reviving	起身 Beginning to grow	拔节 Jointing	开花 Flowering	成熟 Mature
环县	9 月 28 日	11 月 18 日	3 月 18 日	4 月 8 日	4 月 28 日	5 月 28 日	6 月 28 日
通渭	9 月 28 日	11 月 18 日	3 月 28 日	4 月 18 日	5 月 8 日	6 月 8 日	7 月 18 日
西峰	9 月 18 日	11 月 18 日	3 月 8 日	3 月 28 日	4 月 28 日	5 月 28 日	6 月 28 日
麦积	10 月 8 日	12 月 8 日	2 月 18 日	3 月 8 日	4 月 8 日	5 月 8 日	6 月 18 日

## 1.2 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),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(%)。

## 1.3 研究方法

$$\text{土壤贮水量: } W = h \times a \times b \times 10 / 100 \quad (1)$$

式中,  $W$  为土壤贮水量(mm);  $h$  为土壤厚度(cm);  $a$  为土壤容量( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $b$  为土壤含水量(%)。

$$\text{贮水效率}^{[18]}: \text{WSE} = D / R_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $\text{WSE}$  为土壤贮水效率(%);  $D$  为某时期一定土层中增加的贮水量(mm);  $R_1$  为同时期降水量(mm)。

$$\text{土壤水分变化速率: } \text{WCV} = C / T \quad (3)$$

式中,  $\text{WCV}$  为土壤水分变化速率( $\text{mm}/\text{d}$ ),当  $\text{WCV} > 0$  时为土壤贮水过程,  $\text{WCV} < 0$  时为土壤耗水过程;  $C$  为某时期一定土层中贮水变化量(mm);  $T$  为同时期的天数(d)。

$$\text{水分利用效率}^{[19]}: \text{WUE} = Y / ET = Y / (R_2 + \Delta W) \quad (4)$$

式中,  $\text{WUE}$  为水分利用效率( $\text{kg hm}^{-2} \text{mm}^{-1}$ );  $Y$  为小麦产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $ET$  为作物全年耗水量(mm);  $R_2$  为生育期降水量(mm);  $\Delta W$  为计算时段内土壤贮水量的变化(mm)。

$$\text{贮水量消耗百分率: } \text{WCP} = S / W_0 \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $\text{WCP}$  为某时期冬小麦对休闲期土壤贮水量消耗百分率(%);  $S$  为某时期一定土层中减少的贮水量(mm);  $W_0$  为休闲期土壤贮水量(mm)。

$$\text{贮水量占耗水量百分率: } \text{WSP} = S / ET_1 \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $\text{WSP}$  为某时期冬小麦对休闲期土壤贮水消耗量占同时期冬小麦总耗水量的百分率(%);  $ET_1$  为同时期冬小麦耗水量(mm),方法与式(4)中  $ET$  相同。

## 2 结果与分析

### 2.1 休闲期降水对黄土高原不同气候区土壤贮水的影响

#### 2.1.1 休闲期黄土高原降水特征分析

从 4 测站观测年冬小麦休闲期、不同发育时期及全生育期多年平均降水量来看(图 1),西峰、通渭 2 测站

休闲期降水与冬小麦全生育期降水相当,分别占全年降水量的 49.8%、50.6%;麦积、环县 2 测站休闲期降水分别显著多于全生育期降水 128、60 mm,分别占全年降水量的 62.4%、57.0%。降水的季节分配与冬小麦生长发育时段不匹配,导致休闲期降水对黄土高原旱作区冬小麦生产至关重要。

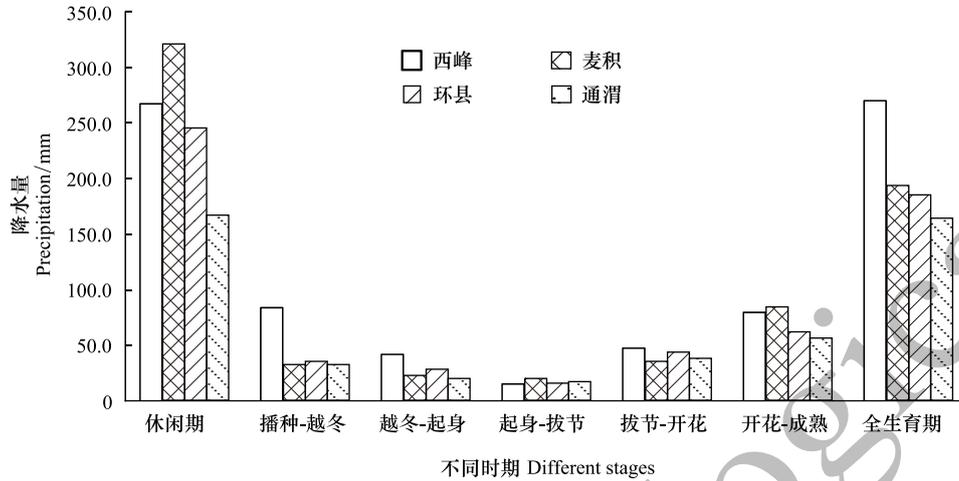


图 1 4 测站冬小麦不同时期平均降水量

Fig.1 Average precipitation of winter wheat different stages at 4 observatory stations

2.1.2 不同降水年型对休闲期 1m 土层贮水的影响

休闲期 1 m 土层多年平均贮水量半湿润区为 91 mm,贮水效率为 30.7%;而半干旱区为 32 mm,贮水效率为 16.5%。不同气候区、不同降水年型(降水偏多年降水距平百分率  $\geq 20\%$ ,降水偏少年降水距平百分率  $\leq -20\%$ ,降水正常年介于两者之间)休闲期贮水量和贮水效率差别较大(表 2)。

表 2 不同气候区不同降水年型休闲期降水利用状况

Table 2 Utilization of rainfall in fallow period under different annual rainfall levels in different climate regions

气候区 Climate region	测站 Observatory station	降水年型 Type of annual rainfall	休闲期降水量/mm Precipitation during fallow period	休闲期贮水量/mm Soil water storage during fallow period	休闲期贮水效率/% Soil water storage efficiency during fallow period
半湿润区 Sub humid region	西峰	降水偏多年	348.4	124.1	37.3
		降水偏少年	185.9	13.7	21.4
		降水正常年	265.3	91.4	32.3
半干旱区 Sub arid region	麦积	降水偏多年	473.2	173.7	37.8
		降水偏少年	194.4	43.7	21.0
		降水正常年	311.4	85.6	26.1
	环县	降水偏多年	386.2	110.9	28.4
		降水偏少年	82.4	-64.0	-71.2
		降水正常年	219.5	31.8	14.5
通渭	降水偏多年	226.7	36.6	16.3	
	降水偏少年	140.8	15.4	10.4	
	降水正常年	148.4	21.2	14.1	

(1)半湿润区,降水偏多年休闲期贮水量平均为 148.9 mm,贮水效率为 37.5%;降水偏少年休闲期贮水量仅为 28.7 mm,贮水效率为 21.2%;降水正常年介于两者之间,贮水量和贮水效率分别为 88.5 mm、29.2%。(2)半干旱区:2 测站间不同降水年型差别也较大,降水偏多年休闲期贮水量环县和通渭分别为 110.0、36.6 mm,贮水效率分别为 28.4%、16.3%;降水偏少年休闲期贮水量环县为-64.0 mm,即休闲期降水量小于蒸发,

贮水效率为-71.2%,通渭贮水量和贮水效率分别为 15.4 mm、10.4%;降水正常年环县贮水量和贮水效率分别为 31.8 mm、14.5%,通渭贮水量和贮水效率分别为 21.2 mm、14.1%。

2.2 休闲期土壤贮水与冬小麦耗水的关系

2.2.1 黄土高原不同气候区 1 m 土层贮水量变化特征分析

黄土高原半湿润区从土壤解冻至封冻期间 1 m 土层贮水量基本呈波谷型分布(图 2):从冬小麦返青起身至拔节前,贮水量以 0.54 mm/d 的速率逐渐减少,拔节至开花期随着冬小麦需水量增加,1 m 土层贮水量以 1.1 mm/d 的速率迅速减少,开花至成熟期以 0.27 mm/d 的速率缓慢减少,休闲期是土壤贮水的关键时期,贮水量平均以 0.97 mm/d 速率不断增加,为冬小麦的生长发育蓄足水分,播种至越冬前自然降水基本满足冬小麦所需水分,土壤贮水量与播种前变化不大。

而半干旱区代表测站土壤解冻至封冻期间 1 m 土层贮水量变化曲线呈不明显的波谷型分布,且两代表测站变化特征有所不同:环县返青至拔节期贮水量以 0.12 mm/d 的速率减少,拔节至开花期以 0.52 mm/d 的速率减少,开花至成熟期以 0.15 mm/d 的速率减少,休闲期 1 m 土层贮水量则以 0.42 mm/d 的速率增加,播种至越冬前贮水量变化不明显;通渭返青至起身期贮水量以 0.13 mm/d 的速率减少,起身至拔节期以 0.60 mm/d 的速率减少,而拔节至成熟期则以 0.10 mm/d 的速率增加,休闲期贮水速率为 0.38 mm/d,播种至越冬前贮水量变化也不明显。

由此可见,黄土高原休闲期土壤贮水对冬小麦整个生育期都有重要作用,当自然降水不能满足冬小麦需水量时,土壤贮水就如地下水不断输送水分满足冬小麦生长所需水分。

2.2.2 休闲期 1 m 土层贮水对不同生育阶段冬小麦耗水的贡献

当冬小麦某一发育阶段自然降水不能满足作物需水量时,黄土高原休闲期土壤贮水能及时补给冬小麦所需水分,因而对黄土高原冬小麦不同生育阶段都有重要作用,且不同发育阶段贡献不同(表 3)。

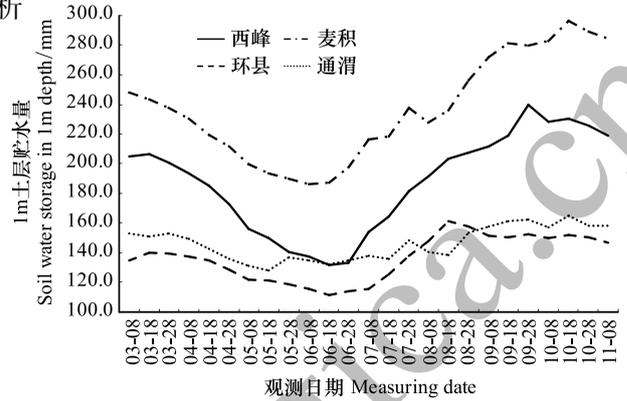


图 2 4 测站 3 月 8 日—11 月 8 日 1 m 土层多年平均贮水量  
Fig.2 Average soil water storage in 1m depth from Mar 8 to Nov 8 at 4 observatory stations

表 3 4 测站贮水量不同发育时段耗水百分率及对冬小麦的贡献

Table 3 Effect of soil water consumption percentage on winter-wheat in different developmental stages at 4 observatory stations

气候区 Climate region	测站 Observatory station	播种-越冬 Sowing-overwinter		越冬-起身 Overwinter-beginning to grow		起身-拔节 Beginning to grow-jointing		拔节-开花 Jointing-flowering		开花-成熟 Flowering-mature	
		WCP/%	WSP/%	WCP/%	WSP/%	WCP/%	WSP/%	WCP/%	WSP/%	WCP/%	WSP/%
半湿润区 Sub-humid region	西峰	0.2	0.2	20.9	29.8	18.3	50.3	41.1	42.4	19.5	17.2
	麦积	-1.2	-3.7	37.6	61.7	18.6	47.6	32.2	46.4	12.8	12.7
半干旱区 Sub-arid region	环县	14.8	13.6	23.4	23.7	24.4	37.8	25.4	18.1	12.0	6.8
	通渭	15.9	11.2	33.3	30.1	68.4	51.3	-13.2	-10.2	-4.3	-2.1

WCP: 冬小麦对休闲期土壤贮水量消耗百分率; WSP: 冬小麦对休闲期土壤贮水消耗量占同时期冬小麦总耗水量的百分率

半湿润区休闲期土壤贮水量大、贮水效率高,贮水量主要消耗在起身至开花期,且在此阶段贮水量占该生育阶段冬小麦耗水量的一半左右:播种至越冬前 2 测站基本不消耗休闲期贮水量,麦积测站还能盈余部分降水贮存在土壤中;越冬至起身期麦积测站由于降水少,冬小麦耗水量 61.7% 来源于休闲期贮水,共消耗休闲期贮水量的 37.6%,西峰测站消耗休闲期贮水量的 20.9%,占该阶段冬小麦耗水量的 29.8%;起身至拔节期是黄土高原少雨时段,易发生春旱,2 测站冬小麦 50% 左右耗水依赖于休闲期土壤贮水;拔节至开花期是冬小麦需水关键时期,也是全生育期耗水量的最大阶段,黄土高原半湿润区降水量逐渐增多,但依旧不能满足冬小麦需

水量,42%—46%的水分依赖于休闲期的贮水量,共消耗休闲期贮水量的32%—41%;开花至成熟期消耗休闲期贮水量的12%—20%,占该阶段冬小麦耗水量的12%—17%。

半干旱区休闲期土壤贮水量相对少、贮水效率低,主要消耗在越冬至拔节期:播种至越冬前,消耗休闲期贮水量15%左右;越冬至起身期,冬小麦耗水量23%—30%来源于休闲期贮水,共消耗休闲期贮水量的23%—33%;起身至拔节期通渭测站冬小麦耗水量51.3%依赖于休闲期贮水量,共消耗休闲期贮水量的68.4%,环县测站消耗休闲期贮水量的24.4%,占该阶段冬小麦耗水量的37.8%;拔节—开花期、开花—成熟期,环县测站分别消耗休闲期贮水量25.4%、12%,分别占该阶段冬小麦耗水量的18.1%、6.8%,通渭测站由于生育期偏晚,拔节普遍进入夏季相对多雨时段,且本身休闲期贮水量已基本消耗殆尽,所以冬小麦拔节至成熟期所需水量主要依赖于自然降水。

### 2.2.3 休闲期不同土层土壤贮水与冬小麦不同生育阶段耗水的关系

半湿润区冬小麦不同发育时期,不同土层土壤水分变化特征为(图3,4):休闲期平均以0.21 mm/d速率贮水,20—40 cm土层贮水量最多,40 cm以下土层贮水量逐层递减;播种—越冬前,0—40 cm土层为水分消耗阶段,40 cm以下土层仍为贮水阶段,且随土层加深贮水量逐层增多,平均贮水速率为0.03 mm/d;越冬—起身期各土层平均以0.03 mm/d速率消耗休闲期贮水;起身—开花期为休闲期贮水量的主要消耗阶段,起身—拔节期、拔节—开花期各土层分别以0.32、0.23 mm/d速率消耗贮水;开花—成熟期主要消耗40 mm以下土层贮水量,平均消耗速率为0.12 mm/d,伴随降水量的增多,0—20 cm土层开始贮水,20—40 cm土层基本维持水分供需平衡。

半干旱区冬小麦不同发育时期,不同土层水分变化特征则表现为(图5,图6):休闲期平均以0.08 mm/d速率贮水,40—60 cm土层贮水量相对最多;播种—越冬前,主要以0—40 cm土层耗水为主,平均消耗速率为0.06 mm/d;越冬—起身期平均消耗速率为0.01 mm/d,起身—拔节期主要消耗0—60 cm土层贮水量,平均消耗速率为0.14 mm/d,拔节—开花期各土层平均消耗速率为0.07 mm/d;开花—成熟期平均消耗速率为0.03 mm/d,伴随降水量的增多,0—20 cm土层开始贮水。

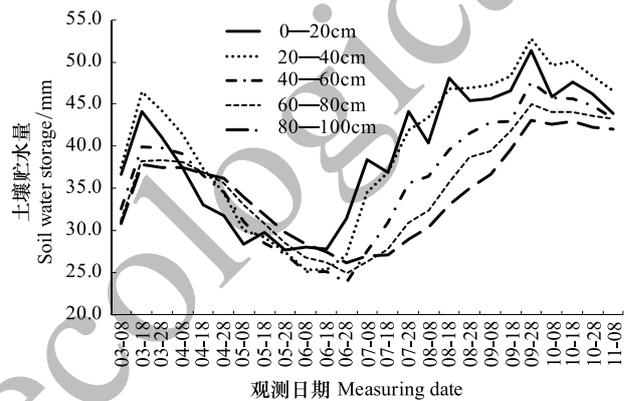


图3 半湿润区(西峰测站)3月8日—11月8日不同土层多年平均贮水量

Fig.3 Average soil water storage in different depths from Mar 8 to Nov 8 in Sub-humid areas

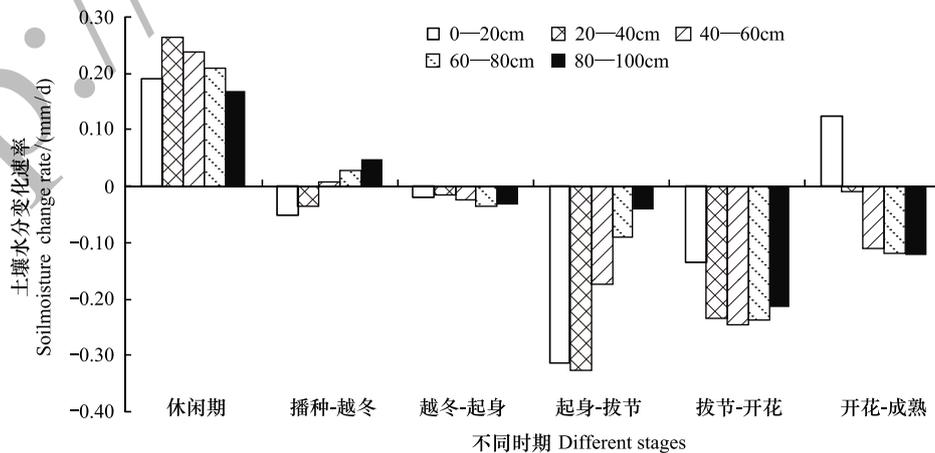


图4 半湿润区(西峰测站)冬小麦不同时期不同土层多年平均土壤水分变化速率

Fig.4 Average soil moisture change rate of winter wheat different stages in different depths in Sub-humid areas

**2.4 休闲期贮水与不同气候区冬小麦水分利用效率和产量的关系**

由于降水时空差异和土壤持水性的不同,不同气候区冬小麦全生育期耗水量不同,因而休闲期贮水占冬小麦耗水百分率、水分利用效率也不同(表4):半湿润区休闲期贮水占冬小麦全生育期耗水量的24%—32%,水分利用效率为7.16—9.73 kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>;半干旱区休闲期贮水占冬小麦全生育期耗水量的13—17%,水分利用效率为3.37—3.93 kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>。半湿润区休闲期贮水量占冬小麦耗水百分率、水分利用效率均远高于半干旱区。休闲期贮水效率与黄土高原冬小麦产量存在显著相关性,因此在冬小麦产量预报等业务服务中,须将休闲期降水考虑进去。

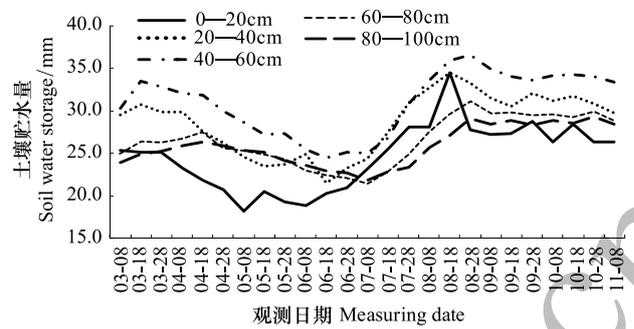


图5 半干旱区(环县测站)3月8日—11月8日不同土层多年平均贮水量

Fig.5 Average soil water storage in different depths from Mar 8 to Nov 8 in Sub-arid areas

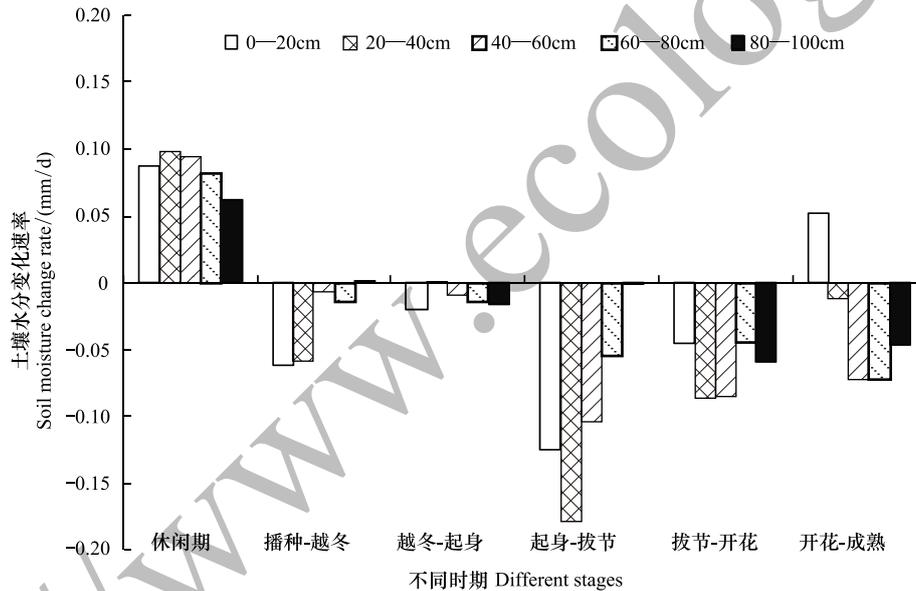


图6 半干旱区(环县测站)冬小麦不同时期不同土层多年平均土壤水分变化速率

Fig.6 Average soil moisture change rate of winter-wheat different stages in different depths in Sub-arid areas

表4 休闲期贮水与冬小麦水分利用和产量的关系

Table 4 Effects of soil water storage in fallow period on winter wheat water use efficiency and yield

气候区 Climate region	测站 Observatory station	休闲期贮水占冬小麦 耗水百分率 Soil water storage in fallow period accounting of winter- wheat water consumption/%	水分利用效率 WUE/ (kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	贮水效率与 产量相关性 Correlation between WSE and yield
半湿润区	西峰	24.17	9.73	0.451 **
Sub-humid region	麦积	32.28	7.16	0.419 **
半干旱区	环县	17.09	3.37	0.677 **
Sub-arid region	通渭	13.15	3.93	0.522 **

\*\* 表示通过 0.01 水平显著性检验;WSE, 贮水效率

### 3 结论与讨论

(1) 土壤贮水是影响黄土高原冬小麦生产力的最重要因素。邓振镛等<sup>[4]</sup>研究表明,黄土高原 1 m 土层最大贮水量和最适宜贮水量分别为 270—331 mm 和 216—265 mm,但实际贮水量 1 m 土层为 111—269 mm。罗俊杰等<sup>[27-28]</sup>研究表明,底墒充足可显著提高冬小麦产量,不同生态类型冬小麦的平均产量在高底墒条件下分别比在中、低底墒条件下提高 28% 和 23%,水分利用效率分别提高 70% 和 75%。本研究表明,黄土高原旱作区休闲期 1 m 土层多年平均贮水量半湿润区为 91 mm,贮水效率为 30.7%;半干旱区为 32 mm,贮水效率为 16.5%。不同降水年型、不同气候区休闲期贮水量和贮水效率差别较大。一方面是由于休闲期黄土高原降水量时空分布不均,半湿润区的西峰、麦积休闲期降水量分别为 272.8、318.2 mm,而半干旱区的环县、通渭仅为 225.3、163.8 mm;另一方面是由于两个气候区土壤贮水能力的差别,半湿润区的西峰和麦积 1 m 土层最大贮水量分别为 295、328 mm,半干旱区的环县和通渭分别为 271、277 mm;此外,还与当地的耕作方式、水肥管理措施等有关,进而影响了半湿润区冬小麦水分利用效率和产量均远高于半干旱区。

(2) 客观定量分析黄土高原不同气候区休闲期土壤贮水规律和耗水特征,对充分利用休闲期降水具有重要意义。邓振镛等<sup>[5]</sup>研究表明,黄土高原冬小麦苗期主要利用浅中层土壤水,生殖生长阶段主要利用中层和深层土壤水,而且愈往生长后期土层愈有加深的趋势。本研究表明,黄土高原旱作区土壤贮水量从土壤解冻至封冻期间 1 m 土层基本呈波谷型分布。返青至成熟期为耗水阶段,半湿润区主要消耗在起身至开花期,半干旱区主要消耗在越冬至拔节期,土壤水分消耗速率与降水年型、冬小麦发育阶段需水量相关,且不同土层消耗速率不同;休闲期至播种期为贮水阶段,土壤贮水速率与土壤持水性、降水年型有关。

(3) 科学的耕作措施,可改善土壤结构,充分利用自然降水,减少土壤水分的无效蒸发,从而达到贮水保墒,提高水分利用率的目的<sup>[17-21]</sup>。合理的水肥耦合抑制土壤蒸发,增加土壤贮水保墒能力,促进作物生长,提高作物产量<sup>[22-26]</sup>。在半湿润区,如何多接纳并保蓄休闲期天然降雨,充分发挥“伏秋雨春用”的作用,必须在耕作、肥力、管理等措施上做到位。在半干旱区气候暖干年份要调整作物种植结构,适当控制冬小麦播种面积,扩大耐旱作物和饲草作物面积以及实行轮作倒茬等措施。

#### 参考文献 (References):

- [1] 陈少勇,郭凯忠,董安祥. 黄土高原土壤湿度变化规律研究. 高原气象, 2008, 27(3): 530-537.
- [2] 王欣,文军,韦志刚,田辉,王磊,李振朝,史小康,张堂堂,刘蓉,张静辉. 中国黄土高原塬区表层土壤水分盈亏状况的研究. 高原气象, 2009, 28(3): 530-538.
- [3] 邓振镛. 高原干旱气候作物生态适应性研究. 北京: 气象出版社, 2005: 25-38.
- [4] 邓振镛,张强,王强,王润元,王劲松,王鹤龄,徐金强. 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. 生态学报, 2010, 30(14): 3672-3678.
- [5] 邓振镛,张强,王强,张谋草,王润元,倾继祖,王鹤龄,徐金芳. 黄土高原旱作区土壤贮水量对冬小麦产量的影响. 生态学报, 2011, 31(18): 5281-5290.
- [6] 王锡稳,王毅荣,张存杰. 黄土高原典型半干旱区水热变化及其土壤水分响应. 中国沙漠, 2007, 27(1): 123-129.
- [7] 孙秉强,张强,董安祥,陈少勇. 甘肃黄土高原土壤水分气候特征. 地球科学进展, 2005, 20(9): 1041-1046.
- [8] 王云强,邵明安,刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. 水科学进展, 2012, 23(3): 310-316.
- [9] 李巍,郝明德,王学春. 黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复. 农业工程学报, 2010, 26(3): 99-105.
- [10] Su Z Y, Zhang J S, Wu W L, Cai D X, Lv J J, Jiang G H, Huang J, Gao J, Hartmann R, Gabriels D. Effects upon productivity of a dry land winter wheat response to conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 307-314.
- [11] Casa R, Cascio B L. Soil conservation tillage effects on yield and water use efficiency on irrigated crops in central Italy. Journal of Agronomy and Crop Science, 2008, 194(4): 310-319.
- [12] 高晓东,吴晋特,张宝庆,黄俊,赵西宁. 黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征. 土壤学报, 2015, 52(1): 57-67.
- [13] 李德帅,王金艳,王式功,李振朝,尚可政,闭建荣. 陇中黄土高原土壤水分变化特征及其机理分析. 中国沙漠, 2014, 34(1): 140-147.

- [14] 廖允成, 韩思明, 温晓霞. 黄土高原旱地小麦机械化保护性耕作栽培体系的水分及产量效应. 农业工程学报, 2002, 18(4): 68-71.
- [15] 王润元, 杨兴国, 张九林, 王德民, 梁东升, 张立功. 陇东黄土高原土壤储水量与蒸发和气候研究. 地球科学进展, 2007, 22(6): 625-635.
- [16] 蒲金涌, 王润元, 王鹤龄, 李晓薇, 李蓉, 汪鸿滨. 甘肃陇东黄土高原陆面实际蒸散测算方法比较研究. 土壤通报, 2014, 45(1): 32-38.
- [17] 代快, 蔡典雄, 张晓明, 王燕, 赵全胜, 张丁辰, 冯宗会, 谢晓红, 王小彬. 不同耕作模式下旱作玉米氮磷肥产量效应及水分利用效率. 农业工程学报, 2011, 27(2): 74-82.
- [18] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 王维, 贾志宽. 夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2012, 28(3): 94-100.
- [19] 孙敏, 温斐斐, 高志强, 任爱霞, 邓妍, 赵维峰, 赵红梅, 杨珍平, 郝兴宇, 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. 作物学报, 2014, 40(8): 1459-1469.
- [20] 王小彬, 蔡典雄, 金轲, 吴会军, 白占国, 张灿军, 姚宇卿, 吕军杰, 王育红, 杨波, Hartmann R, Gabriels D. 旱坡地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响. 中国农业科学, 2003, 36(9): 1044-1049.
- [21] 刘爽, 武雪萍, 吴会军, 梁二, 蔡典雄. 休闲期不同耕作方式对洛阳冬小麦农田土壤水分的影响. 中国农业气象, 2007, 28(3): 292-295.
- [22] 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. 农业工程学报, 2015, 31(24): 82-88.
- [23] 孙敏, 葛晓敏, 高志强, 任爱霞, 邓妍, 赵维峰, 赵红梅. 不同降水年型夏闲期耕作蓄水与旱地小麦籽粒蛋白质形成的关系. 中国农业科学, 2014, 47(9): 1692-1704.
- [24] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 冯倩, 孙丞鸿, 王志伟. 晋南旱地麦田休闲期土壤水分和养分变化特征. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1601-1608.
- [25] 张春, 杨万忠, 韩清芳, 王丹, 张坤, 丁静, 乔灵芝, 贾志宽. 夏闲期种植不同绿肥作物对土壤养分及冬小麦产量的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 66-72, 84-84.
- [26] 李青, 高志强, 孙敏, 赵维峰, 邓妍, 邓联峰. 夏闲期施肥与覆盖处理对旱地冬小麦产量和土壤水分利用的影响. 麦类作物学报, 2011, 31(3): 519-523.
- [27] 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. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 102-104, 111-111.
- [28] 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. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 61-65, 71-71.