

黄土塬区降水变化条件下冬小麦田土壤水分消耗与补给

崔亚强^{1, 2}, 朱元骏^{1, 2, 3}

(1.西北农林科技大学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. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌,712100;3. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌,712100)

摘 要:通过人工实时降水分配试验,研究了黄土塬区冬小麦田 3 种降水条件:正常降水(R_{CK})、降水增加 $1/3$ ($R_{+1/3}$)和降水减少 $1/3$ ($R_{-1/3}$)下,土壤水分变化速率、消耗深度以及水量平衡状态。结果表明: R_{CK} 和 $R_{-1/3}$ 处理 $0\sim 3.8$ m 土层土壤储水量以 $91.85\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $109.39\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度下降,而 $R_{+1/3}$ 处理土壤储水量在 $0\sim 3.0$ m 深度以 $48.94\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度减少,而在深层($3.0\sim 3.8$ m)土壤水以 $17.39\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度增加;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;当土壤底墒充足且生育期降水量较多时,各降水处理土壤水分的消耗深度较浅,反之,则较深;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。

关键词:黄土塬区;降水变化;土壤储水量;冬小麦
中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Soil moisture consumption and replenishment in winter wheat land under the conditions of precipitation change in loess plateau

CUI Ya-qiang^{1,2}, ZHU Yuan-jun^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of soil erosion and dryland agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China. 2 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3 Institute of soil and water conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The soil water consumption and replenishment was the combined action of crop water use and precipitation, it was possessed important value for estimation and prediction of soil water resources. In this paper through the artificial real-time precipitation allocation experiment, has researched the soil water change rate, consumption depth and soil water balance status under three precipitation conditions as: normal precipitation (R_{CK}), precipitation increased $1/3$ ($R_{+1/3}$) and precipitation decreased $1/3$ ($R_{-1/3}$) of winter wheat land in loess plateau. The results indicated that: The soil water storage in $0\sim 3.8$ m depth was reduced with the velocity of $91.85\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ and $109.39\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ for the treatments of R_{CK} and $R_{-1/3}$, but for the treatment of $R_{+1/3}$, Soil water storage decreased at the speed of $48.94\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ within $0\sim 3.0$ m depth and increased within $3.0\sim 3.8$ m depth with the velocity of $17.39\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Increasing of precipitation makes the supply of soil moisture more frequent, thus reducing the temporal and spatial variation of soil moisture. When the soil water content before sowing was sufficient and the precipitation in growing season was more rich, the soil water consumption depth for each treatment was shallower, on the contrary, the consumption depth was deeper. During fallow period, the transformation efficiency of precipitation with the soil water consumption rate was appeared an extremely significant exponential correlation.

Keywords: loess plateau, precipitation change, soil water storage, winter wheat

土壤水分是黄土塬区主要作物冬小麦利用的最重要的水分来源,影响着冬小麦的生长、发育和产量^[1]。在黄土塬区,农地土壤水分主要受降水和冬小麦利用的影响^[2]。近些年,在全球气候变化背

景下,黄土塬区降水格局发生变化,表现为降水分配的不均性增加、极端降水事件频发^[3]。降水格局变化改变了土壤水分形成的初始条件,无疑会对冬小麦-土壤水分关系以及土壤水分的消耗和补给产生重要影响。量化降水变化条件下土壤水分的消耗和补给规律有助于黄土塬区土壤水资源的估算、管理和冬小麦产量的稳定。

降水是影响土壤水分变异、消耗和补给的主要因素^[4-6]。黄土塬区降水主要集中在7-9月,约占年均降水的60%~70%,冬小麦生长季降水稀少。程立平^[7]根据黄土塬区降水变化特征,将该区年内土壤储水量变化分为3个阶段:土壤水分消耗期(3-7月)、土壤水分恢复期(7-10月)和土壤水分相对稳定期(10月至翌年3月)。雨季土壤水分的动态变化与降雨量有着密切的联系,不同土层土壤含水量的变化幅度明显不同,在降雨时土壤含水量急剧上升,随后下降^[8-9]。此外,随着降雨量的增加,土壤含水量与降水量的显著相关深度逐渐向深层推移^[10],而敏感性随深度逐渐降低^[11]。降水作为黄土塬区土壤水输入的重要来源,显著影响土壤水分的消耗与补给过程。一些学者通过降水控制实验研究草地土壤水分循环特征时发现在平水年及干旱年,土壤水分均表现为负平衡;丰水年部分样地土壤水分得到补充^[12-13]。Liu等^[14]在黄土高原南部研究发现,在极端湿润年份,农田的土壤水分都得到极大补给。王石言等^[15]在长武塬区研究发现,旱作小麦田土壤水分的消耗深度为300cm,而补给深度则达到600cm。目前,关于冬小麦田土壤水分的消耗与补给规律的相关研究逐渐增多,但是,由于受降水的影响,连续干旱和湿润条件下土壤水分的消耗与补给规律还未得到充分认识。

本研究利用人工降水实时分配系统来实现不同的降水条件,通过定位观测三种降水条件(自然降水(R_{CK})、降水增加1/3($R_{+1/3}$)和降水减少1/3($R_{-1/3}$))土壤剖面含水量,研究了降水变化对不同深度土壤储水量的影响,分析了降水变化条件下土壤水分消耗和补给规律,以期对降水变化条件下黄土塬区农地土壤水补给和消耗规律研究及冬小麦产量潜力评估提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在地处陕西省长武县的长武黄土高原农业生态试验站(107°41'E,35°14'N)进行。试验站海

拔1220m,属暖温带半湿润大陆性季风气候。该地区多年平均降水量为584mm,年最大降水量为954mm(2003年),年最小降水为296mm(1995年)。降水年季年内分布不均,主要集中在7-9月,占全年降水总量的55%以上,蒸发量较大。该区年日照时数为2226.5h,多年平均无霜期171d,年平均气温9.1℃。试验所在地属于黄土旱塬区,土壤为中壤质黑垆土。耕层(0~20cm)土壤含有机质14.15g·kg⁻¹,全氮0.97g·kg⁻¹,碱解氮68.26mg·kg⁻¹,速效磷22.1mg·kg⁻¹,速效钾156.7mg·kg⁻¹。试验期降水月际分布见图1。

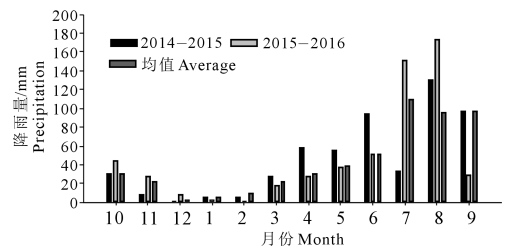


图1 试验区降水月分布(2014-2016)

Fig 1 The monthly distribution drawing of precipitation in experimental area

1.2 试验设计

试验在站区辅助观测场冬小麦地进行,整个生育期无灌溉。2014年10月布设试验小区,小区面积为30m²(5m×6m),共11个。小区采用透明塑料遮雨棚配套集雨桶和自流滴灌系统来实现小区自然降水的实时收集和再分配(图2)。试验小区的详细情况见倪盼盼等^[16]。降水条件设3个处理:自然降水(R_{CK})、降水减少1/3($R_{-1/3}$)和降水增加1/3($R_{+1/3}$)。通过图2中的降水实时分配系统,一个小区上方覆盖1/3面积的遮雨棚,实现降水减少1/3,将这个小区收集的降水分配到另外一个小区,实现降水增加1/3。每两个降水处理之间的降水量差值约为200mm,接近于旱半干旱地区气候分区的降水量间隔。 R_{CK} 处理设置3个重复, $R_{-1/3}$ 处理和 $R_{+1/3}$ 处理各设4个重复(图2),小区布面积为30m²(5m×6m)。试验用冬小麦品种为“长旱58”,种植密度为150kg·hm⁻²,在冬小麦种植前一次性施入小麦专用肥(N:P:K=20:10:5)954kg·hm⁻²,田间管理同大田,小麦生育期进行人工锄草,不施用除草剂。试验冬小麦分别于2014年10月5日和2015年9月28日播种,于2015年6月25日和2016年6月27日收获。

1.3 观测指标和测定方法

1.3.1 土壤水分测定 小区中心位置布设1根3.8m深度的中子管,用中子仪(CNC503B)测定土壤含水量,相同处理小区的平均值作为该小区(降水处理)的土壤

水分。测定时间间隔为 15 d,0~1 m 土层测定深度间隔 0.1 m,>1 m 的土层测定深度间隔为 0.2 m。

每层土壤含水量(体积含水量),取其算术平均值。土壤储水量的计算采用如下公式:

$$WS = \sum_i^n h_i \times W_i \times 10/100 \tag{1}$$

式中,WS 为土壤储水量(mm), h_i 为土层厚度(cm), W_i 为土壤含水量(%)。

黄土塬区蒸散量(ET) 计算的一般公式^[1] 为:

$$ET = P - \Delta W \tag{2}$$

式中, P 为降水量(mm); ΔW 为季初、季末土壤储水量之差(mm)。

1.3.2 冬小麦产量及生物量的测定 在冬小麦成熟期,于每个小区取 1 m² 的冬小麦,计算冬小麦穗数,脱粒后于 75℃ 烘干计算产量,并在每个小区随机选取 6 株生长健康的冬小麦植株,烘干后计算冬小麦单株生物量。

1.3.3 土壤水分消耗深度与补充深度确定 土壤水分消耗深度根据季初和系统蒸散旺季土壤剖面水分分布曲线确定,选取水分含量降低幅度最大的曲线和季初比较,两条曲线交叉点即是消耗深度,如果两条曲线无交叉点,说明消耗深度超过了测定的土层深度。土壤水分的补充深度根据系统蒸散旺季和雨季土壤剖面水分分布曲线确定,选取水分含量增加最大的曲线和消耗曲线比较,两条曲线交叉点即为补充深度。

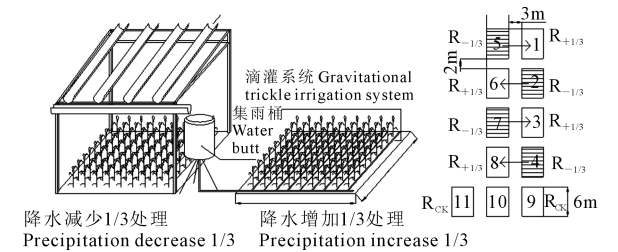


图 2 降水实时收集、分配系统和试验小区处理示意图
Fig. 2 The diagrammatic sketch for precipitation real time collection, distribution system and test plot treatments

2 结果与分析

2.1 土壤储水量变化

不同降水条件下 0~3.8 m 土层的土壤储水量有显著的差异(图 3)。R_{+1/3} 在 0~3.8 m 土层土壤储水量最大,R_{CK} 次之,R_{-1/3} 最小。不同降水条件下,0~3.0 m 土层的土壤储水量在冬小麦生长季(4~6 月)逐渐降低;休闲期,降水能部分补给土壤水,但

未超过初始储水量,总体呈现下降趋势。在 3.0~3.8 m 深度,R_{CK} 和 R_{-1/3} 处理的土壤储水量在生长季减少,在休闲期得到一定补给,而 R_{+1/3} 土壤储水量在 2015 年休闲期得到补给后稳定维持在较高水平。由表 1 可知土壤储水的变化速率,在 0~3.8 m 深度,R_{-1/3} 和 R_{CK} 土壤水储量以 109.39 mm·a⁻¹ 和 91.85 mm·a⁻¹ 的速度减少,R_{+1/3} 土壤储水量在 0~3.0 m 深度以 48.94 mm·a⁻¹ 的速度减少,而在 3.0~3.8 m 深度则以 17.39 mm·a⁻¹ 的速度增加。此外,各降水处理 0~3.0 m 深度的土壤储水消耗速率占总消耗速率的 90% 以上。这表明 0~3.0 m 深度是冬小麦所需水分的主要来源。这主要因为冬小麦根系随着深度的增加而减少,主要分布在浅层土壤^[17]。因此,冬小麦主要利用 0~3.0 m 土层的土壤储水,而 3 m 以下土壤储水则是在土壤水势梯度差的作用下向上运动,最终为农作物所消耗^[18]。此外,R_{-1/3} 土壤储水的下降速率最大,为 109.39 mm·a⁻¹,R_{CK} 次之,这说明减少降水(R_{-1/3})、正常降水(R_{CK})增加了冬小麦对土壤储水的利用,使得土壤储水量逐渐下降。

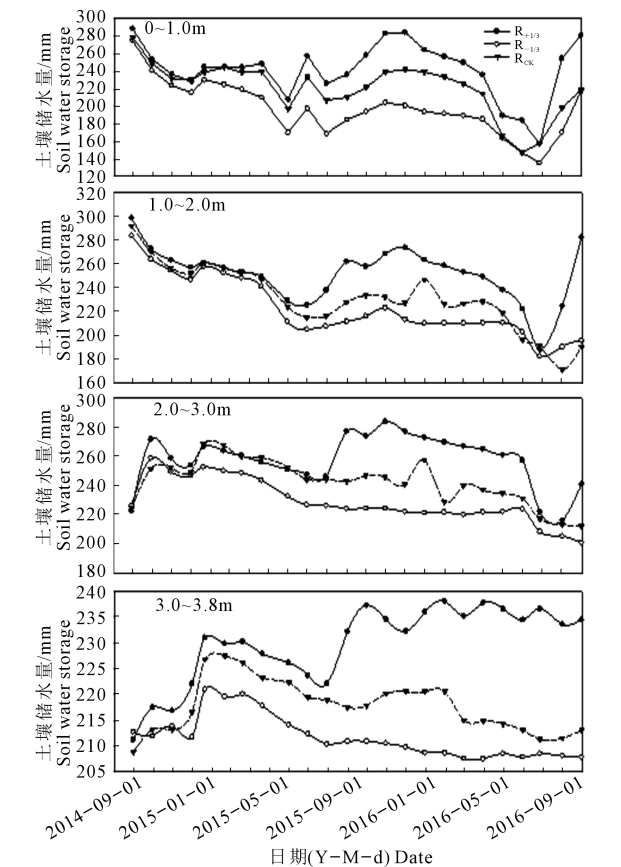


图 3 不同降水条件下不同深度土层的土壤储水量
Fig.3 Soil water storage in different soil depths under different precipitation conditions

表 1 不同降水条件下土壤水分的变化速率/(mm·a⁻¹)

Table 1 The soil water change rate under different precipitation conditions			
土层深度/cm Soil depth	降水处理 Precipitation treatments		
	R _{+1/3}	R _{CK}	R _{-1/3}
0~100	22.08	22.39	37.91
100~200	18.66	49.32	48.51
200~300	8.20	14.75	15.60
300~380	-17.39	5.39	7.37
0~380	31.58	91.85	109.39

2.2 土壤水分的垂直分布及其变异特征

各降水处理的土壤水分均值的垂直分布如图 4 所示。从图中可以看出,随着深度的增加,各降水处理的土壤水分平均值呈现增加趋势。表层土壤受多种因素的影响,土壤水分变异系数(CV)大,且随着深度的增加而呈现减小的趋势(图 4)。Wang 等^[19]研究黄土高原 0~20 m 深度的土壤水分变化

时也得出相似结论。但不同降水处理之间有细微的差异,R_{-1/3}的 CV 首先随着深度的增加而减少(0~70 cm),而在 70~100 cm 则逐渐增加,之后随深度的增加而减少;R_{CK}在 0~70 cm 深度的 CV 变化与 R_{-1/3}相似,而在 70~100 cm 呈现出不规律的变异;R_{+1/3}的 CV 则随着深度的增加逐渐减少。此外,R_{+1/3},R_{CK}和 R_{-1/3} 土壤水分变异系数分别在 120,200 cm 和 180 cm 以上土层大于 0.1。这表明增加降水(R_{+1/3})不仅减少冬小麦对 120 cm 以下土壤水的利用,而且多余的降水通过非饱和土壤水运动方式补给 120 cm 以下的土层。而 R_{CK}和减少 1/3 降水在较深土层由于生长季水分的大量消耗与休闲期水分的补给则表现出典型的失墒和增墒过程,使得 0~200 cm 和 0~180 cm 土层土壤水分变异增大。这表明在较长时间尺度下,增加降水减少了中层土壤水分的变异^[20]。

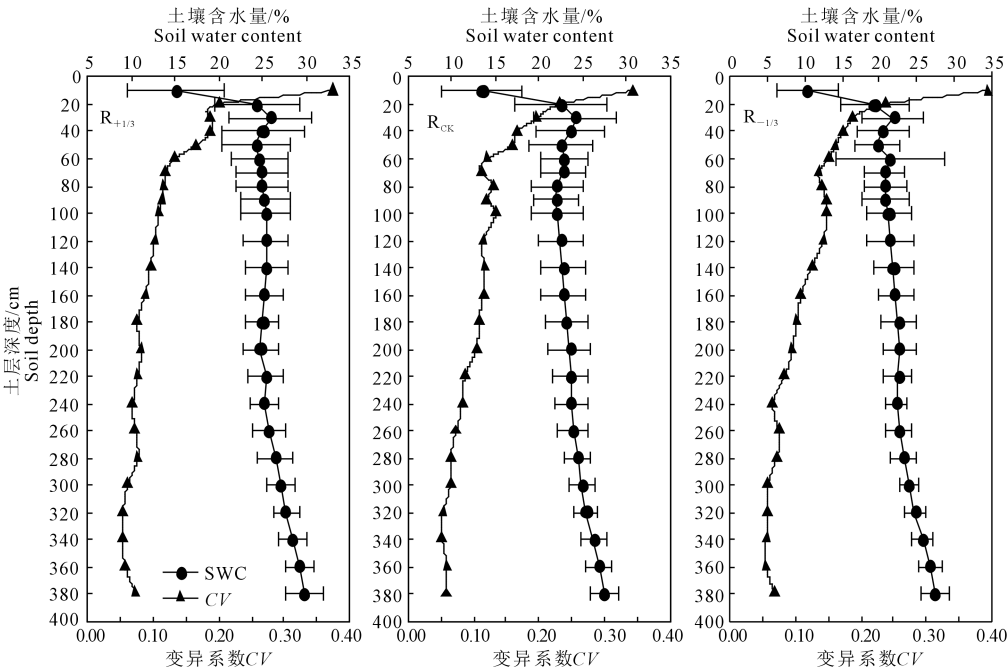


图 4 不同降水处理土壤水分(SWC)及其变异系数(CV)的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of SWC and CV under different precipitation treatments

2.3 土壤水分消耗与补给深度

冬小麦是秋播夏收,生育期处于当年雨季后和翌年雨季前的旱季。冬小麦在生育期由于降水不足,消耗大量土壤水。因此,6 月底小麦田土壤水分含量全年最低。在收割后,小麦田成为休闲农田,7—9 月为该地区的雨季,降水充足,该时期降水补给土壤水。因此,本文选择能够体现冬小麦消耗、补给深度的 7 月与 10 月数据进行分析。

在冬小麦的生长期及休闲期,不同降水条件下的土壤水分垂直分布差异明显(图 5)。R_{+1/3}, R_{-1/3}和 R_{CK}各处理的土壤水分消耗深度在 2015 年生育期分别为 240,240 cm 和 220 cm;而在休闲期末,各降水处理的土壤水补给深度分别为 220,200 cm 和 210cm(图 5)。但在 2016 年生育期,各处理的土壤水分消耗、补给深度出现较大差异,具体表现为 R_{+1/3}, R_{-1/3}和 R_{CK}各处理的土壤水分消耗深度分别

为 340,260 cm 和 340 cm。休闲期末的水分补给深度分别为 280,160 cm 和 240 cm(图 5)。土壤水分的补给深度小于消耗深度,虽然雨季后各处理的土壤水分均得到一定程度的补给,但并未恢复到试验前的水平。李巍等^[21]研究发现,旱作小麦田在丰水年型或者遇到强降雨的月份土壤水分在 0~3 m 土层范围内可以得到恢复,但较难恢复到试验初期的土壤水分。这与本试验结果基本一致。而王艳萍等^[22]研究发现,农地的降水补给深度超过 600 cm,远远大于本试验研究中增加降水处理小区的补给深度,这种差异主要是由休闲期降水量和降水频率所引起。此外,通过对比发现,两年土壤水分消耗、补给深度差异较大,2016 年耗水深度、补给深度显著高于 2015 年。其主要原因是 2015 年冬小麦生长季降雨量为 282.6 mm,远大于 2016 年生长季降雨 215.8 mm,并且在 2015 年播种期土壤储水量高于 2016 年。土壤储水量和生长季降水的减少促使冬小麦利用更深层土壤水分以供冬小麦正常生长,因

而导致冬小麦的耗水深度增加。而休闲期的降雨则正好相反,2016 年休闲期降雨(328.1 mm)高于 2015 年降雨(259.7 mm),降雨量越大,入渗深度越深。这表明降水量、播种期土壤储水量影响土壤水分的消耗和补给。邹文秀等^[23]研究发现,在冬小麦生长季,冬小麦田的土壤水分主要受土壤蒸发、降水的影响和植被根系耗水的影响。忽略了播种时土壤前期储水量对土壤水分消耗、补给的影响。不同降水条件下土壤含水率分布影响土壤水分的补给、消耗(图 5)。例如 2015 年 R_{CK} 与 2016 年 $R_{-1/3}$ 在冬小麦休闲期降雨量基本一致(表 2),但 $R_{-1/3}$ 土壤水分的补给量远远大于 R_{CK} 的补给量。这种差异主要是由收获期土壤含水率差异所引起,土壤含水率越小,有更多的降水转化为土壤水,但 $R_{-1/3}$ 由于生育期土壤水分的连续消耗,在经过补给后土壤含水率未超过田间稳定持水量。程立平等^[24]认为黄土塬区非饱和土壤水的运动是造成这种差异的主要原因。

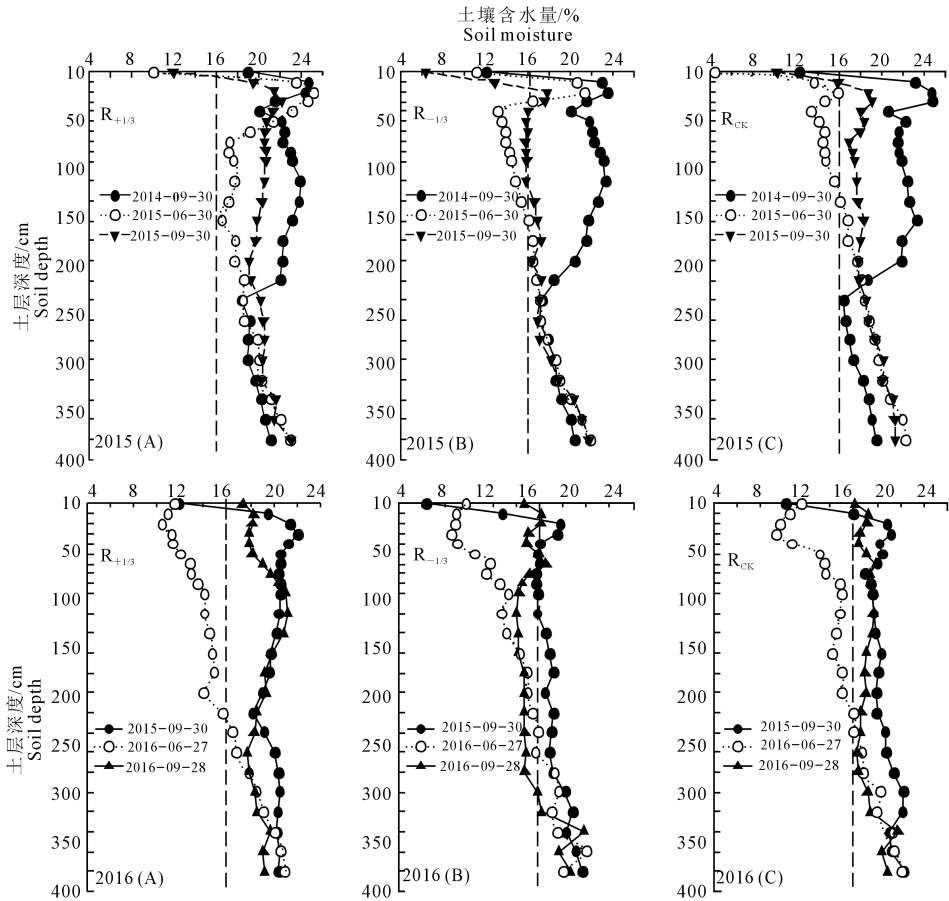


图 5 不同降水条件下土壤剖面水分分布动态

Fig 5 Soil moisture distribution dynamics in soil profiles under different precipitation conditions

表 2 不同降水处理土壤水量平衡特征/mm
Table 2 Soil water balance characteristics under different precipitation treatments

降水处理 Precipitation treatments	2014–2015 生长季 Growing season		2015 休闲季 Fallow season		2015–2016 生长季 Growing season		2016 休闲季 Fallow season/mm	
	P	ΔW	P	ΔW	P	ΔW	P	ΔW
R _{+1/3}	354.27	−97.20	296.27	80.87	287.73	−234.20	479.07	189.44
R _{ck}	265.70	−79.77	222.20	29.01	215.80	−146.13	360.20	129.18
R _{−1/3}	177.13	−146.04	148.13	43.78	143.87	−110.87	241.33	101.35

注: P-降水量; ΔW-土壤储水量变化量. Note: P-Precipitation; ΔW-Change of SWS.

2.4 不同降水条件下的水量平衡特征

2014–2015 年生长季, R_{+1/3}, R_{CK} 和 R_{−1/3} 降水对冬小麦田蒸散的贡献率分别为 78.5%, 76.9% 和 54.8%; 2015–2016 年生长季, R_{+1/3}, R_{CK} 和 R_{−1/3} 降水对冬小麦田蒸散的贡献率分别为 55.1%, 59.6% 和 56.4% (表 2), 其余所需供水来自土壤储水, 导致土壤水量出现负平衡。在休闲期, 试验两年里 R_{+1/3}, R_{CK} 和 R_{−1/3} 处理分别有 27.3%, 13.1%, 29.6%; 39.5%, 35.9%, 42% 的降水通过入渗成为土壤储水, 并且发现 R_{−1/3} 处理降水转化为土壤水的效率更高。通过分析发现土壤水分消耗越多, 降水转化为土壤水的效率越高, 两者呈现极显著的指数关系 (图 6)。这主要是因为 R_{−1/3} 土壤储水量由于生长季降水的减少而大量消耗土壤水, 休闲期降水大部分成为土壤储水; R_{+1/3} 和 R_{CK} 降水主要用作无效蒸散, 只有少数降水进入土壤。2016 年休闲期降水的转化率明显大于 2015 年, 相比于 2015 年, 2016 年由于生长季

降水较少, 使得冬小麦主要利用土壤储水, 造成了土壤储水的大量短缺, 休闲期有更多的降水转化为土壤水。

2.5 土壤储水消耗、补给与冬小麦产量及生物量的关系

黄土塬区冬小麦所需水分主要来自土壤储水。生长季土壤水的消耗与休闲期水分的补给构成了旱塬土壤水分循环的主要环节。因此, 土壤水的消耗、补给与冬小麦生物量和产量之间有密切的关系。如图 7 所示, 生长季土壤水的消耗与休闲期土壤水的补给都是影响冬小麦产量及生物量的因子。

3 结 论

1) 降水变化显著影响不同深度土壤储水量。所有处理在 0~3.0 m 深度, 冬小麦生长季土壤水储量逐渐下降, 而在雨季均得到一定的补给。在 3.0~3.8 m 深度, R_{−1/3} 和 R_{CK} 处理土壤水储量以 7.37、5.39 mm · a^{−1} 的速度减少, 而 R_{+1/3} 处理土壤水以 17.39 mm · a^{−1} 的速度增加。

2) 降水增加可以减少土壤水分的空间变异。降水变化显著影响土壤水分消耗和补给过程。土壤底墒充足且生育期降水量较多时, 各降水处理土壤水分的消耗深度较浅, 反之, 则较深。

3) 冬小麦生育期降水对该时期蒸散的贡献率超过 50%。休闲期降水转化效率主要与生育期水分的消耗度有关, 两者呈现极显著的指数关系。此外, 生长季消耗的土壤水主要用于冬小麦的生长, 休闲期补给的土壤水对于冬小麦增产有益。

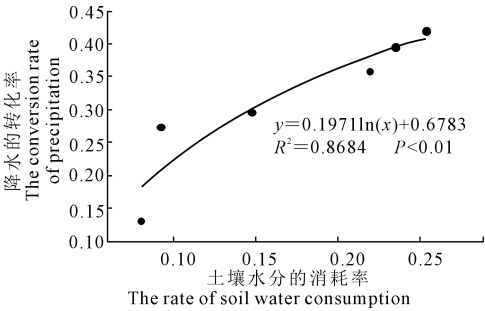


图 6 降水的转化率与土壤水分消耗率的关系
Fig. 6 The relationship between the precipitation infiltration rate and soil water consumption

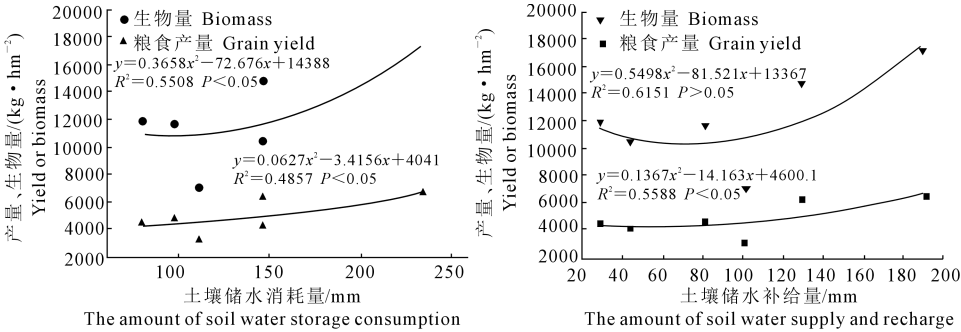


图 7 土壤储水消耗、补给量与冬小麦产量及生物量的关系

Fig. 7 The relationship between the soil water consumption, replenishment with winter wheat yield and biomass

致谢:感谢长武站工作人员对本实验的支持。

参 考 文 献:

[1] He G, Wang Z, Li F, 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.

[2] Wang Y, Xie Z, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3):374-382.

[3] Wang, H., Chen, Y., Chen, Z., 2013. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, north-west of China, during 1960–2010[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27:1807-1818.

[4] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5):427-432.

[5] 李瑜琴, 赵景波. 蓝田、长安人工林地土层含水量研究[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(4):511-515.

[6] Schume H, Jost G, Hager H. Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 289(1):258-274.

[7] 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分特征及其补给地下水过程研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2013.

[8] 孟凯, 张兴义, 随跃宇,等. 黑龙江海伦农田黑土水分特征[J]. *土壤通报*, 2003, 34(1):11-14.

[9] 宋孝玉, 康绍忠, 沈冰,等. 黄土沟壑区不同种植条件下农田土壤水分动态规律研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2):130-133.

[10] 梁芸, 张峰, 王小巍,等. 黄土高原塬区麦田土壤水分变化特征及其对降水的响应[J]. *土壤通报*, 2012,43(1):20-24.

[11] 陈少勇, 郭玉珍, 郑延祥,等. 甘肃旱作农业区降水对土壤水分的影响[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(1):155-162.

[12] 高宇, 樊军, 彭小平,等. 水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗

和补充深度对比研究[J]. *生态学报*, 2014, 34(23):7038-7046.

[13] Fan J, Yu G, Wang Q, et al. Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138(22):10-16.

[14] Liu W Z. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China. [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8):1133-1138.

[15] 王石言, 王力, 张静,等. 黄土旱塬主要农林用地土壤水文特征对比[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(3):10-18.

[16] 倪盼盼, 朱元骏, 崔亚强. 黄土塬区降水变化对冬小麦叶片形态和生物量的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6):116-121.

[17] Zhang X, Chen S, Sun H, et al. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors[J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(1):75-83.

[18] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. *土壤学报*, 2001, 38(3):353-356.

[19] Wang Y, Hu W, Zhu Y, et al. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527(527):543-554.

[20] Chen H, Shao M, Li Y. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1 - 4):242-251.

[21] 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[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3):99-105.

[22] 王艳萍, 王力, 韩雪,等. 黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(22):7571-7579.

[23] 邹文秀, 韩晓增, 江恒,等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9):196-202.

[24] 程立平, 刘文兆, 李志,等. 长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5):670-678.

(上接第 151 页)

[9] 刘思春,梁圀社,张一平,等. 磁环境条件下黄瓜抗旱性变化的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1999, 17(2): 94-100.

[10] Khoshravesh M, Mostafazadeh-Fard B, Mousavi S F, et al. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(4): 515-522.

[11] 朱练峰,张均华,禹盛苗,等. 磁化水灌溉促进水稻生长发育提高产量和品质[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 107-114.

[12] 魏国强,朱祝军,方学智,等. NaCl 胁迫对不同品种黄瓜幼苗生长、叶绿素荧光特性和活性氧代谢的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(11): 176-181.

[13] 王树凤,胡韵雪,孙海菁,等. 盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(4): 1021-1029.

[14] 宋旭丽,侯喜林,胡春梅,等. NaCl 胁迫对超大甜椒种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(3): 569-575.

[15] 张瑞喜,王卫兵,褚贵新. 磁化水在盐渍化土壤中的入渗和淋洗效应[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(8): 1634-1641.

[16] Sprunt S, Zhang C Y, Litster J D. A high - field magnetic birefringence study of dilute phases of a nonionic surfactant in water [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1995, 103(103):10325-10331.

[17] 邱念伟,谭廷鸿,戴华,等. 磁化水对小麦种子萌发、幼苗生长和生理特性的生物学效应[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(8): 803-810.