

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

倪盼盼^{1,3}, 朱元骏^{1,2}, 巩铁雄^{1,3}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 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;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用人工遮雨棚和自流滴灌系统来实时人工干预降水, 研究了黄土塬区不同降水条件即正常降水 (CK)、降水减少 1/3 ($R_{-1/3}$) 和降水增加 1/3 ($R_{+1/3}$) 条件下, 麦田 0~4 m 土壤水分变化、冬小麦耗水特性及 WUE。结果表明: (1) 降水变化改变了冬小麦对土壤水的利用和补给; 降水减少, 冬小麦对土壤水的利用增强, 导致生育期和休闲期深层土壤含水量降低, 且很难补充恢复; 降水增加, 冬小麦也会部分利用深层土壤水, 土壤含水量在生育期呈降低趋势, 在冬小麦收获后, 土壤水得到补给, 土壤含水量会逐渐恢复并高于前期土壤含水量。(2) 冬小麦优先利用降水转化而来的土壤水, 然后利用土壤前期储水; 对于越冬~成熟期的总耗水量 (ET) 组成, $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦对降水和 0~2 m 土壤水分的利用增强, 降水量 (P) 和 0~20 m 土壤贮水变化量 (ΔW_{0-2m}) 各自约占 ET 的 40%; $R_{+1/3}$ 处理 P 占 ET 的比例约是 ΔW_{0-2m} 的 1 倍多; CK 处理 P 占 ET 的比例比 ΔW_{0-2m} 高 15% 左右; 降水减少, 降水占耗水量的比例降低, 0~2 m 土壤水占耗水量比例增加; 降水增加, 则有相反的结果。(3) 降水减少, WUE_{bio} (基于生物量的 WUE) 相对于 CK 处理降低了 1.3%, 但产量下降程度 (7.1%) 小于耗水下降程度 (14.2%), WUE_{grain} (基于籽粒产量的 WUE) 反而增加; 降水增加, 相对于 CK 处理生物量减少 5.3% 而籽粒产量增加 4.5%, 但水分的消耗增加了 11.4%, WUE_{bio} 和 WUE_{grain} 均降低。总之, 降水变化改变了冬小麦对土壤水的利用、土壤水的补给、冬小麦的耗水组成以及生物量和产量的平衡, 最终影响冬小麦 WUE。

关键词: 土壤水; 降水变化; 水分利用效率; 冬小麦; 耗水特征

中图分类号: S271; S152.7+5 文献标志码: A

Effects of rainfall fluctuation on water consumption and water use efficiency of winter wheat in the loess tableland

NI Pan-pan^{1,3}, ZHU Yuan-jun^{1,2}, GONG Tie-xiong^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of the Loess Plateau, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A real-time rainfall control technique consisting of artificial rainfall-shields and gravitational trickle irrigation system was used to investigate the effects of normal rainfall (CK), rainfall reduction 1/3 ($R_{-1/3}$), and rainfall increase 1/3 ($R_{+1/3}$) on 0~4 m soil water storage, winter wheat water consumption and WUE in the loess tableland. The results indicated that: (1) Rainfall fluctuation modified water utilization of winter wheat and soil water supply. With the reducing of rainfall, winter wheat used more soil water, resulting in the decrease of deep soil water content during growth and fallow periods, which was hardly restored by rainfall during fallow period. With the increase of rainfall, deep soil water content decreased during growth period but could be restored even higher than initial soil water content after harvest due to the supply of rainfall in fallow period. (2) Winter wheat used soil wa-

收稿日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金 (41371242, 41530854); 中国科学院“西部之光”和中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-306)

作者简介: 倪盼盼 (1991—), 女, 安徽安庆人, 硕士, 研究方向为土壤水环境。

通信作者: 朱元骏 (1978—), 男, 湖北竹山人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤水分运动及水循环研究。E-mail: zhuyj@nwsuaf.edu.cn。

ter that transformed from current rainfall event firstly and then used early soil water. For evapotranspiration(ET) of the period from overwintering to mature period , winter wheat of $R_{-1/3}$ used more soil water from 0 to 2 m. Precipitation(P) and $\Delta W_{0\sim 2\text{ m}}$ each accounted for about 40% of the ET . The ratio which P accounted for in ET of $R_{+1/3}$ was about 1 times more than $\Delta W_{0\sim 2\text{ m}}$. However , in the treatment of CK , The proportion which P accounted for in ET was about 15% more than $\Delta W_{0\sim 2\text{ m}}$. Under the condition of rainfall decrease , the proportion of soil water transformed from current rainfall event to winter wheat water consumption decreased and the proportion of 0 ~ 2 m early soil water increased. Opposite result was obtained with rainfall decreasing. (3) Compared with CK , the winter wheat WUE_{bio} (on biomass level) decreased by 1.3% in the treatment of $R_{-1/3}$, and its WUE_{grain} (on grain level) increased , because the decline on grain level(7.1%) was less than the degree of water drops(14.2%) . The winter wheat biomass decreased by 5.3% and grain yield increased by 4.5% in the treatment of $R_{+1/3}$ when it was harvested , but its WUE_{bio} and WUE_{grain} decreased because of 11.4% increase in soil water consumption. Generally , rainfall fluctuation had effects on soil water use , soil water supply , winter wheat water consumption composition and the balance between biomass and grain of winter wheat , which affected the winter wheat WUE finally.

Keywords: soil water; rainfall fluctuation; water use efficiency; winter wheat; water consumption

黄土塬区地处我国西北半干旱地区 ,年降雨量 400 ~ 600 mm ,属于传统的雨养农业区。近年来 ,受全球气候变化的影响 ,该区域降水年内和年际分布不均的现象加剧。土壤水作为对降水变化敏感的因素 ,一方面其时空变异性增加^[1-3] ,另一方面缺乏降雨补偿导致土壤干燥化^[4] ,影响区域农田生态系统水平衡和粮食产量稳定。

在雨养农业条件下 ,降水年型、生育期及作物耗水特征的不同是引起作物耗水量、土壤贮水利用程度及土壤水分亏缺分异的主要原因^[5]。无论干旱年还是丰雨年 ,冬小麦田都存在明显的土壤水分亏缺^[6] ,土壤水分供应不足会直接影响冬小麦产量。水分利用效率(Water use efficiency ,WUE) 是表征作物生产与水分消耗关系的综合指标^[7] ,降水变化通过影响农田土壤水分状况、作物对降水和土壤储水的利用以及作物耗水特性 ,进而导致 WUE 也有所变化。作物 WUE 与降水量呈负相关 ,在干旱生境下选择更为保守的水分利用方式 ,通过提高 WUE 来适应干旱^[8]。旱区冬小麦随干旱程度增大 ,WUE 和水分生产力明显递减^[9]。量化降水变化条件下作物耗水特征及 WUE ,有助于明确农田生态系统水分消耗 - 补充规律、评价降水变化对作物产量和 WUE 的影响。

目前相关研究大多采用人工模拟降雨^[10-11] 或不同降水年型^[12-13] 的历史资料。模拟降雨受到水源和人工、机械限制 ,在土柱^[14] 或盆栽^[15-16] 条件下进行 ,又受到土体的限制 ,不能很好反映田间的实际状况; 而针对不同降水年型的研究又受到研究时间的限制 ,需要多年的研究才能获得枯水年、平水年和丰水年的结果。

本研究采用人工遮雨棚和自流滴灌系统来实时人工干预降水 ,利用天然降水资源形成不同的降水条件。通过对黄土塬区不同降水条件下麦田 0 ~ 4 m 土壤含水量和冬小麦生物量的定期测定 ,结合产量来分析土壤储水量、冬小麦耗水量以及 WUE 变化 ,研究降水变化对田间作物耗水特征和 WUE 的影响 ,明确作物水分消耗 - 补充规律以及 WUE 对降水变化的响应 ,为深入理解黄土塬区降水变化条件下作物 - 土壤水二者之间的关系 ,促进区域土壤水资源的合理利用和保障粮食产量的稳定提供科学依据。

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(位于 107°41'E ,35°14'N ,海拔 1 220 m) 进行。属暖温带半湿润大陆性季风气候。据长武县气象局统计(1957—2006 年) ,该地区多年平均降水量为 584.1 mm ,丰水年和枯水年降雨量标准分别为 623.1 mm 和 534.4 mm ,年最大降水量为 954.3 mm(2003 年) ,年最小降水为 296.0 mm(1995 年) 。降水年际季节分布不均 ,降水集中在 7—9 月 ,占全年降水总量 55% 以上 ,蒸发量较大 ,为黄土塬区典型的雨养代表。该区年日照时数为 2 226.5 h ,日照率为 51% 。塬面全年 > 10℃ 活动积温 3 029℃ ,多年平均无霜期 171 d。年平均气温 9.1℃ ,1 月份平均气温 - 5.0℃ ,7 月份平均气温 22.1℃ 。试验所在地属于黄土旱塬区 ,土壤为中壤质黑垆土。2014 年布设试验前 ,土壤容重为 1.24 g · cm⁻³ ,土壤颗粒组成为: 17.6% 粘粒 ,42.6% 粉粒和 39.8%

砂粒。土壤耕层(0~20 cm)土壤含有机质 14.15 g·kg⁻¹,全氮 0.97 g·kg⁻¹,碱解氮 68.26 mg·kg⁻¹,速效磷 22.1 mg·kg⁻¹,速效钾 156.7 mg·kg⁻¹,pH 8.6。

1.2 试验设计

试验在中国科学院长武农业生态试验站内未进行灌溉的旱作耕地上进行。2014年10月布设试验小区,小区面积为 30 m²(5 m×6 m),共 11 个小区。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雨的实时收集和再分配(图 1 左)。雨棚遮雨采用弯成直径为 20 cm 圆弧的透明塑料硬片,间隔 44 cm 铺设。小区中央布设 1 根中子管,小区四周嵌入 1 m 深的 PVC 板,防止表层土壤水分侧渗。小区之间设置 2 m 间距的保护行。供试冬小麦品种为长旱 58,播前施一次冬小麦专用肥 954 kg·hm⁻²(N:P:K=20:10:5),肥料撒施地表,翻入土中,田间管理同大田,人工及时清除杂草,但不使用农药。试验冬小麦于 2014 年 10 月 5 日播种,2015 年 6 月 25 日收获。

长武站多年平均降水量为 584 mm,在此范围向上浮动 1/3 则为 780 mm,约为半湿润地区降水量上限;在此范围向下浮动 1/3 则为 389 mm,约为半干旱地区降水量下限。考虑到这两个降水量接近降水气候分界线^[17],对试验有很大参考价值,所以试验选择 1/3 的降水量波动范围,设置 3 个降水处理,即

正常降水(CK)、降水减少($R_{-1/3}$)和降水增加($R_{+1/3}$)。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 1 右)。播种前仅在 $R_{-1/3}$ 处理的小区上方布置遮盖 1/3 面积的遮雨棚,将小区 1/3 面积的降水收集至集雨桶,实现降水减少 1/3;收集的降水均匀分配给相对应的平行位置另一行的 $R_{+1/3}$ 处理的小区,实现降水增加 1/3。

1.3 样品与数据采集

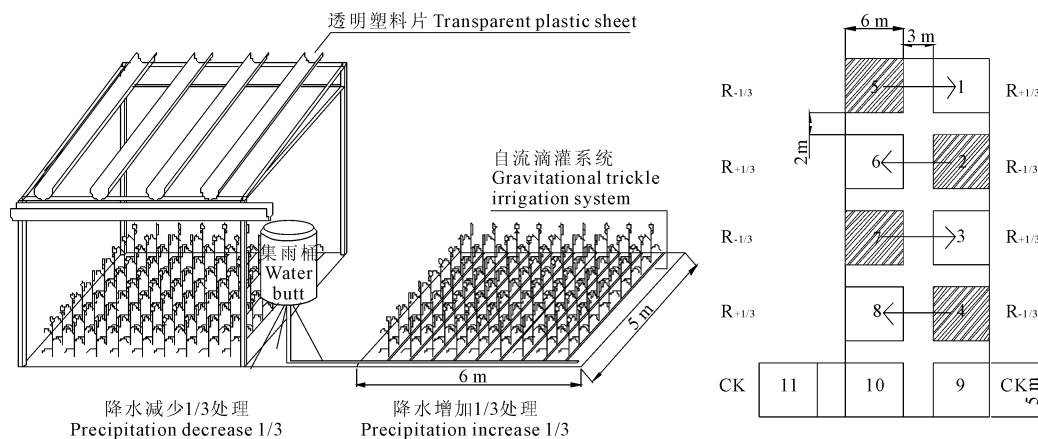
冬小麦拔节期(4月15日)、孕穗~抽穗期(5月2日)、开花期(5月17日)、灌浆期(6月2日)和成熟期(6月15日)各测定一次全株生物量,每个小区采 5 株。收获时调查每个小区 1 m²样方内产量和地上生物量。在冬小麦生育期内每月观测一次 0~4 m 深度的土壤剖面含水量(开始采集生物量后每月观测两次)。

试验期间,长武试验站内气象站记录的 2014—2015 年月降雨量见表 1。2014 年和 2015 年的年降水量分别为 616.9 mm 和 578.2 mm,较之前 50 a (1957—2006 年)的平均降水量(584 mm)分别多了 32.9 mm 和少了 5.8 mm。按照长武塬区丰水年(623 mm)和枯水年(534 mm)降水量划分标准,试验进行的这两年轻武塬区属于平水年。试验期间(2014 年 10 月—2015 年 8 月)麦田不同降水处理的月降水量分布见图 2。冬小麦生育期总降水量为 240.2 mm。

表 1 2014—2015 年月降雨量/mm

Table 1 Monthly precipitations from 2014 to 2015

年份 Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计 Total
2014	0.0	20.5	29.9	95.2	31.7	54.6	24.6	146.2	188.9	13.8	10.5	1.0	616.9
2015	6.6	7.3	17.7	69.4	50.6	99.5	33.3	138.5	62.8	48.0	33.4	11.1	578.2



注: 箭头指示方向为供水方向。 Note: the direction of the arrow is the direction of water supply.

图 1 降水实时收集、分配系统和试验小区处理示意图

Fig. 1 Real-time collection of precipitation and distribution system and experimental plots layout

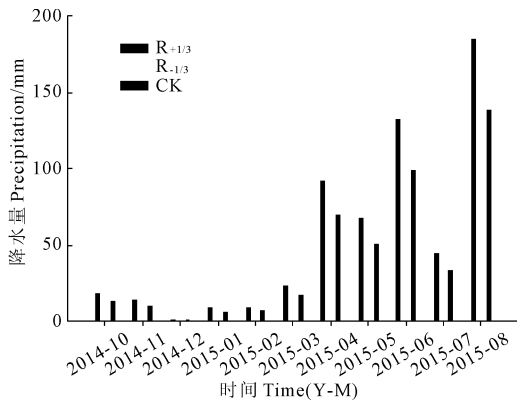


图 2 不同降水处理麦田月降水量

Fig. 2 Monthly precipitations in the winter wheat fields under different precipitation conditions

1.4 测定指标及计算方法

1.4.1 土壤储水量 不同土层的土壤储水量为:

$$W_i = SWC_i \times H_i \times 10 \quad (1)$$

式中, W_i 为第 i 层土壤的储水量 (mm); i 为土壤层数; SWC_i 为第 i 层土壤的体积含水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); H_i 为第 i 层土壤的厚度 (cm); 10 为 cm 转换为 mm 的系数。

土壤储水量变化的计算公式为:

$$\Delta W_j = \sum_i W_{j,i} - \sum_i W_{j-1,i} \quad (2)$$

式中 ΔW_j 为第 j 个生育期的土壤储水量变化 (mm); $W_{j,i}$ 为第 j 个生育期第 i 层土壤的储水量 (mm); $W_{j-1,i}$ 为第 j 个生育期的前一个生育期第 i 层土壤的储水量 (mm)。

1.4.2 作物耗水量及 WUE 黄土塬区由于土层深厚, 地下水深埋 (>50 m), 水量平衡计算时不考虑深层渗漏和地下水补给, 此时冬小麦耗水量就等于土壤储水量变化加上在此期间的降水量, 计算公式为:

$$ET_j = P_j + \Delta W \quad (3)$$

式中 ET_j 为冬小麦第 j 个生育期总耗水量 (mm); P_j 为第 j 个生育期降水量 (mm)。

籽粒产量水分利用效率 WUE_{grain} (基于籽粒产量的 WUE) 采用如下公式计算:

$$WUE_{\text{grain}} = Y/ET \quad (4)$$

生物量水分利用效率 WUE_{bio} ^[18] (基于生物量的 WUE) 采用如下公式计算:

$$WUE_{\text{bio}} = DW/ET \quad (5)$$

式中, WUE_{grain} 为产量水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); WUE_{bio} 为生育量水分利用效率 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); Y 为收获时籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); DW 为收获时不包括籽粒的地上生物量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

1.5 数据处理

由于冬小麦播种 ~ 越冬前降雨量较小, 土壤水分变化不大, 故选用 2015 年 1 月 20 日土壤含水量为基准。采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ($\alpha = 0.05$)。利用 Sigmaplot 10.0 软件作图。各图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同降水处理下土壤剖面含水量和土壤储水量

三种降水处理的麦田 6 个土层 (0~0.5、0.5~1、1~1.6、1.6~2、2~3 m 和 3~4 m) 的平均土壤含水量随时间的变化如图 3 所示。随着土层深度增加, 三种降水处理的土壤含水量受降水量影响程度均逐渐减弱。其中 0~0.5 m 土层的土壤含水量变异系数均大于 15%; 1~2 m 土层的变异系数在 6.0%~9.1% 之间; 2~3 m 土层的变异系数在 3.8%~4.7% 之间; 3~4 m 土层的变异系数则降到 3.3% 以下。降水变化显著影响了麦田不同土层的土壤含水量, 尤其是 0~2 m 土层的土壤含水量, 深层土壤含水量变化比表层土稳定。

三种降水处理 1—6 月 0~0.5 m 的表层土壤含水量波动较大, 0.5~4 m 的各层土壤含水量保持持续下降趋势, 土壤出现水分亏缺, 且亏缺程度与降水量成反比。这说明 1—6 月的降水量不能满足各试验处理下的冬小麦水分需求, 冬小麦需要利用土壤水分来补充降水的不足。冬小麦收获后休闲期有大量降水, $R_{+1/3}$ 处理的 0.5~4 m 土壤含水量逐渐增加并高于 2015 年 1 月的土壤含水量; CK 和 $R_{-1/3}$ 处理的麦田 0.5~2 m 土壤含水量得到一定恢复, 但仍低于 1 月的土壤含水量, 而 2~4 m 土壤含水量则一直是处于下降趋势。冬小麦收获后, 如果在正常降水量的基础上补充一定量的降水 ($R_{+1/3}$ 处理), 土壤水分亏缺可以得到明显恢复; 如果不补充降水, 0.5~4 m 土壤水分亏缺则一直持续, 尤其是降水减少处理 ($R_{-1/3}$), 土壤水分亏缺更为严重。

前述中已知降水变化对麦田 0~2 m 土壤水分影响较大, 因此对 0~2 m 土壤储水量进行了计算 (图 4)。在冬小麦拔节前, $R_{+1/3}$ 处理的土壤储水量与 CK 无明显差异 ($P > 0.05$), 约为 500 mm 左右; $R_{-1/3}$ 处理的土壤储水量在此期间开始低于 CK 和 $R_{+1/3}$ 处理。冬小麦拔节后, $R_{+1/3}$ 处理的土壤储水量开始逐渐高于 CK; $R_{-1/3}$ 处理的土壤储水量仍然明显低于 $R_{+1/3}$ 和 CK 处理 ($P < 0.05$)。 $R_{+1/3}$ 、CK 和

$R_{-1/3}$ 处理冬小麦收获时的土壤储水量相对于 1 月的土壤储水量分别减少了 84.03、107.88 mm 和 124.67 mm。0~2 m 土壤水储量的减少表明冬小麦

对土壤水分的利用程度随降水减少而增强、随降水增加而减弱。

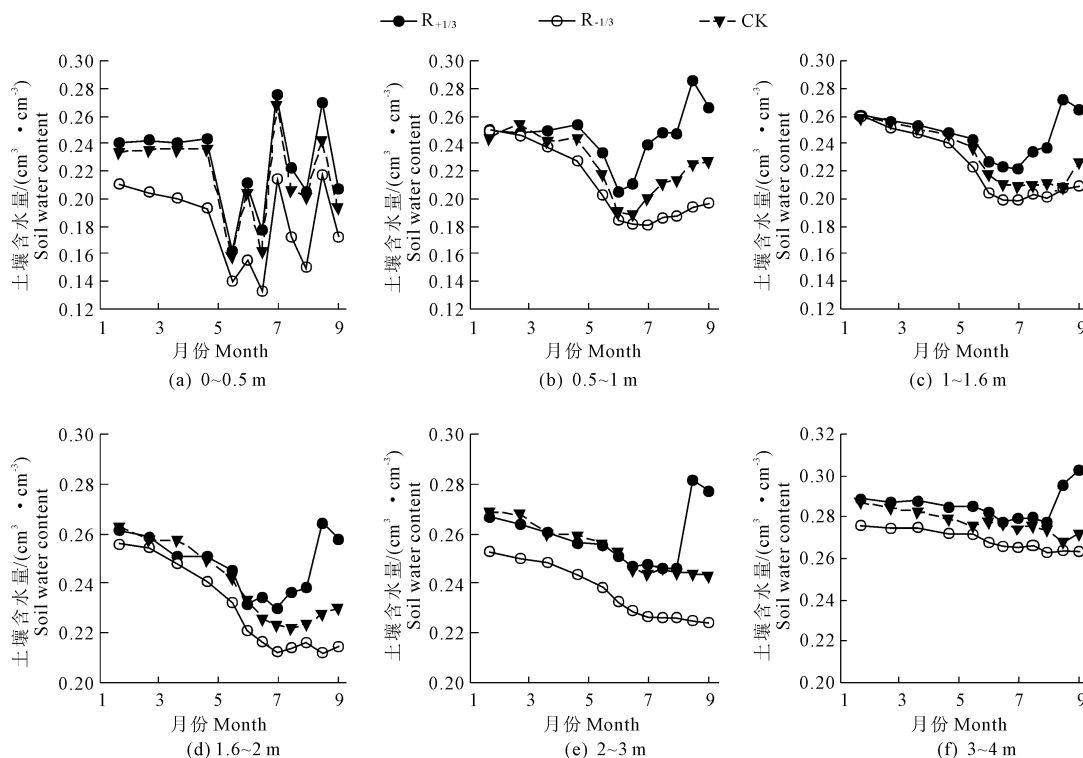


图 3 麦田土壤剖面平均含水量

Fig. 3 Average water content of soil profile in the winter wheat fields

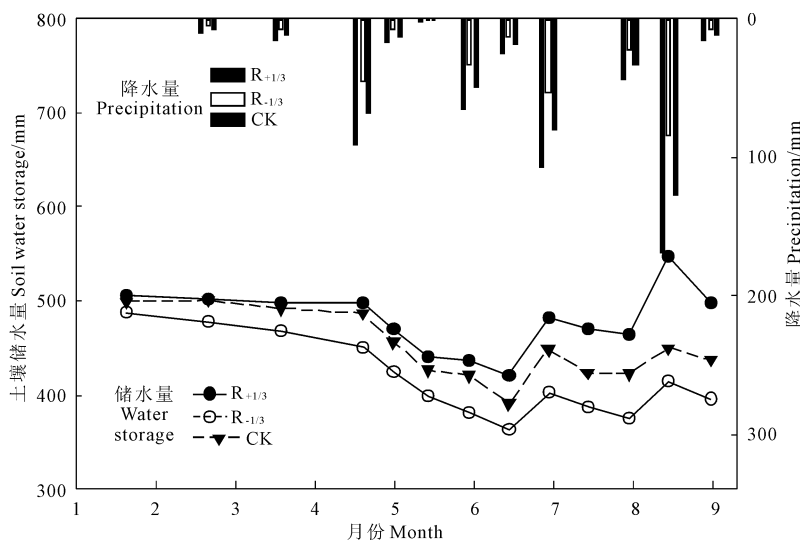


图 4 麦田 1—8 月土壤储水量

Fig. 4 Soil water storage in the winter wheat fields from January to August

2.2 不同降水处理下冬小麦耗水特征

比较不同降水处理下冬小麦总耗水量 ET 可知 降水变化对冬小麦越冬~成熟期总耗水有明显的影响 ($P < 0.05$) (表 2)。冬小麦的越冬~成熟期 ET 随着降水量的增加而增大 $R_{+1/3}$ 处理越冬~成

熟期 ET 比 CK 增加了 9.8% $R_{-1/3}$ 处理越冬~成熟期 ET 比 CK 减少了 12.8%。三种降水处理的 ET 在冬小麦不同生育期内具有明显差异 ($P < 0.05$)。 $R_{+1/3}$ 处理在拔节期和灌浆期的 ET 分别比 CK 增加了 26.1% 和 35.0% 在孕穗~抽穗期、开花期和成

熟期比 CK 有所降低。R_{-1/3} 处理除灌浆期比 CK 增加了 5.2% ,其余时期都比 CK 有所减少。上述差异反映了降水量的改变导致同期冬小麦对土壤水分

(包括前期水分和降水转换而来的土壤水) 的利用程度不同。

表 2 冬小麦生育期降水和水分消耗

Table 2 Precipitations and water consumption in the winter wheat fields

项目 Items	降水处理 Precipitation condition	拔节期 Jointing	孕穗~抽穗期 Booting~heading	开花期 Flowering	灌浆期 Milk	成熟期 Mature	拔节~成熟期 Jointing~ mature	越冬~成熟期 Overwintering~ mature
P /mm	R _{+1/3}	90.80	16.80	1.87	65.60	25.60	109.87	227.73
	R _{-1/3}	45.40	8.40	0.93	32.80	12.80	54.93	113.87
	CK	68.10	12.60	1.40	49.20	19.20	82.40	170.80
ET _{0-4m} /mm	R _{+1/3}	96.81 ± 5.97c	44.96 ± 2.07b	30.70 ± 1.25a	76.52 ± 16.19a	49.25 ± 8.58b	201.43 ± 26.21b	340.79 ± 28.32c
	R _{-1/3}	69.07 ± 2.52a	36.57 ± 2.61a	30.64 ± 2.70a	59.60 ± 4.42a	35.61 ± 6.90a	162.41 ± 5.45a	270.62 ± 1.92a
	CK	76.80 ± 2.60b	45.53 ± 3.27b	34.76 ± 4.15a	56.68 ± 4.86a	56.70 ± 5.24b	193.66 ± 7.81b	310.24 ± 2.39b

注: 同列不同字母表示差异显著 (P < 0.05) ,下同。

Note: different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level , the same below.

试验对不同降水处理的 ET 组成(降水 P 和不同土层土壤储水量变化 ΔW_{0-2m} 及 ΔW_{2-4m}) 进行了分析(图 5)。比较不同降水处理同期的 ET 组成可知 P 占 ET 的比例与降水量呈正比 ΔW_{0-2m} 的比例与降水量呈反比, ΔW_{2-4m} 的比例都很小(均低于 18%)。R_{-1/3} 处理 ΔW_{2-4m} 的比例相对于 CK 略有增加,但 R_{-1/3} 处理 ΔW_{2-4m} 的比例对降水变化的响应规律不明显。这可能与降水入渗再分配的过程有关。冬小麦不同生育期对水分的需求和生育期的降水分布,对不同生育期 ET 组成各分量所占比例有很大影响。在拔节期和灌浆期,三种降水处理的 ET 组成中 P 的比例较大(>55%)。在孕穗~抽穗期和

开花期,由于降水较少,无法满足冬小麦水分需求,冬小麦对土壤水分的利用增强 ΔW_{0-2m} 的比例增加 (>60%)。

对于越冬~成熟期的 ET 组成, R_{-1/3} 处理的冬小麦对降水和 0~2 m 土壤水分的利用增强, P 和 ΔW_{0-2m} 各自约占 ET 的 40%; R_{+1/3} 处理 P 占 ET 的比例约是 ΔW_{0-2m} 的 1 倍多; CK 处理 P 占 ET 的比例比 ΔW_{0-2m} 高 15% 左右。冬小麦优先利用降水,然后再利用 0~2 m 土壤水,最后利用 2~4 m 土壤水。冬小麦对土壤水分的利用明显受到冬小麦生育期以及该生育期内的降水量影响。降水减少,冬小麦对深层土壤水分的利用略有增强。

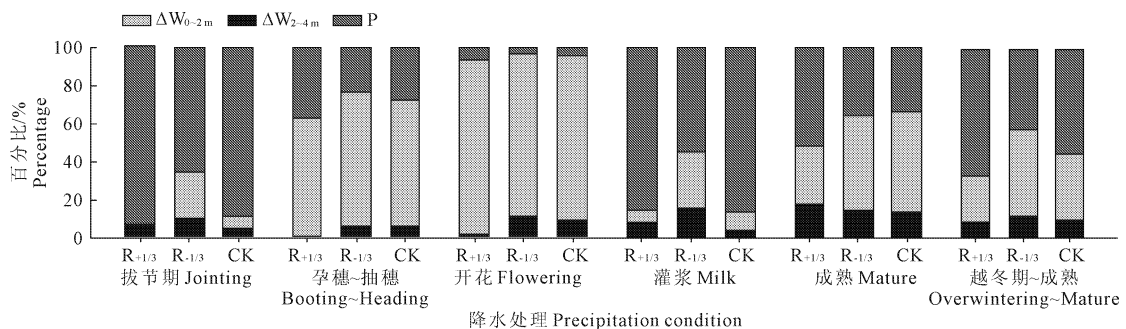


图 5 冬小麦不同生育期 ET 组成

Fig. 5 ET composition in the winter wheat growing period

2.3 不同降水处理下冬小麦水分利用效率

根据对冬小麦各生育期的生物量和耗水的测定,计算了冬小麦各生育期的 WUE_{bio} (图 6)。R_{+1/3} 处理和 R_{-1/3} 处理从播种到成熟期间的 WUE_{bio} 均呈先上升后下降的单峰趋势变化,播种~拔节期的 WUE_{bio} 最低,开花期的 WUE_{bio} 最高。CK 的 WUE_{bio} 呈“M 型”的双峰趋势变化,播种~拔节期的 WUE_{bio} 最

低,两个 WUE_{bio} 峰值分别在孕穗~抽穗期和灌浆期,孕穗~抽穗期的 WUE_{bio} 最高。R_{+1/3} 处理播种~拔节期和开花期的 WUE_{bio} 比 CK 分别增加了 20.4% 和 235.8%; R_{-1/3} 处理播种~拔节期、孕穗~抽穗期、开花期和成熟期的 WUE_{bio} 比 CK 分别增加了 157.1%、17.8%、129.0% 和 4.2%。

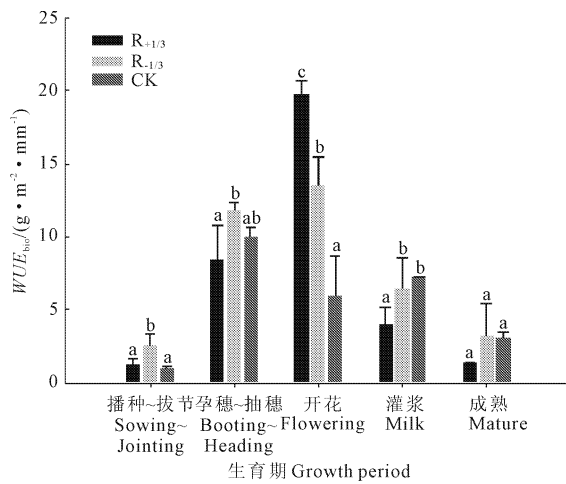


图 6 冬小麦基于各生育期内生物量的水分利用效率

Fig. 6 Water use efficiency on biomass level of the winter wheat

根据对冬小麦收获后地上生物量(不包括籽粒)、产量(籽粒)和耗水的测定,计算了收获时的

表 3 冬小麦各处理的生物量、产量及水分利用效率

Table 3 Biomass, yield and water use efficiency of winter wheat under different precipitation conditions

降水处理 Precipitation condition	DW $/(g \cdot m^{-2})$	WUE_{bio} $/(g \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1})$	Y $/(kg \cdot hm^{-2})$	WUE_{grain} $/(kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1})$
R _{+1/3}	702.63 ± 41.41ab	1.91 ± 0.27a	4680.00 ± 224.76a	12.69 ± 1.37a
R _{-1/3}	628.40 ± 43.47a	2.20 ± 0.15a	4163.75 ± 233.97a	14.58 ± 0.82a
CK	742.27 ± 88.80b	2.23 ± 0.25a	4479.67 ± 493.06a	13.46 ± 1.46a

注: DW 为收获时不包括籽粒的地上生物量($g \cdot m^{-2}$), WUE_{bio} 为生物量水分利用效率($g \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$), Y 为收获时籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$), WUE_{grain} 为产量水分利用效率($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)。

Note: DW—above-ground biomass after harvest not including grain($g \cdot m^{-2}$); WUE_{bio} —water use efficiency on biomass level($g \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$); Y—grain yield after harvest($kg \cdot hm^{-2}$); WUE_{grain} —water use efficiency on grain level($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$).

3 讨论

试验通过对三种降水条件(R_{+1/3}、R_{-1/3}和CK)下麦田土壤耗水特征的研究,发现降水变化对冬小麦耗水量组成(土壤储水量变化ΔW和降水P)有明显影响,冬小麦耗水量与生育期内降水量呈显著正相关。辽西北^[19]和北方农牧交错带^[20]的作物耗水特征研究得出了相似的结论。降水变化条件下,降水增加,降水占冬小麦总耗水的比例随之增大;降水减少,冬小麦对土壤水尤其是0~2 m土壤水的利用明显增强。北方旱地作物的耗水量在丰水年,主要来源于生育期间的自然降水,在干旱年,则很大一部分来源于土壤水^[21]。冬小麦生育期内优先利用降水转化而来的土壤水,其次利用前期土壤储水。

有关旱区麦田土壤水分变化的研究一般都集中在0~2 m土层,但本研究发现冬小麦对2~4 m土壤水分也有所利用,虽然在总耗水中所占比例较小,但对于降水减少处理来说,冬小麦对深层2~4 m土壤水的利用不可忽略。本试验三种降水处理的冬小

WUE_{bio} 和 WUE_{grain} (表3)。CK处理的 WUE_{bio} 最大,R_{+1/3}处理和R_{-1/3}处理的 WUE_{bio} 比CK分别减少了14.3%和1.3%。R_{-1/3}处理的 WUE_{grain} 最大,比CK增加了8.3%;R_{+1/3}处理的 WUE_{grain} 比CK减少了5.7%。

将R_{+1/3}处理和R_{-1/3}处理的 WUE_{grain} 及其 WUE_{bio} 与CK分别进行比较,结果表明R_{+1/3}处理的冬小麦 WUE_{bio} 和 WUE_{grain} 均降低,而R_{-1/3}处理的 WUE_{bio} 降低, WUE_{grain} 增加。与CK相比,R_{+1/3}处理收获时的地上生物量减少了5.3%、产量增加了4.5%,总耗水量增加了11.4%,总耗水量的变化大于生物量和产量的变化,所以R_{+1/3}处理的 WUE_{bio} 和 WUE_{grain} 与CK相比均降低。R_{-1/3}处理收获时的 WUE_{bio} 低于CK,但其产量的降低程度(7.1%)要小于总耗水量的降低程度(14.2%),因而 WUE_{grain} 反而高于CK。

麦收获时土壤水分都出现亏缺现象,亏缺程度与降水量呈反比。土壤水分持续亏缺得不到补充,进而出现农田土壤干燥化^[22],干燥化效应累积和延续,就会严重影响作物产量和深层土壤储水补充调节植物需水作用^[4,23]。本研究中在正常降水量的基础上补充一定量的降水(R_{+1/3}处理),土壤水分亏缺可以得到明显恢复,避免干燥化带来的危害;若收获后降水减少持续进行(R_{-1/3}处理),土壤水分亏缺加重。在生产实践中通常采用夏闲秸秆覆盖^[24]或冬储灌溉^[25]可以增加补充土壤储水,恢复土壤含水量。

本研究发现R_{+1/3}处理的产量增加, WUE_{grain} 降低;R_{-1/3}处理的产量降低,但具有最高的 WUE_{grain} 。适当减少水分能促进冬小麦生长和干物质转移^[16,28-29],使得产量下降的幅度小于耗水量下降的幅度, WUE_{grain} 反而提高,灌溉模拟试验研究也得出了相似的结果^[26-27]。 WUE_{bio} 的结果则有所不同,不管降水增加(R_{+1/3})还是降水减少(R_{-1/3}),收获时的 WUE_{bio} 都低于CK。这可能是由于降水变化导致冬小麦营养生长和生殖生长采取不同的适应措施,

使得不同降水处理下冬小麦生物量和产量不同步,从而形成了不同降水处理的两种类型的 WUE (WUE_{bio} 和 WUE_{grain}) 的差异。

4 结 论

1) 降水变化改变了冬小麦对土壤水的利用和土壤水的补给。降水减少,冬小麦对土壤水的利用增强,导致生育期和休闲期深层土壤含水量的降低,且很难补充恢复;降水增加,冬小麦也会部分利用深层土壤水,土壤含水量在生育期呈降低趋势,在冬小麦收获后,土壤水得到补给,土壤含水量会逐渐恢复并高于前期土壤含水量。

2) 降水变化使得冬小麦耗水组成发生改变。冬小麦优先利用降水转化而来的土壤水,然后利用土壤前期储水。降水减少,降水占耗水量的比例降低,0~2 m 土壤水占耗水量比例增加;降水增加,则有相反的结果。

3) 降水变化能改变生物量(营养生长)和籽粒产量(生殖生长)的平衡,使得生物量和产量不同步,进而影响 WUE 。降水减少, WUE_{bio} 降低,但产量下降程度小于耗水下降程度, WUE_{grain} 反而增加;降水增加,生物量减少而籽粒产量增加,水分的消耗更大, WUE_{bio} 和 WUE_{grain} 均降低。

致谢:感谢长武黄土高原农业生态试验站提供试验和生活条件。

参 考 文 献:

- [1] Mahmood-ul-Hassan M, Gregory P J. Dynamics of water movement on Chalkland[J]. Journal of Hydrology 2002 257: 27-41.
- [2] Ramos M C, Mulligan M. Spatial modelling of the impact of climate variability on the annual soil moisture regime in a mechanized Mediterranean vineyard[J]. Journal of Hydrology 2005 306: 287-301.
- [3] Jan M H Hendrickx, Tzung-mow Yao. Prediction of wetting front stability in dry field soils using soil and precipitation data[J]. Journal of Hydrology 1996 70: 265-280.
- [4] 李 军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原旱塬地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 738-746.
- [5] 李锋瑞, 高崇岳. 陇东黄土旱塬区几种作物田间耗水量及土壤水分亏缺异特征[J]. 应用与环境生物学报, 1996 2(3): 259-267.
- [6] 李锋瑞, 赵松岭. 陇东黄土旱塬不同降水年型作物土壤水分时空分异特征分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1996 32(2): 99-107.
- [7] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展[J]. 应用生态学报, 2010 21(12): 3255-3265.
- [8] 曹生奎, 冯 起, 司建华, 等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报, 2009 29(7): 3882-3892.
- [9] 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.
- [10] Chen Hongsong, Shao Mingan, Li Yuyuan. 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: 242-251.
- [11] Zhao Nana, Yu Fuliang, Li Chuanzhe, et al. Investigation of rainfall-runoff processes and soil moisture dynamics in grass land plots under simulated rainfall conditions[J]. Water 2014 6(9): 2671-2689.
- [12] 郭海英, 赵建萍, 黄 斌, 等. 冬小麦生产年土壤水分变化及其对农业生产影响分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 246-248, 252.
- [13] 廖允成, 韩思明, 温晓霞. 黄土台塬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.
- [14] 杨占平, 杨稚娟, 薛毅芳, 等. 原状土柱模拟不同降水年型条件下冬小麦、夏谷子耗水量研究[J]. 河南农业科学, 2011 40(9): 58-61.
- [15] 张兴娟, 薛绪掌, 郭文忠, 等. 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究[J]. 生态学报, 2014 34(10): 2567-2580.
- [16] 赵世伟, 管秀娟, 吴金水. 不同生育期干旱对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2001 20(4): 56-59.
- [17] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981—2010 年中国气候区划[J]. 科学通报, 2013 58(30): 3088-3099.
- [18] Guo Yu Qiu, Liming Wang, Xinhua He, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the north China plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008 148: 1848-1859.
- [19] 曹永强, 张亭亭, 常 静, 等. 辽西北玉米耗水特征及其与降水和气温的关系[J]. 水利水电科技进展, 2014 34(3): 7-11.
- [20] 赵凌云, 潘志华, 安萍莉, 等. 北方农牧交错带作物耗水特征及其与气温和降水的关系——以内蒙古呼和浩特市武川县为例[J]. 资源科学, 2012 34(3): 401-408.
- [21] 严昌荣, 居 辉, 彭世琪, 等. 中国北方旱农地区农田水分动态变化特征[J]. 农业工程学报, 2002 18(3): 11-14.
- [22] 牛俊杰, 赵景波, 王尚义. 论山西褐土区农田土壤干燥化问题[J]. 地理研究, 2008 27(3): 519-526.
- [23] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征[J]. 生态学报, 2005 25(10): 2491-2498.
- [24] 高艳梅, 孙 敏, 高志强, 等. 不同降水年型旱地小麦覆盖对产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2015 48(18): 3589-3599.
- [25] 杨 伟. 甘肃河西地区不同储水灌溉农田水分特征分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [26] 黄彩霞, 柴守玺, 赵德明, 等. 不同水分处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 草业学报, 2010 19(5): 196-203.
- [27] 房全孝. 灌溉对冬小麦耗水规律和水分利用效率的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- [28] 山 仑, 邓西平, 张岁岐. 生物节水研究现状及展望[J]. 中国科学基金, 2006 20(2): 66-71.
- [29] 黄彩霞, 柴守玺, 赵德明, 等. 灌溉对干旱区冬小麦干物质积累、分配和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2014 38(12): 1333-1344.