

2 个小麦品种水分利用效率的差异及其与深层水分利用的关系

刘为健^{1,2}, 杨文稼^{1,2}, 王盈盈^{1,2}, 王仕稳^{1,2,3}, 邓西平^{2,3}, 殷俐娜^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.中国科学院水利部水土保持研究所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)

摘要: 研究旨在探究不同小麦品种对深层土壤水分利用差异及其对产量、水分利用效率的影响。试验于 2017—2019 年在陕西长武进行,试验为品种、播量双因子试验,品种为主处理(A 为“长旱 58”,B 为“长航 1 号”),播量为副处理(10:播量 150 kg/hm²,12:播量 180 kg/hm²),分析不同处理对冬小麦各生育期土壤水分消耗及其产量和水分利用效率的影响。结果表明:在不同的试验年,与“长旱 58”相比,“长航 1 号”对土壤水分的消耗均显著增加。与此同时,相比“长旱 58”,“长航 1 号”的小麦穗粒数、收获指数、产量及水分利用效率均显著提高。说明“长航 1 号”较“长旱 58”增加了对土壤水分的消耗,尤其增加了对深层土壤水分的消耗,从而影响小麦穗粒数和收获指数,最终获得了较高的产量及水分利用效率。

关键词: 冬小麦; 品种; 土壤水; 产量; 水分利用效率

中图分类号:S512.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)03-0245-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.037

Difference of Water Use Efficiency Between Two Wheat Cultivars and Its Relation with Deep Water Absorption

LIU Weijian^{1,2}, YANG Wenjia^{1,2}, WANG Yingying^{1,2},

WANG Shiwen^{1,2,3}, DENG Xiping^{2,3}, YIN Lina^{1,2,3}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The aim was to investigate the effects of different wheat cultivars on water use efficiency, water use in deep soil, and wheat yield. The experiment was conducted at Changwu experimental station during 2017—2019. A two-factor experiment was conducted, one factor was cultivar (A: “Changhan 58”, B: “Changhang 1”), and another factor was sowing rate (10: 150 kg/hm² of sowing rate, 12: 180 kg/hm² of sowing rate). The effects of different factors on soil water consumption, water use efficiency, and yield at different wheat growth stages were analyzed. The results showed that the average consumption of soil storage water in different test years of “Changhang 1” was significantly higher than that of “Changhan 58”. In addition, the number of grain number per panicle, harvest index, yield, and water use efficiency of “Changhang 1” were also remarkably higher than those of “Changhan 58”. It was showing that compared with “Changhan 58”, “Changhang 1” increased the consumption of soil water, which may contribute to increase the grain number per panicle and the wheat harvest index, and ultimately lead to higher yield and water use efficiency.

Keywords: winter wheat; cultivars; soil water; yield; water use efficiency

黄土高原是中国典型的旱作农业区^[1],该区域年均降水量在 150~750 mm,小麦休闲期降水量占周年降水量的 60%以上,且该地区周年潜在蒸发量可

达 1 400~2 000 mm^[2],降水量、蒸发量、降水时期与小麦需水量及需水时期的矛盾尖锐;此外,黄土高原地下水位较深,少有灌溉条件^[3]。因此,充分利用有

收稿日期:2019-10-09

资助项目:国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01);国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB150402)

第一作者:刘为健(1995—),硕士研究生,主要从事植物营养及旱地农业研究。E-mail:15550856083@163.com

通信作者:王仕稳(1978—),博士,研究员,主要从事植物营养及旱地农业研究。E-mail:shiwenwang@nwsuaf.edu.cn

限的水分资源,提高作物的水分利用效率是该地区提高小麦生产力的关键。

水分利用效率不仅受施肥、播量及其他栽培措施等^[4-7]因素的影响,也存在品种间差异。有关资料^[8]显示,不同小麦品种的籽粒产量和水分利用效率存在明显差异。据董宝娣等^[9]对 19 个小麦品种的研究表明,不同品种间产量差异达 44.9%,水分利用效率差异达 42.2%;闫学梅等^[10]研究表明,各小麦品种水分利用效率与土壤水分吸收显著相关,小麦通过调控自身对土壤水分的吸收消耗进而影响水分利用效率^[11]。

黄土高原有一个得天独厚的优势,即拥有深厚的黄土沉积,其 0—3 m 土层可储存 719~816 mm 的降水^[12]。因此,土壤水在此区域是作物生长的重要水分来源。Zhang 等^[13]研究表明,在干旱年,雨养小麦 80% 的水分消耗来源于播前土壤水分,而在湿润年占 60%。在黄土高原地区,土壤蒸发和作物根系吸收导致作物生育后期表层土壤水分严重匮乏,但同时,仍有大量的水分残留在 100—300 cm 深层土壤中可供作物吸收利用。Kirkegaard 等^[14]研究表明,在冬小麦开花期之后,每消耗 10.5 mm 的深层土壤水分就可以生产 0.62 t/hm² 的籽粒,其边际水分利用效率可达 59 kg/(hm²·mm)。因此,提高作物对深层土壤水分的利用是旱地作物产量提高的关键。

“长航 1 号”是继“长旱 58”后培育的新的旱地小麦品种^[15]。前人^[15-17]研究结果表明,“长航 1 号”具有较高的产量及水分利用效率,具有较大的推广空间。因此,本试验选用“长旱 58”和“长航 1 号”为供试材料,并根据试验地实际情况,每个品种设计 150 kg/hm² 和 180 kg/hm² 2 种播量作为平行试验,以此研究 2 个品种水分利用效率差异及其与深层土壤水分利用的关系,以期为提高旱地作物水分利用效率,指导旱地小麦生产提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于长武农业生态试验站(107°45'E, 35°12'N),海拔 1 220 m。年均降水量 584.1 mm,且 7—9 月降水量占全年降水量的 55%以上,年均温 9.1 °C,属暖温带半干旱大陆性季风气候。该地区农业生产用水主要来自天然降水,为典型旱作农业区。2017—2018 年及 2018—2019 年年降水量分别为 504.6,670.5 mm,其中冬小麦生育期降水量分别为 249,306 mm。

试验地土壤为中壤质黑垆土,孔隙率 50%左右,有机质含量为 11.57 g/kg,全氮含量为 0.80 g/kg,碱解氮含量为 52.33 mg/kg,全磷含量为(P₂O₅)0.68 g/kg,速效磷含量为 11.11 mg/kg,速效钾含量为 154.9 mg/kg。

1.2 试验材料与设置

供试材料为“长航 1 号”和当地主栽品种“长旱 58”,于每年 9 月 24 日播种,翌年 6 月 30 日收获。试验地前茬为冬小麦,夏季休闲。试验以品种为主处理(A:“长旱 58”,B:“长航 1 号”),播量为副处理(10:播量 150 kg/hm²,12:播量 180 kg/hm²),共 4 个处理。小区试验中每处理设 3 重复,小区面积 4 m×5 m,随机区组排列。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 群体、地上生物量的测定 于每年的冬前期(12 月 24 日)、返青期(3 月 15 日)、拔节期(4 月 13 日)、开花期(5 月 20 日)在各处理小区随机选取 1 行,采集 1 m 长度,每个小区取 2 次重复,在统计地上群体株数和分蘖数后于 80 °C 烘箱中烘至恒重后称重。

1.3.2 土壤含水率的测定及储水量的计算 土壤水分测定用土钻取土,于每年的播前(9 月 24 日)、拔节期(4 月 13 日)、开花期(5 月 20 日)、收获后(6 月 30 日)在各处理小麦行间分层采集 0—300 cm 土层土样(0—100 cm 每 10 cm 1 个土样,100—300 cm 每 20 cm 1 个土样),全生育期共采样 4 次,用烘干法测定土壤含水量,土壤容重用环刀法测定,之后再计算土壤储水量,计算公式为:

$$Q=d \times h \times c$$

式中:Q 为某土层储水量(mm);d 为土壤容重(g/cm³);h 为土层厚度(mm);c 为土层含水百分率(%)。本试验中总土壤储水指 0—300 cm 土层储水量,首先按照不同土层土壤含水量进行分层计算求得各层储水量,最后将各层储水量累计加和求得总储水量。

1.3.3 作物耗水量的测定 各处理耗水量采用水量平衡公式计算,计算公式为:

$$ET=R+I-F+Q-S+W$$

式中:ET 为作物蒸腾蒸发量(mm);R 为降水量(mm);I 为灌水量(mm);F 为地表径流量(mm);Q 为地下水补给量(mm);S 为深层渗漏量(mm);W 为土壤贮水量的变化量(mm)。本试验中小麦全生育期无灌溉,因此 I=0;在黄土高原,由于降水量较少且地下水位埋藏较深,因此 F、Q 和 S 均按零计算。

1.3.4 作物水分利用效率的计算

$$WUE=Y/ET$$

式中:WUE 为水分利用效率(kg/(hm²·mm));Y 为作物产量(kg/hm²);ET 为作物整个生育期总耗水量(mm)。

1.3.5 产量测定 在小麦成熟期分别在每个小区长势均匀处取 1 m×1 m 完整植株样,调查穗数及穗粒数之后,风干称其干重即地上生物量,最后脱粒测定籽粒产量及千粒重。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 整理数据和绘图,通过 SPSS 软件进行方差分析,用 LSD 法进行差异显著比较,显著性水平设为 0.05。

2 结果与分析

2.1 品种、播量处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响

由表 1 可知,无论是“长旱 58”还是“长航 1 号”品种,2 年度土壤贮水消耗量均随播量的增加而增加,与播量 150 kg/hm² 相比,播量 180 kg/hm² 土壤贮水消耗量平均增幅达 18.2%,表明播量 180 kg/

hm² 可明显增加冬小麦田间耗水量,这可能与播量 180 kg/hm² 增加了小麦群体有关。播量 180 kg/hm² 也显著提高了产量,2 年平均播量 180 kg/hm² 较播量 150 kg/hm² 增产 5.9%。从表 1 还可看出,与“长旱 58”相比,2 年度“长航 1 号”处理土壤贮水消耗量、小麦产量、水分利用效率分别提高 12.2%,10.0%,6.2%,说明“长航 1 号”较“长旱 58”的土壤水分的消耗程度更高,能获得更高的产量及水分利用效率。从方差分析结果来看,品种、播量、年份均对土壤贮水消耗量、小麦产量及水分利用效率有显著影响,其中产量受品种和年份交互作用的影响显著。

表 1 品种、播量对水分利用效率的影响

年份	处理		土壤储水量/mm		有效 降水量/mm	土壤水 消耗量/mm	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
	品种	播量/ (kg·hm ⁻²)	播种前	收获后				
2017—2018	长旱 58	150	563a	457a	249	106c	5341c	15.0c
		180	563a	424b		139ab	5894b	15.2c
	长航 1 号	150	563a	432ab		130b	6133b	16.2b
		180	563a	413b		150a	6748a	16.9a
2018—2019	长旱 58	150	744a	622a	306	121c	6323b	14.8b
		180	745a	603ab		142b	6485b	14.5c
	长航 1 号	150	750a	613ab		137b	6731a	15.2a
		180	741a	587b		153a	6841a	14.9b
变异来源	自由度							
年份*品种*播量	1		0.16	0.61		0.79	0.60	1.14
年份*品种	1		0.01	0.04		0.04	12.55*	3.36
品种*播量	1		0.16	0.06		2.21	0.10	8.96
年份*播量	1		0.11	0.01		0.89	11.76*	1.45
年份	1		818.00**	714.60**		7.02*	70.23**	5.66*
品种	1		0.01	6.25*		36.26**	74.58**	5.01*
播量	1		0.11	15.17*		67.60**	27.11**	63.37**

注:不同字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$);**和*分别代表各处理间达到差异在 0.01 和 0.05 显著水平。下同。

从表 2 可以看出,2 年度试验结果基本一致,即品种与播量处理对冬小麦产量构成要素有明显的调控效应,2 个品种均在播量 180 kg/hm² 时穗数最多,比播量 150 kg/hm² 增多 15.2%;“长航 1 号”品种较“长旱 58”品种能获得更高的穗粒数和收获指数,其增幅分别为 8.7%,6.1%。从方差分析结果来看,播量对小麦穗数、收获指数均有显著影响;品种主要影响小麦穗粒数和收获指数;年型对小麦穗粒数和成穗率有显著影响。

2.2 品种、播量处理对冬小麦各生育期群体及地上生物量的影响

从图 1 可以看出,2 年度小麦群体均先增加后降低,拔节期达到最大,之后逐渐降低。在两个品种下,随播量的增加冬小麦各个时期的群体数都显著增加,在冬前期、返青期、拔节期、开花期群体数分别较常规播量处理增加 23.7%,14.9%,16.1%,15.9%。从图 1 也可以看出,在各个生育期品种对群体数的影响不显著。2018—2019 年较 2017—2018 年在冬前期群体数明显降低,这可能与 2018—2019 年冬前降水量

偏少有关,但在 2018—2019 年冬前期到返青期分蘖数增加速率明显高于 2017—2018 年。

由图 2 可知,冬小麦生物量随生长时间的推移也在持续增加,增加速率整体呈“慢—快—慢”的趋势。返青期—拔节期出现第一个生物量增加高峰,拔节期—开花期生物量增长速度最快,开花期—成熟期生物量增加缓慢。2 个品种在各生育期均是播量 180 kg/hm² 的生物量大于播量 150 kg/hm² 生物量,在冬前期、返青期、拔节期、开花期、成熟期生物量分别较常规播量处理高 22.8%,13.3%,13.6%,9.2%,8.8%。品种对各个生育期生物量的影响均不显著。

2.3 品种、播量处理对冬小麦各生育期土壤含水率的影响

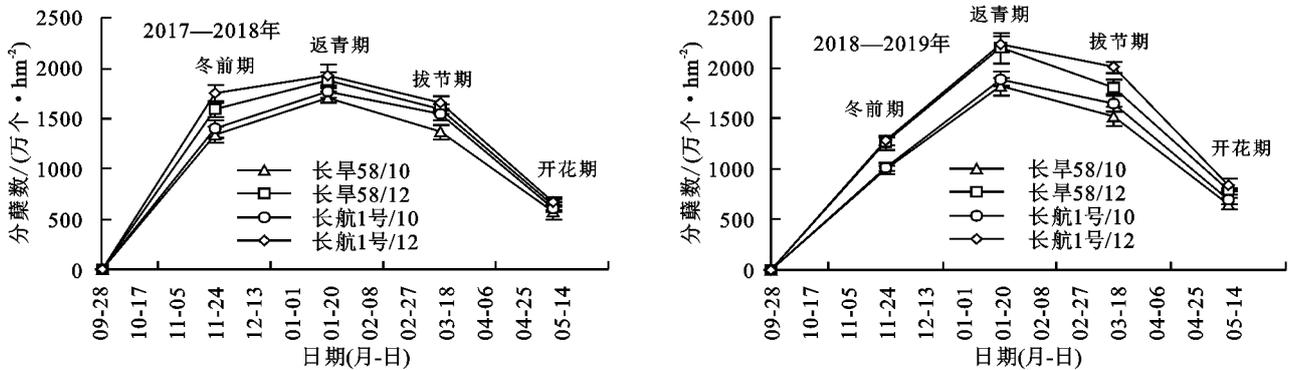
图 3 中 a1~a4 分别为 2017—2018 年返青期、拔节期、开花期、成熟期各处理麦田含水量状况,b1~b4 分别为 2018—2019 年返青期、拔节期、开花期、成熟期各处理麦田含水量状况。在同一品种下,播量 180 kg/hm² 较播量 150 kg/hm² 2 年度均明显降低了拔节期土壤 80—

300 cm 土层土壤含水量(图 3 a2、b2);播量 180 kg/hm² 较播量 150 kg/hm² 明显降低了 2 年度成熟期 180—300 cm 土层土壤含水量(图 3 a4、b4)。从图 3 还可以看出,

“长航 1 号”较“长旱 58”2 年度成熟期各土层的含水量明显不同,“长航 1 号”较“长旱 58”显著降低了 2 年度 180—300 cm 土层土壤含水量。

表 2 品种、播量对产量构成要素的影响

年份	处理		穗数/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	收获指数/ %	成穗率/ %
	品种	播量/ (kg · hm ⁻²)					
2017—2018	长旱 58	150	464.9b	34.15b	42.92a	0.45c	27.17b
		180	537.7a	32.27b	42.30a	0.44c	28.55a
	长航 1 号	150	464.8b	37.70a	44.30a	0.50a	26.35b
		180	533.6a	36.80a	43.60a	0.48b	27.59ab
2018—2019	长旱 58	150	457.9b	35.25b	44.28a	0.46b	23.83a
		180	529.0a	31.00d	44.23a	0.46b	23.30a
	长航 1 号	150	458.2b	37.00a	44.16a	0.48a	24.88a
		180	526.2a	33.00c	44.17a	0.46b	23.68a
变异来源		自由度					
年份 * 品种 * 播量		1	0.12	0.66	0.10	0.06	0.17
年份 * 品种		1	0.03	5.34 *	2.24	16.06 *	6.48 *
品种 * 播量		1	0.02	0.16	0.05	9.39	0.41
年份 * 播量		1	0	11.69 *	1.44	1.39	11.97 *
年份		1	1.00	7.97 *	2.78	0.50	122.50 **
品种		1	0	58.52 **	1.56	68.06 **	0.08
播量		1	51.41 **	46.90	0.02	12.50 *	0.51



注:其中长旱 58/10、长旱 58/12 分别为长旱 58 播量 150,180 kg/hm² 处理,长航 1 号/10、长航 1 号/12 分别为长航 1 号播量 150,180 kg/hm² 处理。下同。

图 1 不同处理各生育阶段群体动态变化情况

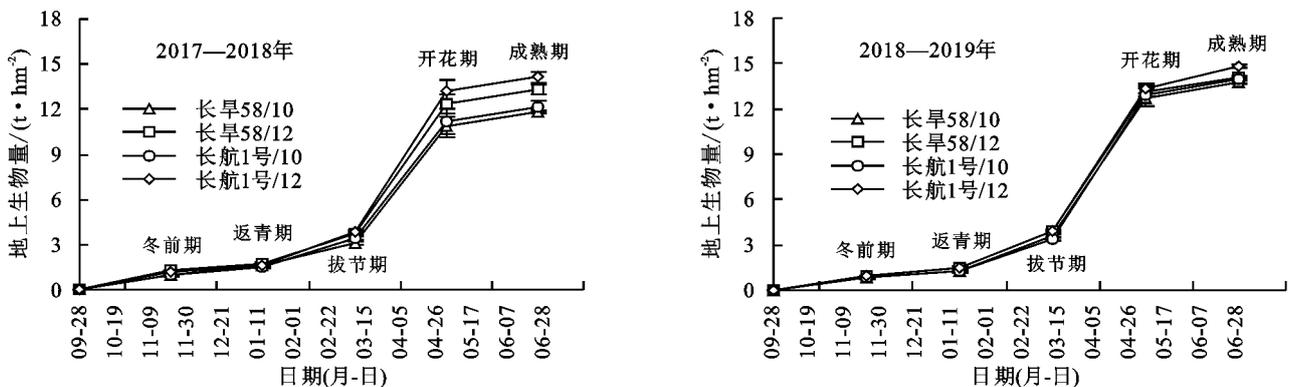


图 2 不同处理各生育阶段地上生物量动态变化情况

2.4 品种、播量处理对冬小麦各生育期土壤贮水量的影响

由图 4 可知,在同一品种下,播量 180 kg/hm² 较播

量 150 kg/hm² 均明显降低了 2 年度开花期和成熟期土壤贮水量,降幅分别达 4.7%,4.8%,对播前、返青期、拔节期的影响较小。从图 4 也可以看出,“长航 1 号”品种

较“长旱 58”品种 2 年度播前、返青期、拔节期土壤贮水量均无明显差异,但“长航 1 号”较“长旱 58”2 年度均降低了开花期和成熟期的土壤含水量。2017—2018 年度播前一返青期降水量大,所以 2017—2018 年度冬小麦播

前一返青期土壤贮水显著增加,返青期之后土壤贮水量不断降低;2018—2019 年度拔节期—成熟期降水量大,所以土壤贮水在拔节期—成熟期变化量不大,降水满足了拔节期—成熟期冬小麦对水分的消耗。

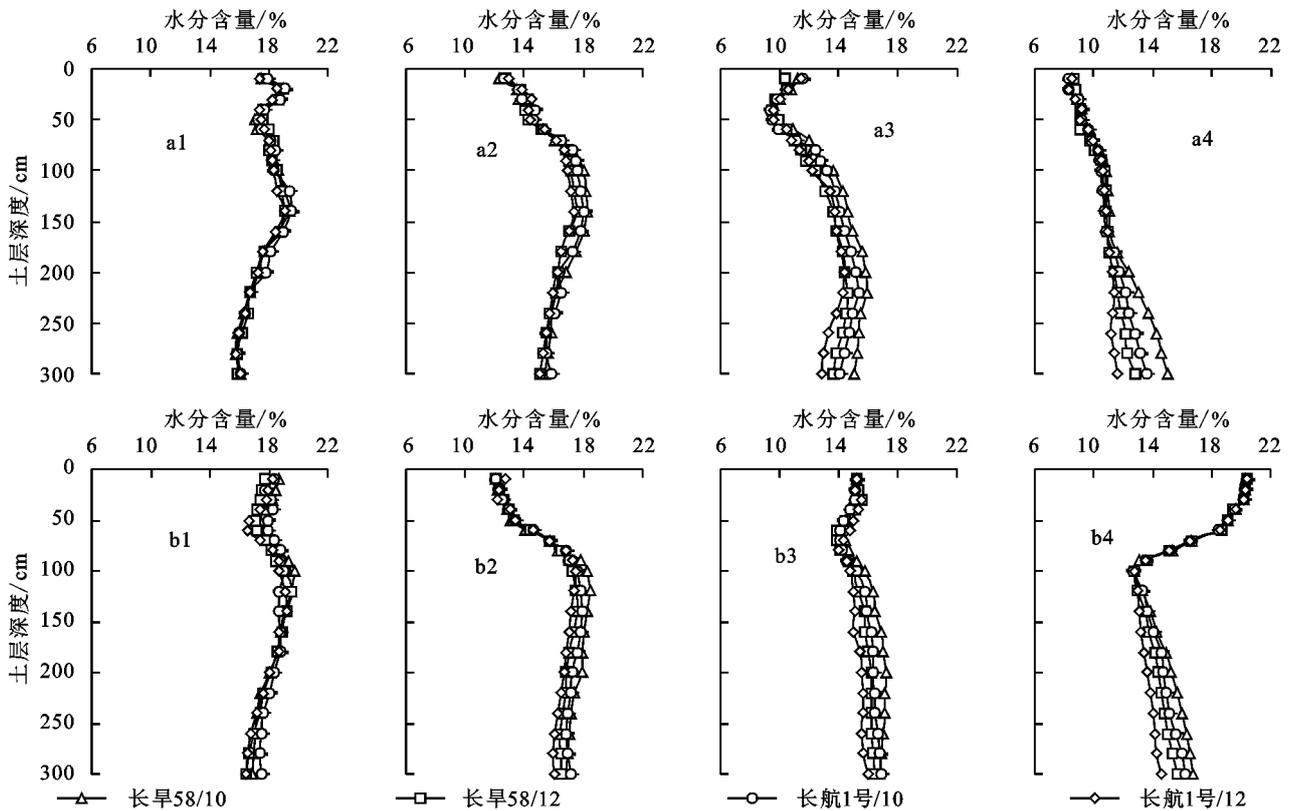


图 3 品种、播量对各生育期麦田含水量的影响

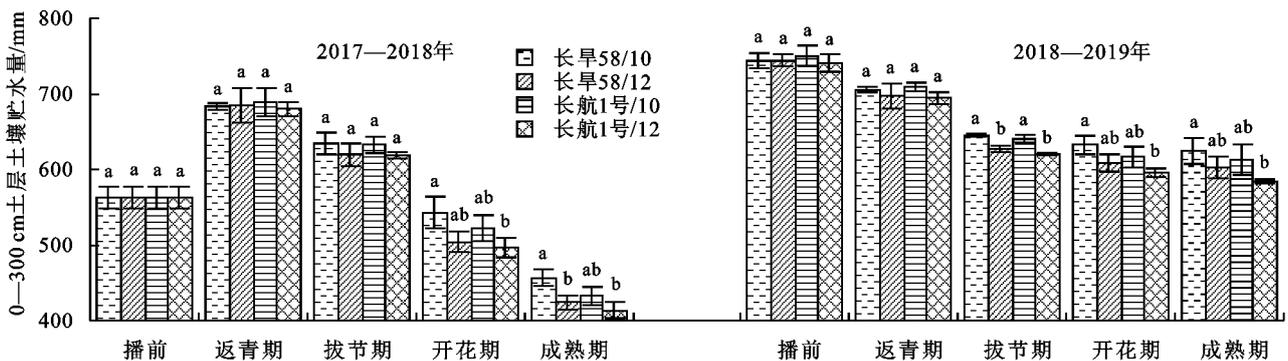


图 4 品种、播量对各生育期麦田贮水量的影响

2.5 品种、播量处理对冬小麦各土层阶段耗水量的影响

图 5 中 1,2 为“长旱 58”播量 150 kg/hm² 和 180 kg/hm²,图 5 中 3,4 为“长航 1 号”播量 150 kg/hm² 和 180 kg/hm²;图 5 中 a,b 为 2017—2018 年播前一返青期和返青期—成熟期麦田各土层储水变化量,图 5 中 c,d 为 2018—2019 年播前一返青期和返青期—成熟期麦田各土层储水变化量。根据水分消耗规律,分别计算 0—100,100—200,200—300 cm 水分消耗情况(图 5),图中外边框为虚线的负数表示此生育阶段此层土壤消耗的水量,外边框为实线的正数表示此生育阶段此层土壤补充的水量。从图 5(a1~a4)可

以看出,同一品种下,2017—2018 年播量 180 kg/hm²和播量 150 kg/hm²对播前一返青期土壤耗水量无明显差异;在 2018—2019 年播量 180 kg/hm²较播量 150 kg/hm²明显增加了播前一返青期对 0—100 cm 土层土壤水分的消耗,增加土壤水消耗 10 mm,增幅 22.9%(图 5 c1~c4);播量 180 kg/hm²较播量 150 kg/hm²增加了在返青期—成熟期对 200—300 cm 土层土壤贮水的消耗,2 年度平均多消耗 17 mm,增幅达 61.0%(图 5, b1~b4, d1~d4)。“长航 1 号”较“长旱 58”在播前一返青期土壤贮水消耗无明显差异,但“长航 1 号”较“长旱 58”增加了在返青期—成熟期对 200—300 cm 土层土壤贮水的消耗,多消耗 13.5 mm,增幅达 39.4%。

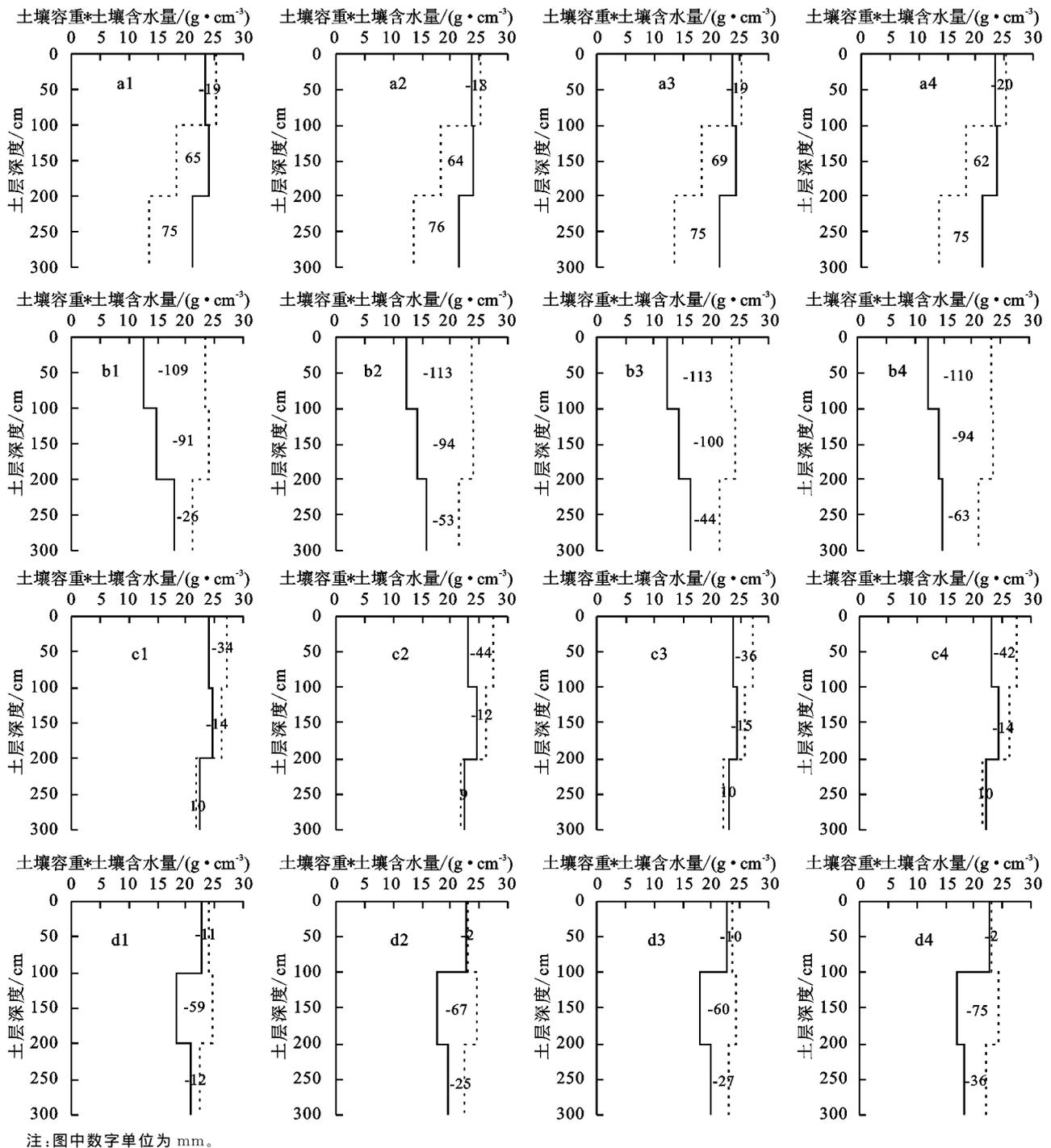


图 5 不同处理各生育阶段不同土层深度水分变化情况

3 讨论

本研究结果表明，“长航 1 号”较“长旱 58”的产量和水分利用效率更高。小麦产量受小麦穗数、穗粒数、千粒重共同影响^[18]，“长航 1 号”主要增加了小麦穗粒数，增幅 8.7%，对穗数和千粒重的影响不显著；据田文仲等^[19]的研究指出，小麦生长期生物量的积累量影响籽粒产量的形成。本研究中，“长航 1 号”在整个生育周期较“长旱 58”都有更高的干物质积累量，并且“长航 1 号”的收获指数高于“长旱 58”，表明在营养生长阶段“长航 1 号”较“长旱 58”积累更多的

生物量，在生殖生长阶段“长航 1 号”较“长旱 58”将更多的碳水化合物转移到籽粒中，因此“长航 1 号”最终获得了更高的产量。从小麦生育期土壤各土层含水量及贮水量来看，开花期和成熟期的差异最明显。据苗果园等^[20]的研究指出，高产型小麦品种，深层根系分布相对较多，在小麦生长的中后期往往能消耗更多的深层水分，在本研究中，“长航 1 号”小麦品种在拔节期—成熟期对 200—300 cm 的土壤耗水较“长旱 58”更高，这为“长航 1 号”在各生育期干物质积累量较“长旱 58”高提供了水分支持，同时也为“长航 1

号”较“长旱 58”高产提供了水分的支持。

本研究表明,播量对小麦的群体性状、产量、深层水分消耗都有重要影响。适当增加播量,能显著提高小麦籽粒产量^[21-23]。从产量构成要素看,适当增加播量主要影响了小麦穗数,其次为穗粒数,对千粒重的影响不大^[24-25]。从小麦群体动态过程来看,适当增加播量提高了小麦各生育阶段的群体数,且成穗率与常规播量相比没有下降,最终使收获期穗数显著提高,这与刘丽平等^[26]研究结果一致。从小麦各生育期麦田土壤水含量及贮水量的变化来看,拔节期和开花期差异最大,增加播量导致贮水量降低^[27]。从小麦对土壤水分消耗角度看,为满足庞大地上群体对水分的需要,小麦需要从土壤中吸收更多的水分。在本试验中,所供试的 2 个小麦品种“长航 1 号”和“长旱 58”都是适应旱作生长的小麦品种,都能较好地利用深层土壤水分。本试验结果表明,适当增加播量,增加了从拔节期—成熟期小麦对 200—300 cm 土层的水分消耗。这为支撑因增加播量而构建起的小麦庞大群体稳定生长提供了水分上的支持。但适当增加播量并没有提高小麦水分利用效率,这与相关研究^[28-30]结果基本一致。

4 结论

(1)品种“长旱 58”与品种“长航 1 号”都能较好地利用深层土壤水分,是适宜旱作条件下种植的品种。相比较“长航 1 号”较“长旱 58”品种从深层土壤中吸收水分的能力更强,有更高的产量及水分利用效率。

(2)适当增加播量能增加小麦穗数从而增加籽粒产量。但增加播量在增加穗数的同时也降低了小麦穗粒数以及收获指数。

(3)不同品种小麦对深层土壤水分吸收能力的不同是影响水分利用效率差异的重要因素。笔者在试验中所选用的材料是选育时间间隔较长的品种,并进行了 2 个播量下的重复认证,取得的试验结果对育种及大田生产具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 林文. 地膜和秸秆覆盖对黄土高原旱作农田土壤水库与作物产量的影响[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.

[2] 耿庆玲. 西北旱区农业水土资源利用分区及其匹配特征研究[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.

[3] 李猛. 西北地区节水农业发展策略研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.

[4] 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 覆盖模式对农田土壤环境与冬小麦生长的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 127-135.

[5] 马守臣, 张伟强, 段爱旺. 不同亏缺灌溉方式对冬小麦产

量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 9-14.

- [6] 熊建, 王忠波, 张忠学, 等. 保墒措施和调亏灌溉对寒区春玉米生长及产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 6-15.
- [7] 赵小光, 张耀文, 陈文杰, 等. 不同种植密度下甘蓝型油菜光合生理特性的差异[J]. 西南农业学报, 2019, 32(7): 1531-1536.
- [8] 高延军, 张喜英, 陈素英, 等. 冬小麦品种间水分利用效率的差异及其影响因子分析[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(5): 45-49.
- [9] 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨, 等. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 27-33.
- [10] 闫学梅, 于振文, 张永丽, 等. 不同小麦品种耗水特性和籽粒产量的差异[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 694-700.
- [11] Liu X W, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 59-67.
- [12] Huang M B, Dang T H, Gallichand J, et al. Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion in the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58(3): 267-278.
- [13] Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(12): 2275-2287.
- [14] Kirkegaard J A, Lilley J M, Howe G N, et al. Impact of subsoil water use on wheat yield[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58(4): 303-315.
- [15] 李跃. 不同年代旱作小麦穗部苞片光合特性及蔗糖合成代谢差异[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [16] 戴伟. 播量对长航一号小麦产量及抗倒性的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [17] 侯芳芳. 播期播量对长航 1 号小麦产量及品质的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [18] 张晗, 孙加梅, 韩瑞玺, 等. 基于小麦产量三要素的产量条件 QTL 分析[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(1): 42-49.
- [19] 田文仲, 张媛菲, 马雯, 等. 行距和播量对比对高产小麦品种“洛麦 23”群体质量及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(3): 347-353.
- [20] 苗果园, 潘幸来. 黄土高原旱地冬小麦根系生长规律的研究[J]. 作物学报, 1989, 15(2): 104-115.
- [21] 温明星, 陈爱大, 李东升, 等. 播期和密度对镇麦 168 农艺和品质性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(6): 1243-1247.
- [22] 陈恢富, 王小燕, 高春保, 等. 不同种植密度对江汉平原地区小麦产量的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(17): 47-49.

(下转第 258 页)

较好,但是需要因地制宜选择合适释放率和释放期的缓/控释肥料,因此,缓/控释肥料的筛选还有待于深入研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室.中国的粮食安全[N].人民日报,2019-10-15(010).
- [2] 何萍,金继运, Mirasol F-P,等.基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):499-505.
- [3] 徐新朋.基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [4] 徐新朋,魏丹,李玉影,等.基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1458-1467.
- [5] Chuan L M, He P, Pampolino M F, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency [J].Field Crops Research,2013,140:1-8.
- [6] 刘奕.水稻养分专家系统在吉林省中部稻区的应用与优化研究[D].长春:吉林农业大学,2018.
- [7] 梁俊梅,张君,安昊,等.养分专家系统推荐施肥对马铃薯产量及肥料利用率的影响[J].作物杂志,2019(4):133-138.
- [8] Xu X P, He P, Pampolino M F, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency [J]. Field Crops Research, 2014,157:27-34.
- [9] Xu X P, He P, Qiu S J, et al. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China [J].Field Crops Research,2014,163:10-17.
- [10] Ullah S, Ai C, Ding W C, et al. The response of soil fungal diversity and community composition to long-term fertilization[J].Applied Soil Ecology,2019,140:35-41.
- [11] 张爱平,刘汝亮,杨世琦,等.基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):555-562.
- [12] 刘汝亮,王芳,王开军,等.控释氮肥侧条施用对东北地区水稻产量和氮肥损失的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):252-256.
- [13] 段然,汤月丰,王亚男,等.不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(12):1815-1822.
- [14] 韩雪松.侧深施肥下施肥量和密度对水稻产量形成的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [16] Yang F, Xu X, Ma J, et al. Experimental validation of a new approach for rice fertilizer recommendations across smallholder farms in China[J].Soil Research, 2017,55(6):579-589.
- [17] 辛柳.施钾量对寒地粳稻碳水化合物形成积累和产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.
- [18] 刘奕,王寅,李春林,等.吉林省中部一季稻区推荐施肥方法研究[J].水土保持学报,2018,32(4):273-278.
- [19] 刘东海,陈云峰,李双来,等.养分专家系统推荐施肥对湖北中稻产量和养分利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2019(4):84-88.
- [20] 柳开楼,李大明,胡志华,等.养分专家系统在双季稻中的应用和评价[J].中国土壤与肥料,2019(1):184-189.
- [21] 刘汝亮,李友宏,王芳,等.缓释肥侧条施肥技术对水稻产量和氮素利用效率的影响[J].农业资源与环境学报,2014,31(1):45-49.
- [22] 钟雪梅,黄铁平,彭建伟,等.机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响[J].中国水稻科学,2019,33(5):436-446.
- [23] 梁涛,廖敦秀,陈新平,等.重庆稻田基础地力水平对水稻养分利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(16):3106-3116.
- [24] 屈会娟,李金才,沈学善,等.种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响[J].作物学报,2009,35(1):124-131.
- [25] 张明明,董宝娣,乔匀周,等.播期、播量对旱作小麦‘小偃60’生长发育、产量及水分利用的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(8):1095-1102.
- [26] 张晓,江伟,李曼.不同年份下播种密度对扬麦13群体动态和产量性状的影响[J].金陵科技学院学报,2017,33(1):60-63.
- [27] 王立明.播种密度对旱地不同类型冬小麦产量和水分利用效率的影响[J].作物品种资源,2010(3):41-43.
- [28] 刘文国,张建昌,曹卫贤,等.旱地小麦不同栽培条件对土壤水分利用效率的影响[J].西北农业学报,2006,15(5):47-51.
- [29] 贾秀领,蹇家利.高产冬小麦水分利用效率及其组分特征分析[J].作物学报,1999,25(3):309-314.
- [30] 邓西平,山仑,稻永忍,等.密度、施肥对旱地春小麦产量、水分利用效率和籽粒养分含量的补偿效应[J].西北植物学报,2003,23(11):1861-1870.

(上接第 251 页)