

有限供水对冬小麦根系生长发育的影响 及其对底墒的利用特征*

郭安红 刘庚山 安顺清 任三学 林日暖

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

试验在中国气象局固城农业气象试验基地人工控制农田水分试验场进行。在底墒充足的条件下采用三种水分处理: I_1 拔节期一次性供水 75 mm; I_2 返青期供水 37.5 mm, 拔节期供水 37.5 mm; I_{CK} 生长季内无水分供应。生育期内遮去自然降水。试验结果表明, I_1 处理由于有充足的底墒配合有限水分胁迫, 有助于减少冬小麦表土层(0~30 cm)的根生物量, 增加根系干物质向土壤深层分配, 挖掘深层土壤水分, 提高了土壤水供应量和有效底墒供水率。另外, I_1 处理增加了需水关键期的有效蒸腾耗水比例, 提高了水分利用效率。虽然由于前期的水分胁迫降低了 I_1 处理总穗数, 但由于增加了籽粒数和籽粒重, 产量反而有所增加。
关键词: 有限供水 冬小麦 根系 底墒利用

引 言

我国北方冬小麦生育期内干旱严重, 农业水资源紧缺。底墒无论在灌溉农业区还是非灌溉的旱作农业区, 都是小麦生长的重要水源。研究表明, 土壤深层储水具有很高的生物有效性。充足的底墒能弥补春季水分不足而形成较好的产量^[1]。然而由于缺乏深层底墒利用技术, 大大降低了底墒利用率。

对深层底墒有效利用的切入点是在发挥深层根系的吸水潜力上。在增强土壤水对作物有效性方面, 可以通过调节根系生长而实现的方法有两种, 即增加根系所占的土壤体积, 扩大根系对土壤水分的利用吸收范围, 另外增加单位土壤体积中的根系生长, 以增加根系对土壤水分的吸收能力^[2]。近年来的研究表明, 在深层土壤中尚保留许多可利用水的情况下, 作物浅层根系量的减少是有益的^[3,4]。一些现代小麦品种其收获指数和水分利用效率的增加与浅层根系生物量和根长密度的减少有一定关系^[5]。这打破了过去认为的“深、广、分支多的根系是抗旱植物的特征之一”^[6]传统观点。因此通过根系的调控增加土壤可利用水量, 特别是增加作物对深层土壤水分的吸收利用是十分重要和必要的。

在影响根系生长发育的诸多土壤环境因素中, 土壤水分和肥力状况对根系的生长和在土壤中的分布影响最大, 特别是土壤水分对深层根系的发育和配置比例有明显的影响^[2]。因此, 本文拟从不同供水方式入手, 探讨相应的根系生长发育模式及其对底墒利

* 中国气象科学研究院博士启动基金“冬小麦根系对土壤水分高效利用研究”资助。

2001-03-08 收到, 2001-09-16 收到修改稿。

用的特征,为合理调节根系的生长发育和吸水模式,发挥作物深层根系的吸水潜力,充分利用自然降水和土壤水库的调控作用,以提高水分利用效率并提高产量提供理论依据。

1 材料及方法

本试验在中国气象局固城农业气象试验基地(位于河北省定兴县固城镇,39°08' N, 115°40' E,海拔高度 15.2 m)的人工控制农田水分试验场进行。试验时间 1999 年 9 月至 2000 年 6 月,供试冬小麦品种为当地主要种植的京冬 6 号。试验场土壤类型为壤土,肥力中等,0~200 cm 深土层平均田间持水量为 22.71%(占干土重百分比),平均凋萎湿度为 5.0%(占干土重百分比),土壤容重为 1.43 g/cm³。

1.1 试验设计

利用人工控制农田水分试验场内的 9 个小区,每个小区面积 8 m²(4 m×2 m),每个小区四周均有地下隔离层(用砖和水泥砌成),隔离深度为 2 m,用以防止水分的水平交换。主要进行供水对冬小麦根系生长发育和产量形成因素关系的试验,播种时土壤湿度保持一致,为 80%左右,(0~200 cm 土层土壤平均有效底墒量 334.5 mm)。采用三种供水方式,分别为: I₁ 拔节期一次性供水 75 mm; I₂ 返青期供水 37.5 mm,拔节期供水 37.5 mm; I_{CK} 生长季内无水分供应。生育期内的全部自然降水用场内的大型电动防雨棚遮去。

1.2 观测项目和方法

每隔 10 d 观测土壤湿度,30~200 cm 用土壤水分中子仪(美国 CPN 公司 503 DR)观测,地表到 30 cm 之间用土钻法观测,两种观测方法的测量间距均为 10 cm。根系的观测采用根钻法:取样时,用自制活动式可调根钻(内径 7 cm)在行间和行上各打一钻,合并土样进行分析;测定深度为 200 cm,耕作层 40 cm 以上每隔 10 cm 取样,40~100 cm 每隔 20 cm 取样,100~200 cm 每隔 30 cm 取样。根长测定采用网格法^[7]取新鲜根样分析,根干物质重采用烘干法,在越冬前、拔节期和开花期取样分析根重、根长和比根重(单位根长的根重)变化。在冬小麦各生长发育期测定叶面积指数,小麦发育期、生物量和考种测定等按照《农业气象观测规范》进行。试验地气象要素观测按照气象站常规观测进行。

2 结果及分析

2.1 小麦生育期各土层土壤含水量变化

0~30 cm 土层土壤湿度明显反映出三种不同的供水处理(图 1)。30~60 cm 土层(图 2), I₂ 返青期浇水提高了该层土壤湿度,随后土壤湿度持续下降; I₁ 拔节期浇水增加了该层土壤湿度,并使 I₁ 土壤湿度持续下降的趋势有所缓和; I_{CK} 该土层土壤湿度下降较缓慢,显然 I_{CK} 对 30~60 cm 土层水分的利用率低于 I₁ 和 I₂。60~100 cm 土层(图略), I₁ 拔节期浇水使该层土壤湿度在随后的两旬内略有升高;拔节以后三个处理 60~100 cm 土层的土壤湿度均有明显的下降。100~200 cm 土层, I₁ 和 I₂ 土壤湿度在开花后均有所降低,这是由于开花后根系下扎到 100~200 cm 土层,吸收利用该层土壤水分所致;而 I_{CK} 开花后该土层土壤湿度几乎没有变化,并在最后一旬高于 I₁ 和 I₂(图略)。

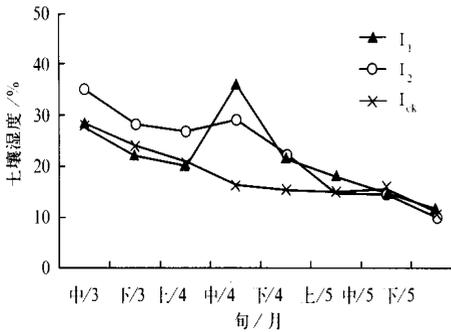


图1 不同浇水处理 0~30 cm 土层土壤湿度变化

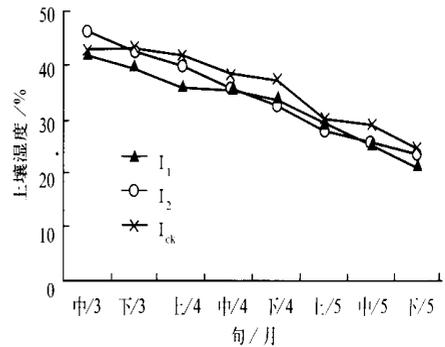


图2 不同浇水处理 30~60 cm 土层土壤湿度变化

2.2 冬小麦根系发育情况

开花期是冬小麦根系生长发育顶峰阶段,因而开花期的根系干物质分配反映了根系生长发育以及最大程度利用土壤水分的状况。由表 1 来看, I_{CK} 具有较高的总根生物量和上层(0~30 cm)根生物量;而 I_1 处理 100 cm 以下根生物量和根长高于其余处理,这显然对于 I_1 利用 100~200 cm 土层的水分极为有利,另外 I_2 在 0~30 cm 30~60 cm 土层根长和总根长较高,这符合 I_2 浇水量少而次数增加,从而根系在表层分布多,以同土壤蒸发竞争水分的特点。比根重(单位根长的根重)可以反映根系的侧生分支情况。其值越小表明在根轴上将分化出更多的二级、三级侧生分支^[5]。由表 1 可以看出, I_2 根系的次级分支增多,从而可以增加根系的表面积,增加土层水分吸收的范围。显然,在土壤水分匮乏的 I_{CK} ,其主要通过增加根系生长来寻找土壤水而增加水分利用,而在有频繁灌溉或降水的条件下(如 I_2),根系通过增加根长和根系的次级分支,增加水分吸收面积以同蒸发竞争土壤水。但是这两种策略与向深层土壤配置较多根系,增加深层土壤水分利用的 I_1 相比较,后者在水分利用上更具优势。我们在后面的分析中可以看到。

表 1 开花期各处理各土层根生物量和根长变化情况

土层/cm	根生物量(g/m^2)			根长(km/m^2)			比根重(g/km)		
	I_1	I_2	I_{CK}	I_1	I_2	I_{CK}	I_1	I_2	I_{CK}
0~30	185.1	217.8	237.4	5.17	6.79	5.15	35.8	32.1	46.1
30~60	27.3	23.3	26.5	2.52	3.37	1.81	10.8	6.91	14.6
60~100	26.1	24.1	36.9	1.97	2.72	2.6	13.2	8.86	14.2
100~200	19.5	11.6	10.6	1.84	0.84	0.97	10.6	13.8	10.93
0~100	238.5	265.3	300.8	9.66	12.9	9.57	24.7	20.1	31.4
0~200	258.0	276.9	311.4	11.5	13.7	10.6	22.4	20.2	29.4

2.3 小麦底墒利用情况和蒸腾比分析

表 2 为冬小麦生长期各土层底墒利用情况。有效底墒供水率表达式为: $SR =$

$\frac{SET}{SW} \times 100\%$, 式中 SR 为某土层有效底墒供水率(%), SET 为该土层有效底墒供水量

(mm), SW 为该土层有效底墒 (mm)^[8]。由表 2 可知, I_1 和 I_2 两处理 0~100 cm 土层有效底墒供水率相等, 但 I_1 处理 100~200 cm 有效底墒供水率比 I_2 高 2.4%, 相当于 I_1 多利用了 5 mm 的深层储水; I_1 处理 0~200 cm 有效底墒供水率高, 这对底墒量略低的 I_1 来讲是十分可贵的, 显然 100~200 cm 土层底墒的有效利用是十分重要的。 I_{CK} 除 0~30 cm 土层外, 其余土层有效底墒供水率均较低; 另外 I_{CK} 在收获时土壤含水量最高, 显然该处理对土壤水分的利用率很低。三个处理 0~30 cm 土层有效底墒供水率均较高, 为 87%~90%; I_1 和 I_2 两处理 30~100 cm 有效底墒供水率也均在 84% 以上。

表 2 冬小麦生长期各土层有效底墒供水率

土层	有效底墒供水率 (%)		
	I_1	I_2	I_{CK}
0~30 cm	87.2	87.8	90.6
30~60 cm	90.0	84.7	71.5
60~100 cm	84.7	89.7	74.3
100~200 cm	34.2	31.8	25.2
0~100 cm	78.8	78.3	72.5
0~200 cm	55.3	51.4	45.4
播种前土壤含水量/mm	535.3	551.2	548.7
收获时土壤含水量/mm	326.4	348.6	371.2
总耗水量/mm	283.9	277.6	177.5

为了更确切地了解不同浇水处理土壤总耗水用于生物有效蒸腾的情况, 我们根据冬小麦的叶面积和土壤湿度状况以及试验区的潜在蒸散资料计算了返青以后至灌浆后期蒸腾量占同期耗水量 (0~200 cm) 的比例 (表 3)。蒸腾量的计算采用下面的公式^[9]:

表 3 3~5 月冬小麦不同处理耗水量、蒸腾量及蒸腾量占同期耗水量的比例

时间	I_1			I_2			I_{CK}		
	耗水量 (mm)	蒸腾量 (mm)	蒸腾比 (%)	耗水量 (mm)	蒸腾量 (mm)	蒸腾比 (%)	耗水量 (mm)	蒸腾量 (mm)	蒸腾比 (%)
3月下旬	10.4	3.1	29.4	19	3.6	19.1	10.8	3.1	28.7
4月	96.9	51.6	53.2	89.2	57.3	64.2	50.8	25.6	50.4
5月	103.7	64.7	62.4	85.8	43.9	51.2	49.6	21.1	42.5
3月下旬至5月总量	211	119.4	56.6	194	104.9	54.1	111.2	49.8	44.8

$$T_r = 0.234758 (LAI + 1)^{1.51445} \times ET_p^{0.48185} \times \left[\frac{SW_e}{SW_t} \right]^{0.16849} - 1 \quad (1)$$

其中 T_r 为蒸腾量, LAI 为叶面积指数, ET_p 为潜在蒸散, SW_e 为 0~200 cm 土壤含水量, SW_t 为 0~200 cm 田间持水量。

由于干旱造成 I_{CK} 叶面积发育不良, 因而 I_{CK} 有效蒸腾量在 4~5 月份都偏低。 I_1 与 I_2 相比较, 虽然 I_1 在 4 月份拔节期浇水造成有效蒸腾比例相对偏低, 但由于这次浇水是在小麦需水关键期, 明显地增加了开花期和灌浆期的蒸腾消耗, 有利于提高水分利用效率; 而 I_2 返青后第一次浇水基本上被无效蒸发散失了。 I_1 处理 5 月份用于蒸腾耗水约 64.7 mm, 由前面的分析可知, I_1 处理 100~200 cm 土层土壤水供应量比 I_2 约高出 5 mm, 而该土层水分蒸发损失很少, 因而相当于在开花灌浆期在 100~200 cm 土层增加了 7.7% 的有效水分消耗。

2.4 产量形成

由表 4 小麦产量及产量构成因素可见, I_{CK} 由于土壤水分不足并未造成千粒重的明显下降, 但因导致穗数、穗粒重、籽粒重和籽粒数的显著降低而造成了最终产量的降低。 I_1

和 I_2 相比较, I_1 总穗数虽然相对减少,但由于增加了籽粒数和籽粒重,从而产量较 I_2 增加。 I_1 水分利用效率明显高于 I_2 和 I_{CK} 两处理。

表 4 不同处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响

处理	总穗数 (个)	穗粒重 (g)	籽粒数 (粒)	籽粒重 (g)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	全生育期总耗 水量(mm)	水分利用效率 (kg/m ³)
I_1	452	0.895	10293	404.5	39.3	4045.4	283.9	1.42
I_2	471	0.722	8814	340.1	38.6	3400.9	277.6	1.23
I_{CK}	393	0.565	5093	222.0	43.1	2220.5	177.5	1.25

注:表中观测数据为 1 m² 的考种资料。

3 讨 论

本试验处于亚劣态供水状况下(即土壤供水处于节水或非充分供水条件下),总耗水量在 280 mm 左右。但由于播前底墒充足,土壤深层储水较丰富,仍获得了较好的产量。其中, I_1 虽然只在拔节期浇水 75 mm,但由于浇水前 0~100 cm 土层土壤相对湿度降至 55%~60%左右(4月10日测定值为 58.2%,4月14日浇水),形成了一定程度的水分亏缺。这种水分亏缺虽然减少了总穗数,但同 I_2 、 I_{CK} 两处理相比较籽粒数和籽粒重有较大幅度增加,因而产量和水分利用效率也有较大提高,达到了有限水分胁迫增产的目的。

在根系研究中表明, I_1 根系生物量较 I_2 低,但产量 I_1 却高于 I_2 。尚不能说根系生物量的增加不利于产量的形成,但是适度的水分亏缺虽然使根系的生长有所抑制,但有可能强化了能量代谢,增加了光合产物向经济产量的转化。从开花期 100~200 cm 土层根生物量占总根生物量的比例来看, I_1 、 I_2 和 I_{CK} 分别为 7.6%、4.2% 和 3.4%, I_1 比 I_2 提高了 3.4%;而由前面对土壤水分供应及作物水分消耗的分析可知,在开花至灌浆期 I_1 在 100~200 cm 土层的有效水分消耗提高约 7.7%,表明在 100~200 cm 土层根系生物量的增加对提高该层土壤水分的吸收利用是极为有效的。 I_1 浇水次数少且关键有效,不仅降低了水分的无效蒸发,加深了灌水深度,在根系生长发育旺盛时期保持了一定的土壤水分,有利于促进小麦根系的深扎,提高了土壤水供应量和有效底墒供水率;同时由于增加了需水关键期的有效蒸腾耗水,提高了水分利用效率。这也是 I_1 虽然总穗数有所减少,但是籽粒数和籽粒重有较大幅度增加的重要原因。分析表明, I_1 浅层根生物量的减少和深层根生物量的增加是有积极意义的:从挖掘土壤水分供应潜力来看,在降水少的情况下,表土层(0~30 cm)土壤水分供应量是有限的,而该土层内的根量占总根量的大部分,继续增加该土层内根生物量所能获得的土壤水量的增加很少;而增加深层根系量对利用储量较高的深层底墒则是明显而有效的。因而,在降水量较少的情况下,增加根系干物质向深层的分配对于小麦利用深层水分和提高产量是十分有利的。当然,促使根系深扎并增加深层根系干物质分配可以通过浇水、深施肥、深耕、上下茬作物搭配等实现,但是控制上层根系量的增长只能通过土壤水分调节来实现。充足的底墒配合有限水分亏缺可较好地起到控制上下层根系干物质分配的作用,有利于合理利用土壤储水和深层底墒,这也是有限水分胁迫增产的原因之一。

参考文献

- 1 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层贮水对小麦产量效应研究. 土壤学报. 1980, 17(1): 43 ~ 53.
- 2 张喜英. 作物根系与土壤水利用. 北京: 气象出版社, 1999. 10.
- 3 张大勇, 姜新华. 半干旱地区作物根系生长冗余的生态学分析. 西北植物学报, 1995, 15(5): 110 ~ 114.
- 4 Passioura J B. Roots and drought resistance. *Agricultural water management*. 1983, 7: 265 ~ 280.
- 5 Siddique K H M, Belford R K and Tennant. Root: shoot ratio of old and modern, tall and semi-dwarf wheat in a Mediterranean environment. *Plant and Soil* 1990, 121: 89 ~ 98.
- 6 Kramer P J. Plant and soil water relationships: a modern synthesis. McGraw-Hill, New York, NY, 1969. 482pp.
- 7 Marsh B. Measurement of length in random arrangements of lines, *J Appl. Ecol*, 1971, 3: 139 ~ 145.
- 8 安顺清, 刘庚山, 吕厚荃, 等. 冬小麦底墒供水特征研究. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 119 ~ 127.
- 9 朱自玺, 赵国强, 方文松, 等. 不同土壤水分和不同覆盖条件下麦田水分动态和增产机理研究. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 137 ~ 143.

EFFECT OF LIMITED WATER SUPPLY ON ROOT GROWTH AND DEVELOPMENT OF WINTER WHEAT AND THE CHARACTERS OF SOIL MOISTURE USE BEFORE PLANTING

Guo Anhong Liu Gengshan An Shunqing Ren Sanxue Lin Rinuan
(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)

Abstract

Experiments were conducted in the man-controlled water supply field at the Gucheng Agrometeorological Experimental Base of the Chinese Academy of Meteorological Sciences. Under the condition of sufficient soil moisture before planting, water was supplied for winter wheat with three scheme: I_1 , 75 mm supplied water at jointing stage; I_2 , 37.5 mm supplied water at returning-green stage and 37.5 mm at jointing stage; I_{CK} , no water supply during whole growth season. The precipitation during the growth season was kept out. Results indicated that under I_1 , the sufficient soil moisture before planting and limited water stress reduce the winter wheat root weight in the upper soil layer, and allocate more dry matter to the deeper root system. It contributes to the increase of the water use in deeper soil and the soil moisture use before planting. In addition, the water supply for winter wheat at jointing stage under I_1 helps increase the effective transpiration proportion at the key water demanding stage, and improves the water use efficiency. Although water stress decreases ears per m^2 in I_1 , but the increase of grain numbers and grain weight contributes to the yield increase.

Key words: Limited water supply Winter wheat Root system Soil moisture use before planting