

土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响

李运生, 王 菱, 刘士平, 王吉顺

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:以冬小麦田间试验为基础, 研究根-土界面不同水分调控措施, 包括不同深度灌水(地面、30cm、50cm、100cm)、同一深度保持不同田间持水量(田持 80%、65%、50%), 共计 12 个水分处理的土壤水分分布对根系和产量影响。研究表明: 根长密度分布与灌水方式息息相关, 地面灌水的根长密度随土层深度呈指数下降趋势, 主要分布于地表层(0~10cm); 不同深度渗灌, 根系分布有两个峰值, 第 1 峰值分布在地表以下 15 cm 左右, 第 2 峰值分布在灌水深度处。通过水分调控措施, 局部改变根系形态, 对节水增产是有利的。耗水量与营养生长(叶面积、根系)成正比关系, 与经济产量呈二次多项式(抛物线型)关系, 最大产量的耗水量比最大耗水量少约 80~100mm。

关键词:水分调控; 根系分布; 耗水量; 最大产量; 冬小麦

The Influence of Different Amounts of Water Supplied at Different Depths in Soil-Root Interface on Root Distribution and Yield of Winter Wheat

LI Yun-Sheng, WANG Ling, LIU Shi-Ping, WANG Ji-Shun (Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1680~1687.

Abstract: The results of a three-year field experiment of water application control for winter wheat, starting in 1999, conducted at the Yucheng Comprehensive Experimental Station (YES), Chinese Academy of Sciences (CAS), Yucheng County, Shandong Province, China, were analyzed. In this field trial the water control experiment was carried out with different soil depths and water contents. In order to know relative root growth, rate of biomass increase and grain yield, the experiment was originally designed with 12 treatments in which soil water contents was kept at $80\% \pm 5\%$, $65\% \pm 5\%$ and $50\% \pm 5\%$ of the field capacity by applying irrigation at depths of 0cm, 30cm, 50cm, and 100cm. Root samples were collected with root auger and total lengths of roots were measured by a laser root-sampling instrument and then the density of roots was estimated. The radii of roots were measured by water drainage method, water contents in soil were measured by neutron probe method and other characteristics such as plant height, LAI, and yield were also measured. During 2000~2001 a supplementary experiment was carried out.

The results showed that the distribution of roots was closely related to irrigation types: under surface irrigation the density of roots declined exponentially downward and over half of them were located within 0~10cm top layers. The peak value of root density, under surface irrigation, appeared when the water content of soil was kept at 80% of field capacity, the next showed up when that at 65% of field capacity, and the lowest one when that at 50% of field capacity. In the treatment where irrigation was done at the depth of 30cm and that at 50cm, two peak values for the root distributions appeared: first one appeared at

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49871041); 中国科学院禹城综合实验站开放课题资助项目

收稿日期: 2002-03-26

作者简介: 李运生(1962~), 男, 陕西铜川人, 副研究员。主要从事农田水分、物质运移研究。

depth of 15cm because of less water content in the top layer; and second one occurred with double peak pattern, which generally had little influence on the effect of water uptake by roots and is favorable for improving yields through water-saving method.

The roots were mainly centralized in the topsoil layer. The roots within 0~60cm zone accounted for 68%~77% of the total, implying that water uptake of roots proceed mostly in the top 60cm layer. However, during the late developmental stages for winter wheat, with the decline of roots in the top layer, the roots below 60cm still grow to a certain extent, which implies that in the late growth period water uptake below 60cm is of importance to grain filling of winter wheat.

Water consumption by winter wheat decreased with depth. Compared with surface irrigation, water consumption with the irrigation application at a depth of 30cm was 82.7 to 156.2mm lower and at a depth of 50cm 135 to 226.7mm lower. Since large part of water was consumed by soil evaporation under surface irrigation and with increase of the irrigation depth, the roots became fewer and thinner; the resistance to water uptake trended to be high and the yield was lowered. The highest yield appeared in the plots in which water content was kept at 65%~80% of field capacity by irrigation at 30cm.

Differences in soil water content affected not only the root distribution but also the radius of root. When soil is dry the radius of root becomes smaller and resistance to root penetration is higher. The radius of root tends to be higher at 30cm and 50cm where the water was irrigated at.

There is positive correlation between water consumption and amounts of roots in winter wheat. Large amounts of roots can increase the area of leaves and increase the water consumption. Water consumption is related to economical yield through a binomial (parabola) function in which the water consumption for the maximal yield is around 310mm, which is about 80~100mm less than maximal water consumption. By controlling water supply appropriately and controlling the growth of roots we can make one part of roots grow in a dry circumstance and other parts grow in a humid environment. Such way of control of water supply does not reduce yield but can increase it to some extent.

Key words: water control; root distribution; water requirement; yield; winter wheat

文章编号:1000-0933(2002)10-1680-08 中图分类号:S154.4 文献标识码:A

根系作为作物整体的水、肥资源捕获器,与土壤水分、养分分布、运移和消耗息息相关,其行为特征直接关系到地上植株生长和产量。近年来,国内外学者对根系的测定方法、土壤水分对根系的影响^[1~6],以及以根系分布为基础,建立的根系吸水模型^[7,8]进行了一系列研究。然而根系生长在不可见的土壤系统中,对它的研究远不如地上冠层来得直观和便利,而且,由于环境因子的多样性、互相耦合和易变特征、根系发育的复杂性、以及测根技术与理论的局限性,使得研究结果与实际要求仍有较大距离,特别是根系形态分布对产量影响的研究则更为少见。

相对于地上部分,根系赖以生存的土壤水分,是对作物影响最经常、也是最易被调节控制的因素,因此,通过一定的灌溉方式,变动土壤水分状况及其剖面分布,调节根系生长,进而调节冠根相互关系,最终实现节水增产的目标是可以实现的。本课题以中国科学院禹城实验站为实验基点,研究不同水分调控措施的土壤水分剖面分布,及它对根系形态和产量的影响。

1 水分调控方案和实验设计

1.1 水分调控方案

水分调控试验是在两个冬小麦生长季进行:1999~2000年试验方案分地表灌水、地表以下30cm、50cm、100cm等4个灌水层次;灌水量为0~30cm、30~50cm、50~100cm、100~140cm土层平均含水量分别保持在田间持水量的50%±5%、65%±5%、80%±5%,共计12个水分调控试验。2000~2001年进行补充试验,只进行地面和30cm两个层次灌水。0~30cm和30~50cm土层平均含水量分别保持

田持的 $50\% \pm 5\%$ 、 $65\% \pm 5\%$ 、 $80\% \pm 5\%$ ，每个实验处理为 2 个重复，重点分析前一个冬小麦生长季的实验结果。

1.2 实验设备

实验设备包括大型实验桶、地下室和防雨棚 3 部分，如图 1 所示。其中实验桶横截面积为 1m^2 正方形，高 1.77m ，封底，用 5mm 钢板钳接而成，根据实验要求，在桶内钳有渗灌管（距上桶沿不同距离），外接入水管伸出地面；桶底安有渗水管，外连出水管伸入地下室，当桶内有积水时，可及时排出。实验桶内外及输水管均用防锈漆和沥青处理过。12 个同样型号实验桶分别安放在地下室防渗墙外侧。实验桶内，底层铺 7cm 碎石，上铺 20cm 细砂，再上依次 $150\sim 100\text{cm}$ ， $100\sim 50\text{cm}$ ， $50\sim 30\text{cm}$ ， $30\text{cm}\sim$ 地面，按层次填入被挖出、放置在一旁备用的土壤，夯实，灌水。供试土壤为壤土，实验设备是在开始实验的前半年完成，并按规范，测定田间持水量。

1.2 实验布置

冬小麦播种前，每桶按 $0.01\text{方}/\text{m}^2$ 有机肥， $30\text{g}/\text{m}^2\text{P}_5\text{O}_2$ ， $15\text{g}/\text{m}^2\text{K}_2\text{O}$ 施入 $0\sim 30\text{cm}$ 土壤中，1999 年 10 月 13 日播种，每桶 6 行，行距 17cm ，每 2.5cm 播种 2 粒，品种为“高优 503”，10 月 27 日出苗，11 月 26 日停长，进入越冬期，翌年 3 月 6 日起身，4 月 4 日拔节，4 月 25 日抽穗，5 月 7 日灌浆，6 月 10 日收获。

2 观测项目

2.1 土壤容积水含量(cm^3/cm^3)的观测

水分调控试验于冬小麦返青后的 3 月 21 日进行，观测仪器为埋入筒中的中子水分仪，距渗灌管 20cm 。每 10cm 深度为一观测层次，测至 140cm 。试验开始后，每隔 5d 观测 1 次，进入抽穗开花期每 3d 观测 1 次。在测定表层土壤湿度时，同时应用英国 Delta 公司产 MP406 土壤水分探测仪（观测深度为 6cm ）进行补充对比观测。当 $10\sim 30\text{cm}$ ， $30\sim 50\text{cm}$ ， $50\sim 100\text{cm}$ 和 $100\sim 140\text{cm}$ 土层平均含水量低于相应水分调控方案水平 5% 时，需要补充灌水，并在灌水的翌日加测土壤湿度。灌水上限高于规定水平 5% ，因此，各水分调控是保持在田持 $80\% \pm 5\%$ ， $65\% \pm 5\%$ ， $50\% \pm 5\%$ 范围内变动。灌水量的计算方法如下：

$$A = (Wp - Wa) \times H \tag{1}$$

式中， A 为灌水量(mm)， Wp 为规定灌水上限， Wa 为实测土层平均容积水含量的(cm^3/cm^3)， H 为灌水土层厚度(mm)。

2.2 根系观测

根系观测包括根长密度和根半径。利用自制旋柄式根钻取根样，根钻高 10cm ，内径为 5cm 的空心钻，手柄长 140cm 。测定时，在小麦行上和行间各取一个测点，每 10cm 为一个层次，测至 120cm ，将每一层次行上和行间取出的根样，分别放入土壤袋中，然后将袋放入水中浸泡、冲洗泥土，检出根中的杂质，然后将根样倒入根样盘中，用 CI-203 激光根样仪扫描总根长，计算单位土壤体积根长，即根长密度(cm/cm^3)。然后将根样放入 $5\sim 10\text{ml}$ 的量杯中，用排水法测定根样体积，计算出平均根半径。

2.3 生态指标和产量要素观测

在生长期间，进行株高、密度和叶面积等观测；在收获期进行产量要素分析，包括不孕小穗数、穗粒数、穗长、千粒重及产量。

3 结果分析

3.1 土壤容积水含量(cm^3/cm^3)的剖面分布

野外数据

图 2 以田持 80% 为例，不同土层深度灌水的土壤容积水含量(cm^3/cm^3)分布，实线为实验初始(3 月 21

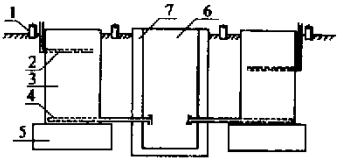


图 1 实验设备简图

Fig.1 Schematic of the experimental facilities

1 防雨棚滑轨 Rails of rain-proof shed; 2 渗灌管 Infiltrating irrigation pipes; 3 实验桶 Test bucket; 4 出水管 Pipe for water outlet; 5 水泥台 Concrete platform; 6 地下室 Basement; 7 防渗墙 Seep-proof wall

日)水含量,虚线则为灌水后的土壤水含量分布。地面灌水(a),灌水后与初始含水量相比,表层土壤水分显著增加,30cm(b)和 50cm(c)灌水,在灌水处,土壤含水量也明显增加。按实验设计要求,各灌水土层的含水量保持田持 80%±5%,因此,在实验期间,水分剖面基本上都保持着这样的分布形式。灌水层以下的土壤水分略低于初始含水量,这是因为根系分布不仅限于在灌水层、还可下扎到灌水层以下吸收水分,使下层水分含量减少。(b)和(c)因地表未灌水,加之地面蒸发,地表层水分含量越来越少,进入 5 月份,(b)和(c)的 10cm 土壤水含量下降到 0.08cm³/cm³左右,已影响到 0~10cm 根系生长。d 为 100cm 灌水处理,因 100 cm 深度以下的土壤含水量较高,实际上,在实验期间未进行灌水,小麦生长完全依靠原有的土壤蓄水量,收获前(6 月 4 日)各深度的土壤含水量均有明显减少,表层已降至 0.03 cm³/cm³,远低于凋萎湿度(0.08 cm³/cm³),但下层土壤含水量仍相对较高。

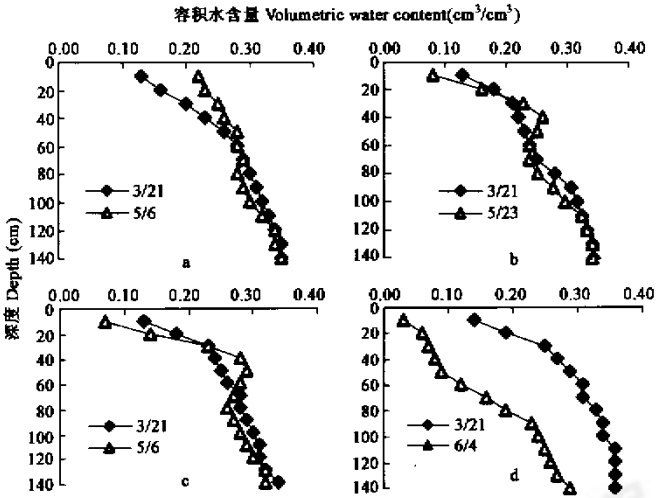


图 2 土壤容积水含量(cm³/cm³)分布

Fig. 2 Profiles of volumetric soil water content (cm³/cm³)

田持 Field capacity 80%;a 地面灌水 Surface irrigation, b 30cm 灌水 Irrigation at 30cm, c 50cm 灌水 Irrigation at 50cm,d 100cm Irrigation at 100cm,

3. 2 作物耗水量

作物耗水量为土壤蒸发和作物蒸腾之和。冬小麦生长前期,由于叶面积较小,土壤蒸发较大,而且土壤表面愈潮湿,土壤蒸发愈大,随着叶面积的增加,作物耗水量则以蒸腾耗水为主。为保持小麦生长前期的一致性,各处理的初始含水量基本相同,随着植物生长,土壤水分不断消耗,当低于水分调控指标时,需要灌水。表 1 列出实验初、末期土层蓄水量,实验期间灌水量和耗水量。从表中可以看出:各处理的初始含水量基本相同,0~140 cm 土层蓄水量为 380~390mm 左右,最高为 429.7 mm。根据实验的设定条件(无地下水天然降水影响),冬小麦耗水量可用简化的水量平衡公式计算:

$$W = W_{T-1} - W_T + I \tag{2}$$

式中,W 为作物耗水量(mm),W_{T-1}和 W_T 分别为实验初始和末期 0~140cm 土层蓄水量(mm),I 为灌水量(mm)。计算结果表明:随着深度增加,冬小麦耗水量减少,依次是地面灌水处理耗水量>30cm 灌水>50cm 灌水>100cm 灌水,这是因为地面灌水,其地表层蒸发占有相当大的比重,而后者基本上只有植物蒸腾。

由于灌水土层深度和灌水频率不同,表 2 计算了平均每天每单位厚度(10cm)土层的灌水量。从表中可以看出:①在保水数据相同的情况下,灌水量随深度增加而减少,例如田持 80%,拔节-抽穗期,0~30cm 土层,每天每 10cm 需灌水 1.67mm, 30~50cm 土层为 0.85mm,50~100cm 土层为 0.46mm,这说明根系吸

水主要发生在 50cm 以上的土层;土壤蒸发也主要发生在表层,研究证实,在非裂隙的土壤,渗入到 25cm 以下的水分,已基本上不可能由土壤表面蒸发损失掉。由此推断,30cm 以下的土壤水分消耗主要为根系吸水;② 孕穗-开花期灌水量大于拔节-孕穗和开花-腊熟期,这是符合冬小麦的需水规律。孕穗-开花期,根系和叶面积同时达最大值,是需水量最多时期。表中的空白部分为实验期间未进行灌水。

表 1 实验初、末期 0~140cm 土层蓄水量(mm)、实验期间的灌水量(mm)和耗水量(mm)

Table 1 Amount of water (mm) in soil at the beginning and end of the experiment, irrigation application (mm) and water consumption (mm) during the experimental period

灌水土层深度 Depth at irrigating	地面灌水 Surface irrigation			30cm 灌水 Irrigation at 30cm			50cm 灌水 Irrigation at 50cm			100cm 灌水 Irrigation at 100cm		
田间持水量 Field capacity (%)	50	65	80	50	65	80	50	65	80	50	65	80
初始蓄水量(3/21) Initial water amount	382	380	389	396	389	406	391	388	399	429	391	419
末期蓄水量(6/4) Residual water amount	242	249	387	283	322	370	230	289	374	233	218	237
初期(W_{T-1})—末期(W_T) 灌水量 Irrigation application (I)	140	131	2	113	67	36	161	99	25	196	173	182
耗水量 Water consumed (W)	388	392	405	232	267	324	161	217	271	196	173	201

表 2 平均每天每 10cm 土层灌水量(mm)

Table 2 The daily mean irrigation at 10 cm soil layer

灌水土层深度 Depth of irrigation application (cm)	0~30			30~50			50~100			100~140		
田间持水量 Field capacity (%)	80	65	50	80	65	50	80	65	50	80	65	50
拔节-孕穗(4/2~4/16) Jointing-booting	1.67	0.95	0.35	0.85	0.43		0.46					
孕穗-开花(4/17~5/2) Bootling-blooming	2.64	1.92	1.84	2.34	1.77	0.52	2.03	1.18				
开花-腊熟(5/3~6/1) Blooming- waxy ripping	1.07	1.03	0.71	1.08	0.82	0.68	0.91	0.53		0.12		

表 3 为根据彭曼公式,计算冬小麦的潜在蒸散量,在试验期间的潜在蒸散量为 402.3mm,比地面灌水田持 80%的耗水量低 4mm,分别比田持 65%和 50%高 11.9mm 和 14.1mm,这说明在地面经常保持湿润条件下,作物的实际蒸散量与潜在蒸散量基本相等。

表 3 试验期间(3/21~6/4)冬小麦潜在蒸散量(mm)

Table 3 Potential evapotranspiration of winter wheat during the experimental period (21 March~4 June)

月 Month	3			4			5			6			合计 Total
旬 A period of ten days	下 (21~31)	上 (1~10)	中 (11~20)	下 (21~30)	上 (1~10)	中 (11~20)	下 (21~31)			1~4 日			
蒸散量 Potential evapotranspiration (mm)	42.4	47.7	53.1	58.4	59.6	60.9	62.2			18.0			402.3

3.3 根系分布

3.3.1 根长密度分布 土壤水分作为最重要的环境因素,对根系分布具有重要影响。图 3 为地面灌水的根长密度分布,从图中可以看出,最大的根长密度出现在表层 0~10cm,随深度增加,根长密度呈指数下降趋势,可用下式表示:

田持 80% $Y_{80\%} = 127.59e^{-x} \quad R^2 = 0.9632$ (3)

田持 50% $Y_{50\%} = 164.76e^{-1.5521x} \quad R^2 = 0.9849$ (4)

式中, Y 为土层深度(cm),其中下标为田持指标, X 为根长密度(cm/cm^3)。

图 4 是保持田持 80%,不同土层深度灌水的根长密度分布,与地面灌水的根系分布不同,30cm 和 50cm 土层灌水,因其表层(0~10 cm)土壤含水量较少,根系也较少,较多的根系下移到地面以下 15cm 左右,出现了第 1 峰值,在灌水处则出现第 2 峰值,显现出双峰分布。水分调控可局部改变根系形态,但从总体来说,冬小麦根系分布仍是随土层深度增加而减少。表 4 以田持 80%为例,不同土层深度灌水根系分布占总根长的百分比(%),从表中可以看出:地面灌水,0~30cm 的根量占总根量的 59%,30cm 和 50cm 土层灌水的表层根量也分别占 51%和 47%,占总根量的一半左右,而在 30cm 和 50cm 灌水处的根量分别为 22%和 17%,比同层次非灌水层略高。

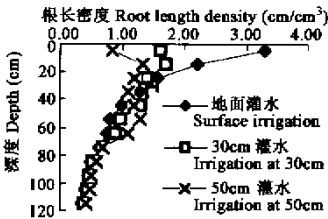


图 4 田持 80%不同层次灌水根长密度分布(5 月 4 日)
Fig. 4 Distribution of root length density at different soil layer with the water content at 80% of field capacity (4 May)

3.3.2 根半径的变化 土壤水分变化对根系的影响,不仅表现在根长密度上,也表现在根半径的变化上。当土壤缺水时,根会变细,根系吸水阻力增加。图 5 为田持 65%,根半径随不同深度土层灌水的变化。从图中可以看出:(1)地面灌水根半径随深度增加呈指数递减;(2)30cm 和 50cm 灌水,根半径在其灌水处都有增大趋势,但表层根半径不会随土壤变干而减小,这是因为小麦次生根距生根处约 10cm 根段的皮层增厚始终不会脱落,形成表层 0~15cm 土层根半径明显大于其它层的根半径。与根长密度相同,水分调控也只是局部改变根半径。除土壤水分外,土壤结构、紧密度、营养水平和通气状况对根系也都有重要影响。

4 不同水分调控下冬小麦耗水量和产量关系

土壤水分引起的根系局部变化,会对冬小麦的耗水量和产量产生一定影响。表 5 为不同水分调控下的植株形态和产量要素变化。

从表 5 可以看出:作物形态(株高和叶面积)与水分关系密切,土壤水分越多,植株生长越茂盛,尤其以地面灌水表现最为明显,30cm 次之,50cm 和 100cm 深度灌水,因其 50cm 以上土层不灌水,土壤非常干旱,已影响到生长,与地面和 30cm 灌水相比,植株高度和叶面积要小许多。从产量结构来说,结实小穗数、穗粒

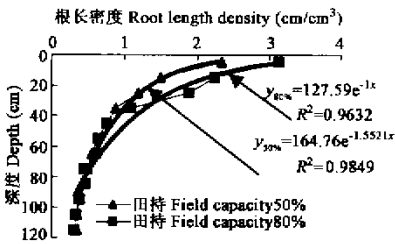


图 3 地面灌水根长密度分布(4 月 9 日)
Fig. 3 Distribution of roots under surface irrigation application(9 April)

表 4 不同深度层根长密度占总根长的百分比(% ,04-14)
Table 4 Percentage (%)of root length at different layers in the total (April 14)

深度 Depth (cm)	地面灌水 Surface irrigation	30cm 灌水 Irrigation at 30cm	50 cm 灌水 Irrigation at 50cm
0~30	59	51	47
30~60	18	22	21
60~90	13	14	17
90~120	11	13	15

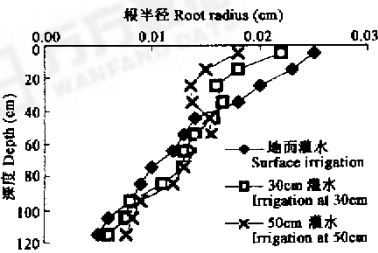


图 5 不同土层深度灌水根半径分布(田持 65%)
Fig. 5 Root radius different at different depth (field capacity of 65%)

数、穗长,基本上与水分呈正相关趋势,不孕小穗数则反之。千粒重表现比较复杂,地面灌水以田持 65%表现最好,30 cm 灌水以田持 65%和 80%较好,50 cm 和 100 cm 以田持 80%表现较好。值得指出的是:地面灌水的田持 80%处理的千粒重为最低,这说明在充分湿润条件下,虽然植株生长可能达到最优,但其最终产量可能不是最优的,这可从表 5 的测定数据得到证实。

表 5 产量要素和生态指标分析

水分调控 Water control	田间持水量 Field capacity (%)	不孕小穗数 (个) Numbers of sterile spikelet	结实小穗数 (个) Numbers of fertile spikelet	穗粒数(个) Grain numbers	穗长 Length of spike (cm)	千粒重 1000-grain-weight (g)	开花期 Blooming stage	
							株高 Height (cm)	单茎叶面积 Leaf area of single stem (cm ²)
地面灌水 Surface irrigation	50	3.4	17.1	38.6	8.5	39.6	61.8	79.4
	65	2.8	17.3	43.0	9.2	43.2	65.2	86.7
30cm 灌水 Irrigation at 30cm	80	2.9	17.2	41.4	9.6	37.7	65.9	104.7
	50	3.7	16.0	34.7	8.8	45.8	58.6	68.0
	65	3.1	16.5	40.0	8.6	45.7	62.9	70.3
50cm 灌水 Irrigation at 50cm	80	2.6	18.7	47.6	9.0	44.4	60.1	73.0
	50	4.3	15.3	32.3	8.2	38.0	47.5	64.8
	65	3.0	15.7	35.0	8.0	44.6	53.3	65.9
100cm 灌水 Irrigation at 100cm	80	2.7	16.4	42.9	8.9	44.9	56.2	65.2
	50	3.2	17.3	38.3	8.9	41.6	54.3	64.9
	65	2.8	16.6	37.5	8.8	41.3	53.6	65.2
	80	3.3	16.9	40.2	9.0	42.0	52.3	65.5

图 6 为不同水分处理取 40 茎产量,换算成单位面积产量(g/m²)与实验期间(3 月 21 日~6 月 4 日)耗水量关系,从图中可以看出:冬小麦产量与耗水量之间关系呈抛物线型,首先,产量随耗水量而增加,然后再随耗水量增加而减少,可拟合成如下关系:

$$y = -0.013x^2 + 8.1096x - 485.85 \quad R^2 = 0.6857 \tag{5}$$

式中, x 为实验期间耗水量(mm), y 为冬小麦产量(g),如果对式(5)求导,并设 $y=0$,可求出最大产量所对应耗水量为 310 mm 左右,也就是说,在这个耗水量范围内产量是较高的,过高或过低的耗水量对产量都有不利的影响。

从表 5 和图 6 可得如下结果:与充分湿润条件下相比,作物在适度干旱条件下,可相应提高产量,这可从对麦类作物非水力根信号研究中得到证实:在土壤适度干旱条件下,一部分根系位于干旱土壤中,另一部分根系位于较湿润土壤中,小麦根信号可以抑制植物生长,但由于穗重量增加,最终产量没有下降,收获指数还有上升^[9]。

5 小结与讨论

5.1 灌水方式可局部改变根系形态,地面灌水根系分布在地表层,随深度增加呈指数下降趋势;地表层根量分布以田持 80%最多,田持 65%次之,田持 50%最少。30cm 灌水和 50cm 灌水的根系分布出现两个峰值,第 1 峰值出现在地面以下 15 cm 左右,这是因为地表层土壤含水量较少,根量也相应较少;第 2 峰值出现在灌

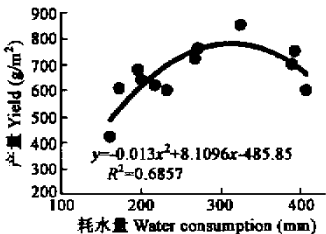


图 6 冬小麦产量与实验期间耗水量的关系

Fig.6 The relationship between yield and water consumption for winter wheat

水深度处,呈现双峰形态,这样的根系分布,一般不会影响根系总体吸水效果,可能对节水增产更为有利。

5.2 从总体来说,根系分布主要集中在土壤上层,0~60 cm 根长密度占总根长密度 68%~77%,说明冬小麦的根系吸水以 60cm 以上的土层为主,但在生长后期,在上层根系迅速衰亡之时,下层根系却略有增加,说明在生长后期,60cm 以下根系吸水对小麦灌浆具有重要作用。

5.3 冬小麦的耗水量随灌水土层深度增加而减少,与地面灌水相比,30cm 灌水的耗水量少 82.7~156.2mm,50cm 灌水的耗水量少 135~226.7mm,这说明地面灌水的作物耗水量有较大部分用于土壤蒸发;但灌水土层深度增加,下层根系因根量较少,根半茎较细,吸水阻力较大,耗水量少,也会影响产量。从节水增产来说,以 30cm 灌水的田持 65%和 80%产量较高。地面灌水的田持 65%和 50cm 灌水的田持 80%也有较高产量,但前者耗水量较多,后者因为灌水深度较深,在农业操作上有一定困难,而在 100 cm 处灌水,已不能起到有效的灌溉作用,无理论和生产实践意义。

5.4 冬小麦耗水量与根量呈正相关关系,根量多,叶面积大,耗水量多;与经济产量呈二次多项式(抛物线型)关系,其最大产量的耗水量约为 310mm 左右,比最大耗水量低约 80~100 mm 左右。通过适当的水分调控措施,控制根、叶生长,促进经济产量的增加,以达到节水增产的目的。

参考文献

[1] Moran C J, Pierret A and Stevenson A W. X-ray absorption and phase contrast imaging to study the interplay between plant roots and soil structure. *Plant and Soil*, 2000, **223**: 99~115.

[2] Kage H, Kochler M and Stutzel H. Root growth of cauliflower (*Brassica oleracea* L. *botrytis*) under unstressed conditions: Measurement and modelling. *Plant and Soil*, 2000, **223**:131~145.

[3] Federico Sau, Lnes Minguez M. Adaptation of indeterminate faba beans to weather and manarement under a Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 2000, **66**:81~99.

[4] Manske G G B, Ortiz-Monasterio J I, Van Ginkel M. Traits associated with improved P-uptake efficiency in CIMMYT's semidwarf spring bread wheat grown on an acid Andisol in Mexico. *Plant and Soil*, 2000, **221**:189~204.

[5] Wang C Y(王晨阳), Ma Y X(马元喜). Ecological and physioioglcal effects on root systems of wheat under different soil water conditions. *Acta Agricultural Boreali-Sinica*(in Chinese)(*华北农学报*), 1992, **7**(4): 1~8.

[6] Miao G Y(苗果园), Zhang Y T(张云亭), Yin J(尹钧), *et al.* A Study on the development of root system in winter wheat under unirrigated conditions in semi-arid Loess Plateau. *Acta Agronomica Sinica* (in Chinese)(*作物学报*), 1989, **15**(2):104~115.

[7] Shao M A(邵明安), Yang W Z(杨文治), Li Y S(李玉山), Mathematical model of soil moisture absorption by plant roots. *Acta Pedologica Sinica*(in Chinese) (*土壤学报*), 1987, **24**(4): 295~305.

[8] Chen De-Xing and Lieth J H. Two-dimensional model of water transport in the root zone and plant for container-grown chrysanthemum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, **59**:129~148.

[9] Li F M (李凤民), Y X(鄢郇), G A H(郭安红)ed. A discussion on the non-hudraulic root-sourced signals and life history strategy of wheat crops. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(*生态学报*). 2000, **20** (3):510~514.