

不同水分条件对冬小麦根系时空分布、 土壤水利用和产量的影响

薛丽华¹, 段俊杰¹, 王志敏^{1,*}, 郭志伟², 鲁来清²

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学吴桥实验站, 河北吴桥 061800)

摘要: 为了明确华北严重缺水晚播冬小麦灌水对根系时空分布和土壤水分利用规律的影响, 以冬小麦石麦 15 为材料, 利用田间定位试验研究了不同灌水处理(春季不灌水 W_0 ; 春季灌拔节水 75mm, W_1 ; 春季灌起身水、孕穗水和灌浆水共 225mm, W_3) 对根系干重密度(DRWD)、根长密度(RLD)、体积密度、分枝数等在 0—200cm 土层的垂直分布、动态变化及其对耗水和产量的影响, 结果表明: 随着春季灌水量的减少, 开花后 0—80cm 土层的根干重密度、根长度密度、体积密度和分枝数密度均显著减少, 80cm—200cm 土层的根干重密度、根长度密度、体积密度和分枝数密度却显著增加, 并且显著增加冬小麦在灌浆期间对 100cm 以下深层土层水分的利用, 总耗水量 W_1 和 W_0 分别比 W_3 减少 70.9mm、115.1mm, 土壤耗水量分别比 W_3 增加 79.1mm、108.9mm, 子粒产量 W_1 和 W_0 分别比 W_3 减少 653.3kg/hm²、1470 kg/hm², 水分利用效率(WUE)则分别比 W_3 提高 0.09kg/m³、0.06kg/m³。晚播冬小麦春季灌 1 水(拔节水)可以促进根系深扎, 增加深土层的根系分布量, 提高对深层土壤贮水的吸收利用量, 有利于实现节水与高产的统一。

关键词: 冬小麦; 调亏灌溉; 根系; 垂直分布; 土壤水分

Effects of different irrigation regimes on spatial-temporal distribution of roots, soil water use and yield in winter wheat

XUE Lihua¹, DUAN Junjie¹, WANG Zhimin^{1,*}, GUO Zhiwei², LU Laiqin²

1 College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Wuqiao Experiment Station, China Agricultural University, Wuqiao, Hebei 061800, China

Abstract: Root systems play an important role in uptake of water and nutrients by winter wheat from soil. The spatiotemporal distribution of roots can be influenced by irrigation strategies. In this study, the influence of three irrigation treatments on spatiotemporal root distribution of late-sowing winter wheat and soil water consumption was investigated in seriously water-deficit North China Plain. The winter wheat cultivar Shimai15 was used as test material. The three irrigation treatments were no irrigation after sowing (W_0), 75-mm irrigation at jointing stage (W_1), three 75-mm irrigations respectively at double ridge stage, booting stage, and grain-filling stage (W_3). Spatiotemporal distribution of roots, soil water consumption in 0—200cm soil depth and winter wheat yield were measured under field condition. The investigated root parameters include dry root weight density (DRWD), root length density (RLD), root volume density, and root branch numbers. The results showed that with decreasing irrigation, the dry root weight density (DRWD), root length density (RLD), root volume density, and root branch numbers decreased after flowering above 80cm soil depth, but increased significantly within 80—200cm soil depth. Soil water consumption beneath 100cm soil depth increased significantly during grain filling period. Total water consumption of W_1 and W_0 were respectively 70.9mm and 115.1mm less than W_3 , but soil water consumptions of W_1 and W_0 were respectively 79.1mm and 108.9mm more than W_3 . Grain yield of W_1 and W_0 were 653.3kg/hm² and 1470 kg/hm² less than W_3 respectively. Water use efficiency (WUE) of W_1 and

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(973 计划)(2009CB118605); 现代农业产业技术体系专项; 公益性行业科研专项(200903007)

收稿日期: 2010-04-03; **修订日期:** 2010-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhimin206@263.net

W_0 were 0.09kg/m^3 and 0.06kg/m^3 higher than W_3 respectively. One time irrigation at jointing stage for late-sowing winter wheat could promote root penetration, increase root density and utilization of water in deep soil, and help to realize the unity of water saving and high yield.

Key Words: regulated deficit irrigation; winter wheat; root system; vertical distribution; soil water content

华北地区是我国小麦主产区,但该区水资源紧缺,小麦高产受水资源严重限制,发展节水栽培意义重大^[1]。根系是重要的吸收和代谢器官,是土壤-植物系统的重要组成部分^[2],其与小麦的产量形成和抗旱节水性能有密切的关系。20 世纪 30 年代 Weaver^[3]提出了研究根系的重要性,此后,国内外学者对作物根系的结构与功能的研究一直给予高度重视, Xue 等^[4]研究了亏缺灌溉下冬小麦根系生长和对水分的吸收;Steingrobe 等^[5]研究了不同土壤基质冬小麦根系产量和死亡率的关系;Gajri 等^[6]探明了灌溉和耕作对根系的扩展、水分利用及产量的影响;以及冯福学等^[7]深入研究了不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响。近年来,针对水分对冬小麦根系生长和分布的影响,许多学者开展了大量的研究,苗果园等^[8]研究了水肥对小麦根系整体影响及其与地上部的相关性;张永清等^[9]研究了缺磷胁迫和水分胁迫条件下小麦根系的生长特点;刘坤^[10]研究了不同灌溉策略对冬小麦根系分布的影响;张和平^[11]及刘殿英^[12]分别研究了灌水对根系分布和根系活力的影响。在华北地区限水灌溉条件下,深层土壤供水及深层根系活动对维持小麦生长发育至关重要。深入研究不同灌溉模式对冬小麦深层根系分布动态的影响,探讨小麦根系构型、分布与深层土壤水分利用的关系十分必要。本文利用田间定位试验,研究了不同灌水处理对冬小麦根系的时空分布、水分利用及产量的影响,以为冬小麦节水高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用小麦品种材料为石麦 15。

1.2 试验条件和试验设计

试验于 2008 年 10 月—2009 年 6 月,在河北省吴桥县中国农业大学吴桥实验站(北纬 $37^{\circ}41'02''$, 东经 $116^{\circ}37'23''$, 海拔 14—22 m)进行。全年光照 2724.8 h, 年平均气温 12.9°C , 无霜期 201d。试验地为壤质底黏潮土,地下水埋深 7m 以上。播前 0—20cm 土壤有机质 1%,全氮 $0.79\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $43.1\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $84.0\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $25.8\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2008 年 10 月 17 日播种,基本苗 $570\times 10^4\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$,基肥施有机肥 $15\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,磷酸二铵 $225\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,尿素 $225\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,硫酸钾 $150\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其它田间管理措施参照小麦节水高产栽培技术^[13]。越冬前和起身期土壤含水量见表 1。2008—2009 年小麦生长期间的总降雨量为 148.5mm,详见表 2。

表 1 越冬前和起身期土壤相对含水量/%

Table 1 Water content of relative of soil before overwintering

土层 Soil layers/cm	0—20	> 20—40	> 40—60	> 60—80	> 80—100
越冬前 Before overwintering	15.6	16.2	17.6	19.3	21.1
起身期 Double ridge	10.1	11.74	14.4	15.7	19.3
土层 Soil layers/cm	> 100—120	> 120—140	> 140—160	> 160—180	> 180—200
越冬前 Before overwintering	25.1	24.3	19.1	20.7	20.1
起身期 Double ridge	19.3	19.1	21.7	24.2	24.5

试验设春季不灌水(W_0),春季灌 1 水(拔节期)(W_1),春季灌 3 水(起身水 + 孕穗水 + 灌浆水)(W_3)3 个处理,每次灌水定额 $750\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各处理设 3 次重复,处理间设置长、宽为 $2\text{m}\times 10\text{m}$ 的隔离区。小区长 $\times$ 宽为 $22\text{m}\times 10\text{m}$,面积为 220m^2 ,行距 15cm。

表 2 2008—2009 年冬小麦生长季降雨分布/mm

Table 2 Precipitation distribution during winter wheat growth period from 2008 to 2009

生长季 Growing season	月份 Month								总计 Total
	10	11	12	1	2	3	4	5	
2008—2009	25.7	0	0.1	0	11.2	18.4	19.3	73.8	148.5

1.3 测定方法

1.3.1 土壤含水量测定

分别在起身期、拔节期、开花期、花后 20d 和成熟期用土钻对各小区 0—200cm 土层分层取样,每 20cm 为一层,取样后立即装入铝盒,110℃烘干至恒重,计算土壤含水量,重复 3 次。将田间的土钻孔用土填实。

$$\text{土层含水量} = [(\text{土样重} - \text{土样干重}) / \text{土样干重}] \times 100\%$$

1.3.2 根系形态指标测定

分别在起身期、拔节期、开花期、花后 20d (20 DAF) 和成熟期在各小区麦行间分层取土体内根样。土体按 0—20cm、>20—40cm、>40—80cm、>80—120cm、>120—160cm、>160—200cm 分层,每层取样土体面积为 20cm × 15cm,重复 2 次。各层所取土样装入尼龙网在水中浸泡半小时后,用自来水冲洗干净,用镊子去除杂质和杂根。测根长密度、根重密度、根体积密度和根系总分枝数等指标^[14-15]。

根重(根长)密度是指单位土壤体积的根干重(根长)。根干重密度、根长密度、根体积密度分别由式(1)、式(2)和式(3)确定:

$$DRWD = M/V \quad (1)$$

$$RLD = L/V \quad (2)$$

$$\text{体积密度} = \text{根体积}/V \quad (3)$$

式中, $DRWD$ 为根干重密度(g/m^3), RLD 为根长密度(m/m^3), M 为根系干重(g), L 为根长(m), V 为取样土层体积(m^3)。

根系总分枝数测定:在每层根样中取 0.1m 长根样测定分枝数 f (重复 3 次)。各土层根分枝数 = 每土层总根长(m) × $f/0.1$ 。

1.3.3 产量和水分利用效率

成熟期考察各处理产量构成因素,每小区实收 5m^2 ,以 3 次重复的平均数计产。根据下式计算水分利用效率:

$$\text{水分利用效率} = \text{经济产量} / \text{生长季总耗水量}$$

其中

$$\text{总耗水量} = \text{生育期 2m 土壤贮水消耗量} + \text{降雨量} + \text{灌溉量}$$

$$\text{灌溉水利用效率} = \text{经济产量} / \text{生长季灌水量}$$

1.4 数据统计分析

数据处理采用 Excel2003 软件、SAS8.0 及 SPSS15.0 统计分析软件。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理 0—200 cm 土层土壤含水量的变化

不同灌水处理各土层含水量垂直分布动态变化,见图 1。拔节期 0—140cm 土层含水量表现为 W_0 (0—20cm, 5.9%) 和 W_1 (0—20cm, 6.9%) 显著低于 W_3 (0—20cm, 11.6%),这是由于 W_3 灌了起身水的结果, >140—200cm 土层含水量在不同处理之间无明显差异,说明拔节前根系的耗水空间为 0—140cm 土层。至开花期,由于 W_3 已灌起身水和孕穗水, W_1 灌过拔节水, 0—140cm 各层土壤含水量均表现为 W_0 (0—20cm, 11.2%) < W_1 (0—20cm, 9.0%) < W_3 (0—20cm, 6.2%),处理间差异显著, 120—200cm 各土层含水量仍表现为 W_1 (>120—140cm, 23.4%) 和 W_0 (>120—140cm, 22.7%) 处理小于 W_3 (>120—140cm, 24.9%) 处理,但差异并不显著。花后 20d, W_0 (>60—80cm, 11.7%) 和 W_1 (>60—80cm, 14.3%) 处理 0—200cm 各土层含水量均

明显低于 W_3 ($>60\text{--}80\text{cm}$, 16.4%) 处理。到成熟期, W_0 和 W_1 处理各土层含水量仍低于 W_3 处理, 特别是 100cm 以下深土层 W_0 ($>100\text{--}120\text{cm}$, 10.6%) 和 W_1 ($>100\text{--}120\text{cm}$, 15.9%) 含水量显著低于 W_3 ($>100\text{--}120\text{cm}$, 18.5%) 处理。可见, 随着春季灌水次数的减少, 显著增加了冬小麦对深土层的水分消耗。

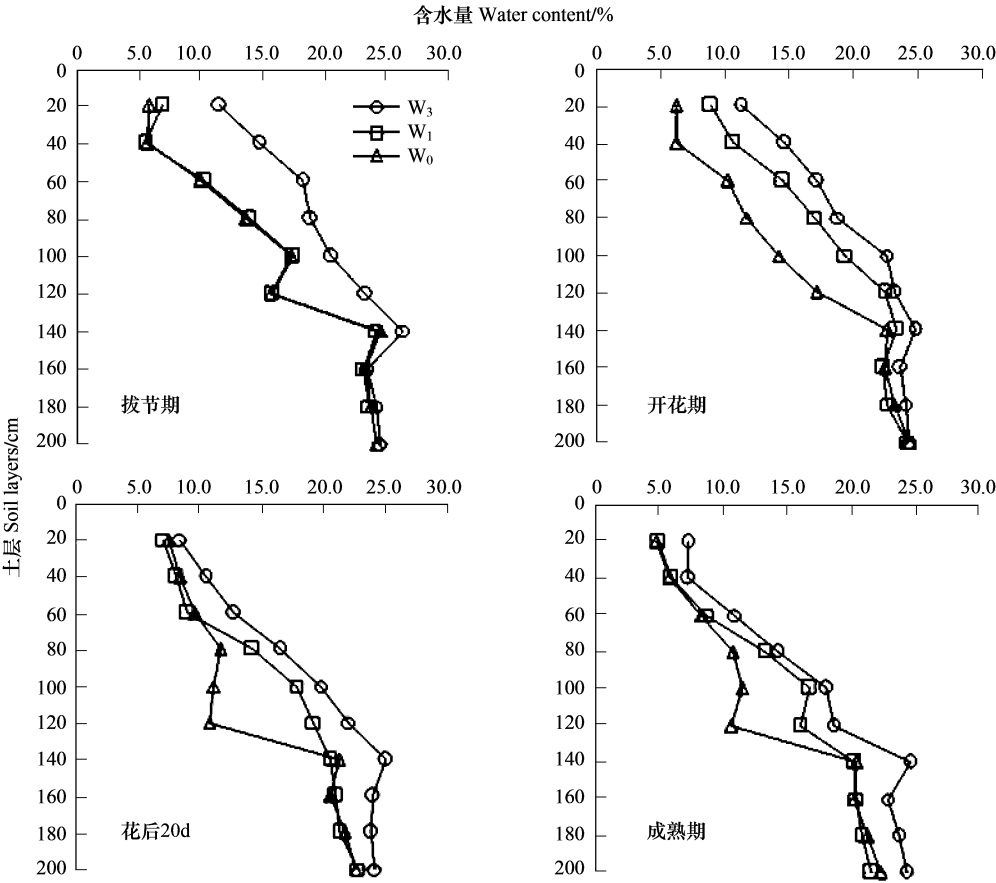


图1 各土层相对土壤含水量的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of soil water content in different soil layers

2.2 不同灌水处理对0—200 cm 土层根系总干重及干重密度垂直分布的影响

不同灌水处理下 0—200cm 土层根系总干重的变化趋势见表 3。各处理的根系总干重起身期后迅速增加, 在开花期达到最大值, 此后缓慢下降。随着春季灌水次数的减少, 各生育时期根系总干重减少。起身期处理间根系总干重差异不显著; 自拔节后, 不同灌水处理之间根系总干重差异明显, 到开花期各处理间差异达显著水平, 此期 W_0 和 W_1 根总干重分别为 W_3 的 76.6% 和 89.0% 。开花后不同灌水处理之间根系总干重的差异呈现变小的趋势。

表3 冬小麦根系总干重动态变化/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 3 The dynamics of total dry weight of root of winter wheat

处理 Treatments	起身期 Double ridge	$W_3/\%$	拔节期 Jointing	$W_3/\%$	开花期 Flowering	$W_3/\%$	花后 20d 20 DAF	$W_3/\%$	成熟期 Maturity	$W_3/\%$
W_0	41.7a	100.4	52.3Bb	81.7	57.2Cc	76.6	50.1Bb	82.7	40.2Bb	89.6
W_1	41.2a	99.2	61.4Aa	95.9	66.5Bb	89.0	54.5ABb	89.9	41.4Bb	92.5
W_3	41.5a	100.0	64.0Aa	100.0	74.6Aa	100.0	60.6Aa	100.0	44.8Aa	100.0

表中不同大、小写字母表示 1%、5% 水平的差异显著性

根干重密度是根系分布的重要指标之一。各灌水处理在各生育时期的根系干重密度随着土层深度的增

加而减少,0—40cm 是根干重密度主要分布区域(图2)。处理间比较,在拔节期 W_3 的0—40cm 土层干重密度显著大于 W_1 和 W_0 。在开花期,不同处理0—40cm 土层的根系干重密度大小排序为 $W_0 < W_1 < W_3$,处理之间差异显著; $>40—80$ cm 土层的干重密度处理间差异不显著; $>80—160$ cm 土层的干重密度差异显著,其大小排序为 $W_0 > W_1 > W_3$ 。花后20d 和成熟期与开花期根系干重密度垂直分布趋势相似, $>80—200$ cm 土层的根系干重密度大小排序均为 $W_0 > W_1 > W_3$,差异显著。由此可见:随着春季灌水次数的减少,根系总干重减少主要是表层根干重减少,而深层土壤的根干重密度却有增加。

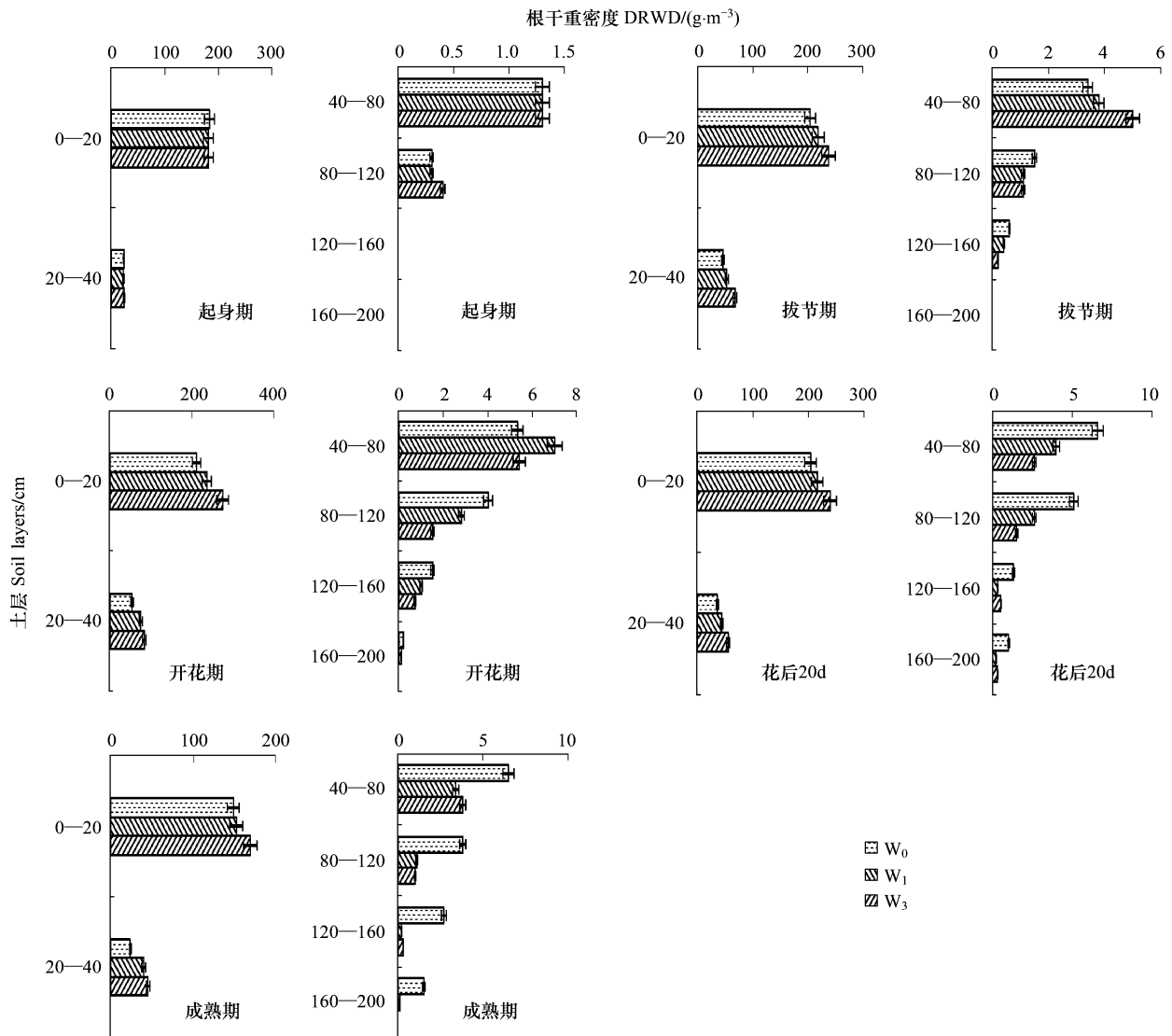


图2 冬小麦根系干重密度在0—200cm 土层垂直分布

Fig.2 The vertical distribution of dry root weight density of winter wheat in soil layer of 0—200cm

2.3 不同灌水处理对0—200 cm 土层根系总长度及根长密度垂直分布的影响

随着生育期的推进,不同灌水处理下冬小麦根系总长度的变化与总干重的变化基本相似(表4)。各处理根系总长度在开花期最大,开花后趋向减小。处理间比较,自拔节后直到成熟期不同灌水处理之间根系总长度差异达显著水平,其大小排序为 $W_0 < W_1 < W_3$,说明,增加灌溉量增加了冬小麦各生育时期根系总长度。

根长密度是表示根系长度在单位土体中的分布参数。由图3可见,根长密度垂直分布的变化趋势与根干重密度的空间分布变化趋势相似。在拔节期 W_3 的0—40cm 根长密度显著大于 W_1 和 W_0 。在开花期,0—40cm 和 $>40—80$ cm 土层的根长密度处理之间的差异均表现为 $W_0 < W_1 < W_3$,而 $>80—120$ cm 和 $>120—$

160cm 土层的根长密度均表现为 $W_0 > W_1 > W_3$, 差异均显著。花后 20d 和成熟期, $>80\text{—}200\text{cm}$ 土层的根长密度差异显著, 其大小排序均为 $W_0 > W_1 > W_3$ 。由此表明:减少春季灌水次数或灌溉量, 减少了根系总长度和 $0\text{—}80\text{cm}$ 土层的根长密度, 但却显著增加 80cm 以下深土层的根长密度。

表 4 冬小麦根系总长度动态变化 ($\times 10^3 \text{m} \cdot \text{m}^{-2}$)

Table 4 The dynamics of total root length of winter wheat ($\times 10^3 \text{m} \cdot \text{m}^{-2}$)

处理 Treatments	起身期 Double ridge	$T_3/\%$	拔节期 Jointing	$T_3/\%$	开花期 Flowering	$T_3/\%$	花后 20d 20 DAF	$T_3/\%$	成熟期 Maturity	$T_3/\%$
W_0	1.15a	100.9	1.58Cc	83.6	3.45Cc	85.8	2.22Cc	80.1	2.04Cc	87.6
W_1	1.14a	100	1.70Bb	89.9	3.75Bb	93.3	2.45Bb	88.4	2.13Bb	91.4
W_3	1.14a	100	1.89Aa	100	4.02Aa	100	2.77Aa	100	2.33Aa	100

表中不同大、小写字母表示 1%、5% 水平的差异显著性

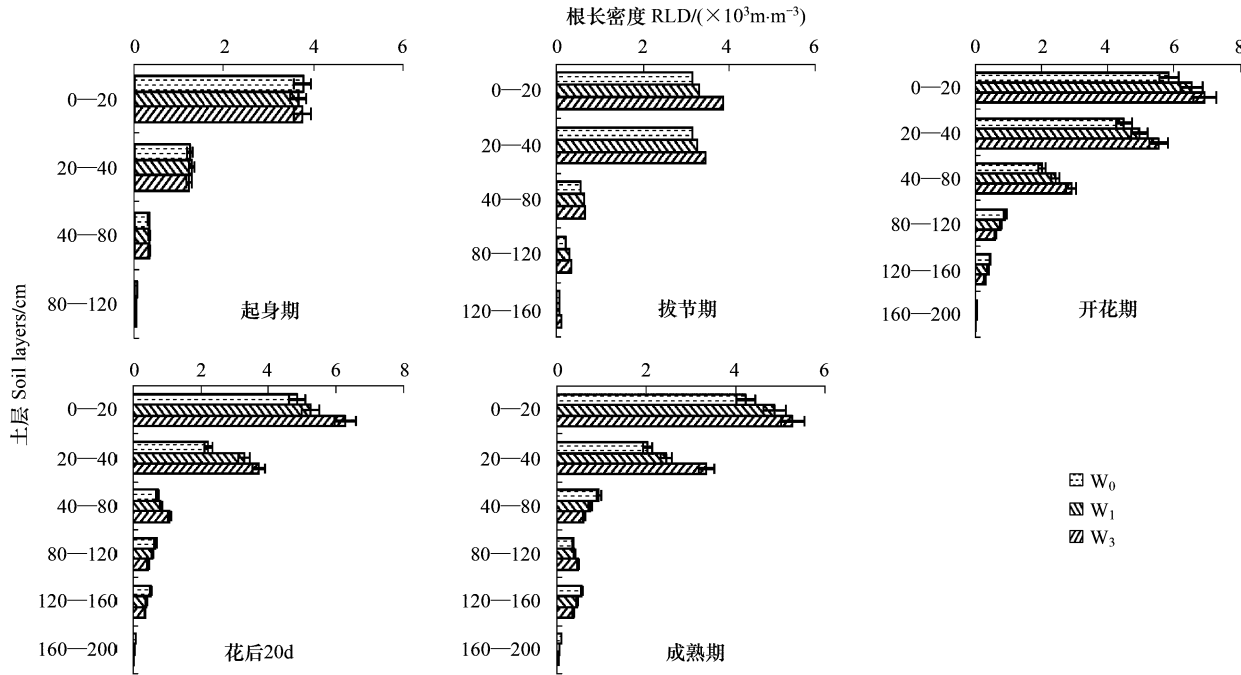


图 3 冬小麦根长密度在 $0\text{—}200\text{cm}$ 土层垂直分布

Fig. 3 The vertical distribution of root length density of winter wheat in soil layer $0\text{—}200\text{cm}$

2.4 不同灌水处理对 $0\text{—}200\text{ cm}$ 土层根系体积垂直分布的影响

不同灌水处理各生育阶段根系体积密度在 $0\text{—}200\text{ cm}$ 土层的垂直分布动态见图 4。在拔节期, W_3 的 $0\text{—}20\text{ cm}$ 和 $>20\text{—}40\text{cm}$ 根体积密度显著大于 W_1 和 W_0 ; 在开花期, $0\text{—}80\text{cm}$ 土层的根体积密度各处理之间差异显著, 其大小排序为 $W_0 < W_1 < W_3$, $>80\text{—}160\text{cm}$ 土层的根体积密度在处理间也达显著水平, 其大小排序为 $W_0 > W_1 > W_3$; 花后 20d 和成熟期与开花期根体积密度垂直分布趋势相似, $>80\text{—}200\text{cm}$ 土层的根体积密度差异显著, 其大小排序均为 $W_0 > W_1 > W_3$ 。说明:随着春季灌水次数的减少, 减少了浅土层根体积密度, 而增加了 80cm 以下深土层的根体积密度。

2.5 不同灌水处理对 $0\text{—}200\text{ cm}$ 土层根系分枝数垂直分布的影响

$0\text{—}200\text{cm}$ 土层剖面上的根系总分枝数自起身期后迅速增加(表 5), 在开花期达到最大值, 此后下降。随着春季灌水次数的减少, 冬小麦各生育时期根系总分枝数减少。开花期 W_0 和 W_1 的根总分枝数分别为 W_3 的 66.7% 、 75.4% 。

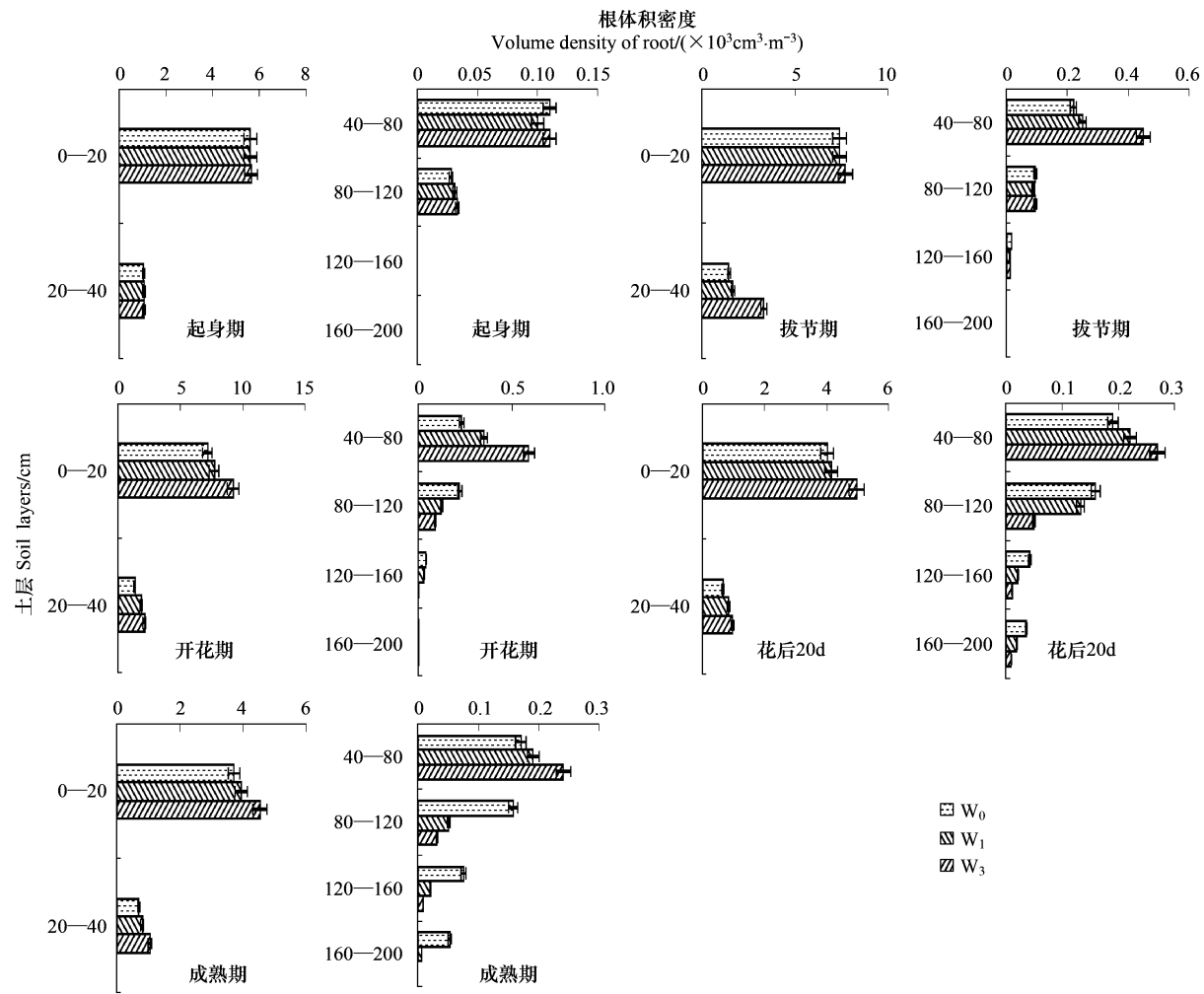


图 4 冬小麦根体积密度在 0—200cm 土层垂直分布

Fig. 4 The vertical distribution of root volume density of winter wheat in soil layer 0—200cm

表 5 冬小麦根系总分枝数动态变化

Table 5 The dynamics of total branches numbers of winter wheat root($\times 10^4$ 个 $\cdot m^{-2}$)

生育期 Growth stages	起身期 Double ridge			拔节期 Jointing			开花期 Flowering		
	W ₀	W ₁	W ₃	W ₀	W ₁	W ₃	W ₀	W ₁	W ₃
总分枝数 Total branches	15.6a	15.0a	15.7a	24.8Cc	30.7Bb	41.6Aa	70.2Cc	79.4Bb	105.2Aa
W ₃ %	99.4	95.5	100	59.6	73.8	100	66.7	75.4	100
生育期 Growth stages	花后 20d 20 DAF			成熟期 Maturity					
	W ₀	W ₁	W ₃	W ₀	W ₁	W ₃			
总分枝数 Total branches	45.6Cc	56.2Bb	75.2Aa	19.5Cc	22.2Bb	23.7Aa			
W ₃ %	60.6	74.7	100	82.3	93.7	100			

表中不同大、小写字母表示 1%、5% 水平的差异显著性

从分枝数密度的垂直分布看(表 6),各处理均为 0—20 cm 土层分枝数最多,随土层加深,根系分枝数减少。处理间比较,拔节期 W₃ 在 0—40cm 土层根分枝数显著大于 W₁ 和 W₀;开花期 0—80cm 土层的根分枝数表现为 W₀ < W₁ < W₃, >80—120cm 土层的根分枝数表现为 W₀ > W₁ > W₃;花后 20d 和成熟期 >20—80cm 土层的分枝数表现为 W₀ < W₁ < W₃, >80—200cm 土层的分枝数表现为 W₀ 显著多于 W₁ 和 W₃。表明:减少春季灌溉或表层水分亏缺,显著减少浅层根分枝数,但却增加了 80cm 以下深土层的根分枝数。

表 6 冬小麦根系分枝数密度在 0—200cm 土层的垂直分布 (×10⁴个·m⁻³)
Table 6 The vertical distribution of branches density of root of winter wheat in soil layer 0—200cm

生育时期 Growth stages	处理 Treatments	0—20 cm	>20—40 cm	>40—80 cm	>80—120cm	>120—160cm	>160—200cm
起身期 Double ridge	W ₀	64.6a	8.3a	2.2a	0.3a	—	—
	W ₁	61.7a	8.6a	2.3a	0.2a	—	—
	W ₃	64.9a	8.4a	2.3a	0.2a	—	—
拔节期 Jointing	W ₀	63.2Cc	49.3Cc	3.8Bb	1.4Bb	0.6Bb	—
	W ₁	80.0Bb	57.3Bb	5.1Aa	2.6Aa	0.6Bb	—
	W ₃	105.2Aa	85.3Aa	4.2Bb	3.2Aa	1.2Aa	—
开花期 Flowering	W ₀	127.2Cc	103.8Bb	32.2Cc	15.6Aa	5.9Aa	1.0Aa
	W ₁	151.3Bb	114.5Bb	42.2Bb	13.2Bb	6.3Aa	0.6Bb
	W ₃	209.4Aa	138.9Aa	68.3Aa	13.9Bb	6.2Aa	0.5Bb
花后 20d 20 DAF	W ₀	111.3Bb	34.0Cc	5.9Bb	19.4Aa	9.2Bb	1.8Aa
	W ₁	123.9Bb	91.1Bb	7.8Bb	13.9Bb	10.2Aa	1.0Bb
	W ₃	190.7Aa	113.4Aa	14.3Aa	13.2Cc	7.6Bb	0.7Bb
成熟期 Maturity	W ₀	39.0Bb	20.8Bb	3.4Bb	8.8Aa	5.8Aa	1.0Aa
	W ₁	53.8Aa	23.3Bb	3.9Bb	7.3Bb	5.2Aa	0.6Bb
	W ₃	50.5Aa	35.8Aa	4.5Aa	7.3Bb	3.9Bb	0.5Bb

表中不同大、小写字母表示 1%、5% 水平的差异显著性

2.6 不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用的影响

不同灌水处理冬小麦产量、耗水量及水分利用效率见表 7。随灌水量增加,小麦总耗水量明显增加,而土壤贮水消耗越少。处理间籽粒产量差异表现为 W₃ > W₁ > W₀,而水分利用效率则表现为 W₁ > W₀ > W₃,灌溉水利用效率则是 W₁ 显著高于 W₃ 处理。可见,适当减少灌溉,增加了土壤水利用,可获得较高的产量并提高水分利用效率。

表 7 不同灌水处理冬小麦产量及水分利用效率
Table 7 The yield and water use of f winter wheat in different irrigation treatments

处理 Treatments	产量 Yield/(kg hm ⁻²)	总耗水量 Total water consumption/mm	土壤贮水消耗量 Soil water consumption/mm	水分利用效率 WUE/(kg/m ³)	灌溉水利用效率 WUE of irrigation /(kg/m ³)
W ₀	5775.3c	380.8c	231.3 a	1.52a	
W ₁	6592.5b	425.0b	201.5 b	1.55a	8.79
W ₃	7245.8a	495.9a	122.4 c	1.46b	3.22

表中不同大、小写字母表示 1%、5% 水平的差异显著性

3 讨论

根系是作物感知干旱的重要位点,根系生长与分布与土壤水分状态有密切关系。冬小麦根系的垂直分布在很大程度上受到根系建成期间的土壤水分影响。在土壤水分正常条件下,根系生物量主要集中在浅土层,土壤干旱时根系在深层的分布明显增多^[16]。本试验结果表明:在春季冬小麦开花前生长阶段(春季根系建成期间),减少春季灌水次数,导致根系总干重、总长度、总体积、总分枝数的减少,主要是显著减少 0—80cm 土层的根干重密度、长度密度、体积密度和分枝数,但 80cm 以下深土层的根干重密度、根长密度、体积密度和分枝数却相对增加。这进一步证明,灌溉可改变根系的空間分布,亏缺灌溉可促进根系深扎。

根系的垂直分布影响作物对土壤水分和养分的利用。冬小麦生育后期,在浅土层逐渐干旱条件下,此时主要依靠深土层中的根系吸收利用相应土层的贮水,以维持其生长和产量形成对水分的需求。因此,深土层的根系分布量在很大程度上决定着冬小麦生育后期的抗旱节水性能^[17-18]。有研究表明,冬小麦利用深土层水分少,是由于深土层根量分布太少的缘故^[4,19-22]。一般说来,浅层根系衰亡腐解的速度较快,而深层根系由

于受大气干热变化的影响较小,生态环境较稳定,衰亡速度较缓慢,因而成为谷类作物籽粒灌浆的功能根系^[16,23]。高产壮苗根系分布较深,深层根量相对比例大,不仅消耗土壤表层水分较少,而且在生育中后期上层土壤干旱条件下,有利于充分利用土壤深层水分,提高水分利用率^[24]。根据 Blum 和 Johnson 对小麦根系的研究表明,当表层土壤水分枯竭时,深层根系吸收的水分可以释放到表层土壤中,有利于作物从耕作层中吸收养分。本试验表明,在华北地区生态条件下,减少春季灌溉次数,生育后期上层土壤处于水分亏缺状态,但下层土壤仍有较多贮水,可为深层根系吸收利用。 W_3 处理由于灌溉多,主要消耗灌溉水,对土壤水利用少,而 W_1 处理灌溉少,深层根较多,对深层土壤水利用明显增加。

增加冬小麦在灌浆期间对深层土壤水分的利用,有利于节水高产。在干旱的条件下,深层的根量与产量呈正相关关系^[17-18]。在本试验条件下,春浇 1 水处理(W_1)虽然产量水平低于春浇 3 水处理(W_3),但也获得了 $6592.5 \text{ kg hm}^{-2}$ 的较高产量,而其总耗水量显著低于 W_3 处理,水分利用效率、特别是灌溉水利用效率显著高于 W_3 处理,使节水与高产得到统一。

小麦的根系由初生根和次生根组成。一般次生根分布较浅,初生根下扎较深。扩大初生根群,并通过适宜的亏缺灌溉促进根系深扎,可增加深土层的根系分布量,提高对土壤深层水分的吸收利用能力^[24]。深入研究小麦根系的生长发育规律,并在此基础上探讨调控其生长及分布的栽培措施,协调浅土层与深土层根系分布,调节初生根与次生根的根群结构,增加对深层土壤贮水的吸收利用,降低总耗水,节约灌溉水,提高产量,是进一步提高小麦水分生产率的关键所在。

References:

- [1] Zhang Z B, Xu P, Zhou X G, Dong B D. Advance in genetic improvement of water use efficiency in crops. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (2): 289-294.
- [2] Itoh S. In situ measurement of rooting density by micro-rhizotron. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1985, 31 (4): 653-656.
- [3] Weaver J E. *Root Development of Field Crops*. New York: Mc Graw-Hill, 1926.
- [4] Xue Q, Zhu Z, Musick J T, Stewart B A, Dusek D A. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. *Plant and Soil*. 2003, 257: 151-161.
- [5] Steingrobe B, Schmid H, Gutser R, Claassen N. Root production and root mortality of winter wheat grown on sandy and loamy soils in different farming systems. *Biology Fertility Soils*, 2001, 33: 331-339.
- [6] Gajri P R, Prihar S S, Cheema H S, Kapoor A. Irrigation and tillage effects on root development, water use and yield of wheat on coarse textured soils. *Irrigation Science*, 1991, 12: 161-168.
- [7] Feng F X, Huang G B, Cha I Q, Yu A Z, Qiao H J, Huang T. Effects of different tillage on spatiotemporal distribution of winter wheat root and yield. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (5): 2499-2506.
- [8] Miao G Y, Gao Z Q, Zhang Y T, Yin J, Zhang A L. Effect of water and fertilizer to root system and its correlation with tops in Wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28 (4): 445-450.
- [9] Zhang Y Q, Miao G Y. Effects of manure on root and shoot growth of winter wheat under water stress. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32 (6): 811-816.
- [10] Liu K, Chen X P, Zhang F S. Winter wheat root distribution and soil water and nutrient availability. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (5): 697-703.
- [11] Zhang HP, Liu XN. Root system development of winter wheat and the effect of nitrogen, phosphorus and soil moisture on its growth in north plain of china. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1993, 8 (4): 76-82.
- [12] Liu D Y, Shi L Y, Huang B G, Dong Q G. Research of cultivation methods on root system root vigor and plant characteristics in winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 1993, 26 (5): 51-56.
- [13] Lan L W, Zhou D X. *Studies on Water-saving and High-yielding of Winter Wheat*. Beijing: China Agricultural University Press, 1995.
- [14] Newman E I. A method of estimating the total length of root in a sample. *Journal Applied Ecology*, 1966, 3, 139-145.
- [15] Ma Y X, Wang C Y, He D X, Liu D Y. *Root of wheat*. Beijing: China Agricultural Publishing Company, 1999.
- [16] Li L H, Li S Q, Zai J H. Review of the relationship between wheat roots and water stress. *Acta Bat Bqrea Qccident Sin*, 2001, 21 (1): 1-7.
- [17] Sun S H, Chen X M, Qiao W C, Meng X H, Wei J W. Relationship between root distribution in different soil layer and yield of winter wheat under

- drought stress. *Journal of Hebei Agricultural Science*, 2008, 12 (5): 6-8.
- [18] Guan J F, Ma C H, Li G M. The change of biomass of the root and shoot under drought stress and its relation with drought — resistance in wheat. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2004, 27(1): 1-5.
- [19] Asseng S, Richter C, Wessolek G. Modeling root growth of wheat as the linkage between crop and soil. *Plant and Soil*, 1997, 190: 267-277.
- [20] Asseng S, Ritchie J T, Smucker A J M, Robertson M J. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat. *Plant and Soil*, 1998, 201: 265-273.
- [21] Zuo Q, Jie F, Zhang R and Meng L. A generalized function of wheat's root length density distributions. Published in *Vadose Zone Journal*, 2004, 3: 271-277.
- [22] Wang F H. Comparative studies on drought-resistant soybean varieties. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 1990, 7(3): 196-199.
- [23] Miao G Y, Zhang Y T, Yin J, Hou Y S, Pan X L. A study on the development of root system in winter wheat under unirrigated conditions in semi-arid loess plateau. *Acta Agronomica Sinica*, 1989, 15(2): 104-115.
- [24] Narayan D. Root growth and productivity of wheat cultivars under different soil moisture condition. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 1991, 17 (1): 19-26.

参考文献:

- [1] 张正斌, 张正斌, 徐萍, 周晓果, 董宝娣. 作物水分利用效率的遗传改良研究进展. *中国农业科学*, 2006, 39(2): 289-294.
- [7] 冯福学, 黄高宝, 柴强, 于爱忠, 乔海军, 黄涛. 不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响. *生态学报*, 2009, 29(5): 2499-2506.
- [8] 苗果园, 高志强, 张云亭, 尹钧, 张爱良. 水肥对小麦根系整体影响及其与地上部相关的研究. *作物学报*, 2002, 28(4): 445-450.
- [9] 张永清, 苗果园. 水分胁迫条件下有机肥对小麦根苗生长的影响. *作物学报*, 2006, 32(6): 811-816.
- [10] 刘坤, 陈新平, 张福锁. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性. *土壤学报*, 2003, 40(5): 697-702.
- [11] 张和平, 刘晓楠. 华北平原冬小麦根系生长规律及其与氮肥磷肥和水分的关系. *华北农学报*, 1993, 8(4): 76-82.
- [12] 刘殿英, 石立岩, 黄炳茹, 董庆裕. 栽培措施对冬小麦根系及其活力和植株性状的影响. *中国农业科学*, 1993, 26(5): 51-56.
- [15] 马元喜, 王晨阳, 贺德先, 刘殿英. 小麦的根. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [16] 李鲁华, 李世清, 翟军海, 史俊通. 小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展. *西北植物学报*, 2001, 21(1): 1-7.
- [17] 孙书雯, 陈秀敏, 乔文臣, 孟祥海, 魏建伟. 冬小麦干旱胁迫下不同土层根量分布于产量的关系. *河北农业科学*, 2008, 12(5): 6-8.
- [18] 关军峰, 马春红, 李广鸣. 干旱胁迫下小麦根冠生物量变化及其与抗旱性的关系. *河北农业大学学报*, 2004, 27(1): 1-5.
- [22] 王法宏. 大豆抗旱品种特性的研究. *莱阳农学院学报*, 1990, 7(3): 196-199.
- [23] 苗果园, 张云亭, 尹钧, 侯跃生, 潘幸来. 黄土高原旱地冬小麦根系生长规律的研究. *作物学报*, 1989, 15(2): 104-115.