

滴灌水氮运筹对南疆春小麦根系生长及产量的影响

孙 婷,张 迪,王冀川,张建芳,石元强,比拉力·艾力,朱 娟

(塔里木大学植物科学学院,新疆 阿拉尔 843300)

摘 要:以南疆地区春小麦新春 6 号为供试材料,采用土柱栽培法,通过滴灌开展水、氮两因素控制性试验,滴施纯氮量设 N_0 (不施氮肥)、 N_1 (69 kg · hm⁻²)、 N_2 (172.5 kg · hm⁻²)和 N_3 (276 kg · hm⁻²)4 个水平,滴灌水量设 W_1 (2 250 m³ · hm⁻²)、 W_2 (3 000 m³ · hm⁻²)、 W_3 (3 750 m³ · hm⁻²)和 W_4 (4 500 m³ · hm⁻²)4 个水平,共 16 个水氮组合处理。结果表明:扬花期是滴灌春小麦根系生长的高峰期,有 64.52%~76.90% 的根系干质量和 76.39%~82.47% 的根长分布在 0~40 cm 土层中。适当增施水氮能有效促进根系生长并提高产量,其中扬花期 N_3W_3 、 N_2W_3 、 N_3W_2 处理的根干质量、根干质量密度、根长、根长密度、根系直径和根系表面积较高,分别为 123.0~148.3 mg、97.07~117.03 g · m⁻³、14 405.8~16 490.8 mm、1.14~1.30 cm · cm⁻³、0.3267~0.3365 mm 和 14 245~17 624 mm²,其产量也达到 8 695.7~9 966.1 kg · hm⁻² 的较高水平。 N_3W_4 处理的根系各项指标虽然较高,但蜡熟期下降过快,表明水氮过高对延缓根系衰亡不利。水氮对根系生长及产量具有显著的互作效应,且水分效应高于氮素效应。通过分析,本地区较适宜的水、氮供应范围分别为 3 750~4 500 m³ · hm⁻² 和 172.5~276 kg · hm⁻²,当施氮量 259.4 kg · hm⁻²、滴灌量 3 793.4 m³ · hm⁻² 时产量可达最高为 9 142.9 kg · hm⁻²。

关键词:水氮运筹;滴灌;春小麦;根系生长;产量;南疆

中图分类号:S512.1;S275.6 **文献标志码:**A

Effects of drip irrigation and nitrogen application on root growth and yield of spring wheat in Southern Xinjiang

SUN Ting, ZHANG Di, WANG Jichuan, ZHANG Jianfang, SHI Yuanqiang, Bilali Aili, ZHU Juan
(College of Plant Science, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: The spring wheat cultivar Xinchun 6 in the Southern Xinjiang was selected as the test material, and two-factor (water and nitrogen) controlling experiments were conducted using soil-column cultivation method. Four levels of nitrogen supply, including N_0 (no N fertilizer), N_1 (69 kg · hm⁻²), N_2 (172.5 kg · hm⁻²), and N_3 (276 kg · hm⁻²), and four levels of water supply, including W_1 (2 250 m³ · hm⁻²), W_2 (3 000 m³ · hm⁻²), W_3 (3 750 m³ · hm⁻²), and W_4 (4 500 m³ · hm⁻²), were used for fertigation and drip irrigation, respectively. Thus, 16 water-nitrogen-combination treatments were implemented. The results showed that flowering stage was the peak period of root growth of spring wheat drip irrigation and 64.52%~76.90% of the root dry mass and 76.39%~82.47% of the root length were distributed in 0~40 cm soil layer. Increasing the water supply and nitrogen properly effectively promoted root growth and improved yield of spring wheat. The root dry mass, root dry mass density, root length, root length density, root diameter, and root surface area of N_3W_3 , N_2W_3 , and N_3W_2 treatments at flowering stage were higher, which were 123.0~148.3 mg, 97.07~117.03 g · m⁻³, 14 405.8~16 490.8 mm, 1.14~1.30 cm · cm⁻³, 0.3267~0.3365 mm, and 14 245~17 624 mm², respectively. The yield under N_3W_3 , N_2W_3 , and N_3W_2 treatments also reached a higher level of 8 695.7~9 966.1 kg · hm⁻². Although the root indexes under the N_3W_4

treatment were higher, yet they declined too fast during wax ripening period, which indicated that excessive water and nitrogen supply was unfavorable for delaying root senescence. Water and nitrogen had significant interaction effects on root growth and yield, and water had greater effect than nitrogen did. Through analysis, the suitable supply ranges of water and nitrogen for this region was $3\ 750\sim4\ 500\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ and $172.5\sim276\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. When nitrogen application and water drip were $259.4\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $3\ 793.4\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, the yield could reach the maximum value of $9\ 142.9\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Keywords: water and nitrogen operations; drip irrigation; spring wheat; root growth; yield; Southern Xinjiang

作物根系生长质量的好坏及分布特征直接影响作物生长、抗旱性及产量的形成^[1]。水氮是影响作物根冠生长及生理功能的重要因素,滴灌麦田由于优化了根区肥水供应方式,改善了小麦根系特征与肥水利用效率之间的关系,增产节水效果明显^[2-3],但关于水氮调控滴灌春小麦根系生长特性的研究较少^[4],滴灌春小麦水肥高效利用的机制尚不清楚,影响了科学合理水肥运筹制度的制定。关于水氮对作物根系的影响研究,李秧秧等^[5]认为,适量施氮(尿素 $600\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)能增加总根质量和深层土壤中的根质量,提高小麦的抗旱性;过量施氮(尿素 $1\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)增加上层根量,对抗旱性的意义并不大。严重水分胁迫时,过量施氮会导致根细胞膜伤害率明显增加,根-水分关系恶化,根系保水能力下降,使小麦抗旱性降低。张国盛等^[6]认为,轻度水分胁迫下,施氮能增加小麦的根系干质量、长度、活力和活跃吸收面积,但在严重水分胁迫条件下,施氮可导致根体积和根干质量严重下降,这说明氮营养在某种程度上能部分改善小麦的耐旱性。Pandey 等^[7]认为小麦苗期水分调亏对氮素的吸收能力降低,在生长中期复水后对氮素的吸收有强烈的补偿效应。以上研究是在常规灌溉下进行的,滴灌由于改变了水肥供应方式,水氮对冬小麦根冠生长调节效应与常规灌溉有明显不同。本试验在南疆干旱气候条件下,通过滴灌水氮一体化措施,研究水氮双因素对小麦根系生长特征和产量的影响,揭示滴施水肥下小麦的根系生长特点,探寻优化根系分布与根冠协调生长的滴灌水氮运筹模式,为干旱区小麦节水省肥栽培提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年在塔里木大学农学试验站网室中进行,该试验点位于塔里木盆地西北边缘, $81^{\circ}16'E$, $40^{\circ}33'N$,海拔 $1\ 012.2\ \text{m}$,年平均气温 11.2°C ,年均降水量 $45.7\ \text{mm}$,年均蒸发量 $1988.4\ \text{mm}$,年均相对

湿度在 55% 以下,属典型暖温带内陆型气候。

1.2 试验材料与试验设计

试验采用土柱栽培的方法,土柱直径 $11\ \text{cm}$ 、高 $80\ \text{cm}$,进行不同滴灌水、氮两因素控制性试验,滴施纯氮量处理设置 4 个水平,分别为不施氮肥及每根土柱滴施纯氮 $0.065\ 6$ 、 $0.163\ 9\ \text{g}$ 和 $0.262\ 3\ \text{g}$ (按土柱面积折算,相当于每公顷滴施纯氮 0 、 69.0 、 $172.5\ \text{kg}$ 和 $276.0\ \text{kg}$),分别以 N_0 、 N_1 、 N_2 和 N_3 表示;滴灌水量设置 4 个水平,分别为每根土柱灌水 2.1383 、 2.8510 、 $3.5637\ \text{kg}$ 和 $4.2765\ \text{kg}$ (按土柱面积折算,相当于每公顷滴灌 $2\ 250$ 、 $3\ 000$ 、 $3\ 750\ \text{m}^3$ 和 $4\ 500\ \text{m}^3$),分别以 W_1 、 W_2 、 W_3 和 W_4 表示,水氮两因素组合共 16 个处理,每个处理重复 15 次,共计 240 根管。全期滴灌 8 次,滴肥 6 次,按不同生育时期的肥水特性设置滴灌滴肥权重(表 1),确定各次的滴灌水量和滴施氮肥量。

表 1 春小麦各生育期滴灌水量、施肥量分配比例
Table 1 Distribution proportion of drip irrigation and fertigation amount in different growth periods of spring wheat

生育期 Growth period	日期(月-日) Date (m-d)	灌水权重 Irrigation ratio	施肥权重 Fertilizer ratio
TLS	04-04	0.10	0.10
JS	04-16	0.10	0.15
BS	04-26	0.12	0.20
HS	05-04	0.12	0.20
FP	05-12	0.15	0.20
GFS	05-18	0.15	0.15
FS	05-26	0.15	0.00
LFS	06-04	0.11	0.00
DS	06-16	0.00	0.00

注: TLS: 三叶期; JS: 拔节期; BS: 孕穗期; HS: 抽穗期; FP: 扬花期; GFS: 籽粒形成期; FS: 灌浆初期; LFS: 灌浆后期; DS: 蜡熟期。下同。

Note: TLS: Three-leaf stage; JS: Jointing stage; BS: Booting stage; HS: Heading stage; FP: Flowering period; GFS: Grain formation stage; FS: Filling stage; LFS: Late filling stage; DS: Dough stage. The same below.

土柱为硬质 PVC 管材,每根装土 12 kg,土壤取自农田的 0~25 cm 土层,土质为沙壤土,干土体积质量为 $1.32\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均土壤质量含水量为 19.27%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量 $49.27\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量 $6.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质的含量 1.03%,土壤 pH 值 7.7。为模拟田间滴灌模式,土柱埋于试验田中,每根管子采用医用输液管连接挂瓶进行滴灌施肥,氮素换算成尿素溶于水后滴施,按照管栽面积换算得到具体水、尿素施用量,每次滴灌时间控制在 3 h 左右。2018 年 3 月 2 日播种,品种为新春 6 号,每管播 10 粒,播深 3 cm,出苗后剔除多余麦苗保证每管 8 株。

1.3 测试项目与方法

在小麦关键的生育时期(拔节、抽穗、籽粒形成、灌浆等)每处理取 3 管,以 20 cm 间隔截取成 4 段,在 200 目纱网中用清水冲洗并挑选出根系,用镊子仔细摆放在玻璃板上,扫描成 TIF 图像,用 DT-SCAN 图像分析软件(Delta-T Devices Ltd.,英国)计算根系的长度(RL)、平均直径(RD)和根表面积等形态特征指标^[8],最后将各层根系放入干燥箱,在 105℃ 下杀青 0.5 h 后于 65℃ 烘干至恒重再称干重,计为根系干物质量(RDW)。

根长密度($RLD, \text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$) = $L/20\pi r^2$
式中, L 为根长(cm), r 为土柱半径(cm)。
根系表面积(RS, cm^2) = $\pi LR^2/4$
式中, R 为根系平均直径(mm)。
根系干质量密度($RWD, \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) = $g/20\pi r^2$
式中, g 为根系干质量(g)。

各处理小麦成熟后考察穗长(cm)、小穗数、穗粒数、千粒质量(g)等穗部性状和产量构成性状,最终计实产($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.4 数据处理

以 Excel 2003 进行数据整理并制图,用 DPS 7.05 对数据进行统计分析,以最小显著差数法(LSD)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 水氮运筹对滴灌春小麦根系生长特性的影响

2.1.1 对根系干物质量(RDW)垂直分布的影响
由表 2 可见,各时期各处理的 RDW 随着土层的深入呈下降的趋势,RDW 在 0~40 cm 土层最多,占总 RDW 的 64.52%~76.90%。随着生育进程的推进根系总干质量随施氮量和灌水量的增加呈先增加后下降的趋势,在扬花期达到最大值。在同一施氮水平或灌水条件下 RDW 随施氮量或灌水量的增加而

增加,其中 N_3W_4 在扬花期达最大,达 158.4 mg,其次是 N_3W_3 达 148.3 mg。但 N_3W_4 随后下降较快,至蜡熟期 RDW 仅为 N_3W_3 的 67.6%。说明增施水、氮对根系生长有较好促进作用,但过高氮肥造成后期群体生长过旺产生郁闭,对根系生长不利。从各处理根系空间分布的平均变异系数(CV)来看(表 2),随供氮或供水的增加,根系干质量在土层的空间分布差异减小,且其以扬花期减小程度最低,说明增加供水或供氮量能促进根系纵向生长,增加各土层根系分布的均匀度。扬花期是小麦根系功能最大时期,这种效应也达到最大。

水氮互作对拔节期、扬花期和灌浆期的根系干物质量影响(F 值)达显著水平($P<0.05$),其中施氮处理下总 RWD 在拔节期、孕穗期、扬花期和蜡熟期的变异系数分别为 10.66%、9.41%、10.32% 和 29.84%,不同灌水处理分别为 9.01%、13.46%、14.48% 和 30.08%。说明水氮对 RWD 的影响差异主要在蜡熟期,且灌水处理效应大于施氮效应。

2.1.2 对根干质量密度(RWD)的影响 从图 1 可以看出,各时期的 RWD 以 0~40 cm 土层最大,是 40~80 cm 的 1.9~3.4 倍,说明滴灌小麦根系主要分布在 0~40 cm 土层中。从各时期的平均 RWD 来看,扬花期>孕穗期>灌浆期>拔节期>蜡熟期,拔节期~孕穗期的增长速度大于其他时期,说明拔节期~孕穗期是小麦根系生长的快速时期,而扬花期是小麦根系分布密度的高峰期。在同一施氮水平或灌水水平下,RWD 随灌水量或施氮量的增加而增加,其中在拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期和蜡熟期施氮处理平均 RWD 的 CV 分别为 10.66%、9.41%、10.32%、11.65% 和 29.84%,而灌水处理 RWD 分别为 9.01%、13.46%、14.68%、14.49% 和 30.08%,后期 RWD 较大,并以蜡熟期显著高于其他时期,其中 N_3W_3 处理的 RWD 最大达 $81.52\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,其次为 N_2W_3 和 N_2W_4 ,分别为 $66.77\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $64.40\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明适当增施水氮能有效增加蜡熟期的 RWD,延缓根系衰老,且这种效应具有累加性,水分效应高于氮素效应。

2.1.3 对根系长度(RL)分布的影响 从表 3 可以看出,各生育期 RL 随土层加深而逐渐降低,0~40 cm 土层根长最大,占总 RL 的 76.39%~82.47%。随生育进程推进各层 RL 随施氮量和灌水量的增加呈先增后降的趋势,在扬花期达到最大值。从各时期的平均 RL 来看,不同水分处理及不同氮素处理间 RL 差异均达显著水平($P<0.05$),表现为 $\text{W}_3>\text{W}_4>\text{W}_2$

表 2 春小麦各生育期不同土层根干质量/(mg·株⁻¹)

Table 2 Dry root weight of different soil layers in different growth periods of spring wheat/(mg·plant ⁻¹)																									
处理 Treatment	JS					BS					FP					DS									
	土层 Soil layer/cm					土层 Soil layer/cm					土层 Soil layer/cm					土层 Soil layer/cm									
	0~20	20~40	40~60	60~80	合计 Total	0~20	20~40	40~60	60~80	合计 Total	0~20	20~40	40~60	60~80	合计 Total	0~20	20~40	40~60	60~80	合计 Total					
N ₀	W ₁	22.4b	19.8b	4.6d	47.3b	92.3	28.8c	30.4b	12.4d	7.5c	79.1d	58.3	26.8c	36.7c	16.4c	10.0c	89.9d	52.3	6.7c	10.9b	4.5c	0.5d	22.6d	76.8	
	W ₂	20.2c	20.9a	6.1c	48.4b	82.3	29.1c	31.4b	15.8c	6.3d	82.6c	57.1	24.8d	41.8b	18.9b	11.1b	96.6c	54.0	8.1b	12.4a	6.9b	3.8c	31.2c	45.4	
	W ₃	24.4a	19.7b	8.9b	5.1a	58.1a	62.3	33.2b	36.7a	17.8b	8.4b	96.1b	55.1	35.2a	44.8a	21.3a	14.4a	115.7a	47.3	8.4b	11.8ab	8.7a	7.5b	36.4b	20.6
	W ₄	22.8b	21.8a	9.7a	4.2b	58.5a	62.5	35.4a	39.2a	19.4a	11.4a	105.4a	49.9	32.8b	42.8ab	20.7a	13.9a	110.2b	46.6	15.6a	12.4a	8.3a	9.9a	46.2a	27.6
N ₁	W ₁	27.3a	22.8a	8.7c	4.2a	63.0a	70.2	32.4b	30.7c	15.8c	5.7d	84.6d	60.1	33.8c	38.9b	14.8c	10.9d	98.4c	56.2	8.7d	13.5d	9.3c	1.4c	32.9d	61.2
	W ₂	25.3b	20.4b	9.7b	4.3a	59.7b	64.4	31.7b	37.5b	16.4c	9.5c	95.1c	54.7	36.8b	42.8a	16.9b	12.7c	109.2b	54.0	14.7c	18.7c	13.3b	9.3b	56.0c	27.7
	W ₃	24.0c	18.7c	11.2a	3.3b	57.2c	63.1	35.7a	42.4a	18.5b	12.6b	109.2b	51.5	38.9a	44.8a	24.8a	14.5b	123.0a	44.6	16.4b	22.1b	18.8a	10.7a	68.0b	28.3
	W ₄	28.1a	22.5a	10.8a	1.2c	62.6a	76.9	34.7a	43.9a	20.1a	16.4a	115.1a	44.5	40.1a	42.8a	25.8a	18.2a	126.9a	36.9	20.5a	25.4a	19.7a	11.1a	76.7a	31.0
N ₂	W ₁	24.8bc	21.6bc	6.9d	2.5c	55.8d	78.3	33.8c	35.8b	14.7d	6.2d	90.5c	64.1	32.8d	36.7c	17.9d	10.9d	98.3d	49.6	9.8c	15.4d	7.0c	2.6d	34.8d	61.7
	W ₂	23.5c	23.4a	8.6c	4.8b	60.3c	65.0	36.8b	43.8a	16.9c	11.7c	109.2b	56.5	34.8c	43.7b	22.4c	16.1b	117.0c	42.3	14.6b	20.8c	15.8b	9.8c	61.0c	29.6
	W ₃	26.9a	22.7ab	12.1a	9.1a	70.8a	47.8	35.8bc	43.9a	20.7b	12.7b	113.1b	50.1	40.1b	46.8ab	25.9b	15.2c	128.0b	44.3	20.8a	27.4b	17.7a	11.8b	77.7b	33.4
	W ₄	24.9b	21.3c	9.7b	9.4a	65.3b	48.8	39.7a	45.6a	22.4a	19.3a	127.0a	40.6	42.8a	49.7a	31.1a	18.0a	141.6a	39.3	21.8a	29.7a	16.2b	13.9a	81.6a	34.5
N ₃	W ₁	26.9c	21.7c	10.7c	0.5d	59.8c	78.7	32.4b	33.7c	19.2b	7.6d	92.9d	53.1	30.7c	38.7c	17.1d	11.9d	98.4d	50.0	11.7d	17.8d	9.8c	3.0d	42.3d	57.6
	W ₂	23.7d	19.8d	11.8b	3.5c	58.8c	61.1	34.2b	40.3b	17.9b	11.6c	104.0c	51.9	38.5b	45.8b	24.1c	14.6c	123.0c	45.7	24.7b	32.7b	18.7a	8.5b	84.6b	48.2
	W ₃	28.7b	23.7b	13.4a	10.5a	76.3b	44.8	40.8a	46.8a	25.7a	15.7a	129.0a	44.0	44.2a	51.3a	32.8b	20.0b	148.3b	37.0	30.4a	41.8a	16.9b	14.2a	103.3a	49.5
	W ₄	32.4a	25.8a	12.3b	10.1b	80.6a	53.2	38.8a	43.8a	26.2a	14.2b	123.0b	43.2	45.8a	52.3a	36.8a	23.5a	158.4a	31.5	22.4c	26.8c	15.9b	4.7c	69.8c	55.1
F 值 F value																									
N	9.9**	2.8ns	124.2**	314.9**	97.4**	25.8**	9.6**	46.5**	11.8**	39.7**	16.7**	4.8*	41.5**	4.7*	27.0**	294.5**	538.6**	87.6**	10.4**	555.8**					
W	4.7**	2.6ns	23.1**	209.1**	28.2**	7.7**	20.5**	14.3**	87.7**	37.7**	20.8**	24.5**	36.7**	43.9**	81.8**	42.8**	38.8**	42.8**	218.2**	205.1**					
N×W	1.6ns	3.2**	1.6ns	63.2**	6.86**	0.8ns	0.8ns	0.7ns	7.3**	1.1ns	1.4ns	1.5ns	2.6*	3.4**	4.1**	5.6**	9.8**	3.6**	21.6**	20.5**					

注:同列不同小写字母表示同一施氮水平下不同灌水处理间差异显著($P<0.05$)。ns、*和**分别表示差异不显著($P>0.05$)、差异显著($P<0.05$)和差异极显著($P<0.01$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference among treatments in the same nitrogen rate treatment ($P<0.05$). ns, * and ** represent not significant ($P>0.05$), significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$), respectively. The same below.

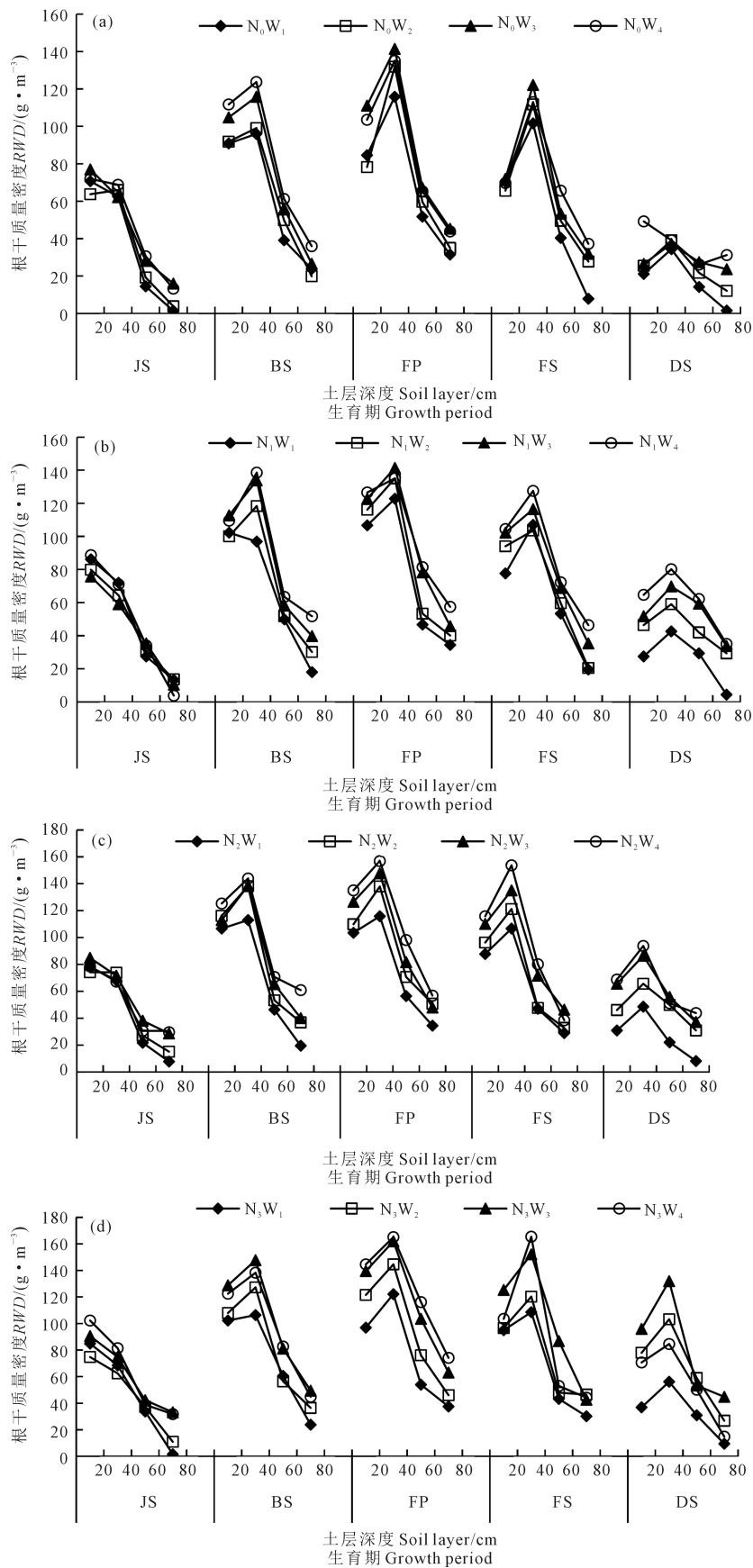


图 1 不同水氮处理对春小麦根干重密度垂直分布的影响

Fig.1 Vertical distribution of dry root weight and root density under different irrigation and nitrogen application

表 3 春小麦各生育期不同土层根长/ $\times 10^3$ mm

Table 3 Root length of different soil layers in different growth periods of spring wheat

处理 Treatment	JS				BS				FP				DS												
	土层 Soil layer/cm				土层 Soil layer/cm				土层 Soil layer/cm				土层 Soil layer/cm												
	0~20	20~40	40~60	60~80	合计 Total	CV/%	0~20	20~40	40~60	60~80	合计 Total	CV/%	0~20	20~40	40~60	60~80	合计 Total	CV/%							
N ₀	W ₁	2.43b	1.68b	0.75a	0.13d	5.00b	81.28	2.00c	2.62c	1.25c	0.35b	6.21d	63.06	2.80c	3.05c	0.71d	0.18c	6.74c	86.14	1.59d	1.15d	0.70c	0.06c	3.50d	74.74
	W ₂	2.81a	1.87a	0.76a	0.14c	5.58a	84.83	2.44b	2.94ab	1.77b	0.31c	7.46b	61.29	3.28b	4.02b	1.86b	0.37a	9.52b	67.77	2.81b	1.77b	0.44d	0.02d	5.05c	100.88
	W ₃	2.99a	1.36c	0.46c	0.32a	5.12b	95.93	3.10a	3.17a	2.64a	0.39a	9.30a	56.41	3.79a	4.86a	2.51a	0.22b	11.38a	70.09	3.64a	1.62c	1.00b	0.06b	6.32a	95.69
	W ₄	2.98a	1.43c	0.52b	0.18b	5.11b	98.15	2.94a	2.77ac	0.90d	0.24d	6.85c	78.88	4.17a	3.97b	0.97c	0.11d	9.23b	89.65	2.09c	2.15a	1.48a	0.08a	5.80b	66.59
N ₁	W ₁	2.36a	1.89c	0.88b	0.13c	5.26c	76.12	3.68c	2.86c	1.63c	0.36c	8.53d	68.04	3.72b	3.83c	1.80d	0.27b	9.61c	70.88	2.44c	1.66c	0.98b	0.07c	5.15d	78.22
	W ₂	2.79c	2.66a	1.14a	0.18ab	6.76b	74.34	4.56b	3.72b	2.08b	0.45a	10.81c	67.42	5.41a	4.70b	2.40c	0.27b	12.78b	73.13	3.66a	1.74c	1.33a	0.09b	6.82b	87.01
	W ₃	3.48b	2.15b	0.73c	0.17b	6.53b	90.96	5.22a	4.76a	2.40a	0.40b	12.77a	70.03	5.72a	5.43a	3.25a	0.33a	14.72a	67.71	4.00a	2.01b	1.37a	0.10a	7.48a	86.92
	W ₄	3.92a	2.61a	0.83b	0.19a	7.55a	89.91	5.57a	4.95a	1.08d	0.25d	11.85b	90.67	5.55a	5.93a	2.75b	0.23c	14.46a	73.76	2.83b	2.62a	0.96b	0.06d	6.48c	82.23
N ₂	W ₁	3.67b	1.52c	1.37a	0.25a	6.81b	84.00	4.48c	3.32b	2.16b	0.40b	10.35c	67.28	3.43c	3.84b	2.07c	0.32a	9.67b	65.64	2.82d	1.36d	0.87c	0.08c	5.14d	89.94
	W ₂	3.57b	1.80ab	0.78c	0.21b	6.36c	92.88	5.72b	3.94a	2.99a	0.50a	13.14a	66.21	5.26b	5.34a	2.82a	0.23c	13.66a	71.02	3.94c	1.77c	1.64b	0.11b	7.46c	84.45
	W ₃	4.16a	1.73b	1.14b	0.22b	7.26ab	92.89	5.79ab	4.09a	2.84a	0.42b	13.14a	68.86	6.23a	5.28a	2.92a	0.28b	14.71a	72.36	5.42a	2.37b	1.94a	0.12a	9.85a	89.39
	W ₄	4.25a	1.99a	1.15b	0.19c	7.59a	91.30	6.14a	4.34a	1.55c	0.29c	12.32b	86.12	5.79ab	5.62a	2.46b	0.28b	14.15a	75.19	4.50b	3.06a	0.85c	0.05d	8.46b	96.21
N ₃	W ₁	2.56d	2.66c	0.78c	0.30a	6.30c	76.95	4.09c	3.24b	2.61b	0.58a	10.52c	56.86	3.73b	4.35b	3.72b	0.43a	12.23c	58.10	2.97d	0.82c	0.44c	0.06b	4.30d	121.16
	W ₂	4.06c	3.16a	1.73a	0.22b	9.17b	73.29	4.65b	4.73a	2.92a	0.46b	12.75b	62.83	5.94a	4.65b	3.45b	0.37b	14.41b	66.17	4.36b	2.10b	0.88b	0.05b	7.40b	101.28
	W ₃	5.22a	2.93b	1.50b	0.22bc	9.87a	86.89	5.27a	4.78a	3.12a	0.43b	13.60a	64.17	6.19a	5.66a	4.30a	0.34b	16.49a	64.14	4.75a	2.79a	1.90a	0.13a	9.57a	80.42
	W ₄	4.77b	3.22a	1.56b	0.20c	9.75a	81.48	5.46a	4.71a	2.48b	0.35c	12.99ab	71.18	5.95a	5.63a	2.69c	0.19c	14.46b	75.08	3.49c	1.93b	0.93b	0.06b	6.41c	92.01
F 值 F value																									
N	143.25 ^{***}	119.74 ^{***}	177.78 ^{***}	11.54 ^{***}	155.67 ^{***}	76.656 ^{***}	131.11 ^{***}	29.72 ^{***}	118.01 ^{***}	402.72 ^{***}	449.02 ^{***}	67.22 ^{***}	190.54 ^{***}	41.10 ^{***}	288.17 ^{***}	170.76 ^{***}	11.17 ^{***}	17.53 ^{***}	606.10 ^{***}	121.35 ^{***}					
W	34.87 ^{***}	16.09 ^{***}	6.72 ^{***}	16.44 ^{***}	25.76 ^{***}	92.70 ^{***}	29.00 ^{***}	87.40 ^{***}	89.87 ^{***}	62.13 ^{***}	73.21 ^{***}	48.63 ^{***}	45.04 ^{***}	21.34 ^{***}	71.01 ^{***}	137.83 ^{***}	114.03 ^{***}	129.89 ^{***}	44.00 ^{***}	314.85 ^{***}					
N×W	5.46 ^{***}	3.74 ^{***}	30.94 ^{***}	34.66 ^{***}	8.15 ^{***}	2.45 [*]	3.85 ^{***}	4.75 ^{***}	12.93 ^{***}	3.01 [*]	2.99 [*]	2.95 [*]	7.56 ^{***}	11.09 ^{***}	1.61ns	5.72 ^{***}	17.83 ^{***}	47.43 ^{***}	17.02 ^{***}	16.43 ^{***}					

$>W_1$ 和 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$, 且以 $N_3 W_3$ 的 RL 最大, 达 16 491 mm, 其次是 $N_2 W_3$ 和 $N_1 W_4$, 为 14 712 mm 和 14 463 mm, $N_3 W_4$ 后期 RL 下降较快, 蜡熟期不及 $N_3 W_3$ 处理的 66.96%, 表明增施水氮能显著增加根长, 但灌水施氮量过高, RL 反而下降。

在拔节期、扬花期和蜡熟期的 RL 水氮互作响应 (F 值) 达显著水平 ($P < 0.05$), 且施氮处理的 RL 在拔节期、孕穗期、扬花期和蜡熟期的 CV 分别为 21.46%、21.46%、17.91% 和 16.29%, 灌水处理分别为 10.51%、12.73%、16.32% 和 23.66%, 可见随生育期推进, 不同施氮对 RL 影响效应的差异在下降, 而灌水的效应差异在增加, 说明水、氮对 RL 的作用重点不同, 增氮能促进前中期的根长发育, 增水能保证后期根系不早衰。在蜡熟期, 随施氮量增加根长在不同土层中分布的 CV 上升, 而随灌水量增加其呈下降趋势, 说明高氮或少水并不利于延缓后期下层根系衰老。

2.1.4 对根长密度 (RDL) 分布的影响 根长密度表示根系长度在单位土体中的分布。从图 2 可以看出, 0~40 cm 的 RDL 是 40~80 cm 的 3.4~4.7 倍, 且随生育进程推进深层土壤 RDL 下降更快, 从各期不同土层平均 RDL 变化看, 施氮量增加, 40~60 cm 土层 RDL 增加, 0~20 cm 土层 RDL 下降; 灌水量增加, 0~20 cm 土层 RDL 增加, 60~80 cm 土层 RDL 减少, 说明氮肥过高, 促进深层土壤根系分布, 但灌水过高, 不利于根系下扎。扬花期各土层平均 RDL 达高峰, 并以 $N_3 W_3$ 最大, 达 $1.30 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 其次是 $N_2 W_3$ 和 $N_3 W_2$, 为 $1.16 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.14 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 在 $N_0 W_1$ 处理下最小, 仅为 $0.53 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 表明适当增加施氮量和保持一定供水量是促进根系发育的关键。

2.1.5 对根系平均直径 (RD) 的影响 根系平均直径的大小决定了根系的吸收动力^[9]。由图 3 可以看出, 小麦的根系平均直径大小表现为扬花期 > 灌浆期 > 孕穗期 > 蜡熟期 > 拔节期。在同一氮素水平不同水分处理间 RD 差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 表现为 $W_4 > W_3 > W_2 > W_1$; 在同一灌水水平不同施氮处理间 RD 表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$, 其中 N_3 和 N_2 差异不显著, 其他处理间差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。组合处理中以 $N_2 W_4$ 处理的 RD 最大, 为 0.341 mm, 其次为 $N_3 W_4$ 和 $N_3 W_3$, 为 0.339 mm 和 0.336 mm, 说明充足的水分供给和高施氮量可以促进根系的加粗生长, 少水少氮处理 RD 变细。在拔节期-孕穗期根系平均直径增长速度最快, 扬花期达高峰期, 灌浆以后 RD 逐渐下降, 这可能与粗根较细根衰老快有关^[10]。

施氮处理下 RD 在拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期和蜡熟期的 CV 分别为 4.44%、6.52%、4.92%、3.49% 和 2.69%, 灌水处理分别为 5.82%、6.58%、5.53%、5.91% 和 2.85%。可见施氮主要影响孕穗期和扬花期, 灌水主要影响在灌浆期之前, 且灌水效应大于施氮效应。

2.1.6 对根系表面积 (RS) 的影响 从图 4 可以看出, RS 随生育期的推进呈先增后降的趋势, 在扬花期达到最大值。在同一氮素水平下 RS 表现为 $W_3 > W_2 > W_4 > W_1$, 在同一灌水水平下表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$, 各水分处理及各施氮处理间差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 说明适当增施水氮能有效提高小麦根系表面积, 且以 $N_3 W_3$ 和 $N_2 W_3$ 处理最大, 达 17 624 mm² 和 16 776 mm², $N_3 W_2$ 和 $N_1 W_3$ 次之, 为 15 653 mm² 和 14 245 mm², 但水氮过多, RS 反而下降。

施氮处理下 RS 在拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期和蜡熟期的 CV 分别为 30.22%、26.56%、16.83%、17.48% 和 14.24%, 灌水处理分别为 13.68%、16.62%、18.89%、22.13% 和 26.79%。说明施氮主要影响春小麦生育前期, 灌水主要影响春小麦生育后期。

2.2 水氮运筹对滴灌春小麦穗部性状及产量构成的影响

灌水量、施氮量对小麦穗部性状及产量构成因素的影响均达显著水平 ($P < 0.05$)。同一施氮处理下, 随灌水量的增加, 穗长、小穗数、穗粒数、千粒质量和穗粒质量增加, 但 $N_3 W_4$ 处理的穗长、千粒质量和穗粒质量及 $N_2 W_4$ 处理的穗粒质量显著下降 ($P < 0.05$); 同一灌水处理下随施氮量增加, 各穗部及产量性状增加, 但 $N_3 W_4$ 处理的千粒质量显著下降 ($P < 0.05$)。从产量指标 (穗粒质量) 看, 以同一灌水条件下的 N_3 处理或同一施氮水平下的 W_3 处理最高, 但与 N_2 处理或 W_4 处理的差异不显著, 可见, 灌水量 $3.563 \sim 4.276 \text{ kg} \cdot \text{管}^{-1}$ (折合 $3 \sim 4 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)、施氮量 $0.163 \sim 0.262 \text{ g} \cdot \text{管}^{-1}$ (折合 $172.5 \sim 276 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 是本地滴灌小麦适合的水氮投入量。由产量构成的水氮调控效应 (F 值) 可见, 指标的单因素及其互作效应均达显著水平 ($P < 0.05$), 且不同施氮条件下, 穗粒数、千粒质量和穗粒质量的 CV 分别为 11.12%、6.15% 和 16.28%, 均小于不同灌水条件下的 16.13%、8.09% 和 23.04%, 说明保证灌水是根本, 适量增施氮肥以发挥水氮对产量构成因素的耦合调控效应是南疆干旱地区滴灌小麦高产的关键。

各组合处理以 $N_3 W_3$ 处理穗粒质量最高, 达 1.184 g (折合 $9 \sim 966.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 其次为 $N_2 W_3$ 和

N_3W_2 , 达 1.041 g 和 1.033 g (折合 $9\,604.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8\,695.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。根据水 (W)、氮 (N) 组合的产量 (Y) 数据, 进行多次二项式逐步回归, 得到拟合方程 $Y = -1.7453 + 2.7063N + 1.3857W - 4.6197N^2 -$

$0.1881W^2 - 0.1189NW$ ($R^2 = 0.9137$), 求极值得到施氮量 $0.246\,5\text{ g}\cdot\text{管}^{-1}$ (折合纯氮 $259.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、滴水量 $3.605\,2\text{ kg}\cdot\text{管}^{-1}$ ($3\,793.6\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$) 时的穗粒质量最高, 为 $1.086\,1\text{ g}$ (折合 $9\,142.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) (表 4)。

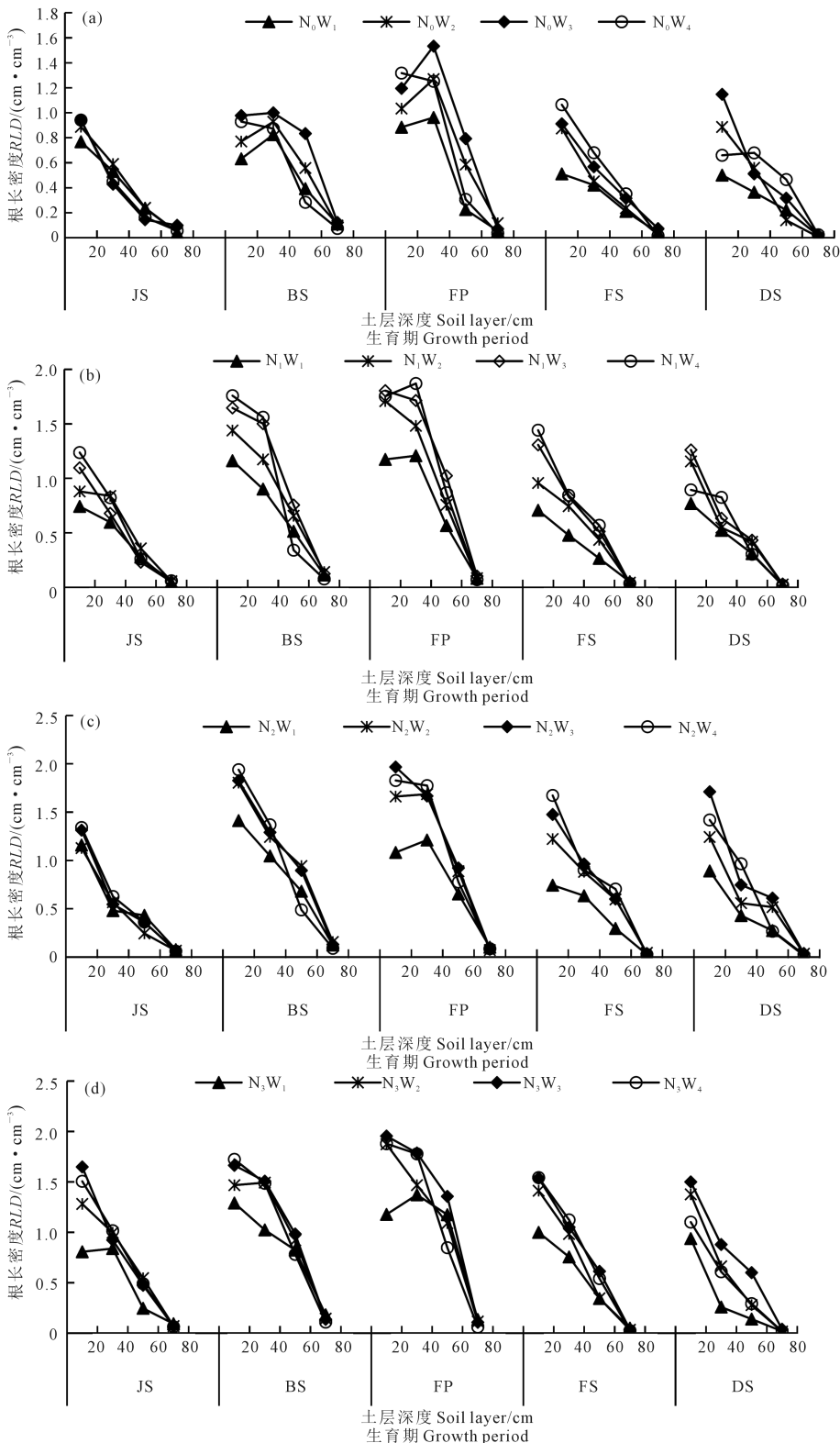


图 2 不同水氮处理对春小麦根长密度垂直分布的影响
Fig.2 Vertical distribution of root length and density under different irrigation and nitrogen application

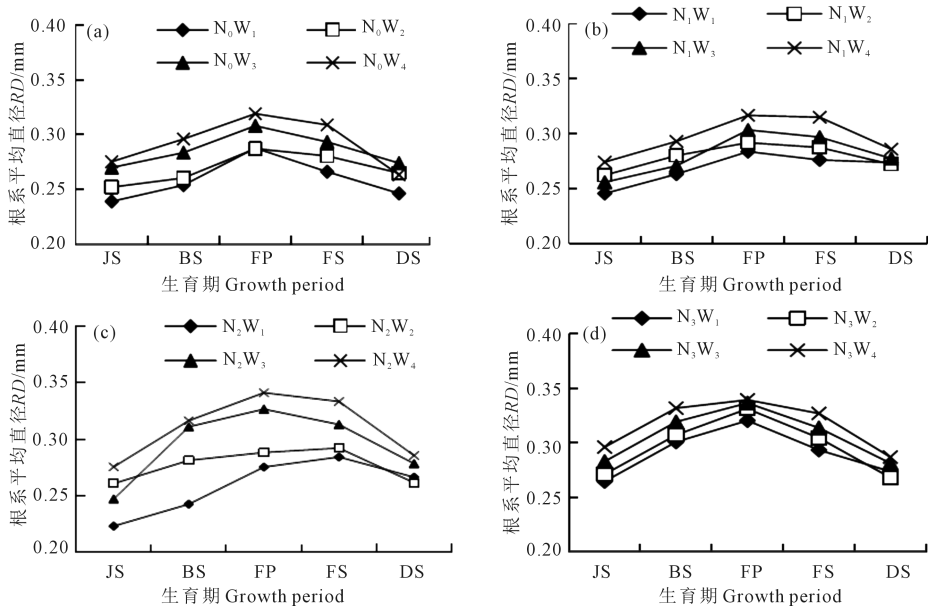


图 3 不同水氮处理对春小麦根系平均直径的影响

Fig.3 Effects of different irrigation and nitrogen application on average root diameter of spring wheat

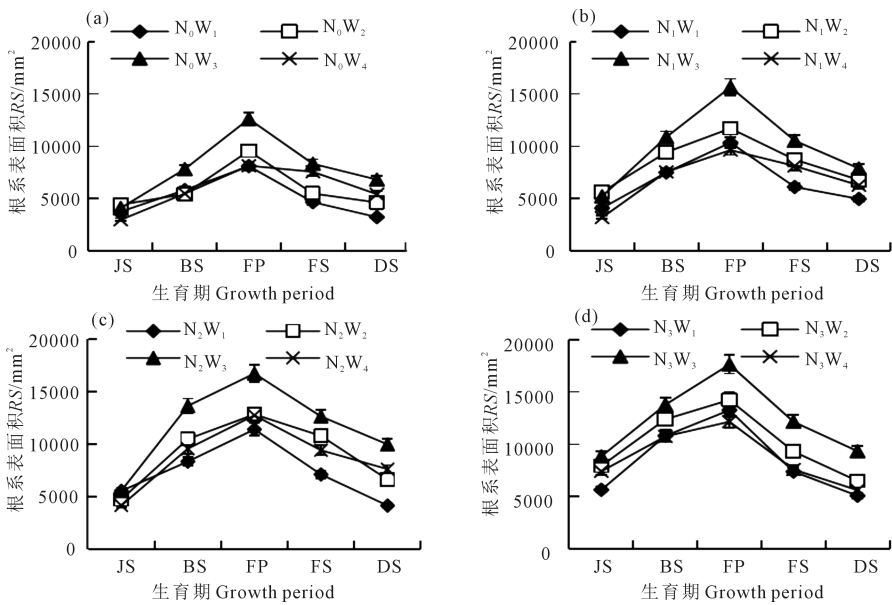


图 4 不同水氮处理对春小麦根系表面积的影响

Fig.4 Effects of different irrigation and nitrogen application on root surface of spring wheat

3 讨论

一般认为小麦根系主要分布在 0~60 cm^[11],并与产量呈显著正相关关系,本试验表明滴灌春小麦的根系主要分布在 0~40 cm 的土层中,比常规灌溉的分布略浅,且随施氮量或灌水量增加,0~40 cm 土壤根系干质量所占比例在下降,而根长所占比例增加,这主要是滴灌施肥优化了浅层土壤水分和养分条件,诱导上层根系快速生长、根径变大的结果^[10],同时增加水氮供应相应增强了根系长势,促进深层

根长密度^[12],对土壤养分的全面吸收有利。

研究表明,根系各指标随小麦生育进程推进呈先升高再下降的变化趋势^[4],在拔节期~孕穗期生长速度最快,扬花期达最大值,这与一般研究认为的抽穗前最快^[13-14]、灌浆期生长达最大值^[11,15]的结果相比有所提前,可能是滴灌改善了根系生长条件、促进根系早发所致^[16],这也是滴灌小麦前期长势较强的原因所在^[17]。但也有研究报道^[10,18],拔节~孕穗期小麦根系生长最快、分布最深,这可能与不同基因型小麦的根系生长差异有关^[19]。

表 4 水氮处理对春小麦穗部性状及产量的影响
Table 4 Effects of irrigation and nitrogen application on ear characters and yield of spring wheat

处理 Treatment	穗长/cm Ear length	小穗数 Spikelet number	穗粒数 Grains number per spike	千粒重/g 1000-grain weight	穗粒重/g Spike weigh	
N ₀	W ₁	6.058c	11.044c	13.210c	32.300d	0.427d
	W ₂	6.673b	12.401b	16.941b	37.274c	0.632c
	W ₃	7.856a	13.543a	17.726a	41.230b	0.728b
	W ₄	6.413b	13.61a	18.654a	43.681a	0.814a
N ₁	W ₁	6.673b	11.994b	13.933c	38.152c	0.530c
	W ₂	6.998b	12.389b	18.352b	41.225b	0.754b
	W ₃	8.060a	14.441a	19.800a	44.965a	0.891a
	W ₄	6.942b	14.161a	19.074ab	46.264a	0.882a
N ₂	W ₁	6.912b	12.369b	15.749c	39.410c	0.621c
	W ₂	6.933b	13.111b	20.896b	44.200b	0.921b
	W ₃	7.887a	14.787a	23.803a	47.979a	1.041a
	W ₄	7.410ab	14.669a	21.016b	45.818ab	0.964b
N ₃	W ₁	6.526c	12.732b	15.301c	40.480b	0.618d
	W ₂	7.497b	13.646b	21.780b	47.476a	1.033b
	W ₃	8.537a	15.238a	24.603a	48.077a	1.184a
	W ₄	7.436b	15.624a	22.717b	39.519b	0.898c
F 值 F value						
F	N	8.019 *	2.651ns	35.301 **	7.582 *	34.132 **
	W	50.743 **	20.546 **	149.264 **	42.832 **	480.684 **
	W×N	1.821ns	0.167ns	3.736 **	7.587 **	21.697 **

合理的水肥运筹可以发挥“以水促肥、以肥调水”的根系调控作用^[20]。适宜的水分供应会显著增加根系在土壤剖面的分布^[21];当土壤水分严重亏缺时,小麦根系生长和土壤剖面的时空分布会受到限制,然而轻度的干旱可以促进根系的延伸生长^[22];过量灌水会导致土壤缺氧,抑制根系生长,引起根系早衰,从而降低产量^[23]。施肥促进根系发育,氮素的亏缺会抑制根系的生长^[24];适当增施氮肥(300 kg·hm⁻²)能促进春小麦根系生长^[25],使小麦生育后期根量保持在较高水平^[26],施氮过量(450 kg·hm⁻²)导致植物体内氮积累到一定程度时根系的生长受到抑制^[25,27]。水、氮之间存在着一定的耦合效应,水分不足则会降低氮肥的吸收。正常供水下增施氮肥促进根系生长,增加根系干质量、根表面积和根长^[28]。王亚萍等^[29]认为轻度干旱胁迫对冬小麦根系生长最为合适,适量施氮可以增加总根系质量和深层土壤中的根系质量,提高作物的抗旱能力;严重水分胁迫下,过量施氮会降低小麦的抗旱性^[5]。梁银丽等^[22]也认为在干旱胁迫下少量增施氮肥可以促进小麦根系生长,而过量施氮则会起到抑制作用。本试验发现 N₃W₃、N₂W₃和 N₃W₂水氮组合处理的根系生长参数(根干重、根干质量密度、根长、根长密度、根系直径和根系表面积)均较大,即高氮中水、中氮多水能有效促进根系生长,表现出较强的水氮互作效应。供氮或供水过高并不利于根系生长,这和王淑芬^[30]、薛丽华^[31]等人的研究

一致。

本研究中滴灌量在 3 750 m³·hm⁻²(W₃)、施氮量为 276 kg·hm⁻²(N₃)时,单产最高达 9 966.1 kg·hm⁻²),这与马忠明等^[4]认为 2 850 m³·hm⁻²和 196~207 kg·hm⁻²的水氮供应量及李彦君等^[32]认为 6 000 m³·hm⁻²和 750 kg·hm⁻²的水氮供应量有所不同,这可能是地区间气候、种植及灌水方式等因素不同造成的。

4 结 论

- 1)拔节~孕穗期是滴灌春小麦根系生长速率最快时期,扬花期根系生长各形态指标达最大值,蜡熟期根系衰亡明显。滴灌春小麦根系主要分布在 0~40 cm 土层中,其根干质量占总根干质量的 64.52%~76.90%,根长占总根长的 76.39%~82.47%,0~40 cm 土层中的根质量密度和根长密度是 40~80 cm 土层的 1.9~3.4 倍和 3.4~4.7 倍。
- 2)不同水氮处理显著影响根系生长特性,适当增加水氮供应量能促进根系下扎,增加根系质量和根长,延长根系功能期,但水氮过多对根系生长不利,表现为后期(蜡熟期)根系衰老加速,根长密度、根干质量密度和根系表面积下降。
- 3)水氮对根系生长特征的影响侧重点不同,氮能促进前中期的根长发育及根系下扎,促进根系直径增大,水分能保证后期的根系不早衰。水氮对根系生长的影响存在显著的互作效应,且水分效应高

于氮素效应,以蜡熟期差异明显,表现出一定的累加效应。

4) N_3W_3 、 N_2W_3 和 N_3W_2 处理的产量较高,可见施氮量在 $207\sim 310.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和灌水量在 $4\,500\sim 5\,400\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间是本地区较适宜的水氮组合。根据水、氮组合的产量拟合方程得到施氮量 $310.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、滴灌水量 $4\,593.8\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的产量最高达 $9\,206.05\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可为生产上的水氮运筹提供参考。

参 考 文 献:

[1] 潘晓迪,张颖,邵萌,等.作物根系结构对干旱胁迫的适应性研究进展[J].中国农业科技导报,2017,19(2):51-58.

[2] Skaggs T H, Trout T J, Troutfuss Y. Drip irrigation water distribution patterns: Effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6):1886.

[3] 王冀川,高山,徐雅丽,等.新疆小麦滴灌技术的应用与存在问题[J].节水灌溉,2011,(9):25-29.

[4] 马忠明,陈娟,刘婷婷,等.水氮耦合对固定道垄作栽培春小麦根长密度和产量的影响[J].作物学报,2017,43(11):1705-1714.

[5] 李秧秧,邵明安.小麦根系对水分和氮肥的生理生态反应[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4):383-388.

[6] 张国盛,张仁陟.水分胁迫下氮磷营养对小麦根系发育的影响[J].甘肃农业大学学报,2001,36(2):163-167.

[7] Pandey R K, Maranville J W, Chetima M M. Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment. II. Biomass accumulation, nitrogen uptake and water extraction [J]. European Journal of Agronomy, 2001, 15(2):107-118.

[8] 王冀川,徐雅丽,高山,等.滴灌条件下根区水分对春小麦根系分布特征及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):21-26.

[9] 杨晓青. 不同类型冬小麦品种根系特性及其与 WUE 的关系研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2004.

[10] 邱新强,高阳,黄玲,等.冬小麦根系形态性状及分布[J].中国农业科学,2013,46(11):2211-2219.

[11] Wang C Y, Liu W X, Li Q X, et al. Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions [J]. Field Crops Research, 2014, 165:138-149.

[12] Wang L L, Palta J A, Chen W, et al. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling [J]. Agricultural Water Management, 2018, 197:41-53.

[13] 邱新强,高阳,李新强,等.黄淮平原冬小麦不同品种根系生长差异[J].应用生态学报,2012,23(7):1832-1838.

[14] 王永华,王玉杰,冯伟,等.两种气候年型下不同栽培模式对冬小麦根系时空分布及产量的影响[J].中国农业科学,2012,45(14):2826-2837.

[15] 陈娟,马忠明,吕晓东,等.水氮互作对固定道垄作栽培春小麦根系生长及产量的影响[J].应用生态学报,2016,27(5):1511-1520.

[16] 张伟,李鲁华,吕新.水氮耦合对滴灌春小麦根系时空分布及产量的影响[J].灌溉排水学报,2015,11(34):47-51.

[17] 蒋桂英,魏建军,刘萍,等.滴灌春小麦生长发育与水分利用效率的研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(6):50-54,73.

[18] Xue Q, Zhu Z, Musick J T, et al. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation [J]. Plant and Soil, 2003, 257(1):151-161.

[19] 熊淑萍,吴克远,王小纯,等.不同氮效率基因型小麦根系吸收特性与氮素利用差异的分析[J].中国农业科学,2016,49(12):2267-2279.

[20] 胡凯军,赵桂琴,吴昌顺,等.麦类作物水肥耦合研究进展[J].中国农学通报,2011,27(12):7-12.

[21] Li Q Q, Dong B D, Qiao Y Z, et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10):1676-1682.

[22] 梁银丽,陈培元.水分胁迫和氮素营养对小麦根苗生长及水分利用效率的效应[J].西北植物学报,1995,15(1):21-25.

[23] Malik A I, Colmer T D, Lambers H, et al. Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat [J]. New Phytologist, 2002, 153(2):225-236.

[24] 史正军,樊小林.作物对氮素养分高效吸收的根系形态学研究进展[J].广西农业生物科学,2003,(3):225-229.

[25] 张伟,李鲁华,吕新.不同施氮量对滴灌春小麦根系时空分布、氮素利用率及产量的影响[J].西北农业学报,2016,25(2):195-202.

[26] 李双双,李晶,陈龙涛,等.施氮量对春小麦根系生长及产量的影响[J].麦类作物学报,2013,33(1):141-145.

[27] Forde B, Lorenzo H. The nutritional control of root development [J]. Plant and Soil, 2001, 232(1-2):51-68.

[28] 谢志良,田长彦.膜下滴灌水氮对棉花根系形态和生物量分配变化的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(4):138-143.

[29] 王亚萍,胡正华,张雪松,等.土壤水分胁迫对冬小麦根系分布规律的影响[J].江苏农业科学,2016,44(11):67-71.

[30] 王淑芬,张喜英,裴冬.不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2006,22(2):27-32.

[31] 薛丽华,赵连佳,陈兴武,等.不同水氮运筹对滴灌冬小麦根系生长、水分利用及产量的影响[J].中国农业大学学报,2017,22(9):21-31.

[32] 李彦君,庄丽,徐红军,等.水氮耦合对北疆地区春小麦光合特性及产量的影响[J].新疆农业科学,2013,50(2):204-213.