

夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应

尹飞¹, 王俊忠², 孙笑梅², 李洪岐³, 付国占¹, 裴瑞杰⁴, 焦念元¹

(¹河南科技大学农学院, 河南洛阳 471023; ²河南省土壤肥料站, 郑州 450002; ³河南省农学会, 郑州 450002;

⁴南阳农业职业学院, 河南南阳 473000)

摘要:【目的】根系是玉米吸收氮素营养的主要器官。在大田条件下, 对夏玉米根系生长分布、根系与土壤硝态氮空间吻合度对不同水氮处理的响应, 以及根系与土壤硝态氮空间吻合度指标的有效性进行研究, 用以了解其时空分布及与土壤氮分布的吻合情况对玉米氮素吸收利用的影响。【方法】2011—2015年, 设置不灌水+不施氮(W0N0)、不灌水+300 kg N·hm⁻²(W0N1)、不灌水+360 kg N·hm⁻²(W0N2)、大喇叭口期灌水+不施氮(W1N0)、大喇叭口期灌水+300 kg N·hm⁻²(W1N1)、大喇叭口期灌水+360 kg N·hm⁻²(W1N2)共6个水氮处理。各施氮处理下拔节期施氮30%、大喇叭口期施氮70%。大喇叭口期灌水为750 m³·hm⁻²。在2015年玉米生长季, 分别于玉米拔节期、大喇叭口期、吐丝期、吐丝后20 d和成熟期在玉米种植行和行间采集0—50 cm土体样品(每10 cm一层), 测定夏玉米根长密度、根干重密度、土壤硝态氮含量, 并计算根系与土壤硝态氮空间吻合度。在成熟期采集植株样品, 分析玉米氮素吸收量。【结果】随着玉米生育进程, 种植行和行间0—50 cm土壤剖面夏玉米根长密度、根干重密度和硝态氮含量均表现出先升高后降低的趋势, 根长密度和根干重密度峰值出现在吐丝后20 d, 而土壤硝态氮含量峰值出现在大喇叭口期。在0—360 kg·hm⁻²的范围内, 夏玉米根长密度和吐丝期之前土壤硝态氮含量随施氮量的增加而增加, 但玉米根干重密度和吐丝期之后土壤硝态氮含量先升高后降低, 峰值出现在施氮300 kg·hm⁻²处理。大喇叭口期灌水可以提高夏玉米生育后期根长密度和根干重密度, 但降低了土壤硝态氮含量。随着土层加深, 种植行夏玉米根长密度与土壤硝态氮空间吻合度(RLD1-N)以及根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度(RWD1-N)总体呈降低趋势, 行间夏玉米根长密度与土壤硝态氮空间吻合度(RLD2-N)以及根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度(RWD2-N)总体呈先增加后降低趋势, 峰值出现在10—30 cm土层。随着玉米生育进程, 各土层RLD1-N、RWD1-N和RWD2-N以及0—40 cm土层RLD2-N呈先升高后降低变化趋势。与不施氮处理相比, 施用氮肥提高了RLD1-N、RLD2-N、RWD1-N和RWD2-N。施氮量从300 kg·hm⁻²增加至360 kg·hm⁻²时, 降低了0—30 cm土层RLD2-N、0—20 cm土层RWD1-N以及拔节至吐丝期间RLD1-N和0—20 cm土层RWD2-N, 提高了40—50 cm土层RLD2-N、20—50 cm土层RWD1-N以及吐丝期之后的RLD1-N和RWD2-N。夏玉米种植行和行间根长密度和根干重密度与其硝态氮含量的吻合度与产量极显著正相关, 但与氮素利用效率极显著负相关, 且其相关性优于根长密度和根干重密度与产量及氮素利用效率的相关性。【结论】在大田条件下, 施用氮肥可以提高夏玉米根长密度、根干重密度、土壤硝态氮含量以及夏玉米根系与土壤硝态氮空间吻合度。但施氮量超过300 kg·hm⁻²时会降低夏玉米生育前期上部土层的夏玉米根系与土壤硝态氮空间吻合度。根系与土壤硝态氮空间吻合度可以作为研究夏玉米氮素利用效率的有效指标。

关键词: 玉米; 根长密度; 根干重密度; 土壤硝态氮含量; 空间吻合度

Response of Spatial Concordance Index Between Maize Root and Soil Nitrate Distribution to Water and Nitrogen Treatments

YIN Fei¹, WANG JunZhong², SUN XiaoMei², LI HongQi³, FU GuoZhan¹, PEI RuiJie⁴, JIAO NianYuan¹

收稿日期: 2016-08-05; 接受日期: 2017-02-23

基金项目: 科技部粮食丰产科技工程项目(2013BAD07B07)、河南科技大学学科提升振兴A计划项目(13660002)、河南科技大学博士科研启动基金(09001273)

联系方式: 尹飞, E-mail: feiyin@yeah.net. 通信作者王俊忠, E-mail: wangjz168@vip.sina.com

(¹College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan; ²Soil and Fertilizer Station of Henan Province, Zhengzhou 450002; ³Henan Association of Agricultural Science Societies, Zhengzhou 450002; ⁴Nanyang Vocational College of Agriculture, Nanyang 473000, Henan)

Abstract: 【Objective】 Root is a major organ of maize for the absorption of soil nitrogen nutrition. The spatial concordance index between maize root and soil nitrogen distribution might have an influence on nitrogen uptake and utilization of maize. The purposes of this study were: (1) to analyze the effects of water and nitrogen treatments on maize root distribution and the spatial concordance index between maize root and soil nitrate content; (2) to determine the effectiveness of spatial concordance index between maize root and soil nitrate content. **【Method】** From 2011 to 2015, the experiment was set in six treatments, including W0N0 (0), W0N1 (0+300 kg N·hm⁻²), W0N2 (0+360 kg N·hm⁻²), W1N0 (750 m³·hm⁻²+0), W1N1 (750 m³·hm⁻²+ 300 kg N·hm⁻²), and W1N2 (750 m³·hm⁻²+ 360 kg N·hm⁻²), in which irrigation occurred at spike formation stage, and nitrogen applied at jointing stage (30%N) and spike formation stage (70%N). In maize growing season of 2015, soil samples were collected in and between maize planting lines at jointing, spike formation, silking, 20 days after silking, and mature stage. Root length density (RLD) and root dry weight density (RWD), soil nitrate content, spatial concordance index between root and soil nitrate content, and nitrogen absorption were analyzed. **【Result】** With the development of maize growth process, both in and between the lines of maize, RLD, RWD, and soil nitrate content increased first and then decreased. The maximum values of RLD and RWD occurred in 20 days after silking, and the maximum value of soil nitrate content occurred at spike formation stage. In the range of 0-360 kg·hm⁻², with the increasing of nitrogen application rate, maize RLD and soil nitrate content before silking stage kept increasing. However, maize RWD and soil nitrate content after silking stage increased first and then decreased, and the maximum value occurred in 300 kg·hm⁻² nitrogen application treatment. At the late stage of maize growth, irrigation increased RLD and RWD, but decreased soil nitrate content. With the increasing of soil layer depth, RLD1-N (the spatial concordance index between RLD and soil nitrate content at the maize planting line) and RWD1-N (the spatial concordance index between RWD and soil nitrate content at the maize planting line) showed a decreasing trend, RLD2-N and RWD2-N showed a trend of increasing first and then decreasing, the maximum value occurred in 10-30 cm soil layer. With the development of maize growth process, RLD1-N, RWD1-N, and RWD2-N, and RLD2-N in 0-40 cm soil layer showed a trend of increasing first and then decreasing. Compared with no nitrogen treatment, nitrogen applications significantly increased RLD1-N, RLD2-N, RWD1-N and RWD2-N. When increasing nitrogen from 300 kg·hm⁻² to 360 kg·hm⁻², the RLD2-N of 0-30 cm soil layer, the RWD1-N of 0-20 cm soil layer, the RLD1-N from jointing to silking stage, and the RWD2-N of 0-20 cm soil layer were decreased; and the RLD2-N of 40-50 cm soil layer, the RWD1-N of 20-50 cm soil layer, the RLD1-N and RWD2-N after silking stage were increased. RLD1-N, RLD2-N, RWD1-N, RWD2-N had a remarkable correlation with maize yield and nitrogen use efficiency, which the correlation coefficient was higher than between root length density, root weight density and maize yield, nitrogen use efficiency. **【Conclusion】** Under field conditions, nitrogen fertilizer application increased RLD, RWD, RLD1-N, RLD2-N, RWD1-N and RWD2-N, but decreased RWD, RLD1-N before silking, RWD2-N, RLD2-N and RWD1-N when nitrogen fertilizer application exceeded 300 kg·hm⁻². The spatial concordance index between root and soil nitrate can be a effective index to assess nitrogen use efficiency of maize.

Key words: maize; root length density; root dry weight density; soil nitrate content; spatial concordance index

0 引言

【研究意义】玉米是中国重要的粮食作物、饲料作物和工业原料作物,在保障国家粮食安全方面作用巨大。根系是主要的吸收器官,其生长发育、在土壤中的分布动态关系着作物吸收水肥的能力^[1-2],而根系分布动态与土壤养分、水分分布动态的吻合程度决定着作物水肥的吸收利用。水分和氮肥是影响作物生长发育、产量形成的基本环境因子,适宜的水氮供给关系着作物高产高效。硝态氮是作物重要的氮素营养形

态。因此,研究夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度及其对水氮处理的响应,对于指导夏玉米水氮管理具有重要意义。**【前人研究进展】**前人研究表明随着土层加深玉米根长和根干重递减^[3],随着玉米生育进程,上层土壤玉米根系分布比例下降而下层土壤根系比例增加^[4]。施肥方式可以调控玉米根系生长与分布。漆栋良等^[5]研究表明在玉米行两侧均匀施氮可增加玉米根量,使根系水平分布更均匀,提高0—40 cm土层玉米根长密度,而在玉米行一侧固定施肥增加60—100 cm土层玉米根长密度。宋日等^[6]研究表明垄沟追肥促

使玉米根系向纵深发展,增加中、深层根干重,且施肥越深玉米中、深层根干重增加幅度越大。同时,肥料种类和施用量也影响着玉米根系分布。易镇邪等^[7]研究得出复合肥对夏玉米生育前期根系生长下扎有较大抑制作用。而接触施用控释肥提高了玉米植株周围 10 cm 范围内的根长密度^[8]。低氮水平有利于根系下扎而高氮水平促进根系横向伸展^[9],追施氮肥可以提高 0—40 cm 土层根重,且吐丝期追施氮肥效果较好^[10]。土壤硝态氮是作物重要的氮素来源,同时也是主要的农业面源污染物,其含量及在土壤剖面上的分布受到广泛关注^[11-14]。前人开展了大量关于施氮量^[15-17]、耕作方式^[18]、栽培模式^[19]、水氮耦合^[20-21]等措施对农田土壤硝态氮分布和淋溶影响的研究。【本研究切入点】作物根系与土壤矿质营养在土壤中分布的空间吻合程度关系到作物对肥料的吸收利用以及作物产量的形成。前人虽然在水氮管理对玉米根系生长分布、土壤硝态氮分布和运移等方面做了大量研究,但关于水氮管理对玉米根系与土壤硝态氮空间吻合度方面的研究还鲜见报道。本文提出空间吻合度的概念,作为表示玉米根系与土壤硝态氮在空间分布上吻合程度的量化指标,来探讨水氮处理对根系与土壤硝态氮空间吻合度的影响。【拟解决的关键问题】本研究在大田条件下,研究 6 种水肥处理对夏玉米根系生长分布、根系与土壤硝态氮空间吻合度的影响,明确根系与土壤硝态氮空间吻合度指标在研究作物吸收利用营养元素方面的有效性,以期为玉米氮素高效利用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2011—2015 年玉米生长季,在河南省温县祥云镇国家粮丰工程试验基地进行了水氮试验处理。采用裂区试验设计,水分管理为主区,氮肥管理为副区。足墒播种条件下,水分因素设 2 个水平:不灌水(W0),

大喇叭口期灌水 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (W1)。前期的研究得出试验区中产田推荐施氮量为 $300\text{—}400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[22],因此本研究中氮肥因素设 3 个水平:不施氮(N0),施氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1),施氮 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2)。其中 30%于拔节期沟施,70%于大喇叭口期沟施。试验共计 6 个处理,3 次重复,小区面积 73.2 m^2 ($12 \text{ m} \times 6.1 \text{ m}$)。供试品种为郑单 958,60 cm 等行距种植,株距 22.22 cm,密度 $75\,000 \text{ 株} / \text{hm}^2$ 。拔节期各处理沟施硫酸钾及重过磷酸钙,施用量分别为 K_2O $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 P_2O_5 $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其他管理措施同一般高产田。试验田土壤基础状况见表 1。在连续 5 年定位试验的基础上,于 2015 年玉米生长季采样调查夏玉米根系与土壤硝态氮空间吻合度。6—9 月试验区常年平均降水量 346.6 mm ,2015 年同期降水 330.4 mm (图 1),与常年平均较接近。

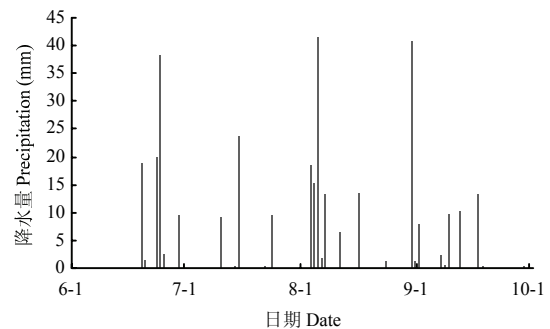


图 1 试验期间降水量

Fig. 1 Precipitation during maize season (2015)

1.2 测定项目与方法

2015 年玉米生长季,分别于拔节期、大喇叭口期、吐丝期、吐丝后 20 d 和成熟期按照 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm 分层挖取土体。先挖取种植行土体:以玉米植株为中心,水平方向上垂直于

表 1 试验田土壤容重、pH 及基础肥力状况

Table 1 Soil bulk density, pH values and the basic index

土层深度 Soil depth (cm)	土壤容重 Soil bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH	土壤有机质 Organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效氮 Available N ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0-10	1.32	8.02	15.90	117.23	24.31	222.07
10-20	1.39	8.16	13.31	102.14	20.60	197.88
20-30	1.52	8.27	10.87	88.97	8.21	152.29
30-40	1.62	8.19	9.43	60.45	6.23	120.37
40-50	1.67	8.30	6.82	36.76	6.05	87.45

玉米种植行土体宽 20 cm，平行于玉米种植行土体长 22.22 cm。然后挖取行间土体：垂直于玉米种植行向行间挖取，长宽与种植行土体相同。采样位置如图 2 所示，每小区设置 3 个采样点。

1.2.1 根长密度和根干重密度 每个土体经过田间分捡后，将根样装入尼龙网，在水中浸泡 30 min，而后用水冲洗干净，挑出杂质和杂根后人工测量根长，然后烘干后称重。计算根长密度和根干重密度。

1.2.2 土壤硝态氮 将每个土体土壤混匀后采集土壤样品，称取 12 g 新鲜土壤样品于 250 mL 的塑料瓶中，加入 100 mL 0.01 mol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 溶液，振荡 1 h，过滤，采用连续流动分析仪 (BRAN+ LUEBBE) 测定土壤硝态氮含量。若不能当天测定，在 4℃ 冰箱中保存。

1.2.3 空间吻合度计算 本文以根密度与土壤硝态氮含量的乘积来计算空间吻合度，具体如下：

种植行根长密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RLD1-N) = 种植行根长密度 × 土壤硝态氮含量；

行间根长密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RLD2-N) = 行间根长密度 × 土壤硝态氮含量；

种植行根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RWD1-N) = 种植行根干重密度 × 土壤硝态氮含量；

行间根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RWD2-N) = 行间根干重密度 × 土壤硝态氮含量。

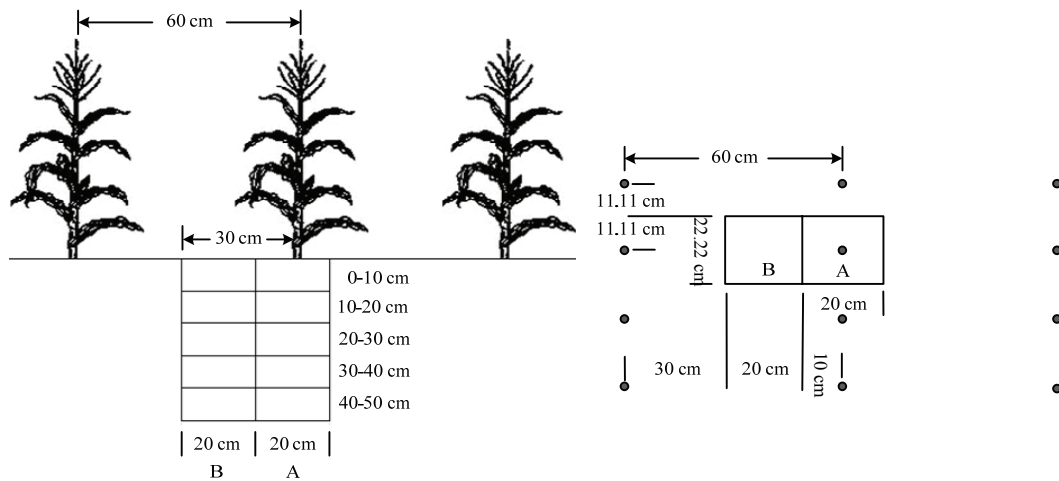
1.2.4 籽粒产量 于成熟期在每个小区中心收获 18 m² (6 m × 3 m) 玉米，果穗风干、脱粒、称质量，得到籽粒产量。

1.2.5 氮素利用效率 于成熟期进行采样，将叶、茎鞘、苞叶、穗轴与籽粒等器官分别装袋，于 105℃ 下杀青 1 h，然后在 80℃ 下烘至恒重。用凯氏定氮法测定各器官含氮量^[23]，计算玉米植株氮积累量。

氮素利用效率 (NUE) = 籽粒产量 / 植株氮积累量。

1.3 试验数据处理

试验数据用 SPSS16.0 进行统计分析，置信水平为 $\alpha=0.05$ 。



黑点表示玉米种植位置。A 和 B 分别表示种植行和行间。下同

Black spot means maize planting site. A and B mean location at the maize planting row and between the maize planting row, respectively. The same as below

图 2 采样位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling locations

2 结果

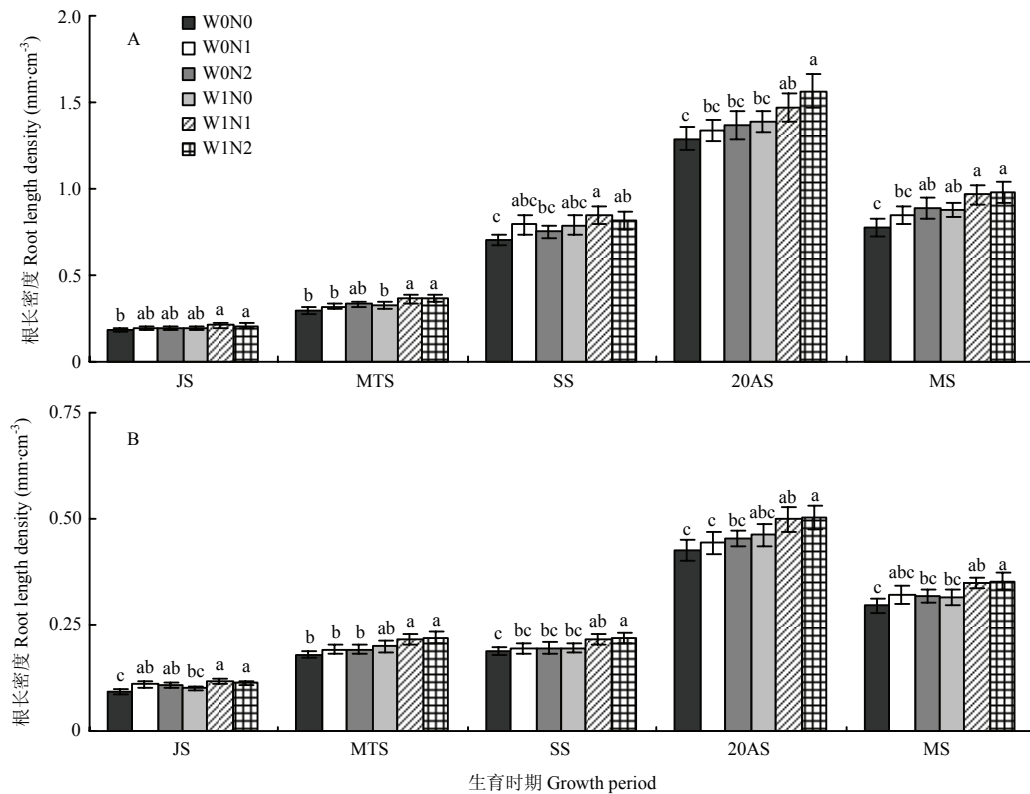
2.1 水氮处理下夏玉米根系空间分布

2.1.1 夏玉米根长密度 随着生育进程，各处理下种植行和行间 0—50 cm 土壤剖面夏玉米根长密度均呈先增加后降低的变化趋势，峰值出现在吐丝后 20 d (图 3)。在 0—360 kg·hm⁻² 的范围内，随着施氮量的增加，

夏玉米根长密度总体呈现增加趋势。与不施氮相比，N1 和 N2 处理下种植行夏玉米根长密度分别比 N0 处理提高了 7.36% 和 9.38%，行间夏玉米根长密度分别提高了 8.13% 和 8.81%。同时，在吐丝后 20 d 和成熟期，N2 处理下种植行和行间夏玉米根长密度显著高于 N0 处理，表明与不施氮相比，施用 360 kg·hm⁻² 的氮肥可以显著提高夏玉米生育后期根长

密度。灌溉可以提高夏玉米种植行和行间根长密度，分别提高了 10.70%和 9.87%。除了成熟期 N1 和 N2 处理下行间根长密度外，在吐丝后 20 d 和成熟期，

各施氮水平灌溉处理下的根长密度均显著高于不灌溉处理，表明进行大喇叭口期灌溉可以增加夏玉米生育后期根长密度。



JS、MTS、SS、20AS 和 MS 分别表示拔节期、大喇叭口期、吐丝期、吐丝后 20 d 和成熟期。同生育时期不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。A 和 B 分别表示种植行和行间。下同

JS, MTS, SS, 20AS, and MS mean jointing stage, male tetrad stage, silking stage, 20 days after silking stage, and maturity stage, respectively. Different lowercase letters in same growth period mean significant difference at the 0.05 level. A and B mean location at the maize planting row and between the maize planting row, respectively. The same as below

图 3 水氮处理下 0—50 cm 土壤剖面夏玉米根长密度

Fig. 3 Maize root length density in 0-50 cm soil profile under different water and nitrogen treatments

2.1.2 夏玉米根干重密度 从图 4 可以看出,随着生育进程,各处理下种植行和行间 0—50 cm 土壤剖面夏玉米根干重密度均呈先增加后降低的变化趋势,峰值出现在吐丝后 20 d。与不施氮相比, N1 和 N2 处理下种植行夏玉米根干重密度分别比 N0 处理提高了 8.10%和 6.58%, 行间夏玉米根干重密度分别提高了 7.50%和 5.96%, 表明施用氮肥可以提高夏玉米根干重密度,但施氮量超过 300 kg·hm⁻² 时根干重密度有降低趋势。灌溉可以提高夏玉米种植行和行间根干重密度,分别提高了 9.89%和 10.59%。

2.2 水氮处理下土壤硝态氮空间分布

从图 5 可以看出,随着玉米生育进程,各处理下

夏玉米种植行和行间 0—50 cm 土壤剖面硝态氮含量均表现出先升高后降低变化趋势,峰值出现在大喇叭口期。在 0—360 kg·hm⁻² 范围内,随着施氮量的增加,吐丝期之前土壤硝态氮含量呈增加趋势,而吐丝后 20 d 和成熟期土壤硝态氮含量呈先增加后降低趋势,峰值出现在 300 kg·hm⁻² 施氮量处理。总体上,与不施氮相比, N1 和 N2 处理下种植行土壤硝态氮含量分别比 N0 处理提高了 16.68%和 15.64%, 行间土壤硝态氮含量分别提高了 15.47%和 14.45%。同时,灌溉处理下土壤硝态氮含量低于不灌溉处理,夏玉米种植行土壤硝态氮含量平均降低 6.23%, 行间土壤硝态氮含量平均降低 6.63%, 但施氮量相同时,不同灌溉水平间差异不显著。

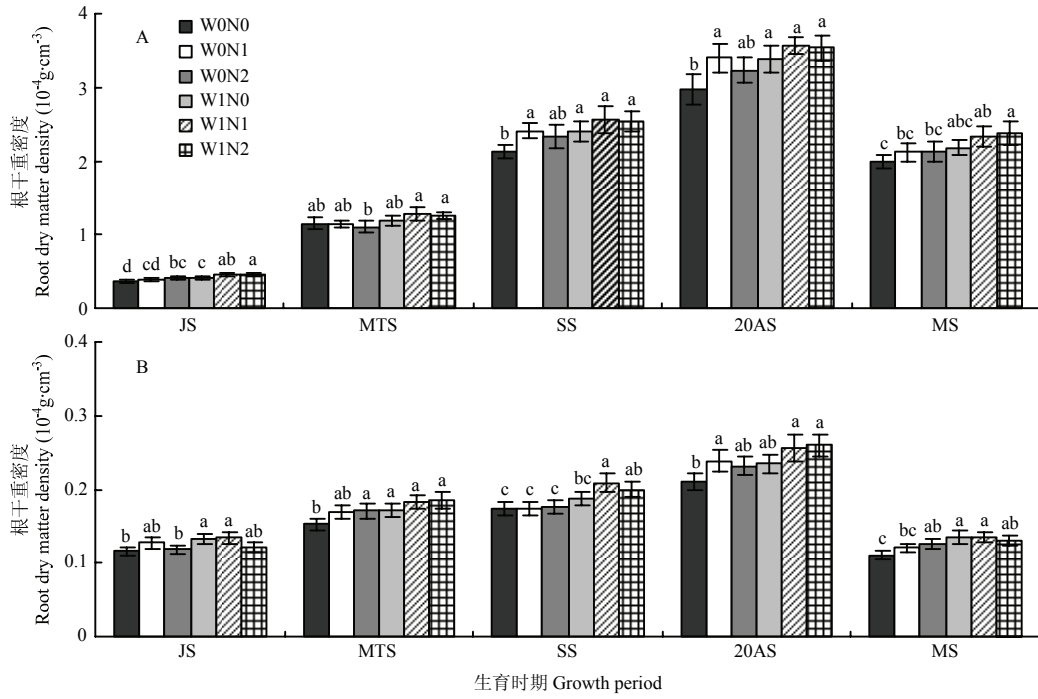


图 4 水氮处理下 0—50 cm 土壤剖面夏玉米根干重密度

Fig. 4 Maize root dry weight density in 0-50 cm soil profile under different water and nitrogen treatments

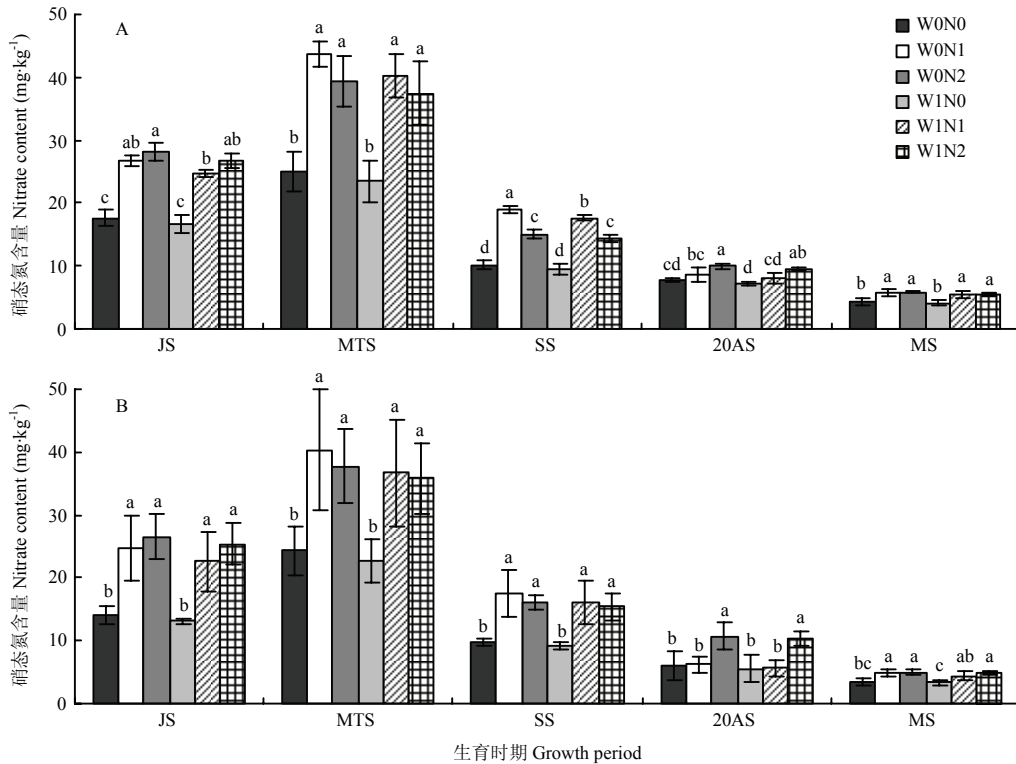


图 5 水氮处理下 0—50 cm 土壤剖面硝态氮含量

Fig. 5 The soil nitrate content in 0-50 cm soil profile under different water and nitrogen treatments

2.3 夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度

2.3.1 种植行根长密度与土壤硝态氮空间吻合度

在0—50 cm土壤剖面中,种植行夏玉米根长密度与土壤硝态氮空间吻合度(RLD1-N)随着土层加深总体呈降低趋势(表2)。随着夏玉米生育进程,各土层RLD1-N总体呈先升高后降低变化趋势,但各土层峰值出现时期不同。0—10 cm峰值出现在吐丝期,10—20 cm不施肥处理峰值出现在吐丝期,施肥处理峰值出现在吐丝后20 d,20—30 cm N0和N1处理峰值出现在大喇叭口期,N2处理峰值出现在吐丝后20 d,30—40 cm和40—50 cm土层峰值出现在大喇叭口期至吐丝期。

除了吐丝后20 d的20—30、40—50 cm和成熟期20—30 cm土层外,与N0相比,N1和N2处理显著提高了RLD1-N,分别提高87.27%和82.01%。在拔节至吐丝期,总体上N1处理RLD1-N高于N2处理,而在吐丝后20 d和成熟期则低于N2处理。大喇叭口期灌溉对RLD1-N影响不明显。

2.3.2 行间根长密度与土壤硝态氮空间吻合度

从表3可以看出,在0—50 cm土壤剖面中,行间夏玉米根长密度与土壤硝态氮空间吻合度(RLD2-N)随着土层加深总体呈先增加后降低趋势,峰值出现在10至30 cm土层。随着夏玉米生育进程,0—40 cm各土层

表2 种植行夏玉米根长密度与土壤硝态氮空间吻合度

Table 2 The spatial concordance index between the density of maize root length and soil nitrate content in the maize planting row

生育时期 Growth period	土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment					
		W0N0	W0N1	W0N2	W1N0	W1N1	W1N2
拔节期 Jointing stage	0-10	4.226c	6.948a	5.705b	4.227c	7.354a	5.763b
	10-20	4.105c	6.790a	4.945b	4.126c	6.678a	5.104b
	20-30	1.310c	3.171b	4.059a	1.466c	3.184b	3.925a
	30-40	2.485bc	2.777b	3.993a	2.271c	2.706b	3.861a
	40-50	0.634b	1.081a	1.014a	0.584b	1.036a	0.980a
大喇叭口期 Male tetrad stage	0-10	8.484b	20.564a	23.717a	8.066b	22.641a	24.188a
	10-20	6.456c	24.634a	17.458b	6.813c	26.314a	18.115b
	20-30	5.264c	15.219a	6.817b	5.806bc	15.244a	6.511b
	30-40	5.425c	5.475c	11.43b	5.307c	5.503c	12.558a
	40-50	3.562b	5.132a	2.932c	3.546b	4.995a	3.306bc
吐丝期 Silking stage	0-10	16.049b	32.184a	29.263a	16.092b	32.326a	29.482a
	10-20	10.350d	14.661c	16.225ab	11.017d	14.844bc	17.139a
	20-30	4.702c	6.846a	6.396a	5.388b	6.403a	6.158a
	30-40	2.520c	7.168a	4.545b	2.578c	7.073a	4.844b
	40-50	2.012c	6.117a	3.029b	2.036c	5.934a	3.348b
吐丝后20 d 20 days after silking stage	0-10	15.871d	28.235c	31.325b	15.404d	29.337bc	34.820a
	10-20	9.203b	23.718a	24.739a	9.513b	23.725a	25.620a
	20-30	5.765c	4.348d	7.595a	6.649b	4.184d	7.446a
	30-40	2.360d	4.274c	5.091b	2.020d	4.333c	5.797a
	40-50	4.745a	3.395bc	3.130c	4.727a	3.559b	3.736b
成熟期 Maturity stage	0-10	8.061c	9.348ab	9.788a	8.486bc	9.943a	10.015a
	10-20	2.655d	11.907b	9.536c	2.821d	12.939a	10.237c
	20-30	4.850b	2.575d	4.264c	5.371a	2.757d	4.279c
	30-40	1.483c	2.002b	2.290a	1.505c	1.983b	2.402a
	40-50	0.844c	1.130b	1.375a	0.890c	1.167b	1.371a

同行数字后不同小写字母表示差异性达显著水平 ($P < 0.05$)。下同

Different small letters in the same row mean significant differences at the 0.05 level. The same as below

表 3 行间夏玉米根长密度与土壤硝态氮空间吻合度

Table 3 The spatial concordance index between the density of maize root length and soil nitrate content among the maize planting rows

生育时期 Growth period	土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment					
		W0N0	W0N1	W0N2	W1N0	W1N1	W1N2
拔节期 Jointing stage	0-10	1.121c	2.204a	1.765b	1.122c	2.273a	1.653b
	10-20	2.620c	4.660a	3.436b	2.683c	4.552a	3.458b
	20-30	1.557c	3.399b	4.326a	1.546c	3.258b	4.203a
	30-40	0.822c	1.241b	1.592a	1.003c	1.107b	1.562a
	40-50	0.419b	0.711a	0.673a	0.390b	0.697a	0.656a
大喇叭口期 Male tetrad stage	0-10	2.239d	7.227a	5.864c	2.370d	6.797ab	6.340bc
	10-20	4.205d	15.184a	9.702c	4.185d	15.638a	11.135b
	20-30	6.504b	18.201a	7.281b	7.111b	17.807a	7.641b
	30-40	4.294c	5.097b	10.684a	5.071b	4.876bc	11.174a
	40-50	1.602cd	1.874b	1.226e	1.472d	2.454a	1.688bc
吐丝期 Silking stage	0-10	1.357d	3.023a	2.505c	1.336d	2.801ab	2.722bc
	10-20	2.898d	4.729ab	3.878c	2.748d	5.125a	4.282bc
	20-30	2.649b	3.180a	3.364a	2.776b	3.209a	3.291a
	30-40	1.443c	3.667a	2.553b	1.421c	3.879a	2.773b
	40-50	1.255c	3.076a	1.582b	1.132c	3.128a	1.693b
吐丝后 20 d 20 days after silking stage	0-10	1.820d	3.932b	3.488c	1.860d	4.319a	3.709bc
	10-20	2.951b	7.836a	7.885a	2.933b	8.048a	8.060a
	20-30	3.540c	2.370d	4.380a	3.935b	2.404d	4.129ab
	30-40	1.790c	3.368b	3.964a	1.545c	3.289b	4.194a
	40-50	4.466a	2.876b	2.940b	4.429a	2.979b	3.315b
成熟期 Maturity stage	0-10	0.826b	0.949a	0.840b	0.822b	0.977a	0.960a
	10-20	1.249c	5.562a	4.122b	1.289c	5.785a	4.359b
	20-30	2.549ab	1.486d	2.352bc	2.663a	1.364d	2.204c
	30-40	1.037c	1.341b	1.554a	1.037c	1.362b	1.676a
	40-50	0.717d	0.970c	1.090b	0.662d	1.002c	1.256a

RLD2-N 总体呈先升高后降低变化趋势, 峰值出现在大喇叭口期。而 40—50 cm 土层则呈波浪形变化, N0 和 N2 处理峰值出现在吐丝后 20 d, N1 处理峰值出现在吐丝期。

除了吐丝后 20 d 的 40—50 cm 和成熟期 20—30 cm 土层外, 与 N0 相比, N1 和 N2 处理显著提高了 RLD2-N, 分别提高 87.47% 和 72.22%。在 0—30 cm 各土层, 除了吐丝后 20 d 的 10—30 cm 土层, N1 处理下 RLD2-N 均显著高于 N2 处理, 提高了 19.01%。而 N2 处理提高了 40—50 cm 土层 RLD2-N, 与 N1 相比, 提高了 18.07%。大喇叭口期灌溉对 RLD2-N 影响不明显。

2.3.3 种植行根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度 从表 4 可以看出, 在 0—50 cm 土壤剖面中, 种植行夏

玉米根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RWD1-N) 随着土层加深总体呈迅速降低趋势。随着夏玉米生育进程, 各土层 RWD1-N 总体呈先升高后降低变化趋势, 但各土层峰值出现时期不同。0—10、20—30 和 30—40 cm 土层的峰值出现在吐丝期, 10—20 cm 不施肥处理峰值出现在吐丝期, 施肥处理峰值出现在吐丝后 20 d, 而 40—50 cm 不施肥处理峰值出现在吐丝后 20 d, 施肥处理峰值出现在吐丝期。

除了吐丝后 20 d 的 40—50 cm 和成熟期 0—10、20—30 cm 土层外, 与 N0 相比, N1 和 N2 处理显著提高了 RWD1-N, 分别提高 100.62% 和 96.11%。与 N2 相比, N1 处理提高了 0—20 cm 土层 RWD1-N, 但降低了 20—50 cm 土层 RWD1-N。大喇叭口期灌溉

表 4 种植行夏玉米根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度

Table 4 The spatial concordance index between the density of maize root dry weight and soil nitrate content in maize planting rows

生育时期 Growth period	土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment					
		W0N0	W0N1	W0N2	W1N0	W1N1	W1N2
拔节期 Jointing stage	0-10	13.921d	23.876b	20.615c	14.390d	26.815a	21.258c
	10-20	4.569d	7.113b	6.184c	4.882d	7.851a	6.239c
	20-30	2.092c	4.458b	6.133a	2.185c	4.251b	6.236a
	30-40	1.388cd	1.516c	2.019b	1.283d	1.941b	2.722a
	40-50	0.847c	1.443b	1.344b	0.775c	1.712a	1.643a
大喇叭口期 Male tetrad stage	0-10	73.825b	181.458a	179.196a	69.440b	193.451a	189.095a
	10-20	6.280c	24.998a	16.902b	6.576c	25.490a	18.072b
	20-30	5.450c	14.653a	6.593b	5.313c	14.145a	6.165bc
	30-40	3.989cd	3.778d	7.831b	4.493c	4.375c	8.926a
	40-50	1.628cd	1.902b	1.728bc	1.482d	2.475a	1.687bcd
吐丝期 Silking stage	0-10	82.516b	168.990a	155.536a	85.741b	166.509a	157.671a
	10-20	14.503c	24.801a	21.735b	15.277c	25.275a	23.126ab
	20-30	4.501b	6.064a	6.579a	5.023b	6.151a	6.217a
	30-40	2.708d	7.416a	4.593c	2.675d	7.560a	5.394b
	40-50	1.142c	3.298a	1.989b	1.224c	3.472a	1.964b
吐丝后 20 d 20 days after silking stage	0-10	69.392b	136.709a	145.452a	72.973b	135.283a	146.216a
	10-20	9.191c	24.487a	22.752b	9.194c	24.330a	25.667a
	20-30	4.049c	3.039d	5.634a	4.826b	3.132d	5.544a
	30-40	1.523c	3.287b	3.975a	1.412c	3.092b	4.086a
	40-50	1.848a	1.292b	1.351b	1.748a	1.405b	1.287b
成熟期 Maturity stage	0-10	41.376ab	44.670ab	44.615ab	41.258b	46.735a	46.458ab
	10-20	4.414c	20.131a	14.239b	4.525c	19.975a	15.355b
	20-30	0.461a	0.248c	0.398b	0.470a	0.218c	0.451a
	30-40	0.714d	0.915c	1.111b	0.688d	0.947c	1.266a
	40-50	0.418c	0.522b	0.631a	0.398c	0.544b	0.621a

对 RWD1-N 影响不明显。

2.3.4 行间根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度
在 0—50 cm 土壤剖面中, 行间夏玉米根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RWD2-N) 随着土层加深总体呈先增加后降低趋势, 峰值出现在 10—30 cm 土层(表 5)。随着夏玉米生育进程, 0—40 cm 各土层 RWD2-N 总体呈先升高后降低变化趋势, 峰值出现在大喇叭口期。而 40—50 cm 土层, N0 处理峰值出现在吐丝后 20 d, N1 和 N2 处理峰值出现在吐丝期。

除了吐丝后 20 d 的 20—30、40—50 cm 和成熟期 20—30 cm 土层外, 与 N0 相比, N1 和 N2 处理显著提高了 RWD2-N, 分别提高 91.32%和 68.45%。总体上看, 与 N1 处理相比, N2 处理降低了拔节至吐丝期 0—20 cm

土层 RWD2-N, 但提高了吐丝后 20 d 和成熟期 RWD2-N。大喇叭口期灌溉对 RWD2-N 影响不明显。

2.4 相关性分析

为了研究夏玉米根长、根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度指标的有效性, 将空间吻合度指标、根长密度、根干重密度与夏玉米产量和氮素利用效率做了相关性分析, 结果见表 6。

从表 6 可以看出, 产量及氮素利用效率与各空间吻合度指标和根系空间分布指标之间的相关性表现一致, 产量均与之呈现显著正相关关系, 氮素利用效率与之均呈现显著负相关关系。同时, 氮素利用效率与根系土壤氮空间吻合度指标之间极显著相关, 相关系数明显高于其与根系空间分布指标的相关系数。

表 5 行间夏玉米根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度

Table 5 The spatial concordance index between the density of maize root dry weight and soil nitrate content among maize planting rows

生育时期 Growth period	土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment					
		W0N0	W0N1	W0N2	W1N0	W1N1	W1N2
拔节期 Jointing stage	0-10	1.005d	1.678b	1.294c	0.912d	1.948a	1.245c
	10-20	3.804b	6.185a	4.055b	3.942b	5.801a	4.051b
	20-30	2.397e	5.405c	6.990a	3.006d	4.904c	6.144b
	30-40	0.549bc	0.611b	0.804a	0.513c	0.547bc	0.790a
	40-50	0.000a	0.000a	0.000a	0.000a	0.000a	0.000a
大喇叭口期 Male tetrad stage	0-10	2.106c	6.294ab	5.851b	2.406c	6.459a	6.232ab
	10-20	3.878c	11.266a	7.754b	2.978c	11.541a	8.104b
	20-30	5.882c	17.14a	8.006b	6.236c	16.471a	7.997b
	30-40	4.031c	4.460c	7.784b	4.357c	4.010c	7.747a
	40-50	1.257c	1.858a	1.608b	1.181c	1.770a	1.498b
吐丝期 Silking stage	0-10	0.871c	1.574b	1.513b	0.811c	1.839a	1.720a
	10-20	2.877d	3.844c	4.621b	2.970d	4.483b	5.191a
	20-30	2.614d	3.473a	3.243ab	2.899cd	3.533ab	3.112bc
	30-40	1.195d	3.075b	2.276c	1.248d	3.400a	2.249c
	40-50	1.323de	2.795b	1.557d	1.241e	3.189a	1.838c
吐丝后 20 d 20 days after silking stage	0-10	0.519d	1.081c	1.448a	0.587d	1.244b	1.389a
	10-20	1.623c	5.098a	4.446b	1.768c	4.741ab	4.742ab
	20-30	2.263b	1.700c	2.767a	2.489b	1.575c	2.930a
	30-40	0.805d	1.450c	1.673b	0.696d	1.471c	1.869a
	40-50	1.873a	1.216b	1.255b	1.746a	1.261b	1.292b
成熟期 Maturity stage	0-10	0.199b	0.260a	0.252a	0.234a	0.247a	0.241a
	10-20	0.595d	2.178b	2.034bc	0.637d	2.588a	1.959c
	20-30	1.061b	0.627d	0.904c	1.333a	0.636d	0.925c
	30-40	0.364c	0.539b	0.635a	0.401c	0.488b	0.611a
	40-50	0.168d	0.284ab	0.308a	0.211c	0.270b	0.307a

表 6 各指标相关性分析

Table 6 The correlation coefficients among indexes

项目 Item	产量 Yield	氮素利用效率 NUE	RLD1-N	RLD2-N	RWD1-N	RWD2-N	RLD1	RLD2	RWD1	RWD2
产量 Yield	1	-0.62**	0.71**	0.66**	0.71**	0.69**	0.69**	0.68**	0.61**	0.58*
氮素利用效率 NUE		1	-0.86**	-0.83**	-0.86**	-0.79**	-0.58*	-0.55*	-0.55*	-0.51*

**表示相关性在 0.01 水平显著；*表示相关性在 0.05 水平显著

**：Correlation is significant at the 0.01 level. *：Correlation is significant at the 0.05 level

3 讨论

3.1 根长密度与根干重密度对水氮处理的响应

玉米根系在土壤中的分布受土壤物理特性^[24-25]、化学特性^[26-27]等诸多因素影响。本研究表明大喇叭口

期灌水可以提高夏玉米生育后期根长密度和根干重密度。同时随着施氮量增加，夏玉米根长密度不断增加，但玉米根干重密度先升高后降低，峰值出现在施氮 300 kg·hm⁻² 处理。这表明适宜施用氮肥有利于夏玉米根长生长发育，而过量施氮则会影响根系生长。武荣

等^[28]在小麦上研究也得出类似结论。

3.2 土壤硝态氮含量对水氮处理的响应

在非淹水条件下, 氮肥进入土壤后经硝化作用转化为硝态氮, 同时硝态氮水溶性高易随水迁移, 所以水氮处理对土壤硝态氮含量有明显的影 响。大量研究表明, 土壤剖面硝态氮含量随施氮量增加而增加^[20, 29-31]。本研究表明随着施氮量增加, 吐丝期之后土壤硝态氮含量先升高后降低。这可能是因为本试验在拔节与大喇叭口期施用氮肥, 较高的施氮量促进了玉米生长和对土壤硝态氮的吸收利用所致。大喇叭口期灌水一方面可能促进了土壤硝态氮淋溶, 另一方面提高了夏玉米根长密度和根干重密度, 促进了对氮的吸收, 使得夏玉米生育后期土壤硝态氮含量低于不灌水处理, 这与前人研究结果一致^[20-21]。

3.3 夏玉米根系与土壤硝态氮空间吻合度对水氮处理的响应

根系具有一定向水性和向肥性^[32], 其生长与分布对土壤水分和肥力状况有一定响应, 但这种响应也存在一定限度。而作物根系吸收的矿质营养主要来自于根际及其周围的土壤^[33], 所以根系吸收养分的能力一方面取决于根系的数量和分布, 另一方面也取决于根系分布与土壤矿质养分分布的空间吻合程度。施用氮肥能促进作物对氮素的吸收, 提高玉米产量^[34], 但过量的氮肥施用及灌溉会造成部分硝态氮淋溶^[35], 导致玉米吸氮量降低, 无益于产量的提高^[31]。其中一个重要原因就在于肥料分布范围超出了作物根系的分布及吸收范围, 造成两者空间分布上的不一致。根系与土壤硝态氮空间吻合度可以同时表征这两方面特征, 能更好地反映玉米对肥料的吸收能力, 该指标与玉米产量及氮素利用效率的相关系数也说明了这一点, 其可作为研究夏玉米氮素利用效率的有效指标。

本研究中根系与土壤硝态氮空间吻合度对大喇叭口期灌水响应不明显, 一方面可能是因为灌水增加了根长密度和根干重密度, 但同时降低了土壤硝态氮含量所致。另一方面也可能由于在平水年份, 仅大喇叭口期灌水不足以引起根系与土壤硝态氮空间吻合度的大幅度变化。可以在防水棚中进一步试验进行研究。

4 结 论

在大田条件下, 进行水氮处理明显促进了夏玉米根系生长, 可以提高夏玉米根长密度和根干重密度。施用氮肥提高了土壤硝态氮含量以及种植行根长密度

与土壤硝态氮空间吻合度 (RLD1-N)、行间根长密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RLD2-N)、种植行根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RWD1-N) 和行间根干重密度与土壤硝态氮空间吻合度 (RWD2-N)。但施氮量超过 300 kg·hm⁻² 时, 夏玉米根干重密度、吐丝期之前 RLD1-N、上部土层的 RWD2-N、RLD2-N 和 RWD1-N 会降低, 300 kg·hm⁻² 的施氮量更有利于兼顾夏玉米产量和氮素利用效率。大喇叭口期灌水降低了土壤硝态氮含量, 但在平水年对 RLD1-N、RLD2-N、RWD1-N 和 RWD2-N 作用不明显。根系与土壤硝态氮空间吻合度可以作为研究夏玉米氮素利用效率的有效指标。

References

- [1] 慕自新, 张岁岐, 郝文芳, 梁爱华, 梁宗锁. 玉米根系形态和空间分布对水分利用效率的调控. 生态学报, 2005, 25(11): 2895-2900.
MU Z X, ZHANG S Q, HAO W F, LIANG A H, LIANG Z S. The effect of root morphological traits and spatial distribution on WUE in maize. *Acta Ecologica Science*, 2005, 25(11): 2895-2900. (in Chinese)
- [2] EHDAIE B, MERHAUNT D J, AHMADIAN S. Root system size influences water-nutrient uptake and nitrate leaching potential in wheat. *Agronomy & Crop Science*, 2010, 196(6): 455-466.
- [3] 刘晶淼, 安顺清, 廖荣伟, 任三学, 梁宏. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 517-521.
LIU J M, AN S Q, LIAO R W, REN S X, LIANG H. Temporal variation and spatial distribution of the root system of corn in a soil profile. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 517-521. (in Chinese)
- [4] 张礼军, 张恩和, 郭丽琢, 黄高宝. 水肥耦合对小麦/玉米系统根系分布及吸收活力的调控. 草业学报, 2005, 14(2): 102-108.
ZHANG L J, ZHANG E H, GUO L Z, HUANG G B. Regulation of water-fertilizer coupling on root distribution and absorbing ability in *Triticum aestivum-Zea mays* intercrop system. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(2): 102-108. (in Chinese)
- [5] 漆栋良, 吴雪, 胡田田. 施氮方式对玉米根系生长、产量和氮素利用的影响. 中国农业科学, 2014, 47(14): 2804-2813.
QI D L, WU X, HU T T. Effects of nitrogen supply methods on root growth, yield and nitrogen use of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(14): 2804-2813. (in Chinese)
- [6] 宋日, 吴春胜, 赵立华, 吴桂淑. 施肥方式对玉米根系分布及产量的影响. 玉米科学, 2001, 9(4): 75-76.
SONG R, WU C S, ZHAO L H, WU G S. Effect of fertilizer application methods on root system distribution and yield in maize.

- Journal of Maize Sciences*, 2001, 9(4): 75-76. (in Chinese)
- [7] 易镇邪, 王璞, 屠乃美. 夏播玉米根系分布与含氮量对氮肥类型与施氮量的响应. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 91-98.
YI Z X, WANG P, TU N M. Responses of roots distribution and nitrogen content of summer maize to nitrogen fertilization types and amounts. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 91-98. (in Chinese)
- [8] 杨俊刚, 倪小会, 徐凯, 许俊香, 曹兵, 刘宝存. 接触施用包膜控释肥对玉米产量、根系分布和土壤残留无机氮的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 924-930.
YANG J G, NI X H, XU K, XU J X, CAO B, LIU B C. Effects of co-situs application of polymer-coated fertilizers on grain yield, root distribution and soil residual N_{min} in summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 924-930. (in Chinese)
- [9] 王艳, 米国华, 张福锁. 氮对不同基因型玉米根系形态变化的影响研究. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 69-71.
WANG Y, MI G H, ZHANG F S. Effect of nitrate levels on dynamic changes of root morphology in different maize inbred lines. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 69-71. (in Chinese)
- [10] 王启现, 王璞, 杨相勇, 翟志席, 王秀玲, 申丽霞. 不同施氮时期对玉米根系分布及其活性的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(12): 1469-1475.
WANG Q X, WANG P, YANG X Y, ZHAI Z X, WANG X L, SHEN L X. Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize (*Zea mays* L.). *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1469-1475. (in Chinese)
- [11] HENNING H J, BEA N, STIG M T. Productivity and quality, competition and facilitation of chicory in ryegrass/legume-based pastures under various nitrogen supply levels. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(3): 247-256.
- [12] READ J J, REDDY K R, JENKINS J N. Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(3): 282-290.
- [13] MISHRA S, DEEDS N, RUSKAUFF G. Global sensitivity analysis techniques for probabilistic ground water modeling. *Ground Water*, 2009, 47(5): 730-747.
- [14] SPALDING R F, WALTTS D G, SCHEPERS J S, BURBACH M E, EXNER M E, POREDA R J, MANIN G E. Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(4): 1184-1194.
- [15] 刘瑞, 周建斌, 崔亚胜, 王天泰. 不同施氮量下夏玉米田土壤剖面硝态氮累积及其与土壤氮素平衡的关系. *西北农林科技大学学报* (自然科学版), 2014, 42(2): 193-198.
LIU R, ZHOU J B, CUI Y S, WANG T T. Accumulation of NO_3^- -N in soil profile and its relationship with nitrogen balance in summer maize field with different nitrogen application rates. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(2): 193-198. (in Chinese)
- [16] 茹淑华, 耿暖, 张国印, 王凌, 孙世友. 施用氮肥对太行山前平原区作物产量和土壤硝态氮残留量的影响. *华北农学报*, 2015, 30(5): 161-166.
RU S H, GENG N, ZHANG G Y, WANG L, SUN S Y. Effect of nitrogen application rate on crop yield and the soil nitrate nitrogen content in Taihang piedmont area. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(5): 161-166. (in Chinese)
- [17] 冯波, 孔令安, 张宾, 司纪升, 李升东, 王法宏. 施氮量对茎秆小麦氮肥利用率和土壤硝态氮含量的影响. *作物学报*, 2012, 38(6): 1107-1114.
FENG B, KONG L A, ZHANG B, SI J S, LI S D, WANG F H. Effect of nitrogen application level on nitrogen use efficiency in wheat and soil nitrate-N content under bed planting condition. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(6): 1107-1114. (in Chinese)
- [18] 王激清, 韩宝文, 刘社平. 施氮量和耕作方式对春玉米产量和土壤硝态氮累积的影响. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2): 129-135.
WANG J Q, HAN B W, LIU S P. Effects of nitrogen application rates and soil tillage modes on yield of spring maize and NO_3^- -N accumulation in soil profile. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 129-135. (in Chinese)
- [19] 张宏, 周建斌, 王春阳, 董放, 李凤娟. 不同栽培模式及施氮对玉米-小麦轮作体系土壤肥力及硝态氮累积的影响. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 693-697.
ZHANG H, ZHOU J B, WANG C Y, DONG F, LI F J. Effect of cultivation pattern and nitrogen application rate on soil fertility and nitrate accumulation under maize-wheat rotation system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 693-697. (in Chinese)
- [20] 薛亮, 马忠明, 杜少平. 水氮耦合对绿洲灌区土壤硝态氮运移及甜瓜氮素吸收的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 139-147
XUE L, MA Z M, DU S P. Effect of water and nitrogen coupling on soil nitrate movement and nitrogen uptake of muskmelon. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1): 139-147. (in Chinese)
- [21] 杜军, 杨培岭, 李云开, 任树梅, 王永忠, 李仙岳, 杜静, 张建国, 贺新. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 57-64.
DU J, YANG P L, LI Y K, REN S M, WANG Y Z, LI X Y, DU J, ZHANG J G, HE X. Influence of the irrigation, fertilization and groundwater depth on wheat yield and nitrate nitrogen leaching.

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 57-64. (in Chinese)
- [22] 王俊忠, 黄高宝, 张超男, 杨亚军, 赵会杰, 朱晓燕, 马培芳. 施氮量对不同肥力水平下夏玉米碳氮代谢及氮素利用率的影响. *生态学报*, 2009, 29(4): 2045-2052.
- WANG J Z, HUANG G B, ZHANG C N, YANG Y J, ZHAO H J, ZHU X Y, MA P F. Influence of nitrogen fertilizer rate on carbon-nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize under high and medium yield levels. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2045-2052. (in Chinese)
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-268.
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis (3rd edition)*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 264-268. (in Chinese)
- [24] 李潮海, 李胜利, 王群, 侯松, 荆棘. 不同质地土壤对玉米根系生长动态的影响. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1334-1340.
- LI C H, LI S L, WANG Q, HOU S, JING J. Effect of different textural soils on root dynamic growth in corn. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(9): 1334-1340. (in Chinese)
- [25] GRANT J C, NICHOLS J D, YAO R L, SMITH R G B, BRENNAN P D, VANCLAY J K. Depth distribution of roots of *Eucalyptus dunnii* and *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* in different soil conditions. *Forest Ecology and Management*, 2012, 269(2): 249-258
- [26] VAMERALI T, SACCOMANI M, BONA S, MOSCA G, GUARISE M, GANIS A. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids. *Plant and Soil*, 2003, 255(1): 157-167.
- [27] 李秧秧, 刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1): 13-15.
- LI Y Y, LIU W Z. Effects of soil moisture and nitrogen fertilizer on root growth of corn. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1): 13-15. (in Chinese)
- [28] 武荣, 李援农. 水氮耦合对冬小麦根系分布和根冠比及产量的影响. *南方农业学报*, 2013, 44(6): 963-967.
- WU R, LI Y N. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on root distribution, root/shoot ratio and yield of winter wheat. *Journal of Southern Agriculture*, 2013, 44(6): 963-967. (in Chinese)
- [29] 杨蕊菊, 柴守玺, 马忠明. 施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响. *生态学报*, 2012, 32(24): 7905-7912.
- YANG R J, CHAI S X, MA Z M. Dynamic changes of soil moisture and nitrate nitrogen in wheat and maize intercropping field under different nitrogen supply. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7905-7912. (in Chinese)
- [30] 高亚军, 李生秀, 李世清, 田霄鸿, 王朝辉, 郑险峰, 杜建军. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 61-64.
- GAO Y J, LI S X, LI S Q, TIAN X H, WANG Z H, ZHENG X F, DU J J. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 61-64. (in Chinese)
- [31] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 谢英荷, 张璐, 邓树元, 单杰, 李云刚. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1358-1365.
- LI L, HONG J P, WANG H T, XIE Y H, ZHANG L, DENG S Y, SHAN J, LI Y G. Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use deficiency in summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1358-1365. (in Chinese)
- [32] LIANG B M, SHARP R E, BASKIN T I. Regulation of growth anisotropy in well-watered and water-stressed maize roots. I. Spatial distribution of longitudinal, radial, and tangential expansion rates. *Plant Physiology*, 1997, 115(1): 101-111.
- [33] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 36-46.
- YANG J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 36-46. (in Chinese)
- [34] 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量-土壤硝态氮和氮平衡的影响. *生态学报*, 2003, 29(30): 1459-1469.
- YANG R, SU Y Z. Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in middle of Heihe River Basin. *Acta Ecologica Science*, 2003, 29(30): 1459-1469. (in Chinese)
- [35] DAI J, WANG Z H, LI M H, HE G, LI Q, CAO H B, WANG S, GAO Y J, HUI X L. Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: Long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China. *Field Crops Research*, 2016, 196: 180-190.

(责任编辑 杨鑫浩)