

局部湿润方式下玉米对不同根区氮素的吸收与分配

胡田田¹, 康绍忠^{1,2*}, 李志军¹, 张富仓¹

(1 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要:采用分根装置,对均匀灌水、固定灌水和交替灌水3种方式下,于1/2根区设施¹⁵NH₄)₂SO₄的处理;另1/2根区施入等量的(¹⁴NH₄)₂SO₄,研究玉米不同根区氮素的吸收与分配特征。结果表明,处理15、20、40 d时,玉米累积¹⁵N肥料氮量表现为:固定灌水下¹⁵N施在灌水区分别是非灌水区的2.37、2.95和3.41倍;交替灌水下¹⁵N施在先灌水区是后灌水区的1.57、1.08和1.06倍。作物自不同根区土壤或肥料吸收氮素占总吸氮量的百分数表明,交替灌水时,不同根区有同等贡献;固定灌水时,作物吸收的氮素绝大部分来自灌水区。根系的氮素吸收速率和根长均表现为,交替灌水两根区趋于相同;固定灌水的非灌水区明显小于灌水区,表明吸收速率和根长对作物吸收氮素都有重要作用。处理40 d时,玉米各部分累积¹⁵N肥料氮占根区总吸收量百分数为地上部:均匀灌水>交替灌水>固定灌水;¹⁴N区根系:¹⁵N施在固定灌水的非灌水区>其他4个处理;¹⁵N区根系:¹⁵N施在固定灌水的灌水区>固定灌水的非灌水区 and 交替灌水任一根区>均匀灌水。说明局部供水使根系的氮素分配明显增多,地上部减少;两种局部灌水所不同的是,固定灌水时,氮素向灌水区根系的分配大于非灌水区,交替灌水时,两根区相近。

关键词:局部湿润方式;不同根区;氮素;吸收与分配;¹⁵N肥料

中图分类号:S274.1;S124+.2

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2009)01-0105-09

Uptake and allocation of nitrogen from different root zones of maize under local irrigation

HU Tian-tian¹, KANG Shao-zhong^{1,2*}, LI Zhi-jun¹, ZHANG Fu-cang¹

(1 Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area of Ministry of Education, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yanglin, Shaanxi 712100, China;

2 The Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Effects of partial root-zone irrigation on uptake and allocation of nitrogen from different root zones of maize grown in split-root containers were studied. Maize was irrigated on both halves of the container (conventional irrigation, C), on one side only (fixed partial root-zone irrigation, F), or alternatively on both sides (alternative partial root-zone irrigation, A). Isotope-labelled ¹⁵N-(NH₄)₂SO₄ was applied to one half of the pot with (¹⁴NH₄)₂SO₄ to the other half so that N inflow could be tracked. Results showed that in the day 15, 20, 40, the ratios of N uptake from ¹⁵N-fertilizer applied in the irrigated root zone (Fw) to that from the non-irrigated zone (Fd) of F treatment were 2.37, 2.95 and 3.41, respectively. For A treatment, the ratios of N uptake from ¹⁵N-fertilizer applied in the early irrigated zone (Ae) to that from the late irrigated zone (Al) were 1.57, 1.08 and 1.06, respectively. The percentages of plant N absorbed from soil or fertilizer in different root zones to total N uptake for three irrigation methods also indicated that the amount of N absorption from two root zones of A treatment was equal whereas for F treatment, the N accumulation in plant was mainly from

收稿日期:2008-01-15 接受日期:2008-09-03

基金项目:教育部创新团队计划项目(IRT0657);陕西省自然科学基金项目(2006C106);西北农林科技大学科研专项基金资助。

作者简介:胡田田(1966—),女,陕西礼泉人,博士,主要从事植物对水分养分局部供应的适应性及其机理研究。

Tel: 029-87091602, E-mail: hutiantian@tom.com. * 通讯作者 E-mail: kangshaozhong@tom.com

the irrigated root zone. Considering the fact that root N inflow and root length in the irrigated zone were larger than those of the non-irrigated zone for F treatment, it could be concluded that both of root length and N absorption capacity contribute to plant N uptake largely. At 40 day, the percentage of ^{15}N - fertilizer N allocation in shoot to total accumulation for A treatment was higher than that for F treatment but lower than that for C. The ^{15}N allocation percentage of the subroot supplied with ^{14}N - fertilizer was higher for Fd than for the others. The ^{15}N allocation percentage of the subroot supplied with ^{15}N - fertilizer was higher for Fd, Al and Ae than for C treatment but lower than for Fw. Our results suggest that partial root-zone irrigation increased N allocation in root system but decreased N allocation in shoot. However, for A treatment, N allocation in two subroots was equal but for F treatment, N allocation of the subroot in the irrigated zone was higher than that of the non-irrigated zone.

Key words : partial root-zone irrigation ; different root zones ; nitrogen ; uptake and allocation ; ^{15}N - fertilizer

近年来,随着水资源问题的日显突出,研究者相继提出了根系分区交替灌水等一些新的节水灌溉方法与技术,受到了广泛关注,并取得了明显的节水效益^[1-6]。局部灌溉技术与传统灌溉方法的区别在于对作物根区的湿润状况不同,整个根系不再处于均一环境,而是处在非均一且多变的土壤环境中,这势必影响作物对养分的吸收利用。氮素是作物需要量大且吸收利用与水分供应联系紧密的营养元素,农田水肥资源短缺与水肥利用率低造成的资源浪费与环境污染问题普遍并存。因此,如何提高水分和氮素的综合利用效率倍受关注。然而,关于局部灌水条件下作物氮素吸收利用的研究尚不多见,其不同根区氮素吸收分配方面的研究更少。为此,采用传统均匀灌水、固定部分根区灌水和根系分区交替灌水3种方式,将 ^{15}N 标记的 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 施入盆栽玉米的1/2根区,另1/2根区施入等量的普通 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (即 $^{14}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,研究不同根区氮素吸收与分配的动态变化,揭示根区局部湿润方式对氮素吸收利用的影响,以期在水氮综合高效利用与调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试作物为玉米(陕丹9号)。供试土壤为土前茬红薯。基础肥力为有机质 16.88 g/kg,全氮 0.98 g/kg,碱解氮 69.8 mg/kg,速效磷 15.07 mg/kg,速效钾 163 mg/kg。

采用红色塑料桶自制分根装置,进行盆栽实验。用塑料胶带将厚塑料布固定在桶壁和桶底上,将桶均等地分为2个半室,两边装入事先施入 KH_2PO_4 0.123 g/kg的等量土壤,每盆装土 12 kg。底部铺一层厚约 3 cm 的砂子。装土时,两侧各插一根 $\varphi 2$ cm PVC管用于灌水。管上打3行 $\varphi 5$ mm的小孔用于渗

水,每行6个。该管用两层窗纱包裹,以防土壤堵塞渗水孔。管子底部用胶带封口,胶带上扎7个小孔用于渗水。将已催芽的种子播在塑料桶中央分根装置的正上方,每盆3棵,全部留苗。同时,两边灌入等量水分使土壤充分均匀湿润。

1.2 试验设计

在根系分区交替灌水(Alternate partial root-zone irrigation,用A表示)、固定1/2根区灌水(Fixed partial root-zone irrigation,用F表示)和传统均匀灌水(Conventional irrigation,用C表示)3种灌水方式下,两个1/2根区分别施入等量的 $(^{14}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (^{15}N 丰度为10.273%),构成以下5个处理: ^{15}N 肥料施在均匀灌水的一个1/2根区(^{15}N fertilizer applied to one of two root zones of C,用Cf表示); ^{15}N 肥料施在固定灌水的非灌水区(^{15}N fertilizer applied to the non-irrigated zone of F,用Fd表示); ^{15}N 肥料施在固定灌水的灌水区(^{15}N fertilizer applied to the irrigated zone of F,用Fw表示); ^{15}N 肥料施在交替灌水的后灌水区(^{15}N fertilizer applied to the late irrigated zone of A,用Al表示); ^{15}N 肥料施在交替灌水的先灌水区(^{15}N fertilizer applied to the early irrigated zone of A,用Ae表示)。重复3次。出苗后36 d,将相应的硫酸铵肥料溶解于水中,随灌水施入土壤,施氮量按N 0.2 g/kg。待含水量降至控制下限时,开始灌水处理。同时采集3盆玉米收集处理开始前的有关资料。

试验持续40 d,10 d为一个处理阶段。其中根系分区交替灌水,每处理10 d交替1次。交替之前,维持土壤湿润区域不变。土壤含水量控制在田间持水量的65%~95%。根据最先达到或接近控制下限的灌水根区确定灌水时间,各处理灌水时间相同。灌水量按时域反射仪(TDR)实测的土壤含水量与控制上限进行计算。该水量经漏斗通过灌水管灌

入, 水分保持自然入渗。处理 40 d 时, 与均匀灌水相比, 固定灌水、交替灌水的灌水量分别减少 32.99% 和 29.54%。

1.3 测定项目及方法

分别于第 1 次交替前和交替后 5、10 d 以及第 3 次交替后 10 d (即试验结束时), 收获地上部后, 将根系分不同根区小心地从土壤中冲洗出来, 测定两个 1/2 根区根系及地上部的干物质重、含氮量和 ^{15}N 丰度。

样品用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{CuSO}_4$ 混合催化剂消解凯氏法定氮。定氮后的样品, 加 6 mol/L H_2SO_4 酸化后, 在 100℃ 水浴上浓缩至 2~3 mL。用美国产 Finnigan MAT 251 型同位素质谱计, 采用单路双束测量方式测定其中的 ^{15}N 丰度(在南京土壤研究所测定)。

根系样品经扫描后, 用 CI-400 型根系图像分析系统测定根系的长度, 再折算为整个根区的根长。

1.4 根系氮素吸收速率 (Inflow) 的计算

根系的平均氮素吸收速率 $[I] (\mu\text{g}/(\text{m} \cdot \text{d})) = (1/L) \times (\Delta N/\Delta t)$

式中, L 是根系的总长度 (m); ΔN 是某时间段的吸氮量 (μg); Δt 是计算的时间段 (d)。^[7]

试验数据用 SPSS 统计分析软件进行方差分析与多重比较。方差分析用 One-way ANOVA, 多重比较用 Duncan 法进行。

2 结果与分析

2.1 玉米对各根区氮素的吸收

2.1.1 标记肥料氮累积量 不同灌水方式下, ($^{15}\text{NH}_4$)₂SO₄ 施在各根区时的累积动态(图 1)表明, 施在固定灌水的灌水区与均匀灌水变化一致, 即玉米对 ^{15}N 标记肥料氮的累积量随时间推移快速增加; 施在非灌水区时, 累积量缓慢增加。而且, 从灌水区吸收累积的总量始终显著大于非灌水区。处理 5~15 d, 施在交替灌水先灌水区的累积量明显大于后灌水区, 且随时间延长, 二者间的差距在第 1 次交替前逐渐增大, 之后则趋于缩小; 处理 20 d 以后, 二者变化一致, 其累积量也没有显著差异。处理 40 d 时, 玉米对施在不同根区 ^{15}N 的累积量表现出: 均匀灌水和固定灌水的灌水区 > 交替灌水的任一根区 > 固定灌水的非灌水区。说明作物对不同根区氮素的吸收情况与根区湿润方式关系密切。固定灌水时, 灌水区氮素的吸收远远大于非灌水区; 交替灌水条件下, 不同根区养分的吸收利用随时间延长趋于均衡。

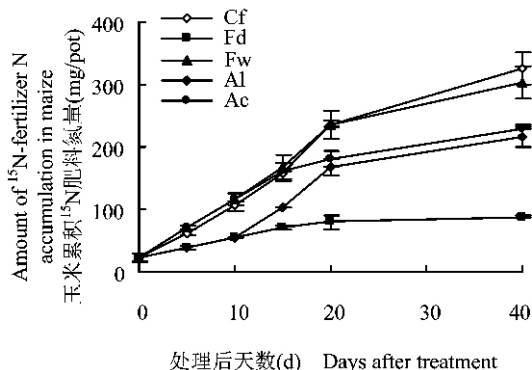


图 1 各处理累积 ^{15}N 标记肥料氮量的动态变化

Fig. 1 Time course of N accumulation from ^{15}N -fertilizer in maize for all treatments

(C, A 和 F 分别代表均匀灌水、交替灌水和固定灌水; C, A and F represent conventional irrigation, alternate partial root-zone irrigation and fixed partial root-zone irrigation, respectively. Cf— ^{15}N 肥料施在均匀灌水的 1/2 根区 ^{15}N fertilizer applied to one of two root zones of C; Fd— ^{15}N 肥料施在固定灌水的非灌水区 ^{15}N fertilizer applied to the non-irrigated zone of F; Fw— ^{15}N 肥料施在固定灌水的灌水区 ^{15}N fertilizer applied to the irrigated zone of F; Al— ^{15}N 肥料施在交替灌水的后灌水区 ^{15}N fertilizer applied to the late irrigated zone of A; Ae—肥料 ^{15}N 施在交替灌水的先灌水区 ^{15}N fertilizer applied to the early irrigated zone of A; 下同 The same below.)

2.1.2 玉米各部分的 ^{15}N 原子百分超 图 2 表明, 固定灌水条件下, 随处理时间延长, ^{15}N 标记肥料施在非灌水区时玉米各部分的 ^{15}N 原子百分超变化缓慢, 而 ^{15}N 施在灌水区时快速增大。同一时期, 玉米两根区根系及地上部的 ^{15}N 原子百分超总是 ^{15}N 施在灌水区大于施在非灌水区, 且二者间的差距随时间延长增大; 而且 40 d 时, ^{15}N 施在灌水区时对应的另一半根区 (^{14}N 根区) 根系的 ^{15}N 原子百分超还大于施 ^{15}N 的非灌水区根系。说明固定灌水条件下, 玉米从灌水区吸收的氮素明显大于非灌水区, 所吸收的氮素向其他组织器官的迁移分配也以灌水区明显大于非灌水区。

交替灌水条件下, 玉米各部分的 ^{15}N 原子百分超因 ^{15}N 肥料施用位置及处理时间的不同而不同(图 3)。处理前期, ^{15}N 施在先灌边时, 施 ^{15}N 边根系、地上部以及施 ^{14}N 边根系的 ^{15}N 原子百分超大于施在后灌边的相应各部分。随处理时间延长, ^{15}N 施在先灌边与后灌边玉米相应各部分 ^{15}N 原子百分超之间的差距不断缩小, 到处理 20 d 以后, 两两趋于相同。说明交替灌水条件下, 随时间推移, 玉米对不同根区氮素的吸收趋于均衡, 两根区对玉米各部分氮素累积的贡献接近。

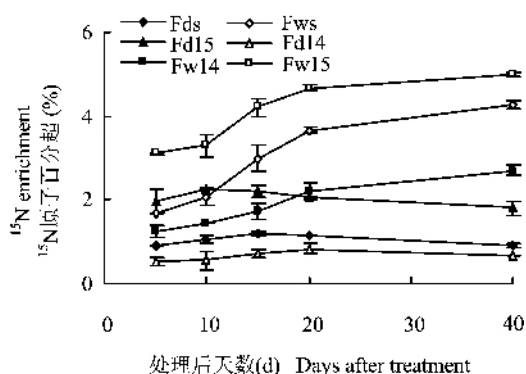


图2 固定灌水玉米各部分¹⁵N原子百分超的动态变化

Fig.2 Time course of ¹⁵N enrichment in different maize parts for F

[Fds : Fd的地上部 Shoot for Fd ; Fws : Fw的地上部 Shoot for Fw ; Fd14、Fd15、Fw14、Fw15 : 分别表示 Fd、Fw 施用(¹⁴NH₄)₂SO₄和(¹⁵NH₄)₂SO₄的1/2根区根系 Means the subroot supplied with (¹⁴NH₄)₂SO₄ or (¹⁵NH₄)₂SO₄ for Fd、Fw , respectively ;下同 The same as below.]

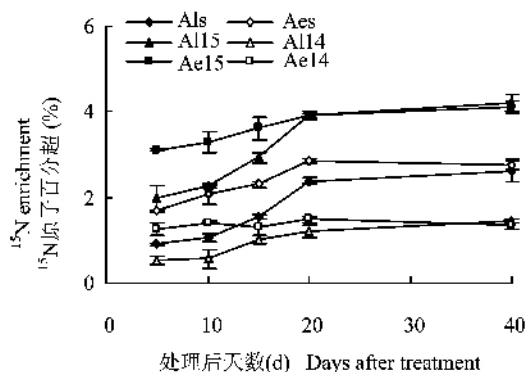


图3 交替灌水玉米各部分¹⁵N原子百分超的动态变化

Fig.3 Time course of ¹⁵N enrichment in different maize parts for A

[Als : Al的地上部 Shoot for Al ; Aes : Ae的地上部 Shoot for Ae ; Al14、Al15、Ae14、Ae15 : 分别代表 Al、Ae 施用(¹⁴NH₄)₂SO₄和(¹⁵NH₄)₂SO₄的1/2根区根系 Means the subroot supplied with (¹⁴NH₄)₂SO₄ or (¹⁵NH₄)₂SO₄ for Al、Ae , respectively ;下同 The same as below.]

2.1.3 各根区氮素对玉米总吸氮量的贡献 ¹⁵N肥料施在同一灌水方式的两个不同根区时,玉米累积的¹⁵N肥料氮量表现为在处理15、20、40 d,固定灌水的灌水区分别是非灌水区的2.37、2.95和3.41倍;交替灌水先灌水区分别是后灌水区的1.57、1.08和1.06倍。表1看出,不同阶段吸收¹⁵N肥料氮占总吸氮量的百分数表现为,交替灌水条件下,施在两个根区时非常接近,且与均匀灌水相近。固定灌水条件下,施在非灌水区时,随时间延长减小,施在灌水区时则相反,随时间延长增大;而且,施在灌水区时作物吸收¹⁵N肥料氮所占百分数显著大于非

灌水区,也比均匀灌水和交替灌水的任一根区明显增大。根据0~40 d作物吸收¹⁵N肥料氮占总吸氮量的百分数可以算出,固定灌水条件下,作物自灌水区和非灌水区土壤吸收氮素分别占19.89%和4.53%;交替灌水条件下,作物自先灌水区 and 后灌水区土壤吸收氮素分别占14.82%和13.91%。进一步说明了交替灌水条件下,不同根区对玉米吸收氮素有同等贡献;而固定灌水条件下,玉米吸收的氮素主要来自灌水区,且这种对灌水区的依赖随时间延长不断增大。

2.1.4 各根区根系的氮素吸收速率 从表2看出,局部灌水条件下,玉米不同根区根系的氮素吸收速率明显不同。固定灌水时,不同处理阶段灌水区根系的¹⁵N肥料氮吸收速率始终显著大于非灌水区,且二者间的差距随时间延长而增大。交替灌水时,前两个阶段内,两个根区呈交替变化,始终是灌水区显著大于非灌水区;第二次交替之后,两部分根区根系的¹⁵N肥料氮吸收速率接近。说明同一根系的不同根区,灌水情况不同时,其根系氮素吸收速率的变化情况很不相同,灌水可明显促进作物根系对土壤中氮素的吸收。

表2还表明,局部供水5 d内,供水区根系的¹⁵N肥料氮吸收速率较之非供水区和均匀灌水均显著增大,供水区根系的氮素吸收表现出明显的补偿效应。交替灌水条件下,处理10~15 d,恢复供水区根系的¹⁵N肥料氮吸收速率明显大于均匀灌水及其它所有根区,说明交替灌水恢复供水区根系的氮素吸收存在补偿效应。处理5~10、15~20 d,交替灌水时灌水区根系的¹⁵N肥料氮吸收速率与均匀灌水无显著差异,非灌水区的¹⁵N肥料氮吸收速率较之均匀灌水明显减小;处理20 d以后,两个根区的平均¹⁵N肥料氮吸收速率明显小于均匀供水。与交替灌水所不同的是,固定灌水条件下,处理5~20 d内,灌水区根系的¹⁵N肥料氮吸收速率与均匀灌水无显著差异,其非灌水区的¹⁵N肥料氮吸收速率始终小于均匀灌水,且减小幅度明显大于交替灌水的停止灌水区。处理20 d以后,其灌水区根系的¹⁵N肥料氮吸收速率的减小幅度小于交替灌水,但其非灌水区的减小幅度显著增大。以上分析表明,与固定部分根区持续湿润相比,不同根区土壤的干湿交替,一方面在一定时间内可以使作物根系对供水区的氮素再一次产生补偿吸收,另一方面可以使停止供水区根系的氮素吸收速率不致大幅度减小。

表 1 不同阶段作物吸收¹⁵N 肥料氮占总吸氮量的百分数(%)Table 1 Percentage of plant total N from ¹⁵N – fertilizer during different treatment periods

处理阶段 Treatment periods	Cf	Fd	Fw	Al	Ae
0~20 d	38.47 b	14.49 c	58.06 a	34.61 b	37.80 b
20~40 d	38.89 b	11.52 c	76.25 a	34.18 b	33.77 b

注 (Note): 同一行中不同字母表示差异达 5% 的显著水平, 下同 Different letters within each line mean significant at 5% level. The same below.

表 2 3 种灌水方式下玉米不同根区根系对¹⁵N 肥料氮的吸收速率 [$\mu\text{g}/(\text{m} \cdot \text{d})$]Table 2 Root N inflows from ¹⁵N – fertilizer applied to different root zones under three irrigation methods

处理阶段 Treatment periods	Cf	Fd	Fw	Al	Ae
I ₀ –I ₅	61.93 ± 1.73 b	26.82 ± 0.98 c	70.75 ± 1.85 a	26.82 ± 0.98 c	70.75 ± 1.85 a
I ₅ –I ₁₀	56.63 ± 1.58 a	23.48 ± 0.77 b	54.27 ± 1.52 a	23.48 ± 0.77 b	54.27 ± 1.52 a
II ₀ –II ₅	55.47 ± 1.56 b	21.15 ± 0.67 d	52.14 ± 1.56 b	62.70 ± 1.78 a	47.83 ± 1.21 c
II ₅ –II ₁₀	68.94 ± 1.66 a	10.40 ± 0.56 c	61.51 ± 1.68 a	64.22 ± 1.83 a	19.55 ± 0.76 b
I – II	47.91 ± 1.19 a	16.38 ± 0.65 c	48.11 ± 1.23 a	35.58 ± 0.98 b	38.22 ± 1.06 b
III – IV	16.63 ± 0.68 a	2.45 ± 0.18 d	14.74 ± 0.61 b	12.04 ± 0.59 c	11.67 ± 0.44 c

注 (Note): I、II、III、IV 分别指处理 0—10、10—20、20—30、30—40 d 四个阶段; I₀、I₅、I₁₀、II₀、II₅、II₁₀ 分别指 I、II 阶段处理 0、5 和 10 d; 下同。I、II、III、IV represent treatment periods from 0 to 10, 10 to 20, 20 to 30, 30 to 40 days after treating, respectively; I₀、I₅、I₁₀、II₀、II₅、II₁₀ represent the zero, fifth and tenth day of periods I and II, respectively. The same below.

2.1.5 各根区根系的根长 固定灌水条件下, 各处理时期灌水区的根长明显大于非灌水区, 且随时间延长, 二者间的差距增大。交替灌水条件下, 处理 15 d 以前, 先灌水区的根长明显大于后灌水区; 15 d 以后, 二者间的差距随时间延长缩小; 处理 20~40 d 时, 两个根区的根长相近。3 种灌水方式相比, 处理 5~10 d 均匀灌水 1/2 根区的根长介于局部灌水的两个根区之间, 差异不显著; 处理 15~20 d 均匀灌水与固定灌水的灌水区及交替灌水的两个根区接近, 明显大于固定灌水的非灌水区; 处理 40 d 时, 与均匀灌水相比, 固定灌水的灌水区及交替灌水两个根区的根长减小, 但均较之固定灌水的非灌水区显著增大(图 4)。说明同一根系在不同区域的生长状况受根区湿润方式影响很大。与均匀灌水类似, 长时间的根系分区交替灌水可使不同根区的根长均衡增大, 而固定灌水的灌水与非灌水区根长发育很不平衡。

2.2 灌水方式对玉米氮素积累量的影响

由图 5 看出, 处理 10 d 以前, 3 种灌水方式下玉米的氮素积累总量间无显著差异。处理 15 d 时, 与均匀灌水相比, 固定灌水玉米的氮素积累总量明显减小, 交替灌水无显著差异。处理 20 d 以后, 两种局部灌水方式比均匀灌水均显著减小, 且以固定灌水的减小幅度更大; 二者所不同的是, 处理 40 d 时,

交替灌水比固定灌水明显增大。说明在以 10 d 为交替间隔时, 与均匀灌水相比, 交替灌水、固定灌水下作物的氮素积累总量有减小趋势, 且随时间延长, 减小幅度增大, 但与固定灌水相比, 交替灌水可以使作物氮素积累量的减小幅度变小。

2.3 玉米各根区根系吸收氮素在体内的分配

2.3.1 作物吸收氮素在体内分配的一般规律 从图 6 和图 7 可以看出, 均匀灌水条件下, 玉米两个根区根系的总含氮量和¹⁵N 原子百分超的变化规律不同, 各处理时期两根区根系的总含氮量均没有显著差异。而¹⁵N 原子百分超则表现为, 施¹⁵N 肥料区根系始终显著大于地上部及施¹⁴N 区根系, 而且处理 10~40 d, 均表现为施¹⁵N 区根系 > 地上部 > 施¹⁴N 区根系, 且随时间推移, 其差距有增大趋势。说明作物某部分根系吸收的氮素优先留给自己, 其次才向地上部及其它根系运输, 即作物各部分根系吸收的氮素呈就近分配规律; 也说明不同部分根系之间氮素的迁移交换是通过地上部氮素向根系的再分配完成的。

从图 2、图 3 和图 8、图 9 可以看出, 固定、交替两种局部供水条件下, ¹⁵N 施在灌水或非灌水区, 玉米两根区根系的总含氮量和各部分的¹⁵N 原子百分超表现出与均匀灌水一致的规律, 即两根区根系的总含氮量之间无显著差异, 而¹⁵N 原子百分超则表现

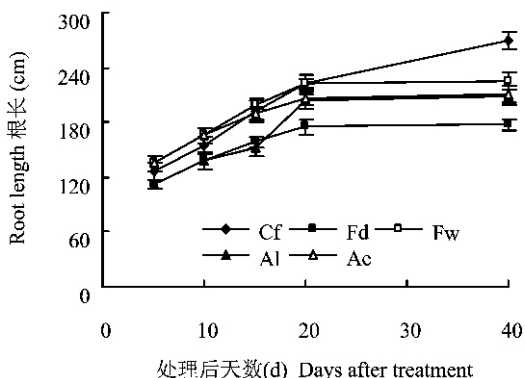


图 4 三种灌水方式施¹⁵N 肥料根区根长的动态变化

Fig.4 Dynamics of root length in zone supplied with ¹⁵N – fertilizer for three irrigation methods

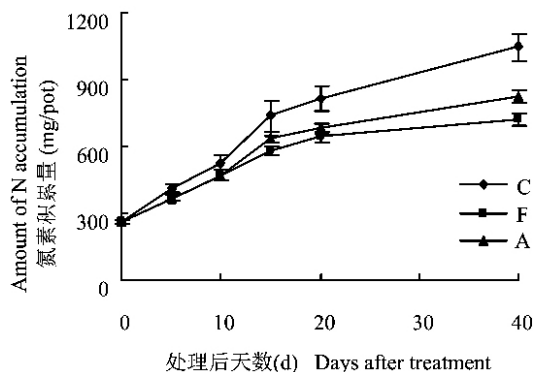


图 5 三种灌水方式氮素积累量的动态变化

Fig.5 Dynamics of N accumulation for three irrigation methods

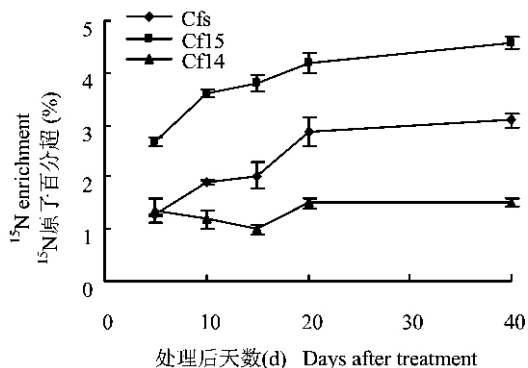


图 6 均匀灌水玉米各部分¹⁵N 原子百分超的动态变化

Fig.6 Dynamics of ¹⁵N enrichment in different maize parts for C

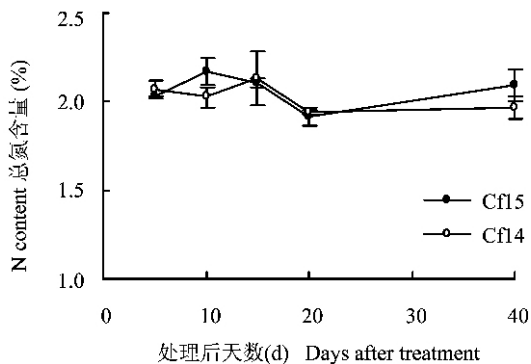


图 7 均匀灌水玉米各根区根系的氮含量

Fig.7 N content in each subroot under C

(Cfs : Cf 的地上部 Shoot for Cf ; Cf14, Cf15 : 分别表示 Cf 施用(¹⁴NH₄)₂SO₄ 和(¹⁵NH₄)₂SO₄ 的 1/2 根区根系 Means the subroot supplied with (¹⁴NH₄)₂SO₄ or (¹⁵NH₄)₂SO₄ for Cf , respectively. 下同 The same below.)

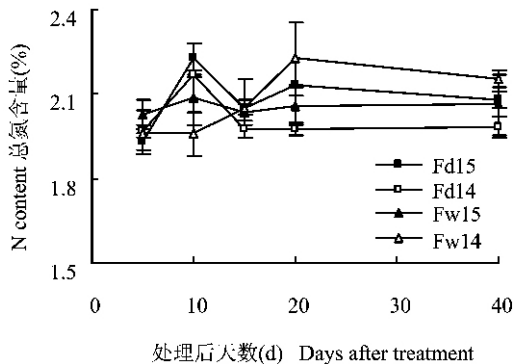


图 8 固定灌水玉米各根区根系的氮含量

Fig.8 N content in each subroot under F

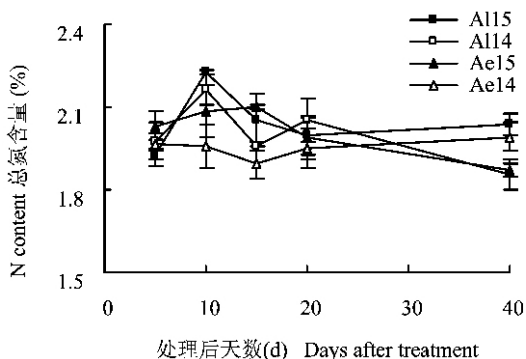


图 9 交替灌水玉米各根区根系的氮含量

Fig.9 N content in each subroot under A

为, 施¹⁵N 区根系 > 地上部 > 施¹⁴N 区根系, 而且, 地上部和施¹⁴N 区根系的¹⁵N 原子百分超均随施¹⁵N 区根系同步升降, 呈一致的变化规律。

2.3.2 各根区根系吸收氮素在体内的分配 3 种灌水方式下, ¹⁵N 肥料施在灌水区或非灌水区, 各处理时期, 玉米地上部累积¹⁵N 肥料氮占总吸收量的百分数远大于¹⁵N 区根系的; 后者又较之¹⁴N 区根系显著增大(表 3)。说明玉米吸收的绝大部分氮素分配在地上部, 根系分配的氮素所占比例较小, 其中以吸收根系分配较多。

表 3 表明, 随时间推移, 玉米各部分累积¹⁵N 肥料氮占吸收总量的百分数因施用位置而不同。¹⁵N 肥料施在固定灌水的非灌水区时, 处理 5~10 d, 地上部吸收氮素所占百分数增大, 根系的明显减小; 10 d 以后, 地上部的基本稳定, ¹⁵N 区根系的持续减小, ¹⁴N 区根系的呈增大趋势。其他处理表现为, 随时间推移, 地上部吸收氮素所占百分数逐渐增大, 各根区根系的持续减小。3 种灌水方式相比, 增减幅度较大的起始时间段不同, 增减幅度也不相同。与处理 5 d 时相比, 均匀灌水条件下, 地上部吸收氮素所占百分数在处理 10 d 时即大幅度增加; 交替灌水处理 15 d 后明显增大; 固定灌水处理 10 d 时增长幅度较大, 但明显小于均匀灌水, 也小于交替灌水处理 15 d

时的增长幅度。根系的变化情况与地上部相反。说明随生长发育过程的进行, 玉米的氮素分配重心向地上部转移。灌水方式不影响这个整体趋势, 但会对其程度及进程产生影响。局部灌水条件下, 氮素分配重心向地上部转移的进程推迟; 与交替灌水所不同的是, 固定灌水时氮素分配重心向地上部转移的速度要慢, 且根系的分配重心逐渐向灌水区转移。

由表 3 还看出, 交替灌水时, 随时间推移, 玉米两部分根系及地上部从两个根区累积¹⁵N 肥料氮量占总吸收量的百分数均趋于相同。固定灌水时, 地上部从两个根区累积¹⁵N 肥料氮的百分数相近; 而同是施¹⁴N 或¹⁵N 的区域, 总呈现出灌水区根系分配百分数大于非灌水区的规律。¹⁵N 肥料施在 3 种灌水方式的不同根区间相比, 处理 40 d 时各部分累积¹⁵N 肥料氮量占总吸收量的百分数表现为, 地上部¹⁵N 施在均匀灌水任一根区 > ¹⁵N 施在交替灌水的任一根区 > ¹⁵N 施在固定灌水的任一根区; ¹⁴N 区根系¹⁵N 施在固定灌水的非灌水区 > 其他四个处理; ¹⁵N 区根系¹⁵N 施在固定灌水的灌水区 > ¹⁵N 施在固定灌水的非灌水区 and 交替灌水的任一根区 > ¹⁵N 施在均匀灌水任一根区。可见, 与均匀灌水相比, 两种局部灌水条件下, 作物对各根区氮素的累积百分数均是根系明显增大, 地上部明显减小。两种局部灌水方

表 3 各根区根系吸收¹⁵N 肥料氮在作物不同器官的分配百分数(%)

Table 3 Percentage of ¹⁵N - fertilizer-N allocation in different organs for all treatments

处理 Treatments	玉米器官 Maize organs	处理后天数 Days after treatment(d)				
		5	10	15	20	40
Cf	Cf14	11.89 a	7.38 b	6.18 c	5.83 c	5.22 d
	Cfs	62.45 b	74.32 a	74.96 a	76.93 a	78.54 a
	Cf15	25.67 a	18.29 b	18.85 b	17.24 c	16.24 c
Fd	Fd14	8.54 b	8.01 c	8.57 b	9.91 a	10.11 a
	Fds	67.35 b	69.71 a	68.81 a	68.55 a	69.52 a
	Fd15	24.11 a	22.27 b	22.61 b	21.55 b	20.37 c
Fw	Fw14	7.50 a	5.40 b	5.67 b	5.70 b	5.62 b
	Fws	65.99 b	69.56 a	69.47 a	70.84 a	71.06 a
	Fw15	26.51 a	25.04 b	24.86 b	23.45 c	23.32 c
Al	Al14	8.54 a	8.01 b	8.39 ab	6.86 c	6.03 d
	Als	67.35 c	69.71 b	71.15 b	73.05 a	73.60 a
	Al15	24.11 a	22.27 b	20.45 c	20.09 c	20.36 c
Ae	Ae14	7.50 a	5.40 b	5.49 b	5.47 b	5.73 b
	Aes	65.99 c	69.56 b	74.14 a	74.60 a	75.14 a
	Ae15	26.51 a	25.04 b	20.37 c	19.93 c	19.12 c

式不同的是,两部分根系自己存留和分配给另一部分根系的百分数表现为,交替灌水条件下,两根区根系的氮素分配随时间延长趋于相同;固定灌水条件下,氮素向灌水区根系的分配总大于非灌水区。

3 讨论

试验结果表明,作物对不同根区氮素的吸收情况与根区灌水湿润方式关系密切。交替灌水条件下,不同根区对玉米各部分的氮素累积有同等贡献;固定灌水条件下,玉米吸收的氮素主要来自灌水区,且这种对灌水区的依赖随时间延长不断增大。这与根区土壤水分状况对氮素有效性以及植物氮素吸收运输的影响有关。一方面,水分亏缺时养分离子 NO_3^- 和 NH_4^+ 通过质流和扩散向根表的迁移速率下降,不利于根系对养分的吸收;另一方面,水分亏缺加重时会抑制作物根系生长,降低根系的吸收面积和吸收能力,使作物对土壤养分的吸收和运输减少。本研究中,根系的氮素吸收速率和根长均表现为,固定灌水的非灌水区明显小于其灌水区,且二者间的差距随时间延长增大,表明根系的氮素吸收速率和根长对作物氮素吸收都有重要作用。说明固定灌水因不同根区持续湿润或干燥,对其养分的吸收利用产生明显不同的影响;而交替灌水条件下,不同根区交替湿润与干燥,可以避免局部根区长期干旱对作物养分吸收的不良影响。

本研究表明,作物体内氮素的循环与分配,除受其生长发育阶段影响外,还受根区灌水湿润方式的影响。与均匀灌水相比,两种局部供水条件下,根系的氮素分配百分数明显增大,地上部明显减小。两种局部灌水方式所不同的是,交替灌水时,两根区根系的氮素分配随时间延长趋于相同;固定灌水时,氮素向灌水区根系的分配大于非灌水区。其原因可能在于作物体内氮素的分配取决于以下两方面:一是地上部与根系以及不同根系部分间的干物质分配关系,另一方面是为了维持稳定的 C/N 比,氮素的分配总是与干物质分配密切联系^[8]。局部供水条件下,作物处于水分非充分供应状态,而水分亏缺会促使干物质向根系的分配比例增大^[9]。固定灌水条件下,非灌水区根系生长受到抑制,灌水区根系生长相对受到明显促进,这就减少了非灌水区根系中的氮素分配,使灌水区根系的氮素分配增加。

4 小结

利用均匀灌水、固定灌水和交替灌水 3 种方式,

研究局部湿润条件下,玉米不同根区氮素的吸收与分配特征,主要结论如下:

1) 土壤氮素和肥料氮素均表现为,交替灌水条件下,不同根区对玉米各部分的氮素吸收累积有同等贡献;固定灌水条件下,玉米吸收的氮素绝大部分来自灌水区,且这种对灌水区的依赖随时间延长不断增大。

2) 根系的氮素吸收速率和根长均表现为,固定灌水的非灌水区明显小于其灌水区,且随时间延长差距增大,表明局部供水条件下,根系氮素吸收速率和根长的变化对作物自不同根区吸收氮素都有重要作用。

3) 交替灌水条件下,开始灌水 5 d 内及交替后恢复供水 5 d 内,供水区根系的氮素吸收速率较之均匀灌水及其他所有根区的显著增大,表现出明显的补偿效应,但这种补偿效应随时间延长而消失。

4) 在以 10 d 为交替间隔时,与均匀灌水相比,交替灌水、固定灌水下作物的氮素积累总量有减小趋势,且随时间延长,减小幅度增大,但与固定灌水相比,交替灌水可以使作物氮素累积量的减小幅度变小。

5) 局部供水使根系的氮素分配百分数明显增大,地上部明显减小。两种局部灌水方式所不同的是,交替灌水时,两根区根系的氮素分配随时间延长趋于相同;而固定灌水时,氮素向灌水区根系的分配大于非灌水区。

参考文献:

- [1] 康绍忠,张建华,梁宗锁,等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1-6.
Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S *et al.* The controlled alternative irrigation—A New approach for water saving regulation in farmland[J]. *Agric. Res. Arid Areas*, 1997, 15(1): 1-6.
- [2] 段爱旺,肖俊夫,张寄阳,等. 控制交替隔沟灌中灌水控制下限对玉米叶片水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 1999, 25(6): 766-771.
Duan A W, Xiao J F, Zhang J Y *et al.* Effect of the lower limit of soil water in controlled alternative furrow irrigation on water use efficiency in maize leaf[J]. *Acta Agron. Sin.*, 1999, 25(6): 766-771.
- [3] 康绍忠,蔡焕杰. 作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
Kang S Z, Cai H J. The theory and generalization of controlled alternate partial root-zone irrigation and regulated deficit irrigation[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002.
- [4] Graterol Y E, Eisenhauer D E, Elmoro R W. Alternate-furrow irrigation for soybean production[J]. *Agric. Water Manag.*, 1993, 24: 133-145.

- [5] 梁宗锁,康绍忠,张建华,高俊风. 控制性分根交替灌水对作物水分利用率的影响及节水效应[J]. 中国农业科学, 1998, 31(5): 88-90.
Liang Z S, Kang S Z, Zhang J H, Gao J F. Effect on water use efficiency and water-saving by controlled root-divided alternative irrigation [J]. Sci. Agric. Sin., 1998, 31(5): 88-90.
- [6] Stone J F, Nofziger D L. Water use and yields of cotton grown under wide-spaced furrow irrigation[J]. Agric. Water Manag., 1993, 24: 27-38.
- [7] van Vuuren M M I, Robinson D, Griffiths B S. Nutrient inflow and root proliferation during the exploitation of a temporally and spatially discrete source of nitrogen in soil[J]. Plant Soil, 1996, 178: 185-192.
- [8] Agrell D, Oscarson P, Larsson C M. Translocation of N to and from barley roots: its dependence on local nitrate supply in split-root culture [J]. Physiol. Plant., 1994, 90: 467-474.
- [9] 谢甫缙,董加耕. 几种主要作物与水分胁迫的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 1992, 23(4): 369-373.
Xie F T, Dong J G. Relation between several crops and water stress [J]. J. Shenyang Agric. Univ., 1992, 23(4): 369-373.