

喷灌条件下水氮用量对玉米氮素吸收转运的影响

张忠学^{1,2} 刘 明^{1,2} 齐智娟^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为揭示不同水氮管理模式下玉米花前、花后氮素吸收、转运规律,探究作物氮、肥料氮、土壤氮之间的关系以及干物质吸收转运规律,以大田试验为基础,采用¹⁵N 同位素示踪技术,设置3个灌水定额水平(W1:40 mm, W2:60 mm, W3:80 mm)和4个施氮量水平(N0:0 kg/hm², N1:180 kg/hm², N2:240 kg/hm², N3:300 kg/hm²),分析比较了不同水氮管理模式对玉米氮素累积量、转运量、氮素籽粒贡献率、肥料氮和土壤氮的吸收转运规律,以及干物质转运量和干物质籽粒贡献率的影响。结果表明:氮肥回收率为21.27%~44.64%, N2W2处理的氮肥回收率最高。成熟期各器官氮素累积量由大到小依次为籽粒、叶、茎、穗叶,中等施氮水平下植株氮素累积量最高,玉米植株氮素在W1水平显著降低($P<0.05$)。各器官氮素转运量由大到小依次为叶、茎、穗叶,施氮处理整株玉米氮素转运量较未施氮处理均有所提高, N2W2处理氮素转运量最高,与其他处理差异显著($P<0.05$)。参与转运的氮素中,土壤氮转运量大于肥料氮转运量。玉米各器官¹⁵N 转运量和土壤氮转运量由大到小依次为叶、茎、穗叶,整株玉米植株中参与转运的氮素有22.43%~39.45%来自肥料,中等施氮灌水处理各器官在向籽粒转运较高肥料氮的同时,还能保证较高的土壤氮转运量。不同器官氮素籽粒贡献率由大到小依次为叶、茎、穗叶,各器官氮素转运量占籽粒氮素累积量的18.29%~44.29%,贡献率最大值出现在N2W2处理。干物质转运量以及籽粒贡献率均由大到小依次为茎、叶、穗叶, N2W2处理籽粒干物质累积量和干物质籽粒贡献率均最高。结合玉米干物质累积与转运规律以及氮素吸收利用规律,建议当地玉米种植采用灌水60 mm、施氮240 kg/hm²的水氮管理模式。研究结果可为东北地区玉米水氮管理方式提供理论支持。

关键词: 玉米; 水氮管理; 氮转运; 同位素示踪技术; 氮肥回收率

中图分类号: S513; S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0299-10

Effect of Water Nitrogen Dosage on Nitrogen Absorption and Transformation of Maize under Sprinkler Irrigation Condition

ZHANG Zhongxue^{1,2} LIU Ming^{1,2} QI Zhijuan^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming to reveal the response of nitrogen uptake and transformation under different water and nitrogen conditions at pre- and post-flower, meanwhile to investigate the relationship between crop nitrogen, fertilizer nitrogen, soil nitrogen and dry matter absorption and transport. Based on the ¹⁵N isotope tracing technique, the experiment with three irrigation levels (W1:40 mm, W2:60 mm, W3:80 mm) and four nitrogen levels (N0:0 kg/hm², N1:180 kg/hm², N2:240 kg/hm², and N3:300 kg/hm²) were carried out in field conditions. The results showed that the nitrogen fertilizer recovery rate was 21.27%~44.64%, and the best value was obtained in N2W2 plot. If making a comparison of nitrogen accumulation in each organ at maturity stage, the best was in grain, then was in leaf, stem, and the last was in ear leaf. With moderate nitrogen application regime, the nitrogen accumulation in plants was the highest, however, in W1 plot, it was significantly decreased ($P<0.05$). The order of nitrogen

收稿日期: 2019-01-02 修回日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779046)和国家重点研发计划项目(2018YFC0407301)

作者简介: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangzhongxue@163.com

通信作者: 齐智娟(1987—),女,讲师,博士后,主要从事土壤水热运移和节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhijuanqi@neau.edu.cn

transformation rate from the largest to the smallest was leaf, stem and ear leaf. The best nitrogen transformation rate was achieved with N2W2 practice which was significantly different from other treatments ($P < 0.05$). The amount of soil nitrogen involved in transformation was greater than the amount of fertilizer nitrogen. The ^{15}N transformation and soil nitrogen transformation of various organs of maize from the largest to the smallest was leaf, stem, and stem leaves. Totally 22.43% ~ 39.45% of nitrogen transformation in plant came from fertilizers, the moderate water and nitrogen treatment could keep higher soil nitrogen transformation. The order of contribution rate of nitrogen grain in different organs from the largest to the smallest as leaf, stem and ear leaf. Nitrogen transformation in various organ accounted for 18.29% ~ 44.29% of the nitrogen accumulation in the grain, and the N2W2 plot had the best value. Dry matter transformation and grain contribution rate from the largest to the smallest is stem, leaf and spike leaf, and the greatest value was got in N2W2 treatment. Therefore, a clear conclusion was that the irrigation of 60 mm and nitrogen application of 240 kg/hm^2 were the best.

Key words: maize; water and nitrogen management; nitrogen transformation; isotope tracer technique; nitrogen recovery rate

0 引言

水氮是限制农作物生长的主要因子,增施氮肥以及提高灌水量成为现阶段农作物增产的主要方式,然而作物产量以及植株体内氮素累积与施氮量和灌水量并非正相关^[1-2]。增施氮肥可以提高农田氮素水平,满足农作物对于养分的需求,但不合理的氮肥施加会导致氮肥利用率和作物产量的降低,甚至造成环境污染^[3-4]。在缺水干旱年份,尤其是在土壤底墒差和生育期雨水少的年份,作物氮吸收和肥料氮利用率较低,氮肥效益差^[5],氮肥的表观利用率、农学利用率和偏生产力在灌水条件下均显著高于自然干旱条件,干旱和缺少氮素限制了干物质向籽粒的转运和分配^[6]。

已有研究结果表明,适宜的氮肥运筹方式有利于春玉米养分转运效率的提高^[7]。随着施氮水平的提高,玉米干物质转运量、转运率和干物质籽粒贡献率总体上呈增加趋势,但不同器官之间存在明显差异^[8]。叶片和穗叶的干物质转运量对籽粒的贡献率高于茎鞘和穗轴,分别达到 12.4% ~ 15.3% 和 5.2% ~ 7.0%^[9],高氮条件下玉米不同器官氮素运转量及其对籽粒贡献率的影响大于低氮和不施氮情况^[10]。徐明杰等^[11]研究指出,施氮 250 kg/hm^2 时籽粒中 57.73% 的氮素、施氮 185 kg/hm^2 时籽粒中 45.15% 的氮素来自各器官的转移,花后积累的氮素是籽粒氮素主要来源,WANG 等^[12]认为,提高氮素利用效率和氮素再分配效率可以提高籽粒产量。

关于玉米水氮耦合的研究多集中在基于提高产量和水氮利用效率寻求最优的水氮管理模式,而对于各器官干物质和氮素吸收以及转运的研究仅限于施氮量单一因素。因此,在前人研究基础上,本文利用 ^{15}N 示踪技术,研究喷灌玉米水氮耦合条件下对氮肥回收率、干物质和氮素积累、转运的影响,并将

玉米植株中肥料氮和土壤氮加以区分,对各器官肥料氮、土壤氮的吸收转运作进一步分析,更具体、准确地了解不同氮源在植株各器官内的吸收转运情况^[13],揭示喷灌玉米水氮耦合条件下花前、花后氮素吸收和转运规律,以及作物氮、肥料氮、土壤氮之间的关系,以期为东北地区玉米种植提供科学合理的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2018年4—10月在黑龙江省肇州县水利科学试验站进行。试验站地处 $45^{\circ}17'\text{N}$ 、 $125^{\circ}35'\text{E}$,属大陆性温带气候。年降雨量在 400 ~ 500 mm 之间,平均蒸发量 $1\,733\text{ mm}$,有效积温 $2\,845^{\circ}\text{C}$,无霜期 138 d,属于第一积温带,试验土壤为碳酸盐黑钙土。土壤容重当土层深度在 0 ~ 10 cm 时为 1.18 g/cm^3 , 10 ~ 20 cm 时为 1.22 g/cm^3 , 20 ~ 30 cm 时为 1.22 g/cm^3 , 30 ~ 40 cm 时为 1.21 g/cm^3 , 40 ~ 100 cm 时为 1.01 g/cm^3 。试验区土壤田间持水率为 31.78%, pH 值为 6.4。土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量(质量比)分别为 28.20、1.41、0.88、19.86、0.13、0.04、0.21 g/kg。

1.2 试验设计

试验设置灌水定额和施氮量 2 个因素。灌水定额设置 3 个水平: W1: 40 mm, W2: 60 mm, W3: 80 mm。氮肥施用量设置 4 个水平: N0: 0 kg/hm^2 , N1: 180 kg/hm^2 , N2: 240 kg/hm^2 , N3: 300 kg/hm^2 , 磷肥和钾肥施用量均为 90 kg/hm^2 。共 12 个处理,每个处理 3 次重复,共 36 个小区。各小区面积 104 m^2 (10.4 m × 10 m)。每公顷保苗 67 500 株,各小区均采用 65 cm 小垄种植,每小区 16 条垄,株距 23.0 cm。保护区宽度为 5 m,保护行宽度为 1 m,隔离带宽度为 1.3 m(即 2 条垄)。于各小区正中心设置微区,

微区采用长 2.0 m、宽 0.6 m、高 0.4 m 的铁皮框制成。划出微区所在位置后,将铁皮框放到微区所在位置,外围垂直挖 0.35 m,将铁皮框套入土中,使其周围与土壤紧贴,铁皮框上方露出地表 5 cm。

试验所用的肥料为尿素(含氮质量分数 46%)、磷酸二铵(含氮质量分数 18%;含磷质量分数 46%)和硫酸钾(含钾质量分数 58%),施肥方式为撒施,不覆膜,微区内施用的氮肥为丰度 10.22% 的¹⁵N 标记的尿素。各处理的肥料施用量均是经过折算后的氮、磷、钾元素的施用量,磷肥和钾肥全部作为基肥施入,氮肥 1/2 随底肥施入,剩余 1/2 在拔节期施入。供试玉米品种为“大龙 568”。试验于 2018 年 5 月 1 日播种,生育期内灌水 2 次,分别在拔节期、抽雄期灌水,各次灌水定额比例为 1:1,其中拔节期灌水是在施完拔节肥随后进行灌水,6 月 30 日追肥,撒施尿素,拔节期 7 月 1 日灌水,抽雄期 7 月 20 日灌水。

喷灌采用 5983 型摇臂式喷头(喷洒半径 9.0 ~ 14.0 m,流量 0.74 ~ 1.02 m³/h),喷头安装在长 1.5 m 的支管上。灌水时将 4 个喷头分别布置在小区四角上,逐一对各小区进行灌水。为防止各小区之间发生水分交换,调节喷头射程略微小于小区长度。灌溉所用水源为当地地下水,用管道末端的水表控制灌水量。

1.3 观测内容及方法

1.3.1 植株干物质量

苗期、拔节期、灌浆期在小区取样,吐丝期、成熟期在微区取样,将植株沿地上部分取下,用农用压缩喷雾器将植株冲洗干净,并将植株按不同器官放入干燥箱中,105℃ 下杀青 30 min 后,60℃ 干燥至干质量恒定。将干燥后的样品放置在干燥箱中冷却,冷却后称量各生育期干物质量。

1.3.2 植株同位素

将称量后的吐丝期和成熟期样品按不同器官用球磨机磨碎,过 80 目筛后混匀,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 溶液消煮,取消煮后的清液,采用德国 SEAL Analytical 公司生产的 Auto Analyzer-Ⅲ型流动分析仪,测定成熟期植株各器官氮质量分数。

植株同位素测定在东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室完成,采用元素分析仪(Flash 2000 HT 型,Thermo Fisher Scientific,美国)和同位素质谱仪(DELTA V Advantage,Thermo Fisher Scientific,美国)联用的方法测定成熟期玉米各器官以及土壤中的¹⁵N 丰度。

1.3.3 产量

于 2018 年 9 月 28 日进行测产和考种。每个小

区随机选取 5 点(中心点与对角点),每点连续选取 1 株玉米测其单株穗长、穗粗、穗质量、百粒鲜质量及秃尖长^[14]。然后将籽粒放入干燥箱并保持(80 ± 2)℃干燥 8 h,冷却后利用电子天平称其质量,再次放入干燥箱中直至质量恒定,得到玉米百粒干质量。

1.3.4 相关指标计算公式

植株氮素累积量计算公式为

$$N_{AA} = D_m N_c \tag{1}$$

式中 D_m ——植株干物质量

N_c ——植株含氮率

植株氮素来源于肥料氮素的百分比计算公式为

$$N_{dff} = (N_p - N_a) / (N_f - N_a) \times 100\% \tag{2}$$

式中 N_p ——微区内植株样品的¹⁵N 丰度

N_a ——天然¹⁵N 丰度标准值(0.366 3% ¹⁵N)

N_f ——¹⁵N 标记尿素中¹⁵N 丰度

植株氮素来源于土壤氮素的百分比计算公式为

$$N_{dfs} = 1 - N_{dff} \tag{3}$$

植株中肥料氮素累积量为 N_{dff} 与植株氮素累积量的乘积。植株中土壤氮素累积量为 N_{dfs} 与植株氮素累积量的乘积。营养器官的物质转运量为该器官最大干质量与该器官成熟时干质量的乘积。营养器官的物质转运率为该器官最大干质量与该器官成熟时干质量的差值与该器官最大干质量的比值。营养器官对籽粒贡献率为该器官最大干质量与该器官成熟时干质量的差值与籽粒干质量的比值^[15]。各器官氮素转运量为开花期各器官氮素累积量与收获期各器官氮素累积量差值。各器官氮素贡献率为各器官氮素转运量与籽粒氮吸收量的比值(%)。肥料回收率为玉米植株肥料氮累积量与施氮量比值(%)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 记录数据,SPSS 16.0 统计分析数据,LSD 法进行显著性检验。采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 9.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合条件下玉米干物质累积与转运规律

2.1.1 水氮耦合条件下玉米干物质量

从图 1 可以看出,不同处理玉米生育期内干物质积累动态基本一致,均符合“S”形生长曲线,干物质积累量随着生育阶段的推进呈增加的趋势,在成熟期干物质积累量达到最大。吐丝期至灌浆期为干物质快速增长阶段,整个生育期呈慢—快—慢的生长模式。从整个生育进程来看,自拔节期开始,N0W1 处理的干物质累积量均低于其他处理,而 N2W2 处理的干物质累积量最高。在同一灌水定额

下,施氮处理干物质累积量明显高于 N0 处理,由大到小依次为 N2、N3、N1、N0,其中 N3 和 N2 处理的干物质累积量接近。同一施氮水平下,干物质累积量随灌溉定额变化的增加先增加后减小,由大到小依次为 W2、W3、W1。N0 条件下不同灌水定额下的干物质累积量差别不大,而所有灌水施氮处理的干物质累积量均高于只灌水不施氮处理,水氮耦合的优势明显。

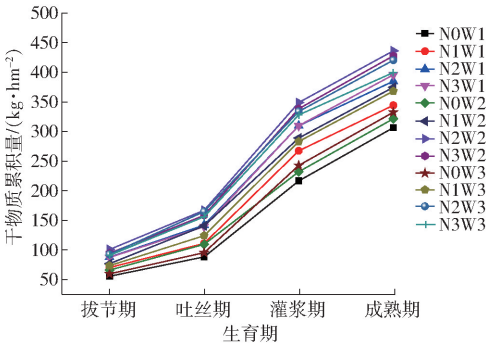


图1 各生育期干物质累积量

Fig. 1 Dry matter accumulation at different growth stages

2.1.2 水氮耦合条件下玉米各器官干物质转运量

通过干物质测定发现玉米营养器官的干物质量最大值均出现在吐丝期后,其中吐丝期玉米叶片干物质最大,而穗叶和茎(包含茎+茎鞘)干物质量的最大值出现在灌浆期。由图2可知,玉米茎的干物质转运量最高。所有处理的转运量由大到小依次为茎、叶、穗叶。N2W2处理整株玉米干物质转运量最大,N0W1处理整株玉米干物质转运量最小,N2W2整株玉米干物质转运量是N0W1的2.72倍。茎、叶和穗叶的转运量随施氮量的增加先增加后减小,随着施氮量增加茎、叶和穗叶转运量均呈现先增后减的趋势,由大到小依次为N2、N3、N1、N0。茎、叶、穗叶的干物质转运量在W2灌水量下最高,W1灌水量下最低,茎在W2水平下总体转运量较W3、W1分别提高24.29%、50.19%,叶提高23.76%、46.95%,穗叶提高29.06%、55.98%,中等灌水量的优势明显。

2.1.3 水氮耦合条件下干物质转运率和籽粒贡献率

由表1可知,不同水氮耦合条件下,各处理整体表现为器官穗叶的干物质转运率最大。同一灌水定额下施氮处理各个器官的转运率均高于未施氮处理,3种器官的转运率均随施氮量增加先增加后减小,叶由大到小依次为N2、N1、N3、N0,茎、穗叶由大到小依次为N2、N3、N1、N0,同一灌水量条件下,3种器官在N1、N2、N3水平下的转运率与N0水平时差异显著($P<0.05$)。各器官转运率随灌水量的增加呈先增后减的趋势,由大到小依次为W2、W3、

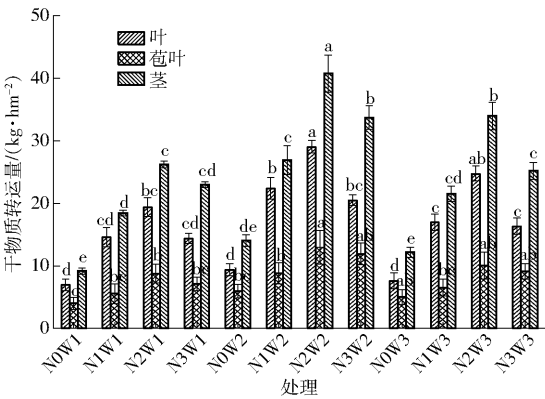


图2 玉米不同器官干物质转运量

Fig. 2 Transformation of dry matter from different organs of maize

表1 不同处理干物质转运率和籽粒贡献率

Tab.1 Transformation rate and grain contribution rate of dry matter under different treatments %

处理	转运率			籽粒贡献率			
	叶	穗叶	茎	叶	穗叶	茎	合计
N0W1	19 ^f	22 ^e	15 ^d	4 ^c	2 ^b	5 ^d	11 ^e
N1W1	24 ^e	27 ^{cd}	22 ^c	7 ^b	3 ^{ab}	9 ^c	19 ^d
N2W1	30 ^{cd}	36 ^{ab}	25 ^b	9 ^b	4 ^{ab}	13 ^{bc}	26 ^b
N3W1	23 ^e	31 ^{bc}	23 ^{bc}	6 ^{bc}	3 ^{ab}	10 ^c	19 ^d
N0W2	20 ^{ef}	27 ^{cd}	20 ^{cd}	5 ^c	3 ^{ab}	7 ^d	15 ^{de}
N1W2	32 ^c	31 ^{bc}	27 ^{ab}	9 ^b	4 ^{ab}	12 ^{bc}	25 ^b
N2W2	39 ^a	39 ^a	30 ^a	12 ^a	5 ^a	17 ^a	34 ^a
N3W2	27 ^d	34 ^b	28 ^a	8 ^b	5 ^a	14 ^b	27 ^b
N0W3	18 ^f	25 ^d	18 ^d	4 ^c	3 ^{ab}	6 ^d	13 ^e
N1W3	31 ^c	29 ^c	23 ^{bc}	8 ^b	3 ^{ab}	10 ^c	21 ^{cd}
N2W3	35 ^b	38 ^a	28 ^a	10 ^{ab}	4 ^{ab}	14 ^b	28 ^b
N3W3	26 ^d	33 ^b	24 ^{bc}	7 ^b	4 ^{ab}	11 ^{bc}	22 ^c

注:同列不同字母表示差异达到显著水平($P<0.05$),下同。

W1、W2水平下N1、N2、N3处理茎、叶的转运率与W1水平差异显著($P<0.05$),而各个灌水量下施氮处理穗叶的转运率无差异。N2W2处理茎、叶和穗叶转运率最高,N2W2处理叶片转运率与其他处理差异显著($P<0.05$),N0W1处理茎和穗叶的转运率最小,N0W3处理叶的转运率最小。

籽粒贡献率由大到小依次为茎、叶、穗叶。茎和叶的籽粒贡献率随着施氮量提高先增加后减小,与转运率呈现的规律一致,叶由大到小依次为N2、N1、N3、N0,茎由大到小依次为N2、N3、N1、N0。当灌水量相同时,施氮处理与不施氮处理茎籽粒贡献率差异显著($P<0.05$),除W1N3处理外,施氮处理与不施氮处理叶籽粒贡献率差异显著($P<0.05$),而N1与N3处理贡献率相近且无差异。茎、叶籽粒贡献率随灌水量的增加先增大后减小,由大到小依次为W2、W3、W1。当灌水量为W2时,N2处理茎、叶的籽粒贡献率与N1、N3处理差异显著。施氮量为N1时,茎、叶在不同灌水量条件下的籽粒贡献率

无差异,施氮量为 N2 时,W2 与 W1 叶的籽粒贡献率差异显著($P<0.05$),W2 与 W3、W1 与 W3 接近,W2 与 W1、W3 茎的籽粒贡献率差异显著($P<0.05$),而 W1 与 W3 无差异。施氮量为 N3 时,各灌水水平下叶的籽粒贡献率接近,茎的籽粒贡献率 W2 与 W1 差异显著,W1 和 W3、W2 和 W3 无差异。

2.2 水氮耦合条件下玉米氮素累积与转运规律

2.2.1 水氮耦合条件下玉米氮素累积量

表 2 为玉米吐丝期和成熟期各器官氮素累积量。吐丝期和成熟期器官茎、叶、籽粒含氮量总体上随着施氮量的提高呈现先增后减的趋势,穗叶的氮素累积量随着施氮量的增加呈现递增趋势,但增幅减小,各器官氮素累积量由大到小依次为籽粒、叶、茎、穗叶。吐丝期灌水量相同时,施氮处理与未施氮处理茎、叶的氮素累积量差异显著($P<0.05$),且各施氮处理之间茎、叶的氮素累积量均有明显差异($P<0.05$)。成熟期,施氮处理茎氮素累积量均高于未施氮处理,相同灌水量条件下 N2 处理增幅最

高,N1 和 N3 处理氮素累积量无明显差异。成熟期除 N2W1 处理外,施氮处理和未施氮处理叶的氮素累积量存在明显差异($P<0.05$),施氮处理中,N2 和 N3 处理叶的氮素累积量接近,均较 N1 有明显提高。中等施氮处理籽粒氮素累积量较其他施氮处理优势明显。随着灌水量的变化两个时期的茎、叶氮素累积量由大到小依次为 W2、W3、W1,籽粒的氮素累积量由大到小依次为 W3、W2、W1,且 W2 水平相同施氮处理的茎、叶氮素累积量与 W1 差异显著($P<0.05$)。同一施氮水平下,W3 水平籽粒氮素累积量较 W2 有所提高,但增幅较小,相同施氮处理之间未表现出差异,而同一灌水水平下,N2、N3 处理籽粒氮素累积量较不施氮处理有显著提高($P<0.05$)。两个时期整株玉米氮素累积量均随施氮量的升高呈现先增后减的趋势,吐丝期 N2W2 处理累积量最高,成熟期 N2W3 处理最高但与 N2W2 处理接近,施氮处理 W2、W3 水平下整株玉米氮素累积量较 W1 有明显提高($P<0.05$)。

表 2 吐丝期、成熟期氮素累积量									
Tab.2 Accumulation of nitrogen at silking and maturity stage									kg/hm ²
处理	吐丝期				成熟期				
	茎	叶	穗叶	合计	茎	叶	穗叶	籽粒	合计
N0W1	19.01 ^f	45.09 ^f	10.48 ^c	74.58 ^f	8.67 ^e	28.29 ^e	8.54 ^b	158.99 ^d	204.49 ^e
N1W1	29.01 ^e	59.39 ^e	14.13 ^b	102.53 ^e	9.78 ^e	30.96 ^e	11.66 ^{ab}	159.53 ^d	211.93 ^e
N2W1	45.34 ^c	91.42 ^c	14.54 ^b	151.30 ^e	10.13 ^{bc}	51.41 ^c	11.81 ^{ab}	194.32 ^{bc}	267.66 ^e
N3W1	36.83 ^d	80.88 ^d	16.65 ^{ab}	134.36 ^e	9.95 ^e	48.16 ^e	13.13 ^{ab}	181.23 ^e	252.47 ^d
N0W2	24.76 ^e	50.75 ^e	10.33 ^c	85.84 ^f	11.88 ^{bc}	29.65 ^e	9.13 ^b ^{ab}	160.43 ^d	211.09 ^e
N1W2	39.81 ^d	86.86 ^{cd}	16.24 ^{ab}	142.91 ^{cd}	15.77 ^b	47.07 ^e	11.75 ^{ab}	193.63 ^{bc}	268.23 ^e
N2W2	62.03 ^a	118.67 ^a	17.61 ^{ab}	198.31 ^a	20.82 ^a	67.19 ^a	12.19 ^a	221.47 ^a	321.67 ^a
N3W2	53.66 ^b	101.55 ^b	18.42 ^a	173.63 ^b	16.65 ^{ab}	54.85 ^b	12.93 ^a	203.91 ^b	288.34 ^b
N0W3	21.04 ^{ef}	50.45 ^e	12.20 ^{bc}	83.69 ^f	9.00 ^e	30.27 ^e	9.52 ^{ab}	161.95 ^d	210.75 ^e
N1W3	33.79 ^d	77.06 ^d	16.27 ^{ab}	128.12 ^d	16.18 ^{ab}	38.47 ^d	10.56 ^{ab}	195.36 ^{bc}	260.57 ^e
N2W3	51.93 ^{bc}	105.24 ^b	18.97 ^a	176.14 ^b	19.41 ^a	57.67 ^b	11.84 ^{ab}	230.89 ^a	319.81 ^a
N3W3	44.71 ^c	90.11 ^c	19.74 ^a	154.56 ^c	18.63 ^{ab}	49.86 ^c	11.89 ^a	206.04 ^b	286.42 ^b

2.2.2 水氮耦合条件下玉米氮素转运量

由表 3 可知,氮素转运量由大到小依次为叶、茎、穗叶,占籽粒氮素累积量的 18.29%~44.29%。随着施氮量的增加,茎、叶、整株玉米的转运量呈现先增后减的趋势,由大到小依次为 N2、N3、N1、N0,穗叶氮素转运量呈现增加的趋势。除 N1W3 处理器官茎外,施氮处理茎、叶以及整株玉米的转运量明显高于未施氮处理($P<0.05$),穗叶的转运量无差异。灌水量相同时,各施氮处理之间叶转运量存在明显差异、相同灌水量茎在 N0、N1、N2 水平下的转运量差异显著($P<0.05$)。随着灌水量的不同,器官转运量的规律也不同,茎由大到小依次为 W2、W1、W3,但不同施氮水平下 W1 和 W3 处理茎的转运量

无差异,穗叶随灌水量提升呈递增趋势,玉米植株及叶的转运量由大到小依次为 W2、W3、W1。施氮处理相同施氮量条件下,不同灌水水平玉米植株的转运量均呈现显著差异($P<0.05$);W2 水平叶的氮素转运量与 W1 差异显著($P<0.05$),而 W1 与 W3 无差异;3 种灌水处理中,只有施氮量 N2 时,W2 与 W1、W3 茎的氮素转运量均表现出差异($P<0.05$)。

不同灌水处理在不施加氮肥条件下各处理整株玉米的氮素转运量接近,增施氮肥后,W2 水平下的转运量较 W1 和 W3 均有提高,施氮量为 N0 时,N0W2 较 N0W1、N0W3 提高 20.98% 和 0.82%,施加氮肥后转运量增幅提高到 8.58%~41.33%。N2W2 处理茎、叶和整株玉米的转运量均最高,整株

玉米氮素转运量较 N2W3、N3W2 和 N3W3 处理分别提高了 9.53%、12.02%、31.72%，佐证了水氮耦合效应较单独提升灌水量和施氮量有助于植株氮素的转运。

表 3 不同处理各器官氮转运量

Tab.3 Transformation of nitrogen in different organs under different treatments kg/hm²

处理	茎	叶	穗叶	合计
N0W1	10.34 ^e	16.80 ^e	1.94 ^b	29.08 ^f
N1W1	19.23 ^d	28.43 ^d	2.47 ^{ab}	50.13 ^e
N2W1	35.21 ^{ab}	40.01 ^b	2.73 ^{ab}	77.95 ^c
N3W1	26.88 ^{bc}	32.72 ^c	3.52 ^{ab}	63.12 ^d
N0W2	12.88 ^e	21.10 ^e	1.20 ^b	35.18 ^f
N1W2	24.04 ^c	39.79 ^b	4.49 ^{ab}	68.32 ^{cd}
N2W2	41.21 ^a	51.48 ^a	5.42 ^{ab}	98.11 ^a
N3W2	37.01 ^{ab}	46.70 ^{ab}	5.49 ^{ab}	89.20 ^b
N0W3	12.04 ^e	20.18 ^{de}	2.68 ^{ab}	34.90 ^f
N1W3	17.61 ^{de}	38.59 ^{bc}	5.71 ^{ab}	61.91 ^d
N2W3	32.52 ^b	47.57 ^{ab}	7.13 ^a	87.22 ^b
N3W3	26.08 ^{bc}	40.25 ^b	7.85 ^a	74.18 ^c

2.2.3 水氮耦合条件下玉米各器官氮素籽粒贡献率

图 3 为玉米各器官氮素籽粒贡献率。从图中可以看出,同一处理不同器官氮素籽粒贡献率由大到小依次为叶、茎、穗叶,茎、叶、穗叶及整株玉米的氮素籽粒贡献率在 6.50% ~ 18.86%、10.57% ~ 23.56%、1.22% ~ 3.87% 及 18.29% ~ 44.29% 之间。同一灌水水平下,茎、叶氮素籽粒贡献率随施氮量的增加呈先增后减的趋势,贡献率最大值均出现在中等施氮水平,与氮素转运量的规律类似,叶由大到小依次为 N2、N3、N1、N0,茎由大到小依次为 N2、N1、N3、N0。各处理之间穗叶的氮素籽粒贡献率相差不大,同一灌水量下,N3 处理的氮素籽粒贡献率最大,N0 处理最小。相同施氮量的前提下,茎、叶转运率随灌水量的增加先增加后减小,同一施氮水平下,灌水量 W2 时的氮素转运率最大。N2W2 处理整株玉米氮素籽粒贡献率与 N3W2 接近,较 N2W1、N3W1、N2W3、N3W3 处理提升 42.33%、10.12%、19.76%、22.35%,水氮耦合效应对玉米茎、叶以及整株玉米的氮素籽粒贡献率的提高更为明显。

2.3 水氮耦合条件下玉米肥料氮和土壤氮的累积与转运

2.3.1 水氮耦合条件下玉米肥料氮累积量

表 4 为吐丝期和成熟期玉米各器官肥料氮累积量,总体上,吐丝期、成熟期茎、叶的肥料氮累积量随着施氮量的增加呈现先增后减的趋势,穗叶氮素累积量随着施氮量的增加而增加,吐丝期、成熟期灌水量相同时,中等施氮量下茎、叶肥料氮累积量最高。

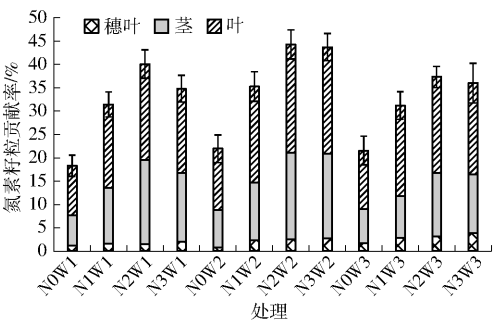


图 3 玉米不同器官氮素籽粒贡献率

Fig.3 Contribution rate of nitrogen in different organs of maize

相同施氮量条件下,随着灌水量变化吐丝期和成熟期茎、叶肥料氮累积量由大到小依次为 W2、W3、W1。吐丝期,中等施氮条件下 W2、W3 处理茎肥料氮累积量与 W1 处理差异显著($P < 0.05$)。施氮量相同时,吐丝期叶肥料氮累积量随着随着灌水量不同呈现显著差异($P < 0.05$)。成熟期,同一施氮量茎肥料氮累积量未表现出差异。当施氮量为 180 kg/hm²和 240 kg/hm²时,叶在 W2、W3 水平下的肥料氮累积量与 W1 水平下的累积量差异显著($P < 0.05$)。吐丝期叶的肥料氮累积量最高,穗叶最小,成熟期籽粒的肥料氮累积量最高。吐丝期,灌水量相同时 N2 条件下茎、叶的肥料氮累积量最高,茎在 N2 和 N3 水平下的累积量无差异,而 N2 与 N1 差异显著($P < 0.05$);灌水量相同时各施氮水平下的叶肥料氮累积量差异显著($P < 0.05$),至成熟期后这种差异性消失,但茎、叶¹⁵N 的累积量仍以 N2 水平下最高。

表 4 吐丝期、成熟期肥料氮累积量

Tab.4 Accumulation of ¹⁵N at silking and maturity stage

处理	吐丝期			成熟期			
	茎	叶	穗叶	茎	叶	穗叶	籽粒
N1W1	6.11 ^d	15.71 ^f	3.77 ^a	2.11 ^b	9.09 ^c	3.15 ^a	38.97 ^e
N2W1	12.89 ^{bc}	25.11 ^d	4.39 ^a	2.49 ^b	11.07 ^b	3.28 ^a	56.70 ^c
N3W1	10.80 ^c	19.33 ^e	4.62 ^a	2.38 ^b	9.60 ^{bc}	3.61 ^a	48.22 ^d
N1W2	10.27 ^{bc}	23.43 ^d	4.57 ^a	2.88 ^b	10.66 ^b	3.30 ^a	51.56 ^{cd}
N2W2	21.20 ^a	38.48 ^a	5.70 ^a	4.92 ^{ab}	18.32 ^a	3.43 ^a	80.45 ^a
N3W2	18.91 ^{ab}	33.14 ^c	5.99 ^a	3.52 ^{ab}	15.82 ^{ab}	3.88 ^a	67.98 ^b
N1W3	9.65 ^d	22.73 ^e	4.52 ^a	4.34 ^{ab}	10.43 ^{ab}	3.29 ^a	46.94 ^d
N2W3	16.43 ^b	33.68 ^b	5.58 ^a	5.90 ^a	16.84 ^a	3.48 ^a	67.46 ^b
N3W3	14.51 ^b	25.90 ^d	6.04 ^a	5.05 ^{ab}	12.66 ^{ab}	4.48 ^a	56.02 ^c

2.3.2 水氮耦合条件下玉米肥料氮和土壤氮转运量

表 5 为吐丝期至成熟期玉米各器官¹⁵N 转运量和土壤氮转运量。由表 5 可知,参与转运的氮素中土壤氮转运量大于肥料氮转运量。玉米各器官¹⁵N 转运量和土壤氮转运量由大到小均依次为叶、茎、穗叶,N2W2 处理茎、叶两种来源氮素的转运量最高,

N1W1 处理 3 种器官转运量均最低。穗叶中肥料氮转运量随施氮量增加而减小,而土壤氮转运量随着施氮量的增加呈递增趋势,且高水高氮处理土壤氮转运量较低水低氮处理增加明显。相同灌水量的前提下,N3 较 N2 处理间茎¹⁵N 转运量有所降低,但差异不大,而土壤氮转运量却出现差异 ($P < 0.05$); N1 和 N2 水平下叶中肥料氮和土壤氮转运量均呈显著差异 ($P < 0.05$)。茎、叶肥料氮转运量随灌水量的增大先增大后减小,由大到小依次为 W2、W3、W1,而茎中土壤氮转运量由大到小依次为 W2、W1、W3。N2W2 处理各器官在向籽粒转运较高肥料氮的同时,也能保证较高的土壤氮转运量,说明适宜的水氮配比可以促进营养器官中肥料氮和土壤氮向籽粒转移。

表 5 吐丝期至成熟期不同器官肥料氮、土壤氮转运量

Tab.5 Transportation of fertilizer nitrogen and soil nitrogen in different organs from silking stage to maturity stage						
处理	kg/hm ²			kg/hm ²		
	肥料氮			土壤氮		
	茎	叶	穗叶	茎	叶	穗叶
N1W1	4.00 ^d	6.62 ^e	0.62 ^a	15.23 ^{cd}	21.80 ^c	1.84 ^b
N2W1	10.40 ^b	14.04 ^{bc}	1.11 ^a	24.82 ^a	25.97 ^b	1.72 ^b
N3W1	8.42 ^{bc}	9.73 ^d	1.01 ^a	18.46 ^{bc}	22.99 ^{bc}	2.42 ^{ab}
N1W2	7.39 ^c	12.77 ^{cd}	1.27 ^a	16.65 ^c	27.02 ^b	3.21 ^{ab}
N2W2	16.28 ^a	20.16 ^a	2.27 ^a	24.93 ^a	31.32 ^a	3.35 ^{ab}
N3W2	15.39 ^a	17.32 ^{ab}	2.11 ^a	21.62 ^b	29.38 ^{ab}	3.38 ^{ab}
N1W3	5.31 ^{cd}	12.30 ^{cd}	1.23 ^a	12.30 ^d	26.28 ^b	4.48 ^{ab}
N2W3	10.53 ^b	16.84 ^b	2.10 ^a	20.99 ^b	30.73 ^a	5.03 ^a
N3W3	9.46 ^{bc}	13.24 ^c	1.56 ^a	16.62 ^c	27.02 ^b	6.28 ^a

图 4 为不同处理器官茎、叶、穗叶和植株氮素转运量中肥料氮和土壤氮的占比,即氮素籽粒贡献率

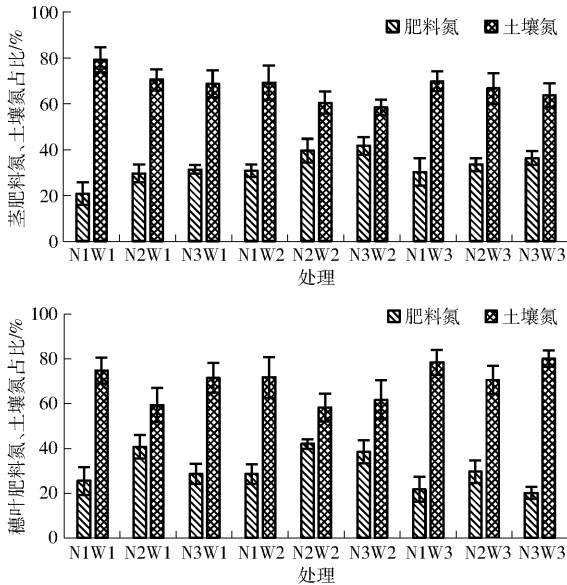


图 4 不同器官肥料氮和土壤氮转运量占比

中肥料氮和土壤氮分别占的比例。从图中可以看出,参与转运的氮素中土壤氮的比例高于肥料氮的比例,参与转运的氮素中茎、叶、穗叶分别有 24.71% ~ 42.44%、25.80% ~ 42.04%、23.39% ~ 41.83% 来自肥料,整株玉米植株中参与转运的氮素有 22.43% ~ 39.45% 来自肥料,说明参与转运的氮素主要来自于土壤,同一灌水水平下中、高施氮处理肥料氮所占比例较低施氮处理均有提高。随着施氮量增加,茎转运量中肥料氮比例呈递增的趋势,叶、穗叶的比例由大到小依次为 N2、N3、N1,说明施氮可以提高肥料氮对籽粒氮素贡献率。各个施氮水平下茎、叶、穗叶肥料氮对籽粒贡献率均表现为中等灌水量时最大,高灌水量次之,低灌水量时最小。叶、穗叶、植株肥料氮籽粒贡献率最大的处理为 N2W2,茎最大的处理为 N3W2,而 N1W1 处理各个器官肥料氮籽粒贡献率均最低。

2.3.3 水氮耦合条件下玉米的氮肥利用率

由图 5 所示,氮肥回收率在 21.27% ~ 44.64% 之间,N2W2 处理的氮肥回收率最高,N3W1 处理的氮肥回收率最低,氮肥回收率随着施氮量的增加先增后减,同一灌水水平下,高施氮量处理氮肥回收率最低,造成氮肥的大量损失。氮肥回收率随灌水量的提高也呈先增后减的趋势,中等灌水水平下氮肥回收率最高,而 W3 水平下氮肥回收率较 W1 也有一定程度的提高,说明提高灌水量可以促进玉米对氮肥的吸收,而适宜的水氮组合能有效提高氮肥的回收率,同时避免了盲目灌水施肥所造成的浪费。

3 讨论

干物质累积是产量形成的基础,而玉米干物质

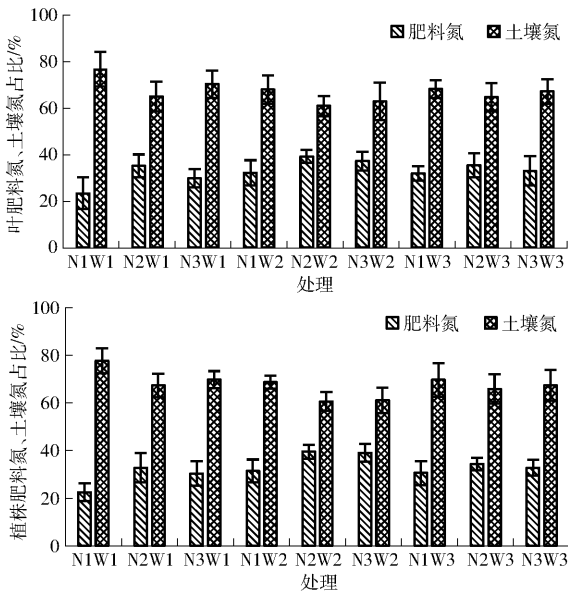


Fig.4 Transportation of fertilizer and soil share of fertilizer in different organs

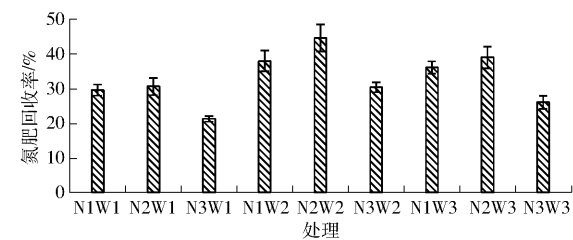


图5 氮肥回收率
Fig. 5 Nitrogen recovery rate

积累对不同水肥条件具有高度的响应效应^[16-17]。进入拔节期后,玉米将由营养生长期进入营养生长和生殖生长并进期,不同器官干物质积累量分布随生长中心而变化,抽雄吐丝后籽粒干物质积累量迅速增加^[18]。本试验研究发现,拔节期后各时期灌水量相同时均为 N2 水平下的干物质积累量最高,说明拔节期后水氮耦合效应优势开始出现,这可能是因为拔节期灌水和追施氮肥后,增加了叶片单位面积叶绿素的相对含量(SPAD 值),叶片的光合作用强度进一步提高,适宜的施氮灌水处理光合产物积累量优势明显。N0 条件下不同灌水定额下的干物质积累量差别不大,同时 N3 处理的干物质积累量低于 N2,说明在 W1、W2、W3 灌水水平下,施氮量 N3 为过量施氮,并不有利于干物质积累。

玉米籽粒干物质主要来源于营养器官所积累的干物质向籽粒的转运和吐丝后光合产物累积,在适当范围内促进营养器官干物质的转移是提高玉米籽粒干物质质量的途径之一^[19]。本试验中不同处理各器官籽粒贡献率为 11%~34%,说明籽粒干物质中有 66%~89% 来源于吐丝期后的同化产物,且后者为籽粒干物质的主要来源,这与钱春荣等^[20]的研究结果相近。本试验中,施氮处理干物质转运量、转运率和籽粒贡献率均高于未施氮处理,N2 处理转运率和籽粒贡献率又高于其他施氮处理。结合不同施氮量下玉米干物质累积特征,说明施加氮肥不仅可以促进玉米植株干物质的累积,还能促进干物质由营养器官向生殖器官转移,而施氮量 240 kg/hm² 时,不仅能促进营养生长阶段玉米在茎、叶等营养器官中积累更多的干物质,并以此作为“源”,在生殖生长阶段更多的向籽粒转移,为籽粒形成提供物质基础。3 种器官干物质转运量、转运率和籽粒贡献率随灌水量变化的规律相同,W2 水平下干物质转运量和籽粒贡献率较 W1、W3 均有提升。这说明适宜的施氮量可以促进植株干物质的积累和转移、施氮条件下适宜的灌水量可以促进植株干物质的转运,而且合理的水氮对比对玉米干物质积累量、转运量和籽粒贡献率的提升具有明显的促进作用。

玉米籽粒中氮素来源于抽雄前期营养器官氮素

的转移和根系对氮的直接吸收^[11]。本试验研究结果表明,在生育前期,玉米氮素累积以叶和茎为主,叶氮素累积量明显高于茎和穗叶,生育后期以籽粒氮素累积为主,籽粒氮素累积量有 18.91%~44.29% 来源于营养器官的转运。整株玉米的氮素累积量、转运量和籽粒贡献率均以 W2 处理最大,且不同灌水处理籽粒氮素累积量差异显著,同时灌水量 60 mm、施氮量 240 kg/hm² 时,植株和籽粒氮素累积量、植株氮素转运量和籽粒贡献率均达到最优,较施氮 180、300 kg/hm² 时均有提高,这是因为在适宜的水肥用量和水肥配比条件下,在生育前期玉米营养器官中积累了大量的氮素,在满足较高氮素转运量的同时,也保证了生育后期玉米叶片能够进行正常的光合作用,保障了玉米在生殖生长阶段仍保持较强的同化能力。王振华等^[21]对水氮耦合条件下油葵氮素吸收的研究也表明,中水中氮灌溉施肥条件下的各器官氮素累积,叶片茎秆氮素转运量均达到最佳,在一定范围内增施氮肥和灌水量可以促进各器官氮素的累积以及叶片和茎秆氮素向花盘的转运。战秀梅等^[22]的研究也指出,适宜的氮、磷、钾用量及其配比,能有效提高植株体内氮素营养的再利用程度,同时促进了籽粒的发育,满足了其对养分的需求,且使得氮素营养能够较多地分配到籽粒中,也有利于产量的提升。

王俊忠等^[23]的研究指出,在高产田当施氮量超过 300 kg/hm² 时,玉米籽粒和叶片中肥料氮累积量有所下降,而茎和根中¹⁵N 随施氮量的增加而增加。本试验的研究结果显示,成熟期¹⁵N 标记的肥料氮累积量在 53.32~105.12 kg/hm² 之间。不同施氮、灌水条件下茎、叶、籽粒以及植株的肥料氮累积量变化趋势与植株含氮量的变化趋势一致,随着施氮量或灌水量的增加呈现先增后减的趋势,且中等灌水中等施氮处理的肥料氮累积量最高。这可能是因为玉米品种的不同导致的试验结果不同。王俊忠等^[23]还指出,各个器官¹⁵N 积累量由大到小依次为籽粒、叶片、茎、叶鞘、穗轴,这与本试验的研究结果一致。本试验利用同位素示踪技术,在不同水氮耦合条件下,在探究玉米氮素吸收利用规律的同时,分析了植株氮、肥料氮、土壤氮之间的转运规律。结果表明,中等灌水中等施氮处理植株氮转运量、肥料氮转运量和土壤氮转运量均达到最大值。N2W2 处理肥料氮累积量、氮肥回收率、干物质籽粒贡献率和氮素籽粒贡献率均最高。结合以上分析,适宜的水氮组合可以促进玉米干物质积累与转运以及玉米对肥料氮和土壤氮素的吸收利用。

4 结论

(1)不同水氮耦合模式下玉米干物质质量、不同器官干物质转运量、转运率以及茎和叶的干物质籽粒贡献率均随施氮量和灌水量的增加呈先增后减的趋势。各器官干物质转运量和干物质籽粒贡献率由大到小依次为茎、叶、穗叶,穗叶的干物质转运率最高,N2W2 处理干物质转运量最高,干物质籽粒贡献率达到 34%。

(2)整株植株和茎、叶的氮素累积量、转运量和氮素籽粒贡献率随灌水量和施氮量的增加先增加后减小,而籽粒氮素累积量随灌水量由大到小依次为

W3、W2、W1。施氮 240 kg/hm²、灌水 60 mm 时,植株氮素累积量、转运量和氮素籽粒贡献率均最高。

(3)成熟期叶和籽粒的肥料氮累积量随着施氮量和灌水量的增加呈先增后减的趋势,茎的肥料氮累积量随灌水量的增加而增加。参与转运的肥料氮的转运量占氮素转运量的 22.43% ~ 39.45%,土壤氮转运量占氮素转运量的 61.55% ~ 77.57%,N2W2 处理肥料氮累积量以及参与转运的肥料氮和土壤氮均达到最高水平。

(4)氮肥回收率在 21.27% ~ 44.64% 之间,获得较高氮肥回收率的施氮量由大到小依次为 N2、N1、N3,灌水量由大到小依次为 W2、W3、W1。

参 考 文 献

[1] 张忠学,陈帅宏,陈鹏,等. 基于¹⁵N 示踪技术的不同灌水方案玉米追肥氮素去向研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):262-272.
ZHANG Zhongxue, CHEN Shuaihong, CHEN Peng, et al. Fate of maize topdressing nitrogen under different irrigation schemes based on ¹⁵N tracer technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 262-272. http://www.j-sam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181232&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.032. (in Chinese)

[2] 夏来坤,陶洪斌,王璞,等. 施氮期对夏玉米氮素积累运移及氮肥利用的影响[J]. 玉米科学,2011,19(1):112-116.
XIA Laikun, TAO Hongbin, WANG Pu, et al. Effects of nitrogen application period on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(1): 112-116. (in Chinese)

[3] 漆栋良,胡田田. 灌水施氮方式对玉米生育期土壤 NO₃⁻-N 时空分布的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):279-287.
QI Dongliang, HU Tiantian. Effects of different nitrogen supply and irrigation methods on spatial-temporal distribution of soil nitrate nitrogen during maize growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 279-287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170237&journal_id=jcsam. DOI: 6041/j.issn.1000-1298.2017.02.037. (in Chinese)

[4] HOWARTH R W. Coastal nitrogen pollution: a review of sources and trends globally and regionally[J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 14-20.

[5] 王小彬,蔡典雄,张镜清,等. 旱地玉米 N 吸收及其 N 肥利用率研究[J]. 中国农业科学,2001,34(2):179-186.
WANG Xiaobin, CAI Dianxiong, ZHANG Jingqing, et al. Nitrogen uptake by corn and N recovery in grain in dry farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(2): 179-186. (in Chinese)

[6] 张馨月,王寅,张灿,等. 吐丝期自然干旱条件下灌水和施氮对玉米产量及氮素吸收的影响[J]. 玉米科学,2018,26(1):120-126.
ZHANG Xinyue, WANG Yin, ZHANG Can, et al. Responses of maize yield and N uptake to irrigation and N fertilizer under natural drought at silking stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(1): 120-126. (in Chinese)

[7] 尹彩侠,李前,孔丽丽,等. 控释氮肥减施对春玉米产量、氮素吸收及转运的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(20):3941-3950.
YIN Caixia, LI Qian, KONG Lili, et al. Effect of reduced controlled-release nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and transportation of spring maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3941-3950. (in Chinese)

[8] 李媛媛,杨恒山,范秀艳,等. 不同施氮水平对春玉米伟科 702 干物质积累及转运的影响[J]. 华北农学报,2016,31(5):228-232.
LI Yuanyuan, YANG Hengshan, FAN Xiuyan, et al. Effects of different nitrogen levels on dry matter accumulation and transportation of spring maize Weike 702[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(5): 228-232. (in Chinese)

[9] 戴明宏,陶洪斌,王利纳,等. 不同氮肥管理对春玉米干物质生产、分配及转运的影响[J]. 华北农学报,2008,23(1):154-157.
DAI Minghong, TAO Hongbin, WANG Li'na, et al. Effects of different nitrogen managements on dry matter accumulation, partition and transportation of spring maize(*Zea mays* L.) [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(1): 154-157. (in Chinese)

[10] 易镇邪,王璞,刘明,等. 不同类型氮肥与施氮量下夏玉米水、氮利用及土壤氮素表观盈亏[J]. 水土保持学报,2006,20(1):63-67.
YI Zhenxie, WANG Pu, LIU Ming, et al. Water and nitrogen utilization and apparent budget of soil nitrogen under different types of nitrogen fertilizer and different application rates in summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 63-67. (in Chinese)

- [11] 徐明杰,张琳,汪新颖,等. 不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):36-45.
XU Mingjie, ZHANG Lin, WANG Xinying, et al. Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(1):36-45. (in Chinese)
- [12] WANG H, MCCAIG T N, DEPAUW R M, et al. Physiological characteristics of recent Canada western red spring wheat cultivars: components of grain nitrogen yield[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2003, 83(4):699-707.
- [13] HASHIM M M, YUSOP M K, OTHMAN R, et al. Characterization of nitrogen uptake pattern in Malaysian rice MR219 at different growth stages using ^{15}N isotope[J]. Rice Science, 2015, 22(5):250-254.
- [14] 张忠学,张世伟,郭丹丹,等. 玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):206-214.
ZHANG Zhongxue, ZHANG Shiwei, GUO Dandan, et al. Coupling effects of different water and fertilizer conditions and optimization of water and fertilizer schemes on maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):206-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170926&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.026. (in Chinese)
- [15] 杨国虎,李建生,罗湘宁,等. 干旱条件下玉米叶面积变化及地上干物质积累与分配的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(5):27-32.
YANG Guohu, LI Jiansheng, LUO Xiangning, et al. Studies on leaf area change and above-ground dry material accumulation and distribution of maize in different droughts[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2005, 33(5):27-32. (in Chinese)
- [16] 景立权,赵福成,刘萍,等. 施氮对超高产夏玉米干物质及光合特性的影响[J]. 核农学报,2014,28(2):317-326.
JING Liquan, ZHAO Fucheng, LIU Ping, et al. Effects of nitrogen treatments on dry matter production and photosynthetic characteristics of summer maize (*Zea mays* L.) under super-high yield conditions[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2014, 28(2):317-326. (in Chinese)
- [17] ABOLHASSAN M, HERBERT S J, PUTNAM D H. Yield response of corn to crowding stress[J]. Agron, 2005, 97(3):839-846.
- [18] 刘克礼,刘景辉. 春玉米干物质积累、分配与转移规律的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报,1994,15(1):1-10.
LIU Keli, LIU Jinghui. A study on the regularity of accumulation, distribution and translation of dry matter in spring maize[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 1994, 15(1):1-10. (in Chinese)
- [19] 宋凤斌,童淑媛. 不同株型玉米的干物质积累、分配及转运特征[J]. 江苏农业学报,2010,26(4):700-705.
SONG Fengbin, TONG Shuyuan. Characteristics of dry matter accumulation, distribution and translocation in maize with different plant types[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2010, 26(4):700-705. (in Chinese)
- [20] 钱春荣,王荣焕,赵久然,等. 不同熟期玉米干物质积累、分配与转运特征[J]. 生态学杂志,2017,36(8):2177-2183.
QIAN Chunrong, WANG Ronghuan, ZHAO Jiuran, et al. Characteristics of accumulation, distribution and translocation of dry matter in maize hybrids differing in maturity duration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(8):2177-2183. (in Chinese)
- [21] 王振华,权双双,郑旭荣,等. 水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):91-100.
WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):91-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013. (in Chinese)
- [22] 战秀梅,邹殿博,韩晓日,等. 不同施肥处理对春玉米氮素累积特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2010,41(5):545-549.
ZHAN Xiumei, ZOU Dianbo, HAN Xiaori, et al. Effects of different fertilization on nitrogen accumulation characteristics of spring maize[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(5):545-549. (in Chinese)
- [23] 王俊忠,黄高宝,张超男,等. 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[J]. 生态学报,2009,29(4):2045-2052.
WANG Junzhong, HUANG Gaobao, ZHANG Chaonan, et al. Influence of nitrogen fertilizer rate on carbon-nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize under high and medium yield levels[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4):2045-2052. (in Chinese)