

doi : 10.11838/sfsc.1673-6257.19349

不同滴灌施肥量对沙地玉米氮效率及硝态氮的影响

李娟娟¹, 李利敏², 马理辉^{3*}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 探索沙地春玉米最佳滴灌施肥方案是提高其生育期氮积累和氮效率的有效途径。试验采用三因素 D 饱和最优设计, 研究拔节期、抽雄期和收获期玉米产量、生育期植株不同器官氮积累和硝态氮含量的差异, 结果表明: (1) 随着玉米生育期推进, 整株氮积累逐渐增加, 叶片、茎下降, 籽粒增加, 高氮处理 (氮肥 240 kg · hm⁻²) 显著高于其他处理; (2) N₃P₁K₃ 处理产量最高 (13 875 kg · hm⁻²), 氮素转运量和营养器官贡献率显著高于其它处理, 氮收获指数和氮肥偏生产力较低; (3) 土壤硝态氮含量随植株生长吸收逐渐降低, 以滴头处 0 ~ 20 cm 硝态氮含量最高, 20 ~ 60 cm 逐渐降低; (4) 不同施氮处理的硝态氮含量有差异, 拔节期施肥处理均与 CK 差异显著, 抽雄期和收获期中氮处理和高氮处理对硝态氮影响显著。高氮处理中土壤 0 ~ 60 cm 硝态氮含量与播前基本一致, 维持了土壤硝态氮的平衡。综合考虑产量、氮效率及土壤硝态氮平衡方面的因素, 膜下滴灌条件下, 陕北风沙滩地玉米合理的施肥为 N₃P₁K₃ 处理, 即施氮肥 240 kg · hm⁻², 磷肥 80 kg · hm⁻², 钾肥 225 kg · hm⁻²。

关键词: 玉米; 滴灌; 氮效率; 硝态氮

玉米是我国产量最高的重要的粮食作物, 作为陕北主要的粮食作物, 玉米种植面积不断扩大^[1]。由于陕北地处半干旱偏旱地区, 降水少且时间分布不均, 沙地土质特征保水保肥性差, 当地农民为追求高产盲目施肥, 造成肥料施用结构不合理, 利用率低下, 产生深层渗漏, 对环境和粮食安全生产带来隐患。

前人就滴灌条件下不同施氮量对玉米产量、氮肥利用效率和土壤硝态氮的影响进行了较多的研究报道^[2-12]。郭丙玉等^[5] 在新疆研究发现, 最佳经济施氮量时, 氮素偏生产力和氮肥利用率分别达 N 122 kg · hm⁻² 和 45.0%。Tsai 等^[4] 试验结果表明, 中氮处理下 (268 kg · hm⁻²) 氮利用效率最大。张鹏飞等^[8] 研究发现追施氮肥 120 kg · hm⁻², 并在 30%、60%、100% 叶龄指数时期氮肥追施比例为 3 5 2 时可对玉米氮素的吸收积累与分配起

到良好的调控作用, 使玉米在生育中后期各营养器官氮素含量仍维持较高水平, 同时减少农田中 0 ~ 100 cm 土层无机氮残留量。

谭华等^[9] 试验结果表明, 水肥一体滴灌玉米随灌水量和施氮量增加氮素利用率增加, 超过限值则降低。郭丽等^[10] 研究发现, 在 0 ~ 100 cm 土层范围内, 施氮处理的土壤硝态氮含量均表现为随土层加深逐渐降低。王爽等^[12] 研究表明, 0 ~ 80 cm 土层硝态氮积累量随氮肥施用量的增加而显著增加, 不同的施氮量对土壤铵态氮含量的影响主要在 0 ~ 20 cm 土层。

当前研究主要集中在不同地区不同施氮量对玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮的影响, 对沙地滴灌条件下的相关研究鲜见报道。通过研究在沙地滴灌条件下, 不同施肥对玉米氮素利用及施氮量对硝态氮的影响, 旨在确定滴灌条件下沙地春玉米最佳施肥量及氮素利用效率, 为当地春玉米滴灌施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究于 2017 年 5 月至 10 月在陕西神木进行, 该试验地区位于毛乌素沙漠与黄土丘陵区过渡地带, 东经 110°51'、北纬 38°83', 年平

收稿日期: 2019-07-31; 录用日期: 2019-11-24

基金项目: 山地果园水肥协同与设施农业沼液灌溉技术创新研究与示范 (2018CX-14); 沙地枸杞滴灌水肥一体化技术与示范。

作者简介: 李娟娟 (1993-), 女, 甘肃天水人, 硕士, 主要从事水土资源高效利用方面的研究, E-mail: lijuanjuangq@163.com; 并列第一作者李利敏 (1977-), 女, 河南济源人, 实验师, 博士, 主要从事植物铁营养及铁肥开发研究, E-mail: liliminamy@163.com。

通讯作者: 马理辉, E-mail: 394534275@qq.com。

均日照 2 875.9 h，年平均气温 8.9℃，10℃以下天数 195 d 左右，0℃以下天数 115 d 左右，无霜期 169 d。平均年降水量 421.2 mm，年蒸发量为 1 336.6 mm。

试验土壤为风沙土，土质疏松。0 ~ 20 cm 耕层土壤的基本性状为：有机质为 5.57 g · kg⁻¹，硝态氮为 15.96 mg · kg⁻¹，有效磷为 13.85 mg · kg⁻¹，速效钾为 81 mg · kg⁻¹，pH 值为 8.0。

1.2 试验材料与设计

供试作物为“榆单 1 号”春玉米，2017 年 5 月 1 日播种，9 月 28 日收获，全生育期 151 d。本试验所选用的化肥种类及有效含量为：氮肥为尿素，含 N 46.4%；磷肥为过磷酸钙，含 P₂O₅ 12%；钾肥为硫酸钾，含 K₂O 52%。采用膜下滴灌的方式，地膜为聚乙烯薄膜，宽 1.2 m，厚度 0.008 mm。滴灌施肥系统由水源、水泵、首部 and 输配水管道系统等组成。灌溉水源来自于地下水，管网由支管和毛管组成。滴灌带滴头间距 30 cm，滴头流量 2.0 L · h⁻¹，滴头工作压力 0.1 MPa。

试验采用三因素 D 饱和最优设计，共 10 个处理，3 个重复。根据统计学，将 3 因素分别安排在结构矩阵 x1、x2、x3 列上，水平编码值对应自然变量，施肥用量的上下限极差如表 1，试验设计方案见表 2。

田间采用随机区组排列的方式，小区大小为 24 m² (4 m × 6 m)，行距 55 cm，株间距 24 cm，种植密度为 59 970 株 · hm⁻²。播种时施入全部的磷肥和钾肥，20% 的氮肥，施肥方式为土施。拔节期和抽穗期各追氮肥 40%；追肥时将设置的各个处理所需氮肥溶解在施肥罐中，开启水泵施入，拔节期、抽穗期分别灌水 300 m³ · hm⁻²。试验采用膜下穴播，镇压后进行土壤封闭除草、覆膜。待玉米出苗后进行间苗，保证每穴一株。其它田间管理均与当地农民习惯保持一致。

表 1 氮、磷、钾肥料用量的上、下限 (kg · hm⁻²)

肥料	上限	下限	级差
N	240	0	120.0
P ₂ O ₅	225	0	112.5
K ₂ O	225	0	112.5

表 2 三因素 D 饱和最优设计方案和施肥量

处理	水平编码值			施肥量 (kg · hm ⁻²)		
	X1	X2	X3	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	-1	-1	-1	0	0	0
N ₃ P ₀ K ₀	1	-1	-1	240	0	0
N ₀ P ₃ K ₀	-1	1	-1	0	225	0
N ₀ P ₀ K ₃	-1	-1	1	0	0	225
N ₀ P ₂ K ₂	-1	0.192 5	0.192 5	0	134	134
N ₂ P ₀ K ₂	0.192 5	-1	0.192 5	143	0	134
N ₂ P ₂ K ₀	0.192 5	0.192 5	-1	143	134	0
N ₁ P ₃ K ₃	-0.291 2	1	1	85	225	225
N ₃ P ₁ K ₃	1	-0.291 2	1	240	80	225
N ₃ P ₃ K ₁	1	1	-0.291 2	240	225	80

1.3 测定项目与方法

玉米播种前，试验田取 0 ~ 20 cm 耕层土壤，按常规法测定土壤的基本理化性质^[13]。pH 值用 pH 计测读 (水土比为 2.5 : 1)；有机质用重铬酸钾氧化外加加热法测定。有效磷用 0.50 mol · L⁻¹ NaHCO₃ 浸提，钼锑抗比色法测定；速效钾用 1 mol · L⁻¹ 醋酸铵浸提，火焰光度法测定。

全氮含量的测定：在拔节期、抽穗期、收获期，每个小区选取长势均匀的两株植株，将所选取植株从茎基部与地下部分分离，分为叶片、叶鞘、茎秆、籽粒等，放入烘箱，将温度设定在 105℃，杀青 0.5 ~ 2 h，控温至 75 ~ 80℃ 将植物样烘干至恒重，将植物样放入干燥器中冷却至室温，称重。将封存的玉米生育期各部分样品，粉碎磨细过筛，H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后使用定氮仪测得植株各部分的全氮含量。

土壤硝态氮测定：在拔节期、抽穗期和收获期，分别在滴头处、垂直于滴灌带距滴头 15、30 cm 处取土样，分别记为 A、B、C 3 点，测定深度分为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm，风干后磨细过筛，1 mol · L⁻¹ KCl 浸提，用 AA3 型流动分析仪测定。

在施肥对土壤硝态氮的影响分析中，分为施氮处理和不施氮处理，K₃、P₃ 和 N₀P₂K₂ 3 个处理为磷钾配施处理，取其均值；低氮处理为 N₁P₃K₃

处理；中氮处理取 $N_2P_0K_2$ 和 $N_2P_2K_0$ 两个处理的均值；高氮处理取 $N_3P_1K_3$ 、 $N_3P_3K_1$ 和 N_3 3 个处理的均值。

1.4 统计方法

试验数据采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 统计软件处理。

1.5 有关统计指标与计算方法

氮素积累量 ($kg \cdot hm^{-2}$) = 非收获物干重 \times 非收获物养分含量 + 收获物干重 \times 收获物养分含量

氮素收获指数 (%) = 籽粒氮素积累量 / 植株总氮素积累量 $\times 100$

营养器官氮素贡献率 (%) = 营养器官氮素运转量 / 成熟期籽粒氮素积累量 $\times 100$

籽粒产量需氮量 ($kg \cdot t^{-1}$) = 植株地上部分氮素养分积累量 / 产量 $\times 1000$

偏生产力 ($kg \cdot kg^{-1}$) = 施氮区产量 / 施氮量

转运量 ($kg \cdot kg^{-1}$) = 抽雄时期营养体氮素积累量 - 成熟期营养体氮素滞留量

2 结果与分析

2.1 生育期整株氮积累变化

如表 3 所示，生育期玉米整株氮积累呈现逐渐增加的趋势。拔节期除 K_3 、 $N_0P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_0$ 处理外其余处理与 CK 差异显著； $N_3P_3K_1$ 处理氮积累量最大，增加 76.84%；其次是 N_3 处理，增加 45.77%；

表 3 生育期整株氮积累变化 ($kg \cdot hm^{-2}$)

处理	拔节期	抽雄期	收获期
CK	37.64 \pm 0.77f	83.20 \pm 4.92c	130.34 \pm 0.50e
N_3	54.87 \pm 0.06b	169.41 \pm 5.08a	188.65 \pm 6.70cd
P_3	47.36 \pm 0.25cde	118.86 \pm 3.04bc	158.68 \pm 5.21de
K_3	39.25 \pm 2.16f	103.72 \pm 3.70c	180.04 \pm 4.02cd
$N_0P_2K_2$	41.96 \pm 0.63ef	121.33 \pm 3.37bc	162.62 \pm 8.95de
$N_2P_0K_2$	45.21 \pm 0.17de	155.95 \pm 6.54ab	235.51 \pm 5.97ab
$N_2P_2K_0$	42.29 \pm 1.27df	150.65 \pm 1.30ab	205.34 \pm 0.90bc
$N_1P_3K_3$	48.44 \pm 0.18cd	157.37 \pm 2.76ab	191.21 \pm 9.73cd
$N_3P_1K_3$	50.90 \pm 0.82bc	180.32 \pm 3.07a	241.30 \pm 4.58a
$N_3P_3K_1$	66.56 \pm 1.74a	184.95 \pm 2.43a	253.71 \pm 7.67a

注：表中数据为 3 次重复的平均值，不同小写字母分别表示经 Duncan's 新复极差检验在 0.05 水平上的差异显著性，下同。

增加最少的是 K_3 处理，仅增加 4.27%。抽雄期植株进入快速生长的阶段，氮素积累迅速增加。除 K_3 、 P_3 、 $N_0P_2K_2$ 处理外其余处理均与 CK 差异显著； $N_3P_3K_1$ 、 $N_3P_1K_3$ 、 N_3 处理增加率均超过了 100%，分别为 122.30%、116.73%、103.62%；增加最少的是 K_3 处理，增加了 24.27%。收获期除 P_3 处理、 $N_0P_2K_2$ 处理外其余处理与 CK 差异显著； $N_3P_3K_1$ 处理氮积累量最大，比 CK 增加 94.65%；增加最少的是 P_3 ，为 21.75%。整体来看，拔节期到抽雄期氮积累增加量较大，在 45.56 ~ 129.42 $kg \cdot hm^{-2}$ 之间；抽雄期到收获期氮积累增加较少，为 19.63 ~ 68.76 $kg \cdot hm^{-2}$ 。

2.2 叶片、茎、籽粒氮积累变化

如表 4 所示，叶片氮积累随生育期逐渐下降。整个生育期，高氮处理 (N_3 、 $N_3P_1K_3$ 和 $N_3P_3K_1$ 处理) 显著高于其它处理。拔节期仅有 K_3 、 $N_0P_2K_2$ 和 $N_2P_2K_0$ 处理与 CK 无显著差异；抽雄期 3 个高氮处理和 $N_2P_2K_0$ 处理与 CK 差异显著；收获期 K_3 、 $N_2P_0K_2$ 、 $N_3P_3K_1$ 处理与 CK 差异显著。拔节期、抽雄期和收获期均以 $N_3P_3K_1$ 处理氮积累量增加最多，分别比 CK 增加 41.53%、71.05% 和 85.29%；以 $N_0P_2K_2$ 处理增加最少，增量分别为 1.11%、2.42% 和 11.74%。

植株茎氮积累变化与叶类似，随生育期逐渐下降。相比 CK，3 个生育期以拔节期增加量最大，为 14.12% ~ 94.65%，其次是抽雄期，增加了 17.57% ~ 66.91%，增加最少的是收获期，5.89% ~ 56.42%。拔节期 $N_0P_2K_2$ 、 $N_3P_1K_3$ 和 $N_3P_3K_1$ 处理与 CK 差异显著；抽雄期仅有 $N_3P_1K_3$ 处理与 CK 差异显著；收获期植株茎氮积累差异性不显著，与 CK 相比， $N_2P_0K_2$ 处理增加最大，其次是 $N_2P_2K_0$ 处理，增加了 54.96%，增加最少的是 P_3 处理。

抽雄期籽粒氮积累量较大，收获期较小；与 CK 相比，抽雄期增加了 11.13% ~ 31.16%；收获期增加量为 2.15% ~ 29.08%。抽雄期各处理之间差异不显著，氮积累量最大的是 $N_3P_3K_1$ 处理，其次是 N_3 处理，增加最少的是 K_3 处理。收获期 K_3 、 $N_2P_0K_2$ 、 $N_3P_3K_1$ 、 $N_3P_1K_3$ 处理与 CK 差异显著； $N_3P_3K_1$ 处理氮积累量最高，其次是 K_3 处理，比 CK 增加了 26.06%，增加最少的是 $N_0P_2K_2$ 处理。

表4 叶、茎、籽粒氮积累量 (g · kg⁻¹)

处理	叶			茎			籽粒	
	拔节期	抽雄期	收获期	拔节期	抽雄期	收获期	抽雄期	收获期
CK	22.12 ± 0.44d	16.18 ± 1.59e	6.00 ± 0.89d	9.05 ± 0.32c	5.82 ± 0.73b	3.50 ± 0.46a	23.32 ± 1.14a	9.98 ± 0.16c
N ₃	29.76 ± 0.07a	26.52 ± 1.38abc	7.77 ± 0.32abcd	14.20 ± 0.66abc	7.80 ± 1.21ab	3.80 ± 0.50a	29.43 ± 2.53a	11.30 ± 0.10bc
P ₃	25.79 ± 0.05b	17.84 ± 1.04cde	7.04 ± 1.51bcd	11.24 ± 0.55bc	6.84 ± 0.28ab	3.71 ± 0.54a	27.55 ± 1.29a	10.33 ± 0.16c
K ₃	22.99 ± 1.10cd	20.28 ± 2.24bcde	9.68 ± 0.24abc	10.33 ± 1.73bc	7.50 ± 0.22ab	4.08 ± 1.37a	25.92 ± 4.76a	12.58 ± 0.12ab
N ₀ P ₂ K ₂	22.37 ± 0.630d	16.57 ± 0.66de	6.70 ± 0.75cd	15.20 ± 2.58ab	6.84 ± 0.19ab	4.24 ± 0.86a	26.30 ± 0.87a	10.20 ± 0.15c
N ₂ P ₀ K ₂	23.88 ± 0.14bcd	20.42 ± 0.62abcde	10.26 ± 0.56ab	12.56 ± 0.28abc	7.62 ± 0.43ab	5.47 ± 0.37a	26.68 ± 2.05a	12.40 ± 0.66ab
N ₂ P ₂ K ₀	23.98 ± 0.74bcd	22.27 ± 0.66abcd	9.32 ± 0.52abcd	12.62 ± 0.29abc	9.21 ± 0.45ab	5.42 ± 0.09a	28.34 ± 0.72a	11.23 ± 0.09bc
N ₁ P ₃ K ₃	25.53 ± 0.02bc	16.79 ± 2.36abcde	9.10 ± 0.99abcd	11.93 ± 0.47bc	9.33 ± 0.67ab	5.32 ± 1.03a	27.96 ± 0.04a	10.59 ± 0.45c
N ₃ P ₁ K ₃	26.05 ± 0.48b	25.70 ± 1.26ab	8.84 ± 0.87abcd	17.62 ± 0.07a	9.71 ± 0.68a	4.80 ± 0.04a	29.37 ± 2.06a	12.46 ± 0.34ab
N ₃ P ₃ K ₁	31.31 ± 0.67a	27.68 ± 0.35a	11.12 ± 1.00a	17.72 ± 1.23a	8.51 ± 1.40ab	4.74 ± 0.75a	30.59 ± 0.91a	12.88 ± 0.18a

2.3 叶、茎、籽粒氮积累占整株比例

如表5所示，氮素在各器官中的分配随生育期发生变化。叶片在整株氮积累量的比例与生育期叶片氮积累变化规律较为一致。拔节期比例最高，抽雄期降低，收获期大多处理降低，少部分升高。拔节期CK叶片氮积累占比例最高，除P₃和N₁P₃K₃

处理外其它处理与CK差异显著；抽雄期叶片氮积累占整株比例显著降低，施氮处理均与CK差异显著，N₃P₁K₃处理最高；收获期除CK、P₃、K₃处理比例略有增大，其余处理均有所降低，各处理间差异不显著。

表5 叶、茎、籽粒氮积累占整株氮积累量比例 (%)

处理	叶			茎			籽粒	
	拔节期	抽雄期	收获期	拔节期	抽雄期	收获期	抽雄期	收获期
CK	71.26a	28.81bc	30.49a	28.74d	15.11a	18.17a	54.93a	51.34a
N ₃	66.79bc	40.45a	33.74a	33.21bc	11.64b	16.38a	47.92a	49.16ab
P ₃	68.82ab	30.35bc	32.27a	31.18cd	13.30ab	17.63a	54.63a	48.62ab
K ₃	67.08bc	27.49c	35.96a	32.92bc	14.86ab	14.83a	51.31a	46.88ab
N ₀ P ₂ K ₂	56.38d	32.06b	30.71a	43.62a	14.01ab	19.48a	54.14a	47.12ab
N ₂ P ₀ K ₂	64.98c	37.67a	36.18a	35.02b	13.30ab	19.29a	47.69a	43.77b
N ₂ P ₂ K ₀	65.65bc	38.99a	35.85a	34.35bc	14.77ab	20.90a	46.49a	43.32b
N ₁ P ₃ K ₃	68.89ab	37.57a	35.73a	31.11cd	16.40a	25.05a	48.34a	41.86b
N ₃ P ₁ K ₃	60.11d	41.82a	33.81a	39.89b	15.11a	18.50a	45.29a	47.59ab
N ₃ P ₃ K ₁	64.88c	39.49a	37.91a	35.12a	14.56ab	16.18a	46.23a	44.22ab

茎氮积累量所占比例变化与生育期茎氮积累规律不一致。拔节期比例最大，抽雄期降低，收获期有所升高。拔节期除P₃、N₁P₃K₃处理，其它处理与CK差异显著，N₀P₂K₂处理茎氮积累量占比例最高；抽雄期茎氮积累量占比例显著下降，仅N₃处理与CK差异显著，K₃处理最高，N₀P₂K₂处理下降幅度最大，达29.61%；收获期茎占整株氮积累量比例各处理之间差异不显著，除K₃处理，

其余处理均小幅度上升，N₁P₃K₃处理增加幅度最大，达8.66%，N₃P₃K₁处理增加幅度最小，仅有1.62%。

生育期籽粒占整株氮积累量比例较为稳定。抽雄期各处理无显著差异，CK最高，N₃P₃K₁处理最低。收获期仅N₂P₀K₂、N₂P₂K₀、N₁P₃K₃处理与CK差异显著；除N₃、N₃P₁K₃处理比例增加，其余处理均有所降低。

2.4 不同施肥处理的氮效率

如表 6 所示, 籽粒产量需氮量中, K_3 、 $N_2P_0K_2$ 、 $N_1P_3K_3$ 和 $N_3P_3K_1$ 4 个处理与 CK 差异显著; CK 产量

最少, 达 $8\ 854\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 籽粒产量需氮量也最小; $N_3P_1K_3$ 和 $N_3P_3K_1$ 处理的产量接近, $N_3P_1K_3$ 处理的需氮量较少。

表 6 不同施肥处理的氮效率

处理	籽粒产量需氮量 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	收获指数 (%)	氮肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮素转运量 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	营养器官贡献率 (%)
CK	$14.82 \pm 0.85\text{b}$	$8\ 854 \pm 504\text{d}$	$0.50 \pm 0.03\text{a}$	—	$27.95 \pm 1.90\text{ef}$	$31.67 \pm 0.52\text{cd}$
N_3	$16.07 \pm 0.42\text{ab}$	$11\ 739 \pm 334\text{abcd}$	$0.43 \pm 0.02\text{a}$	$48.91 \pm 1.39\text{c}$	$61.38 \pm 3.20\text{ab}$	$46.28 \pm 0.41\text{a}$
P_3	$15.34 \pm 0.66\text{ab}$	$10\ 402 \pm 717\text{cd}$	$0.52 \pm 0.02\text{a}$	—	$34.82 \pm 1.66\text{de}$	$32.43 \pm 0.53\text{c}$
K_3	$18.29 \pm 0.62\text{a}$	$9\ 832 \pm 377\text{cd}$	$0.55 \pm 0.06\text{a}$	—	$44.15 \pm 0.69\text{cd}$	$35.70 \pm 0.34\text{bc}$
$N_0P_2K_2$	$15.36 \pm 0.64\text{ab}$	$10\ 597 \pm 515\text{bcd}$	$0.52 \pm 0.01\text{a}$	—	$20.34 \pm 1.61\text{f}$	$18.84 \pm 0.28\text{e}$
$N_2P_0K_2$	$18.69 \pm 1.16\text{a}$	$12\ 686 \pm 749\text{abc}$	$0.52 \pm 0.02\text{a}$	$88.71 \pm 5.23\text{b}$	$32.33 \pm 0.71\text{def}$	$20.66 \pm 1.10\text{e}$
$N_2P_2K_0$	$16.71 \pm 0.23\text{ab}$	$12\ 290 \pm 118\text{abc}$	$0.46 \pm 0.00\text{a}$	$85.94 \pm 0.82\text{b}$	$50.59 \pm 4.33\text{bc}$	$36.65 \pm 0.28\text{b}$
$N_1P_3K_3$	$18.78 \pm 1.15\text{a}$	$10\ 322 \pm 1\ 163\text{cd}$	$0.51 \pm 0.03\text{a}$	$121.44 \pm 13.68\text{a}$	$49.75 \pm 0.22\text{bc}$	$45.67 \pm 1.94\text{a}$
$N_3P_1K_3$	$17.41 \pm 0.26\text{ab}$	$13\ 875 \pm 461\text{a}$	$0.43 \pm 0.02\text{a}$	$57.81 \pm 1.92\text{c}$	$63.41 \pm 3.26\text{a}$	$36.74 \pm 1.01\text{b}$
$N_3P_3K_1$	$18.75 \pm 0.68\text{a}$	$13\ 540 \pm 102\text{ab}$	$0.44 \pm 0.01\text{a}$	$56.42 \pm 0.43\text{c}$	$48.58 \pm 2.02\text{c}$	$27.86 \pm 0.39\text{d}$

氮收获指数各处理间无显著差异, K_3 处理收获指数最高, 比 CK 高 10.00%; 收获指数最低的 3 个处理均为高氮处理。

氮肥偏生产力表明, 两个中氮处理之间、3 个高氮处理之间差异不显著; 低氮处理偏生产力最高, 其次是两个中氮处理, 最小的是 3 个高氮处理。可见, 氮肥偏生产力随氮肥增加而降低。3 个高氮处理中, $N_3P_1K_3$ 处理略高于 $N_3P_3K_1$ 处理, N_3 处理较低; 两个中氮处理中, $N_2P_0K_2$ 处理高于 $N_2P_2K_0$ 处理。

氮素转运量指标中, 除 P_3 、 $N_0P_2K_2$ 和 $N_2P_0K_2$ 3 个处理外其余处理与 CK 差异显著; $N_3P_1K_3$ 处理转运量最大, 比 CK 高 126.87%, 其次是 N_3 处理, 高 119.61%, $N_0P_2K_2$ 处理最低, 比 CK 低 27.52%。总体来看, 施氮处理高于其它配施处理。

营养器官的贡献率结果表明, 除 P_3 、 K_3 、 $N_3P_3K_1$ 3 个处理外其余处理与 CK 差异显著; N_3 处理营养器官的贡献率最高, 比 CK 高 46.13%, 其次是 $N_1P_3K_3$ 处理, 为 44.21%; $N_0P_2K_2$ 和 $N_2P_0K_2$ 处理贡献率比 CK 低, 可能因为 $N_0P_2K_2$ 处理转运量最低而影响贡献率。

2.5 施氮对土壤硝态氮的影响

由表 7 可以看出, 土壤硝态氮随生育期的推进, 出现下降的趋势。总体而言, 3 个生育期中, 以 0 ~ 20 cm A 处硝态氮含量最高, B、C 处略有差

异; 3 处硝态氮含量随深度增加逐渐下降, 40 ~ 60 cm 最低。

拔节期施氮量对表层影响最大, 硝态氮含量显著高于其他深度。表层各处理中, 3 处高氮处理均与 CK 差异显著, 比 CK 高 0.40 ~ 2.39 倍; 20 ~ 40 cm 深度中高氮处理差异仍然显著, A、C 处高氮处理比 CK 高 36.14%、38.26%; 40 ~ 60 cm 深度中 A、C 处无显著差异, B 处低氮、高氮处理差异显著, A、B 处高氮处理比 CK 分别高 28.09%、29.83%。

抽雄期表层硝态氮含量 A 处差异不显著, 以中氮处理最高, 其次是高氮处理, 分别比 CK 高 62.58%、41.43%; B 处仍以施氮处理高于不施氮处理, 高氮处理最高, 其次是低氮处理, 分别高 143.24%、97.35%; C 处施氮处理与不施氮处理差异不显著, 硝态氮含量并未随着施氮发生变化, 与是否施氮关系不明显。20 ~ 40 cm 深度硝态氮含量 3 处均以高氮处理最高, 分别高于 CK 31.32%、30.12%、43.78%; 中氮处理、低氮处理与不施氮处理没有显著差异, 变化规律不明显。

收获期植株生长停滞, 土壤中氮素大部分被植株吸收, 硝态氮含量整体较低。表层各处硝态氮含量中氮处理和高氮处理高于其它处理, 其中 C 处增幅最大, A、B 处增加较小。各处理 20 ~ 40 cm 深度硝态氮差异不显著, 高氮处理含量最高, 比 CK 高 11.44%, 其它处理间变化规律不明显。

表7 生育期不同位置硝态氮含量 (mg · kg⁻¹)

生育期	处理	滴头处 (A)			距滴头 15 cm 处 (B)			距滴头 30 cm 处 (C)		
		0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm
拔节期	CK	11.39e	3.21c	1.78a	14.07c	5.28a	1.81b	18.27cd	4.60b	1.88ab
	磷钾配施	16.62d	3.35c	2.26a	15.10c	4.32bc	1.99b	17.79d	4.07b	1.87ab
	低氮	33.38b	2.07d	1.93a	21.27b	3.15d	1.38c	18.93c	4.65b	1.12c
	中氮	27.46c	4.01b	1.64a	20.76b	4.04c	1.72b	23.24b	3.69b	1.92a
	高氮	38.71a	4.37a	2.28a	31.36a	4.93ab	2.35c	25.56a	6.36a	1.75b
抽雄期	CK	4.49a	2.65ab	1.82a	3.77d	3.55a	1.03b	6.15ab	1.85b	0.93c
	磷钾配施	4.32a	3.34ab	1.71a	5.82c	2.39c	1.39b	4.72b	1.97ab	1.30c
	低氮	2.79a	2.83ab	1.62a	7.44b	2.15c	1.46b	3.91c	1.56b	2.88a
	中氮	7.30a	1.79b	1.19a	6.74bc	1.59d	1.49b	5.29b	2.07ab	1.22c
	高氮	6.25a	3.48a	1.40a	9.17a	2.82b	2.12a	5.40a	2.66a	2.21b
收获期	CK	2.08c	1.75b	1.47c	1.88b	1.17c	1.91bc	1.41c	1.39c	1.11d
	磷钾配施	2.03c	1.95b	1.25c	2.23ab	2.02b	1.68c	2.50b	2.15ab	1.15d
	低氮	1.79c	3.21a	1.39c	1.89b	2.27ab	2.80a	1.76c	1.44c	3.66a
	中氮	4.04a	1.84b	2.67a	2.57a	2.56a	1.68c	2.80ab	1.89bc	2.16b
	高氮	3.15b	2.95a	1.82b	2.72a	2.58a	2.16b	2.91a	2.61a	1.79c

3 讨论

3.1 不同施肥处理整株、不同器官氮积累及比例变化

玉米整株氮素积累随生育期呈现逐渐增加的趋势,拔节期至抽雄期增幅较大,抽雄期至收获期增加较少,收获期氮积累达 130.34 ~ 253.71 kg · hm⁻²,氮积累随施氮量的增加而增加,磷钾配施对氮素积累影响不显著。高氮处理氮积累显著高于其它处理,以 N₃P₃K₁ 处理氮积累最高。陈天宇等^[6]研究发现叶片氮素吸收量最大,达 56.82 kg · hm⁻²,茎秆+叶鞘的氮素最大吸收量达 36.63 kg · hm⁻²,子粒氮素最大吸收量 154.58 kg · hm⁻²。王宜伦等^[14]、晁晓乐^[15]、朱金龙等^[16]对玉米地上部分氮积累规律的研究结果与本文相似。

玉米拔节期以营养器官生长为主,抽雄期进入营养器官与生殖器官并重生长的阶段,收获期营养物质向籽粒转化,促进籽粒成熟^[17]。本试验中,叶片、茎氮积累量随生育期逐渐下降,籽粒氮积累量增加,3个生育期均以高氮处理显著高于其它处理。说明施氮 240 kg · hm⁻²可以在玉米生育后期为籽粒提供充足的养分,为玉米的高产奠定基础。杨明达等^[7]探究在地下滴灌和地表滴灌的条件下夏玉

米氮素情况,结果表明:滴灌模式对夏玉米氮素积累与转运的影响主要体现在吐丝后,地表滴灌获得更高的玉米植株及籽粒氮素积累量。

3.2 不同施肥处理对氮效率的影响

氮效率指标表明,氮收获指数和氮肥偏生产力随施氮量增加而降低,高氮有效促进氮素转运和营养器官对籽粒贡献率。张经廷等^[18]的研究发现不施磷钾会限制氮素从营养器官向籽粒的转运,导致过多的氮素滞留在茎秆内,籽粒氮素积累量和氮收获指数显著降低。侯云鹏等^[19]试验结果表明,氮肥偏生产力随施氮水平提高而明显降低。虽然低氮条件下的氮肥偏生产力较高,但玉米产量和氮素积累量下降。因此,协调玉米产量和氮肥偏生产力之间的矛盾,应以保证产量稳步提升为前提,将研究重心放在提高氮肥的利用效率,同时避免玉米对氮素养分的奢侈吸收。

籽粒产量需氮量随产量增加而增加,CK产量最少,籽粒需氮量也最小;N₃P₁K₃和N₃P₃K₁处理的产量接近,N₃P₁K₃处理的需氮量较少。有研究表明,磷、钾肥均促进玉米对氮、钾的吸收、营养器官的转运量和转运率,且氮、磷、钾积累具有明显的一致性^[20-21]。但王雁敏^[22]指出,在氮肥用量一定的情况下,随着施磷量的增加,养分收获指数变

化不明显。本试验中在高氮处理下,高钾低磷配施比高磷低钾配施更有效促进氮素吸收利用,从而促进产量增加,具体机理还有待研究。

3.3 不同施氮处理对土壤硝态氮的影响

土壤 0 ~ 60 cm 硝态氮随生育期的推进逐渐下降。由于玉米拔节期植株较小,土壤硝态氮养分含量较低;抽雄期玉米植株生长旺盛,大量的土壤氮素被吸收,土壤中硝态氮含量显著下降。到了成熟期,作物需要的供应籽粒的营养增加,土壤中硝态氮含量继续降低。张翠翠等^[23]研究表明 0 ~ 60 cm 硝态氮随玉米生育期变化规律与本试验一致。3 个生育期均以滴头处 0 ~ 20 cm 硝态氮含量最高。水平方向,同一生育期变化不明显。垂直方向上,拔节期、抽雄期随深度增加逐渐降低;收获期仅滴头处表层硝态氮含量较高。李久生等^[24]试验研究发现,在滴灌条件下,含水率变化在垂直方向随灌水量增加而增加,水平方向变化不明显,湿润体范围以垂直方向为主,而硝态氮极易溶于水,且不被颗粒吸附,主要通过对流随水在土壤中运动,所以硝态氮在湿润锋附近累积。

生育期施氮对土壤硝态氮含量影响显著,本试验中主要影响 0 ~ 40 cm 深度,40 ~ 60 cm 没有显著差异,规律不明显;水平方向上拔节期和抽雄期影响滴头至 15 cm 处,收获期影响滴头至 30 cm 处。拔节期施肥处理均与 CK 差异显著,抽雄期和收获期中氮处理和高氮处理对硝态氮影响显著。这可能是由于拔节期植株较小,对氮素不敏感,相关研究表明,氮素吸收的高峰期在灌浆期^[17]。刘瑞等^[11]认为在 0 ~ 200 cm 土层,随着土层深度的增加,土壤硝态氮含量呈下降后升高的趋势。随着氮肥用量的提高,土壤硝态氮累积量明显增加。当施氮量为 90 ~ 150 kg · hm⁻² 时,土壤氮素基本达到平衡;当施氮量达 270 ~ 450 kg · hm⁻² 时,土壤氮素有明显盈余。王爽等^[12]研究发现,土壤硝态氮随氮肥施肥量增加而显著增加,0 ~ 40 cm 深度最高。马琳^[25]的研究结果表明,生育期总体以表层 0 ~ 30 cm 深度土壤硝态氮含量较高。本试验中,由于采用膜下滴灌的方式,且在生育期追肥,硝态氮遵循“水随盐走”的规律,所以硝态氮主要集中在灌水器周围。

4 结论

施肥有效促进玉米增产,氮积累增加、氮素转

运量等指标增加。本试验条件下,高氮处理显著高于其他处理,虽然较高的施氮量降低了氮收获指数和氮肥偏生产力,但高氮处理有效促进氮素转运和营养器官对籽粒贡献率,为高产奠定基础,同时高氮处理中土壤 0 ~ 60 cm 硝态氮含量与播前基本一致,维持了土壤硝态氮的平衡。N₃P₁K₃ 处理产量最高,达 13 875 kg · hm⁻²,其次是 N₃P₃K₁ 处理,产量为 13 540 kg · hm⁻²。相比 N₃P₃K₁ 处理,N₃P₁K₃ 处理籽粒产量需氮量更低,偏生产力、氮素转运量、营养器官贡献率更高。综合产量、氮效率及土壤硝态氮平衡方面的考虑,膜下滴灌条件下,陕北风沙滩地玉米合理施肥为 N₃P₁K₃ 处理,即施氮肥 240 kg · hm⁻²,磷肥 80 kg · hm⁻²,钾肥 225 kg · hm⁻²。

参考文献:

- [1] 王琦琪,陈印军.我国玉米种植的优势分析[J].中国农业科技导报,2018,20(3):1-9.
- [2] Ma Q, Wang X, Li H, et al. Comparing localized application of different N fertilizer species on maize grain yield and agronomic N-use efficiency on a calcareous soil[J]. Field Crops Research, 2015, 180: 72-79.
- [3] Avav T, Shave P A, Magani E I, et al. Effects of Mucuna biomass and N-fertilizer on Striga hermonthica Del. Benth. infestation in maize (*Zea mays* L.)[J]. Journal of Animal & Plant Sciences, 2009, 4(2): 320-328.
- [4] Tsai C Y, Dweikat I, Huber D M, et al. Interrelationship of nitrogen nutrition with maize *Zea mays* grain yield, nitrogen use efficiency and grain quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1992, 58(1): 1.
- [5] 郭丙玉,高慧,唐诚,等.水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(12): 3679-3686.
- [6] 陈天宇,杨克军,李佐同,等.松嫩平原西部膜下滴灌种植方式下氮肥追施对玉米产量和氮素积累的影响[J].玉米科学,2016,24(5): 105-111.
- [7] 杨明达,关小康,刘影,等.滴灌模式和水分调控对夏玉米干物质和氮素积累与分配及水分利用的影响[J].作物学报,2019,45(3): 443-459.
- [8] 张鹏飞,张翼飞,王玉凤,等.膜下滴灌氮肥分期追施对玉米氮效率及土壤氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4): 915-926.
- [9] 谭华,郑德波,邹成林,等.水肥一体膜下滴灌对玉米产量与氮素利用的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3): 18-23.
- [10] 郭丽,史建硕,王丽英,等.滴灌水肥一体化条件下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响[J].中国生态农业学报,2018,5(24): 668-676.
- [11] 刘瑞,周建斌,崔亚胜,等.不同施氮量下夏玉米田土壤硝

- 面硝态氮累积及其与土壤氮素平衡的关系 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42 (2): 193-198.
- [12] 王爽, 孙磊, 陈雪丽, 等. 不同施氮水平对玉米产量、氮素利用效率及土壤无机氮含量的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, (3): 387-391.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 王宜伦, 刘天学, 赵鹏, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46 (12): 2483-2491.
- [15] 晁晓乐. 施氮对不同基因型玉米干物质积累和氮效率的影响 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [16] 朱金龙, 危常州, 张书捷, 等. 不同供氮水平对膜下滴灌春玉米干物质及养分累积的影响 [J]. 新疆农业科学, 2014, 51 (9): 1569-1576.
- [17] 赵斌, 董树亭, 张吉旺, 等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响 [J]. 作物学报, 2010, 36 (10): 1760-1768.
- [18] 张经廷, 吕丽华, 张丽华, 等. 不同肥料滴灌配施夏玉米产量与氮磷钾吸收利用特性 [J]. 玉米科学, 2017, 25 (2): 123-129.
- [19] 侯云鹏, 孔丽丽, 李前, 等. 不同施氮水平对春玉米氮素吸收、转运及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2015, 23 (3): 136-142.
- [20] 李文娟, 何萍, 金继运. 钾素营养对玉米生育后期干物质和养分积累与转运的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (4): 799-807.
- [21] 侯云鹏, 陆晓平, 赵世英, 等. 平衡施肥对春玉米产量及养分吸收的影响 [J]. 玉米科学, 2014, 22 (4): 126-131.
- [22] 王雁敏. 不同氮磷配施对土壤养分、春玉米营养吸收特性及产量和品质的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
- [23] 张翠翠, 闫凌云, 赵鹏, 等. 施氮对夏玉米氮素利用及土壤硝态氮累积的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29 (18): 57-61.
- [24] 李久生, 张建君, 饶敏杰. 滴灌系统运行方式对砂壤土水氮分布影响的试验研究 [J]. 水利学报, 2004, 35 (9): 31-37.
- [25] 马琳. 玉米施氮量与土壤硝态氮、铵态氮的动态变化 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.

Effects of different fertilization by drip irrigation on nitrogen efficiency and nitrate nitrogen in sandy land

LI Juan-juan¹, LI Li-min², MA Li-hui^{3*} (1. College of Water Resources & Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100; 2. College of Resources & Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100)

Abstract: It is an effective way to improve nitrogen accumulation of maize and nitrogen use efficiency by exploring the optimum drip irrigation and fertilization scheme. In this paper, maize yield, nitrogen use efficiency and nitrate nitrogen content of different organs were studied in jointing stage, tasseling stage and harvest stage by using the three-factor D-saturated optimal design. The results showed: (1) With the maize growth, the nitrogen accumulation of the whole plant and grain increased gradually, while that of the leaves and stems decreased. The nitrogen accumulation in the high nitrogen treatment, which applied with N 240 kg · hm⁻² nitrogen fertilizer, was significantly higher than the other treatments; (2) The maize yield of N₃P₁K₃ treatment was the highest (13 875 kg · hm⁻²), nitrogen transport and vegetative organ contribution rate were significantly higher than other treatments, and nitrogen harvest index and nitrogen fertilizer partial productivity were lower; (3) The soil nitrate nitrogen content decreased gradually with the growth of the plant. The nitrate content of 0 ~ 20 cm depth at the dripper was the highest, and it decreased gradually in 20 ~ 60 cm depth; (4) The contents of nitrate nitrogen in different nitrogen treatments were different, and the fertilization treatment at jointing stage was significantly different from CK. Nitrogen treatment and high nitrogen treatment had significant effects on nitrate nitrogen during tasseling and harvesting stages. The content of soil nitrate nitrogen in 0 ~ 60 cm depth for the high nitrogen treatment was basically the same as that before sowing, and the balance of soil nitrate nitrogen was maintained. Considering the factors of yield, nitrogen efficiency and soil nitrate nitrogen balance, under the condition of drip irrigation under the film, the reasonable fertilization of maize in the sandy land of northern Shaanxi is treated with N₃P₁K₃ treatment, namely, nitrogen fertilizer 240 kg · hm⁻², phosphate fertilizer 80 kg · hm⁻², and potassium fertilizer 225 kg · hm⁻².

Key words: maize; drip irrigation; nitrogen use efficiency; nitrate nitrogen