

沙地滴灌春玉米最适氮磷钾配方施肥研究

李利敏¹, 李娟娟², 马理辉^{3*}, 高成平⁴, 刘思春¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 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; 4. 神木市农业技术推广中心, 陕西 神木 719300)

摘要: 探索沙地春玉米 (*Zea mays* L.) 最适滴灌施肥方案是提高其产量和生物量积累的有效途径。采用三因素 D 饱和和最优设计试验, 研究了不同氮磷钾配方施肥对玉米产量及拔节期、抽雄期和收获期玉米干物质质量的影响, 结果表明: (1) 氮磷钾不同配施可提高产量 32.60% ~ 52.90%; 产量方程和两因子互作效应分析表明, 氮磷钾配施有效提高产量, 氮肥增产效果最明显, 钾肥其次, 磷肥最小, 产量随肥料施用量增加呈现先增加后降低的趋势。(2) 氮磷钾配施对干物质质量和收获指数的影响显著, 3 个生育期干物质质量最大的处理、收获指数最高的处理均为氮磷钾配施处理。(3) 在覆膜滴灌条件下, 根据对玉米产量及各生育期干物质质量分析表明: 沙地玉米最佳施肥方案为氮肥 240 kg · hm⁻²、磷肥 80 kg · hm⁻²、钾肥 225 kg · hm⁻²。

关键词: 覆膜滴灌; 春玉米; 配方施肥; 生物量

玉米 (*Zea mays* L.) 是我国第一大粮食作物, 居主要粮食作物种植面积和产量之首, 在我国粮食生产中起到了重要作用^[1], 也是陕北主要的粮食作物。近年来, 随着玉米高产品种的大量种植, 玉米产量不断提高, 化肥用量相应增加, 但是化肥施用过量以及施用结构的不合理造成化肥流失率过高。三大养分资源氮、磷、钾直接影响作物生长发育状况和作物产量^[2]。肖万欣等^[3]通过设置不同氮肥、磷肥和钾肥配比, 对玉米产量和农艺性状的施肥效应进行研究, 结果表明, 在每公顷施 N 135.0 ~ 180.0 kg、P₂O₅ 75.0 ~ 120.0 kg、K₂O 90.0 ~ 120.0 kg 时玉米产量达到最高。王寅等^[4]整理 2005 ~ 2013 年国家测土配方施肥项目田间试验得出: 当氮、磷、钾养分平均吸收量分别为 190.8、87.0、215.1 kg · hm⁻² 时, 区域春玉米可获得最高籽粒产量和养分最佳吸收量。由此可见, 玉米适宜的氮肥、磷肥和钾肥配施存在较大差异。

陕北长城沿线风沙滩地是我国规划发展的“第二粮仓”, 粮食生产需要耗费大量的水资源, 地处半干旱偏旱地区的陕北不仅降水少, 还是全国水土流失最为严重的地区之一。沙地的土质特征不保水不保肥, 传统灌溉方式如畦灌、沟灌及漫灌势必造成地下水资源的大量消耗和肥料的深层渗漏, 这种渗漏又容易造成地下水面源污染。水土流失和不合理的灌溉方式使原本贫瘠的土壤水肥利用率进一步降低^[5], 导致农业生态环境遭到严重破坏。“第二粮仓”建设迫切需要采用更为高效的水肥利用方式, 滴灌是目前当地正在大力推广的节水技术之一, 采用水肥一体化模式可以显著提高作物水肥利用效率, 使作物可以得到充足的养分供应^[6], 可以有效协调产量、施肥及灌溉方式之间的关系^[7]。当前研究多集中于氮、磷、钾配施对产量的影响, 对沙地玉米在水肥一体化条件下合适的氮磷钾配施研究较少, 为了解覆膜滴灌条件下氮、磷、钾不同配施对沙地春玉米产量及不同生育期干物质质量的影响, 在陕西神木沙地进行试验, 旨在确定沙地春玉米最佳养分施用配比, 为沙地滴灌玉米合理施肥提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地区概况

本研究于 2018 年 5 ~ 10 月在陕西神木进行,

收稿日期: 2020-03-17; 录用日期: 2020-05-19

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 (2018CXY-14); 沙地枸杞水肥一体化栽培技术与示范 (2016KTCL02-04)。

作者简介: 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。

该试验地区位于毛乌素沙漠与黄土丘陵区的过渡地带, 东经 110° 51'、北纬 38° 83', 年平均日照 2875.9 h, 年平均气温 8.9℃, 10℃以上天气 169 d。平均年降水量 421.2 mm, 年蒸发量为 1336.6 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 5.57 g · kg⁻¹, 硝态氮 + 铵态氮 15.96 mg · kg⁻¹, 有效磷 13.85 mg · kg⁻¹, 速效钾 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, 2018 年 5 月 1 日播种, 9 月 28 日收获, 全生育期 151 d, 试验期内降水 307.3 mm。本试验所选用的化肥种类及有效含量: 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%。地膜为聚乙烯薄膜, 宽 1.2 m, 厚 0.008 mm。滴灌施肥系统由水源、水泵、首部(由水泵、过滤器、施肥罐、球阀等组成。其作用是从水源取水加压并注入肥料经过滤后按时按量依次输送进各级滴灌管网, 经过滴头将水分、肥料直接输送至作物根部, 保证作物的水分、肥料及药物供应)和输配水管道等组成。灌溉水源来自于地下水, 管网由支管和毛管组成。滴灌带沿玉米行向铺设于中央, 每条滴灌带控制两行玉米, 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。每个小区设置水表和球阀, 确保每个小区灌水量一致。

试验采用三因素 D 饱和最优设计, 10 个处理, 3 次重复, 每小区面积 24 m² (4 m × 6 m), 共 30 个小区, 田间随机区组排列, 设计方案、因素水平见表 1。行距 55 cm, 株间距 24 cm, 种植密度

表 1 氮、磷、钾三因素 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	1	-1	-1	240	0	0
P ₃	-1	1	-1	0	225	0
K ₃	-1	-1	1	0	0	225
N ₀ P ₂ K ₂	-1	0.1925	0.1925	0	134	134
N ₂ P ₀ K ₂	0.1925	-1	0.1925	143	0	134
N ₂ P ₂ K ₀	0.1925	0.1925	-1	143	134	0
N ₁ P ₃ K ₃	-0.2912	1	1	85	225	225
N ₃ P ₁ K ₃	1	-0.2912	1	240	80	225
N ₃ P ₃ K ₁	1	1	-0.2912	240	225	80

59970 株 · hm⁻²。播种时施入全部的磷肥、钾肥和 20% 的氮肥, 穴施, 在播种穴一侧人工挖施肥深度 20 cm 的穴。拔节期和抽穗期各追氮肥 40%, 追肥时将各处理所需氮肥溶解在施肥罐中, 肥料随水施入, 拔节期、抽穗期分别灌水 300 m³ · hm⁻²。试验采用覆膜穴播, 待玉米出苗后进行间苗, 保证每一株, 其它田间管理均与当地农民习惯一致。

1.3 测定项目与方法

干物质量的测定: 每小区选取春玉米拔节期、抽穗期和收获期长势均匀的两株植株, 将所选植株 105℃ 杀青 0.5 ~ 2 h, 75 ~ 80℃ 烘干至恒重后称重。

产量测定: 成熟期, 每小区随机选取 10 株, 将地上部全部收获, 秸秆和籽粒分开, 风干后计算籽粒产量。

收获指数 (HI) = 籽粒产量 / 成熟期地上部总生物量。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 统计分析, 差异显著性用 Duncan 新复极差检验法。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷钾配方施肥处理对玉米产量的影响

2.1.1 不同施肥处理对玉米产量及各指标的影响

从表 2 可以看出, 各施肥处理均促进了百粒重的增加 (32.1 ~ 36.0 g), 处理间差异不显著。与 CK 相比, N₃P₁K₃ 处理增加最多, 其次为 N₃P₃K₁ 处理, N₀P₂K₂ 处理增加最小。除 K₃ 处理外其余处理

表 2 不同施肥处理下玉米产量

处理	百粒重 (g)	Δ 百粒重 (%)	穗粒数 (粒)	Δ 穗粒数 (%)	产量 (kg · hm ⁻²)	Δ 产量 (%)
CK	31.2a	—	598cde	—	8854d	—
N ₃	32.6a	4.5	697a	16.6	11739abcd	32.6
P ₃	32.9a	5.5	645ab	7.9	10402cd	17.5
K ₃	33.2a	6.5	575e	-3.8	9832cd	11.0
N ₀ P ₂ K ₂	31.3a	0.3	653abcd	9.2	10597bcd	19.7
N ₂ P ₀ K ₂	32.9a	5.5	652abc	9.0	12686abc	43.3
N ₂ P ₂ K ₀	34.8a	11.6	615de	2.8	12290abc	38.8
N ₁ P ₃ K ₃	32.1a	2.9	620e	3.7	10322cd	16.6
N ₃ P ₁ K ₃	36.0a	15.5	683a	14.2	13875a	56.7
N ₃ P ₃ K ₁	35.1a	12.6	641bcde	7.2	13540ab	52.9

注: 表中数据为 3 次重复的平均值, 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

均增加了穗粒数, N₃P₁K₃、N₃和P₃处理与CK差异显著; 与CK相比, N₃处理增加最多, 其次为N₃P₁K₃处理。各施肥处理均促进了产量的增加, 其中N₂P₀K₂、N₂P₂K₀、N₃P₁K₃和N₃P₃K₁处理与CK差异达显著水平; 与CK相比, 以N₃P₁K₃处理产量增产最多, 其次为N₃P₃K₁处理, K₃处理增产最少。

2.1.2 产量效应模型建立与分析

试验数据采用 DPS 7.05 软件统计分析, 拟合氮肥、磷肥、钾肥的三元二次多项式为:

$$Y=8854+18.5X_1+16.1X_2+17.8X_3-0.027X_1^2-0.041X_2^2-0.060X_3^2-0.004X_1X_2+0.022X_1X_3-0.055X_2X_3 \quad (1)$$

式中 X₁、X₂、X₃ 分别为 N、P₂O₅、K₂O 施用量 (kg · hm⁻²); Y 为玉米产量 (kg · hm⁻²)。F=8.089, R=0.886, 剩余标准差 S=1015.447, P=0.001, 相关系数 R=0.829, 达极显著水平, 故所建立的产量效应模型效果较好。

由于氮肥、磷肥、钾肥对玉米产量的回归方程已经过无量纲编码代换, 故各偏回归系数绝对值的大小可反映各因子的重要程度。从式 (1) 可知, 氮肥、磷肥、钾肥的一次项绝对值系数分别为 18.5、16.1、17.8, 说明在覆膜滴灌条件下氮肥对玉米产量的影响最大, 钾肥其次, 磷肥最小。产量达到 10000 kg · hm⁻², 所需氮肥、磷肥和钾肥量分别为 70、93 和 95 kg · hm⁻²。

(1) 单因素效应分析

采用降维法, 将式 (1) 中 3 因子中的 2 个固定为零水平, 求得单因素对产量的偏回归子模

型。氮肥对玉米产量效应模型: $Y=8854+18.5X_1-0.027X_1^2$; 磷肥对玉米产量效应模型: $Y=8854+16.1X_2-0.041X_2^2$; 钾肥对玉米产量效应模型: $Y=8854+17.8X_3-0.060X_3^2$ 。

效应模型说明玉米产量开始随施肥量的增加而增大, 达到极限后产量将随着施肥量增大而减小, 符合米采利希 (E.Mitcherlich) 提出的肥料效应报酬递减定律。其中, 单施氮 342 kg · hm⁻² 时, 产量最高可达 12022 kg · hm⁻²; 单施磷肥产量最高达 10435 kg · hm⁻², 对应施磷量为 196 kg · hm⁻²; 在单施钾 148 kg · hm⁻² 时, 产量达到最大值 10174 kg · hm⁻²。

(2) 两因子互作效应分析

采用降维法, 将式 (1) 中任意自变量编码值固定为零水平, 得到其它两因素的互作效应等值线图。

从图 1 (a) 可以看出, 氮磷肥配施有效促进产量增加, 呈现正交互作用, 氮素是主要影响因素, 随着施氮量的增加, 磷肥对氮肥的促进作用越来越小。施氮量不变, 施磷量超过 195 kg · hm⁻² 产量开始下降。产量达到 10000 kg · hm⁻², 氮磷肥用量仅为 40 和 30 kg · hm⁻²。比单因素分析达到相同产量所需肥量分别节省氮肥、磷肥约 30 和 65 kg · hm⁻²。要达到最高产量 13000 kg · hm⁻², 氮肥和磷肥施用量分别为 216 ~ 240 和 128 ~ 225 kg · hm⁻², 其中, 氮肥施用最少的组合为: 氮肥 216 kg · hm⁻²、磷肥 170 kg · hm⁻²; 施肥量最小的组合为: 氮肥 240 kg · hm⁻²、磷肥 127 kg · hm⁻²。

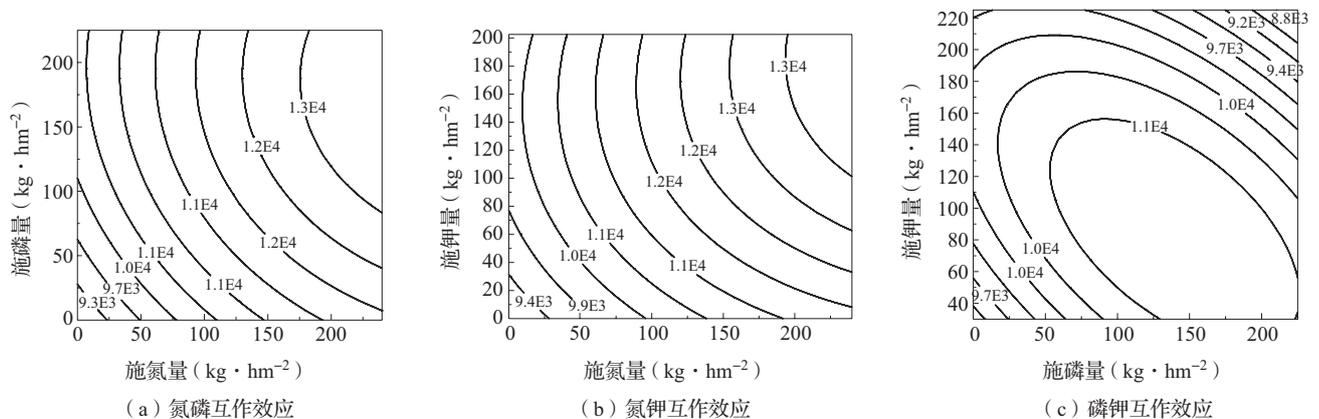


图 1 氮磷钾互作效应

从图 1 (b) 可以看出, 氮钾肥配施对产量有明显的正互作效应, 产量随着施氮量和施钾量增加而增高, 曲线斜率较大, 说明氮钾配施有效促进产

量增加。施氮量不变, 施钾量超过 195 kg · hm⁻² 产量开始下降。达到最高产量 13000 kg · hm⁻², 需施氮肥量 160 ~ 240 kg · hm⁻², 施钾肥量 68 ~ 225

kg · hm⁻², 其中氮肥施用量最少且施肥量最少的组合为: 氮肥 160 kg · hm⁻²、钾肥 145 kg · hm⁻²。与氮磷肥配施相比, 产量达到 13000 kg · hm⁻² 氮钾肥配施所需肥料量减少 62 kg · hm⁻²。

从图 1(c) 可以看出, 磷钾肥配施对产量的影响小于氮磷肥配施、氮钾肥配施, 产量随磷钾施肥量增加而增高。磷钾配施的最高产量为 10728 kg · hm⁻², 远低于氮磷配施、氮钾配施的最高产量, 达最高产量所需钾肥和磷肥分别为 143 和 83 kg · hm⁻²。

2.2 不同配方施肥处理对玉米干物质质量、收获指数的影响

干物质积累是判断玉米营养状况的主要指标之一。从表 3 可以看出, 与 CK 相比, 拔节期施肥处理的玉米各时期干物质质量均有所增加。N₃P₃K₁ 处理与 CK 差异达显著水平, 其次为 N₁P₃K₃ 处理, K₃

处理增加最少。随着生育期推进, 抽雄期各处理干物质质量迅速增加, 除 K₃ 处理外其余处理与 CK 差异达显著水平, 其中, N₃P₃K₁ 处理增加最多, 其次为 N₃P₁K₃ 处理, 增加最少的为 K₃ 处理。与 CK 相比, 收获期各处理干物质质量均有所增加。除 K₃ 处理外其余处理与 CK 差异达显著水平, 干物质质量增加最多的是 N₃P₃K₁ 处理, 其次是 N₃P₁K₃ 处理, 增加最少的为 K₃ 处理。总体来说, 氮磷钾配施处理 (N₃P₃K₁、N₃P₁K₃ 和 N₁P₃K₃) 在各个生育期干物质质量均较高, N₃P₃K₁ 处理最高。

由表 3 可知, 配施处理中, 除 N₁P₃K₃、N₀P₂K₂ 处理外, 其余处理的收获指数均高于 0.50。其中, N₂P₂K₀ 处理收获指数最高, 较 CK 高 18.48%, 其次为 N₃P₁K₃ 处理, 较 CK 高 18.02%; 收获指数最低是 P₃, 仅比 CK 高 2.26%。

表 3 不同生育期玉米整株干物质质量和收获指数

处理	拔节期 (g)	Δ 拔节期 (%)	抽雄期 (g)	Δ 抽雄期 (%)	收获期 (g)	Δ 收获期 (%)	收获指数
CK	30.4b	—	145.9d	—	326.4e	—	0.45
N ₃	33.1b	8.9	184.3ab	26.3	413.9ab	26.8	0.47
P ₃	33.5b	10.2	166.4bc	14.1	375.0cd	14.9	0.46
K ₃	30.5b	0.3	149.9cd	2.7	342.2de	4.8	0.48
N ₀ P ₂ K ₂	32.6b	7.2	174.6ab	19.7	368.4cd	12.9	0.48
N ₂ P ₀ K ₂	33.9b	11.5	184.6ab	26.5	420.7a	28.9	0.50
N ₂ P ₂ K ₀	31.4b	3.3	166.7bc	14.3	382.4bc	17.2	0.54
N ₁ P ₃ K ₃	34.3ab	12.8	184.7ab	26.6	367.9cd	12.7	0.47
N ₃ P ₁ K ₃	34.2ab	12.5	184.8ab	26.7	433.4a	32.8	0.53
N ₃ P ₃ K ₁	38.1a	25.3	186.6a	27.9	440.8a	35.0	0.51

3 讨论

3.1 关于不同氮磷钾配方施肥对玉米产量的影响

不同氮磷钾肥配施对玉米百粒重和穗粒数影响不同。与 CK 相比, 百粒重以 N₃P₁K₃ 处理增加最多, 其次为 N₃P₃K₁ 处理, 穗粒数最大的两个处理分别为 N₃P₁K₃、N₃ 处理。说明氮素对百粒重、穗粒数影响较大, 与单独施肥处理相比, 氮磷钾肥配施更有助于玉米百粒重、穗粒数的增加。晁晓乐^[8] 提出三大养分中, 氮素是对玉米产量和效益影响最大的元素, 玉米体内氮素水平与玉米生长期发育及产量的形成有较好的相关性。王宜伦等^[9]、侯云鹏等^[10] 和曹建敏等^[11] 均认为单独施氮肥、磷肥和钾肥均有助于增加玉米穗粒数, 其中氮肥影

响最大。贺娇姣^[2] 研究表明施用不同配比的氮磷钾肥显著增加穗粒数、百粒重。Ma 等^[12] 在研究不同氮肥对玉米产量和氮效率中发现, 氮磷钾配施能显著提高穗粒数。

施肥显著影响玉米产量, 在一定范围内, 施肥量越大, 玉米产量提高幅度越大。本研究表明, 氮磷钾肥不同配施可提高产量 32.60% ~ 52.90%。闫翠萍等^[13] 通过连续两年大田试验结果表明配方施肥对春玉米增产、增收效果显著。龙胜举等^[14] 通过采用“3414”设计方案研究不同氮磷钾组合对紫叶莴笋的产量与品质的影响, 结果表明, 合理施肥对紫叶莴笋具有显著增产效果。

通过产量效应方程分析, 进一步证明了氮肥对产量影响最大, 其次为钾肥, 磷肥影响最小, 产量

随氮、磷、钾施肥量增加而增加,但超过施肥最佳水平后反而下降。王宜伦等^[9]在施氮量对超高产夏玉米产量的影响研究中发现,随着施氮量增加,产量呈现先增加后降低的趋势。郑毅等^[15]通过肥料效应方程对氮磷钾配合比率进行优化与解析表明,随着氮磷钾施肥用量的增加,糖用甜菜产量、含糖率和产糖量均呈先升后降的趋势,符合肥料报酬递减律。

两因子互作效应表明,氮磷互作、氮钾互作对产量影响远大于磷钾互作。氮磷互作、氮钾互作最高产量可达 13000 kg·hm⁻²,磷钾互作产量最高为 10728 kg·hm⁻²。产量效应方程表明,氮磷钾配施条件下,产量最高达 14151 kg·hm⁻²,再次验证了氮磷钾配施可获得最高产量。侯云鹏等^[16]研究结果表明,平衡施肥使氮、磷、钾等养分均衡,有利于养分被作物充分吸收和利用,促进玉米更好地生长发育,从而提高产量。

3.2 关于不同氮磷钾配方施肥对玉米干物质质量和收获指数的影响

拔节期各处理干物质质量中,3个高磷梯度处理干物质质量高于其它处理,说明拔节期施磷促进茎的生长。孙文涛等^[17]在平衡施肥对玉米产量影响的研究中发现,磷肥对苗期干物质质量影响较大。随着生育期推进,配施肥效对干物质质量增加作用逐渐显现,抽雄期氮磷钾配施仍高于其它处理,其它处理施肥效应依次为 N₂P₀K₂>N₃>N₀P₂K₂>N₂P₂K₀>P₃>K₃,说明抽雄期氮钾肥配施、磷钾肥配施对干物质质量影响较大,单独施磷肥、钾肥效果不显著。成熟期, N₃P₁K₃>N₃P₃K₁, N₂P₀K₂>N₂P₂K₀,说明高氮处理和中氮处理钾素高的籽粒干物质质量也较大,可能与钾素有助于促进籽粒有机物合成有关。

3个生育期干物质质量最大的处理均是 N₃P₃K₁,其次为 N₃P₁K₃处理(拔节期 N₁P₃K₃处理比 N₃P₁K₃处理高 0.29%);产量最高的处理是 N₃P₁K₃,其次是 N₃P₃K₁处理。说明在施氮量相同的情况下(240 kg·hm⁻²),较高的施磷量(225 kg·hm⁻²)显著促进植株生长,使干物质质量增加;较高的施钾量(225 kg·hm⁻²)促进籽粒干物质质量增加,从而获得高产。李文娟等^[18]对钾素在玉米生育后期干物质质量和养分积累与转运中的研究认为,从抽雄期到收获期施钾促进了植株生殖生长阶段对氮、磷、钾的吸收,并以较高的比例运转到籽粒中,对增产有重

要作用。

收获指数反映了作物群体光合同化物转化为经济产品的能力,是评价作物品种产量水平的重要指标。收获指数最高的两个处理为 N₂P₂K₀处理和 N₃P₁K₃处理。

4 结论

在本试验条件下氮磷钾不同配施均有助于玉米产量的增加,产量随肥料施用量增加呈现先增加后降低的趋势。根据产量效应方程得出,滴灌条件下玉米最高产量 14151 kg·hm⁻²时氮磷钾肥用量分别是:氮肥 240 kg·hm⁻²、磷肥 77 kg·hm⁻²、钾肥 158 kg·hm⁻²。综合考虑, N₃P₁K₃处理在本试验中效果最好,可达最高产量 13540 kg·hm⁻²,氮磷钾肥施用量分别为:氮肥 240 kg·hm⁻²、磷肥 80 kg·hm⁻²、钾肥 225 kg·hm⁻²。本试验条件下,通过试验与理论相结合,提出膜下滴灌条件下沙地春玉米的最佳施肥配比,还需要在不同条件下做验证试验,及进一步开展覆膜与不覆膜配方肥用量与效果的差异,西北旱作区壤土、砂土质地条件下氮磷钾肥用量的区别等更多的相关研究,才能为沙地滴灌玉米合理施肥提供足够的理论依据和技术支撑。

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] 贺娇姣.不同氮磷钾配比的控释肥对玉米主要农艺性状及产量的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [3] 肖万欣,赵海岩,刘晶,等.不同氮、磷、钾肥配施对辽单565光合特性和产量的影响[J].玉米科学,2011,19(3):126-130.
- [4] 王寅,高强,冯国忠,等.吉林春玉米氮磷钾养分需求与利用效率研究[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):306-315.
- [5] 姜峻.现阶段陕北农业发展的制约因子分析[J].安徽农学通报,2007(16):1-5.
- [6] 高祥照,杜森,钟永红,等.水肥一体化发展现状与展望[J].中国农业信息,2015(4):14-19.
- [7] 洪传春,刘某承,李文华.我国化肥投入面源污染控制政策评估[J].干旱区资源与环境,2015,29(4):1-6.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 侯云鹏,杨建,孔丽丽,等.不同施磷水平对春玉米产量、

- 养分吸收及转运的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 123-130.
- [11] 曹敏建, 王淑琴, 张雨林, 等. 钾对玉米生长发育及生理指标影响的研究[J]. 土壤通报, 1994(4): 181-183.
- [12] 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.
- [13] 闫翠萍, 杨萍果, 孙树荣. 三种肥力水平土壤施肥对玉米产量及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 56-60.
- [14] 龙胜举, 张杰, 王一鸣. 不同氮磷钾配方施肥对紫叶茼蒿产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 38-43.
- [15] 郑毅, 李庆会, 范富, 等. 糖用甜菜氮磷钾配方施肥效益分析[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 77-82.
- [16] 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.
- [17] 孙文涛, 汪仁, 安景文, 等. 平衡施肥技术对玉米产量影响的研究[J]. 玉米科学, 2008(3): 109-111.
- [18] 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.

Optimum application of nitrogen, phosphorus and potassium with drip irrigation for spring maize in sandy soil

LI Li-min¹, LI Juan-juan², MA Li-hui^{3*}, GAO Cheng-ping⁴, LIU Si-chun¹ (1. College of Resources & Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100; 2. College of Water Resources & Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100; 3. Institute for Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100; 4. Shenmu Agricultural Technology Promotion Center, Shenmu Shaanxi 719300)

Abstract: It is an effective way to improve grain yield and plant biomass by exploring the optimal drip irrigation and fertilization program for sandy spring maize (*Zea mays* L.). In this paper, the effects of different formula fertilization of nitrogen, phosphorus and potassium on grain yield and quality of maize dry matter in jointing, tasseling and harvesting periods were investigated by using three-factor D-saturated optimal design. The results showed that (1) the grain yield was increased by 32.60% to 52.90% with different formula fertilization of nitrogen, phosphorus and potassium. The analysis of yield equation and interaction between two factors showed that combined nitrogen, phosphorus and potassium could improve the grain yield effectively, and that the effect of nitrogen was the most obvious, followed by potassium and phosphorus, and that the grain yield increased first and then decreased with the increase of applying fertilization. (2) The effect of nitrogen, phosphorus and potassium on plant biomass and harvest index was significant. The treatments with the highest dry matter quality and the highest harvest index were formula fertilization of nitrogen, phosphorus and potassium in the three growth stages. (3) According to the analysis of maize yield and plant biomass in different growth stages in the condition of drip irrigation under mulching film, the most optimal formula fertilization is nitrogen fertilizer 240 kg · hm⁻², phosphorus fertilizer 80 kg · hm⁻² and potassium fertilizer 225 kg · hm⁻² in sandy land.

Key words: drip irrigation under film; spring maize; formula fertilizer; biomass