

内蒙古河套灌区向日葵增产氮磷肥优化配施模式研究

娄帅¹, 杨树青^{1*}, 刘瑞敏¹, 刘德平²

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2.东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】减轻内蒙古河套灌区由于过量施肥造成的农田面源污染、提高当地的肥料利用率。【方法】采用当地常规作物向日葵进行3414部分试验, 设置氮肥(0、120、240、360 kg/hm²)和磷肥(0、52.5、105、157.5 kg/hm²)各4个水平, 以当地施肥(N: 275 kg/hm², P: 145 kg/hm²)为对照, 共15个处理, 分析了土壤含水率、硝态氮质量浓度以及向日葵各器官全氮量、全磷量, 在此基础上进行氮磷配比平衡施肥初步研究。【结果】氮磷配施条件下, 施肥量较小时表现为协同促进作用, 而施肥过多则表现为拮抗作用; 高氮(高磷)处理会造成氮(磷)肥的奢侈施入, 中氮中磷(N: 240 kg/hm²; P: 105 kg/hm²)配施则能显著降低土壤氮素残留, 提高作物对肥料的回收利用率、生理利用率。相比对照处理, 中氮中磷配施籽粒增产9.5%, 氮、磷肥利用率分别提高了2.9%、3.8%, 氮、磷肥的生理利用率分别增加了8.3、40 g/kg。【结论】中氮中磷(N: 240 kg/hm², P: 105 kg/hm²)配施方式可以作为当地向日葵的优化施肥模式。

关键词: 氮磷配施; 肥料利用率; 氮素平衡; 氮素残留

中图分类号: S143.1; S143.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.20180334

娄帅, 杨树青, 刘瑞敏, 等. 内蒙古河套灌区向日葵增产氮磷肥优化配施模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 35-43.
LOU Shuai, YANG Shuqing, LIU Ruimin, et al. Optimizing Nitrogen and Phosphorus Fertilization to Improve Sunflower Yield in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 35-43.

0 引言

【研究意义】内蒙古河套灌区由于土壤盐渍化较严重、养分不足, 使得当地农户不得不大量施用化肥来保证作物所需的氮、磷、钾来源充足^[1]。然而, 由于缺乏可靠的理论基础, 当地施肥量一直过高, 且氮磷肥的配比也无合理依据, 致使当地很多农田中, 氮磷肥的利用率均处于较低水平(磷肥约10%~20%, 氮肥约30%~35%)^[2]。因此, 提出合理的施肥方案势在必行^[3]。【研究进展】研究认为, 这种忽视了土壤养分供应和作物养分需求的、过量的、单一的化肥施用措施会直接导致肥料利用效率低下及农田面源污染^[4-5]。田德龙等^[6]在对内蒙古河套灌区向日葵进行水肥耦合试验研究中初步提出最佳水、氮、磷施用量。郭富强等^[7]对向日葵开展的水氮耦合研究表明, 节氮20%对向日葵产量无明显影响, 但显著提高了氮肥利

用效率。汤宏等^[8]、杨黎等^[9]研究表明, 合理范围内单肥增量施用, 对于作物的生长状况、产量、品质均有显著提升, 而李志贤等^[10]、尚文彬等^[11]研究则表明, 氮、磷合理配施是提高养分利用效率和产量的主要途径^[12]。【切入点】在内蒙古河套灌区进行水、氮研究的较多, 而关于磷肥及氮、磷交互作用的研究较少。本研究针对向日葵开展氮、磷配比平衡施肥研究, 在3414施肥方案^[13]的基础上, 重点分析氮、磷肥料效应及其交互作用, 将肥料回收效应、植物对肥料的利用、肥料残留相结合进行系统全面的分析。【拟解决的关键问题】以此为基础, 提出适于当地向日葵氮的磷配施模式, 以期合理调配灌区氮、磷施肥结构, 提高肥料利用效率, 减轻农业面源污染提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2014年在内蒙古河套灌区下游北场示范区进行。示范区地处我国西北干旱、半干旱、半荒漠草原地带, 属典型温带大陆性气候区, 年平均气温

收稿日期: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51539005); 国家自然科学基金项目(51669019); 内蒙古重点科技研发项目(201602049)

作者简介: 娄帅(1996-), 男, 内蒙古赤峰人。硕士研究生, 主要从事盐碱地改良方面的研究。E-mail: 865822716@qq.com

通信作者: 杨树青(1967-), 女, 内蒙古乌兰察布人。教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源利用与环境调控研究。E-mail: nmndysq@126.com

5.6~7.8 ℃, 年平均无霜期 160~180 d, 全年日照时间 3 100 h, 太阳总辐射量 6 200 MJ/m², 年均降水量 139~222 mm, 年均蒸发量 1 999~2 346 mm, 土壤垂直剖面质地排列以黏砂层居多, 剖面 1~2 m 处广泛分布着粉细砂类层, 示范区以引黄自流灌溉为主, 灌溉条件良好。

1.2 试验设计

采用灌区主要经济作物向日葵 (品种 DC6009, 生育期 100~110 d) 为供试作物; 氮肥采用尿素 (46% N), 磷肥采用过磷酸钙 (16% P₂O₅), 钾肥采用加拿大氯化钾 (60% K₂O); 试验区供试土壤为壤土 (经试验前采用五点法测定), 表层 20 cm 土壤养分组成为: 总氮量为 1.1 g/kg, 有效磷量为 8 mg/kg, 速效钾量为 313.2 mg/kg, 有机质量为 16.8 g/kg。5 月 9 日铺

膜、施底肥, 5 月 29 日播种, 同年 9 月 18 日收获, 种植行距 40 cm, 株距 35 cm, 采用人工点播器点种; 向日葵全生育期灌水 2 次, 灌水方式为畦灌, 灌水定额 105 mm, 一水 5 月 25 日, 二水 6 月 13 日。

试验采用 3414 部分实施方案, 钾肥全部做底肥, 施肥水平为 300 kg/hm²。在此基础上进行氮、磷二因素肥料效应试验, 并增加 1 个当地施肥水平, 共 10 个处理, 每个处理设 3 次重复, 试验小区面积 9 m×9 m; 全部的磷、钾肥及 50%氮肥作为基肥, 其余 50%氮肥在二水前追施, 追肥方式为穴施。在试验开始前平整土地, 小区四周用埋深 1.2 m 的聚乙烯膜相隔, 顶部留 30 cm, 其余田间管理与当地农户一致。具体试验设计见表 1。

表 1 试验肥料施量

Table 1 Test fertilizer design											kg/hm ²
处理 Treatments		N ₀ P ₀	N ₀ P ₂	N ₁ P ₂	N ₂ P ₀	N ₂ P ₁	N ₂ P ₂	N ₂ P ₃	N ₃ P ₂	N ₁ P ₁	当地 Local
肥料水平	N	0	0	120	240	240	240	240	360	120	275
Fertilizer level	P ₂ O ₅	0	105	105	0	52.5	105	157.5	105	52.5	145

1.3 研究方法

1.3.1 样品处理及检测

向日葵测产采取试验小区全部取样的方式。植物样测定: 在向日葵收获后, 选取长势均匀、具有代表性的向日葵 3 株, 按器官分解后分装牛皮纸袋内, 用烘箱于 105 ℃杀青 0.5 h, 再于 80 ℃下烘干至恒定质量, 测定各器官干物质质量, 最后粉碎, 按器官分别测定全氮、全磷量, 消化后, 以钒钼黄比色法测定磷素, 凯氏定氮法测定氮素, 最后通过加权统计方法计算整株向日葵养分量^[12]。

土样测定: 在向日葵播种前及收获后, 用土钻采集 0~120 cm 土层土样, 20 cm 为 1 层, 共分 6 层。用烘干法测定土壤含水率, NO₃⁻量的测定方法: 首先称取 5~10 g 新鲜土壤于离心管或三角瓶中, 准确记录称取土壤质量, 然后以水土比 5:1 的比例用移液管加入 1 mol/L 的氯化钾溶液浸提液, 25 ℃下震荡 2 h, 3 500 r/min 下离心 15 min, 0.45 μm 滤膜过滤, 取滤液备用, 之后采用流动分析仪测定。

1.3.2 分析方法

本研究考虑不同氮、磷施用量与产量、植株吸氮量、植株吸磷量之间的关系, 利用 Kriging 最优内插法进行插值分析。

肥料利用率 (RE) 指肥料单位施用对作物氮、磷、钾吸收的增加量, 该指标能直观反映肥料在施入土壤后的回收效率^[14], 计算式为:

$$RE=(U-U_0)/F \quad (1)$$

肥料生理利用率 (PE) 指作物地上部吸收单位肥

料所能增加的籽粒产量, 指出了植物体内养分的利用效率^[15], 计算式为:

$$PE=(Y-Y_0)/(U-U_0) \quad (2)$$

式中: Y 为施肥下作物产量 (kg/hm²); Y₀ 为不施肥下作物产量 (kg/hm²); U 为施肥后作物收获时地上部吸肥总量 (kg/hm²); U₀ 为未施肥作物收获期地上部吸肥总量 (kg/hm²); F 为肥料投入量 (kg/hm²)。

1.4 数据处理

数据分析采用 Office 2010、SPSS 19.0、Surfer 8.0、Sigmaplot 10 等软件处理。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷配施模式下向日葵肥料效应研究

2.1.1 单因素肥料效应研究

单因素肥料效应的研究结果如图 1 所示, 图中的不同字母表示同一时期处理差异达 5%显著水平。由图 1 可知, 随施氮量增加, 向日葵产量表现为先增后减趋势。中氮 (240 kg/hm²) 处理产量最高, 比空白 (N₀P₀) 及当地处理分别增产 58.0%、9.5%, 说明在一定施肥范围内 (0~240 kg/hm²), 增施氮能够显著增加向日葵产量, 而产量达到极限值后, 继续增施氮则对向日葵生长产生抑制作用, 使产量显著降低 (减产 11.7%)。在中磷 (105 kg/hm²) 水平时, 高氮 (360 kg/hm²) 与低氮 (120 kg/hm²) 处理间无显著差异, 其余处理间差异显著 (P<0.05)。在中氮 (240 kg/hm²) 水平时, 中磷 (105 kg/hm²) 与低磷 (52.5 kg/hm²)、缺磷 (0 kg/hm²) 处理间差异显著, 与高磷 (157.5

kg/hm²) 处理间无显著差异, 高磷 (157.5 kg/hm²)、低磷 (52.5 kg/hm²)、缺磷 (0 kg/hm²) 处理间无显著差异 ($P<0.05$)。其中, 中磷 (105 kg/hm²) 产量

最高, 说明在一定施肥范围内 (0~105 kg/hm²), 增施磷能够有效增加向日葵产量, 当产量增长达到极限值后, 增施磷肥则使其产量降低 (减产 4.5%)。

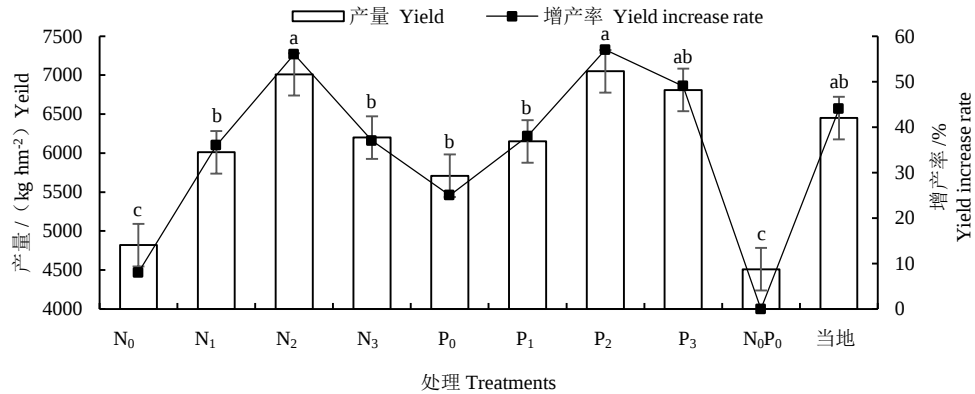


图 1 不同施肥水平下向日葵产量

Fig.1 Analysis of crop yield under different fertilization treatments

2.1.2 氮、磷二因素互作效应分析

图 2 为氮、磷二因素对向日葵产量交互作用分析结果。不难看出, 施氮量单因素变化时, 交互作用可以分为 3 个阶段: ①施氮量较小时 (0~120 kg/hm²), 氮、磷之间为正交互效应, 对产量表现为协同促进作用, 此时处于施氮高效期; 当施氮量达到 120 kg/hm² 左右时, 增施磷肥并不能有效增加作物产量, 处于施氮缓效期。②随着施氮量增加 (120~240 kg/hm²), 当施磷处于 0~105 kg/hm² 时, 增施磷肥能有效增加作物产量, 向日葵处于施磷高效期、施氮缓效期; 当施磷处于 105~157.5 kg/hm² 时, 增施磷肥不能增加产量, 处于施磷无效期。③当施氮在 300 kg/hm² 左右时, 处于施氮缓效或无效期; 施氮量 > 300 kg/hm², 氮、磷之间表现为拮抗作用, 此时处于施氮负效期。

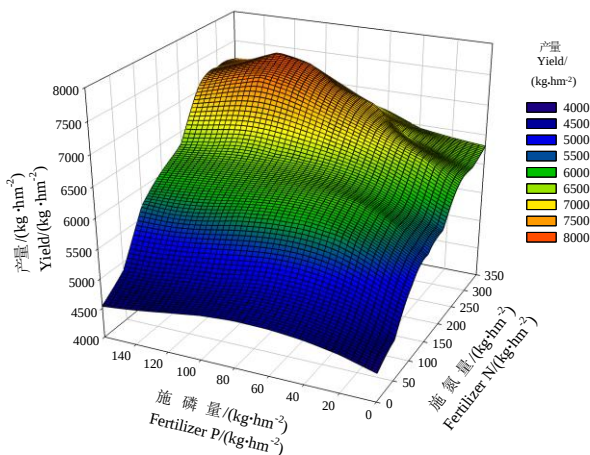


图 2 氮、磷互作效应-产量等值线图

Fig.2 N,P interaction effects-yield isoline map

2.2 不同氮磷配施模式下向日葵肥料利用效率研究

2.2.1 氮磷肥单因素对植株吸氮 (磷) 量的影响

氮、磷施量分别与植株吸氮 (磷) 量的一元二次

回归模型如图 3 所示。由图 3 可知, 二者具有较好的拟合关系, 施氮量和植株吸氮量呈正相关关系, 当施氮量达到一定水平之后, 植株需求量达到极限。合理的施肥应该协调土壤供氮能力与植株吸氮需求间的供需平衡, 植株吸磷量也表现出类似规律。

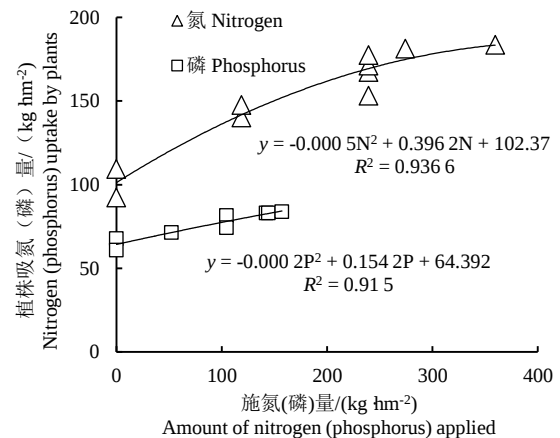


图 3 氮 (磷) 素吸收量对施氮 (磷) 量的反应曲线

Fig.3 Sunflowers N/P uptake responses to N/P rates at harvest

2.2.2 氮磷肥二因素互作对植株吸氮 (磷) 量的影响

氮磷互作对向日葵植株吸氮 (磷) 量的影响如图 4 所示。由图 4 (a) 可知, 随着施氮的增加 (0~240 kg/hm²), 向日葵植株吸氮量处于显著增加阶段, 施磷量在 0~52.5 kg/hm² 时, 对植株吸氮量产生显著影响, 此时处于施氮高效期, 氮、磷对植株吸收量表现为协同促进作用; 当氮、磷施用量达到某一极限时 (240、105 kg/hm²), 增施氮肥并不能有效增加向日葵植株吸收, 此时处于施氮缓效期或负效期, 增施磷肥只在一定范围内增加植株吸氮量。

由图 4 (b) 可知, 随着施磷量的增加 (0~105 kg/hm²), 向日葵的植株吸磷量处于显著增加阶段,

氮 ($0 \sim 240 \text{ kg/hm}^2$)、磷对植株吸收量表现为协同促进作用, 此时处于施磷高效期; 当氮、磷施用量达到某一极限值时 (240 、 105 kg/hm^2), 增施氮、磷肥并

不能有效提升植株吸磷量, 此时处于施氮缓效期、负效期。

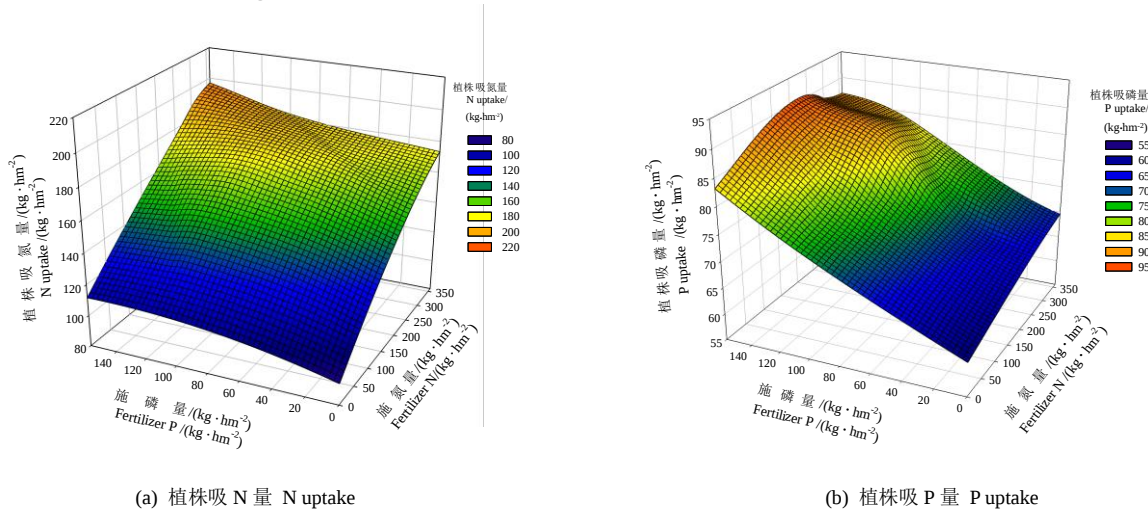


图 4 N、P 肥交互效应-植株吸 N、P 量情况

Fig.4 N, P fertilizer interaction effects-N, P uptake contour map

2.2.3 向日葵肥料利用率分析

肥料利用率及生理利用率如表 2 所示。中氮 (240 kg/hm^2) 水平时, P_0 与各处理间的 RE_N 差异显著, 且 P_1 、 P_2 、 P_3 处理间无显著差异。具体表现为以 P_2 处理下的 RE_N 最高, 分别较 P_0 、 P_1 、 P_3 处理的肥料利用率高 39.53% 、 12.06% 和 7.3% ; 中磷 (105 kg/hm^2) 水平时, N_1 、 N_2 、 N_3 处理间差异显著, 其中以 N_2 处理的 RE_N 最高, 分别较 N_1 、 N_3 处理高 7.62% 和 39.53% ; 对各处理 RE_P 分析则表现为: 中氮 (240 kg/hm^2) 水平时, P_3 与各处理间差异显著, P_1 、 P_2 处理间无显著差异, 表现为 P_1 最高, 分别较 P_2 、 P_3 高 11.64% 和 44.52% ; 中磷 (105 kg/hm^2) 水平时, N_0 与各处理间差异显著, 其余各处理间无显著差异, 其中以 N_2 处理的磷素利用率最高, 分别高出 N_0 、 N_1 、 N_3 处理 47.66% 、 15.95% 和 5.59% 。

此外, 对各处理间 PE_N 分析得出: 中磷 (105 kg/hm^2) 水平时, N_0 与 N_3 处理、 N_1 与 N_2 处理间的 PE_N 无显著差异, 其余处理间差异显著。表现为 PE_N 以 N_2 最高, 较 N_0 、 N_1 、 N_3 处理分别高 60.53% 、 5.17% 和 57.22% ; 中氮 (240 kg/hm^2) 水平时, P_0 与 P_1 处理、 P_2 与 P_3 处理间的 PE_N 无显著差异, 其余处理间差异显著, 表现为 P_2 最大, 且分别较 P_0 、 P_1 、 P_3 处理高 52.5% 、 31.47% 和 6.32% 。而对 PE_P 分析可以发现: 中氮 (240 kg/hm^2) 水平时, 各施磷处理间差异显著, 以 P_0 处理的 PE_P 最大, 分别比 P_1 、 P_2 、 P_3 处理高 28.06% 、 55.30% 和 106.12% ; 中磷 (105 kg/hm^2)

水平时, N_1 与 N_3 处理间无显著差异, 其余处理间差异显著, 表现为 N_2 处理最大, 分别较 N_1 、 N_3 处理高 5% 和 57.5% 。

综上, 从作物对 N、P 肥料利用率和生理利用率分析, N_2P_2 的优化配施模式对于作物的生长、产量及肥料的利用效率均可达到最优效果。

产量、植株吸氮 (磷) 量与施氮 (磷) 量的关系如图 5 所示。由图 5 可知, 施氮 (磷) 量与植株吸氮 (磷) 量满足二次回归关系, 表现为正相关。施氮量小于 260 kg/hm^2 时, 随施氮量增加, 籽粒产量与施氮量呈正相关关系, 而大于 260 kg/hm^2 时, 籽粒产量与施氮量间呈负相关关系, 施磷量小于 120 kg/hm^2 时, 籽粒产量与施磷量呈正相关关系, 而大于 120 kg/hm^2 时, 籽粒产量随施磷量增加变化不大, 此时施磷量与 RE_N (RE_P)、 PE_N (PE_P) 负相关。随着氮、磷施量的增加, 植株吸氮 (磷) 量及籽粒产量都表现为增加趋势, 而当籽粒产量达到临界值时, 植株吸氮 (磷) 量仍表现为增加趋势, 此时, 植株对氮、磷的吸收主要是增加作物秸秆的产量, 这一阶段属于奢侈吸收。 RE_N (RE_P)、 PE_N (PE_P) 表现为随着施氮 (磷) 量的增加而降低, 适量的磷 (氮) 肥也能够有效增加作物植株吸氮 (磷) 量, 从而提高作物对土壤中氮 (磷) 素的回收及植株中氮 (磷) 素的利用。而中氮中磷 (N_2P_2) 相对对照处理, 施氮量削减 12.7% , 施磷量削减 27.6% 的同时, RE_N 、 RE_P 分别提高了 2.9% 、 3.8% , PE_N 、 PE_P 分别增加了 8.3 、 40 kg/kg 。

表 2 肥料利用率及生理利用率

Table 2 Apparent recovery efficiency of applied fertilizer and physiological efficiency of applied fertilizer				
处理 Treatments	施用肥料利用率/% Fertilizer utilization efficiency		施用肥料的生理利用率/(kg·kg ⁻¹) Physiological efficiency of fertilizer application	
	N	P	N	P
N ₀ P ₀	-	-	-	-
N ₀ P ₂	-	12.8±2.7d	19.0±7.7b	23.7±6.1e
N ₁ P ₂	32.8±7.0a	16.3±0.5bc	29.0±7.0a	93.2±12.3d
N ₂ P ₀	25.3±0.7d	-	20.0±2.4b	202.2±80.1a
N ₂ P ₁	31.5±1.5c	21.1±2.3a	23.2±5.8b	157.9±50.3b
N ₂ P ₂	35.3±0.2c	18.9±0.5ab	30.5±2.8a	130.2±15.7c
N ₂ P ₃	32.9±0.4c	14.6±0.6cd	28.7±3.2a	98.1±5.9d
N ₃ P ₂	25.3±0.5d	17.9±2.0b	19.4±3.1b	93.6±24bd
N ₁ P ₁	39.9±0.3b	19.4±1.0ab	32.7±4.1a	153.9±27.8b
当地	32.4±0.2c	15.1±1.3c	22.2±5.9b	90.2±33d

注 表中不同字母表示差异达 5%显著水平。Note: The different letters in the table showed a significant difference at 5% level.

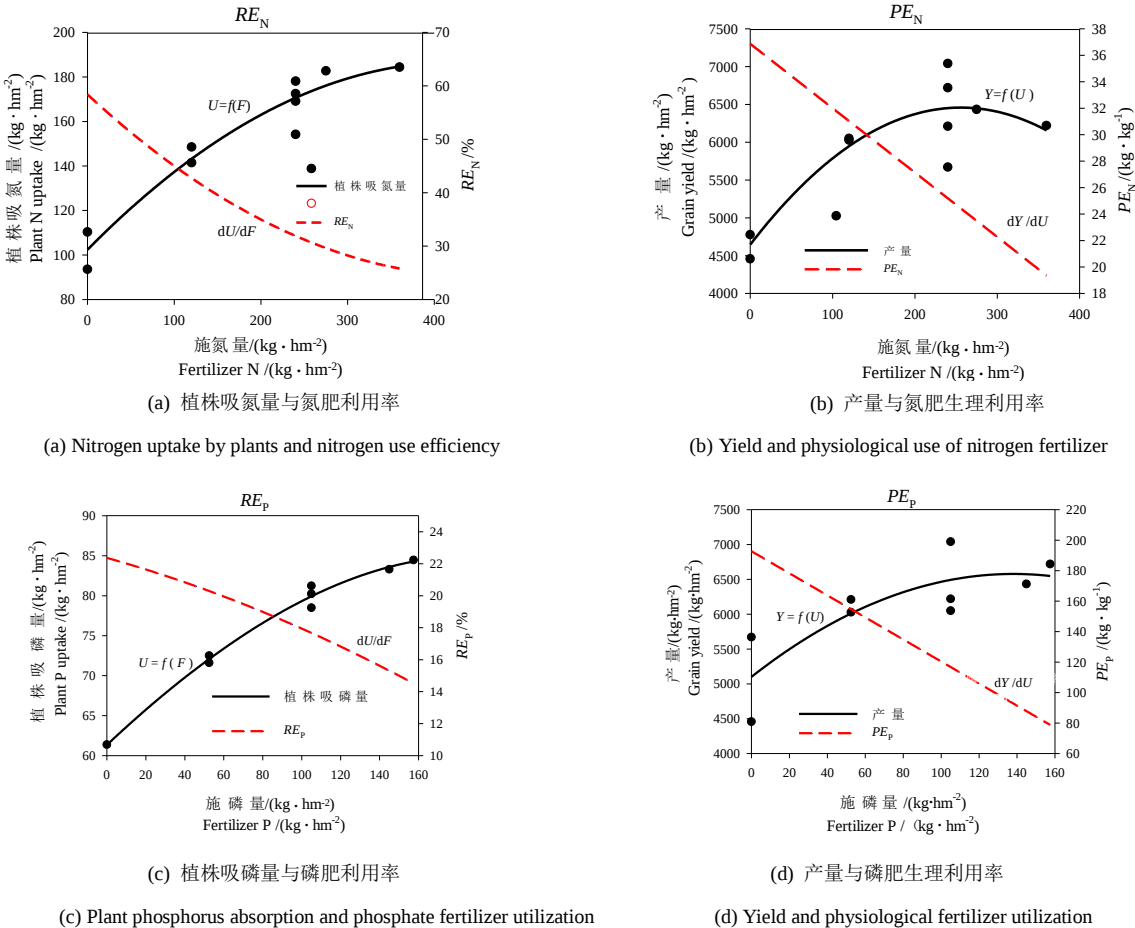


图 5 肥料利用率与生理利用率

Fig.5 Apparent recovery efficiency of applied fertilizer and physiological efficiency of applied fertilizer

2.3 向日葵收获后土壤残留硝态氮累积

向日葵收获后各土层土壤硝态氮残留累积量状况见图 6。作物收获后 0~120 cm 土层中土壤残留无机氮成分主要为硝态氮。因此评价作物收获后矿质氮时，只考虑硝态氮的残留。由图 6 可知，作物收获后 0~120 cm 土层土壤残留硝态氮表现为缺氮（0

kg/hm²）、低氮（120 kg/hm²）、中氮（240 kg/hm²）、高氮（360 kg/hm²）处理间差异显著（*P*<0.05），氮肥施入量越大残留越大，缺氮处理为 59.1~71.6（kg/hm²），低氮处理为 111.3~117 kg/（hm²），中氮处理为 173.8~208.2 kg/hm²，高氮处理为 260.7 kg/hm²；缺氮水平各处理、低氮水平各处理、中氮水

平各处理间均无显著差异,高氮处理与各处理间差异显著,中氮中磷配施处理在 N_2 水平 4 个处理中最低,相比对照处理减少了 51.1 kg/hm^2 的硝态氮残留,说明适当的氮、磷配施能够减少作物收获后土体中的残留硝态氮含量。 $0\sim40$ 、 $40\sim80$ 、 $0\sim80 \text{ cm}$ 土层土壤残留硝态氮的变化规律同 $0\sim120 \text{ cm}$ 土层相似,各处理 $80\sim120 \text{ cm}$ 土层的土壤硝态氮无明显变化。 $0\sim40 \text{ cm}$ 土层的土壤硝态氮残留在各土层中最为严重,占

$0\sim120 \text{ cm}$ 土层中的 $57.3\%\sim62.4\%$, $0\sim80 \text{ cm}$ 土层则占 $0\sim120 \text{ cm}$ 土层中的 $81.7\%\sim95.6\%$, $80\sim120 \text{ cm}$ 土层所占比例最小。

硝态氮残留累积量随着施氮量的增加而增加,同时,随着施磷量的增加表现出先降低后增加的趋势,当施氮量在 N_2 水平时,硝态氮累积量最低,说明适当配施磷肥 (105 kg/hm^2) 能够明显减少作物收获后土壤硝态氮的残留。

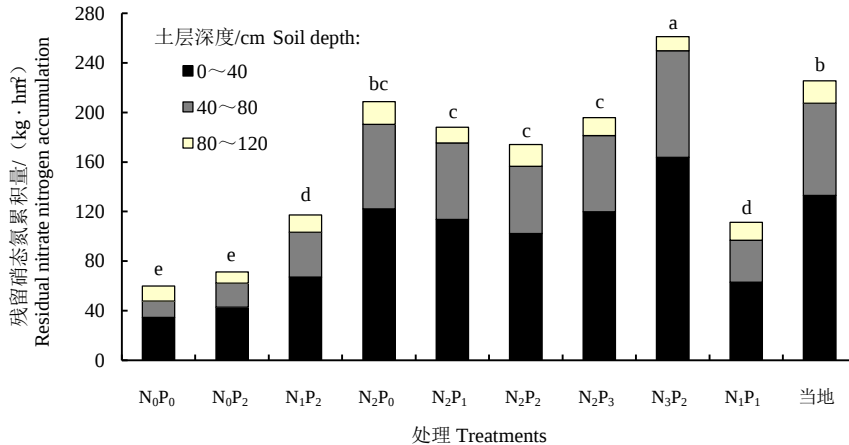


图6 向日葵收获后各土层土壤硝态氮残留累积量图

Fig.6 Sunflower post-harvest soil nitrogen index

3 讨论

3.1 氮磷配施对植株产量及吸氮（磷）量的影响

FAO 考虑不同类型国家的农业生产情况得出: 施肥水平在 200 kg/hm^2 以下对粮食增产效果十分显著, 在 $200\sim400 \text{ kg/hm}^2$ 的水平, 也有明显的增产效果^[16]。本研究对不同氮、磷配施模式下向日葵产量分析得出, 随着施氮（磷）量的增加, 向日葵产量表现为先增加后降低的趋势, 中氮中磷配施 ($N:240 \text{ kg/hm}^2$; $P:105 \text{ kg/hm}^2$) 相比当地处理, 在施氮量减少 12.7%, 施磷量减少 27.6% 的情况下, 籽粒增产 9.5%。其中, 施氮效果由高效、缓效, 到负效的方式转变, 施磷效果以缓效、高效到负效的方式转变, 施肥量较小时, 二者表现为协同促进作用, 过度则表现为拮抗作用。

植株吸氮（磷）量与施氮（磷）量呈正相关关系, 吸氮（磷）效率与施氮（磷）量呈负相关趋势, 施氮（磷）量与植株吸氮（磷）量之间满足一元二次回归关系。氮、磷对产量的交互作用表明: 当施氮、磷量超过中氮中磷 (N_2P_2) 水平时, 将对籽粒产量产生负效应。而此时植株吸氮（磷）量则会继续增加, 这一阶段的施肥量只能满足向日葵秸秆产量的增加, 不增加籽粒产量, 肥量过多会使向日葵的生育期变长, 最终影响灌浆。此阶段处于奢侈吸收阶段 (图 5), 这与赵营等^[17]在宁夏黄灌区对玉米、水稻的研究结果相吻合。因此, 从 N、P 肥耦合效应和向日葵产量等方

面综合评价可以得出, N_2P_2 配施水平可作为该地区的 N、P 肥配施的最优水平。

3.2 氮磷配施对向日葵肥料利用效率的影响研究

据报道, 当作物的氮肥利用率为 $30\%\sim50\%$, 氮肥生理利用率为 $30\sim60 \text{ kg/kg}$ 时, 理论上是比较适宜的^[19]。本研究表明, 不同氮、磷配施模式下的 RE_N 为 $25.3\%\sim45.8\%$, PE_N 为 $19\sim32.7 \text{ kg/kg}$, 其中 PE_N 较小可能由于内蒙古河套灌区耕地盐渍化程度较重, 影响了向日葵籽粒产量, 这是由区域的变异性导致的。此外, 大量研究发现, 氮肥利用率和作物产量与氮肥施用量和施用时间关系密切^[20-21]。本研究通过对氮磷肥配比的研究发现, 不合理的氮磷肥配比, 会直接导致肥料利用率低下, 单一肥料水平过高或过低时, 作物对其他肥料的吸收也受不利影响。故氮磷肥合理配施, 对于提高肥料利用效率至关重要。将肥料利用率与肥料生理利用率结合分析, 能够较好表征施肥方式与作物对肥料的回收利用效率及作物体内的养分利用效率之间的关联性 (图 5)。中氮中磷配施相比于当地处理, 氮、磷肥利用效率分别提高了 2.9% 和 3.8%, 氮、磷肥的生理利用率分别增加了 8.3 kg/kg 、 40 kg/kg 。因此, N_2P_2 配施模式可最大发挥 N、P 肥的利用效率。

3.3 向日葵收获后土壤硝态氮残留累积量

过量施入的氮素, 会以硝态氮的形式累积在土壤

中，且施氮越多，积累越多。积累的氮素，将通过淋洗或流失等方式对地下水环境造成较大污染。本研究针对 0~120 cm 土层的硝态氮累积量与施氮量关系的研究结果符合这一规律。此外，当施氮量超过最佳水平时，硝态氮质量浓度呈线性增加，直接导致硝态氮在土壤中大量淋失^[22]。相对的，也有人认为当施氮量高于最佳施氮量时，收获后土体硝态氮质量浓度没有变化^[20]，甚至减少^[23]。本研究认为，施氮超过最佳施肥水平 (N_2P_2) 时，硝态氮量将继续增加，这会使作物收获后表层 0~40、40~80、0~120 cm 土层土壤硝态氮过度累积且无法被继续利用。过度积累的氮，会随秋浇洗盐过程进入地下水，造成农田面源污染。合理配施磷肥则能够起到协调土壤养分供应、增加作物对硝态氮吸收的作用，从而避免或减缓此种情况发生。中氮中磷配施不仅可以保证产量，更能降低硝态氮在土壤中的残留水平，相比对照处理减少了 51.1 kg/hm² 的硝态氮残留 (0~120 cm 土层)，欧盟标准规定大田作物收获后 0~90 cm 土层硝态氮残留不应超过 90~100 kg/hm²^[17]。本研究表明，向日葵收获后，0~120 cm 土层土壤硝态氮累积量介于 59.1~260.7 kg/hm²。因此，把氮磷合理配施水平下 0~120 cm 土层的土壤硝态氮累积量区间 (173.8~208.2 kg/hm²) 作为内蒙古河套灌区向日葵对土壤硝态氮残留的环境承受范围在理论上是合理的，且最佳施肥水平 N_2P_2 处理下的硝态氮残余量在该地区的土壤承受范围内。

综上，在内蒙古河套灌区，中氮中磷 (N_2P_2) 配施能有效提高作物的籽粒产量、肥料利用效率、生理利用率。同时，还能降低作物收获后土体中氮素盈余。但本研究仅为 1 a 试验结果，仍需进行多年试验进行验证。

4 结 论

1) 中氮中磷配施 ($N:240 \text{ kg/hm}^2$; $P:105 \text{ kg/hm}^2$) 对产量促进效果最好，产量最优。

2) 中氮中磷配施 ($N:240 \text{ kg/hm}^2$; $P:105 \text{ kg/hm}^2$) 时作物养分吸收最好，肥料利用效率较高当地处理有显著提高。

3) 在内蒙古河套灌区向日葵对土壤硝态氮残留的环境承受范围内，得出理论合理的 0~120 cm 土层土壤硝态氮累积量区间为 (173.8~208.2 kg/hm²)。

参考文献：

- [1] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期定位施肥小麦的肥料利用率研究[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 121-126.
- HUANG Shaomin, BAO Dejun, HUANGPU Xiangrong, et al.

- Long-term effect of fertilization on fertilizer use efficiency of wheat in soil[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(2): 121-126.
- [2] 张世贤. 中国的农业发展及平衡施肥在农业生产上的应用[M]. 北京:农业出版社, 1989: 10-15.
- ZHANG Shixian. Agricultural development in China and the application of balanced fertilization to agricultural production [M]. Beijing: Agricultural Press, 1989: 10-15.
- [3] 石元亮, 王玲莉, 刘世彬, 等. 中国化学肥料发展及其对农业的作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 852-864.
- SHI Yuanliang, WANG Lingli, LIU Shibin, et al. Development of chemical fertilizer industry and its effect on agriculture of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 852-864.
- [4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.
- [5] 黄文芳. 农业化肥污染的政策成因及对策分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 193-198.
- HUANG Wenfang. Analysis of the policy causes of pollution from agriculture fertilizers and its countermeasures[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1): 193-198.
- [6] 田德龙, 史海滨, 王长生, 等. 盐渍化土壤向日葵水-肥耦合试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 100-104.
- TIAN Delong, SHI Haibin, WANG Changsheng, et al. Coupling effect of soil water and fertilizer on sunflower in saline soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 100-104.
- [7] 郭富强, 史海滨, 杨树青, 等. 盐渍灌区不同水肥条件向日葵氮磷利用率及淋失规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 39-43.
- GUO Fuqiang, SHI Haibin, YANG Shuqing, et al. Nitrogen and phosphorus utilization of sunflower and loss under different water and fertilizer conditions in salinization of irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 39-43.
- [8] 汤宏, 王建伟, 李向阳, 等. 水氮耦合对烤烟生长、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 17-24.
- TANG Hong, WANG Jianwei, LI Xiangyang, et al. The effect of water-nitrogen coupling on growth, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 17-24.
- [9] 杨黎, 魏占民, 徐大为, 等. 膜下滴灌不同水氮组合对向日葵生长及水氮利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 50-55.
- YANG Li, WEI Zhanmin, XU Dawei, et al. Growth and water-nitrogen use efficiency of sunflower under mulched drip fertigation with different water-nitrogen ratios[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 50-55.
- [10] 李志贤, 柴守玺. 西北绿洲氮磷配施对冬小麦产量及养分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 488-491.

- LI Zhixian, CHAI Shouxi. Effects of fertilizer N, P on winter-wheat yield and fertilizer use efficiency in north-west oasis area[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(3): 488-491.
- [11] 尚文彬, 张忠学, 郑恩楠, 等. 水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(1): 49-55.
- SHANG Wenbin, ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, et al. Nitrogen-water coupling affects nitrogen utilization and yield of film-mulched maize under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(1): 49-55.
- [12] 鲍士旦. 稻麦钾素营养诊断和钾肥施用[J]. *土壤*, 1990, 22(4): 184-189.
- [13] 刘德平. 基于盐渍化灌区水土环境安全的优化施肥模式研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- LIU Deping. Study on the optimization models of fertilization based on environment security of soil and water in salinization irrigation district[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [14] 杜连凤, 张维理, 赵同科. 不同肥力菜地氮肥去向研究[C]//第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 天津: 2009: 522-526.
- DU Lianfeng, ZHANG Weili, ZHAO Tongke. Study on the Fate of Nitrogen Fertilizer in Different Fertility Vegetable Fields [C]// *Proceedings of the Third National Symposium on Agricultural and Environmental Sciences*, 2009: 515-519.
- [15] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1 095-1 103.
- PENG Shaobing, HUANG Jianliang, ZHONG Xuhua, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1 095-1 103.
- [16] 李家康, 林葆, 梁国庆, 等. 对我国化肥使用前景的剖析[J]. *磷肥与复肥*, 2001, 16(2): 1-5.
- LI Jiakang, LIN Bao, LIANG Guoqing, et al. Dissecting the perspectives of fertilizer application in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2001, 16(2): 1-5.
- [17] 赵营, 同延安, 张树兰, 等. 氮磷钾施用量对灌淤土水稻产量及肥料利用率的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(2): 118-121.
- ZHAO Ying, TONG Yan'an, ZHANG Shulan, et al. Effect of different N, P_2O_5 , K_2O rates on yield and fertilizer using efficiency of paddy rice in irrigation-warpage soil of ningxia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(2): 118-121.
- [18] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 3 997-4 007.
- WANG Weini, LU Jianwei, LI Yinshui, et al. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 3 997-4 007.
- [19] KLIMCZAK I, MALECKA M, SZLACHTA M, et al. Effect of storage on the content of polyphenols, vitamin C and the antioxidant activity of orange juices[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2007, 20(3): 313-322.
- [20] RAUN W R, JOHNSON G V, WESTERMAN R L. Fertilizer nitrogen recovery in long-term continuous winter wheat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(3): 645-650.
- [21] JAHANGIR M M R, KHALIL M I, JOHNSTON P, et al. Denitrification potential in subsoils: A mechanism to reduce nitrate leaching to groundwater[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 147: 13-23.
- [22] LIANG B C, MACKENZIE A F. Changes of soil nitrate-nitrogen and denitrification as affected by nitrogen fertilizer on two Quebec soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(3): 521-525.
- [23] 叶东靖, 高强, 何文天, 等. 施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 552-558.
- YE Dongjing, GAO Qiang, HE Wentian, et al. Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 552-558.
- [24] 王兴仁, 张福锁, R.Odowski. 石灰性潮土对氮肥连续施用的环境承受力[J]. *北京农业大学学报*, 1995(S2): 94-98.
- WANG Xingren, ZHANG Fusuo, R.ODOWSKI. Environment capacity of calcareous meadow soil to nitrogen fertilizer applied continuously[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis*, 1995(S2): 94-98.

Optimizing Nitrogen and Phosphorus Fertilization to Improve Sunflower Yield in Hetao Irrigation District

LOU Shuai¹, YANG Shuqing^{1*}, LIU Ruimin¹, LIU Deping²

(1. Water Conserwancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Water Conserwancy and Civil Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: **【Background】** Many farmers in Hetao Irrigation District apply excessive fertilizers as an insurance to ensure yields due to a lack of understanding of what the crops really need. This is not only a waste of fertilizers but could also give rise to water pollution and secondary salinization. Apparently, most research on fertilization has focused on water and nitrogen coupling and overlooked the importance of the combined effects of nitrogen and phosphorus fertilizers. **【Objective】** This study aims to plug this knowledge gap by systemically studying nitrogen-phosphorus interaction in attempts to reduce non-point source pollution and improve fertilizers use efficiency. **【Method】** The experiment was conducted in a sunflower field, with four nitrogen fertilizer levels: 0, 120, 240, 360 kg/hm², and four phosphate fertilizer levels: 0, 52.5, 105, 157.5 kg/hm². Fertilization used by local farmers, N: 275 kg/hm² and P: 145 kg/hm², was taken as the control. Overall, we had 15 treatments. The optimal nitrogen and phosphorus application was estimated by comparing the sunflower yield, plant uptake of nitrogen and phosphorus, and fertilizers use efficiency of all treatments. We also examined the effect of all treatments on soil environment by comparing their associated residual nitrate in soil after harvest. **【Result】** The interaction of nitrogen and phosphorus fertilizers changed from synergy to antagonism as their applications increased. Crop yield and plant nitrogen uptake change from increase, stagnation to decrease as nitrogen application increased, while the impact of phosphorus application on crop yield was concave - increasing first followed by a decline when phosphorus application exceeded a certain value. It was found that applying 240 kg/hm² of N and 105 kg/hm² of P substantially reduced residual nitrogen in soil and increased its uptake by the crop. In particular, compared with the control, it reduced nitrogen and phosphorus fertilizer application by 12.7% and 27.6% respectively, while increasing yield by 9.5% and physiological utilization of nitrogen and phosphorus by 8.3 and 40 kg/kg respectively. **【Conclusion】** Comparative studies revealed that applying 240 kg/hm² of N and 105 kg/hm² of P was the most optimal fertilization to reduce N and P application while in the meantime increasing sunflower yield.

Key words: nitrogen -phosphorus coupling; fertilizer use efficiency; nitrogen balance; residual nitrogen

责任编辑：陆红飞