

磷肥减量结合硫酸铵配施提高西北地区旱地 春玉米磷素利用效率

马琴, 刘小雨, 冉瑾怡, 刘金山*, 张翔, 周景云

(西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】西北旱地春玉米种植区磷肥过量施用, 磷肥利用效率偏低。本研究旨在探究春玉米磷肥减施的可行性以及实现磷素高效利用的优化施肥方式, 以期为该地区春玉米磷肥高效利用提供参考。【方法】在西北典型雨养农业区设置3年的定位田间试验, 共设5个处理: 对照(CK, 不施磷肥)、农户模式(FP, 磷用量 P_2O_5 120 kg/hm², 撒施)、减磷撒施(RP, 磷用量 P_2O_5 70 kg/hm², 撒施)、减磷条施(BF, 磷用量 P_2O_5 70 kg/hm², 条施)、硫酸铵模式(SA, 采用硫酸铵氮肥替代尿素氮肥, 其他同减磷撒施处理)。在玉米四叶期、五叶期以及成熟期采集植物和土壤样品(根际土和非根际土), 测定玉米根系、地上部生物量及其磷含量, 土壤碱性磷酸酶活性、pH、有效磷、丛枝菌根侵染率, 并采用WinRHIZO根系扫描系统测定根长、根表面积、根体积等指标。

【结果】三年试验结果表明, RP、BF、SA处理玉米籽粒产量、生物量与FP处理无显著差异($P > 0.05$), 但磷肥偏生产力显著提高, 平均增幅68.0%。RP、BF、SA处理成熟期玉米籽粒磷含量较FP处理降低7.1%~12.9%, 磷累积量降低了8.8%~17.0%, 其中RP和BF处理降低幅度达到显著水平, 但SA处理籽粒磷含量和磷累积量与FP处理相当。与FP处理相比, RP和SA的磷肥回收利用率均有提高, 其中SA处理显著提高7.2个百分点; RP、BF、SA处理均有促进春玉米苗期根系生长的趋势, 其中SA处理根长、根表面积以及细根长(直径小于0.50 mm)分别提高13.9%~37.9%、8.6%~46.1%、12.2%~43.0%。此外, 与FP处理相比, RP和SA处理提高了玉米苗期根系丛枝菌根侵染率, 增幅在16.2%~21.7%; SA处理非根际土碱性酶活性有增加趋势, 五叶期差异达显著水平, BF处理非根际土有效磷含量提高了18.8%~56.3%。【结论】在西北旱地春玉米种植区, 磷肥施用量由现在的 P_2O_5 120 kg/hm² 减少至70~75 kg/hm² 仍可保证玉米稳产。在此基础上, 用生理酸性肥料硫酸铵代替尿素可促进玉米根系生长以及丛枝菌根侵染, 促进玉米对磷素的吸收利用。

关键词: 磷肥减施; 硫酸铵; 磷肥利用率; AM菌根侵染率; 玉米产量

Improving phosphorus use efficiency of spring maize by reducing phosphate fertilizer rate and replacing urea with ammonium sulfate in dryland of Northwest China

MA Qin, LIU Xiao-yu, RAN Jin-yi, LIU Jin-shan*, ZHANG Xiang, ZHOU Jing-yun

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】 Excessive application of P fertilizer in the planting area of Northwest China is common, which resulted low phosphorus (P) use efficiency in spring maize production. The present study aimed to explore the feasibility of reducing the application rate of P fertilizer, and setup an efficient fertilization regime for spring maize production in this area. 【Methods】 A three-year of spring maize field trial was carried out in the rainfed area of Northwest China. The five treatments included no P fertilizer control (CK), farmers' practice (FP, P_2O_5 rate of 120 kg/hm² and broadcasting), reduced P fertilization pattern (RP, P_2O_5 70 kg/hm², in

收稿日期: 2019-10-18 接受日期: 2020-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200202)。

联系方式: 马琴 E-mail: maqind0112@126.com; *通信作者 刘金山 E-mail: jslu@nwsuaf.edu.cn

broadcasting method), banded P fertilization pattern (BF, P_2O_5 70 kg/hm², in banding application method) and ammonium sulfate pattern (SA, P_2O_5 70 kg/hm², in broadcasting method, and ammonium sulfate replaced urea). Plant roots and shoots, rhizosphere soil and bulk soil were sampled at the four- and five-leaf stage and the mature stage of the maize. The soil alkaline phosphatase activity, pH, Olsen-P content and arbuscular mycorrhizal (AM) infection rate were analyzed. The P concentration in grain, bract, spike-stalk, stem and leaf were measured. The length of roots, surface area of roots and root volume were determined by the WinRHIZO root scanning system.

【 Results 】 Compared to the FP treatment, the maize grain yield and shoot biomass in the reduced P treatments of RP, BF and SA were not significantly different ($P > 0.05$), but the partial factor productivities (PFP) of P fertilizer were much higher, with an average increase of 68.0%. The maize grain P concentration and P accumulation of RP, BF and SA treatments were decreased by 7.1%–12.9% and 8.8%–17.0%, respectively, and the reduction of RP and BF reached a significant level. The recovery rate of P fertilizer was increased in the RP and SA treatments, and the increase in SA treatment was as high as 7.2 percent point ($P < 0.05$). Reducing P treatments increased the total length of roots, root surface area, fine root length (less than 0.50 mm in diameter) of maize, the SA treatment obtained significant increments of 13.9%–37.9%, 8.6%–46.1% and 12.2%–43.0%, respectively. Compared to the FP treatment, RP and SA treatments increased the AM infection rate, with the significant increase rate of 16.2%–21.7% at the four- and five-leaf stage of maize; the SA treatment increased the alkaline phosphatase activity significantly and the BF treatment increased the soil available P concentration significantly at the five-leaf stage of maize. **【 Conclusions 】** In the dryland of northwest China, reducing the application rate of P_2O_5 from current 120 kg/hm² to 70–75 kg/hm² can still ensure the stable yield of spring maize. On basis of this, replacing urea with ammonium sulfate can promote the AM infection rate and the absorption of P, significantly stimulate the growth of maize roots.

Key words: reducing phosphate input; ammonium sulfate; P use efficiency; AM infection rate; maize grain yield

玉米是我国主要的粮食作物、饲料作物以及工业原料,近年来玉米的种植面积和产量均大幅增加。2018年全国玉米种植面积达到了4213万hm²,总产量达到了25717万t^[1]。据统计,磷肥对玉米籽粒产量的贡献率可达11.9%~28.6%^[2-3]。目前在玉米生产中,多数农户主要靠经验施磷肥^[4],在我国主要四大玉米种植区,磷肥施用量偏低或偏高现象占到30.0%~77.7%,其中磷肥施用量偏高的农户占30.0%~58.1%^[5-8]。在西北旱地春玉米种植区,60%以上的农户存在磷肥施用量不合理的现象(施肥不足和施肥过量),其中30.0%以上磷肥施用量偏高^[5]。磷肥施用量可直接导致磷肥当季利用率偏低(11.6%)^[9]和环境风险的增加^[10]。因此,在西北旱地春玉米种植区研究磷肥合理施用量和优化施肥措施对玉米生产具有重要意义。

为了实现磷肥在玉米生产中的可持续利用,前人在通过优化施肥措施挖掘作物自身的生物学潜力实现磷素高效利用方面做了不少研究,如在东北黑土区,常规施磷量基础上减施20%的磷肥可获得与常规施磷量相当的玉米籽粒产量,磷肥偏生产力增加17.0%~21.6%^[11];在华北平原石灰性土壤上,深

施磷肥可促进玉米根系下扎,促进了玉米对深层土壤养分的吸收^[12],磷肥的农学利用率和表观利用率显著增加,且籽粒产量提高10.6%^[13];此外,用生理酸性肥料硫酸铵替代尿素,促进了根系的增殖^[14],增加玉米苗期对磷养分的吸收^[15],玉米籽粒产量提高9.7%~12.5%^[16]。

然而,目前基于优化施肥措施实现磷素高效利用的研究主要集中在华北平原灌溉农业区,在西北雨养农业区尚未见报道。在该区域,优化施肥措施能否实现磷肥高效利用的同时保证玉米的产量尚属未知,故在西北旱地通过3年的定位田间试验,研究不同优化施肥措施对玉米生长、产量、磷素吸收利用和土壤养分含量的影响,为西北旱地春玉米磷肥的优化施用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验位于渭北旱塬雨养农业区陕西省长武县王东村(N 35°12', E 107°40')。该地海拔1220 m,气候类型为暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温和

降水量分别为 9.1℃ 和 578 mm, 全年 70% 降水集中于 5—9 月 (春玉米生长季)。春玉米是该区域主要种植作物之一, 每年于 4 月底播种, 9 月底收获, 生育期间无灌溉措施。供试土壤类型为黑垆土, 试验初始时土壤理化性质为: pH 8.25、容重 1.25 g/cm³、有机质 16.5 g/kg、全磷 0.73 g/kg、硝态氮 15.5 mg/kg、有效磷 (Olsen-P) 10.5 mg/kg、速效钾 (醋酸铵浸提) 134 mg/kg。试验为田间定位试验, 试验期间 (2017—2019 年) 月降雨量、平均气温如图 1 所示, 2017、2018、2019 年度全年降水量分别为 560、586、694 mm, 其中生育期 (5—9 月) 降水分别为 377、479、530 mm。

1.2 试验设计

田间试验采用完全随机区组试验设计, 共设 5 个处理: 对照 (CK, 不施磷肥), 农户模式 (FP, 磷用量 P₂O₅ 120 kg/hm², 撒施), 减磷撒施 (RP, 磷用量 P₂O₅ 70 kg/hm², 撒施), 减磷条施 (BF, 磷用量 P₂O₅ 70 kg/hm², 条施是在距离玉米种植行 5 cm 处挖深 10~13 cm 的沟, 将磷肥均匀撒入沟内后填埋)、硫酸铵模式 (SA, 采用硫酸铵氮肥替代尿素氮肥, 其他同减磷撒施处理)。各处理氮肥施用量为 N 225 kg/hm², 钾肥施用量为 K₂O 96 kg/hm²。氮肥总量的 50% 和全部磷钾肥作为基肥, 在土壤旋耕后人工撒施 (BF 处理除外) 并翻入耕层, 其余 50% 氮肥作为追肥在拔节期穴施, 施肥点距离植株 10 cm、深 10 cm。玉米供试品种为 ‘先玉 335’, 种植方式为全膜双垄沟栽培模式, 种植密度 65000 株/hm², 株距 31 cm。小区面积 24 m² (6 m × 4 m), 每个处理重复 3 次, 整个生育期按照当地农户习惯进行田间管理。

1.3 样品采集与测定

在玉米成熟期, 在各小区避开边行选取 10 m² 的

玉米作为测产样方, 收获玉米并记产, 产量以烘干基表示。同时, 在各小区随机采集 3 株玉米, 收获地上部, 风干后人工分为籽粒、茎叶、穗轴、苞叶 4 部分, 65℃ 烘干到恒重, 称重后粉碎备用。此外, 2018 和 2019 年在玉米四叶期以及五叶期, 分别在各小区随机选取 4 株玉米, 收获地上部, 并挖取 0—20 cm 的玉米根系, 洗净、烘干、称重后粉碎备用。另外, 采集玉米根系, 采用 “抖土法” 获得根际土。在玉米生长的植株行非根际部位采集 0—20 cm 耕层土样作为非根际土, 所有土壤样品风干后过 2 mm 筛备用。

玉米各器官磷含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解, 连续流动分析仪 (AA3, Seal 公司, 德国) 测定。利用 WinRHIZO 根系扫描系统 (Regent Instruments Inc., 加拿大) 扫描玉米根系, 获得数字化图像后对图像进行分析, 获得根系生长参数 (根长、根体积、根表面积、不同直径根系分布)。丛枝菌根侵染率采用 10% KOH 消煮玉米根系, 然后 2% HCl 酸化、0.05% 曲利苯蓝染色, 随机选取 30 根制片后用镜检法测定, 采用 “MYCOCALC” 软件进行计算^[17]。土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提, 连续流动分析仪 (AA3) 测定; 土壤 pH 采用水土比 2.5 : 1 浸提法测定, 土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[18]。试验前基础土样的各指标测定参照《土壤农化分析 (第三版)》^[19]。

1.4 数据处理

成熟期各器官 (籽粒、茎叶、穗轴、苞叶) 磷素累积量 (kg/hm²) = 各器官磷素含量 (g/kg) × 各器官生物量 (kg/hm²)/1000

玉米生育前期各器官 (地上部、根系) 磷素累积量 (mg/株) = 各器官磷素含量 (g/kg) × 各器官生物量

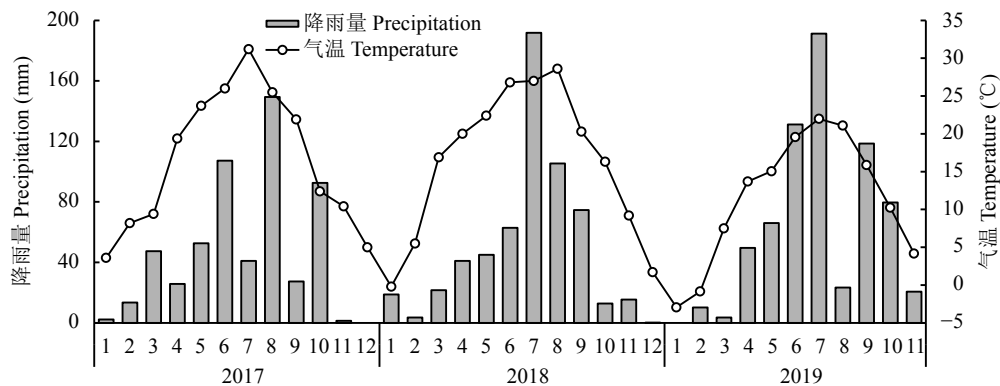


图 1 2017—2019 年试验期间月降雨量与平均气温

Fig. 1 Average monthly precipitation and temperature during the experiment period from 2017 to 2019

(g/株)/1000

磷肥的偏生产力 (kg/kg) = 施磷肥籽粒产量 (kg/hm²)/磷肥的投入量 (kg/hm²)

磷肥回收利用率 = [施磷区地上部吸磷量 (kg/hm²) - 不施磷区地上部吸磷量 (kg/hm²)]/磷投入量 (kg/hm²) × 100%

生育前期磷累积量 (mg/plant) = 地上部磷累积量 (mg/plant) + 根系磷累积量 (mg/plant)

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS (V24.0) 软件进行处理和统计分析, 采用 LSD 法进行方差分析, $P < 0.05$ 为显著。

2 结果与分析

2.1 春玉米籽粒产量与地上部生物量

3 年田间试验结果 (图 2) 表明, 与 CK 处理相比, 各施磷处理 (FP、RP、BF、SA) 玉米籽粒产量和地上部生物量均显著提高, 平均增幅分别为 17.7%~21.9% 和 18.2%~21.4%, 其中 2019 年 FP 处

理籽粒产量和地上部生物量的增幅最大, 分别高达 34.2% 和 36.8%。与 FP 处理相比, 各磷肥减量处理 (RP、BF、SA) 玉米平均籽粒产量和生物量均未显著降低。不同年份之间, 各处理的玉米籽粒产量和地上部生物量差异显著, 主要是由于 3 年间玉米生育关键时期降雨量不同引起的, 如 2017、2018 和 2019 年玉米关键生育期 (7 月份和 8 月份) 内的降雨量分别为 190、297 和 230 mm (图 1)。

2.2 春玉米成熟期各器官磷含量、磷累积量

3 年田间试验结果 (表 1) 表明, 与 CK 处理相比, 各施磷处理 (FP、RP、BF、SA) 均显著提高了玉米籽粒磷含量和累积量, 但对玉米穗轴、苞叶和茎叶的磷含量及累积量影响不显著。与 FP 处理相比, 磷肥减量处理 RP 和 BF 显著降低了籽粒磷含量 (9.6% 和 12.9%) 和磷累积量 (11.2% 和 17.0%), SA 处理籽粒磷含量和累积量降低不明显。不同处理对不同年份春玉米各器官磷含量以及累积量的影响不同, 其中试验第一年 (2017 年) 各施磷处理间玉米各器官的磷含量与累积量无显著差异, 随着试验年

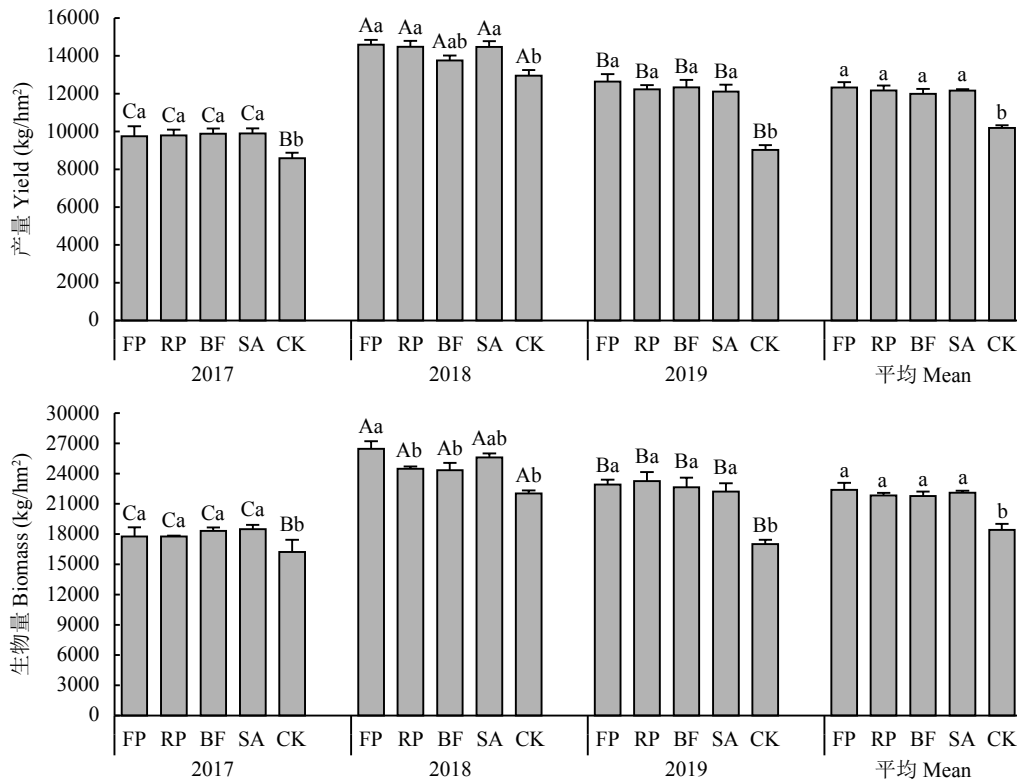


图 2 不同施肥措施对春玉米产量和地上部生物量的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization regimes on yield and shoot biomass of maize

[注 (Note): FP—P₂O₅ 120 kg/hm², 撒施 Broadcasting; RP—P₂O₅ 70 kg/hm², 撒施 Broadcasting; BF—P₂O₅ 70 kg/hm², 条施 Broadcasting in band; SA—P₂O₅ 70 kg/hm², 氮肥为硫酸铵 N fertilizer is ammonium sulfate; CK—不施磷肥对照 No P fertilization; 柱上不同小写字母表示同一年份各处理间差异显著, 不同大写字母表示相同处理在不同年份间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars indicate the significant difference among treatments in the same year and different capital letters indicate significant difference among the three years for the same treatment ($P < 0.05$).]

表 1 不同施肥措施下春玉米成熟期各器官磷含量、累积量
Table 1 Phosphorus content and accumulation in spring maize organs at maturity under different fertilization regimes

处理 Treatment	籽粒 Grain		苞叶 Bract		穗轴 Spike-stalk		茎叶 Stem leaf	
	磷含量 P content (g/kg)	磷累积量 P accumulation (kg/hm ²)	磷含量 P content (g/kg)	磷累积量 P accumulation (kg/hm ²)	磷含量 P content (g/kg)	磷累积量 P accumulation (kg/hm ²)	磷含量 P content (g/kg)	磷累积量 P accumulation (kg/hm ²)
2017								
FP	2.06 a	20.1 a	0.21 a	0.22 a	0.12 a	0.19 a	0.29 a	1.61 a
RP	2.04 a	20.0 a	0.21 a	0.19 a	0.17 a	0.28 a	0.32 a	2.08 a
BF	2.04 a	20.1 a	0.20 a	0.20 a	0.16 a	0.26 a	0.29 a	2.08 a
SA	2.05 a	20.3 a	0.18 a	0.18 a	0.14 a	0.23 a	0.31 a	2.09 a
CK	1.95 a	16.7 b	0.18 a	0.17 a	0.15 a	0.22 a	0.33 a	2.20 a
2018								
FP	2.63 a	38.3 a	0.15 a	0.15 a	0.16 a	0.26 a	0.51 a	4.14 a
RP	2.28 b	33.0 b	0.09 ab	0.08 ab	0.14 a	0.24 a	0.34 a	2.50 b
BF	2.14 c	29.4 c	0.07 b	0.07 b	0.14 a	0.22 a	0.37 a	3.06 ab
SA	2.43 ab	35.2 ab	0.11 ab	0.11 ab	0.14 a	0.23 a	0.40 a	3.40 ab
CK	1.74 d	22.6 d	0.05 b	0.05 b	0.13 a	0.22 a	0.34 a	2.22 b
2019								
FP	2.52 a	31.9 a	0.11 ab	0.13 ab	0.19 a	0.41 a	0.36 ab	1.72 a
RP	2.22 b	27.2 b	0.10 ab	0.11 ab	0.17 a	0.39 a	0.30 abc	1.30 b
BF	2.10 b	26.0 b	0.09 b	0.09 bc	0.16 a	0.36 a	0.40 a	1.69 ab
SA	2.20 b	26.6 b	0.12 a	0.13 a	0.13 a	0.31 a	0.28 bc	1.29 b
CK	1.91 c	15.4 c	0.10 ab	0.08 c	0.13 a	0.25 a	0.25 c	0.89 c
平均 Mean								
FP	2.40 a	29.4 a	0.16 a	0.17 a	0.16 a	0.28 a	0.39 a	2.73 a
RP	2.17 b	26.1 b	0.13 a	0.13 a	0.16 a	0.30 a	0.32 a	1.96 a
BF	2.09 b	24.4 b	0.12 a	0.12 a	0.15 a	0.28 a	0.35 a	2.28 a
SA	2.23 ab	26.8 ab	0.14 a	0.14 a	0.15 a	0.29 a	0.33 a	2.26 a
CK	1.80 c	17.7 c	0.12 a	0.12 a	0.14 a	0.23 a	0.33 a	2.00 a

注 (Note): FP—P₂O₅ 120 kg/hm², 撒施 Broadcasting; RP—P₂O₅ 70 kg/hm², 撒施 Broadcasting; BF—P₂O₅ 70 kg/hm², 条施 Broadcasting in band; SA—P₂O₅ 70 kg/hm², 氮肥为硫酸铵 N fertilizer is ammonium sulfate; CK—不施磷肥对照 No P fertilization; 同列数值后不同小写字母表示同一年份各处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

限的增加, 到 2019 年, 3 个磷肥减量处理 (RP、BF、SA) 籽粒磷含量和磷累积量较 FP 处理显著降低。整体而言, FP、RP、BF、SA 和 CK 处理的玉米地上部磷累积量平均为 P 32.6、28.5、27.1、29.5、20.1 kg/hm², 且 FP > RP、BF、SA > CK。

2.3 磷肥利用效率

3 年试验结果 (表 2) 表明, 与 FP 处理相比,

3 个磷肥减量处理 (RP、BF、SA) 均显著提高了磷肥的偏生产力, 平均增幅为 68.0%。各处理间磷肥的回收利用率在 2017 和 2019 年差异均不显著; 在 2018 年, SA 处理磷肥回收利用率高于其他处理, 与 BF 处理差异达显著水平。三年平均磷肥回收利用率, SA 处理最高, 显著高于 FP 处理 7.2 个百分点。此外, RP 处理较 FP 处理磷肥回收利用率提高 4.3 个

百分点。不同年际间磷肥的利用效率存在差异, 2017 年各处理磷肥的偏生产力和回收利用率均显著低于 2018 和 2019 年, 2018 年各施磷处理磷肥偏生产力显著高于 2019 年, 但其磷肥回收利用率与 2019 年的差异未达显著水平 (BF 处理除外)。

2.4 春玉米苗期根系、地上部生物量及其磷含量和磷累积量

2018—2019 年两年试验结果 (表 3) 表明, 在玉米生长四叶期和五叶期, 与 CK 处理相比, 各施磷处理显著增加了春玉米地上部生物量, 增幅在 21.7%~107.3%。与 FP 处理相比, 3 个磷肥减量处理 (RP、BF、SA) 并未显著降低地上部生物量; 各施磷处理地上部磷含量也较 CK 处理显著增加, 且 FP 处理地上部磷含量相对较高, 高于其他施磷处理 5.1%~48.6%。此外, 在四叶期和五叶期, 各施磷处理显著增加了玉米单株磷累积量, 但各施磷处理之间无显著差异 (2018 年五叶期除外)。

2.5 春玉米苗期根系生长

2018—2019 年两年试验结果 (表 4) 表明, 在玉米四叶期和五叶期, 与 CK 处理相比, 施磷处理 (FP、RP、BF、SA) 均显著提高了玉米的总根长。各施磷处理间根系总根长无显著差异, 其中 SA 处理玉米根系的根长、根表面积、根体积、直径在 0~

0.50 mm 范围内的细根长均优于其他施磷处理, 且与 FP 相比, SA 处理的根长、根表面积、直径在 0~0.50 mm 范围内的细根长分别增加了 13.9%~37.9%、8.6%~46.1%、12.2%~43.0%。

2.6 春玉米苗期丛枝菌根侵染率

2018 和 2019 年两年的研究结果 (表 5) 表明, 在四叶期和五叶期, 与 CK 处理相比, 施磷处理 (FP、RP、BF、SA) 均在一定程度上降低了玉米根系丛枝菌根侵染率, 其中 FP、BF 处理显著降低了根系丛枝菌根侵染率。与 FP 处理相比, 3 个磷肥减量处理中的 RP 和 SA 处理显著提高了玉米 0—20 cm 根系的丛枝菌根侵染率, 增幅为 16.2%~21.7%, 而 BF 处理对丛枝菌根侵染率的影响未达到显著水平。

2.7 土壤 pH、碱性磷酸酶活性及有效磷含量

2018 和 2019 年两年的平均试验结果 (表 6) 表明, 在玉米生长的四叶期和五叶期, 各处理间根际土和非根际土 pH 差异均不显著, 各处理间根际土碱性磷酸酶活性差异不显著, 但在五叶期 SA 和 CK 处理非根际土碱性磷酸酶活性较 FP 处理显著提高。此外, 与 FP 处理相比, BF 处理非根际土有效磷含量提高 18.8%~56.3%, 而 RP、SA 处理土壤有效磷含量降低 18.6%~24.7%, 在五叶期差异达显著水平。

表 2 2017—2019 年不同施肥措施下的春玉米磷肥利用效率

Table 2 Utilization efficiencies of phosphorus fertilizer under different fertilization regimes (2017–2019)

磷肥利用效率 P utilization efficiency	处理 Treatment	年份 Year			平均 Mean
		2017	2018	2019	
偏生产力 PFP (kg/kg)	FP	81 Cb	122 Ab	105 Bb	103 b
	RP	140 Ca	207 Aa	175 Ba	175 a
	BF	141 Ca	196 Aa	176 Ba	171 a
	SA	141 Ca	207 Aa	173 Ba	174 a
	平均 Mean	126 C	183 A	157 B	
回收利用率 RE (%)	FP	5.4 Ba	33.3 Aab	33.5 Aa	24.5 b
	RP	10.5 Ba	35.3 Aab	40.5 Aa	28.8 ab
	BF	10.9 Ca	25.3 Bb	37.6 Aa	24.6 b
	SA	11.3 Ba	45.4 Aa	38.5 Aa	31.7 a
	平均 Mean	9.6 B	35.0 A	37.4 A	

注 (Note): PFP—Partial factor productivity; RE—Recovery efficiency. FP— P_2O_5 120 kg/hm², 撒施 Broadcasting; RP— P_2O_5 70 kg/hm², 撒施 Broadcasting; BF— P_2O_5 70 kg/hm², 条施 Broadcasting in band; SA— P_2O_5 70 kg/hm², 氮肥为硫酸铵 N fertilizer is ammonium sulfate; CK—不施磷肥对照 No P fertilization; 同列数据后不同小写字母表示同一年份各处理间差异显著, 不同大写字母表示相同处理在不同年份间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments in the same year and different capital letters indicate significant difference among the three years for the same treatment ($P < 0.05$).

表 3 不同施肥措施下春玉米不同生育期根和地上部生物量及磷累积量

Table 3 The biomass and phosphorus accumulation in roots and shoots of spring maize in different growing stages under different fertilization regimes

年份 Year	生育期 Growth stage	处理 Treatment	生物量 Biomass (g/plant)		磷含量 P content (g/kg)		磷累积量 P accumulation (mg/plant)
			地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	
2018	四叶期 Four-leaf stage	FP	4.53 a	0.56 a	4.65 a	1.64 a	22.0 a
		RP	4.72 a	0.60 a	4.39 b	1.55 a	21.7 a
		BF	4.63 a	0.63 a	4.10 c	1.56 a	20.0 a
		SA	4.58 a	0.67 a	4.44 b	1.51 a	21.3 a
		CK	3.72 b	0.52 a	3.90 d	1.25 b	15.1 b
	五叶期 Five-leaf stage	FP	13.60 a	1.33 a	3.69 a	1.56 a	52.3 a
		RP	12.77 a	1.34 a	3.50 a	1.44 ab	46.8 b
		BF	12.68 a	1.29 a	3.24 b	1.27 b	42.7 b
		SA	12.16 a	1.25 a	3.43 ab	1.25 b	43.3 b
		CK	8.88 b	0.97 b	2.93 c	1.37 ab	27.3 c
2019	四叶期 Four-leaf stage	FP	6.80 a	0.66 b	4.19 a	1.33 a	29.4 a
		RP	7.12 a	0.86 a	3.24 ab	1.53 a	24.4 a
		BF	6.54 a	0.72 ab	3.70 b	1.30 a	25.1 a
		SA	6.66 a	0.65 b	3.43 b	1.28 a	23.7 a
		CK	3.28 b	0.47 c	2.82 c	1.42 a	9.9 b
	五叶期 Five-leaf stage	FP	15.10 a	1.62 a	3.24 a	1.26 a	51.0 a
		RP	17.21 a	1.60 a	2.83 ab	1.22 a	50.7 a
		BF	15.00 a	1.44 a	2.90 ab	1.66 a	45.9 a
		SA	18.13 a	1.46 a	2.55 b	1.29 a	48.1 a
		CK	12.77 b	1.23 b	2.38 b	1.39 a	32.4 b

注 (Note): FP— P_2O_5 120 kg/hm², 撒施 Broadcasting; RP— P_2O_5 70 kg/hm², 撒施 Broadcasting; BF— P_2O_5 70 kg/hm², 条施 Broadcasting in band; SA— P_2O_5 70 kg/hm², 氮肥为硫酸铵 N fertilizer is ammonium sulfate; CK—不施磷肥对照 No P fertilization; 同列数据后不同小写字母表示同一年份同一生育期各处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments in the same growing stage of the year ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 不同优化施肥措施对玉米籽粒产量的影响

作物高产是农业生产追求的主要目标, 通过减量施肥来实现养分的高效利用时必须考虑其对产量的影响。本研究结果表明, 在黄土高原旱地当前玉米生产中, 磷肥减量处理 (RP、BF、SA) 可以获得与农户模式 FP 处理相当的籽粒产量和生物量 (图 2)。磷肥减施而不减产的主要原因是农户习惯施磷量 (P_2O_5 120 kg/hm²) 远高于当地合理的磷肥推荐量 (P_2O_5 76.9 kg/hm²)^[20], 即过量施磷。这种现象在我国其他玉米产区同样存在, 如在我国主要的四大玉米种植区, 磷肥施用过量的农户占 30.0%~58.1%^[5-8]。根据

养分归还学说, 施入的磷肥应与磷素携出量相当, 即保证磷素养分平衡。本试验结果表明 FP 处理玉米地上部磷累积量平均为 P_2O_5 74.6 kg/hm² (表 1), 3 个磷肥减量处理的磷肥施用量为 P_2O_5 70 kg/hm², 较 FP 处理降低 42%, 但也满足了玉米磷素需求, 故未引起玉米减产。在华北平原, 亦有研究表明磷肥用量减少 20%~40%, 玉米籽粒产量不降低^[21]。由此可见, 当前玉米生产中农户磷肥施用量偏高, 可适量减少磷肥施用量。对于西北旱地玉米而言, 磷肥的施用量可减少至玉米的磷需求量 (P_2O_5 70~75 kg/hm²)。

磷肥条施对玉米产量的效应不一。Alam 等^[22]在孟加拉国的研究表明, 与磷肥撒施相比, 磷肥

表 4 不同施肥措施对春玉米根系生长的影响

Table 4 Effects of different fertilization regimes on the growth of spring maize roots

年份 Year	生育期 Growth stage	处理 Treatment	总根长 Total root length (cm/plant)	根表面积 Root surface area (cm ² /plant)	根体积 Root volume (cm ³ /plant)	直径≤0.50 mm 根长 Length of roots with diameter≤0.50 mm (cm/plant)
2018	四叶期 Four-leaf stage	FP	837 a	141 a	2.17 a	611 a
		RP	837 a	189 a	2.77 a	569 a
		BF	843 a	161 a	2.84 a	591 a
		SA	969 a	206 a	2.85 a	694 a
		CK	707 b	123 a	1.72 a	501 a
	五叶期 Five-leaf stage	FP	1132 a	180 a	3.58 a	864 a
		RP	1193 a	235 a	3.62 a	890 a
		BF	1231 a	243 a	3.73 a	943 a
		SA	1302 a	256 a	3.83 a	1021 a
		CK	853 b	198 a	2.84 b	650 b
2019	四叶期 Four-leaf stage	FP	889 ab	185 a	3.10 a	610 ab
		RP	906 a	190 a	3.24 a	619 ab
		BF	1120 a	227 a	3.74 a	784 a
		SA	1226 a	246 a	3.99 a	872 a
		CK	680 b	153 a	1.39 b	485 b
	五叶期 Five-leaf stage	FP	1379 a	324 a	6.34 a	1008 a
		RP	1605 a	451 a	8.55 a	1244 a
		BF	1418 a	346 a	6.93 a	1089 a
		SA	1571 a	352 a	7.10 a	1131 a
		CK	1066 b	279 b	4.22 b	779 a

注 (Note): FP—P₂O₅, 120 kg/hm², 撒施 Broadcasting; RP—P₂O₅, 70 kg/hm², 撒施 Broadcasting; BF—P₂O₅, 70 kg/hm², 条施 Broadcasting in band; SA—P₂O₅, 70 kg/hm², 氮肥为硫酸铵 N fertilizer is ammonium sulfate; CK—不施磷肥对照 No P fertilization; 同列数据后不同小写字母表示同一年份同一生育期各处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments in the same growing stage of the year ($P < 0.05$).

条施可以显著提高玉米的籽粒产量, 增幅在 6.0%~11.0%。但 Buah 等^[23]在美国爱荷华州的研究结果表明, 在不同磷水平下磷肥条施较撒施并没有提高玉米产量的效应; 朴秀吉等^[24]在我国东北地区的研 究也得到了类似的结果, 本研究结果与其相似, BF 处理与同等施磷量的 RP 处理 (磷肥撒施) 相比产量无显著差异。不同试验点磷肥条施效应存在差异的原因可能与试验点基础土壤速效磷含量以及生育期水分含量有关, 本研究中条施 BF 处理土壤有效磷降低到了较低的水平 (< 10 mg/kg), 且玉米生育期无灌溉措施, 过低的土壤有效磷含量和水分含量限制了玉米磷素累积 (表 1 和表 3), 进而影响玉米产量的进一步提升; 东北地区土壤有效磷含量高达 23.5 mg/kg, 土

壤不缺磷, 导致条施效果不明显。而在孟加拉国的研究中, 其土壤有效磷含量为 11.0 mg/kg, 但在玉米生育期进行了灌溉, 磷肥条施使得磷素更集中于玉米根系周围, 效果明显。

在华北平原的研究结果表明, 与等氮量的尿素处理相比, 硫酸铵处理显著提高了玉米的穗粒数, 从而提高了玉米的产量^[16]。在新疆的石灰性土壤上, 也得到了类似的结果^[25]。但在本研究中, 施用硫酸铵 SA 处理与同施磷量的 RP 处理和高量磷肥 FP 处理相比, 籽粒产量均没有显著提高, 其原因可能与农田管理措施不同导致的土壤水分差异有关。在雨养农业区, 玉米全生育期无灌溉, 土壤水分相对较低 (四叶期和五叶期平均水分含量为 17.5%), 限制

表 5 不同施肥措施下 0—20 cm 土层根系丛枝菌根侵染率

Table 5 The arbuscular mycorrhizal infection rate in roots of 0—20 cm soil layer under different fertilization regimes

生育期 Growth stage	处理 Treatment	年份 Year		平均 Mean
		2018	2019	
四叶期 Four-leaf stage	FP	34.4 Aa	33.9 Ab	34.1 c
	RP	40.2 Aa	41.7 Aa	40.9 ab
	BF	38.1 Aa	34.4 Ab	36.2 bc
	SA	40.4 Aa	42.5 Aa	41.5 a
	CK	40.6 Aa	42.4 Aa	41.5 a
五叶期 Five-leaf stage	FP	34.5 Ac	34.4 Ab	34.4 b
	RP	39.6 Ab	42.5 Aa	41.2 a
	BF	37.2 Abc	34.1 Ab	35.6 b
	SA	39.0 Ab	41.1 Aa	40.1 a
	CK	46.1 Aa	42.2 Aa	44.1 a

注 (Note): FP— P_2O_5 120 kg/hm², 撒施 Broadcasting; RP— P_2O_5 70 kg/hm², 撒施 Broadcasting; BF— P_2O_5 70 kg/hm², 条施 Broadcasting in band; SA— P_2O_5 70 kg/hm², 氮肥为硫酸铵 N fertilizer is ammonium sulfate; CK—不施磷肥对照 No P fertilization; 同列数据后不同小写字母表示同一年份同一时期各处理间差异显著, 不同大写字母表示相同处理在不同年份间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments in the same stage of the year and different capital letters indicate significant difference among the three years for the same treatment ($P < 0.05$).

了硫酸铵效应的发挥, 而在华北平原和新疆, 除降水外, 玉米生育期均多次灌溉, 土壤水分含量相对较高。

3.2 不同优化施肥对春玉米生长和磷素吸收利用的影响

根系的可塑性是实现作物养分资源高效利用的关键, 在受磷胁迫时, 玉米根系会产生反馈调节作用, 使其根总干重、根表面积、总根长、细根长、微生物 (如菌根) 发生改变^[26], 进而增加玉米对养分的吸收利用。由于磷在土壤溶液中的迁移速率只有 $10^{-15} \sim 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[27], 土壤溶液中的磷主要通过扩散作用被根系吸收, 因此作物的根总干重、根表面积、总根长、细根长与作物对磷的吸收利用密切相关^[28]。在本研究中, 与不施磷处理 CK 相比, 施磷处理 (FP、RP、BF、SA) 的根干重、总根长、根表面积、细根长均增加, 提高了根系对土壤磷素吸收利用的能力, 从而促进玉米对磷素养分的累积 (表 1, 表 3) 与产量的增加 (图 2)。与农户模式 (FP) 相比, 磷肥减施模式 (RP) 在一定程度上促进了玉米根系生长和提高了丛枝菌根侵染率 (表 5), 保证了在磷肥用量减少 42% 的情况下玉米磷素吸收利用。此外, 在华北平原石灰性土壤上的研究表明, 等氮量的生理酸性肥料硫酸铵替代尿素促进了根系的增殖, 玉米单株根干重、总根长、一级侧根密度、一级侧根平均长

度以及 0—15 cm 耕层土壤的根长密度均显著增加^[16], 玉米不同时期 (苗期、拔节期和花期) 地上部生物量增加^[29]。本研究中, 与施用尿素处理 FP 和 RP 相比, 磷肥和硫酸铵配施处理 (SA) 在一定程度上增加了玉米总根长、根表面积、细根长以及菌根侵染率 (表 4 和表 5), 因此保证了玉米苗期生物量不降低, 根系与地上部全磷含量基本不变。

在磷肥减施基础上, 用等氮量生理酸性肥料硫酸铵替代尿素, 可得到与农户施磷量相当的籽粒磷含量和磷素累积量 (表 1), 主要原因是硫酸铵促进了玉米根系的增殖以及丛枝菌根侵染率的增加, 与农户模式 FP 相比, 硫酸铵模式 SA 玉米根系的总根长、根表面积、直径小于 0.50 mm 的细根长度和菌根侵染率分别增加了 13.9%~37.9%、8.6%~46.1%、12.2%~43.0% 和 16.2%~21.7% (表 4 和表 5), 进而促进了根系对土壤溶液中磷素的吸收利用。在西北新疆的研究结果也表明, 在等氮量的情况下, 与尿素相比, 施用硫酸铵肥料可显著提高玉米地上部磷含量和磷累积量, 促进玉米对磷素的吸收^[25]。本研究结果表明, 硫酸铵模式 (SA) 磷肥回收利用率较农户模式 FP 提高 7.2 个百分点, 较等氮量的尿素处理 (RP) 提高 2.9 个百分点, 实现了磷素的更高效利用。说明在西北旱地石灰性土壤上, 在磷肥减施的基础上用生理酸性肥料硫酸铵替代尿素可促进玉米

表 6 不同施肥措施下土壤 pH、碱性磷酸酶活性及有效磷含量

Table 6 Soil pH, alkaline phosphatase activity and available P content under different fertilization regimes

生育期 Growth stage	处理 Treatment	pH		碱性磷酸酶活性 [$\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$] Alkaline phosphatase activity		有效磷 (mg/kg) Olsen-P content
		非根际土 Bulk soil	根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Bulk soil	根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Bulk soil
2018 [#]						
四叶期 Four-leaf stage	FP	7.91 a		47.5 a	53.0 a	10.47 c
	RP	7.90 a		45.5 a	51.0 a	11.43 bc
	BF	7.95 a		45.0 a	50.5 a	27.07 a
	SA	7.94 a		48.0 a	52.5 a	12.48 b
	CK	8.05 a		46.5 a	50.5 a	7.44 d
五叶期 Five-leaf stage	FP	7.94 a		42.0 b	61.5 a	11.95 b
	RP	7.82 a		45.5 ab	48.5 a	11.95 b
	BF	7.83 a		45.0 ab	55.5 a	21.58 a
	SA	7.82 a		49.5 a	54.0 a	11.44 b
	CK	7.93 a		45.0 ab	51.5 a	5.13 c
2019						
四叶期 Four-leaf stage	FP	8.13 a	8.08 a	32.3 a	67.2 a	11.80 a
	RP	8.10 a	8.02 a	32.2 a	66.6 a	5.97 b
	BF	8.13 a	8.16 a	32.6 a	59.7 a	7.75 b
	SA	8.15 a	8.12 a	31.9 a	61.2 a	4.29 b
	CK	8.11 a	8.13 a	34.0 a	70.7 a	3.79 b
五叶期 Five-leaf stage	FP	8.31 a	8.01 a	47.6 a	46.7 a	12.16 a
	RP	8.22 a	8.10 a	47.3 a	45.8 a	7.99 b
	BF	8.10 a	7.91 a	35.2 a	46.3 a	7.05 b
	SA	8.24 a	8.05 a	59.1 a	51.6 a	8.2 b
	CK	8.22 a	8.08 a	63.0 a	65.0 a	2.38 c
平均 Mean						
四叶期 Four-leaf stage	FP	8.02 a	8.08 a	39.9 a	60.1 a	11.14 ab
	RP	8.00 a	8.02 a	38.9 a	58.8 a	8.70 b
	BF	8.04 a	8.16 a	38.8 a	55.1 a	17.41 a
	SA	8.05 a	8.12 a	40.0 a	56.9 a	8.39 b
	CK	8.08 a	8.13 a	40.3 a	60.6 a	5.62 c
五叶期 Five-leaf stage	FP	8.13 a	8.01 a	44.8 b	54.1 a	12.06 a
	RP	8.02 a	8.10 a	46.4 ab	47.2 a	9.97 b
	BF	7.97 a	7.91 a	40.1 b	50.9 a	14.33 a
	SA	8.03 a	8.05 a	54.3 a	52.8 a	9.82 b
	CK	8.08 a	8.08 a	54.0 a	58.2 a	3.76 c

注 (Note): FP— P_2O_5 120 kg/hm², 撒施 Broadcasting; RP— P_2O_5 70 kg/hm², 撒施 Broadcasting; BF— P_2O_5 70 kg/hm², 条施 Broadcasting in band; SA— P_2O_5 70 kg/hm², 氮肥为硫酸铵 N fertilizer is ammonium sulfate; CK—不施磷肥对照 No P fertilization; 同列数据后不同小写字母表示同一年份同一生育期各处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments in the same growing stage of the year ($P < 0.05$). [#]2018 年根际土 pH 数据未测定 pH data of 2018 year were not detected.

根系的增殖以及丛枝菌根侵染, 增加玉米植株对磷素的吸收利用, 进而保证玉米产量稳定和磷肥利用效率的提高, 实现旱地春玉米磷肥的高效利用。

3.3 不同优化施肥对春玉米生育前期土壤性质的影响

磷肥集中施用可减小与土壤的接触面积, 从而降低土壤颗粒对施入土壤中磷素的吸附固定, 能提高局部土壤磷的有效性^[30], 陕西关中平原研究结果表明, 在玉米拔节期, 磷肥施用量降低 25.6% 并将撒施改为条施有提高土壤有效磷含量的趋势^[31]。在本研究中磷肥条施处理 (BF) 较等施磷量的撒施处理 (RP 和 SA 处理), 苗期耕层土壤有效磷的含量显著提高。在土壤磷素循环过程中, 磷酸酶 (碱性磷酸酶、酸性磷酸酶) 可将土壤中有机磷分解为作物根系可直接吸收利用的磷形态, 其活性的大小表示土壤有机磷供磷的潜力, 易受土壤酸碱性和磷肥施用量的影响。王文华等^[32]研究表明酸性土壤上, 油菜根际土酸性磷酸酶活性与施磷水平呈负相关, 陈波浪等^[33]研究表明在碱性土壤上, 棉田土壤碱性磷酸酶活性与施磷水平呈正相关; 但同样在碱性土壤上, 番茄田土壤碱性磷酸酶活性却不受施磷量的影响^[34]。在小麦生产中, 陈磊等^[35]研究表明, 随着磷肥用量的增加, 根际土碱性磷酸酶活性下降, 而非根际土碱性磷酸酶活性无显著变化。在本研究中, 磷肥减量施用对根际土碱性磷酸酶活性影响不显著, 但在玉米五叶期, 较 FP 处理, RP、SA 处理有提高非根际土碱性磷酸酶活性的趋势, 其中 SA 处理差异达显著水平, BF 处理对非根际土碱性磷酸酶活性无明显影响 (表 6), 其原因可能是 BF 处理较高土壤速效磷含量限制了土壤碱性磷酸酶活性的提高。

4 结论

在西北典型雨养旱地, 当前农户磷肥用量 (P_2O_5 120 kg/hm²) 减少至玉米磷素需求量 (P_2O_5 70~75 kg/hm², 磷肥减施 42%) 是可行的, 即能保证玉米的籽粒产量以及地上部生物量不降低, 而且还能显著提高磷肥偏生产力。在磷肥减施的基础上用生理酸性肥料硫酸铵替代尿素可促进玉米根系生长和丛枝菌根的侵染, 提高根系对磷的吸收利用, 获得与当地农户施磷量相当的籽粒磷含量和磷累积量, 磷肥当季回收利用率显著提高。因此, 在西北旱地春玉米种植区, 在磷肥合理减施 (即保证磷素平衡) 的基础上用生理酸性肥料硫酸铵代替尿素是实现磷素高

效利用的优化途径之一, 可在当地农业生产中推广使用。

参 考 文 献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] 王寅, 郭聃, 高强, 等. 吉林省不同生态区玉米施磷的增产效应差异[J]. 中国农业科学, 2017, 50(9): 1635–1645. Wang Y, Guo D, Gao Q, et al. Differences in maize yield responses to phosphorous fertilizer in different ecological zones of Jilin Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(9): 1635–1645.
- [3] 徐春丽, 谢军, 王珂, 等. 中国西南地区玉米产量对基础地力和肥力的响应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 129–138. Xu C L, Xie J, Wang K, et al. The response of maize yield to inherent soil productivity and fertilizer in the southwest China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1): 129–138.
- [4] Shen J B, Zhang F S, Siddique K H M. Sustainable resource use in enhancing agricultural development in China[J]. *Engineering*, 2018, 4(5): 588–589.
- [5] 王浩, 董朝阳, 王淑兰, 等. 基于春玉米籽粒产量的渭北旱塬区农户施肥现状评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 590–598. Wang H, Dong Z Y, Wang S L, et al. Evaluation on fertilization of farmer practice based on grain yield of spring maize in Weibei dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 590–598.
- [6] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 229–231. Gao Q, Feng G Z, Wang Z G. Present situation of fertilizer application on spring maize in northeast China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 229–231.
- [7] 张智锋, 张卫峰. 我国化肥施用现状及趋势[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(6): 9–12. Zhang Z F, Zhang W F. The situation and trend of fertilizer application in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2008, 23(6): 9–12.
- [8] 陈尚洪, 陈红琳, 沈学善, 等. 西南地区玉米养分管理现状分析与评价[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (1): 159–165. Chen S H, Chen H L, Shen X S, et al. Current status and evaluation of nutrient management for maize in southwest China[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2019, (1): 159–165.
- [9] 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 F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crop in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [10] Wu L Q, Cui Z L, Chen X P, et al. Change in phosphorus requirement with increasing grain yield for Chinese maize production[J]. *Field Crops Research*, 2015, 180: 216–220.
- [11] 吴启华, 刘晓斌, 张淑香, 等. 施用常规磷水平的 80% 可实现玉米高产、磷素高效利用和土壤磷平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1468–1476. Wu Q H, Liu X B, Zhang S X, et al. Application of 80% of routine

- phosphorus rate to keep high yield and P efficiency of maize and P balance in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1468–1476.
- [12] 杨云马, 孙彦铭, 贾良良, 等. 磷肥施用深度对夏玉米产量及根系分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(8): 1518–1526.
Yang Y M, Sun Y M, Jia L L, *et al.* Effects of phosphorus fertilization depth on yield and root distribution of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(8): 1518–1526.
- [13] 赵亚丽, 杨春收, 王群, 等. 磷肥施用深度对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(23): 4805–4813.
Zhao Y L, Yang C S, Wang Q, *et al.* Effects of phosphorus placement depth on yield and nutrient uptake of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(23): 4805–4813.
- [14] Jing J Y, Rui Y, Zhang F S, *et al.* Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification[J]. *Field Crops Research*, 2010, 119: 355–364.
- [15] Jing J Y, Zhang F S, Rengel Z, *et al.* Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake[J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 176–185.
- [16] Ma Q H, Wang X, Li H B, *et al.* Localized application of NH_4^+ -N plus P enhances zinc and iron accumulation in maize via modifying root traits and rhizosphere processes[J]. *Field Crops Research*, 2014, 164: 107–116.
- [17] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55: 158–161.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
Guan S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil agrochemical analysis (3rd Edition)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [20] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 802–817.
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, *et al.* Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 802–817.
- [21] 陈磊, 云鹏, 高翔, 等. 磷肥减施对玉米根系生长及根际土壤磷组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1548–1557.
Chen L, Yun P, Gao X, *et al.* Effects of reducing phosphorus fertilizer rate on root growth and phosphorus fractions in rhizosphere soils of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1548–1557.
- [22] Alam M, Bell R, Salahin N, *et al.* Banding of fertilizer improves phosphorus acquisition and yield of zero tillage maize by concentrating phosphorus in surface soil[J]. *Sustainability*, 2018, 10(9): 3324–3348.
- [23] Buah S, Polito T A, Killorn R. No-tillage corn response to placement of fertilizer nitrogen, phosphorus, and potassium[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, 31(19): 3121–3133.
- [24] 朴秀吉, 于小东, 李长梅, 等. 磷肥不同施用方法对郑单 958 产量及养分吸收的影响[J]. *玉米科学*, 2008, 16(6): 144–145.
Piao X J, Yu X D, Li C M, *et al.* Effects of phosphorus fertilizers applications on yields and uptakes for nutrients in maize variety Zhengdan 958[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 144–145.
- [25] 马红红, 张敏娜, 马兴旺, 等. 施用硫酸铵对饲料玉米养分吸收和产量构成的影响[J]. *新疆农业科学*, 2017, 54(8): 1429–1436.
Ma H H, Zhang M N, Ma X W, *et al.* Effects of ammonium sulfate on nutrient uptake and yield components of forage maize[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(8): 1429–1436.
- [26] Shen J B, Li X Y, Zhang J L, *et al.* Phosphorus dynamics: from soil to plant[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 997–1005.
- [27] Schachtman D P, Reid R J, Ayling S M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell[J]. *Plant Physiology*, 1998, 116(2): 447–453.
- [28] Lynch J P. Roots of the second green revolution[J]. *Australian Journal of Botany*, 2007, 55(5): 493–512.
- [29] Ma Q H, Wang X, Li H B, *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.
- [30] Thomas B M, Rengel Z. Di-ammonium phosphate and mono-ammonium phosphate improve canola growth when banded in a P-fixing soil compared with triple superphosphate[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2002, 53: 1211–1217.
- [31] 柴泽宇. 不同磷肥调控措施对作物与土壤磷库的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2019.
Chai Z Y. Effects of different phosphate fertilizer control measures on crop and soil phosphorus pools[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2019.
- [32] 王文华, 周鑫斌, 周永祥, 等. 不同磷效率油菜根际土壤磷活化机理研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 91–99.
Wang W H, Zhou X B, Zhou Y X, *et al.* The mechanism of rhizosphere phosphorus activation of two rape genotypes (*Brassica napus* L.) with different P efficiencies[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(6): 91–99.
- [33] 陈波浪, 蒋平安, 盛建东. 磷肥对棉田土壤有效磷及土壤酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 185–188.
Chen B L, Jiang P A, Sheng J D. Effect of phosphate fertilizers on soil available phosphorus and soil enzyme activities in cotton field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 185–188.
- [34] 高利娟, 张猛, 魏建林, 等. 磷肥减施对设施番茄根系形态、磷吸收及土壤微生物量磷含量的影响[J]. *天津农业科学*, 2019, 25(8): 16–22.
Gao L J, Zhang M, Wei J L, *et al.* Effects of phosphorus fertilizer reduction on phosphorus uptake, root morphology, and microbial biomass phosphorus content in rhizosphere soil of tomato[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25(8): 16–22.
- [35] 陈磊, 王盛锋, 刘荣乐, 等. 不同磷供应水平下小麦根系形态及根际过程的变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 324–333.
Chen L, Wang S F, Liu R L, *et al.* Changes of root morphology and rhizosphere processes of wheat under different phosphate supply[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(2): 324–333.