

磷肥减施对玉米根系生长及根际土壤磷组分的影响

陈磊^{1,2}, 云鹏¹, 高翔³, 卢昌艾¹, 刘荣乐⁴, 汪洪^{1*}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 2 黑龙江省农业科学院, 哈尔滨 150086; 3 山西省农业科学院高粱研究所, 山西晋中 030600; 4 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

摘要:【目的】我国农业过量和不合理施用磷肥现象普遍存在, 导致磷资源的浪费, 对环境也造成潜在威胁。研究减少磷肥用量对玉米产量、根系形态及根际中磷转化特征的影响, 为集约化农业生产体系中磷肥合理施用提供技术基础。【方法】在河北省衡水小麦玉米轮作体系下连续三年进行了田间试验, 在冬小麦季设置 4 个 P_2O_5 用量处理: 0、112.5、150.0、187.5 kg/hm², 收获后在原处理小区免耕播种夏玉米。利用 WinRHIZO 根系分析系统分析获取根长、直径等数据, 测定玉米籽粒产量、生物量和地上部磷含量及根际土壤中磷形态等指标。【结果】与农民习惯磷肥用量 (P_2O_5 187.5 kg/hm²) 相比, 3 年磷肥用量减施 20%~40% 处理 (P_2O_5 150 和 112.5 kg/hm²), 玉米籽粒产量、根系长度与直径和土壤有效磷含量尚未发生明显变化。但 3 年不施磷处理, 根际土壤有效形态磷含量和玉米籽粒产量开始出现下降趋势。2009 年和 2010 年玉米收获期, 不施磷肥处理根际土壤有机磷含量低于非根际土壤。2008 年玉米苗期和收获期土壤有机磷分组中, 中等活性有机磷含量最高; 磷肥减施 20%~40% 处理苗期根际中中等活性有机磷含量显著低于非根际土壤。土壤无机磷形态分组研究发现: 从玉米苗期到收获期, 各磷肥处理根际和非根际土壤中 Ca_2 -P 下降明显; 而不同磷肥处理间土壤中 Ca_{10} -P、 Ca_8 -P、O-P (闭蓄态磷)、Al-P 和 Fe-P 含量差异不显著。减施磷肥处理 2008 年玉米苗期根际土壤微生物量 P 含量较非根际土壤高; 与习惯施肥量相比, 磷肥减施未明显降低根际土壤微生物量磷。【结论】在华北小麦玉米轮作种植体系下, 在土壤肥力水平较高地区, 连续 3 年将小麦季磷肥的习惯用量减少 20%~40%, 对夏玉米产量、根系形态以及根际土壤无机磷、有机磷、微生物量磷含量影响尚不明显, 因此, 该地区磷肥施用量可从习惯用量的 P_2O_5 180 kg/hm² 减至 112.5 kg/hm²。

关键词: 夏玉米; 磷肥减施; 根际磷吸收; 无机磷形态; 有机磷

中图分类号: S506.2; S513

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)06-1548-10

Effects of reducing phosphorus fertilizer rate on root growth and phosphorus fractions in rhizosphere soils of summer maize

CHEN Lei^{1,2}, YUN Peng¹, GAO Xiang³, LU Chang-ai¹, LIU Rong-le⁴, WANG Hong^{1*}

(1 National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2 Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Haerbin 150086; 3 Shanxi Academy of Agricultural Science Sorghum Research Institutes, Jinzhong, Shanxi 030600; 4 Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: 【Objectives】 Winter wheat-summer maize rotation is the most common agricultural production system in the North China Plain. Excessive phosphorus (P) fertilization in wheat is concerned in this area, which might result in low fertilizer use efficiency and potentially pressure on the environment. The objective of this paper was to investigate the possibility and potential of reducing application rate of P fertilizer in winter wheat-

收稿日期: 2016-02-23 接受日期: 2016-06-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2013CB127402, 2007CB109302) 资助。

作者简介: 陈磊 (1986—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 主要从事作物氮磷养分管理研究工作。

* 通信作者 Tel: 010-82105021, E-mail: wanghong01@caas.cn

summer maize crop rotation systems. **【 Methods 】** A field experiment was conducted on fluvo aquic soil in Hengshui City, Hebei Province. Four rates of P_2O_5 application rate of 0, 112.5, 150.0 and 187.5 kg/hm^2 were set in winter wheat. After harvest of wheat, summer maize was planted without tillage. The grain yields, biomass and P content in above ground parts of maize were investigated; Root analysis system WinRHIZO was used to determine the root length and diameter; and the contents of different fraction of soil P were analyzed at harvest. **【 Results 】** Compared to current farm's P_2O_5 input rate of 187.5 kg/hm^2 , the maize grain yield, total root length, average root diameter and soil Olsen-P contents were not significantly affected in treatment of P_2O_5 112.5 and 150.0 kg/hm^2 for three years' period. Under no P fertilizer application treatment, the maize yield and soil available P contents in the third year started to decline, the organic P contents in the rhizosphere soils were lower than in the non-rhizosphere soils in 2009 and 2010 year; the amounts of moderately labile organic P in soils were higher at maize seedling and mature stage than at other growth stages in 2008. When less P fertilizer was applied, moderately labile organic P contents in rhizosphere soils were remarkably lower than in non-rhizosphere at maize seedling stage. The concentrations of Ca_2 -P, one of inorganic P forms in soils, declined during maize growth season. The contents of Ca_{10} -P, Ca_8 -P, O-P (Occluded phosphorus), Al-P and Fe-P in the rhizosphere and non-rhizosphere soils presented no significant change among various P fertilizer rates. The concentrations of microbial biomass P in the rhizosphere soils were higher than in the non-rhizosphere soils at maize seedling stage in 2008. Compared with farmers conventional P application (187.5 $kg/hm^2 P_2O_5$), reducing P application rates did not significantly affect on the contents of microbial biomass P in rhizosphere soils at maize seedling stage. **【 Conclusions 】** Under the intensive rotation system of winter wheat and summer maize in North China Plain with high soil fertility, the yield and root development of maize, and the contents of Olsen-P, organic P and microbial biomass P in the rhizosphere soils do not show significant variation when the P fertilizer input was reduced by 20% or 40% in wheat season, but those happened when no P fertilizer were applied. It is suggested that it would be available to reduce the P input by 20%–40% in winter wheat-summer maize crop rotation systems under the tested conditions.

Key words: summer maize; reducing phosphorus fertilizer rate; rhizosphere soil phosphorus absorption; soil phosphorus fraction; soil organic phosphorus

我国农田磷肥施用量迅速提高, 1978 年磷肥施用量为 $282.4 \times 10^4 t$, 2013 年增加到 $1516.4 \times 10^4 t$ (复合肥按 1/3 算)^[1], 增加了约 5.4 倍, 已成为世界上最大的磷肥生产国与消费国^[2]。经过多年磷肥施用和土壤培肥, 我国耕地土壤有效磷含量呈显著增加趋势^[3]。长期定位监测结果表明, 1985 年我国土壤有效磷平均含量为 6.4 mg/kg, 2006 年增加到 27.4 mg/kg, 土壤有效磷水平明显提高^[4]。华北平原地区冬小麦-夏玉米轮作是主要的作物种植体系, 磷肥一般全部作基肥在小麦季一次施入, 玉米季不再施用。张智峰和张卫峰^[5] 在华北地区的调查结果发现, 有 43% 的农户在小麦季磷肥 (P_2O_5) 施用量超过 150 kg/hm^2 。杨莉琳等^[6] 在太行山山前平原高产区小麦季进行了三年定位试验, 表明小麦季磷肥施用量在 75~150 $kg/hm^2 P_2O_5$ 之间对夏玉米产量无明显影响。过量和不合理施用磷肥, 农田生态系统中通过径流、淋洗等排放

的磷增多, 带来水体富营养化的潜在威胁, 造成了农田土壤中磷的损失与磷肥资源的浪费^[7-9]。

根际是作物-土壤-微生物及环境相互作用的场所, 是养分从土壤进入作物系统参与物质循环的必经门户, 是限制作物对养分吸收利用的重要环节, 对作物高效利用土壤磷养分有着重要影响^[10-11]。缺磷胁迫下, 为有效提高对土壤磷的吸收利用, 作物根系形态和根际过程发生一系列改变, 主要包括: 侧根与根毛发育与数量增加, 根冠比增大, 扩大吸收面积; 根系分泌有机酸、磷酸酶增多, 活化和利用根际土壤中的难溶性磷; 高亲和力磷转运蛋白基因上调提高, 吸收能力增强^[11-14]。但集约化农业生产条件下, 降低磷肥用量对作物根系生长及根际过程的影响还缺少深入研究。本研究选择在河北衡水地区连续三年开展田间试验, 以农民习惯施磷量为对照, 探讨冬小麦-夏玉米轮作体系中, 减施磷肥用量

对夏玉米根系生长、根际土壤磷形态组分的影响,以期为在集约化农业生产地区建立优化施磷措施,提高磷肥利用率提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在河北省农林科学院旱作农业研究所衡水试验站进行,供试土壤为潮土,试验前 0—20 cm 层有机质含量 14.19 g/kg、全氮 1.02 g/kg、全磷 0.98 g/kg、全钾 15.32 g/kg、碱解氮 89.46 g/kg、Olsen-P 34.60 mg/kg、速效钾 103.00 mg/kg、pH 8.52 (水土比 5:1)。

试验小区长 9.5 m × 宽 4.4 m, 面积 41.8 m²。冬小麦-夏玉米轮作体系为冬小麦收获后,在相应处理小区免耕播种夏玉米。2007 年 10 月种植小麦时开始实施磷肥处理,于 2010 年 10 月玉米季收获后结束,共开展了三季。每年小麦季设置 4 个磷肥用量水平,以习惯施磷量 P₂O₅ 187.5 kg/hm² 为 100% (P100),减少磷肥用量 P₂O₅ 至 80% (150.0 kg/hm², P80)、60% (112.5 kg/hm², P60) 和不施磷 (P0)。供试磷肥为普通过磷酸钙,每个处理重复 3 次,完全随机排列。

各处理小区每年氮钾肥施用量相同, K₂O 90 kg/hm²,小麦与玉米季各施氮 N 225 kg/hm²;小麦氮肥 50% 作基肥,50% 在返青期追施;玉米季氮肥 50% 作基肥,50% 在大喇叭口期采集土壤和植株样品后追施;磷肥、钾肥均作基肥在小麦季一次性施入,玉米季不施磷钾肥。肥料用尿素 (N 46.4%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 17%)、氯化钾 (K₂O 60%)。供试冬小麦品种为衡观 35,夏玉米品种为郑单 958。

1.2 样品采集

在各处理小区随机选 5 株玉米植株,收获地上部,挖取整个根系,采用抖根分离法取根系所附着的土壤为根际土壤,取行间土壤为非根际土壤。土壤样品过 2 mm 筛后,装入聚乙烯塑料袋中,放入 -18℃ 冰柜中保存。

1.3 根系分析

将根系用清水洗净,扫描根系样品获取数字化图像,利用 WinRHIZO 根系分析系统 (Regent Instruments Inc., Canada) 对图像进行分析,获得根长和根系平均直径等根系生长参数。

1.4 土壤 Olsen-P、无机磷分级及有机磷组分测定

Olsen-P 采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,磷钼蓝比色

法测定^[15]。无机磷形态分级采用蒋柏藩-顾益初法^[16],有机磷分组采用 Bowman-Cole 的测定方法^[17]。

1.5 土壤微生物量磷的测定

新鲜土样解冻后,调节至田间含水量 40%~50%,25℃ 下密封预培养 7 d 后,采用氯仿熏蒸—NaHCO₃ 提取法测定土壤微生物量磷,微生物量磷 B_p = E_{pi}/K_p,其中, E_{pi} 表示熏蒸与未熏蒸土壤浸提磷差值, K_p 为转换系数,取值 0.4^[18]。

1.6 数据统计分析

数据进行方差分析 (ANOVA),不同处理之间数据多重比较采用 Duncan 新复极差法检验 (P < 0.05)。

2 结果与分析

2.1 玉米籽粒产量

2008 年和 2009 年,不施磷及磷肥不同用量处理对玉米籽粒产量均尚未产生明显影响。至试验第三年,即 2010 年,不施磷肥处理 (P0) 玉米籽粒产量开始降低,而 P60 和 P80 处理产量仍未出现下降,与习惯施磷处理 (P100) 相比,差异不明显 (图 1)。

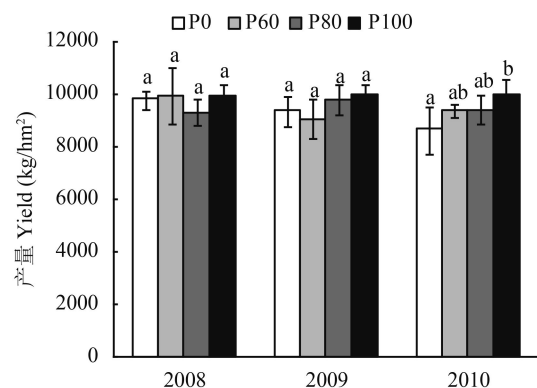


图 1 2008~2010 年不同用量磷肥玉米籽粒产量

Fig. 1 Grain yield of summer maize in different P treatments from 2008 to 2010

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一年度不同磷肥用量处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平 Different letters above the bars mean significant difference among treatments for the same year at the $P < 0.05$ level.]

2.2 玉米植株和籽粒磷含量

由图 2 可知,苗期玉米植株地上部磷浓度较高,随生育期延长呈降低趋势;收获期秸秆中磷浓度较低,籽粒中磷浓度较高。与 2008 年相比,2009 年和 2010 年籽粒中磷浓度较低。2008 年苗期 P80 处理植株磷浓度较 P100 处理高,与 P0 和 P60 处理之间差异不显著。收获期秸秆磷浓度 P0 处理低于 P100

处理。不同磷肥处理对籽粒中磷浓度影响不明显。2009 年苗期地上部磷浓度在不同磷肥处理之间无显著差异; 大喇叭口期 P60 和 P80 处理显著高于 P100; 抽雄期以 P80 和 P100 显著高于 P60 和 P0; 收获期秸秆和籽粒中磷浓度不同处理间差异不显著。2010 年所测生育期内, 不同磷肥处理间玉米植株和籽粒中磷浓度差异均未达显著水平 (图 2)。

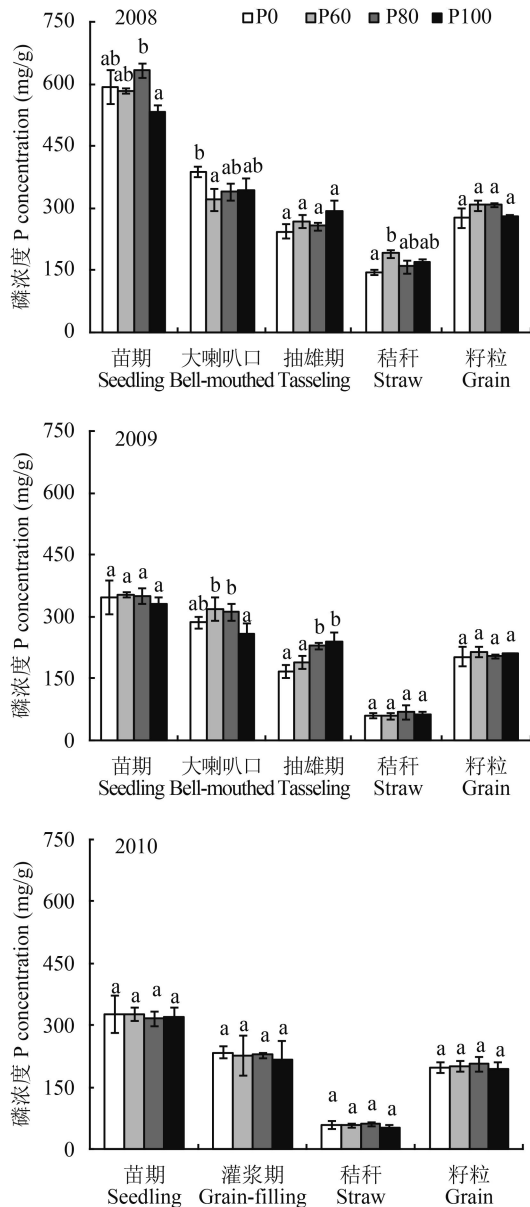


图 2 不同磷肥用量处理下玉米不同生育期地上部植株和收获期籽粒磷浓度

Fig. 2 P concentrations in above ground parts of summer maize in different growing stages and in grains at harvest under different treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一年度不同磷肥用量处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different letters above the bars mean significant difference among treatments for the same year at the $P < 0.05$ level.]

2.3 根系长度与直径

不同磷肥处理之间, 玉米根系长度和直径均未出现明显变化; 降低磷肥用量 3 年, 对根系形态尚未产生明显的影响 (图 3)。

2.4 土壤有效磷含量

由图 4 可知, 2008 年 P100 处理苗期非根际土壤有效磷含量显著高于不施磷处理; 收获期高磷处理的根际土壤有效磷含量较高; 同一施磷量处理, 根际和非根际土壤有效磷含量差异不明显, 各生育期之间差异也不显著。在大喇叭口期, 土壤有效磷含量较低。在苗期, 与不施磷肥处理相比, P80 和 P100 两个用量处理非根际土壤有效磷含量较高。

2009 年, 在玉米季施用磷肥可以提高根际土壤有效磷含量, 在灌浆期 P60 处理根际土壤有效磷含量低于非根际土壤, 其他时期根际土壤和非根际土壤有效磷含量差异不显著; 相同磷肥处理下, 各生育期之间土壤有效磷含量差异不显著。

2010 年, 同一个生育期, 根际和非根际土壤有效磷含量之间没有显著差异。与施磷处理相比, 不施磷肥处理根际和非根际土壤有效磷含量明显较低。

2.5 土壤微生物量磷 (MBC-P) 含量

图 5 表明, 2008 年, P0 处理的苗期土壤 MBC-P 显著高于 P100 处理, 其他磷用量处理之间, 根际土壤 MBC-P 没有明显差异。减施磷肥 3 年间, 未明显降低根际土壤 MBC-P。

2008 年四个生育期中, 除 P100 处理外, 苗期根际土壤 MBC-P 水平显著高于非根际; 在大喇叭口期也有相似趋势。抽雄期根际土壤 MBC-P 显著较低。与 P0 相比, P100 处理显著提高苗期和大喇叭口期非根际土壤 MBC-P。在 P0 和 P60 处理下, 苗期根际土壤 MBC-P 含量显著高于其他三个生育期。2009 年收获期根际 MBC-P 水平与非根际土壤之间没有明显差异。2010 年不施磷处理苗期根际土壤 MBC-P 水平较非根际高, 其他磷肥处理根际土壤 MBC-P 含量与非根际间没有差异。收获期不施磷处理根际 MBC-P 水平较非根际低, 施磷处理根际 MBC-P 比不施磷处理高。

2.6 土壤中无机磷形态

土壤中无机磷的形态分布均以 Ca_{10} -P 最多, 其次为 Ca_8 -P 和 O-P, 而 Al-P、Fe-P 和 Ca_2 -P 较少。经过三年试验, 不施磷肥根际和非根际土壤 Ca_2 -P、 Ca_8 -P 含量下降明显, 但 Al-P、Fe-P 和 Ca_{10} -P 增加 (表 1)。

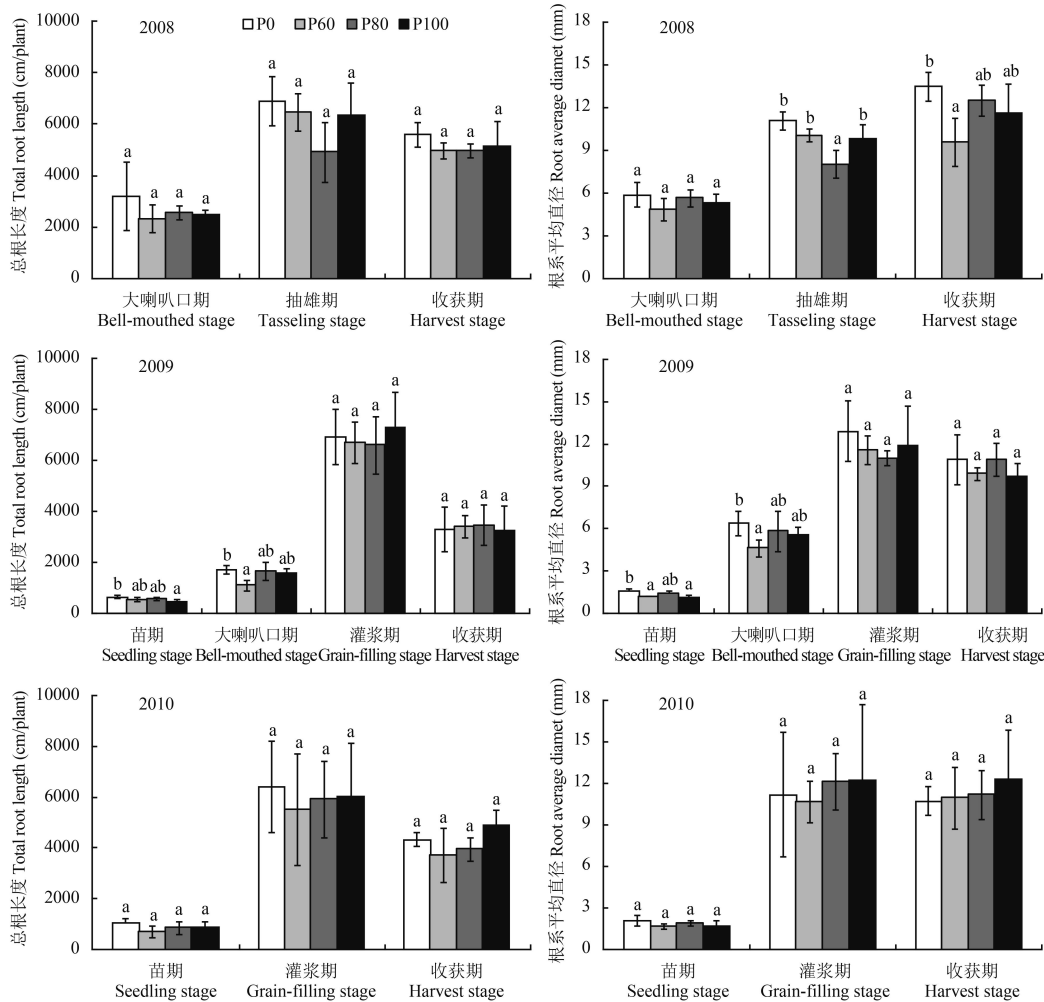


图 3 不同用量磷肥施用下玉米根系长度和直径变化

Fig. 3 Effects of P rates on total root length and root diameter of summer maize plants

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示同一年度不同磷肥用量处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

Different small letters above the bars mean significant different among treatments for the same year at the $P < 0.05$ level.]

不同处理之间比较, 不施磷处理 2008 年苗期根际 Ca_2 -P 含量较非根际高, 收获期根际 Ca_8 -P 含量较非根际土壤高; 从苗期到收获期, 非根际土壤中 Ca_8 -P 含量下降, 根际 Ca_2 -P 含量下降, 以不施磷肥处理下降最多。2009 年收获期, 各形态无机磷含量在根际与非根际土壤之间以及不同施磷处理之间没有明显区别。到 2010 年玉米收获期, 与施磷肥处理相比, 不施磷肥处理根际和非根际土壤中 Ca_2 -P 含量明显较低, 根际土壤中 Al-P、Fe-P 和 O-P 含量也较低。与高量施磷处理 P100 相比, P80 处理非根际 Ca_2 -P 含量较低。

2.7 土壤有机磷含量

用 Bowman-cole 法^[17] 对 2008 年土壤有机磷含量进行分组研究 (图 6)。苗期和收获期土壤含量顺序均表现为中等活性有机磷>中稳定有机磷>高稳定有机

磷>活性有机磷。施入不同用量磷肥, 对根际和非根际土壤有机磷含量没有显著影响。在苗期时, 除 P100 处理外, 根际土壤中中等活性有机磷含量显著低于非根际土壤。苗期和收获期根际土壤中稳性有机磷含量较非根际土壤高。

不施磷肥处理根际土壤有机磷含量显著低于非根际土壤。2010 年苗期与不施磷肥相比, 施磷处理的根际土壤中有机磷含量显著降低 (图 7)。

3 讨论与结论

随着农业生产高度集约化, 生产水平提高, 过量施肥加上作物根茬还田, 土壤肥力得以提高。邢丹等^[19] 在 2014 年在河北潮土上试验发现, 在 0—20 cm 土层有效磷含量为 16.16 mg/kg 条件下, 小麦玉米轮作体系中施用 120 kg/hm² 时玉米产量最高。在土壤

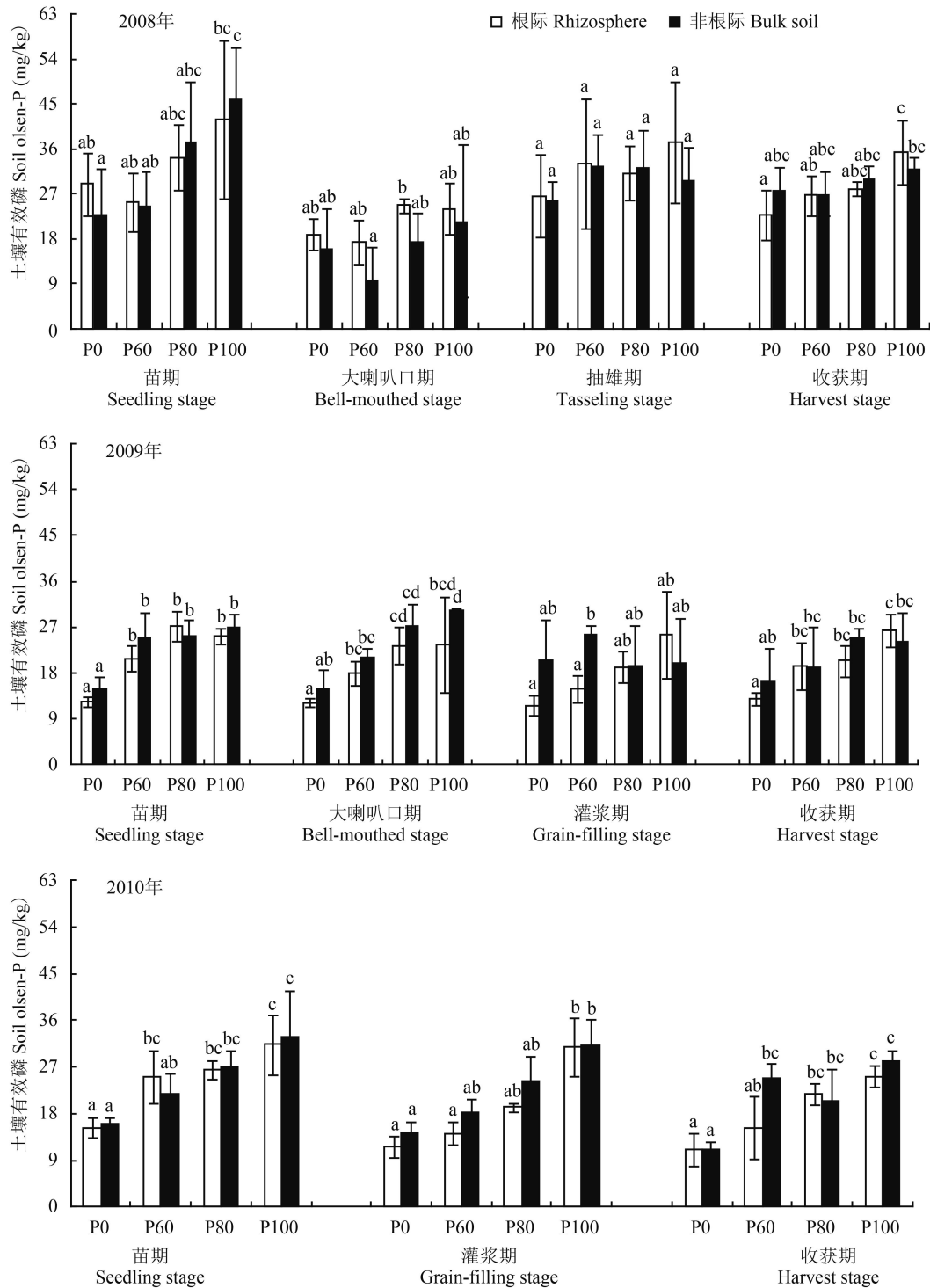


图 4 不同磷肥施用量玉米根际和非根际土壤有效磷含量

Fig. 4 Olsen-P content in rhizosphere and bulk soils of summer maize plants with different P treatments

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一年度不同磷肥用量处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

Different small letters above the bars mean significant different among treatments for the same year at the $P < 0.05$ level.]

有效磷含量 36.23 mg/kg 的条件下, 不同磷肥处理对玉米地上部干物质重和产量没有影响^[20]。本研究通过 3 年实验表明小麦季磷肥用量从习惯施肥量的 P_2O_5 187.5 kg/hm² 减至 112.5 和 150.0 kg/hm², 即磷肥用量

减少 20%~40% 处理。不施磷肥条件下, 前 2 年后作夏玉米籽粒产量不受影响, 但第三年籽粒产量开始出现下降。究其原因, 本文从作物根系形态、根际土壤磷形态变化与有效供应等角度开展了研究。

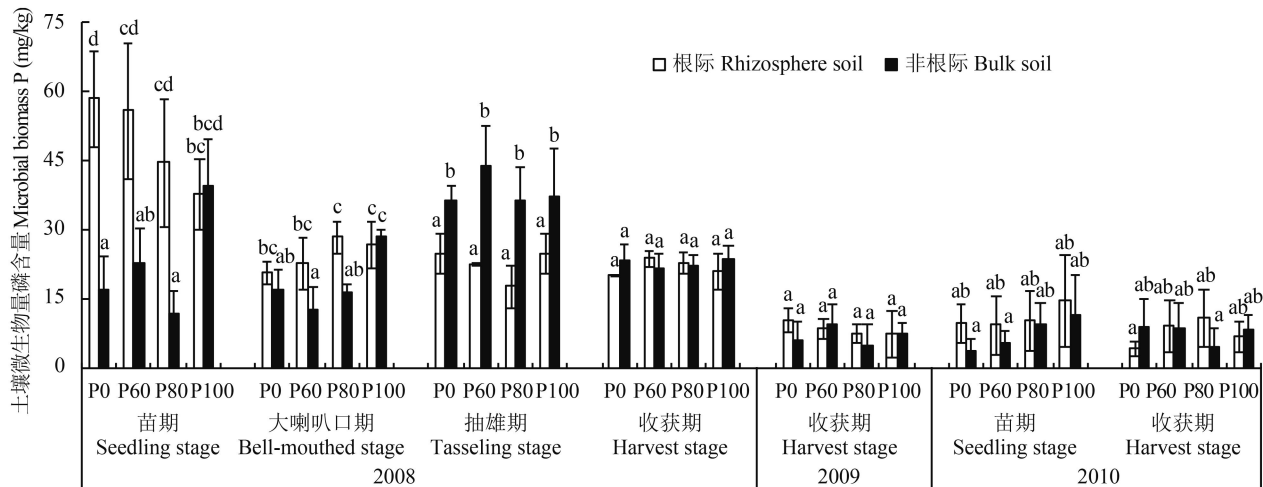


图5 不同磷肥用量玉米根际土壤微生物量磷含量变化

Fig. 5 Microbial biomass phosphorus content in rhizosphere and bulk soils of summer maize in different P treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一年度不同磷肥用量处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

Different letters above the bars mean significant difference among treatments for the same year at the $P < 0.05$ level.]

低磷胁迫下植物会改变根系构型如侧根与根毛数量增加, 根冠比增大, 以增加根系与土壤的接触面积, 提高对土壤中磷的获取^[11-14]。本研究供试土壤养分投入量较大, 土壤中磷素供应水平较高, 连续三年不施或减施磷肥, 玉米根系总长度和平均直径均未发生明显变化, 说明此时磷肥的施用量还未影响到根系的磷素供应。

一些盆栽和根盒试验研究结果表明植物根际容易出现存在磷耗竭区, 尤其是在缺磷胁迫下^[10,12]。本研究试验是在田间开展, 不同磷处理间玉米根际和非根际有效磷含量没有差异, 可能与土壤中磷供应强度较高有关, 也可能是由于根系吸收养分的体积远大于盆栽, 作物通过调整根系构型适应缺磷的能力更强, 减少了局部磷胁迫的影响。磷肥用量在目前常用量的基础上减少 20%~40%, 玉米根际有效磷含量到第三年未有明显变化, 说明供试土壤条件下, 磷肥减施尚未影响根际土壤磷的供应。

土壤磷形态分为无机磷和有机磷。土壤有效磷可由土壤中无机磷化学平衡溶解、微生物固定与释放、有机磷矿化而得到补充。李和生等^[22]研究发现, 小麦根际土壤有机磷总量低于非根际土壤, 以中度活性有机磷所占比例较高; 与非根际土壤相比, 根际土壤中中度活性有机磷和活性有机磷含量降低。本研究结果表明, 玉米苗期和收获期土壤有机磷组分中以中等活性有机磷含量较高, 不施磷处理根际土壤有机磷含量显著低于非根际土壤, 可能是缘于根系对有机磷的强力吸收, 不施磷肥在某种程度上已经影响到土壤磷的供应强度, 而减量施用

磷肥 20%~40% 并没有显著影响根系对土壤有机磷利用; 苗期表现为中稳性有机磷含量低于非根际土壤, 中等活性有机磷的降低可能转化为土壤有效磷被玉米吸收利用。

根际土壤中微生物分布密集、活性强, 有利于土壤中养分转化, 对植物高效利用土壤磷素有着重要影响^[10,18]。在农业土壤中微生物量磷 (MBC-P) 占有有机磷总量只有 3% 左右, 但土壤微生物量磷周转速率快, 对土壤磷素的循环转化和植物磷素营养起着重要的作用^[18]。在 2008 年玉米苗期, 根际土壤 MBC-P 水平较高, 除了 P_2O_5 187.5 kg/hm² 用量处理外, 其它磷肥处理玉米苗期根际 MBC-P 比非根际土壤高, 2010 年苗期也得到相似结果, 不施磷处理根际土壤 MBC-P 水平较非根际高; 但在抽雄期, 根际土壤 MBC-P 比非根际土壤低。与不施磷肥相比, 施 P_2O_5 187.5 kg/hm² 处理在玉米生长前期明显提高了非根际土壤 MBC-P。与习惯施肥量相比, 磷肥减施未明显降低根际土壤 MBC-P。

土壤无机磷组分中, Ca_2 -P 易被作物吸收, 是有效磷源, Ca_8 -P、Al-P、Fe-P 有效性相对较低, 可作为有效磷补充; Ca_{10} -P 和 O-P 在短期内难以为作物吸收利用, 是潜在磷源^[23]。长期定位试验发现, 经过 14 年作物消耗, 在褐潮土无机磷分组中 Ca_2 -P 消耗最大, 平均为 94.7%, 其次 Ca_8 -P 消耗平均为 23.8% 和 Al-P 平均下降 9.2%, 施用磷肥可显著增加 Ca_2 -P 含量^[24]。本试验结果表明, 与不施磷肥处理相比, 施 P_2O_5 187.5 kg/hm² 磷处理可以显著增加 Ca_2 -P 含量。

表 1 不同磷肥施用量下土壤中不同形态无机磷含量 (mg/kg)
Table 1 Phosphorus concentrations of various inorganic forms in maize rhizosphere and bulk soils with different P treatments

生育期 Growth stage	处理 Treatment	Ca ₂ -P	Al-P	Fe-P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	O-P		
2008									
苗期 Seedling	P0	根际 R	48.23 ± 2.60 abc	76.48 ± 2.53 a	45.79 ± 2.06 ab	315.29 ± 35.39 b	364.30 ± 33.08 a	108.80 ± 11.43 a	
		非根际 B	35.59 ± 1.99 a	59.05 ± 3.53 a	48.13 ± 2.64 abc	262.33 ± 47.88 ab	381.92 ± 27.03 a	110.12 ± 7.11 a	
	P60	根际 R	44.16 ± 4.82 ab	61.79 ± 5.71 a	43.50 ± 3.53 a	252.13 ± 28.74 a	376.35 ± 11.37 a	107.83 ± 6.87 a	
		非根际 B	45.61 ± 5.60 abc	56.62 ± 4.84 a	47.13 ± 1.17 a	235.64 ± 38.47 ab	381.66 ± 10.82 a	114.78 ± 4.74 a	
	P80	根际 R	47.16 ± 1.06 abc	60.34 ± 6.45 a	46.22 ± 0.09 ab	284.77 ± 33.98 ab	375.10 ± 5.36 a	101.83 ± 8.59 a	
		非根际 B	47.61 ± 11.61 abc	64.15 ± 3.49 a	49.27 ± 2.17 bc	287.26 ± 21.75 ab	377.55 ± 9.05 a	115.42 ± 3.31 a	
	P100	根际 R	61.40 ± 20.28 bc	58.74 ± 5.26 a	50.88 ± 3.69 c	270.00 ± 32.29 ab	376.91 ± 30.48 a	109.39 ± 6.19 a	
		非根际 B	65.49 ± 15.87 c	60.35 ± 7.78 a	50.32 ± 2.05 bc	254.02 ± 55.38 ab	371.30 ± 34.13 a	110.27 ± 4.01 a	
	收获期 Harvest	P0	根际 R	25.35 ± 5.15 a	66.62 ± 8.98 a	46.01 ± 4.44 a	302.32 ± 44.23 b	373.25 ± 23.86 a	111.23 ± 5.75 a
			非根际 B	29.99 ± 5.31 a	60.40 ± 9.34 a	49.50 ± 4.62 a	255.39 ± 36.27 ab	388.01 ± 25.99 a	111.07 ± 4.63 a
P60		根际 R	29.17 ± 2.90 a	63.03 ± 6.72 a	47.29 ± 6.66 a	268.69 ± 52.89 ab	367.17 ± 3.80 a	107.87 ± 5.43 a	
		非根际 B	29.28 ± 6.27 a	61.13 ± 3.00 a	46.65 ± 0.17 a	228.32 ± 46.76 ab	382.85 ± 10.88 a	113.18 ± 5.05 a	
P80		根际 R	29.34 ± 2.00 a	61.06 ± 1.58 a	47.69 ± 3.00 a	277.57 ± 14.21 ab	379.41 ± 24.44 a	108.06 ± 2.59 a	
		非根际 B	33.75 ± 2.93 ab	57.81 ± 2.99 a	47.50 ± 2.74 a	246.08 ± 11.74 ab	374.53 ± 26.35 a	110.96 ± 1.36 a	
P100		根际 R	39.29 ± 9.43 b	65.20 ± 3.78 a	52.67 ± 5.45 a	268.70 ± 12.02 ab	375.46 ± 26.29 a	115.28 ± 0.24 a	
		非根际 B	40.22 ± 1.95 b	56.61 ± 5.41 a	46.34 ± 3.67 a	209.11 ± 55.82 a	365.09 ± 40.43 a	112.25 ± 2.97 a	
2009									
收获期 Harvest		P0	根际 R	29.94 ± 3.41 a	116.62 ± 34.50 a	61.98 ± 4.34 a	117.66 ± 11.06 a	448.21 ± 27.28 a	53.75 ± 1.32 a
	非根际 B		36.14 ± 6.49 ab	88.77 ± 32.24 a	58.15 ± 8.22 a	163.49 ± 57.90 a	444.30 ± 63.57 a	59.25 ± 3.33 a	
	P60	根际 R	35.18 ± 5.51 ab	113.26 ± 29.79 a	67.07 ± 3.70 a	132.81 ± 17.36 a	417.36 ± 48.22 a	54.26 ± 1.43 a	
		非根际 B	37.44 ± 8.23 ab	77.05 ± 17.42 a	66.21 ± 4.68 a	117.38 ± 62.16 a	387.58 ± 3.85 a	53.59 ± 2.34 a	
	P80	根际 R	36.93 ± 4.48 ab	101.02 ± 16.99 a	59.85 ± 9.86 a	132.41 ± 16.13 a	388.13 ± 11.44 a	55.20 ± 2.69 a	
		非根际 B	32.50 ± 8.40 ab	84.17 ± 12.32 a	67.93 ± 4.85 a	105.27 ± 3.27 a	389.09 ± 21.23 a	54.42 ± 1.23 a	
	P100	根际 R	41.98 ± 2.37 ab	117.27 ± 51.39 a	61.73 ± 9.15 a	129.42 ± 28.93 a	450.95 ± 28.64 a	58.12 ± 2.39 a	
		非根际 B	43.99 ± 12.29 b	95.07 ± 43.84 a	59.79 ± 4.38 a	105.55 ± 21.25 a	438.79 ± 21.92 a	55.14 ± 3.62 a	
	2010								
	收获期 Harvest	P0	根际 R	23.66 ± 2.89 a	97.32 ± 12.75 a	46.80 ± 8.18 a	231.15 ± 23.45 a	652.44 ± 26.36 a	70.52 ± 3.58 a
非根际 B			23.93 ± 0.89 a	115.29 ± 19.46 a	52.84 ± 3.08 a	221.00 ± 16.58 a	635.18 ± 42.15 a	79.78 ± 5.13 ab	
P60		根际 R	30.20 ± 2.70 ab	106.50 ± 16.22 a	57.18 ± 6.39 a	221.65 ± 57.56 a	613.71 ± 40.09 a	72.05 ± 16.56 ab	
		非根际 B	38.09 ± 4.27 cd	135.99 ± 34.18 a	53.50 ± 4.08 a	216.38 ± 26.88 a	644.86 ± 20.72 a	75.26 ± 13.91 ab	
P80		根际 R	36.16 ± 6.74 bcd	112.92 ± 13.93 a	54.76 ± 4.81 a	219.49 ± 13.02 a	648.49 ± 29.38 a	75.79 ± 14.61 ab	
		非根际 B	34.67 ± 6.74 bc	100.46 ± 28.36 a	59.59 ± 9.28 a	186.66 ± 27.98 a	642.13 ± 21.24 a	71.23 ± 8.54 ab	
P100		根际 R	35.38 ± 2.00 bc	119.07 ± 21.38 a	54.42 ± 2.14 a	217.73 ± 31.57 a	631.88 ± 29.49 a	76.26 ± 0.92 a	
		非根际 B	43.28 ± 2.71 d	119.95 ± 18.24 a	54.72 ± 5.29 a	198.98 ± 47.71 a	631.49 ± 33.08 a	92.56 ± 7.82 b	

注 (Note): R—Rhizosphere; B—Bulk soil; 数值后不同小写字母表示同一季不同磷肥用量处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平 Values followed by different small letters are significant among P treatments at the same stage at the $P < 0.05$ level.

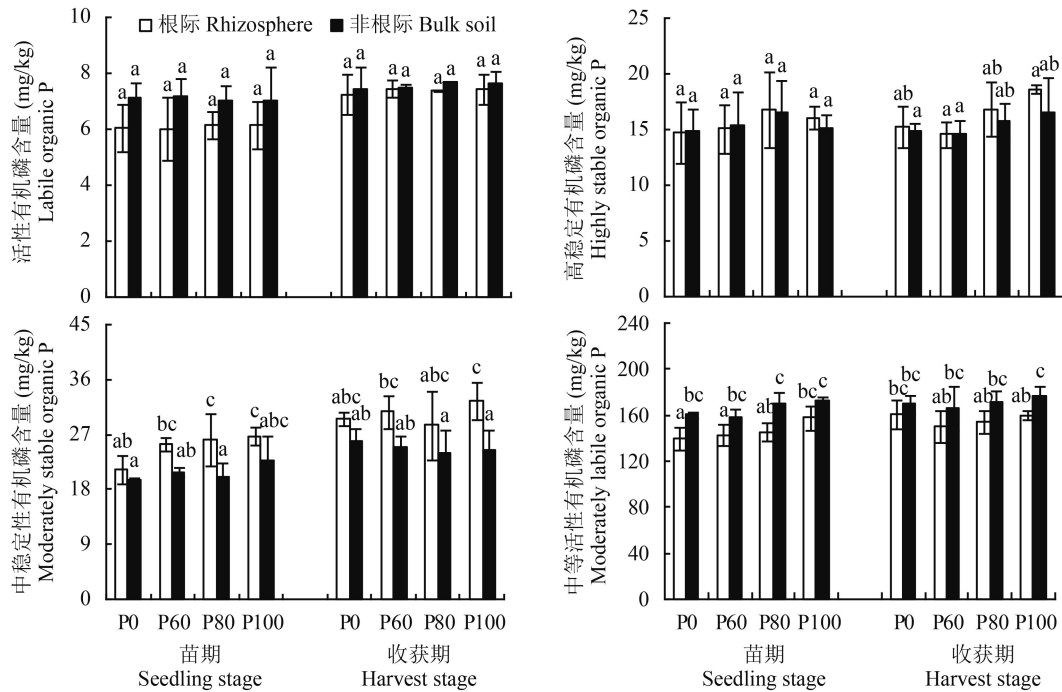


图 6 2008 年不同磷肥用量玉米根际、非根际土壤不同形态有机磷含量比较

Fig. 6 Comparison of different organic P content in maize rhizosphere and bulk soils with different P treatments in 2008

[注 (Note)]: 柱上不同字母表示同一年度不同磷肥用量处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

Different letters above the bars mean significant difference among treatments for the same year at the $P < 0.05$ level.]

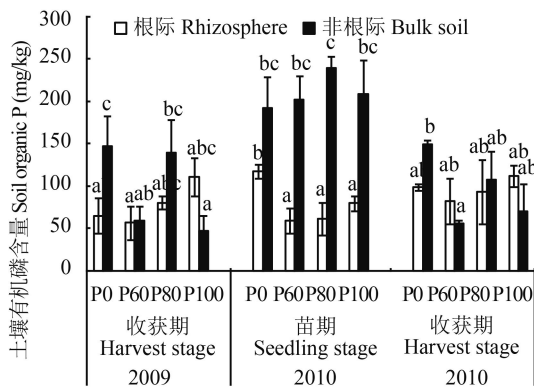


图 7 不同处理玉米根际非根际土壤有机磷含量

Fig. 7 Contents of content organic phosphorous content in maize rhizosphere and bulk soils with different treatments

[注 (Note)]: 柱上不同字母表示同一年度不同磷肥用量处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different letters above the bars mean significant difference among treatments for the same year at the $P < 0.05$ level.]

不同磷肥处理间根际和非根际土壤中 Ca_{10} -P、 Ca_8 -P、O-P、Al-P 和 Fe-P 含量差异不明显; 但经过三年试验, 不施磷肥根际和非根际土壤 Ca_2 -P、 Ca_8 -P 含量下降明显, 这影响到第三年的玉米生长, 导致产量开始出现下降, 而磷肥减施尚未影响土壤各形态无机磷含量。

综上所述, 与习惯高量施磷量相比, 在河北省衡水潮土上小麦季磷肥施用量减少 20%~40% 对后作玉米根系形态及根际土壤无机磷、有机磷、微生物量 P 含量影响尚不明显, 籽粒产量没有降低, 降低作物磷肥用量是可行的; 但 3 年不施磷处理, 根际土壤有效形态磷含量和玉米籽粒产量开始出现下降趋势。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
The national bureau of statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.

[2] Sattari S Z, Van Ittersum M K, Giller K E, *et al.* Key role of china and its agriculture in global sustainable phosphorus management[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9 (5): 1-8.

[3] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 24 (6): 687-694.
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, *et al.* Current status of soil and plant nutrient management in china and improvement strategies[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2007, 24 (6): 687-694.

[4] 辛景树, 徐明岗, 田有国, 等. 耕地质量演变趋势研究-国家级耕地土壤监测数据整编[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008. 62-63.
Xin J S, Xu M G, Tian Y G, *et al.* Research of the evolution of arable land quality[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2008. 62-63.

- [5] 张智峰, 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.
- [6] 杨莉琳, 贾良良, 胡春胜, 等. 太行山山前平原冬小麦-夏玉米推荐施肥指标的修正[J]. 农业工程学报, 2007, 23 (11): 89-94.
Yang L L, Jia L L, Hu C S, *et al.* Revision of fertilizer recommendation for wheat and maize rotation in Taihang piedmont of North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 11 (23): 89-94.
- [7] Hart M R, Quin B F, Nguyen M L. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33 (6): 1954-1972.
- [8] Wang W T, Liang L, Wang Y, *et al.* The effects of fertilizer applications on runoff loss of phosphorus[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68: 1313-1319.
- [9] Li H, Jian L, Li G, *et al.* Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses[J]. Ambio A Journal of the Human Environment, 2015, 44(Suppl. 2): 274-285.
- [10] Hinsinger P, Gobran G R, Gregory P J, *et al.* Rhizo-Sphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes[J]. New Phytologist, 2005, 168 (2): 293-303.
- [11] Shen J L, Yuan J, Zhang H, *et al.* Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. Plant Physiology, 2011, 156: 997-1005.
- [12] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root induced chemical changes[J]. Plant and Soil, 2001, 237: 173-95.
- [13] López-Arredondo D L, Leyva-González M A, González-Morales S I, *et al.* Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops[J]. Annual Review of Plant Biology, 2014, 65: 95-123.
- [14] Baker A, Ceasar A S, Palmer J A, *et al.* Replace, reuse, recycle: improving the sustainable use of phosphorus by plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66 (12): 3523-3540.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤化学磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22 (2): 101-102, 110.
Gu Y C, Jiang B F. Method for the determination of chemical phosphorus in calcareous soil[J]. Soils, 1990, 22 (2): 101-102, 110.
- [17] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 1978, 125: 95-101.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, *et al.* Determination of soil microbial biomass and its application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [19] 邢丹, 李淑文, 夏博, 等. 施磷对冬小麦-夏玉米体系产量和肥料利用效率的影响[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37 (5): 26-31.
Xing D, Li S W, Xia B, *et al.* Influences of phosphorus application on yield traits and properties of fertilizer utilization in wheat-maize rotation system[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2014, 37 (5): 26-31.
- [20] 彭正萍, 孙旭霞, 刘会玲, 等. 缺磷对不同基因型玉米苗期生长及氮磷钾吸收的影响[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32 (6): 8-13.
Peng Z P, Sun X X, Liu H L, *et al.* Effects of P deficiency on the plant growth and uptake of N, P and K in different maize cultivars at the seedling stage[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2009, 32 (6): 8-13.
- [21] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米根际磷转化及VA菌根对其影响研究[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22 (4): 4-9.
Liu J L, Zhang F S. The transformation of phosphorus in the rhizosphere of crops and effect of va to phosphorus transformation[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1999, 22 (4): 4-9.
- [22] 李和生, 马宏瑞, 赵春生. 根际土壤有机磷的分组及其有效性分析[J]. 土壤通报, 1998, 29 (3): 116-118.
Li H S, Ma H R, Zhao C S. Rhizosphere soil organic phosphorus groups and their effectiveness analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1998, 29 (3): 116-118.
- [23] Condon L M, Newman S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11 (5): 830-840.
- [24] 李莉, 李絮花, 李秀英, 等. 长期施肥对褐潮土磷素积累、形态转化及其有效性的影响[J]. 土壤肥料, 2005 (3): 32-35.
Li L, Li X H, Li X Y, *et al.* Effect of long-term fertilization on accumulation, transformation and availability of phosphorus in fluvo-aquic soil[J]. Soils and Fertilizers, 2005 (3): 32-35.