

新型耕作施肥方式下夏玉米田土壤水分分布和磷素利用研究

马阳¹, 吴敏¹, 郭献彬², 王亚玲¹, 李鸿池², 王艳群¹, 彭正萍¹, 郭丽果³

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000;

2. 宁晋县农业局, 河北宁晋 055550; 3. 河北农业大学科学技术研究院, 河北保定 071000)

摘要: 为研究新型耕作施肥方式下的土壤水分、磷素空间动态分布、玉米磷素吸收利用及产量, 在两茬夏玉米时期分别设置免耕浅施 NPK 肥(T1)、深松全层施 NPK 肥(T2)、深松两肥异位分层施 NPK 肥(T3)。结果表明: 与 T1 相比, 成熟期 T2、T3 的整株磷积累量平均分别提高 15.9% 和 21.2%; T2、T3 的磷肥生产效率、表观利用率、农学效率平均分别增加 14.5%, 11.0% 和 84.5%; 其中 T3 的磷肥生产效率、表观利用率、农学效率分别较 T2 提高 8.4%, 11.6% 和 47.8%。T2、T3 的土壤含水量较 T1 平均提高 6.6%。T3 处理将磷肥深施, 有效提高 20—40 cm 土层土壤有效磷含量, 较 T1 显著增加 10.2 mg/kg。T2、T3 的玉米产量较 T1 分别提升 11.7% 和 22.6%; T3 较 T2 的玉米产量提高 9.7%。说明新型深松两肥异位分层施肥技术有效提高深层土壤保水性能, 增加土壤下层有效磷含量, 促进玉米磷素吸收, 提升磷肥利用率, 提高玉米产量, 可以有效减少土壤水分和磷素营养损失。

关键词: 夏玉米; 耕作施肥方式; 土壤水分; 磷素利用

中图分类号: S513; S147.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0098-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.016

Soil Water Distribution and Phosphorus Utilization in Summer Maize Field Under New Tillage and Fertilization Method

MA Yang¹, WU Min¹, GUO Xianbin², WANG Yaling¹, LI Hongchi²,

WANG Yanqun¹, PENG Zhengping¹, GUO Ligu³

(1. Hebei Agricultural University, College of Resources and Environmental Science,

Baoding, Hebei 071000; 2. Ningjin Municipal Bureau of Agriculture, Ningjin, Hebei 055550;

3. Hebei Agricultural University, Science and Technology Research Institute, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: This research was conducted to explore the effects of new tillage and fertilization methods on soil water, phosphorus (P) spatial dynamic distribution, P uptake and utilization, and maize yield. In 2016—2017, three treatments of tillage and fertilization methods were designed, including T1 (no-tillage + upper NPK), T2 (subsoiling + whole layer NPK), T3 (application of N, P, K fertilizers to designated soil depth with subsoiling). The results showed that compared with T1, the total P accumulations of T2 and T3 in the mature period were increased by 15.9% and 21.2% respectively. The production efficiencies, apparent utilization rates and agronomic efficiencies of T2 and T3 were increased by 14.5%, 11.0%, 84.5% respectively. Compared with T2, the production efficiency, apparent utilization rate and agronomic efficiency of T3 were enhanced by 8.4%, 11.6% and 47.8% respectively. Compared with T1, the soil water contents of T2 and T3 were both improved by 6.6%. The available P of T3, in which P fertilizer was applied to the deeper soil layer, was increased by 10.2 mg/kg than T1, effectively increasing the available P content in the 20—40 cm soil layer. Maize yields of T2 and T3 were increased by 11.7% and 22.6% respectively compared with T1. Maize yield in T3 was increased by 9.7% compared with T2. Therefore, the new tillage and fertilization method could improve the water retention performance of deep soil, increase the available P in the lower layer of the soil, then promote the P absorption of maize, increase the P fertilizer use efficiency, resulting in the enhanced maize yield and the reduced soil water and P nutrition losses.

Keywords: summer maize; tillage fertilization method; soil water; phosphorus utilization

收稿日期: 2018-10-17

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄淮海北部小麦—玉米农田耕层调理与土壤肥力提高关键技术”(2017YFD0300905)

第一作者: 马阳(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤养分化学与调控研究。E-mail: 63999319@qq.com

通信作者: 彭正萍(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养与生态环境研究。E-mail: pengzhengping@sina.com

2017 年我国玉米的耕种面积和产量都占三大粮食作物之首^[1]。黄淮海地区土地总面积占全国的 6.3%，农作物种植主要模式为夏玉米—冬小麦轮作。随着小麦—玉米轮作区保护性耕作的大面积推广应用，目前黄淮海玉米生产中普遍采用免耕浅层单施基肥、免耕浅层基肥及后期追肥耕作施肥方式，由此导致的土壤耕层结构变差、水肥气热协调功能弱化问题日益突出^[2]。改变夏玉米耕作施肥方式是提高土壤生产能力、构建合理耕层结构的重要途径之一^[3]。

大量研究^[4-7]表明，深松可打破土壤犁底层，增加土壤孔隙度，降低土壤容重，提高土壤蓄水保肥性能，改善土壤通透性，有利于作物扎根，增产效果显著。目前，深松作为一种较好的耕作方式被拥有大型农机设备的国营农场所采用^[8]。磷是植物生长的必需营养元素，由于常年磷肥的施用，导致土壤上层磷含量远高于下层^[9]，加之磷在土壤中移动性较差，造成磷肥当季利用率只有 10%~20%^[10-11]。结合土壤磷素特点，补充土壤下层磷含量是促进作物对磷吸收、提高磷肥利用效率的途径之一。因此，本文针对黄淮海地区长期采用单一耕作施肥方式引起的土壤耕层浅薄、犁底层逐年加厚、作物根系下扎困难及磷肥利用率低等问题，采取田间试验与室内分析相结合的研究方法，以小麦—玉米轮作系统中的夏玉米为研究对象，课题组研发了新型深松两肥异位分层施肥精播技术，设置免耕浅施肥、深松全层施肥和深松两肥异位分层施肥 3 种耕作施肥处理，研究土壤水分分布和磷素吸收利用，探寻新型耕作施肥方式对提高土壤保水性能、促进玉米磷素吸收和转化的作用机理和效果，为选择更好的耕作施肥模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地位于河北省邢台市宁晋县凤凰镇孟村(37°36'N, 114°59'E)，年平均气温 12.8℃，无霜期 198 天，年均日照时间 2 538.1 h，年均降水量 449.1 mm。前茬作物为冬小麦，收获后其秸秆粉碎还田，

供试土壤为壤质潮褐土，pH 8.5，有机质含量 15.7 g/kg，NH₄⁺-N 含量 2.2 mg/kg，NO₃⁻-N 含量 4.3 mg/kg，有效磷含量 19.3 mg/kg，速效钾含量 112.5 mg/kg。供试作物：第 1 茬玉米为“郑单 958”，第 2 茬玉米为“伟科 966”，冬小麦为“河农 6049”。

供试肥料：掺混肥料(N:P₂O₅:K₂O 为 26:10:12+TE)、缓释氮肥(含纯 N44%，由河北领先生物农业股份有限公司提供)、过磷酸钙(含 P₂O₅16%)和氯化钾(含 K₂O 60%)。供试农机：深松两肥异位分层施肥精播机(课题组自制 ZL 201620490603.9)、深松全层施肥精播机和普通玉米精播机(均由河北农哈哈机械集团有限公司生产)。

1.2 试验处理

本试验进行两茬夏玉米和一茬冬小麦。试验开始于第 1 茬夏玉米，设置免耕浅施 NPK 肥(施肥深度 0—13 cm)、深松全层施 NPK 肥(通体分 6 层施用同一种复混肥，施肥深 0—30 cm)和新型深松两肥异位分层施 NPK 肥[上层 0—15 cm 分 3 层施用缓释氮肥(总纯氮用量的 60%)，下层 15—30 cm 分 3 层施用事先混配好的 NPK 肥(包括缓释氮肥(总纯氮用量的 40%)，过磷酸钙和氯化钾提前混配)]。3 种不同耕作施肥处理的纯 N、P₂O₅、K₂O 施用量相同，分别为 234, 90, 108 kg/hm²；同时设置 3 种不同耕作方式的缺磷肥处理，该处理只用于磷肥利用效率的计算。各处理全部肥料做底肥一次性施入土壤，后期不再追肥。为了实际机械化操作方便，每个处理进行大区试验，每个处理 2 800 m²，采样时每个大区取 3 个重复。各处理设置见表 1。第 1 茬玉米 2016 年 6 月 18 日播种，10 月 7 日收获。10 月 10 日种植后茬冬小麦，小麦季各处理进行相同模式播种和施肥，统一水肥管理，基肥纯 N、P₂O₅、K₂O 施入量分别为 156, 60, 72 kg/hm²，来年春季 4 月结合灌溉追氮肥 132 kg/hm²，2017 年 6 月 15 日收获，小麦只作为后效研究，不做具体分析。6 月 17 日播种第 2 茬夏玉米，10 月 7 日收获，两茬夏玉米试验处理及方法相同。

表 1 夏玉米各试验处理纯养分用量

处理	代码	施肥 深度/cm	施肥 方式	纯养分用量/(kg·hm ⁻²)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
免耕浅施肥	T1	0—13	全部 NPK	234	90	108
深松全层施肥	T2	0—30	全部 NPK	234	90	108
深松两肥异位 分层施肥	T3	0—30	0—15 cm 缓释氮肥 15—30 cm 部分缓释氮肥和全部磷钾肥	234	90	108

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品 在两茬夏玉米生长的拔节期、抽雄吐丝期和成熟期分别取 0—120 cm(每 20 cm 一层)土壤。各层鲜土采用烘干法测定土壤含水量；由于 40 cm 以下土壤有效磷变化较小，0—60 cm 各层

鲜土风干后过筛，采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量^[12]。

1.3.2 植物样品 在上述时期采集土壤样品的同时，植物样品分茎、叶、穗轴、籽粒分别取样，在 105℃ 杀青 30 min，75℃ 烘至恒重，称重后全部粉碎混匀，

过 1 mm 筛。采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,钒钼黄比色法测定其全磷含量。

1.3.3 产量 在植株成熟期,每个处理采 3 个重复,每组连续选取 15 个玉米果穗,风干脱粒后,测定籽粒重,采用谷物水分测定仪(PM-8188)测定籽粒含水量,按面积折算后为含水量 14% 的玉米籽粒产量。在冬小麦收获期,每个处理采 3 组,每组割取 2 m 6 行小麦,用脱粒机将其全部脱粒,测定总籽粒重及其含水量,按面积折算后为含水量 12.5% 的小麦籽粒产量^[12]。

1.3.4 磷肥效率 磷肥累积生产效率(kg/kg) = 各季作物施磷区籽粒产量之和/各季作物总施磷量

磷肥累积表观利用率(%) = (各季作物施磷区地上部植株吸磷量之和 - 各季作物不施磷区地上部植株吸磷量之和)/各季作物总施磷量 × 100%

磷肥累积农学效率(kg/kg) = (各季作物施磷区作物籽粒产量之和 - 各季作物不施磷区作物籽粒产量之和)/各季作物总施磷量

河北省基准作物为冬小麦,当地夏玉米单位面积实际产量与基准作物实际产量之比(产量比系数)为 0.7^[13],可以将冬小麦折为夏玉米,这样利用 3 茬作物计算磷肥效率。

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据的处理和相关图表的绘制,并且使用 SPSS 25.0 软件进行显著性检验,显著性均为 0.05 水平。

2 结果与分析

2.1 不同耕作施肥方式下玉米产量

由图 1 可知,3 种耕作施肥方式的第 1 茬、第 2 茬玉米产量及平均产量均表现为 $T3 > T2 > T1$,其中第 2 茬玉米整体产量水平较第 1 茬降低 8.2%。与 $T1$ 比, $T2$ 和 $T3$ 的平均玉米产量分别提高 11.7% 和 22.6%;与 $T2$ 比, $T3$ 显著增产 9.7%。说明不同耕作施肥方式对玉米产量影响不同, $T2$ 和 $T3$ 有效提升玉米产量,其中 $T3$ 的增产效果更为突出。

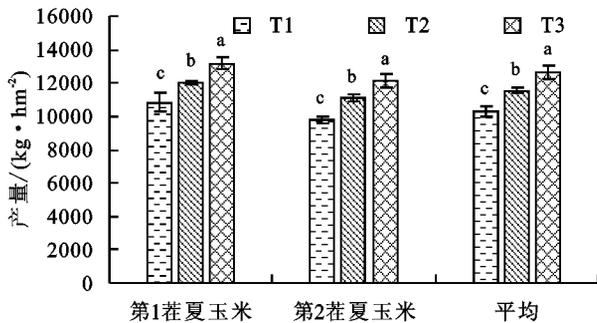


图 1 不同耕作施肥方式下玉米籽粒产量

2.2 不同耕作施肥方式下植株体内磷的吸收与分布

由图 2 可知,随着玉米生长,整株中全磷积累量不断上升。第 1 茬玉米,茎中磷含量呈“S”形,叶中磷含量先升高后平稳;拔节期磷主要分布在叶片,抽

雄吐丝期茎中磷含量达 65.0%,成熟期籽粒磷含量最高达 71.0%;抽雄吐丝期和成熟期各处理整株全磷积累量均表现为 $T3 > T2 > T1$ 。第 2 茬与第 1 茬玉米在抽雄吐丝期磷分布不同,叶中磷含量最高,占 70.3%。成熟期两茬玉米 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 整株磷积累量平均分别为 45.7, 51.4, 55.6 kg/hm^2 。与 $T1$ 比, $T2$ 、 $T3$ 平均整株磷积累量分别提高 12.6% 和 21.8%,说明深松促进磷素向籽粒转移,提升玉米整株全磷积累量,与 $T2$ 比, $T3$ 平均两茬整株磷积累量显著增加 8.2%,效果最佳。

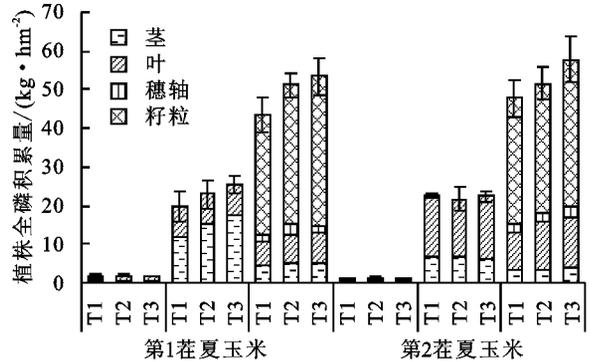


图 2 不同生育时期磷在玉米各器官间的分配和整株积累量

2.3 不同耕作施肥方式下磷肥效率

由表 2 可知,第 1 茬夏玉米,磷肥生产效率和农学效率均表现为 $T3 > T2 > T1$,差异达 5%,且 $T3$ 各种磷肥效率显著高于 $T1$ 和 $T2$ 。 $T3$ 磷肥生产效率、表观利用率、农学效率较 $T1$ 分别提高 21.6%, 19.9% 和 125.1%,较 $T2$ 分别增加 9.8%, 14.2% 和 49.7%。第 2 茬玉米各处理间磷肥的各项累积效率差异与第 1 茬一致,与 $T1$ 比, $T2$ 和 $T3$ 显著提高玉米磷肥累积效率, $T3$ 效果最佳。说明深松耕作施肥能够有效提升玉米磷肥效率,而新型耕作施肥方式更有利于植株的养分吸收和利用,显著提升磷肥的各项累积效率。

表 2 不同耕作施肥方式下磷肥累积效率

夏玉米	处理	磷肥生产效率/ ($kg \cdot kg^{-1}$)	磷肥表观 利用率/%	磷肥农学效率/ ($kg \cdot kg^{-1}$)
第 1 茬	T1	275.3c	27.7b	40.3c
	T2	304.9b	33.4b	60.6b
	T3	334.9a	47.6a	90.7a
第 2 茬	T1	315.2c	29.0b	36.7c
	T2	343.8b	33.8b	54.1b
	T3	368.5a	42.7a	78.8a

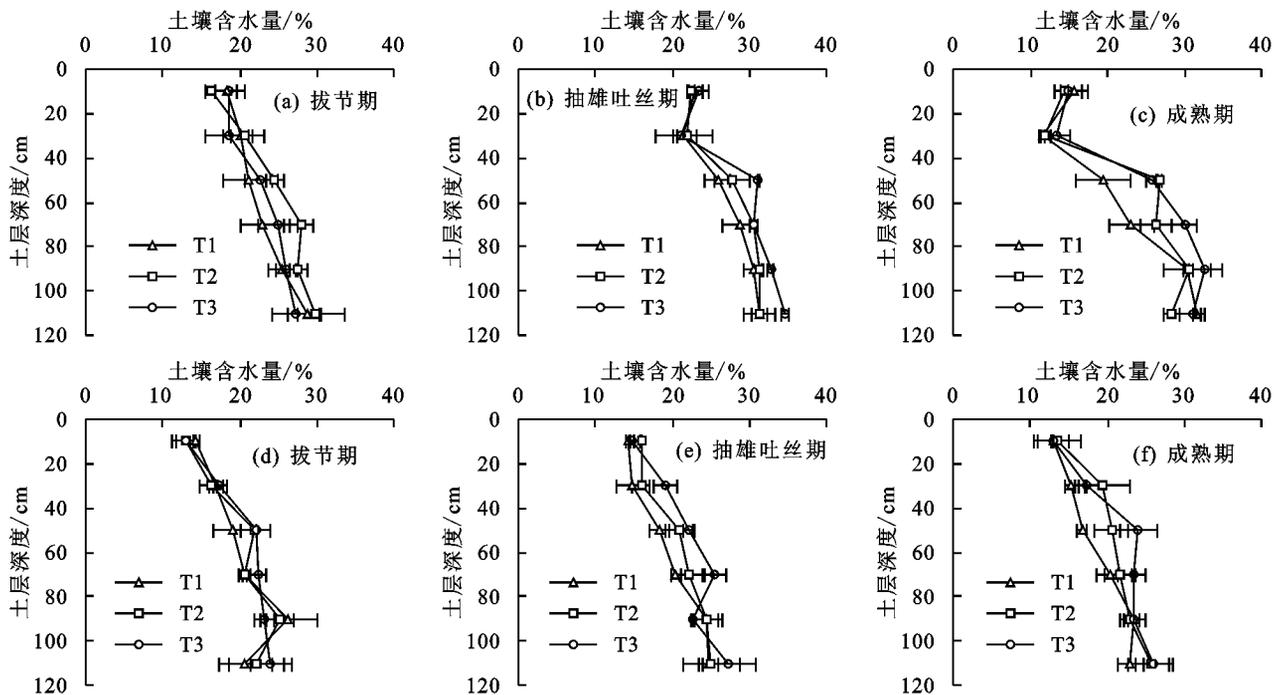
注:同一茬口玉米,每列数字后不同小写字母表示差异达显著水平($P < 0.05$)。下同。

2.4 不同耕作施肥方式下土壤水分空间动态分布

综合两茬玉米各生育期土壤含水量(图 3)可知,随着土层深度的增加,各时期土壤含水量呈现不同程度的递增趋势。在第 1 茬玉米整个生育时期 40—80 cm 土层, $T2$ 、 $T3$ 土壤含水量平均较 $T1$ 提高 16.5%,其他土层间差异不显著。在第 2 茬,抽雄吐丝期和成熟期 40—80

cm 土层间, T2、T3 土壤含水量平均较 T1 抬升 18.7%, 其他时期各土层间差异不显著。与免耕浅施肥比, 深松

能够提升土壤的保水性能。在玉米各生育时期 2 种深松耕作处理(T2、T3)间差异不显著。



注: a、b、c 为第 1 茬玉米, d、e、f 为第 2 茬玉米。下同。

图 3 不同耕作施肥方式下土壤水分时空分布

2.5 不同耕作施肥方式下土壤有效磷空间动态分布

从图 4 可以看出, 玉米各生育时期土壤有效磷含量随土层深度的增加而降低, 各土层中的有效磷含量随着玉米生长发育而逐渐下降。第 1 茬玉米, 拔节期 0—20 cm 土层 T1 有效磷含量平均较 T2、T3 高 30.6%, 20—40 cm 土层 T3 有效磷含量平均较 T1、T2 增加 74.1%,

40—60 cm 土层各处理间差异不显著; 抽雄吐丝期和成熟期, 20—40 cm 土层 T3 有效磷含量均高于 T1、T2, 其他土层各处理间差异不显著。第 2 茬玉米, 各时期不同处理间的差异与第 1 茬趋势接近, T1 在拔节期 0—20 cm 土层有效磷含量最高, T3 平均有效提高各玉米时期 20—40 cm 土层的有效磷含量 10.2 mg/kg。

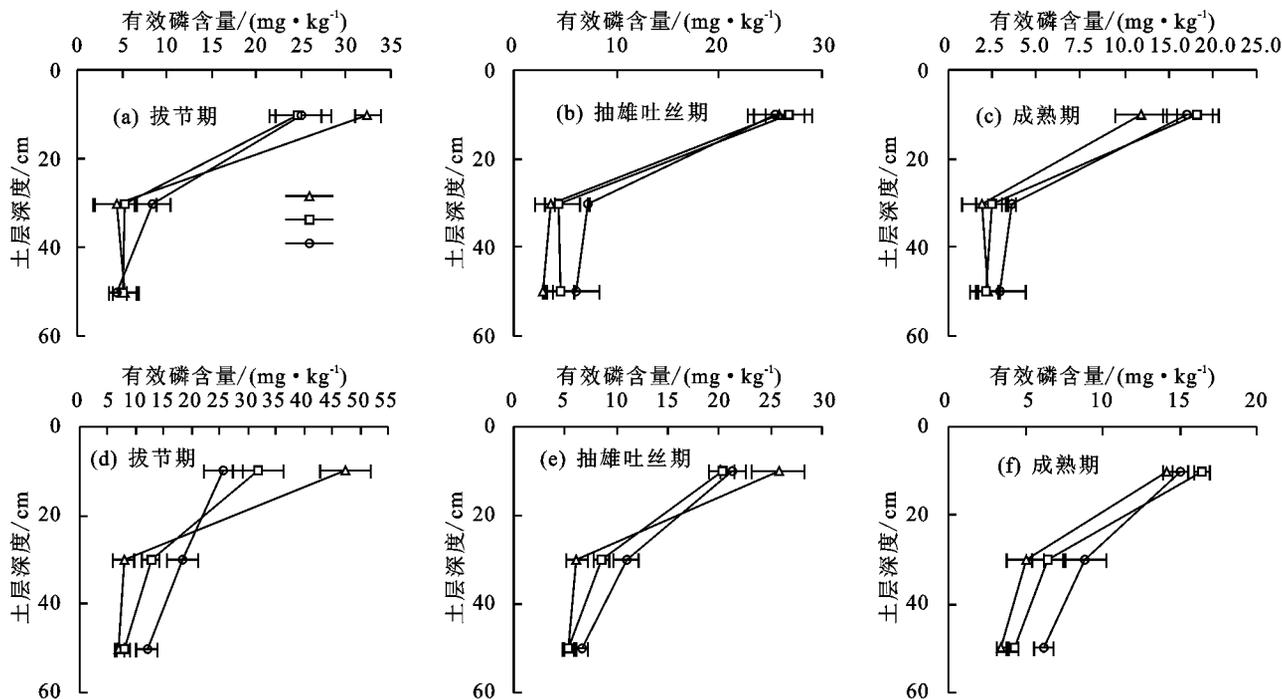


图 4 不同耕作施肥方式下土壤有效磷时空分布

3 讨论与结论

选择优质的耕作施肥模式是提高作物高产高效

的有效途径, 养分的吸收、利用与转运通过影响作物的生长发育进而影响作物产量^[14]。靳海洋等^[15]报

道,深松能够有效改善土壤容重,提高土壤保水性能。本试验中,T2 和 T3 的土壤含水量较 T1 平均抬升 6.6%,成熟期 T2 和 T3 的 0—60 cm 各土层容重较 T1 平均降低 5.5%^[16]。说明深松耕作能够机械式打破坚实犁底层,提高土壤渗透性能和对降水的接纳、储存能力,为作物根系生长发育提供良好环境,促进根系生长发育^[17]。张玉玲等^[18]指出,深松能够显著提高土壤有机质及全氮、全磷、全钾含量。本试验两茬夏玉米各时期中,T3 显著提高 20—40 cm 土壤有效磷含量 10.2 mg/kg(图 4),主要由于 T3 将磷肥施在 15—30 cm,有效补充了土壤下层磷素。

本文研究表明,不同耕作方式改变土壤理化性质致使磷素在玉米各器官中的分配存在差异,随着玉米生长发育,不断从土壤中吸收养分,茎叶中的磷向籽粒转移,与免耕浅施肥(T1)相比,成熟期深松全层施肥(T2)和新型深松两肥异位分层施肥(T3)整株磷积累量平均提高 15.9%,其中 T3 提升 21.2%,效果更为显著(图 2)。2 种深松处理均有效提升玉米磷肥生产效率和农学效率(表 2),本试验与司政邦等^[19]得出的深松能够显著提高磷肥利用效率的结果一致。张瑞富等^[20]指出,施磷位置适度下移可提高春玉米的磷素吸收效率和磷肥利用率,本文 T3 的磷肥生产效率、表观利用率、农学效率较 T1 显著提升 19.1%、16.8%和 120.1%,更有利于促进植株的养分吸收和利用,减少磷素对环境的污染。与 T1 比,T2、T3 的玉米产量平均提升 17.2%,T3 的产量提升效果最显著。第 2 茬玉米整体产量水平较第 1 茬降低 8.2%,与两茬玉米供试品种和两年气候差异有关。说明新型深松两肥异位分层施肥能够有效降低土壤容重,提高土壤保水性能,增加土壤下层磷含量,促进玉米养分吸收,提升磷肥利用率,提高玉米产量。

因此,深松能够打破坚实犁底层,降低土壤容重,提高土壤渗透性能、储水能力和水分调节能力,提升深层土壤磷素养分含量,促进作物对磷肥吸收,增加玉米磷肥效率、表观利用率和农学效率。新型深松两肥异位分层施肥将施磷位置下移,显著提高 20—40 cm 土壤有效磷含量,提升磷素吸收、利用效率,促进植株养分吸收利用和提高玉米产量,增产效果显著,是现在夏玉米生产中值得推荐的一种新型耕作施肥方式。

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,2017.

[2] 翟振,李玉义,逢焕成,等. 黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J]. 中国农业科学,2016,49(12):2322-2332.

[3] Roshani S, Komal B B, Santosh M, et al. Performance of maize hybrids under different tillage methods and nitrogen levels[J]. African Journal of Agricultural Re-

search,2018,13(2):36-40.

[4] Ohwaki A. Ground arthropod communities in paddy fields during the dry period: Comparison between different farming methods[J]. Journal of Asia-Pacific Entomology,2015,18(3):413-419.

[5] 郭家萌,刘振朝,高强,等. 深松对玉米产量和养分吸收的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):249-254.

[6] 贾凤梅,张淑花,魏雅冬. 不同耕作方式下玉米农田土壤养分及土壤微生物活性变化[J]. 水土保持研究,2018,25(5):112-117.

[7] 郑洪兵,刘武仁,罗洋,等. 耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(3):264-270.

[8] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.

[9] Peng Z P, Ma S Y, Wang Y Q, et al. Plant and soil fertility characteristics of different winter wheat fields in the Huang-huai-hai plain of China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science,2016,66(7):1-10.

[10] 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.

[11] Chien S H, Prochnow L I, Cantarella H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts [J]. Advances in Agronomy,2009,102(9):267-322.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析. [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.

[13] 陈亚恒. 占补耕地数量—质量折算方法研究[D]. 河北保定:河北农业大学,2008.

[14] 郑成岩,崔世明,王东,等. 土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2011,37(8):1432-1440.

[15] 靳海洋,谢迎新,李梦达,等. 连续周年耕作对砂姜黑土农田蓄水保墒及作物产量的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(16):3239-3250.

[16] 马阳. 不同耕作施肥方式下的夏玉米养分利用和土壤效应研究[D]. 河北保定:河北农业大学,2018.

[17] Cai H G, Ma W, Zhang X Z, et al. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize[J]. The Crop Journal,2014,2(5):297-307.

[18] 张玉玲,张玉龙,黄毅,等. 辽西半干旱地区深松中耕对土壤养分及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(4):167-170.

[19] 司政邦,李军,周婷婷. 耕作与施肥模式对渭北旱塬春玉米土壤肥力和产量的影响[J]. 西北农业学报,2016,25(1):25-33.

[20] 张瑞富,杨恒山,范秀艳,等. 施磷深度和深松对春玉米磷素吸收与利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(4):880-887.