植物营养与肥料学报 2013,19(2):312-320
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0206

施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响

范秀艳[1,2], 杨恒山[2*], 高聚林[1*], 张瑞富[2], 王志刚[1], 张玉芹[2]
(1 内蒙古农业大学农学院,内蒙古呼和浩特 010019; 2 内蒙古民族大学农学院,内蒙古通辽 028042)

摘要: 以高产春玉米"金山27"为供试品种,研究了在3个施磷水平(P_2O_5 100、150和200 kg/hm^2)下,不同施磷方式(分层施磷和传统施磷)对其磷素吸收、转运和利用的影响。结果表明,同一施磷水平下,分层施磷较传统施磷方式玉米植株磷含量和磷积累量均有不同程度的提高,在完熟期差异均达到显著水平。不同施磷方式间,茎鞘、叶片、穗部营养体各生育时期磷含量和磷积累量差异多数不显著,但完熟期子粒磷含量和磷积累量分层施磷均显著高于传统施磷方式。同一施磷水平下,叶片、茎鞘和穗部营养体中磷素的转运量均表现为分层施磷高于传统施磷,但差异多数未达到显著水平。转运率及对子粒贡献率的差异规律性不明显。磷肥吸收效率、利用效率、偏生产力和利用率均以分层施磷高于传统施磷方式,且差异多数达到显著水平。因此分层施磷方式能促进春玉米对磷素的吸收,可提高磷肥的吸收效率和利用效率。

关键词: 春玉米; 施磷方式; 磷素积累与转运; 磷肥利用效率
中图分类号: S513.06.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)02-0312-09

Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize

FAN Xiu-yan[1,2], YANG Heng-shan[2*], GAO Ju-lin[1*], ZHANG Rui-fu[2], WANG Zhi-gang[1], ZHANG Yu-qin[2]
(*1 College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China;*
2 College of Agronomy, Inner Mongolia University for the Nationality, Tongliao, Inner Mongolia 028042, China)

Abstract: A maize cultivar, "Jinshan 27", was used as the test material to study the effects of different phosphorus levels (P_2O_5 0, 100, 150 and 200 kg/ha) and application methods (traditional application and application at different depths) on phosphorus absorption, translocation and utilization of the high-yield spring maize. The results show that compared with the traditional phosphorus application, the phosphorus content and accumulation in plant of phosphorus application at different depths are increased in various degrees, and the differences reach to a significant level at the mature stage. The phosphorus contents and accumulation amounts of stem and sheath, leaves, bracteal leaf and ear axis have no significant differences at the growth stages, while the phosphorus content and accumulation of seed have significant differences at the mature stage. Under the same level of phosphorus application, the transfer amounts of the vegetative of leaves, stem and sheath, bracteal leaf and ear axis under the phosphorus application with different depths are higher than those under the traditional within, and the differences are not at the significant difference level. There aren't obviously regularity in transfer rate and contribution rate for seed. The phosphate fertilizer absorption efficiency, phosphate utilization efficiency, partial factor productivity and phosphate apparent utilization efficiency of the phosphorus application with different depths are higher than those of the traditional phosphorus application. The posphorus application with different depths could promote spring maize

收稿日期: 2012-06-26 **接受日期:** 2012-11-02
基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAD16B13);内蒙古自然科学基金(2012MS0312);内蒙古民族大学科研创新团队支持计划项目(NMD1003)资助。
作者简介: 范秀艳(1975—),女,内蒙古赤峰人,副教授,博士研究生,主要从事作物栽培生理研究。E-mail: fanxiuyan12@126.com
* 通信作者 Tel: 0471-4301057, E-mail: gaojulin@yahoo.com.cn; Tel: 04758314830, E-mail: yanghenshan2003@yahoo.com.cn

absorb phosphorus, and moreover, improve absorption efficiency and utilization efficiency of phosphate fertilizer.

Key words: spring maize; phosphorus application method; phosphate accumulation and translocation; utilization efficiency of phosphate fertilizer

玉米持续增产是保障我国粮食安全的关键,高产技术的研究对进一步提升玉米单产水平具有重要的推动作用[1-2]。磷是玉米生长发育中不可缺少的大量营养元素之一,在提高玉米产量方面的作用是其它肥料不可替代的[3]。西辽河平原地处世界玉米生产的黄金地带,该区域光热资源丰富,土壤肥沃,井灌条件良好,具有实现玉米大面积超高产的潜力和优势,其玉米种植面积一直稳定在 6.0×10^5 hm^2 左右,平均单产 7.50 t/hm^2,较全国平均单产 5.25 t/hm^2 高 40% 以上,总产量约占内蒙古自治区玉米总产量的 30%[4]。近年来,随着玉米免耕播种及机械化施肥技术的推广应用,磷肥施用的深度普遍较浅,多在 5 cm 左右[5]。由于磷在土壤中易被固定且移动性较差,多年的累积效应导致磷素在土壤表层富积而下层不足[6-7]。当前所种植玉米品种的根系多呈现"横向紧缩,纵向延伸"的特点[8],其根系对磷的吸收活跃层大喇叭口期在 10—20 cm,乳熟期下移到 20—40 cm 土层[9],这种磷素养分的空间分布与高产和超高产玉米根系空间分布的一致性变差。因此研究和解决高产、超高产玉米磷高效利用的问题,对实现玉米生产的持续发展具有重要的意义。已有研究表明,磷肥深施能提高玉米产量和磷素的利用率[5,10-11],但有关分层施磷对玉米磷素吸收、积累、转运和利用的系统研究尚未见报道。本研究针对内蒙古西辽河平原地区具有实现大面积玉米高产的资源优势[12]和生产中玉米施磷较浅的实际问题,在高产栽培条件下,研究分层施磷对春玉米磷素吸收、积累、转运和磷肥利用的影响,以期为玉米高产和磷高效的养分管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2010 年在内蒙古民族大学实验农场进行,试验点地处西辽河平原(43°36′N、122°22′E),海拔 178 m,年均气温 6.8℃,年均降水量 399.1 mm,无霜冻期 150 d 左右,≥10℃ 年活动积温 3200℃。试验地土壤为灰色草甸土,是当地主要土壤类型。耕层土壤养分含量为:有机质 24.6 g/kg、全氮 0.96 g/kg、碱解氮 58.78 mg/kg、速效磷 10.81 mg/kg、速效钾 79.92 mg/kg,土壤 pH 值 8.3。试验地前茬为紫花苜蓿。

1.2　试验设计

供试品种为高产春玉米"金山 27",由通辽金山种业科技有限责任公司提供,该品种产量纪录为 18.62 t/hm^2(2009 年农业部专家测产)。试验设施 P_2O_5 100、150 和 200 kg/hm^2 3 个施磷水平,分别以 T100、T150、T200 表示;每一施磷水平下均设传统施磷(深度 8 cm)和分层施磷(施磷与播种同步进行,人工开沟 16 cm,按 1/2 量施入磷肥,覆土 8 cm,再施入其余 1/2 磷肥,覆土 3 cm,人工点种后覆土镇压)2 种施用方式,分别以 Ⅰ 和 Ⅱ 表示,以不施磷肥为对照(CK),共 7 个处理。每个处理 3 次重复,小区面积 60 m^2。每处理均基施钾肥(K_2O)250 kg/hm^2,种肥氮(N)17 kg/hm^2;追施氮(N)356 kg/hm^2,分别在拔节期、大喇叭口期和抽雄期按 3∶6∶1的比例追施。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。种植密度为 90000 plant/hm^2;5 月 2 日播种,9 月 25 日收获测产。生育期间浇水 4 次,铲、耥各 3 次。

1.3　样品采集与测定

分别于拔节期(V6)、大喇叭口期(V12)、吐丝期(R1)、吐丝后 15 d、乳熟期(R3)和完熟期(R6)在每个小区取代表性植株 3 株,分叶片、茎鞘(茎+叶鞘)、穗部营养体(苞叶+穗轴+穗柄)和子粒,在 105℃ 杀青 30 min,65℃ 烘干至恒重后测定干物质重。留小样粉碎后,用钒钼黄比色法测定各器官的磷含量[13]。

1.4　相关参数计算公式[5,14-16]

磷转运量 = 吐丝后 15 d 各器官磷积累量 − 收获期相应器官磷积累量

磷转运率 = 器官磷转运量/吐丝后 15 d 相应器官磷积累量 × 100%

器官磷转运量对产量的贡献率 = 器官磷转运量/籽粒产量 ×100%

磷肥偏生产力(PPFP,kg/kg) = 施磷处理子粒产量/施磷量

磷肥吸收效率(PAE,kg/kg) = 植株磷累积量/施磷量

磷肥利用效率(PUE,kg/kg) = (施磷区子粒产量 − 不施磷区子粒产量)/施磷量

试验数据用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.05 软件进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 施磷方式对春玉米产量及产量构成的影响

由表1可以看出,与不施磷处理(CK)相比,不同施磷处理均有增产效应,且与CK间的差异均达到了显著水平。同一施磷水平下,施磷方式间春玉米千粒重和穗粒数差异均不显著;在施磷(P_2O_5) 100 kg/hm^2 水平下,分层施磷较传统施磷方式增产7.1%,产量差异达显著水平。在150 kg/hm^2 和200 kg/hm^2 磷水平下,两种施磷方式间产量的差异不显著。

表1 超高产栽培下施磷方式对春玉米产量及产量构成的影响

Table 1 Effects of the phosphorus application on grain yield and its components of spring maize under the super-high-yield cultivation

处理 Treatment	穗粒数(No./ear) Kernel number	千粒重(g) 1000-grain weight	实测产量(t/hm^2) Actual yield	增产率(%) Increased rate
CK	507.7 c	287.5 c	12.300 c	
T100Ⅰ	509.9 c	303.3 b	13.352 b	8.5
T100Ⅱ	516.8 abc	308.3 ab	14.296 a	16.3
T150Ⅰ	511.1 bc	305.5 b	14.117 ab	14.8
T150Ⅱ	523.9 ab	313.0 ab	14.769 a	20.1
T200Ⅰ	523.0 ab	312.3 ab	14.732 a	19.8
T200Ⅱ	526.1 a	319.2 a	14.953 a	21.5

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

2.2 施磷方式对植株磷含量的影响

2.2.1 玉米各器官磷含量的动态变化 从表2可以看出,玉米各器官的磷含量变化在处理间有一定差异,叶片中的磷含量在整个生育时期呈先升后降的变化趋势,最大值均出现在吐丝期。同一施磷水平下,叶片磷含量均为分层施磷高于传统施磷方式,且在吐丝后15 d两种施磷方式间的差异较为明显。吐丝后15 d,T200Ⅱ、T150Ⅱ、T100Ⅱ处理较T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ处理叶片的磷含量高14.4%、8.7%和1.1%。

各处理茎鞘磷含量随生育期持续下降。同一施磷水平下,各生育时期茎鞘中磷含量均为分层施磷高于传统施磷方式,其中吐丝后15 d差异较为明显,吐丝后15 d茎鞘中的磷含量T200Ⅱ、T150Ⅱ、T100Ⅱ处理分别较T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ高18.7%、6.5%和4.4%。表明分层施磷能促进茎鞘对磷的吸收,增强玉米的抗逆性,对防止玉米生育后期早衰起到积极作用。

不同施磷方式对穗部营养体中磷含量的影响与其对茎鞘中磷含量的影响趋势基本一致,随玉米生育进程的推进,穗部营养体中磷含量逐渐降低;同一施磷水平下,穗部营养体中磷含量分层施磷高于传统施磷方式。

随着玉米生育进程的推移,各处理子粒中磷含量均呈先升后降的变化趋势,最大值均出现在乳熟期。分层施磷方式均高于同水平传统施磷方式,且在完熟期其差异均达到显著水平。

2.2.2 玉米植株磷含量的动态变化 表2还显示,同一施磷水平下,玉米花前(拔节期、大口期)施磷方式间植株磷含量的差异均不显著;在玉米花后,除T200处理的吐丝期外,其余各时期分层施磷方式的植株磷含量均显著高于传统施磷方式。表明分层施磷能促进春玉米对磷素的吸收,且后期作用更为明显。各处理植株磷含量均表现为随施磷水平的增加而增加,随生育进程的推移而降低。

2.3 施磷方式对植株磷积累量的影响

2.3.1 玉米各器官中磷积累量的动态变化 由表3可知,同一施磷水平下,分层施磷方式的玉米叶片磷积累量均高于传统施磷方式。随生育进程的推进各

表 2　高产春玉米不同器官和植株中磷含量的动态变化(%)

Table 2　Contents of P in different organs and plant at different growth stages of high-yield spring maize

器官 Organ	处理 Treatment	拔节期 V6	大口期 V12	吐丝期 R1	吐丝后 15 d 15DAS	乳熟期 R3	完熟期 R6
叶 Leaf	CK	0.674 c	0.677 4c	0.750 b	0.635 e	0.499 c	0.376 c
	T100 Ⅰ	0.730 b	0.693 bc	0.776 ab	0.655 de	0.558 c	0.404 bc
	T100 Ⅱ	0.741 ab	0.710 bc	0.786 ab	0.662 de	0.633 b	0.434 ab
	T150 Ⅰ	0.736 b	0.704 bc	0.802 a	0.691 cd	0.631 b	0.428 ab
	T150 Ⅱ	0.750 ab	0.760 ab	0.809 a	0.751 b	0.676 b	0.449 ab
	T200 Ⅰ	0.754 ab	0.759 ab	0.805 a	0.707 c	0.640 b	0.452 a
	T200 Ⅱ	0.782 a	0.793 a	0.820 a	0.809 a	0.765 a	0.459 a
茎鞘 Stem-sheath	CK		0.553 b	0.381 c	0.409 e	0.277 c	0.255 d
	T100 Ⅰ		0.582 b	0.462 b	0.413 de	0.285 c	0.270 cd
	T100 Ⅱ		0.588 b	0.495 ab	0.431 cde	0.297 bc	0.305 abc
	T150 Ⅰ		0.586 b	0.493 ab	0.432 cd	0.289 c	0.294 bcd
	T150 Ⅱ		0.617 ab	0.516 a	0.460 b	0.346 ab	0.331 ab
	T200 Ⅰ		0.606 ab	0.515 a	0.449 bc	0.321 abc	0.328 ab
	T200 Ⅱ		0.660 a	0.527 a	0.533 a	0.356 a	0.345 a
穗部营养体 Bracteal leaf and ear axis	CK			0.857 e	0.399 d	0.228 d	0.188 e
	T100 Ⅰ			0.861 de	0.466 c	0.285 c	0.260 cd
	T100 Ⅱ			0.871 de	0.473 c	0.348 b	0.276 bcd
	T150 Ⅰ			0.904 cd	0.478 c	0.351 b	0.244 d
	T150 Ⅱ			0.966 ab	0.504 bc	0.379 ab	0.307 ab
	T200 Ⅰ			0.940 bc	0.535 ab	0.358 b	0.293 abc
	T200 Ⅱ			0.984 a	0.553 a	0.399 a	0.322 a
子粒 Seed	CK				0.524 d	0.683 c	0.454 d
	T100 Ⅰ				0.527 d	0.685 bc	0.463 cd
	T100 Ⅱ				0.552 bcd	0.687 bc	0.532 b
	T150 Ⅰ				0.538 cd	0.724 ab	0.514 bc
	T150 Ⅱ				0.606 ab	0.733 a	0.619 a
	T200 Ⅰ				0.590 bc	0.719 abc	0.561 b
	T200 Ⅱ				0.650 a	0.745 a	0.652 a
植株 Plant	CK	0.674 c	0.622 b	0.544 d	0.478 e	0.437 e	0.363 e
	T100 Ⅰ	0.730 b	0.642 b	0.598 c	0.501 d	0.461 e	0.388 de
	T100 Ⅱ	0.741 ab	0.651 b	0.627 b	0.515 c	0.492 d	0.438 c
	T150 Ⅰ	0.736 b	0.646 b	0.633 b	0.523 c	0.502 cd	0.425 cd
	T150 Ⅱ	0.750 ab	0.691 ab	0.659 a	0.560 b	0.541 ab	0.493 ab
	T200 Ⅰ	0.754 ab	0.688 ab	0.651 ab	0.550 b	0.521 bc	0.465 bc
	T200 Ⅱ	0.782 a	0.731 a	0.671 a	0.625 a	0.566 a	0.517 a

注(Note)：同列数据后不同字母表示同一器官不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant in same organs among treatment at the 5% level. V6—Jointing stage; V12—Trumpeting stage; R1—Silking stage; 15DAS—15 days after silking; R3—Milking stage; R6—Maturity stage.

表3 高产春玉米不同器官和植株中磷积累量的动态变化(kg/hm²)

Table 3 Accumulation of P in different organs and plant at different growth stages of high-yield spring maize

器官 Organ	处理 Treatment	拔节期 V6	大口期 V12	吐丝期 R1	吐丝后15 d 15DAS	乳熟期 R3	完熟期 R6
叶 Leaf	CK	1.837 c	17.615 d	27.724 e	28.920 d	20.644 d	9.908 d
	T100 Ⅰ	3.391 b	23.581 cd	33.901 d	34.953 c	24.541 cd	11.401 cd
	T100 Ⅱ	3.780 b	28.534 c	36.805 cd	39.248 bc	30.872 b	13.298 bc
	T150 Ⅰ	4.175 b	26.372 c	39.511 bc	39.874 bc	28.114 bc	14.701 ab
	T150 Ⅱ	4.656 ab	34.833 ab	42.991 ab	45.575 ab	33.063 ab	15.035 ab
	T200 Ⅰ	4.533 ab	30.724 bc	40.563 bc	42.247 b	31.147 b	14.971 ab
	T200 Ⅱ	5.552 a	40.984 a	45.870 a	50.315 a	37.443 a	16.833 a
茎鞘 Stem-sheath	CK		11.761 d	28.776 e	30.033 e	18.841 c	17.524 e
	T100 Ⅰ		17.941 c	35.220 d	36.357 d	21.188 bc	18.637 de
	T100 Ⅱ		21.753 bc	37.862 cd	39.634 cd	27.817 ab	21.695 cd
	T150 Ⅰ		21.182 bc	39.606 cd	40.537 cd	26.342 ab	21.754 cd
	T150 Ⅱ		25.294 ab	45.844 ab	47.641 b	30.870 a	25.506 b
	T200 Ⅰ		21.336 bc	42.422 bc	44.676 bc	29.164 a	23.857 bc
	T200 Ⅱ		29.679 a	47.797 a	54.571 a	31.050 a	29.016 a
穗部营养体 Bracteal leaf and ear axis	CK			7.263 e	11.428 d	5.731 d	4.317 c
	T100 Ⅰ			8.107 de	14.250 cd	7.237 cd	6.004 bc
	T100 Ⅱ			10.385 cde	16.711 bc	9.514 b	6.636 b
	T150 Ⅰ			11.130 bcd	16.501 bc	9.036 bc	6.358 b
	T150 Ⅱ			13.771 ab	20.185 ab	11.102 ab	7.802 ab
	T200 Ⅰ			12.327 bc	19.047 ab	10.286 b	7.802 ab
	T200 Ⅱ			15.544 a	22.526 a	13.258 a	8.971 a
子粒 Seed	CK				6.661 d	37.234 d	54.539 e
	T100 Ⅰ				7.322 cd	41.247 d	64.441 de
	T100 Ⅱ				8.071 bcd	42.758 d	79.085 c
	T150 Ⅰ				7.744 bcd	45.986 cd	75.301 cd
	T150 Ⅱ				9.838 b	55.081 ab	95.760 ab
	T200 Ⅰ				9.508 bc	52.465 bc	85.953 bc
	T200 Ⅱ				12.357 a	63.270 a	104.668 a
植株 Plant	CK	1.837 c	29.376 d	63.763 e	77.042 e	82.450 e	86.288 e
	T100 Ⅰ	3.391 b	41.522 c	77.225 d	92.882 d	94.213 de	100.483 d
	T100 Ⅱ	3.780 b	50.287 bc	85.052 cd	103.664 cd	110.961 cd	120.714 c
	T150 Ⅰ	4.175 b	47.554 c	90.247 c	104.656 cd	109.478 cd	118.114 c
	T150 Ⅱ	4.656 ab	60.127 ab	102.606 ab	123.239 b	130.116 ab	144.103 b
	T200 Ⅰ	4.533 ab	52.060 bc	95.312 bc	115.478 bc	123.062 bc	132.583 bc
	T200 Ⅱ	5.552 a	70.663 a	109.211 a	139.769 a	145.021 a	159.488 a

注(Note):同列数据后不同字母表示同一器官不同处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant in same organs among treatment at the 5% level. V6—Jointing stage; V12—Trumpeting stage; R1—Silking stage; 15DAS—15 days after silking; R3—Milking stage; R6—Maturity stage.

处理叶片磷积累量均呈先升后降的变化趋势,最大值均出现在吐丝后 15 d。吐丝后 15 d,除 T200 处理外,T100 和 T150 处理的分层施磷方式叶片磷积累量与传统施磷方式间差异均不显著。

施磷方式对茎鞘磷积累量的影响与其对叶片磷积累量的影响趋势基本一致,随着生育进程,各处理茎鞘中磷积累量均先升高后降低。各生育时期茎鞘中磷积累量,在同一施磷水平下分层施磷均高于传统施磷方式,其中吐丝后 15 d 的差异较为明显,吐丝后 15 d 其 T200Ⅱ、T150Ⅱ、T100Ⅱ处理分别较 T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ玉米茎鞘中磷的积累量高 22.2%、17.5%和 9.0%。

同一施磷水平下,穗部营养体中磷积累量为分层施磷方式高于传统施磷方式。随着玉米生育期的推进,穗部营养体中磷积累量呈先升高后降低的变化趋势,最大值均出现在吐丝后 15 d。但施磷方式间穗部营养体磷积累量差异未达显著水平。

子粒中磷积累量随生育进程呈增加趋势,到完熟期达到最大值。各生育时期,子粒中磷积累量均为分层施磷高于同水平传统施磷方式,在完熟期两种施磷方式间差异均达显著水平。完熟期 T200Ⅱ、T150Ⅱ、T100Ⅱ处理分别较T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ子粒中磷积累量高 21.8%、27.2%和 22.7%,表明分层施磷能促进子粒磷的积累。

2.3.2 玉米植株磷积累量的动态变化　由表 3 还可看出,同一施磷水平下,玉米植株磷积累量分层施磷均高于传统施磷方式,随着生育期的推移,二者之间差异逐渐增大,在完熟期,分层施磷均显著高于同一施磷水平下的传统施磷方式。完熟期 T200Ⅱ、T150Ⅱ、T100Ⅱ分别较 T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ处理的植株磷积累量分别增加 20.3%、22.0%和 20.4%。说明分层施磷能促进春玉米对磷素的吸收,且生育后期作用更为明显。

2.4　施磷方式对花后磷转运及完熟期磷分配的影响

2.4.1 对花后磷转运的影响　由表 4 可以看出,不同处理,各器官磷素向子粒的转运量均为叶片 > 茎鞘 > 穗部营养体。各器官磷素转运量,分层施磷均高于同一施磷水平下的传统施磷方式,但差异多数未达到显著水平;叶、茎鞘和穗部营养体磷的转运率与施磷方式的关系不明显;对子粒的贡献率,除叶片的 T200 处理外,均为分层施磷低于传统施磷方式。不同施磷方式磷的转运率均表现为叶 > 穗部营养体 > 茎鞘,对子粒的贡献率均为叶 > 茎鞘 > 穗部营养体。

2.4.2 对完熟期磷分配的影响　玉米完熟期磷分配比例以子粒中最大,占植株磷总积累量的 63.2%～66.4%(见表 5)。各器官磷分配比例的高低为子粒 > 茎鞘 > 叶 > 穗部营养体。同一施磷水平下,子粒中磷的分配比例(即磷收获指数)分层施磷高于传

表 4　施磷方式对春玉米植株磷转运的影响

Table 4　Effects of the phosphorus application methods on P translocation of spring maize

处理 Treat.	叶片 Leaf			茎鞘 Stem-sheath			穗部营养体 Bracteal leaf and ear axis		
	转运量 Transl. amount (kg/hm^2)	转运率 Transl. rate (%)	贡献率 Contr. rate (%)	转运量 Transl. amount (kg/hm^2)	转运率 Transl. rate (%)	贡献率 Contr. rate (%)	转运量 Transl. amount (kg/hm^2)	转运率 Transl. rate (%)	贡献率 Contr. rate (%)
CK	19.012 d	65.5	35.2	12.509 d	41.6	23.0	7.111 c	62.0	13.1
T100Ⅰ	23.552 cd	67.2	36.7	17.720 c	48.7	27.7	8.246 bc	58.2	13.1
T100Ⅱ	25.950 bc	65.1	33.1	17.939 c	45.0	23.0	10.075 abc	60.0	12.7
T150Ⅰ	25.173 c	63.1	33.6	18.783 bc	46.1	25.0	10.143 abc	61.4	13.5
T150Ⅱ	30.540 ab	66.9	32.0	22.135 ab	46.6	23.3	12.383 a	61.1	12.9
T200Ⅰ	27.276 bc	64.2	32.0	20.819 bc	46.5	24.6	11.245 ab	58.7	13.0
T200Ⅱ	33.482 a	66.6	32.0	25.555 a	46.7	24.4	13.555 a	59.9	13.0

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

表5 完熟期各器官磷的分配比例(%)

Table 5 Phosphorus distribution rates of each organ at the mature stage

处理 Treat.	叶片 Leaf	茎鞘 Stem and sheath	穗部营养体 Bracteal leaf and ear axis	子粒 Seed
CK	11.5 a	20.3 a	5.0 a	63.2 a
T100Ⅰ	11.5 a	18.6 a	6.0 a	64.0 a
T100Ⅱ	11.3 a	17.9 a	5.6 a	65.2 a
T150Ⅰ	12.4 a	18.4 a	5.4 a	63.7 a
T150Ⅱ	10.5 a	17.7 a	5.5 a	66.4 a
T200Ⅰ	11.3 a	18.1 a	5.9 a	64.8 a
T200Ⅱ	10.5 a	18.2 a	5.6 a	65.7 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

统施磷方式;叶片中磷的分配比例分层施磷低于传统施磷方式;茎鞘和穗部营养体中磷的分配比例与施磷方式间的相关性不明显。各器官磷分配比例施磷方式间差异均未达显著水平。

2.5 施磷方式对磷肥利用的影响

表6显示,同一施磷水平下,除T200处理外,分层施磷方式可显著提高磷肥的偏生产力;磷肥利用效率和吸收效率分层施磷均显著高于传统施磷方式。其中,磷肥利用效率T200Ⅱ、T150Ⅱ、T100Ⅱ分别比T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ处理高23.3%、34.4%和56.7%;磷肥吸收效率分别比T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ处理高21.2%、21.5%和19.8%。说明分层施磷可促进春玉米对磷肥的吸收与利用。

表6 施磷方式对春玉米磷肥吸收利用效率的影响(kg/kg)

Table 6 Effects of the phosphorus application methods on phosphorus absorption and utilization efficiency of spring maize

处理 Treat.	磷肥偏生产力 PPFP	磷肥吸收效率 PAE	磷肥利用效率 PUE
T100Ⅰ	139.0 b	1.0 b	18.2 cd
T100Ⅱ	149.3 a	1.2 a	28.4 a
T150Ⅰ	97.5 d	0.8 cd	16.9 cd
T150Ⅱ	103.3 c	1.0 b	22.8 b
T200Ⅰ	76.5 e	0.7 d	16.1 d
T200Ⅱ	80.3 e	0.8 c	19.9 bc

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. PPFP—P partial factor productivity; PAE—P absorption efficiency; PUE—P utilization efficiency.

3 讨论

3.1 施磷方式对高产春玉米磷吸收的影响

由于磷在土壤中易固定和移动性差,玉米对磷素养分的吸收主要是通过根系所接触的土壤来获取[17-18]。随着品种的改良,当前玉米品种的根系多呈现"横向紧缩,纵向延伸"的特点[8]。国外学者也研究证实,玉米新品种在深层土壤中的根系分布增加,根系下扎能力增强[19-20]。近年来,随着玉米免耕播种及机械化施肥技术的推广应用,磷肥施用深度普遍较浅,多在5 cm左右[5]。这些变化导致磷素养分供需在空间上的匹配性变差,必然会影响到玉米对磷的吸收。已有研究表明,磷肥深施可以促进夏玉米植株对磷素养分的吸收[5]。本课题组的前期研究也发现,分层施磷能显著提高春玉米下层根量和根系活力[21]。本研究结果表明,在3个施磷水平下,玉米植株及各器官的磷含量均表现为分层施磷高于传统施磷方式,且在生育后期更为明显。分层施磷提高植株对磷素吸收的原因,一是磷素养分供需的匹配性好,促进根系生长发育,二是下层根量增加,根系活力增强,对磷的吸收能力增强。

3.2 施磷方式对高产春玉米磷素转运的影响

玉米子粒中的养分,一部分来源于根系吸收养分的直接供应,另一部分来源于营养器官养分的再转移[22-23]。磷是典型的向代谢活性高的器官再移动的元素,玉米子粒中56.0%~85.8%的磷来源于营养器官的转运[24]。从本研究结果看出,叶、茎鞘和穗部营养体磷向子粒的转运量分层施磷均高于传统施磷方式,但转运对子粒的贡献率总体上表现为分层施磷低于传统施磷方式。这说明分层施磷既促进了营养器官中磷向子粒的转运,又促进了生育后期子粒对磷的直接吸收。尽管完熟期施磷方式间各器官磷分配比例的差异均未达到显著水平,但同一施磷水平下分层施磷方式的子粒中磷含量均高于传统施磷。不同施磷方式下,磷的转运率均表现为叶>穗部营养体>茎鞘,转运对子粒的贡献率均表现为叶>茎鞘>穗部营养体。表明叶中的磷更为活跃

且对子粒磷的影响更大。叶、茎鞘和穗部营养体磷的转运率与施磷方式间的关系尚不清晰,有待于进一步深入研究。

3.3 施磷方式对高产春玉米磷肥利用的影响

施磷深度对玉米产量的影响,国内外学者得到的研究结论不尽一致。一些研究表明,磷肥深施能提高玉米产量[5,25]。也有研究认为磷肥深施对产量的影响不明显[26-27]。本课题组前期的研究结果表明,低磷水平下分层施磷产量显著高于传统施磷方式,高磷水平下产量差异不显著[21]。这些研究结论的不同,可能与试验地土壤的供磷能力、施磷水平和供试玉米品种不同有关。施磷方式对磷肥利用效率的影响,既与后期的直接吸收有关,又和营养器官的转运有关。已有的研究表明,磷肥深施可增加营养器官中磷向子粒的转运量,提高玉米磷效率[5]。在本研究中,磷肥偏生产力(除 T200 的两个处理差异不显著外)、利用效率和吸收效率分层施磷方式均显著高于传统施磷,表明分层施磷对提高春玉米磷肥利用效率具有积极的意义。

3.4 生产中减磷增效的技术探讨

从本试验的结果来看,分层施磷(磷肥部分下移)较常规施磷方式提高了磷肥的吸收效率、利用效率和偏生产力,为玉米生产实现减磷增效提供了一个新的思路。鉴于目前生产上实施分层施磷农机配套尚有困难,单一的分层施磷措施难以推广应用。将施磷与耕作方式(多年旋耕不深松)改革相结合,可较好地解决这一问题。即在现行的旋耕灭茬浅施磷的生产方式下,每隔 2 ~ 3 年,结合深翻施磷一次,达到磷肥下移的目的。这样通过不同年度间的施磷深度变化,达到分层施磷的效果,在生产中具有较大的可行性。

4 结论

分层施磷能促进春玉米对磷素的吸收,增加植株体内磷的积累量,促进营养器官中磷向子粒的转运,增加了完熟期子粒中磷的分配比例,提高了磷肥的利用效率,是实现春玉米高产和磷高效的有效调控途径。

参 考 文 献:

[1] Bruulsema T W, Tollenaar M, Heckman J R. Boosting crop yields in the next century[J]. Bett. Crops Plant Food, 2000, 84(1): 9-11, 13.

[2] 王志敏, 王树安. 集约多熟超高产—21 世纪我国粮食生产发展的重要途径[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(4): 193-196.
Wang Z M, Wang S A. Intensive multiplecropping for super high yield major way to develop food production of China in the 21st century[J]. Reas. Agric. Modern, 2000, 21(4): 193-196.

[3] 刘景辉, 刘克礼. 春玉米需磷规律的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1995, 16(2): 16-26.
Liu J H, Liu K L. A study of phosphorus requirement in spring maize[J]. J. Inner Mongolia Inst. Agric. Anim. Husbandry, 1995, 16(2): 16-26.

[4] 杨恒山, 高聚林, 张玉芹, 等. 超高产春玉米氮磷钾养分吸收与利用的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 15-20, 39.
Yang H S, Gao J L, Zhang Y Q *et al*. Studies on absorption and use of N, P and K by spring maize under super-yield cultivation [J]. Agric. Res. Arid Areas, 2011, 29(2): 15-20, 39.

[5] 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]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(23): 4805-4813.

[6] 李晓林, 陈新平, 崔俊霞, 丁宝建. 不同水分条件下表层施磷对小麦吸收下层土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 40-45.
Li X L, Chen X P, Cui J X, Ding B J. Uptake of nutrients from subsoil by wheat as affected P supply under different soil moistures [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1995, 1(2): 40-45.

[7] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有效性的衰减[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 323-329.
Lu R K, Shi Z Y, Qian C L. Decline of phosphorus availability with time in soils[J]. Acta Pedol. Sin., 2000, 37(3): 323-329.

[8] 王空军, 郑洪建, 刘开昌, 等. 我国玉米品种更替过程中根系时空分布特性的演变[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 472-475.
Wang K J, Zheng H J, Liu K C *et al*. Evolution of maize root distribution in space-time during maize varieties replacing in China [J]. Acta Phytoecol. Sin., 2001, 25(4): 472-475

[9] 陈学留, 朱献玳, 刘益同. 玉米根系对磷肥的吸收利用研究[J]. 核农学报, 1986, (2): 29-33.
Chen X L, Zhu X D, Liu Y T. Studies on the uptake of phosphorous by corn root system[J]. Acta Agric. Nucl. Sin., 1986, (2): 29-33.

[10] Schwab G J, Whitney D A, Kilgore G L, Sweeney D W. Tillage and phosphorus management effects on crop production in soils with phosphorus stratification[J]. Agron. J., 2006, 98: 430-435.

[11] 田霄鸿, 聂刚, 李生秀. 不同土壤层次供应水分和养分对玉米幼苗生长和吸收养分的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 263-267.
Tian X H, Nie G, Li S X. Effect of water and nutrients supplying in different soil layers on growth and nutrition absorption of corn

seedlings[J]. Chin. J. Soil Sci., 2002, 33(4): 263-267.

[12] 张玉芹，杨恒山，高聚林，等. 超高产春玉米的根系特征[J]. 作物学报，2011，37(4)：735-743.
Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L *et al*. Root characteristics of super high-yield spring maize[J]. Acta Agron. Sin., 2011, 37(4): 735-743.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000. 257-270.
Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Prees, 2000. 257-270.

[14] 刘占军，谢佳贵，张宽，等. 有机肥磷替代化肥磷对春玉米干物质积累和磷素吸收的影响[J]. 玉米科学，2011，19(2)：123-128.
Liu Z J, Xie J G, Zhang K *et al*. Biomass accumulation and phosphorus uptake of spring maize as influenced by organic manure substitution for chemical phosphate[J]. J. Maize Sci., 2011, 19(2): 123-128.

[15] 王小彬，蔡典雄，张镜清，高绪科. 旱地玉米N吸收及其N肥利用率研究[J]. 中国农业科学，2001，34(2)：179-186.
Wang X B, Cai D X, Zhang J Q, Gao X K. Nitrogen uptake by corns and N recovery in grain in dry farmland[J]. Sci. Agric. Sin., 2001, 34(2): 179-186.

[16] 吴萍萍，刘金剑，周毅，等. 长期不同施肥制度对红壤稻田肥料利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(2)：277-283.
Wu P P, Liu J J, Zhou Y *et al*. Effects of different long-temp fertilizing system on fertilizer use efficiency in red paddy soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(2): 277-283.

[17] Bordoli J M, Mallarino A P. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn[J]. Agron. J., 1998, 90: 27-33.

[18] 宋春，韩晓增. 长期施肥条件下土壤磷素的研究进展[J]. 土壤，2009，(1)：21-26.
Song C, Han X Z. Advances in phosphorus in long-term fertilized soil[J]. Soils, 2009, (1): 21-26.

[19] Campos H M, Cooper J E, Habben G O. Improving drought tolerance in maize: a view from industry[J]. Field Crops Res., 2004, 90: 19-34.

[20] Hammer G L, Dong Z, McLean G. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. Corn belt? [J]. Crop Sci., 2009, 49: 299-312.

[21] 范秀艳，杨恒山，高聚林，等. 超高产栽培下磷肥运筹对春玉米根系特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(3)：562-570.
Fan X Y, Yang H S, Gao J L *et al*. Effects of phosphorus application on root characteristics of super-high-yield spring maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(3): 562-570.

[22] 杜金哲，李文雄，胡尚连，刘锦红. 春小麦不同品质类型氮的吸收、转化利用及与籽粒产量和蛋白质含量的关系[J]. 作物学报，2001，27(2)：253-260.
Du J Z, Li W X, Hu S L, Liu J J. Nitrogen assimilation, transfer and utilization in relation to grain protein content and yield of spring wheat genotypes differing in quality[J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(2): 253-260.

[23] 吴迪，黄绍文，金继运. 氮肥运筹、配施有机肥和坐水种对春玉米产量与养分吸收转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(2)：317-326.
Wu D, Huang S W, Jin J Y. Effects of nitrogen fertilizer management, organic manure application and bed-irrigation sowing on maize yield, and nutrient uptake and translocation[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(2): 317-326.

[24] 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.
Li W J, He P, Jin J Y. Potassium nutrition on dry matter and nutrients accumulation and translocation at reproductive stage of maize[J]. Plant. Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(4): 799-807.

[25] 王少仁，夏培桢. 夏玉米磷肥追施技术[J]. 土壤肥料，1989，(3)：14-17.
Wang S W, Xia P Z. Phosphorus fertilization application technique on summer maize[J]. Soils Fert., 1989, (3): 14-17.

[26] Borges R, Mallarino A P. Deep banding phosphorus and potassium fertilizers for corn produced under ridge tillage[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65: 376-384.

[27] Mallarino A P, Bordoli J M, Borges R. Phosphorus and potassium placement effects on early growth and nutrient uptake of no-till corn and relationships with grain yield[J]. Agron. J., 1999, 91: 37-45.