植物营养与肥料学报 2012,18(3):562-570
Plant Nutrition and Fertilizer Science

超高产栽培下磷肥运筹对春玉米根系特性的影响

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: 以金山 27 为供试品种,研究了超高产栽培下不同施磷量(P_2O_5 0、100、150 和 200 kg/hm^2)和施用方式(传统施磷和分层施磷)对春玉米根系特征及产量的影响。结果表明,根重、40—60 cm 土层根幅及根系活力均随施磷量的增加而增加,根系 SOD 和 POD 活性随施磷量的增加而提高,MDA 含量则随施磷量的提高而降低。同一施磷水平下,分层施磷不仅能促进春玉米根重的增加和下层土壤中根条数的增多;同时能延缓生育后期不同土层中根系活力下降,提高根系 SOD 和 POD 活性,降低 MDA 含量。在 100 kg/hm^2 施磷量下,分层施磷较传统施磷增产 7.1%,产量差异达到5%显著水平;在 150 kg/hm^2 和 200 kg/hm^2 施磷量条件下,分层施磷与传统施磷的产量差异不显著。

关键词: 春玉米; 超高产; 施磷量; 施磷方式; 根系特性
中图分类号: S513.062　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)03-0562-09

Effects of phosphorus application on root characteristics of super-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 with different depths) on root characteristics of spring maize under super-high-yield cultivation. The results show that the root weight, root width in 40 to 60 cm soil layer, root vigor, and the activities of SOD and POD of roots are all increased with the increase of the phosphorus application, while the MDA content of roots is decreased. The phosphate application in different soil layers could promote the increase of the root weight and the number of roots per plant in deep soil layers, delay the decrease of root activity in the later growing stages, enhance the activities of SOD and POD, and reduce the MDA content of roots in different soil layers under the same level of phosphate. Compared with conventional phosphorus application, the phosphate application in different soil layers increases grain yield by 7.1% under the level of phosphorus 100 kg/ha, was improved significantly at the 5% probability levels. But grain yield had no significant difference under the levels of 150 kg/ha and 200 kg/ha.

Key words: spring maize; super-high yield; phosphorus application rates; phosphorus application methods; root characteristic

玉米持续增产是保障我国粮食安全的关键,超高产栽培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]。目前,我国玉米超高产多是在充分供肥条件下实现的,如何在保证产量目标

收稿日期: 2011-08-28　　**接受日期:** 2012-01-09
基金项目: 国家973计划项目(2009CB118601);国家科技支撑计划(2011BAD16B13);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,蒙古族,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
* 通讯作者 Tel: 0475-8314830, E-mail: yanghenshan2003@yahoo.com.cn; Tel: 0471-4301057, E-mail: gaojulin@yahoo.com.cn

实现的前提下,减肥提效是超高产研究中亟待解决的关键问题[3-7]。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[8]。由于磷在土壤中易被固定且移动性较差,长期施磷导致表层磷素养分富积而下层磷素养分相对不足[9-10]。有研究表明,玉米根系对磷素养分吸收的活跃层大喇叭口期在 10—20 cm 土层,乳熟期下移到 20—40 cm 土层[11]。土壤磷素养分与根系吸收活跃层在垂直分布上的不一致,无疑会影响到施磷的增产效应和磷肥的利用效率。前人对夏玉米的研究表明,磷肥深施对产量和养分利用率的提高具有明显的促进作用[8, 12-15]。本文针对内蒙古西辽河平原具有实现大面积玉米超高产的资源优势[16]和生产中玉米施磷较浅的实际,系统地研究了分层施磷(磷肥下移)对春玉米根系特性及产量的影响,旨在为超高产春玉米磷素养分管理提供理论指导。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

西辽河平原地处世界玉米生产的黄金带,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。玉米种植面积稳定在 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,总产约占内蒙古自治区玉米总产的 30%。

试验于 2010 年在地处西辽河平原的内蒙古民族大学实验农场进行,试验点地理坐标为 N43°36′、E122°22′,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℃活动年积温 3200℃。试验地土壤为灰色草甸土,为当地主要土壤类型。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。前茬为紫花苜蓿。

1.2　试验设计

供试品种为金山 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,折为 14% 含水量)。试验设 3 个施磷量水平,分别为 P_2O_5 100、150 和 200 kg/hm^2,分别以 T100、T150、T200 表示;每一施磷水平均设传统施磷(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;并以不施磷肥为对照(CK),共 7 个处理。每个处理 3 次重复,小区面积为 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。试验田种植密度均为 9 万株/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

1.3.1 生物量测定　在大喇叭口期(V12)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)和完熟期(R6)取样 3 株,3 次重复。为便于取根,样株为同行内连续 3 株,以 1/2 行距为宽,挖长方形样方分层取根,每 20 cm 为一层,深度为 60 cm,清水冲洗根系,剔除杂质,并捡出死根后烘干称重。同时,测定地上部分干物质重。

1.3.2 根系活力与酶活性测定　在大喇叭口期(V12)、吐丝期(R1)和乳熟期(R3)每个处理选择有代表性的植株 3 株,3 次重复,用上述方法分层取根,每 20 cm 为一层,取根深度为 60 cm,在网袋内用清水将根系冲洗干净,剔除杂质后用滤纸吸干表层水分,剪取根系的根尖作为待测样品。采用 TTC 还原法测定根系活力[17],四氮唑蓝(NBT)光化还原法测定 SOD 活性[18],愈创木酚法测定 POD 活性[19],硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量[20]。

1.3.3 根条数与根幅的测定　完熟期将根挖出后,置于贴有坐标纸的平板上,查 10 cm、20 cm 和 30 cm 处单株根条数并测定行间和株间的根幅(植株根系水平分布最大直径),每处理取样 5 株,3 次重复。

1.3.4 产量及产量构成因素　收获时每处理均取 3 个 30 m^2 样方,查样方内有效穗数,测定籽粒产量,并取样测定籽粒含水量,折算出 14% 含水量下的产量。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.05 软件进行数据处理和统计分析。

2　结果与分析

2.1　磷肥运筹对春玉米产量的影响

由表 1 可见,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或极显著水平。其中 T200Ⅱ 处理产量最高,与 T100Ⅰ、CK 差异达到极显著水平,与其它施磷处理间的差异均未达到显著水平。从不同施磷量下的产量结果来看,春玉米产量总体上随施磷量的增加而

表1 超高产栽培下磷肥运筹对春玉米产量的影响

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

处理 Treatment	产量 (t/hm²) Yield	增产(%) Increase rate
T100 Ⅰ	13.35 ±0.77 bBC	8.5
T100 Ⅱ	14.30 ±0.44 aAB	16.3
T150 Ⅰ	14.12 ±0.47 abAB	14.8
T150 Ⅱ	14.77 ±0.13 aA	20.1
T200 Ⅰ	14.73 ±0.55 aA	19.8
T200 Ⅱ	14.95 ±0.50 aA	21.5
CK	12.30 ±0.37 cC	

注(Note)：同列中不同大、小写字母分别表示差异达到0.05、0.01显著水平。Different capital letters and small letters in a column indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

增加。在施磷(P_2O_5)100 kg/hm² 水平下，分层施磷较传统施磷增产7.1%，产量差异达到5%显著水平。在150 kg/hm² 和200 kg/hm² 水平下，两种施磷方式间的产量差异不显著。表明分层施磷(磷肥下移)在相对较低施用量下增产效果较为明显。

2.2 磷肥运筹对根系生物量的影响

健壮的根系是玉米高产的基础，根系干重是衡量根系大小的一个重要指标。由图1可见，与CK相比，施磷能提高春玉米的根干重。随生育进程的推移，各处理下春玉米的根干重均呈先升后降的变化趋势，最大值均出现在吐丝期。各生育时期玉米根干重，分层施磷处理均高于同水平传统施磷处理，且在吐丝期和完熟期差异较为明显。吐丝期T200Ⅱ、T150Ⅱ、T100Ⅱ处理较T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ处理根重分别增加13.5%、12.9%和8.1%；完熟期T200Ⅱ、T150Ⅱ、T100Ⅱ处理较T200Ⅰ、T150Ⅰ、T100Ⅰ处理根重分别增加16.3%、14.0%和12.1%。表明分层施磷(磷肥下移)促进了玉米根系的生长，增强了玉米的吸肥吸水能力，为实现超高产奠定了基础。

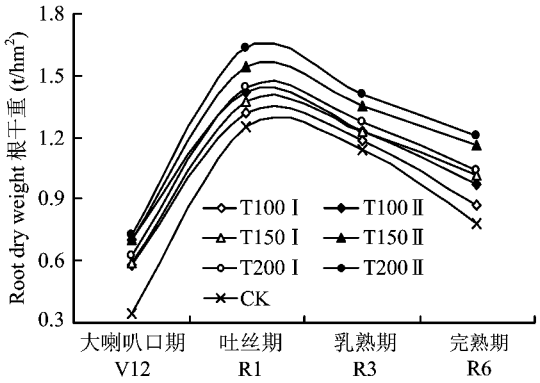

图1 磷肥运筹对春玉米不同生育期根重变化的影响

Fig. 1 Effects of the phosphorus application on root dry weight for spring maize in different growth stages

[注(Note)：V12—Trumpeting stage；R1—Silking stage；R3—Milking stage；R6—Maturity stage]

2.3 磷肥运筹对根条数及根幅的影响

2.3.1 对根条数的影响 由图2可见，在玉米完熟期，10 cm、20 cm和30 cm土层处单株根条数随施磷量的增加呈增加趋势。同一施磷量下，10 cm和20 cm土层处分层施磷的根条数均低于传统施磷的根

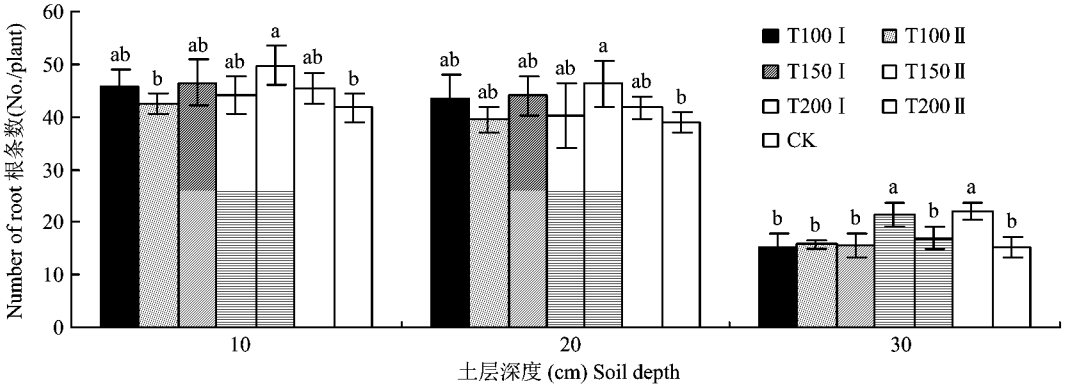

图2 磷肥运筹对春玉米完熟期不同土层深度根条数的影响

Fig. 2 Effects of the phosphorus application on the number of roots of spring maize at maturity stage in different soil layers

[注(Note)：柱上不同字母表示同一土层深度处理间差异达到0.05显著水平

In the same soil depth, different letters above the bars show significant between treatments at the 0.05 probability level.]

条数,但两种施磷方式间的差异均未达到显著水平;而在 30 cm 土层处,则表现为分层施磷的根条数高于传统施磷的根条数,其中施磷(P_2O_5)150 和 200 kg/hm^{2}下,2 种施磷方式间的差异均达到了显著水平。30 cm 土层处分层施磷的根条数多,这可能与磷肥下移延缓根系衰老有关。

2.3.2 对根幅的影响　由图 3 可知,完熟期不同施磷处理的单株根幅随土层深度的增加均呈先升后降的变化趋势,20 cm 土层处根幅最大。10 cm 土层处,各施磷水平的根幅均表现为分层施磷低于传统施磷;20 cm 土层处,除 T100 处理外,分层施磷的根幅亦低于传统施磷的根幅;30 cm 土层处,则表现为分层施磷的根幅均高于传统施磷的根幅,其中 T200Ⅱ处理的根幅显著高于 CK、T100Ⅰ、T100Ⅱ和 T150Ⅰ处理。表明磷肥下移能促进下层根系根幅的增大,这对提高根系对养分的吸收有益。

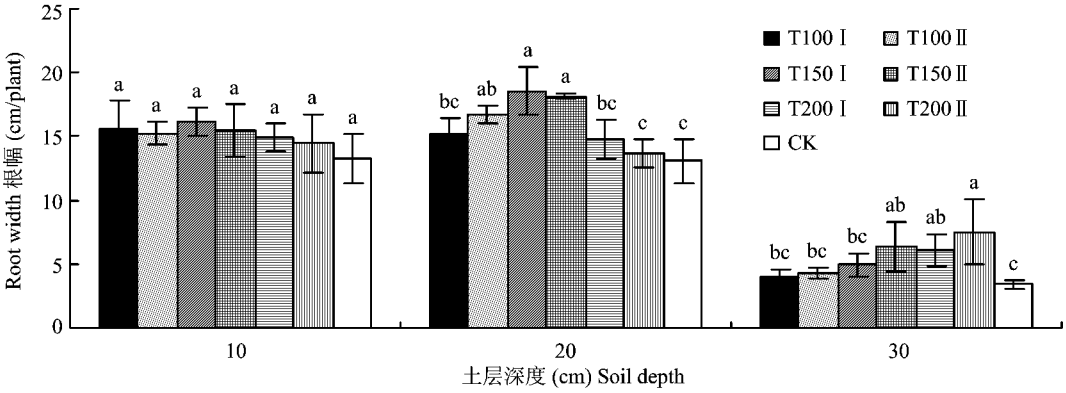

图 3　磷肥运筹对春玉米完熟期不同土层深度根幅的影响

Fig. 3　Effects of the phosphorus application on the root width of spring maize at at maturity stage in different soil depths

[注(Note):柱上不同字母表示同一土层深度处理间差异达到 0.05 显著水平

In the same soil depth, different letters above the bars show significant between treatments at the 0.05 probability level.]

2.4　磷肥运筹对根系活力的影响

由表 2 可见,不同施磷处理根系活力的最大值大喇叭口期出现在 20—40 cm 土层,吐丝期和乳熟期则出现在 40—60 cm 土层;不同生育时期根系活力均随施磷量的增加而增加;同一施磷量下根系活力总体上表现为分层施磷高于传统施磷,且在乳熟期 40—60 cm 土层处,两种施磷方式间的差异均达到了显著水平。表明增施磷肥和分层施磷均有利于提高春玉米的根系活力。

2.5　磷肥运筹对根系保护酶活性的影响

2.5.1 SOD 活性　由表 3 可知,各处理不同土层根系 SOD 活性均表现为乳熟期高于吐丝期,在这两个时期 SOD 活性总体上表现为随施磷量的增加而增加。同一施磷量下,除吐丝期 T100 处理外,SOD 活性表现为分层施磷处理高于传统施磷处理。其中,吐丝期 20—40 cm 和 40—60 cm 土层处,部分施磷量下施磷方式间的差异达到了显著水平;乳熟期 40—60 cm 土层处,各施磷量下施磷方式间的差异均达到了显著水平。这表明增施磷肥和磷肥下移能提高 SOD 的活性,延缓根系的衰老,对春玉米超高产的实现有益。

2.5.2 POD 活性　由表 4 可见,磷肥运筹对 POD 活性的影响与其对 SOD 活性的影响基本一致。POD 活性总体上表现为随施磷量的增加而增加。同一施磷量下 POD 活性分层施磷处理高于传统施磷处理,其中,在 0—20 cm 土层处,两种施磷方式间的差异多数未达到显著水平,而在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层处,两种施磷方式间的差异多数达到了显著水平。

2.5.3 MDA 含量　由表 5 可知,各处理不同土层根系 MDA 含量随生育进程推进而增加,随土层深度增加而降低,吐丝期和乳熟期根系 MDA 含量总体表现为随施磷量增加而降低。同一施磷量下根系 MDA 含量分层施磷处理均低于传统施磷处理,其中,P_2O_5 150 kg/hm^2 施磷量下,吐丝期 20—40 cm 和 40—60 cm 土层处,施磷方式间的差异达到了显著水平。这表明增施磷肥和分层施磷方式均可降低根系膜脂过氧化程度,延缓根系衰老。

表2 磷肥运筹对春玉米不同生育时期不同土层深度根系活力的影响［μg/(g·h)］

Table 2 Effects of the phosphorus application on root activity of spring maize at different growth stages in different soil depths

时期 Growth stage	处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)		
		0—20	20—40	40—60
大喇叭口期(V12) Trumpeting stage	T100 Ⅰ	56.59 ±1.38 a	63.11 ±2.50 ab	60.10 ±2.09 a
	T100 Ⅱ	56.87 ±1.75 a	63.40 ±0.92 ab	61.94 ±1.00 a
	T150 Ⅰ	57.55 ±0.95 a	61.38 ±5.64 ab	61.34 ±1.18 a
	T150 Ⅱ	58.53 ±1.91 a	65.04 ±1.21 ab	62.37 ±1.60 a
	T200 Ⅰ	58.11 ±1.12 a	65.81 ±1.96 a	63.13 ±3.83 a
	T200 Ⅱ	59.51 ±3.12 a	64.68 ±1.11 ab	61.64 ±2.34 a
	CK	56.15 ±0.90 a	59.78 ±2.46 b	61.03 ±2.16 a
吐丝期(R1) Silking stage	T100 Ⅰ	59.74 ±1.36 b	64.12 ±1.43 c	79.73 ±1.37 ab
	T100 Ⅱ	59.57 ±1.25 b	65.93 ±1.76 bc	75.50 ±1.06 cd
	T150 Ⅰ	61.28 ±1.65 ab	65.68 ±1.26 bc	77.53 ±1.76 bc
	T150 Ⅱ	60.84 ±2.58 ab	67.84 ±1.57 ab	80.41 ±1.09 ab
	T200 Ⅰ	63.64 ±1.76 ab	66.38 ±1.96 bc	79.88 ±3.09 ab
	T200 Ⅱ	66.99 ±8.39 a	70.31 ±2.10 a	81.21 ±1.33 a
	CK	57.81 ±2.36 b	63.27 ±2.71 c	73.55 ±0.92 d
乳熟期(R3) Milking stage	T100 Ⅰ	51.95 ±2.15 bc	59.68 ±1.65 bc	67.61 ±1.02 d
	T100 Ⅱ	53.11 ±0.74 ab	60.85 ±1.74 bc	70.69 ±1.30 bc
	T150 Ⅰ	54.38 ±0.62 ab	61.15 ±1.93 bc	69.39 ±1.06 cd
	T150 Ⅱ	52.23 ±0.96 bc	62.94 ±0.66 ab	72.60 ±1.12 ab
	T200 Ⅰ	53.87 ±1.57 ab	62.35 ±2.71 abc	73.59 ±1.09 a
	T200 Ⅱ	55.22 ±0.92 a	64.89 ±1.52 a	70.88 ±1.10 bc
	CK	50.49 ±1.31 c	59.36 ±0.89 c	67.30 ±2.23 d

注(Note)：同列数据后不同字母表示处理间差异达到0.05显著水平 Values followed different letters are significant at the 0.05 probability level.

3 讨论与结论

3.1 分层施磷(磷肥下移)对春玉米根系生物学特征的影响

植株对磷素吸收和利用提高主要与磷在土壤中的分布特性和玉米根系的特征有关，磷肥深施可以促进夏玉米植株对养分的吸收和利用，进而提高了玉米子粒产量[8,15]。本研究结果表明，施磷能提高春玉米的根干重，不同施磷处理间根重的差异在吐丝期和完熟期较为明显。分层施磷处理与传统施磷处理相比，根重在不同施磷量下均有不同程度的增加，且在施磷量较大的情况下增加更为明显。同一施磷量下，30 cm 土层处根条数和根幅均表现为分层施磷处理高于传统施磷处理，而在 10 cm 土层处则与之相反。说明分层施磷(磷肥下移)能促进较深土层根系的生长，扩大根系对养分和水分的吸收范围。深层土壤中根系环境相对稳定[16]，根系深扎，有助于增强玉米对土壤不良环境的缓冲能力，提高玉米的抗逆性。根系的这种变化对增强超高产玉米群体的抗倒延衰性具有积极的意义。

3.2 分层施磷(磷肥下移)对春玉米根系活力和酶活性的影响

根系活力及其生理活性是衡量作物根对养分吸收能力的重要指标。根系活力大，生理活性强，意味着根系对养分的吸收能力强，对延缓叶片衰老进程和促进籽粒灌浆有益[16,21]。已有研究表明，深层施

表 3　磷肥运筹对春玉米不同土层深度根系 SOD 活性的影响 (U/g, FW)

Table 3　Effects of the phosphorus application on SOD activities of roots of spring maize in different soil depths

生育期 Growth stage	处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)		
		0—20	20—40	40—60
吐丝期(R1) Silking stage	T100 Ⅰ	131.03 ±3.79 c	122.76 ±2.31 bc	115.60 ±3.79 b
	T100 Ⅱ	128.50 ±0.81 cd	118.34 ±1.91 c	106.74 ±1.84 cd
	T150 Ⅰ	133.65 ±5.72 bc	117.62 ±3.64 c	107.67 ±2.44 cd
	T150 Ⅱ	134.41 ±0.81 abc	136.03 ±2.54 a	110.74 ±3.49 c
	T200 Ⅰ	138.83 ±6.68 ab	117.56 ±1.24 c	105.35 ±2.66 d
	T200 Ⅱ	141.10 ±1.15 a	126.21 ±4.64 b	123.38 ±3.05 a
	CK	123.37 ±1.05 d	110.42 ±1.87 d	98.45 ±0.81 e
乳熟期(R3) Milking stage	T100 Ⅰ	146.36 ±3.88 ab	166.91 ±3.41 cd	173.70 ±4.94 c
	T100 Ⅱ	147.60 ±8.47 ab	176.58 ±4.00 b	189.40 ±5.45 b
	T150 Ⅰ	150.26 ±4.38 ab	167.95 ±2.68 c	175.47 ±3.43 c
	T150 Ⅱ	159.38 ±7.56 a	165.38 ±5.43 cd	184.61 ±1.84 b
	T200 Ⅰ	148.74 ±8.11 ab	185.26 ±2.83 a	184.38 ±1.75 b
	T200 Ⅱ	157.12 ±8.94 a	179.51 ±4.27 ab	201.58 ±7.54 a
	CK	140.25 ±7.32 b	160.91 ±0.52 d	175.26 ±1.20 c

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平 Values followed different letters are significant at the 0.05 probability level.

表 4　磷肥运筹对春玉米不同土层深度根系 POD 活性的影响 (U/g, FW)

Table 4　Effects of the phosphorus application on POD activities of roots of spring maize

生育期 Growth stage	处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)		
		0—20	20—40	40—60
吐丝期(R1) Silking stage	T100 Ⅰ	76.66 ±2.44 b	62.05 ±1.60 c	52.71 ±1.85 de
	T100 Ⅱ	74.85 ±1.44 b	76.14 ±2.67 a	57.45 ±2.58 bc
	T150 Ⅰ	82.96 ±0.90 a	63.75 ±1.66 c	65.05 ±2.98 a
	T150 Ⅱ	81.97 ±1.20 a	75.96 ±3.03 a	59.05 ±1.46 bc
	T200 Ⅰ	80.98 ±2.49 a	69.93 ±3.11 b	55.97 ±1.59 cd
	T200 Ⅱ	82.36 ±1.40 a	76.25 ±2.07 a	61.46 ±1.14 ab
	CK	69.04 ±3.43 c	60.90 ±1.25 c	51.67 ±3.16 e
乳熟期(R3) Milking stage	T100 Ⅰ	93.52 ±2.74 ab	113.07 ±4.98 c	119.41 ±1.84 cd
	T100 Ⅱ	92.60 ±2.96 ab	115.83 ±2.58 bc	128.09 ±3.32 ab
	T150 Ⅰ	93.03 ±1.46 ab	111.94 ±4.30 c	124.78 ±5.39 bc
	T150 Ⅱ	94.96 ±3.14 ab	123.43 ±5.55 a	124.52 ±4.25 bc
	T200 Ⅰ	92.21 ±2.71 b	115.81 ±1.08 bc	122.60 ±3.11 bcd
	T200 Ⅱ	97.66 ±2.69 a	121.21 ±4.10 ab	132.96 ±5.88 a
	CK	85.25 ±2.40 c	105.08 ±1.30 d	116.71 ±3.68 d

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平 Values followed different letters are significant at the 0.05 probability level.

表5 磷肥运筹对玉米不同土层深度根系MDA含量的影响（μmol/g，FW）

Table 5 Effects of the phosphorus application on MDA content of roots of spring maize in different soil layers

生育期 Growth stage	处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)		
		0—20	20—40	40—60
吐丝期(R1) Silking stage	T100 Ⅰ	11.34 ±0.27 ab	9.89 ±0.28 ab	9.17 ±0.14 ab
	T100 Ⅱ	11.13 ±0.40 abc	9.75 ±0.16 ab	9.17 ±0.49 ab
	T150 Ⅰ	11.14 ±0.13 abc	10.11 ±0.48 a	8.87 ±0.19 bc
	T150 Ⅱ	11.04 ±0.38 abc	9.36 ±0.21 b	9.43 ±0.12 a
	T200 Ⅰ	10.87 ±0.13 bc	9.52 ±0.40 ab	8.98 ±0.19 abc
	T200 Ⅱ	10.63 ±0.33 c	9.31 ±0.54 b	8.55 ±0.23 c
	CK	11.58 ±0.24 a	9.93 ±0.22 ab	9.44 ±0.25 a
乳熟期(R3) Milking stage	T100 Ⅰ	14.49 ±0.11 ab	14.47 ±0.26 a	13.51 ±0.11 ab
	T100 Ⅱ	14.16 ±0.19 ab	14.38 ±0.62 a	13.35 ±0.14 ab
	T150 Ⅰ	14.54 ±0.16 ab	14.31 ±0.08 a	13.47 ±0.24 ab
	T150 Ⅱ	14.07 ±0.24 ab	14.25 ±0.28 a	13.10 ±0.44 b
	T200 Ⅰ	14.09 ±0.55 ab	13.95 ±0.23 a	13.66 ±0.59 ab
	T200 Ⅱ	13.97 ±0.35 b	13.94 ±0.32 a	13.16 ±0.30 ab
	CK	14.64 ±0.46 a	13.88 ±0.22 a	13.84 ±0.44 a

注(Note)：同列数据后不同字母表示处理间差异达到0.05显著水平 Values followed different letters are significant at the 0.05 probability level.

肥能提高小麦根系SOD，POD活性，降低MDA含量，可以延缓下层根系的衰老，有利于小麦产量的提高[22-23]。本研究结果表明，同一施磷水平下，分层施磷较传统施磷玉米的根系活力强，且在乳熟期40—60 cm土层处差异显著。这说明施磷方式对根系活力的影响在生育后期和下层根系更大。SOD和POD活性均以分层施磷高于传统施磷，且施磷方式间酶活性的差异总体上表现为0—20 cm土层相对较小，20—40 cm土层和40—60 cm土层相对较大。分层施磷方式下根系MDA含量低于传统施磷方式，反映了分层施磷下根系细胞膜脂过氧化程度相对较低。分层施磷提高了春玉米根系活力和保护酶的活性，从而能延缓植株衰老，对玉米超高产的实现具有积极作用。

3.3 超高产栽培下春玉米磷素养分管理

玉米超高产多是在大密度、高肥水的条件下实现的[24-27]。在保证产量目标实现的前提下，如何通过合理的栽培技术手段，减肥增效是一个亟待解决的关键问题。大量的研究表明，玉米的产量随着施磷量的增加而增加，但增产幅度随施磷量的增加而减小[7,28-30]。本研究表明，分层施磷产量高于相同水平下传统施磷的产量，且在相对较低的施磷量下效果更为明显。分层施磷增加了玉米的根干重，促进了下层根系的发育，并提高了根系活力和保护酶的活性，这是其增产的重要生理基础。超高产玉米栽培应推广分层施磷技术以降低磷肥的高量施用，从而实现高产高效的统一。分层施磷的农机配套措施是今后需要加以研究解决的关键问题之一。

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] 王宜伦，李潮海，谭金芳，等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J]. 作物学报，2011，37(2)：339-347.
Wang Y L, Li C H, Tan J F *et al*. Effect of postponing N application on yield, nitrogen absorption and utilization in super-high-yield summer maize[J]. Acta Agron. Sin., 2011, 37(2): 339-347.

[4] 李青军, 张炎, 胡伟, 等. 氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 755-760.
Li Q J, Zhang Y, Hu W *et al*. Effects of nitrogen management on maize dry matter accumulation nitrogen uptake and distribution and maize yield[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(3): 755-760.

[5] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3151-3158.
Wang Y L, Li C H, Tan J F *et al*. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(15): 3151-3158.

[6] 王宜伦, 李潮海, 何萍, 等. 超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 559-566.
Wang Y L, Li C H, He P *et al*. Nutrient restrictive factors and accumulation of super-high-yield summer maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(3): 559-566.

[7] 张福锁, 陈新平, 高祥照, 等. 协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. 7-9, 38-40, 77-80.
Zhang F S, Chen X P, Gao X Z *et al*. Study and application on nutrient resources comprehensive management technology of coordination crop high yields and environmental protection[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008. 7-9, 38-40, 77-80.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 鲁如坤, 时正无, 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Mallarino A P, Webb J R, Blackmer A M. Corn and soybean yields during 11 years of phosphorus and potassium fertilization on a high-testing soil[J]. J. Prod. Agric., 1991, 4: 312-317.

[15] 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.

[16] 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. Root characteristics of super high-Yield spring maize[J]. Acta Agron. Sin., 2011, 37(4): 735-743.

[17] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 32-33.
Zou Q. The book instruction experiment of plant physio-logical and biochemical[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997. 32-33.

[18] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants[M]. Plant Physiol., 1977, 59: 309-314.

[19] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992. 131-207.
Zhang X Z. Research methods about crop physiology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992. 131-207.

[20] Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[M]. Arch. Biochem. Biophys., 1968, 125: 189-198.

[21] Russell R S, Ellis F B. Estimation of distribution of plant roots in soil[J]. Nature, 1968, 217: 582-583.

[22] 张水清, 李华, 苗果园. 施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响[J]. 土壤, 2006, 38(1): 110-112.
Zhang Y Q, Li H, Miao Guo Y. Effect of fertilization depth on distribution and late senescence of root system of spring wheat[J]. Soils, 2006, 38(1): 110-112.

[23] 石岩, 位东斌, 于振文, 余松烈. 施肥深度对旱地小麦花后根系衰老的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 573-575.
Shi Y, Wei D B, Yu Z W, Yu S L. Influence of fertilization depth on root system senescence of upland wheat after anthesis[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 12(4): 573-575.

[24] 黄振喜. 超高产夏玉米光合与养分生理特性研究[D]. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2007.
Huang G X. Studies on photosynthetic and nutrient physiological characteristics of super-high yield summer maize hybrids[D]. Taian: Ms thesis, Shandong Agricultural University, 2007.

[25] 王永军. 超高产夏玉米群体质量与个体生理功能研究[D]. 泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2008.

Wang K J. Study on population quality and individual physiology function of super- high-yielding maize (*Zea mays* L.) [D]. Taian: PhD dissertation, Shandong Agricultural University, 2008.

[26] 杨吉顺，高辉远，刘鹏，等. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. 作物学报，2010，36(7)：1226-1233.
Yang J S, Gao H Y, Liu P *et al*. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn [J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36 (7): 1226-1233.

[27] 宋红凯，郝满，韩霖，吴春胜. 超高产玉米与普通玉米生理特性的比较研究[J]. 玉米科学，2008，16(4)：111-114.
Song H K, Hao M, Han L, Wu C S.. Studies on the comparison of physiological character between super high-yield maize and common maize[J]. J. Maize Sci., 2008, 16(4): 111-114.

[28] 张玉斌，曹庆军，张铭，等. 施磷水平对春玉米叶绿素荧光特性及品质的影响[J]. 玉米科学，2009，17(4)：79-81.
Zhang Y B, Cao Q J, Zhang M *et al*. Effects of phosphorus application on chlorophyll fluorescence characteristic and quality of spring maize[J]. J. Maize Sci., 2009, 17(4): 79-81.

[29] 王雁敏. 不同氮磷配施对土壤养分、春玉米营养吸收特性及产量和品质的影响[D]. 兰州：甘肃农业大学硕士学位论文，2009.
Wang Y M. Effect of different NP ratios on soil nutrients, corn nutrient absorption characteristics, yields and quality [D]. Lanzhou: Ms thesis, Gansu Agricultural University, 2009.

[30] 吴照辉，贺立源，左雪冬，等. 低磷胁迫对不同基因型水稻阶段生物学特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(2)：227-234.
Wu Z H, He L Y, Zuo X D *et al*. Influence of low-P stress on the biological characteristics of different rice genotypes at different stages[J]. Plant. Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(2): 227-234.