

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.01478

不同施氮水平对超高产夏玉米氮磷钾积累与分配的影响

景立权¹ 赵福成^{1,2} 王德成¹ 袁建华³ 陆大雷¹ 陆卫平^{1,*}

¹扬州大学农学院 / 农业部长江中下游作物生理生态与栽培重点开放实验室 / 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏扬州 225009;

²浙江省东阳玉米研究所, 浙江东阳 322100; ³江苏省农业科学院粮食作物研究所, 江苏南京 210014

摘 要: 为探明不同施氮水平下玉米超高产($13\ 500\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$)群体氮磷钾积累及分配规律, 通过苏玉 20、浚单 20 两品种 3 年不同氮肥运筹方案的试验, 实现了籽粒最高产量 $14\ 753\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 的目标。结果表明: (1)随着生育进程, 两品种氮磷钾在植株、籽粒中积累逐渐增大, 在叶片、茎秆、叶鞘中呈先单峰变化趋势, 叶片氮钾峰值在大口期, 磷峰值在开花期。增大灌浆期植株氮积累量及叶片氮转移率, 促使成熟期籽粒氮磷较大积累量, 利于超高产玉米群体的形成。(2)籽粒产量、1 kg 氮生产籽粒量、氮肥的农学效率、氮素利用率、植株(叶片、茎秆、叶鞘、籽粒等器官)氮磷钾含量在 $450\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 施氮水平时达到最大值, 其值(苏玉 20)分别为 $14\ 753\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 、44.0 kg、19.24%、38.63%、335.4 $\text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 、178.2 $\text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 、230.7 $\text{kg}\ \text{hm}^{-2}$, 过高过低施氮均使氮磷钾积累量及产量下降。(3)由两品种产量与施氮水平的回归方程, 确定了超高产时的最佳施氮量、超高产施氮水平和最佳施氮范围, 苏玉 20 分别为 $457.0\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 、 $418.3\sim 495.7\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 、 $418.5\sim 495.4\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$; 浚单 20 分别为 $452.7\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ (最佳施氮量)、 $410.8\sim 494.6\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ (最佳施氮范围)。

关键词: 玉米; 施氮水平; 超高产; 氮磷钾; 积累与分配

Effects of Nitrogen Application on Accumulation and Distribution of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium of Summer Maize under Super-high Yield Conditions

JING Li-Quan¹, ZHAO Fu-Cheng^{1,2}, WANG De-Cheng¹, YUAN Jian-Hua³, LU Da-Lei¹, and LU Wei-Ping^{1,*}

¹Agriculture College of Yangzhou University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture / Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou 225009, China; ²Dongyang Institute of Maize Research, Dongyang 322100, China; ³Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China

Abstract: Establishing a high quality population is an important prerequisite to achieve high grain yield. Nitrogen (N) application is one of the most important practices in maize (*Zea mays* L.) production and plays a critical role in regulating population quality. To explore the effects of N application on accumulation and distribution of N, phosphorus (P), and potassium (K) of summer maize under the conditions of super-high yield ($\geq 13\ 500\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$), we planted two maize cultivars (Suyu 20 and Xundan 20), with different N application levels across three years, and the highest grain yield reached to $14\ 753\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$. The results showed that in the growth process, N, P, K accumulation increased gradually in the plants and grains of Suyu 20 and Xundan 20, and showed a curvilinear change in leaves, stems and sheathes with a peak value at trumpeting stage and anthesis stage, respectively. The increasing of N accumulation and transfer rate in leaves at filling stage promoted the N and P accumulation of grain at mature stage, leading to super-high yield groups. In Suyu 20, yield, grain production per kg N, N agronomy efficiency, N utilization efficiency, N, P, K content in leaves, stems and sheathes were the highest at $450\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$ which were $14\ 753\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$, 44.0 kg, 19.24%, 38.63%, $335.4\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$, $178.2\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$, $230.7\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$, respectively. But N, P, K accumulation and yield decreased when N application level was too high or too low. According to the regression equations between N application rate and yield of two varieties, for Xundan 20 the optimal N amount was $457.0\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$, the range of optimum N was $418.5\sim 495.4\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$, $418.3\sim 495.7\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$ for su-

本研究由国家自然科学基金项目(30971731, 31000684, 31271640)和江苏省三项工程项目[SX(2010)086]资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 陆卫平, E-mail: wplu@yzu.edu.cn, Tel: 0514-87979377

第一作者联系方式: E-mail: 204jll@163.com, Tel: 13665268176

Received(收稿日期): 2012-11-15; Accepted(接受日期): 2013-04-22; Published online(网络出版日期): 2013-05-20.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130520.1159.012.html>

per-high yield groups; and for Xundan 20, the optimal N was 452.7 kg ha⁻¹, the range of optimum N was 410.8–494.6 kg ha⁻¹

Keywords: Maize; Nitrogen application; Super-high yield; NPN; Accumulation and distribution

在我国, 2004—2011 年玉米连续 8 年增产, 近年来, 玉米在我国粮食增产中的作用达 55%^[1], 2006—2010 年 5 年内全国涌现出 159 块 15 000 kg hm⁻² 以上的高产田^[2], 玉米已超过水稻成为我国第一大作物^[3]。然而, 我国玉米生产水平与同处北半球且自然条件、种植面积也比较相似的美国相比, 差距甚远^[3]。据报道, 美国玉米高产纪录 27 743 kg hm⁻² (美国 Iowa 州, Francis Childs, 2002), 我国仅为 21 154.5 kg hm⁻² (新疆奇台总场, 李少昆, 2012), 美国在 2007 年全国平均产量就已高达 9480 kg hm⁻², 而我国至今不足 6000 kg hm⁻²。在无法扩大种植面积的情况下, 提高单产是玉米增产的唯一途径。

玉米超高产群体的形成囿于多方面因素, 超高产目标的实现凝聚着现代科学技术与传统精细农艺之精华^[4]。氮肥运筹是协调作物氮磷钾等营养元素积累、分配的重要手段, 是实现夏玉米超高产的最有效方法之一。前人以大于或等于 12 000 kg hm⁻²^[5]、15 000 kg hm⁻²^[6]等为标准判定夏玉米超高产与否, 并研究了密度^[7-8]、行距配置^[7]、肥料运筹^[9-10]等对

超高产玉米群体干物质生产及光合特性^[5-6]、群体质量与个体生理功能^[11]、氮素吸收和利用规律^[9,11]、根系时空分布特征^[13]、养分积累与转运特征(春玉米)^[14]等的影响, 然而超高产夏玉米氮磷钾积累、转运及分配规律却鲜见报道, 本文研究了不同施氮水平下的超高产夏玉米对氮磷钾的吸收积累及分配规律, 提出了超高产夏玉米的最佳施氮量, 以期为我国玉米进一步增产稳产及超高产育种提供理论与技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验地点

试验在扬州大学农学院作物栽培生理省级重点实验室试验田内进行。2008 年筛选出在本地具有超高产潜力的品种苏玉 20、浚单 20, 并初步确定最佳种植密度 82 500 株 hm⁻²。2009、2010 年以两品种为材料继续开展不同施氮水平处理试验, 探索其需肥规律及其施肥方案。试验地灌排设施良好, 土壤为沙质土壤, 前茬休耕, 2009、2010 年玉米秸秆还田, 耕作层 0~20 cm, 3 年土壤耕作层农化性质见表 1。

表 1 供试土壤耕作层农化性质
Table 1 Agro-chemical character of the tested soil

年份 Year	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolysable N (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)
2008	16.08	0.98	80.22	85.07	6.01
2009	14.33	1.31	93.43	85.34	9.45
2010	14.27	0.96	82.33	86.14	6.31

1.2 试验设计

每年 6 月 22 日左右大田直播, 采用裂区设计, 品种为主区, 施氮水平为裂区。2008、2009 年小区面积 24 m², 2010 年为 110 m², 大、小行距分别为 0.7 m 和 0.3 m; 2008 年 2 个密度水平(75 000 株 hm⁻²、82 500 株 hm⁻²), 2009、2010 年密度为 82 500 株 hm⁻², 重复 3 次。根据斯坦福方程, 以 100 kg 籽粒需氮量 2.5 kg, 实现产量 15 000 kg hm⁻²时需施氮 375 kg hm⁻², 2008 年以此为中心上下加减 10%、20%, 结果表明施氮量为 450 kg hm⁻²、密度为 82 500 株 hm⁻²时产量最高, 在此基础上 2009 年以 450 kg hm⁻²施氮水平为中心上下加减 10%、20%, 2010 年重复 1 次。

均在拔节期追施穗肥, 开花吐丝期施粒肥, 具体施氮方案如表 2。基施肥 P₂O₅ 150 kg hm⁻²、K₂O 225 kg hm⁻², 均在播种时一次施用。其他管理按高产田要求进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 氮磷钾含量 从每处理分别选定 3~5 株长势均匀一致有代表性植株标记叶龄进程。在拔节期、大喇叭口期(大口期)、开花期、灌浆期(花后 25 d)、成熟期各处理分别取 3 株的地上部分, 按照叶片、叶鞘、茎秆、苞叶、籽粒等器官分开, 105℃杀青 30 min, 75℃烘至恒重。将干样品粉碎后, 2008、2009 年采用 H₂O₂-H₂SO₄ 湿灰化法消煮, 用凯氏定氮法测

表 2 氮肥施用方案
Table 2 Nitrogen fertilization scheme (kg hm^{-2})

施氮处理 N treatment	基肥 Base fertilizer	穗肥 Ear-fertilizer	粒肥 Grain fertilizer
2008			
0	0	0	0
300.0	112.5	187.5	0
337.5	112.5	187.5	37.5
375.0	112.5	225.0	37.5
412.5	112.5	262.5	37.5
450.0	112.5	262.5	75.0
2009, 2010			
0	0	0	0
360	135	225	0
405	135	225	45
450	135	270	45
495	135	315	45
540	135	315	90

定样品中的含氮量; 用钒钼黄比色法测定样品中的含磷量; 用火焰光度计法测定样品中的含钾量。2010 年采用 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 K_2SO_4 作催化剂, H_2SO_4 (浓) 消解, 用全自动凯氏定氮仪(Kjeltec 8400, FOSS, Denmark)测氮含量; 每样品称重 0.45 g 左右, 加 4 mL HNO_3 、3 mL 超纯水和 2 滴 H_2O_2 , 置于微波消解仪(MARS5, CEM, USA)内消解后, 采用原子吸收色谱仪(Solar S4+GraphiteFurnace System 97, Thermo Elemental, USA)测磷、钾含量。

1.3.2 籽粒产量及其构成 收获各小区中间两行玉米, 分别装入尼龙网袋, 晒干脱粒称重, 以含水量 14% 的重量折算产量。另取 20 穗玉米考种, 调查穗行数、行粒数及千粒重等。规定籽粒产量 $\geq 13500 \text{ kg hm}^{-2}$ 时为超高产水平。

1.4 数据分析

1 kg 氮生产籽粒量(Grain production per kg N)=单位面积成熟期产量/地上部分植株积累氮的总量

氮素收获指数(N harvest index)=成熟期单位面积植株籽粒氮积累量/地上部分植株氮积累总量

氮肥的农学效率(N agronomy efficiency)=(施氮肥区-不施氮肥区产量)/施氮水平

氮素利用率(N utilization efficiency)=(施氮处理植株地上部分-不施氮处理氮积累量)/施氮水平

最佳施氮范围(The optimal N application)=最高理论产量的 95%及以上时的施氮范围

采用 Microsoft Excel 2007 处理数据, 用 SPSS 19.0 统计分析数据, 用 Duncan's 法作多重比较。2009、2010 年 2 年试验结果趋势相似, 本文主要以 2010 年数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理对两品种籽粒产量及其构成因素的影响

施氮可显著提高籽粒产量, 3 年的数据(表 3)表明, 籽粒产量随着施氮水平的提高呈先增高后降低的趋势, 且在 450 kg hm^{-2} 施氮水平处达到最高, 相对不施氮处理, 450 kg hm^{-2} 施氮水平 3 年平均增产幅度苏玉 20 为 134.17%, 浚单 20 为 163.39%。由千粒重、总粒数与产量作通径分析及相关分析, 其系数表明产量的提高主要是源于总粒数的增多, 其次是千粒重的增大。综合 3 年试验数据, 得施氮水平(x)与产量(Y)之间的回归方程, 苏玉 20 为 $Y = -0.47x^2 + 433.20x - 84774$ ($R^2 = 0.948$); 浚单 20 为 $Y = -0.36x^2 + 328.65x - 61665.8$ ($R^2 = 0.951$), 可知本试验条件下, 苏玉 20 最佳施氮量、最佳施氮范围、超高产施氮范围分别为 457.0 kg hm^{-2} 、 $418.3 \sim 495.7 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $418.5 \sim 495.4 \text{ kg hm}^{-2}$; 浚单 20 最佳施氮量、最佳施氮范围分别为 452.7 kg hm^{-2} 、 $410.8 \sim 494.6 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

2.2 氮素积累及分配规律

由表 4、表 5 可知, 在相同生育时期, 随着施氮水平的不同, 两品种各器官表现出相似的氮素积累规律, 叶片、茎秆、叶鞘、苞叶、籽粒中含氮量随着施氮水平的升高均呈单峰变化趋势, 峰值出现在 450 kg hm^{-2} 施氮水平处。相同施氮水平下, 随着生育进程, 两品种氮素积累规律不尽相同, 苏玉 20 叶片、茎秆、叶鞘呈单峰变化趋势, 叶片峰值出现在大口期, 茎秆、叶鞘出现在开花期; 而浚单 20 叶片峰值出现在大口期, 茎秆出现在灌浆期, 叶鞘出现在开花期。两品种苞叶、籽粒的氮素积累均逐渐增大, 成熟期达到最大值。不施氮和 450 kg hm^{-2} 两个氮素处理, 灌浆期叶片氮素, 苏玉 20 分别下降 23.87%、49.92%, 浚单 20 分别下降 23.31%、48.84%。在 6 个氮素处理下, 两品种植株的整个生育期内氮素积累总量不同, 苏玉 20 分别是浚单 20 的 1.43、

1.27、1.23、1.21、1.22、1.30 倍, 说明氮素的供应及品种的氮素利用率有利于促进超高产群体的形成。两品种成熟期各器官氮积累量与产量的回归方程苏玉 20 为 $Y=39769.5-1934.60X_1-3685.91X_2+3681.81X_3-1333.35X_4+899.87X_5$, 直接通径系数分别为-6.155、

-5.874、4.836、-1.145、9.349; 浚单 20 为 $Y=-14633.81+547.23X_1+519.75X_2-2626.33X_3-162.24X_4+561.52X_5$, 直接通径系数分别为 0.724、4.359、-6.804、-0.137 和 3.085。由此可知苏玉 20 产量受籽粒中氮素积累量的影响最大, 其次浚单 20 为叶鞘。

表 3 不同施氮水平对玉米产量及其构成因素的影响
Table 3 Effect of nitrogen treatments on grain yield and its components of maize

施氮处理 N treatment (kg hm ⁻²)	苏玉 20 Suyu 20			浚单 20 Xundan 20		
	千粒重 1000-grain weight (g)	总粒数 Total grains (kg hm ⁻²)	产量 Yield (kg hm ⁻²)	千粒重 1000-grain weight (g)	总粒数 Total grains (kg hm ⁻²)	产量 Yield (kg hm ⁻²)
2008						
0	257 d	3175 e	7006 e	254 c	2171 f	4735 f
300.0	324 c	3871 d	10773 d	318 b	3136 e	8566 e
337.5	340 b	4088 c	11939 c	316 b	3403 d	9236 d
375.0	347 b	4183 b	12469 b	328 b	3628 c	10221 c
412.5	352 a	4164 b	12591 b	321 b	4223 b	11643 b
450.0	359 a	4390 a	13554 a	347 a	4429 a	13202 a
Pc	0.247	0.753		0.206	0.808	
Rc	0.995**	0.999**		0.936**	0.994**	
2009						
0	241 b	2556 d	5298 d	241 b	2599 e	5387 e
360	352 a	3465 c	10489 c	358 a	3288 d	10123 d
405	349 a	3939 b	11823 b	359 a	3621 c	11179 c
450	363 a	4480 a	13986 a	361 a	4461 a	13850 a
495	362 a	4012 b	12490 b	362 a	4018 b	12509 b
540	363 a	3899 b	12172 b	359 a	3841 bc	11859 bc
Pc	0.333	0.690		0.364	0.683	
Rc	0.953**	0.989**		0.915*	0.977**	
2010						
0	241 c	2880 c	5960 e	226 d	2654 d	5165 f
360	366 b	3194 d	10052 d	323 c	3516 c	9754 e
405	395 a	3627 b	12325 c	323 c	4166 b	11558 c
450	394 a	4357 a	14753 a	354 a	4339 a	13212 a
495	364 b	4356 a	13633 b	337 b	4122 b	11928 b
540	364 b	3506 b	10967 d	336 b	3477 c	10059 d
Pc	0.470	0.623		0.383	0.648	
Rc	0.883*	0.935**		0.944**	0.980**	

同一年内、相同品种内不同字母者表示在 0.05 水平上差异显著; Pc: 直接通径系数; Rc: 相关系数。*, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

In each year and for the same cultivation, values followed by different letters are significantly different at $P<0.05$; Pc: path coefficient; Rc: related coefficient. *, ** Significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 4 不同施氮处理下苏玉 20 生育时期内各器官氮素积累量变化(2010 年)

Table 4 Dynamics of plant N accumulation of Suyu 20 at different growth stages under different N treatments in 2010 (kg hm⁻²)

生育时期 Growth stage	施氮处理 N treatment	叶片 Leaf	茎秆 Stem	叶鞘 Sheath	苞叶 Husk	籽粒 Seed	植株 Plant
拔节期 Jointing stage	0	10.8±0.8 b	2.0±0.3 b	3.1±0.3 b			15.8±1.3 b
	360	26.5±0.8 a	3.4±0.8 a	4.1±0.8 a			33.9±1.4 a
	405	25.3±0.4 a	3.4±0.3 a	4.6±0.9 a			33.3±1.0 a
	450	26.6±0.7 a	3.6±0.3 a	4.9±0.9 a			35.1±1.6 a
	495	28.0±0.8 a	3.7±0.4 a	4.6±0.1 a			36.2±0.9 a
	540	27.1±0.2 a	3.4±0.2 a	5.2±0.3 a			35.7±0.7 a
大口期 Trumpeting stage	0	67.0±2.4 d	17.0±0.3 d	14.0±0.3 d			98.0±3.4 d
	360	95.2±2.7 c	21.7±0.2 c	17.0±0.3 c			133.9±2.8 c
	405	101.0±1.6 c	24.7±0.4 c	17.6±0.4 c			143.3±3.4 c
	450	123.7±2.5 a	29.8±0.8 a	23.3±0.8 a			176.8±2.2 a
	495	108.5±2.4 b	27.4±0.8 b	19.1±0.8 b			154.9±2.4 b
	540	115.3±2.6 b	25.5±0.2 b	20.1±0.7 b			160.9±3.2 b
开花期 Anthesis stage	0	41.5±1.8 d	18.4±0.5 d	16.5±0.8 d	5.1±0.6 d		81.4±2.0 d
	360	98.2±3.0 c	28.3±0.6 c	24.4±0.9 c	9.1±0.3 c		171.9±1.7 c
	405	96.2±3.0 c	29.1±0.5 c	24.6±0.5 c	10.1±0.5 c		171.8±3.0 c
	450	115.9±1.7 a	43.2±0.6 a	34.1±0.8 a	14.1±0.6 a		216.3±2.2 a
	495	108.1±2.9 b	38.4±0.7 b	30.2±0.3 b	12.3±0.8 b		200.8±3.1 b
	540	111.2±2.4 b	42.6±0.7 b	28.3±0.4 b	13.9±0.4 b		207.9±3.3 b
灌浆期 Filling stage	0	34.5±2.4 d	16.7±0.3 b	9.3±0.4 d	7.0±0.7 e	65.2±1.9 e	132.7±2.4 e
	360	73.1±3.0 c	30.5±0.2 a	16.8±0.7 c	10.4±0.5 d	113.1±1.8 d	261.3±4.1 d
	405	74.9±3.3 c	31.9±0.7 a	17.1±0.8 c	11.1±0.8 c	123.0±4.8 c	274.2±3.8 c
	450	86.4±2.7 a	33.9±0.9 a	19.7±0.5 a	15.0±0.2 a	132.6±2.8 a	302.1±4.1 a
	495	79.3±1.9 b	33.2±0.2 a	16.9±0.3 c	13.3±0.9 b	125.4±3.1 b	283.4±2.5 b
	540	85.3±2.5 a	33.0±0.4 a	18.8±0.6 b	15.0±0.1 a	121.8±2.9 c	290.1±4.7 b
成熟期 Maturity stage	0	31.6±3.1 e	18.9±0.2 c	7.8±0.2 e	10.8±0.3 d	92.2±1.9 f	161.3±3.1 f
	360	42.0±2.2 d	28.6±0.1 b	10.2±0.7 d	13.6±0.6 c	152.9±3.4 e	273.1±3.0 e
	405	51.1±1.6 c	27.2±0.3 b	12.5±0.4 c	14.1±0.2 c	157.3±3.6 d	288.2±1.8 d
	450	58.1±2.2 a	32.2±0.5 a	18.2±0.3 a	18.5±0.1 a	181.9±3.7 a	335.4±3.6 a
	495	53.3±3.1 b	31.9±0.6 a	16.7±0.9 b	16.4±0.8 b	173.2±4.0 b	318.1±3.2 b
	540	55.7±2.0 b	30.8±0.2 a	16.2±0.4 b	16.3±0.3 b	171.8±2.8 c	317.8±2.8 c

相同生育时期内的同列标明不同字母的值在 0.05 水平上显著。

At the same growth stage, values within a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$.

2.3 磷素积累及分配规律

由表 6 和表 7 可知, 在相同生育时期, 随着施氮水平的不同, 两品种各器官表现出相似的磷素积累规律, 即各器官磷积累量随着施氮水平的升高均呈

单峰变化趋势, 最大值出现在 450 kg hm⁻² 施氮处理水平处, 相对于苏玉 20, 浚单 20 各器官表现更敏感。相同施氮水平下, 随着生育进程的推进, 苏玉 20 叶片、茎秆磷素积累量呈单峰变化趋势, 峰值出现在开

表 5 不同施氮处理下浚单 20 生育时期内各器官氮素积累量变化(2010 年)

Table 5 Dynamics of plant N accumulation of Xundan 20 at different growth stages under different N treatments in 2010 (kg hm⁻²)

生育时期 Growth stage	施氮处理 N treatment	叶片 Leaf	茎秆 Stem	叶鞘 Sheath	苞叶 Husk	籽粒 Seed	植株 Plant
拔节期 Jointing stage	0	14.4±0.4 b	4.7±0.5 b	7.4±0.1 b			26.5±1.2 b
	360	27.2±0.7 a	9.7±0.4 a	10.4±0.4 a			47.3±1.9 a
	405	27.8±0.3 a	9.1±0.9 a	9.9±0.9 a			46.8±2.0 a
	450	27.6±0.8 a	10.1±0.7 a	10.9±0.5 a			48.6±1.4 a
	495	27.5±0.2 a	10.4±0.6 a	10.6±0.3 a			48.6±1.7 a
	540	27.9±0.4 a	9.3±0.3 a	10.3±0.4 a			47.5±0.9 a
大口期 Trumpeting stage	0	58.0±0.8 d	14.0±0.5 d	10.3±0.4 c			82.2±1.7 d
	360	82.0±1.0 c	19.7±0.6 c	21.9±0.5 b			123.7±3.2 c
	405	83.0±1.5 c	21.4±0.4 c	21.8±0.7 b			126.2±2.5 c
	450	99.4±1.1 a	25.8±0.5 a	25.7±0.3 a			150.8±1.7 a
	495	94.2±0.7 b	25.5±0.2 a	25.7±0.2 a			145.4±2.7 ab
	540	94.1±1.9 b	23.7±0.6 b	25.3±0.4 a			143.1±2.5 b
开花期 Anthesis stage	0	27.8±0.7 c	26.0±0.5 c	27.1±0.5 d	7.4±0.4 d		88.2±1.8 d
	360	56.9±0.6 b	57.5±0.4 b	42.9±0.4 c	9.8±0.6 c		180.3±3.4 c
	405	57.0±1.1 b	57.7±0.5 b	43.8±0.8 c	10.3±0.4 c		181.2±2.1 c
	450	62.8±1.9 a	67.7±0.2 a	52.0±0.5 a	14.2±0.4 a		209.9±2.4 a
	495	61.7±1.8 a	67.0±0.9 a	48.0±0.8 b	12.3±0.2 b		202.5±3.3 b
	540	61.4±0.6 a	66.3±0.8 a	47.9±0.7 b	12.2±0.3 b		201.8±2.8 b
灌浆期 Filling stage	0	22.1±0.5 d	34.5±0.1 e	13.5±0.2 e	4.6±0.1 d	31.8±4.6 e	106.4±4.7 f
	360	43.7±0.7 c	77.3±0.3 d	23.1±0.5 d	7.4±0.2 c	53.8±2.8 c	204.4±2.6 e
	405	43.5±1.2 c	81.0±0.1 c	24.2±0.4 c	7.4±0.4 c	54.1±3.4 c	211.1±2.0 d
	450	47.4±0.5 a	103.4±0.3 a	38.9±0.2 a	12.5±0.4 a	60.2±4.5 a	262.4±3.0 a
	495	45.9±0.7 b	95.4±0.7 b	35.6±0.7 b	11.5±0.4 b	57.4±3.9 b	246.8±2.1 b
	540	45.7±0.5 b	93.6±0.8 b	34.8±0.6 b	11.3±0.4 b	56.1±4.6 b	242.5±4.1 c
成熟期 Maturity stage	0	21.3±1.3 e	36.5±0.9 e	12.9±0.9 f	12.9±0.4 e	41.9±2.8 c	116.4±3.2 f
	360	26.8±1.2 d	62.6±0.2 d	25.1±0.7 e	25.1±0.2 d	78.6±4.4 b	215.5±2.5 e
	405	28.1±0.7 c	74.1±0.9 c	26.8±0.2 d	26.8±0.2 d	77.7±2.8 b	229.3±2.1 d
	450	32.1±1.9 a	102.0±0.3 a	33.3±0.8 a	31.4±0.7 a	82.4±2.7 a	276.4±3.4 a
	495	30.4±1.3 b	92.4±0.7 b	31.4±0.6 b	33.3±0.4 b	81.3±3.9 a	260.2±2.5 b
	540	28.3±1.2 c	85.5±0.9 c	29.3±0.9 c	29.3±0.3 b	76.6±2.8 b	244.6±2.9 c

相同生育时期内的同列标明不同字母的值在 0.05 水平上显著。

At the same growth stage, values within a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$.

花期, 叶鞘、苞叶、籽粒呈逐渐增大趋势, 而浚单 20 苞叶磷积累量从开花期逐渐递减。在不施氮和 450 kg hm⁻²两个氮素水平上, 灌浆期苏玉 20 叶片磷素分别下降 64.67%、44.51%, 浚单 20 分别下降 65.35%、39.35%, 说明灌浆期内较大的叶片磷素转移率不利于高产的形成。两品种成熟期各器官磷积累量与产量的回归方程苏

玉 20 为 $Y = -12977.75 - 236.06X_1 - 1241.04X_2 - 26.35X_3 + 312.88X_5$, 直接通径系数分别为 0.277、-1.178、-0.019 和 1.886; 浚单 20 为 $Y = -5226 + 178.28X_1 - 432.47X_2 + 505.92X_3 - 305.76X_4 + 141.93X_5$, 直接通径系数分别为 0.265、-0.604、0.438、-0.089 和 0.950。由此可知两品种产量受籽粒中磷素积累量的影响最大。

表 6 不同施氮处理下苏玉 20 生育时期内各器官磷素积累量变化(2010 年)

Table 6 Dynamics of plant P accumulation of Suyu 20 at different growth stages under different N treatments in 2010 (kg hm⁻²)

生育时期 Growth stage	施氮处理 N treatment	叶片 Leaf	茎秆 Stem	叶鞘 Sheath	苞叶 Husk	籽粒 Seed	植株 Plant
拔节期 Jointing stage	0	6.1±0.1 c	2.1±0.2 b	1.9±0.1 b			10.0±0.7 c
	360	9.7±0.1 b	3.2±0.3 a	2.8±0.2 a			15.7±1.7 b
	405	9.8±0.2 b	3.2±0.2 a	2.8±0.2 a			15.8±1.2 b
	450	10.2±0.2 b	3.9±0.2 a	2.8±0.3 a			16.9±2.0 b
	495	11.4±0.2 a	3.9±0.3 a	2.9±0.3 a			18.2±1.0 a
	540	11.4±0.3 a	4.0±0.3 a	3.0±0.2 a			18.3±1.7 a
大口期 Trumpeting stage	0	19.7±1.2 d	10.5±0.2 d	5.9±0.7 c			36.0±2.0 d
	360	25.8±1.3 c	12.3±0.6 c	7.8±0.2 b			45.9±0.7 c
	405	25.9±1.4 c	12.9±0.7 c	7.7±0.7 b			46.4±0.6 c
	450	29.7±0.8 a	15.3±0.7 a	9.1±0.5 a			54.0±1.3 a
	495	26.3±1.8 b	13.8±0.1 b	8.0±0.1 b			48.1±1.4 b
	540	27.0±1.8 b	13.3±0.8 b	7.4±0.8 b			47.7±0.9 b
开花期 Anthesis stage	0	29.6±1.3 d	8.6±0.8 e	4.4±0.4 e	4.3±0.7 c		54.4±0.9 d
	360	33.0±0.9 c	12.8±0.6 d	7.5±0.7 d	7.4±0.6 b		68.6±2.1 c
	405	36.7±0.8 a	14.0±0.5 c	8.1±0.8 c	8.0±0.6 b		74.5±0.7 c
	450	34.9±1.3 a	13.9±0.6 a	10.7±0.7 b	10.2±0.2 a		83.4±0.9 a
	495	37.6±1.2 b	18.8±0.7 c	9.7±0.4 a	9.6±0.7 a		77.3±0.8 b
	540	33.6±1.3 c	15.5±0.4 b	10.1±0.8 a	10.0±0.4 a		76.4±1.3 b
灌浆期 Filling stage	0	18.2±1.3 f	6.4±0.7 c	2.8±0.1 c	2.7±0.5 c	46.7±1.4 d	85.5±1.8 e
	360	25.9±1.4 e	11.0±0.5 b	4.4±0.4 b	4.0±0.6 b	76.1±3.2 c	129.7±1.3 d
	405	27.7±1.5 c	11.9±0.6 b	4.8±0.2 b	4.7±0.2 b	83.1±1.1 b	140.7±1.4 c
	450	28.1±0.8 a	12.4±0.3 a	8.6±0.4 a	9.5±0.6 a	84.2±3.3 a	161.6±1.5 a
	495	30.9±2.1 b	12.8±0.1 a	9.5±0.5 a	9.4±0.3 a	89.5±2.6 b	151.8±2.2 b
	540	28.2±1.6 b	12.1±0.7 a	9.5±0.7 a	9.4±0.6 a	84.6±1.0 b	153.2±1.2 b
成熟期 Maturity stage	0	10.5±1.0 d	4.2±0.4 c	4.2±0.9 d	4.2±0.6 d	70.2±2.1 d	102.7±3.1 d
	360	18.0±1.0 c	8.2±0.5 b	7.4±0.7 c	7.3±0.7 c	100.1±3.0 c	149.8±1.2 c
	405	18.9±1.4 b	8.2±0.7 b	9.7±0.1 b	9.6±0.6 b	100.3±2.0 c	155.7±1.3 c
	450	19.1±0.9 a	10.8±0.4 a	9.4±0.8 a	9.3±0.6 a	116.8±3.5 a	178.2±1.9 a
	495	20.9±1.9 b	12.7±0.2 b	10.2±0.7 b	10.1±0.6 b	105.2±1.8 b	163.3±1.1 b
	540	18.7±1.5 ab	10.5±0.1 a	9.6±0.6 b	9.5±0.8 b	104.1±3.2 b	160.8±1.3 b

相同生育时期内的同列标明不同字母的值在 0.05 水平上显著。

At the same growth stage, values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$.

2.4 钾素积累及分配规律

由表 8 和表 9 可知, 在相同生育时期, 两品种各器官钾素积累均随着施氮水平的升高呈单峰变化趋势, 峰值出现在 450 kg hm⁻² 施氮处理。相同施氮水平下,

随着生育进程, 两品种叶片、茎秆、叶鞘钾素积累量呈单峰变化趋势, 叶片峰值出现在大口期, 叶鞘出现在开花期, 茎秆出现在灌浆期中期, 且灌浆后期钾素转出速率低; 籽粒的钾素积累两品种均逐渐增大, 成

表 7 不同施氮处理下浚单 20 生育时期内各器官磷素积累量变化(2010 年)
Table 7 Dynamics of plant P accumulation of Xundan 20 at different growth stages under different N treatments in 2010 (kg hm⁻²)

生育时期 Growth stage	施氮处理 N treatment	叶片 Leaf	茎秆 Stem	叶鞘 Sheath	苞叶 Husk	籽粒 Seed	植株 Plant
拔节期 Jointing stage	0	5.8±0.2 b	2.7±0.2 b	1.5±0.4 b			10.0±1.7 b
	360	9.4±0.1 a	3.8±0.3 a	2.4±0.1 a			15.6±0.5 a
	405	9.5±0.4 a	3.8±0.4 a	2.4±0.3 a			15.7±1.1 a
	450	9.9±0.4 a	4.2±0.1 a	2.4±0.3 a			16.5±0.7 a
	495	10.0±0.3 a	4.1±0.3 a	2.5±0.1 a			16.7±0.9 a
	540	9.6±0.2 a	4.1±0.4 a	2.6±0.2 a			16.2±1.5 a
大口期 Trumpeting stage	0	17.5±1.1 d	8.8±0.1 d	4.6±0.7 b			30.8±1.6 d
	360	25.6±1.1 c	10.8±0.3 c	6.5±0.3 a			42.8±1.5 c
	405	25.7±0.8 c	11.7±0.6 c	6.4±0.3 a			43.7±1.2 c
	450	28.9±1.2 a	14.6±0.6 a	7.0±0.7 a			50.5±1.5 a
	495	27.1±1.3 b	12.8±0.3 b	6.7±0.3 a			46.6±1.2 b
	540	27.8±0.8 b	12.8±0.7 b	6.1±0.3 a			46.7±1.4 b
开花期 Anthesis stage	0	29.3±1.9 c	9.2±0.4 d	4.0±0.6 c	4.7±0.3 d		55.1±1.3 d
	360	32.7±1.8 b	13.9±0.6 c	7.1±0.8 b	7.8±0.2 c		70.5±0.5 c
	405	34.4±0.5 b	14.6±0.8 b	7.7±0.3 b	8.3±0.2 c		73.1±1.2 bc
	450	37.6±1.2 a	17.5±0.7 a	10.3±0.5 a	11.0±0.3 a		84.2±1.6 a
	495	35.3±1.7 b	15.5±0.8 b	9.3±0.1 b	10.0±0.3 b		78.2±0.9 b
	540	34.3±2.0 b	15.1±0.7 b	9.7±0.1 c	10.4±0.1 b		77.9±1.3 b
灌浆期 Filling stage	0	17.9±1.0 d	7.1±0.3 d	2.4±0.4 e	2.5±0.2 d	45.4±1.9 d	83.7±2.1 e
	360	25.6±0.8 c	11.7±0.5 c	4.1±0.2 d	3.4±0.1 c	74.8±3.8 c	128.3±3.5 d
	405	27.4±1.5 b	12.5±0.2 b	4.4±0.9 d	3.7±0.1 c	81.8±3.4 b	138.2±1.8 c
	450	29.8±1.9 a	14.1±0.2 a	9.9±0.5 a	6.0±0.1 a	91.9±1.1 a	161.1±3.9 a
	495	28.2±1.8 b	13.4±0.9 a	9.1±0.8 b	4.2±0.3 b	83.2±3.7 b	146.4±1.6 b
	540	27.9±1.4 b	12.7±0.5 d	9.1±0.8 c	4.0±0.1 b	76.3±2.2 c	138.5±3.7 c
成熟期 Maturity stage	0	10.2±1.4 d	4.8±0.9 c	3.8±0.4 e	3.5±0.5 c	68.9±1.6 f	99.5±1.2 f
	360	17.7±1.1 c	8.8±0.8 c	7.5±0.2 d	4.7±0.6 b	93.8±1.8 e	141.9±2.6 e
	405	18.6±0.8 b	8.8±0.2 b	9.3±0.2 b	4.8±0.5 b	99.0±2.1 d	149.2±2.0 d
	450	22.8±1.4 a	15.4±0.3 a	11.0±0.8 a	6.0±0.4 a	121.9±1.8 a	186.4±2.9 a
	495	19.6±1.1 b	13.3±0.7 b	9.2±0.4 b	5.3±0.7 a	115.5±1.2 b	171.6±1.9 b
	540	18.2±2.0 c	13.2±0.5 b	8.1±0.6 c	5.0±0.6 b	106.8±1.3 c	159.5±1.3 c

相同生育时期内的同列标明不同字母的值在 0.05 水平上显著。
At the same growth stage, values within a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$.

熟期达到最大值。在不施氮和 450 kg hm⁻² 两个氮素处理水平上, 灌浆期苏玉 20 叶片钾素分别下降 43.46%、43.30%, 浚单 20 分别下降 35.41%、53.30%, 说明灌浆期内两品种叶片钾素转移速率存在基因型差异, 并对产量的影响程度浚单 20 高于苏玉 20。将两品种成熟期各器官钾积累量与产量的回归方程苏玉 20 为 $Y =$

$-7043.86+75.56X_1+530X_2-1045.95X_3-1144.12X_4+246.85X_5$, 直接通径系数分别为 0.114、1.805、-1.363、-0.483 和 0.914; 浚单 20 为 $Y = -10592.42+396.33X_1+396.92X_2-1425.98X_3-1276.89X_4+364.78X_5$, 直接通径系数分别为 0.524、2.881、-3.698、-1.081 和 2.551。由此可知两品种产量受茎秆中钾素积累量的影响最大。

表 8 不同施氮处理下苏玉 20 生育时期内各器官钾素积累量变化(2010 年)

Table 8 Dynamics of plant K accumulation of Suyu 20 at different growth stages under different N treatments in 2010 (kg hm⁻²)

生育时期 Growth stage	氮处理 N treatment	叶片 Leaf	茎秆 Stem	叶鞘 Sheath	苞叶 Husk	籽粒 Seed	植株 Plant
拔节期 Jointing stage	0	16.5±0.7 b	2.3±0.2 b	2.8±0.6 b			21.5±2.0 b
	360	24.8±0.3 a	7.9±0.3 a	8.7±0.4 a			41.4±1.9 a
	405	26.6±0.7 a	7.9±0.8 a	9.1±0.8 a			43.6±1.9 a
	450	27.1±0.5 a	8.2±0.4 a	8.8±0.3 a			44.1±0.5 a
	495	27.3±0.8 a	8.3±0.2 a	8.8±0.3 a			44.4±0.9 a
	540	26.2±0.2 a	8.4±0.4 a	9.0±0.5 a			43.7±2.1 a
大口期 Trumpeting stage	0	76.3±0.8 d	14.7±0.6 d	12.9±0.9 d			103.9±2.7 d
	360	86.6±0.8 c	26.7±0.6 c	22.2±0.2 c			135.5±2.3 c
	405	85.9±0.6 c	27.3±0.5 c	22.6±0.4 c			135.7±2.0 c
	450	100.0±1.9 a	32.4±0.4 a	28.0±0.4 a			160.3±2.4 a
	495	92.3±1.2 b	29.6±0.7 b	24.8±0.3 b			146.7±2.7 b
	540	91.1±1.3 b	29.9±0.4 b	24.7±0.3 b			145.7±1.5 b
开花期 Anthesis stage	0	42.3±0.6 d	48.7±0.6 d	16.3±0.8 d	8.3±0.3 e		128.5±2.6 d
	360	57.5±0.5 c	64.8±0.4 c	43.8±0.5 c	8.7±0.7 d		188.1±1.6 c
	405	57.8±1.1 c	64.7±0.3 c	45.6±0.4 c	8.9±0.4 d		190.9±2.6 c
	450	61.7±1.9 a	66.2±0.4 a	49.5±0.3 a	12.7±0.4 a		211.4±2.0 a
	495	64.1±1.6 b	69.1±0.2 b	50.8±0.2 b	14.0±0.1 b		203.2±3.3 b
	540	60.8±0.9 b	64.0±0.7 c	49.2±0.8 c	11.7±0.7 c		199.0±2.5 b
灌浆期 Filling stage	0	25.9±0.7 e	54.9±0.3 e	15.9±0.7 e	5.5±0.8 f	22.6±4.0 e	138.7±3.2 f
	360	36.7±1.0 d	65.3±0.6 d	28.1±0.5 d	6.7±0.4 e	34.4±3.3 d	184.3±2.1 e
	405	40.1±1.4 c	75.1±0.6 c	32.1±0.2 c	7.0±0.6 d	36.0±2.8 d	204.2±4.7 d
	450	43.4±2.1 a	82.0±0.3 a	34.3±0.5 a	10.1±0.6 a	54.9±4.5 a	260.2±1.9 a
	495	47.3±0.9 b	88.0±0.7 b	38.7±0.4 b	12.8±0.3 b	59.8±4.6 b	237.9±2.3 b
	540	43.2±1.2 b	81.9±0.5 b	34.1±0.5 b	9.5±0.5 c	45.2±3.8 c	226.9±2.7 c
成熟期 Maturity stage	0	23.9±1.3 c	48.4±0.6 d	13.2±0.6 e	8.6±0.6 d	37.3±2.3 f	145.1±2.0 f
	360	33.3±1.9 b	65.0±0.7 c	19.5±0.3 d	9.6±0.4 c	46.2±3.7 e	187.4±4.6 e
	405	33.6±1.4 b	71.6±0.4 b	21.0±0.5 c	10.3±0.6 b	51.0±4.6 d	201.5±3.9 d
	450	36.9±1.1 a	75.2±0.2 a	23.1±0.4 a	11.6±0.7 a	62.8±4.2 a	230.7±2.3 a
	495	36.4±0.7 a	76.1±0.9 a	24.1±0.3 a	11.5±0.5 a	69.3±2.7 b	223.1±2.9 b
	540	34.1±1.0 b	74.6±0.7 a	23.4±0.8 a	11.9±0.7 a	56.7±2.1 c	214.8±3.3 c

相同生育时期内的同列标明不同字母的值在 0.05 水平上显著。

At the same growth stage, values within a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$.

2.5 不同施氮处理对两品种各生育期氮吸收利用、氮收获指数及农学效率的影响

不同施氮处理、不同品种对不同生育期的玉米氮积累量、1 kg 氮生产籽粒量、氮素收获指数及氮素利用率差异均极显著, 且存在显著或极显著的互作效应(表 10)。两品种植株氮积累量整个生育时期以拔节至开花阶段最大, 其次为开花至成熟阶段, 且随施氮量的提高呈先增大后降低的单峰变化趋势, 峰值出现在 450 kg hm⁻² 施氮处理。出苗至拔

节、拔节至开花、开花至成熟 3 个阶段苏玉 20 植株平均氮积累量分别是浚单 20 氮积累量的 0.72、1.09 和 2.29 倍, 表明玉米灌浆期较大的植株氮积累利于籽粒产量的提高。两品种 1 kg 氮生产籽粒量、氮肥的农学效率及氮素利用率均在 450 kg hm⁻² 施氮处理达到最大值, 过高过低施氮时, 三者及产量均呈下降趋势, 这可能是适量施氮促进超高产形成的一个重要原因。氮肥农学效率在品种间差异不显著(配对 F 检验, $F=1.29$, Sig.=0.27), 趋势一致。

表 9 不同施氮处理下浚单 20 生育时期内各器官钾素积累量变化(2010 年)

Table 9 Dynamics of plant K accumulation of Xundan 20 at different growth stages under different N treatments in 2010 (kg hm⁻²)

生育时期 Growth stage	氮处理 N treatment	叶片 Leaf	茎秆 Stem	叶鞘 Sheath	苞叶 Husk	籽粒 Seed	植株 Plant
拔节期 Jointing stage	0	14.4±0.2 b	4.7±0.6 b	7.4±0.2 b			26.5±1.4 b
	360	27.2±0.4 a	9.9±0.4 a	10.2±0.2 a			47.3±1.9 a
	405	27.8±0.3 a	10.1±0.4 a	9.9±0.4 a			47.8±0.9 a
	450	27.6±0.2 a	10.1±0.4 a	10.1±0.3 a			47.8±1.0 a
	495	27.5±0.4 a	10.0±0.5 a	10.2±0.5 a			47.8±1.3 a
	540	27.9±0.5 a	9.6±0.4 a	10.3±0.3 a			47.8±1.7 a
大口期 Trumpeting stage	0	58.0±0.6 d	14.0±0.5 d	10.3±0.6 c			82.2±2.5 d
	360	82.0±1.5 c	19.7±0.2 c	21.9±0.4 b			123.7±3.2 c
	405	83.0±0.5 c	21.4±0.3 c	21.8±0.4 b			126.2±3.4 c
	450	94.2±1.7 a	25.5±0.6 a	25.7±0.5 a			150.8±2.5 a
	495	99.4±1.4 b	25.8±0.3 a	25.7±0.2 a			145.4±1.9 b
	540	94.1±1.5 b	23.7±0.2 b	25.3±0.4 a			143.1±2.9 b
开花期 Anthesis stage	0	33.0±1.0 d	34.0±0.3 c	31.1±0.5 d	7.4±0.5 d		120.5±1.6 d
	360	56.9±1.8 c	57.5±0.2 b	42.9±0.6 c	9.8±0.1 c		182.0±1.8 c
	405	57.0±1.4 c	57.7±0.4 b	43.8±0.2 c	10.3±0.7 c		183.5±1.5 c
	450	68.8±1.5 a	67.7±0.8 a	52.0±0.8 a	14.2±0.2 a		219.3±3.2 a
	495	61.7±1.8 b	67.0±0.7 a	48.0±0.6 b	12.3±0.6 b		204.1±2.2 b
	540	61.4±1.4 b	66.3±0.2 a	47.9±0.7 b	12.2±0.4 b		202.6±3.3 b
灌浆期 Filling stage	0	37.1±1.5 d	57.5±0.4 e	13.5±0.5 e	3.8±0.6 d	22.8±2.9 e	151.5±4.2 e
	360	43.7±1.7 c	77.3±0.5 d	23.1±0.7 d	6.2±0.9 c	53.8±2.0 c	220.9±3.9 d
	405	43.5±1.7 c	81.0±0.2 c	24.2±0.5 c	6.7±0.3 c	54.1±3.7 c	225.0±2.3 d
	450	52.4±1.0 a	103.4±0.8 a	38.9±0.7 a	10.6±0.9 a	60.2±4.2 a	283.8±4.7 a
	495	45.9±1.8 b	95.4±0.7 b	35.6±0.3 b	8.7±0.7 b	57.4±2.7 b	260.4±3.9 b
	540	45.7±1.0 b	93.6±0.6 b	34.8±0.5 b	8.6±0.6 b	56.1±2.8 b	256.2±2.5 c
成熟期 Maturity stage	0	21.3±1.6 e	46.5±0.6 e	12.9±0.4 f	12.9±0.8 e	32.9±4.4 d	132.4±2.5 f
	360	26.8±1.6 d	62.6±0.2 d	25.1±0.5 e	25.1±0.7 d	78.6±2.5 c	214.1±4.2 e
	405	28.1±0.9 c	74.1±0.7 c	26.8±0.5 d	26.8±0.5 d	77.7±4.5 c	227.9±2.9 d
	450	32.1±1.8 a	102.0±0.7 a	33.3±0.3 a	31.4±0.4 a	86.4±2.1 a	279.9±2.6 a
	495	30.4±1.7 b	92.4±0.3 b	31.4±0.7 b	33.3±0.8 b	81.3±2.1 b	258.5±2.1 b
	540	28.3±2.0 c	85.5±0.9 c	29.3±0.8 c	29.3±0.2 b	77.6±1.9 c	243.3±3.9 c

相同生育时期内的同列标明不同字母的值在 0.05 水平上显著。

At the same growth stage, values within a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$.

3 讨论

3.1 超高产夏玉米施氮量研究

增施氮磷钾养分可增加作物产量已被世界各国的生产实践所证实。满足即将到来的 70 亿人口对粮食的需求, 依靠氮肥运筹取得玉米的高产将变得非常重要^[15]。按照精确定量栽培基本原理^[16], 根据基础供氮量、目标产量需氮量和氮素的利用率确定最佳施氮量, 基于施氮量按氮磷钾在作物体内的吸收规律再确定氮磷钾的量^[17], 该方法已经为我国高产

高效农业做出了贡献。然而供氮量囿于品种、土壤及其生态条件等复杂且难以确定的因素^[18], 目标产量和氮肥的利用率也时常根据经验估计得出, 准确获得这些参数是确定施氮量的难点。本研究基于以上原理, 通过当地的试验数据, 由不同品种产量结果和施氮水平进行方程拟合, 进而确定其超高产时的最佳施氮量及施氮范围, 这综合了原理方程式中涉及到的各因素的结果, 具有一定的准确度和推广意义。由该回归方程可知, 苏玉 20 最佳施氮量、最佳施氮范围、超高产施氮范围分别为 457.0 kg hm⁻²、

表 10 施氮对各生育期氮吸收利用、氮收获指数及农学效率的影响(2010 年)

Table 10 N uptake and utilization efficiency, N harvest index and agronomy efficiency under N treatments at different growth stages in 2010

品种 Cultivar	氮处理 N treatment	不同生育阶段氮素积累量 N accumulation at different stages (kg hm ⁻²)			1 kg 氮 生产籽粒量 Grain produc- tion per kg N (kg)	氮素 收获指数 N harvest index (%)	氮肥 农学效率 N agronomy efficiency (kg kg ⁻¹)	氮素 利用率 Nutilization efficiency
		出苗-拔节 Seeding -Jointing	拔节-开花 Jointing -Anthesis	开花-成熟 Anthesis -Maturity				
苏玉 20 Suyu 20	0	15.8 b	65.5 d	80.0 d	36.9 b	57.13 a	—	—
	360	33.9 a	138.0 c	101.9 c	36.7 b	55.85 b	11.37 c	31.25 b
	405	33.3 a	138.5 c	110.8 b	43.6 a	54.60 b	15.72 b	29.95 b
	450	35.1 a	181.2 a	118.9 a	44.0 a	54.26 b	19.54 a	38.63 a
	495	36.2 a	164.5 b	116.2 a	43.0 a	54.33 b	15.50 b	31.44 b
	540	35.7 a	172.2 b	109.3 b	34.6 c	54.16 b	9.27 d	28.86 c
	Average	31.7	143.3	106.2	39.81	55.05	14.28	32.02
浚单 20 Xundan 20	0	26.5 b	61.7 d	28.1 f	44.4 b	36.03 a	—	—
	360	47.3 a	132.8 c	35.0 e	45.3 b	36.53 a	12.75d	27.43 c
	405	46.8 a	135.0 c	47.5 c	50.4 a	33.92 b	15.78 b	27.86 bc
	450	48.6 a	161.0 a	66.6 a	47.8 a	29.84 c	17.88 a	35.52 a
	495	48.6 a	153.4 b	58.0 b	45.9 b	31.28 c	13.66 c	29.02 b
	540	47.5 a	153.3 b	43.3 d	41.2 b	31.37 c	9.06 e	23.66 d
	Average	44.2	132.9	46.4	45.85	33.16	13.83	28.70
<i>F</i> 值 <i>F</i> -value								
品种 Cultivar		2129.04**	90.93**	14508.78**	593.96**	9439.24**	1.29	164.48**
氮处理 N treatment		611.06**	824.99**	519.23**	106.55**	43.84**	99.03**	136.41**
品种×氮 Cultivar×N		2.89*	415.46**	27.00**	14.07**	11.39**	3.37*	3.48*

同栏标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著; *, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

Values followed by a different letter are significantly different at $P < 0.05$. *, ** Significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

418.3~495.7 kg hm⁻²、418.5~495.4 kg hm⁻²; 浚单 20 最佳施氮量、最佳施氮范围分别为 452.7 kg hm⁻²、410.8~494.6 kg hm⁻², 即过高过低施氮不利于氮磷钾的吸收利用及产量的提高。这与杨雄等^[19]在水稻上的研究结果相一致。浚单 20 品种在 2010 年的试验中未达超高产水平, 原因可能是不适宜本地气候, 造成后期早衰。然而, 产量对施氮量的响应程度跟氮肥运筹密切相关, 需要进一步深入研究。

3.2 超高产夏玉米产量与氮磷钾积累和分配关系的研究

作物的产量直接或间接受氮磷钾在其器官内积累和转运状况的影响, 施氮对作物生长发育的调节

及产量很大程度上是作物器官内氮磷钾吸收与分配关系协调的结果。氮转运对玉米籽粒的贡献率远大于干物质的, 且较多的研究认为, 玉米氮磷钾转运对籽粒养分的贡献率要大于吐丝后氮磷钾积累对籽粒养分的贡献率^[15]。霍中洋等^[20]的研究表明, 产量大于 10.50 t hm⁻²的水稻品种叶片的干物质和氮素积累与转运比其他产量水平品种在抽穗后表现出明显的优势, 穗部氮素积累量较高。孙永健等^[21]认为水稻各生育期对氮磷钾的吸收及结实期各养分转运间均存在协同性, 且与产量呈显著正相关。阳显斌等^[22]认为低磷处理下, 磷高效小麦品种的氮磷钾积累量及产量较高, 且积累量主要集中在拔节期后。本研究表明, 过量施氮情况下, 氮磷钾吸收及产量均下

降, 原因可能是过量施氮促使植株启动了自我保护机制, 是植物对外界环境变化的一种自我反应。玉米植株氮积累量以拔节-开花阶段最大, 而灌浆期植株氮积累大的品种产量高。同时, 灌浆期较大的叶片氮素转移率, 较小的叶片磷转移率有利于高产的形成。叶片钾素转移速率受基因型差异影响较大, 对产量的影响程度浚单 20 高于苏玉 20。在成熟时期, 两品种产量受籽粒(浚单 20 为叶鞘)中氮、磷、茎秆钾的含量影响最大, 这与孙永健等^[21]在水稻上的研究结果相似。

4 结论

随施氮水平的提高, 籽粒产量、1 kg 氮生产籽粒量、氮肥的农学效率、氮素利用率、植株(叶片、茎秆、叶鞘、籽粒等器官)氮磷钾积累量均呈单峰变化趋势, 均在 450 kg hm⁻² 施氮水平达到最大值, 其值(苏玉 20)分别为 14 753 kg hm⁻²、44.0 kg、19.24%、38.63%、335.4 kg hm⁻²、178.2 kg hm⁻²、230.7 kg hm⁻²。增大灌浆期植株氮积累量及叶片氮转移速率, 促使成熟期籽粒氮磷较大积累量, 利于超高产玉米群体的形成。两品种的最佳施氮量、超高产施氮水平和最佳施氮范围, 苏玉 20 分别为 457.0 kg hm⁻²、418.3~495.7 kg hm⁻²、418.5~495.4 kg hm⁻²; 浚单 20 分别为 452.7 kg hm⁻² (最佳施氮量)、410.8~494.6 kg hm⁻² (最佳施氮范围)。

References

- [1] Han C-F(韩长赋). The analysis of maize. *Issues Agric Econ* (农业经济问题), 2012, (4): 4–8 (in Chinese)
- [2] Chen G-P(陈国平), Gao J-L(高聚林), Zhao M(赵明), Dong S-T(董树亭), Li S-K(李少昆), Yang Q-F(杨祁峰), Liu Y-H(刘永红), Wang L-C(王立春), Xue J-Q(薛吉全), Liu J-G(柳京国), Li C-H(李潮海), Wang Y-H(王永宏), Wang Y-D(王友德), Song H-X(宋慧欣), Zhao J-Y(赵久然). Distribution, yield structure, and key cultural techniques of maize super-high yield plots in recent years. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2012, 38(1): 80–85 (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhao J-R(赵久然), Wang R-H(王荣焕). Factors promoting the steady increase of american maize production and their enlightenments for China. *J Maize Sci* (玉米科学), 2009, 17(5): 156–159 (in Chinese with English abstract)
- [4] Tong P-Y(佟屏亚). Discussion about “super maize”, “super-high yield”. *J Maize Sci* (玉米科学), 2006, 14(1): 168–170 (in Chinese)
- [5] Li C-H(李潮海), Su X-H(苏新宏), Xie R-Z(谢瑞芝), Zhou S-M(周苏玫), Li D-H(李登海). Study on relationship between grain-yield of summer corn and climatic ecological condition under super-high-yield cultivation. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2001, 34(3): 311–316 (in Chinese with English abstract)
- [6] Yang J-S(杨今胜), Wang Y-J(王永军), Zhang J-W(张吉旺), Liu P(刘鹏), Li C-F(李从锋), Zhu Y-G(朱元刚), Hao M-B(郝梦波), Liu J-G(柳京国), Li D-H(李登海), Dong S-T(董树亭). Dry matter production and photosynthesis characteristics of three hybrids of maize (*Zea mays* L.) with super-high-yielding potential. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2011, 37(2): 355–361 (in Chinese with English abstract)
- [7] Yang J-S(杨吉顺), Gao H-Y(高辉远), Liu P(刘鹏), Li G(李耕), Dong S-T(董树亭), Zhang J-W(张吉旺), Wang J-F(王敬锋). Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2010, 36(7): 1226–1233 (in Chinese with English abstract)
- [8] Xue J-Q(薛吉全), Zhang R-H(张仁和), Ma G-S(马国胜), Lu H-D(路海东), Zhang X-H(张兴华), Li F-Y(李凤艳), Hao Y-C(郝引川), Tai S-J(邵书静). Effects of plant density, nitrogen application, and water stress on yield formation of maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2010, 36(6): 1022–1029 (in Chinese with English abstract)
- [9] Wang Y-L(王宜伦), Li C-H(李潮海), Tan J-F(谭金芳), Zhang X(张许), Liu T-X(刘天学). Effect of postponing N application on yield, nitrogen absorption and utilization in super-high-yield summer maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2011, 37(2): 339–347 (in Chinese with English abstract)
- [10] Lü P(吕鹏), Zhang J-W(张吉旺), Liu W(刘伟), Yang J-S(杨今胜), Su K(苏凯), Liu P(刘鹏), Dong S-T(董树亭), Li D-H(李登海). Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of summer maize under super-high yield conditions. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2011, 17(4): 852–860 (in Chinese with English abstract)
- [11] Wang Y-J(王永军). Study on Population Quality and Individual Physiology Function of Super High-Yielding Maize. PhD Dissertation of Shandong Agricultural University, 2008 (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang Y L, Liu T X, Tan J F, Zhang X, Li C H. Effect of N fertilization on yield, N absorption and utilization of two species of super high-yielding summer maize. *Agric Sci Technol*, 2012, 13: 339–342
- [13] Qi W-Z(齐文增), Liu H-H(刘惠惠), Li G(李耕), Shao L-J(邵立杰), Wang F-F(王飞飞), Liu P(刘鹏), Dong S-T(董树亭), Zhang J-W(张吉旺), Zhao B(赵斌). Temporal and spatial distribution characteristics of super-high-yield summer maize root. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2012, 18(1): 69–76 (in Chinese with English abstract)
- [14] Yang H-S(杨恒山), Zhang Y-Q(张玉芹), Xu S-J(徐寿军), Gao J-L(高聚林), Wang Z-G(王志刚). Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and translocation of super-high-yield

- spring maize. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥科学报), 2012, 18(2): 315–323 (in Chinese with English abstract)
- [15] Schmidt J, Beegle D, Zhu Q, Sripada R. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. *Field Crops Res*, 2011, 120: 94–101
- [16] Ling Q-H(凌启鸿). Theory and Technology of Rice Precision and Quantitative Cultivation (水稻精确定量栽培理论与技术). Beijing: China Agriculture Press, 2007. pp 76–91 (in Chinese)
- [17] Yu L-H(于林惠), Li G-H(李刚华), Xu J-J(徐晶晶), Yang J-J(杨娟娟), Wang S-H(王绍华), Liu Z-H(刘正辉), Wang Q-S(王强盛), Ling Q-H(凌启鸿). Characteristics of uptake of nitrogen, phosphorus, and potassium and partitioning in mechanical transplanting japonica rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2012, 38(4): 707–716 (in Chinese with English abstract)
- [18] Ling Q-H(凌启鸿), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Ding Y-F(丁艳锋), Ling L(凌励), Su Z-F(苏祖芳), Xu M(徐茂), Que J-H(阙金华), Wang S-H(王绍华). Study on precise and quantitative N application in rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(12): 2457–2467 (in Chinese with English abstract)
- [19] Yang X(杨雄), Ma Q(马群), Zhang H-C(张洪程), Wei H-Y(魏海燕), Li G-Y(李国业), Li M(李敏), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Zhang Q(张庆), Guo B-W(郭保卫), Ge M-J(葛梦婕). Characteristics and correlation analysis of N and P uptake and utilization of early maturing late japonica under different N fertilizer levels. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2012, 38(1): 174–180 (in Chinese with English abstract)
- [20] Huo Z-Y(霍中洋), Yang X(杨雄), Zhang H-C(张洪程), Ge M-J(葛梦婕), Ma Q(马群), Li M(李敏), Dai Q-G(戴其根), Xu K(许轲), Wei H-Y(魏海燕), Li G-Y(李国业), Zhu C-C(朱聪聪), Wang Y-J(王亚江), Yan X-T(颜希亭). Accumulation and translocation of dry matter and nitrogen nutrition in organs of rice cultivars with different productivity levels. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥科学报), 2012, 18(5): 1035–1045 (in Chinese with English abstract)
- [21] Sun Y-J(孙永健), Sun Y-Y(孙园园), Li X-Y(李旭毅), Zhang R-P(张荣萍), Guo X(郭翔), Ma J(马均). Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2010, 36(4): 655–664 (in Chinese with English abstract)
- [22] Yang X-B(阳显斌), Zhang X-Z(张锡洲), Li T-X(李廷轩), Wu D-Y(吴德勇). Effects of applied P amount on nitrogen, phosphorus and potassium accumulation and distribution in wheats of different phosphorus use efficiency. *J Nucl Agric Sci* (核农学报), 2012, 26(1): 141–149 (in Chinese with English abstract)