植物营养与肥料学报 2013,19(1):26-36
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0104

超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点

齐文增,陈晓璐,刘 鹏*,刘惠惠,李 耕,邵立杰,王飞飞,董树亭,张吉旺,赵 斌
(作物生物学国家重点实验室,山东省作物生物学重点实验室,山东农业大学农学院,山东泰安 271018)

摘要: 探讨超高产夏玉米品种整株干物质与氮、磷、钾养分积累分配特点,为制定高产栽培管理措施提供依据。本文在大田条件下,以登海 661(DH661)和郑单 958(ZD958)为试验材料,比较研究了超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累分配特点。结果表明,超高产夏玉米 DH661 在成熟期内整株干物质及氮、磷、钾积累量分别为 33475.53 kg/hm^2、369.76 kg/hm^2、117.85 kg/hm^2、285.78 kg/hm^2,均显著高于 ZD958,较 ZD958 分别高 15.82%、23.72%、32.17%、21.89%。超高产夏玉米 DH661 的干物质和氮、磷、钾养分在叶片和茎秆中的分配比例均低于 ZD958,而籽粒和根系中的分配比例高于 ZD958,因而具有较高的养分收获指数与偏生产力。整个生育期内,DH661 各器官的养分吸收速率均显著高于 ZD958,具有较高的养分吸收效率;茎、叶及根系的氮、磷、钾养分吸收速率在灌浆期前保持较高水平,之后下降较快,而籽粒的氮、磷、钾养分吸收速率于灌浆期后增加较快。吐丝期后,DH661 仍能吸收积累较多的养分,因此吐丝后适当追肥对于超高产夏玉米灌浆期养分充足供应至关重要。

关键词: 超高产夏玉米;干物质;氮、磷、钾养分
中图分类号: S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)01-0026-11

Characteristics of dry matter, accumulation and distribution of N, P and K of super-high-yield summer maize

QI Wen-zeng, CHEN Xiao-lu, LIU Peng*, LIU Hui-hui, LI Geng, SHAO Li-jie, WANG Fei-fei, DONG Shu-ting, ZHANG Ji-wang, ZHAO Bin
(*State Key Laboratory of Crop Biology/Shandong Key Laboratory of Crop Biology/ Agronomy college of Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China*)

Abstract: The aim of this study is to investigate characteristics of dry matter and nitrogen(N), phosphorus(P) and potassium(K) nutrient accumulations and distributions of super-high-yield summer maize. Field experiments were conducted in 2010 and 2011 for the higher-yield corn cultivar, Denghai (DH661) and the commonly grown corn cultivar, Zhengdan 958 (ZD958). The results show that the dry matter and N, P and K nutrient accumulation amounts per hectare of DH661 are 33475.53 kg, 369.76 kg, 117.85 kg and 285.78 kg at maturity stages of corn respectively, and compared with the ZD958, the dry matter and N, P and K nutrient accumulation amounts of DH661 are increased by 15.82%, 23.72%, 32.17% and 21.89% respectively. The proportions of dry matter and N, P and K nutrients in the organs of stems and leaves of DH661 are lower than those of ZD958, while the proportions of dry matter and N, P and K nutrients in the organs of grains and roots of DH661 are higher than those of ZD958. The rates of nutrients uptakes of DH661 are higher than those of ZD958 in the whole organs. The rates maintain high levels before the filling stage and decline very fast after the filling stage in the organs of stems, leaves and roots, and

收稿日期: 2012-04-09 **接受日期:** 2012-10-08
基金项目: 国家自然科学基金(3071358、30871476);欧盟 FP7 国际合作项目(NUE-CROPS 222645);国家"十二五"科技支撑计划(2011BAD16B14);公益性行业(农业)科研专项(HY201203100,HY201203096);山东省财政支持农业重大应用技术创新课题(2010);山东省良种工程玉米重大课题(2011);山东登海种业玉米育种与栽培技术重点实验室开放课题(2012)资助。
作者简介: 齐文增(1987—),男,山东昌乐人,硕士研究生,主要从事玉米栽培生理生态方面的研究。
Tel: 0538-8245838, E-mail: qiwenzeng321@163.com。 * 通信作者 Tel: 0538-8245838, E-mail: liupengsdau@126.com

increase very fast after the filling stage in the grains. After the silking, DH661 still can uptake large amounts of the nutrients. As for DH661, the top dressing of the nutrients after the silking is very important to fill grains and attain higher yield.

Key words: super-high-yield summer maize; dry matter; N, P and K nutrients

玉米是我国重要的粮食作物,其产量的高低直接影响国家粮食安全和玉米产业的发展[1],因此实现玉米高产乃至超高产是提高玉米总产量、保障粮食安全的重要途径[2-3]。研究表明,在一定范围内,干物质积累量与产量呈正相关关系[4],高生物量是高产的物质基础[5],因此增强玉米生育期内干物质的积累能力是提高籽粒产量的有效途径[6]。而矿质营养的吸收、同化与转运直接影响着植株干物质积累与分配,进而影响产量[7-9]。充足的养分供应是夏玉米获得高产的关键[10-11]。玉米对氮素吸收量最多,钾次之,磷最少[12];随着玉米产量的提高,氮、磷、钾的吸收量增加[13]。拔节至吐丝期是养分吸收的关键阶段,养分吸收速率高、积累量大,吐丝后植株仍能吸收较多的氮、磷[14-15]。近年来对超高产夏玉米的研究多集中于冠层结构[16-17]、源库关系[18]、肥密调控[19]、生态条件[20-21]及生理特性[4,22]等方面,而对超高产夏玉米整株(地上部与地下部)干物质、养分积累分布规律的研究鲜见报道。本文在大田条件下,以创造我国夏玉米高产纪录的超高产品种登海 661(DH661)为试材,以普通品种郑单 958(ZD958)为对照,研究了超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点,以期为制定玉米高产栽培管理措施提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2010～2011 年在山东农业大学黄淮海区域玉米技术创新中心(N36°18′,E117°12′)和作物生物学国家重点实验室进行。供试材料为登海 661(DH661)和郑单 958(ZD958),其中 DH661 在 2005 年创造了 21042.91 kg/hm^2 的我国夏玉米高产纪录[23],而 ZD958 自 2004 年以来已连续 7 年为我国第一大玉米栽培品种。

1.2　试验设计

采用大田种植,试验田 0—40 cm 耕层土壤 pH 6.85,有机质含量 11.41 g/kg,全氮 0.75 g/kg,碱解氮 57.39 mg/kg,速效磷 27.05 mg/kg,速效钾 107.12 mg/kg。试验采用随机区组设计,小区面积 300 m^2(长 50 m×宽 6 m),重复 3 次。种植密度均为 75000 plant/hm^2,行距 60 cm,株距 22.22 cm。2010 年 6 月 12 日播种,10 月 8 日收获;2011 年 6 月 20 日播种,10 月 12 日收获。基肥和拔节(V6)肥均为三元复合肥(总养分含量为 45%,N－P_2O_5－K_2O 比例为 15－15－15),其中基肥施入 N、P_2O_5、K_2O 均为 196.5 kg/hm^2,拔节肥施入 N、P_2O_5、K_2O 均为 131.0 kg/hm^2。大口期(V12)所施肥料为尿素(含 N 46%),施入 N 量为 138 kg/hm^2。基肥为整地前撒施,追肥为沟施。其他管理措施同一般高产田。

分别于大口期(V12)、吐丝期(R1)、灌浆期(R2)、乳熟期(R3)、蜡熟期(R5)和完熟期(R6)系统取样,取样时每小区选取有代表性的植株 3 株,完熟期选取 6 株。首先将地上部取下,按照叶片(含苞叶)、茎秆(含雄穗、叶鞘、穗轴和地下茎)、籽粒分开,105℃杀青 30 min 后 80℃烘至恒重,测定地上部干物质积累量。根系取样采用土壤剖面法,取长 60 cm(垂直于行向以植株为中心)×宽 20 cm(沿行向以植株为中心)的面积,取样深度为 200 cm。土壤挖出后,装入网袋,用冲根器冲洗根系,剔除杂质后置于 80℃烘箱中烘至恒重,测定根系干重。

成熟期考种测产。每小区选取有代表性区域 30 m^2(长 10 m×宽 3 m),重复三次。将 30 m^2 区域内玉米全部收获、脱粒并晒干至籽粒含水量约为 14%时,测定收获的籽粒产量,最后折算成每公顷收获的籽粒产量。

1.3　测定项目及方法

将称重后的各器官粉碎,以 H_2SO_4－H_2O_2 消煮后用 BRAN＋LUEBBE Ⅲ 型连续流动分析仪测定全氮、全磷含量;用 FP 6410 型火焰光度计测定全钾含量。

按如下公式计算氮、磷、钾养分吸收利用效率[9,11]:

氮素吸收效率(NUPE,kg/kg)＝植株地上部氮素累积量/施氮量;

氮(磷或钾)收获指数(HI,%)＝玉米子粒吸 N(P_2O_5 或 K_2O)量/玉米地上部植株总吸 N(P_2O_5 或 K_2O)量×100;

氮肥(磷肥或钾肥)偏生产力(PFP,kg/kg)＝籽粒产量(kg/hm^2)/施纯 N(P_2O_5 或 K_2O)量(kg/hm^2)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 处理数据,并用 DPS V10.0 软件检验处理间的差异显著性(LSD 方法)。因 2010 和 2011 年数据变化趋势基本一致,本文重点以 2010 年数据进行详细说明。

2 结果与分析

2.1 超高产夏玉米产量及其构成因子

由表 1 可知,两年的试验结果趋势基本一致。相同栽培条件下,两品种的实际收获穗数、穗行数及行粒数无显著差异;而 DH661 的千粒重及实测产量均显著高于 ZD958,2010 年和 2011 年 DH661 千粒重分别较对照增加 19.17%、14.85%,籽粒产量分别较对照增加 19.73%、19.88%。

表 1 产量及其构成因素

Table 1 Grain yields and its components of different corn cultivars

年度 Year	品种 Cultivar	实际穗数 Actual ear ($\times 10^4$ ear/hm^2)	穗行数 Row No. per ear (No./ear)	行粒数 Grains per row (No./row)	穗粒数 Grains per ear (No./ear)	千粒重 1000-kernel weight (g)	实测籽粒产量 Actual grain yield (t/hm^2)
2010	ZD958	7.625 b	16.0 a	39.6 b	633.6 c	314.1 b	14.7 d
	DH661	7.695 b	16.2 a	38.8 b	628.6 d	374.3 a	17.6 b
2011	ZD958	7.813 a	16.1 a	43.1 a	693.9 b	319.8 b	16.1 c
	DH661	7.854 a	16.4 a	42.7 a	700.3 a	367.3 a	19.3 a

注(Note):同列数据后不同小写字母表示品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between cultivars at the 5% level.

2.2 超高产夏玉米干物质积累与分配

由表 2 可知,整个生育时期中 DH661 的整株干物质积累量均显著高于 ZD958,至完熟期达最大值 33475.53 kg/hm^2,此时较 ZD958 高 15.82%;两品种的茎、叶干物质积累量均于灌浆期达最大值,自大口期后 DH661 显著高于 ZD958,灌浆期较 ZD958 分别高 10.50%、14.29%;籽粒的干物质积累量显著高于 ZD958,完熟期较 ZD958 高 19.61%;全生育时期根系的干物质积累量均显著高于 ZD958,于灌浆期达最大值时较 ZD958 高 56.21%。

DH661 茎、叶中的干物质分配比例各生育时期均低于 ZD958,而根系则显著高于 ZD958;生育后期籽粒的干物质分配比例高于 ZD958;由此可知,在生育后期 DH661 储藏在各器官中的干物质向籽粒转移的量较多,有利于 DH661 获得较高的产量(表2)。

2.3 超高产夏玉米养分积累与分配

2.3.1 氮、磷、钾养分积累量的变化及分配特点 由表 3 可以看出,随生育进程推进,超高产夏玉米 DH661 整株氮积累量呈递增趋势且各生育时期均显著高于 ZD958,至成熟期达最大值 369.76 kg/hm^2,较 ZD958 高 23.72%;整个生育期,DH661 茎、叶、根系、籽粒氮积累量均显著高于 ZD958,茎、叶、根系氮积累量均于灌浆期达最大值,分别较 ZD958 高 37.22 %、27.74 %、63.63%,而籽粒的氮积累量于完熟期达最大值,较 ZD958 高 27.32%。从各器官氮素分配比例可知,完熟期 DH661 茎、叶中的氮素分配比例均低于 ZD958,灌浆期后籽粒中的氮素分配比例高于 ZD958,根系的氮素分配比例高于 ZD958。

超高产夏玉米 DH661 整株磷积累量变化趋势与氮积累量基本一致(表 4),于完熟期达到 117.85 kg/hm^2,较 ZD958 高 32.17%。随生育进程推进,DH661 整个生育时期的茎、叶、籽粒及根系的磷积累量均显著高于 ZD958,灌浆期达最大值时分别较 ZD958 高 19.56%、74.80%;乳熟期叶的磷积累量达最大值,较 ZD958 高 4.38%;而籽粒的磷积累量于完熟期达最大值,此时较 ZD958 高 43.22%。完熟期,DH661 茎、叶中磷的分配比例均低于 ZD958,而在籽粒和根系中的分配比例均高于 ZD958。由此可知,DH661 茎、叶中的磷向籽粒中转移的较多。

表 2　不同生育时期夏玉米干物质积累与分配

Table 2　Dry matter accumulation and distribution in summer maize at different growth stages

器官 Organ	品种 Cultivar	干物质积累量 Dry matter accumulation amount (g/plant)					
		V12	R1	R2	R3	R5	R6
茎秆 Stalk	DH661	47.63 a	104.68 a	143.29 a	139.85 a	127.73 a	116.43 a
	ZD958	46.92 a	89.28 b	129.68 b	126.46 b	119.18 b	108.99 b
叶 Leaf	DH661	37.69 a	63.31 a	95.26 a	89.21 a	84.56 a	77.57 a
	ZD958	38.15 a	52.41 b	83.35 b	78.79 b	72.20 b	70.85 b
籽粒 Grain	DH661			10.38 a	99.25 a	169.87 a	227.07 a
	ZD958			8.63 b	73.10 b	132.50 b	189.84 b
根系 Root	DH661	15.83 a	34.45 a	35.21 a	31.10 a	30.34 a	25.27 a
	ZD958	10.58 b	18.81 b	22.54 b	16.84 b	16.54 b	15.70 b
整株 Whole plant	DH661	101.15 a	202.44 a	284.14 a	359.41 a	412.50 a	446.34 a
	ZD958	95.66 b	160.50 b	244.20 b	295.20 b	340.42 b	385.38 b
器官 Organ	品种 Cultivar	干物质分配比例 Dry matter distribution rate (%)					
		V12	R1	R2	R3	R5	R6
茎秆 Stalk	DH661	47.09	51.71	50.43	38.91	30.96	26.09
	ZD958	49.05	55.63	53.10	42.84	35.01	28.28
叶 Leaf	DH661	37.26	31.27	33.53	24.82	20.50	17.38
	ZD958	39.89	32.65	34.13	26.69	21.21	18.38
籽粒 Grain	DH661			3.65	27.62	41.18	50.87
	ZD958			3.53	24.76	38.92	49.26
根系 Root	DH661	15.65	17.02	12.39	8.65	7.36	5.66
	ZD958	11.06	11.72	9.23	5.71	4.86	4.07
整株 Whole plant	DH661	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	ZD958	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注(Note): V12—大喇叭口期 Bell stage; R1—吐丝期 Silking stage; R2—灌浆期 Filling stage; R3—乳熟期 Milk stage; R5—蜡熟期 Dough stage; R6—完熟期 Full ripe stage. 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between cultivars at the 5% level.

表 5 显示,随生育进程推进,两品种整株钾积累量呈先增加后降低的趋势,但 DH661 显著高于 ZD958,完熟期 DH661 整株钾积累量为 285.78 kg/hm^2。其中,茎、叶、根系的钾积累量均呈先增加后降低的趋势,而籽粒钾积累量呈增加趋势。DH661 各器官的钾积累量均显著高于 ZD958,茎、叶片、根系及籽粒在完熟期钾积累量分别较 ZD958 高 25.74%、20.52%、61.20%、35.86%; DH661 茎、叶片中的钾分配比例低于 ZD958,籽粒、根系中的钾分配比例高于 ZD958。

2.3.2 氮、磷、钾养分的运转　由表 6 可以看出,DH661 吐丝前、后氮、磷、钾养分积累量均显著高于 ZD958,吐丝前氮、磷、钾养分积累量分别较 ZD958 高 23.00%、24.27%、24.62%,而吐丝后分别较 ZD958 高 27.04%、41.36%、7.80%。从吐丝前后养分积累所占比例可知,两品种的氮、钾两种养分大部分是在吐丝期前吸收积累的,磷素在吐丝前后所占的比例相差不大; 吐丝前 DH661 氮、磷所占比例均低于 ZD958,吐丝后均高于 ZD958,而钾与之相反。因此说明,DH661 不仅在生育前期能吸收较多的养分,而且生育后期仍能吸收较多的养分,这有利于促进地上部光合物质的积累,获得较高的籽粒产量。

表3 不同生育时期夏玉米氮素积累与分配

Table 3 Nitrogen accumulation and distribution in summer maize at different growth stages

器官 Organ	品种 Cultivar	氮积累量 N accumulation amount (g/plant)					
		V12	R1	R2	R3	R5	R6
茎秆 Stalk	DH661	1.23 a	1.82 a	2.04 a	1.24 a	0.90 a	0.78 a
	ZD958	1.11 b	1.57 b	1.49 b	1.05 b	0.82 b	0.72 b
叶 Leaf	DH661	1.21 a	1.66 a	2.04 a	1.80 a	1.37 a	1.13 a
	ZD958	1.06 b	1.40 b	1.59 b	1.48 b	1.16 b	0.94 b
籽粒 Grain	DH661			0.14 a	1.32 a	2.16 a	2.70 a
	ZD958			0.11 b	0.90 b	1.61 b	2.12 b
根系 Root	DH661	0.20 a	0.54 a	0.65 a	0.50 a	0.48 a	0.32 a
	ZD958	0.15 b	0.31 b	0.40 b	0.26 b	0.26 b	0.19 b
整株 Whole plant	DH661	2.64 a	4.03 a	4.87 a	4.87 a	4.91 a	4.93 a
	ZD958	2.33 b	3.28 b	3.60 b	3.69 b	3.85 b	3.98 b
器官 Organ	品种 Cultivar	氮分配比例 N distribution rate (%)					
		V12	R1	R2	R3	R5	R6
茎秆 Stalk	DH661	45.45	45.22	41.89	25.49	18.24	15.90
	ZD958	47.86	47.86	41.39	28.37	21.32	18.19
叶 Leaf	DH661	46.83	41.31	41.79	37.02	27.94	22.82
	ZD958	45.71	42.63	44.36	40.24	30.16	23.71
籽粒 Grain	DH661			2.93	27.14	43.97	54.81
	ZD958			3.16	24.39	41.83	53.25
根系 Root	DH661	7.72	13.47	13.39	10.34	9.85	6.47
	ZD958	6.42	9.51	11.09	7.00	6.70	4.84
整株 Whole plant	DH661	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	ZD958	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注(Note): V12—大喇叭口期 Bell stage; R1—吐丝期 Silking stage; R2—灌浆期 Filling stage; R3—乳熟期 Milk stage; R5—蜡熟期 Dough stage; R6—完熟期 Full ripe stage. 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between cultivars at the 5% level.

2.3.3 氮、磷、钾养分吸收速率的变化特点 由图1可知,DH661各器官氮、磷、钾养分吸收速率变化趋势与ZD958基本一致。随生育进程的推进,DH661茎、叶及根系的氮、磷、钾养分吸收速率在灌浆期之前保持较高的水平,之后较快下降,而籽粒的氮、磷、钾养分吸收速率于灌浆期后迅速增加;整个生育期内,DH661各器官养分吸收速率均显著高于对照。由此可知,DH661在生育期内可吸收较多的营养物质,不仅有利于生育前期营养器官的形态建成,而且有利于生育后期籽粒的灌浆充实、获得较高的产量。

2.3.4 氮、磷、钾养分利用效率 由表7可以看出,DH661氮、磷、钾的吸收效率、收获指数和偏生产力均显著高于ZD958。二者的磷吸收效率仅分别为0.36和0.27 kg/kg,因此可以适当降低夏玉米田的磷肥施用量。而DH661的钾吸收效率高达0.87 kg/kg,可见超高产夏玉米对钾肥的需求量较普通玉米品种显著增加。

3 讨论

前人研究表明,在玉米品种更替过程中,产量的提高是生物量和收获指数协同提高的结果[24-25],而收获指数仅从0.45提高到0.50左右,这就意味着

表 4　不同生育时期夏玉米磷素积累与分配

Table 4　Phosphorus accumulation and distribution in summer maize at different growth stages

器官 Organ	品种 Cultivar	磷积累量 P accumulation amount (g/plant)					
		V12	R1	R2	R3	R5	R6
茎秆 Stalk	DH661	0.22 a	0.45 a	0.56 a	0.51 a	0.45 a	0.35 a
	ZD958	0.18 b	0.40 b	0.47 b	0.44 b	0.40 b	0.30 b
叶 Leaf	DH661	0.20 a	0.25 a	0.31 a	0.33 a	0.29 a	0.26 a
	ZD958	0.19 b	0.19 b	0.26 b	0.31 b	0.24 b	0.22 b
籽粒 Grain	DH661			0.03 a	0.33 a	0.64 a	0.88 a
	ZD958			0.02 b	0.20 b	0.42 b	0.62 b
根系 Root	DH661	0.04 a	0.10 a	0.14 a	0.11 a	0.10 a	0.08 a
	ZD958	0.02 b	0.05 b	0.08 b	0.06 b	0.05 b	0.04 b
整株 Whole plant	DH661	0.46 a	0.79 a	1.03 a	1.27 a	1.49 a	1.57 a
	ZD958	0.39 b	0.64 b	0.82 b	1.01 b	1.12 b	1.19 b
器官 Organ	品种 Cultivar	磷分配比例 P distribution rate (%)					
		V12	R1	R2	R3	R5	R6
茎秆 Stalk	DH661	47.52	56.62	53.84	40.24	30.45	22.56
	ZD958	45.20	62.47	56.76	43.52	36.03	25.58
叶 Leaf	DH661	43.77	30.94	29.81	25.58	19.58	16.23
	ZD958	49.12	29.92	31.17	31.03	21.51	18.88
籽粒 Grain	DH661			2.98	25.66	43.05	56.11
	ZD958			2.43	19.89	37.68	51.78
根系 Root	DH661	8.72	12.44	13.37	8.51	6.92	5.10
	ZD958	5.68	7.61	9.64	5.56	4.78	3.76
整株 Whole plant	DH661	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	ZD958	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注(Note):V12—大喇叭口期 Bell stage;R1—吐丝期 Silking stage;R2—灌浆期 Filling stage;R3—乳熟期 Milk stage;R5—蜡熟期 Dough stage;R6—完熟期 Full ripe stage. 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between cultivars at the 5% level.

进一步提高玉米产量需依赖于光合产物的更多积累[26],即干物质积累越多,籽粒产量也就越高[4]。本研究发现,两品种收获指数无显著差异,DH661 籽粒产量高主要是干物质积累量增加造成的。另外本研究表明,超高产夏玉米 DH661 地上部干物质积累量于大口期后显著高于 ZD958,而整株干物质积累量在整个生育时期均显著高于 ZD958,至完熟期 DH661 整株干物质积累量较 ZD958 高 15.82%,籽粒干物质积累量较 ZD958 高 19.61%,且吐丝期后植株的干物质增加量约等于籽粒产量。说明超高产夏玉米 DH661 整株干物质积累优势主要表现在生育中后期,且生育中后期的干物质积累量与籽粒产量相关[27]。生育后期干物质积累多,一方面说明光合生产能力高,另一方面说明库的需求量大,碳水化合物运输("流")顺畅[28]。另外本研究表明,生育后期超高产夏玉米 DH661 茎、叶中的干物质分配比例低于 ZD958,而在籽粒和根系中的分配比例高于 ZD958。茎、叶干物质分配比例低,有利于较多的干物质向籽粒分配,有利于获得高产,而根系干物质分配比例高对后期根系活力具有重要意义,笔者已证实,保持生育后期根系活力高利于吸收土壤中较多的水分和养分而获得高产[29-30],同时也说明干物质

表5 不同生育时期夏玉米钾素积累与分配

Table 5 Potassium accumulation and distribution in summer maize at different growth stages

器官 Organ	品种 Cultivar	钾积累量 K accumulation amount (g/plant)					
		V12	R1	R2	R3	R5	R6
茎秆 Stalk	DH661	1.14 a	1.76 a	2.15 a	1.96 a	1.56 a	1.38 a
	ZD958	1.02 b	1.50 b	1.77 b	1.64 b	1.38 b	1.24 b
叶 Leaf	DH661	0.87 a	0.97 a	1.22 a	1.17 a	1.09 a	0.91 a
	ZD958	0.81 b	0.80 b	1.08 b	0.92 b	0.88 b	0.79 b
籽粒 Grain	DH661			0.04 a	0.42 a	0.78 a	1.07 a
	ZD958			0.03 b	0.29 b	0.58 b	0.84 b
根系 Root	DH661	0.31 a	0.53 a	0.62 a	0.58 a	0.52 a	0.45 a
	ZD958	0.16 b	0.32 b	0.33 b	0.27 b	0.24 b	0.26 b
整株 Whole plant	DH661	2.32 a	3.26 a	4.03 a	4.13 a	3.94 a	3.81 a
	ZD958	1.99 b	2.62 b	3.22 b	3.12 b	3.08 b	3.13 b
器官 Organ	品种 Cultivar	钾分配比例 K distribution rate (%)					
		V12	R1	R2	R3	R5	R6
茎秆 Stalk	DH661	49.05	54.00	53.28	47.40	39.48	36.24
	ZD958	51.50	57.20	55.12	52.59	44.86	39.64
叶 Leaf	DH661	37.48	29.85	30.36	28.32	27.60	23.87
	ZD958	40.65	30.47	33.65	29.42	28.48	25.32
籽粒 Grain	DH661			1.08	10.11	19.83	28.11
	ZD958			0.97	9.32	18.80	26.85
根系 Root	DH661	13.47	16.15	15.28	14.17	13.09	11.78
	ZD958	7.85	12.33	10.26	8.68	7.86	8.19
整株 Whole plant	DH661	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	ZD958	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注(Note): V12—大喇叭口期 Bell stage; R1—吐丝期 Silking stage; R2—灌浆期 Filling stage; R3—乳熟期 Milk stage; R5—蜡熟期 Dough stage; R6—完熟期 Full ripe stage. 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between cultivars at the 5% level.

的积累分配与转移特性决定了玉米籽粒产量[31-32]，而茎杆、叶的干物质积累与分配是玉米籽粒产量形成的重要因素[33-34]。

作物生物量的累积量与养分的积累有着密切的关系，养分积累是生物量累积的基础，也是作物产量形成的基础。夏玉米生育期内吸收养分的能力强，充足的养分供应是夏玉米获得高产的关键[10-11]。研究表明，超高产夏玉米 DH661 具有产量水平高，根系活力强，有利于吸收较多的养分[34-35]。本研究结果表明超高产夏玉米 DH661 在整个生育期内氮、磷、钾养分积累量和吸收速率均显著高于 ZD958，具有较高的养分吸收效率。茎、叶及根系的养分吸收速率灌浆期前较高，籽粒灌浆期后养分吸收速率较高，这有利于吸收更多的氮、磷、钾，提高其积累量[13,35]。另外，本研究表明，DH661 吐丝期后仍能吸收积累较多的养分，因此，保证后期养分的充足供应有利于超高产夏玉米产量形成[14]。生育后期，超高产夏玉米 DH661 茎、叶中的养分分配比例低于 ZD958，而籽粒和根系中的比例高于 ZD958，在保证根系基本功能的情况下，籽粒中分配较多的养分，有利于满足籽粒充实所需的营养物质，因而具有较高的养分收获指数和偏生产力，同时也说明氮、磷、钾

表 6　夏玉米吐丝期前后整株氮、磷、钾养分积累量及比例

Table 6　Accumulation amounts and ratios of nitrogen, phosphorus and potassium of the whole maize plant at the pre-silking and post-silking

项目 Item	N		P		K	
	DH661	ZD958	DH661	ZD958	DH661	ZD958
吐丝前积累量(kg/hm²) Accum. amount of pre-silking	302.13 a	245.63 b	59.62 a	47.98 b	244.75 a	196.39 b
吐丝前比例(%) Rate of pre-silking	81.71	82.19	50.59	53.81	85.64	83.76
吐丝后积累量(kg/hm²) Accum. amount of post-silking	67.63 a	53.23 b	58.23 a	41.19 b	41.04 a	38.07 b
吐丝后比例(%) Rate of pre-silking	18.29	17.81	49.81	46.19	14.36	16.24

注(Note): 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between cultivars at the 5% level.

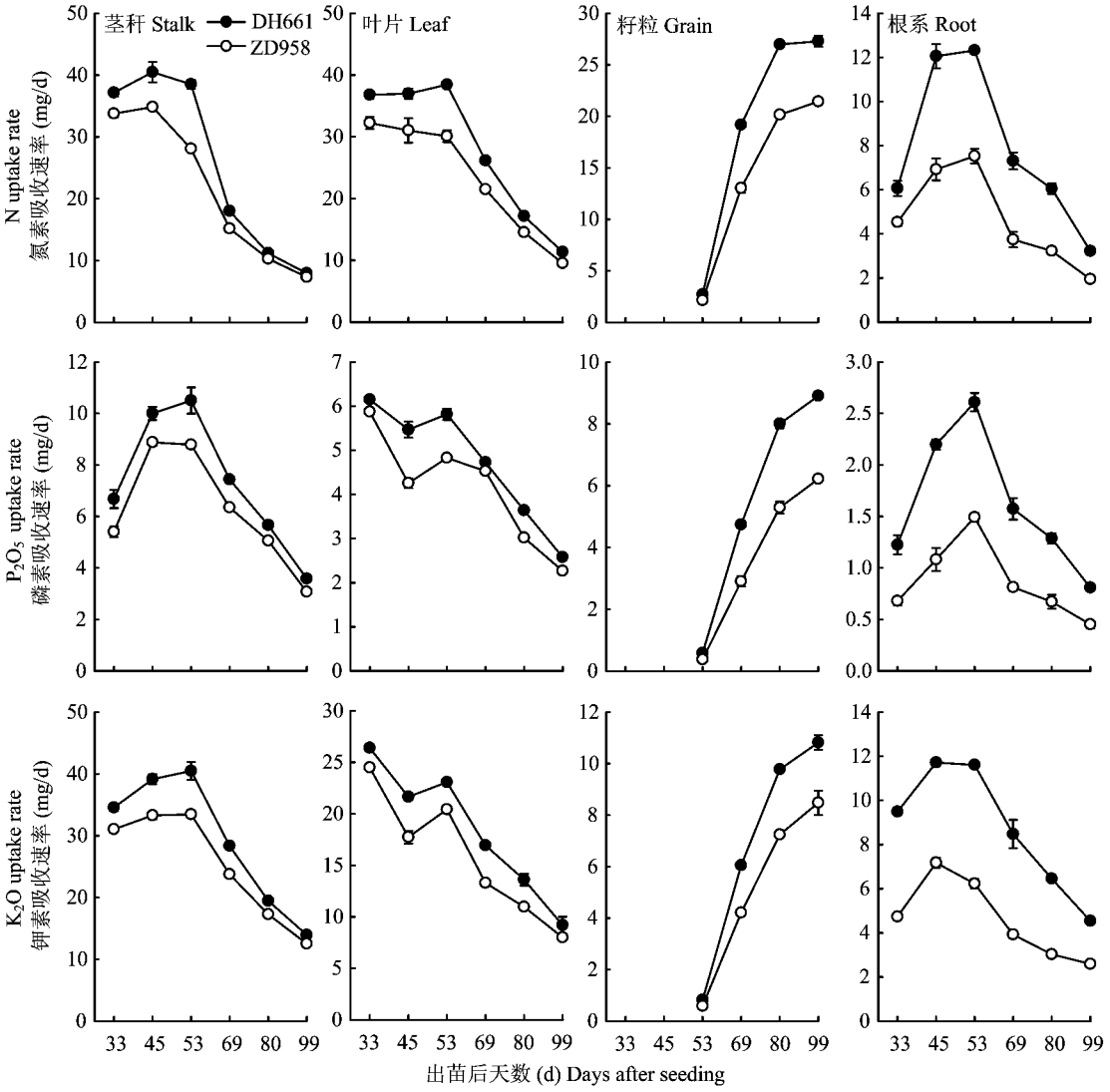

图 1　不同生育阶段夏玉米氮、磷、钾养分吸收速率

Fig. 1　Uptake rates of N, P_2O_5 and K_2O in summer maize at different growth stages

表7 夏玉米氮、磷、钾养分利用效率

Table 7 N, P and K utilization efficiencies of summer maize

品种 Cultivar	吸收效率 UPE(kg/kg)			收获指数 HI(%)			偏生产力 PFP(kg/kg)		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
DH661	0.79 a	0.36 a	0.87 a	50.87 a	54.81 a	56.11 a	37.81 a	53.74 a	53.74 a
ZD958	0.64 b	0.27 b	0.72 b	49.26 b	53.25 b	51.78 b	31.58 b	44.89 b	44.89 b

注(Note): UPE—Uptakes efficiency; HI—Harvest index; PFP—Partial fertilizer productivity. 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between cultivars at the 5% level.

养分的吸收积累与分配直接影响着植株干物质积累与分配,进而影响产量[7-9]。由于本试验是在超高产栽培条件下进行的,水肥投入量大,水肥利用效率不一定高,但是摸清超高产条件下玉米的矿质养分吸收、运转规律有助于我们进一步研究水肥的合理运筹、提高水肥利用效率,达到高产高效的目的。

4 结论

超高产夏玉米DH661整株干物质及氮、磷、钾养分积累量在整个生育期内均显著高于ZD958,二者收获指数无显著差异,因此其籽粒产量高的主要原因是较高的干物质积累量。超高产夏玉米DH661根系及籽粒中的干物质分配比例高于ZD958,具有较高的养分吸收效率、收获指数和偏生产力。DH661根系中的干物质分配比例高,有利于维持根系活性,促进氮、磷、钾养分吸收速率和积累量的增加。这不仅有利于生育前期营养器官的形态建成,而且有利于生育后期制造更多的光合产物满足籽粒充实的需要,最终获得高产。

参 考 文 献:

[1] 董树亭, 张吉旺. 建立玉米现代产业技术体系,加快玉米产业发展[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 18-20.
Dong S T, Zhang J W. The establishment of maize modern industrial technology system, accelerate the development of maize production[J]. J. Maize Sci., 2008, 16(4): 18-20.

[2] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004. 1-3.
Guo Q F, Wang Q C, Wang L M. Maize cultivation science of China[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publish, 2004. 1-3.

[3] 李少昆. 当前玉米生产中存在的主要问题与对策[J]. 中国农业信息, 2008, (6): 37-38.
Li S K. Main problems and countermeasures on maize production at present[J]. China Agric. Inform., 2008, (6): 37-38.

[4] 黄振喜, 王永军, 王空军, 等. 产量15000 kg/ha以上夏玉米灌浆期间的光合特性[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1898-1906.
Huang Z X, Wang Y J, Wang K J *et al*. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15000 kg/ha[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(9): 1898-1906.

[5] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 95-98.
Huang Z H, Wang S Y, Bao Y *et al*. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize[J]. J. Maize Sci., 2007, 15(3): 95-98.

[6] 丛艳霞, 赵明, 董志强, 等. 乙霉合剂对春玉米干物质积累和茎秆形态的调控[J]. 作物杂志, 2008, 4: 68-71.
Cong Y X, Zhao M, Dong Z Q *et al*. Regulation of dry matter accumulation and stem shape of spring maize by EM-compounded agent[J]. Crops. 2008, 4: 68-71.

[7] 李兆君, 杨佳佳, 范菲菲, 等. 不同施肥条件下覆膜对玉米干物质积累及吸磷量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 571-577.
Li Z J, Yang J J, Fan F F *et al*. Effect of plastic film mulching on dry mass accumulation and phosphorus uptake of corn receiving different fertilizers[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(3): 571-577.

[8] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 71-76.
Song H X, Li S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions[J]. Sci. Agric. Sin., 2003, 36(1): 71-76.

[9] 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.

[10] 何萍, 金继运, 林葆. 玉米高产施肥营养生理研究进展[J]. 玉米科学, 1998, 6(2): 72-76.
He P, Jin J Y, Lin B. Study progress on maize high yield fertilization and nutrition physiological[J]. J. Maize Sci., 1998, 6(2): 72-76.

[11] 何萍, 金继运, 林葆, 等. 不同氮、磷、钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 123-130.

He P, Jin J Y, Lin B *et al*. Dynamics of biomass and its components and models of nutrients absorption by spring maize under different nitrogen, phosphorous and potassium application rates[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 123-130.

[12] 张颖. 不同产量类型春玉米养分吸收特点及其分配规律的研究[J]. 玉米科学, 1997, 5(3): 70-72.
Zhang Y. Studies on the characteristics of nutrient absorption and distribution patterns of different types of spring maize[J]. J. Maize Sci., 1997, 5(3): 70-72.

[13] 郭景伦，张智猛，李伯航. 不同高产夏玉米品种养分吸收特性的研究[J]. 玉米科学, 1997, 5(4): 50-52, 59.
Guo J L, Zhang Z M, Li B H. Studies on the characteristics of nutrient absorption of high-yielding summer maize[J]. J. Maize Sci., 1997, 5(4): 50-52, 59.

[14] 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.

[15] 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 J, 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.

[16] 张玉芹，杨恒山，高聚林，等. 超高产春玉米冠层结构及其生理特性[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4367-4376.
Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L *et al*. Study on canopy structure and physiological characteristics of super-high yield spring maize[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(21): 4367-4376.

[17] 王志刚，高聚林，任有志，等. 春玉米超高产群体冠层结构的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 51-56.
Wang Z G, Gao J L, Ren Y Z *et al*. Study on canopy structure of super-high yield colony in spring maize[J]. J. Maize Sci., 2007, 15(6): 51-56.

[18] 黄智鸿，申林，曹洋，等. 超高产玉米与普通玉米源库关系的比较研究[J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(6): 607-611, 615.
Huang Z H, Shen L, Cao Y *et al*. Comparative studies on source-sink relationship among super high-yield and common maize varieties[J]. J. Jilin Agric. Univ., 2007, 29(6): 607-611, 615.

[19] 高玉山，窦金刚，刘慧涛，等. 吉林省半干旱区玉米超高产品种、密度与产量关系研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(1): 120-122.
Gao Y S, Dou J G, Liu H T *et al*. Research on relationship of varieties, densities and yield constitute factor for super high-yielding maize in semi-arid region of Jilin Province[J]. J. Maize Sci., 2007, 15(1): 120-122.

[20] 苏新宏，张学林，王群，李潮海. 超高产栽培条件下气象条件对夏玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(1): 105-107, 112.
Su X H, Zhang X L, Wang Q, Li C H. Effects of meteorological factors on grain yield of summer corn under super-high-yield cultivation[J]. J. Maize Sci., 2009, 17(1): 105-107, 112.

[21] 侯玉虹，陈传永，郭志强，等. 春玉米不同产量群体叶面积指数动态特征与生态因子资源量的分配特点[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 135-142.
Hou Y H, Chen C Y, Guo Z Q *et al*. Dynamic characteristics of leaf area index and allocation characters of ecological resources for different yielding spring maize populations[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2009, 20(1): 135-142.

[22] 杨今胜，王永军，张吉旺，等. 三个超高产夏玉米品种的干物质生 产及光合特性[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 355-361.
Yang J S, Wang Y J, Zhang J W *et al*. Dry matter production and photosynthesis characteristics of three hybrids of maize (*Zea Mays* L.) with super-high-yielding potential[J]. Acta Agron. Sin., 2011, 37(2): 355-361.

[23] 杨今胜，王永军，李登海，等. 超高产夏玉米栽培研究初 报[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 97-100.
Yang J S, Wang Y J, Li D H *et al*. Study on cultivation of super-high yield summer maize[J]. J. Qingdao Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2007, 24(2): 97-100.

[24] Gardner F P, Pearce R B, Mitchell R L. Physiology of crop plant[M]. Ames: Iowa State University Press, 1985. 3-30.

[25] Fageria N K, Baligar V C, Clark R B. Physiology of crop production[M]. New York: An Imprint of the Haworth Press, Inc, 2005. 72-82.

[26] Russell W A. Evaluations for plant, ear, and grain traits of maize cultivars representing seven years of breeding[J]. Maydica, 1985, 30: 85-96.

[27] 李飒，彭云峰，于鹏，等. 不同年代玉米品种干物质积累与钾素吸收及其分配[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 325-332.
Li S, Peng Y F, Yu P *et al*. Accumulation and distribution of dry matter and potassium in maize varieties released in different years[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(2): 325-332.

[28] 戴明宏，赵久然，杨国航，等. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1585-1595.
Dai M H, Zhao J R, Yang G H *et al*. Source-sink relationship and carbon-nitrogen metabolism of maize in different ecological regions and varieties[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(8): 1585-1595.

[29] Saidou A, Janssen B H, Temminghoff E J M. Effects of soil properties, mulch and NPK fertilizer on maize yield sand nutrient budgets on ferralitic soils in southern Benin[J]. Agric Ecosyst. Environ., 2003, 100: 265-273.

[30] 黄智鸿，申林，孙刚，等. 超高产玉米叶面积及地上部干物质积累与分配[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(8): 2227

-2228.
Huang Z H, Shen L, Sun G *et al*. Study on leaf area and dry matter accumulation and distribution in super high-yield maize [J]. J. Anhui Agric. Sci., 2007, 35(8): 2227-2228.

[31] 齐文增, 刘惠惠, 李耕, 等. 超高产夏玉米根系时空分布特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 69-76.
Qi W Z, Liu H H, Li G *et al*. Temporal and spatial distribution characteristics of super-high-yield summer maize root[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(1): 69-76.

[32] 陈国平, 杨国航, 赵明, 等. 玉米小面积超高产创建及配套栽培技术研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 1-4.
Chen G P, Yang G H, Zhao M *et al*. Studies on maize small area super-high yield trails and cultivation technique[J]. J. Maize Sci., 2008, 16(4): 1-4.

[33] Karlen D L, L'flannery R, Sadler E J. Dry matter nitrogen, phosphorus and potassium accumulation rate by corn on Norfolkloamy sand[J]. Agron. J., 1987, 79: 649-656.

[34] Qi W Z, Liu H H, Liu P *et al*. Morphological and physiological characteristics of corn roots from cultivars with different yield potentials[J]. Eur. J. Agron., 2012, 38: 54-63.

[35] 佟屏亚, 凌碧莹. 夏玉米氮、磷、钾积累和分配态势的研究[J]. 玉米科学, 1994, 2(2): 65-69.
Tong P Y, Ling B Y. Studies on the accumulation and distribution trends of N, P and K of summer maize[J]. J. Maize Sci., 1994, 2(2): 65-69.