DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.01035

稻茬小麦公顷产量 9000 kg 群体钾素积累、分配与利用特性

丁锦峰 訾妍 杨佳凤 潘婷 封超年 朱新开 李春燕
彭永欣 郭文善*

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

摘要: 在稻麦两熟制条件下, 以扬麦 20 为材料, 通过基本苗和氮肥施用量、施用时期及比例的调控, 建立不同产量水平群体, 研究籽粒产量 9000 kg hm⁻² 群体钾素积累、分配与利用特性。结果表明, 籽粒产量 ≥ 9000 kg hm⁻² (超高产) 群体钾素吸收高峰期出现在拔节至开花期, 吸收的钾素占一生吸收钾素的 52%~68%; 开花期和成熟期钾素积累量均极显著高于 < 9000 kg hm⁻² (高产) 群体。成熟期叶片、茎鞘、颖壳+穗轴和籽粒钾素积累量与籽粒产量均呈极显著线性正相关; 花后茎鞘钾素转运量与产量呈极显著线性正相关, 颖壳+穗轴钾素转运量与产量呈极显著线性负相关。超高产群体开花期和成熟期钾素积累量分别为 430~450 kg hm⁻² 和 366~408 kg hm⁻²; 成熟期钾素积累量, 茎鞘中最高, 为 244~269 kg hm⁻², 其次是叶片和颖壳+穗轴, 分别为 46~49 kg hm⁻² 和 40~46 kg hm⁻², 籽粒中仅为 35~46 kg hm⁻²; 花后茎鞘钾素转出量为 46~52 kg hm⁻², 颖壳+穗轴钾素积累量为 9~17 kg hm⁻²。超高产群体每 100 kg 籽粒的吸钾量需达 4.57~4.87 kg, 此时的钾素利用效率为 20.56~22.02 kg kg⁻¹, 钾收获指数为 0.095~0.112。

关键词: 稻茬小麦; 高产; 钾素积累、分配与利用

Potassium Accumulation, Distribution, and Utilization in Wheat with Yield Potential of 9000 kg ha⁻¹ in Rice-Wheat Rotation System

DING Jin-Feng, ZI Yan, YANG Jia-Feng, PAN Ting, FENG Chao-Nian, ZHU Xin-Kai, LI Chun-Yan, PENG Yong-Xin, and GUO Wen-Shan*

College of Agriculture, Yangzhou University / Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River of Ministry of Agriculture / Wheat Research Institute, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

Abstract: Different populations of wheat cultivar Yangmai 20 were established in the rice-wheat rotation system by managing plant density and nitrogen application amount, timing and splitting ratio in 2010–2011 and 2011–2012 growing seasons. These populations were divided into high yield (HY, <9000 kg ha⁻¹) and super high yield (SHY, ≥9000 kg ha⁻¹) groups. Characteristics of potassium (K) uptake and utilization in both population groups were compared to guide high-yield wheat production in the rice-wheat rotation system. In SHY population, K absorption from elongation to anthesis was greater than that of other growing periods, which accounted for 52–68% of the total K uptake. The K accumulation amounts at anthesis and maturity were significantly higher in SHY population than in HY population. At maturity, K accumulation amount in leaf, stem, rachis + hull, and grain was positively correlated with grain yield. After anthesis, K translocation amount from stem to grain was positively correlated with grain yield, whereas K translocation amount from rachis + hull to grain was negatively correlated with grain yield. In SHY population, K accumulation amount was 430–450 kg ha⁻¹ at anthesis and 366–408 kg ha⁻¹ at maturity; K accumulation amounts at maturity were 46–49 kg ha⁻¹ in leaf, 244–269 kg ha⁻¹ in stem, 40–46 kg ha⁻¹ in rachis + hull, and 35–46 kg ha⁻¹ in grain; K translocation amount at anthesis from stem to grain was 46–52 kg ha⁻¹; and K accumulation amount in rachis + hull from anthesis to maturity was 9–17 kg ha⁻¹. For yielding grain higher than 9000 kg ha⁻¹, winter wheat in the rice-wheat rotation system required

本研究由国家自然科学基金项目(30971729, 31171480), “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD04B08), 江苏省科技厅项目(BE2009426), 江苏省农业三项工程, 江苏高校优势学科建设工程和江苏高校优秀科技创新团队项目资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 郭文善, E-mail: wheat@yzu.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: jfdin@yzu.edu.cn

Received(收稿日期): 2013-07-25; Accepted(接受日期): 2014-03-04; Published online(网络出版日期): 2014-04-09.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20140409.1117.005.html>

4.57–4.87 kg K nutrient to produce 100 kg grain. Meanwhile, the K use efficiency and K harvest index were 20.56–22.02 kg kg⁻¹ and 0.095–0.112, respectively.

Keywords: Wheat in wheat-rice rotation system; High-yield production; Accumulation, distribution and utilization of potassium

钾素参与作物水分代谢、光合作用、离子的吸收转运及酶活化等生理过程,是提高作物产量和品质的关键营养元素之一^[1]。小麦对钾素吸收利用的规律及营养诊断指标,可为选育品种和栽培调控提供参考。小麦对钾素的吸收、积累、分配与利用特性因品种^[2-3]、土壤类型^[4-5]、产量^[6-7]等而异。在江淮麦区,旱茬小麦可达到 9000 kg hm⁻² 的高产水平。研究表明,冬小麦 8693 kg hm⁻² 产量水平下,植株对钾的吸收强度随小麦生长发育进程推移而增加,拔节到挑旗阶段达最高峰,挑旗以后植株体内钾的绝对含量明显下降^[8]; 9000 kg hm⁻² 的高产小麦,植株对钾素吸收的最大速率期出现在返青至孕穗末期^[9]。9000 kg hm⁻² 高产条件下,每公顷氧化钾吸收量及生产 100 kg 籽粒所需氧化钾的量均高于一般高产麦田^[10]; 小麦植株对钾的积累整个生育期呈“S”型动态变化,扬花期积累量达最大值,较一般高产小麦在拔节至孕穗末期对钾的吸收数量大,持续时间长^[7]。长江中下游地区多为稻-麦轮作体系,对稻茬小麦钾素吸收与利用特性的研究多以 7500 kg hm⁻² 产量水平的群体为对象^[6],而对 9000 kg hm⁻² 以上的高产小麦群体的钾素吸收、积累、分配与利用特性缺乏了解。本试验在长江中下游稻麦两熟制条件下,以中筋小麦扬麦 20 为材料,通过不同基本苗、氮肥施用量、施用时期和比例调控建立不同产量水平群体,分析其钾素积累动态、钾素吸收与利用差异及其与籽粒产量的关系,探讨稻茬小麦 9000 kg hm⁻² 高产

群体的钾素积累、分配与利用特性,为稻茬小麦大面积高产及高产栽培提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试品种

扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室试验场(119°42' N, 32°39' E)属亚热带湿润气候区,年平均温度 13.2~16.0℃、降雨量 800~1200 mm、日照 2000~2600 h、无霜期 220~240 d。试验年度气候条件见表 1。试验田前茬为水稻(产量 10 000 kg hm⁻²),土壤为轻壤土。2010—2011 年度小麦播种前 0~20 cm 土层含水解氮 65.81 mg kg⁻¹、速效磷 45.88 mg kg⁻¹、速效钾 101.98 mg kg⁻¹、有机质 15.5 g kg⁻¹; 2011—2012 年度小麦播种前 0~20 cm 土层含水解氮 65.56 mg kg⁻¹、速效磷 46.23 mg kg⁻¹、速效钾 102.05 mg kg⁻¹、有机质 15.9 g kg⁻¹。供试品种为中筋小麦扬麦 20,由江苏里下河地区农业科学研究所提供。

1.2 试验设计

采用四因素裂区设计,共 32 个处理,小区面积为 18 m²。以基本苗为主区,设 150 万株 hm⁻² (D1) 和 225 万株 hm⁻² (D2) 2 个水平;以施氮量(纯氮)为副区,设 210 kg hm⁻² (LN)和 262.5 kg hm⁻² (HN) 2 个水平;以施氮比例为裂区,设基肥 壮蘖肥 拔节肥 穗肥 3 1 3 3 (S3133)和 5 1 2 2 (S5122) 2 个水平;以穗肥追氮时期为裂裂区,设剑叶露尖 (T1)、孕穗期(T2)、抽穗期(T3)和开花期(T4) 4 个追

表 1 小麦不同生育阶段的积温、日照和降雨
Table 1 Accumulated temperatures, sunshine, and precipitation during various phases of wheat growth

生长阶段 Growing phase	日期 Date (month/day)	2010–2011			2011–2012		
		≥0 积温	日照	降水量	≥0 积温	日照	降水量
		≥0 temperature accumulation ()	Sunshine (h)	Precipitation (mm)	≥0 temperature accumulation ()	Sunshine (h)	Precipitation (mm)
播种–冬前 SD–BW	11/01–12/20	625	392	66	639	247	82
冬前–返青 BW–GT	12/20–2/20	116	338	18	155	237	43
返青–拔节 GT–EL	2/20–3/10	118	101	14	92	30	27
拔节–孕穗 EL–BT	3/10–4/20	510	299	43	543	229	113
孕穗–成熟 BT–MT	4/20–5/30	897	324	115	890	269	49
全生育期 Total	10/20–5/30	2266	1454	256	2319	1012	314

SD: seeding; BW: beginning of winter; GT: green-turning; EL: elongation; BT: booting; MT: maturity.

氮时期。播种前施用基肥, 四叶期施用壮蘖肥, 叶龄余数 2.5 时施用拔节肥; 磷肥(P_2O_5)及钾肥(K_2O)均为 130 kg hm^{-2} , 50%作为基肥, 50%作为拔节肥。2010—2012 两年度均于 11 月 1 日播种, 人工条播, 行距 30 cm, 三叶期定苗, 3 次重复。其余管理措施同大田高产栽培。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 钾素积累动态 分别于越冬始期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期和成熟期取样, 每小区取样面积 0.15 m^2 , 样品植株分器官, 于 105°C 杀青 1 h, 然后 80°C 烘至恒重, 测定干物重。烘干样品按生育期和器官分别磨碎, 称取 0.25 g, 用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮, 消煮液用火焰光度法测定植株样本含钾率^[3], 计算各器官钾素积累量及植株钾素(以 K_2O 计)积累总量。

1.3.2 产量及产量结构 成熟期分小区调查穗数、每穗粒数及千粒重, 收获 1.2 m^2 计产, 3 次重复, 折算成籽粒含水率为 13%时的产量。以 9000 kg hm^{-2} 为标准, 将高于该产量水平称为超高产(SHY), 低于该水平称为高产(HY)。

1.4 计算方法与统计分析

花后营养器官钾素转运量(kg hm^{-2}) = 开花期营养器官钾素积累量 - 成熟期营养器官钾素积累量^[11];
 100 kg 籽粒吸钾量(kg) = 植株钾素积累量/籽粒产量 $\times 100$ ^[12]; 钾素利用效率(kg kg^{-1}) = 籽粒产量/植株钾素积累量^[12]; 钾素收获指数 = 籽粒钾素积累量/植株钾素积累量^[12]。

采用 SPSS 15.0 软件进行方差分析(ANOVA), 用 LSD 法检验差异显著性。采用线性方程 $y = ax + b$ 拟合不同生育期、生育阶段及器官的钾素积累量、花后钾素转运量与产量的关系。用 SigmaPlot 10.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理籽粒产量

方差分析表明, 影响籽粒产量的基本苗、施氮量、施氮比例及追氮时期, 处理间存在极显著差异, 基本苗 $\times$ 施氮量、基本苗 $\times$ 施氮量 $\times$ 施氮比例对产量的互作效应均达极显著水平, 且对产量的互作效应在年度间表现有所差异(表2)。各处理2010—2011年

表 2 小麦产量在不同处理下的方差分析
 Table 2 Analysis of variance for grain yield of wheat among different treatments

变异来源 Source of variation	自由度 <i>df</i>	方差 <i>SS</i>	均方 <i>MS</i>	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value
年度 Year (Y)	1	12529638.59	12529638.59	457.10**
基本苗 Plant density (D)	1	833508.50	833508.50	30.41**
施氮量 Nitrogen amount (N)	1	5148804.36	5148804.36	187.84**
D $\times$ N	1	614827.71	614827.71	22.43**
Y $\times$ N	1	6019565.48	6019565.48	219.6**
Y $\times$ D $\times$ N	1	509811.02	509811.02	18.60**
施氮比例 Nitrogen split ratio (S)	1	5011145.30	5011145.30	182.81**
D $\times$ S	1	394913.24	394913.24	14.41**
N $\times$ S	1	3462318.50	3462318.50	126.31**
D $\times$ N $\times$ S	1	208905.88	208905.88	7.62**
Y $\times$ S	1	106590.15	106590.15	3.89*
Y $\times$ D $\times$ S	1	223029.06	223029.06	8.14**
Y $\times$ N $\times$ S	1	381715.37	381715.37	13.93**
Y $\times$ D $\times$ N $\times$ S	1	286823.20	286823.20	10.46**
追氮时期 Nitrogen topdressing time (T)	3	3296464.98	1098821.66	40.09**
D $\times$ T	3	852889.41	284296.47	10.37**
N $\times$ T	3	6334869.33	2111623.11	77.04**
S $\times$ T	3	726055.77	242018.59	8.83**
Y $\times$ T	3	3290346.93	1096782.31	40.01**
Y $\times$ D $\times$ T	3	777701.22	259233.74	9.46**
Y $\times$ N $\times$ T	3	8738480.55	2912826.85	106.26**
Y $\times$ S $\times$ T	3	403190.55	134396.85	4.90**
Y $\times$ D $\times$ N $\times$ T	3	1008426.57	336142.19	12.26**
总和 Total	191	65725444.02		

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

度的籽粒产量为 7846.16~9568.60 kg hm⁻², 2011—2012 年的产量为 6573.19~9172.59 kg hm⁻²。2010—2011 年度共有 4 个处理达到超高产水平, 而 2011—2012 年度仅有 1 个处理产量高于 9000 kg hm⁻² (表 3)。综合两年结果, 在较高密度(225 万株 hm⁻²)和氮肥适当后移(3 1 3 3)条件下, 且穗肥不晚于孕穗期, 可以达到或有望达到超高产水平; 而高施氮量(262.5 kg hm⁻²)的高产效果不明显。

2.2 不同产量水平群体钾素吸收积累差异

2.2.1 钾素积累量变化动态 扬麦20 超高产和高产群体整个生育期的钾素积累量变化均呈“S”型曲线, 即出苗至返青期缓慢积累, 返青期至开花期快速积累, 开花期至成熟期少量流失(图 1)。两年度不同群体间钾素积累量在越冬始期、返青期、拔节期差异均不显著; 超高产群体开花期、成熟期钾素积累量极显著高于高产群体, 2010—2011 年度分别平均为 445.18 kg hm⁻² 和 389.46 kg hm⁻², 较高产群

体分别高 12%和 16%。

两年度开花期、成熟期钾素积累量与产量均呈极显著线性正相关(图2)。越冬始期、返青期、拔节期钾素积累量2011—2012年度极显著高于2010—2011年度, 开花期、成熟期钾素积累量年度间差异不显著。综合两年度结果, 超高产群体钾素积累量在开花期和成熟期分别为430~450 kg hm⁻²和366~408 kg hm⁻², 说明超高产群体在拔节期前应有较高的钾素积累量, 但关键是增加开花期和成熟期的钾素积累量。

2.2.2 主要生育阶段钾素积累量和吸收比例 不同群体主要生育阶段钾素积累量和吸收比例均呈逐渐增加趋势, 最高峰均出现在拔节至开花期, 开花期至成熟期钾素少量流失(图 3)。超高产群体拔节期至开花期钾素积累量和吸收比例分别为 235~311 kg hm⁻² 和 52%~68%, 开花期至成熟期钾素流失量和流失比例分别为 51~64 kg hm⁻² 和 11%~15%。不同群体间各生育阶段钾素积累量和吸收比例差异均不显著。

表 3 不同处理下小麦籽粒产量
Table 3 Grain yield of wheat under different treatments (kg hm⁻²)

氮肥管理 Nitrogen management			2010-2011		2011-2012	
			D1	D2	D1	D2
LN	S3133	T1	8423.37 cde	9100.48 bc	8366.95 d	9172.59 a
		T2	8617.03 bcd	8719.67 cde	8481.95 bc	8873.59 b
		T3	8396.15 cde	8527.49 def	7995.05 f	8603.64 c
		T4	8355.45 cde	8454.87 def	7893.12 gh	8289.76 ef
	S5122	T1	8604.52 bcd	8533.89 def	8551.76 b	8786.36 b
		T2	8640.47 bc	8675.90 cde	8510.92 b	8612.49 c
		T3	8668.61 bc	8869.46 cd	8103.19 e	8450.17 d
		T4	8418.63 cde	8083.18 f	7848.10 h	8040.97 h
HN	S3133	T1	8844.83 b	9568.60 a	7376.66 j	6908.21 k
		T2	9480.69 a	9345.30 ab	7716.87 i	8067.17 h
		T3	8429.65 cde	8871.06 cd	8642.80 a	8377.28 de
		T4	8569.43 bcd	8559.85 def	8429.78 cd	8139.90 gh
	S5122	T1	7846.16 f	8272.33 ef	6573.19 l	6722.04 l
		T2	8872.63 b	8327.86 def	7249.70 k	7693.48 i
		T3	8227.6 def	8094.41 f	8104.37 e	8222.11 fg
		T4	8147.09 ef	8057.49 f	7934.39 fg	7516.34 j

D1 = 150 万株 hm⁻², D2 = 225 万株 hm⁻²; LN = 纯氮 210.0 kg hm⁻², HN = 纯氮 262.5 kg hm⁻²; S3133 = 基肥:壮蘖肥:拔节肥:穗肥 3:1:3:3, S5122 = 基肥:壮蘖肥:拔节肥:穗肥 5:1:2:2; T1~T4 = 穗肥施用时期为剑叶露尖、孕穗期、抽穗期和开花期。数据后不同字母表示不同氮肥处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

D1 = 150×10^4 plants hm⁻², D2 = 225×10^4 plants hm⁻²; LN = pure N of 210.0 kg hm⁻², HN = pure N of 262.5 kg hm⁻²; S3133 = N fertilizer split ratio of 3 (basal): 1 (tillering): 3 (elongation): 3 (panicle development), S5122 = N fertilizer split ratio of 5 (basal): 1 (tillering): 2 (elongation): 2 (panicle development); T1~T4 = the last part of N fertilizer applied at flag leaf emergence, booting, heading, and anthesis stage, respectively. Significant difference among treatments of nitrogen management is indicated with different letters after data ($P < 0.05$).

图1 不同产量水平群体钾素积累动态

Fig. 1 Dynamics of potassium accumulation amount in different yield level populations

EM: 出苗期; BW: 越冬始期; GT: 返青期; EL: 拔节期; AN: 开花期; MT: 成熟期。

ns 和 ** 分别表示 HY 和 SHY 群体间差异不显著 ($P > 0.05$) 和差异极显著 ($P < 0.01$)。EM: emergence; BW: beginning of winter; GT: green-turning; EL: elongation; AN: anthesis; MT: maturity. "ns" and "***" indicate no significant ($P > 0.05$) and extremely significant difference ($P < 0.01$) between HY and SHY populations, respectively.

图2 小麦开花期和成熟期钾素积累量与产量的关系

Fig. 2 Relationship between grain yield and potassium accumulation amount (KAA) at anthesis and maturity stages of wheat

出苗至越冬始期、越冬始期至返青期及返青期至拔节期阶段钾素积累量和吸收比例年度间差异达显著水平, 拔节期至开花期钾素积累量和吸收比例年度间差异达显著水平, 开花期至成熟期钾素流失量及流失比例年度间差异不显著。说明超高产群体在出苗至返青期钾素积累量较低, 拔节期至开花期具有钾素高吸收的特点, 吸收的钾素占一生吸收钾素的52%~68%, 花后钾素少量流失。

2.3 不同产量水平群体不同器官钾素积累、分配和转运及其与产量的关系

2.3.1 成熟期钾素在不同器官中的积累与分配

不同群体成熟期茎鞘钾素积累量在各器官中最高, 叶片、颖壳+穗轴及籽粒钾素积累量各有高低。两年度超高产群体成熟期叶片、茎鞘、颖壳+穗轴和籽粒钾素积累量均显著高于高产群体, 2010—2011

年度分别为47.01、259.07、43.68和39.71 kg hm⁻², 较高产群体分别高25%、13%、31%和17%。两年度成熟期叶片、茎鞘、颖壳+穗轴和籽粒钾素积累量与籽粒产量均呈极显著线性正相关(图4)。成熟期叶片、颖壳+穗轴和籽粒钾素积累量2011—2012年度显著低于2010—2011年度, 茎鞘钾素积累量2011—2012年度显著高于2010—2011年度。综合两年度试验结果表明, 超高产群体成熟期叶片、茎鞘、颖壳+穗轴和籽粒钾素积累量分别为46~49、244~269、40~46和35~46 kg hm⁻²。

2.3.2 花后营养器官钾素的转运量 两年度花后总的营养器官钾素转运量不同群体间差异不显著, 超高产群体分别平均为 95.42 kg hm⁻² 和 100.21 kg hm⁻²。花后总的营养器官钾素转运量与产量呈散点分布(图5)。花后总的营养器官钾素转运量年度间差异不

图 3 不同产量水平群体不同生育阶段钾素积累量及吸收比例差异

Fig. 3 Differences of potassium accumulation amount and percentage under different yield level populations during various growing phases

EM: 出苗期; BW: 越冬始期; GT: 返青期; EL: 拔节期; AN: 开花期; MT: 成熟期. ns 表示 HY 和 SHY 群体间差异不显著 ($P > 0.05$).

EM: emergence; BW: beginning of winter; GT: green-turning; EL: elongation; AN: anthesis; MT: maturity. "ns" indicates no significant difference ($P > 0.05$) between HY and SHY populations

显著。

不同群体花后叶片和茎鞘钾素均呈输出状态, 穗轴+颖壳钾素呈积累状态。两年度不同群体间花后叶片钾素转运量差异不显著; 超高产群体花后茎鞘和穗轴+颖壳钾素转运量均显著高于高产群体, 2010—2011 年度平均为 47.66 kg hm^{-2} 和 $-12.80 \text{ kg hm}^{-2}$, 较高产群体分别高 38% 和 57%。两年度花后叶片钾素转运量与产量均呈散点分布; 花后茎鞘钾素转运量与产量均呈极显著线性正相关, 花后颖壳+穗轴钾素转运量与产量呈极显著线性负相关 (图 5)。2011—2012 年度花后茎鞘钾素转运量显著低于 2010—2011 年度, 花后叶片及穗轴+颖壳钾素转运量年度间差异不显著。综合两年度试验结果表明, 超高产群体花后总的营养器官、叶片、茎鞘和颖壳+穗轴钾素转运量分别为 $91 \sim 100$ 、 $55 \sim 63$ 、 $46 \sim 52$ 和 $9 \sim 17 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

2.4 不同产量水平群体 100 kg 籽粒吸钾量、钾素利用效率、钾收获指数的差异

两年度不同群体 100 kg 籽粒吸钾量、钾素利用效率和钾素收获指数分别为 $4.11 \sim 5.13 \text{ kg}$ 、 $19.49 \sim 23.21 \text{ kg kg}^{-1}$ 和 $0.080 \sim 0.113$, 其中超高产群体分别变动在 $4.54 \sim 4.87 \text{ kg}$ 、 $20.56 \sim 22.02 \text{ kg kg}^{-1}$ 和 $0.095 \sim 0.112$, 与高产群体差异均不显著。100 kg 籽粒吸钾量 2011—2012 年度显著高于 2010—2012 年度, 钾素利用效率及钾素收获指数 2011—2012 年度显著低于 2010—2012 年度。

3 讨论

3.1 稻茬小麦籽粒产量 9000 kg hm^{-2} 高产群体钾素吸收、积累与分配特性

小麦产量的形成需要在生育各阶段吸收、积累与产量相适应的营养物质, 并合理分配于各营养器

图 4 成熟期钾素在不同器官中的积累量与籽粒产量的关系

Fig. 4 Relationship between grain yield and potassium accumulation amount (KAA) in different organs at maturity stage

官中, 以满足各器官的生理代谢活动。韩燕来等^[9]研究发现, 9000 kg hm⁻² 高产旱茬小麦整个生育期钾素积累呈单峰曲线变化, 以扬花期积累量最大, 达 518.55 kg hm⁻², 花后钾素有所外排; 余松烈等^[8]试验表明, 8693 kg hm⁻² 高产旱茬小麦拔节至挑旗阶段为钾素吸收强度高锋期, 平均达 2.66 kg hm⁻² d⁻¹, 成熟期钾素累积吸收量达 353.85 kg hm⁻²; 于振文等^[10]指出, 黄淮麦区 9000 kg hm⁻² 高产麦田每公顷吸收 K₂O 的数量高于一般高产麦田, 达 276~316 kg hm⁻²; 杜世州等^[13]研究表明 9000 kg hm⁻² 高产旱茬小麦钾吸收量为 224.69~305.28 kg hm⁻²。可见, 小麦一生钾素总吸收量因品种、生态环境、土壤类型等而异, 而 9000 kg hm⁻² 高产群体钾素吸收总量较一般高产群体进一步增加的结论基本一致。凌启鸿等^[7]综合分析江苏省不同生态区研究结果, 认为产量 7500 kg hm⁻² 的小麦群体, 需吸 K₂O 240 kg hm⁻² (210~300 kg hm⁻²), 扬州地区产量 9000 kg hm⁻² 的小麦群体, 约需吸 K₂O 430 kg hm⁻²。本试验以扬麦 20 为材料, 通过基本苗和氮肥运筹(氮肥施用量、施用时期和比例)

调控建立稻茬小麦不同产量水平群体, 受 2010—2012 小麦生长季不同气候条件, 尤其是降雨的影响, 年度间不同处理下产量有所差异; 稻茬小麦群体整个生育期钾素积累量呈“S”型动态变化, 超高产群体钾素吸收高峰期出现在拔节至开花期, 吸收的钾素占一生吸收钾素的 52%~68%; 开花期和成熟期钾素积累量均极显著高于高产群体。这一结果与前人研究结果基本一致。超高产群体开花期和成熟期钾素积累量分别为 430~450 kg hm⁻² 和 366~408 kg hm⁻²。周玲等^[14]认为, 较低的花后钾素流失量是旱地冬小麦品种高产的重要原因, 而本研究结果与此不尽相同, 是否由于长江中下游麦区小麦生育后期降雨频繁, 钾素被水淋失量大所致, 尚需进一步研究。

韩燕来等^[9]研究认为, 高产旱茬小麦孕穗末期后钾素的分配重心在茎秆, 花后转移至籽粒; 周玲等^[14]认为旱地高产冬小麦品种籽粒对钾的保持能力较高。本试验结果表明, 稻茬小麦成熟期叶片、茎鞘、颖壳+穗轴和籽粒钾素积累量与籽粒产量均呈极显著线性正相关, 超高产群体分别为 46~49、244~

图5 花后不同营养器官钾素的转运量与籽粒产量的关系

Fig. 5 Relationship between potassium translocation amount (KTA) from different organs to grains and grain yield of wheat

269、40~46 和 35~46 kg hm⁻²。对其他高产小麦品种的钾素吸收规律尚待研究。

3.2 稻茬小麦籽粒产量 9000 kg hm⁻² 高产群体钾素转运特性

周玲等^[14]认为旱地高产冬小麦品种花后钾素转移量无明显优势; 韩燕来等^[9]研究认为 9000 kg hm⁻² 高产旱茬小麦到收获时叶+叶鞘和茎中转移出的钾素分别占最大积累量的 60.2%和 24.9%, 颖壳+穗轴在孕穗末期即开始转移, 籽粒是钾素的输入器官。本试验结果表明, 稻茬小麦不同产量水平群体间花后总的营养器官及叶片钾素转运量差异不显著。花后茎鞘钾素转运量与产量呈极显著线性正相关, 颖壳+穗轴钾素转运量与产量呈极显著线性负相关。超高产群体花后茎鞘钾素转出量为 46~52 kg hm⁻², 颖壳+穗轴钾素积累量为 9~17 kg hm⁻²。

3.3 稻茬小麦籽粒产量 9000 kg hm⁻² 高产群体钾素利用特性

营养元素的利用效率反映了作物利用吸收的营

养元素生产最大物质质量或产量的能力^[15]。Damon 等^[16]认为钾高效品种更具持续增产潜力; Pettigrew 等^[1]认为增加钾素的吸收或提高钾素利用效率均可以有效提高作物产量; 国内试验表明, 9000 kg hm⁻² 高产旱茬小麦 100 kg 籽粒吸钾量为 2.89~3.89 kg^[9-10,17], 钾收获指数为 0.122~0.135^[10,17]; 凌启鸿等^[6]认为, 7500~9300 kg hm⁻² 高产群体 100 kg 籽粒吸钾量为 2.77~4.62 kg, 且表现出产量越高, 吸钾量越大; 赵俊晔等^[18]试验表明, 黄淮麦区 8000 kg hm⁻² 高产旱茬小麦钾素利用效率为 22.26~31.08 kg kg⁻¹, 钾收获指数为 0.119~0.132。在本试验中, 稻茬小麦超高产群体 100 kg 籽粒吸钾量为 4.57~4.87 kg, 钾素利用效率为 20.56~22.02 kg kg⁻¹, 钾收获指数为 0.095~0.112, 与高产群体差异均不显著。说明与黄淮麦区旱茬小麦相比, 稻茬小麦钾素吸收效率较高, 但利用效率较低, 关于稻茬小麦超高产群体如何在保证高钾素吸收效率的基础上提高钾素利用效率尚待研究。

4 结论

稻茬小麦超高产群体与高产群体相比, 拔节期前钾素积累量差异不显著, 拔节至开花期、开花期及成熟期钾素积累量较高; 成熟期茎鞘及籽粒钾素积累量较高; 花后总的营养器官钾素转运量差异不显著, 花后茎秆钾素转运量较高; 100 kg 籽粒吸钾量、钾素利用效率及收获指数差异不显著。9000 kg hm⁻² 以上超高产群体在开花期和成熟期的钾素积累量分别为 430~450 kg hm⁻² 和 366~408 kg hm⁻², 成熟期茎鞘和籽粒钾素积累量分别为 244~269 kg hm⁻² 和 35~46 kg hm⁻², 花后茎鞘钾素转出量为 46~52 kg hm⁻²。

References

- [1] Pettigrew W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiol Plant*, 2008, 133: 670–681
- [2] Damon P M, Ma Q F, Rengel Z. Wheat genotypes differ in potassium accumulation and osmotic adjustment under drought stress. *Crop Pasture Sci*, 2011, 62: 550–555
- [3] Zhang G P, Chen J X, Eshetu A T. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in wheat. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 1999, 54: 41–48
- [4] Wong M T F, Corner R J, Cook S E. A decision support system for mapping the site-specific potassium requirement of wheat in the field. *Aust J Exp Agric*, 2001, 41: 655–661
- [5] Roshania G A, Narayanasamy G. Effects of potassium on temporal growth of root and shoot of wheat and its uptake in different soils. *Int J Plant Prod*, 2010, 4: 25–32
- [6] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000. pp 271–276
Lin Q H. Crop Population Quality. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2000. pp 271–276 (in Chinese)
- [7] 谭金芳, 介晓磊, 韩燕来, 郑义. 潮土区超高产麦田供钾特点与小麦钾素营养研究. 麦类作物学报, 2001, 21(1): 45–50
Tan J F, Jie X L, Han Y L, Zheng Y. Study on potassium supplying properties in super-high yield wheat field in Chao soil region and potassium nutrition characteristics of wheat. *J Triticeae Crops*, 2001, 21(1): 45–50 (in Chinese with English abstract)
- [8] 余松烈, 靳新华, 刘希运. 高产冬小麦对三要素的吸收和供应特点的研究. 土壤肥料, 1981, (1): 31–34
Yu S L, Qi X H, Liu X Y. Studies on absorption and supply characteristics of three elements in high-yield winter wheat. *Soils Fert*, 1981, (1): 31–34 (in Chinese)
- [9] 韩燕来, 介晓磊, 谭金芳, 郭天财, 朱云集, 王晨阳, 夏国军, 刘征. 超高产冬小麦氮磷钾吸收、分配与运转规律的研究. 作物学报, 1998, 24: 908–915
Han Y L, Jie X L, Tang J F, Guo T C, Zhu Y J, Wang C Y, Xia G J, Liu Z. Studies on absorption, distribution and translocation of N, P and K of super-high yield winter wheat. *Acta Agron Sin*, 1998, 24: 908–915 (in Chinese with English abstract)
- [10] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 岳寿松, 王东, 段藏禄, 段玲玲, 王志军, 牛运生. 黄淮麦区冬小麦超高产栽培的理论与实践. 作物学报, 2002, 28: 577–585
Yu Z W, Tian Q Z, Pan Q M, Yue S S, Wang D, Duan Z L, Duan L L, Wang Z J, Niu Y S. Theory and practice on cultivation of super high yield of winter in the wheat fields of Yellow River and Huaihe River districts. *Acta Agron Sin*, 2002, 28: 577–585 (in Chinese with English abstract)
- [11] 王强盛, 甄若宏, 丁艳锋, 吉忠军, 曹卫星, 黄丕生. 钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响. 中国农业科学, 2004, 37: 1444–1450
Wang Q S, Zhen R H, Ding Y F, Ji Z J, Cao W X, Huang P S. Effects of potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain quality of japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2004, 37: 1444–1450 (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang H M, Yang X Y, He X H, Xu M G, Huang S M, Liu H, Wang B R. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China. *Pedosphere*, 2011, 21: 154–163
- [13] 杜世州, 曹承富, 张耀兰, 赵竹, 乔玉强, 刘永华, 张四华. 氮素运筹对淮北市超高产小麦养分吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17: 9–15
Du S Z, Cao C F, Zhang Y L, Zhao Z, Qiao Y Q, Liu Y H, Zhang S H. Effects of nitrogen application on nitrogen absorption, utilization in super-high-yielding wheat in Huaibei region. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17: 9–15 (in Chinese with English abstract)
- [14] 周玲, 赵护兵, 王朝辉, 孟晓瑜, 王建伟, 陈辉林, 李小涵. 不同产量水平旱地冬小麦品种氮磷钾养分积累与转移的差异分析. 中国生态农业学报, 2011, 19: 318–325
Zhou L, Zhao H B, Wang Z H, Meng X Y, Wang J W, Chen H L, Li X H. NPK accumulation and translocation in dryland winter wheat cultivars with different yields. *Chin J Eco-Agric*, 2011, 19: 318–325 (in Chinese with English abstract)
- [15] Swiader J M, Chyana Y, Freijia F G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. *J Plant Nutr*, 1994, 17: 1687–1699
- [16] Damon P M, Rengel Z. Wheat genotypes differ in potassium efficiency under glasshouse and field conditions. *Aust J Agric Res*, 2007, 58: 816–825
- [17] 于振文, 梁晓芳, 李延奇, 王雪. 施钾量和施钾时期对小麦氮素和钾素吸收利用的影响. 应用生态学报, 2007, 18: 69–74
Yu Z W, Liang X F, Li Y Q, Wang X. Effects of potassium application rate and time on the uptake and utilization of nitrogen and potassium by winter wheat. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18: 69–74 (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 王雪. 施氮量对小麦氮磷钾养分吸收利用和产量的影响. 西北植物学报, 2006, 26: 98–103
Zhao J Y, Yu Z W, Li Y Q, Wang X. Effects of different nitrogen rates of fertilization on nitrogen, phosphorous and potassium uptakes and utilizations as well as kernel yield of wheat under high yield circumstances. *Bot Boreali-Occident Sin*, 2006, 26: 98–103 (in Chinese with English abstract)