植物营养与肥料学报 2013,19(2):274-287
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0202

超高产冬小麦对钾的吸收、积累和分配

党红凯[1,2], 李瑞奇[1], 李雁鸣[1*], 孙亚辉[1,3], 张馨文[1], 孟 建[1]
(1 河北农业大学农学院,河北省作物生长调控重点实验室,河北保定 071000; 2 河北省农林科学院旱作农业研究所,河北衡水 053000; 3 河北联合大学轻工学院,河北唐山 063000)

摘要: 为明确超高产(9000 kg/hm^2 左右)冬小麦的钾营养特点和为确定施钾技术提供理论依据, 2004～2005 年、2005～2006 年通过田间试验在 2 个小麦生长季分别种植 4 个品种,在小麦生长的各生育时期取植株样品,分析不同器官钾的浓度。结果表明,小麦全生育期地上部不同器官中钾(K_2O)浓度为 0.21%～3.84%(干重)。各器官均是在形成初期或早期含钾量最高,之后直到成熟期都在不同程度地下降。各生育时期钾浓度最高的器官随生长中心转移而更替。在所有器官中,开花前叶片中钾的积累量和分配率最高,其中拔节前钾在叶片中的分配率达 50%或以上; 开花后茎秆中钾的积累量和分配率最高,成熟期钾在茎秆中的分配率达 35.6%～45.3%。同一年份不同品种各器官的钾浓度及全生育期钾的总积累量有一定差异,但差异不显著,表明产量在 9000 kg/hm^2 左右的不同品种具有相似的钾素营养特性。小麦植株对钾的总积累量在开花期达到最高值为 181.7～230.7 kg/hm^2,每生产 100 kg 籽粒需吸收钾 2.0～2.6 kg,钾生产效率为 35.36～55.58 kg/kg。小麦对钾的吸收以生育中期(起身至开花)最高,前期(出苗至起身)次之,后期(开花至成熟)为负积累。根据本研究小麦钾素的营养特点,在小麦秸秆还田基础上,9000 kg/hm^2 左右超高产小麦的钾肥施用量应不低于 K_2O 90 kg/hm^2。

关键词: 超高产; 冬小麦; 钾; 吸收; 积累; 分配
中图分类号: S512.1+1.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)02-0274-14

Absorption, accumulation and distribution of potassium in super highly-yielding winter wheat

DANG Hong-kai[1,2], LI Rui-qi[1], LI Yan-ming[1*], SUN Ya-hui[1,3], ZHANG Xin-wen[1], MENG Jian[1]
(*1 College of Agronomy, Agricultural University of Hebei/Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000, China; 2 Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui; Hebei 053000, China; 3 College of Light Industry, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063000, China*)

Abstract: In order to clarify the characteristics of potassium nutrition in super highly-yielding (≥ 9000 kg/ha) winter wheat, and to provide experimental basis for potassium application, field experiments were conducted in Gaocheng County, Hebei Province from 2004 to 2006. Four winter wheat cultivars, Shimai14, Shimai12, Jifeng703 and Shixin828 during 2004-2005, and four cultivars, Temai1, Shimai12, Shixin531 and Shixin828 during 2005-2006, were used as experimental cultivars. Plant samples were collected from the plots at different growth stages and used to determine potassium concentration in laboratory. The results show that the concentrations of potassium (K_2O) in various above-ground organs of wheat are from 0.21% to 3.84% (dry weight) during the whole growing period. For the above-ground organs, the highest concentrations of potassium appear as early as they formed or at their early period of life, then the concentrations of potassium decrease until the maturity. The organs with the highest concentration of potassium succeed with the turnover of growth center at various growth stages. Before the anthesis, the accumulation amount and distribution percentage of potassium in leaf blades are the highest among all organs, and the distribution percentage of potassium in leaf blades can reach to 50% or higher before the

收稿日期: 2012-08-26 **接受日期:** 2012-12-11
基金项目: 国家科技支撑计划项目"粮食丰产科技工程"课题(2006BAD02A08,2011BAD16B08)资助。
作者简介: 党红凯(1979—),男,河北巨鹿人,博士,助理研究员,主要从事作物节水节肥栽培生理研究。E-mail: wheatcrop@126.com
* 通信作者 E-mail: liym315@126.com

jointing. After the anthesis, however, the accumulation amount and distribution percentage of potassium in stems are the highest, and the distribution percentage of potassium in stems are from 35.6%-45.3% at the maturity. The concentrations of potassium in various organs and the total accumulation amounts of potassium during the growing period for different wheat cultivars in a growing year are different, but usually insignificant, which indicate similar characteristics of potassium nutrition for different cultivars with the yield ≥ 9000 kg/ha. The total accumulation amount of potassium in wheat plants reaches the highest value 181.7-230.7 kg/ha at the anthesis. The amount of potassium required for the formation of 100 kg grain is from 2.0 to 2.6 kg. The potassium production efficiency (defined as the grain production per unit of K_2O absorbed) is from 35.36-55.58 kg/kg. The period with the highest potassium absorption is from the double ridge to the anthesis and then the period from the seedling emergence to the double ridge, and after the anthesis, however, potassium presents negative accumulation. According to the characteristics of potassium nutrition, the potassium fertilizer amount applied for super highly-yielding winter wheat with a grain yield 9000 kg/ha should not be less than K_2O 90 kg/ha under the conditions of straw returning to soil.

Key words: super highly-yielding; winter wheat; potassium; absorption; accumulation; distribution

钾营养对作物的重要性,表现在钾对产量与品质的影响和作物对钾的大量吸收[1]。与氮、磷不同,钾在小麦体内以 K^+ 形态存在,不参与有机物质的形成,具有高度移动性[2]。钾供应充足有利于小麦茎秆厚角组织、维管束的形成和发育,提高抗倒伏能力[3],提高叶片光合速率,促进光合产物转化并向生长器官运输,提高粒重和产量[4-5]。钾还能促进籽粒中游离氨基酸转化为蛋白质,改善籽粒营养品质和加工品质[6-7]。

由于钾具有上述生理功能,小麦对钾的吸收、积累和分配特点,关系到小麦的生长发育与钾肥施用技术的确定。前人研究发现,小麦对钾的吸收受土壤供钾水平和钾肥施用量等多种因素的影响[8-9]。于振文等[10]研究表明,在0—20 cm 土层速效钾含量为79.0 mg/kg 的条件下,施钾后小麦植株的钾积累量显著提高;土壤速效钾达 118.5 mg/kg 时,施钾后小麦植株的钾积累量没有提高。谭金芳等[7]研究发现,在耕层速效钾含量为98.2 mg/kg 的条件下适当提高施钾量,能提高小麦钾的积累量和产量,改善籽粒品质。河北平原是我国小麦的重要产区,随着生产的发展,该区小麦产量不断提高,小麦对钾的吸收量也随产量水平的提高而增加[11],因此钾肥施用也越来越受到重视。然而,有关河北平原 9000 kg/hm² 及其以上超高产冬小麦对钾的吸收特点方面的研究还尚未见报道。由于中国钾肥资源匮乏[12],要保持小麦的可持续生产,从节约资源和维持投入与产出平衡的角度出发,需要进一步明确钾元素的需求特点。本研究以河北平原超高产(9000 kg/hm²)冬小麦品种为对象,研究其对钾的吸收、积累和分配特点,旨在为明确超高产小麦的需钾规律以及优化钾肥施用技术提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

田间试验分别于2004～2005 年、2005～2006 年2 个小麦生长季在河北省藁城市进行。前作夏玉米及此前的小麦、玉米两茬作物已连续多年秸秆全量还田。在施底肥前多点取样测定 0—20 cm 土层的土壤养分含量,其有机质含量为 16.9 ～ 22.4 g/kg,全氮 0.75 ～0.97 g/kg,速效氮 116.9 ～135.4 mg/kg,速效磷 20.4 ～ 59.9 mg/kg,速效钾(醋酸铵浸提法[13])108.3 ～ 154.5 mg/kg。小麦基肥施用量为尿素(含 N 46%) 150 kg/hm²,磷酸二铵(含 N 18%、P_2O_5 46%) 300 kg/hm²,氯化钾(含 K_2O 60%)150 kg/hm²;拔节期追施尿素 300 kg/hm²。折合总施肥量为 N 261 kg/hm²、P_2O_5 138 kg/hm²、K_2O 90 kg/hm²。

供试小麦品种为具有 9000 kg/hm² 产量潜力的冬小麦品种。2004 ～2005 年 4 个品种为石麦 14、石麦 12、冀丰 703 和石新 828,10 月 3 日播种; 2005 ～2006 年 4 个品种为特麦 1 号、石麦 12、石新 531 和石新 828,10 月 6 日播种。采用各品种审定时推荐的适宜基本苗。每个品种种植面积均为 1 hm²,分为相等的 3 个地块(3333 m²),取样时作为 3 次重复。2 年小麦的籽粒产量为 8750.9 ～ 9637.5 kg/hm²,达到或接近超高产(9000 kg/hm²)水平,其产量及相关产量性状结果见表 1。

表1 不同品种的小麦产量及其相关性状

Table 1 Grain yield and yield-related traits in different cultivars of wheat

年度 Year	品种 Cultivar	基本苗 Basic seedling ($\times10^4/hm^2$)	穗数 Spike number ($\times10^4/hm^2$)	穗粒数 Grains per spike (No./spike)	千粒重 1000-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm^2)
2004～2005	石麦14 Shimai 14	257.0 b	736.5 b	31.4 ab	40.8 a	9057.7 a
	石麦12 Shimai 12	313.5 a	742.9 b	34.1 a	40.2 ab	9029.0 a
	冀丰703 Jifeng 703	312.3 a	851.0 a	29.0 b	41.4 a	9122.7 a
	石新828 Shixin 828	326.7 a	812.5 a	32.8 ab	38.7 b	9400.5 a
2005～2006	特麦1 Temai 1	396.8 a	473.7 b	48.4 a	44.6 a	9637.7 a
	石麦12 Shimai 12	344.7 a	813.9 a	34.3 c	37.5 c	9195.0 a
	石新531 Shixin 531	233.2 b	547.0 b	37.5 b	42.0 b	8751.0 a
	石新828 Shixin 828	298.2 b	729.3 a	31.3 c	42.7 b	8855.1 a

注(Note)：同列数据后不同字母表示每个年度品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the four cultivars in each growing year at the 5% level.

1.2 测定项目和方法

各主要生育时期在田间按5点法取样，苗期每个样本取50株，成株后取30株。将植株按当时的不同器官分开，于烘箱中105℃杀青30 min，80℃烘干至恒重。冷却后各器官分别称量，并根据基本苗和取样株数计算各器官每公顷的总重量，用以计算钾的积累量。

植株样品粉碎后用硫酸—双氧水法消煮，WGH－1A型火焰光度计测定钾浓度[13]。

2 结果与分析

2.1 地上部各器官中钾的吸收、积累和分配

2.1.1 小麦植株内钾浓度的变化动态 由表2可见，2年中各小麦生育时期同一器官的钾浓度差别较大，2004～2005年各器官的钾浓度均高于2005～2006年的同一器官，但2年的变化趋势相似。2年中各生育时期不同器官的钾(K_2O)浓度为0.21%～3.84%(干重)。同类器官不同时期比较，各器官都是在形成初期或早期钾浓度最高，之后直到成熟期都有不同程度地下降。各时期钾浓度最高的器官随生长中心转移而更替，冬前和起身期多数品种叶鞘中的钾浓度高于叶片；拔节期茎秆中钾浓度最高，表现为茎秆＞叶鞘＞叶片；孕穗期和开花期叶片、叶鞘和茎秆中的钾浓度差别较小，但都高于穗部；成熟期茎秆＞叶鞘＞叶片＞穗部，2005年穗部的钾浓度高于籽粒，2006年穗部的钾浓度低于籽粒。不同品种各器官中的钾浓度的变化趋势基本一致，尤其在生育后期不同品种相同器官中的钾浓度差异多不显著。总体来看，不同品种各器官中钾浓度的差异较小，表现出超高产条件下不同品种的共性。

2.1.2 地上部各器官中钾的积累量 由表3可以看出，小麦地上部各器官中钾的积累量，开花以前叶片中最高，开花以后茎秆中最高。2个年度不同生育时期各器官钾积累量比较，2004～2005年叶片钾积累量在开花期达到最高值，而2005～2006年孕穗期出现最高值。2年中叶鞘的钾积累量均在孕穗期达到最大值，之后逐渐降低，总体变化趋势与叶片相同。茎秆中钾积累量从拔节到开花期递增，开花期达到最大值以后一直下降。穗部钾积累量在开花期最高。籽粒钾积累量从开花后10 d逐渐增加，成熟期达到最大值。同一年份不同品种仅在个别生育时期个别器官的钾积累量差异显著，显示出不同品种钾积累量的共性特征。

2.1.3 不同生育时期钾在各器官中的分配 表4显示，钾在拔节前主要分配在叶片中，达50%或以上，其次为叶鞘。拔节期以后，钾在叶片中的分配比例迅速下降，到成熟期降至7.2%～16.1%。拔节期以后钾在茎秆中的分配比例逐渐增加，尤其在成熟期钾在茎秆中的分配比例高于其他器官，达到35.6%～45.3%。钾在穗部(开花后不包括籽粒)的分配比例始终处于较低水平，在9%以下。钾在籽粒中的分配比例从开花后10 d开始逐渐升高，成熟期达到最高值为19.5%～37.7%。总体来看，生

表 2　小麦不同器官总干物质中钾(K_2O)的浓度(%)

Table 2　Potassium (K_2O) concentrations in dry matter of different organs of wheat

年度 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d)			成熟期 Maturity
							0	10	20	
2004～2005	叶片 Leaf blade	石麦 14 Shimai 14	2.05 a	2.46 a	1.90 b	1.66 b	1.64 b	1.19 c	1.10 c	1.04 b
		石麦 12 Shimai 12	2.02 a	2.38 a	2.06 b	1.96 a	1.94 a	1.74 a	1.66 a	1.26 a
		冀丰 703 Jifeng 703	1.81 a	1.99 b	2.25 a	2.18 a	1.70 b	1.40 b	1.57 a	1.05 b
		石新 828 Shixin 828	2.07 a	2.06 b	1.92 b	2.03 a	1.66 b	1.41 b	1.37 b	1.08 b
	叶鞘 Leaf sheath	石麦 14 Shimai 14	2.07 b	2.35 a	3.30 a	1.88 a	1.82 a	1.61 a	1.51 a	1.55 a
		石麦 12 Shimai 12	2.51 a	2.66 a	3.28 a	1.95 a	1.88 a	1.71 a	1.65 a	1.52 a
		冀丰 703 Jifeng 703	1.95 b	2.47 a	3.07 b	2.13 a	1.73 a	1.63 a	1.59 a	1.64 a
		石新 828 Shixin 828	2.19 b	2.49 a	2.70 c	2.02 a	1.70 a	1.76 a	1.58 a	1.61 a
	茎秆 Stem	石麦 14 Shimai 14			3.48 a	1.86 b	1.82 a	1.26 a	1.27 b	1.87 a
		石麦 12 Shimai 12			3.84 a	2.14 b	1.64 a	1.40 a	1.24 ab	1.72 a
		冀丰 703 Jifeng 703			3.77 a	2.89 a	1.86 a	1.38 a	1.32 a	1.61 a
		石新 828 Shixin 828			3.11 a	2.59 a	2.03 a	1.47 a	1.48 a	1.60 a
	穗部 Spike	石麦 14 Shimai 14				1.51 a	0.78 a	0.34 a	0.41 a	0.60 a
		石麦 12 Shimai 12				1.31 a	0.77 a	0.43 a	0.39 a	0.43 b
		冀丰 703 Jifeng 703				1.33 a	0.77 a	0.40 a	0.42 a	0.45 b
		石新 828 Shixin 828				1.33 a	0.65 a	0.38 a	0.45 a	0.46 b
	籽粒 Grain	石麦 14 Shimai 14						0.51 a	0.48 a	0.37 a
		石麦 12 Shimai 12						0.53 a	0.49 a	0.39 a
		冀丰 703 Jifeng 703						0.56 a	0.52 a	0.41 a
		石新 828 Shixin 828						0.51 a	0.49 a	0.37 a

续表 2 Table 2 continued

年度 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d)			成熟期 Maturity
							0	10	20	
2005～2006	叶片 Leaf blade	特麦 1 号 Temai 1	1.81 ab	1.62 ab	1.43 a	1.08 c	1.05 a	0.83 a	0.47 b	0.37 a
		石麦 12 Shimai 12	1.58 b	1.82 a	1.53 a	1.06 c	1.14 a	0.98 a	0.65 ab	0.40 a
		石新 531 Shixin 531	1.76 ab	1.70 a	1.68 a	1.70 a	1.47 a	1.15 a	0.88 a	0.51 a
		石新 828 Shixin 828	2.25 a	1.52 b	1.46 a	1.31 b	1.16 a	1.10 a	0.89 a	0.50 a
	叶鞘 Leaf sheath	特麦 1 号 Temai 1	1.39 b	2.04 b	1.85 b	1.70 a	1.55 b	1.07 b	0.91 b	0.61 b
		石麦 12 Shimai 12	2.27 a	1.91 b	1.87 b	1.92 a	1.63 b	1.25 ab	1.06 a	0.56 b
		石新 531 Shixin 531	1.65 b	2.63 a	2.07 a	1.99 a	2.24 a	1.47 a	1.36 a	0.68 b
		石新 828 Shixin 828	2.06 a	2.17 b	1.75 b	1.81 a	1.69 b	1.74 a	1.26 a	0.93 a
	茎秆 Stem	特麦 1 号 Temai 1			2.97 b	1.78 a	1.48 b	1.14 b	0.94 a	0.81 a
		石麦 12 Shimai 12			2.68 b	1.63 a	1.57 b	1.22 b	1.11 a	0.93 a
		石新 531 Shixin 531			3.34 a	1.84 a	1.86 a	1.37 ab	1.15 a	0.97 a
		石新 828 Shixin 828			3.40 a	1.94 a	1.63 b	1.57 a	1.12 a	1.08 a
	穗部 Spike	特麦 1 号 Temai 1				1.08 a	0.42 a	0.26 a	0.32 a	0.26 a
		石麦 12 Shimai 12				1.23 a	0.45 a	0.21 a	0.35 a	0.25 a
		石新 531 Shixin 531				1.20 a	0.41 a	0.34 a	0.31 a	0.29 a
		石新 828 Shixin 828				1.02 a	0.39 a	0.21 a	0.26 a	0.30 a
	籽粒 Grain	特麦 1 号 Temai 1						0.50 a	0.39 a	0.34 a
		石麦 12 Shimai 12						0.56 a	0.44 a	0.40 a
		石新 531 Shixin 531						0.45 a	0.34 a	0.34 a
		石新 828 Shixin 828						0.49 a	0.38 a	0.33 a

注(Note):同列数据后不同字母表示每个年度品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the four cultivars in each growing year at the 5% level.

表 3　不同生育时期钾在地上部器官中的积累量(kg/hm²)

Table 3　Accumulation amounts of K_2O in aboveground organs at various growth stages

年度 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d)			成熟期 Maturity
							0	10	20	
2004～2005	叶片 Leaf blade	石麦 14 Shimai 14	11.8 b	20.6 b	42.9 c	53.2 c	62.7 b	62.7 c	36.2 b	15.3 b
		石麦 12 Shimai 12	15.7 ab	16.7 b	49.1 c	74.1 b	76.3 a	88.2 a	53.8 a	24.9 a
		冀丰 703 Jifeng 703	20.8 a	40.6 a	71.5 a	88.3 a	66.8 ab	78.0 b	53.0 a	27.3 a
		石新 828 Shixin 828	21.2 a	40.0 a	58.2 b	75.6 b	66.0 ab	57.5 c	45.5 ab	20.5 ab
	叶鞘 Leaf sheath	石麦 14 Shimai 14	11.5 a	18.6 ab	41.8 ab	39.8 b	49.2 a	38.4 b	32.0 b	30.3 ab
		石麦 12 Shimai 12	12.3 a	14.1 b	33.0 b	44.9 b	55.0 a	44.5 b	36.0 ab	26.2 b
		冀丰 703 Jifeng 703	16.4 a	25.5 a	45.7 a	54.7 a	48.1 a	44.4 b	42.5 a	36.0 a
		石新 828 Shixin 828	15.0 a	26.5 a	49.9 a	57.2 a	48.9 a	56.3 a	41.5 a	35.5 a
	茎秆 Stem	石麦 14 Shimai 14			15.6 a	51.3 b	95.5 a	70.6 b	62.8 c	78.5 a
		石麦 12 Shimai 12			15.6 a	39.6 c	82.0 b	85.2 a	75.2 b	60.6 b
		冀丰 703 Jifeng 703			11.6 a	61.9 a	82.3 b	71.8 b	83.2 ab	71.2 ab
		石新 828 Shixin 828			13.9 a	51.9 b	88.1 ab	83.0 a	87.8 a	75.9 a
	穗部 Spike	石麦 14 Shimai 14				4.6 a	18.0 a	8.1 a	10.1 a	15.2 a
		石麦 12 Shimai 12				4.0 a	17.4 a	10.1 a	7.4 a	7.8 b
		冀丰 703 Jifeng 703				5.0 a	15.8 a	7.8 a	10.7 a	11.1 ab
		石新 828 Shixin 828				5.4 a	13.5 a	12.1 a	11.7 a	10.6 ab
	籽粒 Grain	石麦 14 Shimai 14						7.3 a	21.6 a	33.8 a
		石麦 12 Shimai 12						2.4 c	14.8 b	34.9 a
		冀丰 703 Jifeng 703						7.0 a	22.5 a	37.4 a
		石新 828 Shixin 828						4.4 b	19.6 ab	34.8 a

续表 3　Table 3 continued

年度 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2005～2006	叶片 Leaf blade	特麦 1 号 Temai 1	23.8 a	22.9 ab	49.4 a	52.0 b	47.3 a	40.0 a	15.9 b	10.3 a
		石麦 12 Shimai 12	20.5 ab	26.0 a	49.0 a	45.1 b	48.4 a	36.1 a	20.1 ab	7.7 a
		石新 531 Shixin 531	17.2 b	19.6 b	50.5 a	70.8 a	49.9 a	42.0 a	22.3 a	7.3 a
		石新 828 Shixin 828	23.0 a	23.7 ab	39.7 b	48.8 b	40.3 a	37.7 a	19.0 ab	7.3 a
	叶鞘 Leaf sheath	特麦 1 号 Temai 1	12.6 a	21.7 a	37.0 a	62.0 a	51.9 c	33.7 a	26.2 a	15.1 ab
		石麦 12 Shimai 12	18.4 a	20.0 a	28.8 ab	40.2 c	45.0 c	32.8 a	27.0 a	9.9 b
		石新 531 Shixin 531	11.4 a	21.0 a	31.0 a	48.6 bc	60.5 b	38.7 a	31.3 a	12.6 ab
		石新 828 Shixin 828	13.3 a	17.6 a	22.1 b	50.1 b	70.0 a	39.2 a	26.1 a	18.9 a
	茎秆 Stem	特麦 1 号 Temai 1			14.9 a	47.6 a	83.0 a	69.4 b	52.8 a	36.4 a
		石麦 12 Shimai 12			10.2 a	33.8 b	80.1 a	65.6 b	53.5 a	36.9 a
		石新 531 Shixin 531			12.5 a	34.5 b	80.4 a	68.1 b	50.4 a	30.6 a
		石新 828 Shixin 828			10.0 a	33.8 b	63.5 b	78.8 a	54.0 a	39.6 a
	穗部 Spike	特麦 1 号 Temai 1				3.7 ab	11.0 a	6.7 a	8.1 a	6.5 a
		石麦 12 Shimai 12				4.1 a	9.5 a	5.8 a	9.0 a	5.8 a
		石新 531 Shixin 531				4.3 a	10.2 a	8.0 a	7.4 a	5.9 a
		石新 828 Shixin 828				2.9 b	7.9 a	4.4 a	5.8 a	6.4 a
	籽粒 Grain	特麦 1 号 Temai 1						7.1 a	18.5 a	32.9 a
		石麦 12 Shimai 12						5.1 a	20.1 a	36.5 a
		石新 531 Shixin 531						5.1 a	14.3 a	29.7 a
		石新 828 Shixin 828						6.5 a	17.5 a	28.8 a

注(Note):同列数据后不同字母表示每个年度品种间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the four cultivars in each growing year at the 5% level.

表 4　不同生育时期钾在地上部器官中的分配率(%)

Table 4　Distribution percentages of potassium in aboveground organs of wheat at various growth stages

年度 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d)			成熟期 Maturity
							0	10	20	
2004～2005	叶片 Leaf blade	石麦 14 Shimai 14	50.5 a	52.5 b	42.8 b	25.2 a	27.8 a	33.5 ab	22.2 a	8.8 b
		石麦 12 Shimai 12	56.2 a	54.2 ab	50.3 ab	32.5 a	33.1 a	38.3 a	28.7 a	16.1 a
		冀丰 703 Jifeng 703	55.9 a	61.4 a	55.5 a	32.9 a	31.3 a	37.3 a	25.0 a	14.9 a
		石新 828 Shixin 828	58.5 a	60.2 a	48.0 ab	30.5 a	30.5 a	26.9 b	22.1 a	11.6 ab
	叶鞘 Leaf sheath	石麦 14 Shimai 14	49.5 a	47.5 a	41.6 a	9.7 a	21.8 a	20.5 a	19.7 a	17.5 a
		石麦 12 Shimai 12	43.8 a	45.8 ab	33.8 a	11.0 a	23.8 a	19.3 a	19.2 a	16.9 a
		冀丰 703 Jifeng 703	44.1 a	38.6 b	35.5 a	8.8 a	22.6 a	21.3 a	20.1 a	19.7 a
		石新 828 Shixin 828	41.5 a	39.8 b	40.5 a	8.9 a	22.6 a	26.4 a	20.1 a	20.0 a
	茎秆 Stem	石麦 14 Shimai 14			15.6 a	15.9 a	42.4 a	37.8 a	38.6 a	45.3 a
		石麦 12 Shimai 12			15.9 a	10.9 ab	35.5 a	37.0 a	40.2 a	39.3 a
		冀丰 703 Jifeng 703			9.0 a	8.4 b	38.6 a	34.3 a	39.2 a	38.9 a
		石新 828 Shixin 828			11.5 a	10.3 ab	40.7 a	38.9 a	42.6 a	42.8 a
	穗部 Spike	石麦 14 Shimai 14				4.6 a	8.0 a	4.3 ab	6.2 a	8.8 a
		石麦 12 Shimai 12				3.8 a	7.6 a	4.4 ab	3.9 b	5.1 b
		冀丰 703 Jifeng 703				3.9 a	7.4 a	3.7 b	5.1 a	6.0 ab
		石新 828 Shixin 828				4.4 a	6.3 a	5.7 a	5.7 a	6.0 ab
	籽粒 Grain	石麦 14 Shimai 14						3.9 a	13.3 a	19.5 a
		石麦 12 Shimai 12						1.0 b	7.9 b	22.6 a
		冀丰 703 Jifeng 703						3.4 a	10.6 ab	20.4 a
		石新 828 Shixin 828						2.1 b	9.5 ab	19.6 a

续表 4　Table 4 continued

年度 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d)			成熟期 Maturity
							0	10	20	
2005～2006	叶片 Leaf blade	特麦 1 号 Temai1	65.4 a	51.4 ab	48.8 a	24.2 a	24.5 a	25.5 a	13.1 a	10.2 a
		石麦 12 Shimai12	52.7 b	56.5 a	55.6 a	29.0 a	26.5 a	24.8 a	15.5 a	7.9 a
		石新 531 Shixin 531	60.1 ab	48.2 b	53.7 a	21.1 a	24.8 a	26.0 a	17.7 a	8.4 a
		石新 828 Shixin 828	63.3 a	57.4 a	55.4 a	22.0 a	22.2 a	22.6 a	15.6 a	7.2 a
	叶鞘 Leaf sheath	特麦 1 号 Temai1	34.6 b	48.6 ab	36.5 a	14.6 ab	26.9 b	21.5 a	21.6 a	14.9 ab
		石麦 12 Shimai12	47.3 a	43.5 ab	32.7 a	12.9 ab	24.6 b	22.6 a	20.8 a	10.3 b
		石新 531 Shixin 531	39.9 ab	51.8 a	32.9 a	10.8 b	30.1 ab	23.9 a	24.9 a	14.6 ab
		石新 828 Shixin 828	36.7 b	42.6 b	30.8 a	16.5 a	38.5 a	23.5 a	21.3 a	18.7 a
	茎秆 Stem	特麦 1 号 Temai1			14.7 a	11.0 a	43.0 a	44.2 a	43.4 a	36.0 a
		石麦 12 Shimai12			11.6 a	14.1 a	43.8 a	45.1 a	41.3 a	38.1 a
		石新 531 Shixin 531			13.4 a	10.7 a	40.0 a	42.0 a	40.1 a	35.6 a
		石新 828 Shixin 828			13.9 a	9.5 a	35.0 a	47.3 a	44.1 a	39.3 a
	穗部 Spike	特麦 1 号 Temai1				3.0 a	5.7 a	4.3 a	6.7 a	6.4 a
		石麦 12 Shimai12				3.2 a	5.2 a	4.0 ab	6.9 a	6.0 a
		石新 531 Shixin 531				3.6 a	5.1 a	4.9 a	5.9 a	6.9 a
		石新 828 Shixin 828				3.5 a	4.3 a	2.7 b	4.7 a	6.3 a
	籽粒 Grain	特麦 1 号 Temai1						4.6 a	15.2 a	32.5 a
		石麦 12 Shimai12						3.5 a	15.5 a	37.7 a
		石新 531 Shixin 531						3.2 a	11.4 a	34.5 a
		石新 828 Shixin 828						3.9 a	14.3 a	28.5 a

注(Note):同列数据后不同字母表示每个年度品种间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the four cultivars in each growing year at the 5% level.

育前期钾在不同器官的分配率由高到低的顺序为叶片 > 叶鞘 > 茎秆 > 穗部,成熟期为茎秆 > 籽粒 > 叶鞘 > 叶片≥穗部。同一年份不同品种各生育时期钾在相同器官中的分配率差异极小,生育后期钾在不同器官中的分配率差异一般不显著,显示不同品种的一致性。

2.2　小麦植株对钾的总积累量和积累进程

2.2.1 小麦植株对钾的总积累量　由表 5 可以看出,各品种全株的钾积累量随生育进程而增加。其中冬前至起身期积累较慢,起身至开花期快速积累,开花期达到最高值以后即开始下降。开花期达到最高值时各品种对钾的积累量为 181.7 ~ 230.7 kg/hm^2,成熟期为 86.0 ~ 183.0 kg/hm^2。成熟期不同品种、不同年度的积累量差别很大,而开花期不同品种、不同年度的积累量相对较小。钾的积累百分率在越冬前、拔节期、开花期和成熟期依次达到全生育期的 10.3% ~ 20.0%、39.5% ~ 60.4%、100% 和 42.8% ~ 85.9%,不同品种、不同年度的差异也较大。按小麦一生中积累量最高的开花期计算,每生产 100 kg 籽粒需吸收 K_2O 2.0 ~ 2.6 kg,2 年中品种间的差异均不显著。

2.2.2 不同生育阶段钾的吸收量和日吸收量　2 年中小麦吸收钾最多的阶段均在拔节到孕穗期(表 6),此前的起身至拔节期和之后的孕穗至开花期阶段吸收量也较高,开花后的吸收量均为负值。相同品种不同年份对钾的阶段吸收量差异较大;相同年份不同品种对钾的阶段吸收量差异也较大。

小麦对钾的每日吸收量的变化趋势与阶段吸收量的趋势类似(表 6),以拔节到孕穗期最高,平均日吸收量达到 1.35 ~ 3.85 kg/hm^2,开花后的日吸收量为负值。不同品种日吸收量的差异也与不同品种阶段吸收量的差异类似。概括来看,全生育期钾的阶段吸收量和日吸收量都以生育中期(起身至开花)最高,生育前期(出苗至起身)次之,生育后期(开花至成熟)为负值。

3　讨论

3.1　小麦植株中钾的浓度和积累量及其影响因素

明确小麦植株中钾浓度和积累量的变化规律,有助于确定小麦的施钾量。本研究中小麦不同器官钾浓度为 0.21% ~ 3.84%(干重),与李雁鸣等的结果(0.35% ~ 5.25%)[11]相近。不同器官比较,茎秆和叶鞘中钾浓度最高,籽粒和穗部最低,这与小麦各器官中氮、磷的浓度分布[11]不同,可能与钾不参与有机物质形成[2]有关。本研究 2 年中的冬小麦品种籽粒产量为 8750.9 ~ 9637.5 kg/hm^2,钾的积累量为 181.7 ~ 230.7 kg/hm^2。与本研究小麦产量相当的韩燕来等(9405.0 kg/hm^2)[14]、余松烈等(8692.5 kg/hm^2)[15]的研究中,其钾积累量(622.3 kg/hm^2[14]、522.2 kg/hm^2[15])远高于本研究结果。与本研究小麦产量相比逐渐降低的有赵俊晔等(7856.7 ~ 8530.0 kg/hm^2)[16]、Shaaban 等(5388.1 ~ 7031.0 kg/hm^2)[17]、王荣辉等(4619.0 ~ 5616.0 kg/hm^2)[18]、Abbas 等(3970.0 ~ 4590.0 kg/hm^2)[19]、张国平等(3332.3 kg/hm^2)[20]的研究,小麦钾的积累量分别为 303.3 ~ 450.8 kg/hm^2、300.6 ~ 564.8 kg/hm^2、102.2 ~ 138.2 kg/hm^2、138.7 ~ 149.3 kg/hm^2、393.8 kg/hm^2[16-20]。可见,由于研究背景的不同,小麦籽粒产量的高低与钾的积累量并不同步,尤其是产量很低或很高时。这说明,除了产量水平以外,钾的积累量还受其他因素的影响。

比较每公顷钾肥施用量可见,比本研究施钾量高的如韩燕来等(K_2O 150 kg/hm^2)[14]、余松烈等(K_2O 130.3 kg/hm^2、富含钾的圈粪 75000 kg/hm^2)[15]、赵俊晔等(K_2O 105 kg/hm^2)[16]、张国平(K_2O 120 kg/hm^2)[20]的研究结果,其钾积累量也高于本研究;施钾量比本研究低的 Shaaban 等(K_2O 57.1 kg/hm^2)[17]、王荣辉等(K_2O 0 kg/hm^2)[18]、Abbas 等(K_2O 72 kg/hm^2)[19],钾积累量除 Shaaban 等的结果[17]比本研究高外,其他均比本研究低。以上说明,钾积累量很大程度上决定于钾肥施用量。进一步比较耕层土壤速效钾浓度,韩燕来等(266 mg/kg)[14]、王荣辉等(182.4 mg/kg)[18]的研究中速效钾浓度比本研究结果(108.3 ~ 154.5 mg/kg)高,Abbas 等[19]研究中速效钾浓度(125 mg/kg)与本研究相当,其他研究的速效钾浓度(33.8 ~ 48.0 mg/kg)[15-17,20]均低于本研究。其中韩燕来等[14]的研究中土壤速效钾浓度最高,钾积累量也最高;王荣辉等[18]的土壤速效钾浓度次之,在未施钾情况下,植株钾积累量仍较高。这表明,土壤速效钾浓度也与小麦植株钾积累量密切相关。

本研究中,2005 年在拔节期和孕穗期的日平均气温分别为 17.6℃ 和 19.4℃,而 2006 年相应时期的平均气温为 14.1℃ 和 19.2℃。相应地,2005 年拔节期和孕穗期各器官的钾浓度和钾积累量也明显高于 2006 年。由此可见,小麦吸收钾最快时期的温

表5 小麦植株钾的总吸收量和累进吸收百分率

Table 5 The accumulation amounts and accumulative percentages of K_2O in wheat plants

年度 Year	品种 Cultivar	项目 Item	冬前期 Pre-winter	起身期 Double ridge	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 Days after anthesis(d) 0	10	20	成熟期 Maturity	100 kg 籽粒产量吸收量 Absorption for 100 kg grain yield (kg)
2004～2005	石麦 14 Shimai14	A	23.3 b	39.2 b	100.3 b	149.0 b	225.4 a	187.1 b	162.6 b	173.1 a	2.5 a
		P	10.3 b	17.4 b	44.5 b	66.1 c	100.0 a	83.0 b	72.2 c	76.8 ab	
	石麦 12 Shimai12	A	28.0 b	30.7 b	97.7 b	162.7 b	230.7 a	230.4 a	187.1 b	154.4 b	2.6 a
		P	12.1 ab	13.3 b	42.3 b	70.5 c	100.0 a	99.9 a	81.1 b	66.9 b	
	冀丰 703 Jifeng703	A	37.1 a	66.1 a	128.7 a	209.8 a	213.0 a	209.0 ab	211.9 a	183.0 a	2.3 a
		P	17.4 a	31.0 a	60.4 a	98.5 a	100.0 a	98.1 a	99.5 a	85.9 a	
	石新 828 Shixin828	A	36.1 a	66.4 a	121.1 a	190.1 a	216.5 a	213.3 ab	206.1 a	177.2 a	2.3 a
		P	16.7 a	30.7 a	55.9 a	87.8 b	100.0 a	98.5 a	95.2 a	81.9 a	
	平均 Mean	A	31.1 a	50.6 a	111.9 a	177.9 a	221.4 a	209.9 a	191.9 a	171.9 a	
		P	14.1 a	23.1 a	50.8 a	80.7 a	100.0 a	94.9 a	87.0 a	77.9 a	
2005～2006	特麦 1 Temai 1	A	36.4 a	44.6 a	101.4 a	165.3 a	193.1 ab	156.9 ab	121.5 a	101.1 a	2.0 a
		P	18.8 a	23.1 a	52.5 a	85.6 a	100.0 a	81.2 b	62.9 a	52.4 a	
	石麦 12 Shimai12	A	38.9 a	46.0 a	88.0 ab	123.2 b	182.9 b	145.4 b	129.7 a	96.8 a	2.0 a
		P	21.3 a	25.2 a	48.1 a	67.4 b	100.0 a	79.5 b	70.9 a	52.9 a	
	石新 531 Shixin531	A	28.6 b	40.5 a	94.0 a	158.2 a	201.1 a	161.9 a	125.6 a	86.0 a	2.3 a
		P	14.2 a	20.2 a	46.7 ab	78.7 ab	100.0 a	80.5 b	62.5 a	42.8 b	
	石新 828 Shixin828	A	36.3 a	41.2 a	71.7 b	135.6 b	181.7 b	166.6 a	122.4 a	100.9 a	2.1 a
		P	20.0 a	22.7 a	39.5 b	74.6 ab	100.0 a	91.7 a	67.4 a	55.5 a	
	平均 Mean	A	35.0 a	43.1 a	88.8 b	145.6 b	189.7 b	157.7 b	124.8 b	96.2 b	
		P	18.6 a	22.8 a	46.7 a	76.6 a	100.0 a	83.2 b	65.9 b	50.9 b	

注(Note):A—小麦植株钾的总积累量 The accumulation amount in wheat plants(kg/hm^2);P—累进吸收百分率(某时期积累量占最高积累量的百分比,%)The accumulative percentage (The percentage of the accumulation amount at a growth stage against the maximum accumulation amount, %). 各品种数值后不同字母表示每个年度4个品种之间A或P的差异达5%显著水平 The different letters following the data for each cultivar show the significances at the 5% level of A or P among the four cultivars in each growing year. 平均数据为4个品种各3次重复的总平均值,其后不同字母表示2个年度间A或P的平均值差异达5%显著水平 The line "Mean" is the mean of four cultivars with three replications, and the different letters following them show the significance at the 5% level of A or P between the two growing years.

表 6　2 个年度小麦植株钾(K_2O)的阶段吸收量和日吸收量

Table 6　Phasic and daily absorption amounts of potassium (K_2O) by wheat plants in two growing years

项目 Item	年度 Year	品种 Cultivar	出苗~越冬 Pre-winter	越冬~起身 Pre-winter to double ridge	起身~拔节 Double ridge to jointing	拔节~孕穗 Jointing to booting	孕穗~开花 Booting to anthesis	开花~成熟 Anthesis to maturity
阶段吸收量 Phasic Absorption (kg/hm^2)	2004~2005	石麦 14 Shimai 14	23.3 b	15.9 b	61.1 ab	48.7 c	76.5 a	-66.3 b
		石麦 12 Shimai 12	28.0 b	2.7 c	66.9 a	65.0 b	68.1 a	-152.4 c
		冀丰 703 Jifeng 703	37.1 a	29.0 a	62.6 ab	81.1 a	3.2 c	-30.0 a
		石新 828 Shixin 828	36.1 a	30.3 a	54.6 b	69.0 b	26.4 b	-39.2 a
	2005~2006	特麦 1 号 Temai 1	36.4 a	8.2 ab	56.8 a	63.9 a	27.8 c	-92.0 ab
		石麦 12 Shimai 12	38.9 a	7.1 ab	42.0 b	35.2 b	59.7 a	-86.1 a
		石新 531 Shixin 531	28.6 b	12.0 a	53.4 a	64.3 a	42.9 b	-115.1 b
		石新 828 Shixin 828	36.3 a	4.9 b	30.5 c	63.8 a	46.1 b	-80.7 a
日吸收量 Daily absorption [$kg/(hm^2 \cdot d)$]	2004~2005	石麦 14 Shimai 14	0.37 b	0.19 b	1.88 a	2.32 b	5.11 a	-2.20 b
		石麦 12 Shimai 12	0.44 b	0.03 c	2.08 a	3.09 a	4.54 a	-4.69 c
		冀丰 703 Jifeng 703	0.58 a	0.35 a	1.94 a	3.85 a	0.21 b	-0.86 a
		石新 828 Shixin 828	0.57 a	0.36 a	1.71 a	3.32 a	1.76 b	-1.15 a
	2005~2006	特麦 1 号 Temai 1	0.72 a	0.08 a	2.03 a	2.44 a	1.54 c	-2.68 a
		石麦 12 Shimai 12	0.78 a	0.09 a	1.51 ab	1.35 b	3.32 a	-2.43 a
		石新 531 Shixin 531	0.56 a	0.13 a	1.89 a	2.46 a	2.39 b	-3.24 b
		石新 828 Shixin 828	0.72 a	0.05 a	1.09 b	2.48 a	2.56 b	-2.30 a

注(Note):各品种数值后不同字母表示每个年度 4 个品种之间差异达 5% 显著水平 The different letters following the data for each cultivar show the significances at the 5% level among the four cultivars in each growing year.

度对钾素吸收积累有很大的影响。在此期间遭遇低温时,更应注意钾肥的施用,以保证对小麦钾素的供应。

3.2 冬小麦钾生产效率与产量水平的关系

本研究在超高产条件下,小麦钾生产效率(单位钾素生产的籽粒)为35.36～55.58 kg/kg,与王荣辉等39.44～46.51 kg/kg的结果[18]相近,高于Abbas等(28.63～30.74 kg/kg)[19]、赵俊晔等(18.55～25.90 kg/kg)[16]、余松烈等(16.65 kg/kg)[15]、韩燕来等(15.11 kg/kg)[14]、Shaaban等(9.77～18.86 kg/kg)[17]、张国平(8.46 kg/kg)[20]等研究的钾生产效率。本研究的小麦产量与韩燕来等[14]、余松烈等[15]的研究结果相近,但钾生产效率差异却很大,以本研究的最高。结合钾肥施用情况和土壤速效钾浓度,可以认为小麦钾生产效率与产量的密切程度不如与土壤速效钾浓度和钾肥运筹的关系大。另外还发现,张国平[20]、余松烈等[15]和韩燕来等[14]的研究均在上世纪后期,钾的积累量都很高,但钾生产效率却都比较低;而本研究、王荣辉等[18]和Abbas等[19]为代表的近期的研究中,小麦产量和钾生产效率都得到提高,这可能与近年综合生产条件的改善和综合技术运用水平的提高有关。这表明,通过合理的施肥等技术,超高产条件下钾生产效率仍可以得到提高。

3.3 高产冬小麦吸收钾的关键时期与施肥

本研究结果表明,小麦起身期以前各器官的含钾量较高,是吸收钾的重要时期之一,应通过底施钾肥促进苗期的吸收[10]。拔节到开花期各器官的含钾量依然较高,而且对钾的阶段吸收量和日吸收量(即吸收强度)也最高,是小麦吸收钾的关键时期。生育后期,籽粒成为生长中心,而钾素不参与有机物质形成,因此对钾的需求较少,出现负积累。本研究中,小麦开花后钾负积累的差异较大,特别是2004～2005年石麦14和冀丰703在开花后仍有少量吸收,与其他品种明显不同。联系到陈学留等[21]的研究,小麦从灌浆到成熟期各器官(籽粒除外)作为钾暂贮器官,处于钾淋失和钾吸收的平衡中,保持一定水平的钾营养利于维持钾淋失和钾吸收的平衡。综上可见,生产上将钾肥作为基肥一次性施入,与小麦需钾规律不够吻合。王激清等[22]对我国当前小麦钾肥施用情况进行了调查,发现基肥与追肥比例为1:0.02,但也有追肥比例较高的研究,谭金芳等[7]采用的钾肥基追比为8:2,于振文等[10]认为钾肥基追最适宜比例为1:1。关于本研究条件下最合理的钾肥基追比,还需要在控制条件下做进一步研究。

有关学者在本研究所在区域秸秆还田条件下进行的研究认为,麦田耕层土壤速效钾浓度高于126.5 mg/kg为丰富,92.0～126.5 mg/kg为中等,67.2～92.0 mg/kg为中度缺乏,小于67.2 mg/kg为重度缺乏[23]。本研究土壤速效钾浓度为108.3～154.5 mg/kg,属于速效钾浓度中等以上地区。在不同基础地力条件下,目前学者一般推荐的钾肥施用量为K_2O 96.8～181.5 kg/hm^2[4,9,24]。本研究中,成熟期小麦植株地上部K_2O的总积累量为86.0～183.0 kg/hm^2,减去籽粒中的积累量28.8～47.4 kg/hm^2,还田秸秆中的K_2O为56.3～139.3 kg/hm^2。加上施入的化肥K_2O 90 kg/hm^2,对土壤钾的总补充量[25]为146.3～235.6 kg/hm^2,与本研究中小麦开花期对K_2O的最高积累量181.7～230.7 kg/hm^{2}接近,高于成熟期植株地上部K_2O的总积累量86.0～183.0 kg/hm^2,能够维持土壤钾素的平衡。另外,90 kg/hm^{2}的施钾量也高于黄淮海麦区目前生产中钾肥的平均施用量73.7 kg/hm^2[26]。可见,河北平原冬小麦实现≥9000 kg/hm^{2}的超高产,需要土壤速效钾浓度中等以上(约100～150 mg/kg),秸秆全量还田后施用钾肥不低于K_2O 90 kg/hm^2。但在其它栽培条件下实现小麦超高产的最适施钾量,还需要在特定条件下进行更深入的研究。

参考文献:

[1] Panaullah G M, Timsina J, Saleque M A *et al*. Nutrient uptake and apparent balances for rice-wheat sequences. Ⅲ. Potassium [J]. J. Plant Nutr., 2006, 29: 173-187.

[2] 张士功, 刘国栋, 刘更另. 植物营养与作物抗旱性[J]. 植物学通报, 2001, 18(1): 64-69.
Zhang S G, Liu G D, Liu G L. Plant nutrition and drought resistance of crops[J]. Chin. Bull. Bot., 2001, 18(1): 64-69.

[3] 熊明彪, 雷孝章, 田应兵, 等. 钾素对小麦茎、叶解剖结构的影响[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(3): 53-57.
Xiong M B, Lei X Z, Tian Y B *et al*. Effects of potassium on wheat stem-leaf anatomical structure[J]. J. Trit. Crops, 2003, 23(3): 53-57.

[4] 王旭东, 于振文, 王东. 钾对小麦旗叶蔗糖和籽粒淀粉积累的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 196-201.
Wang X D, Yu Z W, Wang D. Effect of potassium on sucrose content of flag leaves and starch accumulation of kernels in wheat [J]. Acta Phytoecol. Sin., 2003, 27(2): 196-201.

[5] 童贯和. 不同供钾水平对小麦旗叶光合速率日变化的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 547-553.
Tong G H. The effect of different levels of potassium nutrition on the diurnal variation of photosynthetic rates of wheat flag leaves [J]. Acta Phytoecol. Sin., 2004, 28(4): 547-553.

[6] 王旭东,于振文,王东. 钾对小麦旗叶蛋白水解酶活性和籽粒品质的影响[J]. 作物学报,2003,29(2):285-289.
Wang X D, Yu Z W, Wang D. Effect of potassium on flag leaf proteinases activity and kernel quality in wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(2): 285-289.

[7] 谭金芳,洪坚平,赵会杰,等. 不同施钾量对旱作冬小麦产量、品质和生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3):456-462.
Tan J F, Hong J P, Zhao H J *et al*. Effects of different potassium application rates on yield, quality and physiological characteristics of dryland winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(3): 456-462.

[8] Eldardiry E I, Abd EI-Hady M, El-Ashry S A. Effect of water regime and potassium application on water relations and nutrients uptake of wheat plant[J]. Int. J. Acad. Res., 2010, 2(2): 75-82.

[9] 武际,郭熙盛,王允青,等. 氮钾配施对弱筋小麦氮、钾养分吸收利用及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(6):1054-1061.
Wu J, Guo X S, Wang Y Q *et al*. Effects of combined application of nitrogen and potassium on absorption of N and K, grain yield and quality of weak gluten wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(6): 1054-1061.

[10] 于振文,梁晓芳,李延奇,等. 施钾量和施钾时期对小麦氮素和钾素吸收利用的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(1):69-74.
Yu Z W, Liang X F, Li Y Q *et al*. Effect of potassium application rate and time on the uptake and utilization of nitrogen and potassium by winter wheat[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(1): 69-74.

[11] 李雁鸣,张建平,王焕忠,等. 喷灌条件下高产冬小麦植株体内氮磷钾的时空分配特点[J]. 河北农业大学学报,2002,25(3):1-5.
Li Y M, Zhang J P, Wang H Z *et al*. Properties of spatial and temporal distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in the plant of high yield winter wheat under the conditions of sprinkling irrigation [J]. J. Agric. Univ. Hebei, 2002, 25(3): 1-5.

[12] 刘国栋,刘更另. 论缓解我国钾源短缺问题的新对策[J]. 中国农业科学,1995,28(1):25-32.
Liu G D, Liu G L. A new strategy alleviating shortage of potassium resource in China[J]. Sci. Agric. Sin., 1995, 28(1): 25-32.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京:中国农业出版社,2000.71,106-108.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.71, 106-108.

[14] 韩燕来,介晓磊,谭金芳,等. 超高产冬小麦氮磷钾吸收、分配与运转规律的研究[J]. 作物学报,1998,24(6):908-915.
Han Y L, Jie X L, Tan J F *et al*. Studies on absorption, distribution and translocation of N, P and K of super-high yield winter wheat[J]. Acta Agron. Sin., 1998, 24(6): 908-915.

[15] 余松烈,亓新华,刘希运. 高产冬小麦对三要素的吸收和供应特点的研究[J]. 土壤肥料,1981,(1):31-34.
Yu S L, Qi X H, Liu X Y. Absorption and supply characteristics of N P K in high-yielding winter wheat[J]. Soils Fert., 1981, (1): 31-34.

[16] 赵俊晔,于振文,李延奇,等. 施氮量对小麦氮磷钾养分吸收利用和产量的影响[J]. 西北植物学报,2006,26(1):98-103.
Zhao J Y, Yu Z W, Li Y Q *et al*. 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 [J]. Acta Bot. Bor-Occid. Sin., 2006, 26(1): 98-103.

[17] Shaaban S H A, Manal F M, Afifi M H M. Humic acid foliar application to minimize soil applied fertilization of surface-irrigated wheat[J]. World J. Agric. Sci., 2009, 5(2): 207-210.

[18] 王荣辉,王朝辉,李生秀,等. 施磷量对旱地小麦氮磷钾和干物质积累及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(1):115-121.
Wang R H, Wang Z H, Li S X *et al*. Effects of P rates on N P K and dry matter accumulation and grain yield of winter wheat[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2011, 29(1): 115-121.

[19] Abbas G, Khan M Q, Khan M J *et al*. Nutrient uptake, growth and yield of wheat (*Triticum astivum* L.) as affected by manganese application[J]. Pakistan J. Bot., 2011, 43(1): 607-616.

[20] 张国平. 小麦干物质积累和氮磷钾吸收分配的研究[J]. 浙江农业科学,1984,(5):222-225.
Zhang G P. Research of dry matter accumulation and N P K accumulation and distribution in wheat[J]. J. Zhejiang Agric. Sci., 1984, (5): 222-225.

[21] 陈学留,王制芬,余美炎,等. 高产小麦灌浆期钾的吸收与分配[J]. 核农学通报,1996,17(3):144-145.
Chen X L, Wang Z F, Yu M Y *et al*. Potassium accumulation and distribution during filling stage in high yielding wheat[J]. Nucl. Agric. Sci. Bull., 1996, 17(3): 144-145.

[22] 王激清,马文奇,江荣风,等. 我国水稻、小麦、玉米基肥和追肥用量及比例分析[J]. 土壤通报,2008,39(2):329-333.
Wang J Q, Ma W Q, Jiang R F *et al*. Analysis about amount and ratio of basal fertilizer and topdressing fertilizer on rice, wheat, maize in China[J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(2): 329-333.

[23] 周晓芬,冯伟,杨军芳,等. 太行山山前平原秸秆还田条件下小麦磷、钾丰缺指标研究[J]. 华北农学报,2011,26(2):170-174.
Zhou X F, Feng W, Yang J F *et al*. The study on the abundance and deficiencey indices of phosphorus and potassium of wheat with straw returning in Taihang Mountain Piedmont Plain[J]. Acta Bot. Bor-Occid. Sin., 2011, 26(2): 170-174.

[24] Vuscan A. The effect of K × NP fertilizers in long term field experiments, on winter wheat yield and its quality in the preluvosoil conditions from North-west part of Romania [J]. Res. J. Agric. Sci., 2010, 42(3): 354-358.

[25] 谭德水,金继运,黄绍文,等. 长期施钾及小麦秸秆还田对北方典型土壤固钾能力的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(10):2072-2079.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W *et al*. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on potassium fixation capacity of selected soils from northern China [J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(10): 2072-2079.

[26] 王旭,李贞宇,马文奇,等. 中国主要生态区小麦施肥增产效应分析[J]. 中国农业科学,2010,43(12):2469-2476.
Wang X, Li Z Y, Ma W Q *et al*. Effects of fertilization on yield increase of wheat in different agro-ecological regions of China [J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(12): 2469-2476.