

# 长期定位施肥对冬小麦干物质生产、产量形成 及钾素吸收分配的影响<sup>①</sup>

张水清<sup>1</sup>, 黄绍敏<sup>1</sup>, 刘建青<sup>2</sup>, 聂胜委<sup>1</sup>, 郭斗斗<sup>1</sup>, 梁雪杰<sup>3</sup>

(1 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 国家潮土土壤肥力与肥料效益长期监测站, 郑州 450002;

2 南阳市气象局, 河南南阳 473000; 3 驻马店市农业局, 河南驻马店 463000)

**摘要:** 采用田间试验、室内分析与数理统计相结合的方法研究了潮土区长期定位施肥对冬小麦干物质生产、产量形成及钾素吸收分配的影响。结果表明, 长期施用化肥 (NPK), 有机无机肥配施 (MNPK), 无机肥配合秸秆还田 (SNPK) 均能显著提高冬小麦茎蘖数、地上部干物质积累量、籽粒产量及钾素积累量, 但三者之间并无显著差异。冬小麦吸钾量在整个生育期内呈“低-高-低”单峰曲线变化, 在扬花期至灌浆前期达最大值, 拔节期吸钾量与冬小麦生长关系最为密切, 与产量、地上部干物质积累量、穗数、穗粒数、株高及穗长均呈显著正相关。冬小麦在生育后期存在钾素外排现象, 外排的钾素量达 43.05 ~ 114.81 kg/hm<sup>2</sup>, 是冬小麦成熟期钾素积累量的 1.55 ~ 3.09 倍, 冬小麦生育后期钾素管理不容忽视。

**关键词:** 长期定位施肥; 冬小麦; 干物质积累量; 产量; 吸钾量

**中图分类号:** S512.1<sup>1</sup>; S158.5

小麦是中国的主要粮食作物之一, 河南省是全国小麦总产及种植面积最大的省份, 2010 年小麦总产 309 亿 kg, 超过全国小麦总产量的 1/4<sup>[1]</sup>。然而随着作物产量水平不断提升, 氮肥投入也不断增加, 1988 年河南省平均施氮量为 384 kg/hm<sup>2</sup>, 到 2000 年增加至 670 kg/hm<sup>2</sup>, 每年以 5.7% 的速度增加<sup>[2]</sup>。氮磷肥高投入导致钾肥投入相对不足, 氮磷钾比例严重失衡, 因此, 钾素已成为提高小麦产量和改善小麦品质的主要限制因子<sup>[3-5]</sup>。

钾素不仅是植物生长发育必需的营养元素, 而且是肥料三要素之一, 对植物体内细胞酶活性、蛋白质、淀粉及叶绿素合成有着不可替代的作用<sup>[6]</sup>。前人的研究表明: 增施钾肥可以提高小麦干物质积累量, 尤其对拔节至抽穗期单株干物质积累影响最大<sup>[7-8]</sup>; 在潮土区长期施用化肥和有机肥均可以提高作物产量, 且氮素与磷素是限制小麦产量提高的主要因子<sup>[9-10]</sup>; 速效钾及缓效钾与土壤脲酶、过氧化氢酶活性在小麦生育期内均显著或极显著相关, 有利于保证土壤新陈代谢活性, 为冬小麦后期正常的灌浆、结实提供良好的养分供应<sup>[11]</sup>; 施用钾素能增强光合性能、提高旗叶中保护

酶的活性、延缓后期叶片的衰老、促进维管组织和厚壁组织的发育<sup>[12]</sup>, 因此冬小麦对钾素的吸收利用至关重要。冬小麦对钾的累积吸收特点与氮、磷不同, 在整个生育期中呈单峰曲线变化, 以扬花期积累量最大, 之后降低<sup>[13]</sup>。尽管有关钾素吸收利用研究得比较多, 但主要在短期试验研究上<sup>[14-19]</sup>, 所得的结论仍需进一步的研究与验证; 长期试验可以弥补这方面的不足, 而且利用长期定位试验来研究小麦不同生育期内的钾素吸收分配规律还鲜有报道。长期定位试验具有时间上的长期性和气候上的代表性等特点, 其信息量充足, 准确可靠, 具有短期试验不可比拟的优点。本研究以此为切入点, 以国家潮土土壤肥力与肥料效益长期监测基地为平台, 研究长期定位施肥对冬小麦干物质生产、产量形成及钾素吸收分配的影响, 旨在为河南及周边潮土区冬小麦钾肥管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概括

试验在“国家潮土土壤肥力与肥料效益长期监测基地”进行, 基地原址位于河南省郑州市, 34°47'N 和

<sup>①</sup>基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划沃土工程项目 (2006BAD25B06)、国家科技基础条件平台建设项目 (SF2007-5)、河南省重大公益性科研项目 (081100911500) 和河南省省院科技合作项目 (092106000011, 102106000034) 资助。

作者简介: 张水清 (1982—), 男, 河南南阳人, 硕士, 主要从事作物施肥与土壤肥力研究。E-mail: zsq510@163.com

113°40'E。1987年开始, 经过两年匀地种植, 于1990年开始不同施肥结构和种植制度下(小麦-玉米和小麦-大豆)的作物产量与土壤肥力和肥料效益长期定位监测试验。供试土壤为砂壤质潮土, 成土母质为黄河冲积物, 土壤pH值8.1, 全氮、全磷、全钾和有机质分别为1.01、0.65、16.9和10.6 g/kg, 碱解氮、有效磷和交换性钾分别为76.6、21.2和71.7 mg/kg。试验地于2009年5月采用原状土搬迁方式移至河南省原阳县祝楼乡, 位于原试验地正北约23 km处。

## 1.2 试验材料与设计

试验用冬小麦品种为郑麦9694, 由河南省农科院小麦研究中心提供。

试验共5个处理, 分别为: ①CK(种植, 不施肥); ②NK(施氮钾肥, 不施磷肥); ③NPK(施氮磷钾肥); ④MNPK(施氮磷钾肥+有机肥); ⑤SNPK(施氮磷钾肥+玉米秸秆), 重复4次, 试验小区面积50 m<sup>2</sup>, 施肥量从1990年至今一直保持不变, MNPK与SNPK处理与NPK总施氮量相等, 具体见表1。

表1 各处理施肥量 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Rates of fertilizer application

处理	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	有机肥(秸秆)含N量
K	0	0	0	0
NK	165	0	82.5	0
NPK	165	82.5	82.5	0
MNPK	49.5	82.5	82.5	115.5
SNPK	49.5	82.5	82.5	115.5

冬小麦于2009年10月18日播种, 播量约150 kg/hm<sup>2</sup>, 行距23 cm, 2010年6月11日收获。试验田按大田试验要求进行管理, 分别于越冬前、返青期及孕穗期浇水3次, 每次500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 并在必要时进行人工除草。全生育期共取样8次, 分别为2009年12月22日(越冬期)、2010年2月25日(返青期)、3月17日(拔节期)、4月16日(抽穗期)、4月29日(扬花期)、5月6日(灌浆前期)、5月20日(灌浆中期)、6月11日(成熟期)。

## 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 茎蘖数** 小麦出苗后, 在每个小区插入3个1 m长样段, 在每个生育期调查分蘖数与主茎数, 取平均值计算每公顷茎蘖数。

**1.3.2 地上部干物质积累量** 在小麦各生育期取0.5 m植株样品, 用自来水冲洗干净, 剪去根部, 分为茎秆、叶、叶鞘、穗和籽粒(生育前期为整株), 鲜样

于105℃杀青30 min, 70℃烘干至恒重, 称重。

**1.3.3 产量及农艺性状** 在成熟期取0.5 m植株样品进行考种, 测定穗数、穗粒数、千粒重、株高及穗长。实收5 m<sup>2</sup>以测定籽粒产量。

**1.3.4 钾素测定** 植株样品全钾采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>硝化后, 火焰光度法测定。土壤交换性钾采用乙酸铵震荡, 过滤, 火焰光度法测定<sup>[20]</sup>。吸钾量(kg/hm<sup>2</sup>) = 各器官干物质积累量(kg/hm<sup>2</sup>) × 各器官中全钾含量(g/kg) / 1000。

**1.3.5 数据处理** 数据整理与作图使用Excel 2007, 统计分析使用SPSS17.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期定位施肥对冬小麦干物质生产的影响

**2.1.1 长期定位施肥对冬小麦茎蘖数的影响** 由图1可以看出, 所有处理的茎蘖数在越冬期之后均随着冬小麦生长天数的增加而增加, 并在播种150天左右(返青期)达到最大值, 之后逐渐降低并达到稳定; NPK、MNPK和SNPK处理表现基本一致, 其茎蘖数(平均507万/hm<sup>2</sup>)显著高于CK和NK处理(平均321万/hm<sup>2</sup>), CK与NK处理的茎蘖数无明显差异。

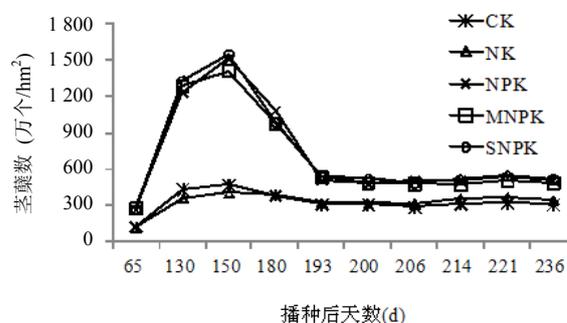


图1 长期定位施肥对冬小麦茎蘖数的影响

Fig. 1 Effects of long term fertilization on tiller numbers of winter wheat

**2.1.2 长期定位施肥对冬小麦地上部干物质积累量的影响** 地上部干物质积累量是决定冬小麦产量高低的物质基础。由图2可以看出, 所有处理干物质积累量均随着冬小麦的生长不断增加, 在成熟期达到最大值; NPK、MNPK和SNPK处理的干物质积累量无明显差异, 但显著高于CK和NK处理, CK与NK处理的地上部干物质积累量无明显差异。

### 2.2 长期定位施肥对冬小麦产量形成的影响

由表2可以看出, NPK处理的产量最高, 分别为CK和NK处理的3.81和3.82倍, 差异显著; 比

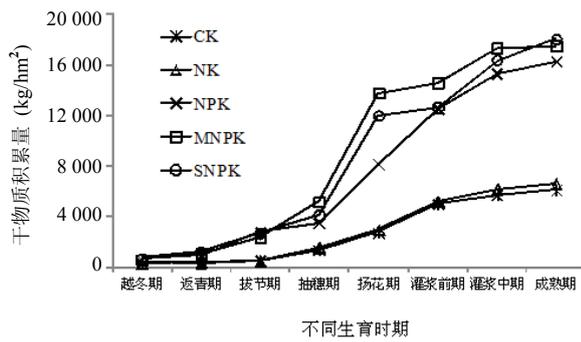


图 2 长期定位施肥对冬小麦不同生育期地上部干物质积累量的影响

Fig. 2 Effects of long term fertilization on dry matter accumulation of winter wheat at different periods

MNPK 和 SNPK 处理产量高 16% 和 7%，差异不显著，原因可能是由于 MNPK 和 SNPK 处理的氮素在小麦生长当季很难完全矿化分解以供小麦吸收利用，相当于当季施氮量低于 NPK 处理。NPK、MNPK 和 SNPK

处理的穗数、穗粒数、千粒重和株高均无显著差异，但 NPK 处理的穗长显著高于 MNPK 和 SNPK 处理。长期不施磷肥处理 (NK) 与 CK 的产量及所有农艺性状指标均无显著差异，原因是由于 NK 处理的长期非均衡化施肥导致土壤磷素严重缺乏，磷素成为制约小麦生长的主要限制因子<sup>[9]</sup>。

### 2.3 长期定位施肥对冬小麦钾素吸收分配的影响

2.3.1 长期定位施肥对冬小麦不同生育期各器官全钾含量的影响 在抽穗期之前测定整株钾素含量，在扬花期之后分器官测定其钾素含量 (表 3)。所有处理的小麦茎秆中钾素在扬花期之后均呈高-低-高趋势；叶片钾素含量在扬花期到灌浆中期均维持在较高水平 (13.52 ~ 25.98 g/kg)，到成熟期剧烈下降到 1.55 ~ 5.42 g/kg，仅为灌浆中期叶片钾素含量的 11% ~ 31%；叶鞘钾素含量在扬花期到成熟期一直维持在高水平 (9.03 ~ 21.34 g/kg)；而穗和籽粒在扬花期之后钾素含量均呈逐渐下降趋势 (NK 处理的穗除外)。

表 2 长期定位施肥对冬小麦产量及农艺性状的影响

Table 2 Effect of long term fertilization on grain yields and agronomic properties of winter wheat

处理	穗数 (10 <sup>6</sup> 穗/hm <sup>2</sup> )	穗粒数 (粒/穗)	千粒重 (g)	株高 (cm)	穗长 (cm)	籽粒产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
CK	3.05 ± 0.48 b	19.09 ± 1.37 b	46.76 ± 0.65 b	56.06 ± 3.23 b	5.81 ± 1.06 c	1 799.58 ± 200.70 b
NK	3.39 ± 0.35 b	19.46 ± 0.29 b	47.22 ± 1.57 b	52.64 ± 5.34 b	5.99 ± 1.31 c	1 794.30 ± 52.02 b
NPK	5.07 ± 0.30 a	28.22 ± 3.73 a	52.68 ± 1.39 ab	72.98 ± 1.10 a	7.52 ± 1.18 a	6 848.08 ± 498.06 a
MNPK	4.86 ± 0.48 a	24.13 ± 1.81 a	55.08 ± 1.54 a	75.09 ± 1.26 a	6.63 ± 0.22 b	5 891.52 ± 82.65 a
SNPK	5.15 ± 0.22 a	25.35 ± 2.08 a	56.20 ± 1.63 a	74.02 ± 3.35 a	6.84 ± 0.38 b	6 413.79 ± 94.77 a

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平。

表 3 冬小麦不同生育期各器官全钾含量 (g/kg)

Table 3 K contents in various organs of winter wheat at different growing stages

处理	器官	越冬期	返青期	拔节期	抽穗期	扬花期	灌浆前期	灌浆中期	成熟期
CK	茎秆					10.28	6.66	5.14	7.77
	叶					15.33	17.00	13.52	1.55
	叶鞘					11.59	12.35	12.51	9.03
	穗*					9.31	6.31	4.50	2.53
	籽粒							3.80	2.39
	整株	15.88	15.34	15.85	16.54				
NK	茎秆					14.85	12.35	13.00	16.45
	叶					17.16	19.11	17.28	5.42
	叶鞘					15.25	19.03	21.34	19.70
	穗					10.65	7.18	5.40	6.31
	籽粒							5.03	2.34
	整株	18.35	17.08	15.65	23.69				
NPK	茎秆					8.65	7.78	9.46	14.01
	叶					22.17	19.74	19.93	3.74
	叶鞘					15.33	16.12	19.44	17.63
	穗					9.53	7.06	5.25	2.79

续表 3

MNPK	籽粒							3.87	2.56
	整株	20.36	23.89	26.90	23.29				
	茎秆					10.08	8.65	8.30	13.90
	叶					23.80	21.13	20.97	3.74
	叶鞘					17.00	15.93	18.32	15.30
	穗					11.90	7.26	5.25	2.39
	籽粒							3.76	2.56
SNPK	整株	21.62	25.62	29.62	24.58				
	茎秆					11.87	9.33	8.38	13.54
	叶					25.98	22.72	21.19	3.08
	叶鞘					20.54	18.75	17.73	16.28
	穗					12.99	8.00	5.32	2.73
	籽粒							3.65	2.56
	整株	21.88	26.90	29.53	26.74				

注：\* 表示在扬花期和灌浆前期指全穗，在灌浆中期和成熟期指除籽粒以外的穗轴和颖壳。

2.3.2 长期定位施肥对冬小麦地上部吸钾量的影响

由图 3 可以看出所有处理冬小麦地上部吸钾量从越冬期至扬花期一直呈增加趋势，至扬花期和灌浆前期达到最大值，MNPK 处理最高，为 206.63 kg/hm<sup>2</sup>，之后逐渐降低，在整个生育期中呈“低-高-低”单峰曲线变化。

不施有机肥处理（CK、NK 和 NPK）对钾素的吸收主要集中在冬小麦的拔节期至灌浆前期，这一时期的吸钾量分别占到总量的 371.78%、261.33% 和 215.39%，之后从灌浆中期开始至成熟期钾素开始外排，吸钾总量降低；而施用有机肥处理（MNPK 和 SNPK）对钾素吸收的时间较为提前，主要集中在冬小麦的拔节期至扬花期，分别占到总量的 311.33% 和 239.99%（表 4）。

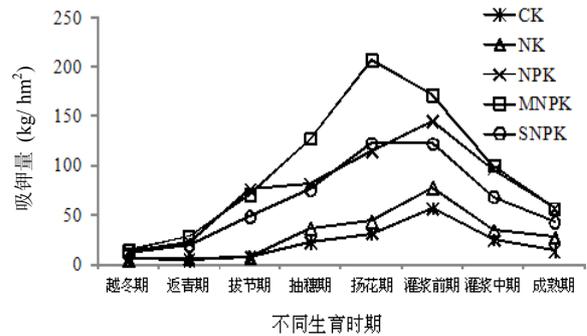


图 3 长期定位施肥对冬小麦不同生育时期地上部吸钾量的影响

Fig. 3 Effects of long term fertilization on K uptake of winter wheat at different growing stages

表 4 冬小麦不同生育时期钾素吸收量及吸收速率

Table 4 K uptakes and rates by winter wheat at different growing stages

处理	项目	越冬期	返青期	拔节期	抽穗期	扬花期	灌浆前期	灌浆中期	成熟期
CK	阶段吸收量 (kg/hm <sup>2</sup> )	5.69	-0.51	2.74	14.28	9.14	25.64	-31.81	-11.24
	占总量 (%)	40.85	-3.68	19.68	102.46	65.62	184.02	-228.28	-80.67
	阶段吸收速率 (kg/(hm <sup>2</sup> -d))	0.09	-0.01	0.14	0.48	0.70	3.20	-4.54	-0.54
NK	阶段吸收量 (kg/hm <sup>2</sup> )	5.51	0.94	1.18	29.54	6.72	34.11	-43.36	-7.26
	占总量 (%)	20.11	3.44	4.32	107.89	24.53	124.59	-158.38	-26.50
	阶段吸收速率 (kg/(hm <sup>2</sup> -d))	0.08	0.01	0.06	0.98	0.52	4.26	-6.19	-0.35
NPK	阶段吸收量 (kg/hm <sup>2</sup> )	13.21	9.38	53.10	5.37	33.53	29.94	-47.83	-40.09
	占总量 (%)	23.33	16.57	93.80	9.48	59.22	52.89	-84.49	-70.81
	阶段吸收速率 (kg/(hm <sup>2</sup> -d))	0.20	0.14	2.65	0.18	2.58	3.74	-6.83	-1.91
MNPK	阶段吸收量 (kg/hm <sup>2</sup> )	13.77	15.53	41.54	56.25	79.55	-34.86	-71.43	-43.38
	占总量 (%)	24.17	27.26	72.92	98.75	139.66	-61.20	-125.40	-76.17
	阶段吸收速率 (kg/(hm <sup>2</sup> -d))	0.21	0.24	2.08	1.87	6.12	-4.36	-10.20	-2.07
SNPK	阶段吸收量 (kg/hm <sup>2</sup> )	10.83	8.70	28.76	27.49	46.70	-0.42	-53.34	-25.82
	占总量 (%)	25.25	20.27	67.04	64.08	108.87	-0.98	-124.34	-60.19
	阶段吸收速率 (kg/(hm <sup>2</sup> -d))	0.17	0.13	1.44	0.92	3.59	-0.05	-7.62	-1.23

CK、NK 和 NPK 处理对钾素的吸收速率在灌浆前期达到最大值, 分别为 3.20, 4.26, 3.74 kg/(hm<sup>2</sup>·d); MNPK 和 SNPK 处理对钾素的吸收速率在扬花期达到最大值, 分别为 6.12 和 3.59 kg/(hm<sup>2</sup>·d)。

### 2.3.3 冬小麦吸钾量相关性分析 综合分析 5 个

处理不同生育时期的吸钾量与冬小麦产量干重及农艺性状的相关性(表 5), 可以看出, 拔节期吸钾量与冬小麦生长关系最为密切, 与除千粒重外其他指标均呈显著正相关; 其次为越冬期的吸钾量, 与冬小麦穗数、穗粒数、株高、产量及干重呈显著正相关。

表 5 冬小麦产量、地上部干重及农艺性状与不同生育时期吸钾量相关性分析

Table 5 Correlations between grain yields, dry matter accumulation, agronomic properties and K uptake of winter wheat

生育期	穗数	穗粒数	千粒重	株高	穗长	产量	干重
越冬期	0.923*	0.891*	0.870	0.958*	0.846	0.944*	0.937*
返青期	0.868	0.742	0.889*	0.918*	0.675	0.858	0.913*
拔节期	0.902*	0.948*	0.783	0.911*	0.931*	0.941*	0.884*
抽穗期	0.178	-0.125	0.386	0.251	-0.207	0.094	0.286
扬花期	0.765	0.574	0.868	0.862	0.477	0.748	0.850
灌浆前期	-0.520	-0.259	-0.718	-0.661	-0.139	-0.489	-0.647
灌浆中期	-0.719	-0.505	-0.800	-0.751	-0.434	-0.665	-0.779
成熟期	-0.854	-0.844	-0.798	-0.918*	-0.804	-0.890*	-0.877

注: \*表示相关性达到  $P < 0.05$  显著水平。

## 3 讨论与结论

### 3.1 长期定位施肥对冬小麦干物质生产及产量影响

本研究表明, 长期不施用磷肥条件下, 冬小麦不同时期茎蘖数、干物质积累量、钾素吸收量及成熟期产量和农艺性状与长期不施肥处理均无显著差异, 可以看出不施用磷素条件下, 长期施用钾肥并不能提高冬小麦对钾素的吸收利用。NPK、MNPK 与 SNPK 处理的籽粒产量、干物质积累量无显著差异, 但均显著高于 CK 和 NK 处理, 可以看出施肥可以提高作物产量及干物质积累量; 而有机肥(秸秆)与化肥对冬小麦的长期效果相似, 但对土壤培肥效果差异较大, MNPK 与 SNPK 处理的速效钾含量要明显高于 NPK 处理(图 4)。

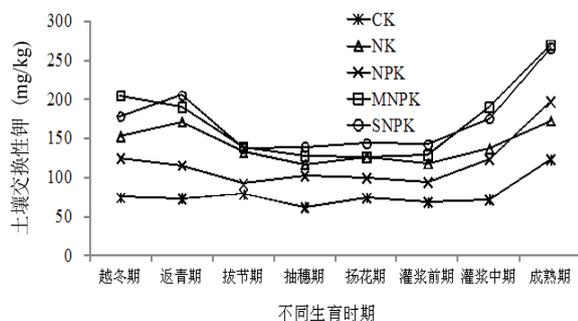


图 4 长期定位施肥对冬小麦不同生育时期土壤交换性钾变化的影响

Fig. 4 Effects of long term fertilization on soil exchangeable K at different growing stages of winter wheat

### 3.2 返青期至拔节期钾肥运筹

本研究还表明, 冬小麦在拔节期茎蘖数达最大值, 且在拔节期之后干物质积累量快速增长, 返青期至拔节期的钾素积累量与最终冬小麦的籽粒产量、干物质积累量、穗数及穗粒数等指标呈显著正相关, 因此在返青期至拔节期应重视钾肥施用。

### 3.3 冬小麦生育后期钾素外排

冬小麦在生育后期存在钾素外排现象已有报道, 熊明彪等<sup>[21]</sup>、武际等<sup>[22]</sup>、谭金芳等<sup>[12]</sup>和张鸿程等<sup>[23]</sup>分别在紫色土、砂姜黑土和潮土上得出此结论, 本研究再次验证, 但关于外排钾素的量与去处研究较少。本研究表明, 冬小麦在扬花期至成熟期外排的钾素量达 43.05 ~ 114.81 kg/hm<sup>2</sup>(表 4), 是冬小麦成熟期钾素积累量的 1.55 ~ 3.09 倍, 可能的原因是钾在植株中与有机物结合不牢固, 在小麦生育后期衰老时容易外渗或淋失, 但其机理有待于进一步的研究<sup>[12]</sup>。外排的钾素主要以离子形式进入到土壤中, 因此土壤速效钾含量从灌浆前期开始呈逐渐增加趋势(图 4)。尽管冬小麦生育后期钾素外排, 但后期钾素管理依然不容忽视, 小麦扬花期施用钾肥仍能显著提高小麦千粒重<sup>[13]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 2010 年全国夏粮总产量 12310 万吨比上年减少 0.3%. 2010-7-12, [http://www.gov.cn/wszb/zhibo397/content\\_1654944.htm](http://www.gov.cn/wszb/zhibo397/content_1654944.htm)
- [2] Lin Z, Zoebisch MA, Chen G, Feng Z. Sustainability of farmers'

- soil fertility management practices: A case study in the North China Plain. *J. Environ. Manage.*, 2006, 79: 409-419
- [3] Zhang HM, Yang XY, He XH, Xu MG, Huang SM, Liu H, Wang BR. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 154-163
- [4] Li QQ, Zhou XB, Chen YH, Yu SL. Grain yield and quality of winter wheat in different planting patterns under deficit irrigation regimes. *Plant Soil Environ.*, 2010, 56(10): 482-487
- [5] 涂书新, 郭智芬, 张平, 孙锦荷. 植物吸收利用钾素研究的某些进展. *土壤*, 2000, 32(5): 248-253
- [6] 陆景陵. 植物营养学. 北京: 北京农业大学出版社, 1994: 36-44
- [7] 张睿, 王新中, 刘党校, 刘新伦, 戴开军. 不同 NPK 配置对强筋小麦群体生物量与产量的效应研究. *土壤通报*, 2006, 37(2): 309-313
- [8] 王喜枝, 王立河, 曹雯梅, 王应君, 孙斌, 刘松涛, 王立秋. 豫东潮土氮钾营养对强筋小麦干物质积累和产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2009(4): 64-67
- [9] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗, 胡传中. 长期定位施肥对小麦产量及构成因素的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(4): 166-169
- [10] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 长期定位施肥对冬小麦产量及潮土土壤肥力的影响. *华北农学报*, 2010, 25(6): 217-220
- [11] 熊明彪, 田应兵, 雷孝章, 宋光煜, 曹叔尤. 小麦生长期土壤养分与土壤酶活性变化及其相关性研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 27-30
- [12] 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
- [13] 韩燕来, 介晓磊, 谭金芳, 郭天财, 朱云集, 王晨阳, 夏国军, 刘征. 超高产冬小麦的氮磷钾的吸收、分配与运转规律的研究. *作物学报*, 1998, 24(6): 908-915
- [14] Tal AB, Yermiyahu U, Beraud J, Keinan M, Rosenberg R, Zohar D, Rosen V, Fine P. Nitrogen, phosphorus and potassium uptake by wheat and their distribution in soil following successive annual compost applications. *J. Environ. Qual.*, 2004, 33: 1 855-1 865
- [15] 何文寿, 何进勤, 郭瑞英. 宁夏引黄灌区春小麦不同生育期吸收氮、磷、钾养分的特点. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 789-796
- [16] 李雁鸣, 张建平, 王焕忠, 姜青珍, 吴景玉, 郑焕彩, 耿振水, 彭泽明. 喷灌条件下高产冬小麦植株体内氮磷钾的时空分配特点. *河北农业大学学报*, 2002, 25(3): 1-5
- [17] 杜承林, 祝斌, 陶帅平, 葛志清, 虞国兴, 印良柏. 施肥对扬麦 158 等小麦品种的养分吸收与生物产量的影响. *土壤学报*, 2001, 38(3): 301-307
- [18] 胡田田, 刘翠英, 李岗, 韩思明. 施肥对土壤供肥和冬小麦养分吸收及其产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(3): 36-41
- [19] 吴国梁, 崔秀珍. 高产小麦氮磷钾营养机理和需肥规律研究. *中国农学通报*, 2000, 16(2): 8-11
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 308-316
- [21] 熊明彪, 雷孝章, 宋光煜, 曹叔尤. 长期施肥条件下小麦对钾素吸收利用的研究. *麦类作物学报*, 2004, 24(1): 51-54
- [22] 武际, 郭熙盛, 王允青, 黄晓荣. 钾肥运筹对小麦氮素和钾素吸收利用及产量和品质的影响. *土壤*, 2008, 40(5): 777-783
- [23] 张鸿程, 皇甫湘荣, 宝德俊, 黄绍敏. 冬小麦地上部器官氮磷钾的积累分配和运转的研究. *土壤通报*, 2000, 31(4): 177-179

## Effects of Long-term Fertilization on Dry Matter Production, Yield Formation, K Uptake and Distribution of Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.)

ZHANG Shui-qing<sup>1</sup>, HUANG Shao-min<sup>1</sup>, LIU Jian-qing<sup>2</sup>, NIE Sheng-wei<sup>1</sup>, GUO Dou-dou<sup>1</sup>, LIANG Xue-jie<sup>3</sup>

(1 *Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, National Long-term Monitoring Station of Fluvo-Aquic Soil Fertility and Fertilizer Effects, Zhengzhou 450002, China;* 2 *Nanyang Meteorological Bureau, Nanyang, Henan 473000, China;* 3 *Zhumadian Agricultural Bureau, Zhumadian, Henan 463000, China*)

**Abstract:** Methods of field experiment, chemical analysis and data statistics were employed to study the effects of long-term fertilization on dry matter production, yield formation, K uptake and distribution of winter wheat. The results showed that NPK, NPKM and SNPK treatments significantly increased tiller number, dry matter accumulation, grain yield and K uptake of winter wheat, but there were no significant difference in these parameters between these three treatments. K accumulation of winter wheat was maximal from flowering period to filling period. K uptake at shooting period was significantly positively correlated to grain yield, dry matter accumulation, spike number, kernel number per spike, plant height and spike length. K excretion phenomenon of winter wheat was observed and K excretion rate was 43.05-114.81 kg/hm<sup>2</sup>, which was 1.55-3.09 times of K accumulation at maturing period.

**Key words:** Long-term fertilization, Winter wheat, Dry matter accumulation, Yield, K uptake