

不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响

谭德水, 金继运, 黄绍文, 李书田, 何萍

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与养分循环重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】研究施钾和秸秆还田对华北地区不同种植制度下作物产量和耕层土壤钾素状况的影响。【方法】在华北平原的河北潮土和山西褐土上进行连续 13 年的施钾和秸秆还田试验。【结果】施钾和秸秆还田能增加小麦和玉米产量, 处理之间表现为: $NPK+St > NPK > NP+St > NP$, 施钾处理的作物产量与 NP 处理的产量差异显著, 轮作制度下玉米的施钾效应高于小麦。与山西单作制度相比, 河北轮作制度下的土壤钾素损耗严重, 除 $NPK+St$ 处理外土壤钾素均表现亏缺。秸秆还田和施用钾肥较 NP 处理可不同程度提高河北潮土和山西褐土耕层土的水溶性钾、非特殊吸附钾、非交换性钾、矿物钾及全钾含量, 且降低矿物钾比例的同时提高其余几种形态钾的比例。与定位开始相比, 两种类型土壤各形态钾含量和比例随时间变异特点不同, 两定位点土壤矿物钾和全钾含量均表现下降。【结论】整体看直接施用化肥钾的效果优于秸秆还田。但从提高作物产量和缓解土壤钾素下降来看, 小麦秸秆还田是一个有效的补钾措施。

关键词: 不同种植制度; 长期施钾; 秸秆还田; 作物产量; 土壤钾素

Effect of Long-Term Application of K Fertilizer and Wheat Straw to Soil on Crop Yield and Soil K Under Different Planting Systems

TAN De-shui, JIN Ji-yun, HUANG Shao-wen, LI Shu-tian, HE Ping

(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition Cycling, Ministry of Agriculture, Beijing 100081*)

Abstract: 【Objective】Effect of application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and status of soil K in plough layer under different planting systems was studied. 【Method】Experiment on long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil experiments in Hebei fluvo aquic soil and Shanxi brown soil in northern China were begun in 1992. 【Result】The results showed that K fertilizer and straw could improve yields of wheat and maize, and treatments showed: $NPK+St > NPK > NP+St > NP$, and treatment of K fertilizer made a significant difference to NP, and efficiency of K fertilizer in maize was higher than in wheat under rotation system of Hebei. In contrast with Shanxi, soil potassium wastage of rotation system in Hebei was more serious, only potassium in treatment of $NPK+St$ showed a surplus and others showed a wane. K fertilizer and straw could improve content of water-soluble K, non-specifically adsorbed K, non-exchangeable K, mineral K and total K in contrast to NP, however reduce proportion of mineral K and improve those of others in the two locating sites. Compared with the orientation's beginning, temporal variability character of soil K content and proportion showed a difference between two soil types, further more content of mineral K and total K behaved a decrease accordantly in two locating sites. 【Conclusion】As a whole, effect of K fertilizer applied to soil directly was excelled to wheat straw to soil. In order to increase crop yield and retard decrease of soil K, wheat straw to soil was an effective measure to complement potassium.

Key words: Different planting systems; Long-term application of K fertilizer; Wheat straw to soil; Crop yield; Soil K

收稿日期: 2006-06-23; 接受日期: 2006-09-08

基金项目: 中国-加拿大钾磷研究所 (PPI-PPIC) 合作项目, 国家科技支撑计划 (2006BAD02A14)

作者简介: 谭德水 (1978-), 男, 山东文登人, 博士研究生, 研究方向为植物营养与土壤养分管理。Tel: 010-68918662; E-mail: tandeshui@163.com。
通讯作者金继运 (1950-), 男, 河南范县人, 研究员, 博士, 研究方向为植物营养与土壤养分管理。Tel: 010-68918000; E-mail: jyjin@ppi.caas.ac.cn

0 引言

【研究意义】由于中国钾资源贫乏，目前使用的钾肥主要靠进口^[1]，每年要消耗大量外汇，面对日益严重的土壤缺钾问题，针对不同土壤类型和种植制度地区，需要寻找除化肥钾以外的对土壤钾的有效补充手段。【前人研究进展】小麦秸秆是大量而普遍存在的有机物料，是一种有机钾肥资源。秸秆直接或间接归还于土壤，可建立一个良好的土壤生态体系^[2]。由于秸秆不易腐烂，当季的直接作用不明显，在短时间内评价秸秆还田对土壤的改良效应尚不准确。国内外进行秸秆还田和施肥的研究不少，但大多数集中在施肥与秸秆还田对土壤物理性状、基本养分变化及对作物产量和品质影响的报道上^[3~8]，而定位于某一地块长期施钾和秸秆还田对钾素各形态影响及对土壤钾库的影响方面研究较少。金继运等^[9]对土壤中起重要作用的当季作物主要来源的交换性钾按存在位置和可交换性不同作了进一步分级，将交换性钾分为非特殊吸附钾和特殊吸附钾两种形态。土壤中不同形态钾的含量及相对活性决定了土壤钾对植物的有效性^[10]，这一钾素形态分级方法的提出，可以清楚了解作物对土壤各种形态钾的有效性吸收。【本研究的切入点】由于

土壤钾的存在形态、含量分布及其植物有效性是决定土壤供钾能力的重要因素^[11]，试验立足于华北黄淮海产区的潮、褐土区土壤上进行 13 年的秸秆与化肥配施长期定位试验。【拟解决的关键问题】观察不同种植制度下秸秆增钾效应和土壤钾素平衡、各形态钾转化特点，为不同类型土壤的钾肥资源优化管理提供大量的试验资料。

1 材料与方法

1.1 试验方案

本试验开始于 1992 年，包含了华北地区的两种主要种植制度：（1）河北省辛集市马兰农场，粘土矿物含量为蛭石>云母>绿泥石>石英>高岭石，土壤为壤质潮土，偏碱性，肥力中等，供钾能力偏低，种植制度为小麦-玉米轮作。（2）山西临汾市乔李镇南麻村，粘土矿物含量为云母>蒙脱石>绿泥石>石英，土壤为石灰性褐土，偏碱性，肥力中等，供钾能力较高，种植制度为小麦单作。两地均用当地主推高产品种。定位开始时 0~20 cm 耕层土壤肥力状况见表 1。铵态氮用系统研究法测定^[12]；速效磷用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提，钼锑抗比色；速效钾用 1 mol·L⁻¹ 醋酸铵浸提，原子吸收分光光度计测定。

表 1 1992 年各定位点供试土壤基础肥力

Table 1 Details on fertility of soil in each experimental locating site in 1992 (0-20 cm)

定位点 Locating site	土壤类型 Soil type	pH	阳离子交换量 CEC (cmol·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	有机质 OM (g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Avail. P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Avail. K (mg·kg ⁻¹)
河北 Hebei	潮土 Fluvo aquic soil	8.8	15.2	1.0	14.0	37.6	19.1	99.1
山西 Shanxi	褐土 Brown soil	8.9	14.8	0.9	13.0	35.0	24.8	137.9

试验设 4 个处理，均在充足的氮磷底肥下进行。河北定位点具体施肥处理为：（1）NP：N 225 kg·ha⁻¹、P₂O₅ 90 kg·ha⁻¹；（2）NP+St：N 225 kg·ha⁻¹、P₂O₅ 90 kg·ha⁻¹；（3）NPK：N 225 kg·ha⁻¹、P₂O₅ 90 kg·ha⁻¹、K₂O 150 kg·ha⁻¹；（4）NPK+St：N 225 kg·ha⁻¹、P₂O₅ 90 kg·ha⁻¹、K₂O 150 kg·ha⁻¹，具体肥料：尿素（底追与追肥比例为 1:1），磷酸二铵（全部底施），钾肥为氯化钾（加拿大进口钾肥，含 K₂O 60%，生理中性肥料，全部底施）。山西定位点具体施肥处理为：（1）NP：N 195 kg·ha⁻¹、P₂O₅ 105 kg·ha⁻¹；（2）NP+St：N 195 kg·ha⁻¹、P₂O₅ 105 kg·ha⁻¹；（3）NPK：N 195 kg·ha⁻¹、P₂O₅ 105 kg·ha⁻¹、K₂O 150 kg·ha⁻¹；（4）NPK+St：N 195 kg·ha⁻¹、P₂O₅ 105 kg·ha⁻¹、K₂O 150 kg·ha⁻¹。具体肥料：

硝酸磷肥（底施），钾肥为氯化钾（底施，肥料性质同上）。St 代表当季小麦秸秆全部还田。每处理 4 次重复，每小区 50 m²，随机排列，每季作物施肥量和施肥方式相同，栽培管理措施同于当地大田生产。

1992 年于最后一季作物收获时取 0~20 cm 土壤样品，风干保存，同时开始定位试验。2005 年最后一季作物收获时取 0~20 cm 土层土样，风干土过 1 mm 筛，用于土壤各分级形态钾含量的测定，风干土过 0.25 mm 筛用于土壤全钾含量测定。1992 年与 2005 年土壤样品各项目测定同时进行。

1.2 测定项目及方法

水溶性钾按水土比 10:1 用蒸馏水提取；非特殊吸附钾用 0.5 mol·L⁻¹ 中性醋酸镁溶液提取，非特殊吸

附性钾=醋酸镁浸提钾-水溶性钾；特殊吸附钾用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 中性醋酸铵溶液提取，特殊吸附钾=醋酸铵浸提钾-醋酸镁浸提钾；非交换性钾用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸溶液煮沸提取，非交换性钾=硝酸消煮钾-醋酸铵浸提钾；矿物钾=全钾-硝酸消煮钾；全钾：用氢氧化钠熔融测定。提取出来的钾稀释后用原子吸收分光光度计测定。

植株钾含量测定： $\text{H}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}_2$ 联合消煮，原子吸收分光光度计测定。

钾肥产量效应 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = 施钾增产量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) / 施钾量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

土壤钾素表观盈亏量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) = 投入土壤钾素总量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) - 作物带出土壤钾素总量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

钾素平衡系数=投入土壤钾量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) / 带出土壤钾量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)。

用 DPS 3.01v 专业版软件进行统计分析。

表 2 长期施用钾肥与秸秆还田对作物吸钾量和土壤钾素平衡的影响

Table 2 Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on quantity of K absorbed by crop and balance status of soil K

定位点 Locating site	处理 Treatment	小麦秸秆钾量 (K_2O) K quantity absorbed by straw		年均总吸收钾 (K_2O) Total K quantity absorbed annually ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)			年均盈亏量 (K_2O) Profit and loss annually ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	钾素平衡系数 Balance index of K
		含量 Quantity ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	比例 Proportion (%)	小麦 Wheat	玉米 Maize	总计 Total		
河北潮土 Hebei fluvo aquic soil	NP	77.8b	81.5	95.5	100.4	195.9b	-195.9±65.5	0
	NP+St	144.3a	86.7	166.4	179.3	345.7a	-201.4±73.3	0.42 ± 0.09
	NPK	142.3a	85.8	165.9	213.6	379.5a	-79.5±55.4	0.79 ± 0.17
	NPK+St	140.6a	85.9	163.7	227.9	391.6a	49.0±91.3	1.13 ± 0.22
山西褐土 Shanxi brown soil	NP	110.5c	83.9	131.6	-	131.6c	-131.6±23.9	0
	NP+St	120.6b	84.4	142.9	-	142.9b	-22.3±26.8	0.84 ± 0.04
	NPK	126.8b	84.5	150.1	-	150.1b	-0.1±4.3	1.00 ± 0.17
	NPK+St	140.5a	85.2	164.9	-	164.9a	125.6±4.5	1.76 ± 0.15

同一地区不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 (LSD)。下同

Lowercase letters in the same location site indicate significant difference at 5% level (LSD). The same as below

2.2 长期施用钾肥与秸秆还田对耕层土壤不同形态钾素含量的影响

从对植物有效性上讲，水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾的总和就是速效钾，非交换性钾即为缓效钾^[14]。从表 3 看到，各种形态钾在两种类型土壤中的含量分布基本是矿物钾 > 非交换性钾 > 特殊吸附钾 ≈ 非特殊吸附钾 > 水溶性钾。

秸秆还田和施用钾肥较 NP 处理均可不同程度提高河北潮土和山西褐土的水溶性钾、非特殊吸附钾、非交换性钾和矿物钾含量，处理之间表现为：NPK+St > NPK > NP+St > NP。NPK 处理和 NPK+St 处理的几

2 结果与分析

2.1 长期施用钾肥与秸秆还田对土壤钾素收支平衡的影响

小麦秸秆钾含量占植株中钾素总含量的 80% 以上 (表 2)，是植物体中丰富的钾素资源^[13]，施钾和秸秆还田均可显著增加秸秆含钾量和作物的总吸钾量。在河北潮土上玉米比小麦吸收更多的钾，且轮作制度下作物年均从土壤中带走大量的钾素，除 NPK+St 外其它 3 个处理都出现不同程度的钾素表观亏缺，NPK 处理平衡系数仅在 0.79；在山西褐土小麦单作制度下，除 NPK+St 外其它 3 个处理也出现钾素亏缺但亏缺量相对较少，NPK 处理钾平衡系数为 1，且 NPK+St 处理有较多盈余的土壤钾素。由此看到轮作制度下的土壤钾素损耗巨大。

种形态钾含量均与 NP 差异显著 (山西褐土特殊吸附钾除外)。特殊吸附钾含量则不受施用钾肥和秸秆还田措施的影响。向土壤投入钾素的两种措施相比较，直接施用钾肥较 NP 处理在增加各种形态钾含量的效果上明显优于秸秆还田 (将还田的秸秆钾按等量的肥料钾计算)。

相比定位开始时，河北潮土定位点水溶性钾和非特殊吸附钾含量只有 NPK 和 NPK+St 处理升高，另外两处理则降低，特殊吸附钾含量各处理均有升高，各处理土壤非交换性钾和矿物钾含量都有不同程度的降低。在山西褐土定位点上，相比定位开始时除 NP 处

理非交换性钾含量有所降低以及全部处理的矿物钾含量降低外, 其余各处理另外几种形态钾含量均有所升高。

表 3 长期施钾和秸秆还田条件下两种类型土壤不同形态钾素含量时间变异状况

Table 3 Temporal variability status of content of different forms of potassium in two soil types under long-term application of K fertilizer and wheat straw

定位点 Locating site	处理 Treatment	水溶性钾 Water-soluble K (mg·kg ⁻¹)		非特殊吸附钾 Non-specifically adsorbed K (mg·kg ⁻¹)		特殊吸附钾 Specifically adsorbed K (mg·kg ⁻¹)		非交换性钾 Non-exchangeable K (mg·kg ⁻¹)		矿物钾 Mineral K (%)	
		1992	2005	1992	2005	1992	2005	1992	2005	1992	2005
		河北潮土 Hebei fluvo aquic soil	NP NP+St NPK NPK+St	11.4	8.9b 9.8b 19.4a 20.4a	41.4	30.3c 32.5c 56.8b 72.6a	46.4	51.4b 57.5ab 58.6a 58.4a	1070.7	911.9b 940.2b 1038.6a 1062.1a
山西褐土 Shanxi brown soil	NP NP+St NPK NPK+St	23.7	25.4b 29.0b 54.0a 59.1a	57.3	66.3b 79.3b 126.8a 138.0a	57.0	74.0a 70.2a 69.9a 72.2a	1149.3	1089.1c 1149.8b 1180.0a 1209.0a	1.67	1.60b 1.60b 1.60b 1.61a

2.3 长期施用钾肥与秸秆还田对耕层土壤不同形态钾素比例的影响

秸秆还田和施用钾肥对土壤各种形态钾在全钾中比例的影响与含量相似(表 4)。不同在于秸秆还田和施用钾肥较 NP 处理可降低土壤矿物钾比例, 源于施用钾肥与秸秆还田进入土壤的钾素都是以离子钾的

形态存在从而削弱矿物钾的比例。不同钾素投入措施相比较, 施用钾肥较秸秆还田可明显提高水溶性钾、非特殊吸附钾、非交换性钾在全钾中的比例, 也可明显降低矿物钾比例。与定位开始时各种形态钾比例相比, 其时间变异特征和含量变异特征相同。

表 4 长期施钾和秸秆还田条件下两种类型土壤不同形态钾素比例时间变异状况

Table 4 Temporal variability status of proportion of different forms of potassium in two soil types under long-term application of K fertilizer and wheat straw (%)

定位点 Locating site	处理 Treatment	水溶性钾 Water-soluble K		非特殊吸附钾 Non-specifically adsorbed K		特殊吸附钾 Specifically adsorbed K		非交换性钾 Non-exchangeable K		矿物钾 Mineral K	
		1992	2005	1992	2005	1992	2005	1992	2005	1992	2005
		河北潮土 Hebei fluvo aquic soil	NP NP+St NPK NPK+St	0.063	0.054 0.059 0.115 0.120	0.230	0.185 0.196 0.338 0.425	0.258	0.315 0.347 0.348 0.342	5.95	5.58 5.67 6.17 6.22
山西褐土 Shanxi brown soil	NP NP+St NPK NPK+St	0.132	0.147 0.167 0.310 0.337	0.318	0.384 0.459 0.727 0.786	0.317	0.429 0.406 0.401 0.411	6.39	6.31 6.65 6.76 6.89	92.85	92.73 92.32 91.80 91.58

2.4 长期施用钾肥与秸秆还田对耕层土全钾含量的影响

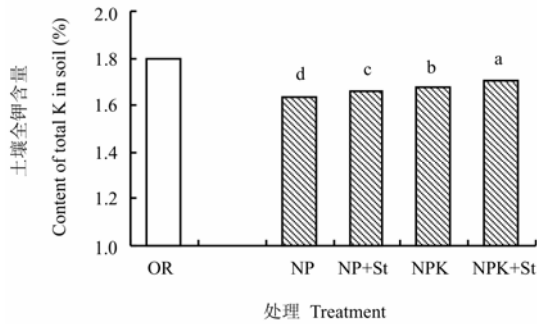
如图 1 和图 2 所示, 两定位点施用钾肥和秸秆还田处理的土壤全钾含量高于 NP 处理, 处理间表现为: NPK+ St>NPK>NP + St>NP。河北轮作潮土定位点

其余 3 个处理均与 NP 处理差异显著, 而山西小麦单作褐土点只有施钾处理(NPK 与 NPK+St)与 NP 差异达显著水平。与定位开始时相比, 两定位点各处理全钾含量均表现降低, 河北轮作制度下土壤全钾含量下降幅度大, 山西小麦单作区相对较小。河北定位点

各处理之间差异都达到显著水平也说明该轮作制下的耗钾量大。

2.5 长期施用钾肥与秸秆还田对小麦、玉米的产量效应

施用钾肥和秸秆还田均能提高小麦和玉米产量（表 5）。两定位点处理之间不同作物产量均表现为：



OR 代表定位开始。下同 OR: Delegating experiment's beginning. The same as below

图 1 长期施钾和秸秆还田对河北潮土全钾含量的影响

Fig. 1 Effect of application of K fertilizer and wheat straw to soil on content of total K in fluvo aquic soil of Hebei

表 5 不同类型土壤上长期施钾与秸秆还田对小麦、玉米产量（13 年平均）的影响

Table 5 Effect of long-term K application of K fertilizer and wheat straw to soil on yield of wheat and maize in different types of soil (average of 13 years)

定位点 Locating site	处理 Treatment	年均产量 Yield annually (kg·ha ⁻¹)			增产 Yield increase (%)		钾肥产量效应 Yield efficiency of K (kg·kg ⁻¹)	
		小麦 Wheat	玉米 Maize	总产 Total yield	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize
河北潮土	NP	6133.6b	5957.1b	12090.7	-	-	-	-
Hebei fluvo aquic soil	NP+St	6320.0b	6362.0b	12682.0	3.0	6.8	-	-
	NPK	6624.0a	7130.8a	13754.8	8.0	19.7	3.3	7.8
	NPK+St	6662.6a	7172.8a	13835.4	8.6	20.4	2.3	5.4
山西褐土	NP	5391.4c	-	5391.4	-	-	-	-
Shanxi brown soil	NP+St	5660.6b	-	5660.6	5.0	-	-	-
	NPK	5799.2b	-	5799.2	7.6	-	2.7	-
	NPK+St	6064.5a	-	6064.5	12.5	-	2.7	-

3 讨论

目前大田生产条件下作物对土壤钾素的消耗量较大^[15]，中国北方地区陆续出现一些土壤缺钾和作物施钾增产的报道^[16,17]。本研究得出两定位点施钾处理作物产量与对照差异均达到显著水平，但山西小麦单作区处理间产量差距相对较小。河北轮作地区施钾或秸秆还田处理作物总吸钾量高且土壤钾素平衡系数低，

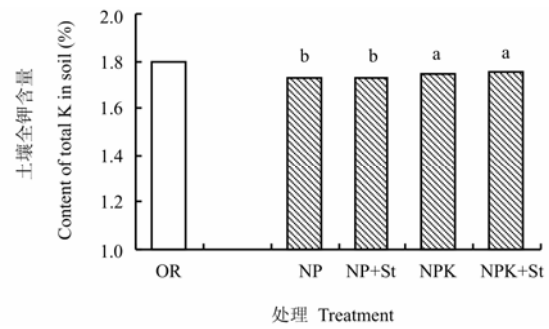


图 2 长期施钾和秸秆还田对山西褐土全钾含量的影响

Fig. 2 Effect of application of K fertilizer and wheat straw to soil on content of total K in brown soil of Shanxi

NPK+St>NPK>NP+St>NP。河北轮作潮土区施钾处理作物产量平除氮磷肥配合秸秆处理外其余处理与 NP 相比差异显著。钾肥和秸秆还田效果不同。在山西褐土区 3 个处理产量均与 NP 处理差异显著。轮作潮土区施钾和秸秆还田对玉米的增产效果高于小麦。从钾肥产量效应看，轮作潮土区玉米的钾肥产量效应高于小麦，NPK 配施的效应高于 NPK+St 处理，这源于秸秆还田的钾素补充效应；而山西褐土在此两处理的钾肥产量效应相同。

除 NPK+St 土壤钾素表现有盈余外其余处理钾素出现很大程度的亏缺。从这些方面以及钾肥产量效应侧面可看出轮作制度下土壤钾素消耗严重。从保持土壤钾素平衡和使作物保持在一个相当高的产量水平方面看，向土壤中投入钾素是当今生产的一个必需措施^[18]。

在评价土壤钾对当季作物的有效性时，往往以速效钾（水溶性钾+非特殊吸附钾+特殊吸附钾）作为主

要指标,而在评价土壤钾对作物的长期有效性时,则不仅要考虑速效钾的水平,更要注意非交换性钾的贮量及其释放速率^[9]。谢建昌研究认为^[19],土壤钾素的充分与否是由土壤速效钾含量和非交换性钾含量及其释放速率共同决定的。本研究表明:河北潮土复种指数高,作物每年从土壤中带走的钾素较多,无钾肥处理中可供速效钾含量被作物吸收降到最低值以后,其钾素的消耗主要来自非交换性钾的释放。而施钾和秸秆还田处理中各种速效钾含量明显升高,反映了潮土固钾能力不强,从而使投入土壤中的钾仍以速效的形态存在。褐土定位点从试验开始速效钾含量相对较低,接近此土壤类型速效钾的“最低水平值”(可能由于石灰性褐土中 Ca^{2+} 的大量存在影响土壤胶体上 K^+ 的解离),无钾处理中小麦吸收的钾主要来自非交换性钾以及矿物钾的释放(矿物钾贡献较大)^[20],由于长期施氮磷肥可促进土壤自然钾素的释放^[21,22],其释放速率和数量均可满足作物的需要,同时也增加了速效态钾离子的含量,供钾能力较高,与前人研究相似^[23]。所以生产中应重视土壤矿物钾的实际意义,通过栽培措施最大限度的促进矿物钾有效性也是今后研究的重点所在。两种类型土壤相比较,经过13年的外界条件影响,河北潮土矿物钾含量下降幅度较大,这是气候条件和种植制度的双重影响^[24,25]的结果。另外研究发现即使将还田的秸秆钾换算成等量的肥料钾,对土壤速效钾的增加效果也远不如肥料钾,这可能是由于秸秆钾离子在进入土壤溶液的过程中被雨水大量冲失的缘故,这方面还有待于进一步研究。

另外本研究还发现,无论是施用钾肥或是秸秆还田,两定位点各处理全钾含量较定位开始都有着不同程度的降低,相比较而言河北轮作制度下全钾降低幅度较大且各处理全钾含量差异达显著水平,从正面说明了轮作制度下的土壤钾素消耗严重,从节省资源的角度需秸秆还田配合钾肥施用用来缓解土壤钾素的耗竭^[7]。

4 结论

施用钾肥和秸秆还田均提高了河北、山西两定位点小麦和玉米产量。河北轮作制度下土壤钾素亏缺严重,两种土壤类型中只有NPK+St处理土壤钾素表观有盈余,单纯小麦秸秆还田或施钾尚不能抵消钾素的消耗。秸秆还田和施用钾肥处理土壤水溶性钾、非特殊吸附钾、非交换性钾和矿物钾的含量均高于NP处理,同时降低土壤中矿物钾比例而提高其余几种形态

钾的比例,两种投入钾素的措施对土壤全钾贡献较明显,特殊吸附钾含量和比例则不受钾肥和秸秆还田措施的影响,两种类型土壤对外源钾的固定能力不强。与定位开始相比两土壤类型各形态钾的变异特点不同,但同一点各形态钾的含量和比例变异特征相似。河北潮土区耕层土壤矿物钾和全钾含量较定位开始时下降,下降其幅度较山西褐土点的大。

References

- [1] 王石军. 发展我国钾肥工业的几点思考. 化肥工业, 1996, 26(1): 12-14.
Wang S J. Reflections on expansion of potassic fertilizer industry in China. *Journal of the Chemical Fertilizer Industry*, 1996, 26(1): 12-14. (in Chinese)
- [2] 李秋梅, 陈新平, 张福锁, V. Römheld. 冬小麦-夏玉米轮作体系中磷钾平衡的研究. 植物营养与肥料学报, 2002, 8: 152-156.
Li Q M, Chen X P, Zhang F S, Römheld V. Study on balance of phosphorus and potassium in winter wheat and summer maize rotation system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8: 152-156. (in Chinese)
- [3] 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究. 农业工程学报, 2002, 18(2): 49-52.
Lao X R, Wu Z Y, Gao Y C. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 49-52. (in Chinese)
- [4] 刘世平, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许 轲, 阮慧芳. 免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响. 应用生态学报, 2005, 16: 393-396.
Liu S P, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Ruan H F. Effect of no-tillage plus inter-planting and remaining straw on the field on cropland eco-environment and wheat growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16: 393-396. (in Chinese)
- [5] 王 英, 孙克刚, 焦 有, 郭忠义, 吴春西, 李瑞萍. 河南主要土类施用钾肥配合秸秆还田定位试验初报. 河南农业科学, 1996, (1): 20-24.
Wang Y, Sun K G, Jiao Y, Guo Z Y, Wu C X, Li R P. Study on the fixed site trials for the combined application of K fertilizer and straw in Henna major soil types. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 1996, (1): 20-24. (in Chinese)
- [6] Turley D B, Phillips M C, Johnson P, Jones A E, Chambers B J. Long-term straw management effects on yields of sequential wheat (*Triticum aestivum* L.) crops in clay and silty clay loam soils in England. *Soil and Tillage Research*, 2003, 71: 59-69.
- [7] 李忠佩, 唐永良, 石 华, 高坤林. 不同施肥制度下红壤稻田的养分循环与平衡规律. 中国农业科学, 1998, 31(1): 46-54.
Li Z P, Tang Y L, Shi H, Gao K L. Nutrient cycling and balance of paddy fields in different fertilization systems in red soil region of subtropical China. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(1): 46-54.

- (in Chinese)
- [8] Nel P C, Barnard R O, Steynberg R E, De Beer J M, Groeneveld H T. Trends in maize grain yields in a long-term fertilizer trial. *Field Crops Research*, 1996, 47: 53-64.
- [9] 金继运. 土壤钾素研究进展. *土壤学报*, 1993, 30(1): 94-101. Jin J Y. The advance of soil potassium. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(1): 94-101. (in Chinese)
- [10] 黄绍文, 金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展. *土壤肥料*, 1995, 5: 23-29. Huang S W, Jin J Y. Research of potassium forms and plant validity in soils. *Soils and Fertilizers*, 1995, 5: 23-29. (in Chinese)
- [11] 黄绍文, 金继运, 王泽良, 程明芳. 北方主要土壤钾形态及其植物有效性研究. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4: 156-164. Huang S W, Jin J Y, Wang Z L, Cheng M F. Native potassium forms and plant availability in selected soils from Northern China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4: 156-164. (in Chinese)
- [12] 金继运, 自由路. 精准农业与土壤养分管理. 北京: 中国大地出版社, 2001: 152-159. Jin J Y, Bai Y L. *Precision Agriculture and Management of Soil Nutrients*. Beijing: China Land Press, 2001: 152-159. (in Chinese)
- [13] 曹荣祥, 王志明, 童晓利, 李刚华, 赵荷娟, 张海军. 稻麦轮作制中秸秆钾与化肥钾利用的研究. *土壤肥料*, 2000, 4: 23-26. Cao R X, Wang Z M, Tong X L, Li G H, Zhao H J, Zhang H J. Study on the utilization of straw potassium and chemical potassium in rice-wheat rotation system. *Soils and Fertilizers*, 2000, 4: 23-26. (in Chinese)
- [14] 杨振明, 阎飞, 韩丽梅. 土壤钾素研究的新进展. *吉林农业大学学报*, 1998, 20(3): 99-106. Yang Z M, Yan F, Han L M. Advances in the research of soil potassium. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1998, 20(3): 99-106. (in Chinese)
- [15] 刘会玲, 陈亚恒, 段毅力, 许 嗒. 土壤钾素研究进展. *河北农业大学学报*, 2002, 25(增刊): 66-68. Liu H L, Chen Y H, Duan Y L, Xu H. The advance of soil potassium. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2002, 25(Suppl.): 66-68. (in Chinese)
- [16] 中国农业科学院土壤肥料研究所, 加拿大钾磷研究所北京办事处. 北方土壤钾素和钾肥效益. 北京: 中国农业科技出版社, 1994: 1-5. Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Peking Office of Canada Phosphorus and Potassium Institute. *Soil Potassium and Yield Responses in North China*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1994: 1-5. (in Chinese)
- [17] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 梁鸣早. 我国北方土壤-作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6: 123-132. Liu R L, Jin J Y, Wu R G, Liang M Z. Study on the characteristics of potassium cycling in different soil-crop systems in Northern China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6: 123-132. (in Chinese)
- [18] 陈旭晖, 陈湘燕. 贵州土壤钾素状况与钾肥施用问题. *西南农业大学学报*, 2003, 25(2): 157-160. Chen X H, Chen X Y. The content of soil potassium in Guizhou and the application of potassium fertilizer. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2003, 25(2): 157-160. (in Chinese)
- [19] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展. *土壤*, 1999, 31(5): 244-254. Xie J C, Zhou J M. Progress in study on soil potassium and application of potassium fertilizers in China. *Soils*, 1999, 31(5): 244-254. (in Chinese)
- [20] Jouany C, Colomb B, Bosc M. Long-term effects of potassium fertilization on yields and fertility status of calcareous soils of south-west France. *European Journal of Agronomy*, 1996, 5: 287-294.
- [21] 姚源喜, 刘树堂, 郇恒福. 长期定位施肥对非石灰性潮土钾素状况的影响. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10: 241-244. Yao Y X, Liu S T, Huan H F. Effect of long-term fertilization on the status of potassium in noncalcareous fluvo-aguic soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10: 241-244. (in Chinese)
- [22] 范钦楨, 谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变. *土壤学报*, 2005, 42: 591-599. Fan Q Z, Xie J C. Variation of potassium fertility in soil in the long-term stationary experiment. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42: 591-599. (in Chinese)
- [23] 陈 防, 鲁剑巍, 万运帆, 刘冬碧, 许幼生. 长期施钾对作物增产及土壤钾素含量及形态的影响. *土壤学报*, 2000, 37: 233-241. Chen F, Lu J W, Wan Y F, Liu D B, Xu Y S. Effect of long term potassium application on soil potassium content and forms. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37: 233-241. (in Chinese)
- [24] 范闻捷, 介晓磊, 李有田, 自由路, 季保平. 潮土区小麦-玉米轮作周期内土壤钾素的动态研究. II. 施钾对作物产量及土壤钾素动态的影响. *华中农业大学学报*, 1999, 18: 427-430. Fan W J, Jie X L, Li Y T, Bai Y L, Ji B P. Studies on dynamics of potassium in soil in wheat-maize rotated chao soil region. II. Effects of potash application on crop yield and dynamics of potassium in soil. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1999, 18: 427-430. (in Chinese)
- [25] Officer S J, Tillman R W, Palmer A S. Plant available potassium in New Zealand steep-land pasturing soils. *Geoderma*, 2006, 133: 408-420.

(责任编辑 李云霞)