植物营养与肥料学报 2010,16(4):801-808
Plant Nutrition and Fertilizer Science

山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响

王宏庭[1], 金继运[2], 王 斌[1], 赵萍萍[1]
(1 山西省农业科学院土壤肥料研究所,山西太原 030031;
2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要:在山西石灰性褐土一年一作条件下,通过16年的田间定位试验,研究了长期施钾和秸秆还田对小麦产量和土壤钾素平衡的影响。结果表明,只施用氮、磷肥,冬小麦年平均产量5.5 t/hm^2,土壤钾素养分严重亏缺,年平均亏缺104.3 kg/hm^2,与试验前的初始值比较,土壤速效钾和缓效钾含量分别下降23.6%和14.3%。在施用氮、磷肥的基础上每年施用钾肥(K_2O 150 kg/hm^2),平均增产10.2%以上;小麦秸秆还田平均增产6.6%以上,二者配合平均增产17.6%,年平均吸钾量提高32.0 kg/hm^2。与试验初始值比较,土壤速效钾、缓效钾分别提高38.6%和11.0%。在施用氮、磷肥的基础上,长期施用钾肥和秸秆还田在显著增加冬小麦的经济产量、生物产量和吸钾量的同时,也减少年度间因气候因素等影响引起的产量变异,提高年度间产量和植物吸钾量的稳定性。

关键词:钾肥;褐土;秸秆还田;产量;土壤钾素平衡
中图分类号:S512.1.06　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2010)04-0801-08

Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi

WANG Hong-ting[1], JIN Ji-yun[2], WANG Bin[1], ZHAO Ping-ping[1]
(*1 Institute of Soil and Fertilizer, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China;*
2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Under the condition of wheat-fallow rotation on a calcareous cinnamon soil in Shanxi province, a long-term field experiment was conducted for 16 years to study the effects of long-term potassium(K) application and wheat straw return on wheat yields and soil K status. The results show that application of nitrogen(N) and phosphate(P) fertilizer only without K addition to the system(NP treatment) results in an average yield of 5.5 t/ha and an average annual deficit of 104.3 kg/ha, which indicates there is a serious deficit of soil potassium. Compared with their initial values, contents of soil available K and slowly available K are decreased by 23.6% and 14.3%, respectively. Compared with the NP treatment, the average wheat yield is increased by 10.2% under the application of K fertilizer(NPK treatment) at the rate of K_2O 150 kg/ha annually, and is increased by 6.6% under the straw return treatment(NP + St treatment). The combination of wheat straw return to soil and K application(NPK + St treatment) can increase wheat yield by 17.6%, and K uptake by wheat plants is increased by 32.0 kg/ha. Compared with their initial values, contents of soil available K and slowly available K are increased by 38.6% and 11.0%, respectively. On the base of N and P fertilizer application, wheat grain yield, biomass yield and K uptake by wheat plants are significantly increased under the long-term K application or wheat straw return, and the stability of yield and plant K uptake are improved and the yield variation among the 16 crop seasons is reduced as well.

Key words: potassium fertilizer; cinnamon soil; straw return to soil; yield; soil potassium balance

收稿日期:2009-08-10　　**接受日期**:2010-01-12
基金项目:国际植物营养研究所(IPNI)中国项目(NMBF-Shanxi);国家"十一五"科技支撑计划(2006BAD25B01,2006BAD05B03,2008BADA4B07)资助。
作者简介:王宏庭(1968—),男,山西昔阳人,博士,副研究员,主要从事植物营养和土壤养分管理方面的研究。
Tel:0351-7122524, E-mail:htwang@ipni.ac.cn

钾是植物必需的三大营养元素之一。正常情况下植物吸钾量一般都超过吸磷量,与氮相近,而喜钾植物需钾量高于需氮量[1]。土壤钾以水溶性、交换性和非交换性形态存在,不同形态之间相互处于动态平衡,是植物钾素养分的重要来源[1-5]。对不同土壤的钾素状况、土壤形态和施用的有效性和方法的研究引起了国内外学者广泛重视[6-12]。20世纪90年代以来,随着农业生产的发展,农作物产量的大幅度提高,氮、磷化肥的大量施用和有机肥施用量的减少,致使北方地区农业生产中土壤缺钾和施钾增产的报道逐渐增多,农业生产中钾肥的施用也逐渐增多[13-15]。从农业可持续发展看,理想的养分管理应该长期保持养分投入和产出的平衡[16-17],增施化学钾肥或秸秆还田是增加作物产量和保持土壤钾素肥力的重要措施和手段。

长期定位试验对于了解产量变化趋势、估计养分的动态和平衡、预测土壤养分供应能力、评价系统的持续性是非常有价值的[18]。高祥照等[19]根据全国耕地地力监测点10余年监测结果,分析了我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况,结果表明常规施肥中氮、磷盈余,钾处于亏缺状况,土壤速效钾呈下降趋势。国内一些学者也通过长期定位试验探索了长期施钾或秸秆还田在保持土壤钾素肥力和增产方面的作用[20-26],多集中在施肥与秸秆还田对土壤理化性状、作物产量及品质、养分变化等的影响上,而定位于某一地块长期施钾和秸秆还田对土壤钾素形态、平衡的影响方面研究较少。而占山西耕地面积54.86%的褐土类土壤长期施钾和秸秆还田对作物产量和土壤钾素平衡的研究鲜有报道。本试验在山西褐土区土壤上进行了16年的施钾肥和秸秆还田长期定位试验,旨在监测土壤钾素肥力和作物产量的动态变化,以期为山西褐土钾素肥力的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

试点位于山西省临汾市尧都区乔李镇南麻村(东经111°37′,北纬36°9′),属于半干旱半湿润季风气候区,降水量分布不均,60%~70%的自然降水集中在夏季。1992~2008年间的年降水量和年平均气温见图1。土壤为石灰性褐土,母质为冲积性黄土,粘土矿物含量为云母>蒙脱石>绿泥石>石英,土壤肥力中等。试验始于1992年秋,试验开始前耕层(0—20 cm)土壤基本肥力状况为:pH 8.5,有机质含量12.6 g/kg,全氮1.1 g/kg,速效磷14.2 mg/kg,速效钾140 mg/kg,缓效钾1050 mg/kg。

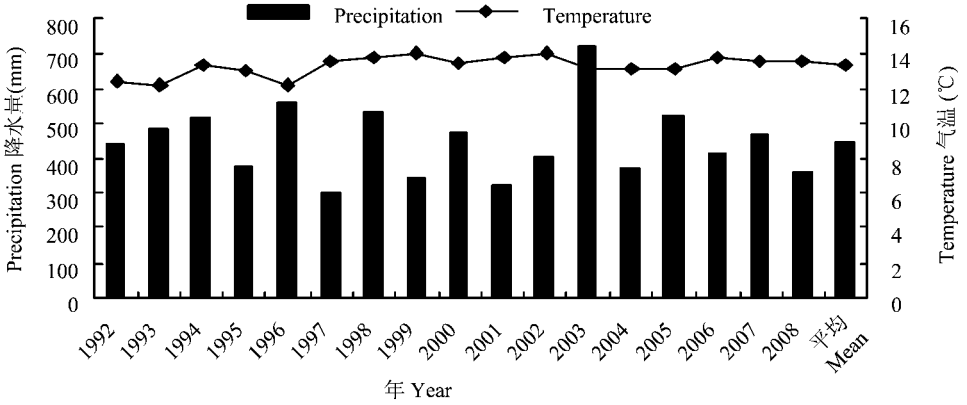

图1 1992~2008年的年降水量和气温分布

Fig.1 Distributions of annual precipitation and temperature in 1992-2008

1.2 试验设计

试验为随机区组设计,在保证氮、磷肥供应的基础上,设4个处理:NP、NPK、NP+St、NPK+St,其中St代表小麦秸秆全部还田;氮、磷、钾养分的施用量分别为N 195 kg/hm^2、P_2O_5 105 kg/hm^{2}和K_2O 150 kg/hm^2,重复4次。1992~2000年氮肥品种选用尿素(N 46%),磷肥用过磷酸钙(P_2O_5 14%),60%的氮肥及全部磷肥作基肥,40%氮肥作追肥。2001年至2008年肥料选用硝酸磷肥(N 26.5%,P_2O_5 11.5%),基肥施用,钾肥品种一直选用加拿大产红色氯化钾(K_2O 60%),基肥施用。小区面积33.3 m^2。供试作物为冬小麦,考虑到生产实际,所用小麦1993年为晋麦35,1994年为5088,1995、1996年为4094,1997、1998年为4096,1999、2000年品种为晋麦31,2001~2003年品种选用济南17,2004年为石家庄8,2005年为绿丰1,2006~2007晋麦81,2008年烟农19。小麦采用条播,行距为20 cm,播量为225 kg/hm^2。每年10月中旬播种,翌年6月中

旬收获。小麦生育期间通常浇水 3 次(越冬前、返青、灌浆期各 1 次),其它管理措施按当地习惯。一年一熟,冬小麦收获后休闲。

1.3　样品分析、相关计算及统计方法

土壤和植株样品(子粒和秸秆)的分析采用常规分析方法[27]进行,土壤速效钾用 1 mol/L 醋酸铵浸提,土壤缓效钾用 1 mol/L 硝酸溶液煮沸提取,火焰光度计测定。植株全钾含量测定用 H_2SO_4 -HNO_3 -$HCLO_4$ 消煮,火焰光度计测定。

有关土壤钾素平衡的计算公式:

土壤钾素表观盈亏量(kg/hm^2) = 钾素投入总量(kg/hm^2) - 作物带出土壤钾素总量(kg/hm^2);

钾素平衡系数 = 投入土壤钾量(kg/hm^2)/带出土壤钾量(kg/hm^2)。

数据统计分析采用 SPSS 11.5 软件进行。

2　结果与分析

2.1　长期施钾和秸秆还田对冬小麦经济产量、生物产量及钾肥农学效率的影响

在栽培管理措施相对一致的情况下,同一年度的不同肥料处理明显影响作物的经济产量和生物产量,而不同年度产量的差异则表现为气候因素、肥料处理甚至品种的共同作用。

2.1.1 对经济产量和钾素农学效率的影响　从 16 年结果(表 1)看出,在施用氮、磷肥的基础上长期施用钾肥和秸秆还田冬小麦产量增产显著。其中,NP 处理的冬小麦平均产量为 5.5 t/hm^2,年度间变异最大,达 15.7%; NPK + St 处理产量最高,平均为 6.5 t/hm^2,年度间变异最小,为 13.1%; 而 NPK 和 NP + St 处理间差异未达显著水平,不同年度间的变异系数也小于 NP 处理。表明施用钾肥和秸秆还田既增加作物产量,同时降低年度间的产量变异,有利于作物稳产。

表 1 还看出,与 NP 处理相比,NPK 处理增产率为 10.3%,每 kg K_2O 平均增产 3.6 kg 小麦,NPK + St 较 NP + St 处理平均增产率为 10.2%,每 kg K_2O 平均增产 3.9 kg 小麦,表明无论是否秸秆还田,施钾均有 10% 以上的增产,而秸秆还田有助于钾肥农学效率的提高。NP + St 处理较 NP 处理平均增产率为 6.6%,NPK + St 处理较 NPK 处理平均增产率为 6.7%,说明无论是否施钾,秸秆还田增产率可达 6% 以上。

2.1.2 对生物产量的影响　作物的生物产量是气候、品种、施肥等因素的综合作用的表现。表 1 表明,在施用氮、磷肥的基础上长期施用钾肥和秸秆还田对冬小麦的生物产量均有增产效应,但不同年度存在差异。从不同处理的多年平均效果看,NP 处理的冬小麦生物产量最低,平均为 12.3 t/hm^2,年度间变异较大,达 8.9%; 而 NPK、NP + St 和 NPK + St 处理均较 NP 处理增产,其中,NPK + St 处理产量为 14.7 t/hm^2,与 NP 处理的差异达显著水平; NPK、NP + St 处理和 NP 处理间未达显著水平,但年度间的变异系数小于 NP 处理,这与冬小麦的经济产量表现一致,但变异系数小于经济产量的变异系数。

2.2　长期施钾和秸秆还田对冬小麦吸钾量的影响

从冬小麦的吸钾量(表 2)可以看出,年份间受气候等因素影响波动较大,但不同处理间表现出明显差异。其中,NP 处理子粒吸钾量和植株总吸钾量最低,16 年平均分别为 16.8 和 104.3 kg/hm^2; NPK + St 处理子粒吸钾量和植株总吸钾量表现最高,平均值分别为 20.8 和 136.0 kg/hm^2。各处理子粒吸钾量和植株总吸钾量的大小顺序为: NPK + St > NPK > NP + St > NP。

从年度间吸钾量的变异情况看,NP 处理的变异较大,子粒吸钾量变异为 17.6%,植株吸钾总量变异为 18.0%; NPK、NP + St、NPK + St 处理的变异程度均低于 NP 处理,NPK + St 处理的变异最小,子粒吸钾量变异为 15.5%,植株吸钾总量变异为 14.0%,可见,施用钾肥和秸秆还田不仅可以提高冬小麦的吸钾量,而且能降低植株吸收钾素的变异程度,从而提高吸钾量的稳定性。

2.3　土壤钾素的表观平衡

在农业生态系统中,土壤(养分)肥力的保持或改善是以土壤养分循环为基础的。从持续农业发展的观点出发,养分管理应该保持养分投入和支出的平衡[16]。Heckman 等[17]指出,有效的养分管理需要准确计算作物的移走量。因此定期计算农田养分收支平衡是检查土壤肥力状况和预测土壤养分水平的发展趋势的方法之一。根据这种养分平衡的计算可以确定土壤肥力主要演化过程的方向和土壤肥力的水平,并作为拟定提高农业土壤肥力措施和提高推荐施肥效果的主要依据。土壤—作物系统中各种输入、输出途径对土壤养分现存量的影响,一般以养分的亏盈量或亏盈程度表示,而用平衡系数反映对土壤养分平衡程度的调控效果。本研究只探讨了土壤-作物系统内影响土壤钾素库的作物子粒产出、作物秸秆产出、施钾肥输入和作物秸秆还田输入 4 种主要途径,故把算得的钾素亏盈量称为表观亏盈量。各处理的钾素总输出量为植物总吸钾量(表 2),各处理的钾投入量、盈亏量及平衡系数列于表 3。

表1 长期施钾和秸秆还田对冬小麦经济产量、生物产量及钾肥农学效率的影响

Table 1 Influences of applications of K fertilizer and straw return to field on economic yield, biomass yield and agronomic efficiency of K_2O over 16 years

年份 Years	经济产量(t/hm^2) Economic yield				生物产量(t/hm^2) Biomass yield				农学效率($kg/kg, K_2O$) Agronomic efficiency	
	NP	NPK	NP + St	NPK + St	NP	NPK	NP + St	NPK + St	NPK	NPK + St
1993	4.8 ±0.2 b	5.0 ±0.3 ab	5.1 ±0.3 ab	5.3 ±0.2 a	11.6 ±0.4 b	12.0 ±0.6 ab	12.2 ±0.8 ab	12.8 ±0.5 a	1.1	1.7
1994	5.4 ±0.2 b	5.8 ±0.4 ab	5.6 ±0.2 b	6.2 ±0.4 a	12.8 ±0.3 b	13.8 ±0.6 ab	13.4 ±0.7 ab	14.8 ±1.0 a	2.9	3.9
1995	5.5 ±0.4 b	6.0 ±0.5 ab	5.9 ±0.6 ab	6.4 ±0.5 a	11.8 ±0.8 a	13.0 ±1.3 a	12.7 ±1.8 a	13.8 ±1.2 a	3.2	3.4
1996	5.5 ±0.4 b	5.8 ±0.4 ab	5.9 ±0.3 ab	6.2 ±0.5 a	11.9 ±0.6 b	13.7 ±1.0 a	13.4 ±0.6 a	13.4 ±1.1 a	2.2	1.9
1997	5.9 ±0.2 b	6.3 ±0.4 ab	6.1 ±0.4 b	6.7 ±0.3 a	12.9 ±0.5 b	13.9 ±0.8 b	13.9 ±0.8 b	15.7 ±0.6 a	2.9	4.5
1998	5.2 ±0.3 b	5.7 ±0.4 a	5.6 ±0.2 ab	6.5 ±0.3 a	11.5 ±0.6 c	12.6 ±0.8 b	12.3 ±0.4 bc	15.1 ±0.7 a	3.4	5.9
1999	4.3 ±0.2 d	5.0 ±0.2 b	4.7 ±0.2 c	5.3 ±0.1 a	11.8 ±0.4 d	13.6 ±0.3 b	12.7 ±0.6 c	14.5 ±0.3 a	4.5	4.4
2000	5.4 ±0.1 c	6.2 ±0.3 a	5.8 ±0.3 b	6.5 ±0.1 a	12.0 ±0.3 d	13.8 ±0.7 bc	13.3 ±0.7 c	14.7 ±0.2 a	5.2	4.8
2001	3.8 ±0.2 c	4.6 ±0.4 ab	4.3 ±0.2 b	4.8 ±0.3 a	10.8 ±0.7 b	12.4 ±1.0 a	12.5 ±0.7 a	13.1 ±0.7 a	5.2	3.6
2002	4.8 ±0.6 b	5.6 ±0.7 ab	5.4 ±0.4 ab	5.9 ±0.5 a	12.8 ±1.7 b	14.1 ±1.7 b	14.3 ±1.4 b	15.7 ±1.4 a	5.2	3.6
2003	5.6 ±0.2 b	6.3 ±0.7 ab	5.9 ±0.7 ab	6.8 ±0.5 a	11.8 ±0.4 b	14.2 ±1.5 ab	13.3 ±1.7 ab	15.2 ±1.2 a	5.0	5.6
2004	6.5 ±0.5 b	7.1 ±0.3 a	7.0 ±0.2 ab	7.5 ±0.4 a	12.7 ±1.0 c	13.9 ±0.5 b	13.6 ±0.5 b	15.1 ±0.9 a	4.0	3.6
2005	5.7 ±0.2 b	6.4 ±0.4 a	6.1 ±0.4 ab	6.6 ±0.6 a	12.4 ±0.3 b	13.9 ±0.8 ab	13.1 ±1.0 ab	14.6 ±1.5 a	4.4	3.5
2006	6.1 ±0.1 c	6.7 ±0.2 ab	6.6 ±0.5 bc	7.3 ±0.4 a	12.2 ±0.7 b	13.0 ±0.5 ab	13.2 ±1.0 ab	14.5 ±1.3 a	4.0	4.5
2007	7.2 ±0.1 b	7.4 ±0.2 ab	7.2 ±0.2 ab	7.7 ±0.2 a	15.8 ±0.3 a	16.1 ±0.5 a	15.9 ±0.5 a	16.4 ±0.4 a	1.8	3.0
2008	6.7 ±0.3 b	7.2 ±0.3 b	6.9 ±0.4 b	7.7 ±0.5 a	12.8 ±0.7 b	13.8 ±0.8 ab	13.4 ±0.7 ab	14.9 ±0.7 a	3.2	5.4
平均 Mean	5.5 ±0.9 c	6.1 ±0.8 b	5.9 ±0.8 b	6.5 ±0.8 a	12.3 ±1.1 c	13.6 ±0.9 b	13.3 ±0.9 b	14.7 ±1.0 a	3.6	3.9
变异 CV(%)	15.7	13.4	13.8	13.1	8.9	6.8	6.6	6.7	34.6	30.6

注(Note): St—本田小麦秸秆全部还田 Whole straw of wheat was returned to field. 各年份不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters in the same year indicate significant difference at 5% level.

表 2　长期施钾和秸秆还田对冬小麦吸钾量的影响

Table 2　Influences of long-term potassium application and straw return to soil on K uptake over 16 years

年份 Years	子粒吸钾量 K uptake in grain (kg/hm^2)				植株吸钾总量 K uptake in plant (kg/hm^2)			
	NP	NPK	NP + St	NPK + St	NP	NPK	NP + St	NPK + St
1993	13.1	14.8	13.5	14.9	98.2	117.2	104.9	118.3
1994	19.8	22.2	18.8	24.4	117.9	116.9	120.3	126.6
1995	18.3	20.8	20.0	21.2	101.0	98.1	93.7	113.4
1996	20.3	20.7	22.5	21.7	91.6	123.9	131.7	133.0
1997	16.8	19.9	19.3	19.9	99.3	116.1	125.8	152.8
1998	15.0	16.5	16.2	19.5	99.2	109.5	111.0	137.2
1999	13.8	14.9	14.0	16.0	104.2	136.5	109.7	151.9
2000	20.0	22.2	23.1	25.2	92.9	104.6	96.3	109.0
2001	13.9	19.1	16.7	16.9	85.4	103.5	112.1	117.8
2002	14.4	16.7	16.6	19.5	111.1	133.4	124.9	147.9
2003	12.9	15.5	13.4	19.5	95.4	130.1	97.0	138.3
2004	19.5	22.8	21.6	25.4	100.7	123.7	112.0	139.2
2005	21.9	22.4	22.4	23.0	120.4	137.7	120.6	155.6
2006	14.9	16.7	17.1	18.8	104.9	125.9	116.6	143.7
2007	19.1	20.7	20.4	24.0	162.1	173.0	167.2	177.9
2008	15.8	19.8	19.1	22.7	84.2	96.5	91.4	112.8
平均 Mean	16.8	19.1	18.4	20.8	104.3	121.7	114.7	136.0

注(Note)：St—本田小麦秸秆全部还田 Whole straw of wheat was returned to field.

表 3　长期施钾和秸秆还田对土壤钾素平衡的影响

Table 3　Influences of long-term K application and straw returning on soil potassium balance

年份 Years	钾投入量 K input[kg/(hm^2 · a)]				盈亏 Budget[kg/(hm^2 · a)]				平衡系数 Balance coefficient		
	NP	NPK	NP + St	NPK + St	NP	NPK	NP + St	NPK + St	NPK	NP + St	NPK + St
1993	0	124.5	91.4	227.9	−98.2	7.3	−13.5	109.6	1.06	0.87	1.93
1994	0	124.5	101.5	226.7	−117.9	7.6	−18.8	100.1	1.07	0.84	1.79
1995	0	124.5	73.7	216.7	−101.0	26.4	−20.0	103.3	1.27	0.79	1.91
1996	0	124.5	109.2	235.8	−91.6	0.6	−22.5	102.8	1.00	0.83	1.77
1997	0	124.5	106.5	257.4	−99.3	8.4	−19.3	104.6	1.07	0.85	1.68
1998	0	124.5	94.8	242.2	−99.2	15.0	−16.2	105.0	1.14	0.85	1.77
1999	0	124.5	95.7	260.4	−104.2	−12.0	−14.0	108.5	0.91	0.87	1.71
2000	0	124.5	73.2	208.3	−92.9	19.9	−23.1	99.3	1.19	0.76	1.91
2001	0	124.5	95.4	225.4	−85.4	21.0	−16.7	107.6	1.20	0.85	1.91
2002	0	124.5	108.3	252.9	−111.1	−8.9	−16.6	105.0	0.93	0.87	1.71
2003	0	124.5	83.6	243.3	−95.4	−5.6	−13.4	105.0	0.96	0.86	1.76
2004	0	124.5	81.2	238.3	−100.7	0.8	−21.4	99.1	1.01	0.81	1.71
2005	0	124.5	98.5	257.1	−120.4	−13.2	−22.4	101.5	0.90	0.81	1.65
2006	0	124.5	89.9	249.4	−104.9	−1.4	−17.1	105.7	0.99	0.85	1.74
2007	0	124.5	146.8	278.4	−162.1	−48.5	−20.4	100.5	0.72	0.88	1.56
2008	0	124.5	72.3	214.6	−84.2	28.0	−19.1	101.8	1.29	0.79	1.90
平均 Mean		124.5	95.1	239.7	−104.3	2.8	−18.4	103.7	1.04	0.84	1.78

注(Note)：St—本田小麦秸秆全部还田 Whole straw of wheat was returned to field.

由于本研究只进行本田秸秆还田,不考虑外源秸秆,每年的秸秆还田量存在差异,致使 NP + St 处理和 NPK + St 处理的钾素投入量年度间存在差异。表 3 结果显示,NP 处理每年的钾素均处于严重亏缺状况,钾素(K)年表观亏缺在 84.2～162.1 kg/hm^2 之间,平均为 104.3 kg/hm^2; NP + St 处理进行本田秸秆还田措施,维持了一定量的钾素养分再循环,平衡系数在 0.76～0.88之间,平均为 0.84。表明秸秆还田能使小麦吸收的 84% 的钾素还回土壤中,减缓了钾素的严重亏缺,但仍处于亏缺状况,钾素年表观亏缺为 13.4～23.1 kg/hm^2,平均为 18.4 kg/hm^2。NPK 处理通过进行施钾(K_2O 150 kg/hm^2)措施,大体上满足了本试验条件下产量的需求,平衡系数在 0.7～1.3 之间,平均为 1.04。说明土壤钾素基本趋于收支平衡,多年平均盈余量为 2.8 kg/hm^2,但没有实行秸秆还田,造成了有机资源的浪费。NPK + St 处理实行了秸秆还田,又施钾素补充,充分保证了钾素养分的再循环利用,平衡系数在 1.56～1.93,平均为 1.78。说明土壤钾素出现了输入大于输出的盈余状态,有利于土壤钾素肥力的增加,年表观盈余在 99.1～109.6 kg/hm^{2}之间,平均为 103.7 kg/hm^2。因此,要保证土壤肥力的可持续发展,必须进行有机肥和化肥的平衡施用。

2.4 长期施钾和秸秆还田对土壤速效钾、缓效钾的影响

土壤速效钾为水溶性钾和交换性钾之和,非交换性钾也就是缓效钾,土壤速效钾和缓效钾处于动态平衡中。表 4 看出,长期施用钾肥和秸秆还田对土壤速效钾和缓效钾均有影响。与 NP 处理相比,2008 年 NPK、NP + St、NPK + St 处理的土壤速效钾、缓效钾含量均显著提高; 与 NP + St 处理相比,NPK、NPK + St 处理土壤速效钾、缓效钾含量也均有显著提高; 但 NPK + St 与 NPK 处理间速效钾含量差异不显著,缓效钾含量达显著差异。与试验开始前的初始值(1992 年)比较,NP 处理由于长期得不到钾素养分的补充,钾素养分一直处于亏缺状况,致使土壤速效钾和缓效钾含量分别以每年 2.06 和 9.38 mg/kg 的速度下降; NP + St 处理是在 NP 处理基础上进行秸秆还田,补充一定量的钾素养分,减缓了对土壤钾素养分的耗竭,但土壤速效钾和缓效钾含量有所下降,分别下降 15.7% 和 6.2%。NPK 处理是在 NP 处理基础上每年施用钾肥(K_2O 150 kg/hm^2),满足了冬小麦生长的需要,土壤速效钾和缓效钾含量均提高了 50 mg/kg,年均积累量均达 3.13 mg/kg; NPK + St 处理的土壤钾素平衡处于盈余状态,土壤速效钾和缓效钾含量以每年 3.38 和 7.19 mg/kg 的速度增加,表明施钾结合秸秆还田有利于土壤-作物体系的钾素循环和土壤钾素肥力的提高。

表 4 长期施钾和秸秆还田对土壤速效钾、缓效钾的影响

Table 4 Influences of long-term K application and straw return to field on soil available K and slowly available K

处理 Treatment	土壤速效钾含量 Available K		土壤缓效钾含量 Slowly available K	
	(mg/kg)	(±%)	(mg/kg)	(±%)
初始值 Initial	140	0	1050	0
NP	107 c	-23.6	900 d	-14.3
NPK	190 a	35.7	1100 b	4.8
NP + St	118 b	-15.7	985 c	-6.2
NPK + St	194 a	38.6	1165 a	11.0

注(Note): St—本田小麦秸秆全部还田 Whole straw of wheat was returned to field. 不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters indicate significant difference at 5% level.

3 讨论

我国北方土壤,受气候、成土母质、土地利用等条件的综合影响,土壤风化程度较南方低,当前的土壤速效钾、缓效钾以及全钾含量均较高[10]。随着农业生产水平的不断提高,氮、磷化肥的施用和高产新品种的推广,钾素在农业生产中的作用日益突出,将是作物高产、超高产的重要保证。由于中国钾矿资源贫乏,目前使用的钾肥主要靠进口,而农作物秸秆广泛存在,含有相当数量的钾,是非常重要的有机钾资源。因此,钾素养分的有效管理应该考虑无机资源和有机资源的综合使用,找出合理的施用量和施用方法及时期,不仅要注意当季作物的反应,更需监测长期的效应。研究表明,不同地区、不同土壤类型的供钾能力及植物有效性存在差异[1-5,10]。范闻捷等[11]研究了潮土区小麦—玉米轮作施钾对当季作物产量和土壤钾素的影响,表明施钾可以增加作物产量,施钾量与小麦产量呈一元二次函数关系,冬小麦最高产量的施钾量(K_2O)为 191.1 kg/hm^2,且施钾可以提高耕层土壤速效钾含量; 陈防等[20]认为,长期施钾对作物增产及土壤钾素含量及形态均有显著影响; 劳秀荣等[23]的研究看出,在施用氮、磷化肥基础上,土壤速效钾与秸秆还田量呈正比关系。本研究结果表明,无论是否秸秆还田,施钾平均有 10% 左右的增产,与一些文献报道[11,20]的施钾增产 11% 左右基本一致。不论是否施钾,秸秆还田有

6.6% 以上的增产,施钾结合秸秆还田增产效果较好,增产达 17.6%。但是不同年度间存在差异,如 1993～1997 年间,NPK 或 NP + St 较 NP 处理均有增产效应,但未达显著水平,这主要与供试土壤本身土壤速效钾含量较高有关。之后随着 NP 处理钾素的消耗,NPK 处理的增产效应达到 5% 显著水平(7 个年度),但受气候影响(降水量分布),2002、2003、2007、2008 未达显著水平,而 NP + St 处理较 NP 处理只有 3 个年份(1999、2000、2001)达到显著水平,大多数年份不显著,主要受秸秆还田数量、还田质量及气候的影响。NPK + St 处理较 NP 处理在各个年度均有明显的增产效应,主要是施钾和秸秆还田结合既改善了土壤结构又增加了土壤供钾的强度,而其钾素的农学效率较低主要与供试土壤本身速效钾含量较高有关。

尽管受气候因素影响而存在波动,NPK、NP + St、NPK + St 处理的吸钾量均高于 NP 处理,表明施钾和秸秆还田及二者结合均能促进冬小麦对钾素养分的吸收,增加植物的吸钾量;而 NP 处理的钾素养分处于亏缺状态,土壤速效钾和缓效钾含量均有下降趋势,与有关报道一致[10-11,20-22,25-26]。

本研究结果还看出,NP 处理与试验开始前的初始值比较作物吸钾量下降 33 mg/kg,年均下降 2.1 mg/kg,明显低于 5 mg/kg 的报道[22,25]。主要是因为本试验的种植制度为一年一作,每年 6 月份小麦收获后,有 4 个月(6～10 月份)处于休闲状态,而文献报道多为轮作制度,土壤钾素处于连续耗竭状态。NP + St 处理可以减缓钾素的耗竭,平衡系数平均为 0.84,NPK 处理大体上满足土壤钾素的平衡,土壤速效钾和缓效钾含量均有所提高,而 NPK + St 处理则可使土壤钾素年均盈余 103.7 kg/hm^2,平衡系数达 1.78,土壤速效钾和缓效钾含量明显提高,这与文献报道一致[10-11,20-22,25-26]。

综上,在山西石灰性褐土一年一作耕作制度下,每年只施用氮、磷肥,冬小麦年平均产量 5.5 t/hm^2,土壤钾素年均亏缺 104.3 kg/hm^2,土壤速效钾和缓效钾含量分别下降 23.6% 和 14.3%。而在施用氮、磷肥的基础上,增施钾肥和秸秆还田是作物增产和保持土壤钾素肥力的重要措施,每年施用钾肥(K_2O 150 kg/hm^2),平均增产 10.2% 以上,小麦秸秆还田平均增产 6.6% 以上,二者结合平均增产 17.6%,均可以提高年度间产量和吸钾量的稳定性。施钾大体上能维持土壤钾素的平衡,平衡系数为 1.04,秸秆还田可减缓土壤钾素耗竭,平衡系数为 0.84,施用钾肥和秸秆还田结合则可使土壤钾素平衡处于盈余状况,平衡系数达 1.78,显著提高土壤速效钾和缓效钾的含量,与初始值比较,土壤速效钾和缓效钾含量分别提高 38.6% 和 11.0%。

参 考 文 献:

[1] 金继运. 土壤钾素研究进展[J]. 土壤学报,1993,30(1):94-101.
Jin J Y. The advance of soil potassium[J]. Acta Pedol. Sin., 1993,30(1):94-101.

[2] 谢建昌,周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. 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[J]. Soils,1999,31(5):244-254.

[3] Cox A E, Joern B C, Brouder S M *et al*. Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1999,63:902-911.

[4] 黄绍文,金继运,王泽良,等. 北方主要土壤钾形态及其植物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(2):156-164.
Huang S W, Jin J Y, Wang Z L *et al*. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,1998,4(2):156-164.

[5] 王宏庭,金继运,刘荣乐. 山西省几种典型土壤供钾能力评价[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(2):144-151.
Wang H T, Jin J Y, Liu R L. Potassium supplying characteristics of selected soils from Shanxi Province[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002,8(2):144-151.

[6] Mallarino A P, Borges R. Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,2006,70:702-707.

[7] Vyn T J, Janovicek K J. Potassium placement and tillage system effects on corn response following long-term no till[J]. Agron. J.,2001,93:487-495.

[8] Limon-Ortega A, Sayre K D, Francis C A. Wheat and maize yields in response to straw management and nitrogen under a bed planting system[J]. Agron. J.,2000,92:295-302.

[9] Dierolf T S, Yost R S. Stover and potassium management in an upland rice-soybean rotation on an Indonesian Ultisol[J]. Agron. J.,2000,92:106-114.

[10] 刘荣乐,金继运,吴荣贵,等. 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[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(2):123-132.
Liu R L, Jin J Y, Wu R G *et al*. Study on the characteristics of potassium cycling in different soil crop systems in northern China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,2000,6(2):123-132.

[11] 范闻捷,介晓磊,李有田,等. 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[J]. 华中农业大学学报,1999,18(5):427-430.
Fan W J, Jie X L, Li Y T *et al*. 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 [J]. J. Huazhong Agric. Univ. ,1999,18: 427 -430.

[12] 李秋梅,陈新平,张福锁,Römheld V. 冬小麦-夏玉米轮作体系中磷钾平衡的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(2): 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[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2002,8(2): 152 -156.

[13] 金继运. 我国北方土壤缺钾和钾肥应用的发展趋势[A]. 中国农业科学院土壤肥料研究所/加拿大钾磷研究所. 北方土壤钾素和钾肥效益[C]. 北京: 中国农业科技出版社,1994. 1 -5.
Jin J Y. Development of potassium application and lack of soil potassium in north China[A]. Institute of Soil and Fertilizer, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Potash and Phosphate Institute of Canada(PPIC)(ed.) Soil K and yield responses in north China[C]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 1994. 1 -5.

[14] 王宏庭,胡全才,王斌,等. 忻州地区玉米施钾效果初报[J]. 山西农业科学,2003,31(1): 22 -25.
Wang H T, Hu Q C, Wang B *et al*. A Preliminary study on the effect of applied potassium fertilizer on corn in Xinzhou City[J]. J. Shanxi Agric. Sci. ,2003,31(1): 22 -25.

[15] 白大鹏,王宏庭,焦晓燕. 钾肥平衡施用与农业持续增产[A]. 谢建昌,马茂桐,杜承林,等. 北方土壤钾素肥力及其管理[C]. 北京: 中国农业科技出版社,1995. 124 -127.
Bai D P, Wang H T, Jiao X Y. Balanced application of potash fertilizer and increasing yield in sustainable agriculture[A]. Xie J X, Ma M T, Du C L *et al*(ed.). Soil potassium fertility and management in north China[C]. Beijing: China Agricultural scientech Press,1995. 124 -127.

[16] Bacon S C, Lanyon L E, Schlander R M. Plant nutrient flow in the managed pathways of an intensive dairy farm[J]. Agron. J. , 1990,82: 755 -761.

[17] Heckman J R, Sims J T, Beegle D B *et al*. Nutrient removal by corn grain garvest[J]. Agron. J. ,2003,95: 587 -591.

[18] Regmi A P, Ladha J K, Pathak H *et al*. Yield and soil fertility trends in a 20 - Year rice-rice-wheat experiment in Nepal[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. ,2002,66: 857 -867.

[19] 高祥照,马文奇,崔勇,等. 我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(4): 363 -369.
Gao X Z, Ma W Q, Cui Y *et al*. Changes of soil nutrient contents and input of nutrients in arable of China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2000,6(4): 363 -369.

[20] 陈防,鲁剑巍,万运帆,等. 长期施钾对作物增产及土壤钾素含量及形态的影响[J]. 土壤学报,2000,37(2): 233 -241.
Chen F, Lu J W, Wan Y F *et al*. Effect of long term potassium application on soil potassium content and forms[J]. Acta Pedol. Sin. ,2000,37(2): 233 -241.

[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[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(3): 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[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2004,10(3): 241 -244.

[22] 范钦桢,谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变[J]. 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[J]. Acta Pedol. Sin. ,2005,42: 591 -599.

[23] 劳秀荣,吴子一,高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 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[J]. Trans. CSAE,2002,18(2): 49 -52.

[24] 劳秀荣,孙伟红,王真,等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报,2003,40(4): 618 -623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z *et al*. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin. ,2003,40(4): 618 -623.

[25] 邢素丽,刘孟朝,韩保文. 12 年连续施用秸秆和钾肥对土壤钾素含量和分布的影响[J]. 土壤通报,2007,38(3): 486 -490.
Xing S L, Liu M C, Han B W. Effect of 12 -year continuous application of straw and K fertilization on soil potassium concentration and distribution in Fluvo-aquic soil[J]. Chin. J. Soil Sci. , 2007,38(3): 486 -490.

[26] 谭德水,金继运,黄绍文,高伟. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(1): 106 -112.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W, Gao W. Effect of long-term application of potassium fertilizer and wheat straw to soil on yield of crops and soil potassium in fluvo-aquic soil and brown soil of Northcentral China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2008,14(1): 106 -112.

[27] 劳家柽. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社,1988.
Lao J C. Soil and agrochemistry analysis handbook[M]. Beijing: Agricultural Press,1988.