植物营养与肥料学报 2015,21(4):936-942 doi: 10.11674/zwyf.2015.0412
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

秸秆还田方式对褐土钾素平衡与钾库容量的影响

解文艳[1], 周怀平[1], 杨振兴[1], 路慧英[2], 关春林[1], 武文丽[1]
(1 山西省农业科学院农业环境与资源研究所,山西太原 030006;
2 山西省文水县水利水保局,山西文水 032100)

摘要:【目的】在春玉米为主的山西省进行定位试验,探明不同秸秆还田方式对大田作物产量和耕层土壤钾素状况的影响。**【方法】**春玉米长期定位试验于1992～2011年在典型褐土上进行。试验设秸秆不还田(CK)、秸秆覆盖还田(SM)、秸秆粉碎后还田(SC)、过腹还田(CM)四种方式。秸秆还田量为6 t/hm^2,过腹产生的湿牛粪施用量为45 t/hm^2。每年玉米收获期采取植物样品,用于玉米植株茎叶和籽粒钾素含量的测定;采集0—20 cm土壤样品,用于土壤各分级形态钾的测定。2011年分析测定了0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm和80—100 cm土层速效钾、缓效钾及全钾含量。**【结果】**1)在施用氮磷肥的基础上,不同秸秆还田方式增产显著,玉米增产幅度为11.58%～20.91%。处理之间增产幅度表现为CM > SM > SC > CK。2)秸秆还田处理较不还田处理可不同程度提高耕层土壤水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾、非交换性钾、矿物钾及全钾的含量。矿物钾在全钾中的比例降低。3)与定位开始相比,连续10年秸秆还田土壤的速效钾含量明显提高,不还田对照则逐渐下降。4)不同秸秆还田方式各处理作物吸钾量明显高于施钾量,致使土壤钾素逐渐耗竭,土壤供钾能力降低;SM、SC、CM处理的钾素表观平衡系数分别为0.45、0.56、0.74。与对照相比,秸秆还田依然有利于钾素养分的收支平衡,减轻作物对土壤钾素的消耗,缓解土壤钾素肥力下降的程度。**【结论】**在几种秸秆还田中,以秸秆过腹还田(CM)最有利于钾素的收支平衡,减轻作物对土壤钾素的消耗,缓解土壤钾素肥力下降程度,进而维持土壤钾素肥力的稳定。

关键词: 褐土; 秸秆还田; 土壤钾素
中图分类号: S141.4;S158.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-0936-07

Effect of different straw return modes on potassium balance and potassium pool in cinnamon soil

XIE Wen-yan[1], ZHOU Huai-ping[1], YANG Zhen-xing[1], LU Hui-ying[2], GUAN Chun-lin[1], WU Wen-li[1]
(*1 Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030006, China;*
2 Wenshui Water Resources Management Bureau, Wenshui, Shanxi, 032100, China)

Abstract:【Objectives】 A long-term location experiment was conducted in the main growing area of spring maize in Shanxi Province, northern China, to study the effective modes of straw returns with high yield and potassium balance. **【Methods】** The long-term experiment was conducted from 1992 to 2011 in typical cinnamon soil with spring maize as tested crop. Four treatments were included, no straw return (CK), direct straw mulching (SM), pulverized straw mulching (SC) and straw return after livestock digestion (cattle manure, CM). Straw was returned 6 t/hm^2, and the wet cattle manure amount were 45 t/hm^2. The 0-20 cm soil samples were collected every year after harvest and the potassium contents of different fractions were analyzed. In 2011, the soil K contents in 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm soil samples were collected and the K contents were analyzed. **【Results】** 1) Compared with no straw return, all the three straw treatments significantly increased the crop yield by 11.58% -20.91%, and the yield increments follow the sequence of CM > SM > SC > CK. 2) The contents of available potassium, slowly available potassium and total potassium in straw return treatments were higher than

收稿日期: 2014-01-24 **接受日期:** 2015-04-07 **网络出版日期:** 2015-05-06
基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201203030-08-03);"十二五"农村领域国家科技计划课题(2012BAD09B01-1);山西省留学人员管理委员会办公室项目(2013-149);山西省软科学研究项目(2013041055-01)资助。
作者简介: 解文艳(1978—),女,山西曲沃人,助理研究员,博士研究生,主要从事旱作农田资源高效利用研究。E-mail: xwy6018060@163.com

control, and the proportion of mineral potassium in these treatments became lowered and other fractions raised. 3) Compared with the beginning of the experiment, soil available potassium content was significantly raised in long-term straw return treatments (SM, SC and CM), whereas that gradually decreased in control. 4) Straw return stimulate the apparent potassium absorption, leading to a gradual depletion of soil potassium, with apparent potassium equilibrium coefficients in the straw return treatments were 0.45, 0.56 and 0.74, respectively; but for all of that, the straw return practice still helped sustain soil potassium balance and alleviate the depletion of soil potassium pool, and maintain a stable soil potassium supply, compared with control. 【**Conclusions**】Straw return to land after livestock digestion (cattle manure, CM) can sustain soil potassium balance, restore soil potassium after consumption by crops, alleviate the depletion of soil potassium pool, and maintain a stable soil potassium supply.

Key words: cinnamon soil; straw return to land; soil potassium balance

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,我国农田土壤钾素多年来一直处于亏缺状态[1]。中国是世界秸秆产量大国[2],据统计,2006 年中国玉米、水稻、小麦三大作物的秸秆产量达 5.89×10^8 t[3],占到秸秆总量的 77.2%,而且秸秆钾素含量较高,三大作物秸秆钾养分数量占到总量的 73.9%,充分利用现有钾肥和秸秆,是目前平衡施肥中极其重要的课题之一。

长期定位试验是非内外研究施肥对作物产量及养分平衡的影响的一种行之有效的方法[4]。氮磷肥基础上施用钾肥或氮磷钾肥配合秸秆还田对各形态钾素的影响及对土壤钾库贡献和作物产量的影响已有许多报道[1,5-11],对同一地区同一生态系统下不同秸秆还田方式间对各形态钾素的影响及对土壤钾库贡献的研究较少。由于土壤钾素的存在形态、分布及其植物有效性是决定土壤供钾能力的重要因素[10],因此,本研究以褐土区土壤上进行的秸秆还田长期定位试验资料,探讨秸秆增钾效应、土壤钾素平衡和各形态钾分布特点,为不同类型土壤的钾肥资源优化管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验点概况

长期秸秆还田定位试验布置在中国北方半湿润偏旱区的山西省寿阳县宗艾村北坪旱塬地上,试验田地理坐标为 N37°58′22.0″～24.4″、E113°06′37.8″～39.9″,海拔 1130 米;多年平均气温 7.6℃,大于 10℃ 积温 3 400℃,无霜期为 135～140 d;年平均降水量 501.1 mm(年际间降水变率大),70% 左右的降水集中在 6～9 月份,干燥度为 1.3,属半湿润偏旱区。

试验地块基本平坦,土层深厚,地下水埋深在地表 50 m 以下。供试土壤为褐土,成土母质为马兰黄土。1993 年试验前耕层土壤(0—20 cm)基本理化性状为:有机质含量 23.5 g/kg、全氮 1.07 g/kg、硝态氮 21.17 mg/kg、有效磷(P) 4.97 mg/kg、速效钾(K) 117.2 mg/kg、土壤 pH 8.4。

1.2　试验设计

春玉米是当地的重要粮食作物,一年一熟,多实行冬季休闲,主要依赖自然降水。还田秸秆为当地春玉米秸秆。试验于 1992 年秋季玉米收获后开始,到 2011 年已连续进行 19 年。试验设 4 个处理:1) 秸秆不还田(CK);2) 秸秆覆盖还田(SM),秸秆覆盖还田量为 6 t/hm^2;3) 秸秆粉碎直接还田(SC),秸秆粉碎直接还田量为 6 t/hm^2;4) 秸秆过腹还田(CM),腐熟湿牛粪还田量 45 t/hm^2。各还田处理保证还田物的碳含量一致。各处理均施化肥 N 150 kg/hm^2 和 P_2O_5 84 kg/hm^2,试验小区面积 54 m^2,无重复,所有小区采用定位试验(各小区位置和秸秆覆盖量保持不变)。

1.3　试验方法

秸秆覆盖还田是在前茬玉米收获后,将上茬覆盖未腐解的秸秆铡碎,结合秋季深耕翻直接还田;第二年整地直接播种后,按照试验设计再进行整秆均匀覆盖,覆盖时间每年 5 月下旬。秸秆粉碎直接还田是在前茬玉米收获后,按照试验设计将玉米秸秆铡碎成 15 cm 长,结合秋季深耕翻直接还田,第二年整地后直接播种。秸秆过腹还田是前茬玉米收获后,按照试验设计将腐熟湿牛粪均匀撒在地面,结合秋季深耕翻直接还田,第二年整地后直接播种。各小区统一施肥,在前茬玉米收获后结合秋季深耕翻施肥,玉米生长期间不再施肥,无补充灌溉,农田栽培管理措施相同。

供试作物为春玉米,品种 1993～1997 年为烟单 14 号,1998～2003 年为晋单 34 号,2004 年以后

为强盛31号。玉米播种时间在4月15～25日,收获时间为9月20日～10月10日。种植密度49500～52500 plant/hm^2,田间管理措施主要是除草和防治病虫害。试验用氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为普通过磷酸钙(含P_2O_5 14%)。牛粪(风干)有机质含量90.5～127.3 g/kg,全氮3.93～4.97 g/kg,全磷(P_2O_5) 1.37～1.46 g/kg,全钾(K_2O) 14.1～34.3 g/kg。玉米秸秆(风干)有机碳含量38.1%～44.3%,全氮7.39～9.79 g/kg,全磷0.44～0.54 g/kg,全钾17.1～27.5 g/kg。

1.4 测定项目及方法

土样采集分别在当年玉米收获后的10月,按"之"字型采集0—20 cm土壤,每区每层取5个点混合成一个样。风干后过1 mm筛,用于土壤各分级形态钾的测定,风干土过0.25 mm筛用于土壤全钾的测定。2011年10月分层(0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm)取土样测定速效钾、缓效钾及全钾含量,0—20 cm土层用于各形态钾含量的测定。

1996年、2001年、2006年和2011年0—20 cm耕层土壤测定速效钾、缓效钾和全钾含量。同时采取植物样品,用于玉米植株茎叶和籽粒钾素含量的测定。

植株钾含量的测定用$H_2SO_4-H_2O_2$联合消煮后,火焰光度法测定。水溶性钾(直接被作物吸收利用)按水土比10∶1用蒸馏水提取[12];非特殊吸附钾(当季作物直接吸收利用)用0.5 mol/L中性醋酸镁溶液提取,非特殊吸附钾=醋酸镁浸提钾-水溶性钾;特殊吸附钾(当季作物直接吸收利用)用1 mol/L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(作物有效钾的贮备部分)用1 mol/L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(作物难以利用)=全钾-硝酸消煮钾;全钾用1∶8的氢氧化钠熔融,提取出来的钾均用火焰光度计测定[13]。

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

钾素表观平衡系数= 投入土壤钾量/带出土壤钾量

其中,土壤钾素的投入量主要是指有机肥和秸秆还田携入量,降雨和种子的含钾量未计入计算,作物携出钾量主要包括作物地上部(茎、叶、穗轴、籽粒等)的携出量,根茬的含钾量未计入[5]。

2 结果与分析

2.1 长期秸秆还田对作物产量和钾素吸收的影响

19年秸秆还田长期定位试验玉米籽粒产量结果显示,CM和SM处理显著高于CK处理,但SC和CK处理产量差异不显著(表1)。SM、SC和CM处理产量没有显著差异。秸秆覆盖还田和过腹还田都有显著的增产效果[14]。3种秸秆还田处理玉米籽粒产量19年累计比CK处理增加13440～24270 kg/hm^2,增产幅度为11.58%～20.91%。处理间产量变化趋势为CM>SM>SC>CK。

表1还显示,不同秸秆还田方式各处理土壤表观钾平衡均处于亏缺状态。秸秆不还田CK处理亏缺最为严重,19年累计亏缺2706.7 kg/hm^2;秸秆还田处理中,SM、SC和CM处理19年亏缺量分别是2081.8、1422.7和1043.8 kg/hm^2。19年钾素表观平衡系数均小于1,SM、SC和CM处理分别为0.45、0.56、0.74。不同秸秆还田方式各处理作物吸

表1 长期秸秆还田对玉米产量及土壤钾素平衡的影响(1993～2011,kg/hm^2)

Table 1 Effect of straw to soil on crop yield and apparent K balances of the soil during 1993-2011

处理 Treatment	总产量 Total yield	年钾投入量 Annual K input	年钾带走量 Annual K removal	盈亏 Balance	平衡系数 K balance index
秸秆不还田 CK	116080 b	0.0	142.5	-142.5	
秸秆覆盖还田 SM	131510 a	90.4	199.9	-109.5	0.45
秸秆粉碎直接还田 SC	129520 ab	96.0	170.8	-74.8	0.56
过腹还田 CM	140350 a	155.1	210.0	-54.9	0.74

注(Note):CK—No straw return; SM—Direct straw mulching; SC—Pulverized straw mulching; CM—Straw return after livestock digestion (cattle manure). 数据后不同小写字母表示处理间差异在5%水平显著 Values followed different small letters are significantly different among different treatments at 5% level.

钾量明显高于施钾量,致使土壤钾素逐渐耗竭,土壤供钾能力降低;但是秸秆还田有利于钾素养分的收支平衡,减轻作物对土壤钾素的消耗,可缓解土壤钾素肥力下降的程度和维持土壤钾素肥力的稳定。

2.2　长期秸秆还田耕层土壤钾素的年际变化特征

2.2.1 长期秸秆还田耕层土壤速效钾的年际变化特征　土壤速效钾包括土壤水溶性钾和交换性钾,是当季作物容易吸收的钾,长期以来被广泛用于衡量当季土壤的供钾能力。由图 1a 可看出,尽管没施化学钾肥,不同秸秆还田处理对土壤速效钾含量仍产生了十分明显的影响:1)不还田处理(CK),由于没有任何外源钾的输入,土壤速效钾含量呈现下降趋势,试验 19 年后下降 20.40 mg/kg,降幅为 17.41%。2)秸秆还田各处理,较试验开始时土壤速效钾含量均有所增加。到 2011 年 SM、SC 和 CM 处理土壤速效钾含量分别增加 21.83、18.60 和 52.20 mg/kg,上升幅度分别为 18.6%、15.9% 和 44.5%。3)秸秆还田各处理土壤速效钾含量均显著高于不还田处理。2011 年 SM、SC 和 CM 处理土壤速效钾含量依次较 CK 处理高出 43.6%、40.3% 和 75%。4)所有处理土壤速效钾含量排序由高到低依次为 CM > SM > SC > CK。显然,秸秆过腹还田对维持和提高褐土的供钾能力具有重要的作用。这一方面是由于有机肥本身含有比较丰富的钾,另一方面可能是由于有机胶体其表面具有保持养分的巨大能力的缘故。

2.2.2 长期秸秆还田耕层土壤缓效钾的年际变化特征　缓效钾即土壤非交换性钾,是存在于黏土矿物层间的钾,它与土壤速效钾和矿物钾之间存在着动态平衡,是土壤速效钾的储备,常用来衡量土壤的供钾能力。由图 1b 可以看出,1)不同处理耕层土壤缓效钾含量较试验开始前均不同程度的下降。与试验开始相比,1996 年 CK 处理土壤缓效钾含量下降 51.40 mg/kg,SM、SC 和 CM 处理分别上升 1.70、80.24 和 86.36 mg/kg。从 2001 年开始各处理土壤缓效钾含量均呈下降趋势,2011 年各处理土壤缓效钾含量较试验开始前降低了 129.00 ～ 234.00 mg/kg。2)2011 年秸秆还田各处理土壤缓效钾含量均高于不还田处理。SM、SC 和 CM 处理分别较 CK 处理高出了 14.2%、10.3% 和 18.4%。这说明各还田处理均能减缓土壤缓效钾的消耗,以 CM 处理效果最佳。

2.2.3 长期秸秆还田耕层土壤全钾的年际变化特征　全钾是土壤钾素含量的重要指标。由图 1c 可知,全钾的基础值为 18.92 g/kg,历时 20 年,除 CM 处理外,其他处理全钾含量均下降,下降幅度为 1.47 ～2.28 g/kg,CK 处理下降幅度最大,主要因为作物长期不断从土壤携出钾而没有任何的补充。CM 处理全钾含量均高于试验基础值,说明长期秸秆过腹还田(有机肥)可以增加土壤有效性钾素,维持作物的吸收,减少土壤钾素的耗竭,提高土壤全钾含量。

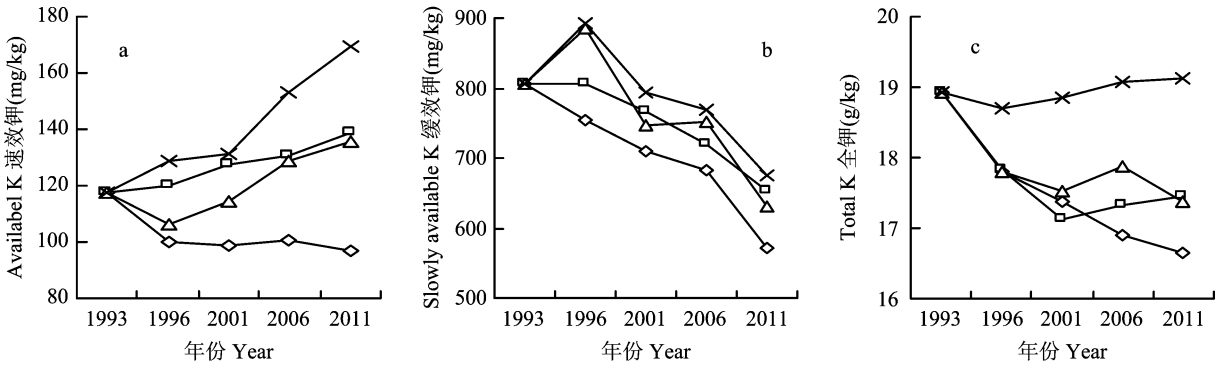

图 1　不同秸秆还田耕层土壤不同形态钾素的年际变化特征

Fig. 1　Changes of different fraction of soil potassium contents under different straw return ways in 0–20 cm depth

2.3　长期秸秆还田耕层土壤不同形态钾素含量和比例

在对植物的有效性上,水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾之和为速效钾,非交换性钾即缓效钾[10]。由表 2 可知,1)长期秸秆还田各处理耕层土壤中的含量分布基本上是矿物钾 > 非交换性钾 > 特殊吸附钾 > 非特殊吸附钾 > 水溶性钾。2)与 CK 处理相比,秸秆还田处理可以显著的增加土壤各形态钾素含量,其中水溶性钾提高 0.22 ～1.11 倍,非特殊吸附钾提高 0.33 ～1.08 倍,特殊吸附钾提高

0.33～0.66倍,非交换钾提高0.10～0.18倍。矿物钾和全钾含量相对稳定,即秸秆还田对矿物钾和全钾影响很小。3)不同秸秆还田处理间对各形态钾素含量的影响不同。各钾素形态基本上以CM处理最高。4)从19年的长期效果看,耗钾严重的CK处理土壤速效钾较早降到最低值后,过度消耗的部分则是非交换性钾和常年释放的矿物钾[15]。

表2 长期秸秆还田各处理耕层土壤中不同形态钾素含量

Table 2 Content of different forms of potassium as affected by long-term straw return ways

处理 Treatment	水溶性钾 Water-soluble K (mg/kg)	非特殊吸附钾 Non-specifically absorbed K (mg/kg)	特殊吸附钾 Specifically absorbed K (mg/kg)	非交换性钾 Non-exchangeable K (mg/kg)	矿物钾 Mineral K (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)
秸秆不还田 CK	9 c	12 c	75 c	571 c	15.97 c	16.64 c
秸秆覆盖还田 SM	13 b	16 b	110 b	652 ab	16.49 bc	17.45 bc
秸秆粉碎直接还田 SC	11 bc	25 a	100 b	630 b	16.68 bc	17.28 bc
过腹还田 CM	19 a	25 a	125 a	676 a	18.27 a	19.12 a

注(Note): CK—No straw return; SM—Direct straw mulching; SC—Pulverized straw mulching; CM—Straw return after livestock digestion (cattle manure). 同列数据后不同小写字母表示处理间差异在5%水平显著 Values followed by different small letters are significantly different among treatments at 5% level.

各种形态钾在土壤全钾中的比例状况和含量相似(表3)。不同之处在于秸秆还田各处理较CK处理可降低土层中矿物钾比例,源于秸秆还田进入土壤的钾素都是以速效钾和部分缓效钾的形态存在,从而削弱矿物钾的比例。秸秆过腹还田CM处理可明显提高水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾在全钾中的比例,但对矿物钾比例影响不明显。

表3 长期秸秆还田各处理耕层土壤中不同形态钾素占全钾的比例(%)

Table 3 Proportion of different forms of potassium as affected by different treatments (0-20 cm soil depth)

处理 Treatment	水溶性钾 Water-soluble K	非特殊吸附钾 Non-specifically absorbed K	特殊吸附钾 Specifically absorbed K	非交换性钾 Non-exchangeable K	矿物钾 Mineral K
秸秆不还田 CK	0.06	0.07	0.45	3.43	95.99
秸秆覆盖还田 SM	0.07	0.09	0.64	3.77	95.42
秸秆粉碎直接还田 SC	0.07	0.13	0.57	3.61	95.61
过腹还田 CM	0.10	0.13	0.65	3.54	95.58

注(Note): CK—No straw return; SM—Direct straw mulching; SC—Pulverized straw mulching; CM—Straw return after livestock digestion (cattle manure).

3 讨论与结论

秸秆还田的增产作用已经有大量报道[9-10,14]。秸秆还田对产量的影响是由土壤类型、气候、耕作管理等因素共同作用的结果。特别是在进入21世纪后,随着农业生产水平的提高,钾素在提高作物产量方面受到越来越多的证实[16-17]。从本试验作物产量来看,在施用氮磷肥的基础上,不同秸秆还田方式增产显著,SC、SM、CM处理与CK处理相比,玉米增产幅度为11.58%～20.91%。秸秆过腹还田(CM)较单施氮磷化肥处理显著提高玉米产量,可能与有机肥投入改善土壤物理以及生物化学性质

有关[1]。

本研究结果表明,单施化肥 CK 处理土壤钾库长期处在被作物耗用的状态下,与试验开始前的初始值相比,土壤速效钾含量逐渐下降。秸秆还田均能不同程度地减缓这种下降趋势,可使土壤速效钾含量明显提高。长期秸秆过腹还田(有机肥)可以增加土壤有效性钾素,维持作物的吸收,减少土壤钾素的耗竭,提高土壤全钾含量。

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[18]。本研究中,SC、SM、CM 处理较 CK 均不同程度提高土层水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾、非交换性钾和矿物钾的含量;降低矿物钾比例,而提高其余几种形态钾的比例,对土壤全钾贡献较明显。

鲁如坤等[19]提出,在农田养分平衡中,施入养分和作物取走养分之间的比例(即养分平衡的盈亏)决定于作物需要量和土壤供应量之差。19 年钾素表观平衡结果表明,在山西褐土一年一作耕作制度下,秸秆还田仍然不能平衡作物钾的携出量,土壤钾素肥力依然呈消耗状态,这与前人的研究结果一致[5,20]。但是秸秆还田可以缓解土壤钾素的耗竭,中国的钾肥资源有限,因此玉米秸秆作为一种有机钾肥资源,其对土壤钾素的补充有十分重要的意义。

参 考 文 献:

[1] 葛玮健, 常艳丽, 刘俊梅, 等. 塿土区长期施肥对小麦 - 玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 629-636.
Ge W J, Chang Y L, Liu J M *et al*. Potassium balance and pool as influenced by long-term fertilization under continuous winter wheat-summer maize cropping system in manural loess soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 629-636.

[2] 王亚静, 毕于运, 高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1852-1859.
Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1852-1859.

[3] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179.
Gao L W, Ma L, Zhang W F *et al*. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 173-179.

[4] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(1): 1-9.
Shen S M. The scientific value of long-term soil fertility experiment[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1995, 1(1): 1-9.

[5] 王宏庭, 金继运, 王斌, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 801-808.
Wang H T, Jin J Y, Wang B *et al*. Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 801-808.

[6] 韩宝文, 邢竹, 郭建华, 等. 冬小麦 - 夏玉米轮作中的施钾效应及钾素平衡[J]. 河北农业科学, 2004, 8(3): 25-27.
Han B W, Xing Z, Guo J H *et al*. The experiment research of yield increasing and circulating of potassium in winter Wheat-Summer corn rotation[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2004,8(3): 25-27.

[7] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾对东北春玉米产量和土壤钾素状况的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2234-2240.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of Long-term application of K fertilizer on spring maize yield and soil K in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(10): 2234-2240.

[8] 熊明彪, 舒芬, 宋光煜, 等. 施钾对紫色土稻麦产量及土壤钾素状况的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 274-279.
Xiong M B, Shu F, Song G Y *et al*. Effects of long-term potassium application on yield and soil potassium in rice-wheat cropping system in purple soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (2): 274-279.

[9] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾与秸秆还田对西北地区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 886-893.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 886-893.

[10] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 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 *et al*. 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 north central China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 886-893.

[11] 王志勇, 白由路, 杨俐苹, 等. 低土壤肥力下施钾和秸秆还田对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 900-906.
Wang Z Y, Bai Y L, Yang L P *et al*. Effects of application of potassium fertilizer and straw returning on crop yields and soil potassium balance in low-yield fields[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 900-906.

[12] 刘会玲, 陈亚恒, 段毅力, 等. 土壤钾素研究进展[J]. 河北

农业大学学报, 2002, 25(增刊): 66-68.
Liu H L, Chen Y H, Duan Y L *et al*. The advance of soil potassium[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, 25(S): 66-68.

[13] 金继运, 高广领, 王泽良, 等. 不同土壤钾素释放动力学及其供钾特征的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1994(1): 39-48.
Jin J Y, Gao G L, Wang Z L *et al*. Kinetics of native potassium release and potassium supplying characteristics in selected soils [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1994(1): 39-48.

[14] 周怀平, 解文艳, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 321-330.
Zhou H P, Xie W Y, Guan C L *et al*. Effects of long-term straw-returning on corn yield, economic benefit and water use in arid farming areas[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 321-330.

[15] 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]. 植物营养与肥料报, 1998, 4(2): 156-164.
Huang S W, Jin J Y, W ang Z L *et al*. Native potassium form sand plant availability in selected soils from northern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2): 156-164.

[16] 吴婕, 朱钟麟, 郑家国, 等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 西南农业学报, 2006, 19(2): 192-195.
Wu J, Zhu Z L, Zheng J G *et al*. Influences of straw mulching treatment on soil physical and chemical properties and crop yields [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2006, 19(2): 192-195.

[17] 陈金海, 李金海, 王磊, 等. 两种基于芦苇秸秆还田的改良措施对崇明东滩围垦土壤理化性质和微生物呼吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (2): 307-315.
Chen J H, Li Y L, Wang L *et al*. Effect of two improving measures based on returning phragmites communis straw on soil phy-chemical properties and microbial respiration of the reclaimed lands in Chongming Dongtan, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30 (2): 307-315.

[18] 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 Pedologica Sinica, 1993, 30(1): 94-101.

[19] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 Ⅴ. 农田养分平衡和土壤有效磷、钾消长规律[J]. 土壤通报, 1996, 27(6): 241-242.
Lu R K, Liu H X, Wen D Z *et al*. Nutrient cycle and balance of agroecosystem in the typical regions of China V. Correlation between nutrients balance and ebb and flow of soil available P and K[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(6): 241-242.

[20] 刘会玲, 陈亚恒, 许蜡, 霍习良. 河北低平原潮土氮磷钾平衡状况及评价研究[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(2): 28-31.
Liu H L,Chen Y H, Xu H, Huo X L. The nutrient balance of N P K in aquent of Hebei alluvial plain and their evaluation[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, 25(2): 28-31.