植物营养与肥料学报 2012,18(5):1096-1102
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期施钾和秸秆还田对河北潮土区作物产量和土壤钾素状况的影响

孙丽敏[1,4], 李春杰[2], 何 萍[3], 刘孟朝[2*], 胡景辉[4]
(1 河北农业大学资源与环境学院, 河北保定 071001; 2 河北省农林科学院农业资源与环境研究所, 河北石家庄 050051; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081; 4 河北省农林科学院农业信息与经济研究所, 河北石家庄 050051)

摘要: 以河北冲积平原典型潮土区小麦-玉米轮作长期定位试验(1992～2009 年)为基础,分析了长期施用钾肥和秸秆还田对作物产量、土壤钾含量及钾素平衡的影响。研究结果表明,不同处理下小麦、玉米 17 年平均产量均表现为 NPKSt > NPK > NPSt > NP,其中,小麦、玉米 NPKSt 处理比 NP 处理分别增产 9.37% 和 19.23%,NPK 处理比 NP 处理分别增产 6.32% 和 18.25%; NPSt 处理比 NP 处理分别增产 2.76% 和 9.60%; 长期定位施肥下,各处理耕层土壤(0—20 cm)各施钾肥的处理其速效钾、缓效钾含量均与 NP 处理差异极显著,且表现为 NPKSt > NPK > NPSt > NP; 各处理下层土壤(20—40 cm)的速效钾、缓效钾含量差异均不显著,从钾素平衡看,NP 处理钾素表观年盈亏量为 -170.0 kg/hm^2,土壤钾严重亏缺; NPSt 处理实际平衡盈亏率 -58.4%,表观年盈亏量为 -150.6 kg/hm^2; NPK 处理钾素表观年盈亏量 -3.1 kg/hm^2,盈亏率 -1.0%,基本接近平衡; NPKSt 处理实际平衡盈亏率 36.8%,表观年盈亏量为 111.4 kg/hm^2。试验结果说明,在潮土区,在施氮、磷肥的基础上,配施钾肥或秸秆还田不仅能持续提高小麦、玉米的高产、稳产生产能力,而且对保持农田土壤钾素平衡、有效改善耕层土壤钾素状况、提高土壤肥力有重要的作用。

关键词: 长期施肥; 潮土; 作物产量; 土壤钾素状况
中图分类号: S158.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)05-1096-07

Effects of long-term K application and straw returning on crop yield and soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei Province

SUN Li-min[1,4], LI Chun-jie[2], HE Ping[3], LIU Meng-chao[2*], HU Jing-hui[4]
(*1 College of Resource and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2 Institute of Agro-resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4 Agricultural Information and Economic Research Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China*)

Abstract: With the aim to provide the theoretical basis for sustainably increasing crop yield, productivity, and nutrient management in fluvo-aquic soil of Hebei Province, the effects of the long-term application of K fertilizers and straw returning on crop yield, soil K content and potassium balance were analyzed using the data obtained from the long-term K localization experiment (1992-2009) under wheat-maize rotation system. The results reveal that the 17-year average yields of wheat and maize are in an order as NPKSt > NPK > NPSt > NP, which is similar to the effects of the K fertilizer application. Compared to the NP mode, the yields of wheat and maize under the NPKSt mode are increased by 9.37% and 19.23% respectively, the yields of wheat and maize under the NPK mode are increased by 6.32% and 18.25% respectively, and the yields of wheat and maize under the NPSt mode

收稿日期: 2011-04-18　　**接受日期:** 2012-07-12
基金项目: 国际植物营养研究所(IPNI)中国项目; 河北省财政专项(F12R15029)资助。
作者简介: 孙丽敏(1964—),女,河北元氏人,研究员,在读博士,研究方向为植物营养。Tel: 0311-87651256, E-mail: liminsun@163.com
* 通讯作者 E-mail: lmchao1758@sohu.com

are increased by 2.76% and 9.60% respectively. The nutrient analysis indicates that the contents of available potassium and slowly releasing potassium in the 0-20 cm soil layers under the modes of NPKSt, NPK and NPSt are significantly different from those under the NP mode, showing an order as NPKSt > NPK > NPSt > NP, while no significant differences in the contents of available potassium and slowly releasing potassium in 20 to 40 cm soil layers are found between the four fertilizing modes. The nutrient balance analysis discloses that the profit and loss annually of K under the NP mode is −170.0 kg/ha, indicating that potassium is seriously deficiency in soil, the real surplus and deficit rate under the NPSt mode is −58.4% and the annual profit and loss of K is −150.6 kg/ha, the profit and annual loss of K and the real surplus and deficit rate under the NPK mode are nearly in balance and they are −3.1 kg/ha and −1.0% respectively, while under the NPKSt mode, the balance index of K is 1.37, the real surplus and deficit rate is 36.8% and the profit and loss annually of K is 111.4 kg/ha. These results demonstrate that the long-term application of K fertilizers and straw returning in fluvo-aquic soils of wheat-maize rotation fields have significant effects on yield increase and soil potassium balance.

Key words: long-term fertilization; fluvo-aquic soil; crop yield; soil K status

施用钾肥对提高作物产量、改善品质及提高作物抗逆性具有显著作用[1-9]。小麦-玉米轮作是华北平原最主要的种植制度之一,长期以来该区生产中重视施用氮、磷肥,少施或不施钾肥,特别是随着作物高产品种的应用、产量水平的提高和复种指数的增加,农田钾素平衡状况如何,是否是影响该区农业生产的进一步发展的重要限制因素已成为学术界研究的重要课题。有关施用钾肥或秸秆还田前人进行了大量研究,如谭金芳等[10]分别就黄淮海平原潮土区超高产麦田土壤钾素变化、小麦钾素营养特点等进行了研究。于振文等[11]利用^{15}N示踪技术,研究了施钾量和施钾时期对高产小麦氮素和钾素吸收的影响。王宏庭等[12]在山西褐土区小麦上的研究认为,只施用氮、磷肥,冬小麦年平均产量5.5 t/hm^2,土壤钾素严重亏缺;在施用氮、磷肥的基础上施用钾肥,平均增产10.2%以上;施用氮、磷肥的基础上秸秆还田平均增产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。谭德水等[13]认为,在施用氮、磷肥基础上长期施钾和秸秆还田能增加小麦和玉米产量,表现为:氮磷钾肥配合秸秆还田>只施用氮、磷、钾肥>氮、磷肥配合秸秆还田>只施用氮、磷肥;小麦的产量变异系数大于玉米,但钾肥产量效应却低于玉米[14]。定位后8～10年施钾肥开始显著有效,玉米显效时间早于小麦。研究不同施肥处理的作物产量效应及农田养分平衡对田块尺度上合理高效施肥具有重大意义[7,15]。而前人关于施用钾肥或秸秆还田的研究多偏重于其对冬小麦单个作物产量的探讨,对于不同作物长期施用钾肥和秸秆还田的产量效应及土壤钾素演变的系统报道较少,基于此,本文以河北冲积平原典型潮土区长期定位试验为依据,分析施用钾肥和秸秆还田对作物产量、土壤钾素含量及平衡的影响,旨在为该区合理施用钾肥及钾肥资源的优化管理提供试验依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况及施肥方案

试验设在河北省农林科学院农业资源与环境研究所试验基地辛集市马兰农场。供试土壤为轻壤质潮土,耕层土壤(0—20 cm)养分状况为:有机质8.7 g/kg,速效钾83.2 mg/kg,速效氮69.7 mg/kg,有效磷12.6 mg/kg,全钾24.4 g/kg,缓效钾916 mg/kg。下层土壤(20—40 cm)养分状况:有机质5.5 g/kg,速效钾88.0 mg/kg,速效氮48.3 mg/kg,有效磷3.2 mg/kg,全钾25.4 g/kg,缓效钾862.0 mg/kg。

试验时间自1992年秋～2009年秋共17年。种植方式为小麦-玉米轮作[17-19]。试验设4个处理:1)对照(只施氮、磷肥,NP);2)在对照基础上增施秸秆(NPSt),St代表作为肥料还田的小麦秸秆,一般用量为7500 kg/hm^2(干质量,约折合K_2O量102 kg/hm^2);3)在对照基础上增施钾肥(NPK);4)在对照基础上增施秸秆和钾肥(NPKSt)。具体施肥方案见表1。每个处理设4次重复,小区面积50 m^2。小麦年度播期一般为10月上旬,翌年6月上旬收获;玉米一般6月中旬种植,当年9月下旬收获。

表1 施肥方案

Table 1 Fertilization design

处理 Treatment	小麦季施肥量（kg/hm²） Fertilization rate on wheat			玉米季施肥量（kg/hm²） Fertilization rate on maize			
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	麦秸 Wheat straw
CK(NP)	225	90	0	225	90	0	0
NPK	225	90	150	225	90	150	0
NPSt	225	90	0	225	90	0	7500
NPKSt	225	90	150	225	90	150	7500

1.2 样品分析测定方法

原始土的基本理化性状用常规方法测定[16]。土壤速效钾采用1 mol醋酸铵浸提—火焰光度计测定[16]；土壤缓效钾用1 mol硝酸煮沸浸提—火焰光度计测定[16]。

植株样品采集与产量测定方法：每单季作物收获后，分区计产。每个小区去除东西两边各4行、南北两头各50 cm作物，只计算小区中间部分的作物产量。收获时，先称各小区实际收获部分小麦（玉米）地上部分总鲜质量，然后从中分取1/10，单独脱粒并晒干，分别称取籽粒和其余部分（含茎叶及麦糠等）干质量，用此部分干质量样品折算全区小麦（玉米）籽粒产量和干物质质量。

植株样品钾素测定方法：采用$H_2SO_4-H_2O_2$消煮法—火焰光度计测定[16]。

主要计算公式：

钾素平衡系数＝投入土壤钾素/带出土壤钾素

钾素平衡率＝[（输入－支出）/支出]×100%

钾素表观总盈亏量＝（钾素投入总量－作物带出土壤钾素总量）×试验年限

1.3 数据处理和方差分析

数据分析采用Microsoft Excel和SPSS 11.5统计软件完成，处理间差异显著性检测采用Duncan新复极差法。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对小麦、玉米籽粒产量的影响

由17年各处理作物产量变化趋势可以看出，小麦和玉米产量基本表现为NPKSt > NPK > NPSt > NP，说明不同施肥处理对作物产量有明显影响，且小麦和玉米响应相同。

作物的稳产性也是评价施肥制度优劣的重要指标之一，常用表示作物产量年际波动的变异系数来表示。从图1可以看出，不同处理小麦、玉米年际间产量的稳定性有明显的差异。其中，各处理小麦产量的变异系数依次为NPKSt（8.3%）< NPK（9.3%）< NP（10.1%）< NPSt（10.8%），施钾处理小麦产量稳定性较高，说明施钾肥提高了小麦产量稳定性；玉米为NP（14.0%）< NPKSt（15.4%）< NPK（15.8%）< NPSt（16.6%），说明施钾肥未提高玉米产量的稳定性。究其原因应为玉米产量的大幅提高所致。此外，各处理小麦产量变异系数普遍小于玉米，说明小麦产量的稳定性强于玉米。总体来看，在潮土上NPKSt处理的作物产量丰产性和稳定性最高。

由17年各处理作物平均产量（表2）来看，1）从长期施用化肥钾的影响来看，NPK处理比NP的小麦、玉米产量分别增产6.3%（$P<0.01$）和18.3%（$P<0.01$），NPKSt处理比NPSt的小麦、玉米产量分别增产6.8%（$P<0.01$）和10.7%（$P<0.01$），说明施用钾肥对作物的增产效果显著，钾肥在玉米上比小麦上的增产效果显著。2）从长期秸秆还田的影响来看，NPSt处理比NP处理的小麦、玉米产量分别增产2.8%（$P>0.01$）和9.6%（$P<0.01$），说明在施氮、磷的基础上秸秆还田仅对玉米产量增产效果显著；NPKSt处理比NPK处理分别增产3.26%（$P<0.01$）和1.20%（$P<0.01$），说明在施钾肥的情况下秸秆还田对小麦产量增产效果显著。3）NPKSt处理比NP处理的小麦、玉米产量分别增产9.4%（$P<0.01$）和19.2%（$P<0.01$），且NPKSt较NP处理的小麦、玉米增产幅度最大，说明在氮磷钾肥配合秸秆还田对小麦、玉米的增产效应最大，即表明在华北潮土区，在施用氮磷钾肥的基础上进行秸秆还田可以进一步提高作物产量。

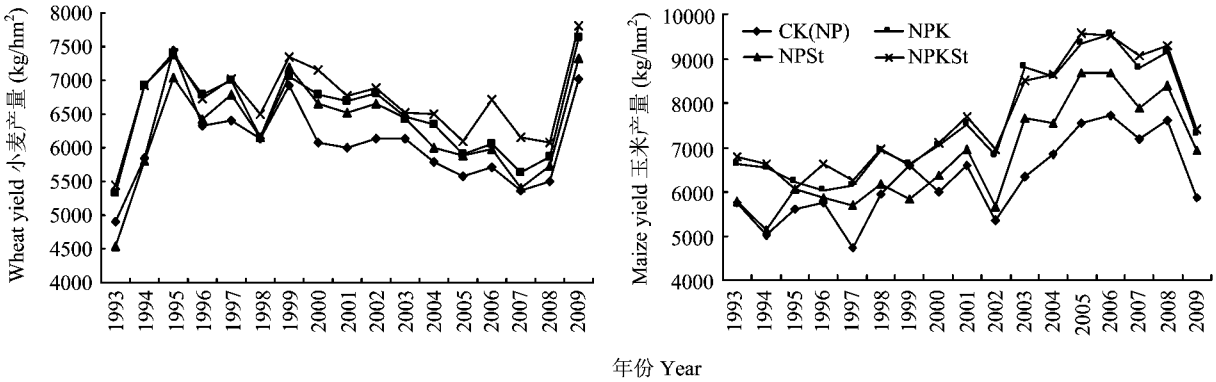

图 1　不同长期定位施肥处理的小麦和玉米籽粒产量

Fig. 1　Yields of wheat and maize under different long-term fertilization treatments

表 2　长期定位施肥对小麦、玉米籽粒产量的影响

Table 2　Effect of the long-term fertilization on grain yields of wheat and maize

处理 Treatments	小麦籽粒产量 Grain yield of wheat (kg/hm^2)	增产 Increased production (%)	玉米籽粒产量 Grain yield of maize (kg/hm^2)	增产 Increased production (%)
NP	6 048.1 ± 174.1 C		6 512.6 ± 247.8 D	
NPK	6 455.9 ± 171.4 B	6.3	7 966.3 ± 330.0 B	18.3
NPSt	6 219.8 ± 189.8 C	2.8	7 204.5 ± 311.4 C	9.6
NPKSt	6 673.3 ± 158.1 A	9.4	8 063.4 ± 323.7 A	19.2

注(Note):同列数据后不同字母表示在 0.01 水平差异显著 Values followed by different letters within a column are significantly different at the 0.01 level.

2.2　长期施肥对土壤钾素平衡的影响

从表 3 看出,17 年试验点的植株年吸钾量,以 NPKSt 和 NPK 处理最高,其次是 NPSt 和 NP。小麦、玉米籽粒吸钾量、秸秆吸钾量与施钾量有明显的关系,施钾可明显提高植株吸钾量。长期不施钾肥(NP)处理,钾素表观年盈亏量 -170.0,土壤钾严重亏缺;NPSt 处理平衡系数 0.42,实际平衡盈亏率 -58.4%,土壤钾仍出现亏缺,平均每年亏缺降低为 -150.6 kg/hm^2,说明尽管秸秆还田是重要的钾源,但还不足以维持土壤的钾素平衡;NPK 处理钾素表观年盈亏量 -3.1 kg/hm^2,平衡系数 0.99,实际平衡盈亏率 -1.0%,基本接近平衡;NPKSt 处理平衡系数 1.37,实际平衡盈亏率 36.8%,各项指标均为正值,钾素盈余,平均每年积累在土壤中钾为 111.4 kg/hm^2。因此,在本试验条件下,只有连续施钾和秸秆还田才能保障土壤钾素不亏损。

2.3　长期定位施肥对土壤速效钾、土壤缓效钾的影响

从表 4 可以看出,在 0—20 cm 土层,速效钾、缓效钾含量以 NPKSt 处理最高,其次为 NPK 和 NPSt 处理,NP 处理最低,且前三者均与对照(NP)间差异极显著($P<0.01$),而在 20—40 cm 土层,三处理与对照则差异不显著,说明施钾肥或秸秆还田对提高耕层土壤的钾素含量有显著效果,对下层土壤钾素含量影响不大。

从 0—20 cm 土壤速效钾含量来看,1992 年土壤速效钾基础含量为 83.2 mg/kg,长期不施钾肥处理(NP)1993 ~ 2009 年平均值速效钾含量为 91.0 mg/kg,平均值较基础值上升 8.57%,究其原因可能是由于在低产条件下富钾潮土的缓效、有机态和难溶性钾转化为速效钾的数量大于作物吸收所致;而 NPKSt、NPK 和 NPSt 处理 1993 ~ 2009 年平均速效钾含量较基础值则分别上升 45.55%、38.28% 和 30.61%,表明各处理较对照均显著提高了土壤速效钾含量。

土壤缓效钾是衡量土壤供钾潜力的指标,缓效

表3 长期定位施肥对钾素(K_2O)平衡的影响(1992～2009年)

Table 3 Effects of the long-term fertilization on the farmland potassium(K_2O) balances(1992-2009)

处理 Treat.	钾施用量 K application amount (kg/hm^2)	植株年吸钾量 Annually K uptake by plant (kg/hm^2)	钾素表观总盈亏量 Total surplus of K (kg/hm^2)	钾素表观年盈亏量 Annually surplus of K (kg/hm^2)	钾素平衡系数 Balance index of K	钾素平衡率 Surplus of K (%)
NP	0.0	170.0	-2550.4	-170.0	0.00	-100.0
NPSt	107.3	258.0	-2259.6	-150.6	0.42	-58.4
NPK	300.0	303.1	-47.2	-3.1	0.99	-1.0
NPKSt	414.2	302.8	1 670.9	111.4	1.37	36.8

注(Note):植株年吸钾量为小麦、玉米籽粒和秸秆年吸钾量的和 The annual amount of potassium absorbed by plants were calculated by grain and straw of wheat and maize.

表4 长期定位施肥对土壤速效钾、缓效钾含量的影响(1992～2009年)

Table 4 Effects of the long-term fertilization on the soil available potassium and slowly available potassium(1992-2009)

年份 Year	土壤速效钾 Soil available potassium (K_2O, mg/kg)							
	0—20 cm				20—40 cm			
	NP	NPK	NPSt	NPKSt	NP	NPK	NPSt	NPKSt
1992	83.2	83.2	83.2	83.2	88.0	88.0	88.0	88.0
1993～2009	91.0 ±12.9 C	134.8 ±40.1 AB	119.9 ±30.2 B	152.8 ±44.1 A	108.8 ±33.1 A	104.0 ±33.7 A	92.7 ±18.3 A	105.1 ±21.2 A

年份 Year	土壤缓效钾 Soil slowly available potassium (K_2O, mg/kg)							
	0—20 cm				20—40 cm			
	NP	NPK	NPSt	NPKSt	NP	NPK	NPSt	NPKSt
1992	916.8	916.8	916.8	916.8	862	862	862	862
1993～2009	871.3 ±123.5 C	987.5 ±146.6 AB	934.0 ±148.1 B	1020.1 ±156.0 A	903.8 ±156.7 AB	921.4 ±172.8 AB	891.0 ±129.6 B	941.8 ±160.4 A

注(Note):同行数据后不同的大写字母表示同一土层不同处理间差异在0.01水平显著 Data with a different letter within a column are significantly different among different treatments at the same soil layer at the 0.01 probability level.

钾含量高,土壤供钾能力大。从0—20 cm土壤缓效钾来看,长期不施钾肥处理(NP)土壤缓效钾明显下降,1993～2009年平均值为871.3 mg/kg,平均值较基础值下降5.22%,土壤供钾能力进一步恶化;与对照相反,NPKSt、NPK和NPSt处理1993～2009年平均缓效钾含量较基础值则分别上升10.13%、7.15%和1.84%,表明施钾或秸秆还田大大缓解了土壤钾素亏缺状况,增强了土壤供钾能力。

3 讨论与结论

3.1 长期定位施肥对小麦、玉米籽粒产量的影响

谭德水等[20]在辽宁、吉林、黑龙江3个试验点的研究表明,长期施钾条件下13年平均作物产量分别增加9.9%～10.3%、12.6%～13.6%和17.5%～21.7%,并且直接施用钾肥效果优于秸秆还田[13,20]。从本试验作物产量来看,施用钾肥或小麦秸秆还田可显著提高河北潮土小麦玉米轮作种植制度下作物产量,且基本表现为:NPKSt > NPK > NPSt > NP,小麦钾肥产量效应低于玉米,这与谭德水等[20]的研究结果一致;从稳定性来看,小麦的产量稳定性高于玉米,与谭德水等[20]研究结果相反,究其原因可能是土壤类型不同所致;从增产效果来

看,在施氮、磷肥的基础上每年配施钾肥(K_2O 150 kg/hm^2),小麦、玉米分别平均增产 6.3% 和 18.3%,小麦秸秆还田平均增产分别为 2.8% 和 9.6%,二者配合施用平均增产 9.4% 和 19.2%。这一结果与王宏庭等[21]在山西褐土上的研究结果近似。此外,NP 和 NPSt 处理的小麦产量差异不显著,玉米产量差异极显著,即在施用磷、钾肥的基础上进行秸秆还田仅能使玉米增产,对小麦产量影响不显著;NP 和 NPKSt 处理的小麦、玉米产量差异均极显著且最大,即在施用氮、磷肥的基础上同时配施钾肥和秸秆还田是作物增产的最佳途径。

3.2　长期定位施肥对钾素平衡的影响

鲁如坤等[22]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。刘会玲等[23]认为,河北低平原潮土养分收支情况为氮磷有盈余,而钾素处于亏损状态,钾素的平衡系数为 0.72 ~ 0.96,钾素亏缺率为 28.1%,比允许值 41.3% 低。张玉铭等[24]对华北太行山前平原农田生态系统中氮、磷、钾循环与平衡进行了研究,认为栾城县磷、钾分别允许有 95% 和 93.3% 的赤字,比较栾城县、站区及周围区域农田养分实际平衡状况,钾素由极度亏缺逐渐向平衡发展,但仍有大量田块是赤字平衡。王宏庭等[21]在山西石灰性褐土 16 年的定位试验表明,只施用氮、磷肥处理冬小麦土壤钾素严重亏缺,年平均亏缺 104.3 kg/hm^2。本研究认为,秸秆还田(NPSt)处理实际平衡盈亏率为 -58.4%,平均每年亏缺 -150.6 kg/hm^2,尚不足以维持土壤的钾素平衡;在氮、磷基础上配施钾肥,土壤钾素年盈余量为 -3.1 kg/hm^2,平衡系数平均为 0.99,可以减缓钾素的耗竭和基本保持土壤钾素的平衡;而 NPKSt 处理土壤钾素年均盈亏量为 111.4 kg/hm^2,平衡系数达 1.37,已使土壤钾素平衡处于盈余状况。

3.3　长期定位施肥对土壤速效钾、土壤缓效钾的影响

王宏庭等[21]研究表明,与 NP 处理相比,NPK、NPSt、NPKSt 处理的土壤速效钾、缓效钾含量均显著提高;与 NPSt 处理相比,NPK、NPKSt 处理土壤速效钾、缓效钾含量均显著提高;但 NPKSt 与 NPK 处理间速效钾含量处理间差异不显著,缓效钾含量有显著差异。本研究中 NPKSt、NPK、NPSt 处理在 0—20 cm 土层速效钾、缓效钾含量与对照(NP)间差异极显著($P<0.01$),与对照相比,各处理均明显提高了土壤速效钾含量。NP 处理土壤缓效钾从 1992 年的 916.8 mg/kg 下降到 871.3 mg/kg,下降 5.22%,下降明显,土壤供钾能力不断恶化;而 NPKSt、NPK、NPSt 处理缓效钾含量较基础值则分别上升 10.13%、7.15%、1.84%,大大缓解了钾素亏缺状况,增强了土壤供钾能力。

肥料长期定位试验具有常规试验不可比拟的优点,通过研究长期不同施肥处理对作物产量、土壤钾素的平衡及土壤速效钾、缓效钾的影响特性,可以深入了解长期施肥条件下土壤钾素复杂的化学行为,预测施入土壤钾素的变化和土壤供给植物钾素营养的本质特征。本文仅就河北冲积平原典型种植制度下,施用钾肥和秸秆对作物产量、土壤钾素含量及平衡的影响进行了初步探讨,作物品种和施肥时间的影响有待今后做进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 谭金芳,介晓磊. 钾素施用原理与实践[M]. 北京:中国农业科技出版社,1996.
Tan J F, Jie X L. The principle and practice and potassium[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1996.

[2] Khan A W. Mann R A. Muhammad S A M. Integrated potash nutrient management enhances rice productivity under paddy soil [J]. Intern. J. Biol. Biotechnol., 2011. 8(3): 387-389.

[3] Ayub C M, Abdul Manan Pervez M A, Shahid M A *et al*. Growth and yield response of potato crop to different sources of potash[J]. Intern. J. Agron. Veterin. Med. Sci., 2011. 5(3): 316-321.

[4] Zhao B Q, Li X Y, Liu H *et al*. Results from long-term fertilizer experiments in China: the risk of groundwater pollution by nitrate [J]. NJAS-Wagen. J. Life Sci., 2011. 58(3/4): 177-183.

[5] Naidu L G K, Ramamurthy V, Sidhu G S. Dipak Sarkar. Emerging deficiency of potassium in soils and crops of India. (Special Issue: Potassium nutrition in enhancing yield and quality of crops.)[J]. Karnataka J. Agric. Sci., 2011. 24(1): 12-19.

[6] Quddus M A, Siddiqi M W, Riaz M M. The demand for nitrogen, phosphorus and potash fertilizer nutrients in Pakistan[J]. Pakistan Econ. Soc. Rev., 2008. 46(2): 101-116.

[7] Watanabe K, Murayama T, Niino T *et al*. Reduction of phosphatic and potash fertilizer in sweet corn production by pre-transplanting application of potassium phosphate to plug seedlings[J]. Plant Prod. Sci., 2005. 8(5): 608-616.

[8] Kunzova E, Hejcman M. Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic[J]. Field Crops Res., 2009, 111 (3): 226-234.

[9] Licina V, Markovic N, Mladenovic S A *et al*. The fraction of potassium in soil at different applications of fertilizer K, and its accumulation in grape vines[J]. Ann. Univ. Craiova-Agric.,

Montanol., Cadastre Ser., 2010. 40(1): 267-271.

[10] 谭金芳，介晓磊，韩燕来，等. 潮土区超高产麦田供钾特点与小麦钾素营养研究[J]. 麦类作物学报，2001，21(1)：45-50.
Tan J F, Jie X L, Han Y L *et al*. Study on potassium supplying properties in super-high yield wheat field in Chao soil region and potassium nutrition characteristics of wheat[J]. Acta Tritir. Crops, 2001, 21(1): 45-50.

[11] 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*. Effects 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.

[12] 王宏庭，金继运，王斌，赵萍萍. 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 Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(4): 801-808.

[13] 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 northcentral China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(1): 106-112.

[14] 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 Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(5): 886-893.

[15] 李新旺，门明新，王树涛，等. 长期施肥对华北平原潮土作物产量及农田养分平衡的影响[J]. 草业学报，2009，18(1)：9-16.
Li X W, Men M X, Wang S T *et al*. The effects of long-term fertilization on crop yields and farmland nutrient equilibrium[J]. Acta Pratac. Sin., 2009, 18(1): 9-16.

[16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，1999.
Lu R K. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1999.

[17] 邢素丽，刘孟朝，何萍. 用增稳系数评价钾肥配合秸秆还田对作物的增产稳定性效应[J]. 干旱地区农业研究，2010，28(5)：47-51.
Xing S L, Liu M C, He P. Evaluating stability of durative yield-increasing effect of potassium(K) fertilization and straw recycling on crop yields by yield increase stability coefficient (YISC)[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2010, 28(5): 47-51.

[18] 邢素丽，李春杰，韩宝文，贾良良. 壤质潮土长期施钾对小麦玉米轮作制作物钾吸收的影响[J]. 华北农学报，2008，23(增刊)：274-278.
Xing S L, Li C J, Han B W, Jia L L. Impact of long term potassium(K) fertilization on crop K uptake on wheat-corn rotation on in loamy fluvo-aquic soil[J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 23(Suppl.): 274-278.

[19] 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. Effects of 12-year continuous application of straw and K fertilizer on soil potassium concentration and distribution in fluvo-aquic soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(3): 486-490.

[20] 谭德水，金继运，黄绍文，何萍. 东北地区黑土、草甸土长期施钾对玉米产量及耕层土钾素形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(5)：850-855.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W, He P. Effect of long-term K application on corn yield and potassium forms in plough layer of black soil and meadow soil in northeast of China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 850-855.

[21] 王宏庭，金继运，王斌，赵萍萍. 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, Zhao P P. Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(4): 801-808.

[22] 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]. Chin. J. Soil Sci., 1996, 27(6): 241-242.

[23] 刘会玲，陈亚恒，许蟠，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]. J. Agric. Univ. Hebei, 2002, 25(2): 28-31.

[24] 张玉铭，胡春胜，毛任钊，董文旭. 华北太行山前平原农田生态系统中氮、磷、钾循环与平衡研究[J]. 应用生态学报，2003，14(11)：1863-1867.
Zhang Y M, Hu C S, Mao R Z, Dong W X. Nitrogen, phosphorus and potassium cycling and balance in farmland ecosystem at the piedmont of Taihang[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(11): 1863-1867.