

华北地区长期施钾和秸秆还田对土壤钾素和作物产量的影响

赵士诚¹ 贾良良³ 何萍^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所北京办事处, 北京 100081; 3. 河北省农林科学院农业资源与环境研究所, 石家庄 050051)

摘要: 利用长期(20年)定位试验研究了施钾和秸秆还田对土壤钾水平和作物产量的影响。试验处理包括: 氮磷肥(NP), 氮磷肥+小麦秸秆(NPS), 氮磷钾肥(NPK), 氮磷钾肥+小麦秸秆(NPKS)。结果表明, 土壤钾平衡随钾投入总量(肥料钾和秸秆钾)的增加而增加。NP和NPS处理0-30厘米土层的土壤速效和缓效钾含量均较试验开始前降低, 施钾和秸秆还田可缓解土壤钾消耗和提高土壤钾水平。施钾和秸秆均可提高作物产量, 且玉米对钾肥的产量反应高于小麦。

关键词: 长期定位试验; 钾肥; 秸秆还田; 产量; 钾平衡

充足的土壤钾素供应是作物高产的保证。全球土壤钾水平在不断降低, 土壤钾缺乏也成为世界性难题^[1]。在中国, 不平衡施肥导致了严重的土壤钾消耗, 土壤钾缺乏也成为作物高产的限制因素之一。推广平衡施肥提高了钾肥投入, 但我国钾肥主要靠进口, 近年升高的钾肥价格增加了农业生产成本。因此, 高效施用钾肥在我国资源限制条件下意义重大。作物秸秆是重要的有机肥资源, 秸秆还田能返回农田大量的钾素。最近随秸秆还田机械的推广, 我国华北冬小麦-夏玉米轮作区域作物秸秆全量还田的比例越来越高。秸秆在田间的分解和养分释放较慢, 其对作物产量和土壤肥力、质量的影响短期很难显现^[2], 而长期定位试验能较好的反应不同养管理措施对作物产量和土壤肥力、质量的影响^[3]。几位学者研究了长期施肥和秸秆还田下表层土壤的养分变化^[4-5], 而 Breulmann 等^[6]认为研究深层土壤能得到更多的关于土壤养分变化的信息。我们通过定位试验研究了长期施钾和秸秆还田对华北土壤钾水平和作物产量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验点和试验设计

长期定位试验位于河北省马兰农场(37°55'N, 115°13'E), 于1992年10月建立。试验点土壤为潮土, 轻质壤土, 基本理化性状为(0-20厘米土层): pH 8.6, 有机质 14.1 克/公斤, 碱解氮 69.7 毫克/公斤, Olsen-P 19.1 毫克/公斤, 速效钾 99.6 毫克/公斤, 缓效钾 1072 毫克/公斤, 全钾 23.4 克/公斤。试验采用冬小麦-夏玉

米轮作体系, 四个施肥处理为氮磷肥(NP)、氮磷肥+小麦秸秆(NPS)、氮磷钾肥(NPK)和氮磷钾肥+小麦秸秆(NPKS)。

在每一作物季节, 各处理的氮肥用量均为 15 公斤 N/亩(尿素, 46% N)。在小麦季, 三分之一的氮肥基施和三分之二的氮肥拔节期追施; 在玉米季, 三分之一的氮肥三叶期做基肥条施, 三分之二的氮肥在十叶期追施。两作物所有处理的磷肥以 6 公斤 P₂O₅/亩(过磷酸钙, 12% P₂O₅)用量基施, 钾肥仅在 NPK 和 NPKS 处理以 10 公斤 K₂O/亩(氯化钾, 60% K₂O)用量基施。NPS 和 NPKS 处理的小麦秸秆在玉米播前全部粉碎后还田, 其他处理的全部移出小区。自 1993 至 2006 年, 所有小区的玉米秸秆全移走, 自 2007 年玉米收获后, 所有处理小区的玉米秸秆全部还田。试验中选用当地高产品种, 田间管理参照高产田管理措施。

1.2 作物收获与采样

在每年作物成熟期各处理单收计产并取样分析。2012 年小麦收获后, 每处理小区选 5 点分 0-10、10-20、20-30、30-40、40-60、60-80 和 80-100 厘米取样, 同层 5 个土样组成混合样, 风干过筛后分析。

1.3 植株和土壤分析

植株和籽粒全钾用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮, 土壤全钾用 NaOH 熔融法, 土壤速效钾用 1M 醋酸铵浸提, 非交换钾用热硝酸浸提, 所有消煮和浸提液的钾含量用原子吸收法测定, 其中缓效钾为非交换钾与速效钾之差^[7]。

1.4 数据分析与统计

作物钾吸收根据作物生物量及其钾含量计算，每年土壤钾平衡根据下式计算：

土壤钾平衡 (公斤 K_2O / 亩) = 钾总投入 (肥料钾 + 秸秆钾) - 作物钾移走

数据利用 SPSS 13.0 软件进行方差分析，并根据 LSD 进行多重比较 ($p < 0.05$)，表格采用 Excell 2007 制作。

2 结果与分析

2.1 作物钾吸收和土壤钾平衡

各施肥处理间，每年的小麦钾吸收在 1993 - 1997 和 1998 - 2002 间变化趋势为：NP < NPS ≤ NPK ≤ NPKS，在 2003 - 2007 和 2008 - 2012 间为：NP < NPS < NPK = NPKS (表 1)。同一处理的玉米钾吸收随试验的进行逐年增加，在不同试验阶段处理间变化一致，为 NP < NPS < NPK = NPKS。

对于任一处理，1993 - 2007 年的年土壤钾平衡值低于 2008 - 2012 年，因为 2008 年后秸秆钾投入显著增加 (表 2)。在不同试验阶段，四个处理间钾平衡值变化为：NP < NPS < NPK < NPKS。在 1993 - 1997，1998 - 2002 和 2003 - 2007 年间，NP、NPS 和 NPK 处理每年的钾平衡值为负，而同期 NPKS 处理的值分别为 0.35、0.28 和 0.086 公斤 K_2O / 亩。结果说明秸秆还田在提高土壤钾肥力方面有重要作用，施钾和秸秆还田均可缓解土壤钾耗竭，且高量钾投入能较好提高此效果。

表 1 不同试验阶段各施肥处理的每年作物地上部钾吸收量 (公斤 K_2O / 亩)

试验阶段	NP	NPS	NPK	NPKS
小麦				
1993-1997	10.9a C	14.0a B	15.9a AB	16.7a A
1998-2002	11.6a C	15.3a B	16.1a AB	16.7a A
2003-2007	11.0a C	15.1a B	16.5a A	17.3a A
2008-2012	11.7a C	14.8a B	16.2a A	17.4a A
玉米				
1993-1997	6.5b C	9.4c B	11.2b A	12.0b A
1998-2002	7.3ab C	10.8b B	12.1b A	13.0b A
2003-2007	7.2ab C	12.3a B	15.3a A	16.4a A
2008-2011	8.0a C	13.6a B	16.4a A	17.7a A

不同小写字母表明同一作物不同试验阶段差异显著，不同大写字母表明同一试验阶段处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

表 2 不同试验阶段各施肥处理的每年田间钾平衡 (公斤 K_2O / 亩)

试验阶段 / 处理	年钾投入		年作物钾移走	年土壤钾平衡
	肥料钾	秸秆钾 ^a		
1993 - 1997				
NP	--	--	17.5c	-17.5d
NPS	--	11.7b	23.4b	-11.1c
NPK	20	--	27.1a	-7.1b
NPKS	20	13.9a	28.7a	52a
1998 - 2002				
NP	--	--	18.9c	-18.9d
NPS	--	12.7b	26.1b	-13.4c
NPK	20	--	28.3a	-8.3b
NPKS	20	14.0a	29.8a	4.2a
2003 - 2007				
NP	--	--	18.2c	-18.2d
NPS	--	12.5b	27.4b	-14.9c
NPK	20	--	31.8a	-11.8b
NPKS	20	15.0a	33.7a	1.3a
2008 - 2012				
NP	--	6.2d	19.6c	-13.5d
NPS	--	22.7b	28.4b	-5.7c
NPK	20	13.3c	32.6a	0.6b
NPKS	20	27.3a	35.1a	12.2a

不同字母表明同一试验阶段处理间差异显著 ($p < 0.05$)。
^a 1993-2007 年秸秆钾投入来自小麦秸秆，2008-2012 年秸秆钾投入来自小麦和玉米秸秆。

2.2 土壤钾变化

NP 处理的土壤速效钾从 30 - 40 厘米至 0 - 10 厘米土层逐步降低，而 NPK 和 NPKS 处理呈现相反趋势 (表 3)。除 NPKS 处理 30 - 40 厘米土层速效钾显著高于 60 - 80 和 80 - 100 厘米土层外，土层深度对其它处理 30 厘米以下速效钾没有影响。在 0 - 10 和 10 - 20 厘米土层，所有处理间速效钾差异显著，变化趋势为 NP < NPS < NPK < NPKS；在 20 - 30 厘米，处理间速效钾变化趋势为 NP ≤ NPS ≤ NPK = NPKS > NPS；而 30 厘米土层以下各处理间差异不显著。

对同一处理，30 厘米土层以下各层土壤缓效钾没有显著差异 (表 4)。NP 处理 0 - 30 厘米土层的缓效钾显著低于 30 厘米以下各层的含量。对于 NPS 和 NPK 处理，除 NPS 处理 10 - 20 和 20 - 30 厘米土层缓效钾含量较低和 NPK 处理 0 - 10 厘米较高外，其它土层的缓效钾相似。NPKS 处理的缓效钾自 30 - 40 厘米至 0 - 10 厘米土层逐步增加。在 0 - 10 厘米土层，处理间缓效钾显著变化为：NP < NPS < NPK < NPKS；在 10 - 20 和 20 - 30 厘

表3 不同施肥处理下不同土层土壤有效钾(毫克 K/公斤)

土层(厘米)	NP	NPS	NPK	NPKS
0-10	83.8c D	96.1b C	138.7a B	194.7a A
10-20	84.5cD	98.2b C	119.2b B	150.7b A
20-30	92.4bc B	99.8ab AB	113.4b A	118.5c A
30-40	102.3ab A	110.6ab A	115.8b A	114.9c A
40-60	114.0a A	114.2a A	114.0b A	109.8cd A
60-80	111.1a A	112.4a A	116.2b A	105.3d A
80-100	106.6a A	111.4ab A	117.2b A	104.2d A

不同小写字母表明同一作物不同土层间差异显著,不同大写字母表明不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同

表4 不同施肥处理下不同土层土壤缓效钾(毫克 K/公斤)

土层(厘米)	NP	NPS	NPK	NPKS
0-10	657.9b D	756.2ab C	1234.2a B	1516.7a A
10-20	663.1b C	672.1b C	867.5b B	1099.9b A
20-30	624.9b C	667.90b C	768.0b B	881.8c A
30-40	823.0a A	790.1a A	835.6b A	876.2cd A
40-60	778.6a A	768.1ab A	831.3b A	838.9cd A
60-80	768.9a A	784.6a A	790.0b A	788.7d A
80-100	782.3a A	795.0a A	823.5b A	809.7cd A

表5 不同施肥处理下不同土层间土壤总钾(毫克 K/公斤)

土层(厘米)	NP	NPS	NPK	NPKS
0-10	22.4a A	22.6a A	23.3a A	24.0a A
10-20	23.1a A	23.4a A	23.3a A	23.9a A
20-30	24.0a A	23.4a A	23.4a A	24.0a A
30-40	24.1a A	22.5a A	23.3a A	23.4a A
40-60	24.0a A	22.8a A	23.8a A	23.9a A
60-80	24.2a A	24.0a A	23.7a A	23.57a A
80-100	24.3a A	23.4a A	24.0a A	23.8a A

米土层,处理间变化为:NP = NPS < NPK < NPKS。而30厘米以下各土层的缓效钾含量没有显著差异。

施肥处理和土层均没有显著影响土壤全钾含量(表5)。而与试验起始土壤相比较,NP、NPS和NPK处理0-10厘米土层的全钾含量分别降低了4.3%、3.4%和0.4%,而NPKS处理增加了2.6%。

2.3 作物产量

从1993至2012年,NP处理每年小麦产量相似;而NPS和NPK处理2008-2012年的年小麦产量显著高于2003-2007年,NPKS处理2008-2012年的年小麦产量显著高于1993-1997年和2003-2007年(表6)。在1993-1997年,各处理的年小麦产量没有差异,而自

表6 不同试验阶段不同处理下每年小麦和玉米产量(公斤/亩)

试验阶段	NP	NPS	NPK	NPKS
小麦				
1993-1997	385.5a A	402.3ab A	423.5ab A	425.4b A
1998-2002	411.5a B	431.7a A	440.3ab A	455.3ab A
2003-2007	381.1a B	396.3b AB	418.7b AB	426.0b A
2008-2012	416.8a B	444.8a AB	458.9a A	472.1a A
玉米				
1993-1997	372.2c B	386.0c B	420.7d A	424.2d A
1998-2002	390.1c B	415.8c B	465.5c A	470.7c A
2003-2007	459.3b C	512.6b B	568.3b A	578.3b A
2008-2011	492.7a C	562.3a B	623.2a A	634.1a A

不同小写字母表明同一作物不同试验阶段差异显著,不同大写字母表明同一试验阶段处理间差异显著($p < 0.05$)。

1998年后,NP处理的年小麦产量较其它处理显著降低。所有处理的年玉米产量均随试验的进程逐年增加。在1993-1997和1998-2002年,各处理年玉米产量变化为NP = NPS < NPK = NPKS,在2003-2007和2008-2012年,各处理年玉米产量变化为NP < NPS < NPK = NPKS。

3 讨论

施肥不平衡是导致土壤速效钾耗竭的主要原因,本研究NP和NPS处理0-30厘米土层速效钾较试验前显著降低,年土壤钾平衡为负值,是因为每年总的钾投入量低于总的作物钾移走量。2008年玉米秸秆还田后,NPK处理的土壤钾平衡开始为正值,其它处理的钾平衡值也显著增加。结果表明秸秆还田在提高土壤钾素肥力方面具有重要作用,施用钾肥和秸秆还田均可提高土壤钾水平和缓解土壤钾消耗,而高量钾素投入可提高此效果。土壤速效钾和缓效钾间存在一个相互转化的动态平衡,当速效钾含量低于一定阈值后,部分缓效钾就会转化为速效钾供作物吸收利用^[2,8]。NP和NPS处理0-20厘米土层缓效钾较试验前显著降低,可能因为长期植物耗竭下土壤速效钾显著降低,部分缓效钾转化为速效钾。同时,华北石灰性潮土富含云母和高岭石,风化程度较高^[9],矿物钾或难溶性钾也可转化和释放出速效钾。Sheldrick等^[10]发现低肥力条件下植物吸收的钾很大一部分来自土壤固持态钾。因此,长期负的钾平衡导致NP和NPS处理0-10厘米土层全钾较试验前出现稍降趋势,且其土层全钾在持续不平衡

施肥下将会随试验的进展进一步降低。此外, NPKS 处理土壤钾平衡为盈余, 部分速效钾可转化为缓效钾和难溶性钾, 导致其表层含量较试验前增加。

尽管 1993–1997 和 2003–2007 年间各处理间小麦产量差异不显著, 钾肥施用和 / 或秸秆还田提高了小麦产量。而 NPS 和 NPK 处理的玉米产量分别较 NP 处理增加了 3.7–14.1% 和 13.0–26.5%, 表明施钾和秸秆还田均可提高作物产量。钾肥施用下玉米的增产速率显著高于小麦, 一是因为玉米季的秸秆还田量高于小麦季, 二是玉米对钾肥的产量反应较小麦敏感^[11], 因此有限的钾肥资源应优先施用于玉米。

整个试验过程中 NPS 处理的土壤钾平衡值均为负, 说明仅秸秆还田不能维持土壤钾平衡和实现作物高产, 仍需补施一定量的钾肥。NPKS 处理土壤钾平衡显著高于 NPK 处理, 但其作物产量并没有显著增加, 说明双作

物秸秆还田下每年施钾 20 公斤 K_2O / 亩是不经济的, 根据本研究各处理的土壤钾平衡和作物产量变化, 在我国华北地区小麦–玉米轮作体系秸秆全量还田下年施钾 8 公斤 K_2O / 亩对于维持作物高产和土壤钾平衡是可行和合理的。

4 结论

本研究表明施钾和秸秆还田缓解了土壤钾消耗和提高了土壤钾肥力, 且高量钾投入提高了此效果。与试验前土壤相比较, 不同施肥措施主要影响 0–30 厘米土层的速效钾、缓效钾和 0–10 厘米土层全钾。施钾和秸秆还田均可提高作物产量, 而仅秸秆还田不能满足作物高产和维持土壤钾平衡, 有限的钾肥应优先用于玉米以提高其产量和钾肥效率。

参考文献

- [1] Malo DD, Schumacher TE, Doolittle JJ. Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern Great Plains [J]. *Soil Till. Res.*, 2005, 81:277–291.
- [2] Wang HY, Shen QH, Zhou JM, et al. Plants use alternative strategies to utilize nonexchangeable potassium in minerals [J]. *Plant soil.*, 2010, 343:209–220.
- [3] Liang Q, Chen HQ, Gong YS, et al. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2012, 92:21–33.
- [4] 曹彩云, 李科江, 崔彦宏, 等. 长期定位施肥对夏玉米子粒灌浆影响的模拟研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14:48–53.
- [5] Zhang WJ, Wang XJ, Xu MG, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China [J]. *Biogeosciences.*, 2010, 7:409–425.
- [6] Breulmann M, Schulz E, Weißhuhn K, et al. Impact of the plant community composition on labile soil organic carbon, soil microbial activity and community structure in semi-natural grassland ecosystems of different productivity [J]. *Plant Soil*, 2012, 352:253–265.
- [7] 鲁如坤. 土壤农化分析 [M]. 中国过农业技术出版社. 北京.
- [8] Martin HW, Sparks DL. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils [J]. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*, 1985, 16(2):133–162.
- [9] Tan DS, Jin JY, Jiang LH, et al. Potassium assessment of grain producing soils in North China [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2012, 148:65–71.
- [10] Sheldrick WF, Syers JK, Lingard J. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2003, 94:340–345.
- [11] Sharma A, Jalali VK, Arora S. Non-exchangeable potassium release and its removal in foot-hill soils of North-west Himalayas [J]. *Catena.*, 2010, 82:112–117.