植物营养与肥料学报 2012,18(3):629-636
Plant Nutrition and Fertilizer Science

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

葛玮健,常艳丽,刘俊梅,张树兰*,孙本华,杨学云*
(西北农林科技大学,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要: 本文研究了塿土区小麦-玉米轮作体系长期氮磷钾化肥不同配合施用方式及氮磷钾化肥与秸秆或有机肥配合施用对钾素平衡以及土壤钾库的影响。试验包括9个处理,分别为不施肥(CK)、单施氮(N)、氮钾(NK)、磷钾(PK)、氮磷(NP)、氮磷钾(NPK)、氮磷钾配合一季秸秆还田(SNPK)、氮磷钾配合低量有机肥(M1NPK)和高量有机肥(M2NPK)。结果表明,除NK、PK和M2NPK处理外,其它处理小麦和玉米钾的携出量均大于钾的投入量,导致土壤钾素处于亏缺状态,20年累计亏缺量为617~4333 kg/hm^2。与试验前相比,长期施肥种植没有显著影响土壤全钾含量;长期施用钾肥显著提高土壤速效钾含量,但长期不施钾肥处理的土壤速效钾含量也未显著降低;无论施钾与否土壤非交换性钾(Mactotal K)以及非交换性钾中更容易被HNO_3溶解提取的钾(Step K)均明显低于试验前水平。表明土壤非交换性钾可以作为该土壤钾素消耗的指标。考虑到施钾肥的经济投入和现有资源高效利用(如秸秆、有机肥),从长远的角度出发,维持土壤钾素肥力以及土地可持续生产力,塿土区小麦-玉米轮作体系采用秸秆全部还田或施有机肥是必要的。

关键词: 秸秆还田;有机肥;土壤速效钾;Mactotal K;Step K
中图分类号: S153.6$^+$1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)03-0629-08

Potassium balance and pool as influenced by long-term fertilization under continuous winter wheat-summer maize cropping system in a manural loess soil

GE Wei-jian, CHANG Yan-li, LIU Jun-mei, ZHANG Shu-lan*, SUN Ben-hua, YANG Xue-yun*
(*Northwest A & F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: The long term effects of various combinations of nitrogen (N), phosphate (P), and potassium (K) application, NPK integrated with crop straw or organic manure on potassium balances and potassium pools were studied under continuous winter wheat-summer maize cropping system in a manural loess soil in Shaanxi of China. The long term experiment included nine applications of the recommended doses, un-amended control (CK), nitrogen (N), nitrogen and potassium (NK), phosphorus and potassium (PK), nitrogen and phosphorus (NP), nitrogen phosphorus and potassium (NPK), wheat/maize straw (S) with NPK (SNPK) and dairy manure (M) with NPK (M1NPK and M2NPK). The results show that except for the NK, PK and M2NPK treatments, the total K removals by crops exceed the quantities of total K applied to the soils in other treatments, where the net negative K balances were observed ranging from 617 kg/ha in the plot of M1NPK to 4333 kg/ha in NP treated soils over 20 years. Compared with soil total K content of the initial soil at the start of experiment, the long term fertilization and cultivation have no significant effects on soil total K. Nevertheless, soil available potassium contents are significantly increased by the long term addition of potassium (containing fertilizers or manure), but it remains

收稿日期: 2011-09-26　　**接受日期:** 2012-02-18
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203030);西北农林科技大学创新团队项目资助。
作者简介: 葛玮健(1987—),男,黑龙江省建三江人,硕士研究生,主要从事土壤肥力方面的研究工作。E-mail: hmilzj@tom.com
*通讯作者 Tel: 029-87088120, E-mail: zhangshulan@nwsuaf.edu.cn; E-mail: xueyunyang@nwsuaf.edu.cn

unchanged on the treatments without K addition. The contents of non-exchangeable K extracted in 9 sequential extractions with boiling 1 mol/L HNO_3 (Mactotal K), particularly Step K, which is considered to be the most soluble fraction of Mactotal K, are substantially lower than their initial values, which suggests that Step K could be used as an indicator of K depletion for the investigated soil. Considering the cost of K fertilizer and the efficient use of existing K resources (such as straw, manure), incorporation of crop straw/stalk or organic manure into soil is, therefore, necessary in the long run under continuous winter wheat-summer maize cropping system in the manural loess soil in order to maintain soil K fertility and sustain land productivity.

Key words: crop straw return; organic manure; soil available potassium; Mactotal K; Step K

作为植物生长必需的大量元素,钾素对农作物的高产、优质和抗逆性有着举足轻重的作用。随着氮、磷化肥的大量施用,粮食产量大幅度提高,农田中大量钾素被携出,加之在粮食作物上有机肥施用量锐减,我国农田土壤钾素多年来一直处于亏缺状态。目前,我国缺钾土壤由南到北、由东向西正逐渐扩大[1-2]。潮土[3]、砂质潮土[4]、褐土[5]、黑土[6]、紫色土[7]以及灌淤土[8]上的研究表明,在氮磷肥基础上施用钾肥或氮磷钾肥配合秸秆还田可以明显增加小麦或玉米产量,这些土壤的速效钾含量范围一般在65～164 mg/kg之间。潮土上小麦-玉米轮作体系定位试验的结果显示,施用氮磷化肥土壤速效钾和缓效钾呈明显下降趋势,施钾肥显著增加了耕层土壤的速效钾含量,但钾素平衡表明土壤钾素依然呈耗竭状态,只有氮磷钾配合一季小麦秸秆还田钾素略有盈余[3]。灌淤土及栗钙土施用氮磷钾以及氮磷钾配合秸秆还田对钾素平衡的影响[8]与潮土一致。同样,在草甸土及黑土上也发现,玉米施用钾肥112.5 kg/hm^2,虽然土壤速效钾含量有所提高,但钾素平衡仍然为负值[6]。在紫色土上施用常量氮磷钾、氮磷钾配合有机肥或秸秆还田没有显著改变土壤速效钾的水平,表观平衡也显示钾素呈亏缺状态,只有高量氮磷钾配合秸秆还田才能维持土壤钾素平衡[7]。另外,西北灌淤土施用钾肥尽管显著地增加了小麦、玉米产量,且土壤钾素亏缺严重,但只施用氮磷肥并没有降低土壤速效钾的水平,而栗钙土施用钾肥没有显著影响小麦产量,但不施钾肥处理土壤速效钾却有较大幅度的下降[8]。不同土壤上施用钾肥对作物产量、土壤钾含量以及钾平衡的影响差异可能与土壤本身钾素水平、供钾能力、作物体系以及作物产量水平有关。

塿土是陕西省关中平原的主要土壤类型,土壤含钾丰富,供钾能力较强[9],小麦-玉米轮作是该区主要的作物种植体系,当地农民的习惯施肥仍是以氮磷肥为主,不施钾肥,有机肥用量也很少[10]。以往关于长期氮磷肥施用对作物产量、钾素平衡以及土壤钾库的影响的研究报道较少。为此,本文利用陕西杨凌"国家黄土肥力与肥料效益监测基地"的长期肥料定位试验,探讨长期施用氮磷、氮磷钾、氮磷钾配合秸秆还田以及氮磷钾配合有机肥对塿土钾素平衡以及土壤钾库的影响,为养分合理投入、维持土壤钾素肥力、提高土壤生产力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本试验在"国家黄土肥力与肥料效益监测基地"进行,试验地位于黄土高原南部的陕西省杨凌示范区渭河三级阶地(N 34°17′51″,E 108°00′48″,海拔534 m)。供试土壤为塿土(土垫旱耕人为土),土壤质地为粉砂粘壤土,黄土母质。试验开始前种植了三季作物匀地(不施肥,第三季作物提前收割进行试验准备),试验开始前每个小区多点采集耕层(0—20 cm)基础混合土样,进行基本理化性质分析。基础土壤pH(水土比为1∶1) 8.62、有机碳为7.44 g/kg、全氮0.83 g/kg、全磷0.61 g/kg、全钾21.64 g/kg、Olsen-P 9.57 mg/kg、有效钾200.0 mg/kg、土壤容重1.35 t/m^3。试验点年平均气温13.0℃,年平均降水量约为550 mm,降水主要分布在6月至9月。

1.2 试验设计

试验开始于1990年秋,实行小麦-玉米轮作,一年两熟。本试验共有13个处理,重复1次,小区面积196 m^2(14 m×14 m)。本文涉及9个处理:1)对照(不施任何肥料,CK);2)氮肥(N);3)氮磷(NP);4)磷钾(PK);5)氮钾(NK);6)氮磷钾(NPK);7)秸秆+氮磷钾(SNPK);8)低量有机肥+氮磷钾(M1NPK);9)高量有机肥+氮磷钾(M2NPK)。

种植小麦时氮、磷、钾(N、P、K)的施用量分别

为 165.0、57.6、68.5 kg/hm^2,玉米分别为 187.5、24.6、77.8 kg/hm^2。SNPK 处理自试验开始至 1998 年秸秆还田量为 4500 kg/hm^2 小麦秸秆(干重),自 1999 年以后为当季该小区的全部玉米秸秆,平均 4392 kg/hm^2(变幅为 2630 ~ 5990 kg/hm^2),用铡刀切成约 3 cm 长的小段,秋播小麦时一次施入。秸秆氮、磷、钾平均含量分别为 N 9.2、P 0.83、K 19.4 g/kg,未计入施用量。M1NPK 和 M2NPK 处理中来自有机肥的氮和化肥氮的比例为 7∶3,按含 N 量折合牛粪施用,亦为秋播小麦时一次施入;小麦生长季节 M1NPK 处理与 NPK 处理 N 素和化肥 P、K 施入量相同;M2NPK 处理小麦生育期的 N 与化肥 P、K 用量为 M1NPK 的 1.5 倍;玉米生育期 M1NPK 和 M2NPK 处理 N、P、K 用量均与 NPK 处理相等且全部用化肥。有机肥的磷、钾平均含量分别为 P 8.7 和 K 10.9 g/kg,也未计入施用量。小麦生长季所有肥料于播种前一次施入,玉米生长季于播种后一个月结合中耕除草施入。化肥氮为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。小麦生育期内灌溉 1 ~ 2 次,玉米生育期 2 ~ 4 次,每次灌溉量为 90 mm 左右。收获时除了 SNPK 处理的玉米秸秆外所有作物的地上部分全部被移走。

1.3　样品采集与分析

1.3.1 样品采集　土壤样品于 2010 年 6 月小麦收获后,用 2.8 cm 内径不锈钢土钻采集 0—20 cm 耕层土壤。采样时将每个小区分为 3 部分,每部分随机取 16 钻混合,由此构成每个处理的 3 个重复。土壤样品经风干处理,人工拣去杂物,过 1 mm 筛,测定土壤速效钾(AK)、非交换性钾(Mactotal K),测定全钾(TK)的样品过 0.15 mm 筛。植物样品为历年保存的小麦、玉米子粒和植株样。

1.3.2 土壤测定方法及计算　Mactotal K 的测定依据 Richards 的方法[11],Mactotal K 由两部分组成:1)土壤层间钾(CRK);2)容易被 HNO_3 溶解提取的非交换性钾(Step K)。

具体测定步骤如下:准确称取 5.0000 g 过 1 mm 筛的风干土于三角瓶中,用 0.1 mol/L 硝酸 50 mL 浸泡 16 h,过滤并用 50 mL 0.1 mol/L 硝酸淋滤 5 次,保存滤液。滤纸上残留土样恒温 32℃烘干(18 h),过 1 mm 筛,称重置于三角瓶中加入 1 mol/L 硝酸 50 mL,190℃消煮 7 min,冷却离心 5 min(4000 r/min),上清液转至 100 mL 容量瓶中蒸馏水定容。离心管中的土样用 1 mol/L 硝酸 50 mL 连续消煮、提取 9 次。

Mactotal K 量不包括速效钾的含量,Mactotal K、CRK 和 Step K 按以下方法计算:

$$\text{Mactotal K(mg/kg)} = \sum \text{K} + 0.1\ \text{mol/L}\ HNO_3\ \text{K} - 1.0\ \text{mol/L}\ NH_4OAc\ \text{K}$$

式中:∑K 是 1 mol/L 硝酸连续浸提 9 次钾浓度的总和(mg/kg);0.1 mol/L HNO_3 K 为 0.1 mol/L HNO_3 浸泡处理滤液中钾的浓度(mg/kg);1.0 mol/L NH_4OAc K 是 1 mol/L NH_4OAc 浸提的钾(mg/kg)。

$$\text{CRK(mg/kg)} = \bar{x}\text{K} \times \text{nE}$$

式中:$\bar{x}$K 是 1 mol/L 硝酸连续浸提最后三次浸提浓度的平均值(mg/kg);nE 为连续浸提的次数。

$$\text{Step K(mg/kg)} = \text{Mactotal K} - \text{CRK}$$

土壤全钾采用 NaOH 熔融法,土壤速效钾采用 1 mol/L NH_4OAc(pH 7.0)溶液提取法,植株钾含量测定采用浓硫酸-双氧水联合消煮法,钾含量均采用火焰光度计(FP-640)测定[12]。

1.3.3 钾表观平衡和回收率(RE)　钾的表观平衡为投入的钾与作物携出钾量之差,产量数据是 20 年(1991 ~ 2010)的总产量,具体计算方法为:

⊿K=(化肥钾 + 有机肥钾 + 秸秆钾 + 降雨钾 + 灌溉水钾 + 种子钾)-(作物地上部钾的携出量)

式中:2007 ~ 2009 年测定降水中的钾量为 1.76 kg/(hm^2·a),其余年份降水量的钾依据降水量进行调整。灌溉水中钾含量极低,未计入。根据小麦子粒钾含量 0.41% 和玉米子粒钾含量 0.42% 计算种子携入的钾,小麦播种量平均约为 150 kg/hm^2,玉米播种重量约 75 kg/hm^2。当土壤 CEC 超过 40 mmol/kg 时,可以忽略土壤钾的淋溶[13],供试土壤的 CEC 为 86 mmol/kg[14]。

根据 20 年钾肥施入量和作物钾携出量,钾的表观利用率(RE)采用下式计算[15]:

RE(%)=(施钾处理钾携出量-对照处理钾携出量)/钾投入量×100

试验数据用 DPS v7.05 软件进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　作物产量

小麦 20 年平均产量显示,M2NPK 处理显著高于 CK、N、NK、PK 和 NP 5 个处理,但和 M1NPK,SNPK 和 NPK 处理产量差异不明显(表 1)。NP 和 M1NPK、SNPK 和 NPK 处理产量差异也不显著,但显著高于 CK、N、NK、PK 处理;CK、N、NK、PK 处理

小麦产量没有显著差异。施用有机物料的三个处理玉米产量表现相似,有机肥处理的产量明显高于单施化肥以及CK处理;SNPK和NPK、NP处理的产量没有显著差异,NPK和NP处理的玉米产量均显著高于CK、N、NK、PK(表1)。与小麦产量相比,玉米产量NK处理要高于N处理,而N处理高于PK和CK。小麦和玉米总产量表现为M2NPK显著高于除M1NPK以外的所有处理。M1NPK、SNPK、NPK处理和NP处理的产量差异不明显。

表1 不同处理小麦和玉米的平均产量(1991～2010,kg/hm²)

Table 1 The average grain yields of winter wheat and summer maize under different treatments (1991-2010)

处理 Treatment	小麦 Wheat	玉米 Maize	总产量 Total yield
CK	992 c	2235 f	3228 e
N	1030 c	3002 e	4032 cd
NK	1269 c	3447 d	4716 c
PK	1247 c	2544 f	3792 de
NP	5329 b	6286 bc	11615 b
NPK	5476 ab	6144 c	11620 b
SNPK	5573 ab	6512 abc	12085 b
M1NPK	5668 ab	6644 ab	12312 ab
M2NPK	5962 a	6894 a	12855 a

注(Note):同列数据后不同字母表示差异达到5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different at the 5% level.

2.2 作物子粒和秸秆的钾含量

从表2可以看出,20年小麦子粒钾含量平均变幅为0.39%～0.43%,与CK相比施肥处理对小麦子粒的钾含量均无显著影响;除PK显著高于N处理外,其它长期施肥处理间小麦子粒的钾含量也无显著差异。小麦秸秆的平均钾含量范围为1.45%～2.22%,M2NPK和NK两个处理含量最高,显著高于其它化肥及对照处理,PK和CK两个处理含量最低,有机物处理之间的M1NPK、SNPK与NPK和NP之间均无显著差异。玉米子粒钾含量范围为0.36%～0.48%,与小麦相似,除M2NPK处理外,其它施肥处理与CK相比都没有显著影响玉米子粒的钾含量;施肥处理间,M1NPK、M2NPK和PK三个处理显著高于NK和N两个处理。玉米秸秆钾含量为1.40%～2.10%,以有机物处理最高,其次为NPK和NK处理,NP、N、PK以及CK处理最低。

表2 小麦、玉米子粒和秸秆平均钾含量(1991～2010,%)

Table 2 Mean contents of potassium in grain and straw/stalk of wheat and maize (1991-2010)

处理 Treatment	小麦子粒 Wheat grain	小麦秸秆 Wheat straw	玉米子粒 Maize grain	玉米秸秆 Maize stalk
CK	0.40 ab	1.47 c	0.40 bc	1.45 cd
N	0.39 b	1.84 b	0.37 c	1.40 d
NK	0.40 ab	2.19 a	0.36 c	1.67 bcd
PK	0.43 a	1.45 c	0.45 ab	1.49 cd
NP	0.40 ab	1.70 bc	0.41 bc	1.50 cd
NPK	0.41 ab	1.82 b	0.42 abc	1.75 bc
SNPK	0.42 ab	2.00 ab	0.41 bc	1.84 ab
M1NPK	0.42 ab	1.90 ab	0.44 ab	2.05 a
M2NPK	0.41 ab	2.22 a	0.48 a	2.10 a

注(Note):同列数据后不同字母表示差异达到5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different at the 5% level.

2.3 钾表观平衡和回收率

表3显示,除了M2NPK、NK和PK处理外,其它处理土壤表观钾平衡均处于亏缺状态。在未施钾肥的处理中NP处理亏缺最为严重,20年累计亏缺4333.3 kg/hm²;施钾处理中,SNPK、NPK和M1NPK 3个处理20年亏缺量分别是994.0、2268.3和617 kg/hm²。M2NPK、NK和PK处理20年累计盈余分别为395.0、756.7和1189.7 kg/hm²。从作物钾表

观利用率来看,施用钾肥处理中,NK 和 PK 两个处理的表观利用率分别只有 13.4% 和 12.0%,其余 4 个处理的表观利用率在 28.0% 至 39.4% 之间(表 4)。

表 3　不同处理土壤钾表观平衡状况(1991 ~ 2010,kg/hm²)

Table 3　Apparent K balances of the soil under different treatments during 1991-2010

处理 Treatment	钾投入量 K input					钾携出量 K removal			钾平衡 K Balance
	化肥钾 Potash	有机肥 Manure	降水 Precipitation	种子 Seed	总量 Total	小麦 Wheat	玉米 Maize	总量 Total	
CK	0	0	35.1	18.6	53.7	643	797	1440	-1386.3
N	0	0	35.1	18.6	53.7	866	965	1831	-1777.3
NK	2926	0	35.1	18.6	2979.7	1044	1179	2223	756.7
PK	2926	0	35.1	18.6	2979.7	722	1068	1790	1189.7
NP	0	0	35.1	18.6	53.7	2716	1671	4387	-4333.3
NPK	2926	0	35.1	18.6	2979.7	3240	2008	5248	-2268.3
SNPK	2926	1710	35.1	18.6	4689.7	3650	2034	5684	-994.0
M1NPK	2926	2778	35.1	18.6	5757.7	3797	2577	6374	-616.9
M2NPK	3612	4177	35.1	18.6	7842.7	4765	2683	7448	395.0

表 4　不同处理钾素表观利用率(1991 ~ 2010)

Table 4　Apparent K recovery efficiency (RE) under different treatments (1991-2010)

处理 Treatment	钾投入量 K input (kg/hm²)	钾携出量 K removal (kg/hm²)	钾表观利用率 RE (%)
CK	0	1440	
N	0	1831	
NP	0	4387	
NK	2926	2223	13.4
PK	2926	1790	12.0
NPK	2926	5248	29.4
SNPK	4636	5684	28.0
M1NPK	5704	6374	34.8
M2NPK	7789	7448	39.3

注(Note):钾表观利用率(%)=(施钾处理作物携出钾量-不施钾处理作物携出钾量)/该处理施钾量×100;其中 NK 处理对应的对照为 N;PK 为 CK;其它处理为 NP. Apparent K recovery efficiency for a specific treatment (%) = (K removal of the treatment with K addition - K removal in treatment without K addition)/quantity of K applied in the treatment × 100; In the formula, the treatment without K addition used for NK treatment is N, CK for PK and NP for treatments those giving NPK fertilizers.

2.4　土壤钾含量

试验 20 年后耕层(0—20 cm)土壤速效钾量含量变化在 183 ~ 385 mg/kg 之间,相对于试验前速效钾含量,20 年不施钾肥处理耕层土壤速效钾含量无显著变化(表 5)。但施钾处理土壤速效钾含量均显著高于对照,且除 NPK 外均较试验开始时明显提高。其中施有机肥两个处理显著高于其它处理;PK 处理也明显高于除 NK 外的处理;SNPK 处理高于 NPK。

耕层土壤全钾含量在 21.23 ~ 23.03 g/kg 之间,全部处理和试验前相比没有显著变化。CK 处理显著低于 PK 和 NPK 及 M2NPK,PK 高于 N,其它处理间无差异(表 5)。耕层土壤 Mactotal K 含量变幅为 3464 ~ 4165 mg/kg,NK、PK 处理较试验前略有下降,其它处理均较试验前土壤显著降低。各处理间又以 PK、NK 的 Mactotal K 含量最高,其次为 SNPK、MNPK 和 NPK 处理,CK、N、NP 处理最低,特别是 CK 和 NP,显著低于几乎所有施钾处理(表 5)。

各处理土壤的 CRK 含量变化在 1670 ~ 1910 mg/kg 之间,变化幅度相对较小。和试验前相比土壤中 CRK 含量除了 PK 处理显著增加,其余处理均没有显著变化。有机肥处理较 PK 和 NPK 明显下降(表 5)。

表5 不同处理耕层土壤(0—20 cm)速效钾、全钾、Mactotal K、CRK和Step K含量(1990～2010)

Table 5 Concentrations of soil available potassium (AK), total potassium (TK), Mactotal K, CRK and Step K in the plough layer (0-20 cm) soils under different treatmentss (1991-2010)

处理 Treatment	速效钾含量 AK content (mg/kg)	全钾含量 TK content (g/kg)	Mactotal K含量 Mactotal K content (mg/kg)	CRK含量 CRK content (mg/kg)	Step K含量 Step K content (mg/kg)
Initial	200 cd	21.64 abc	4265 a	1706 bc	2559 a
CK	183 d	21.23 c	3550 ef	1683 c	1867 de
N	217 cd	21.49 bc	3702 def	1762 bc	1941 de
NK	329 b	22.42 abc	4124 abc	1718 bc	2406 ab
PK	345 ab	23.03 a	4165 ab	1910 a	2255 bc
NP	198 cd	21.65 abc	3464 f	1695 bc	1768 e
NPK	245 c	22.88 ab	3838 d	1834 ab	2004 d
SNPK	299 b	22.14 abc	3932 bcd	1709 bc	2223 bc
M1NPK	378 a	22.19 abc	3731 de	1670 c	2061 cd
M2NPK	385 a	22.89 ab	3912 cd	1692 c	2220 bc

注(Note): CRK—土壤层间钾、稳定比率钾 Constant rate potassium; Initial—基础土壤测定值 Initial denotes the soil background value of the parameters at the start of the treatments; 同列数字后不同字母表示处理间差异达到5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different at the 5% level.

各处理土壤的Step K含量范围在1768～2406 mg/kg之间,除了NK外其他处理与试验前相比均有较大幅度下降。总体上,不施钾肥处理显著低于施钾肥处理,尤其是NP处理耗竭最为严重。施用有机物料的三个处理间没有显著差异(表5)。

3 讨论

20年小麦、玉米产量结果表明,垆土上氮磷配合施用是保证作物高产的有效施肥措施,在此基础上施用钾肥没有显著提高作物产量。这是由于土壤含钾量较高,即使经过20年种植,其速效钾含量也均在180 mg/kg以上(表5),远高于该区域大田作物钾素临界值110 mg/kg[16]。较高的钾素肥力也反映在另一方面,亦即经过20年高强度种植,不施钾肥处理(NP)土壤速效钾含量并未显著降低(表5),这表明了土壤可以全部或者很大程度上满足作物钾素供给,因此,施化学钾肥其钾素表观利用率不到30%(表4)。氮磷钾配合高量有机肥(M2NPK)较氮磷配合显著提高小麦和玉米的产量,可能与大量有机肥投入改善土壤物理以及生物化学性质有关[17-19]。与不施肥相比,长期施用化肥或有机物料对小麦、玉米子粒钾含量没有显著影响,但是长期施用有机物料均明显提高小麦、玉米秸秆的钾含量。谭金芳[20]等也曾报道不同量的化学钾肥施用对小麦子粒和秸秆的含钾量没有显著影响。邢素丽等[21]的结果显示,秸秆还田显著提高小麦、玉米秸秆的钾含量。因此,秸秆还田能充分利用有机资源,实现钾素养分循环利用。

农田养分收支平衡的定期计算是检查土壤肥力状况和预测土壤养分水平发展趋势的方法之一[22]。20年钾素表观平衡结果表明,在垆土上小麦-玉米轮作体系年施用146 kg/hm^{2}钾素(K)或配合一季作物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。紫色土上也有类似的结果[7]。不过石灰性潮土小麦-玉米轮作的结果表明,氮磷钾配合一季小麦秸秆还田或两季作物秸秆还田能够平衡作物钾的携出量[6,23]。不同土壤上施用钾肥配合秸秆还田对钾素表观平衡影响的差异可能与土壤钾素水平及作物产量水平有关。虽然本试验高量有机肥配合氮磷钾施用增加了土壤钾素累积,有利于钾素肥力的维持和提升,但考虑到钾肥资源的有限性以及较低的钾肥利用率,有机肥配合氮肥施用可能是值得尝试的管理措施。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。尽管垆土20年不施钾肥作物产量仍然维持较高的水平,但从长远看土壤钾库容量是有限的,

所以氮磷肥配合作物秸秆还田或过腹还田(有机肥)是维持塿土钾素肥力的一种可行措施。

土壤钾库的变化与钾素平衡密切相关。由于供试土壤钾库容量较大,全钾含量很高,作物携出钾量相对于土壤全钾库容而言只是很小的一部分,全钾的变化很难反映出施肥处理和作物种植对土壤钾素肥力的影响。不施钾肥处理(CK、N、NP)土壤的速效钾含量与试验前相比没有显著变化,这一现象表明了土壤钾库对有效钾的补充较为迅速,因此土壤速效钾也难以反映塿土钾素肥力的变化。和有效钾一样,硝酸溶钾也同样地不能反映塿土钾素肥力的变化(数据未给出)。本试验中,1.0 mol/L 硝酸煮沸多次(9 次)提取的非交换性钾(Mactotal K)及其中被认为更容易为 HNO_3 溶解提取的 Step K 均显著低于试验前水平(表 5),而且总体上和钾素平衡表结果能很好地吻合。这可以很好地解释速效钾水平的维持是源于非交换性钾尤其是 Step K 的消耗,同时,较高的非交换性钾含量也表明塿土非交换性钾对速效钾有很强的补充能力。因此,Mactotal K 和 Step K 可以作为供试土壤钾素肥力变化的有效指标。以往生物耗竭试验也显示塿土供钾能力很强[24]。而施用钾肥处理土壤速效钾显著高于试验前水平,特别是有机肥处理土壤速效钾含量几乎是试验前的两倍,如 M2NPK(表 5),不过 Step K 依然较试验前水平显著降低,可能与土壤钾库之间的转化速度有关。长期不同施肥处理对作物难利用钾(CRK,被认为代表了土壤矿物层间钾)的影响不明显,这可能与 CRK 短时间难以转化有关[25],也说明了土壤非交换性钾库向速效钾库转化是一个缓慢而长期的动态平衡过程[24,26]。

综上所述,尽管塿土施用钾肥没有显著提高小麦和玉米产量,但是连续种植使得各处理的耕层土壤钾库均处于消耗状态,特别是长期施用氮、磷肥,考虑到施肥的经济投入(如化学钾肥)和现有资源的高效利用(如秸秆、有机肥),从长远的角度,为了维持塿土土壤钾素肥力以及土地可持续生产力,小麦-玉米轮作体系采用秸秆全部还田或施用有机肥是必要的。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 韩宝文, 邢竹, 郭建华, 李春杰. 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, Li C J. The experiment research of yield increasing and circulating of potassium in winter Wheat-Summer corn rotation [J]. J. Hebei Agric. Sci., 2004, 8(3): 25-27.

[4] 杨素芬, 苏菊, 王宜伦, 等. 砂薄地冬小麦-夏玉米轮作施钾效应 [J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 243-245.
Yang S F, Su J, Wang Y L *et al*. Effects of potassium fertilizer in winter wheat-summer maize rotated in sandy soil [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(5): 243-245.

[5] 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.

[6] 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]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(10): 2234-2240.

[7] 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 Pedol. Sin., 2003, 40(2): 274-279.

[8] 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.

[9] 熊毅, 李庆逵, 等. 中国土壤[M]. 北京:科学出版社, 1987. 502-516.
Xiong Y, Li Q K *et al*. Soil of China [M]. Beijing: Science Press, 1987. 502-516.

[10] 同延安, Ove Emteryd, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1239-1244.
Tong Y A, Emteyd O, Zhang S L *et al*. Evaluation of overapplication of nitrogen fertilizer in China's Shaanxi province [J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(8): 1239-1244.

[11] Richards J E, Bates T E. Studies on the potassium-supplying

capacities of southern Ontario soils. Ⅱ. Nitric acid extraction of nonexchangeable K and its availability to crops[J]. Can. Soil Sci., 1988, 68: 199-208.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 101-103, 106-108, 270-271.
Bao S D. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 101-103, 106-108, 270-271.

[13] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京:中国农业出版社, 1998.
Shen S M. Soil fertility in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.

[14] 郭兆元, 黄自立, 冯立孝, 等. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 100.
Guo Z Y, Huang Z L, Feng L X *et al*. Shaanxi soils[M]. Beijing: Science Press, 1992. 100.

[15] Tang X, Li J M, Ma Y B *et al*. Phosphorus efficiency in long-term(15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions [J]. Field Crops Res., 2008, 108: 231-237.

[16] 孙本华, 杨学云, 古巧珍, 等. 陕西省几种作物土壤钾临界值的研究[A]. 周健民. 土壤钾素肥力评价与钾肥合理施用[M]. 长春:吉林科学技术出版社,2004. 78-83.
Sun B H, Yang X Y, Gu Q Z *et al*. Critical values of potassium for paddy rice, winter wheat and summer maize in Shaanxi Province[A]. Zhuo J M. Evaluation of soil K fertility and rational K fertilization [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2004. 78-83.

[17] Zhang S L, Yang X Y, Wiss M *et al*. Changes in physical properties of a loess soil in China following two long-term fertilization regimes [J]. Geoderma, 2006, 136: 579-587.

[18] Hati K M, Swarup A, Dwivedi A K *et al*. Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2007, 119: 127-134.

[19] Monaco S, Hatch D J, Sacco D *et al*. Changes in chemical and biochemical soil properties induced by 11-yr repeated additions of different organic materials in maize-based forage systems[J]. Soil Biol. Biochem., 2008, (40): 608-615.

[20] 谭金芳, 洪坚平, 赵会杰, 等. 不同施钾量对旱作冬小麦产量、品质和生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 456-462.
Tan J F, Hong J P, Zhao H J *et al*. Effect of different potassium application rates on yield, quality and physiological characteristics of dry land winter wheat [J]. Plant. Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(3): 456-462.

[21] 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. Bor-Sin., 2008, 23(Suppl.): 274-278.

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

[23] 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[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.

[24] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 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 [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 156-164.

[25] Barber T E, Matthews B C. Release of non-exchangeable K by resin-equilibration and its significance for crop growth[J]. Can. J. Soil Sci., 1962, (42): 266-277.

[26] 黄绍文, 金继运. 土壤钾形态及其植物的有效性研究进展[J]. 土壤肥料, 1995, (5): 23-29.
Huang S W, Jin J Y. Advance of potassium forms and plant availability [J]. Soil Fert., 1995, (5): 23-29.