

# 长期定位试验土壤钾素肥力变化及其对不同测钾方法的响应<sup>①</sup>

孙海霞<sup>1,2</sup>, 王火焰<sup>1\*</sup>, 周健民<sup>1</sup>, 杜昌文<sup>1</sup>, 陈小琴<sup>1</sup>, 钦绳武<sup>1</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 土壤K素肥力因长期施肥管理可能会发生变化。本文以土壤K素肥力相对较高的河南封丘 16 年长期定位试验土壤为研究对象, 分析比较了不同施肥处理对土壤K素肥力的影响, 以及常规速效K、缓效K、全K和两种四苯硼钠法等土壤测K方法对土壤K素变化的响应能力。16 年K肥施用量和作物吸K量的差值表明, 不施K土壤K素发生耗竭, 任何肥料都不施的CK处理K耗竭较少, 为  $K\ 28.5\ kg/(hm^2 \cdot a)$ , 而不施K的NP处理中K的耗竭速率较高, 为 CK 处理的 5.2 倍, 所有施K土壤中由于作物吸K量小于K肥施用量, 表现为土壤K素盈余, 其中不施P或N的NK和PK处理K素盈余最高, 分别达  $K\ 207$  和  $190.5\ kg/(hm^2 \cdot a)$ , 平衡施用化肥或有机肥土壤K的盈余较少, 为  $K\ 31.5 \sim 63.0\ kg/(hm^2 \cdot a)$ 。不同土壤测K方法反映的 16 年前后土壤K素变化与以上理论值均有差异, 醋酸铵法、沸硝酸法、两种四苯硼钠法和碱熔法反映的 7 个不同施肥处理K素变化的回收率(测定值与理论值的比率)平均值分别为 39%、51%、66%、71% 和 176%, 7 个施肥处理回收率的变异系数 5 种方法分别为 103%、74%、36%、30% 和 141%。回收率偏离估计值较大并且不稳定, 说明土壤常规测K方法(速效K、缓效K和全K)不能够准确地反映土壤K素肥力的变化, 而四苯硼钠法较常规方法可以较准确地反映土壤K素变化。

**关键词:** 潮土; 长期定位试验; K 测定方法; 四苯硼钠

**中图分类号:** S151.9+5

作物生长过程中需要从土壤中吸收大量的K。受K肥资源的限制, 我国农田K素投入量明显偏低, 农田K素的亏缺近些年来由南到北、由东向西呈逐渐扩大的趋势<sup>[1-3]</sup>。目前为止土壤K素肥力下降主要是通过醋酸铵法提取的土壤速效K或沸硝酸法提取的缓效K含量的变化来反映。但有研究表明速效K或者缓效K反映出来的土壤K素肥力变化较实际值会大幅度偏低, 且偏低的程度也因土壤种类而异<sup>[4]</sup>。最近的研究表明四苯硼钠法可以用来较准确地测定土壤有效K素的变化量<sup>[5]</sup>, 该方法经进一步优化, 可以较方便地用来测定土壤K素变化, 并在室内土壤培养试验中取得了较好的结果<sup>[6]</sup>, 但能否用来准确测定田间土壤K素的实际变化尚待进一步验证。田间条件下, 短期作物种植引起的农田K素肥力的变化幅度通常较小, 而长期施肥管理可能导致土壤K素肥力发生显著变化。因而本文利用河南封丘长期定位试验为平台, 对富K潮土经 16 年不同施肥管理后的K素肥力变化进行了分析, 以揭示不同施肥处理对土壤K素肥力的影响规律。并着重探讨不同土壤测K方法测定土壤K素肥力变化的准确性, 以推动土壤K素肥力的评估方法向更加准

确、定量的方向发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 长期定位试验概况

该长期定位试验设于中国科学院封丘农业生态国家实验站内, 于 1989 年秋季开始。土壤为轻壤质黄潮土, 布置试验前耕层土壤(0~20 cm)的基本理化性质见表 1。试验设 28 个小区, 每个小区面积为  $47.5\ m^2$ 。各小区用水泥板围起, 以防小区间水、肥及作物根系的相互渗透。水泥板入土 60 cm, 露出地面 10 cm, 小区两层水泥板之间铺设水泥路面, 形成宽 20 cm 的小区间小埂。试验区四周设 1.5 m 以上的保护行, 保护行中埋设地下灌水管, 接上水表后可以进行定额灌溉。在保护行两侧铺设硬化排水沟。

长期定位试验共设 7 个不同施肥处理, 每处理 4 次重复, 采用随机区组排列。施肥处理具体如下: 不施肥对照(CK)、化肥 NK(NK)、化肥 PK(PK)、化肥 NP(NP)、化肥 NPK(NPK)、有机肥(OM)、有机肥和化肥配合(1/2OM+1/2NPK)。肥料用量见表 2。肥料品种 N 肥为尿素, P 肥为过磷酸钙, K 肥为硫

①基金项目: 中科院创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-002)和国家自然科学基金项目(NSFC40201027)资助。

\* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 孙海霞(1983—)女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事土壤、肥料与植物营养方面的研究。E-mail: hxsun@issas.ac.cn

表1 试验前耕层土壤(0~20 cm)基本理化性状

Table 1 Basic agrochemical properties of topsoil before fertilization

| pH   | CEC       | 有机质    | CaCO <sub>3</sub> | 全 N    | 全 P    | 全 K    | 碱解 N    | 速效 P    | 速效 K    | 缓效 K    | 主要黏土矿物             |
|------|-----------|--------|-------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
|      | (cmol/kg) | (g/kg) | (g/kg)            | (g/kg) | (g/kg) | (g/kg) | (mg/kg) | (mg/kg) | (mg/kg) | (mg/kg) |                    |
| 8.65 | 8.31      | 5.83   | 73.6              | 0.445  | 0.50   | 18.6   | 9.51    | 1.93    | 82.9    | 797.5   | 水云母, 蒙脱石, 绿泥石, 高岭石 |

表2 封丘长期定位试验每季肥料用量(kg/hm<sup>2</sup>)

Table 2 Fertilizer rates of each crop for Fengqiu long-term field experiment

| 作物 | 施肥时期 | N 肥<br>(N) | P 肥<br>(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | K 肥<br>(K <sub>2</sub> O) |
|----|------|------------|-----------------------------------------|---------------------------|
| 小麦 | 基肥   | 90         | 75                                      | 150                       |
|    | 追肥   | 60         | 0                                       | 0                         |
|    | 追肥   |            |                                         |                           |
| 玉米 | 基肥   | 60         | 60                                      | 150                       |
|    | 追肥   | 90         | 0                                       | 0                         |
|    | 追肥   |            |                                         |                           |

酸钾, 有机肥以粉碎的麦秆为主, 每季用量 4500 kg/hm<sup>2</sup>, 加上适量粉碎后的大豆饼和棉仁饼, 以提高有机肥的含N量。有机肥中的P、K不足部分, 用化肥补充。种植小麦和玉米, 一年两季轮作, 所用品种均为当地大面积种植品种。

## 1.2 取样及测定方法

每年每季作物成熟后采集地上部植株样品(籽粒和秸秆), 地下部翻耕还田。每年秋季玉米收完后采集耕层土壤样品。本研究所使用的土壤样品为 1989 年试验前所取耕层(0~20 cm)原始土以及 2005 年采集的各小区耕层土壤(0~20 cm)。

原始土的基本理化性状用常规方法测定<sup>[7]</sup>。秸秆和籽粒用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后测定其K含量。土壤速效K采用 1 mol/L 中性NH<sub>4</sub>OAc 法, 缓效K采用 1 mol/L HNO<sub>3</sub> 煮沸法, 全K采用 NaOH 熔融法测定。

四苯硼钠法提取的土壤K量因提取剂强度增加和提取时间的延长而变化。为较准确地测定土壤K素变化, 王火焰等<sup>[5]</sup>提出了一种可以测定土壤K素变化的四苯硼钠法, 经进一步优化后的具体步骤(四苯硼钠法A)如下<sup>[6]</sup>: 称取 0.500 g 土样于 80 ml 离心管中, 加入 3 ml 混合浸提剂(0.25 mol/L NaBPh<sub>4</sub> + 1.7 mol/L NaCl + 0.01 mol/L EDTA), 于 25℃, 200 r/min 振荡 24 h。振

荡结束后, 加入 25 ml 由 0.5 mol/L NH<sub>4</sub>Cl 和 0.14 mol/L CuCl<sub>2</sub>组成的混合终止剂。将加入终止剂的离心管置于沸水浴中 1 h, 使四苯硼钾沉淀溶解, 经冷却、过滤后测定滤液中K含量。延长提取时间, 四苯硼钠法可以提取土壤中更多的K, 但 25℃下, 提取时间超过 20 天, 土壤中可被四苯硼钠提取的K量不再随时间延长而进一步增加, 这时不同类型土壤中四苯硼钠法提取的K量都存在最大值<sup>[6]</sup>。因而本研究也采用四苯硼钠最大值的提取方法(四苯硼钠法B)对长期定位实验土壤中的K进行了提取, 具体步骤同四苯硼钠法A, 但提取时间为 20 天。

植物样和土壤全 K 待测液用 6400 火焰光度计(上海分析仪器厂)测定, 其他待测液加 3 mmol/L LiCl 作内标后, 用 HG-5 型火焰光度计(北京检测仪器有限公司)测定其 K 含量。

文中数据均为每处理 4 次重复的平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同施肥处理对封丘长期定位试验点多年作物生长和 K 吸收的影响

长期定位试验是监测土壤肥力变化、研究土壤质量演变趋势和机理的极好平台。土壤 K 素含量一般较高, 短期内土壤 K 素肥力的小幅度变化很难通过测土的方法来准确反应。长期定位试验较短期田间试验可提供更加准确的数据。作物对 K 的吸收是土壤 K 素变化的主要原因, 因而土壤 K 的减少, 一方面受植株地上部总生物量的影响, 另一方受植株体内 K 含量的影响。河南封丘潮土 K 素肥力相对较高, 但 N、P 肥力相对不足。CK 处理和 NK 处理均导致两种作物大幅减产, 总生物量基本都只有 NPK 处理的 20% 或者更低(表 3), 其次是 PK 处理, 16 年小麦、玉米的总生物量分别为 NPK 处理的 26% 和 30%。而 1/2OM + 1/2NPK 处理作物总生物量与 NPK 处理基本接近, OM 处理与 NPK 处理相比使小麦、玉米总生物量分别下降了 22% 和 10%。NP 处理小麦和玉米的总生物产量受不施 K 的影响相对较小, 小麦、玉米 NP 处理 16 年总生物产量均可达 NPK 处理的 95%(表 3)。但从

年际的产量变化来看, NP 处理在多年的耗竭以后, 小麦于 1999 年、玉米于 2003 年后较 NPK 处理开始显著减产(数据未列出)。说明在 K 素肥力相对充足的土壤上可以适当地耗竭 K 素肥力, 但长期的耗竭必然

会导致土壤 K 素肥力的下降, 并最终逐渐影响作物的产量。

不同施肥处理一方面影响了作物总生物量, 另一

表 3 不同施肥处理对封丘长期定位试验点小麦、玉米 16 年总生物产量、平均 K 含量和 K 吸收量的影响  
Table 3 Effects of various fertilizer treatments on 16-year total biomass of wheat and maize in Fengqiu long-term field experiment

| ● 处理           | ● 小麦                              |                    |                                       | ● 玉米                              |                    |                                       |
|----------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
|                | ● 总生物产量<br>● (t/hm <sup>2</sup> ) | ● K 含量<br>● (g/kg) | ● K 吸收量<br>● (K, kg/hm <sup>2</sup> ) | ● 总生物产量<br>● (t/hm <sup>2</sup> ) | ● K 含量<br>● (g/kg) | ● K 吸收量<br>● (K, kg/hm <sup>2</sup> ) |
| ● CK           | ● 20.4 ± 1.2                      | ● 7.9 ± 0.3        | ● 162 ± 6                             | ● 36.9 ± 3.6                      | ● 7.8 ± 0.2        | ● 290 ± 35                            |
| ● NP           | ● 135.9 ± 1.6                     | ● 9.0 ± 0.2        | ● 1229 ± 38                           | ● 182.6 ± 3.4                     | ● 6.2 ± 0.1        | ● 1124 ± 36                           |
| ● NK           | ● 21.9 ± 1.6                      | ● 11.4 ± 0.2       | ● 249 ± 11                            | ● 39.5 ± 4.0                      | ● 10.5 ± 0.1       | ● 414 ± 15                            |
| ● PK           | ● 36.9 ± 1.4                      | ● 8.1 ± 0.2        | ● 299 ± 9                             | ● 57.6 ± 2.6                      | ● 11.1 ± 0.2       | ● 641 ± 24                            |
| ● NPK          | ● 143.0 ± 1.6                     | ● 10.1 ± 0.2       | ● 1449 ± 18                           | ● 192.2 ± 3.4                     | ● 10.5 ± 0.2       | ● 2024 ± 38                           |
| ● 1/2NPK+1/2OM | ● 139.7 ± 2.6                     | ● 9.7 ± 0.2        | ● 1352 ± 45                           | ● 186.9 ± 1.0                     | ● 10.7 ± 0.2       | ● 1997 ± 38                           |
| ● OM           | ● 111.5 ± 2.2                     | ● 9.5 ± 0.2        | ● 1055 ± 26                           | ● 173.4 ± 8                       | ● 11.0 ± 0.2       | ● 1916 ± 114                          |

注: 总生物产量 = 籽粒产量 + 秸秆产量; 植株平均 K 含量 = K 吸收量/总生物产量。

方面对作物体内的 K 含量也有显著影响(表 3)。CK 处理使小麦和玉米的 K 含量较 NPK 处理分别下降了 21% 和 26%。NP 处理则使小麦和玉米的 K 含量较 NPK 处理分别下降了 11% 和 41%, 不施 K 使玉米植株 K 含量下降的幅度远远高于小麦。NK 处理尽管使作物总生物量大幅下降, 两种作物的 K 含量并没有下降。PK 处理对玉米 K 含量影响不大, 但却使小麦的 K 含量较 NPK 处理显著下降了 20%。从结果可以看出, 小麦的 K 含量受不施 K 肥和不施 N 肥的影响较大, 而玉米的 K 含量主要因不施 K 而显著下降。

在总生物量和 K 含量的共同作用下, 不同施肥处理对两种作物的吸 K 量有着极显著的影响。小麦吸 K 量以 NPK 处理最高, 其次是 1/2OM + 1/2NPK、NP 处理以及 OM 处理吸 K 量分别占 NPK 处理的 93%、85% 和 73% (表 3)。CK 处理因总生物量和 K 含量都较低, 使两种作物的吸 K 量在所有处理中均为最低。PK、NK 和 CK 处理因总生物量大幅下降, 小麦吸 K 总量均大幅下降, 分别只占 NPK 处理的 21%、17% 和 11%。玉米各处理吸 K 量表现为受有机肥的影响较小, 表现为 NPK 与 1/2OM + 1/2NPK、OM 处理的吸 K 量差异不显著。较为特殊的是, 玉米 NP 处理吸 K 量显著下降, 只有 NPK 处理的 56%。在玉米其他处理的吸 K 量显著高于小麦的情况下, 也只有 NP 处理的吸 K 量低于小麦的吸 K 量。其原因是 NP 处理玉米 16 年的总生物量较 NPK 处理没有大幅下降, 而 NP

处理玉米中的 K 含量有较大幅度的下降。比较 NPK 和 NP 处理中 K 的效果, 可以说明玉米正常 NPK 处理较 NP 处理有明显的 K 奢侈吸收情况。因而, 对于玉米而言, 封丘 NPK 处理 K 素肥力明显偏高, 在秸秆不还田的情况下会造成肥料 K 的浪费。

## 2.2 不同施肥处理 16 年后, 土壤 K 素的平衡及其变化值估算

不同施肥处理一方面造成土壤 K 素的投入不同, 另一方面通过影响作物产量和其 K 含量改变了作物吸收土壤 K 素的强度, 这两方面的共同作用是引起土壤 K 素变化的主要原因。表 4 结果表明, NP 处理平均每年作物带走的土壤 K 素(以纯 K 计, 下同)约为 150 kg/hm<sup>2</sup>, 不施任何肥料的 CK 处理只有 30 kg/hm<sup>2</sup>, 这两个处理都表现为土壤 K 的亏缺。其他施 K 处理中, 作物带走的 K 量都低于施入的 K 肥总量, 表现为土壤 K 的盈余, 其中 NK 和 PK 处理因缺 P 和缺 N 作物大幅减产、吸 K 量低而使土壤 K 盈余最多, 可达年均 180 ~ 210 kg/hm<sup>2</sup>。养分供应较为均衡的 NPK 和有机肥等处理土壤 K 表现为略有盈余, 每年增加 30 ~ 60 kg/hm<sup>2</sup>。

由农田土壤 K 素总收支平衡绝对量转换到单位质量土壤中 K 含量需要根据耕层土壤的总质量来进行换算。土壤质量又取决于耕层土壤体积和土壤体积质量(容重), 因而最终的换算取决于耕层土壤的体积质量和深度。如果耕层土壤深度都以 20 cm 计, 不同施肥处理 16 年引起封丘长期定位试验耕层土壤 K 的变化估

算值见表 4。K 素盈余的 NK 和 PK 处理耕层土壤 K 估计可增加约 1100 mg/kg, 而 K 耗竭最严重的 NP 处理土壤中 K 估计可降低 800 mg/kg。其他施肥处理引起的土壤 K 素累计变化相对最小, CK 处理 16 年使耕层土壤 K 约下降 160 mg/kg, 而施用化肥的 NPK 处

理耕层土壤约增加 180 mg/kg。有机肥部分替代或全部替代化肥处理的耕层土壤中 K 的积累有所上升, 分别增加约 220 和 370 mg/kg。

### 2.3 不同测 K 方法对土壤 K 素肥力变化的响应

表 4 不同施肥处理 16 年后封丘长期定位试验土壤 K 素平衡及耕层 K 素变化值估算

Table 4 Balance of soil K and estimation of K change in topsoil after 16-year treatment with various fertilizers in Fengqiu long-term field experiment

| ● 处理           | ● 16 年累计施 K 量<br>● (K, kg/hm <sup>2</sup> ) | ● 16 年作物带走 K 量<br>● (K, kg/hm <sup>2</sup> ) | ● 土壤体积质量<br>● (g/cm <sup>3</sup> ) | ● 耕层 K 变化估算值<br>● (K, mg/kg) |
|----------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| ● CK           | ● 0                                         | ● 450 ± 39                                   | ● 1.39                             | ● -162 ± 14                  |
| ● NP           | ● 0                                         | ● 2352 ± 72                                  | ● 1.41                             | ● -834 ± 25                  |
| ● NK           | ● 3984                                      | ● 663 ± 23                                   | ● 1.55                             | ● 1072 ± 7                   |
| ● PK           | ● 3984                                      | ● 941 ± 33                                   | ● 1.38                             | ● 1103 ± 12                  |
| ● NPK          | ● 3984                                      | ● 3471 ± 24                                  | ● 1.43                             | ● 179 ± 8                    |
| ● 1/2NPK+1/2OM | ● 3984                                      | ● 3348 ± 57                                  | ● 1.43                             | ● 222 ± 20                   |
| ● OM           | ● 3984                                      | ● 2972 ± 116                                 | ● 1.38                             | ● 367 ± 42                   |

注: 以耕层深度 20 cm 计, 负值表示 K 素亏缺, 正值表示 K 素积累。

土壤 K 素肥力的变化通常需要通过测土的方法来进行评估。本文采用 3 种常规方法和经筛选的两种四苯硼钠方法对封丘长期定位试验原始土和各施肥处理 16 年后的土壤 K 进行提取, 其结果如表 5 所示。除碱熔法测得的全 K 外, 各方法测得的不同施肥处理土壤 K 含量都表现为 NP、CK 处理最低, NK 和 PK 处理最高, 其他处理则居中。说明这几种测 K 方法反映同一类型土

壤肥力高低顺序的结果基本一致。对于同一土壤样品, 各方法中以速效 K 所用的醋酸铵法提取的 K 量最低, 其次是缓效 K 所用的沸硝酸法, 四苯硼钠法 A 提取的 K 量约为沸硝酸法的 3 倍, 四苯硼钠法 B 提取的 K 量为四苯硼钠法可以提取的土壤 K 量最大值<sup>[6]</sup>, 其值较四苯硼钠法 A 增加了近 1 倍, 但也只有碱熔法测得的全 K 的 30% 左右。

表 5 封丘长期定位试验原始土和 16 年后各施肥处理耕层土壤不同方法测定的 K 素含量

Table 5 K content in topsoil original or treated with various fertilizers for 16 years in Fengqiu long-term field experiment as indicated by different soil K extraction methods

| 处理           | 醋酸铵法<br>(K, mg/kg) | 沸硝酸法<br>(K, mg/kg) | 四苯硼钠法 A<br>(K, mg/kg) | 四苯硼钠法 B<br>(K, mg/kg) | 碱熔法<br>(K, g/kg) |
|--------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| 原始土壤         | 83 ± 4             | 798 ± 54           | 2462 ± 102            | 5252 ± 157            | 18.6 ± 0.4       |
| CK           | 98 ± 12            | 753 ± 19           | 2445 ± 88             | 5085 ± 114            | 18.8 ± 0.5       |
| NP           | 59 ± 5             | 628 ± 9            | 2302 ± 30             | 4987 ± 144            | 18.1 ± 0.3       |
| NK           | 403 ± 25           | 1142 ± 31          | 2919 ± 98             | 5652 ± 79             | 19.4 ± 0.4       |
| PK           | 371 ± 18           | 1162 ± 14          | 2963 ± 53             | 5726 ± 40             | 19.6 ± 0.3       |
| NPK          | 275 ± 24           | 987 ± 96           | 2644 ± 89             | 5584 ± 185            | 19.7 ± 0.7       |
| 1/2NPK+1/2OM | 234 ± 23           | 963 ± 44           | 2664 ± 105            | 5536 ± 176            | 19.7 ± 1.1       |
| OM           | 243 ± 52           | 965 ± 57           | 2703 ± 67             | 5567 ± 70             | 19.2 ± 0.1       |

不同土壤测 K 方法因其提取原理、条件不同, 提取的 K 量差异显著, 其数据的指示意义以及数据变化与土壤 K 素的实际变化关系也会有所不同。为探讨各土壤测 K 方法反映土壤 K 素变化的能力, 本文以封丘长期定位试验原始土壤为参照, 经 16 年施肥和作物

吸收引起耕层土壤 K 变化的估算值为理论值 (表 4), 计算不同测 K 方法反映的各施肥处理 16 年引起的土壤 K 素变化的回收率 (表 6)。回收率接近 100% 则说明该方法测定的 16 年后土壤与原始土的土壤 K 素变化值与理论值接近, 越低或越高则表示测定值反映的

土壤 K 素变化值低于或高于理论值,回收率为负值则表示测定值反映的土壤 K 素盈亏与估算的结果相反。

醋酸铵法是土壤速效K的经典测定方法,该法提取的速效K含量是表征土壤K素肥力的主要指标之一,也是作物K肥合理施用需要考虑的重要参考依据。近年来农田土壤速效K值的变化也引起了人们的广泛关注

表 6 5 种土壤 K 素测定方法反映封丘潮土不同施肥处理 16 年土壤 K 素变化的回收率 (%)

Table 6 Recovery rate of K changed in topsoil treated with various fertilizers for 16 years in Fengqiu long-term field experiment as indicated by different soil K extraction methods

| 处理           | 醋酸铵法         | 沸硝酸法         | 四苯硼钠法 A    | 四苯硼钠法 B     | 碱熔法            |
|--------------|--------------|--------------|------------|-------------|----------------|
| CK           | -9.6 ± 7.6   | 30.1 ± 9.4   | 60.1 ± 6.0 | 79.6 ± 9.4  | -170.5 ± 369.4 |
| NP           | 3.1 ± 1.1    | 18.0 ± 6.7   | 32.8 ± 2.8 | 41.5 ± 4.5  | 52.2 ± 75.0    |
| NK           | 29.7 ± 2.9   | 31.8 ± 2.9   | 48.3 ± 2.1 | 52.6 ± 2.9  | 83.9 ± 37.9    |
| PK           | 26.2 ± 1.3   | 32.6 ± 1.3   | 51.6 ± 2.4 | 53.9 ± 2.0  | 97.5 ± 24.0    |
| NPK          | 107.3 ± 15.1 | 126.5 ± 11.2 | 84.9 ± 9.6 | 89.9 ± 9.4  | 454.9 ± 406.2  |
| 1/2NPK+1/2OM | 70.0 ± 13.2  | 74.1 ± 26.0  | 94.2 ± 7.8 | 92.8 ± 7.2  | 551.5 ± 546.6  |
| OM           | 43.0 ± 12.7  | 44.6 ± 14.1  | 89.7 ± 7.7 | 88.9 ± 13.4 | 163.4 ± 188.1  |

注: 负值表示 K 素变化测定值反映的盈亏与理论值相反。

都比较低,尤其 CK 处理为 -9.6%,其速效 K 的变化与土壤 K 素变化趋势的估算结果相反。醋酸铵法反映 7 个不同施肥处理 K 素变化的回收率平均为 39%,变异系数则达 103%。此结果说明土壤 K 素肥力无论是增长还是降低,醋酸铵法提取的土壤速效 K 变化值会大大低于土壤 K 素的实际变化值,而降低的程度依具体土壤条件而异。依此类推,目前许多文献中农田土壤速效 K 增减变化的结果也可能大幅度低于农田 K 素的实际变化值,因而速效 K 用来反映土壤 K 素变化主要是给出一个增减趋势的定性结论,而非准确定量的结果。沸硝酸法是经典的土壤缓效 K 测定方法,可以较多地提取土壤中醋酸铵不能提取的 K,该方法反映封丘长期定位试验不同施肥处理土壤 K 素变化的回收率较醋酸铵法有所提高,尤其是 K 素耗竭的 CK 和 NP 处理(表 6)。沸硝酸法反映土壤 K 素变化的回收率 7 个施肥处理平均为 51%,变异系数达 74%,总体上看这一方法测定值的变化也不能较准确反映土壤 K 素的实际变化情况,其结果多数情况下也只是反映了土壤 K 素变化的一部分。土壤全 K 因其含量较高,其取样和测定过程中的误差决定了该方法不可能用来准确反映土壤有效 K 的少量变化,表 6 全 K 反映土壤 K 素变化的回收率的大幅度变化已经说明这一点。

四苯硼钠法A是经优化专门用来测定土壤K素变化的方法,该方法反映土壤K素变化的准确性和稳定性在室内培养试验中已得到证实<sup>[6]</sup>。该方法反映封丘长期定位试验不同施肥处理土壤K素变化的回收率较醋

酸铵法和沸硝酸法均有显著提高,其平均回收率达 66%,变异系数也显著降低为 36%(表 6)。四苯硼钠法B基本操作步骤与方法A相同,但提取时间由 1 天延长到了 20 天,该方法提取的是土壤中可被四苯硼钠法提取的最大K提取量<sup>[6]</sup>,其反映土壤K素变化的平均回收率为 71%,变异系数为 30%,结果较方法 A 稍有改进。从方法的可操作性和结果的准确性两方面考虑,四苯硼钠法 A 基本达到了四苯硼钠法测定土壤 K 素变化的最佳条件和较可靠结果相结合。本文中 2 种四苯硼钠法反映土壤K素变化的平均回收率都在约 70% 左右,与理论值还有约 30% 的差距,这可能并非该方法本身不准,而更可能是田间情况下土壤K素变化受多种原因影响后,土壤K素实际变化与估算值有差距而致。该方法反映封丘潮土长期定位试验土壤K素变化的回收率因施肥处理而异的结果可以说明这一点。K 素稍有盈余的 NPK、OM 和 1/2NPK+1/2OM 等 3 个处理中,2 种四苯硼钠法反映土壤K素变化的回收率可达 90%,而回收率低的情况主要出现在是K大量积累的 NK、PK 和K耗竭严重的NP 处理。由于土壤K变化估算值是将耕层土壤设为 20 cm,亚耕层土壤没有考虑在内,但实际上在耕层土壤K大幅度累积或大幅度耗竭的情况下,由于土壤水盐运移,较高的耕层和亚耕层土壤溶液K的浓度差将会加剧K在耕层和亚耕层之间的扩散。这种扩散表现为耕层土壤K素在大幅度积累的情况下会向亚耕层迁移,或者耕层土壤K大量耗竭的情况下促使亚耕层土壤K素向耕层迁移,这样耕层土

酸铵法和沸硝酸法均有显著提高,其平均回收率达 66%,变异系数也显著降低为 36%(表 6)。四苯硼钠法B基本操作步骤与方法A相同,但提取时间由 1 天延长到了 20 天,该方法提取的是土壤中可被四苯硼钠法提取的最大K提取量<sup>[6]</sup>,其反映土壤K素变化的平均回收率为 71%,变异系数为 30%,结果较方法 A 稍有改进。从方法的可操作性和结果的准确性两方面考虑,四苯硼钠法 A 基本达到了四苯硼钠法测定土壤 K 素变化的最佳条件和较可靠结果相结合。本文中 2 种四苯硼钠法反映土壤K素变化的平均回收率都在约 70% 左右,与理论值还有约 30% 的差距,这可能并非该方法本身不准,而更可能是田间情况下土壤K素变化受多种原因影响后,土壤K素实际变化与估算值有差距而致。该方法反映封丘潮土长期定位试验土壤K素变化的回收率因施肥处理而异的结果可以说明这一点。K 素稍有盈余的 NPK、OM 和 1/2NPK+1/2OM 等 3 个处理中,2 种四苯硼钠法反映土壤K素变化的回收率可达 90%,而回收率低的情况主要出现在是K大量积累的 NK、PK 和K耗竭严重的NP 处理。由于土壤K变化估算值是将耕层土壤设为 20 cm,亚耕层土壤没有考虑在内,但实际上在耕层土壤K大幅度累积或大幅度耗竭的情况下,由于土壤水盐运移,较高的耕层和亚耕层土壤溶液K的浓度差将会加剧K在耕层和亚耕层之间的扩散。这种扩散表现为耕层土壤K素在大幅度积累的情况下会向亚耕层迁移,或者耕层土壤K大量耗竭的情况下促使亚耕层土壤K素向耕层迁移,这样耕层土

壤实际K素浓度的变化量会显著低于理论估算值,这与四苯硼钠方法测定土壤K素变化结果显著低于估算值是一致的。因而利用改进的四苯硼钠法测定土壤K素变化前后的土壤,其差值可以较准确地反映土壤K素的实际变化。这一方法的应用将使通过测土较准确地评估土壤K素的收支平衡成为可能,也将推动土壤K素肥力评估向准确、定量的方向发展。

### 3 结论

封丘潮土不施K肥对小麦、玉米16年的总产影响不大,但随种植年限的增加,两种作物均因不施K而开始减产,揭示富K土壤的K素耗竭也要适度。16年K肥施用量和作物吸K量的差值表明,不施K会导致土壤K素耗竭,按本试验点设计的用量施用K肥,既使在其他养分均衡供应的情况下,也会导致土壤K素肥力呈缓慢的上升趋势,而在其他养分供应不均衡的情况下,则会导致土壤K素肥力不同程度地显著上升。采用常规土壤速效K、缓效K和全K方法测定原始土和种植16年之后的土壤,其差值不能准确反映土壤K素的实际变化,而采用改进的四苯硼钠方法可以较准确地测定土壤K素的变化。

封丘NPK养分均衡供应的情况下,小麦、玉米产量和土壤K素肥力都能得到较好地保持,但却导致玉米对土壤K的大量奢侈吸收。如何在合理耗竭土壤富余K素的基础上,建立作物高产、稳产且无K奢侈吸收条件下的土壤K素收支平衡管理模式,是未来K

肥合理施用中需要面对的问题。

### 参考文献:

- [1] 唐中凡. 中国钾肥行业状况及发展趋势. 新疆化工, 2007 (1): 23-33
- [2] 张晓卫. 世界钾肥市场对我国钾肥供求关系的影响和对策. IM & P 化工矿物与加工, 2006 (3): 1-4
- [3] 张华. 北方土壤应重视施用钾肥. 中国农业信息, 2006 (4): 37
- [4] 王火焰, 朱树国, 周健民, 吴礼树, 杜昌文, 陈小琴. 常规方法准确测定土壤有效钾素变化可能性的探讨. 土壤通报, 2006, 37(5): 954-960
- [5] 王火焰, 朱树国, 周健民, 吴礼树, 杜昌文, 陈小琴. 运用四苯硼钠法准确测定土壤有效钾素变化的初步探讨. 土壤, 2007, 39(2): 231-237
- [6] 程炜. 土壤钾素变化与非交换态钾总量测定方法的研究(硕士学位论文). 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2006
- [7] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [8] 慕兰, 郑义, 申眺, 葛树春. 河南省主要耕地土壤肥力监测报告. 中国土壤与肥料, 2007 (2): 17-22
- [9] 苏建平, 邹忠, 黄标, 丁峰, 陈小明, 王冬梅, 李峰, 丁扣其. 江苏如皋市农田土壤速效钾时空变化与平衡施肥技术研究. 土壤通报, 2006, 37(2): 407-410
- [10] 李祖章, 刘光荣, 袁福生, 刘益仁, 邹进平. 江西农田土壤钾素肥力的现状、发展趋势及其对策. 江西农业学报, 2003, 15(1): 1-7

## Change of Soil Potassium Fertility in Long-Term Located Field Experiment and Comparison of Different Methods to Measure Potassium Change in Soil

SUN Hai-xia<sup>1,2</sup>, WANG Huo-yan<sup>1</sup>, ZHOU Jian-min<sup>1</sup>, DU Chang-wen<sup>1</sup>, CHEN Xiao-qin<sup>1</sup>, QIN Sheng-wu<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Soil potassium fertility could probably be changed by long-term fertilization management. Effect of 16-year different fertilization treatments on the change of potassium fertility in soil of a long-term field experiment located in Fengqiu County, Henan Province, China was studied in this paper. Five soil K testing methods (1 mol/L  $\text{NH}_4\text{OAc}$  method, 1 mol/L boiling  $\text{HNO}_3$  method, total potassium method and two kinds of sodium tetraphenylboron (NaTPB) methods) were compared with regards to their ability to recover K change in soils. The results of soil K balance based on 16-year K input of fertilization and K removal by crop harvest showed that soil K depletion occurred in the soils without input of fertilizer K. K depletion rate of NP (apply nitrogen and phosphorus fertilizers) treatment was 5.2 time as that of the CK (without fertilizer) treatment which was K 28.5 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ). For all the other 5 treatments with fertilizer K applied, soil K got positive balance because that the amount of K applied was higher than the amount K removed by crops. The higher soil K accumulation rates were found in the NK (apply nitrogen and potassium fertilizers) and PK (apply phosphorus and potassium fertilizers) treatment, that was K 207 and 190.5 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), respectively. While the K accumulation rates in soils treated with balanced fertilizers were comparatively lower, which ranged from K 31.5 to 63.0 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ). The change of soil K measured by 5 soil testing methods differed from the estimated value calculated by soil K balance and the mass of the topsoil in the field. The average recovery rate

(ratio of value determined to the value estimated) of change of soil K of 7 fertilizers treatment determined by 5 methods (1mol/L  $\text{NH}_4\text{OAC}$  method, 1 mol/L boiling  $\text{HNO}_3$  method, two kinds of NaTPB methods and total potassium method ) were 39%, 51%, 66%, 71% and 176%, respectively. The variation coefficient of the recovery rate of the above 5 methods were 103%, 74%, 36%, 30% and 141%, respectively. The results indicated that the conventional 1 mol/L  $\text{NH}_4\text{OAC}$  method, 1 mol/L boiling  $\text{HNO}_3$  method and total potassium method were not suitable for determination of K change in soils, while the NaTPB methods proposed were suitable for this purpose.

**Key words:** Calcareous soil, Long-term located field experiment, Potassium determination methods, NaTPB