

不同提取方法测定的土壤钾的有效性比较研究*

张洋洋 鲁剑巍[†] 王箬 邹娟 王寅 任涛 丛日环 李小坤

(华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要 以 122 个油菜钾肥田间试验的籽粒产量和植株吸钾量为标准, 分别采用 1 mol L^{-1} 中性醋酸铵、 1 mol L^{-1} 沸硝酸和 0.2 mol L^{-1} 四苯硼钠 3 种浸提剂测定试验基础土壤的钾素含量, 并按浸提剂种类和速效钾、缓效钾将其分类, 通过相关性分析探索土壤有效钾的准确测定方法, 并建立与之对应的土壤钾素丰缺指标。研究结果表明, 不同方法的提取能力有所不同, 沸硝酸钾含量 > 四苯硼钠钾含量 > 醋酸铵钾含量。用醋酸铵法和四苯硼钠法测得的土壤钾素的生物有效性均较好, 其中又以四苯硼钠法更好。长江流域冬油菜区醋酸铵法浸提的土壤钾素“低”、“中”、“高”和“极高”指标分别为 $< 45 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $45 \sim 115 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $115 \sim 190 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $> 190 \text{ mg kg}^{-1}$; 四苯硼钠法浸提的土壤钾素“低”、“中”、“高”和“极高”指标分别为 $< 125 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $125 \sim 415 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $415 \sim 755 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $> 755 \text{ mg kg}^{-1}$ 。综合结果表明四苯硼钠法和醋酸铵法测得的土壤钾素含量与油菜相对产量和相对吸钾量间呈极显著相关关系。据此建立的土壤钾素丰缺指标可以用来指导长江流域油菜的测土配方施肥, 另外此区域应该重视并合理的施用钾肥。

关键词 油菜; 土壤有效钾; 浸提剂; 四苯硼钠法; 生物有效性; 土壤钾素丰缺指标

中图分类号 S151.9 **文献标识码** A

土壤实际供钾水平对于生产实践中的合理施肥具有指导性意义, 而化学方法是评价土壤供钾能力的最常用方法, 但目前土壤钾素化学测定方法并不能真实反映土壤供钾状况, 几种常用的方法各有优劣。如 1 mol L^{-1} 中性醋酸铵法, 虽然此法提取的速效钾与作物的产量和吸钾量均有极显著的相关性^[1], 但其稳定性并不能令人十分满意^[2-3]。 1 mol L^{-1} 沸硝酸法不仅能提取土壤交换性钾还能提取对作物有效的非交换性钾, 但其提取能力过强, 提取的大部分非交换性钾不能被当季作物吸收利用, 通常被用作评价土壤长期供钾能力的指标^[4-5]。因此研究并筛选出一个简便易行的测定土壤钾素的方法反映土壤实际供钾水平对于科学施肥极其重要。近年来研究表明四苯硼钠法也可以很好地评价土壤钾素的生物有效性, 且对该法进行了改进, 结果表明该方法可较准确地测定土壤中钾素的动态变化^[6-7]。但该方法目前多集中于提取原理、提取能力和应用在盆栽试验上, 在大田试验上的验证则

较少^[8-11]。

土壤钾素测定方法研究的最终目的是将其应用于生产实践中, 随着测土配方施肥项目的开展, 根据土壤钾素测试结果来计算推荐施钾量的方法已经得到普遍接受和认可^[12]。选择合适的方法判断土壤钾素丰缺状况并提出相应推荐施钾量的前提是建立土壤钾素丰缺指标^[13-14]。20 世纪 80 年代我国根据全国第二次土壤普查结果建立了适合当时生产水平的土壤钾素丰缺指标体系, 对我国的科学施用钾肥做出了重大贡献^[15]。但是近 30 年来, 随着农业生产水平的提高、高产优质品种的推广、种植制度和栽培技术的不断变化, 原有的土壤钾素丰缺指标已不能适应新形势下的测土配方施肥的要求^[16]。因此寻找与作物对钾的效应相关性较好的方法并建立与之对应的土壤钾素丰缺指标对于现代科学施用钾肥极其重要。本文在已有的多年多点油菜钾肥试验数据的基础上, 应用 1 mol L^{-1} 中性醋酸铵、 1 mol L^{-1} 沸硝酸和 0.2 mol L^{-1} 四苯硼

* 公益性行业(农业)科研专项(201203013)、国家自然科学基金项目(41001178)、国家测土配方施肥技术项目和长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1247)资助

[†] 通讯作者, Tel: 027-61379276, E-mail: lunm@mail.hzau.edu

作者简介: 张洋洋(1989—), 女, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向为土壤肥力。E-mail: zyy19890202@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2013-07-05; 收到修改稿日期: 2013-09-12

钠 3 种不同浸提剂提取土壤钾素,研究其生物有效性,校验其可行性,并确定适合的土壤钾素提取方法,最终建立与之对应的土壤钾素丰缺指标,以期为我国油菜种植的测土施钾提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

供试土壤及油菜籽粒产量和植株吸钾量数据来自于本课题组 2005 - 2009 年在长江流域冬油菜主产区的湖北、四川、江苏、江西、浙江、重庆、安徽、贵州、河南及湖南共 10 个省(市)布置的 122 个田间钾肥对比试验。试验设施钾和不施钾 2 个处理,肥料施用情况、供试油菜和肥料品种、试验进程安排、前茬作物及植物样品的采集与测定方法见前文施钾效果文章^[17]。土壤基础样品均为前季作物收获后、油菜基肥施用前采集的 0 ~ 20 cm 耕层土壤。

1.2 分析方法

土壤养分含量(钾除外)的测定均采用常规分析方法^[18],供试土壤除钾素外的基本养分状况见表 1,土壤钾素含量状况见 2.1 部分。

表 1 供试土壤的基本养分性状

Table 1 Some basic properties of the soils in the field experiments

| 项目 Item | pH | 有机质 Organic matter (g kg ⁻¹) | 全氮 Total N (g kg ⁻¹) | 有效磷 Available P (mg kg ⁻¹) |
|------------|-----------|--|--|--|
| 变幅 Range | 4.6 ~ 8.3 | 10.7 ~ 57.4 | 0.36 ~ 3.38 | 1.9 ~ 50.6 |
| 均值 Mean | 6.4 ± 1.0 | 28.2 ± 10.5 | 1.50 ± 0.58 | 17.1 ± 9.2 |

土壤钾素分别采用醋酸铵法、沸硝酸法和王火焰等^[8]改进后的四苯硼钠法测定,各具体方法如下:

醋酸铵法^[18]:称取 2.50 g 风干土样于 150 ml 塑料瓶中,加入 25 ml 1 mol L⁻¹ NH₄OAc 溶液(pH = 7.0),加盖,振荡 30 min,过滤,火焰光度计测定。

沸硝酸法^[18]:称取 2.50 g 风干土样于 50 ml 消化管中,加 25 ml 1 mol L⁻¹ HNO₃ 溶液,在管口加一弯劲小漏斗,放入油浴锅内加热煮沸 10 min(沸腾时开始计时),取下,稍冷,趁热过滤于 100 ml 容量瓶中,用 0.1 mol L⁻¹ 的 HNO₃ 洗涤消化管和小漏斗 3 ~ 4 次,洗液过滤于容量瓶,冷却后用 0.1 mol L⁻¹ 的 HNO₃ 定容,摇匀,火焰光度计测定。

四苯硼钠法^[8]:称取 0.50 g 风干土样于 50 ml

的离心管中,准确加入 3 ml 0.2 mol L⁻¹ NaBPh₄-EDTA 混合剂,振荡 60 min。振荡结束后加入 25 ml 终止剂(0.5 mol L⁻¹ NH₄Cl + 0.14 mol L⁻¹ CuCl₂),摇匀后置于沸水浴中煮沸 60 min,取出,冷却,过滤,火焰光度计测定。

1.3 参数计算方法

将用中性醋酸铵、沸硝酸和四苯硼钠 3 种浸提剂测定的土壤钾素分别定义为土壤醋酸铵钾、沸硝酸钾和四苯硼钠钾。

通常中性醋酸铵提取的土壤钾素被称为土壤速效钾,沸硝酸法浸提的钾量减去土壤速效钾含量为土壤缓效钾(即土壤缓效钾 A),同理将四苯硼钠法浸提的土壤钾素含量减去土壤速效钾含量定义为土壤缓效钾 B。

此外,计算油菜的籽粒相对产量和植株相对吸钾量,公式如下:

作物相对产量(%) = 缺钾区作物籽粒产量 ÷ 施钾区作物籽粒产量 × 100

作物相对吸钾量(%) = 缺钾区作物总吸钾量 ÷ 施钾区作物总吸钾量 × 100

1.4 土壤钾素丰缺指标的确定

根据油菜籽粒产量对土壤钾素含量的响应建立土壤钾素丰缺指标体系,即用相对产量与土壤钾素含量间的关系建立数学模型: $y = a \ln(x) + b$, 式中 y 为相对产量(%), x 为土壤钾素含量(mg kg⁻¹)^[19-20]。参照 Cate^[21] 和陆允甫^[22] 等的标准并结合长江流域冬油菜生产水平,以相对产量 < 80%、80% ~ 90%、90% ~ 95%、> 95% 将土壤钾素分为“低”、“中”、“高”和“极高”4 个丰缺等级,计算并建立土壤钾素丰缺指标。

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 软件进行统计、绘图和显著性分析。

2 结果

2.1 土壤钾素基本情况

根据不同提取方法所测得的土壤钾素含量范围进行分级并按其比例进行统计(表 2),结果表明,3 种不同浸提剂提取的土壤钾素含量相差较大,总体来看,沸硝酸提取钾含量最高,醋酸铵提取钾含量最低。统计显示,土壤醋酸铵钾含量范围为 19.9 ~ 289.0 mg kg⁻¹,平均值为 92.9 mg kg⁻¹,主要分布在 40 ~ 120 mg kg⁻¹,占总试验数的 71.3%。沸硝酸钾

含量范围为 159.7 ~ 2 355 mg kg⁻¹, 平均值为 609.1 mg kg⁻¹, 主要分布在 300 ~ 900 mg kg⁻¹, 占总试验数的 78.7%。四苯硼钠钾含量范围为 64.3 ~ 1 184

mg kg⁻¹, 平均值为 334.4 mg kg⁻¹, 主要分布在 100 ~ 500 mg kg⁻¹, 占总试验数的 77.0%。

表 2 土壤钾素基本状况

Table 2 Basic state of soil potassium

| 醋酸铵钾分级 NH ₄ OAc-K (mg kg ⁻¹) | 比例 Ratio (%) | 沸硝酸钾分级 Boiling HNO ₃ -K (mg kg ⁻¹) | 比例 Ratio (%) | 四苯硼钠钾分级 NaBPh ₄ -K (mg kg ⁻¹) | 比例 Ratio (%) |
|---|--------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| < 40 | 8.2 | < 300 | 12.3 | < 100 | 7.4 |
| 40 ~ 80 | 36.9 | 300 ~ 600 | 50.8 | 100 ~ 300 | 48.3 |
| 80 ~ 120 | 34.4 | 600 ~ 900 | 27.9 | 300 ~ 500 | 28.7 |
| 120 ~ 160 | 13.1 | 900 ~ 1200 | 2.4 | 500 ~ 700 | 8.2 |
| > 160 | 7.4 | > 1200 | 6.6 | > 700 | 7.4 |

另外, 以四苯硼钠钾含量从低到高进行排序, 据此各土壤钾素含量变化趋势见图 1, 研究结果表明不同方法提取的土壤钾素含量的大小顺序有所不同, 这说明不同提取方法对土壤中不同形态钾素的提取能力有所差异。由图 1 可知除少部分试验点外, 大部分试验点土壤沸硝酸钾含量 > 四苯硼钠钾含量 > 醋酸铵钾含量, 且 3 种钾变化趋势基本一致。由以上分析可知, 3 种方法测得的有效钾含量范围各不相同。

处理油菜吸钾量关系见图 2, 由图中可知缺钾处理油菜吸钾量随着土壤钾素含量的升高而明显升高, 且 3 种方法测得的土壤钾素含量与缺钾处理油菜吸钾量间相关性均达极显著水平 ($p < 0.01, n = 122$), 其相关性大小顺序为: 四苯硼钠钾 > 沸硝酸钾 > 醋酸铵钾, 说明 3 种方法均可作为评价土壤供钾能力的方法, 其中四苯硼钠法最好, 其次为沸硝酸法。这可能与四苯硼钠法提取土壤钾的过程类似于植物根系对土壤有效钾的耗竭过程有关。而醋酸铵钾含量与缺钾处理油菜吸钾量相关性最小主要是因为其含量太低, 仅占全部土壤有效钾的一部分。

2.3 土壤钾素含量与油菜相对产量的关系

2.3.1 不同提取方法测得土壤钾素含量与油菜相对产量的关系 采用对数方程拟合油菜相对产量 (y) 与土壤钾素含量 (x) 之间的关系 (图 3), 结果显示, 3 种方法测得的土壤钾素含量与油菜相对产量间的相关性相差较大, 其相关性系数大小顺序为: 四苯硼钠钾 > 醋酸铵钾 > 沸硝酸钾, 且油菜相对产量与土壤醋酸铵钾含量和四苯硼钠钾含量间均呈极显著正相关关系, 而与土壤沸硝酸钾含量间虽呈显著正相关关系, 但相关系数明显下降。因此醋酸铵法和四苯硼钠法均为反映油菜施钾效果的较好方法, 其中四苯硼钠法更好。

2.3.2 不同形态土壤钾素含量与油菜相对产量的关系 土壤各形态钾素中对作物起关键性作用的主要是速效钾和缓效钾, 且二者之间存在着动态平衡从而调节钾对植物的供应^[18]。由图 4 可知, 不同形态土壤钾素对油菜产量的贡献不同, 其含量与油菜相对产量的相关性系数大小顺序为: 缓效钾

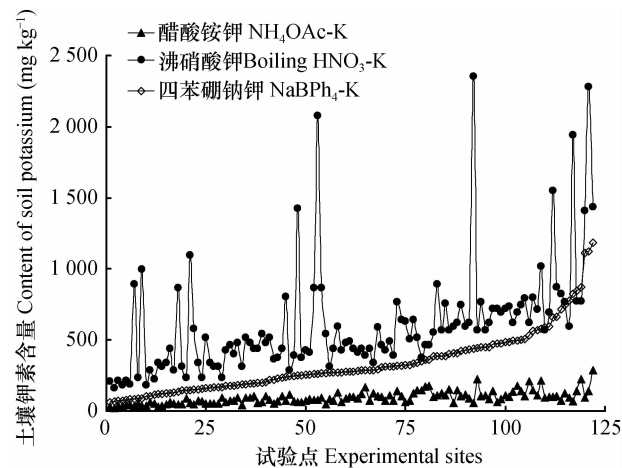


图 1 不同地区土壤 3 种浸提剂测得土壤钾素含量

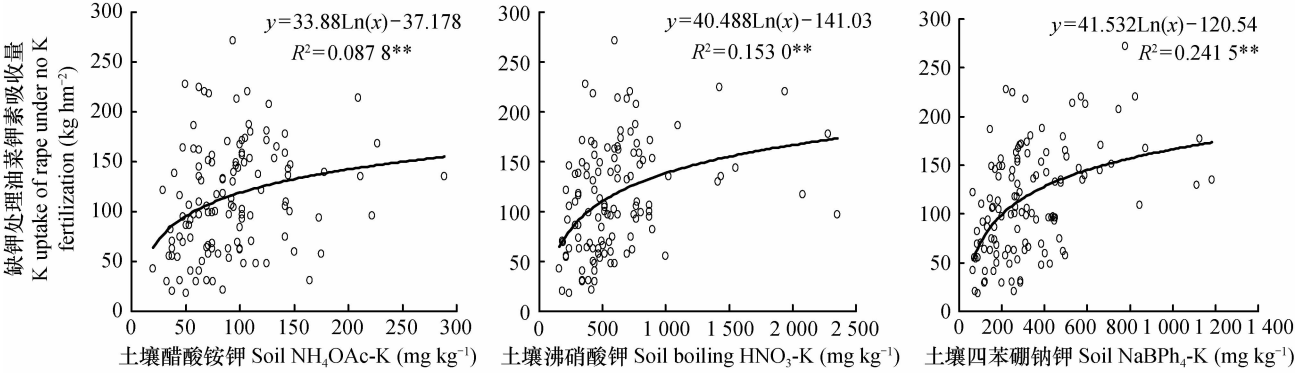
Fig. 1 Content of soil potassium extracted with three different extractants from soils in different experimental sites

2.2 土壤供钾能力评价

在不施钾条件下, 植物的总吸钾量可以作为反映土壤供钾能力的尺度^[23], 即通过土壤钾素含量与植物吸钾量建立相关关系可反映出土壤钾的生物有效性。3 种浸提剂所测得土壤钾素含量与缺钾

B > 速效钾 > 缓效钾 A, 其中速效钾含量和缓效钾 B 含量与油菜相对产量间的相关性均达极显著水平, 而土壤缓效钾含量 A 与油菜相对产量无明显相关性, 这可能是因为速效钾是当季作物可以吸收利用的主要土壤钾素形态, 而缓效钾是速效钾的主要储

备库, 但沸硝酸法提取能力过强, 导致提取出作物无法吸收的钾, 使其测得的缓效钾有效性降低。由以上分析可知, 土壤硝酸钾含量与相对产量的相关系数较低是由于土壤缓效钾 A 含量与相对产量的相关性较小导致。



注: *, **分别表示在0.05和0.01水平上相关性显著 (n=122), 下同 Note: * and ** stands for significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively (n=122). The same below

图2 不同提取方法测得的土壤钾素含量与缺钾处理油菜吸钾量的关系

Fig. 2 Relationship between content of soil K extracted with different methods and K uptake of rape in treatments of K deficiency

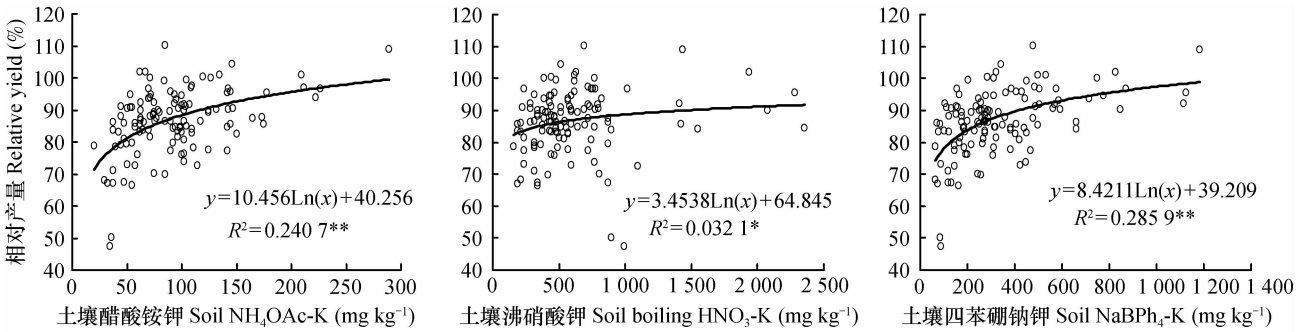


图3 不同提取方法测得的土壤钾素含量与油菜相对产量的关系

Fig. 3 Relationship between content of soil K extracted with different methods and relative yield of rapeseed

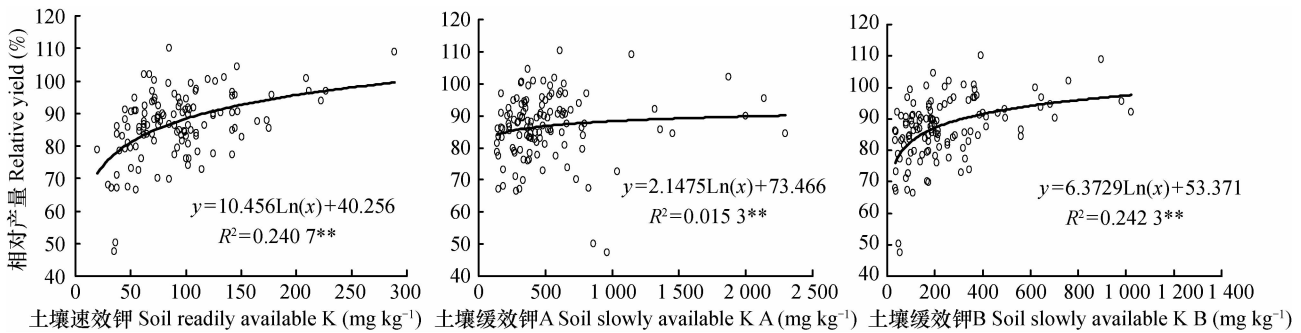


图4 不同形态土壤钾素含量与油菜相对产量的关系

Fig. 4 Relationship between content of soil K different in form and relative yield of rapeseed

2.4 土壤钾素含量与油菜相对吸钾量的关系

2.4.1 不同提取方法测得土壤钾素含量与油菜相对吸钾量的关系

由于作物吸钾量不仅受土壤

钾素含量的影响还会受其他多种因素的影响, 如生长环境和土壤其他养分含量, 因此用相对吸钾量能有效地排除其他因素的影响, 其与土壤钾素

含量的关系能更好地反映土壤钾素的有效性。图5是油菜相对吸钾量与不同浸提方法测得的土壤钾素含量间的关系图,根据相关性分析可知,其相关性系数大小顺序为:四苯硼钠钾 > 醋酸铵钾 > 沸硝酸钾,且3种方法所测得的土壤钾素含量与

油菜相对吸钾量之间相关性均达极显著水平。由此说明3种方法均能很好地反映施钾对油菜吸钾量的影响,比较而言四苯硼钠法更能反映应油菜对钾的效应及土壤钾的有效性,这与3种方法提取钾的能力有关。

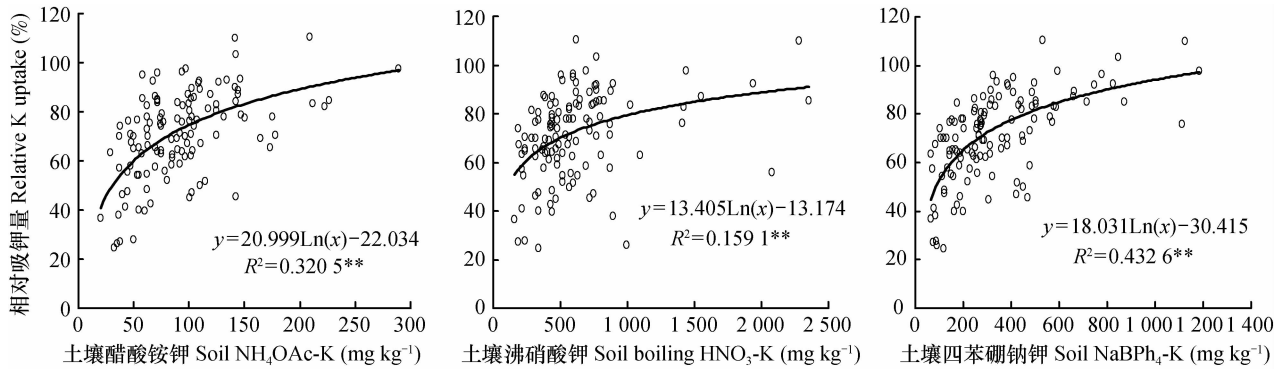


图5 不同提取方法测得的土壤钾素含量与油菜相对吸钾量的关系

Fig. 5 Relationship between content of soil K extracted with different methods and relative K uptake of rape

2.4.2 不同形态钾素含量与油菜相对吸钾量的关系 沈钦华等^[24]研究结果表明作物吸收的钾大部分来自于土壤缓效钾,土壤缓效钾在植物钾素的吸收中具有重要的意义。由图6可知,土壤速效钾含量和缓效钾含量与相对吸钾量均达到极

显著的相关性,且相关性系数大小为:缓效钾B > 速效钾 > 缓效钾A,说明土壤速效钾和缓效钾均能反映施钾对油菜吸钾量的影响,且当土壤速效钾含量较低时缓效钾含量的高低决定了油菜吸钾量的高低。

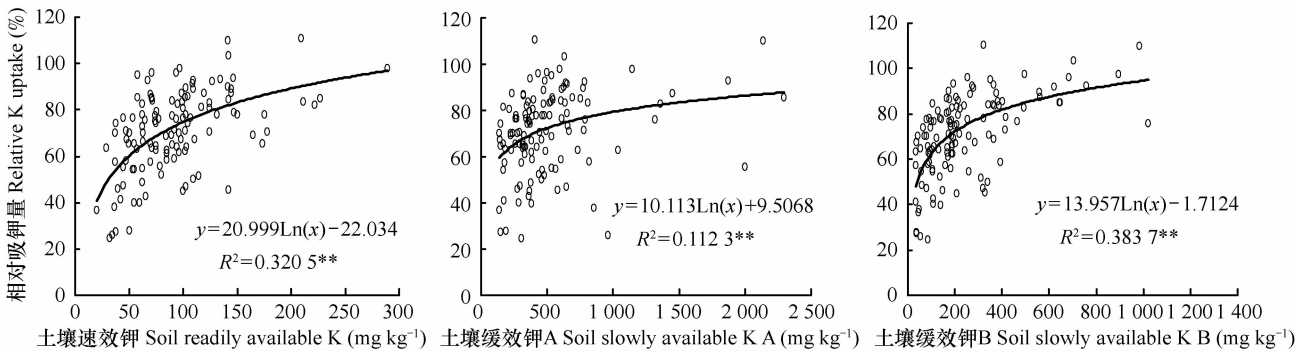


图6 不同形态土壤钾素含量与油菜相对吸钾量的关系

Fig. 6 Relationship between content of soil K different in form and relative K uptake of rape

2.5 土壤钾素丰缺分级指标的建立

以上分析表明,醋酸铵法和四苯硼钠法测得的土壤钾素含量与油菜相对产量和相对吸钾量间呈极显著相关关系,说明醋酸铵法和四苯硼钠法测得的土壤钾素含量水平能较好地反映长江流域土壤钾素肥力丰缺状况及油菜施用钾肥的效应。根据图3中对数曲线 $y = 10.456 \ln(x) + 40.256$ 和 $y = 8.4211 \ln(x) + 39.209$,以相对产量 < 80%、80%~90%、90%~95%、> 95% 为标准建立土壤钾素丰缺分级指标,为方便推广应用我们将根据方程计算出的土壤钾素临界指标定为相近的5的倍数(表

3)。结果表明,土壤醋酸铵钾和四苯硼钠钾的“低”、“中”、“高”和“极高”指标分别为 < 45 mg kg⁻¹、45 ~ 115 mg kg⁻¹、115 ~ 190 mg kg⁻¹ 和 > 190 mg kg⁻¹ 及 < 125 mg kg⁻¹、125 ~ 415 mg kg⁻¹、415 ~ 755 mg kg⁻¹ 和 > 755 mg kg⁻¹。

对试验点土壤钾素丰缺状况进行统计(表3),结果表明,11.5%的土壤醋酸铵钾和13.1%的土壤四苯硼钠钾属于“低”等级,66.4%的土壤醋酸铵钾和59.0%的土壤四苯硼钠钾属于“中”等级,属于“极高”等级的土壤醋酸铵钾和四苯硼钠钾仅4.1%和5.8%。若以相对产量90%作为临界值标准,土

壤醋酸铵钾和四苯硼钠钾分别低于 115 mg kg^{-1} 和 415 mg kg^{-1} 时,施用钾肥有较好的效果。根据此临界值标准本研究中有 95 或 88 个试验点当季土壤缺

钾,分别占试验总数的 77.9% 或 72.1%,因此在长江流域油菜种植区应重视并合理的施用钾肥。

表 3 土壤钾素丰缺分级指标及其丰缺状况评价

Table 3 Indices for grading of K abundance and K deficiency and evaluation of the soils by the indices

| 项目 Item | 醋酸铵钾 $\text{NH}_4\text{OAc-K}$ | | | | 四苯硼钠钾 $\text{NaBPh}_4\text{-K}$ | | | |
|---|--------------------------------|-------------|-----------|-------------------|---------------------------------|-------------|-----------|-------------------|
| | 低 Low | 中 Medium | 高 High | 极高 Pretty high | 低 Low | 中 Medium | 高 High | 极高 Pretty high |
| 相对产量 Relative yield (%) | <80 | 80~90 | 90~95 | >95 | <80 | 80~90 | 90~95 | >95 |
| 根据方程计算的土壤钾素丰缺指标 Soil K abundance and deficiency indices based on equation (mg kg^{-1}) | <45 | 45~116 | 116~188 | >188 | <127 | 127~416 | 415~754 | >753 |
| 调整的土壤钾素丰缺指标 Soil K abundance and deficiency indices after adjustment (mg kg^{-1}) | <45 | 45~115 | 115~190 | >190 | <125 | 125~415 | 415~755 | >750 |
| 样本数 Number of samples | 14 | 81 | 22 | 5 | 16 | 72 | 27 | 7 |
| 占样本数比例 Percentage of the total number of samples (%) | 11.5 | 66.4 | 18.0 | 4.1 | 13.1 | 59.0 | 22.1 | 5.8 |
| 平均含量 Mean (mg kg^{-1}) | 37.0 | 80.5 | 142.6 | 231.8 | 93.8 | 256.0 | 514.3 | 963.6 |
| 增产率 Yield increase rate (%) | 39.8 | 16.5 | 11.0 | 0.8 | 36.6 | 17.0 | 11.7 | 3.3 |

3 讨论

3.1 不同方法的提取量高低比较及其优缺点

研究表明,不同方法所浸提的土壤钾素含量有所差别,3 种方法测得的土壤钾素含量大小顺序为沸硝酸钾含量 > 四苯硼钠钾含量 > 醋酸铵钾含量,说明不同方法其提取能力有所差异。醋酸铵法主要提取的是土壤水溶性钾和交换性钾,四苯硼钠法和沸硝酸法除了能够提取土壤水溶性钾和交换性钾外还能提取对作物有效的部分非交换性钾。由于这 3 种方法的提取原理及其提取能力不同,因此各具特点。研究结果表明,醋酸铵法提取的土壤钾素含量与油菜的相对产量及相对吸钾量均呈极显著相关,这与前人研究结果一致^[1,25],且该法操作简单方便,因此是目前使用最广的方法,甚至成为全世界范围内公认的标准方法^[26]。但由于 NH_4^+ 容易使矿物晶层塌陷致使其对土壤钾素提取能力降低,其提取的钾素含量较低。此外土壤速效钾含量易受施肥、温度、水分等影响^[27],且土壤钾素有季节性变化的现象^[28]。因此醋酸铵浸提的速效钾结果的可靠性和稳定性并不能令人满意^[29]。本研

究也表明醋酸铵法的准确度不及四苯硼钠法高。沸硝酸法提取的土壤钾素含量与油菜相对吸钾量呈极显著相关,与相对产量呈显著性相关,但其相关性远小于其他 2 种方法。沸硝酸法是通过 H_3O^+ 交换土壤矿物层间钾以及破坏矿物晶格架构从而提取矿物中的钾,因此其提取能力最强。其提取的土壤钾素包括速效钾和非交换性钾,虽然也有用来反映土壤有效钾水平,但其中非交换性钾并不能完全被植物吸收利用,因此也有人认为其反映值偏高^[30],其测定值远高于另外 2 种方法也证明了这一点。有研究结果表明四苯硼钠法测得的土壤钾素含量与作物吸钾量之间有良好的相关性^[31-32],本文研究结果也表明四苯硼钠钾与油菜相对产量和相对吸钾量间的相关性均达极显著水平,且相关系数最大,这主要是因为四苯硼钠法是通过 Na^+ 交换土壤矿物层间 K^+ 而后由 BPh_4^- 将溶液中的 K^+ 沉淀,其对矿物晶格架构的破坏能力较沸硝酸法弱,因此其提取能力要强于醋酸铵法却没有沸硝酸法那么强烈。因此该法提取土壤钾素的过程类似于植物吸收土壤有效钾的过程,但其操作步骤较为繁琐且耗时较长,如何将四苯硼钠法和醋酸铵法有效地结合起来用于土壤钾素的测定有待进一步的研究

与探讨。

3.2 不同形态土壤钾素的生物有效性

土壤各形态钾的含量及其相对活性决定了土壤钾素对作物的有效性。其中对植物生长发育起到关键作用的主要是交换性钾和非交换性钾。一般以速效钾为主要指标同时考虑缓效钾的含量来评价土壤钾素对当季作物的有效性。本研究中,速效钾和缓效钾 B 与油菜相对产量和相对吸钾量间呈极显著相关关系,而缓效钾 A 与相对产量无明显相关关系,与相对吸钾量有极显著相关关系,但其相关系数最小。3 种形态钾素与油菜相对产量和相对吸钾量间的相关性大小均为:缓效钾 B > 速效钾 > 缓效钾 A,这与对应的浸提剂测得的土壤钾素生物有效性大小一致,即四苯硼钠法测得缓效钾对作物有较好的有效性,且缓效钾对作物的贡献大于速效钾,说明当速效钾含量较低时,作物吸收的钾大部分来源于缓效钾,并对作物的生长起着关键性作用。而缓效钾 A 与油菜对钾的效应相关性最差,且与相对产量无明显相关性,这可能是由于沸硝酸法的提取剂破坏性较强,使其提取的对作物无效的缓效钾量过多,而使其有效性降低。

3.3 土壤钾素丰缺指标的建立

指标的确定和测试方法的选择是建立土壤钾素丰缺指标的核心。通常以作物相对产量的 50%、75% 和 95% 时的土壤养分含量作为土壤养分的丰缺指标^[33],而 Cate 和 Nelson^[21]则以相对产量 90% 时的土壤养分含量作为土壤养分丰缺临界值指标。此外,由于油菜的单产水平及土壤有效养分含量的提高,使得油菜籽粒相对产量低于 75% 的田块相对较少,因此本研究对指标的标准做了相应的调整,以相对产量 80%、90% 和 95% 时的土壤钾素含量为标准将土壤钾素丰缺指标分为“低”、“中”、“高”和“极高”4 个等级。本文研究结果表明土壤醋酸铵钾“低”、“中”、“高”和“极高”指标分别为 < 45 mg kg⁻¹、45 ~ 115 mg kg⁻¹、115 ~ 190 mg kg⁻¹ 和 > 190 mg kg⁻¹。根据资料统计,20 世纪 80 年代土壤速效钾极缺、缺乏、中级和适量的指标分别为 < 54 mg kg⁻¹、54 ~ 75 mg kg⁻¹、75 ~ 95 mg kg⁻¹、> 95 mg kg⁻¹^[34]。可见,目前土壤醋酸铵钾的中级和适量的指标有所提高,说明以往的土壤钾素丰缺指标已不适用于现代农业生产的需求。这主要是由于高产品种的推广应用,使其需钾量提高,此外重化肥轻有机肥亦会使土壤钾素的有效性降低。近年来王火焰等^[9]认为四苯硼钠法是较好地评价土壤

有效钾的方法,并在盆栽试验上得到验证,本研究结果也表明四苯硼钠法较醋酸铵法能更好地评价土壤供钾能力,因此以四苯硼钠钾含量作为土壤钾素丰缺指标,其“低”、“中”、“高”和“极高”指标分别为 < 125 mg kg⁻¹、125 ~ 415 mg · kg⁻¹、415 ~ 755 mg kg⁻¹ 和 > 755 mg kg⁻¹。

4 结 论

本文研究结果表明,不同浸提剂测得的土壤钾素含量范围有所差别,即沸硝酸钾含量 > 四苯硼钠钾含量 > 醋酸铵钾含量,说明不同方法的提取能力有所不同。3 种方法中四苯硼钠法和醋酸铵法均为评价当季土壤供钾能力及土壤钾素有效性的较好方法,其中又以四苯硼钠法更好。以相对产量和土壤钾素含量建立对数模型,并以相对产量 < 80%、80% ~ 90%、90% ~ 95%、> 95% 将土壤钾素分为“低”、“中”、“高”和“极高”4 个丰缺等级。其中土壤醋酸铵钾和四苯硼钠钾的“低”指标分别为 45 mg kg⁻¹ 和 125 mg kg⁻¹，“中”指标分别为 45 ~ 115 mg kg⁻¹ 和 125 ~ 415 mg kg⁻¹，“高”指标分别为 115 ~ 190 mg kg⁻¹ 和 415 ~ 755 mg kg⁻¹，“极高”指标分别为 190 mg kg⁻¹ 和 755 mg kg⁻¹。

参 考 文 献

- [1] 陆允甫,周鸣铮. 红壤旱地速效钾测定方法与指标的研究. 浙江农业科学,1986(4):162—166. Lu Y F, Zhou M Z. Study on determination method for available potassium and index in upland field (In Chinese). Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 1986(4):162—166
- [2] 王火焰,朱树国,周健民,等. 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. Wang H Y, Zhu S G, Zhou J M, et al. A discussion on the possibility of accurate quantifying the variation of available K in the soils by common methods (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(5):954—960
- [3] 谢建昌,周健民,Hardter R. 钾与中国农业. 南京:河海大学出版社,2000. Xie J C, Zhou J M, Hardter R. Potassium in Chinese agriculture (In Chinese). Nanjing: Hohai University Press, 2000
- [4] 戴自强,李明德. 旱地红壤有效钾测定方法的研究. 土壤学报,1997,34(3):336—343. Dai Z Q, Li M D. Study on determination methods for available potassium in upland field (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(3):336—343
- [5] 谢建昌,杜承林. 土壤钾素的有效性及其评定方法的研究. 土壤学报,1988,25(3):271—280. Xie J C, Du C L. Studies on availability of potassium in soils and its evaluating methods (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1988, 25(3):271—280

- [6] Cox A E, Joern B C, Brouder S M, et al. Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 (4) : 902—911
- [7] 王火焰, 朱树国, 周健民, 等. 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. Wang H Y, Zhu S G, Zhou J M, et al. Accurate quantification of variation of available K in soil with NaBPh₄ extraction method (In Chinese). *Soils*, 2007, 39 (2) : 231—237
- [8] Wang H Y, Sun H X, Zhou J M, et al. Evaluating plant-available potassium in different soils using a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Science*, 2010, 175 (11) : 544—551
- [9] Wang H Y, Sun H X, Zhou J M, et al. Potassium extracting power, a key factor determine the efficiency of the sodium tetraphenylboron method to evaluate soil K availability to plant//Proceeding of 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australia. 2010:231—234
- [10] 沈钦华, 王火焰, 周健民, 等. 四苯硼钠溶液中含钾矿物非交换态钾的释放特性研究. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (2) : 477—485. Shen Q H, Wang H Y, Zhou J M, et al. Release characters of non-exchangeable potassium from potassium bearing minerals in NaBPh₄ solutions (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (2) : 477—485
- [11] 刘宏鸽, 王火焰, 周健民, 等. 不同有效钾提取方法的原理与效率比较. *土壤*, 2012, 44 (2) : 242—252. Liu H G, Wang H Y, Zhou J M, et al. Comparing principles and efficiency of different methods for available potassium extraction (In Chinese). *Soils*, 2012, 44 (2) : 242—252
- [12] 张福锁. 测土配方施肥技术要览. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. Zhang F S. Outline for the technology of soil testing and fertilizer recommendation (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2006
- [13] Heckman J R, Jokela W, Morris T, et al. Soil test calibration for predicting corn response to phosphorus in the northeast USA. *Agronomy Journal*, 2006, 98 (3/4) : 280—288
- [14] Gascho G J, Parker M B. Nitrogen, phosphorus and potassium fertilization of a coastal plain cotton-peanut rotation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37 (10) : 1485—1499
- [15] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998. Soil Survey Office of China. The soil of China (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1998
- [16] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2009. Zhang F S, Chen X P, Chen Q, et al. Fertilization guide for the main crops of China (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2009
- [17] 张洋洋, 鲁剑巍, 邹娟, 等. 冬油菜施钾的增产效果和肥料利用率研究. *中国土壤与肥料*, 2013 (5) : 51—55. Zhang Y Y, Lu J W, Zou J, et al. Effect of potassium fertilizer on yield increase and potassium nutrient utilization for winter rapeseed (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013 (5) : 51—55
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [19] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料. 上海: 上海科学技术出版社, 1994: 431—450. Institute of Soil and Fertilizers, Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Fertilizers in China (In Chinese)*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994: 431—450
- [20] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系. *中国农技推广*, 2006, 22 (4) : 36—39. Chen X P, Zhang F S. Establishing technical index system of soil testing and fertilizer recommendation from “3414” experiments (In Chinese). *China Agricultural Technology Extension*, 2006, 22 (4) : 36—39
- [21] Cate R B, Nelson L A. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, 35 (4) : 658—660
- [22] 陆允甫, 吕晓男. 中国测土施肥工作的进展和展望. *土壤学报*, 1995, 32 (3) : 241—251. Lu Y F, Lü X N. Progress and prospect in fertilizer recommendation based on soil testing in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32 (3) : 241—251
- [23] 周鸣铮. 土壤钾有效度测定方法研究的进展(上). *土壤学进展*, 1979 (4) : 39—50. Zhou M Z. Advances in determination method of soil potassium availability (In Chinese). *Advances in Soil Science*, 1979 (4) : 39—50
- [24] 沈钦华, 王火焰, 周健民, 等. 含钾矿物中钾的释放及其与溶液环境中离子种类的关系. *土壤*, 2009, 41 (6) : 862—868. Shen Q H, Wang H Y, Zhou J M, et al. Dynamic release of potassium from potassium bearing minerals as affected by ion species in solution (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 (6) : 862—868
- [25] 游植森. 土壤速效钾测定方法的比较研究. *土壤肥料*, 1992 (4) : 45—48. You Z L. Comparative study on the determination method of soil available potassium (In Chinese). *Soil and Fertilizers*, 1992 (4) : 45—48
- [26] Eckert D J. Site-specific soil tests and interpretations for potassium//Havlin J L, Jacobsen J S. *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSAJ Special Publication, 1994 (40) : 163—171
- [27] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展. *华中农业大学学报*, 2007, 26 (6) : 907—913. Cong R H, Li X K, Lu J W. Advances in research on influence factors of soil potassium transformation (In Chinese). *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26 (6) : 907—913
- [28] Lauren F V, Carrie A M L, Todd W A. Effect of sampling time on soil test potassium levels//Proceeding of the 2010 Wisconsin crop management conference. Wisconsin: University of Wisconsin-Madison, 2010: 32—38
- [29] Shen S, Stucki J W. Effect of iron oxidation state on the fate and behavior of potassium in soils// Havlin J L, Jacobsen J S. *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSAJ Special Publication, 1994 (40) : 173—185
- [30] 鲍士旦. 土壤有效钾测定方法的研究进展. *土壤学报*, 1988, 25 (3) : 269—274. Bao S D. The advancement of determination method of soil available potassium (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1988, 25 (3) : 269—274
- [31] Fernandez F G, Brouder S M, Beyrouy C A, et al. Assessment of plant-available potassium for no-till, rainfed soybean. *Soil Science*

- Society of America Journal, 2008, 72(4):1085—1095
- [32] López-Piñero A, Navarro A G. Potassium release kinetics and availability in unfertilized vertisols of southwestern Spain. *Soil Science*, 1997, 162(12):912—918
- [33] Hegeny M A, McPharlin I R, Jeffery R C. Using soil testing and petiole analysis to determine phosphorus fertilizer requirements of potatoes (*Solanum tuberosum* L. cv. Delaware) in the Manjimup-Pemberton region of Western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2000, 40(1):107—117
- [34] 刘昌智, 涂运昌. 油菜氮磷钾肥配合施用的研究//中国农业科学院土壤肥料研究所. 国际平衡施肥学术讨论会论文集. 北京:农业出版社, 1989:215—220. Liu C Z, Tu Y C. Study on combined application of nitrogen, phosphorus and potassium to rapeseed (In Chinese)//Institute of Soil and Fertilizers, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Symposium of international colloquium of balanced fertilizer. Beijing: Agriculture Press, 1989:215—220

COMPARISON BETWEEN SOIL POTASSIUM DETERMINATION METHODS IN AVAILABILITY OF THE POTASSIUM THEY EXTRACTED

Zhang Yangyang Lu Jianwei[†] Wang Zheng Zou Juan Wang Yin Ren Tao Cong Rihuan Li Xiaokun

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation

(Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

Abstract Based on the grain yields and plant K uptakes of the 122 K fertilizer field experiments conducted on rape as reference, three different extractants (i. e., 1 mol L⁻¹ neutral NH₄OAc, 1 mol L⁻¹ boiling HNO₃, 0.2 mol L⁻¹ NaBPh₄) were used to extract soil K in the experiment soils, and the data were sorted by extractants and by available K and slowly available K. Then correlation analysis was done of the data to define which one was the accurate determination method for soil available K and corresponding indices for soil K abundance and deficiency were established. It was found that the three extractant varied in extraction capacity and displayed an order of NH₄OAc-K > Boiling HNO₃-K > NaBPh₄-K. The soil Ks extracted with NH₄OAc and NaBPh₄ were higher in bio-availability and NaBPh₄ the highest. For winter rape fields in the Yangtze River valley, the index of “Low”, “Medium”, “High” and “Very High” for soil NH₄OAc-K and NaBPh₄-K was < 45 mg kg⁻¹, 45 ~ 115 mg kg⁻¹, 115 ~ 190 mg kg⁻¹ and > 190 mg kg⁻¹; and < 125 mg kg⁻¹, 125 ~ 415 mg kg⁻¹, 415 ~ 755 mg kg⁻¹ and > 755 mg kg⁻¹, respectively. Suumarization of the results showed that the relative yield and relative plant uptake was highly significantly correlated with soil K content extracted with the NaBPh₄ and NH₄OAc method. The soil K critical indices established using the methods and through the field experiments can be used as reference for soil test based fertilizing recommendation for winter rape production in the valley. Moreover, it is essential to pay more attention to rational K fertilization in the region.

Key words Rape; Soil available K; Extractant; NaBPh₄ method; Bio-availability; Soil K abundant and deficiency indices

(责任编辑:卢 萍)