

DOI: 10.11766/trxb201901140585

陈勇, 邹献中, 卢瑛, 黄伟濠, 贾重建, 李博, 陈丽君, 阳洋. 磁力搅拌法改进土壤阳离子交换量测定的研究[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 508–514.

CHEN Yong, ZOU Xianzhong, LU Ying, HUANG Weihao, JIA Chongjian, LI Bo, CHEN Lijun, YANG Yang. Study on Improving Soil CEC Determination by Magnetic Stirring Method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (2): 508–514.

## 磁力搅拌法改进土壤阳离子交换量测定的研究\*

陈勇<sup>1, 2</sup>, 邹献中<sup>2</sup>, 卢瑛<sup>1†</sup>, 黄伟濠<sup>1</sup>, 贾重建<sup>1</sup>, 李博<sup>1</sup>, 陈丽君<sup>2</sup>, 阳洋<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510642; 2. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部南方植物营养与肥料重点实验室, 广东省农业资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640)

**摘要:** 针对传统土壤阳离子交换量测定方法中的玻璃棒搅拌所存在的分析效率低的问题, 开展了运用磁力搅拌替代玻璃棒搅拌的探索性研究。通过平行性实验、条件实验、实验室间对比和不同黏粒含量土壤的 CEC 测定结果检验, 分析了磁力搅拌法的精准度、可操作性、稳定性和适用性。结果表明, 磁力搅拌法测定土壤 CEC 的准确度、精密度均不低于甚至高于玻璃棒搅拌方法, 土壤 CEC 测定值与土壤标准物质认定值吻合。当搅拌时间在 1 min、搅拌速度 850 r·min<sup>-1</sup> 以上时, 延长搅拌时间和提高搅拌速度对分析结果无影响。不同实验室间测定结果相关性好、没有显著性差异。相比传统的玻璃搅拌法, 磁力搅拌法具有操作简单、高效, 测定结果稳定性好、精准度高等优点, 非常适用于大批量土壤 CEC 的测定。

**关键词:** 土壤阳离子交换量; 磁力搅拌; 搅拌条件; 精准度; 黏质土壤

中图分类号: S151.9<sup>+</sup>3 文献标识码: A

## Study on Improving Soil CEC Determination by Magnetic Stirring Method

CHEN Yong<sup>1, 2</sup>, ZOU Xianzhong<sup>2</sup>, LU Ying<sup>1†</sup>, HUANG Weihao<sup>1</sup>, JIA Chongjian<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, CHEN Lijun<sup>2</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation; Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to resolve the problem of low efficiency of the measurement of soil cation exchangeable capacity (CEC) with the traditional glass rod stirring method, an experiment was designed to stir suspensions with a magnetic stirrer instead of glass rod. Parallel tests different in controlled condition were carried out in different labs to determine CEC of soils different in clay

\* 国家科技基础性工作专项重点项目 (2014FY110200)、国家自然科学基金项目 (41877008) 和广东省自然科学基金项目 (2015A030313567) 资助 Supported by the Special Project of National Science and Technology Basic Research (No. 2014FY110200), the National Natural Sciences Foundation of China (No. 41877008) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province of China (No. 2015A030313567).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: luying@scau.edu.cn

作者简介: 陈勇 (1984—), 男, 广东雷州市人, 硕士研究生, 主要从事土壤化学研究。Email: yongchen223@163.com

收稿日期: 2019-01-14; 收到修改稿日期: 2019-05-21; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-06-10

content with the magnetic stirring method for comparison between the tests in accuracy, operability, stability and applicability of the measurements with the method. Results show that the magnetic stirring method was not lower or even magnetic stirring method higher than the glass rod stirring method in accuracy and precision of the CEC measurement. What was obtained with the former was highly in consistency with the values of the certified reference materials. When stirring of the suspension went on over 1 min at no less than  $850 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , duration and speed of the stirring did not have much effect on soil CEC determination, and neither the labs where the tests were conducted. No significant difference was found between labs in CEC measurement. Compared with the traditional glass rod stirring method, the magnetic stirring method has such merits as simple in operation and high in efficiency, stability and precision, when used to measure soil CEC, and is highly suitable for use to determine soil CEC of large batches of soil samples.

**Key words:** Soil cation exchange capacity; Magnetic stirring; Stirring condition; Accuracy; Clayey soil

土壤阳离子交换量 (CEC) 是度量土壤所带负电荷的容量指标, 可反映土壤保肥性、缓冲性能和环境容量, 是表征土壤肥力质量和环境质量的重要指标之一<sup>[1-2]</sup>, 在耕地质量调查与评价和土壤污染调查中是必测项目。因此, 准确、快速高效地测定土壤阳离子交换量是非常重要的。

面临测定大批量土壤 CEC 时, 高效精准测定关键核心步骤在哪?  $\text{NH}_4^+$  与土壤胶体表面阳离子吸附交换时, 胶体—溶液界面间产生冗余铵离子, 95% 乙醇清洗  $\text{NH}_4^+$  彻底与否是测定 CEC 精准性的关键步骤, 往往因土壤样品胶结黏附, 阻碍土壤分散, 致使在测定过程中乙醇清洗不充分, 导致  $\text{NH}_4^+$  残留而使测定结果明显偏高<sup>[3]</sup>。因此, 需要一种能有效、快速地搅拌分散土壤的方法。近些年学者研究阳离子吸附交换后分散土壤及处理冗余  $\text{NH}_4^+$  方法有: 玻璃搅拌法<sup>[1, 3-7]</sup>、震荡法<sup>[8-9]</sup>、凯氏氮仪配合漩涡振荡法<sup>[10]</sup>和全自动淋洗法<sup>[11]</sup>等。玻璃棒搅拌法是一种经典吸附交换搅拌及分散土壤的方法, 应用广泛, 但因人工操作, 容易增加人为误差; 在处理质地黏重的土壤时, 玻璃棒搅拌法、震荡法、涡旋震荡法和淋洗法均很难有效、快速地将土壤分散成泥浆状, 分散土壤费时费力、批量化效率较低。

此外, 针对国家行业标准<sup>[3, 5-6]</sup>中, 没有提及测定土壤 CEC 过程中的搅拌速度、搅拌时间和上述方法在处理冗余铵离子中的不足, 本研究对土壤阳离子吸附交换搅拌操作方法进行了改进, 采用磁力搅拌器加搅拌子的方式替换现行的行业标准中玻璃棒搅拌, 分别研究了搅拌速度、搅拌时间和黏粒含量对土壤 CEC 测定结果的影响, 并展开了不同实验室对比验证实验, 籍以提出一种高效、精准的土壤 CEC 测定方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

选取 4 个土壤有效态成分分析标准物质 GBW07412、GBW07416a、GBW07417、GBW07458 和 8 个黏粒含量不同的土壤, 供试土壤基本情况如表 1。

### 1.2 仪器材料

凯氏定氮仪 (Foss Kjeltac 8200); 数字滴定器 (普兰德 BRAND Titrette-25 mL); 磁力搅拌器 (JOANLAB SH-4C 型); 100 mL 离心管; 托盘天平; 天平 (精确至 0.0001g); 离心机 (嘉文 JW-1032 低速离心机); 梭形搅拌子 (2 cm); 100 mL 烧杯 (内镶海绵); 磁铁; 消化管; 250 mL 三角瓶。

### 1.3 试剂溶液

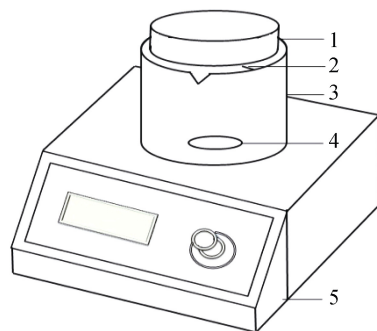
所用试剂参考 NY/T 295-1995<sup>[6]</sup>。

### 1.4 操作步骤

阳离子交换过程: 称取过 0.25 mm 筛的风干土壤 2.00 g 于 100 mL 塑料离心管中, 同时放入 2 cm 长梭形磁力搅拌子。往离心管中加入约 30 mL  $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  乙酸铵溶液, 将离心管放入内镶硬海绵的 100 mL 高脚烧杯中固定, 再将烧杯放置于磁力搅拌器上 (图 1), 以转速  $950 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  (调节转速使离心管内液面形成大约 1 cm 深漩涡, 转速大小适中, 不宜太大, 以防溶液溅出), 进行搅拌 1 min。取出离心管放置托盘天平平衡之后放入离心机中, 转速为  $4\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 离心 5 min。离心后上清液倒入 200 mL 容量瓶 (用于测定交换性盐基离子)。再加入 30 mL 乙酸铵, 重复上述操作步骤 3 次, 对于质地黏重土壤则需在重复交换前用强磁性磁铁松动搅拌子, 手拿离心管在磁力搅拌器上成  $45^\circ$  角慢慢旋转

表 1 供试土壤的颗粒组成和质地类别

样品编号 Sample No.	pH	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%	土壤质地 Soil texture
1	4.18	79.5	14.6	5.9	壤质砂土 Loamy sand
2	5.66	62.5	28.6	8.9	砂质壤土 Sandy loam
3	6.35	41.0	45.9	13.2	壤土 Loam
4	4.81	30.5	47.3	22.2	壤土 Loam
5	4.97	12.6	56.1	31.2	粉质黏壤土 Silt clay loam
6	4.94	20.8	35.8	43.4	黏土 Clay
7	6.23	5.7	32.0	62.4	黏土 Clay
8	5.66	1.4	16.0	82.6	黏土 Clay



- 1、100ml塑料离心管Plastic centrifuge tube
- 2、0.4cm厚硬海绵Hard sponge
- 3、100ml高脚烧杯Tall beaker
- 4、2cm锥形搅拌子Cone stirrer
- 5、磁力搅拌器Magnetic stirrer

图 1 磁力搅拌法实验装置图

Fig. 1 Sketch of the experimental device used by the magnetic stirring method

分散,使粘附在离心管上的土壤完全搅散成泥浆状。取最后一次的上清液 5 mL,加入 pH=10 缓冲溶液 1 mL,再加少许 K-B 指示剂,如呈蓝色,表示无钙离子;如呈紫红色,表示有钙离子,需继续重复上述搅拌离心步骤,直至上清液无钙离子为止。

95%乙醇清洗过程:沿着离心管内壁加入约 40 mL 95%乙醇,清洗内壁上铵离子,放在磁力搅拌器上搅拌分散 1 min,取出离心,弃去酒精溶液。如此反复用酒精清洗 3~5 次,直至乙醇溶液中无铵离子为止(用纳氏试剂检验)。彻底清除冗余铵离子,对获得准确的分析结果非常关键。对于质地黏重土壤需充分分散,切不可有小土团存在,否则会使测定结果偏高。

$\text{NH}_4^+$ 测定过程:用去离子水冲洗离心管外壁,防止多余的铵离子二次污染,再往离心管内加入约 15 mL 去离子水,用磁铁松动搅拌子,慢慢搅拌分散土壤成泥浆状,用镊子取出搅拌子,再用少许去离子水清洗干净搅拌子,并将离心管中土壤样品完

全转移至消化管中,使用去离子水总体积控制在 80 mL。向消化管中加入 1 g 左右固体氧化镁,在 250 mL 三角瓶中加入 10 mL  $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  硼酸溶液作为吸收液,将消化管装入凯式定氮仪进行蒸馏。取下三角瓶,加入 2 滴甲基红-溴甲酚绿混合指示剂,用  $0.03 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  盐酸标准溶液滴定。同时做空白试验。

### 1.5 数据处理

使用 Excel 2010、Origin2018 进行数据处理和图表制作,采用 SPSS19.0 软件对实验室内测定数据进行配对样本 t 检验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁力搅拌法的准确度

鉴于准确度对于测定方法的重要性,运用磁力搅拌法处理 4 种土壤有效态成分分析标准物质,测定 CEC 的同时,也对交换性钙、镁离子进行测定,每种标准物质进行了 5 次平行实验,测定结果和相

对标准偏差 (RSD%) 分别列于表 2、表 3 和表 4。

测定结果显示, 磁力搅拌法对 4 种土壤有效态成分分析标准物质的 CEC 和交换性钙、镁测定结果

均与认定值吻合,  $RSD < 5\%$ , 表明磁力搅拌法使土壤中的交换性阳离子被充分交换出来, 而且不损失, 准确度与精密度均佳。

表 2 磁力搅拌法测定 CEC 的准确度

Table 2 Accuracy of the measurement of CEC with the magnetic stirring method

标准物质 Certified reference materials	pH	CEC 测定值/ (cmol·kg <sup>-1</sup> ) Measured value of CEC						认定值 Validated value/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	相对标准 偏差 RSD/%
		重复 1	重复 2	重复 3	重复 4	重复 5	平均值		
		Duplicate 1	Duplicate 2	Duplicate 3	Duplicate 4	Duplicate 5	Mean value		
GBW07412	5.98	17.2	17.4	16.9	17.0	16.8	17.1	17.3±2.1	1.5
GBW07416a	5.44	10.0	10.0	10.4	10.2	9.67	10.1	10.0±0.6	2.7
GBW07417	4.71	6.03	5.80	5.67	5.70	5.96	5.83	6.0±0.5	2.7
GBW07458	6.14	31.3	30.8	31.2	30.7	30.9	31.0	31.0±1	0.9

表 3 磁力搅拌法测定交换性钙的准确度

Table 3 Accuracy of the measurement of exchangeable Ca<sup>2+</sup> with the magnetic stirring method

标准物质 Certified reference materials	交换性 Ca <sup>2+</sup> 测定值 /cmol (1/2Ca <sup>2+</sup> )·kg <sup>-1</sup> Measured value of exchangeable Ca <sup>2+</sup>						认定值 Validated value/ (cmol (1/2Ca <sup>2+</sup> )·kg <sup>-1</sup> )	相对标准偏 差 RSD/%
	重复 1	重复 2	重复 3	重复 4	重复 5	平均值		
	Duplicate 1	Duplicate 2	Duplicate 3	Duplicate 4	Duplicate 5	Mean value		
GBW07412	14.4	14.5	14.6	14.7	14.4	14.5	14.1±1.5	1.1
GBW07416a	1.45	1.43	1.43	1.46	1.48	1.45	1.6±0.2	1.5
GBW07417	2.31	2.26	2.32	2.38	2.36	2.33	2.6±0.7	2.1
GBW07458	22.1	22.6	21.9	23.3	22.2	22.4	22.5±1.1	2.5

表 4 磁力搅拌法测定交换性镁的准确度

Table 4 Accuracy of measurement of exchangeable Mg<sup>2+</sup> with the magnetic stirring method

标准物质 Certified reference materials	交换性 Mg <sup>2+</sup> 测定值/cmol (1/2Mg <sup>2+</sup> )·kg <sup>-1</sup> Measured value of exchangeable Mg <sup>2+</sup>						认定值 Validated value/ (cmol (1/2Mg <sup>2+</sup> )·kg <sup>-1</sup> )	相对标准偏 差 RSD/%
	重复 1	重复 2	重复 3	重复 4	重复 5	平均值		
	Duplicate 1	Duplicate 2	Duplicate 3	Duplicate 4	Duplicate 5	Mean value		
GBW07412	3.70	3.64	3.85	3.52	3.73	3.69	3.54±0.24	3.3
GBW07416a	0.39	0.38	0.38	0.39	0.39	0.39	0.42±0.05	1.5
GBW07417	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25	0.24	0.27±0.06	0.7
GBW07458	5.27	5.22	5.61	5.70	5.32	5.43	5.4±0.2	4.0

## 2.2 搅拌时间对测定结果的影响

使用磁力搅拌法, 搅拌时间是非常重要的, 时间不够, 可能导致离子交换不彻底; 时间过长, 会

导致测定效率的不必要降低。分别选择了 4 种土壤有效态成分分析标准物质, 设定了 1 min、3 min、5 min 三个搅拌时间处理, 各 3 次重复, 以了解搅拌

时间对测定结果的影响。

图 2 结果表明, 搅拌 1 min、3 min 和 5 min, CEC 结果均在认定值范围内, 当搅拌时间在 1 min 以上时, 延长搅拌时间并不会导致测定结果的偏离, 这表明磁力搅拌法应用于质地黏重的土壤时, 即使延长搅拌分散时间, 对结果也无影响。

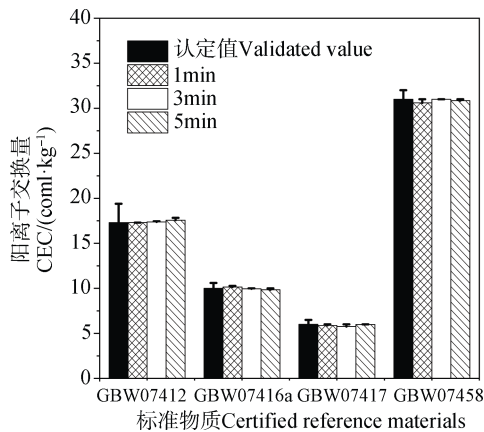


图 2 不同搅拌时间对 CEC 测定结果的影响

Fig. 2 Effect of stirring time on CEC measurement

### 2.3 搅拌速度对测定结果的影响

鉴于磁力搅拌法涉及搅拌速度的问题, 而搅拌速度可能间接影响阳离子交换强度, 因此针对搅拌速度进行相关对比实验。由于对不同黏粒含量的土壤, 设定相同的转速也可能会导致搅拌子的实际转速不一致, 因此在本研究中以液面边缘与中心的液面差值作为搅拌速度的判断依据。预备试验结果显示, 当搅拌土壤产生 0.5~1.5 cm 液面差时, 对应的搅拌速度在 850~1050 r·min<sup>-1</sup> 之间, 故分别设置了搅拌速度为 850 r·min<sup>-1</sup>、950 r·min<sup>-1</sup> 和 1050 r·min<sup>-1</sup> 的 3 次重复实验, 明确搅拌速度对 CEC 测定结果的影响。

图 3 结果显示, 只要磁力搅拌出现液面差, 即只要在搅拌时有一定的搅拌漩涡存在, CEC 测定值均在标准物质认定值范围之内, 间接证明搅拌强度增加或减少对 CEC 测定结果没有明显的影响。国家行业标准中的玻璃棒搅拌法也从某种程度上证明, 不同人搅拌强度可能有所不同, 但对结果无实际影响。

### 2.4 黏粒含量对测定结果的影响

土壤黏粒含量与黏附力呈正相关性, 质地黏重土壤较砂壤土黏附力大几倍甚至几十倍<sup>[12]</sup>, 黏粒不仅能吸附阳离子, 而且由于黏粒胶结和粘附会影响

CEC 的精密度。针对上述情况, 以不同黏粒含量土壤为对象, 进行了评价磁力搅拌法与玻璃棒搅拌法精密度的对比试验。

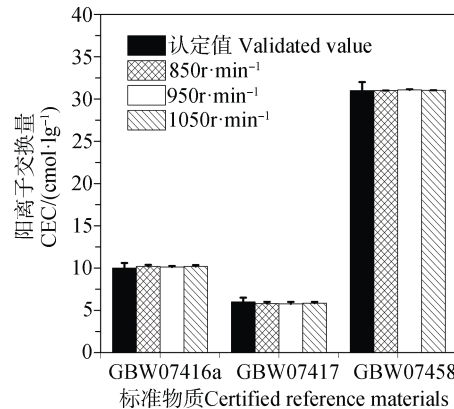


图 3 不同搅拌转速对 CEC 测定结果的影响

Fig. 3 Effect of stirring speed on CEC measurement

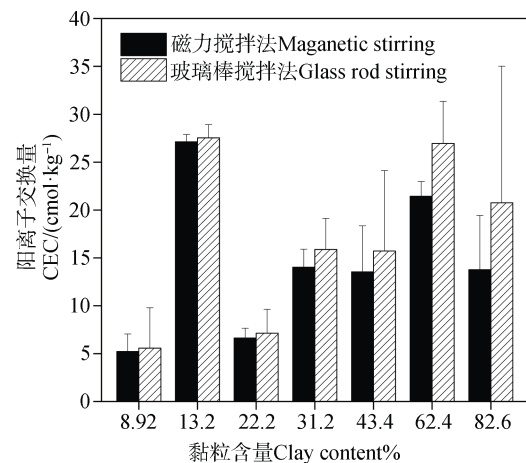


图 4 两种搅拌方法测定的不同黏粒含量土壤 CEC 值与 RSD 比较

Fig. 4 Comparison between the two measuring methods in determination of CEC value and RSD in soils different in clay content

图 4 结果表明, 除黏粒含量为 82.6% 的土壤外, 磁力搅拌法测定土壤 CEC 结果 RSD 值均 < 5%。对于玻璃棒搅拌法, 只有黏粒含量 < 43.4% 的土壤 RSD < 5%, 而黏粒含量 > 43.4% 的土壤 RSD > 5%, 且测定结果不稳定, 说明玻璃棒搅拌法处理黏粒含量高的土壤时, CEC 的测定结果精密度不如磁力搅拌法。图 4 结果同时显示, 相比磁力搅拌法, 玻璃搅拌法 CEC 测定结果和 RSD 均普遍偏高。相同测定条件下, 玻璃搅拌法 RSD 变幅范围为 1.40%~14.3%, 而磁力搅拌法为 0.81%~5.66%, 特别当土

壤黏粒含量>43.4%时, 两者的 RSD 值差异更为明显。这表明相比磁力搅拌法, 玻璃搅拌法精密度偏低, 因为土壤黏粒含量越高, 土壤的黏附力越大<sup>[12]</sup>, 土壤容易胶结, 使得玻璃棒搅拌分散土壤困难, 导致溶液中冗余铵离子不易被 95%乙醇洗净, 从而引起测定结果偏高。磁力搅拌法 CEC 测定结果 RSD 值相对较小, 精密度高, 主要因为搅拌均匀且高效、快速地分散离心后土壤, 使乙醇能充分洗净土壤溶液中冗余的铵离子, 结果精准。

### 2.5 两种搅拌法分析效率对比

玻璃搅拌法在处理土壤样品后, 需清洗干净玻璃棒, 才能离心, 对于黏质土壤, 清洗难度增加, 需要时间多, 而且容易导致土壤颗粒损失。磁力搅拌法省去了清洗步骤, 溶液平衡后, 搅拌子可以留在离心管中进行离心, 而且一个分析人员可以同时操作多台磁

力搅拌器, 或者采用多通道磁力搅拌器, 省时省工。相同土壤样品数量采用两种不同搅拌法, 磁力搅拌法至少能节省 50%时间。因此, 磁力搅拌法分析效率明显高于玻璃搅拌法, 适合大批量土壤样品分析。

### 2.6 不同实验室测定结果对比

土壤阳离子交换量的测定属于常规测定项目, 进行实验室间测定结果比较是必要的。不同实验室间对同一批样品均采用磁力搅拌法测定 CEC 的结果表明(表 5), 实验室内测定结果绝对偏差小, 符合国家行业标准允许绝对偏差范围<sup>[3]</sup>。采用 SPSS19.0 软件对数据进行配对样本 t 检验的显著性分析, 不同实验室间测定结果的相关性极显著 ( $r=0.993$ ,  $P<0.0001$ ), 相同土壤样品测定结果没有显著性差异 ( $P>0.05$ ), 这表明磁力搅拌法具有稳定性好和可移植性强的特点。

表 5 实验室内磁力搅拌法 CEC 测定值比较

Table 5 Comparison between laboratories in CEC measured with the magnetic stirring method

样品编号 Sample No.	黏粒含量 Clay/%	CEC 测定值/cmol·kg <sup>-1</sup>			绝对偏差 /cmol·kg <sup>-1</sup> Absolute deviation
		Measured values of CEC			
		实验室 1 Lab 1	实验室 2 Lab 2	平均值 Mean value	
1	5.92	5.62	4.70	5.16	0.46
2	8.92	5.22	4.40	4.81	0.41
3	13.2	27.1	28.4	27.8	0.64
4	22.2	6.62	6.95	6.79	0.16
5	31.2	14.0	14.6	14.3	0.30
6	43.4	13.5	11.3	12.4	1.10
7	62.4	21.4	21.3	21.4	0.09
8	82.6	13.8	12.9	13.3	0.43

## 3 结 论

磁力搅拌法用于土壤 CEC 测定, 结果的准确度高, 土壤 CEC 测定值与土壤标准物质认定值吻合度高, 相对标准偏差 RSD<5%。搅拌时间为 1 min 和搅拌速度呈现液面差(即转速为 850 r·min<sup>-1</sup>)能满足实验要求, 搅拌时间和转速的增加对分析结果无显著影响。相比传统的玻璃搅拌法, 磁力搅拌法具有操作简单、减少人为操作误差等优点, 能高效分

散质地黏重的土壤, 分析结果的精密度高和稳定性好, 是一种高效快速测定土壤 CEC 的方法, 适合大批量土壤测定。

### 参 考 文 献

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 22—29  
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 22—29
- [2] 周碧青, 邱龙霞, 张黎明, 等. 基于灰色关联-结构方程模型的土壤酸化驱动因子研究. 土壤学报, 2018, 55

- (5): 1233—1242  
Zhou B Q, Qiu L X, Zhang L M, et al. Study on driving factors of soil acidification based on grey correlation-structure equation model. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (5): 1233—1242
- [ 3 ] LY/T 1243—1999. 森林土壤阳离子交换量的测定. 北京: 中国标准出版社, 1999
- [ 4 ] LY/T 1243—1999. Determination of cation exchange capacity in forest soil. Beijing: China Standard Press, 1999
- [ 5 ] Bao S D. Soil agrochemical analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 156—158. [鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 156—158.]
- [ 6 ] NY/T 1121.5—2006. Determination of cation exchange capacity in calcareous soils. Beijing: China Standard Press, 2006. [NY/T 1121.5—2006. 石灰性土壤阳离子交换量的测定. 北京: 中国标准出版社, 2006.]
- [ 7 ] NY/T 295—1995. Determination of cation exchange capacity and exchangeable salt base in neutral soil. Beijing: China Standard Press, 1996. [NY/T 295—1995. 中性土壤阳离子交换量和交换性盐基的测定. 北京: 中国标准出版社, 1996.]
- [ 8 ] National Agricultural Technology Promotion Center. Soil analysis technical specification. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 78—84. [全国农业技术推广中心. 土壤分析技术规范. 北京: 中国农业出版社, 2006: 78—84.]
- [ 9 ] Chu L, He B. Determining method of soil cation exchange capacity. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2009, 33 (1): 81—84. [褚龙, 贺斌. 土壤阳离子交换量的测定方法. 黑龙江环境通报, 2009, 33 (1): 81—84.]
- [ 10 ] Zhang Y X, Li D, Zhang Z Y, et al. A comparison study of two methods for mensuration of soil cation exchange capacity. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2010, 38 (2): 45—49. [张彦雄, 李丹, 张佐玉, 等. 两种土壤阳离子交换量测定方法的比较. 贵州林业科技, 2010, 38 (2): 45—49.]
- [ 11 ] Shen C Y, Xing W Y. Research on the rapid determination of cation exchange capacity in soil. *China Soil and Fertilizer*, 2016 (5): 144—147. [沈纯怡, 邢伟银. 快速检测土壤阳离子交换量的研究. 中国土壤与肥料, 2016 (5): 144—147.]
- [ 12 ] Shi B, Zhu X D, Lu G X, et al. Application of automatic leaching instrument to detect the soil cation exchange capacity. *Environment and Development*, 2017 (8): 139—140, 142. [史斌, 朱晓丹, 陆国兴, 等. 全自动淋洗仪在土壤阳离子交换量测定中的应用. 环境与发展, 2017 (8): 139—140, 142.]
- [ 13 ] Ren L Q. Soil adhesion mechanics. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011: 110—111. [任露泉. 土壤粘附力学. 北京: 机械工业出版社, 2011: 110—111.]

(责任编辑: 檀满枝)