

邢雨欣,袁红,吉香潼,等.湖南典型岩溶土壤 CEC、机械组成与矿物类型的响应[J].中国岩溶,2024,43(5):1076-1087.

DOI: 10.11932/karst2024y037

# 湖南典型岩溶土壤 CEC、机械组成与矿物类型的响应

邢雨欣<sup>1</sup>,袁红<sup>1,2</sup>,吉香潼<sup>1</sup>,段承龙<sup>1</sup>,蒋军<sup>1</sup>,刘单鹏<sup>1</sup>,刘鹏<sup>1</sup>

(1.湖南农业大学资源学院,湖南长沙 410128; 2.中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西桂林 541004)

**摘要:**为探究岩溶土壤 CEC 含量、机械组成与土壤矿物类型的关系,在湖南省典型岩溶区通过野外调查、挖掘、采集与描述石灰岩风化物母质发育的 32 个土壤剖面,室内分析 146 个样品的土壤理化性状,为岩溶土壤发育类型鉴定及改土培肥、生态修复奠定基础。结果表明:(1)湖南典型岩溶土壤 CEC 含量介于 6.99~36.03 cmol·kg<sup>-1</sup>,土壤保肥能力中等偏强;土壤机械组成以粉粒、黏粒为主,质地黏重,通透性较差。(2)研究区岩溶土壤的主要矿物类型为:硅质混合型、伊利石混合型、高岭石型、高岭石混合型、混合型。五种矿物类型土壤均为酸性土壤,不同矿物类型土壤的 pH、容重差异较小,但有机质含量差异较大;混合型土壤砂粒含量最高,硅质混合型土壤粉粒含量最高,高岭石土壤黏粒含量最高;CEC 与 ECEC 含量在伊利石混合型土壤中最多,在混合型土壤中含量最少。(3)土壤 CEC 与粉粒含量呈极显著负相关关系,与黏粒含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),土壤粉粒含量的降低或黏粒含量的增加均可显著提高阳离子交换量值。土壤 ECEC 与粉粒、黏粒均无显著相关性,但其与土壤 pH、有机质含量以及交换性 Ca<sup>2+</sup>、交换性 Mg<sup>2+</sup>均呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。土壤 CEC 与矿物类型无相关性,而 ECEC 与矿物类型呈极显著负相关( $P < 0.01$ )。典型岩溶区不同发育程度的土壤可以通过调节土壤黏粒与粉粒含量的比例来改善土壤质地,增加土壤肥力。

**关键词:**阳离子交换量;土壤颗粒组成;石灰岩母质

**创新点:**以往的土壤阳离子交换量只做保肥指标,土壤阳离子交换量与机械组成以往只在土壤肥力与养分方面做研究,本文将其与矿物类型研究结合,更好的定义土壤形成与演化。

**中图分类号:**P642.25; S153   **文献标识码:**A

**文章编号:**1001—4810 (2024) 05—1076—12

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

土壤的阳离子交换性能主要包括交换性阳离子组成、交换性酸、阳离子交换量、有效阳离子交换量、交换性盐基总量和盐基饱和度等指标。土壤阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC)是指带负电荷的土壤胶体通过静电引力所交换出来的各种阳离

子的总量,以每千克土壤的厘摩尔数(cmol·kg<sup>-1</sup>)表示<sup>[1]</sup>。土壤有效阳离子交换量(Effective Cation Exchange Capacity, ECEC)最能反映实际的负电荷情况,代表实际的阳离子交换量。土壤 CEC 是土壤物理、化学性质的综合体现,是反映土壤保肥能力以及缓冲能力的重要指标之一。因此土壤 CEC 通常被作为提高土壤质量、改善土壤肥力条件的重要依据<sup>[2]</sup>。

基金项目:自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室开放基金(KDL&Guangxi 202010);科技部国家重点研发计划(2022YFD1700103-306);湖南省教育厅重点项目(23A0185)

第一作者简介:邢雨欣(2001—),女,硕士研究生,研究方向为土壤形成过程与肥力质量演变。E-mail: 13130166741@163.com。

通信作者:袁红(1982—),女,副教授,研究方向为土壤质量演变。E-mail: brandyuan@163.com。

收稿日期:2024—05—27

近年来, 针对土壤阳离子交换量与其他理化性质间关系的研究备受关注。土壤阳离子交换量对土壤的影响可以通过分析土壤有机质含量、土壤酸碱度、阳离子交换量以及机械组成来判断<sup>[3]</sup>。岩溶区土壤养分受气候、母岩、地貌、地形、植被类型、人类活动等多种因子的影响, 具有较高的空间变异性<sup>[4]</sup>。刘贺永等<sup>[5]</sup>研究表明, 温带森林土壤阳离子交换量高和盐基饱和度水平都比较高, pH 比较稳定, 几乎不会出现土壤酸化的情况, 因为盐基离子对酸性物质具有缓冲作用。对于土壤有机质而言, 其负电荷含量的增加, 能够提高盐基离子含量, 进而促进与阳离子的交换, 并形成 ECEC, 这对有效养分和土壤肥力的增加起着重要作用, 从而促进植被的生长发育<sup>[6-7]</sup>, 并且植被的生长又会改善岩溶区土壤养分<sup>[8]</sup>, 显著提高其土壤肥力条件。

土壤是由形状大小不同的固体颗粒构成有疏松多孔介质的复杂自然体<sup>[9]</sup>, 土壤颗粒组成、分布、粒径大小、组合比例和排列状况直接影响植物生长<sup>[10]</sup>。粒径分布是土壤重要的物理性质之一, 它与土壤结构<sup>[11]</sup>、土壤养分含量<sup>[12-13]</sup>以及土壤生产与退化有密切联系, 能够反映土壤的发育状况<sup>[14-15]</sup>。黄尚书等<sup>[16]</sup>对江西土壤理化性质的研究发现土壤黏粒对土壤 CEC 的贡献较大, 土壤 pH 与土壤 CEC 含量呈显著负相关。于耀泓等<sup>[17]</sup>对鹅凰嶂山地雨林土壤研究发现土壤 CEC 与土壤有机碳含量呈极显著正相关。陈萍等<sup>[18]</sup>对土壤黏粒进行研究, 黏粒比表面相对较大, 能有效吸附金属离子, 土壤经长期风化释放盐基离子后, 土壤中黏粒与盐基离子含量增加, ECEC 含量也会增加。F. Caravaca 等<sup>[19]</sup>研究人员发现土壤 CEC 与其矿物组成有关, 耕作土壤中 CEC 含量随黏土矿物粒度的增加而减少。此外, 张水清等<sup>[20]</sup>根据不同类型土壤有机质含量、土壤 pH 值、机械组成与土壤 CEC 的相关性, 建立了预测土壤 CEC 的六种线性模型, 说明不同类型的土壤理化性质间的相关性趋势不一定相同。

土壤矿物是土壤的重要组成部分, 早在 20 世纪中期就有研究者开始对土壤中矿物的组成、性质以及化学反应等进行研究, 尤其是黏土矿物的含量及相互间的反应, 土壤中黏粒与有机质之间的相互作用, 以及矿物类型的鉴定等研究<sup>[21]</sup>。有新闻报道对美国西部 2 000 个土壤样品的分析, 得出土壤含水量、CEC 与土壤黏粒含量、矿物类型和黏土矿物的 X 射

线衍射峰强之间具有显著相关性。土壤颗粒组成包含了黏土矿物的演化信息, 对了解土壤黏土矿物组成以及土壤形成与演化具有重要意义<sup>[22]</sup>。一般来说, 黏土矿物的类型与形成区的气候条件紧密相关, 如在高温高湿条件下, 土壤黏土矿物则以高岭石为主<sup>[23]</sup>。除此之外, 土壤颗粒粒径也影响了黏土矿物的组成和分配。已有研究显示, 随粒径减小, 黏土矿物组成逐渐单一, 矿物类型由 2:1 型向 1:1 型转变<sup>[24-25]</sup>。不同矿物类型土壤发育和演化方式不同, 理化性质存在差异, CEC 含量也会发生显著变化。

基于此, 为辨析石灰岩母质发育的不同土壤 CEC 与颗粒组成之间的关系, 本研究通过野外描述、采样与实验室测定, 界定土壤发生特征与土壤发育程度, 获取土壤肥力状况, 深入分析土壤 CEC 与土壤理化性质的关系, 阐明其对土壤发育程度的响应, 为提高湖南省土壤质量、改善土壤肥力条件, 实现岩溶土壤的合理利用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

湖南位于长江中下游, 洞庭湖以南, 四周分别与江西、广东、广西, 以及重庆、贵州、湖北相邻, 地理坐标  $108^{\circ}47' \sim 114^{\circ}15'E$ ,  $24^{\circ}38' \sim 30^{\circ}08'N$ , 属于亚热带季风气候, 四季分明, 光热充足, 降水充沛, 年平均气温  $16 \sim 18^{\circ}C$ , 年平均降水量  $1200 \sim 1800 mm$ 。共有土地面积 21.18 万  $km^2$ , 耕地面积 351.2 万  $hm^2$ , 占全省土地总面积的 16.58%。在耕地中, 丘岗区、山区、湖区耕地面积分别占全省耕地面积的 40.5%、36.3% 和 23.2%。湖南岩溶区分布涉及 81 个县(市、区), 总面积 543.62 万  $hm^2$ , 占全省土地总面积的 25.7%, 主要地貌类型可分为六种, 分别为: I 区丘峰—溶盆与溶洼、峡谷山原区, II 区丘峰—溶盆与溶洼、中低山山地区, III 丘峰—溶洼与溶盆、低山与丘陵区, IV 区丘峰与峰林—溶盆与溶洼、丘陵平原区, V 埋藏岩溶区, VI 洞庭湖平原区(图 1)。从图 2 可知, 典型岩溶土壤主要集中在 I 区、II 区和 IV 区。

### 1.2 样品采集

参照《湖南土壤》中对石灰岩土壤的描述和分类, 确定湖南省范围内典型土壤剖面位置, 通过野外实地踏勘, 同时考虑地形地貌、植被分布状况、土壤母



图 1 湖南省岩溶地貌分区图

Fig. 1 Map of karst landform zoning in Hunan Province

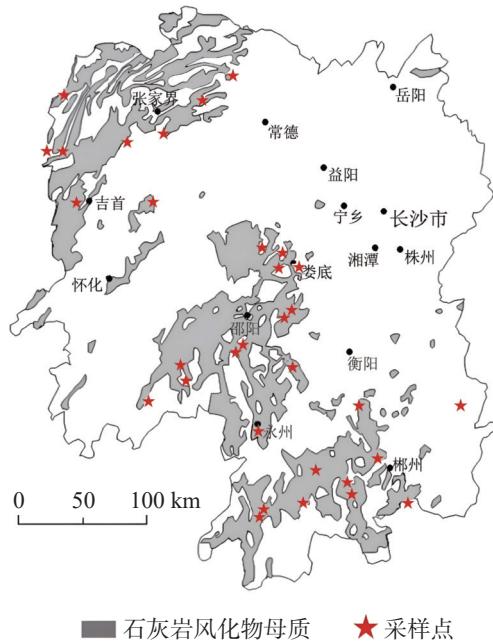


图 2 石灰岩风化母质区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the study area

质等多种因素,选取湖南省具有代表性的典型石灰岩发育土壤,利用全球定位系统仪(GPS)确定9个市32个土壤剖面的野外取样点,共采集剖面样品146个(表1)。样品采集范围涵盖了湖南省主要岩溶分布地区,包含湘东地区的湘潭;湘南地区的永州、郴州;湘西地区的湘西自治州、张家界和怀化;湘中地

区的衡阳、邵阳和娄底等地。土壤剖面的挖掘、成土因素以及土壤形态均按照《第三次全国土壤普查外业调查与采样技术规范》进行分析。

确定样点后,依照《野外土壤描述与采样手册》挖掘标准土壤剖面并对剖面形态进行观察描述,然后进行取样、拍照,按四分法分取1kg左右的新鲜土样装袋。将样品全部带回实验室后清除石块和草根等杂质,将大土块用手掰开,并于室温下完全风干,风干后研磨通过不同孔径土筛以用于之后的理化性质分析。

### 1.3 样品分析

土壤理化性质测定依据《土壤分析技术规范》<sup>[26]</sup>,其中土壤pH采用电位法测定,有机质用重铬酸钾容量法—外加热法测定,土壤容重用环刀法测定,土壤全氮用重铬酸钾—外加热法测定,全磷用消解—钼锑抗分光光度法测定,全钾用火焰原子吸收分光光度法测定,交换性钙、镁采用EDTA滴定法,交换性钠、钾采用火焰原子吸收分光光度法;采用吸管法测定颗粒组成<sup>[27]</sup>,共有301个数据,粒级划分采用美国制(砂粒2.000~0.050mm,粉粒0.050~0.002mm,黏粒<0.002mm);土壤黏土矿物类型用X衍射仪测定;CEC采用乙酸铵离心交换法测定。

ECEC的计算方式为:

$$\text{有效阳离子交换量(ECEC)} [\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}] = \text{H}^+ + \text{Al}^{3+} (\frac{1}{3}\text{Al}^{3+}) + \text{浸提性盐基总量}$$

注:式中 $\text{H}^+$ 和 $\text{Al}^{3+}$ 为 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KCL(pH5.5~6.0)浸提交换性 $\text{H}^+$ 和 $\text{Al}^{3+}$ ( $\frac{1}{3}\text{Al}^{3+}$ )( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ );浸提性盐基总量 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NH<sub>4</sub>OAc(pH7.0)浸提性盐基总量 [ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]。

### 1.4 数据分析

实验数据采用Microsoft Excel 2021软件进行制表,采用SPSS 23.0和Origin2021两种软件进行数据统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 典型岩溶土壤主要理化性质的描述性统计分析

对研究区土壤理化性质进行统计分析(表2,表3),研究区土壤pH最小值为3.46,中值为5.57,小于7.00的占比为78.77%,大于7.00占比为21.23%,

表 1 采样点概况  
Table 1 Overview of sampling points

| 剖面号   | 地区        | 海拔/m | 土地利用现状 | 土类*     | 矿物类型   |
|-------|-----------|------|--------|---------|--------|
| ZJJ01 | 张家界慈利县    | 124  | 灌木林地   | 铁质湿润雏形土 | 硅质混合型  |
| ZJJ02 | 张家界慈利县    | 284  | 灌木林地   | 钙质湿润雏形土 | 硅质混合型  |
| ZJJ03 | 张家界永定区    | 510  | 灌木林地   | 铁聚水耕人为土 | 硅质混合型  |
| XX01  | 湘西永顺县     | 811  | 灌木林地   | 简育常湿淋溶土 | 伊利石混合型 |
| XX04  | 湘西龙山县     | 1236 | 天然牧草地  | 简育常湿淋溶土 | 硅质混合型  |
| XX05  | 湘西保靖县     | 365  | 针阔林地   | 铁质湿润淋溶土 | 伊利石混合型 |
| XX09  | 湘西吉首市     | 606  | 水田     | 铁聚水耕人为土 | 硅质混合型  |
| XX12  | 湘西龙山县     | 550  | 水田     | 铁聚水耕人为土 | 硅质混合型  |
| CZ03  | 郴州宜章县     | 313  | 针阔林地   | 铁质湿润雏形土 | 高岭石型   |
| CZ04  | 郴州临武县     | 404  | 灌木林地   | 铁质湿润淋溶土 | 高岭石混合型 |
| CZ05  | 郴州嘉禾县     | 255  | 灌木林地   | 黏化湿润富铁土 | 高岭石型   |
| CZ11  | 郴州桂阳县     | 205  | 水田     | 简育水耕人为土 | 硅质混合型  |
| YZ03  | 永州道县      | 201  | 针阔林地   | 黏化湿润富铁土 | 高岭石型   |
| YZ05  | 永州江华县     | 228  | 针阔林地   | 黏化湿润富铁土 | 高岭石混合型 |
| YZ06  | 永州宁远县     | 290  | 针阔林地   | 黏化湿润富铁土 | 高岭石混合型 |
| YZ08  | 永州新田县     | 380  | 针阔林地   | 黏化湿润富铁土 | 高岭石型   |
| YZ10  | 永州祁阳县     | 117  | 水田     | 简育水耕人为土 | 硅质混合型  |
| YZ11  | 永州零陵县     | 131  | 水田     | 潜育水耕人为土 | 伊利石混合型 |
| HH11  | 怀化沅陵县     | 134  | 水田     | 简育水耕人为土 | 硅质混合型  |
| SY02  | 邵阳武冈县     | 326  | 针阔林地   | 黏化湿润富铁土 | 混合型    |
| SY04  | 邵阳城步苗族自治县 | 462  | 灌木林地   | 铁质湿润淋溶土 | 伊利石混合型 |
| SY07  | 邵阳邵阳县     | 343  | 灌木林地   | 简育湿润富铁土 | 高岭石混合型 |
| SY09  | 邵阳邵东县     | 320  | 针阔林地   | 铁质湿润淋溶土 | 高岭石型   |
| SY11  | 邵阳邵东县     | 254  | 水田     | 简育水耕人为土 | 硅质混合型  |
| SY12  | 邵阳武冈县     | 397  | 水田     | 简育水耕人为土 | 硅质混合型  |
| SY13  | 邵阳邵阳县     | 259  | 水田     | 简育水耕人为土 | 硅质混合型  |
| LD01  | 娄底涟源县     | 174  | 针阔林地   | 铝质湿润淋溶土 | 高岭石型   |
| LD02  | 娄底新化县     | 440  | 针阔林地   | 钙质湿润淋溶土 | 混合型    |
| LD03  | 娄底涟源县     | 224  | 耕地     | 铝质湿润雏形土 | 硅质混合型  |
| LD05  | 娄底娄星县     | 146  | 水田     | 简育水耕人为土 | 硅质混合型  |
| HY02  | 衡阳常宁县     | 92   | 针阔林地   | 黏化湿润富铁土 | 高岭石型   |
| ZZ05  | 株洲炎陵县     | 263  | 灌木林地   | 黏化湿润富铁土 | 高岭石混合型 |

\*: 表示土壤系统分类名称。

\*: The classification name of a soil system.

表明湖南地区土壤以酸性为主。土壤全氮、全磷、全钾的含量分别为  $1.10 \pm 0.63$ 、 $0.49 \pm 0.30$ 、 $14.20 \pm 5.48$ ，土壤养分含量处于中等水平，变异系数属高度变异，肥力特征差异大。土壤有机质平均含量为  $19.65 \pm 15.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，土壤肥力较低。

土壤 CEC 的平均值为  $16.70 \pm 5.62 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，样本数值之间差异较大；土壤 ECEC 平均值为  $8.86 \pm 3.75 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，远低于土壤 CEC 的含量；土壤颗粒组

成以粉粒与黏粒为主。根据土壤保肥能力分级方法<sup>[28]</sup>(表 4)可知, 当  $\text{CEC} < 10.5 \text{ cmol kg}^{-1}$ , 保肥能力弱；当  $\text{CEC}$  在  $10.5 \sim 15.4 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 保肥能力中等；当  $\text{CEC}$  在  $15.4 \sim 20.0 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 保肥能力较强, 当  $\text{CEC} > 20.0 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 保肥能力强。研究区土壤阳离子交换含量大于  $10.5 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的样本占样本总数的 89.04%，土壤保肥能力多处于较强、中等水平，土壤质地较黏重，以粉粒、黏粒含量为主。研究区土

表 2 研究区土壤理化参数统计特征值

Table 2 Statistical characteristics of soil physical and chemical parameters in the study area

| 指标                            | 平均值         | 最大值        | 最小值  | 中值    | 变异系数 |
|-------------------------------|-------------|------------|------|-------|------|
| pH                            | 5.46±1.41   | 7.97       | 3.46 | 5.57  | 0.26 |
| 容重/g·cm <sup>-3</sup>         | 1.30±0.22   | 1.75       | 0.86 | 1.33  | 0.17 |
| 有机质含量/g·kg <sup>-1</sup>      | 19.65±15.74 | 100.92     | 1.93 | 14.99 | 0.8  |
| CEC/cmol kg <sup>-1</sup>     | 16.7±5.62   | 36.03      | 6.99 | 15.96 | 0.34 |
| ECEC/cmol·kg <sup>-1</sup>    | 8.86±3.75   | 20.88      | 2.91 | 8.48  | 0.42 |
| 砂粒                            | 118±101.64  | 555        | 0    | 87    | 0.87 |
| 机械组成                          | 粉粒          | 441±174.54 | 790  | 103   | 468  |
| 黏粒                            | 441±193.92  | 879        | 123  | 369   | 0.44 |
| 全氮/g·kg <sup>-1</sup>         | 1.10±0.63   | 3.67       | 0.18 | 0.92  | 0.57 |
| 全磷/g·kg <sup>-1</sup>         | 0.49±0.30   | 1.74       | 0.09 | 0.44  | 0.60 |
| 全钾/g·kg <sup>-1</sup>         | 14.20±5.48  | 31.14      | 2.87 | 13.74 | 0.39 |
| 交换性酸/cmol kg <sup>-1</sup>    | 1.74±2.63   | 9.79       | 0.00 | 0.11  | 1.50 |
| 交换性盐基总量/cmol·kg <sup>-1</sup> | 7.12±4.75   | 20.88      | 0.32 | 6.55  | 0.67 |

表 3 不同矿物类型土壤基本理化参数

Table 3 Basic soil physical and chemical parameters for soils of different mineral types

| 指标     | 平均值 | 最大值         | 最小值    | 中值   | 变异系数  |
|--------|-----|-------------|--------|------|-------|
| 硅质混合型  | 容重  | 1.32±0.21   | 1.74   | 0.86 | 1.34  |
|        | pH  | 6.86±0.75   | 7.97   | 4.54 | 6.96  |
|        | 有机质 | 24.54±17.29 | 100.92 | 1.93 | 21.15 |
| 伊利石混合型 | 容重  | 1.24±0.13   | 1.42   | 0.91 | 1.27  |
|        | pH  | 6.37±1.06   | 7.90   | 5.24 | 5.86  |
|        | 有机质 | 21.28±19.85 | 77.25  | 4.88 | 11.24 |
| 高岭石型   | 容重  | 1.28±0.21   | 1.75   | 0.93 | 1.29  |
|        | pH  | 5.44±0.64   | 6.74   | 4.38 | 5.28  |
|        | 有机质 | 12.58±8.63  | 36.76  | 5.00 | 8.77  |
| 高岭石混合型 | 容重  | 1.37±0.10   | 1.55   | 1.20 | 1.36  |
|        | pH  | 5.86±0.53   | 6.85   | 5.07 | 5.82  |
|        | 有机质 | 14.64±9.92  | 39.07  | 4.73 | 10.35 |
| 混合型    | 容重  | 1.36±0.08   | 1.45   | 1.22 | 1.38  |
|        | pH  | 5.88±1.27   | 7.65   | 4.75 | 5.34  |
|        | 有机质 | 11.04±6.96  | 20.10  | 5.16 | 7.98  |

表 4 土壤保肥能力分级方法

Table 4 Classification method for soil fertility retention capacity

| 土壤阳离子交换量/cmol·kg <sup>-1</sup> | 土壤保肥能力 | 样本数 |
|--------------------------------|--------|-----|
| [20.0, $\infty$ )              | 强      | 39  |
| [15.4, 20.0)                   | 较强     | 43  |
| [10.5, 15.4)                   | 中等     | 48  |
| [6.2, 10.5)                    | 弱      | 16  |
| [0, 6.2)                       | 很弱     | 0   |

壤  $\text{Al}^{3+}$ /CEC、 $\text{Ca}^{2+}$ /CEC、 $\text{Mg}^{2+}$ /CEC、 $\text{K}^+$ /CEC、 $\text{Na}^+$ /CEC 含量分别为  $0.098 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.365 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.057 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.010 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.003 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，交换性铝、交换性钙与交换性镁含量较高，使土壤胶体可变负电荷增加，从而增加土壤有效负电荷密度，提升土壤阳离子的吸附能力。

研究区典型岩溶土壤的 5 种矿物类型(表 3)分别为：硅质混合型、伊利石混合型、高岭石型、高岭

石混合型、混合型。五种矿物类型岩溶土壤 pH、容重变异小; 土壤有机质含量差异较大, 变异系数为 0.70 属于强变异, 其中混合型土壤有机质平均值最低, 为  $11.04 \pm 6.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 而硅质混合型土壤有机质平均含量最大, 为  $24.54 \pm 17.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

## 2.2 土壤阳离子交换量、机械组成与主要矿物类型的关系

通过对研究区 146 个土壤样品的分析发现(图 3), 不同矿物类型土壤的机械组成呈现黏粒>粉粒>砂粒的趋势, 高岭石型土壤黏粒含量最多, 伊利石混合型土壤砂粒含量最少。质地类型涵盖黏土、黏壤土、粉壤土、粉黏壤土、壤土、砂壤土、砂黏壤土、粉砂质黏土以及粉砂质黏壤土共 9 种类型, 质地为黏土的土壤样点占比最大, 达 31.50%; 其次为粉壤土、粉黏壤土, 占比分别为 30.14% 和 27.40%; 黏壤土占比为 6.16%; 壤土、砂壤土、砂黏壤土、粉砂质黏土、粉砂质黏壤土的占比均低于 2.0%。伊利石混合型土壤 CEC 含量最大, 为  $21.76 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其余四种矿物类型土壤 CEC 含量差异不大。总体上, 146 个样点的土壤质地以黏土、粉壤土、粉黏壤土为主, 粉黏粒

土质黏重, 结构紧密、耕作困难, 影响土壤的透气性和排水性。

如图 4 所示, 混合型土壤砂粒含量最高, 硅质混合型土壤粉粒含量最高, 高岭石土壤黏粒含量最高; CEC 与 ECEC 含量在伊利石混合型土壤中最多, 在混合型土壤中含量最少。

## 2.3 阳离子交换量的影响因子

由表 5 可知, 土壤 CEC、ECEC 与砂粒含量存在负相关趋势, 但相关性不显著; 土壤 CEC 与黏粒含量呈极显著正相关与粉粒含量的关系则相反, ECEC 与粉粒、黏粒含量均无相关性( $P < 0.01$ ); 土壤 CEC 与土壤容重成极显著负相关关系, 而 ECEC 与土壤容重无相关性( $P < 0.01$ ); 土壤 CEC 与土壤 pH、有机质含量均无相关性, 而 ECEC 则与二者呈现极显著正相关关系( $P < 0.01$ )。土壤 CEC、ECEC 与土壤全氮、全磷、全钾、交换性  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  以及交换性盐基总量均成正相关, 其中与全磷、交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、盐基总量的相关性极显著; 交换性酸、交换性  $\text{H}^+$  和交换性  $\text{Al}^{3+}$  与 CEC 呈正相关, 而与 ECEC 呈负相关( $P < 0.01$ )。土壤 CEC 与矿物类型无相关性,

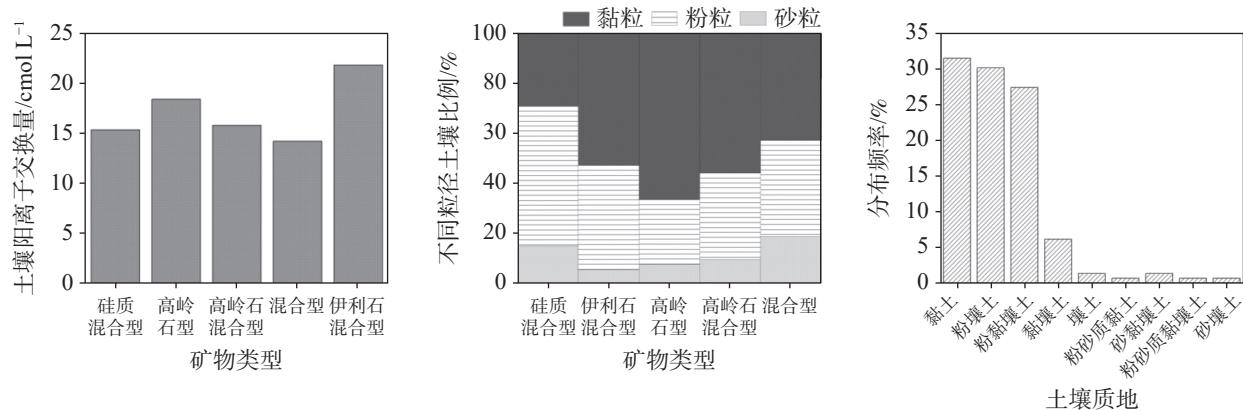


图 3 土壤矿物类型与 CEC、机械组成的关系

Fig. 3 Relationship between soil CEC, mechanical compositions and mineral types

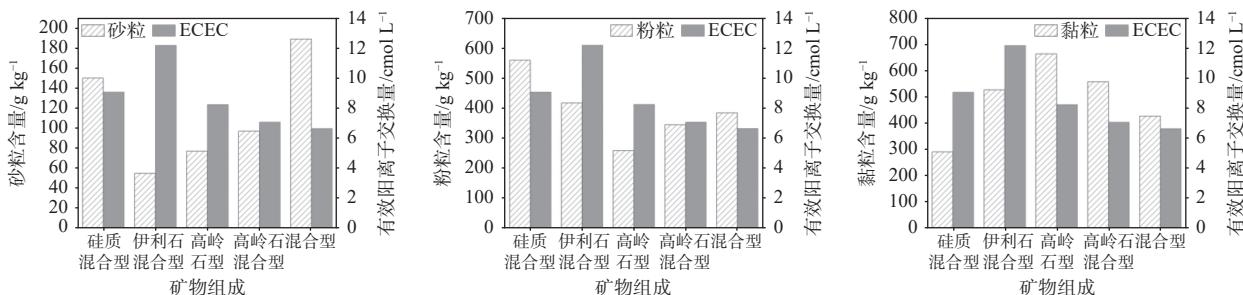


图 4 土壤矿物组成与 ECEC 以及土壤颗粒组成的关系

Fig. 4 Relationship between soil mineral compositions, ECEC and soil particle compositions

表 5 土壤交换性阳离子与其他因子相关性分析  
Table 5 Correlation analysis of soil exchangeable cations with other factors

|                     | CEC      | ECEC     |
|---------------------|----------|----------|
| 砂粒                  | -0.106   | -0.008   |
| 粉粒                  | -0.420** | 0.048    |
| 黏粒                  | 0.434**  | -0.039   |
| 容重                  | -0.282** | -0.138   |
| pH(水提)              | -0.112   | 0.307**  |
| 有机质                 | 0.094    | 0.243**  |
| 全氮(N)               | 0.142    | 0.132    |
| 全磷(P)               | 0.225**  | 0.368**  |
| 全钾(K)               | 0.207*   | 0.183*   |
| 交换性酸                | 0.290**  | -0.085   |
| 交换性H <sup>+</sup>   | 0.187*   | -0.101   |
| 交换性Al <sup>3+</sup> | 0.287**  | -0.080   |
| 交换性K <sup>+</sup>   | 0.263**  | 0.175*   |
| 交换性Ca <sup>2+</sup> | 0.272**  | 0.801**  |
| 交换性Mg <sup>2+</sup> | 0.285**  | 0.499**  |
| 交换性Na <sup>+</sup>  | 0.121    | 0.004    |
| 交换性盐基总量             | 0.315**  | 0.836**  |
| 矿物类型                | 0.058    | -0.217** |

注: \*P<0.05; \*\*P<0.01。

Note: \*P<0.05; \*\*P<0.01.

而 ECEC 与矿物类型呈极显著负相关( $P<0.01$ )。

### 3 讨 论

已有研究<sup>[29]</sup>表明,土壤 CEC 与黏粒呈显著正相关,与砂粒呈显著负相关,本文研究结果相似。研究区土壤以粉黏粒为主,土壤黏粒、粉粒粒径极小,易在径流过程中随悬浊液而流失,砂粒会在植株根系产生一定沉积<sup>[30]</sup>。土壤粒度组成和分形特征的变化会使土壤理化性质产生重大变化<sup>[31]</sup>。相关研究表明:土壤颗粒越细,土壤的保肥能力越强,但受颗粒含量的影响,土壤会出现压实、板结的现象<sup>[32]</sup>。本文中粉黏粒含量高,而土壤中砂粒含量低,虽然有利于水肥保持,但透气性较差会产生负面影响<sup>[33]</sup>。土壤中各粒径含量更能反映土壤质量水平<sup>[34]</sup>,土壤中黏、粉粒含量大,土壤的保水、保肥能力强。周雷等<sup>[35]</sup>对宁夏 114 个土壤点位的研究发现,土壤质地类型变异的主要原因是砂粒和粉粒的相对含量的变化。土壤颗粒粒径分布与组成是土壤最基本的物理性质,反

映了土壤的结构特征<sup>[36]</sup>对植物生长发育和土壤肥力的形成有着重要的影响。肥沃的土壤不仅要求耕层的质地良好,还要求有良好的质地状况。虽然土壤质地主要决定于成土母质类型,具有相对的稳定性,但耕作层的质地仍然可通过耕作、施肥等活动来进行调节。砂粒粒径为 2.00~0.05 mm,颗粒较粗,比表面积相对较小,其吸附的带电胶体粒子相对较少,对应的 CEC 的含量较低,砂粒较多而交换量低,土壤保肥性弱,王文艳等<sup>[37]</sup>通过对黄土高原陕北地区 3 个小流域的土壤 CEC 的影响进行分析,发现土壤 CEC 与砂粒含量呈负相关是由于砂粒含量大则土壤粉黏粒含量下降,导致阳离子吸附交换点位少。王圣等<sup>[38]</sup>对江西省旱地土壤进行研究发现,土壤粉粒和黏粒含量与土壤 CEC 呈极显著相关,随着两者含量的增加,土壤 CEC 含量显著增加;而砂粒含量与 CEC 的相关性并非极显著,但是土壤的通透性很好。土壤颗粒对土壤 CEC 的影响主要来自于黏粒含量且二者具有相关性<sup>[37,39]</sup>,其次为粉砂粒的贡献<sup>[40-41]</sup>。粉粒是指土壤中粒径为 0.050~0.002 mm 的矿物颗粒,其粒径大于黏粒,能够吸附一定量的阳离子,但吸附能力较弱,养分易流失。有研究表明土壤中粉粒含量增加,土壤 CEC 显著增加<sup>[38]</sup>,但粉粒的含量对土壤 CEC 的贡献很小,甚至有时会出现负值<sup>[37]</sup>。土壤中黏粒是指粒径小于 0.002 mm 的各类矿物颗粒,由于其粒径很小比表面大,吸附能力强。在农田土壤中黏粒是养分的主要供给者,农田土壤中所含的黏粒数量越多,农田土壤中营养成分含量越高,农田土壤保水保肥能力越强,但是正是因为这些特性使得土壤的通透性能较差。阳离子交换量是土壤中吸附各类阳离子的总和,黏粒含量越多土壤吸附能力越强,其吸附的阳离子也就越多。

不同成土母质间由于颗粒组成和矿物类型存在差异,其发育土壤的阳离子交换性能会发生显著变化。俞月凤等<sup>[42]</sup>对岩溶区土壤矿物质与主要养分的关系进行分析,发现土壤矿物质与土壤养分之间具有相互作用关系,岩溶地区碳酸盐岩风化过程中产生各种矿物质,形成土壤的物质基础可增强了土壤肥力。本研究所采集的土样为湖南省典型岩溶区石灰岩母质发育的土壤,属亚热带季风气候、降水量多,土壤中机械组成与土壤发生发育程度、黏土矿物类型组成有重要关系。土壤中黏土矿物的类型与数量是影响土壤阳离子交换量的大小的主要因素之一<sup>[43]</sup>。

土壤矿物质是土壤阳离子交换量的主要提供者, 土壤中细粒矿物比粗粒矿物具有较大的表面积和更多的交换点<sup>[44]</sup>, 因此不同粒级矿物其交换量一般随粒度的增大而减少<sup>[45]</sup>。本研究中, 根据土壤诊断层与诊断性质, 按照土壤系统分类体系, 所采土壤样品可划分为 5 个土纲, 分别为人为土纲(34%)、富铁土纲、淋溶土纲和雏形土纲, 占比最少的为新成土纲(3%)。土壤矿物, 尤其是土壤次生矿物, 决定着土体的许多理化性质, 如黏着性和土壤结构等<sup>[46]</sup>。研究区土壤矿物类型有 11 种, 主要的矿物类型为黏壤质硅质混合型, 占比 37.5%; 其次为极黏质高岭石型和黏质高岭石混合型, 各占比为 12.5%; 黏质高岭石型、黏质伊利石混合型、极黏质高岭石混合型以及极黏质伊利石混合型, 各占比为 6.25%; 含量最少的矿物类型为黏壤质混合型、壤质硅质混合型、黏质混合型和粗骨壤质硅质混合型, 各类型仅占 3.13%(图 5)。

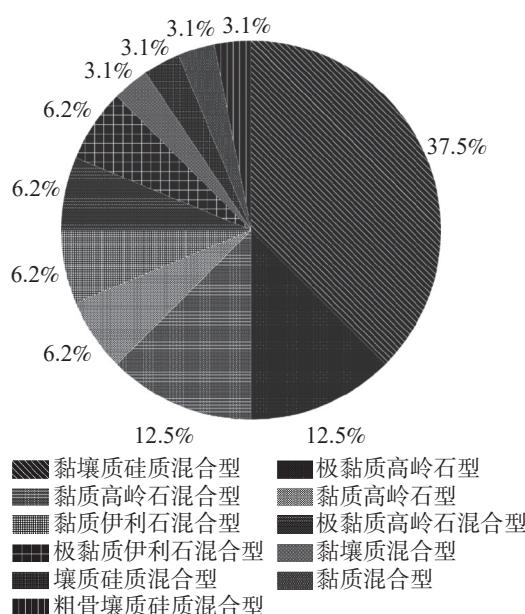


图 5 研究区土壤矿物类型占比

Fig. 5 Percentages of soil mineral types in the study area

在本研究中土壤 CEC 与粉粒含量均呈极显著负相关; 与黏粒含量呈极显著正相关, 说明在岩溶土壤中, 土壤颗粒越细, 结构紧实, 土壤阳离子交换量越多, 土壤保肥质量会得到较大改善, 但供肥环境限制了土壤与作物养分的循环, 可以通过调节土壤中粉粒与黏粒的含量占比来增加 CEC 值, 提高土壤肥力。土壤 ECEC 虽然与土壤颗粒组成无显著相关性, 但其与土壤 pH、土壤有机质含量以及交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、交

换性  $\text{Mg}^{2+}$  均呈极显著正相关, 更能反映土壤保肥、供肥的协调效应, 农业利用中可配合水利措施建设、多种耕、施用有机肥等措施来提高土壤生产效能。

## 4 结 论

(1) 湖南省岩溶土壤以粉黏粒为主, 土壤 pH 为  $5.46 \pm 1.41$ , 呈酸性; 土壤有机质含量为  $19.65 \pm 15.74 \text{ g kg}^{-1}$ , 含量不高且样本之间差异大; 土壤 CEC 的平均含量为  $16.70 \pm 5.62 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 岩溶区土壤虽供肥能力较差, 但保肥能力处于中等偏上水平。

(2) 湖南省岩溶区五种黏土矿物类型土壤 pH、容重差异较小, 但有机质含量差异较大, 硅质混合型土壤有机质含量最大, 且属于强变异。混合型土壤砂粒含量最高, 硅质混合型土壤粉粒含量最高, 高岭石土壤黏粒含量最高; CEC 与 ECEC 含量在伊利石混合型土壤中最多, 在混合型土壤中含量最少。

(3) CEC 与粉粒、黏粒含量均呈现出极显著相关性, 与砂粒含量无显著相关性; 土壤 ECEC 与土壤颗粒均无显著相关, 但其与土壤 pH 以及有机质含量、土壤全磷含量均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与土壤全钾含量呈显著正相关, 土壤 ECEC 与土壤主要理化性质的相关性, 说明相对于 CEC 来说, ECEC 能更有效地影响土壤发生特性, 可以对土壤肥力产生更加有用的功能。

(4) 土壤交换性盐基总量以交换性  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  为主, 土壤 CEC 与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), ECEC 与  $\text{K}^+$  呈显著正相关, 与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  呈极显著正相关, 土壤 CEC 与矿物类型无相关性, 而 ECEC 与矿物类型呈极显著负相关。不同矿物类型的土壤中, 交换性盐基离子内  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  对湖南岩溶地区土壤 CEC、ECEC 含量产生影响。

(5) 在农业生产过程中, 添加各类有机质的含量, 可有效提高农田土壤阳离子交换量。农田土壤中阳离子交换量的增大, 能有效提高农田土壤的缓冲能力, 增强农田土壤的保肥能力以及保水能力, 从而改善土壤地力的有效性。

## 参考文献

- [1] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第 3 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [2] 胡梦颖, 张鹏鹏, 徐进力, 刘彬, 张灵火, 杜雪苗, 白金峰. CEC 前处理系统-凯氏定氮仪快速测定土壤中的阳离子交换量[J].

- 物探与化探, 2023, 47(2): 458-463.
- HU Mengying, ZHANG Pengpeng, XU Jinli, LIU Bin, ZHANG Linghuo, DU Xuemiao, BAI Jinfeng. Rapid determination of soil cation exchange capacity using a cation exchange capacity pre-treatment system and a Kjeldahl apparatus[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 458-463.
- [3] 杨树俊, 韩张雄, 王思远, 端爱玲, 孙东年, 李敏. 土壤阳离子交换量与有机质、机械组成的关系[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7): 2799-2805.
- YANG Shujun, HAN Zhangxiong, WANG Siyuan, DUAN Ailing, SUN Dongnian, LI Min. The relationship between cation exchange capacity and organic matter, mechanical composition in soil[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(7): 2799-2805.
- [4] 岳祥飞, 李衍青, 刘鹏. 广西岩溶区灌木林地凋落物: 土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 1106-1116.
- YUE Xiangfei, LI Yanqing, LIU Peng. Stoichiometric characteristics of C, N and P in soil and litter of shrublands in karst areas of Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(5): 1106-1116.
- [5] 刘贺永, 何鹏, 蔡江平, 王汝振, 殷进飞, 杨山, 张玉革. 模拟氮沉降对内蒙古典型草地土壤 pH 和电导率的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 85-91.
- LIU Heyong, HE Peng, CAI Jiangping, WANG Ruzhen, YIN Jinfei, YANG Shan, ZHANG Yuge. Effects of simulated nitrogen deposition on soil pH and electric conductivity in a typical grassland of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 85-91.
- [6] 许安定, 周鑫斌, 苏婷婷, 张璐, 杨超, 谢德体, 石孝均. 土地整理对烟田土壤理化及生物学性状的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 156-164.
- XU Anding, ZHOU Xinbin, SU Tingting, ZHANG Lu, YANG Chao, XIE Deti, SHI Xiaojun. Effects of land consolidation on soil physical, chemical and biological properties on hilly land[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2016, 38(3): 156-164.
- [7] 吴敏, 韦家少, 孙海东, 何鹏, 吴炳孙, 高乐. 生物质炭对橡胶园土壤酸度及交换性能的影响[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(3): 98-107.
- WU Min, WEI Jiashao, SUN Haidong, HE Peng, WU Bingsun, GAO Le. Effects of biocarbon acidify and exchangeable capacity of the granite-derived ferralsol in rubber plantation[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(3): 98-107.
- [8] 陈秋帆, 卢琦, 王妍, 刘云根. 西南石漠化区林下土壤养分特征及差异性[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 290-300.
- CHEN Qiufan, LU Qi, WANG Yan, LIU Yungen. Nutrient characteristics and differences of forest soil in rocky desertification areas of Southwest China[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(2): 290-300.
- [9] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- WANG Guoliang, ZHOU Shengl, ZHAO Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 545-550.
- [10] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [11] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987-996.
- [12] 白永会, 查轩, 吴伟成, 周飞华. 植被恢复花岗岩红壤土壤颗粒组成及土壤养分储量特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 179-186.
- BAI Yonghui, ZHA Xuan, WU Weicheng, ZHOU Feihua. Characteristics of soil particle composition and soil nutrient storage in vegetated granite red soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 179-186.
- [13] Komeg K, Enangr K, Tabif O, Yerimabp K. Influence of clay minerals on some soil fertility attributes: A review[J]. Open Journal of Soil Science, 2019, 9(9): 155-188.
- [14] Ruehlmann J. Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 1. Partitioning of SOM in conceptional fractions and derivation of a variable SOC to SOM conversion factor[J]. Geoderma, 2020, 375: 114542.
- [15] Zhang J H, Li G D, Ding S Y, Tian H W, Ren X J, Liu M, Zheng Y P. Distribution characteristics of soil particles and their relationships with soil organic carbon components in the alluvial/sedimentary zone in the lower reaches of the Yellow River[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 849565.
- [16] 黄尚书, 叶川, 钟义军, 成艳红, 武琳, 黄欠如, 郑伟, 孙永明, 张昆, 章新亮. 不同土地利用方式对红壤坡地土壤阳离子交换量及交换性盐基离子的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(2): 72-77.
- HUANG Shangshu, YE Chuan, ZHONG Yijun, CHENG Yanhong, WU Lin, HUANG Qianru, ZHENG Wei, SUN Yongming, ZHANG Kun, ZHANG Xinliang. Soil cation exchange capacity and exchangeable base cations as affected by land use pattern in sloping farmland of red soil[J]. Soils and Crops, 2016, 5(2): 72-77.
- [17] 于耀泓, 刘悦, 王艺颖, 周庆, 龙凤玲, 赵倩, 何茜, 莫其锋. 鹅凰嶂山地雨林土壤阳离子交换量和交换性盐基离子分布特征[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1341-1349.
- YU Yaohong, LIU Yue, WANG Yiying, ZHOU Qing, LONG Fengling, ZHAO Qian, HE Qian, MO Qifeng. Distribution of soil cation exchange capacity and exchangeable based cations in the E'huangzhang montane rain forest[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1341-1349.
- [18] 陈萍, 何文寿. 不同盐化土壤理化性质差异研究[J]. 农业科学, 2016, 37(3): 36-39.
- CHEN Ping, HE Wenshou. A study of soil physicochemical properties for different levels of salinization[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2016, 37(3): 36-39.
- [19] Caravaca F, Lax A, Albaladejo J. Organic matter, nutrient contents and cation exchange capacity in fine fractions from semi-

- arid calcareous soils[J]. *Geoderma*, 1999, 93(3-4): 161-176.
- [20] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 河南三种土壤阳离子交换量相关性及预测模型研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 627-631.
- ZHANG Shuiqing, HUANG Shaomin, GUO Doudou. The correlations and prediction models of cation exchange capacity in three soils in Henan[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 627-631.
- [21] 许冀泉. 国外土壤矿物学研究近况[J]. 干旱区研究, 1986(3): 28-40.
- [22] 姚乃慈, 赵曼爽, 张志丹, 张晋京, 何念鹏, 钟佳君. 不同气候带森林土壤粘粒矿物 XRD 物相分析[J]. 矿物学报, 2021, 41(6): 668-678.
- YAO Naichi, ZHAO Minshuang, ZHANG Zhidan, ZHANG Jingjing, HE Nianpeng, ZHONG Jiajun. The XRD phase analysis of clay minerals in the forest soils of different climate zones[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2021, 41(6): 668-678.
- [23] 刘智杰, 黄丽, 李峰, Ndzana Georges Martial, 周方亮, 李小坤, 鲁剑巍. 长期施肥对土壤颗粒粘粒矿物组成及其演变特征的影响[J]. 矿物学报, 2018, 39(5): 563-571.
- LIU Zhijie, HUANG Li, LI Feng, Ndzana Georges Martial, ZHOU Fangliang, LI Xiaokun, LU Jianwei. Effect of long-term fertilization on the composition and evolution of clay minerals in soil particles[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2018, 39(5): 563-571.
- [24] Tsao T M, Chen Y M, Sheu H S, Zhuang S Y, Shao P H, Chen H W, Chiang K Y. Red soil chemistry and mineralogy reflect uniform weathering environments in fluvial sediments, Taiwan[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2012, 12: 1054-1065.
- [25] 李丰义, 宋桂云, 张庆昕, 范富. 西辽河平原两种常见土壤颗粒中黏土矿物的组成特征[J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1009-1016.
- LI Fengyi, SONG Guiyun, ZHANG Qingxin, FAN Fu. Composition characteristics of clay minerals from chestnut and saline soil particles in west Liaohe river plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(5): 1009-1016.
- [26] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [27] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHANG Ganlin, GONG Zitong. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [28] 童根平, 姜霓雯, 傅伟军, 叶正钱. 清凉峰自然保护区土壤阳离子交换量的剖面分布特征及其影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(2): 111-115.
- TONG Genping, JIANG Niwen, FU Weijun, YE Zhengqian. Profile distribution characteristics and influencing factors of soil cation exchange capacity in Low Mountain Natural Forest Land in South China[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(2): 111-115.
- [29] 欧阳宁湘. 湖南省典型红壤在土壤系统分类中的归属与发生特征[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- OUYANG Ningxiang. Attribution of typical red earth of Hunan Province in China soil taxonomy and their genetic characteristics[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [30] 李海涛. 白皮沙拐枣根系与环境关系的初步研究[J]. 新疆农业大学学报, 1996, 19(1): 56-61.
- LI Haitao. The preliminary study on the relation between *Caligdonum leucocladum* and its environment[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 1996, 19(1): 56-61.
- [31] 张佛熠, 承勇, 阳雅茨, 韦培, 金涛涛, 凌婉茹, 尹婕, 刘玮, 王琼. 南昌不同城市化强度土壤粒度组成和分形特征及其影响因素[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1138-1145.
- ZHANG Foyi, CHENG Yong, YANG Yaying, WEI Pei, JIN Taotao, LING Wanru, YIN Jie, LIU Wei, WANG Qiong. Particle size composition, fractal characteristics and influencing factors of soils with different urbanization intensities in Nanchang[J]. *Soils*, 2023, 55(5): 1138-1145.
- [32] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.
- PENG Xinhua, ZHANG Bin, ZHAO Qigu. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 618-623.
- [33] Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, Wu B, Zhang Y Q, Guo J B, Liu Y D. Characterization of soil particle size distribution with a fractal model in the desertified regions of Northern China[J]. *Acta Geophysica*, 2015, 64(1): 1-14.
- [34] 朱梦雪, 赵洋毅, 王克勤, 段旭, 卢华兴, 涂晓云. 中亚热带不同演替森林群落土壤结构分形特征对大孔隙的影响[J]. 林业科学研究, 2022, 35(2): 67-77.
- ZHU Mengxue, ZHAO Yangyi, WANG Keqin, DUAN Xu, LU Huaxing, TU Xiaoyun. Effect of fractal characteristics of soil structure on macropores in different succession forest communities in mid-subtropical region[J]. *Forest Research*, 2022, 35(2): 67-77.
- [35] 周雷, 曲潇琳, 周涛, 马常宝, 李建兵, 龙怀玉, 徐爱国, 张认连, 李格. 宁夏土壤颗粒组成特点及其影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2023, 56(21): 4272-4287.
- ZHOU Lei, QU Xiaolin, ZHOU Tao, MA Changbao, LI Jianbing, LONG Huaiyu, XU Aiguo, ZHANG Renlian, LI Ge. Analysis of the characteristics and influencing factors of soil particle composition in Ningxia[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(21): 4272-4287.
- [36] 张世熔, 邓良基, 周倩, 伍国锋. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 221-226.
- ZHANG Shirong, DENG Liangji, ZHOU Qian, WU Guofeng. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 221-226.
- [37] 王文艳, 张丽萍, 刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 123-127.
- WANG Wenyan, ZHANG Liping, LIU Qiao. Distribution and

- affecting factors of soil cation exchange capacity in watershed of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 123-127.
- [38] 王圣, 陈科希, 袁源远, 王泓汇, 魏宗强, 吴建富, 卢志红. 江西省旱地土壤质地与土壤化学性状的相关性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 65-71.
- WANG Sheng, CHEN Kexi, YUAN Yuanyuan, WANG Honghui, WEI Zongqiang, WU Jianfu, LU Zhihong. Correlation between soil texture and soil chemical properties in dry land of Jiangxi Province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(6): 65-71.
- [39] 杨家伟, 王天巍, 包莹莹, 罗梦雨, 李德成. 黏粒阳离子交换量估测模型的优化研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 514-525.
- YANG Jiawei, WANG Tianwei, BAO Yingying, LUO Mengyu, LI Decheng. Optimization of the model for predicting cation exchange capacity of clays[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 514-525.
- [40] 徐明岗, 张建新, 张航, 安战士. 黑垆土、黄褐土等土壤阳离子交换量影响因素的研究[J]. 土壤通报, 1991, 22(3): 108-110, 127.
- [41] 刘世全, 蒲王琳, 张世熔, 王昌全, 邓良基. 西藏土壤阳离子交换量的空间变化和影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 1-5.
- LIU Shiquan, PU Wanglin, ZHANG Shirong, WANG Changquan, DENG Liangji. Spatial change and affecting factors of soil cation exchange capacity in Tibet[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5): 1-5.
- [42] 俞月凤, 曾成城, 宋同清, 彭晚霞, 何铁光. 桂西北喀斯特区石灰土矿物质的空间变异特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 509-516, 527.
- YU Yuefeng, ZENG Chengcheng, SONG Tongqing, PENG Wanxia, HE Tieguang. Spatial variation of limestone soil minerals in a karst area of northwestern Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 509-516, 527.
- [43] 赵之重. 青海省土壤阳离子交换量与有机质和机械组成关系的研究[J]. 青海农林科技, 2004(4): 4-6.
- ZHAO Zhizhong. Study on relationship between organic matter, soil fractions and CEC in Qinghai soil[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2004(4): 4-6.
- [44] 马毅杰. 土矿物和有机质对土壤胶体表面积影响[J]. 土壤, 1984, 16(1): 31.
- MA Yijie. Effect of soil minerals and organic matter on soil colloidal surface area[J]. Soils, 1984, 16(1): 31.
- [45] 蒋梅茵, 杨德涌, 熊毅. 中国土壤胶体研究: VIII. 五种主要土壤的粘粒矿物组成[J]. 土壤学报, 1982, 19(1): 62-70, 98.
- JIANG Meiyin, YANG Deyong, HSEUNG Yi. Soil colloid researches VIII. The mineralogical composition of the colloids of five important soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19(1): 62-70, 98.
- [46] 赵烨. 环境地学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

## Response relationships among CEC, mechanical compositions and mineral types in typical karst soil

XING Yuxin<sup>1</sup>, YUAN Hong<sup>1,2</sup>, JI Xiangtong<sup>1</sup>, DUAN Chenglong<sup>1</sup>, JIANG Jun<sup>1</sup>, LIU Shanpeng<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>

( 1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/

Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004 )

**Abstract** In this study, a total of 146 profile samples were collected from 32 soil profile sampling sites in nine towns and cities in typical karst areas of Hunan Province. The physical and chemical properties of soil were analyzed through field investigation, excavation, and collection and description of soil profiles of limestone weathering parent materials. The relationships among soil CEC contents, mechanical compositions, and soil mineral types were also explored. The research findings laid a foundation for modification, fertilization and ecological restoration of karst soil.

According to the Technical Specifications for Soil Analysis, the determination of soil physicochemical properties was conducted as follows: the soil pH values were measured by potentiometry. Both soil organic matters and total nitrogen contents in soil were determined by potassium dichromate heating method. Soil bulk density was measured by cutting ring method, while total phosphorus was assessed through the digestion-Mo-Sb anti-spectrophotometric method. Total potassium was analyzed via flame atomic absorption spectrophotometry. Exchangeable calcium and magnesium were quantified by EDTA titration method, and exchangeable sodium and potassium were also measured by flame atomic absorption spectrophotometry. The composition of soil particles was determined by pipette method, and the particle fraction was classified based on the system of United States (2.00–0.05 mm for sand, 0.050–0.002 mm for silt, and <0.002 mm for clay). Types of clay minerals were determined by X-Ray diffraction. The cation exchange capacity (CEC) was determined by ammonium acetate centrifugal exchange method. The effective cation exchange

capacity (ECEC) was calculated in the following formula:  $[cmol \cdot kg^{-1}] = H^+ + Al^{3+}(\frac{1}{3}Al^{3+}) + \text{total extractability base}$ .

The results shows as follows. (1) The CEC contents of typical karst soil in Hunan ranged between 2.71–13.9 cmol·kg<sup>-1</sup>, with an average value of  $16.70 \pm 5.62$  cmol·kg<sup>-1</sup>. The sample values exhibited considerable variability. The average soil ECEC was  $8.86 \pm 3.75$  cmol·kg<sup>-1</sup>, significantly lower than soil CEC. The particulate composition of soil was mainly silt and clay, resulting in a heavy texture and poor permeability in the study area. Based on the American grading method for soil fertilizer retention capacity combined with the measurement data, it was observed that the soil fertilizer retention capacity in the study area predominantly fell within the medium to strong levels, but the soil fertilizer capacity was inadequate. (2) The particulate compositions of soil followed a trend of clay>silt>sand, encompassing nine texture types. The soil samples with clay texture constituted the largest proportion of 31.50%. This was followed by silty loam and silty clay loam, which accounted for 30.14% and 27.40%, respectively. The soil samples from the study area included five distinct mineral types: siliceous hybrid, illite hybrid, kaolinite, kaolinite hybrid and hybrid. The hybrid soil exhibited the highest sand content, while the siliceous hybrid had the highest content of powder silt, and the kaolinite hybrid contained the most clay. The CEC and ECEC contents were the highest in illite hybrid and lowest in hybrid soil. In general, the soil texture of the 146 samples was primarily clay, silty loam and silty clay loam, resulting in heavy and compact soil that adversely affected the air permeability and drainage of soil. (3) CEC exhibited a highly significant correlation with both silt and clay content, while showing no significant correlation with sand. Soil ECEC was not significantly correlated with any of the soil particles; however, it demonstrated a highly significant positive correlation with soil pH, organic matter content and total phosphorus content ( $P < 0.01$ ). Additionally, there was a significant positive correlation between ECEC and total potassium content, indicating a relationship between ECEC and the primary physicochemical properties of soil. This suggests that ECEC may influence the soil characteristics more effectively than CEC and could have a greater impact on soil fertility. (4) The primary exchangeable ions were  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$ , with soil CEC showing an extremely significant positive correlation with  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , and  $Mg^{2+}$  ( $P < 0.01$ ). Furthermore, soil ECEC was significantly positively correlated with  $K^+$ , and extremely significantly positively correlated with  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  ( $P < 0.01$ ). Soil CEC was not correlated with mineral type, while ECEC was highly significantly negatively correlated with mineral type. The contents of  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  and  $K^+$  in soil exchangeable salt-based ions also had an effect on the contents of CEC and ECEC in soils of different mineral types.

In this study, soil CEC was found to be extremely significantly negatively correlated with silt contents. Conversely, there was a highly significant positive correlation with clay contents. This indicates that in karst soil, finer soil particles contribute to a more compact structure, which enhances soil cation exchange and improves soil fertilizer retention quality. However, the fertilizer environment can limit the nutrient cycle between soil and crops. By adjusting the proportions of silt and clay in soil, it is possible to increase the CEC value and enhance soil fertility. Although no significant correlation was observed between ECEC and soil particle compositions, ECEC was found to be significantly positively correlated with soil pH, soil organic matter contents, exchangeable  $Ca^{2+}$  and exchangeable  $Mg^{2+}$ . Additionally, it exhibited a highly significant negative correlation with soil mineral types, which better reflects the synergistic effects of soil fertility conservation and nutrient supply.

**Key words** cation exchange capacity, soil particle composition, limestone parent material

( 编辑 杨杨 )