

DOI: 10.11766/trxb201909090428

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.

## 黏粒阳离子交换量估测模型的优化研究\*

杨家伟<sup>1</sup>, 王天巍<sup>1†</sup>, 包莹莹<sup>1</sup>, 罗梦雨<sup>1</sup>, 李德成<sup>2</sup>

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 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)

**摘要:** 为了优化土壤黏粒阳离子交换量估测模型, 提升估测结果准确性, 为土壤系统分类检索提供可靠数据支持, 以江西省土壤为主要研究对象, 根据有机质、粉粒阳离子交换量对现有估测模型的影响, 将有机质含量低于  $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的土壤样本定为低有机质样本, 高于  $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的土壤定为高有机质样本开展分类建模。高有机质样本中主要误差因子为有机质, 按照土壤质地不同开展分类建模; 低有机质样本中主要误差因子为粉粒  $\text{CEC}_7$ , 在实测粉粒  $\text{CEC}_7$  的同时根据 pH、年均气温、纬度估测粉粒  $\text{CEC}_7$  大小, 建立低有机质样本间接估测模型。分类优化后的黏粒  $\text{CEC}_7$  估测模型的估测值更加接近实测值, 提升了土壤系统分类检索的准确度。

**关键词:** 黏粒阳离子交换量; 中国土壤系统分类; 优化模型; 误差因子; 有机质

**中图分类号:** S155      **文献标志码:** A

## Optimization of the Model for Predicting Cation Exchange Capacity of Clays

YANG Jiawei<sup>1</sup>, WANG Tianwei<sup>1†</sup>, BAO Yingying<sup>1</sup>, LUO Mengyu<sup>1</sup>, LI Decheng<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** [Objective] Cation exchange capacity of clays is an important index for determining diagnostic horizons and diagnostic characteristics in the Chinese Soil Taxonomy (3rd edition) and the United States Soil Taxonomy. However, some studies have shown that the values of  $\text{CEC}_7$  particles predicted using models are often higher than their corresponding measured ones, thus leading to misjudgment of taxon at high taxonomic levels. With the zonal soil in Jiangxi Province taken as the main object, this study aimed to optimize the current CEC prediction model to alleviate the impacts of its error factors, to build up a new model, based on main error factors, for predicting  $\text{CEC}_7$  of clay particles, so as to improve prediction accuracy and to provide reliable data support for retrieval in the soil taxonomy. [Method] To that end, an idea of how to optimize the current model was put forward, suspicious error factors were screened out based on the previous researches and collated with those in the current model for correlation analysis, and error law in the current model was explored. Then soil samples were classified in line with the law to improve the model in prediction accuracy. Main error factors in each classification sample

\* 国家自然科学基金项目(41877071, 41877008)和国家科技基础性工作专项项目(2014FY110200A16)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41877071 and 41877008) and the Special Project of National Science and Technology Basic Research of China (No. 2014FY110200A16)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangtianwei@webmail.hzau.edu.cn

作者简介: 杨家伟(1996—), 男, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事土壤地理研究。E-mail: hzauijw@163.com

收稿日期: 2019-09-09; 收到修改稿日期: 2020-01-06; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-03-12

were searched out and got involved in modeling. Eventually, the optimized model for soil classification was established. 【Result】 By comparing the value estimated with the current model with the measured one, it is found that the former is generally higher than the latter. Previous studies have shown that soil organic matter, silt  $CEC_7$ , soil pH and soil free iron oxide content are factors affecting CEC of the fine soil in the B layer of weathered soil. Correlation analysis was performed of the factors with the error, and indicated that organic matter and silt  $CEC_7$  were the main ones causing errors. Studies found that in predicting soils higher or lower than  $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  in organic content, errors varied in dispersion. Therefore, in this study, all soil samples were sorted into two groups, high and low in organic matter content for modeling. For the group high in organic matter, errors were ultra-significantly related to soil organic matter content ( $R^2=0.402$ ,  $n=23$ ). Considering that organic matter may get bonded with clay particles, the group of samples high in organic matter content were further sorted in three subgroups, i.e. “clay soil samples”, “clay loam soil samples”, and “loam soil samples” and a model was set up for each of the three subgroups. In the subgroup low in organic matter content, errors were ultra-significantly related to  $CEC_7$  of silt ( $R^2=0.675$ ,  $n=23$ ), so a direct model was obtained for soil samples low in organic matter. Considering that  $CEC_7$  is not easy to be measured, soil pH, annual mean temperature (Tem,  $^{\circ}\text{C}$ ) and Latitude (Lat) were selected and used in modeling for predicting silt  $CEC_7$ , and consequently an indirect model based on environmental factors was established for soil samples low in organic matter. Through the accuracy evaluation of the models, it is found that optimization of the models has brought predicted values closer to measured values, and the models for all subgroups of soil samples are good in accuracy. Optimization of the models has raised retrieval of iron-rich soils from 20% to 93.3% in accuracy. 【Conclusion】 Based on the above findings, it is found that modeling by content of soil organic matter is reasonable. By analyzing sources of the errors with the current model and following the optimization formula, models for predicting cation exchange capacity of clay particles are established by content of soil organic matter with higher accuracy. The models may provide reliable data support for retrieval in the soil taxonomy.

**Key words:** Clay cation exchange capacity; Chinese soil classification system; Model optimization; Error factors; Organic matter

黏粒阳离子交换量指在 pH 为 7 的条件下测定的每千克黏粒中可吸附的全部交换性阳离子量, 也称为黏粒  $CEC_7$ , 是《中国土壤系统分类(第三版)》和《美国土壤系统分类》中确定诊断层、诊断特性的重要指标, 例如低活性富铁层要求其部分亚层黏粒  $CEC_7 < 24 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。但由于土壤黏粒的提取较为耗时费力, 在系统分类检索过程中使用的黏粒  $CEC_7$  通常并非实测结果, 而是将黏粒视为细土  $CEC_7$  的主要贡献因子, 通过模型 1 由细土  $CEC_7$  换算得到(以下称为现行模型)<sup>[1]</sup>。

$$CEC_{7(c)} = \frac{CEC_7}{C_c} \times 1000 \quad (1)$$

式中,  $CEC_{7(c)}$  为黏粒阳离子量,  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $CEC_7$  为细土阳离子交换量,  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $C_c$  为每千克细土中黏粒的含量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

现行模型在我国土壤系统分类检索过程中被广泛使用。但有研究表明, 由该模型得到的黏粒  $CEC_7$  估测值通常高于实测值, 造成对高级分类单元的误

判<sup>[2-3]</sup>, 特别是在南方红壤地区, 由于黏粒  $CEC_7$  估测值大于等于  $24 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 可能将富铁土划归为淋溶土或雏形土。现行模型仅考虑了黏粒对细土  $CEC_7$  的贡献, 但目前很多研究表明有机质、粉粒、游离氧化铁等土壤属性均对细土  $CEC_7$  有贡献<sup>[4-9]</sup>, 导致单位质量的黏粒吸附的交换性阳离子量被高估。

本研究以江西省地带性土壤为主要对象, 同时搜集相同气候带的其他南方地区土壤数据, 将上述土壤属性视为误差因子, 探究其对现行模型误差的影响。在此基础上, 通过优化模型将误差因子的影响削弱, 建立基于主要误差因子的黏粒  $CEC_7$  估测新模型, 提升模型估测结果准确性, 为系统分类检索提供可靠数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域以江西省为主, 属中亚热带湿润季风气候, 年均温约  $16.3\sim 19.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年降水量约  $1341\sim$

1 943 mm, 降水集中于 7—8 月份。地形复杂多样, 东、西、南三面环山, 北面濒临长江和鄱阳湖, 成土母质以泥质岩类风化物、酸性结晶岩类风化物、红砂岩类风化物为主, 全省特殊的气候条件使脱硅富铁铝化和生物富集现象强烈, 黏粒和次生黏土矿物含量相对丰富, 土壤以红壤、黄壤和黄棕壤为主<sup>[10-11]</sup>。

## 1.2 样品采集和数据测定

结合江西省地带性土壤分布范围, 综合考虑气温、降水、母质、海拔、坡度等因子, 进行模糊 C 均值聚类后确定 28 个典型采样点 (样点编号 1~28), 结合野外实际情况, 最终挖掘 28 个代表性土壤剖面, 均采自林、草地。按照中国科学院南京土壤研究所主编的《野外土壤描述与采样手册》<sup>[12]</sup> 要求进行剖面分层观测, 并自上而下采集土样, 待室内基本理化分析结束后, 结合颜色、黏粒胶膜等野外观测数据和颗粒组成、有机质、阳离子交换量、游离铁等室内分析数据, 每个样点选取代表性 B 亚层样品进一步提取粉粒和黏粒, 测定其阳离子交换量。本文使用此 B 亚层数据作为建模数据。同时, 引用相同气候带的 18 个代表性土层数据<sup>[4]</sup>, 以丰富数据来源 (样点编号 29~46), 样点分布如图 1 所示。

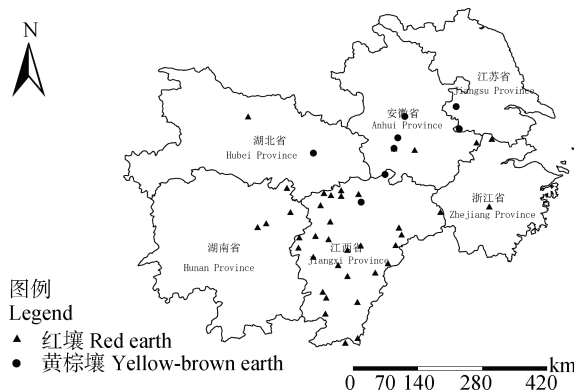


图 1 样点分布图  
Fig. 1 Soil sampling sites

土壤样品经过自然风干、挑出杂物后研磨过筛, 以备理化性质分析。土壤 pH 采用电位法 (液土比 2.5 : 1) 测定; 有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 游离氧化铁采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠提取, 邻菲罗啉比色法测定; 土壤机械组成采用吸管法测定, 并根据目前广泛使用的美国农业部制分级, 土壤粉粒和黏粒提取采用虹吸法测定, 阳离

子交换量采用乙酸铵 ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) pH 7.0 交换法测定<sup>[13-14]</sup>。引用文献中的粉粒数据通过模型 2 从国际制分级数据转换为美国农业部制分级数据<sup>[15]</sup>, 对比转换前后的粉粒含量数据, 发现差异较小, 南方红壤区今后开展此类研究可以考虑忽略二者差异。各样点理化性质如表 1 所示。

$$P_{2-50} = -18.39 + 2.097 (P_{2-20}) + 0.6726 (P_{20-2000}) - 0.0142 (P_{2-20})^2 - 0.0049 (P_{20-2000})^2 \quad (R^2 = 0.823)$$

$$\text{如果 } P_{2-50} < 0, \text{ 那么 } P_{2-50} = 0.8289 (P_{2-20}) + 0.0198 (P_{20-2000}) \quad (2)$$

式中,  $P_{2-50}$  为美国农业部制土壤颗粒分级标准对应的粉粒含量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $P_{2-20}$  为国际制土壤颗粒分级标准对应的粉粒含量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $P_{20-2000}$  为国际制土壤颗粒分级标准对应的砂粒含量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

## 1.3 误差规律确定方法及优化模型形式确定

现行模型估测值高于实测值主要是因为仅考虑了黏粒对细土  $\text{CEC}_7$  的贡献, 而忽略了其他因子对细土  $\text{CEC}_7$  的贡献。因此, 本研究将其他因子 (以下称误差因子) 对细土  $\text{CEC}_7$  的贡献视为现行模型的误差  $d'$ 。

误差  $d'$  计算公式为:

$$d' = \text{CEC}_7 - \frac{y}{1000} \times C_c \quad (3)$$

式中,  $\text{CEC}_7$  为细土的阳离子交换量,  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $y$  为实测黏粒阳离子交换量,  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $C_c$  为每千克细土中的黏粒含量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

本研究通过消除误差因子对结果的影响来对现行模型进行优化。通过选取适合建模的误差因子, 将其与误差  $d'$  做线性回归分析得到误差规律  $D'$  (形式为  $y_i = a + bx_i$ ), 代入模型 4 得出新的黏粒  $\text{CEC}_7$  估测模型 (以下称优化模型):

$$\text{CEC}_{(7)} = \frac{\text{CEC}_7 - D'}{C_c} \times 1000 \quad (4)$$

式中,  $\text{CEC}_{(7)(c)}$  为优化后的每千克黏粒  $\text{CEC}_7$  估测值,  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\text{CEC}_7$  为细土阳离子交换量,  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $C_c$  为每千克细土中黏粒含量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physiochemical properties of the test soil

样点 编号 <sup>①</sup>	发生层 深度 <sup>②</sup> n /cm	pH	有机质 <sup>③</sup> / (g·kg <sup>-1</sup> )	游离氧 化铁 <sup>④</sup> / (g·kg <sup>-1</sup> )	细土 CEC <sub>7</sub> <sup>⑤</sup> / (cmol·kg <sup>-1</sup> )	黏粒 CEC <sub>7</sub> 实 测值 <sup>⑥</sup> / (cmol·kg <sup>-1</sup> )	粉粒 CEC <sub>7</sub> 实 测值 <sup>⑦</sup> / (cmol·kg <sup>-1</sup> )	土壤机械组成 <sup>⑧</sup> / (g·kg <sup>-1</sup> )		
								砂粒	粉粒	黏粒
								Sand	Silt	Clay
								2~ 0.05 mm	0.05~ 0.002 mm	<0.002 mm
1	25~40	5.60	16.00	6.63	12.30	13.25	0.60	134.0	373.0	493.0
2	30~43	4.50	15.10	5.10	15.50	21.55	0.80	94.0	496.0	410.0
3	40~80	4.00	12.90	2.19	15.60	27.65	1.60	304.0	295.0	401.0
4	40~110	5.10	9.70	2.46	12.20	18.90	2.30	160.0	438.0	402.0
5	20~58	5.60	13.90	3.60	17.50	21.90	2.40	8.0	513.0	479.0
6	18~47	4.60	4.49	2.44	6.43	19.10	1.19	596.9	208.9	194.2
7	20~35	4.29	4.73	2.39	4.60	10.60	4.27	455.7	413.0	131.3
8	18~66	4.81	5.33	1.86	9.68	13.90	5.78	160.4	389.5	450.1
9	68~90	4.56	6.07	2.88	11.79	17.91	0.43	60.00	396.5	543.5
10	25~60	4.92	9.21	2.40	14.09	19.37	2.18	78.30	402.0	519.7
11	22~70	4.64	10.21	2.56	12.31	16.99	1.14	356.7	176.5	466.8
12	25~45	4.35	17.62	3.13	16.62	15.31	2.78	393.0	132.0	475.0
13	148~192	5.30	4.60	2.43	9.40	21.55	1.00	81.00	599.0	320.0
14	30~70	4.60	7.04	4.94	12.59	15.90	0.86	328.3	345.0	326.7
15	18~48	5.18	5.72	2.45	7.88	16.90	0.54	368.5	282.9	348.6
16	45~85	4.51	7.51	2.09	8.09	14.77	0.48	462.2	224.6	313.2
17	18~40	4.23	7.75	2.69	7.43	14.12	1.78	360.2	317.2	322.6
18	20~40	4.86	8.83	1.19	7.71	11.14	6.58	560.2	200.0	239.8
19	15~45	4.86	10.55	3.90	9.83	5.73	3.78	297.3	324.0	378.7
20	20~47	4.35	13.22	0.91	12.11	11.85	2.28	677.4	103.6	219.0
21	60~70	4.32	9.20	4.04	11.83	12.50	1.41	196.0	419.0	385.0
22	15~65	4.60	9.68	3.83	10.96	13.09	8.38	461.2	218.7	320.1
23	24~65	4.70	18.37	3.10	32.66	19.80	3.01	631.2	227.0	141.8
24	30~55	5.05	7.80	1.84	4.30	8.90	3.20	664.4	158.4	177.2
25	30~50	4.42	10.33	1.64	11.00	11.60	2.60	701.4	216.0	82.60
26	16~46	3.63	14.00	2.55	23.16	16.70	1.58	498.5	281.5	220.0
27	18~50	4.50	8.40	1.63	13.70	23.60	2.00	447.0	350.0	203.0
28	20~60	5.60	8.15	1.56	7.44	20.96	1.38	339.2	406.3	254.5
29	23~72	7.65	3.97	3.07	29.70	49.33	9.38	179.0	295.0	526.0
30	50~120	5.63	3.62	4.15	21.98	60.12	12.07	436.0	268.0	296.0
31	30~80	6.57	2.93	2.32	22.35	48.76	9.92	336.1	294.9	369.0
32	24~89	5.41	4.31	1.94	14.99	24.23	6.20	153.8	362.2	484.0
33	24~200	5.51	2.59	1.78	11.12	21.03	6.34	278.5	346.5	375.0

续表

样点 编号 <sup>①</sup>	发生层 深度 <sup>②</sup> n/cm	pH	有机质 <sup>③</sup> / (g·kg <sup>-1</sup> )	游离氧 化铁 <sup>④</sup> / (g·kg <sup>-1</sup> )	细土 CEC <sub>7</sub> <sup>⑤</sup> / (cmol·kg <sup>-1</sup> )	黏粒 CEC <sub>7</sub> 实 测值 <sup>⑥</sup> / (cmol·kg <sup>-1</sup> )	粉粒 CEC <sub>7</sub> 实 测值 <sup>⑦</sup> / (cmol·kg <sup>-1</sup> )	土壤机械组成 <sup>⑧</sup> / (g·kg <sup>-1</sup> )		
								砂粒	粉粒	黏粒
								Sand	Silt	Clay
								2~ 0.05 mm	0.05~ 0.002 mm	<0.002 mm
34	25~130	5.54	3.10	1.71	12.36	23.17	7.60	271.6	346.4	382.0
35	17~52	5.02	1.90	1.94	10.65	25.41	6.46	368.0	317.0	315.0
36	20~75	5.07	3.79	1.23	9.81	26.39	3.16	303.2	390.8	306.0
37	12~130	4.84	2.24	1.97	9.77	23.98	4.56	318.2	363.8	318.0
38	19~61	4.67	1.90	0.99	9.94	23.14	1.69	228.9	390.1	381.0
39	22~95	5.43	5.00	1.76	14.59	21.38	3.91	99.00	300.0	601.0
40	25~100	4.72	3.97	1.11	13.07	20.67	2.58	108.0	318.0	574.0
41	65~120	4.87	3.45	2.88	12.93	22.01	2.91	164.0	303.0	533.0
42	24~61	5.39	3.28	1.39	10.41	23.37	1.92	250.0	355.0	395.0
43	25~80	4.83	3.79	0.86	9.33	18.22	1.64	173.0	365.0	462.0
44	20~95	4.50	2.93	0.96	8.91	18.79	1.12	250.4	319.6	430.0
45	30~110	3.98	4.14	1.23	9.47	16.04	2.24	122.2	355.8	522.0
46	15~90	4.58	2.41	1.17	9.73	15.38	1.95	100.4	330.6	569.0

①Sample number, ②Depth of soil genetic horizon, ③Soil organic matter, ④Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ⑤Fine-earth CEC<sub>7</sub>, ⑥Clay CEC<sub>7</sub> measured values, ⑦Silt CEC<sub>7</sub> measured values, ⑧Soil mechanical composition.

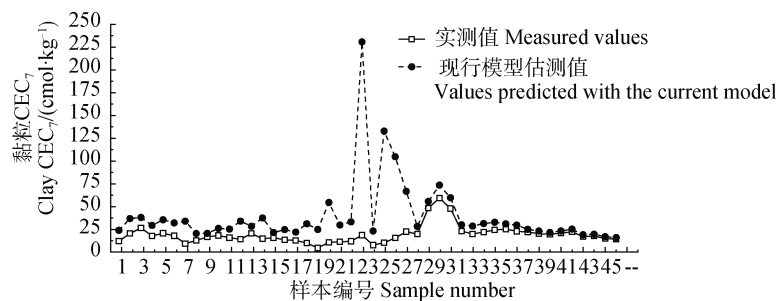
#### 1.4 模型精度验证方法

模型精度由决定系数 ( $R^2$ )、平均绝对误差 (MAE)、均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE) 四个参数进行评价, 模型的决定系数 ( $R^2$ ) 越大, 模型越稳定, 平均绝对误差 (MAE)、均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE) 越小, 表明模拟值与实测值之间的偏差越小, 即模型的模拟结果越准确、可靠<sup>[16]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 现行模型误差分析及误差因子选取

图 2 为现行模型估测值与实测值的散点图。整体可知, 估测值高于实测值, 其中黏粒 CEC<sub>7</sub> 实测平均值为 20.37 cmol·kg<sup>-1</sup>, 而估测平均值为 40.36 cmol·kg<sup>-1</sup>, 估测平均值为实测平均值的 1.98



注: CEC<sub>7</sub>: 黏粒阳离子交换量。下同。Note: CEC<sub>7</sub>: Clay cation exchange capacity. The same below.

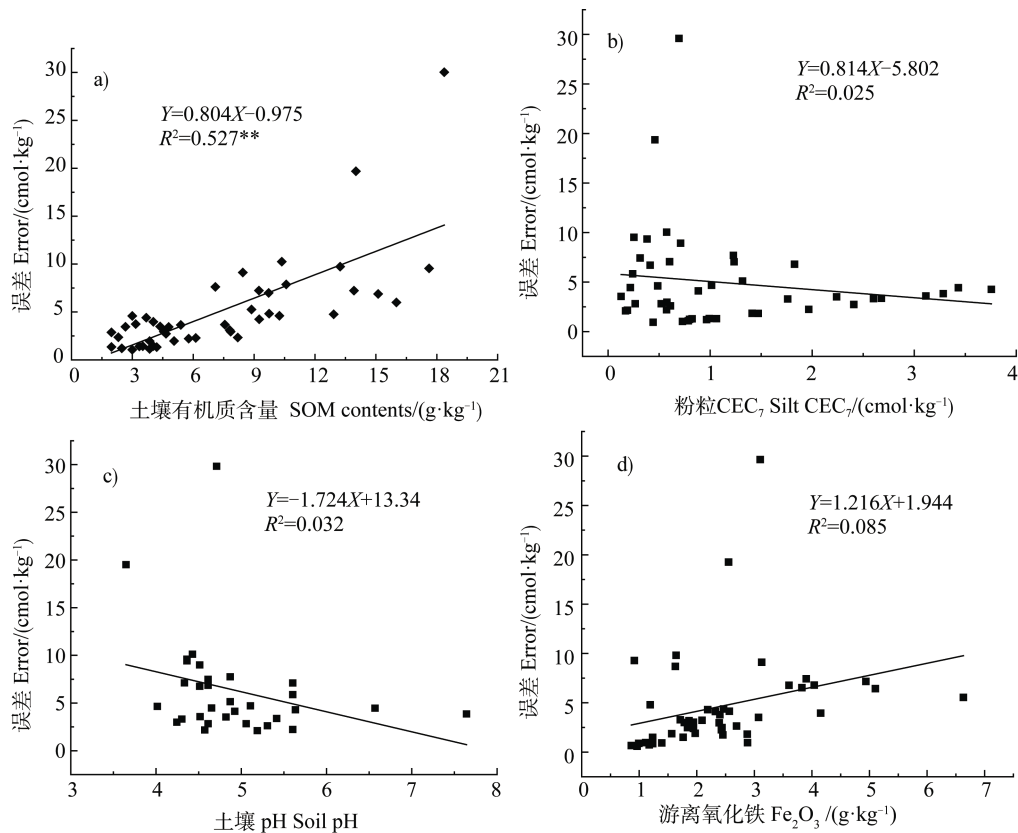
图 2 现行模型估测值和实测值散点图

Fig. 2 Scatter plot of measured values and values predicted with the current model

倍。实测值范围在  $5.73\sim 60.12\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间，估测值范围在  $17.10\sim 230.4\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间，分布较为分散，估测值分布范围为实测值 2.98 倍 $\sim$ 3.83 倍。

现行模型估测值普遍高于实测值的主要原因是其认为在热带和亚热带地区，B 层土壤有机质含量较低，从而仅考虑黏粒对土壤风化 B 层细土 CEC 的贡献。但研究表明，虽然 B 层土壤有机质含量相对 A 层有所减少，但并未达到可忽略的程度。以江西省为例，第二次土壤普查数据表明，红壤 B 层有机质含量较 A 层平均减少 62.7%，但仍有约  $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；黄壤 B 层较 A 层平均减少 75.0%，但仍有约  $17.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[11]</sup>，而有机质在以 1:1 型黏土矿物和铁、铝氧化物为主的土壤胶体中可以增加其比表面积，提升土壤 CEC，且随着采集深度的增加，土壤有机质含量与土壤 CEC 之间的相关性逐渐增强<sup>[17]</sup>。此外，有机质不仅直接对土壤 CEC 产生贡献，也可通过与黏粒复合，降低黏粒对土壤阳离子交换量的贡献程度，有机质

含量越高，黏粒 CEC<sub>7</sub> 的贡献程度越低<sup>[6, 17]</sup>。由图 3a) 可知，全体样本中有机质与误差呈显著正相关 ( $R^2=0.527^{**}$ ,  $n=46$ )，随着有机质增加，误差值逐渐增大，离散程度逐渐增加，表明有机质含量高低对现行模型估测值误差的影响程度不同。除有机质对现行模型误差的影响之外，粉粒是影响该模型估测准确度的重要因素<sup>[3]</sup>，粉粒中由于含有高岭石、伊利石等黏土矿物，对细土 CEC 具有一定的贡献<sup>[5]</sup>。由图 3b) 可知，随着粉粒 CEC<sub>7</sub> 的增加，误差值有逐渐降低的趋势，但二者相关关系不显著 ( $R^2=0.025$ ,  $n=46$ )。土壤 pH 的变化会直接影响离子吸附作用，也可通过改变土壤表面电荷产生间接影响<sup>[18]</sup>，从而会影响现行模型的精确度。由图 3c) 可知，随着土壤 pH 的增加，误差值有逐渐降低的趋势，但二者相关关系不显著 ( $R^2=0.032$ ,  $n=46$ )。此外，土壤 pH 对 CEC 的影响机理不确切<sup>[7]</sup>，本研究不将其作为主要误差因子参与建模。由图 3d) 可



注：粉粒 CEC<sub>7</sub> 指每千克细土中包含粉粒对应的阳离子交换量。下同。Note: Silt CEC<sub>7</sub> refers to cation exchange capacity of the silt contained in each kilogram of fine soil. The same below.

图 3 现行模型误差因子与误差相关性

Fig. 3 Correlation analysis between error factor and error in the current model

知, 土壤游离氧化铁与误差相关关系不显著 ( $R^2=0.085$ ,  $n=46$ ), 且已有研究表明游离氧化铁对土壤  $CEC_7$  的影响机理较为复杂, 在去除游离氧化铁前后, 土壤  $CEC_7$  大小变化不明显<sup>[5]</sup>, 因此本研究

不将其作为主要误差因子参与建模。表 2 为土壤有机质、粉粒  $CEC_7$ 、pH、游离氧化铁分别进行相关性分析的结果, 可知不同误差因子之间相关关系均不显著 ( $n=46$ ), 其相互关系不会对优化后模型产生影响。

表 2 不同误差因子之间相关系数

Table 2 Correlation coefficients between different error factors ( $n=46$ )

	土壤有机质 SOM	粉粒 $CEC_7$ Silt $CEC_7$	pH	游离氧化铁 Free iron oxides
土壤有机质 SOM	1			
粉粒 $CEC_7$ Silt $CEC_7$	-0.010	1		
pH	0.326	0.056	1	
游离氧化铁 Free iron oxides	0.326	-0.182	-0.217	1

在全部样品中, 有机质与误差极显著相关, 粉粒  $CEC_7$  与误差相关关系不显著。但通过观察发现, 在有机质为  $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  前后离散程度有所不同, 数据分析结果表明, 随着有机质含量增加, 误差离散程度也逐渐增加, 当有机质含量小于  $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, 误差平均值为  $2.3 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 标准差为  $1.12 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 当有机质含量大于  $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, 误差平均值为  $7.45 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 标准差为  $6 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此本研究将全部样本按高、低有机质两类建模。将有有机质含量大于  $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的样本称作高有机质样本, 数量为 23 个, 包含黏土类 9 个、黏壤土类 8 个、壤土类 6 个三种质地; 将有有机质含量小于  $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的样本称作低有机质样本, 数量为 23 个, 包含黏土类 12 个、黏壤土类 11 个两种质地。

分别在高低有机质样品中将现行模型误差与有

机质和粉粒  $CEC_7$  做灰色关联性分析和线性回归分析, 结果如表 3 所示: 在高有机质样本中, 现行模型误差与有机质和粉粒  $CEC_7$  的关联度  $r_i$  为 0.834 和 0.562, 决定系数  $R^2$  分别为 0.402 和 0.038, 表明高有机质样本中, 有机质与误差关联度和相关性更强, 可忽略粉粒  $CEC_7$  对误差的影响。同时根据有机质与黏粒的复合作用, 将高有机质样本按照质地进行细分, 以提升建模效果。在低有机质样本中, 现行模型误差与有机质和粉粒  $CEC_7$  的关联度  $r_i$  为 0.663 和 0.922, 决定系数  $R^2$  分别为 0.019 和 0.675, 表明低有机质样本中, 粉粒  $CEC_7$  与误差关联性和相关性更强。值得指出的是, 粉粒的提取较黏粒更为复杂, 因此, 本研究在实测粉粒  $CEC_7$  的同时建立关于环境因子的粉粒  $CEC_7$  估测模型, 从而提升模型适用性。

表 3 不同样本中误差与有机质、粉粒  $CEC_7$  的关联性

Table 3 Correlations of errors with organic matter and silt  $CEC_7$  relative to type of soil samples

样本类型	样本数量	分析对象	灰色关联性分析	线性回归分析
Sample type	Sample size	Analysis object	Grey relational analysis	Linear regression analysis
高有机质样本	23	有机质 OM	0.834	0.402**
High organic matter samples		粉粒 $CEC_7$ Silt $CEC_7$	0.562	0.038
低有机质样本	23	有机质 OM	0.562	0.019
Low organic matter samples		粉粒 $CEC_7$ Silt $CEC_7$	0.922	0.675**

注: \*\*表示达到 0.01 的显著水平。Note: \*\* denotes significant difference at  $P=0.01$ .

## 2.2 高有机质样本建模

将高有机质样本按照土壤质地类型分为三类,

即“黏土类样本”、“黏壤土类样本”和“壤土类样本”, 分别进行建模。通过式 (3) 建立高有机质各

样本中有机质和误差的线性方程分别为  $Y_1=0.510X-0.899$  ( $R^2=0.827, n=9$ ),  $Y_2=0.817X-1.316$  ( $R^2=0.527, n=8$ ),  $Y_3=2.492X-15.67$  ( $R^2=0.963, n=6$ )。将各线性方程分别代入模型 4, 即可得到黏土类、黏壤土类、壤土类质地类型高有机质样本的黏粒  $CEC_7$  多元分段估测模型:

$$CEC_{(7)} = \begin{cases} \frac{CEC_7 - (0.510 \times OM - 0.899)}{C_c} \times 1000 \text{ (黏土类)} \\ \frac{CEC_7 - (0.817 \times OM - 1.316)}{C_c} \times 1000 \text{ (黏壤土类)} \\ \frac{CEC_7 - (2.492 \times OM - 15.665)}{C_c} \times 1000 \text{ (壤土类)} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $CEC_{7(c)}$  为优化后的每千克黏粒  $CEC_7$  估测值,  $cmol \cdot kg^{-1}$ ;  $OM$  为有机质含量,  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $C_c$  为黏粒含量,  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $CEC_7$  为细土  $CEC_7$  实测值,  $cmol \cdot kg^{-1}$ 。

适用范围分别为:黏土类, 即  $350 < C_{(clay)} < 1000$  且  $0 < C_{(silt)} < 600$  且  $0 < C_{(sand)} < 650$ ; 黏壤土类, 即  $200 < C_{(clay)} < 400$  且  $0 < C_{(silt)} < 730$  且  $0 < C_{(sand)} < 800$ ; 壤土类, 即  $0 < C_{(clay)} < 270$  且  $0 < C_{(silt)} < 800$  且  $0 < C_{(sand)} < 850$ 。

### 2.3 低有机质样本建模

**2.3.1 通过实测粉粒  $CEC_7$  直接建模** 由图 4 可知, 建立的低有机质粉粒  $CEC_7$  和误差的线性方程为  $Y=0.853X+0.899$  ( $R^2=0.685, n=23$ ), 代入模型 4 可得低有机质黏粒  $CEC_7$  估测模型 (下称“低有机质模型”)。

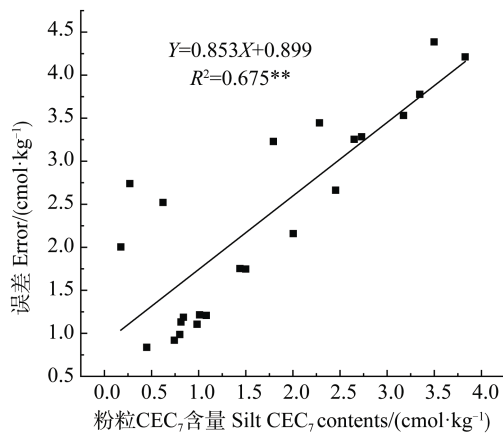


图 4 低有机质样本粉粒  $CEC_7$  与误差相关性分析  
Fig. 4 Correlation analysis of silt  $CEC_7$  and errors in models for low OM samples

$$CEC_{7(c)} = \frac{CEC_7 - (0.853 \times CEC_{7(s)} + 0.899)}{C_c} \times 1000 \quad (6)$$

式中,  $CEC_{7(c)}$  为优化后的每千克黏粒  $CEC_7$  估测值,  $cmol \cdot kg^{-1}$ ;  $CEC_{7(s)}$  为粉粒阳离子交换量,  $cmol \cdot kg^{-1}$ ;  $C_c$  为黏粒含量,  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $CEC_7$  为细土  $CEC_7$  实测值,  $cmol \cdot kg^{-1}$ 。

### 2.3.2 通过环境因子估测粉粒 $CEC_7$ 间接建模

粉粒  $CEC_7$  大小与黏土矿物组成和种类有关, 黏土矿物的组成与种类一般与土壤 pH、降水量、气温等理化、环境因子有关, 其具有纬度地带性规律<sup>[19-20]</sup>。

据此, 本研究选择土壤 pH、年均气温 ( $T$ )、年均降水量 ( $R$ )、纬度 ( $L$ ) 进行粉粒  $CEC_7$  的估测建模, 将该类因子进行多元逐步回归分析。其中, 年均气温和年均降水量均从中国气象数据网获取 (<http://data.cma.cn/>), 引用文献中采样点纬度数据采用行政区域中心点纬度数据替代。做回归分析时, 依次运用五种自变量进入方法: 输入法、逐步法、删除法、后退法及前进法做模型估测。变量的选入标准是  $F$  值的概率  $P \leq 0.05$ , 剔除标准是  $P \geq 0.10$ 。

多元逐步回归的方程式如下所示:

$$CEC_{7(s)} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \lambda_i \quad (7)$$

式中,  $CEC_{7(s)}$  为粉粒  $CEC_7$  大小;  $n$  为参与回归的环境因子个数;  $a_0$ 、 $a_i$  为回归系数;  $\lambda_i$  为第  $i$  个环境因子的大小。

得到的基于环境因子的粉粒  $CEC_7$  的估测最佳模型结果如模型 8 所示, 其  $R^2=0.606, n=23$ 。

$$CEC_{7(s)} = 1.501 \times L + 1.693 \times T + 1.775 \times pH - 79.99 \quad (8)$$

式中,  $L$  为纬度 (度数表示法);  $T$  为年均气温,  $^{\circ}C$ 。

代入模型 6 得到低有机质样本间接估测模型为:

$$CEC_{7(c)} = \{ CEC_7 - [0.853 \times (1.501 \times L + 1.693 \times T + 1.775 \times pH - 79.99) + 0.899] \} \times 1000 / C_c \quad (9)$$

式中,  $CEC_{7(c)}$  为优化后的每千克黏粒  $CEC_7$  估测值,



$\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $L$  为纬度 (度数表示法);  $T$  为年均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_c$  为黏粒含量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 按照有机质含量高低分类建模的合理性

有机质被视为现行模型的误差因子主要是有机质削弱了黏粒对细土  $\text{CEC}_7$  的贡献程度。一方面, 有机质会直接贡献阳离子交换量, 导致黏粒对细土  $\text{CEC}_7$  的贡献程度减小, 从而根据现行模型计算出的黏粒  $\text{CEC}_7$  会高于实测值; 另一方面, 有机质会与黏粒的矿质部分复合, 复合后阳离子交换量总是小于二组分单独存在的交换量之和<sup>[6]</sup>, 从而削弱黏粒对细土  $\text{CEC}_7$  的贡献程度。因此, 高低有机质对于现行模型精度的影响程度是不同的。如图 3a) 所示, 在一定程度上随着有机质含量增加, 误差会增大, 同时由于有机质与黏粒的复合作用增强, 误差离散程度也会增加, 整体上虽达到极显著相关, 但高有机质部分精度较差。此外, 考虑分类建模的另一个原因是高低有机质中主要误差因子不同。由相关性分析和灰色关联分析结果可知, 高有机质样本中有机质含量较高, 粉粒  $\text{CEC}_7$  对误差的贡献较低, 而低有机质样本的中粉粒  $\text{CEC}_7$  与误差具有极显著相关关系 (图 4)。因此, 结合统计分析结果, 本研究以有机质含量为  $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  作为分界线, 将全部样本分为了高、低有机质样本分别进行建模。值得指出的是, 此处的有机质“高、低”仅为相对性描述。

#### 3.2 各分类模型精度评价

图 5 为优化前后模型估测值与实测值的对比散点图, 整体而言优化后模型的估测值更加接近实测值, 且无异常点, 表明经过误差优化后的模型相对于优化前更加稳定, 估测效果更好。分别对各分类样本模型进行精度评价, 结果如表 4 所示。总体而言, 各分类样本模型精度评价结果良好, 符合使用要求, 但不同样本模型之间精度有所不同。低有机质样本直接模型的  $R^2$  最大, 为 0.959, 平均绝对误差 (MAE)、均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE) 最小, 表明其建模效果最好, 也说明在低有机质样本中, 粉粒  $\text{CEC}_7$  是主要的误差因子, 同时低有机质间接模型的  $R^2$ 、MAE、MSE、RMSE 与直接模型相近, 表明选取 pH、年均气温 ( $T$ )、纬度 ( $L$ ) 得

到的间接模型是可取的, 在使用过程中, 如果方便获取粉粒  $\text{CEC}_7$ , 推荐使用直接模型, 若粉粒  $\text{CEC}_7$  不方便获取, 则推荐使用间接模型。而在高有机质样本中精度评价结果由大到小依次为黏土类、黏壤土类、壤土类, 主要原因是三类样本中粉粒的含量由大到小依次为壤土类、黏壤土类、黏土类, 随着粉粒的增加, 有机质对误差的贡献程度会相对降低, 从而导致将有机质视为唯一误差因子的高有机质优化模型精度逐渐下降。

#### 3.3 黏粒 $\text{CEC}_7$ 估测模型优化前后对土纲划分的影响

本研究对现行模型优化的目的是为了提升黏粒  $\text{CEC}_7$  的估测准确性, 从而为系统分类检索的准确性提供保障。对江西省 28 个代表性剖面颜色、质地、黏粒含量、游离氧化铁含量等数据进行整理, 并按照《中国土壤系统分类 (第三版)》<sup>[1]</sup> 要求检索土纲, 由图 6 可知, 使用实测黏粒  $\text{CEC}_7$  值检索后, 28 个土壤剖面中有 15 个划为富铁土, 而使用现行模型估测值检索仅有 3 个土壤剖面可划为富铁土, 准确率仅 20%; 优化后的分类模型共有 14 个土壤剖面可划为富铁土, 准确率提升至 93.3%。通过对比可以看出, 优化后的模型由于消除了有机质和粉粒  $\text{CEC}_7$  的干扰, 估测值更接近实测值。

#### 3.4 优化后模型的普适性

富铁土主要形成于温热气候条件下, 广泛分布于我国南方诸省<sup>[21-25]</sup>。本研究样点选取以江西省为主, 加以浙江、湖南、湖北等省份, 主要集中于我国东南部地区, 地形以山地丘陵为主。陈志诚等<sup>[3]</sup> 曾分别于海口、广州、南昌挖掘三个土壤断面开展研究, 结果表明江西断面丘陵和山地的土壤 B 层细粉粒/黏粒比相较海南和广东断面有逐渐增大趋势, 海南和广东断面的黏粒  $\text{CEC}_7$  计算值主要集中于  $16\sim 24\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 江西断面丘陵区域部分断面大于  $24\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 山地上则均大于  $40\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 计算数值高于实测值。以上研究表明, 江西省及其周边区域现行模型计算结果相较于其他区域误差更大, 针对该区域开展的模型优化研究更加符合区域特性, 对于其他区域的适用性尚有待验证和提升。值得指出的是, 砂土质地不是富铁土的典型质地类型, 同时由于采样限制, 在此未做深入研究。此外, 各类质地样品量较小, 今后研究中可注重提升各类样品数量, 进一步提升优化模型估测精度。

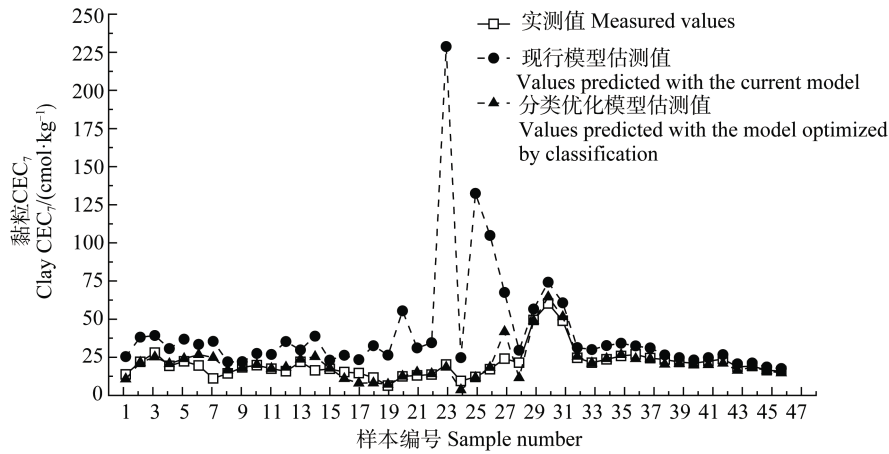


图 5 估测模型优化前后与实测值散点图

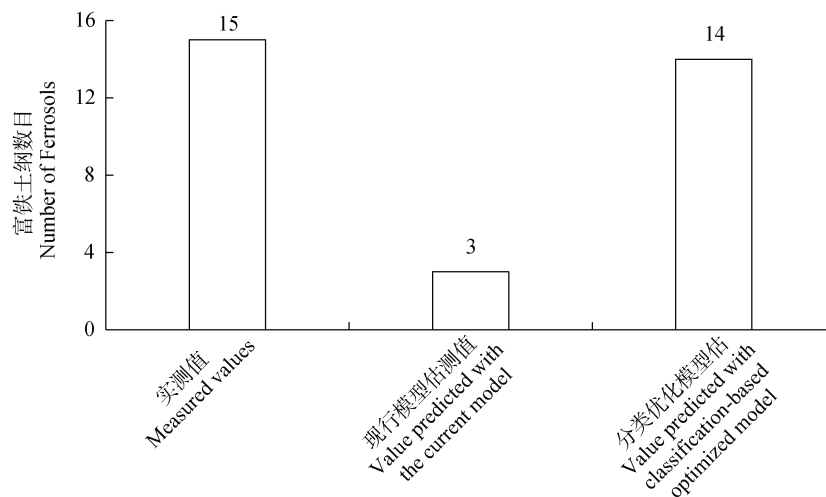
Fig. 5 Scatter plots predicted values and measured values before and after optimization of the prediction model

表 4 各分类样本模型精度评价结果

Table 4 Accuracy evaluation of the models based on classification of soil samples

模型名称 Model name	n	验证方程 Verification equation	模型精度评价指标 Indices for accuracy evaluation of models			
			R <sup>2</sup>	MAE	MSE	RMSE
高有机质黏土类样本模型 <sup>①</sup>	9	$Y=0.908X+1.746$	0.806	1.418	0.363	1.806
高有机质黏壤土类样本模型 <sup>②</sup>	8	$Y=1.130X-1.830$	0.348	3.421	2.559	4.524
高有机质壤土类样本模型 <sup>③</sup>	6	$Y=1.767X-12.829$	0.58	6.22	12.816	8.769
低有机质样本直接模型 <sup>④</sup>	23	$Y=0.946X+1.765$	0.959	1.680	0.255	2.421
低有机质样本间接模型 <sup>⑤</sup>	23	$Y=0.999X+0.730$	0.911	2.311	0.602	3.721

①Model for clay soil samples high in organic matter, ②Model for clay loam soil samples high in organic matter, ③Model for loam soil samples high in organic matter, ④Direct model for soil samples low in organic matter, ⑤Indirect model for soil samples low in organic matter.



不同黏粒CEC7数据来源 Sources of clay CEC7 data relative to type of clay

图 6 不同黏粒 CEC<sub>7</sub> 数据来源对应富铁土纲检索数目

Fig. 6 Sources of clay CEC<sub>7</sub> data corresponding to number of Ferrosols

## 4 结论

通过分析现行模型误差的来源, 基于优化公式, 探究了按照有机质含量高低分类建模的合理性, 得到了黏粒 CEC<sub>7</sub>分类优化估测模型, 提升了模型预测精度, 为土壤系统分类检索提供了可靠数据支持。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Soil System Classification Research Group & China Soil System Classification Research Cooperation Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Chinese soil taxonomy search[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001. [中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.]
- [ 2 ] Mou J R. Study of ferrosols and argosols in Hubei and Jiangxi Province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. [牟经瑞. 富铁土、淋溶土在鄂赣地区分布与分界的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [ 3 ] Chen Z C, Gong Z T, Zhao W J, et al. Some characteristics and taxonomic classification of Ferrallitic soils in eastern part of tropical and subtropical zone of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32 (Supplement): 53—68. [陈志诚, 龚子同, 赵文君, 等. 我国热带亚热带东部富铁铝化土壤特性及系统分类[J]. *土壤学报*, 1995, 32 (增刊): 53—68.]
- [ 4 ] Zhang M K, Zhu Z X. Effect of powder on cation exchange capacity of soil [J]. *Soils and Fertilizers*, 1993 (4): 41—43. [章明奎, 朱祖祥. 粉粒对土壤阳离子交换量的影响[J]. *土壤肥料*, 1993 (4): 41—43.]
- [ 5 ] Xu M G, Zhang J X, Zhang H, et al. Study on effect factors of cation exchange capacity in Dark felty soils and Yellow-cinnamon soils [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1991, 22 (3): 108—110, 127. [徐明岗, 张建新, 张航, 等. 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.]
- [ 6 ] Xu M G, An Z S, Zhang J X. Contribution of organic matter and clay complex to cation exchange capacity in soils[J]. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali - occidentalis*, 1991, 19 (4): 79—84. [徐明岗, 安战士, 张建新. 有机质与粘粒复合对土壤阳离子交换量的贡献[J]. *西北农业大学学报*, 1991, 19 (4): 79—84.]
- [ 7 ] Wang W Y, Zhang L P, Liu Q. 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. [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.]
- [ 8 ] Bayat H, Davatgar N, Jalali M. Prediction of CEC using fractal parameters by artificial neural networks[J]. *International Agrophysics*, 2014, 28 (2): 143—152.
- [ 9 ] Liu S Q, Pu Y L, Zhang S R, et al. Spatial change and affecting factors of soil cation exchange capacity in Tibet[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (5): 1—5. [刘世全, 蒲玉琳, 张世榕, 等. 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.]
- [ 10 ] Soil Fertilizer Station, Hubei Department of Agriculture. Records of soil species in Hubei Province[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2015. [湖北省农业厅土肥站. 湖北省土种志[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2015.]
- [ 11 ] Xu J S, Liu X, Liu K S, et al. Jiangxi soils[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1991: 373—388. [许菊生, 刘勋, 刘开树, 等. 江西土壤[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991: 373—388.]
- [ 12 ] Zhang G L, Li D C. Manual of description and sampling [M]. Beijing: Science Press, 2016. [张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [ 13 ] Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (1): 227—241. [吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (1): 227—241.]
- [ 14 ] Bao S D. Analysis for soil and agro-chemistry [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [ 15 ] Minasny B, McBratney A B. The Australian soil texture boomerang: A comparison of the Australian and USDA/FAO soil particle-size classification systems[J]. *Soil Research*, 2001, 39 (6): 1443—1451.
- [ 16 ] Ni J H, Luo W H, Li Y X, et al. Simulation of leaf area and dry matter production in greenhouse tomato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38 (8): 1629—1635. [倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟[J]. *中国农业科学*, 2005, 38 (8): 1629—1635.]
- [ 17 ] Zhao Z Z. 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. [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.]
- [ 18 ] Zhang X N, Jiang N H, Shao Z C, et al. Studies on electrochemical properties of soils—VI. Adsorption of ions by red soils in relation to the electric charge of the soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1979, 16 (2): 145—156. [张效年, 蒋能慧, 邵宗臣, 等. 土壤电化学性质的研究——VI. 红壤对离子的吸附特点与其电荷性质的关系[J]. *土壤学报*, 1979, 16 (2): 145—156.]

- [ 19 ] Huang C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [ 20 ] Lü Q R, Wang X J. Clay minerals in fine-grained sediments at Changjiang estuary and their geochemical characteristics[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4): 141—153. [吕全荣, 王效京. 长江口细颗粒沉积物的粘土矿物及地球化学特征[J]. *沉积学报*, 1985, 3(4): 141—153.]
- [ 21 ] Zhao W J, Chen Z C. Establishment of ferrisol order in Chinese soil taxonomic classification[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(Supplement): 21—33. [赵文君, 陈志诚. 论富铁土纲的设立[J]. *土壤学报*, 1995, 32(增刊): 21—33.]
- [ 22 ] Jing C W, Zhang M K, Zhi J J, et al. Referencing between soils under GSCC and CST and CST soil mapping in Zhejiang Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 260—267. [荆长伟, 章明奎, 支俊俊, 等. 浙江省土壤发生分类与系统分类参比及制图研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 260—267.]
- [ 23 ] Ouyang N X, Zhang Y Z, Sheng H, et al. Attribution of typical soils derived from quaternary red clay of eastern Hunan in Chinese soil taxonomy[J]. *Soils*, 2018, 50(4): 841—852. [欧阳宁相, 张杨珠, 盛浩, 等. 湘东第四纪红色黏土发育的典型土壤在中国土壤系统分类中的归属[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 841—852.]
- [ 24 ] Luo M Y, Bao Y Y, Yang J W, et al. Characteristics of references between GSCC and CST for typical red soil in Jiangxi[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(5): 1—7. [罗梦雨, 包莹莹, 杨家伟, 等. 江西红壤在系统分类中的参比特征研究[J]. *土壤通报*, 2019, 50(5): 1—7.]
- [ 25 ] Ouyang N X, Zhang Y Z, Sheng H, et al. Taxonomy of granite-derived red soils in eastern Hunan[J]. *Soils*, 2017, 49(4): 828—837. [欧阳宁相, 张杨珠, 盛浩, 等. 湘东地区花岗岩红壤在中国土壤系统分类中的归属[J]. *土壤*, 2017, 49(4): 828—837.]

(责任编辑: 陈荣府)