

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.023

白志强, 张世熔, 钟钦梅, 等. 四川盆地西缘土壤阳离子交换量的特征及影响因素. 土壤, 2020, 52(3): 581–587.

四川盆地西缘土壤阳离子交换量的特征及影响因素^①

白志强, 张世熔*, 钟钦梅, 王贵胤, 徐光荣, 马小杰

(四川农业大学环境学院, 成都 611130)

摘要: 土壤阳离子交换量(CEC)因其对土壤肥力保护及污染评估具有重要意义而受到日益重视。对四川盆地西缘黄壤、黄棕壤、水稻土、紫色土、潮土和石灰土 CEC 进行系统比较及影响因素研究, 结果表明: 黄壤、水稻土和紫色土 CEC 显著低于黄棕壤($P < 0.05$), 显著高于潮土($P < 0.05$)。同时, 土壤 CEC 与年均温、积温呈负相关关系($P < 0.01$), 而与年均降水量和湿润指数呈二次函数关系($P < 0.01$); 山地土壤的 CEC 显著高于平原和丘陵土壤($P < 0.05$), 且土壤 CEC 随海拔增加而极显著上升($P < 0.01$); 冰碛物发育土壤的 CEC 显著高于河流冲积物和紫色粉砂岩发育土壤($P < 0.05$)。主成分分析结果表明, 温度和降水组成的气候因素为该区土壤 CEC 的决定性影响因素。

关键词: 土壤 CEC; 气候因素; 地形因素; 成土母质; 主成分分析

中图分类号: X53 文献标志码: A

Characteristics and Impact Factors of Soil Cation Exchange Capacity (CEC) in Western Margin of Sichuan Basin

BAI Zhiqiang, ZAHNG Shirong*, ZHONG Qinmei, WANG Guiyin, XU Guangrong, MA Xiaojie
(College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Soil cation exchange capacity (CEC) has become a concern in the world for its importance in soil fertility and pollution. Characteristics and impact factors of CECs of yellow earth, yellow-brown earth, paddy soil, purple soil, fluvo-aquic soil and calcareous soil in the western margin of Sichuan Basin were investigated and compared in this study. The results showed that CECs were significantly lower in yellow earth, paddy soil and purple soil than in yellow-brown earth ($P < 0.05$), but significantly higher than in fluvo-aquic soil ($P < 0.05$). Soil CEC was significantly negatively correlated with mean annual temperatures, $>0^{\circ}\text{C}$ and $>10^{\circ}\text{C}$ cumulative temperatures ($P < 0.01$), while showed quadratic function relation with precipitation and humidity index ($P < 0.01$). CECs were higher in the mountain soils than in the plain and hill soils ($P < 0.05$), and soil CEC was significantly positively correlated with altitudes ($P < 0.01$). CEC was higher in soils derived from glacial till than in soils derived from river alluvium and purple siltstone ($P < 0.05$). The result of principal component analysis illustrated that temperature and precipitation of climate factors were the determinant for soil CEC in the study region.

Key words: Soil CEC; Climate; Topography; Parent material; Principal component analysis

土壤阳离子交换量(CEC)不仅是评价土壤肥力的重要指标^[1], 也是土壤环境容量和污染物迁移转化的重要影响因素^[2-3]。因此, 开展土壤 CEC 的研究对于正确估算土壤的保肥能力和污染物迁移转化潜力具有重要意义。

迄今, 土壤 CEC 的特征及影响因素已有一些研究报道。例如, 杨艳丽等^[4]在江苏北部的研究表明, 褐土和水稻土 CEC 显著低于石质土和沼泽土($P < 0.05$), 显

著高于棕壤和盐土($P < 0.05$); 姜林等^[5]在祁连山区的研究表明, 高山草甸土 CEC 显著低于灰褐土($P < 0.05$), 而高于棕钙土($P < 0.05$)。在四川盆地及盆周山地, 尽管单一黄壤、水稻土和紫色土等类型的 CEC 研究已有一些报道^[6-8], 但是系统比较这些土壤类型的 CEC 研究还鲜见报道。

在土壤 CEC 的影响因素方面, 已有研究者报道了地貌类型、海拔高度、成土母质和土地利用方式等

①基金项目: 四川省环境保护科技项目计划(2018HB30)资助。

* 通讯作者(rsx01@163.com)

作者简介: 白志强(1997—), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态。E-mail: zhiqbai123@163.com

因素的影响^[9-10]。例如, Tesfahunegn 等^[11]在埃塞俄比亚北部的研究表明,高原面上土壤 CEC 显著低于山谷底部土壤($P<0.05$); Nakao 等^[12]在喀麦隆高原的研究表明,土壤 CEC 随着海拔的增加而增加($P<0.05$)。有研究表明,在巴拿马科罗拉多岛不同母质发育土壤的 CEC 差异明显:灰岩>砾岩>火山碎屑岩($P<0.05$)^[13]。此外,土地利用也是影响土壤 CEC 的重要因素。例如,陕西北部灌木林地转为耕地和苗圃能显著增加土壤 CEC($P<0.05$)^[14]。然而,已有报道多为上述因素中单一或某些因素对区域土壤 CEC 的影响,而鲜见分析年均温、年均降水量和湿润指数等气候因素对土壤 CEC 影响的报道。同时,已有研究多关注于各因素分别对土壤 CEC 的影响或相互关系,但鲜见多环境因素对土壤 CEC 综合影响的研究报道。

四川盆地西缘地处北亚热带季风性湿润气候区。区内地貌类型复杂、地表起伏较大导致温度和降水随空间变化明显。同时,区内分布着易受气候影响的紫色泥岩、砂岩和粉砂岩等母质,且土壤类型和土地利用方式均较多。因此,该区适合进行土壤 CEC 的系统对比及其影响因素的研究。本文拟通过调查该区土壤 CEC,同时探究气候、地貌类型和成土母质等因素对其的影响及程度,以期获得多环境因素综合作用下土壤 CEC 的决定性影响因素,同时为区域土壤保肥和污染防治提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地西缘,地理位置 $102^{\circ}7'48'' \sim 106^{\circ}28'48''$ E, $28^{\circ}30'36'' \sim 33^{\circ}16'12''$ N。区内受北亚热带季风性湿润气候影响,年均温变化显著($12 \sim 17^{\circ}\text{C}$)、年均降水量差异明显($800 \sim 1\,400$ mm)。地貌类型复杂,分布着平原、丘陵和山地 3 种地貌类型。地表起伏较大,海拔介于 $400 \sim 1\,800$ m。该区成土母质多样,主要为河流冲积物、冰碛物、紫色泥岩、紫色粉砂岩、紫色砂岩和石灰岩。土壤类型为黄壤、黄棕壤、水稻土、紫色土、潮土和石灰土。

1.2 土壤样品采集

在研究区域内,根据地貌类型、成土母质和土壤类型分布等因素,于 2017 年 6—7 月随机采集土壤样品 42 个。采样时,在每个样点的同一地块内用五点取样法将 5 个表层土壤子样混合组成一个样品,按四分法去掉后保留样品约 1 kg;同时,调查记录采样点的地理坐标、海拔、土壤类型、土地利用方式等相关信息。土壤样品经自然风干,去掉植物残骸、石块等,

过 2 mm 筛,备测。

1.3 样品测定

土壤 CEC 的测定采用乙酸铵交换法^[15]。称取 2.0 g 过 2 mm 筛孔的风干土壤放入 100 ml 离心管中,加入 1 mol/L 乙酸铵溶液搅拌均匀,重复处理 3 次;随后加入 950 ml/L 乙醇充分搅拌,重复处理 3 次,除去多余乙酸铵;然后用蒸馏水将土壤完全洗入消化管,并采用自动凯氏定氮仪蒸馏,馏出液用 0.05 mol/L 盐酸直接滴定。

土壤有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤 pH 采用电位法在土液比为 1:5(m/V)的条件下测定。本研究土壤样品性质测定均设置 3 次重复,所用化学试剂均为分析纯。

1.4 气象数据获取

本研究中的年均温、年均降水量、积温、湿润指数和干燥度等资料来源于中国科学院资源环境科学数据中心^[16],样点的气象数据利用 ArcGIS 10.2 软件提取。

1.5 数据统计分析

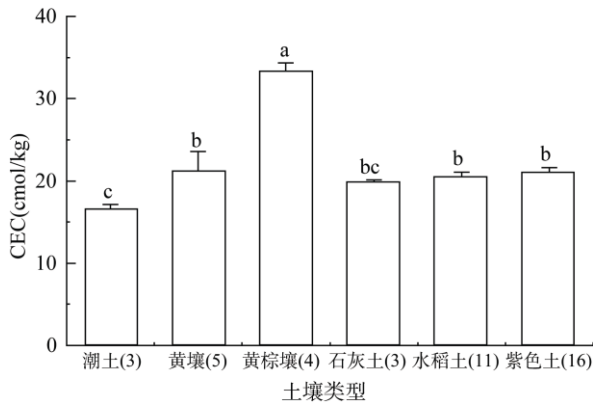
本研究数据在 SPSS19.0 平台进行统计分析,采用 Origin Pro 9.1 作图。其中,不同土壤类型、地貌类型、成土母质和土地利用方式间 CEC 的差异比较采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),平均值差异显著性比较采用最小显著差数法(LSD);土壤 CEC 与年均温、积温、年均降水量、湿润指数和海拔等影响因素之间的关系采用回归分析建模;各影响因素对土壤 CEC 变异的贡献采用主成分分析法综合分析。

2 结果与讨论

2.1 不同土壤类型 CEC 分布特征

不同土壤类型因其胶体类型和数量的不同,其 CEC 也可能存在差异^[17]。在研究区内,土壤 CEC 介于 $16.58 \sim 30.39$ cmol/kg,平均值为 21.70 cmol/kg。同时,不同土壤类型间 CEC 存在显著性差异(图 1, $P<0.05$)。其中,黄棕壤 CEC 为 33.38 cmol/kg ± 0.99 cmol/kg,显著大于其余 5 种土壤($P<0.05$)。这可能是因为黄棕壤多为林地土壤,其土壤有机碳含量显著大于其他土壤(图 2, $P<0.05$),而有机质又是土壤 CEC 的重要影响因素之一^[18-19]。除石灰土外,潮土 CEC 显著低于其他 4 种土壤($P<0.05$)。黄壤、石灰土、水稻土和紫色土 CEC 之间无显著差异($P>0.05$)。除黄棕壤外,潮土与黄壤、水稻土和紫色土的有机碳含量差异并不显著($P>0.05$),其 CEC 却显著低于以上 3 种土壤($P<0.05$)。这可能是因为潮土的矿质胶体数量低于以上 3 种土

壤，而矿质胶体也是土壤 CEC 的重要贡献源^[20]。水稻土有机碳含量显著高于紫色土($P<0.05$)，但是紫色土较水稻土更为黏重，所以两者 CEC 差异不显著($P>0.05$)。黄壤、石灰土、水稻土和紫色土这 4 种土壤可吸附的阳离子量相近，因此 CEC 不存在显著性差异($P>0.05$)。



(图中不同小写字母表示不同土壤类型间差异显著($P<0.05$), 横坐标括号内数值为样本数, 下同)

图 1 不同土壤类型之间 CEC 的差异
Fig. 1 CECs under different soils

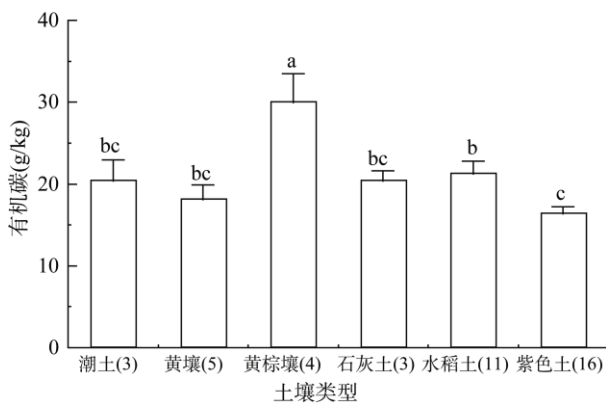


图 2 不同土壤类型之间 TOC 的差异
Fig. 2 TOCs under different soils

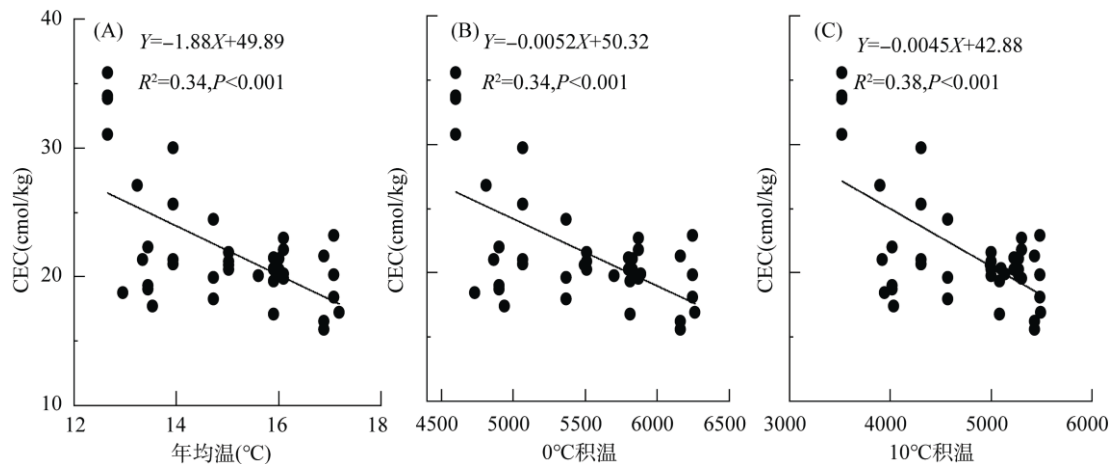


图 3 年均温和积温对土壤 CEC 的影响

Fig. 3 Effects of mean annual temperature and accumulated temperature on soil CEC

2.2 土壤 CEC 的影响因素

2.2.1 温度

温度通过控制土壤理化反应速率影响土壤胶体数量^[21]，进而影响土壤 CEC。年均温和积温作为主要的温度因素，影响土壤 CEC 的方式也较为相似。

年均温的变化能同时影响土壤有机胶体和矿质胶体的数量^[22]。因此，土壤 CEC 与年均温密切相关。本文探究了土壤 CEC 与年均温的关系，结果表明，土壤 CEC 与年均温呈极显著线性负相关(图 3A, $P<0.01$)。这可能是因为随着年均温的增加，土壤有机胶体的分解速率也会增加，导致土壤 CEC 降低。同时，温度的增加也有利于土壤矿物风化为更简单的形态^[23]。在本研究区，土壤黏土矿物主要为 2:1 的蒙脱石、伊利石和 1:1 型的高岭石构成^[24]。随着年均温的增加，更多的 2:1 型黏土矿物风化为 1:1 型，导致土壤 CEC 降低^[25]。

与年均温相似，积温也能同时影响土壤有机胶体和矿质胶体的数量，从而影响土壤 CEC。在本研究中，土壤 CEC 与积温呈极显著负相关(图 3B 和 C, $P<0.01$)。这是由于随着积温的增加，黏土矿物从 2:1 型风化为 1:1 型的比例增加，其 CEC 也随之降低。同时，本研究区积温较低的区域均为海拔较高的低山区，土地利用类型为林草地的土样较多，其植物返还土壤的有机质较高且分解较为缓慢。因此，土壤 CEC 随两种积温的增加而呈明显减少的趋势。

2.2.2 降水

降水能影响生物的生命活动和土壤的风化淋溶，从而影响土壤胶体数量^[26-27]。本研究进行了年均降水量、湿润指数和干燥度对土壤 CEC 影响的探究，结果表明，年均降水量和湿润指数对土壤 CEC 的影响较大，且土壤 CEC 与二者呈二次函数关

系(图 4, $P<0.01$), 而干燥度对土壤 CEC 的影响不显著($P>0.05$)。这主要是因为降水因素能影响土壤的含水量, 从而控制土壤的理化反应。在降水量较低时, 随着降水增加, 植物根系分泌大量有机物进入土壤,

土壤有机胶体含量增加导致土壤 CEC 增加^[26]。当降水量较高时, 随着降水量的继续增加, 土壤有机胶体的输入变化不大, 但是土壤黏土矿物有从 2:1 型转变为 1:1 型的趋势, 导致土壤 CEC 降低^[27]。

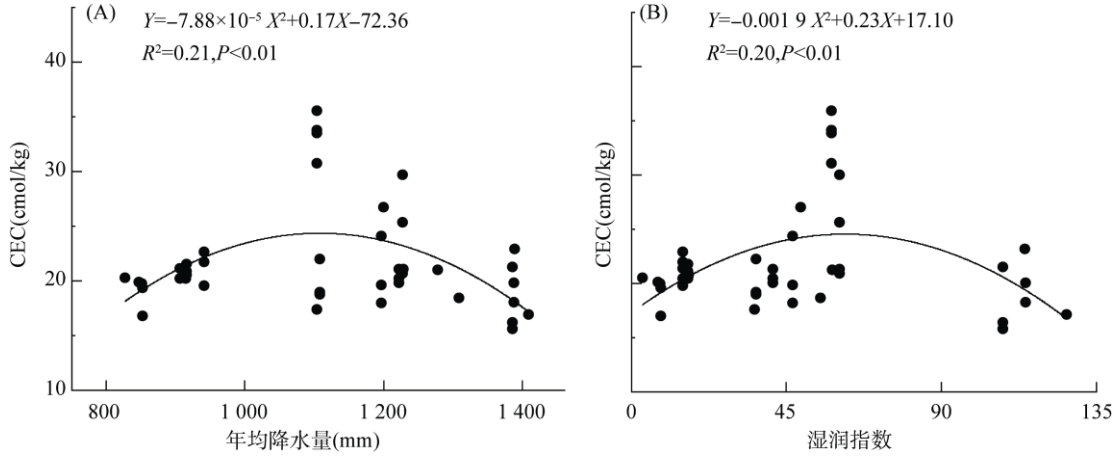


图 4 年均降水量和湿润指数对土壤 CEC 的影响
Fig. 4 Effects of mean annual precipitation and moisture index on soil CEC

2.2.3 地形 地形控制着地表水热资源的再分配, 影响着土壤理化反应, 进而影响土壤 CEC。地貌类型和海拔作为主要的地形因素对土壤 CEC 具有较大影响^[11-12]。在本研究中地貌主要为平原、丘陵和山地 3 种类型。3 种地貌类型间土壤 CEC 存在显著性差异(图 5A, $P<0.05$)。山地土壤 CEC($25.10 \text{ cmol/kg} \pm 1.83 \text{ cmol/kg}$)显著高于平原($20.1 \text{ cmol/kg} \pm 0.45 \text{ cmol/kg}$)

和丘陵土壤($20.18 \text{ cmol/kg} \pm 0.64 \text{ cmol/kg}$)($P<0.05$), 平原和丘陵土壤 CEC 差异不显著($P>0.05$)。这是因为平原和丘陵多为耕地, 土壤有机质主要来源于施肥和秸秆返田, 而山地土壤则林草地较多, 输入土壤的有机质较以上二者更多。同时, 区内西南部山地温度较低, 土壤有机质的累积高于中部盆地和东北部丘陵, 所以其 CEC 显著高于平原和丘陵土壤。

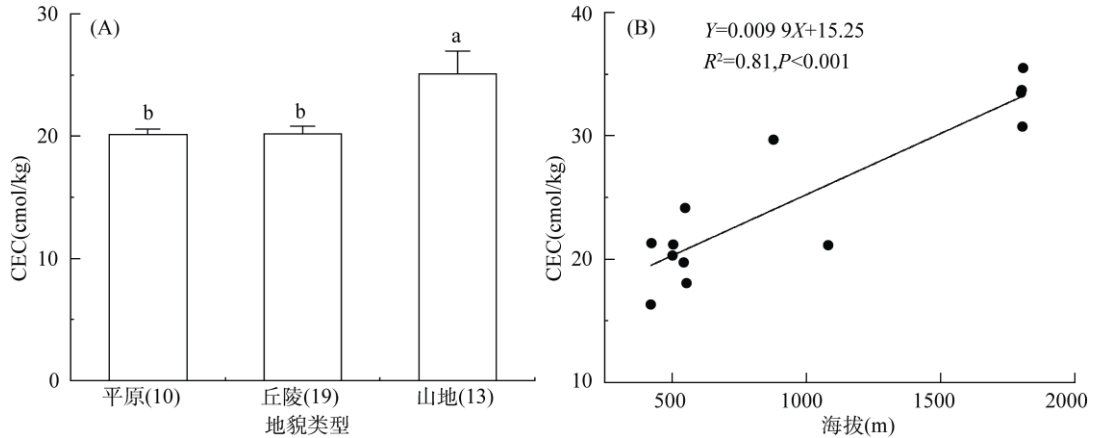


图 5 地貌类型和海拔对土壤 CEC 的影响
Fig. 5 Effects of landforms and altitude on soil CEC

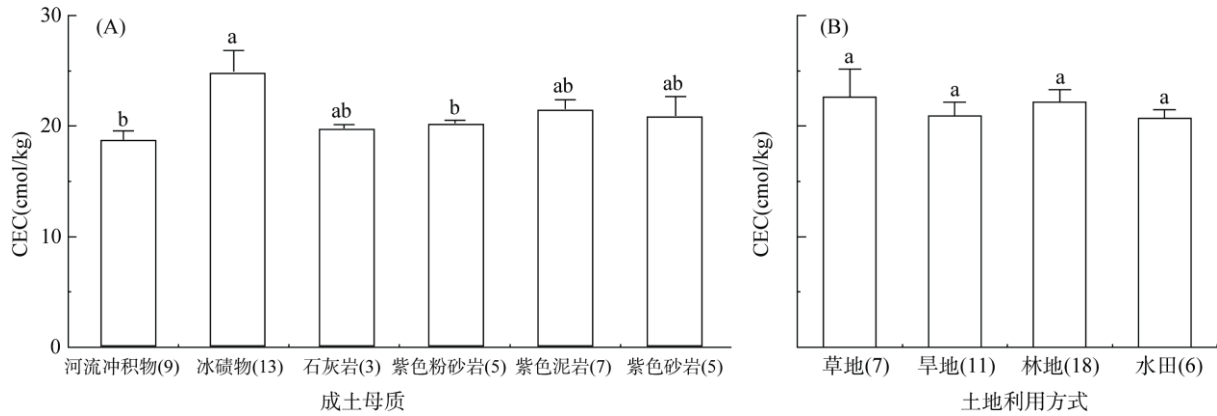
本研究还进行了海拔对土壤 CEC 影响的探究。因为母质对土壤 CEC 的影响较大, 所以选择同一母质发育土壤分析海拔对 CEC 的影响。本研究中, 冰碛物母质发育土壤的样本较多($n=13$), 适合进行回归分析, 结果表明, 冰碛物母质发育土壤的 CEC 与海拔呈极显著线性正相关(图 5B, $P<0.01$), 与 Nakao 等^[12]在喀麦

隆高原的研究结果一致。总体来看, 主要是因为土壤有机胶体含量随着海拔的上升呈增加趋势^[28]。

2.2.4 成土母质 成土母质的差异会影响发育土壤的有机胶体和矿质胶体数量^[29], 导致土壤 CEC 存在差异^[13]。在本研究区内, 不同母质发育而成土壤的 CEC 存在显著性差异(图 6A)。其中, 冰碛物母质发育土壤

的 CEC(24.97 cmol/kg ± 1.86 cmol/kg)显著高于河流冲积物(18.84 cmol/kg ± 0.73 cmol/kg)和紫色粉砂岩(20.3 cmol/kg ± 0.24 cmol/kg)发育而成的土壤($P < 0.05$), 而石灰岩、紫色泥岩和紫色砂岩这 3 种母质发育土壤的 CEC 之间差异不显著($P > 0.05$)。这是因为河流冲积物和紫色粉砂岩发育土壤多为水田和旱地, 它

们二者的有机物主要来源于有机肥施用和部分秸秆还田。相反, 本研究所采冰碛物母质发育形成的土壤质地较为黏重, 且多为常绿阔叶林地或马尾松林地, 林下调落物较多。因此, 冰碛物母质发育形成土壤的胶体数量高于河流冲积物和紫色粉砂岩发育而成的土壤, 其 CEC 显著高于后二者($P < 0.05$)。



注: 括号内表示样本数, 不同字母之间表示显著性差异($P < 0.05$)。

图 6 成土母质和土地利用方式对土壤 CEC 的影响

Fig. 6 Effects of soil parent materials and land uses on soil CEC

2.2.5 土地利用方式 土地利用方式主要通过影响有机质的输入、分解, 从而影响土壤 CEC^[30]。本研究草地和林地 CEC 略大于旱地和水田, 但是差异不显著(图 6B, $P > 0.05$), 与 Qi 等的研究结论不一致^[14]。这主要是因为陕西北部沙漠地带区域同质性较高, 而在本研究区内同一种土地利用方式所处的地形和成土母质等条件复杂多变, 可能掩蔽了土地利用方式对土壤 CEC 的影响。

2.3 多因素对土壤 CEC 的综合影响

本研究为进一步确定多环境因素综合影响下, 各影响因素对土壤 CEC 变异的贡献, 选择年均温、年均降水量、0 °C 积温、10 °C 积温、湿润指数、干燥度、地貌类型、海拔、成土母质和土地利用方式进行综合分析, 确定各因素对土壤 CEC 变异的贡献。主成分分析结果表明, F1、F2 和 F3 三个主成分的方差累积贡献率达 81.83%(表 1), 同时, 年均温、0 °C 积温和 10 °C 积温在 F1 上有较大载荷, 年均降水量和湿润指数在 F2 上有较大载荷, 海拔和地貌类型在 F3 上有较大载

荷(表 2)。因此, 可将 F1 归纳为温度因子, F2 归纳为降水因子, F3 归纳为地形因子。其中, F1 和 F2 对土壤 CEC 变异的贡献率最大, 两者之和达到 69.32%, 表明气候因素为该区域土壤 CEC 的决定性影响因素。

表 2 初始因子载荷矩阵

Table 2 Component matrix

评价指标	成分		
	F1	F2	F3
年均温	0.95	-0.10	0.27
年均降水量	0.22	0.95	-0.12
0 °C 积温	0.95	-0.11	0.26
10 °C 积温	0.95	-0.21	0.18
湿润指数	0.29	0.91	0.04
干燥度	-0.08	-0.98	0.08
海拔	-0.78	0.03	0.51
地貌类型	-0.32	0.20	0.88
成土母质	-0.40	0.41	0.08
土地利用方式	-0.48	-0.19	-0.14

表 1 主成分的特征值和方差贡献率

Table 1 Eigenvalue and contribution rate of principal components

主成分	特征值	方差贡献率	累积方差贡献率
F1	3.93	39.31	39.31
F2	3.00	30.02	69.32
F3	1.25	12.50	81.83

3 结论

1) 研究区域内不同土壤类型 CEC 差异显著, 黄壤、水稻土和紫色土 CEC 显著高于潮土($P < 0.05$), 而显著低于黄棕壤($P < 0.05$)。

2) 研究区内年均温、0 °C 积温、10 °C 积温与土

壤 CEC 呈极显著线性负相关关系($P < 0.01$), 年均降水量和湿润指数与土壤 CEC 为极显著二次函数关系($P < 0.01$), 而干燥度对土壤 CEC 的影响不显著($P > 0.05$)。山地土壤 CEC 显著高于平原和丘陵土壤($P < 0.05$), 且随着海拔的增加而极显著上升($P < 0.01$)。不同母质发育土壤 CEC 为冰碛物显著高于河流冲积物和紫色粉砂岩($P < 0.05$)。但在本研究中, 土地利用方式对土壤 CEC 的影响不显著($P > 0.05$)。

3) 主成分分析表明, 土壤 CEC 在多环境因素综合影响下, 由温度和降水组成的气候因素对土壤 CEC 变异的贡献率达到 69.32%。因此, 气候是四川盆地西缘土壤 CEC 的决定性影响因素。

参考文献:

- [1] Qaryouti M, Bani-Hani N, Abu-Sharar T M, et al. Effect of using raw waste water from food industry on soil fertility, cucumber and tomato growth, yield and fruit quality[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 193: 99–104.
- [2] Aihemaiti A, Jiang J G, Li D A, et al. The interactions of metal concentrations and soil properties on toxic metal accumulation of native plants in vanadium mining area[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 216–226.
- [3] Paz-Ferreiro J, de A Marinho M, de Abreu C A, et al. Soil texture effects on multifractal behaviour of nitrogen adsorption and desorption isotherms[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 168: 121–132.
- [4] 杨艳丽, 史学正, 王果, 等. 江苏北部土壤属性空间分异及其影响因素研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(3): 465–470.
- [5] 姜林, 耿增超, 李珊珊, 等. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布[J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3368–3377.
- [6] Zhang F Y, Kong R, Peng J B. Effects of heating on compositional, structural, and physicochemical properties of loess under laboratory conditions[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 152(19): 259–266.
- [7] Mi W H, Sun Y, Xia S Q, et al. Effect of inorganic fertilizers with organic amendments on soil chemical properties and rice yield in a low-productivity paddy soil[J]. *Geoderma*, 2018, 320: 23–29.
- [8] Bu C F, Gale W J, Cai Q G, et al. Process and mechanism for the development of physical crusts in three typical Chinese soils[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(3): 321–332.
- [9] Khaledian Y, Brevik E C, Pereira P, et al. Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries[J]. *Catena*, 2017, 158: 194–200.
- [10] Ulery A L, Graham R C, Goforth B R, et al. Fire effects on cation exchange capacity of California forest and woodland soils[J]. *Geoderma*, 2017, 286: 125–130.
- [11] Tesfahunegn G B, Tamene L, Vlek P L G. Assessing soil properties and landforms in the Mai-negus catchment, northern Ethiopia[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(5): 745–759.
- [12] Nakao A, Sugihara S, Maejima Y, et al. Ferralsols in the Cameroon plateaus, with a focus on the mineralogical control on their cation exchange capacities[J]. *Geoderma*, 2017, 285: 206–216.
- [13] Messmer T, Elsenbeer H, Wilcke W. High exchangeable calcium concentrations in soils on Barro Colorado Island, Panama[J]. *Geoderma*, 2014, 217: 212–224.
- [14] Qi Y B, Chen T, Pu J, et al. Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land[J]. *Catena*, 2018, 160: 339–344.
- [15] 鲍士旦, 江荣风, 杨超光, 等. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2008: 154–163.
- [16] 徐新良, 张亚庆. 中国气象背景数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017.
- [17] Castaldelli G, Colombani N, Tamburini E, et al. Soil type and microclimatic conditions as drivers of urea transformation kinetics in maize plots[J]. *Catena*, 2018, 166: 200–208.
- [18] 江厚龙, 刘国顺, 杨永锋, 等. 基于 GIS 和多种土壤属性的烟田养分分区管理研究[J]. *土壤*, 2011, 43(5): 736–745.
- [19] 李锦芬, 瞿明凯, 黄标, 等. 区域土壤 CEC 与相关控制因子的空间非平稳关系评估[J]. *土壤学报*, 2017, 54(3): 638–646.
- [20] Saidi D. Importance and role of cation exchange capacity on the physicals properties of the cheliff saline soils (Algeria)[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 33: 435–449.
- [21] Qin X L, Li Y Z, Han Y L, et al. Ridge-furrow mulching with black plastic film improves maize yield more than white plastic film in dry areas with adequate accumulated temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 206–214.
- [22] Thangavel R, Kanchikerimath M, Sudharsanam A, et al. Evaluating organic carbon fractions, temperature sensitivity and artificial neural network modeling of CO₂ efflux in soils: Impact of land use change in subtropical India (Meghalaya)[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 129–141.
- [23] Wang Q, Zhu C, Yun J N, et al. Compositional transformations as well as thermodynamics and mechanism of dissolution for clay minerals[J]. *Chemical Geology*, 2018, 494: 109–116.

- [24] 曹珂, 李祥辉, 王成善. 四川盆地白垩系粘土矿物特征及古气候探讨[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 115–123.
- [25] 干方群, 杭小帅, 刘云, 等. 苏南地区膨润土物理化学和矿物学特性研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 945–954.
- [26] Han G X, Sun B Y, Chu X J, et al. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256–257: 292–303.
- [27] Pincus L N, Ryan P C, Huertas F J, et al. The influence of soil age and regional climate on clay mineralogy and cation exchange capacity of moist tropical soils: a case study from Late Quaternary chronosequences in Costa Rica[J]. *Geoderma*, 2017, 308: 130–148.
- [28] Ji H B, Zhuang S Y, Zhu Z L, et al. Soil organic carbon pool and its chemical composition in *phyllostachy pubescens* forests at two altitudes in Jian-ou City, China[J]. *PLoS One*, 2015, 10(12): e0146029. DOI:10.1371/journal.pone.0146029.
- [29] 宋正姍, 史学正, 王美艳, 等. 南方侵蚀治理区土壤碳分布及主控因素研究[J]. 土壤, 2013, 45(5): 850–855.
- [30] Maharjan M, Sanaullah M, Razavi B S, et al. Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 113(113): 22–28.