

DOI: 10.11766/trxb202007220408

李松, 慈恩, 连茂山, 曾蔓漫, 胡瑾. 水耕条件下两类富钙母岩发育土壤的系统分类归属及成因探讨[J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 678–687.

LI Song, CI En, LIAN Maoshan, ZENG Manman, HU Jin. Taxonomy and Genesis of Soils Derived from Two Types of Calcium-rich Rocks Under Rice-planting Conditions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 678–687.

水耕条件下两类富钙母岩发育土壤的系统分类归属及成因探讨*

李 松, 慈 恩[†], 连茂山, 曾蔓漫, 胡 瑾

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘 要: 在重庆境内, 遂宁组 (J_{3s}) 钙质泥岩发育水耕人为土的剖面分异多不明显, 而石灰岩发育水耕人为土则不尽如此, 其原因尚不明确。为此, 以上述两类母岩在不同坡位发育的水耕人为土为研究对象, 分析水耕条件下钙质泥岩和石灰岩发育土壤的发生特征及系统分类归属, 并以有机碳矿化特性为切入点, 探讨其成因。结果表明, 从中坡至坡麓, 钙质泥岩发育的水耕人为土 (CS) 结构面上均仅有少量锈斑且游离铁的垂直分异不明显, 而石灰岩发育的水耕人为土 (LS) 结构面上有少量至多量锈斑且在不同坡位的分布状况不同, 特别是下坡呈酸性的土体中游离铁的下层聚集显著, 表明两类母岩发育水耕人为土铁的剖面迁移特征有明显差异。CS 的有机碳累积矿化量 (C_{15}) 显著低于同坡位的 LS ($P < 0.05$), 较低量的易矿化有机碳使得 CS 土体中高价铁难以发生还原, 铁的剖面迁移不明显, 导致不同坡位的 CS 典型个体均被归为筒育水耕人为土; 从中坡至坡麓, LS 的 C_{15} 逐级增高, 且坡麓的 C_{15} 显著高于其他坡位 ($P < 0.05$), 加之受与坡位关联的土壤水分状况影响, 其典型个体依次被归为“筒育”“铁聚”和“潜育”水耕人为土土类。易矿化有机碳含量可能是决定坡位能否引起富钙母岩发育的水耕人为土产生类型分异的重要因素。

关键词: 土壤发生; 系统分类; 水耕人为土; 有机碳矿化; 富钙母岩

中图分类号: S155.3 **文献标志码:** A

Taxonomy and Genesis of Soils Derived from Two Types of Calcium-rich Rocks Under Rice-planting Conditions

LI Song, CI En[†], LIAN Maoshan, ZENG Manman, HU Jin

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: 【Objective】 In Chongqing, changes in soil morphological characteristics of Stagnic Anthrosols derived from

* 国家自然科学基金项目 (41977002)、国家科技基础性工作专项 (2014FY110200)、中央高校基本科研业务费专项资金项目 (XDJK2020B069) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41977002), the Special Project of National Science and Technology Basic Research (No. 2014FY110200) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. XDJK2020B069)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: cien777@163.com

作者简介: 李 松 (1996—), 男, 重庆南川人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤发生与分类。E-mail: lisongls007@163.com

收稿日期: 2020-07-22; 收到修改稿日期: 2020-12-24; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-04-22

calcareous mudstone are not obvious from top to bottom of the soil profile in most cases. However, this phenomenon is not always so for Stagnic Anthrosols derived from limestone. Given that the reason for this difference is not clear, there is a need for further studies in this area. Therefore, this paper discusses the occurrence and evolution characteristics; types and causes of calcareous mudstone and limestone soils under rice-planting conditions, to improve the accuracy of the systematic classification and spatial distribution prediction. 【Method】 Field soil surveys were conducted to identify six Stagnic Anthrosols profiles of different slope positions (mesoslope, baseslope and footslope) on limestone and calcareous mudstones and to obtain soil-forming conditions and soil morphological characteristics of the profiles. Soil samples were collected from the profiles by horizon for analysis of physical and chemical properties. According to the “Keys to Chinese Soil Taxonomy (3rd ed.)”, diagnostic horizons and diagnostic characteristics for the tested soils were determined, and the soils were attributed and named in Chinese Soil Taxonomy level by level. The soil genesis of the tested soils is discussed based on the characteristics of organic carbon mineralization. 【Result】 From the mesoslope to footslope, there was very few rust mottles on the structural plane of Stagnic Anthrosols derived from calcareous mudstone (CS), and the vertical differentiation of free iron was not obvious. However, there was very few to many rust mottles on the structural plane of Stagnic Anthrosols derived from limestone (LS), and the distribution was different in different slope positions. Especially in the acid soil of the baseslope, the lower layer of free iron accumulated significantly. This showed that there were differences in iron migration characteristics between the Stagnic Anthrosols derived from the different types of parent rocks. The accumulation of organic carbon mineralization (C_{15}) of CS was significantly ($P<0.05$) lower than that of LS at the same slope position. The lower amount of easily mineralized organic carbon made it difficult to reduce the high valent iron in CS. Given that iron migration in the profiles was not observable, the typical soils of CS at different slope positions were classified as Typic Hapli-Stagnic Anthrosols. From the mesoslope to footslope, the C_{15} of LS increased gradually, with C_{15} of footslope being significantly ($P<0.05$) higher than that of other slope positions. Combined with the influence of slope position on water condition, the typical soils from the mesoslope to footslope were classified as Typic Hapli-Stagnic Anthrosols, Typic Fe-accumuli-Stagnic Anthrosols and Typic Gleyi-Stagnic Anthrosols. 【Conclusion】 The concentration of easily mineralized organic carbon is a key factor in determining whether slope position can cause different types of Stagnic Anthrosols derived from calcium-rich mother rock. Also, some of the Stagnic Anthrosols derived from limestone have anthro-recalcification, but cannot be classified into the subcategory of “Recalcaric” based on the current standards. Therefore, it is suggested that the retrieval requirements for the adjective “Recalcaric” of the subcategory of Stagnic Anthrosols be revised.

Key words: Soil pedogenesis; Chinese Soil Taxonomy; Stagnic Anthrosols; Organic carbon mineralization; Calcium-rich parent rock

人类活动给土壤带来了广泛而深刻的影响,使土壤变化速度远超自然演化过程,成为耕地土壤发育的决定因素之一^[1-3]。中国非常重视稻田土壤的发生与分类研究,早在 20 世纪 30 年代就提出以水分在土壤剖面运移的特征来划分稻田土壤的类型^[4]。中国土壤系统分类提出水耕表层和水耕氧化还原层作为水耕人为土的诊断层,在国际上得到广泛认可^[5-6]。虽然在水耕条件下不同母岩(质)起源和不同地形部位上的土壤均会向水耕人为土所固有的剖面特征方向发展,但成土母岩(质)作为土壤形成的物质基础^[7],其对土壤理化性质具有重要影响,母岩(质)不同可能会导致土壤形成发育过程有所差异,使其表现出不一样的剖面特征而被归为

不同类型。因此,母岩(质)如何影响水耕人为土发生演化是水耕人为土研究中一个非常值得探讨的科学问题。

目前,关于水耕人为土系统分类的研究已有诸多报道^[8-13],这些研究主要侧重于土系和土族的建立以及与发生学分类的参比研究,而关于不同母岩(质)特别是不同富钙母岩发育土壤在水耕条件下的剖面分异及其对系统分类归属影响的研究较少。笔者对重庆地区不同坡位的水耕人为土的调查发现,侏罗系遂宁组钙质泥岩(J_{3s})发育的剖面分异甚微,而石灰岩发育的剖面则呈现出不同的形态特征,导致这一差异原因目前尚不明确。为此,本研究选取重庆地区这两类常见的富钙母岩(钙质泥岩

和石灰岩)在不同坡位上发育的水耕人为土为研究对象,结合矿化培养试验,旨在明确水耕条件下富钙母岩发育土壤的发生演变特征、类型归属及其成因,切实提升对其系统分类归属及空间分布预判的准确度。

1 材料与方 法

1.1 采样区概况

重庆市地处四川盆地东部,属我国陆地地势第二级阶梯,介于 $28^{\circ}10' \sim 32^{\circ}13'N$ 和 $105^{\circ}11' \sim 110^{\circ}11'E$ 之间;属亚热带湿润季风气候,年均气温为 $17.4^{\circ}C$,年降水量为 $900 \sim 1\ 300\ mm$,年日照时数为 $1\ 000 \sim 1\ 500\ h$,为全国年日照最少的地区之一^[14]。石灰岩和钙质泥岩是重庆市境内最为常见的两类富钙成土母岩,实际调查中发现,这两类母岩发育的自然土壤属性差异较为明显,因此本研究选取这两类富钙母岩发育的水耕人为土为研究对象。在重庆市境内,钙质泥岩发育的水耕人为土则主要分布在渝西方山丘陵区和中部平行岭谷区,特别是侏罗系遂宁组(J_3s)钙质泥岩发育的最为常见,

石灰岩发育的水耕人为土主要分布在渝东南强岩溶化峡谷中山区和渝东北溶蚀层状中山区。

1.2 样品采集与分析

结合史料分析^[15]与实地考察,由于在丘陵山地的上坡及坡顶部位主要为旱地,水田极少。为使本研究更具典型性,选取了两类母岩在中坡、下坡和坡麓三个部位发育的水耕人为土剖面(钙质泥岩发育的水耕人为土,CS1,CS2,CS3;石灰岩发育的水耕人为土,LS1,LS2,LS3)。土壤调查采样均在水稻收割排水后采集,剖面选在稻田的中心部位。位于坡麓的CS3和LS3两个剖面的地下水埋深约为 $50 \sim 60\ cm$ 。参照《野外土壤描述与采样手册》^[16]挖掘标准土壤剖面,划分层次,观察记录剖面形态特征,采集土样。

土样经过室内常温风干,剔除杂物,研磨过不同孔径筛以供分析使用。土壤颜色确定采用中国标准土壤色卡^[17],相关理化指标的测定方法为:pH—水浸提-电位计法;容重—环刀法;颗粒组成—吸管法;有机质—重铬酸钾-硫酸消化法; $CaCO_3$ —气量法;全铁(Fe_t)—HF、 $HClO_4$ 酸溶-邻菲罗啉比色法;游离氧化铁(Fe_d)—DCB浸提-邻菲罗啉比色法^[18]。

表 1 供试土壤剖面的成土环境

Table 1 Soil-forming conditions of the tested soil profiles

剖面编号 Profile No.	剖面地点 Location	海拔 Elevation/m	地形 Terrain	部位 Position	母质 Parent material
CS1	垫江县	393	丘陵	中坡	钙质泥岩风化坡积物
CS2	潼南区	260	丘陵	下坡	钙质泥岩风化坡积物
CS3	大足区	362	丘陵	坡麓	钙质泥岩风化坡积物
LS1	酉阳县	704	山地	中坡	石灰岩风化坡积物
LS2	黔江区	430	山地	下坡	石灰岩风化坡积物
LS3	南川区	547	山地	坡麓	石灰岩风化坡积物

1.3 培养试验

称取过 $2\ mm$ 筛的 6 个供试土壤剖面 B 层土样 $20\ g$,均匀平铺于 $250\ mL$ 培养瓶底部,调节土壤含水量至 60% 田间持水量,置于 $25^{\circ}C$ 恒温培养箱中预培养 3 天后,采用称重法调节土壤水分至淹水处理(土水比=1:2)。用橡胶塞塞住培养瓶瓶口中间小孔,并涂上硅胶以防止漏气,放入 $20^{\circ}C$ 的恒温培养箱中避光密封培养 15 天,每个处理 3 个重

复,并设置无土空白对照。定期测定培养瓶重量,添加适量去离子水以保证瓶内水分恒定,分别在培养后第 1、2、3、4、5、7、9、11、13、15 天用注射器从培养瓶的瓶塞小孔处抽取约 $9\ mL$ 气体,并用气相色谱仪(Agilent, 7820A)分析 CO_2 浓度。采集气体后打开培养瓶的瓶塞约 $20\ min$,待培养瓶的内外气体交换充分后,盖上瓶塞并封闭抽气孔,并将密封培养瓶放入培养箱继续培养。根据气

体产物的释放量, 计算培养期内 SOC 的日均矿化量和累积矿化量。

1.4 数据处理

矿化速率 $[\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]$ 以单位质量土壤单位时间内矿化释放的碳量表示; 累积矿化量 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 是单位质量土壤(105 °C烘干土重)整个培养期(15 d)内矿化释放的总碳量, 用 C_{15} 表示。CO₂ 浓度的计算公式如下:

$$F = \frac{P \times V \times M}{V_1 \times m \times 1000}$$

式中, F 为 CO₂-C 的浓度 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$; P 为培养瓶内土壤所释放的 CO₂ 浓度 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$; V 为培养瓶内气体所占的体积(L); M 为 CO₂-C 的摩尔质量 $(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$; V_1 为标准大气压下气体的标准摩尔体积 $(22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1})$; m 为烘干土质量(g)。

数据处理和制图采用 Microsoft Excel 2019、IBM Statistics SPSS 22.0 软件进行统计分析, 不同处理间差异采用 One-Way ANOVA 进行比较(LSD 法, $P < 0.05$)。采用 CANOCO5 软件进行冗余分析(redundancy analysis, RDA), 定量描述供试土壤剖面铁迁移与环境因子的关系, 因变量包含剖面游离氧化铁的变异系数(C.V.Fed)、剖面锈纹锈斑的变异系数(C.V.R)以及剖面游离氧化铁的最大层间比(BRF); 自变量包括母质类型、坡位、有机碳含量、易矿化有机碳含量(15 d)(EMC₁₅)、土壤孔隙度、黏粒含量、粉黏比、pH 以及 CaCO₃ 相当物含量。

2 结 果

2.1 形态特征

由表 2 可知, 在 125 cm 深度范围内, 剖面 CS2 为 A-B-R 构型, 其余剖面均为 A-B 构型。钙质泥岩发育的土壤中, 剖面 CS1 的色调为 2.5 YR, 明度为 5~6, 彩度随着层次的加深而有所增加, 为 3~8, 剖面 CS2 和 CS3 的色调为 5 YR, 明度为 4~6, 彩度为 3~4。石灰岩发育土壤的色调均为 2.5 Y, 明度为 4~7, 彩度除剖面 LS2 的 Br4 较高, 值为 6, 其余均较低, 值为 1~4。CS 的土壤质地主要为粉壤土, LS 则主要为粉质黏壤土。所有供试土壤剖面

均有锈纹锈斑和灰色腐殖质-粉砂-黏粒胶膜, 但锈纹锈斑的丰度在石灰岩发育的不同土体中有所不同, 在钙质泥岩发育的土体中均很少。剖面的各层次土壤结构发育明显, 主要为块状、棱块状和棱柱状结构。此外, 除供试剖面 LS2 无石灰反应外, 其余剖面均有石灰反应。仅供试剖面 LS3 在 50 cm 以下土层有亚铁反应。

2.2 理化性质

由表 2 可知, 在 6 个供试土壤中, 供试土壤 Ap2 层容重为 Ap1 层容重的 1.11 倍~1.25 倍。供试土壤 pH 介于 5.2~8.5, 最低值和最高值分别出现在剖面 LS2 的 Ap1 层和剖面 CS2 的 Br3 层, 其中剖面 L2 呈酸性, 其余剖面呈碱性。

由图 1 可知, 不同坡位的 CS 之间的黏粒含量变化较大, 而 LS 的黏粒含量变化不明显。供试土壤有机碳含量自剖面由上至下逐渐减少, 其中 CS1、CS3 底层的土壤有机碳含量均不足表层的 1/3, LS3 各发生层的有机碳含量明显高于其他剖面, 在相同坡位下, CS 有机碳含量均低于 LS。供试土壤 CaCO₃ 相当物含量在 5.40~96.10 g·kg⁻¹ 之间, 不同土壤剖面之间 CaCO₃ 相当物含量差异较大。CS 的 Ap1 的 CaCO₃ 相当物含量均低于 Ap2, 在 Ap2 之下 CaCO₃ 相当物含量随深度增加变化不明显。LS1 的 CaCO₃ 相当物含量在 0~50 cm 深度范围以表层最高, 并逐渐向下减少, 在 Br2 层(50~70 cm) 有一定的淀积; LS2 的 CaCO₃ 相当物含量随土层深度增加无明显变化; LS3 的 CaCO₃ 相当物含量在 0~50 cm 深度范围以表层最高, 并逐渐向下减少, 但在 Bg1 层(50~90 cm) 有明显的淀积。供试土壤的全铁含量在 27.01~69.27 g·kg⁻¹ 之间, 游离铁含量在 12.76~35.56 g·kg⁻¹ 之间, 供试土壤的全铁含量与游离铁含量的变化趋势一致, CS 铁的游离度均低于 LS。LS1 的游离铁含量垂直变异小, LS2 在 Br2 (36~56 cm) 及下层的游离铁含量明显高于上层, LS3 的游离铁含量在 Bg2 (90~110 cm) 及下层明显低于上层; 钙质泥岩发育的土壤剖面游离铁含量垂直差异不明显。

2.3 有机碳矿化

由图 2a 所示, 在整个培养期间(15 d), 供试土壤 LS3 日均矿化速率在培养前期逐渐上升在第 5 天达到顶峰, 之后再逐渐下降; 其余供试土壤日均

表 2 供试土壤的剖面形态特征和理化性质

Table 2 Morphological characteristics and physicochemical properties of the tested soil profiles

剖面 编号 Profile No.	发生层 Soil horizon	深度 Depth /cm	土壤颜色		质地 Soil texture (USDA)	结构 Structure	锈纹锈斑 Rust mottles	石灰反应 Lime reaction	亚铁反应 Ferrous reaction	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	pH
			Soil color								
			干态	润态							
			Dry	Wet							
CS1	Ap1	0~13	2.5YR 6/3	2.5YR 5/3	粉质黏壤土	块状	很少量	有	无	1.24	7.9
	Ap2	13~20	2.5YR 6/4	2.5YR 5/4	粉质黏壤土	块状	很少量	有	无	1.40	8.0
	Br1	20~36	2.5YR 6/5	2.5YR 5/5	粉质黏壤土	棱柱状	很少量	有	无	1.63	7.7
	Br2	36~70	2.5YR 6/6	2.5YR 5/6	粉质黏壤土	块状	很少量	有	无	1.61	7.7
	Br3	70~95	2.5YR 6/7	2.5YR 5/7	黏壤土	块状	很少量	有	无	1.66	7.6
	Br4	95~140	2.5YR 6/8	2.5YR 5/8	壤土	块状	很少量	有	无	1.65	7.4
CS2	Ap1	0~18	5YR 6/3	5YR 5/3	粉壤土	块状	很少量	有	无	1.34	8.2
	Ap2	18~26	5YR 6/3	5YR 5/3	粉壤土	块状	很少量	有	无	1.52	8.3
	Br1	26~60	5YR 6/3	5YR 5/3	粉壤土	棱柱状	很少量	有	无	1.60	8.3
	Br2	60~97	5YR 6/3	5YR 5/3	粉壤土	棱块状	很少量	有	无	1.62	8.3
	Br3	97~120	5YR 6/4	5YR 5/4	粉壤土	块状	很少量	有	无	1.65	8.5
	R	120~	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CS3	Ap1	0~17	5YR 5/3	5YR 4/3	粉壤土	块状	很少量	有	无	1.17	8.1
	Ap2	17~24	5YR 5/3	5YR 4/3	粉质黏壤土	块状	很少量	有	无	1.33	8.0
	Br1	24~60	5YR 5/3	5YR 4/3	粉壤土	棱柱状	很少量	有	无	1.47	8.1
	Br2	60~81	5YR 5/4	5YR 4/4	粉壤土	棱块状	很少量	有	无	1.54	8.2
	Br3	81~130	5YR 5/4	5YR 4/4	粉壤土	棱块状	很少量	有	无	1.66	8.2
LS1	Ap1	0~16	2.5Y 6/1	2.5Y 5/1	粉质黏壤土	块状	少量	有	无	1.40	8.0
	Ap2	16~24	2.5Y 6/1	2.5Y 5/1	粉质黏壤土	块状	少量	有	无	1.56	8.1
	Br1	24~50	2.5Y 6/3	2.5Y 5/3	粉质黏壤土	棱块状	少量	有	无	1.66	8.2
	Br2	50~70	2.5Y 6/3	2.5Y 5/3	粉质黏壤土	棱块状	少量	有	无	1.63	8.0
	Br3	70~120	2.5Y 6/2	2.5Y 5/2	粉质黏壤土	棱块状	少量	有	无	1.64	7.9
LS2	Ap1	0~17	2.5Y 7/2	2.5Y 6/2	粉质黏壤土	块状	中量	无	无	1.23	5.2
	Ap2	17~24	2.5Y 6/2	2.5Y 5/3	粉质黏壤土	块状	中量	无	无	1.54	6.0
	Br1	24~39	2.5Y 6/2	2.5Y 5/3	粉质黏壤土	棱块状	中量	无	无	1.60	6.1
	Br2	39~56	2.5Y 6/2	2.5Y 5/3	粉质黏壤土	棱块状	中量	无	无	1.63	6.2
	Br3	56~85	2.5Y 6/2	2.5Y 5/3	粉壤土	棱块状	多量	无	无	1.65	6.2
	Br4	85~128	2.5Y 7/6	2.5Y 6/6	粉质黏壤土	块状	中量	无	无	1.60	6.2
LS3	Ap1	0~12	2.5Y 6/2	2.5Y 5/1	粉壤土	块状	少量	有	无	0.92	7.9
	Ap2	12~19	2.5Y 6/2	2.5Y 5/1	粉壤土	块状	多量	有	无	1.11	7.8
	Br	19~50	2.5Y 6/3	2.5Y 6/1	粉质黏壤土	棱柱状	多量	有	无	1.23	8.1
	Bg1	50~90	2.5Y 6/3	2.5Y 5/1	粉质黏壤土	棱块状	中量	有	有	1.22	7.9
	Bg2	90~110	2.5Y 6/1	2.5Y 4/1	粉壤土	块状	少量	有	有	1.31	7.8
	Bg3	110~133	2.5Y 7/1	2.5Y 4/1	壤土	块状	很少量	有	有	1.33	7.8

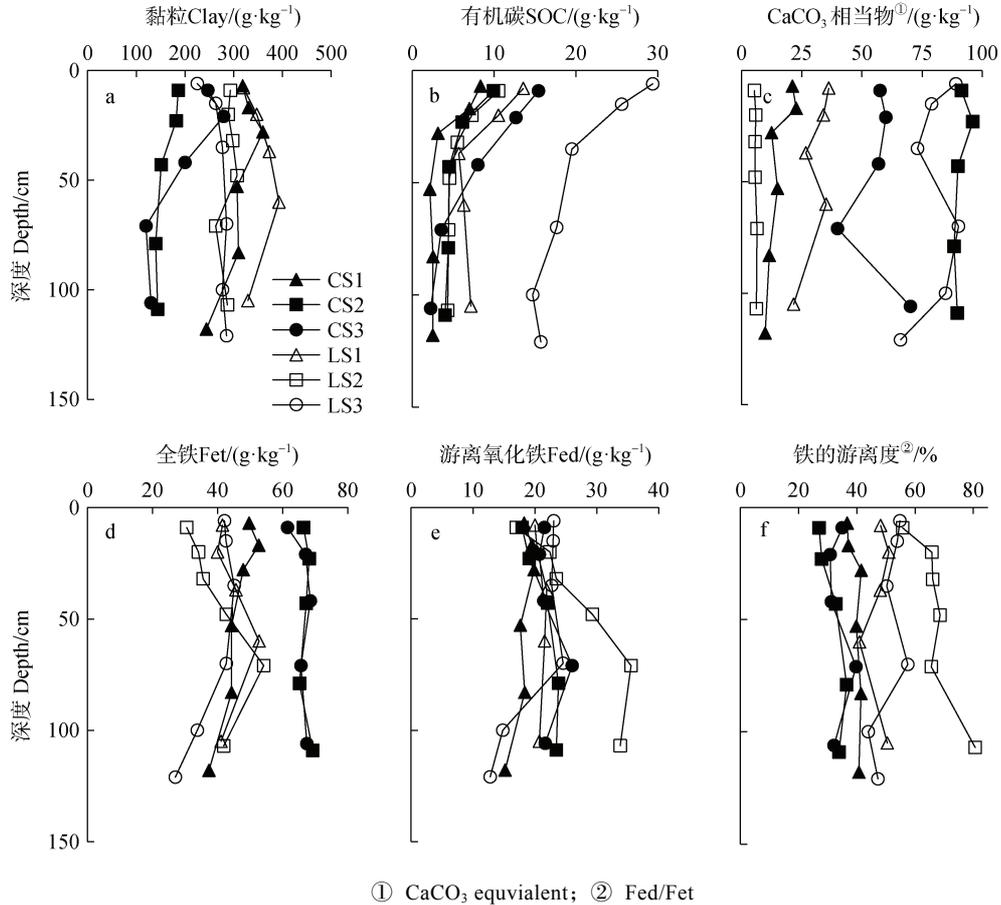


图 1 供试土壤化学性质的剖面变化

Fig. 1 Changes in soil chemical properties of the tested soil profiles

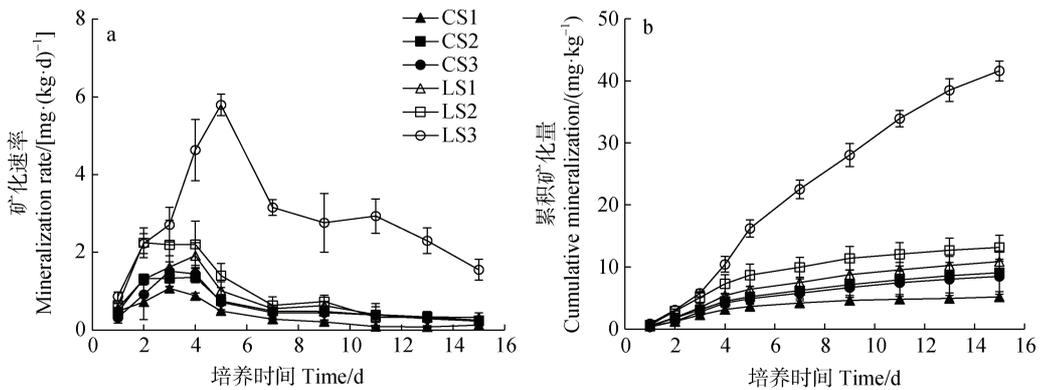


图 2 供试土壤的有机碳矿化特征

Fig. 2 Mineralization characteristics of organic carbon in the tested soil

矿化速率呈现相似的变化趋势，即在培养前期（1~3 d）日均矿化速率逐渐上升，此后再下降，直至在小范围内浮动并逐渐平稳。CS 的有机碳矿化速率低于 LS，CS 的有机碳矿化速率差异不明显，LS 的有机碳矿化速率快慢顺序为：LS3 > LS2 > LS1，供试土壤 LS3 矿化速率显著大于其他供试土壤的矿化速

率。由图 2b 可知，供试土壤 LS3 有机碳累积矿化量前 3 天增长较缓慢，此后增速逐渐加快，再随时间延长增速逐渐减缓；其余各供试土壤累积矿化量均呈现前期增速较快，随培养时间延长增幅减慢渐趋平缓。由图 3 可看出，整个培养期内，钙质泥岩在中坡发育水耕人为土的 C₁₅ 显著低于坡麓和下坡，

石灰岩在坡麓发育水耕人为土的 C_{15} 显著高于下坡和中坡 ($P < 0.05$); 在相同坡位上, CS 的 C_{15} 均显著低于 LS 的 C_{15} ($P < 0.05$)。

2.4 分类归属

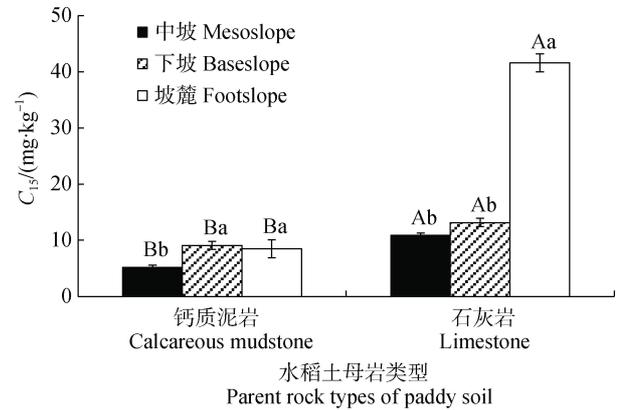
根据《中国土壤系统分类检索(第3版)》^[5]对6个供试土壤剖面的诊断层和诊断特性进行检索,除水耕表层、水耕氧化还原层、人为滞水土壤水分状况等水耕人为土共有的诊断层和诊断特性外,其余诊断特性鉴定如下:(1)岩性特征:LS1土表至125 cm范围内有碳酸盐岩岩屑且所有土层盐基饱和度 $\geq 50\%$, $pH \geq 5.5$,符合碳酸盐岩岩性特征。(2)准石质接触面:CS2在土体深度120 cm以下的下垫物质为泥岩。(3)潜育特征:LS3在50 cm深度以下土层色调为2.5Y,润态明度 ≥ 4 ,彩度为1,有亚铁反应,符合潜育特征,被归为普通潜育水耕人为土。(4)铁质特性:CS1、CS2、CS3土壤基质色调为5YR或2.5YR,剖面CS2、CS3、LS1、LS2、LS3整个B层细土部分DCB浸提游离铁 $\geq 14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,故供试剖面均符合铁质特性,其中LS2水耕氧化还原层的DCB浸提游离铁为表层的2.1倍,被归为普通铁聚水耕人为土。根据供试土壤的诊断层和诊断特性,6个供试剖面被归为1个土纲,3个土类,3个亚类(表3)。

2.5 铁迁移与环境因子的关联性

对可反映土壤铁迁移特点的参数(C.V.Fed, C.V.R, BRF)和土壤环境因子进行冗余分析,发现前两个排序轴共解释了变量的99.68%,其中第一排序轴解释了91.91%,表明与第一排序轴相关的土壤环境因子为主要影响因素。从图4中可以看出,与第一排序轴关系较为密切的依次为 EMC_{15} 、坡位、SOC含量和土壤孔隙度。其中, EMC_{15} 和坡位与第一排序轴关系最为密切,这表明易矿化有机碳和地形在富钙母岩发育的水耕人为土铁迁移中起着重要作用。

3 讨论

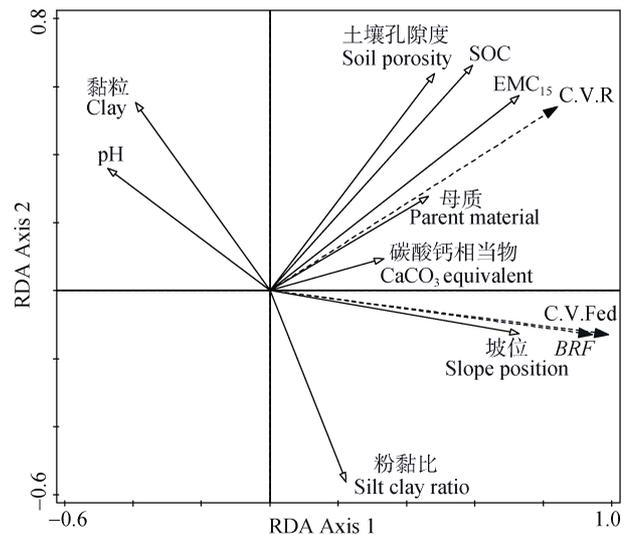
虽然供试土壤的母岩均为富钙母岩,但母岩类型不同,其发育的水耕人为土的质地、铁的游离度、有机碳矿化特征等存在明显差异,这与前人研究结果一致^[19-20]。此外,本研究还发现易矿化有机碳和



注:柱上不同大写字母表示同一地形部位不同母质差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示同一母质不同地形部位差异显著($P < 0.05$)。Note: Different uppercase letters on the column indicate a significant ($P < 0.05$) difference between different parent rock at the same terrain while different lowercase letters indicate a significant ($P < 0.05$) difference between different terrain at the same parent rock.

图3 供试土壤的有机碳总累积矿化量(C_{15})

Fig. 3 Total accumulated mineralization of organic carbon (C_{15}) in the tested soil



注: EMC_{15} 表示易矿化有机碳含量(15 d),C.V.R表示剖面锈纹锈斑的变异系数,C.V.Fed表示剖面游离氧化铁的变异系数,BRF表示剖面游离氧化铁的最大层间比。Note: EMC_{15} is the content of mineralizable organic carbon (15 d); C.V.R is the coefficient of variation of rust mottles in the tested soil profiles; C.V.Fed is the coefficient of variation of free Fe oxides in the tested soil profiles; BRF is the maximum inter-horizon ratio of free Fe oxides in the tested soil profiles.

图4 供试土壤铁迁移与环境因子冗余分析的二维排序图
Fig. 4 Biplot of RDA ordinations for iron migration characteristics of the tested soils and soil environmental factor

表 3 供试土壤的系统分类归属

Table 3 Attribution of the tested soils in the Chinese Soil Taxonomy

亚类 Subgroup	剖面编号 Profile No.
普通筒育水耕人为土 Typic Hapli-Stagnic Anthrosols	CS1, CS2, CS3, LS1
普通铁聚水耕人为土 Typic Fe-accumuli-Stagnic Anthrosols	LS2
普通潜育水耕人为土 Typic Gleyi-Stagnic Anthrosols	LS3

地形部位是影响富钙母岩发育水耕人为土铁垂直分异的主要因子，使其在土类划分中产生分异。易矿化有机碳含量是影响土壤氧化还原过程的重要因素^[6]，在提供土壤养分方面起着重要作用，可以灵敏地反映土壤微小变化^[21-23]。此外，重庆境内地形起伏较大，丘陵山地的土壤水分状况受地形影响大，同时，位于坡麓的土壤因土层较厚、灌溉方便等而最先被开垦为水田，随着人口压力的增大，人类逐步向上开垦，致使不同地形部位的水耕人为土发育时间不一致^[24]。为此，本文将着重分析易矿化有机碳含量和地形对富钙母岩发育水耕人为土发生特征和系统分类的影响。

CS 结构面上有少量锈纹锈斑且游离铁的垂直分异不明显，这种现象的产生可能与供试土体内有机碳的矿化特性有关。矿化试验表明 CS 下部土体易矿化有机碳的含量很低，在浅层淹水环境下，当土壤中易矿化有机碳含量较低时，其有机碳矿化的需氧要求也较低，氧气供应能满足矿化需求，这使得土体中较难形成还原环境，故在剖面中仅可见很少量的锈纹锈斑。图 3 可看出土壤易矿化有机碳含量受地形部位的影响不大，造成 CS 土体易矿化有机碳含量低的原因可能是土体自身有机质积聚方式和含量引起的。钙质泥岩的风化过程主要是物理风化^[25-26]，土体下部的有机物质主要是地质作用下残留的有机物质，而侏罗系遂宁组的钙质泥岩是在半干燥和干燥气候下形成的，植物生长差，形成的红色沉积岩中有机质少^[27]；另一方面土壤黏粒含量低，有机物质在物质循环中不容易形成有机复合体而流失。尽管 CS3 位于坡麓，但其下部土层的有机碳含量远低于 LS3，即使处于在高地下水水位的环境下，其铁锰也无法发生强烈的还原反应，土壤未发生潜育化过程。CS 有机物质难以积聚，同时成土时间短，富含碳酸盐，pH 高，较低量的易矿化有机碳在分解过程中使得 CS 土体难以形成还原环境，铁的剖面

迁移不明显，不同坡位的 CS 剖面未发生明显分异，在中国土壤系统分类中均被归为普通筒育水耕人为土。当然，随着水耕熟化的进一步加剧，特别是人为施用有机肥持续不断的输入，CS 土体表层或者上部土体有机质会不断积聚，这可能会影响到 CS 的发生过程，使其分类归属产生分异。

从中坡至坡麓，LS 的 C_{15} 逐级增高，且坡麓的 C_{15} 显著高于其他坡位 ($P < 0.05$)，加之受与坡位相关联的土壤水分状况影响，LS 的系统分类土类归属产生分异。位于坡麓的 LS3 各发生层有机碳含量均明显高于其他剖面，且其下部土层具有潜育特征，究其原因如下，石灰岩发育成自然土壤需要经历漫长的时间并以化学风化为主^[28-29]，有机物质来源主要为现代气候下的生物残体累积，加之所处地势低，土壤发育过程中长期接受来自上坡表层土壤的坡积，土壤整体有机碳含量高；其次，在田间淹水的情况下，大量的有机碳嫌气分解容易形成还原环境，铁锰发生强烈还原，下部土层表现出潜育特征，被归为潜育水耕人为土。位于下坡的 LS2 土体中游离铁的下层聚集显著，其原因可能如下：一方面土壤发育成熟，土壤脱钙充分，pH 低，使土壤中铁较易发生还原淋溶^[30]；另一方面其下部土体黏粒减少，同时不受地下水的影响，有利于保持土层处于氧化状况，使下部土层的铁氧化淀积，被归为铁聚水耕人为土。位于中坡的 LS1 形成水田的时间较低坡位短，水耕熟化程度低，土壤氧化还原过程不明显，游离铁在剖面中垂直差异较小，被归为筒育水耕人为土。可见，易矿化有机碳含量高低是决定坡位能否引起富钙母岩发育水耕人为土产生类型分异的关键因素。此外，在进行土壤调查时，可以更加合理的布置观察点，CS 的类型归属随坡位变化不明显，可酌情减少其观察点的布置，LS 在不同坡位其类型归属有差异，调查区地形越复杂，需布置的观察点密度越高。

值得注意的是,剖面 L3 表层 CaCO_3 相当物含量高达 $89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,这可能是由于 LS 多位于喀斯特地区,当地居民采用富含碳酸盐的岩溶水灌溉水田,使水田发生复钙过程,耕作层的 CaCO_3 含量较下层土体高,并且在土层深度 $0\sim 50 \text{ cm}$ 逐渐减少,存在明显的人为复钙作用,但在 Bg1 层 ($50\sim 90 \text{ cm}$) 可能受到地下水位或母质残积碳酸盐的影响,碳酸盐有一定的淀积,按现行标准却无法被划分到“复钙”亚类,被归为普通潜育水耕人为土亚类,这可能会影响到水耕人为土系统分类高级单元对农业生产的实际指导价值。针对这一问题,结合本文调查结果,建议适当放宽对复钙潜育水耕人为土的检索要求,但受本次调查样点数和区域的限制,这一建议还有待进一步验证和完善。

4 结 论

富钙泥岩 (J_3s) 发育的不同坡位的水耕人为土,易矿化有机碳含量均较低,其坡位对土壤类型的影响较小,均被归为简育水耕人为土。石灰岩发育的水耕人为土易矿化有机碳含量较高,且不同坡位土体的易矿化有机碳含量差异明显,坡位对土壤类型影响明显,从中坡至坡麓依次被归为简育水耕人为土、铁聚水耕人为土和潜育水耕人为土。这表明,易矿化有机碳含量是决定坡位能否引起富钙母岩发育的水耕人为土产生类型分异的重要因素。此外,部分石灰岩发育的水耕人为土存在明显的人为复石灰作用,但按现行标准则无法被划分到“复钙”亚类,故建议适当修订“复钙”的检索要求。

参考文献 (References)

- [1] Li Q K. Paddy soils of China[M]. Beijing: Science Press, 1992. [李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [2] Wu H L, Wang S C, Yan Z H, et al. Evolution characteristics of fertility of typical paddy soil in China in recent 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24 (6): 1416—1424. [吴红亮, 王士超, 闫志浩, 等. 近 30 年我国典型水稻土肥力演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (6): 1416—1424.]
- [3] Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1060—1070. [张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 等. 土壤时空变化研究的进展与未来[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1060—1070.]
- [4] Hou K C, Ma Y T. On the morphological aspects of podzolic rice paddy soils in Nanchang region, Kiangsi, China[J]. Special Soil Publication, 1935, 3: 1—20.
- [5] Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy[J]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001.
- [6] IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps[J]. World Soil Resources Reports No.106. Rome: FAO, 2015.
- [7] Huang C Y, Xu J M. Soil science[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010. [黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.]
- [8] Han G Z, Zhang G L, Li D C, et al. Pedogenetic evolution of clay minerals and agricultural implications in three paddy soil chronosequences of South China derived from different parent materials[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15 (2): 423—435.
- [9] Han G Z, Xie X J, Li S Q. Numerical comparison between hydric anthrosols of different parent materials in development in hill regions of South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (2): 298—309. [韩光中, 谢贤健, 李山泉. 南方丘陵区不同母质水耕人为土发育速率的比较[J]. 土壤学报, 2019, 56 (2): 298—309.]
- [10] Peng T, Ouyang N X, Zhang L, et al. Reference of paddy soil developed from granite in eastern Hunan in Chinese Soil Taxonomy[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29 (10): 1726—1732. [彭涛, 欧阳宁相, 张亮, 等. 湘东花岗岩发育水稻土在中国土壤系统分类中的归属[J]. 浙江农业学报, 2017, 29 (10): 1726—1732.]
- [11] Man H Y, Huang Y X, Sheng H, et al. Genetic characteristics and taxonomic classification of paddy field soils developed from two parent materials in East Hunan[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30 (7): 1194—1201. [满海燕, 黄运湘, 盛浩, 等. 湘东两类母质发育水田土壤的发生特性及其系统分类[J]. 浙江农业学报, 2018, 30 (7): 1194—1201.]
- [12] Cao Q, Yu Z, Zhou Q, et al. Genetic characteristics of paddy soils in northern Hunan and their attribution in Chinese Soil Taxonomy[J]. Soils, 2019, 51 (1): 168—177. [曹倩, 余展, 周清, 等. 湘北地区典型水稻土的发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属[J]. 土壤, 2019, 51 (1): 168—177.]
- [13] Li S, Ci E, Weng T, et al. Genetic characteristics and soil taxonomy of gleyic paddy soils in Chongqing[J]. Soils, 2019, 51 (4): 813—820. [李松, 慈恩, 文婷, 等. 重

- 庆市潜育水稻土发育特性和系统分类研究[J]. 土壤, 2019, 51(4): 813—820.]
- [14] Chen S Q, Cai S L, Xiao T, et al. Chongqing geography[M]. Chongqing: Southwest China Normal University Press, 2003. [陈升琪, 蔡书良, 肖挺, 等. 重庆地理[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2003.]
- [15] Agriculture and Animal Husbandry Department of Sichuan Province, Soil Survey Office of Sichuan Province. Chorography of Sichuan soil species [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1994. [四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土种志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.]
- [16] Zhang G L, Li D C. Manual of soil 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.]
- [17] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Standard soil colour charts[M]. Nanjing: Nanjing Press, 1989. [中国科学院南京土壤研究所, 中国科学院西安光学精密机械研究所. 中国标准土壤色卡[M]. 南京: 南京出版社, 1989.]
- [18] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [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.]
- [19] Wu M, Li Z P, Feng Y Z, et al. Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1705—1714. [吴萌, 李志佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1705—1714.]
- [20] Han G Z, Zhang G L, Li D C. Accumulation of soil organic carbon and their influencing factors of hydric anthrosols in hilly regions of South China[J]. Soils, 2013, 45(6): 978—984. [韩光中, 张甘霖, 李德成. 南方丘陵区三种母质水耕人为土有机碳的累积特征与影响因素分析[J]. 土壤, 2013, 45(6): 978—984.]
- [21] Lin Q M, Liao C L, Xie L H, et al. Effects of groundwater tables and long-term fertilization on mineralization of organic carbon in red paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(6): 1414—1424. [林清美, 廖超林, 谢丽华, 等. 地下水位和长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化特征的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1414—1424.]
- [22] Luo M, Tian D, Gao M, et al. Soil organic carbon of purple soil as affected by different application of biochar[J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4327—4337. [罗梅, 田冬, 高明, 等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4327—4337.]
- [23] Li W T, Liu M, Li P F, et al. Temporal variation of soil organic C and nutrients in high yield paddy soils of Yujiang County in the past 40 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 937—942. [李委涛, 刘明, 李朋发, 等. 近 40 年余江县高产水稻土有机碳及养分含量的演变特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 937—942.]
- [24] Huang L M, Thompson A, Zhang G L, et al. The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: A review[J]. Geoderma, 2015, 237/238: 199—210.
- [25] Ci E, Tang J, Lian M S, et al. Higher category partition for purple soils in Chongqing in Chinese Soil Taxonomy[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3): 569—584. [慈恩, 唐江, 连茂山, 等. 重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 569—584.]
- [26] Pedology Section of Chengdu Branch, Chinese Academy of Sciences. Purple soils in China [M]. Beijing: Science Press, 1991. [中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土(上篇)[M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [27] Tang S J, Sun D J, Luo Y F, et al. The fertility of purple soil in relation to the Characteristics of parent material in Sichuan basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 1984, 21(2): 123—133, 229—230. [唐时嘉, 孙德江, 罗有芳, 等. 四川盆地紫色土肥力与母质特性的关系[J]. 土壤学报, 1984, 21(2): 123—133, 229—230.]
- [28] Zhang M K, Yao Y C, Qiu Z T, et al. Pedogenetic characteristics and taxonomic classification of soils developed from carbonate rocks in the south of China[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2019, 45(1): 54—65. [章明奎, 姚玉才, 邱志腾, 等. 中国南方碳酸盐岩发育土壤的成土特点与系统分类[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(1): 54—65.]
- [29] Chen L, Ci E, Lian M S, et al. Soil taxonomy of typical soils in karst area of southeast Chongqing[J]. Soils, 2019, 51(1): 178—184. [陈林, 慈恩, 连茂山, 等. 渝东南岩溶区典型土壤的系统分类研究[J]. 土壤, 2019, 51(1): 178—184.]
- [30] Li J Z, Wang X G, Yuan X H, et al. relationship between pH and iron redox cycle in calcareous paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 143—149. [李金珠, 王旭刚, 袁雪红, 等. pH 与石灰性水稻土铁氧化还原过程的关系[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 143—149.]

(责任编辑: 檀满枝)