

王大龙,舒英格,文小琴,等.岩溶山区石灰土剖面硅铁铝元素分布特征:以贵州省晴隆县为例[J].中国岩溶,2018,37(5):777-785.
DOI:10.11932/karst20180516

岩溶山区石灰土剖面硅铁铝元素分布特征 ——以贵州省晴隆县为例

王大龙,舒英格,文小琴,陈梦军,肖盛杨

(贵州大学农学院,贵阳 550025)

摘 要:选取贵州省晴隆县岩溶山区石灰土剖面土壤为研究对象,采用土壤学常规测定方法对土壤硅、铁、铝全量及风化度指标进行研究,初步分析了研究区石灰土剖面硅、铁、铝元素含量和分布特征。结果表明:区内土壤质地较黏,应进行土壤改良;土壤中氮、磷流失严重,需加强秸秆还地和增施有机肥;其硅、铁、铝元素含量较高,但主要以矿物态形式存在,受成土要素与环境的制约导致土壤脱硅富铁铝化程度较低,土壤剖面缺乏过渡层,由降雨冲刷易造成水土流失和加剧石漠化,应采取工程和自然保护措施防治植被覆盖减少和生态恶化。

关键词:岩溶山区;石灰土;硅、铁、铝;土壤氧化铁;分布

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)05-0777-09

0 引 言

云贵高原多岩溶地貌,岩溶面积达 10.9 万 km^2 ^[1]。为研究较小尺度不同生态系统土壤肥力因子的变化和生态化学计量特征,有学者分别将岩溶峰丛洼地和峡谷作为研究对象,探讨坡耕地、草丛地、灌丛地、人工林地、次生林地和原生林地土壤生态系统的养分变化情况^[2]和计量峡谷型岩溶水田、旱地、草地、灌丛、人工林、次生林 6 种生态系统的土壤养分^[3]。贵州省作为典型岩溶生态脆弱区和景观破碎区,区内广泛分布有碳酸盐岩等可溶性盐岩,在此基础上风化发育的石灰土偏碱性,又因风化强度和成土过程及环境不同产生不同的土壤类型和石灰土亚类,之前学者对石灰土发生特征的研究较多^[4-6],对不同石灰土发育阶段特征与肥力因子及理化性质的关系已有研究^[7-10],也有学者从矿物组成和地球化学方面研究了岩溶地区石灰土的发育特征^[11-13],但对岩溶区石灰土剖面土壤氧化态形态分布特征的研究

较少。

本文以贵州省晴隆县石灰岩岩溶发育的石灰土剖面为研究对象,以硅、铁、铝全量和氧化铁形态及含量分布为研究内容,探索岩溶环境演变、石漠化过程中土壤硅、铁、铝全量和氧化铁形态变化分布特征规律,初步揭示土壤硅、铁、铝全量和氧化铁形态含量及分布对研究区环境演变、植被演替及石漠化发生发展的指示作用,以期对岩溶山区石灰土土壤资源合理利用、石漠化综合防治提供参考。

1 研究区概况

晴隆县地处云贵高原中段,为集中典型岩溶发育区,该区属高原亚热带季风性气候,平均海拔为 1 442 m,年降雨量为 1 500~1 650 mm,年均气温为 14 ℃,无霜期约 320 d,研究区位置如图 1 所示,采样点情况见表 1。

基金项目:国家自然科学基金项目(31460133)

第一作者简介:王大龙(1984—),男,在读硕士,研究方向为土壤化学与环境。E-mail:975091983@qq.com。

通信作者:舒英格(1973—)男,副教授,硕士生导师,研究方向为农业资源与环境、土地资源利用管理。E-mail:maogen958@163.com。

收稿日期:2018-01-05

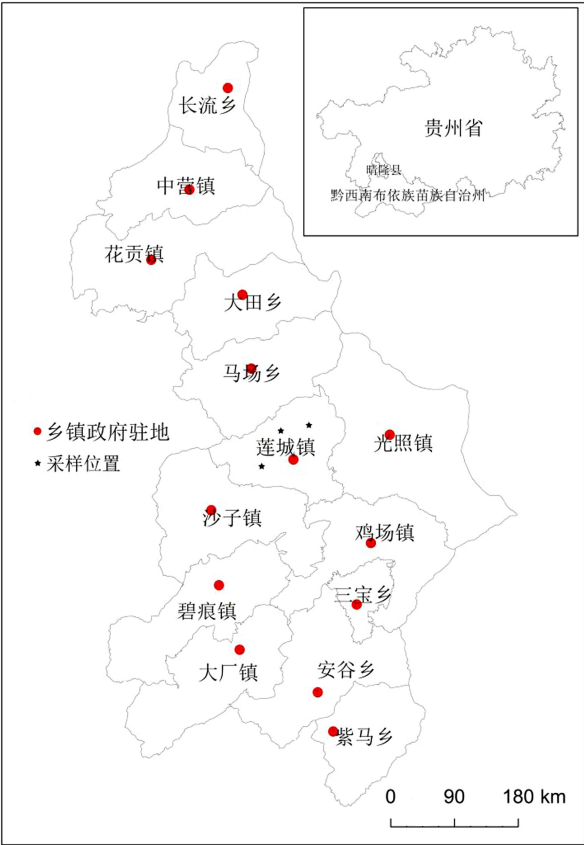


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of the study area

表 1 供试土壤基本情况

Table 1 Basic conditions of the tested soil

剖面编号	采样地点	地形	海拔/m	地理坐标	坡度/°	母质(母岩)	植被
HCD—I	晴隆县菜籽村	坡地	1 577.1	N 25°49′53″,E 105°15′36″	28	石灰岩	三叶草、毛草
TGHC—II			1 520.0		25	石灰岩	黑麦草
GD—III	晴隆县庄子村		1 529.9	N 25°51′11″,E 105°13′59″	35	石灰岩	玉米、烤烟
LD—IV			1 518.5		40	石灰岩	马草
TGHC—V	晴隆县合兴村		1 312.9	N 25°47′32″,E 105°11′40″	28	石灰岩	三叶草
TGHC—VI			1 308.4		30	石灰岩	皇竹草

2 研究方法

通过查阅研究区相关文献及实地生态调查后,分别在晴隆县莲城镇菜籽村、庄子村和合兴村选定石灰土为研究对象,每个村设置 2 个采样点,去除地面枯枝落叶和碎石后开挖剖面,测量 0~10 cm、10~20 cm、20—母质(母岩)等不同深度剖面后用木铲和竹片铲取土样(约 1 kg 土)混匀装入塑料袋,密封编号

后带回实验室,此次共设置样地 6 个,每个样地面积约 2 m²,采集剖面土样共 22 个。采集的土样按顺序排列平铺在塑料纸上,去除其中根系和石砾后自然风干,风干后的土样采用四分法重复依次通过 2 mm 和 0.149 mm 的尼龙筛,最后装入样品袋编号保存待测。

2.1 测定方法

土壤基本性质采用常规方法和仪器测定^[14-15],依次为:土壤容重,环刀法;土壤 pH 值,电极电位法;

有机质,重铬酸钾—硫酸外加热法;阳离子交换量(CEC),乙酸铵交换—盐酸滴定法;全氮,硫酸消解—凯氏定氮法;全钾,盐酸—硝酸—高氯酸消解—火焰光度法;全磷,盐酸—硝酸—高氯酸消解—钼锑抗比色法;全硅,盐酸—硝酸—高氯酸消解—氢氧化钠浸提—硫酸亚铁铵比色法;游离氧化硅,柠檬酸钠—连二亚硫酸钠—碳酸氢钠(DCB)法浸提—氢氧化钠消煮—硫酸亚铁铵比色法;无定型氧化硅,Tamm 液浸提—硫酸亚铁铵比色法;全铁,盐酸—硝酸—高氯酸消解—原子吸收光谱仪(耶拿 700P,德国 2012)测定;游离氧化铁,DCB 法浸提—原子吸收光谱仪测定;无定型氧化铁,Tamm 液浸提—原子吸收光谱仪测定;络合态铁,焦磷酸钠浸提—硫酸和硝酸消解—原子吸收光谱仪测定;全铝,盐酸—硝酸—高氯酸消解—铝试剂比色法。

2.2 土壤风化度指标

全量硅和铝的比率^[16]: $Sa = SiO_2 / Al_2O_3$;全量硅、铁及铝的比率^[17]: $Saf = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$;元素风化与淋溶系数^[18]: $Ba = (Na_2O + K_2O + CaO + MgO) / Al_2O_3$;土壤化学蚀变指数^[19]: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO + MgO)] \times 100\%$;土壤铁氧化物指标^[20]:铁游离度=游离氧化铁/全铁 $\times 100\%$,铁活化度=非晶质氧化铁/游离氧化铁 $\times 100\%$,铁晶化度=[游离氧化铁—非晶质氧化铁]/游离氧化铁 $\times 100\%$ 。铁晶胶率=[游离氧化铁—非晶质氧化铁]/非晶质氧化铁 $\times 100\%$;铁络合度=络合态铁/游离氧化铁 $\times 100\%$ 。运用 SPSS19.0 统计软件进行数据分析。

3 结果与分析

3.1 土壤基本性质

3.1.1 土壤容重及颗粒组成

土壤容重和颗粒组成影响土壤中元素的利用和迁移。由表 2 可知,研究区土壤容重值在 $1.14 \sim 1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间,平均值为 $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大值与最小值之差为 $0.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,变幅较小,土壤容重值在各剖面变化不显著;其颗粒组成中,砂粒变幅为 $4.08\% \sim 45.00\%$,粉粒变幅为 $31.80\% \sim 48.00\%$,黏粒变幅为 $21.00\% \sim 53.32\%$,砂粒变幅最大,最小为粉粒,黏粒居中;GB—III 剖面砂粒平均含量最高,LD—IV 剖面粉粒平均含量最低,GB—III 剖面黏粒平

均含量最低,这表明同一剖面下砂粒和黏粒是一种此消彼长的关系。

3.1.2 土壤 pH、有机质和阳离子交换量

土壤溶液的酸碱度能促进或制约元素的吸收及利用;有机质是土壤肥力的象征,对土壤的理化性质影响较大;阳离子交换量是土壤肥力的另一重要因子,对土壤的交换性能影响强烈。表 2 中,pH 值在 $5.21 \sim 7.33$ 之间,均值为 6.57 ,其土壤整体微酸偏中性,除 GD—III、TGHC—II 剖面 pH 值随土壤深度的增加而减小之外,其余各剖面土壤 pH 值呈现增加的趋势;与土壤 pH 相反,有机质含量随剖面(TGHC—II 除外)土壤深度的增加而降低,变幅在 $14.74 \sim 76.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $42.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;各剖面土壤中 CEC 在 $17.98 \sim 43.64 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $23.75 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,与有机质类似,除 TGHC—II 剖面外,HCD—I、LD—IV、TGHC—V 剖面 CEC 含量随土壤深度的增加而降低,TGHC—II 剖面 CEC 含量随土层深度增加表现出降低—增加—降低的趋势,TGHC—II 剖面随深度变化降幅较小,GD—III 剖面随深度($0 \sim 10 \text{ cm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$)变化不显著, 40 cm —母岩较前三层变化较大,LD—IV 剖面随深度变化降幅较大。

3.1.3 土壤氮、磷、钾

研究区土壤氮、磷含量基本相当,氮含量在 $1.34 \sim 3.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $2.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;磷含量在 $1.58 \sim 3.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $2.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;钾含量总体较高,在 $7.50 \sim 19.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $12.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量是氮的 5.34 倍,磷的 5.06 倍。

3.2 土壤全量硅、铁、铝及风化度指标

3.2.1 土壤硅、铁、铝全量特征

硅、铁、铝是土壤发育和风化淋溶及成土过程的重要元素,通过分析其元素总量和硅铁铝率可推断土壤风化发育状况和成土机制。由表 3 可知,全量硅、铁、铝在各剖面中的含量总趋势是硅($220.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和铝($211.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)较高,均值为 $180.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $167.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全铁含量相对较低,在 $69.57 \sim 115.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $85.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全硅最大值和平均值约为铁的 2 倍;各剖面土层全硅含量值差异不显著,TGHC—II、TGHC—V、TGHC—VI 剖面全硅含量大致相等,变幅较小($132.56 \sim 163.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),说明同一剖面下可能受植

被覆盖影响硅的风化淋溶进程,硅含量相对稳定,变异不明显,HCD—I、GD—III、LD—IV 剖面土壤全硅含量基本维持在较高水平(约 $200\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),说明三种土地

利用方式下土壤硅全量高;全铁含量分布在腐殖质层(0~10 cm)和淋溶层(10~20 cm)较高,全铝分布在淋溶层和淀积层(20~40 cm)的含量较高。

表 2 供试土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the tested soil

剖面 编号	深度/ cm	土壤容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	土壤颗粒组成/%			pH 值	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	阳离子 交换量/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮	全磷	全钾
			砂粒	粉粒	黏粒						
			0.02~2 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm						
HCD—I	0~10	1.14	4.08	45.00	50.92	6.81	69.44	32.12	3.93	2.68	8.18
	10~20	1.37	12.08	45.00	42.92	6.95	51.99	29.03	3.26	2.54	7.80
	20~40	1.38	11.08	44.00	44.92	7.04	40.39	27.18	2.77	2.10	7.50
	40—母岩	1.41	12.08	43.00	44.92	7.33	31.35	24.59	1.63	1.58	8.02
TGHC—II	0~10	1.34	21.08	48.00	30.92	5.70	40.60	21.10	2.15	2.74	7.85
	10~20	1.32	23.08	44.00	32.92	6.17	34.73	20.75	1.93	2.67	8.56
	20~40	1.21	24.08	47.00	28.92	6.65	60.09	21.57	1.94	2.79	10.10
	40—母岩	1.30	25.08	42.00	32.92	6.43	41.67	21.68	2.00	2.86	9.82
GD—III	0~10	1.47	35.00	44.00	21.00	6.07	76.67	20.89	2.85	3.77	18.28
	10~20	1.43	44.00	35.00	21.00	5.93	60.65	21.03	2.45	3.87	16.06
	20~40	1.48	45.00	34.00	21.00	5.46	54.57	20.79	2.34	3.62	16.15
	40—母岩	1.43	43.80	31.80	24.40	5.21	36.47	23.19	2.40	3.05	16.75
LD—IV	0~10	1.52	10.88	36.80	52.32	7.04	54.95	43.64	1.81	2.23	17.96
	10~20	1.40	13.88	32.80	53.32	6.91	25.12	23.43	2.21	2.16	19.50
	20~40	1.49	17.88	34.80	47.32	6.78	22.72	22.19	1.50	2.03	19.68
	40—母岩	1.47	15.88	34.80	49.32	7.00	14.74	19.31	1.34	1.96	17.84
TGHC—V	0~10	1.50	11.08	48.00	40.92	6.70	44.82	23.38	2.71	2.11	10.50
	10~20	1.46	11.08	47.00	41.92	6.74	35.67	19.21	2.38	1.79	10.89
	20—母岩	1.50	10.08	45.00	44.92	7.20	30.72	17.98	2.02	1.75	11.71
TGHC—VI	0~10	1.52	12.08	47.00	40.92	6.67	40.58	22.76	2.64	1.91	8.78
	10~20	1.50	11.08	48.00	40.92	6.83	33.85	24.69	2.33	1.72	10.02
	20—母岩	1.18	9.08	48.00	42.92	7.00	29.02	22.04	2.42	1.78	9.85

3.2.2 土壤风化度指标

Sa、Saf 和 Ba 值是土壤风化度的重要量化指标,其数值越小,风化作用越强烈,反之亦然,由表 3 可知,各剖面 Sa 值在 1.54~3.20 之间,平均值为 1.86, Saf 值在 1.18~2.11 之间,平均值为 1.39,表明该区热量和降水强度较小,母质受物理和化学风化作用较弱,脱硅富铁铝化过程缓慢;各土壤剖面 Ba 值在 0.36~0.98 之间,平均值为 0.54,表明土壤风化发育及淋溶强度不同,TGHC—II 剖面 Ba 值均较小,在 0.36~0.43 之间,风化越强,土壤脱硅富铝化越强,黏粒含量相对较高,石灰土土层较薄,逐渐被开垦熟

化为耕地后受人为扰动较大,导致水土流失加剧,土壤贫瘠。CIA 越大,风化淋溶强度和脱硅富铝化作用越强,各剖面 CIA 值在 67.49~86.31 之间,平均值为 79.17,土壤 CIA 处于较高水平,表明该区风化淋溶强度大和脱硅富铝化作用强烈,但受抗风化度强的石灰岩(主要为碳酸钙的溶解)环境(降雨较少)影响,实际风化强度要弱很多。

3.3 土壤氧化铁及风化发育指标

土壤中原生铝硅酸盐矿物晶格受风化破坏释放出的铁,其风化度和形态含量可反映成土过程和环境,主要为游离氧化铁,其遇水化合成无定型非晶质

氧化铁(活性氧化铁),在一定条件下脱水为晶质氧化铁(老化过程),晶质氧化铁又进一步转化成离子态铁(活化过程)^[21]。

3.3.1 土壤游离氧化铁

由表 4 可知,DCB 法浸提出的土壤游离氧化铁(主要是氧化铁及其水合物)含量在 $16.55 \sim 41.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,HCD—I 剖面土壤游离铁平均含量最高,为 $35.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TGHC—V 剖面最低,为 $17.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,游离铁含量在各剖面土壤中的分布

特征是:HCD—I、TGHC—II、GD—III 剖面分别为土壤 0~10 cm、10~20 cm、40 cm—母岩显著高于各剖面其他土层;LD—IV 剖面游离铁含量随土壤深度增加而增加,表明土壤淋溶层和淀积层具铁质特征。土壤铁游离度是游离氧化铁与全铁含量的比值,其含量高低表示风化强度差异程度,研究区土壤剖面铁游离度在 17.37~48.09 之间,HCD—I 剖面平均含量最高,为 44.69,GD—III 剖面最低,为 21.95。

表 3 土壤全量硅铁铝及风化度指标

Table 3 Soil full amount of Si, Fe, Al and weathering development index

剖面编号	深度/cm	土壤风化度指标						
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃ / g · kg ⁻¹	Al ₂ O ₃	Sa	Saf	Ba	CIA/ %
HCD—I	0~10	187.72	87.66	169.74	1.88	1.41	0.57	74.36
	10~20	199.88	69.57	206.07	1.65	1.36	0.51	77.44
	20~40	201.26	88.59	211.43	1.62	1.28	0.47	79.94
	40—母岩	201.97	77.57	192.15	1.79	1.42	0.45	79.54
TGHC—II	0~10	147.15	77.88	162.46	1.54	1.18	0.36	81.91
	10~20	161.68	78.36	172.89	1.59	1.23	0.39	80.39
	20~40	163.84	77.52	174.73	1.59	1.24	0.36	81.62
	40—母岩	157.65	90.04	147.35	1.82	1.31	0.43	77.40
GD—III	0~10	215.09	80.78	176.11	2.08	1.61	0.64	83.20
	10~20	203.94	115.36	171.31	2.02	1.42	0.64	83.75
	20~40	216.88	105.02	177.11	2.08	1.51	0.59	84.81
	40—母岩	216.73	108.13	189.68	1.94	1.42	0.58	86.31
LD—IV	0~10	220.46	94.39	117.08	3.20	2.11	0.98	67.49
	10~20	219.52	105.5	214.01	1.74	1.33	0.57	80.10
	20~40	220.89	103.76	217.48	1.73	1.32	0.52	81.51
	40—母岩	215.99	94.79	207.47	1.77	1.37	0.57	80.32
TGHC—V	0~10	140.46	80.48	139.58	1.71	1.25	0.41	79.76
	10~20	132.56	72.81	79.67	2.83	1.79	0.77	67.73
	20—母岩	145.65	82.67	146.66	1.69	1.24	0.53	78.61
TGHC—VI	0~10	140.81	82.97	139.03	1.72	1.25	0.47	79.16
	10~20	148.31	81.72	142.64	1.77	1.29	0.48	79.00
	20—母岩	146.93	73.07	135.84	1.84	1.37	0.52	77.41

3.3.2 土壤非晶质氧化铁

非晶质氧化铁(晶质氧化铁的反称)与游离态铁含量的比值为铁活化度,表示铁元素离子化的程度,又称无定型氧化铁,其含量高低与风化成土时间有

关,晶质态铁是游离态铁与非晶质氧化铁之比,其含量越高,晶质作用越强,铁胶体老化加剧,用晶化度(老化度)表示铁结晶程度,当条件或环境改变时,铁的活化与老化发生相反的改变^[22]。

由表 4 可知,晶质态铁高于非晶质氧化铁,其含量为后者的 2~3 倍,但二者的含量分布特征不具剖面对称性,非晶质氧化铁含量变化为 3.93~18.54 g · kg⁻¹,晶质态氧化铁含量变化为 4.25~29.79 g · kg⁻¹,HCD-I、TGHC-II、GD-III、LD-IV 剖面中 TGHC-II 剖面土壤非晶质氧化铁平均含量最高,为 12.27 g · kg⁻¹,GD-III 剖面最低,为 10.52 g · kg⁻¹,TGHC-V、TGHC-VI 剖面差异不显著。

晶胶率是土壤中晶质氧化铁与非晶质氧化铁含量的比值,比值越大,氧化铁的活性越低,老化程度越高,研究区剖面土壤晶胶率的变化范围为 0.23~5.33,HCD-I、TGHC-II、GD-III、LD-IV 剖面中 HCD-I 剖面土壤晶胶率平均值最大,为 2.00, TGHC-II 剖面的最低,为 1.02, TGHC-V、TGHC-VI 剖面的较大,除 TGHC-VI 剖面的 20 cm—母

岩层晶胶率异常外,其余层次差异不显著。

3.3.3 土壤络合态氧化铁

络合态氧化铁主要受温度和地面植被的影响。研究区剖面土壤络合态氧化铁含量在 0.68~6.21 g · kg⁻¹ 之间(表 4),HCD-I、TGHC-II、GD-III、LD-IV 剖面中 HCD-I 剖面络合态氧化铁平均含量最高,为 5.27 g · kg⁻¹,LD-IV 剖面的最低,为 1.59 g · kg⁻¹,TGHC-V、TGHC-VI 剖面含量变异小。土壤铁络合度是络合态氧化铁含量与全铁的比值,有机质是土壤中铁络合的重要介质和载体,有研究表明有机质与络合态氧化铁含量呈正相关关系^[23],HCD-I、TGHC-II、GD-III、LD-IV 剖面中 HCD-I 剖面土壤铁络合度均值最高,为 14.41,LD-IV 剖面最低,为 6.53,TGHC-V(除 0~10 cm 土层)、TGHC-VI 剖面络合态氧化铁变异较小。

表 4 土壤氧化铁及风化度指标
Table 4 Soil iron oxide and weathering development index

剖面编号	深度/ cm	土壤氧化铁及指标								
		游离态	非晶质态	络合态	晶质态	游离度	活化度	晶化度	晶胶率	络合度/
		g · kg ⁻¹			%			%		
HCD—I	0~10	41.03	11.24	6.21	29.79	46.81	27.40	0.73	2.65	13.85
	10~20	33.46	11.55	4.68	21.91	48.09	34.52	0.65	1.90	14.00
	20~40	32.93	12.43	6.16	20.50	37.17	37.75	0.62	1.65	18.71
	40—母岩	36.23	12.79	4.01	23.45	46.71	35.29	0.65	1.83	11.06
TGHC—II	0~10	24.29	12.58	1.97	11.71	31.19	51.78	0.48	0.93	8.11
	10~20	30.76	12.70	1.53	18.06	39.26	41.30	0.59	1.42	4.96
	20~40	25.06	11.28	1.38	13.78	32.33	45.01	0.55	1.22	5.50
	40—母岩	18.96	12.54	1.57	6.41	21.05	66.17	0.34	0.51	8.27
GD—III	0~10	22.71	10.14	0.68	12.57	28.12	44.66	0.55	1.24	3.00
	10~20	23.23	9.88	1.50	13.35	20.13	42.52	0.57	1.35	6.46
	20~40	18.24	11.50	2.21	6.74	17.37	63.07	0.37	0.59	12.10
	40—母岩	24.01	10.56	1.38	13.45	22.20	43.98	0.56	1.27	5.76
LD—IV	0~10	22.31	7.48	1.71	14.83	23.63	33.53	0.66	1.98	7.67
	10~20	22.79	18.54	1.71	4.25	21.60	81.37	0.19	0.23	7.52
	20~40	24.88	9.94	1.31	14.94	23.98	39.94	0.60	1.50	5.25
	40—母岩	28.93	8.16	1.64	20.78	30.52	28.20	0.72	2.55	5.67
TGHC—V	0~10	16.55	4.49	1.45	12.06	20.56	27.13	0.73	2.69	8.74
	10~20	20.01	5.00	1.09	15.01	27.49	24.99	0.75	3.00	5.46
	20—母岩	17.33	3.93	0.88	13.40	20.96	22.68	0.77	3.41	5.08
TGHC—VI	0~10	19.96	4.99	0.83	14.97	24.06	25.00	0.75	3.00	4.15
	10~20	22.88	5.14	1.24	17.75	28.00	22.44	0.78	3.46	5.42
	20—母岩	31.38	4.96	1.47	26.42	42.95	15.81	0.84	5.33	4.69

4 讨 论

4.1 岩溶山区石灰土剖面基本理化特征

土壤容重平均值($1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$)在正常范围($1.0 \sim 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间),与研究区土壤质地较黏不太一致,可能与黏壤土中壤土部分孔隙度有关;土壤颗粒组成总体上粉粒和黏粒占比较大,在 70% 以上,土壤质地以黏土或黏壤土为主;土壤酸碱度为微酸偏中性($5.21 \sim 7.33$);有机质含量随剖面土壤深度的增加而降低($76.67 \rightarrow 14.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),变化趋势与王秋兵等^[24]研究相一致;CEC 总体随剖面土壤深度的增加而降低趋势,说明土层越深,交换作用减弱;三大营养元素中钾(均值为 $12.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量高于氮(均值为 $2.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、磷(均值为 $2.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),这与本地区植被为灌草丛(草本植物钾含量高)有关,草木枯萎进入土壤,补充了植物从土壤中吸收的钾素;总体上石灰性土壤肥力随剖面土壤深度的增加而呈降低趋势,但岩溶山区成土速度和过程制约了土壤风化进程,导致土壤普遍贫瘠和薄弱,如利用不当易发生石漠化。

4.2 岩溶山区石灰土剖面硅、铁、铝风化强度及含量变异特征

研究区石灰土化学组成以硅、铝、铁为主,除 GD—III 剖面 and TGHC—V 剖面 10~20 cm 土层,其余各剖面含量高低为全硅 $\approx$ 全铝 $>$ 全铁(硅、铝 $\approx$ 2 倍铁),硅在土层中的分布变化较均匀,尤其在同一剖面中含量基本相等,表明硅的稳定性较好,较其他元素不易风化和淋失,呈弱迁移性,这是由硅的地球化学行为特征(几乎不迁移)决定的;全铁含量分布在腐殖质层和淋溶层较高,表层和耕层土壤有机质较高,腐殖化过程较强,能够分解大量的有机酸,有利于铁的降解和富集;全铝分布在淋溶层和淀积层的含量较高,在腐殖化和淋溶作用下随土壤黏粒向下层迁移,主要积累在淀积层(土壤黏粒较多)。

土壤风化指标是成土过程和作用的主要量化标准,其数值的大小与风化程度成正比关系,根据各元素之间比例关系可反映风化强度差异。 S_a (均值为 1.89)、 S_{af} (均值为 1.39)和 B_a (均值为 0.54)值均较小(表 2),表明植被覆盖率低、水汽对岩石的物理和化学侵蚀风化强烈,因生态类型较单一,生态群落结构相对简单,热量和水气的亏缺,导致生物种群单一,

微生物活性较低,生物化学风化强度较弱,以及大量的碳酸盐岩和硫酸盐岩抗风化能力较强,使得成土过程缓慢,土壤年龄时间长。

CIA 值在 50~65 之间,反映了寒冷、干燥的气候条件下低等的化学风化强度,在 65~85 之间,指示出温暖、湿润气候条件下的中等化学风化强度,在 85~100 之间,表明在炎热、潮湿的热带、亚热带季风气候条件下化学风化程度最为强烈^[25]。研究区 CIA 在 67.49~86.31 之间,均值为 79.17,说明受气候、温度和降雨的影响,研究区化学风化强度处于中等至强烈的程度,由于 CIA 计算中包含了碱金属和碱土金属部分阳离子,主要是钠、钙和镁,而研究区石灰岩集中发育,土壤中存在大量游离氧化钙、氧化镁,导致平均值偏高,CIA 数值偏高,这与实际风化强度不一致,用 CIA 反映岩溶地区石灰土土壤风化强度需进一步探讨改进。

4.3 岩溶山区石灰土剖面氧化铁含量变化及分布特征

土壤游离氧化铁含量最高为 HCD—I 剖面,最低为 TGHC—V,仅 LD—IV、TGHC—VI 剖面含量随土层深度增加而增加,总体上,各剖面土壤游离氧化铁含量约为 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且主要集中在土壤淋溶淀积层,表明剖面土壤淋溶淀积层具铁质特征,这与宁婧^[5]、王薇等^[26]的研究结果相一致;铁游离度在 HCD—I 分布规律与游离氧化铁一致,在 GD—III 剖面中最低,因为耕地受人为扰动较大,作物轮作及吸收会影响土壤全铁和游离氧化铁的含量变化。

晶质氧化铁含量是游离氧化铁与非晶质氧化铁的差值,表 3 反映出晶质氧化铁含量高于非晶质氧化铁,其含量为后者的 2~3 倍,但晶质氧化铁含量变幅度大于非晶质氧化铁,二者含量变化在各剖面层次上成非对称性分布特征。晶胶率变幅较大,但最高剖面含量平均值和最低剖面含量平均值差异不大。

络合态氧化铁受有机质影响较大,土壤络合铁和铁络合度平均含量高低分布一致,都是 HCD—I 剖面最高,LD—IV 剖面最低,GD—III 剖面含量变化较小,分布差异不明显,各剖面土壤有机质含量随土层深度增加而减少,研究表明有机质与络合态氧化铁含量呈正相关关系,HCD—I 剖面受季节控制,草被枯萎凋落进入土壤,在土壤微生物的作用下分解成各种有机酸与铁螯合,使络合态氧化铁稳定积累在土壤中,含量相对较高;而耕地土壤熟化度高,开垦年长,

使用化肥导致土壤退化,有机质也随之减少,络合态氧化铁失去螯合媒介,易淋失和转化,含量下降。

5 结论与建议

(1)研究区土壤容重与颗粒组成有关,壤土比例小,土壤质地较黏重,不利于耕作,应采取参沙和增加有机物等措施改良土壤质地状况,针对氮、磷较低且易流失的特点,应加强水土保持力度,进行秸秆还田、增施有机肥等。

(2)研究区硅、铁、铝土壤风化发育元素含量较高,土壤潜在发育和风化度较大,但由于气候、降雨及生物等成土因素较弱,高温湿热的风化环境缺乏,导致成土要素主要以矿物态形式存在,风化发育度较低,土壤的自然形成和积累过程缓慢,土壤脱硅富铁铝化程度低,土层贫瘠、浅薄,土壤剖面常缺乏过渡层,由降雨冲刷导致水土易流失,因此必须采取工程措施和自然恢复等手段,减少人为干扰和增加植被覆盖等。

(3)研究区土壤游离氧化铁含量最高,络合态氧化铁含量最低,表明区内土壤氧化铁形态主要是游离氧化铁;土壤氧化铁游离度最高,晶化度最低。

参考文献

- [1] 王金乐. 贵州喀斯特石漠化地区荒地土壤理化性质及环境效应研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [2] 于扬, 杜虎, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33 (23): 7455-7466.
- [3] 谭秋锦, 宋同清, 曾馥平, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 农业现代化研究, 2014, 35 (2): 225-228.
- [4] 李安定, 郭春艳, 符裕红, 等. 贵州喀斯特峰丛洼地石漠化区土壤物理特征时空分异[J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 202-206.
- [5] 宁婧. 贵州喀斯特生态环境石灰土发生特征与诊断特性的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [6] 杨柳, 何腾兵, 舒英格, 等. 贵州喀斯特区草地生态条件下石灰(岩)土的发生特性及系统分类研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30 (1): 93-99.
- [7] 梁建宏, 曹建华, 杨慧, 等. 钙、铁、铝形态对岩溶石灰土磷有效性的影响[J]. 中国岩溶, 2016, 35(2): 211-217.
- [8] 陈超, 杨丰, 赵丽丽, 等. 贵州省不同土地利用方式对土壤理化性质及其有效性的影响[J]. 草地学报, 2014, 22(5): 1008-1013.
- [9] 贾申, 喻理飞. 喀斯特石漠化区石灰岩与白云岩土壤理化性质分析:以贵州兴义市为例[J]. 贵州科学, 2010, 28(3): 29-33.
- [10] 董玲玲, 何腾兵, 刘元生, 等. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要理化性质差异性分析[J]. 土壤通报, 2008, 39 (3): 471-474.
- [11] 刘文景, 涂成龙, 郎赞超, 等. 喀斯特地区黄壤和石灰土剖面化学组成变化与风化成土过程[J]. 贵州科学, 2010, 38(3): 271-279.
- [12] 韩美荣, 宋同清, 彭晚霞, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤矿物质的组成特征与作用[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 685-693.
- [13] 宋照亮. 喀斯特流域风化成土作用及其矿质元素行为与环境质量[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版, 1999: 60-73.
- [15] 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, 2011: 148-179.
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 156.
- [17] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 118-119.
- [18] Jenny H. Factors of soil formation [J]. New York: McGraw-Hill, 1941: 50-125.
- [19] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982(299): 715-717.
- [20] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 161-165.
- [21] 常庆瑞, 冯立孝, 阎湘. 陕西汉中土壤氧化铁及其发生学意义研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(1): 14-16.
- [22] 张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 等. 岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2013-2020.
- [23] 徐德福, 黎成厚. 氧化铁和有机质对土壤有机无机复合状况的影响[J]. 贵州大学学报(农业与生物科学版), 2002, 21(6): 397-403.
- [24] 王秋兵, 李岩, 韩春兰, 等. 宽甸盆地火山喷出物发育土壤特性研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 258-265.
- [25] 冯连君, 储雪蕾, 张启瑞, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544.
- [26] 王薇, 黄景, 银秋玲. 广西大明山垂直带土壤理化性质及其系统分类[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(9): 1548-1554.

Distribution characteristics of silicon, iron and aluminum in lime soil profile in karst mountainous areas: A case study of Qinglong county, Guizhou Province

WANG Dalong, SHU Yingge, WEN Xiaoqin, CHEN Mengjun, XIAO Shengyang

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract The study site is located in Liancheng town, Qinglong county, Guizhou Province, an area with highly developed karst landforms dominated by mountainous lands. The area belongs to plateau subtropical monsoon climate with an average elevation of 1,442 m, annual precipitation of 1,500 to 1,650 mm, annual average temperature of 14 °C, and frost-free period of about 320 d. The hilly area is dominated by limestone soils, with dominant vegetation species of fir and eucalyptus trees. This paper aims to understand the changes of silicon, iron and aluminum contents and the characteristics of weathering development through studying the limestone soil profile, which provide references for soil fertilization and associated improvement in the karst mountain areas. The mineral elements determination method (triacid digestion-atomic absorption spectrophotometry and aluminum reagent colorimetry and silicon-molybdenum blue colorimetry methods) and soil oxide determination method (sodium disulfite-sodium citrate-sodium bicarbonate method, acidic ammonium oxalate method and sodium pyrophosphate extraction-atomic absorption spectrophotometry) were used to analyze the contents and variation characteristics of silicon, iron and aluminum elements. The results show that the content of silicon, iron and aluminum in karst mountain areas of Qinglong county is in the order of silicon>aluminum>iron, and the content of iron oxide is in the form of free state>amorphous state>complexation state. The conclusion is that the content of silicon, iron and aluminum in the soil profile of karst mountainous area in Qinglong county is higher, and mainly exists in the form of minerals. The constraints of soil formation factors and the environment resulting in low degree of desilicization and iron aluminization in soil, slow accumulation of soil, lack of transition layers in soil profile and etc. all cause soil erosion and rocky desertification. Engineering and natural protection measures should be taken to prevent and control the vegetation cover reduction and ecological deterioration. Soil iron oxide is also an important indicator of weathering process, and the study of different forms of iron oxide can be conducted to understand the morphological and environmental behaviors of iron, which will assist in the study of soil development and soil environment in karst mountainous areas.

Key words karst mountain areas, lime soil, silicon, iron and aluminum, soil iron oxide, distribution

(编辑 黄晨晖)