

喀斯特石漠化地区土壤 Fe 组成及其发生学意义

李孝良^{1,2}, 陈效民¹, 周炼川¹, 焦存来², 程寿芝²

LI Xiao-liang^{1,2}, CHEN Xiao-min¹, ZHOU Lian-chuan¹,

JIAO Cun-lai², CHENG Shou-zhi²

1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095;

2. 安徽科技学院城建与环境学院, 安徽 凤阳 233100

1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China;

2. College of Urban Construction and Environmental Sciences, Anhui Science and Technology University,

Fengyang 233100, Anhui, China

摘要:土壤中氧化铁的组成反映了土壤的成土过程和环境条件。通过对西南喀斯特石漠化地区不同石漠化阶段山地自然土壤和农田土壤 Fe 组成的分析,研究了土壤全铁、游离氧化铁和非晶形氧化铁的分布规律,探讨了喀斯特地区石漠化土壤的发育过程和 Fe 的指示作用。研究表明:①喀斯特地区土壤表层全铁含量在 38.9~53.9g/kg 之间,游离氧化铁含量在 18.0~26.7g/kg 之间,铁游离度在 44.1%~73.4%之间,铁活度在 7.2%~11.4%之间。②随着石漠化程度的加剧,土壤游离氧化铁和铁游离度呈增加的趋势,而铁活度呈降低的趋势。③在土体分布上,自然土壤剖面随深度的增加,土壤铁游离度和铁活度呈明显降低的趋势,而农田土壤铁游离度呈增加的趋势。④喀斯特地区的土壤是石灰岩溶蚀风化的产物,人为活动干扰下的自然土壤石漠化过程是在水力作用下的表土侵蚀过程,而农田土壤受水分垂直运动的影响,是土壤丢失的过程。

关键词:石漠化;铁游离度;铁活度;土壤;喀斯特地区

中图分类号:S153

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2010)05-0745-07

Li X L, Chen X M, Zhou L C, Jiao C L, Cheng S Z. Characteristics of soil iron and its pedogenetic significance in the process of Karst rocky desertification, southwestern China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5):745-751

Abstract: Soil iron oxide indicates soil-forming process and soil-forming environment under which the iron oxide was formed. Soil iron oxides of natural soils and agriculture soils in different phases of Karst rocky desertification in southwestern China were analyzed this time. The distributions of soil total iron (Fet), free iron oxide (Fed) and amorphous iron (Feo) were also studied, and soil-forming process in the Karst rocky desertification regions was discussed. The results were as follows: the soil total iron content in Karst region ranges from 38.9~53.9 g/kg. The free iron oxide content ranges from 18.0~26.7 g/kg. The degree of free iron ranges from 44.1% to 73.4%, and the degree of active iron ranges from 7.2% to 11.4%. With the aggravation of rocky desertification, the free iron oxide content and the free iron degree increase, and the degree of active iron decreases. The degree of free iron and the active iron of different profile in karst natural soils in surface layer is larger than bottom layer, but the degree of free iron in agriculture soil in bottom layer is larger than surface layer. The soil-forming process of karst region is due to limestone corrosion. Under anthropogenic disturbance, the essence of rocky desertification process in natural soils is soil and water erosion process in surface layer, and that in agriculture soils was "soil loss" process which was affected by water vertical migration.

Key words: rock desertification; degree of free iron; degree of active iron; soil; Karst region

收稿日期:2009-07-01;修订日期:2009-08-28

科技项目:国家 973 计划项目《西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控》子课题《养分生物地球化学循环及其对石漠化过程的响应》(编号:2006CB403205)资助

作者简介:李孝良(1974-),男,在读博士,副教授,从事土壤水土资源利用与管理研究。E-mail: lixl100@163.com

通讯作者:陈效民(1957-),男,教授,博士生导师,从事水土资源利用和土壤物理过程的研究。E-mail: xmchen@njau.edu.cn

Fe 是土壤的重要组成成分,除原生矿物中的硅酸盐铁外,土壤中氧化铁的形态和含量受成土环境的影响,同时也反映成土环境的特点^[1]。已有的研究表明^[2~3],在中国,土壤铁的游离度有自南向北递减的趋势,氧化铁主要存在于土壤的粘粒中,反映土壤的地带性特征。土壤铁的活度与游离度相反,自南向北呈递增的趋势,主要受土壤中有机的影响。山区土壤随海拔高度降低、温度升高和降水增多,土体的风化发育程度逐渐加深,土壤剖面中整体游离氧化铁的含量和游离度也随之增加^[4]。土壤剖面铁游离度与剖面游离氧化铁含量相比,能更好地反映水热条件、成土母质等因素对土壤发育的影响。

喀斯特地区由于脆弱的生态环境和不合理的土地利用方式,土壤侵蚀和土地退化很严重,形成基岩裸露的石漠化景观^[5~6],严重地影响了当地的农业生产和生态环境。喀斯特山区土壤的退化的实质是在水力作用下土壤的侵蚀退化过程^[7~8]。为了有针对性地划分土壤石漠化的过程,有必要对能够反映成土环境和过程的土壤全铁、游离氧化铁、非晶形氧化铁进行分析,为石漠化阶段的划分和石漠化过程的研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区土样采集情况

试验点选择在贵州省普定县陈旗村和荔波县

茂兰自然保护区。普定县陈旗村位于贵州普定后寨河流域,为典型的喀斯特山地小流域地形,年均温 15.1℃,年降雨量为 1378.2mm,年平均相对湿度为 80%以上,属亚热带季风湿润气候,母岩为三叠纪灰岩。荔波县茂兰保护区是地球上唯一幸存下来的喀斯特原始森林生态系统,年平均温度为 18.3℃,年降水量为 1320.5mm,年平均相对湿度为 83%,属亚热带季风湿润气候,采样点母岩为石炭纪灰岩^[9~10]。按梅再美等^[11]提出的石漠化划分标准,在研究区典型地段选择不同石漠化阶段的土壤(表 1),按发生层取样,每个样点重复 3 次。样品取回后风干磨细,分别过 1mm 和 0.149mm 筛备用。

1.2 分析测试方法

(1)土壤基本性质的测定

研究区土壤基本性质的分析结果见表 2。其中 pH 值采用酸度计法,容重采用环刀法,CaCO₃ 采用中和滴定法,土壤颗粒组成采用吸管法(国际分类),土壤非晶形氧化铝采用酸性草酸铵缓冲溶液提取——氟化钾取代 EDTA 容量法^[12~13]。

(2)土壤中各种形态铁的测定

土壤全铁采用碳酸钠熔融-邻啡罗啉比色法,土壤游离氧化铁采用柠檬酸钠-重碳酸钠-连二亚硫酸钠混合液(DCB 法)提取-邻啡罗啉比色法,土壤非晶形氧化铁采用酸性草酸铵缓冲溶液提取-邻啡罗啉比色法^[11,12~13]。

表 1 喀斯特地区供试土壤的状况
Table 1 The situation of sampling soils in Karst region

石漠化阶段	编号	土壤类型	土壤层次/cm	母质	地 理 坐 标	高程/m	采样点	植被
未石漠化	NS1	黑色石灰土	0~12	石灰岩	25 ° 17.5'N 107 ° 56.3'E	755±50	荔波凉水井	原始森林
			12~24					
			24~50					
潜在石漠化	NS2	黑色石灰土	0~8	石灰岩	26°15.6' N 105° 46.4' E	1457±20	普定陈旗村	灌丛
			8~32					
轻度石漠化	NS3	黑色石灰土	0~17	石灰岩	25 ° 18.8' N 107 ° 56.0' E	753±15	荔波尧古村	草地
			17~49					
潜在石漠化	AS1	棕色石灰土	0~20	石灰岩	26° 15.8' N 105 ° 46.1' E	1323±5	普定陈旗村	玉米
			20~40					
			40~60					
轻度石漠化	AS2	黄红壤	0~12	石灰岩	25 ° 19.3' N 107 ° 56.1' E	793±5	荔波尧古村	玉米
			12~39					
中度石漠化	AS3	红色石灰土	39~70	石灰岩	25 ° 18.9' N 107 ° 56.5' E	761±5	荔波尧古村	玉米
			0~15					
			15~35					

注: NS—自然土壤, AS—农田土壤, 下同

(3)土壤铁游离度和铁活度的计算

土壤铁游离度(%)=100×游离氧化铁%/土壤全铁^[13]

土壤铁活度(%)=100×非晶形氧化铁%/游离氧化铁^[13]

1.3 数据整理与统计方法

采用 EXCEL 和 DPS 统计软件对数据进行整理与分析。

2 研究结果

2.1 喀斯特石漠化地区山地自然土壤 Fe 组成特征

喀斯特山地自然土壤表层全铁(Fe₂O₃,土壤中铁的总量)含量变化较小,在38.9~41.8g/kg之间(表

3),平均值为 40.2g/kg,石漠化程度对表层土壤全铁含量无明显影响。

游离氧化铁(Fe₂O₃)包括无定形和晶形氧化铁,是硅酸盐结晶矿物蚀变游离出的铁,是土壤风化的产物,在喀斯特山地自然土壤中有较大的差异(表3)。研究区供试山地自然土壤的表层游离氧化铁含量在20.8~30.7g/kg之间,随石漠化程度的增加呈极显著增加的趋势(概率*P*<0.01)。铁的自由度在一定程度上反映了土壤风化作用的强度,喀斯特地区山地自然土壤表层氧化铁游离度随石漠化程度的增加呈明显增加的趋势,由未石漠化阶段的 52.3%、潜在石漠

表 2 研究区供试土壤的基本性质
Table 2 Basic properties of the studied soils in Karst region

编号	层次/cm	pH	有机碳/g·kg ⁻¹	CaCO ₃ /g·kg ⁻¹	容重/g·cm ⁻³	非晶形氧化铝/g·kg ⁻¹	颗 粒 组 成 /g·kg ⁻¹		
							>0.02mm	0.02~0.002mm	<0.002mm
NS1	0~12	7.52	78.9	40.2	0.628	2.15	495.7	360.4	143.9
	12~24	7.62	36.8	23.3	0.986	3.22	299.9	402.7	297.4
	24~50	7.77	17.8	18.7	1.142	2.51	208.2	435.6	356.2
NS2	0~8	7.46	42.3	6.2	0.940	2.15	457.8	339.7	202.5
	8~32	7.57	12.1	25.4	1.059	2.15	220.0	368.6	411.4
NS3	0~17	6.34	19.2	11.4	1.247	1.16	345.3	433.2	221.5
	17~49	7.53	3.8	13.1	1.388	1.08	75.6	426.1	498.3
AS1	0~20	6.71	21.3	15.8	1.132	1.88	183.3	505.0	311.7
	20~40	7.80	15.9	17.4	1.348	0.45	247.8	479.0	273.2
	40~60	7.77	15.0	15.2	1.512	1.90	235.1	480.5	284.4
AS2	0~12	4.66	13.5	7.1	1.032	1.56	96.7	390.9	512.4
	12~39	5.20	6.0	16.1	1.298	0.81	62.1	227.2	710.7
	39~70	7.38	3.7	15.8	1.308	0.61	126.0	377.7	496.3
AS3	0~15	5.77	13.2	13.4	1.116	1.88	166.3	399.8	433.8
	15~35	5.41	4.5	10.0	1.248	1.88	113.8	254.0	632.3

表 3 喀斯特地区土壤氧化铁的形态特征
Table 3 Physical properties of iron oxide forms in the studied soils in Karst region

编号	石漠化阶段	层次/cm	全铁/g·kg ⁻¹	硅酸盐铁/g·kg ⁻¹	游离氧化铁/g·kg ⁻¹	非晶形氧化铁/g·kg ⁻¹	铁活度/%	铁游离度/%
NS1	未石漠化	0~12	39.8±3.2	19.0±0.8	20.8±2.5	2.37±0.23	11.4±0.3	52.3±2.0
		12~24	42.9±3.8	28.6±1.8	14.3±2.2	1.41±0.22	9.9±0.3	33.3±3.1
		24~50	47.0±4.3	32.7±2.2	14.3±1.8	1.06±0.19	7.4±0.4	30.4±2.5
NS2	潜在石漠化	0~8	38.9±2.2	16.9±0.2	22.0±2.2	2.04±0.22	9.3±0.1	56.6±2.5
		8~32	49.3±5.2	32.8±1.6	16.5±2.1	1.02±0.14	6.2±0.6	33.5±3.2
NS3	轻度石漠化	0~17	41.8±3.4	11.1±1.7	30.7±2.0	2.27±0.44	7.4±1.0	73.4±2.0
		17~49	37.4±4.0	22.3±2.2	15.1±1.7	1.07±0.28	7.1±0.9	40.4±3.7
AS1	潜在石漠化	0~20	40.8±3.2	22.8±0.9	18.0±2.4	2.06±0.16	11.4±0.9	44.1±2.3
		20~40	45.2±4.2	21.7±1.5	23.5±2.8	2.49±0.23	10.6±1.0	52.0±2.9
		40~60	40.2±3.9	16.8±1.8	23.4±2.6	2.38±0.24	10.2±0.8	58.2±3.5
AS2	轻度石漠化	0~12	53.9±3.9	27.8±1.3	26.1±2.9	2.41±0.33	9.2±0.3	48.5±2.1
		12~39	57.5±5.5	26.6±1.9	30.9±3.2	2.13±0.29	6.9±0.5	53.7±3.3
		39~70	48.5±3.8	22.3±1.9	26.2±3.1	1.74±0.21	6.6±0.6	54.0±3.2
AS3	中度石漠化	0~15	50.5±3.1	23.8±1.2	26.7±2.6	1.93±0.39	7.2±0.7	52.9±2.4
		15~35	57.0±4.9	26.5±2.1	30.5±3.3	1.61±0.28	5.3±0.7	53.5±3.7

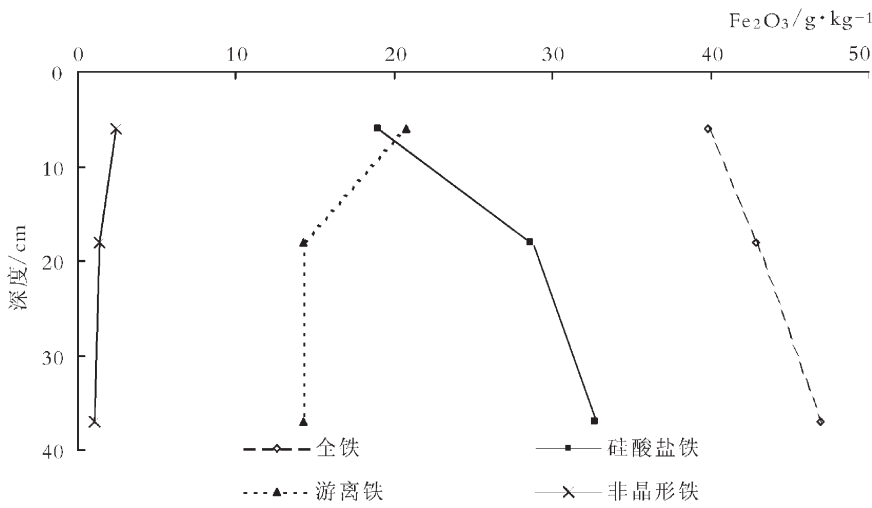


图 1 喀斯特山地自然土壤剖面 Fe 的分布

Fig. 1 Distribution of iron in natural soil profile in Karst rocky area

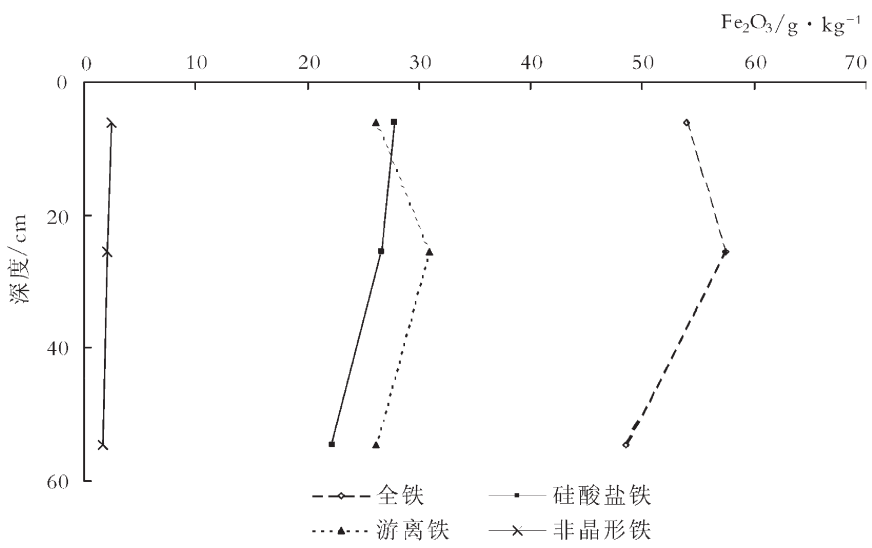


图 2 喀斯特农田土壤剖面 Fe 的分布

Fig. 2 Distribution of iron in agriculture soil profile in Karst rocky area

化56.6%增加到轻度石漠化的 73.4%。

喀斯特山地自然土壤非晶形氧化铁(Fe_2O_3)含量在不同石漠化阶段有一定的差异(表 3),以未石漠化土壤最高,达 2.37g/kg,潜在石漠化土壤较低,为 2.04g/kg,平均为 2.23g/kg。铁活度随石漠化程度的增加呈极显著的降低趋势($P<0.001$),表现为未石漠化土壤>潜在石漠化土壤>轻度石漠化土壤。

2.2 喀斯特石漠化地区农田土壤 Fe 组成特征

由于受到人为翻耕熟化的影响,研究区供试

农田土壤表层全铁含量明显高于山地自然土壤(表 3),在 40.8~53.9g/kg 之间,平均为 48.4g/kg。石漠化程度对表层土壤全铁含量有极显著的影响($P<0.01$),表现为随石漠化程度的增加,土壤表层全铁含量呈先增加后降低的趋势。研究区供试农田土壤表层全铁含量最高的为轻度石漠化土壤,其次为中度石漠化土壤,以潜在石漠化土壤全铁含量最低,这与淋溶条件下土壤成分的流失有关。

喀斯特农田土壤表层游离氧化铁含量在 18.0~

表 4 喀斯特地区土壤 Fe 组成与土壤基本性质的相关性
Table 4 The correlation between the soil iron formation and basic properties of the Karst soils

Fe 组成	pH	有机碳	CaCO ₃	容重	非晶形铝	>0.02mm 砂粒	0.02~0.002 mm 粉粒	<0.002mm 粘粒
全铁	-0.7276**	-0.4917	-0.2186	0.1208	-0.1898	-0.6041*	-0.6401*	0.7961**
硅酸盐铁	-0.1109	-0.2733	0.1606	-0.1236	0.3344	-0.4773	-0.2410	0.5023
游离铁	-0.6919**	-0.2678	-0.4032	0.2579	-0.5464*	-0.1865	-0.4642	0.3733
非晶形铁	-0.3001	0.2819	-0.0904	-0.0376	-0.3635	0.2757	0.1054	-0.2741
铁活度	0.3241	0.6435**	0.3258	-0.3411	0.1984	0.5265*	0.5489*	-0.6895**
铁游离度	-0.3206	0.0251	-0.3257	0.2065	-0.5030	0.2198	-0.1084	-0.1264

注:样品数 n=15,相关系数 $r_{0.05}=0.514$; $r_{0.01}=0.641$; * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

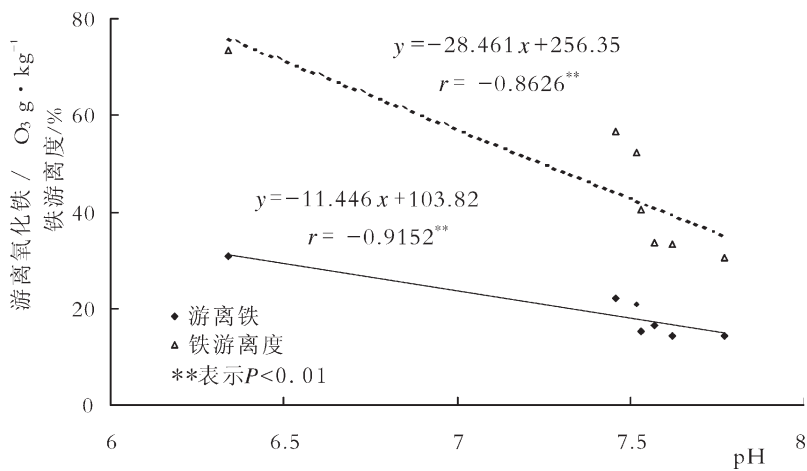


图 3 研究区自然土壤 pH 对游离氧化铁和铁游离度的影响
Fig. 3 The effect of pH on free iron oxide and degree of free iron in studied natural soils

26.7g/kg 之间(表 3),平均为 23.6g/kg,铁游离度在 44.1%~52.9%之间,随石漠化程度的增加,农田表层土壤游离氧化铁含量和铁游离度均呈增加的趋势(方差分析 F 值,游离氧化铁 $F=10.426$, $P<0.05$;铁游离度 $F=11.461$, $P<0.01$)。

喀斯特农田土壤表层铁活度在 11.4%~7.2%之间(表 3),随石漠化程度的增加,铁活度表现为潜在石漠化>轻度石漠化>中度石漠化($P<0.001$)。

2.3 喀斯特地区土壤 Fe 剖面特征

对比喀斯特山地未石漠化自然土壤(NS1)和农田轻度石漠化土壤(AS2)Fe 组成在土体中的分布,可以看出(图 1、图 2),山地土壤与农田土壤 Fe 的剖面分布有一定的差异。

喀斯特山地自然土壤随土体深度的增加,全铁、硅酸盐铁含量呈明显增加的趋势,而游离氧化铁和非晶形氧化铁呈递减的趋势,且除表层土壤外,游离

氧化铁含量低于硅酸盐铁含量。农田土壤则表现为随土体深度的增加,全铁、游离氧化铁含量呈先增加后降低的趋势,土体中出现较为明显的铁淀积层,而硅酸盐铁和非晶形氧化铁呈递减的趋势,且除表层土壤外,游离氧化铁含量高于硅酸盐铁含量。

3 讨 论

Fe 是土壤的重要组成成分,在风化成土过程中,Fe 从原生矿物中分离出来,形成氧化铁矿物,广泛分布于土壤中^[1]。土壤铁主要存在于粘粒部分中,具有随粘粒移动的可能性^[9],在母质类型相同的情况下,土壤矿质元素的聚积和迁移反映了土壤的淋溶强度和风化的发育程度^[14]。碳酸盐岩中 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的总和不足 1%^[15],而研究区土壤全铁含量为 38.9 ~ 53.9g/kg,具有明显的 Fe 富集特征。土壤全铁与小于 0.002mm 的粘粒含量表现出极显著的线性

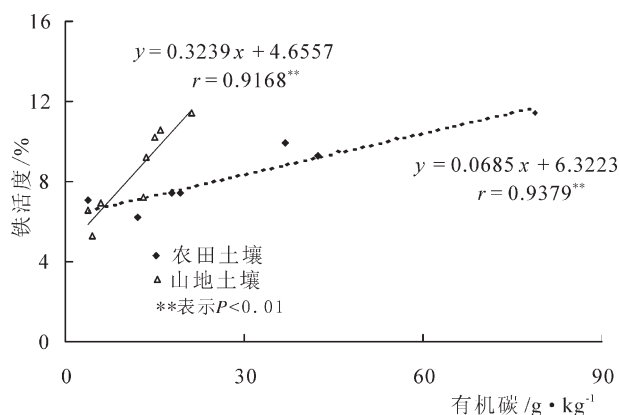


图4 喀斯特地区土壤有机碳与铁活度的相关性

Fig. 4 The correlation between soil organic carbon and degree of active iron in Karst soils

正相关关系(相关系数 $r=0.7961^{**}$, 表4), 即随粘粒移动的现象。山地自然土壤全铁含量随土体深度的增加呈增加的趋势(图1), 但不同石漠化阶段变化规律不明显, 说明山地自然土壤的发育具有一定的淋溶特征, 石漠化并不加速其淋溶过程。农田土壤受人为耕作熟化的影响, 表现出明显的Fe淀积特征(图2), 全铁以心土层最高, 且随石漠化程度的增加, 土壤全铁含量呈先增加后降低的趋势(表3)。石漠化过程的最初阶段主要加速了土壤盐基成分的损失, Fe相对富集, 而随石漠化程度的加深, 土壤淋溶作用增强, 粘粒部分流失, 土壤Fe含量也随之下降。

土壤中的游离氧化铁常被用来反映成土过程和成土环境^[16], 是土壤风化度的指标^[17]。在母质类型相同的情况下, 铁游离度取决于母质的风化程度, 风化程度越深, 游离氧化铁含量越高^[18]。喀斯特地区农田土壤表现出随石漠化程度的加重, 铁游离度增加的趋势, 说明人为干扰下的植被破坏和农业活动加速了土壤的发育过程。喀斯特地区土壤发育过程中, 母岩中的CaCO₃淋溶损失, 残留于土体中的主要成土物质为母岩中的副成分(铁锰铝及粘土)^[19], 地表植被破坏加速了盐基离子的损失和硅酸盐矿物的分解, 土壤酸化, 表现出土壤pH、游离氧化铁含量和铁游离度呈极显著的线性负相关关系(图3)。土体中游离氧化铁与硅酸盐铁的比值反映了母质的风化程度或土壤的发育状况^[18]。研究区山地未石漠化土壤土体中硅酸盐铁占优势(图1), 且随剖面深度的增加, 土壤铁游离度由52.3%下降至30.4%, 说明喀

斯特地区碳酸盐岩的成土过程决定了其成土速率极低, 土体发育程度差^[20], 石漠化过程并没有改变山地自然土壤游离氧化铁在土体中的分布。农业利用产生的石漠化土壤游离氧化铁的分布与山地土壤相反(图2), 随剖面深度的增加, 土壤铁游离度呈增加的趋势。以农用方式为主的农田土壤风化溶蚀作用得到加强, 甚至出现中度石漠化区土壤丢失的现象^[21], 表层土壤处于负增长状态是碳酸盐岩地区与其他岩类分布区的重要区别, 也是碳酸盐岩地区石漠化的重要特征^[22], 人为耕作加剧了土壤丢失的过程, 土壤风化溶蚀作用增强。

土壤中氧化铁的形成、累积状况与气候、温度明显相关, 土壤铁活度是反映土壤形成与气候条件的可靠数量指标^[18]。喀斯特地区不完善的地表水系与地下水系并存构成的喀斯特水系二元结构导致雨水及地表水强烈渗漏, 形成“岩溶干旱”^[23]。土壤氧化铁老化现象明显, 铁活度较低, 表层土壤铁活度在7.2%~11.4%之间, 且随石漠化程度的加重呈明显降低的趋势。石漠化过程使地表植被受到破坏, 土壤涵养水分的能力降低^[24], 土壤生境干旱加剧, 降低了土壤铁活度。喀斯特地区土壤铁活度与土壤有机质含量呈极显著线性正相关关系(表4、图4), 表明土壤有机质是促使氧化铁活化的重要因素之一。有机质的存在可以干扰或阻碍Fe的水解与聚合, 提高土壤铁活度^[25]。

4 结 论

(1) 研究区土壤表层全铁含量在38.9~53.9g/kg之间, 表现出Fe的富集特征。随土体深度的增加, 山地自然土壤全铁含量呈增加的趋势, 农田土壤则表现出明显的Fe淀积特征, 以心土层相对较高。

(2) 研究区土壤表层游离氧化铁含量在18.0~26.7g/kg之间, 铁游离度在44.1%~73.4%之间。随石漠化程度的加剧, 土壤游离氧化铁和铁游离度均呈极显著增加的趋势。在土体分布上, 山地自然土壤游离氧化铁和铁游离度随深度的增加呈降低的趋势, 而农田土壤铁游离度呈增加的趋势, 游离氧化铁具有明显淀积的特征。

(3) 喀斯特地区土壤铁活度较低, 在7.2%~11.4%之间, 且随石漠化程度的加重呈明显降低的趋势。

(4) 喀斯特地区土壤的发育过程是碳酸盐岩溶蚀风化的过程, 自然土壤的石漠化过程是在水力作

用下表土侵蚀的过程,农田土壤的石漠化过程受水分垂直运动的影响,是土壤丢失的过程。

致谢:在土壤样品采集过程中得到贵州省荔波县茂兰自然保护区管理局科研科和普定县岩溶站的支持,论文写作过程中得到华中农业大学资源与环境学院谭文峰博士的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]李学垣.土壤化学及实验指导[M].北京:中国农业出版社,1997: 53-71.
- [2]蒋梅茵,杨德涌.玄武岩发育的几种红壤的矿物特征[J].土壤学报, 1991, 28(3): 268-275.
- [3]马毅杰,陈家纺.我国红壤氧化铁形态及其特性和功能[J].土壤, 1998, 30(1): 1-6.
- [4]雷梅,常庆瑞,冯立孝,等.太白山土壤特性及氧化铁发生学特征[J].地理研究, 2001, 20(1): 83-90.
- [5]王德炉,朱守谦,黄宝龙.石漠化的概念及其内涵[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 87-90.
- [6]Wang Shijie, Liu Qiming, Zhang Dianfa. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, land use, impact and rehabilitation [J]. Land Degradation and Development, 2004, 15: 115-121.
- [7]Wang Shijie, Zhang Dianfa, Li Ruiling. Mechanism of rocky desertification in the karst mountain areas of Guizhou province southwest China[J]. International Review for Environmental Strategies, 2002, 3(1): 123-135.
- [8]赵中秋,后立胜,蔡运龙.西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨[J].地学前缘, 2006, 13(3): 185-189.
- [9]周运超,张平究,潘根兴,等.表层岩溶系统中土-气-水界面碳流通的短尺度效应——以贵州茂兰国家喀斯特森林公园的秋季日动态监测为例[J].第四纪研究, 2002, 22(3): 258-265.
- [10]喻理飞,朱守谦,叶镜中,等.人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究[J].应用生态学报, 2002, 13(5): 529-532.
- [11]梅再美,王代懿,熊康宁,等.不同强度等级石漠化土地植被恢复技术初步研究——以贵州花江试验示范区查尔岩试验小区为例[J].中国岩溶, 2004, 23(3): 253-258.
- [12]鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- [13]鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [14]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.
- [15]林进也,朱立军.贵州岩溶地区红土的地球化学特征及其意义[J].贵州工业大学学报, 1997, 26(2): 31-36.
- [16]Schwermann U. The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals[J]. Advance in Soil Science, 1985, 1: 171-200.
- [17]黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社, 2000: 156-157.
- [18]刘文彰.土壤铁的形态类型及其发生学意义[J].河北师范大学学报(自然科学版), 1984, 8(1): 95-104.
- [19]章明奎,胡国成.浙西石灰岩发育土壤中氧化铁矿物组成及其特性的研究[J].土壤, 2000, 32(1): 38-42.
- [20]郑永春,王世杰.贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析[J].长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 461-465.
- [21]李德文,崔之久,刘耕年,等.岩溶风化壳形成演化及其循环意义[J].中国岩溶, 2001, 21(3): 183-188.
- [22]万国江,白占国.论碳酸盐岩侵蚀与环境变化——以黔中地区为例[J].第四纪研究, 1998, 18(3): 279.
- [23]龙健.贵州喀斯特地区土壤障碍因素分析及其调控对策[J].土壤通报, 2005, 36(5): 795-798.
- [24]李孝良,陈效民,周炼川,等.西南喀斯特石漠化过程对土壤水分特性的影响[J].水土保持学报, 2008, 22(5): 198-203.
- [25]贺纪正,李学垣,徐凤琳.天宝山土壤中铝的形态和转化的初步研究[J].土壤通报, 1993, 24(3): 105-107.