

DOI: 10.11766/trxb202305040171

徐祖亮, 陆晓辉, 曾海莲, 邹钰峰. 贵州典型喀斯特流域土壤氧化铁特征分异及其影响因素[J]. 土壤学报, 2024, 61 (5): 1284–1298.  
XU Zuliang, LU Xiaohui, ZENG Hailian, ZOU Yufeng. Distinguishing Features and Influential Factors of Soil Iron Oxide in a Representative Karst Watershed in Guizhou Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (5): 1284–1298.

## 贵州典型喀斯特流域土壤氧化铁特征分异及其影响因素\*

徐祖亮<sup>1, 2</sup>, 陆晓辉<sup>1, 2†</sup>, 曾海莲<sup>1, 2</sup>, 邹钰峰<sup>1, 2</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550025)

**摘 要:** 探究亚热带喀斯特流域土壤氧化铁特征及其分异, 对认识这类特殊地域综合体上土壤的发生发育及类型演化等具有重要意义。以贵州省普定县后寨河流域内 53 个典型剖面土壤为研究对象, 测定诊断表层和诊断表下层不同形态氧化铁含量并计算其风化度指标, 分析土壤氧化铁特征及其分异情况, 探讨成土环境和土壤属性对氧化铁特征分异的影响。结果表明: 由诊断表层至诊断表下层, 全铁、游离铁呈增加趋势, 平均增幅分别为 25.54% 和 39.63%, 铁氧化物具有在诊断表下层富集的特征; 诊断表层铁活化度高于诊断表下层, 而铁游离度和铁晶胶率与之相反。大部分诊断表下层土壤游离铁在  $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上, 铁游离度  $\geq 50\%$ , 铁活化度  $< 30\%$ , 土壤处于中期脱硅富铝化阶段。母岩、土地利用、流域部位、有机质、pH、黏粒阳离子交换量和质地等对不同形态土壤氧化铁含量及其风化度指标分异均有显著影响 ( $P < 0.05$ ); 地理探测器分析表明, 母岩与有机质对各氧化铁特征 (除铁游离度) 分异的解释力较大, 二者交互作用下的  $q$  值最大 (全铁 41.9%、游离铁 39.8%、非晶质铁 40.1%、铁活化度 41%、铁晶胶率 52.5%), 因此母岩和有机质为亚热带喀斯特流域土壤氧化铁特征分异的主控因子。

**关键词:** 氧化铁; 影响因素; 亚热带喀斯特流域; 贵州省

**中图分类号:** S151.9<sup>+</sup>3      **文献标志码:** A

## Distinguishing Features and Influential Factors of Soil Iron Oxide in a Representative Karst Watershed in Guizhou Province

XU Zuliang<sup>1, 2</sup>, LU Xiaohui<sup>1, 2†</sup>, ZENG Hailian<sup>1, 2</sup>, ZOU Yufeng<sup>1, 2</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Ecological Environment in Karst Mountainous Area of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** 【Objective】 Understanding the characteristics and differentiation of soil iron oxide in subtropical karst basins is crucial for comprehending the occurrence, development, and type evolution of soil in this unique regional complex. 【Method】 This study focused on 53 typical soil profiles in the Houzhai River Basin, Puding County, Guizhou Province. The research involved

\* 国家自然科学基金项目 (41867001, 41261058)、贵州师范大学学术新苗培养及创新探索专项项目 (黔科合平台人才 ([2018]5769-23) 和贵州师范大学博士科研项目 (GZNU[2017]7 号) 资助 Supported by the Project of National Natural Science Foundation of China (Nos.41867001, 41261058), and The Special Project of Training and Innovative Exploration of New Academic Seedlings in Guizhou Normal University (Talents of Guizhou Science and Technology Cooperation platform) (No. [2018]5769-23), and Doctoral Research Project of Guizhou Normal University (No. GZNU[2017]7)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lu\_xiaohui@126.com

作者简介: 徐祖亮 (1995-), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事土壤与景观生态研究。E-mail: 840787426@qq.com

收稿日期: 2023-05-04; 收到修改稿日期: 2023-08-28; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-03-08

measuring the content of various forms of iron oxides in diagnostic surface and subsurface horizons, calculating their weathering indexes, and analyzing the characteristics and differentiation of soil iron oxides. Additionally, the study explored the impacts of soil-forming environments and soil attributes on the characteristic differentiation of iron oxides. 【Result】 The results revealed an increasing trend in the content of total iron and free iron from diagnostic surface to subsurface horizons, with average increments of 25.54% and 39.63%, respectively. Iron oxides exhibited enrichment in diagnostic subsurface horizons. The activation degree of iron in the diagnostic surface layer surpassed that in subsurface horizons, while free iron and the iron crystal gel rate showed an opposite trend. Most tested diagnostic tables' subsoil had over  $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  of free iron, over 50% iron dissociation degree, and less than 30% iron activation degree, indicating that the soil was in the aluminization stage during the middle phase of desilication. Factors such as parent rock, land use, watershed position, organic matter, pH, clay CEC<sub>7</sub>, and texture types significantly influenced the iron oxide content and weathering index of various soil forms. Geographical detector analysis highlighted the significant explanatory power of parent rock and organic matter on iron oxide index differences (excluding free iron degree), with the highest Q value observed in their interaction (total iron 41.9%, free iron 39.8%, amorphous iron 40.1%, iron activity 41%, iron crystal gel ratio 52.5%). 【Conclusion】 Apparently, parent rock and organic matter are the primary factors influencing the differentiation of soil iron oxide characteristics in subtropical karst watersheds.

**Key words:** Iron oxide; Influential factors; Subtropical karst watershed; Guizhou Province

土壤氧化铁是成土母质经历漫长的风化作用后形成的产物,并以游离态、非晶质态、晶质态及有机质络合态等赋存于土壤中<sup>[1-3]</sup>,因其地球化学敏感性强<sup>[4]</sup>,常作为成土过程和成土环境的重要指示物<sup>[5-7]</sup>,被认为是土壤发生发育的函数<sup>[8]</sup>。

近年来,诸多学者在我国亚热带、温带地区对不同影响因素下的土壤氧化铁特征进行了研究。如受母质、海拔、土壤有机质的影响,重庆金佛山土壤中各氧化铁特征存在分异<sup>[9]</sup>;苏皖丘陵地区不同母质<sup>[10]</sup>及辽宁天柱山不同土地利用影响下<sup>[11]</sup>,土壤中游离铁、铁活化度和铁晶胶率出现明显分异;东北三江平原地区土地利用方式的变化改变了土壤中氧化铁的垂直分布<sup>[12]</sup>;武夷山、太白山随海拔的不断降低,水热组合逐渐变好,土壤的风化发育程度逐渐加深,土壤游离铁及铁游离度随之增加<sup>[1, 13]</sup>。土壤属性也对氧化铁的活化与老化产生影响,从而影响其化学活性<sup>[14-15]</sup>。土壤有机质能促进非晶质铁的生成,从而增加土壤中氧化铁的活化度<sup>[16]</sup>;我国南方地区水热条件组合好,风化淋溶作用强,在酸性及近中性土壤中易形成结晶较好的氧化铁<sup>[17]</sup>。

流域作为探究元素循环与物质迁移的基本单元,一直是研究者关注的重要研究尺度<sup>[18]</sup>。喀斯特流域是可溶岩双重含水介质由特殊的流域边界(地表、地下双重分水岭)、独特的地貌—水系结构及水文动态过程耦合的地域综合体<sup>[19]</sup>。贵州省是世界上分布碳酸盐岩面积最集中的区域之一,境内喀斯特

流域纵横,对这类特殊地质综合体上发育的土壤属性<sup>[20-22]</sup>、分类<sup>[23-24]</sup>及开发利用<sup>[25-26]</sup>一直是人们关注的焦点,但系统地认识喀斯特流域土壤氧化铁特征及分异影响因素的研究尚鲜见报道。鉴于此,本文分析贵州省普定县后寨河流域土壤氧化铁特征及其分异规律,探讨不同成土环境及土壤属性等单因子及交互作用对土壤氧化铁特征分异的影响,以期为更深入地认识喀斯特地区土壤的发生发育及类型演化等提供参考性理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

后寨河流域位于贵州省安顺市普定县境内,地理位置为 $26^{\circ}12'01''$ — $26^{\circ}18'52''\text{N}$ , $105^{\circ}35'58''$ — $105^{\circ}48'13''\text{E}$ ,面积约  $75 \text{ km}^2$ ,属于亚热带季风湿润气候区,年平均气温在  $15^{\circ}\text{C}$  左右,降水量为  $1\,200 \text{ mm}$ <sup>[27-28]</sup>。

流域内分布有三叠系石灰岩、白云岩、泥灰岩等碳酸盐岩以及第四纪红色黏土等(图 1b)。境内喀斯特地貌类型多样,流域上游海拔为  $1\,330 \sim 1\,571 \text{ m}$ ,地上发育有峰林洼地、老峰林漏斗洼地、峰丛谷地;中游海拔  $1\,290 \sim 1\,330 \text{ m}$ ,地貌包括峰林漏斗洼地、峰林盆地和峰林洼地;下游海拔  $1\,245 \sim 1\,290 \text{ m}$ ,地貌类型包括峰林红土地、复活型峰林盆地和峰林盆地。整个流域具备典型的喀斯特地上地下二元水文结构(图 1c),是我国南方典

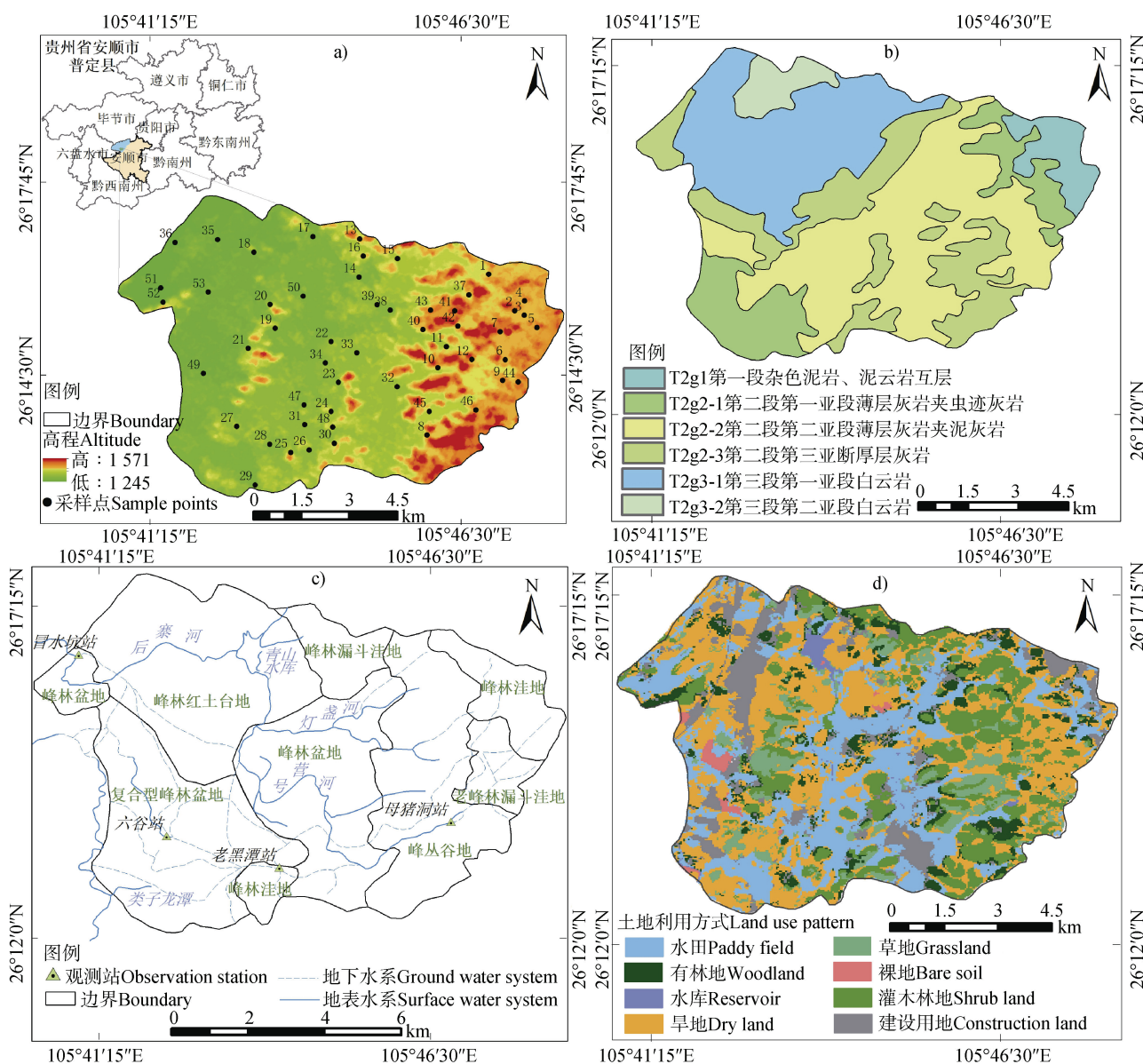


图1 研究区位置 (a) 和环境因子 (b. 成土母岩; c. 水文、地貌; d. 土地利用)

Fig. 1 The location of the study area (a) and environmental factors (b. Parent rock, c. Hydrology and geomorphology, d. Land use)

型的喀斯特流域。土地利用方式主要为水田、旱地、灌木林地、草地等 8 种类型 (图 1d)。采样点分布、土壤剖面基本信息见图 1a、表 1。

## 1.2 样品采集

结合后寨河流域地形地貌、成土母岩及土地利用, 共采集了 53 个典型剖面不同发生层的土壤样品, 土壤野外成土因素调查、剖面层次划分、形态观察记录及样品采集等均按《野外土壤描述与采样手册》<sup>[29]</sup>进行。在地形较平坦的地方挖掘剖面 (若未受人类活动影响的剖面, 修整出新鲜剖面即可), 探坑尺度为 1.2 m (剖面宽) × (1.2~2) m (剖面深),

如遇土层浅薄则挖至石质接触面, 露出岩石 10 cm 即可), 按照“自下而上”的顺序进行分层采样装袋, 并进行土壤标本盒样品采集。采集的土样经风干、去杂、研磨后装袋备用, 用于土壤理化性质及氧化铁等指标的测定。根据中国土壤系统分类诊断要求, 共检索出新成土、雏形土、均腐土、淋溶土、富铁土和人为土 6 个土纲以及湿润正常新成土、钙质湿润雏形土、黑色湿润均腐土、筒育湿润均腐土、钙质湿润淋溶土、铁质湿润淋溶土、富铝湿润富铁土、强育湿润富铁土、筒育水耕人为土和铁聚水耕人为土 10 个土类。

表 1 供试土壤剖面基本信息

Table 1 Information of tested soil profiles

剖面号 Profile	采样点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	土地利用 Land use	母岩 Parent rocks
1	赵家田村	105.783 0°E	26.268 3°N	1 334	旱地	泥灰岩
2	姜角山	105.790 3°E	26.258 1°N	1 373	灌木林地	泥灰岩
3	姜角山	105.792 9°E	26.256 8°N	1 334	水田	泥灰岩
4	孙家寨	105.793 1°E	26.260 8°N	1 364	草地	泥灰岩
5	团山小寨	105.796 5°E	26.253 4°N	1 410	旱地	泥灰岩
6	倒马坎	105.787 6°E	26.244 4°N	1 322	旱地	石灰岩
7	田坝村	105.786 1°E	26.252 2°N	1 389	灌木林地	石灰岩
8	草塘	105.765 6°E	26.223 1°N	1 339	灌木林地	石灰岩
9	烟关	105.786 9°E	26.238 5°N	1 353	草地	石灰岩
10	长冲	105.768 6°E	26.242 1°N	1 353	灌木林地	石灰岩
11	山王庙	105.771 1°E	26.248 0°N	1 298	旱地	石灰岩
12	山王庙	105.778 2°E	26.244 4°N	1 410	草地	石灰岩
13	生命公园	105.746 7°E	26.278 3°N	1 319	灌木林地	白云岩
14	陈旗堡村	105.746 5°E	26.267 6°N	1 244	水田	石灰岩
15	陈旗堡村	105.757 3°E	26.272 8°N	1 302	灌木林地	石灰岩
16	水浸坡	105.747 7°E	26.273 4°N	1 296	旱地	第四纪红色黏土
17	五岔口	105.733 5°E	26.278 9°N	1 233	水田	石灰岩
18	青山村	105.716 9°E	26.274 6°N	1 246	灌木林地	石灰岩
19	平山	105.722 9°E	26.253 2°N	1 281	草地	白云岩
20	大窝二中	105.721 5°E	26.259 8°N	1 259	草地	白云岩
21	大窝冲	105.715 4°E	26.247 5°N	1 250	草地	白云岩
22	贾官村	105.738 7°E	26.249 4°N	1 255	灌木林地	石灰岩
23	号云村	105.740 7°E	26.238 0°N	1 269	旱地	石灰岩
24	荷包村	105.738 7°E	26.229 7°N	1 270	灌木林地	石灰岩
25	大兴寨村	105.727 2°E	26.218 3°N	1 292	灌木林地	石灰岩
26	陇脚	105.732 4°E	26.219 0°N	1 285	水田	石灰岩
27	六谷村	105.712 1°E	26.225 5°N	1 278	灌木林地	石灰岩
28	大兴寨村	105.721 4°E	26.220 6°N	1 250	旱地	石灰岩
29	田官村	105.717 3°E	26.209 1°N	1 255	旱地	石灰岩
30	陇脚	105.739 6°E	26.220 8°N	1 285	草地	石灰岩
31	大兴寨村	105.731 2°E	26.226 1°N	1 252	水田	石灰岩
32	中坝村	105.757 2°E	26.236 8°N	1 270	水田	石灰岩
33	羊角冲	105.745 8°E	26.246 3°N	1 264	水田	石灰岩
34	贾官村	105.737 1°E	26.243 4°N	1 268	旱地	第四纪红色黏土
35	小独坡	105.706 7°E	26.278 1°N	1 237	灌木林地	白云岩
36	小独坡	105.694 8°E	26.277 3°N	1 200	水田	白云岩

续表

剖面号	采样点	经度	纬度	海拔	土地利用	母岩
Profile	Location	Longitude	Latitude	Altitude/m	Land use	Parent rocks
37	陈旗村	105.777 4°E	26.262 6°N	1 351	草地	泥灰岩
38	田坎寨	105.755 2°E	26.258 3°N	1 296	草地	石灰岩
39	田坝寨	105.751 6°E	26.259 8°N	1 289	水田	石灰岩
40	高子塔	105.764 5°E	26.252 8°N	1 403	灌木林地	石灰岩
41	高子塔	105.773 4°E	26.258 1°N	1 395	灌木林地	石灰岩
42	高子塔	105.774 2°E	26.253 8°N	1 405	旱地	石灰岩
43	陈旗村	105.766 6°E	26.258 3°N	1 315	灌木林地	泥灰岩
44	烟关	105.791 3°E	26.238 1°N	1 357	旱地	石灰岩
45	草塘	105.766 2°E	26.229 7°N	1 311	水田	石灰岩
46	草塘	105.779 4°E	26.230 2°N	1 341	草地	泥灰岩
47	马官	105.731 1°E	26.231 6°N	1 286	旱地	第四纪红色黏土
48	马官	105.739 1°E	26.225 4°N	1 302	草地	石灰岩
49	马官	105.702 7°E	26.240 5°N	1 252	旱地	第四纪红色黏土
50	青山村	105.730 8°E	26.262 2°N	1 267	灌木林地	第四纪红色黏土
51	洞口	105.690 7°E	26.264 5°N	1 248	灌木林地	石灰岩
52	洞口	105.691 4°E	26.260 5°N	1 230	水田	石灰岩
53	洞口	105.704 0°E	26.263 4°N	1 242	草地	白云岩

1.3 测定方法及土壤属性分级

土壤理化性质及氧化铁等指标均采用标准方法测定<sup>[30]</sup>。pH，电位法（水土比为 2.5 : 1），划分为酸性（4.5~5.5）、微酸（5.5~6.5）、中性（6.5~7.5）和碱性（≥7.5）四个等级<sup>[31]</sup>；有机质（SOM），德国 vario MACRO cube 常量元素分析仪测定，划分为极低（<6 g·kg<sup>-1</sup>）、低（6~10 g·kg<sup>-1</sup>）、中（10~20 g·kg<sup>-1</sup>）、中上（20~30 g·kg<sup>-1</sup>）、高（30~40 g·kg<sup>-1</sup>）和极高（>40 g·kg<sup>-1</sup>）6 级水平<sup>[31]</sup>；颗粒组成，比重计法，分为壤土、黏壤土、黏土<sup>[30]</sup>；乙酸铵-EDTA 交换法测定土壤 CEC<sub>7</sub> 后，再依据公式计算出黏粒的阳离子交换量（CEC<sub>7 黏粒</sub>），其按照中国土壤系统分类诊断条件要求分为低（<16 cmol·kg<sup>-1</sup>）、中（16~24 cmol·kg<sup>-1</sup>）、高（>24 cmol·kg<sup>-1</sup>）三类<sup>[32]</sup>。全铁（Fet）、游离铁（Fed）和非晶质铁（Feo）采用邻菲罗啉比色法测定。

土壤氧化铁风化度指标计算<sup>[8]</sup>：

铁游离度= Fed/Fet×100%，铁活化度= Feo/Fed×100%，铁晶胶率=（Fed-Feo）/Feo。（1）

式中，Fed 为游离铁，Fet 为全铁，Feo 为非晶质铁。

1.4 数据统计与分析

相关数据的统计整理于 Microsoft Excel 2019 中完成。运用 IBM Statistics SPSS 进行数据的正态性检验，整体数据经自然对数转换后呈正态分布，符合统计分析要求，而后进行描述性统计和单因素方差分析；利用地理探测器中因子探测和交互作用探测对土壤氧化铁特征影响因子的解释力进行排序。运用 ArcMap 进行研究区位置和环境因子图件绘制；使用 Origin 进行方差制图。

2 结 果

2.1 土壤中不同形态氧化铁含量及风化度指标

诊断表层是指单个土体最上部的诊断层，包括 A 层和 AB 层。诊断表下层是由物质淋溶、迁移、淀积或就地富集作用，在土壤表层之下具有诊断意义的土层，包括发生层中的 B 层和 E 层<sup>[32]</sup>。供试土壤检索出诊断表层有暗沃表层 24 个、暗瘠表层 7 个、淡薄表层 11 个及水耕表层 11 个；诊断表下层有维

形层 12 个、黏化层 14 个、水耕氧化还原层 11 个及低活性富铁层 6 个。由表 2 可知，不同土层氧化铁含量及风化度指标存在较大差异。诊断表层土壤的 Fet 介于 16.23~102.48 g·kg<sup>-1</sup>，均值为 66.49 g·kg<sup>-1</sup>；Fed 介于 10.5~59.28 g·kg<sup>-1</sup>，均值为 30.1 g·kg<sup>-1</sup>；铁游离度介于 20.9%~74.42%，均值为 46.99%；Feo 介于 1.64~10.08 g·kg<sup>-1</sup>，均值仅为 6.65 g·kg<sup>-1</sup>；铁活化度介于 8.09%~62.74%，均值为 24.42%；铁晶胶率介于 0.59~11.34，均值为 3.96。诊断表下层土壤中，Fet 介于 38.06~123.15 g·kg<sup>-1</sup>，均值为 83.47 g·kg<sup>-1</sup>；Fed 介于 26.19~67.68 g·kg<sup>-1</sup>，均值为 42.03 g·kg<sup>-1</sup>；铁游离度介于 28.43%~69.14%，均值为 50.96%；Feo 介于 2.97~14.01，均值仅为 6.69 g·kg<sup>-1</sup>；铁活化度介于 4.66%~32.81%，均值为 17.19%；铁晶胶率介于 2.04~20.43，均值为 6.37。其中 Fet、Fed 和 Feo 自诊断表层向诊断下层呈增加趋势，Fet 和 Fed 增加趋势明显，增幅分别为 25.54%和 39.63%；诊断表层土壤的铁活化度高于诊断下层，其余风化度指标与之相反。所有指标的变异系数均在 0.1~1 之间，属于中等变异。

表 2 不同形态氧化铁及风化度指标描述统计

Table 2 Descriptive statistical results of iron oxides and weathering indices of various forms

土层	氧化铁特性	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	S-W
Soil layer	Characteristics of iron oxide	Min.	Max.	Mean	Standard deviation	CV	( P )
诊断表层 ( A/AB )	全铁/( g·kg <sup>-1</sup> )	16.23	102.48	66.49	16.58	0.25	0.07
	游离铁/( g·kg <sup>-1</sup> )	10.5	59.28	30.1	9.08	0.3	0.41
	非晶质铁/( g·kg <sup>-1</sup> )	1.64	10.08	6.65	1.86	0.28	0.51
	铁游离度/%	20.9	74.42	46.99	12.79	0.27	0.49
	铁活化度/%	8.09	62.74	24.42	11.13	0.46	0.96
	铁晶胶率	0.59	11.34	3.96	2.27	0.57	0.58
诊断表下层 ( B/BC )	全铁/( g·kg <sup>-1</sup> )	38.06	123.15	83.47	20.01	0.24	0.35
	游离铁/( g·kg <sup>-1</sup> )	26.19	67.68	42.03	10.13	0.24	0.55
	非晶质铁/( g·kg <sup>-1</sup> )	2.97	14.01	6.69	2.62	0.39	0.3
	铁游离度/%	28.43	69.14	50.96	9.15	0.18	0.15
	铁活化度/%	4.66	32.81	17.19	7.89	0.46	0.13
	铁晶胶率	2.04	20.43	6.37	4	0.63	0.23

注：表中氧化铁单位为 g·kg<sup>-1</sup>。Note: The iron oxide units in the table are g·kg<sup>-1</sup>.

2.2 基于不同环境因子的土壤氧化铁特征分异

不同母岩发育土壤的氧化铁含量及其风化度指标存在显著差异 ( *P*<0.05 )，如图 2 所示。第四纪红色黏土发育土壤所有土层的 Fed 及铁晶胶率均显著高于碳酸盐岩发育的土壤；泥灰岩和石灰岩发育土壤诊断表层的 Feo 显著高于白云岩和第四纪红色黏土发育的土壤；石灰岩发育土壤诊断表下层的 Feo 及铁活化度显著高于白云岩和第四纪红色黏土发育的土壤。

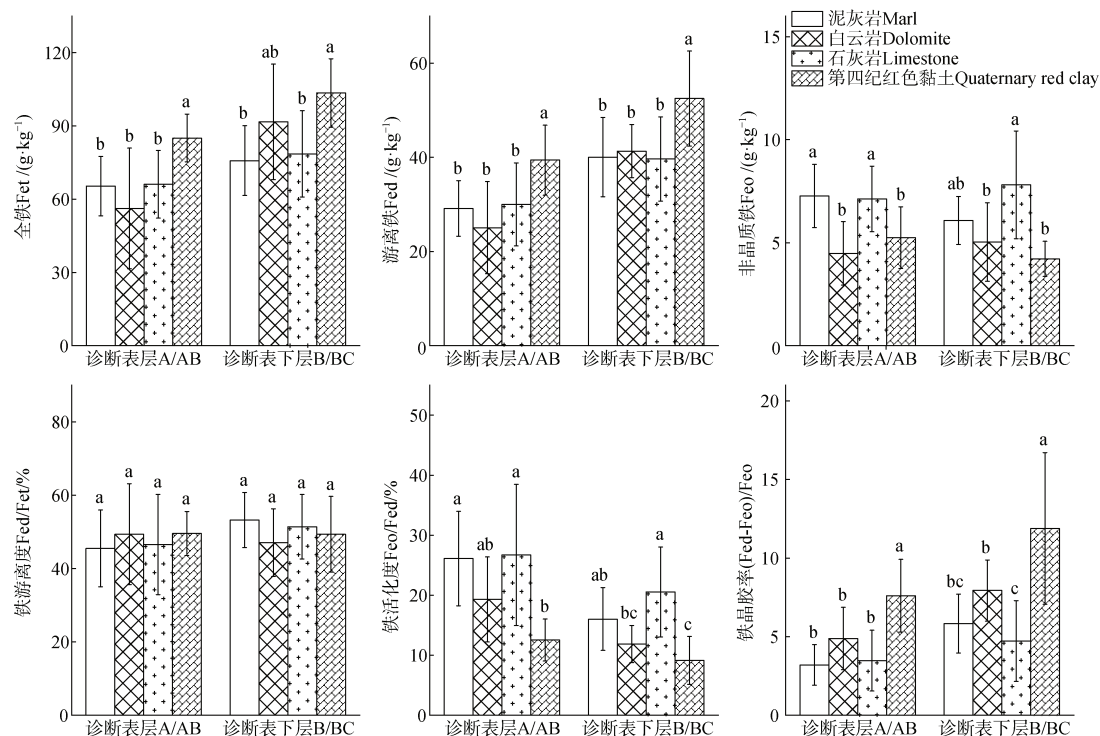
如图 3 所示，土地利用仅对部分土壤氧化铁特征产生显著影响 ( *P*<0.05 )。草地诊断表层土壤的铁游离度显著高于旱地；诊断表下层土壤中，水田的 Feo 显著高于旱地、灌木林地和草地；水田的铁活

化度显著高于旱地，铁晶胶率则旱地显著高于水田。

从图 4 可知，对于诊断表层土壤，流域上游土壤 Feo 显著高于下游土壤，铁晶胶率则与之相反 ( *P*<0.05 )。对于诊断表下层土壤，下游土壤 Fed 及铁晶胶率显著高于中游和上游土壤 ( *P*<0.05 )，下游土壤 Fet 显著高于上游土壤，而铁活化度则上游显著高于下游 ( *P*<0.05 )。

2.3 基于不同土壤属性的氧化铁特征分异

不同有机质水平下的土壤氧化铁含量及其风化度指标存在显著差异 ( *P*<0.05 ) ( 图 5 )。对诊断表层土壤而言，有机质中等水平 ( 10~20 g·kg<sup>-1</sup> ) 土壤的 Fed 及铁晶胶率显著高于其他水平的土壤，有



注：图中不同小写字母表示同一影响因子下不同子类型之间差异显著 ( $P < 0.05$ )，下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different subtypes under the same impact factor ( $P < 0.05$ ).

图2 不同母岩发育土壤的氧化铁特征

Fig. 2 Characteristics of iron oxides in soils derived from different parent rocks

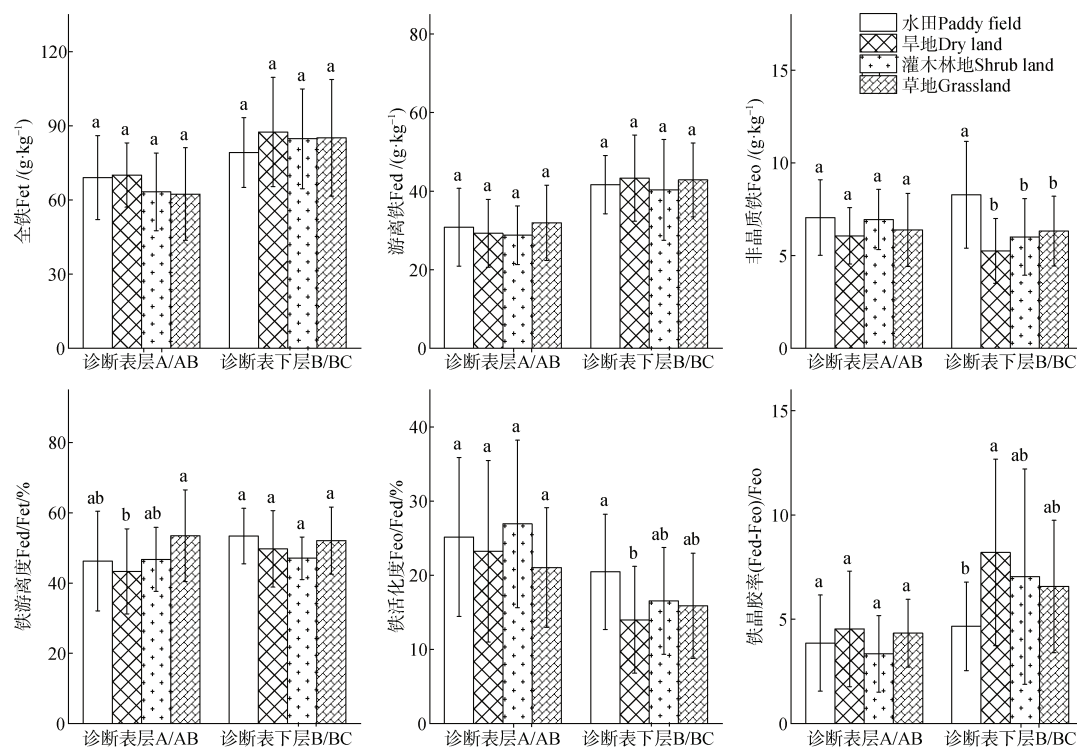


图3 不同土地利用下土壤氧化铁特征

Fig. 3 Characteristics of iron oxides in soils under different land use types



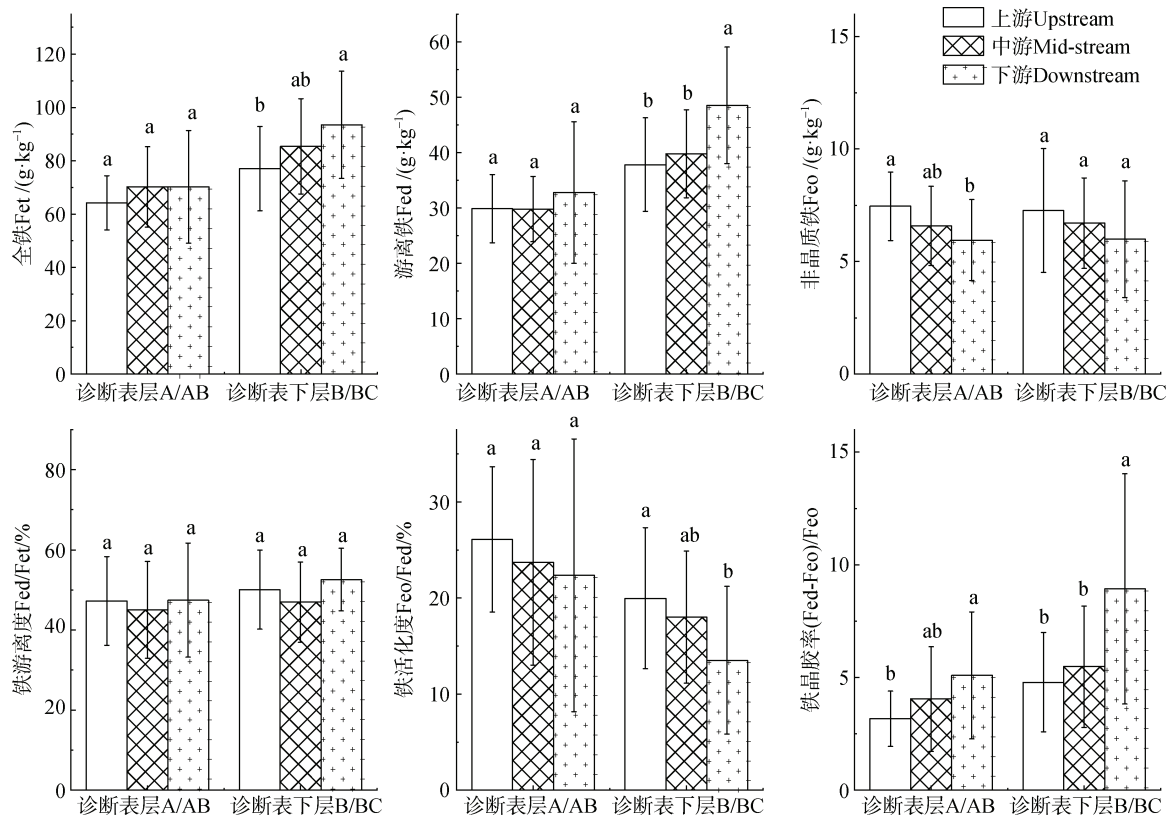


图4 不同流域部位土壤氧化铁特征

Fig. 4 Characteristics of iron oxides in soils at different watershed positions

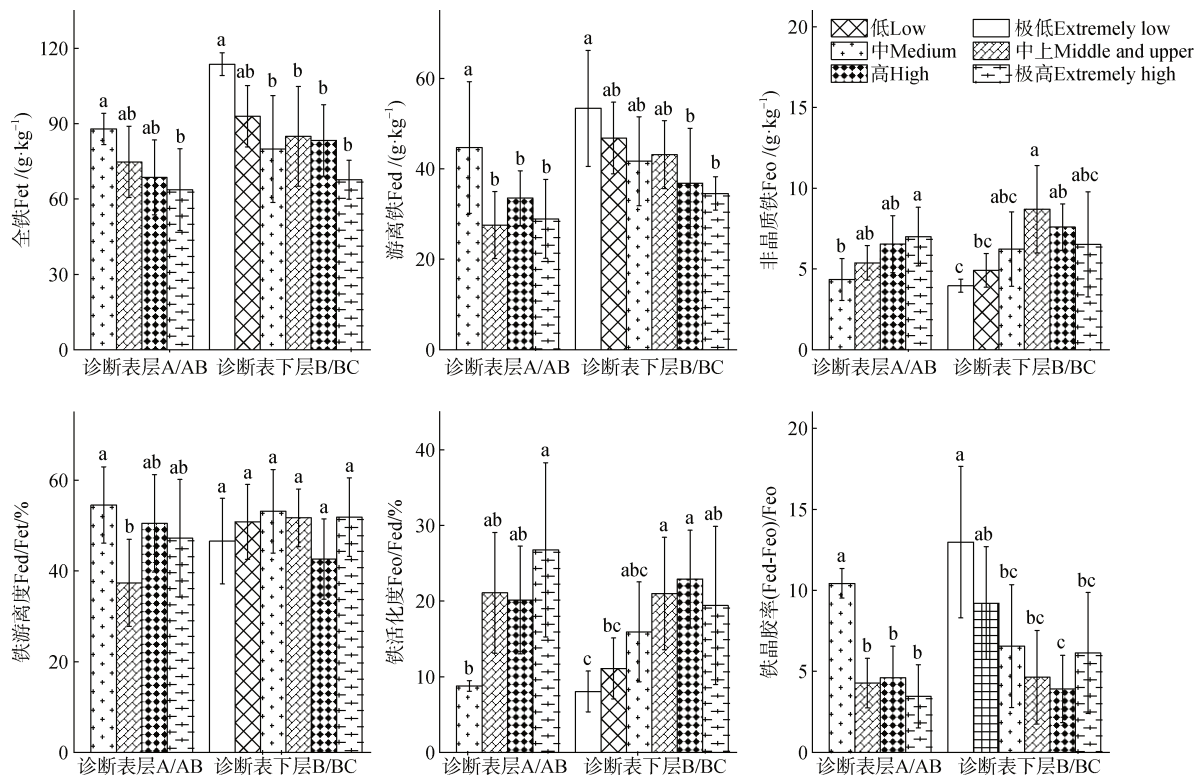


图5 不同水平有机质下土壤氧化铁特征

Fig. 5 Characteristics of iron oxides in soils under various levels of organic matter



机质中等水平土壤的  $\text{Fe}_0$  和铁活化度显著低于极高水平 ( $>40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的土壤。诊断表下层土壤中, 有机质极低水平 ( $<6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 土壤的  $\text{Fed}$  显著高于高水平 ( $30 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、极高水平的土壤,  $\text{Fet}$  及铁晶胶率显著高于其他水平 (除低水平外) 的土壤; 有机质中上 ( $20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、高水平土壤的  $\text{Fe}_0$  及铁活化度显著高于极低水平的土壤。

图 6 分析了因土壤酸碱程度差异, 土壤氧化铁特征出现了显著分异 ( $P < 0.05$ )。所有土壤诊断层中, 酸性土壤的  $\text{Fet}$ 、 $\text{Fed}$  及铁晶胶率显著高于中性和碱性土壤,  $\text{Fe}_0$  和铁活化度与上述情况相反。

流域内土壤  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  对土壤氧化铁特征的影响亦有明显差异 ( $P < 0.05$ ), 如图 7 所示。诊断表层土壤中, 低水平 ( $<16 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的  $\text{Fet}$  显著高于高水平 ( $>24 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$ , 铁活化度与之相反; 中等水平  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  ( $16 \sim 24 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的  $\text{Fed}$  显著高于其他水平  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的土壤, 而高水平  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的铁晶胶率及低水平的  $\text{Fe}_0$  显著低于其他水平  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的土壤。诊断表下层土壤中, 高水平

$\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的  $\text{Fet}$  显著低于其他水平  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的土壤, 而中等水平  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的  $\text{Fe}_0$  和低水平  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的铁晶胶率显著高于其他水平  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  的土壤。

如图 8 所示, 在不同土壤质地类别下, 土壤氧化铁含量及其风化度指标也存在明显差异 ( $P < 0.05$ )。黏壤土和黏土诊断表层的  $\text{Fet}$ 、 $\text{Fed}$  和  $\text{Fe}_0$  均显著高于壤土; 诊断表下层土壤中, 仅黏壤土的铁活化度明显高于黏土, 而壤土的铁晶胶率显著高于黏壤土。

## 2.4 土壤氧化铁特征分异的主控因子

地理探测器是用来探测物质的空间分异, 并揭示其背后驱动因子的一种统计学方法, 它主要用于分析各种现象的驱动力和影响因子以及多因子交互作用, 寻找因变量的解释变量是其主要用途之一<sup>[33]</sup>, 为探究不同因子对流域内土壤氧化铁特征差异的独立解释力及因子间交互作用, 运用地理探测器对母岩、流域部位、土地利用、有机质、pH、 $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  和质地类别进行因子探测和交互作用探测分析。影响因素对各氧化铁特征 (除铁游离度) 的影响程度不同 ( $P < 0.05$ )。其中主要影响  $\text{Fet}$  分异的因子及其

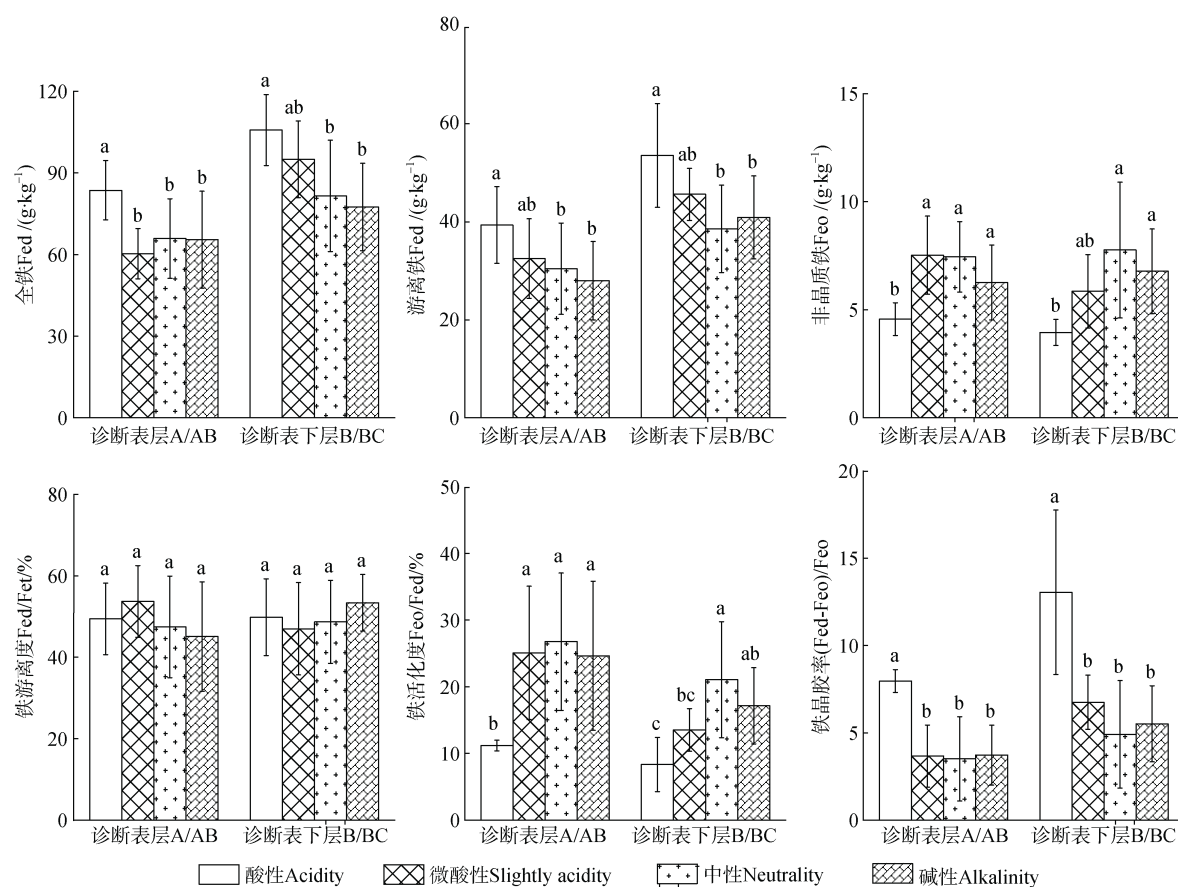


图 6 不同土壤 pH 下土壤氧化铁特征

Fig. 6 Characteristics of iron oxides in soils under different pH

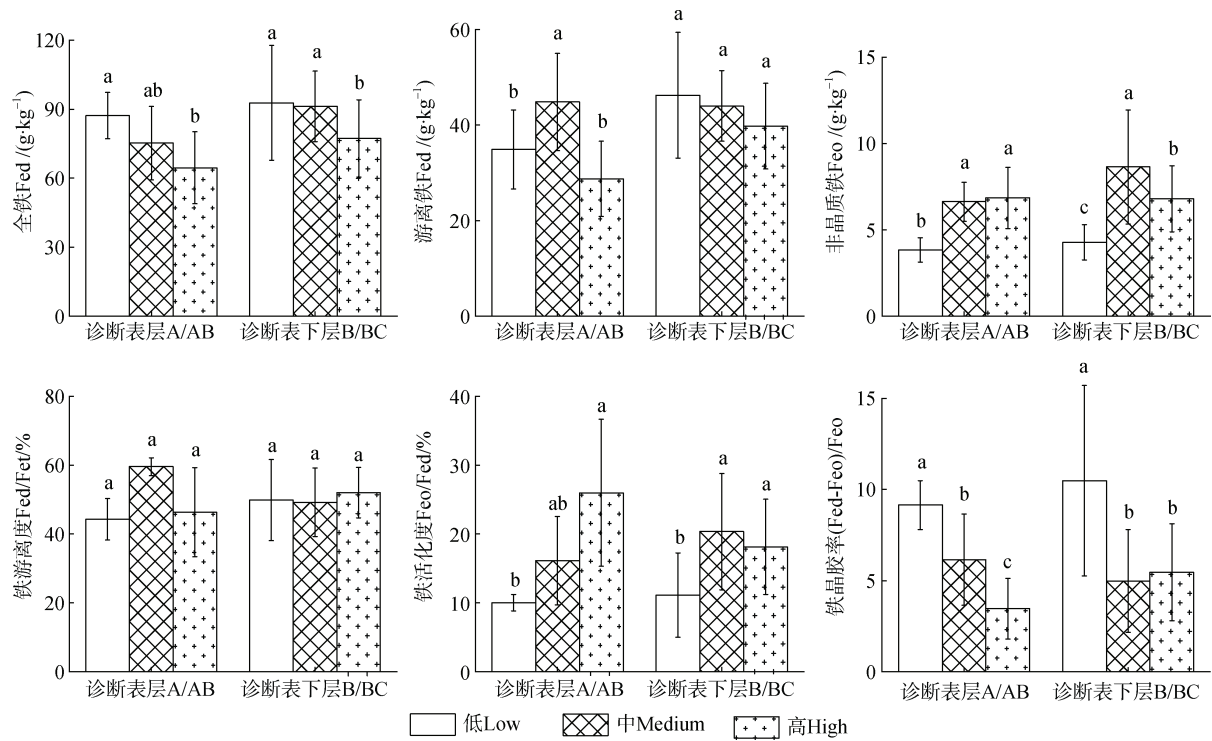
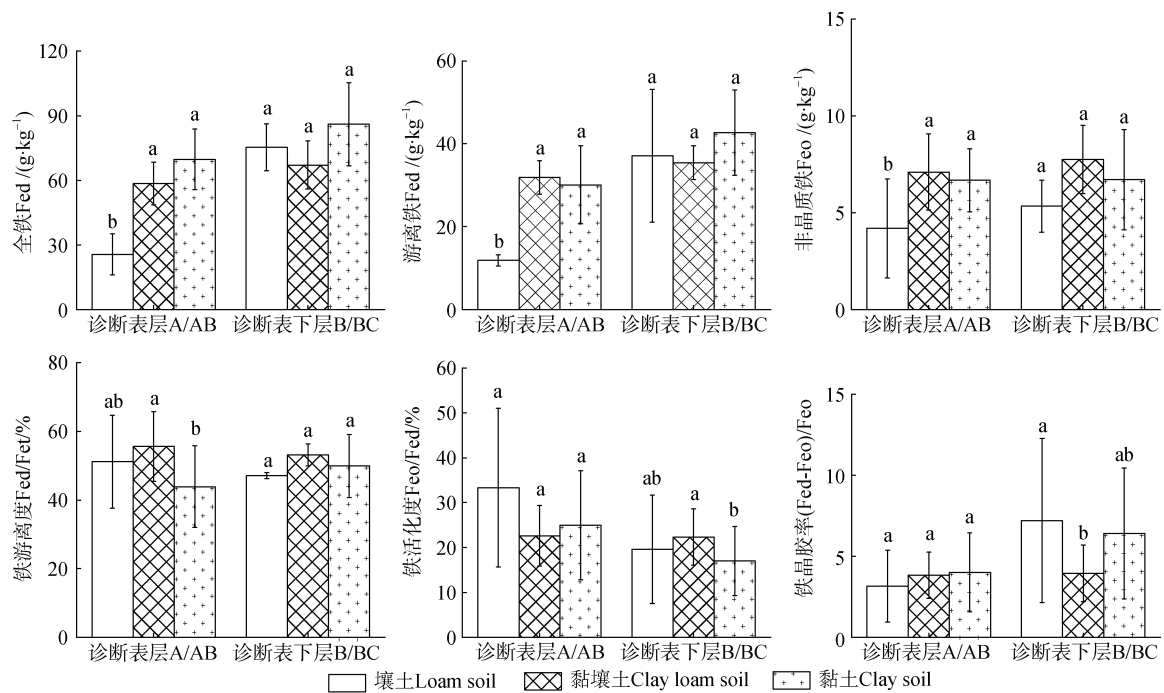
图 7 不同  $CEC_7$  黏粒 下土壤氧化铁特征Fig. 7 Characteristics of iron oxides in soils under different  $CEC_7$  clay grades

图 8 不同土壤质地类别下土壤氧化铁特征

Fig. 8 Characteristics of iron oxides in soils under different texture types

解释力  $q$  值大小排序为：有机质 (25.1%) > 质地 (18.9%) > 母岩 (15.7%) > pH (14.8%); 对 Fed 分异产生主要影响的因子仅为有机质 (25.1%) 和母岩 (14.1%); 7 个因子均能显著影响 Feo 的分异且解释

力  $q$  值大小排序依次为：母岩 (23.7%) > pH (16.8%) >  $CEC_7$  黏粒 (15.4%) > 有机质 (14.4%) > 质地 (10.9%) > 土地利用 (9.8%) > 流域部位 (5.7%); 对铁活化度分异产生显著影响的因子且解释力  $q$  值由大到小

排序为: 有机质 (24.4%) > 母岩 (18%) > pH (13.7%) > CEC<sub>7 黏粒</sub> (13.6%); 显著影响铁晶胶率分异的因子及其解释力  $q$  值大小排序依次为: 母岩 (29.4%) > 有机质 (29.3%) > pH (27.3%) > CEC<sub>7 黏粒</sub> (25.3%) > 流域部位 (11.3%)。

不同因子间主导交互作用类型存在差异, 解释力  $q$  值排首位的交互作用方式中, Fet 为母岩 $\cap$ 有机质 (41.9%), Fed 为母岩 $\cap$ 有机质 (39.8%), Feo 为母岩 $\cap$ 有机质 (40.1%), 铁活化度为母岩 $\cap$ 有机质 (41%), 铁晶胶率为母岩 $\cap$ 有机质 (52.5%)。与单因子相比, 各土壤氧化铁特征的影响因子在交互作用下的解释力均明显高于单因子的解释力, 表明因子间的交互作用对土壤氧化铁特征分异的解释力更强。其中, 母岩与有机质两因子交互作用对除铁游离度外的其他氧化铁特征指标变异的解释力排首位, 解释力均高于 39%。

### 3 讨 论

#### 3.1 喀斯特流域土壤氧化铁特征与土壤发育

土壤 Fed 含量及铁游离度高低可以反映土壤成土过程的特点<sup>[9, 34]</sup>。已有研究表明, 土壤中 Fed 的含量与土壤发育程度有关, 即土壤发育程度越高, 土壤中 Fed 越多, Feo 越少<sup>[35-36]</sup>。铁游离度可以阐明土壤中富铁作用强弱, 即游离度越高, 土壤富铁作用越显著<sup>[37]</sup>。铁活化度同样可作为表征土壤发育的可靠指标<sup>[38]</sup>。据统计, 贵州非喀斯特流域土壤的 Fed 介于 5.3~71.5 g·kg<sup>-1</sup>, 均值为 26.22 g·kg<sup>-1</sup>; 铁游离度介于 15.4%~70%, 均值为 32.33%; 铁活化度介于 3.67%~51.23%, 均值为 26.01%<sup>[37-39]</sup>。而本研究中 Fed 介于 13.24~67.69 g·kg<sup>-1</sup>, 均值为 34.38 g·kg<sup>-1</sup>; 铁游离度介于 21%~78%, 均值为 48.04%; 铁活化度介于 4.67%~54.74%, 均值为 21.71%。由此可知, 喀斯特流域土壤的 Fed、铁游离度不低于非喀斯特流域, 而铁活化度低于非喀斯特流域, 反映出喀斯特流域内土壤的发育程度不低于非喀斯特流域土壤, 且喀斯特土壤中氧化铁的富铁过程较强。与非喀斯特流域相比, 喀斯特流域土壤在形成发育过程中, 虽然存在生物富钙、有机质的钙凝作用及含钙的岩溶水不断补充土体中淋失的盐基<sup>[8]</sup>, 土体中富含盐基离子, 但这并未明显阻碍风化的进行, 在亚热带季风气候作用下土壤中累积

了一定水平的氧化铁。

自诊断表层向诊断下表层 Fet 和 Fed 增加趋势明显, 且两者在剖面间的分布存在诊断表下层高于诊断表层的特征。经统计分析发现, 大部分土壤剖面的黏粒有从诊断表土层向诊断表下层移动淀积的规律 (82%的供试剖面诊断表下层与诊断表层黏粒比>1), 而土壤中的氧化铁具有较强的化学活性, 主要赋存于黏粒中, 且 Fed 有随黏粒移动的迹象<sup>[40-41]</sup>, 因此这可能是造成流域内诊断表下层氧化铁特征高于诊断表层的原因之一。供试诊断表下层土壤中, 有 16.28%的土壤样品中 Fed 含量介于 20~30 g·kg<sup>-1</sup>, 23.26%的铁游离度小于 50%, 6.98%的铁活化度介于 30%~50%; 83.72%的土壤样品中 Fed 含量在 30 g·kg<sup>-1</sup> 以上, 76.74%的铁游离度大于 50%, 93.02%的铁活化度小于 30%; 且黏粒硅铝率介于 1.5~2.2<sup>[42]</sup>的供试土壤剖面达 75%。此外, 有 18.87%的供试土壤剖面土层浅薄, 无 B 层发育, 土壤发育程度较差。基于上述不同氧化铁特征并结合土壤风化发育阶段指标<sup>[35]</sup>和成土过程分析可知: 流域内大部分土壤处于中期脱硅富铝化阶段, 土壤风化程度较高。

#### 3.2 成土环境及土壤属性对土壤氧化铁特征分异的影响

母岩是土壤形成的物质基础, 而土壤氧化铁是成土母岩风化成土过程中遗留的产物<sup>[13]</sup>。因此母岩对土壤氧化铁特征产生了直接的影响。根据母岩性状可将本研究中的母岩分为碳酸盐岩类 (泥灰岩、白云岩和石灰岩) 和碳酸盐岩红色风化壳 (第四纪红色黏土) 两大类。方差分析表明, 无论是诊断表层还是诊断表下层土壤中, 碳酸盐岩红色风化壳发育土壤的 Fet、Fed、晶胶率均高于碳酸盐岩类母岩发育的土壤。这是因为在湿润的亚热带地区, 碳酸盐岩红色风化壳在风化成土过程中, 盐基不断淋失, 酸根离子不断累积, 形成的土壤常呈酸性或强酸性, 土壤处于偏酸性的环境中, 基岩中的矿物快速溶蚀分解, Fe、Al 等水合化氧化物相对积聚<sup>[43]</sup>。虽然碳酸盐岩类母岩在风化成土过程中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 也有明显富集<sup>[44]</sup>, 但在喀斯特地区, 碳酸盐岩类母岩风化后形成的酸不溶解物质较少, 形成的土粒数量较少, 土壤常为中性或碱性, 加之亚热带季风气候, 降水丰富, 径流的侵蚀作用使碳酸盐岩形成的土壤较浅薄<sup>[37]</sup>, 因此碳酸盐岩发育土壤的 Fet、Fed 较碳酸盐岩红色风化壳形成的土壤低。由

于石灰岩的可溶性, 易受流水的溶解和侵蚀作用, 这利于石灰岩发育土壤中元素的迁移; 白云岩因其节理发育, 易发生物理崩解<sup>[37]</sup>, 土壤易被外力作用侵蚀搬运带走, 致使土层浅薄; 碳酸盐岩红色风化壳是对基岩的继承和演化, 是基岩残积风化的结果<sup>[45]</sup>, 因此石灰岩发育土壤诊断表下层的 Feo 及铁活化度显著高于白云岩和第四纪红色黏土发育的土壤。单因子探测也表明, 母岩对 Feo 和铁晶胶率的解释力最大, 分别为 23.7% 和 29.4%。

土壤有机质 (SOM) 能被 Feo 强烈吸附, 阻碍铁晶核生长而妨碍晶质态氧化铁形成, 且氧化铁与富里酸能够形成络合物, 影响结晶产物的性质和结晶速率<sup>[16]</sup>, 使土壤中 Feo 含量增加, 晶质态氧化铁含量减少, 从而影响氧化铁的活化度与晶胶率。本研究中, 在不同 SOM 水平下, 土壤氧化铁含量及其风化度指标存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。经相关分析发现 (图 9), 土壤铁活化度与 SOM 呈极显著性正相关 ( $r = 0.505^{**}$ ,  $P < 0.01$ ), 铁晶胶率与 SOM 呈极显著性负相关 ( $r = -0.469^{**}$ ,  $P < 0.01$ )。可见, SOM 通过抑制氧化铁的结晶或阻碍晶核的形成而影响着氧化铁的活化与老化。流域内碳酸盐岩发育土壤的 SOM 积累明显 (SOM 多为极高水平, 均值为  $40.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 有利于氧化铁的活化; 而碳酸盐岩红色风化壳发育土壤的 SOM 多为低, 中水平, 均值为  $20.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有利于氧化铁的老化, 故碳酸盐岩发育土壤铁晶胶率显著低于碳酸盐岩红色风化壳发育的土壤, 而 Feo 含量及铁活化度则相反。单因子探测也表明, SOM 对铁活化度的解释力最大 (24.4%), 对铁晶胶率的解释力为 29.3%, 仅次于母岩 (29.4%)。

pH 虽不能直接影响土壤氧化铁的含量, 但在强还原性酸性土壤环境中, 有利于土壤中不溶性  $\text{Fe}^{3+}$  向可溶性  $\text{Fe}^{2+}$  转换, 可溶性  $\text{Fe}^{2+}$  再经水解、氧化、沉淀形成晶质态氧化铁 (Fec)<sup>[16, 46]</sup>, 使 Fec 在 Fed 中占主导, 而 Feo 较低, 因此在酸性土壤中氧化铁的活化度较低, 晶胶率较高。在本研究各氧化铁特征中, pH 与 SOM 或成土母岩交互作用的  $q$  值均较大, 说明土壤酸碱度差异也对流域内氧化铁特征分异产生了一定影响。海拔在土壤形成过程中虽不提供新的物质, 但它却能引起地表物质和能量的再分配<sup>[47]</sup>, 从而间接对氧化铁特征产生影响。方差分析发现, 流域不同部位 (上下游) 土壤中氧化铁特征存在差异。相同气候条件下, 流域上游海拔较高,

水热条件组合较下游差, 土壤风化发育程度较弱, 使土壤中 Fed 及铁晶胶率较低, 铁活化度较高。土地利用方式的不同, 会使土壤中氧化铁特征产生分异<sup>[48-49]</sup>。本研究中土地利用引起显著差异的氧化铁特征主要体现在水田与旱地的铁活化度与铁晶胶率上, 即水田的铁活化度高于旱地, 铁晶胶率则旱地高于水田。这是因为水耕熟化是水田形成发育过程中主要的成土过程, 渍水条件使 Fec 含量减少而 Feo 含量增加<sup>[50]</sup>, 致使水田铁活化度较高, 铁晶胶率较低。土壤  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  与 SOM 和 pH 均呈现显著性正相关 ( $r_{\text{SOM}} = 0.54^{**}$ ,  $r_{\text{pH}} = 0.423^{**}$ ,  $P < 0.01$ ), 由此可知, 土壤  $\text{CEC}_{7 \text{ 黏粒}}$  间接性地对土壤中氧化铁特征分异产生影响。土壤质地与黏粒含量存在一定关联, 黏土、黏壤土和壤土中黏粒含量依次减少, 而土壤氧化铁主要存在于黏粒部分, 其中 Fed 为母岩风化的产物, 因此其有随黏粒而移动的可能<sup>[13]</sup>, 且在 Fed 的地理探测器中质地类别与 SOM 及其与母岩的交互因子分别为 30.5% 和 23.4%, 说明质地类别也会对流域内土壤氧化铁特征分异产生一定的影响。

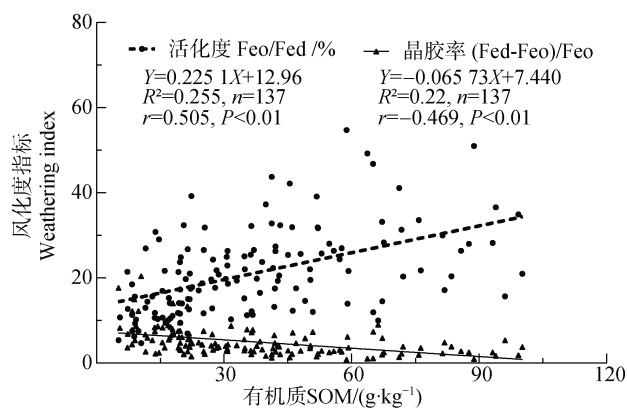


图 9 有机质与活化度、晶胶率的关系

Fig. 9 The relationship between organic matter and activation degree and crystal gel rate

土壤氧化铁的形成及其形态转化的原因是复杂的<sup>[35, 51]</sup>, 因此导致影响因子并非单独起作用, 而是多因子的协同作用。本研究中单因子探测结果显示, 除铁游离度外, 多个单因子均对各土壤氧化铁特征产生显著影响。而因子两两交互作用探测时所产生的解释力  $q$  值均大于单因子下的解释力  $q$  值, 说明两因子间的协同作用对土壤氧化铁的形成及形态转化的影响增强。其中母岩与 SOM 对各氧化铁特征 (除铁游离度) 分异的解释力较大, 并且二者交

相互作用下的  $q$  值最大,  $F_{et}$  为 41.9%、 $F_{ed}$  为 39.8%、 $F_{eo}$  为 40.1%、铁活化度为 41%、铁晶胶率为 52.5%, 因此可以认为母岩和有机质是引起后寨河流域土壤氧化铁特征分异的主控因子。

## 4 结 论

亚热带喀斯特流域土壤铁氧化物具有在诊断表下层富集的特征。较高的游离铁和铁游离度以及较低的铁活化度表明绝大部分土壤处于中期脱硅富铝化阶段。流域内不同成土条件及土壤属性对土壤氧化铁特征的分异有显著影响, 其中母岩和有机质是除铁游离度外各氧化铁特征产生分异的主控因子。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Lin L Q. The vertical distribution of iron oxide in Wuyi Mountain and its causes analysis[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010 ( 17 ): 70—71, 75. [林丽琴. 武夷山土壤氧化铁垂直分布及其成因分析[J]. *湖南农业科学*, 2010 ( 17 ): 70—71, 75.]
- [ 2 ] Mehmood A, Akhtar M S, Deng Y J, et al. Iron oxides minerals in soils derived from different parent materials[J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2015, 5 ( 2 ): 110—116.
- [ 3 ] Rezapour S, Azhah H, Momtaz H R, et al. Changes in forms and distribution pattern of soil iron oxides due to long-term cropping in the Northwest of Iran[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73 ( 11 ): 7275—7286.
- [ 4 ] Hesung Y. Soil colloid[M]. Beijing: Science Press, 1983. [熊毅. 土壤胶体[M]. 北京: 科学出版社, 1983.]
- [ 5 ] Jia C J. Characteristics of soil Fe-Mn nodules and their pedogenetic significance in south China [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018. [贾重建. 华南土壤铁锰结核性状及其发生学指示意义[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.]
- [ 6 ] Zhao H L, Gan S, Yuan X P, et al. Application of a fractional order differential to the hyperspectral inversion of soil iron oxide[J]. *Agriculture*, 2022, 12 ( 8 ): 1163.
- [ 7 ] Zhang M K, Hu G C. Study on the composition and characteristics of iron oxide minerals in limestone soil in western Zhejiang Province[J]. *Soils*, 2000, 32 ( 1 ): 38—42. [章明奎, 胡国成. 浙西石灰岩发育土壤中氧化铁矿物组成及特性的研究[J]. *土壤*, 2000, 32 ( 1 ): 38—42.]
- [ 8 ] Liu Y J, Lu X H, Luo D, et al. Characteristics of iron oxides and their relationship with soil types in the Karst mountainous areas of Guizhou[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52 ( 3 ): 505—514. [刘玉晶, 陆晓辉, 罗丹, 等. 贵州喀斯特山区典型土壤氧化铁特征及其与土壤类型分异关系[J]. *土壤通报*, 2021, 52 ( 3 ): 505—514.]
- [ 9 ] Zhang Z W, Zhu Z X, Fu W L, et al. Morphology of soil iron oxides and its correlation with soil-forming process and forming conditions in a Karst mountain[J]. *Environmental Science*, 2012, 33 ( 6 ): 2013—2020. [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.]
- [ 10 ] Liu Y Z, Ding R X, Huang R C. Forms and genetic characteristics of iron, aluminium and manganese oxides of yellow brown soils[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1990, 13 ( 2 ): 86—91. [刘友兆, 丁瑞兴, 黄瑞采. 黄棕壤中铁铝锰氧化物的形态及发生学特征[J]. *南京农业大学学报*, 1990, 13 ( 2 ): 86—91.]
- [ 11 ] Liu Y, Guan L Z, Zhang R J, et al. The existences and characters of iron oxides in brown soil of different land use systems[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21 ( 2 ): 181—183. [刘晔, 关连珠, 张瑞杰, 等. 不同利用方式下棕壤中氧化铁的存在形态和分异特征研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21 ( 2 ): 181—183.]
- [ 12 ] Chi G Y, Chen X, Shi Y, et al. Forms and profile distribution of soil Fe in the Sanjiang Plain of Northeast China as affected by land uses[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10 ( 4 ): 787—795.
- [ 13 ] Lei M, Chang Q R, Feng L X, et al. Soil characteristic and genetic feature of iron oxide of Taibai Mountains[J]. *Geographical Research*, 2001, 20 ( 1 ): 83—90. [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.]
- [ 14 ] Yang D W, Zhang M K, Zhang P Q, et al. Changes of soil clay minerals and iron oxides after paddy field converted into forest land in plain areas[J]. *Soils*, 2020, 52 ( 3 ): 567—574. [杨东伟, 章明奎, 张鹏启, 等. 平原区水田改林地后土壤黏土矿物及氧化铁的变化[J]. *土壤*, 2020, 52 ( 3 ): 567—574.]
- [ 15 ] Wang P, Wang J D, Zhang H, et al. The role of iron oxides in the preservation of soil organic matter under long-term fertilization[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19 ( 2 ): 588—598.
- [ 16 ] Cai M Z, Xing C H. Activation of iron oxide in soil and its environmental significance[J]. *Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences*, 2004, 27 ( 3 ): 279—282. [蔡妙珍, 邢承华. 土壤氧化铁的活化与环境意义[J]. *浙江师范大学学报 (自然科学版)*, 2004, 27 ( 3 ): 279—282.]
- [ 17 ] Wang X H, Yang Z J, Liu X F, et al. Effects of different forms of Fe and Al oxides on soil aggregate stability in mid-subtropical mountainous area of Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 ( 9 ): 2588—2596. [王



- 小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36 (9): 2588—2596.]
- [ 18 ] Zhang G L, Zhu A X, Shi Z, et al. Progress and future prospect of soil geography[J]. Progress in Geography, 2018, 37 (1): 57—65. [张甘霖, 朱阿兴, 史舟, 等. 土壤地理学的进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37 (1): 57—65.]
- [ 19 ] Yang M D. Hydrological and geomorphological system of Karst Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. [杨明德. 喀斯特流域水文地貌系统[M]. 北京: 地质出版社, 1998.]
- [ 20 ] Wang Z J, Liang X, Yuan D X. Distribution and leaching of dissolved carbon and nitrogen in different soil profiles in Karst Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (6): 83—87, 93. [汪智军, 梁轩, 袁道先. 岩溶流域不同土壤剖面溶解性碳氮分布和淋失特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24 (6): 83—87, 93.]
- [ 21 ] Xiong B L, Gao Y, Peng T, et al. Characteristics of vertical variation of soil aggregates stability and nutrients in shallow Karst fissures of Karst sloping fields[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (6): 1472—1485. [熊佰炼, 高扬, 彭韬, 等. 喀斯特坡地浅层岩溶裂隙土壤团聚体稳定性与养分垂直变化特征[J]. 土壤学报, 2021, 58 (6): 1472—1485.]
- [ 22 ] Wang J, Liu Z Q, Bao E Y, et al. Effects of forest and grass restoration on soil aggregates and its organic carbon in Karst rocky desertification areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33 (6): 249—256. [王进, 刘子琦, 鲍恩保, 等. 喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (6): 249—256.]
- [ 23 ] 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 & 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.]
- [ 24 ] Yang L, He T B, Shu Y G, et al. Study on the genesis characteristics and taxonomic classification of limestone soil under grassland ecosystem in Guizhou Karst Area[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30 (1): 93—99. [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.]
- [ 25 ] Hu X J, Chen B, Hu X H, et al. Study on the model of rational land use in the Karst areas of the Houzhai River Basin[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20 (4): 305—309. [胡绪江, 陈波, 胡兴华, 等. 后寨河喀斯特流域土地资源合理利用模式研究[J]. 中国岩溶, 2001, 20 (4): 305—309.]
- [ 26 ] Zhang C, Yuan D X. Hydrochemical variation of typical Karst subterranean stream basin and its relationship with landuse change—A case study of Houzhai subterranean stream basin, Puding County, Guizhou Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (5): 134—137, 183. [章程, 袁道先. 典型岩溶地下河流域水质变化与土地利用的关系——以贵州普定后寨地下河流域为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (5): 134—137, 183.]
- [ 27 ] Cao J H, Yuan D X, Pan G X. Some soil features in Karst ecosystem[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18 (1): 37—44. [曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18 (1): 37—44.]
- [ 28 ] Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35 (7): 934—937. [中国科学院地球化学研究所. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35 (7): 934—937.]
- [ 29 ] Zhang G L, Li D C. Manual of soil description and sampling[M]. Beijing: Science Press, 2022. [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, 2022.]
- [ 30 ] 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.]
- [ 31 ] Huang X L, Dai Q, Liang W H, et al. Analysis and evaluation of soil nutrient content in chestnut orchards in Northwest Guangxi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35 (12): 2827—2835. [黄晓露, 戴勤, 梁文汇, 等. 桂西北板栗园土壤养分含量分析及评价[J]. 西南农业学报, 2022, 35 (12): 2827—2835.]
- [ 32 ] Research Group of Soil Taxonomy, Nanjing Institute of soil Chinese Academy of Sciences, China Soil Taxonomy Project Research Cooperation Group. Chinese Soil Taxonomy [M]. 3rd. 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]. 第3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.]
- [ 33 ] Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116—134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72 (1): 116—134.]
- [ 34 ] Zhang X W, Kong L W, Cui X L, et al. Occurrence characteristics of free iron oxides in soil microstructure: Evidence from XRD, SEM and EDS[J]. Bulletin of



- Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(4): 1493—1503.
- [ 35 ] Wang L D, He Z J, Wang J. Iron oxides in soil of three parallel rivers area and its genealogical significance[J]. Journal of Southern Agriculture, 2009, 40(7): 864—868. [王立东, 何忠俊, 王晶. 三江并流区土壤氧化铁及其发生学意义研究[J]. 南方农业学报, 2009, 40(7): 864—868.]
- [ 36 ] Fayyadh M A, Ali D K H. Distribution of soil iron oxides along catena at two different locations, in Erbil Province, northern Iraq[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 454: 012123.
- [ 37 ] Soil Survey Office of Guizhou Province. Soils of Guizhou Province [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1994. [贵州省土壤普查办公室. 贵州省土壤[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994.]
- [ 38 ] Lair G J, Zehetner F, Hrachowitz M, et al. Dating of soil layers in a young floodplain using iron oxide crystallinity[J]. Quaternary Geochronology, 2009, 4(3): 260—266.
- [ 39 ] Soil Survey Office of Guizhou Province. Soil Species of Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1994: 1—112. [贵州省土壤普查办公室. 贵州土种志[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994.]
- [ 40 ] Zhang L, Zhang F R, Jin D S, et al. The correlation of soil color relative to clay and iron oxides in Alfisol of the Loess Plateau and its genetic explanation—A case study of the 31 Argillic horizons covered in the soil series survey of Shanxi Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 876—886. [张蕾, 张凤荣, 靳东升, 等. 黄土高原淋溶土黏粒、氧化铁与颜色的关系及发生学解释——以山西土系调查的 31 个黏化层为例[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 876—886.]
- [ 41 ] Azadi A, Baghernejad M, Gholami A, et al. Forms and distribution pattern of soil Fe (Iron) and Mn (Manganese) oxides due to long-term rice cultivation in fars Province Southern Iran[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(16): 1849—1911.
- [ 42 ] Zhao Q G, Wang Z Q, Liu Z L. Preliminary studies on genetic properties of the alltic soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1983, 20(4): 333—346, 453—454. [赵其国, 王振权, 刘兆礼. 我国富铝化土壤发生特性的初步研究[J]. 土壤学报, 1983, 20(4): 333—346, 453—454.]
- [ 43 ] Zhu H J, Chen J F, Chen S L. Pedogeography[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2010. [朱鹤健, 陈健飞, 陈松林. 土壤地理学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2010.]
- [ 44 ] Zhang L K, Ji H B, Liu X M, et al. Genetic mechanism and elemental evolution of weathering laterite crust overlying carbonate rocks in tropical areas[J]. Geology in China, 2021, 48(2): 651—660. [张连凯, 季宏兵, 刘秀明, 等. 热带地区碳酸盐岩上覆红色风化壳的成因机理及元素演化[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 651—660.]
- [ 45 ] Feng Z G, Wang S J, Sun C X, et al. Particle distribution of red weathering crust and its genetic implication—As exemplified by Pingba County of Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22(3): 243—248. [冯志刚, 王世杰, 孙承兴, 等. 岩溶地区缺失原岩残余结构红色风化壳的粒度分布特征及成因指示——以贵州平坝为例[J]. 矿物学报, 2002, 22(3): 243—248.]
- [ 46 ] Li F Y. Characteristics of iron oxide in loess profile and its indication of soil-forming environment[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. [李丰义. 黄土剖面中铁氧化物的特征及其成土环境的指示[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.]
- [ 47 ] Wu Z X, Zhou Y, Muhtar-AMAT, et al. Spatial variability of soil pH value and its influencing factors in the soil layer of northwestern Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(2): 488—498. [吴正祥, 周勇, 木合塔尔·艾买提, 等. 鄂西北山区耕层土壤 pH 值空间变异特征及其影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 488—498.]
- [ 48 ] Yuan D G, Zhang G L. Distribution characteristics of iron species in urban soils under different land use partens[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(11): 5046—5050. [袁大刚, 张甘霖. 不同土地利用方式下城市土壤铁形态的分布特征[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(11): 5046—5050.]
- [ 49 ] Xu J L, Zhu Z F, Huang C Q, et al. Interactions between organic matters and clay minerals in soils for different land uses in Jiangnan Plain, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2014, 34(1): 47—52. [徐晋玲, 朱志锋, 黄传琴, 等. 江汉平原不同利用方式下土壤有机质与粘粒矿物的交互作用[J]. 矿物学报, 2014, 34(1): 47—52.]
- [ 50 ] Su L, Lin X Y, Zhang Y S, et al. Effects of flooding on iron transformation and phosphorus adsorption-desorption properties in different layers of the paddy soils[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2001, 27(2): 124—128. [苏玲, 林咸永, 章永松, 等. 水稻土淹水过程中不同土层铁形态的变化及对磷吸附解吸特性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27(2): 124—128.]
- [ 51 ] Wang D L, Shu Y G, Wen X Q, et al. Distribution characteristics of silicon, iron and aluminum in lime soil profile in Karst mountainous areas: A case study of Qinglong County, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(5): 777—785. [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.]

(责任编辑: 檀满枝)