

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮑姆卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峰, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翔, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系

张治伟¹, 朱章雄^{1,2}, 傅瓦利¹, 文志林¹

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆科技学院, 重庆 400700)

摘要: 土壤氧化铁的数量和形态是成土过程和成土环境的反映. 以重庆金佛山为研究对象, 采用化学选择溶解法, 分析了岩溶山地土壤铁氧化物数量与形态, 并探讨了氧化铁数量、形态与成土环境、岩溶环境退化和石漠化发生发展的关系. 结果表明, 山顶区与坡腰区全铁含量差异大, 山顶土壤全铁 $51.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 坡腰区全铁含量 $86.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤全铁主要受母质影响. 山顶区气温低, 土壤发育程度弱, 黏粒游离铁含量低 ($29.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 黏粒部分铁的游离度小 (35.40%); 坡腰区气温高, 土壤风化程度较深, 黏粒游离铁含量高 ($43.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 黏粒铁的游离度高 (60.41%). 山顶区低温潮湿, 土壤有机质含量高, 铁的活化度和络合度高 (73.51% 和 17.21%), 显著高于坡腰区 (13.06% 和 0.41%). 在坡腰区, 灌丛马尾松退化或转化为旱地后, 土壤有机质含量下降, 黏粒流失, 游离铁有伴随黏粒迁移的趋势, 使土壤全铁和黏粒游离铁减少; 灌丛马尾松土壤全铁 $98.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 坡耕地 $84.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 灌丛马尾松黏粒游离铁 $50.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 坡耕地 $47.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤铁氧化物数量与形态可以表征岩溶环境退化及石漠化发生发展状况.

关键词: 岩溶山地; 土壤铁氧化物; 数量; 形态; 成土环境; 石漠化

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2013-08

Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain

ZHANG Zhi-wei¹, ZHU Zhang-xiong^{1,2}, FU Wa-li¹, WEN Zhi-lin¹

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400700, China)

Abstract: The quantity and morphology of iron oxides are indicators of soil forming-process and forming conditions. In order to analyze the connection between soil iron oxides and soil forming conditions and degenerative process of karst ecosystem, we have chosen 14 soil profiles on the top and middle section of Jinfo Mountain, a typical karst slope in Chongqing, China. Morphology and contents of soil iron oxides were studied by using chemical selective extraction techniques. We draw conclusions: ① total iron (Fe_t) is mainly controlled by parent material and lithology. Significant difference of Fe_t content exists between soils in Top Mountain ($51.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, mean value from 5 profiles) and soils at the middle sector of North Slope ($86.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, mean value of 9 profiles); ② the results show low concentration of Fe_d ($29.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and low ratio of Fe_d to Fe_t (35.40%) in soil clay under conditions of high elevation and low temperature on Top Mountain. In contrast, the results indicate advanced weathering and soil-forming process at middle slope sites due to high temperature; this is supported by high mean values of Fe_d ($43.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and ratio of Fe_d/Fe_t in clay (60.41%); ③ long humid climatic setting and large numbers of soil organic matter on top of the mountain result in high activation degrees (Fe_o/Fe_d) and high complexation degrees (Fe_p/Fe_d); mean values of them are 73.51%, 17.21% respectively, which are higher than that of soils at middle slope sites (13.06%, 0.41%); ④ after degradation or deforestation of secondary forestland (*pinus massoniana* among bushes) at middle section of the hillslope, soil free iron oxides (Fe_d) and total iron oxides (Fe_t) decrease as well as soil organic carbon and clay, because of progressively increasing of soil erosion. Average contents of Fe_t and Fe_d in clay from 2 shrub profiles are $98.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $50.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. However, the four tillage soils we have studied reveal lower values of Fe_t ($84.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and Fe_d in clay ($47.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Soil iron oxides are reliable indicators to estimate degeneration of karst ecosystem and karst rock desertification.

Key words: karst slope; soil iron oxides; quantity; morphology; soil-forming process; karst rock desertification

土壤氧化铁可以来自母质风化的遗骸,但主要是成土过程中母质风化产物的再淀积. 氧化铁广泛分布在各种类型的土壤中,是土壤中易受环境影响的一种氧化物,有机质、水分状况和土壤 pH 等都影响氧化铁的活化与老化,从而影响铁氧化物的化学活性. 土壤中氧化铁的数量和形态是成土过程和成土环境的反映^[1],铁氧化物在土壤肥力和土壤发生上的意义是多方面的^[2]. 土壤中铁氧化物具有胶结

作用、专性吸附作用和易随环境变化而改变其表面性质等特征,铁氧化物研究的意义已经超越了土壤化学、土壤发生学和植物营养学的范畴^[3].

收稿日期: 2011-07-12; 修订日期: 2012-01-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2011C048, XDJK2010B006); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20100182120029); 西南大学博士基金项目 (SWU111009)

作者简介: 张治伟 (1974 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为岩溶环境学、土壤地理学, E-mail: zflyzzw@swu.edu.cn

国外对铁氧化物的报道较多,研究也比较深入,内容涉及环境修复、土壤发育及土壤结构稳定性等方面.美国伊利诺斯西南岩溶区的研究^[4]指出,岩溶洞穴铁锰氧化物对痕量元素的分布有重要影响;Contin 等^[5]的研究证实,氧化还原交替作用可以增强铁氧化物对某些重金属离子的吸收固定;英国3种砷污染土壤修复试验表明,铁氧化物可降低土壤砷等重金属的活性^[6];Park 等^[7]的研究指出,土壤游离铁、活性铁和活化度可以较好地反映坡面土壤流的空间分布模式及其强度;多瑙河平原成土年龄研究表明^[8], Fe_o/Fe_d 伴随成土年龄的增加而下降,是指示土壤发育的可靠指标;在波兰含硫化物的矿区弃土中^[9], Fe_d/Fe_o 的比值可以表征土壤发育的程度,比值越高,土壤发育越好;在尼日利亚土壤微结构稳定性研究中, Fe_o 和 Fe_p 在稳定土壤结构方面有较重要的作用^[10];铁氧化物在稳定土壤有机质方面具有重要的作用^[11].

我国土壤铁氧化物的研究集中于南方红壤^[12~14]、北方棕壤和黄棕壤^[15,16]及东北沼泽土^[17,18]等,研究内容涉及铁氧化物与成土环境及土壤发生间的关系.我国有世界面积最大的岩溶区.西南岩溶坡地属于典型的脆弱生态系统,原始植被已较少见到,土层浅薄且不连续是其主要特征,局部坡地石漠化严重.土地石漠化是西南岩溶坡地最主要的土地和生态退化形式,土地石漠化使土地生产力下降甚至丧失,已经严重威胁到岩溶石山地区人们的生产生活以及社会经济的发展.到目前为止,关于西南岩溶区土壤铁氧化物的研究鲜见报道^[19],土壤铁氧化物与岩溶环境退化及石漠化发生发展的关系还很模糊.

本研究以不同岩溶生态系统与不同石漠化阶段石灰岩土壤铁氧化物数量与形态为对象,探索岩溶环境演变、石漠化过程中土壤铁氧化物的数量与形态变化,揭示铁氧化物对岩溶环境及石漠化发生发展的指示作用,以期为岩溶坡地土壤资源合理利用、石漠化综合治理与评价提供理论与实践依据.

1 研究区概况与试验方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市南川区金佛山北坡(图1).金佛山是四川盆地东南缘大娄山脉的主峰,最高峰海拔2 251 m,地理坐标: $N28^{\circ}50'$ ~ $N29^{\circ}20'$, $E107^{\circ}$ ~ $E107^{\circ}20'$.金佛山保护区总面积约1 300 km²,本研究在北坡取样(图2),取样区面积约20 km².山顶区

海拔1 900 m 以上,年降水量约1 400 mm,多年平均气温为8.2℃.基岩为二叠系灰岩,岩溶洞穴发育.受人类影响小,生态原生性强.山顶区水热条件基本一致,按地形与植被状况分为原始阔叶林生态系统和次生植被生态系统(表1).坡腰区海拔600~1 200 m,年降雨量约1 200 mm,多年平均气温14~15℃,奥陶系灰岩为主,人类活动干扰大.坡腰区可分为灌丛马尾松、退耕地、坡耕地及草坡地四类岩溶生态系统(表1).

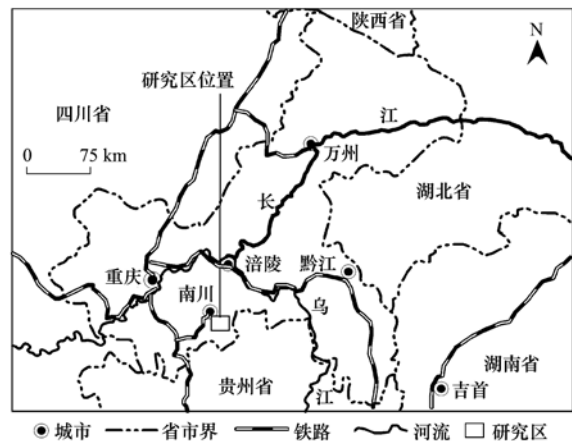
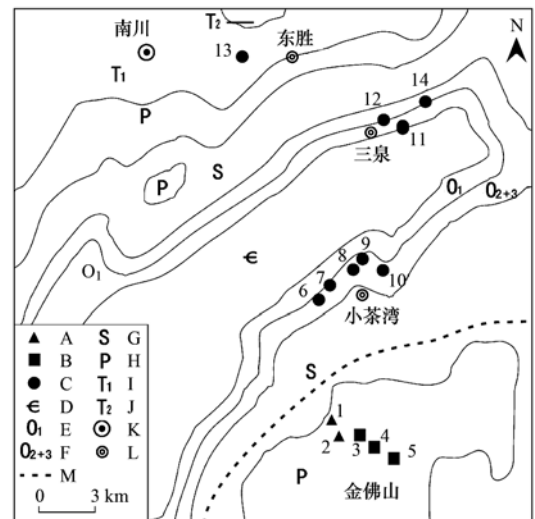


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of research area



A. 山顶陡坡样点; B. 山顶缓坡样点; C. 坡腰岩溶地区样点; D. 寒武系; E. 奥陶系下统; F. 奥陶系中上统; G. 志留系; H. 二叠系(含上统、下统); I. 三叠系下统; J. 三叠系中统; K. 南川区; L. 村镇; M. 山顶区与坡腰区界

图2 研究剖面位置示意

Fig. 2 Distribution of sampling profiles

1.2 供试土壤

野外按发生层次采集土壤样品,带回室内风干,去除枯枝砾石,研磨过0.25 mm和1.00 mm筛备用.各剖面基本特征见表1,土壤主要理化性质详见文献[20, 21],土壤铁氧化物含量见表2.

表 1 各生态系统土壤基本特征

Table 1 Basic properties for different ecosystem soils

地貌部位与基岩	岩溶生态系统类型	土壤剖面	海拔 /m	坡度 /(°)	土壤类型	剖面生境
山顶区,二 叠系灰岩 (含上统和下统)	原始阔叶林 生态系统	1, 2	2 000, 2 090	45, 30	黑色 石灰土	原始常绿阔叶林,坡度大,土层浅,枯枝落叶 层厚,土色灰黑,碳酸盐 7.5 ~ 10.5 g·kg ⁻¹
	次生植被 生态系统	3 ~ 5	2 100 ~ 2 150	15	山地 黄棕壤	属次生植被,包括草甸、竹林和柳杉林,地处 缓坡,土层厚,表层灰黑色,AB、B 层显黄色, 全剖面无石灰反应
坡腰区,奥 陶系灰岩	灌丛马尾松	6, 14	1 250, 770	15	黄色 石灰土	荚迷、铁仔、白茅和芒等灌丛杂草夹稀疏马尾 松,剖面 6 为岩体间的石缝土,岩石裸露率 25% ~ 30%
	退耕地	7, 9	1 250, 1 100	3, 15		剖面 7 退耕 3 ~ 4 a,已种银杏,高度约 1 m;剖 面 9 坡度较大,地面生长矮草,岩石裸露率 30%、50%
	草坡地	11	640	25		白茅为主,夹荚迷、栀子花和葛根等,岩石裸 露率约 35%
	坡耕地	8, 10, 12, 13	600 ~ 1 120	2 ~ 25		剖面 8 为水田,取样时已落干;其余为旱地, 种植玉米、黄豆和红薯,岩石裸露率约 45% ~ 50%

表 2 各剖面土壤铁的形态特征及含量¹⁾

Table 2 Quantitative and morphological properties of soil iron oxides

地貌 部位	剖面 编号	生态系统 类型	土层	土壤全铁 Fe _t /g·kg ⁻¹	游离铁 Fe _d /g·kg ⁻¹	活性铁 Fe _o /g·kg ⁻¹	络合铁 Fe _p /g·kg ⁻¹	黏粒游离铁 Fe _d (clay) /g·kg ⁻¹	结晶铁 Fe _o -Fe _p /g·kg ⁻¹	铁游离度 Fe _d /Fe _t /%	黏粒铁游离度 Fe _d /Fe _t (clay) /%	活化度 Fe _o /Fe _d /%	络合度 Fe _p /Fe _d /%
山顶	1	阔叶林	A0	18.97	8.19	6.45	0.881	16.92	1.75	43.19	24.20	78.67	10.76
			A	20.73	8.47	7.60	0.706	—	0.87	40.86	—	89.72	8.33
			B	20.27	8.93	8.56	0.742	13.07	0.37	44.03	22.22	95.85	8.31
			A0	23.90	10.37	6.68	1.596	12.10	3.69	43.39	29.19	64.38	15.39
	2	阔叶林	A	25.54	10.13	6.45	0.596	12.10	3.68	39.66	24.01	63.64	5.89
			C	24.52	10.03	6.37	1.280	14.35	3.66	40.90	20.45	63.50	12.76
			A	71.44	26.65	18.41	6.388	—	8.24	37.30	—	69.08	23.97
			AB	77.23	28.66	17.56	6.824	—	11.09	37.10	—	61.29	23.81
	3	草甸	B	84.08	28.32	19.42	8.413	39.05	8.90	33.68	43.40	68.58	29.71
			A	57.84	22.53	15.39	3.175	47.96	7.14	38.95	40.28	68.33	14.09
			AB	67.34	25.55	17.88	3.906	41.30	7.67	37.94	40.20	69.98	15.29
			B	68.65	22.93	18.41	5.831	37.45	4.53	33.41	40.33	80.26	25.42
坡体 中部	4	竹林	A	52.56	21.25	20.42	6.614	42.58	0.83	40.43	37.57	96.12	31.13
			AB	62.76	21.26	15.50	5.720	36.16	5.75	33.87	41.65	72.93	26.91
			B	72.79	28.37	18.66	7.439	38.41	9.71	38.97	53.15	65.78	26.22
			A	91.56	30.25	6.69	0.296	—	23.56	33.04	—	22.13	0.98
	6	灌丛马尾松	B1	101.97	38.92	7.26	0.215	56.37	31.67	38.17	55.78	18.65	0.55
			B2	114.38	36.88	5.71	0.084	61.83	31.16	32.24	62.02	15.50	0.23
			A	72.87	34.13	9.07	0.617	43.22	25.06	46.84	61.12	26.57	1.81
			B	83.36	37.14	6.84	0.205	47.07	30.30	44.56	56.87	18.43	0.55
	7	退耕地	C	76.04	34.99	6.42	0.264	40.33	28.57	46.01	51.24	18.35	0.75
			A	75.06	32.06	5.41	0.830	45.14	26.65	42.71	75.24	16.89	2.59
			B _{fe}	79.43	39.49	4.92	0.213	49.64	34.57	49.72	74.94	12.47	0.54
			B _{mn}	84.97	42.09	3.68	0.205	48.67	38.41	49.53	69.91	8.75	0.49
	9	退耕地	AB	79.43	31.57	7.41	0.190	42.26	24.16	39.75	62.24	23.47	0.60
			C	89.81	32.09	6.58	0.054	41.94	25.51	35.73	53.09	20.51	0.17
			A	84.08	34.93	6.66	0.116	47.71	28.27	41.54	64.48	19.06	0.33
			B	84.87	30.54	6.66	0.157	48.35	23.89	35.99	67.07	21.79	0.51
	11	草坡	A	78.16	30.43	3.68	0.625	36.80	26.75	38.93	61.40	12.10	2.05
			B	75.86	36.26	2.63	0.030	26.86	33.63	47.80	54.85	7.24	0.08
			C	80.00	37.39	2.70	0.030	33.92	34.69	46.74	51.83	7.22	0.08
			A	89.60	42.34	4.36	0.088	40.65	37.98	47.26	64.93	10.29	0.21
	12	旱地	B	99.23	46.47	5.19	0.027	52.84	41.29	46.83	80.96	11.16	0.06
			A	69.73	31.61	2.32	0.027	43.54	29.28	45.32	66.87	7.36	0.09
			B	86.61	41.10	2.63	0.006	52.20	38.47	47.45	72.30	6.39	0.01
			A	76.94	34.81	1.91	0.143	43.22	32.90	45.24	59.62	5.49	0.41
	14	灌丛马尾松	BC	90.61	39.94	1.76	0.022	43.86	38.18	44.07	60.35	4.41	0.06

1) —表示数据缺失,缺失数据因预处理损坏

1.3 试验方法

土壤全铁(Fe_t)是土壤中铁的全量.土壤游离铁(Fe_d)是禁锢在原生矿物中的铁在风化和成土过程中逐渐释放出来的铁的总和^[22],游离铁包括活性铁、隐晶质和结晶态铁($\text{Fe}_d\text{-Fe}_o$),是氧化铁及其水合物的通称;游离铁占全铁的百分数为游离度(Fe_d/Fe_t);黏粒游离铁是土壤黏粒部分的游离铁含量.活性铁(Fe_o)又称为无定形铁,是游离氧化铁中活性较高的部分,活性铁占游离铁的百分数为活化度(Fe_o/Fe_d).络合态铁(Fe_p)是指与土壤腐殖质形成络合物的铁,也属于无定形态,络合铁占游离铁的百分数为络合度(Fe_p/Fe_d).

铁氧化物测试方法:土壤全铁首先制备矿质全量系统分析待测液,而后由等离子发射光谱仪测定;游离铁用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠提取,邻啡罗啉比色法测定;黏粒游离铁首先提取土壤黏粒,而后与土壤游离铁的测定方法相同;土壤活性铁用酸性草酸铵溶液提取,邻啡罗啉比色法测定;络合铁用焦磷酸钠提取,邻啡罗啉比色法测定^[2].有机质、pH、碳酸钙、颗粒组成等土壤理化性质采用

常规分析方法^[23].

按岩溶生态系统类型统计试验结果并进行分析、比较与讨论,平均值是按土层厚度统计的剖面加权平均数.

2 结果与分析

2.1 山顶区土壤铁氧化物与成土环境

山顶区海拔较高,生态原生性强,气温低,土壤潮湿.由于水热条件一致,母质、地形和植被对土壤发育及铁形态的影响较大.全铁在原始阔叶林土壤和次生植被土壤间差异较大,阔叶林土壤全铁显著小于次生植被土壤(表2和表3).山顶区虽均属二叠系,但上、下统之间岩性有差异,上统龙潭组夹有部分煤层及砂页岩,下统为质纯灰岩^[24],铁全量的差异可能与岩性变化有关.相关分析显示,全铁与游离铁、活性铁和络合铁均呈显著正相关(r^2 为0.978、0.875、0.873, $n=15$),表明游离铁含量受全铁的控制.由于全铁含量差异显著,阔叶林土壤游离铁、活性铁和络合铁也均显著小于次生植被土壤.

表3 山顶区原始阔叶林与次生植被土壤铁氧化物的差异¹⁾

Table 3 Differences of soil properties and iron oxides between broad-leaved forest and secondary vegetation soils on top mountain

岩溶生态系统类型	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	黏粒 /%	物理性黏粒 /%	CaCO_3 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全铁 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	游离铁 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	活性铁 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	络合铁 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	黏粒铁游离度 /%	活化度 /%	络合度 /%
阔叶林土壤	109.76	17.46	50.14	8.64	22.19	9.26	7.05	0.91	22.51	76.19	9.68
次生植被土壤	77.02	18.45	56.77	0.31	71.02	25.76	18.07	6.40	43.99	70.83	24.73

1) 按土层厚度加权平均的值

通常认为黏粒部分铁的游离度与气候条件密切相关,我国各种母质发育的土壤,其黏粒铁的游离度有自南向北递减的趋势^[2].由表3可见,阔叶林土壤黏粒铁的游离度显著低于次生植被土壤,表明阔叶林土壤风化程度低于次生植被土壤.由于气候条件一致,可能与阔叶林土壤地处陡坡、次生植被土壤地处缓坡及其引起的风化淋溶的差异有关.

活性铁是游离氧化铁中活性较高的部分,有机质和水分状况对其影响较大.阔叶林土壤活性铁含量显著小于次生植被土壤(表2和表3).由于活性铁与全铁和游离铁正相关,同时阔叶林土壤全铁和游离铁含量小于次生植被,从而使活性铁含量也小于次生植被土壤.铁活化度在山顶两类生态系统差异较小,活化度与土壤水分和有机质关系密切,而水分和有机质含量受气候带和海拔影响.表明在成土环境相似条件下,活性铁含量可以差异悬殊,但活化度却可以接近.

络合态铁是指与土壤腐殖质形成络合物的铁,土壤中只要有有机质存在,或多或少有络合铁的存在,络合作用是影响铁形态及移动的重要因素.山顶阔叶林、次生植被土壤络合铁含量分别为 $0.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,两者差异极显著.阔叶林土壤铁的络合度也显著小于次生植被土壤(表3).山顶土壤有机质含量差异小,但地处缓坡的次生植被土壤,土层深厚,底部黏化层明显,不利于排水,铁不容易脱水结晶.加上pH低于阔叶林土壤,滞水还原条件下形成的部分可溶性 Fe^{2+} 可能被淋溶或转化为有机结合态,使次生植被土壤络合铁含量极高,并且剖面底部络合铁含量高于表层(表2).研究指出,土壤渍水还原状况^[25]和低的pH有利于络合铁的形成^[1].

2.2 坡腰区土壤铁氧化物与成土环境

坡腰区土壤全铁含量 $69.73 \sim 114.38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高值出现在灌丛马尾松土壤B层,最低值在旱地

表层. 灌丛马尾松退化后, 全铁含量明显下降(图3). 灌丛马尾松转化为坡耕地、退耕地和草坡后, 黏粒部分的游离铁含量下降, 灌丛马尾松、退耕地、坡耕地和草地生态系统土壤分别为 50.81、42.94、47.86 和 32.48 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图3). 灌丛马尾松退化后, 表层黏粒、物理性黏粒和剖面黏粒平均含量均呈下降趋势(图3). 由表4可见, 土壤黏粒与黏粒游离铁极显著正相关, 与全铁含量有正相关趋势; 物理性黏粒与全铁也显著正相关. 表明氧化铁更多地富集于黏粒部分, 凡是影响土壤黏粒迁移和淀积的环境因素(降水和侵蚀等)都可能间接影响铁的全量和

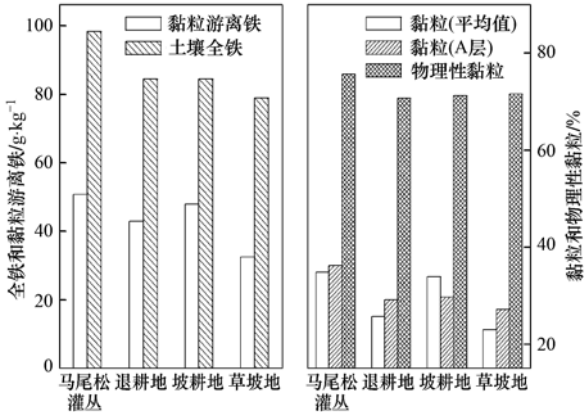


图3 坡腰区各生态系统黏粒及黏粒游离铁

Fig. 3 Content of clay and free iron oxides in clay for different land use patterns at middle section slope

游离铁含量. 灌丛林地退化, 侵蚀加剧^[26], 黏粒流失, 游离铁伴随黏粒迁移.

坡腰区温度较高, 水热条件配合较好, 从而有利于土壤原生矿物的风化, 黏粒部分铁的游离度较高(60.41%), 显著高于山顶阔叶林和次生植被土壤(22.50%、43.99%), 表明坡腰区土体的风化程度普遍高于山顶地区土壤.

如表4所示, 活性铁、活化度与有机质含量呈显著正相关. 活性铁与活化度基本自表层土壤向底层降低, 与剖面有机质含量变化规律一致. 在各剖面间, 活性铁含量与各剖面土壤有机质平均含量基本一致. 灌丛马尾松开垦为旱地后, 土壤有机质含量降低, 铁结晶老化, 活化度降低, 灌丛马尾松土壤平均活化度 13.81%, 旱地为 12.24%.

与有机质关系更为密切的络合态铁在灌丛马尾松土壤与旱地土壤间的差异较为明显. 灌丛马尾松土壤表层络合铁 $0.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 旱地表层络合铁 $0.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表层平均值); 灌丛马尾松土壤络合铁 $0.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 旱地剖面络合铁 $0.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (加权平均值); 灌丛马尾松络合度 0.26%, 旱地 0.20%(加权平均值). 剖面7(退耕地)表层出现较高的络合铁, 与该土壤退耕后表层较高的土壤有机质有关. 相关分析显示, 络合铁与有机质显著正相关(表4).

表4 坡腰区土壤铁形态相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis between soil iron oxides and soil properties at middle section of the mountain

	有机质	黏粒	物理性黏粒	土壤全铁	游离铁	活性铁	络合铁	黏粒游离铁	结晶铁	铁游离度	黏粒铁游离度	活化度	络合度
有机质	1	-0.112	-0.552 **	-0.323	-0.156	0.450 *	0.451 *	-0.056	-0.307	0.171	-0.102	0.438 *	0.422
黏粒		1	0.538 *	0.372	0.269	-0.125	0.031	0.590 **	0.272	-0.102	0.646 **	-0.172	0.036
物理性黏粒			1	0.450 *	0.314	-0.159	-0.188	0.394	0.322	-0.110	0.275	-0.206	-0.199
土壤全铁				1	0.482 *	0.151	-0.365	0.693 **	0.339	-0.497 *	0.075	0.022	-0.373
游离铁					1	-0.241	-0.424	0.326	0.923 **	0.513 *	0.354	-0.455 *	-0.464 *
活性铁						1	0.367	0.312	-0.596 **	-0.394	-0.087	0.970 **	0.339
络合铁							1	-0.081	-0.497 *	-0.065	0.136	0.429	0.996 **
黏粒游离铁								1	0.146	-0.341	0.454 *	0.200	-0.108
结晶铁									1	0.580 **	0.328	-0.761 **	-0.518 *
铁游离度										1	0.250	-0.482 *	-0.101
黏粒铁游离度											1	-0.145	0.134
活化度												1	0.414
络合度													1

1) * 为 $P<0.05$, ** 为 $P<0.01$; $n=21$

3 讨论

3.1 山顶区与坡腰区铁的数量与形态差异

如表2所示, 山顶区与坡腰区铁氧化物数量有极显著的差异. 山顶区全铁、游离铁、黏粒游离铁及其游离度均显著低于坡腰区, 但山顶区的活性铁、络

合铁、活化度和络合度却远高于坡腰区. 经 SPSS 差异性检验, 土壤铁在山顶区和坡腰区有极显著差异($P<0.01$).

山顶土壤全铁 $51.49\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 坡腰区全铁 $86.29\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 综合成土环境分析, 全铁差异可能主要与母质有关, 山顶区属二叠系灰岩, 坡腰区属于奥陶系

灰岩。

山顶区游离铁 $19.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 坡腰区游离铁 $36.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 山顶区黏粒游离铁为 $29.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 坡腰区为 $43.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 经过 SPSS 相关性分析, 游离铁与全铁之间有极显著相关性 ($r^2 = 0.846$, $n = 37$, $P < 0.01$), 黏粒游离铁与全铁也呈极显著正相关 ($r^2 = 0.787$, $n = 34$, $P < 0.01$), 说明全铁含量影响土壤游离铁含量. 铁的游离度可作为土壤风化程度的一个指标^[27]. 黏粒部分铁的游离度, 山顶区为 35.40%, 坡腰区为 60.41%. 坡腰区温度较高, 水热条件配合较好, 从而有利于土壤原生矿物的风化. 山顶地区虽然降水量稍大, 但常年温度较低, 冬季气温在 0°C 以下, 释放出的游离铁相对较少, 因而游离铁及黏粒铁的游离度偏低.

山顶土壤活性铁为 $13.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 坡腰区土壤为 $4.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 山顶区铁活化度普遍较高 (61.29% ~ 96.12%), 坡腰区活化度较低 (4.41% ~ 26.57%), 坡腰区活性铁含量和活化度均显著低于山顶区. 经相关分析, 活化度与有机质含量极显著正相关 (图 4、图 5), 表明有机质含量对铁活化度的贡献较大. 有机质促进铁活化的原因通常是因为无定形水合氧化物强烈吸附有机质, 阻碍晶核形成^[1], 或铁离子与富里酸结合为络合物^[28]. 另外, 水分状况也是影响氧化铁活化度的重要因素. 山顶区海拔高, 降雨量大, 气温偏低, 蒸发较弱, 土壤常年湿润, 使铁的活化度极高. 而坡腰区气温升高, 蒸发大, 土壤易于脱水使铁老化, 铁活化度降低.

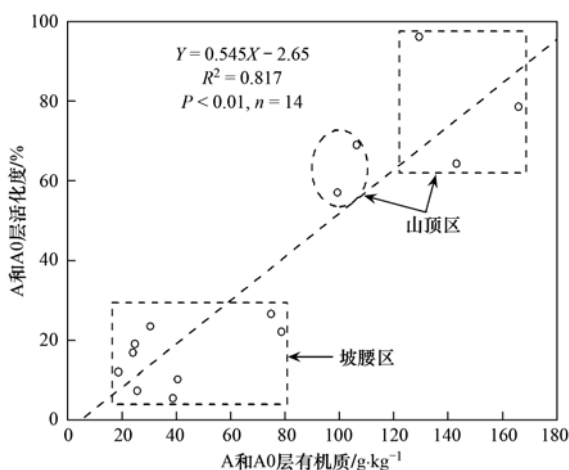


图 4 表层有机质含量与活化度关系

Fig. 4 Correlation between soil iron activation degree and organic matter in surface layers

山顶土壤络合铁含量高 ($0.41 \sim 8.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 平均值 $4.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 坡腰区土壤络合铁含量低

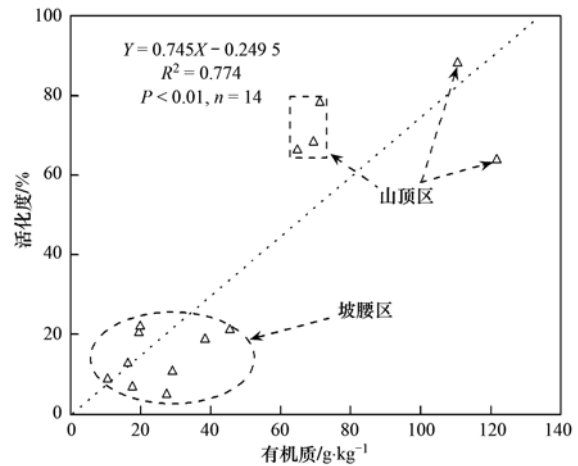


图 5 有机质平均含量与活化度关系

Fig. 5 Correlation between iron activation degree and mean organic matter

($0.01 \sim 0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 平均值 $0.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 山顶区铁络合度 17.21%, 也显著高于坡腰区的 0.36%. 在土壤表层, 14 个剖面络合度与有机质含量显著正相关 ($r^2 = 0.537$, $P < 0.01$, $n = 14$), 体现了有机质的重要影响. 可见, 山顶区极高的活性铁、络合铁、活化度以及络合度是大量的土壤有机质和常湿润土壤水分状况所致.

3.2 铁氧化物与岩溶环境演变及石漠化发生发展的关系

土壤氧化铁对环境变化敏感, 土壤有机质、水分状况和 pH 等都对氧化铁的形态与迁移有重要影响. 岩溶环境的退化及石漠化的发展, 必然引起土壤腐殖质减少、土壤含水量降低和黏粒的流失等, 并通过这些土壤性质的作用引起铁氧化物数量和形态的变化, 建立氧化铁数量与岩溶坡地土壤退化和石漠化程度的定量关系模型具有重要的理论和实践意义.

在坡腰区, 现存面积最大的岩溶生态系统为灌丛马尾松, 灌丛马尾松破坏后常转化为草坡地或用作坡耕地, 近期部分耕地已退耕. 前期研究^[26]表明, 灌丛马尾松退化后土壤侵蚀加剧. 土壤侵蚀的过程中, 黏粒通常首先迁移. 灌丛马尾松退化后, 黏粒以及物理性黏粒含量均呈降低趋势, 表层黏粒的减少最为明显 (图 3). 研究区 14 个剖面黏粒与游离铁平均含量极显著正相关 (图 6); 在坡腰区, 9 个剖面黏粒与黏粒游离铁也呈极显著正相关 ($r^2 = 0.568$, $P < 0.01$, $n = 9$), 物理性黏粒与土壤全铁显著正相关 (表 4). 表明灌丛马尾松退化后, 游离铁有伴随黏

粒迁移的趋势,使游离铁和全铁含量减少(图3)。可见,在海拔相差不大的同一母质区,建立氧化铁数量与岩溶环境退化的定量关系是可行的。

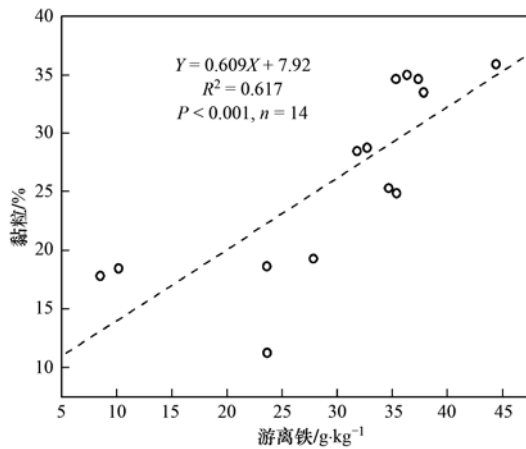


图6 黏粒与游离铁的相关性分析

Fig. 6 Correlation between clay and soil free iron oxide (Fed)

另外,游离氧化铁是土壤中重要的矿质胶结物,次生灌丛林地的退化,导致土壤有机质、黏粒及游离铁的下降,使有机胶结物与无机胶体减少,可能致使土壤结构恶化,并进一步加剧土壤侵蚀,使石漠化发生或加剧。

3.3 土壤氧化铁的发生学意义

山顶区与坡腰区对比,坡腰区黏粒铁的游离度(60.41%)高于山顶区(35.41%),说明山顶区土体风化程度较坡腰区弱。

在山顶区,水热状况一致,地形、坡度与植被状况成为影响土壤发育的重要因素。阔叶林土壤地处陡坡,坡度大,土层浅;而次生植被土壤位于缓坡,坡度小,土层深厚;从而使次生植被土壤稳定发育的时间长,发育程度较深,表现为次生植被土壤黏粒部分铁的游离度显著高于阔叶林土壤(表2和表3)。从两类生态系统土壤的土层厚度、剖面构型、土壤颜色、黏粒和铁的垂直分布以及碳酸盐含量等^[20]均可以得到佐证。阔叶林土壤土层浅薄,层次分异不明显,而次生植被土壤土层厚度大,层次分异明显;阔叶林土壤灰黑至黑色,次生植被土壤表层灰色,AB、B层显黄棕色或亮黄色;阔叶林土壤黏粒和全铁在剖面上无明显分异,而次生植被土壤黏粒和全铁显著向B层聚集;阔叶林土壤有碳酸盐存在,而次生植被土壤碳酸盐残留痕迹。阔叶林土壤发育较弱,属黑色石灰土;次生植被土壤发育较深,为山地黄棕壤。

Fe_0/Fe_d 反映晶质氧化铁的含量或比例,而氧化

铁的结晶程度却与时间有关^[8,13,29]。但 Fe_0/Fe_d 对土壤年龄的反映是有条件的,在本研究区可能不能体现或不明确,因为大量的有机质和土壤水分会改变 Fe_0 的含量。

3.4 需要深入研究的领域

本研究土壤剖面数量有限,需要进一步采集样品;山顶区次生植被土壤络合铁含量极高,有待于进一步研究,可能与酸性淋溶、底部滞水的还原条件及腐殖质组成^[20]有关(阔叶林土壤腐殖质含胡敏酸多,次生植被土壤含富里酸多),活性铁、络合铁与富里酸占有有机碳比重呈显著正相关(r^2 为 0.645、0.693, $n=15$)。当富里酸与铁离子的比率高时可以妨碍晶态氧化铁的形成^[11]。

4 结论

(1)山顶区氧化铁全量显著小于坡腰区,主要受母质的影响。山顶土壤黏粒游离铁和黏粒部分铁的游离度小于坡腰区,说明山顶土体风化程度较坡腰区弱。在山顶区,受地形、坡度和植被的影响,阔叶林土壤发育程度较次生植被土壤弱。

(2)山顶土壤常年湿润,有机质含量高,土壤活性铁、络合铁及活化度、络合度均显著大于坡腰地区。

(3)在坡腰区,灌丛马尾松退化后,有机质含量下降,侵蚀加剧,黏粒流失,游离铁伴随黏粒迁移,使全铁和黏粒游离铁含量减少。在海拔相差不大的同一母质区,土壤氧化铁数量和形态可以表征岩溶环境退化与石漠化发生发展状况。

参考文献:

- [1] 于天任. 土壤化学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1987. 73-99.
- [2] 于天仁, 王振权. 土壤分析化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 337-361.
- [3] 孙丽蓉, 曲东, 王旭刚. 土壤微团聚体中氧化铁的异化还原能力 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 47-50.
- [4] Friedrich A J, Hasenmueller E A, Catalano J G. Composition and structure of nanocrystalline Fe and Mn oxide cave deposits: Implications for trace element mobility in karst systems [J]. Chemical Geology, 2011, 284(1-2): 82-96.
- [5] Contin M, Mondini C, Leita L, et al. Enhanced soil toxic metal fixation in iron (hydr) oxides by redox cycles [J]. Geoderma, 2007, 140(1-2): 164-175.
- [6] Hartley W, Lepp N W. Remediation of arsenic contaminated soils by iron-oxide application, evaluated in terms of plant productivity, arsenic and phytotoxic metal uptake [J]. Science of the Total Environment, 2008, 390(1): 35-44.

- [7] Park S J, Burt T P. Identification of throughflow using the distribution of secondary iron oxides in soils [J]. *Geoderma*, 1999, **93**(1): 61-84.
- [8] 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.
- [9] Uzarowicz L, Skiba S. Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: mineral transformations as an indicator of pedogenesis [J]. *Geoderma*, 2011, **163**(1-2): 95-108.
- [10] Igwe C A, Zarei M, Stahr K. Colloidal stability in some tropical soils of southeastern Nigeria as affected by iron and aluminium oxides [J]. *Catena*, 2009, **77**(3): 232-237.
- [11] Wagai R, Mayer L M. Sorptive stabilization of organic matter in soils by hydrous iron oxides [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, **71**(1): 25-35.
- [12] 马毅杰, 陈家坊. 我国红壤中氧化铁形态及其特性和功能 [J]. *土壤*, 1998, (1): 1-6.
- [13] 黄成敏, 龚子同, 杨德涌. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究 II. 铁氧化物特征 [J]. *土壤学报*, 2002, **39**(4): 449-458.
- [14] 周性敦, 庄卫民, 王果, 等. 福建三个垂直带谱中土壤氧化铁的研究 [J]. *土壤学报*, 1995, **32**(1): 23-31.
- [15] 衡利沙, 王代长, 蒋新, 等. 黄棕壤铁铝氧化物与土壤稳定性有机碳和氮的关系 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2748-2755.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 邹元春, 吕宪国, 姜明. 不同开垦年限湿地土壤铁变化特征研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 814-818.
- [19] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 喀斯特石漠化地区土壤 Fe 组成及其发生学意义 [J]. *地质通报*, 2010, **29**(5): 745-751.
- [20] 张治伟. 岩溶环境中土壤退化规律研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007. 7-10, 42-47.
- [21] 张治伟, 袁道先, 傅瓦利, 等. 重庆金佛山地区土壤酸度分布特点及影响因素研究 [J]. *中国岩溶*, 2006, **25**(1): 67-72.
- [22] 郭曼, 安韶山, 常庆瑞, 等. 宁南宽谷丘陵区土壤矿质元素与氧化铁的特征 [J]. *水土保持研究*, 2005, **12**(3): 38-40.
- [23] 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. 12-14, 60-67, 99-108.
- [24] 吴孔运, 孙海龙, 汪进良, 等. 重庆金佛山岩溶作用驱动因素初探 [J]. *中国岩溶*, 2004, **23**(3): 247-252.
- [25] 潘淑贞. 不同潜育化土壤中还原物质的变化 [J]. *土壤通报*, 1996, **27**(4): 158-161.
- [26] 张治伟, 傅瓦利, 张洪, 等. 岩溶坡地土壤侵蚀强度的¹³⁷Cs法研究 [J]. *山地学报*, 2007, **25**(3): 302-308.
- [27] 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.
- [28] 于天仁, 陈志诚. 土壤发生中的化学过程 [M]. 北京: 科学出版社, 1990. 452-461.
- [29] Eppes M C, Bierma R, Vinson D, *et al.* A soil chronosequence study of the Reno valley, Italy: insights into the relative role of climate versus anthropogenic forcing on hillslope processes during the mid-Holocene [J]. *Geoderma*, 2008, **147**(3-4): 97-107.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人