

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)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及p53的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,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-CeO₂/ZrO₂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CO₂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CH₄和N₂O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N₂O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CO₂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,丁嫄,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Cu²⁺、Cd²⁺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)

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¹, 廖洪凯¹, 李娟², 陈彩云¹

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境重点实验室, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 通过对贵州西南部典型喀斯特山区植被调查与土壤样品分析, 运用冗余分析(RDA)的手段研究土壤-石漠化关系。结果表明, 喀斯特石漠化过程中, 除土壤全磷、全钾和交换性钙由于受成土母质的影响变化规律不明显外, 土壤有机碳、全氮、微生物生物量碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳、基础呼吸及土壤速效养分含量均呈明显下降趋势; RDA 分析结果表明, 不同石漠化类型与土壤因子相关性差异明显, 总体表现为: 未石漠化 > 潜在石漠化 > 轻度石漠化 > 中度石漠化 > 重度石漠化, 且利用土壤有机碳、全氮、碱解氮和容重作为石漠化过程中土壤指示因子, 可解释 74.4% 的土壤-石漠化信息; 另外, 相关性分析结果表明, 土壤养分因子在很大程度上受地上植被的影响, 为此综合考虑地表植被的生态功能和土壤质量水平, 认为花椒是喀斯特石漠化山区生态恢复较好的植被选择。

关键词: 喀斯特; 土壤因子; 石漠化; 冗余分析; 贵州省

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2131-08

Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis

LONG Jian¹, LIAO Hong-kai¹, LI Juan², CHEN Cai-yun¹

(1. Guizhou Provincial Key Laboratory of Mountain Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Department of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Redundancy analysis (RDA) was employed to reveal the relationships between soil and rocky desertification through vegetation investigation and analysis of soil samples collected in typical karst mountain area of southwest Guizhou Province. The results showed that except TP, TK and A_{Ca}, all other variables including SOC, TN, MBC, ROC, DOC, available nutrients and basal respiration showed significant downward trends during the rocky desertification process. RDA results showed significant correlations between different types of desertification and soil variables, described as non-degraded > potential desertification > light desertification > moderate desertification > severe desertification. Moreover, RDA showed that using SOC, TN, AN, and BD as soil indicators, 74.4% of the variance information on soil and rocky desertification could be explained. Furthermore, the results of correlation analysis showed that soil variables were significantly affected by surface vegetation. Considering the ecological function of the aboveground vegetation and the soil quality, *Zanthoxylum* would be a good choice for restoration of local vegetation in karst mountain area.

Key words: Karst; soil variables; rocky desertification; RDA; Guizhou Province

喀斯特系统以其独特二元结构和生态景观为基本特征, 与黄土、沙漠、寒漠并列为我国四大环境脆弱地区^[1,2]。我国喀斯特地貌主要分布在广西、贵州、云南、四川、重庆、西藏及湖南、湖北的部分地区, 总面积达 54 万 km², 是国家进行环境治理和扶贫的重点与难点。贵州位于祖国西南部喀斯特地貌最集中的中心片区, 喀斯特面积占全省总面积的 73.6%, 全省 95% 以上的县(市)有喀斯特分布, 自 20 世纪 70 年代以来, 国家退耕还林(草)政策的实施, 加之粗放型的农业运作模式逐渐向集约型转变, 使得喀斯特石漠化进程得以放缓, 部分石质荒漠化地区生态得以有效恢复。然而, 据资料统计, 贵州岩溶石漠化土地面积仍以每年 508.16 km² 的速度不断扩展^[3], 石漠化形势不容乐观。现已明确认识到石漠化是岩溶山区脆弱生态系统与人类不合理经济

活动相互作用而造成的土地退化过程^[4,5], 许多研究者对喀斯特石漠化进行了大量研究并取得了一系列的成果, 主要涉及: 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理^[6]; 石漠化驱动因子分析^[7]; 岩性与石漠化的空间相关分析^[8]; 石漠化的防治与恢复重建技术^[9]等, 但总体上对石漠化的研究仍然停留在宏观尺度, 而对岩溶生态系统中土壤因子与石漠化相互关系的研究还相对缺乏。其主要的科学问题在于: ①喀斯特石漠化对土壤因子有多大影响, 哪些土壤因子与石

收稿日期: 2011-09-08; 修订日期: 2011-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971160); 贵州省优秀青年科技人才培养对象专项资金项目(黔科合人字[2009]21号); 贵州省高层次人才科研经费项目(TZJF-2008-40号); 贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2011]2046号)

作者简介: 龙健(1974~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为喀斯特土壤环境化学与土壤生态, E-mail: longjian22@163.com

漠化发展关系密切;②采用哪些土壤指标更能敏感地指示石漠化的发展.基于此,本研究在贵州西南部典型喀斯特山区 16 块样地(5 个等级石漠化)环境参数的收集和土壤样品测定的基础上,运用数量生态学中的冗余分析方法(Redundancy analysis, RDA)研究土壤-石漠化的内在联系,以期对喀斯特地区石漠化防治和生态恢复提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于贵州省安顺地区关岭县花江干热河谷小流域内(北纬 $25^{\circ}38.988'$ ~ $25^{\circ}40.322'$,东经 $105^{\circ}39.031'$ ~ $105^{\circ}41.505'$),海拔在 500~800 m 间,该地区碳酸岩盐广布,区内地表起伏较大,河谷深切,地下水深埋,热量丰沛,降水分布极其不均,5~10 月降水量达全年降水量的 83%,年均温 18°C 左右,年积温 6542.9°C ,全年无霜期在 337 d 以上.研究区内气候垂直变异明显,海拔 850 m 以下为南亚带干热河谷气候,900 m 以上为中亚热带河谷气候.成土母岩以白云质灰岩、泥质灰岩为主,土壤类

型多以黑色石灰土和棕黄色石灰土为主,森林覆盖率 $<5\%$,岩石裸露率为 70% 以上,发育有较完善的土面、石面和石坑等小生境,属于典型的脆弱喀斯特岩溶山区.

1.2 样地的选取与土样采集

2010 年 7 月,在实地调查的基础上,综合考虑景观^[10]和土地利用方式^[11]以及该区域石漠化等级划分^[12],分别选取了 4 块未石漠化、4 块潜在石漠化、3 块轻度石漠化、2 块中度石漠化以及 3 块重度石漠化样地共计 16 块样地作为研究对象.样地设置好后,首先进行植物群落状况调查,主要考察植物种类,生长状况,冠幅等.随后在每块样地内设置 3 个 20 m \times 10 m 样方,每个样方内以“S”形设置 10 个样点,取样深度在 0~20 cm 之间,混合制成一个土壤样品.采集的土壤密封后带回室内,仔细除去新鲜土样中可见的植物及土壤动物残体,混匀后,取出部分土壤用于微生物生物量碳、可溶性有机碳和基础呼吸的测定.其余土壤自然风干后分别过 0.25 mm 和 2 mm 尼龙筛,以供土壤有机碳、易氧化有机碳及土壤养分等指标的测定.具体的样地信息如表 1 所示.

表 1 调查样地基本信息

Table 1 Basic information of the investigated plots

石漠化程度	序号	植被类型	海拔/m	总盖度/%	坡度/($^{\circ}$)	坡向	干扰强度
未石漠化	1	天然次生林(F1)	711	83	15	南坡	弱
	2	天然次生林(F2)	674	82	23	南坡	弱
	3	天然次生林(F3)	667	87	30	北坡	弱
	4	天然次生林(F4)	653	80	25	北坡	弱
潜在石漠化	5	人工灌木林(S1)	641	65	25	南坡	较强
	6	人工灌木林(S2)	637	60	23	南坡	较强
	7	人工灌木林(S3)	654	70	20	北坡	较强
	8	人工灌木林(S4)	624	62	15	北坡	较强
轻度石漠化	9	天然次生草丛(G1)	631	54	5	南坡	弱
	10	天然次生草丛(G2)	598	57	0	北坡	弱
	11	天然次生草丛(G3)	583	63	10	北坡	弱
中度石漠化	12	农田(F5)	666	40	0	南坡	强
	13	农田(F6)	597	33	0	南坡	强
重度石漠化	14	裸荒地(B1)	645	0	5	南坡	弱
	15	裸荒地(B2)	519	0	12	南坡	弱
	16	裸荒地(B3)	546	0	18	南坡	弱

1.3 样地状况描述

(1)天然次生林(F1、F2、F3、F4) 一直封闭,基本无人干扰,树高 7.0 m 以上,胸径 20~70 cm.主要植物优势种为香椿(*Toona sinensis*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、小叶榕(*Ficus concinna*)和核桃(*Juglans regia*)等树种.

(2)人工灌木林(S1、S2、S3、S4) 人工花椒林,1992 年开始有规模种植,1995 年开始成熟,至 2000

年左右进入丰产期,平均株高 2.5 m 左右,树冠最大直径在 4.5 m 左右.除花椒(*Zanthoxylum planispinum*)外,有少量草本植物伴生,如芒草(*Miscanthus sinensis*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、仙人掌(*Cactaceae*)等.

(3)天然次生草地(G1、G2、G3) 主要由耕地或耕坡地退耕后形成,恢复年限在 15 a 左右,人为干扰活动少,现今已逐渐形成以芒草为主导的草本

植被体系,主要植物包括:芒草、野古草(*Arundinella hirta*)、苦蒿(*Conyza blinii*)等。

(4) 农田(F1、F2) F1 为玉米-红薯轮番地,连续耕作 30 a 以上,每年进行翻耕时会施入一定量的农家肥和尿素。F2 为火龙果地,种植时间约在 5 a 左右,单株高在 2.0 m 左右,种植密度低,一年一熟,除火龙果(*Hylocereus undatus*)外,地表覆盖有少量芒草。

(5) 裸荒地(B1、B2、B3) 之前火烧草地及超载的过牧模式,使得土壤退化严重,现已失去利用价值,岩石裸露率在 85% 以上,土被零星不连续,仅有极少量的芒草和狗芽根(*Cynodon dactylon*)生长其中。

1.4 土壤样品分析方法

土壤样品测定的项目有:容重(BD)、有机碳(SOC)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、全磷(TP)、有效磷(AP)、全钾(TK)、速效钾(AK)、交换性钙(ACa)、交换性镁(AMg)、易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)和基础呼吸(CO_2),共计 14 项土壤指标。土壤容重采用环刀法、有机碳采用重铬酸钾外加热法、全氮采用半微量凯氏定氮法、碱解氮采用扩散皿法、全磷采用浓硫酸-高氯酸消解-钼蓝比色法、有效磷采用 Olsen 法(NaHCO_3 溶液浸提)、全钾采用高氯酸-氢氟酸消解-原子吸收光谱法、速效钾采用乙酸铵浸提-原子吸收光谱法、交换性钙和镁采用乙酸铵浸提-EDTA 滴定法进行测定。

土壤易氧化有机碳的测定:称取约 15 ~ 30 mg 碳的土样,加入 333 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高锰酸钾溶液 25 mL,振荡 1 h,然后以 4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5 min,取上清液用去离子水按 1:250 稀释,将稀释液在 565 nm 波长处进行比色。根据高锰酸钾的消耗量,可计算出土壤易氧化有机碳含量。

土壤可溶性有机碳的测定:称取 15 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤,加入 25 mL 蒸馏水,于室温下振荡 30 min,然后以 4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,上清液过 0.45 μm 滤膜^[13],滤液加 5 mL 0.8 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 重铬酸钾和 5 mL 浓硫酸,在 185 $^{\circ}\text{C}$ 条件下保持沸腾 5 min,用 0.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸亚铁滴定。

土壤微生物生物量碳的测定^[14]:称取过 2 mm 筛的相当于烘干土 10 g 的新鲜土样,在真空干燥器中用氯仿熏蒸 24 h,用反复抽真空方法除去氯仿残留,再用 30 mL 0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸钾溶液振荡 30 min 后,取滤液用重铬酸钾容量法测定碳含量。同时以未熏蒸土壤为对照。以熏蒸土样与未熏蒸土样提取的

有机碳的差值分别乘以转换系数 2.64,可计算出土壤微生物生物量碳含量。

土壤基础呼吸测定方法:采用经改进的室内密闭培养法^[15]。称取 20 g 新鲜土壤,调节土壤含水量至田间持水量的 60%,用通透性良好的纱布将土壤包起来悬于培养瓶上方,然后吸取 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠溶液 10 mL,迅速将培养瓶加盖密闭,于 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养 24 h,测定 CO_2 释放量,同时设一空白处理作为对照。

1.5 数据定量分析方法

选用 RDA 分析需要 2 个矩阵,一个是物种(species)数据矩阵,另一个是环境因子(environment)数据矩阵。进行分析前需将定性指标进行编码^[16],依据相关文献,植被类型可分为 5 类:1 代表天然次生林;2 代表人工灌木林;3 代表天然次生草地;4 代表农田;5 代表裸荒地。坡向可分为 2 类:1 代表南坡;2 代表北坡。另外,由于农田及人工灌木林受施肥和践踏等人为干扰活动,在一定程度上会对土壤理化性质产生一定的影响,因此,为使不同石漠化程度样地间具有可比性,故将人为干扰强度一并列入物种数据进行分析。干扰强度可分为 3 类:1 代表弱;2 代表较强;3 代表强。海拔、植被盖度和坡度按实测值进行输入。RDA 分析应用国际标准通用软件 CANOCO 4.5.1 (Microcomputer Power, Ithaca, USA) 进行,数据的统计分析通过 DPS 6.55 完成,差异间的显著性检验采用 ANOVA 分析(LSD 检验, $P < 0.05$),用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关性。

2 结果与讨论

2.1 石漠化过程中土壤容重和养分的变化

由表 2 可以看出,喀斯特石漠化过程中,与未石漠化相比,重度石漠化样地中土壤有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾及交换性镁含量分别下降了 83.7%、77.1%、66.2%、41.1%、40.1% 和 34.1%。这主要是因为石漠化过程中,地表群落退化,生境逐渐向干旱、温度变化剧烈、蓄水能力减弱的严酷生境转变,土壤养分的供给平衡被打破,使土壤成为养分供给“源”而被消耗。其中,中度石漠化样地中碱解氮及速效磷的含量仅次于未石漠化样地,这与魏亚伟等^[17]的研究结果基本一致,可能与中度石漠化(农田)每年翻垦时施入一定量的肥料有关。土壤交换性钙和全磷随石漠化过程变化并不明显,而全钾及容重的变化与石漠化方向相反,且与

未石漠化样地相比,严重石漠化样地全钾和容重反而分别增加了 68.7% 和 44.8%。这可能是因为全磷、交换性钙和全钾的含量主要取决于成土母质和土壤发育程度^[18],而与石漠化过程中地上生物量的

释归关系不大所致。另外,石漠化过程中黏粒和粉粒由于土壤侵蚀加重而流失,使得土壤粗粒化,结构分散,土壤有机碳含量的降低,是导致土壤容重增加的重要原因^[19]。

表 2 不同石漠化阶段土壤容重和养分库¹⁾

Table 2 Soil bulk density and nutrient pools at different stages of rocky desertification

测定项目	未石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	F	P
SOC/g·kg ⁻¹	52.59 ± 8.98a	32.51 ± 5.48b	21.45 ± 4.09c	17.52 ± 2.86cd	8.59 ± 0.78d	28.76	0.00
TN/g·kg ⁻¹	4.41 ± 0.37a	2.84 ± 0.46b	2.10 ± 0.33c	1.59 ± 0.20cd	1.01 ± 0.02d	50.38	0.00
AN/mg·kg ⁻¹	311.9 ± 42.8a	244.5 ± 25.4b	167.8 ± 15.7c	253.3 ± 33.1b	105.3 ± 12.6d	27.36	0.00
TP/g·kg ⁻¹	1.26 ± 0.19bc	1.01 ± 0.29c	1.69 ± 0.17ab	1.91 ± 0.06a	1.16 ± 0.39c	5.84	0.01
AP/mg·kg ⁻¹	5.50 ± 0.50a	4.43 ± 0.79abc	3.03 ± 0.25c	4.52 ± 0.93ab	3.24 ± 1.39bc	5.16	0.01
TK/g·kg ⁻¹	7.83 ± 1.48b	7.63 ± 1.68b	9.33 ± 0.36b	11.83 ± 0.60a	13.21 ± 1.62a	10.15	0.00
AK/mg·kg ⁻¹	273.0 ± 17.46a	256.1 ± 32.7a	251.0 ± 35.4a	203.8 ± 45.2ab	163.5 ± 33.3b	6.59	0.01
ACa/g·kg ⁻¹	1.23 ± 0.18ab	1.08 ± 0.10ab	1.00 ± 0.08b	1.27 ± 0.18a	1.34 ± 0.19a	3.42	0.06
AMg/mg·kg ⁻¹	273.9 ± 48.0a	273.5 ± 81.2a	126.8 ± 17.62b	208.5 ± 40.3ab	180.6 ± 23.5ab	5.02	0.02
BD/g·cm ⁻³	1.05 ± 0.07a	1.17 ± 0.05b	1.24 ± 0.02bc	1.30 ± 0.04c	1.52 ± 0.06d	33.87	0.00

1) 同一行中不同字母表示不同石漠化阶段之间的差异显著 ($P < 0.05$)

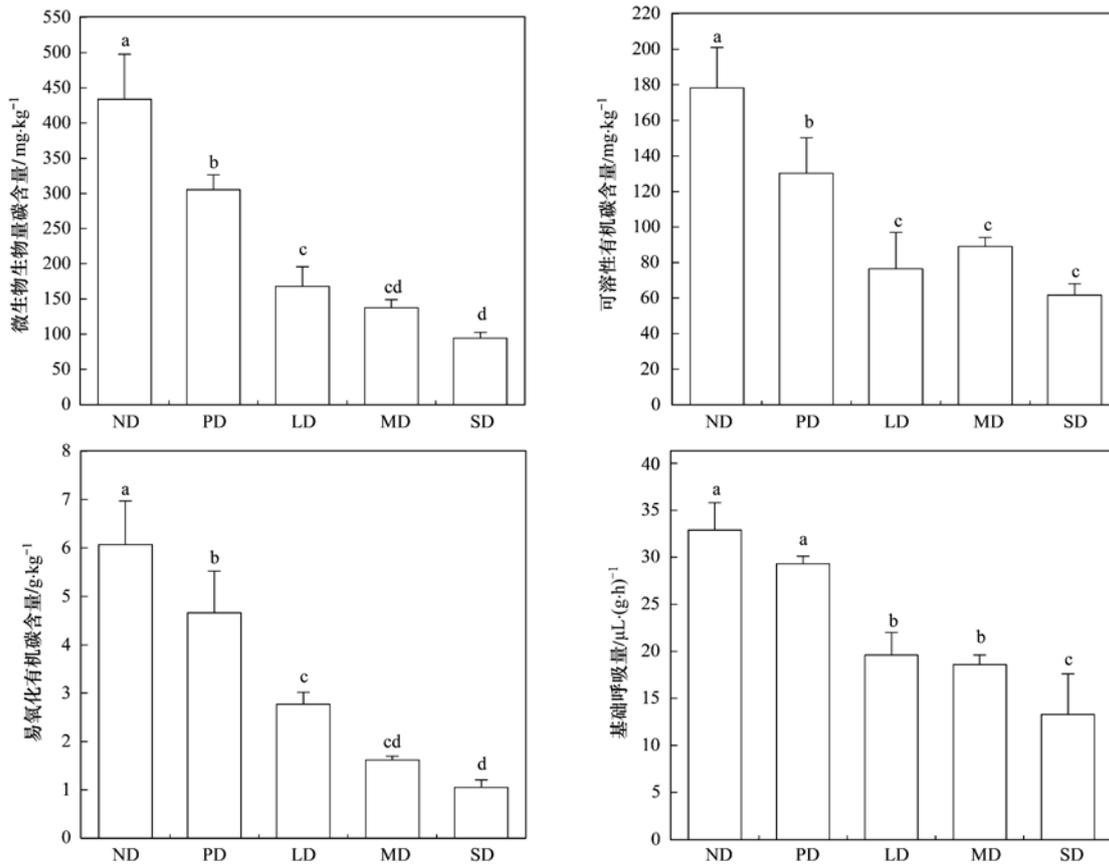
2.2 石漠化过程中土壤活性有机碳及基础呼吸的变化

土壤活性有机碳是指在一定的时空条件下受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性,且在土壤中移动较快、不稳定、易氧化、易分解、易矿化,其形态和空间位置对植物和微生物有较高活性的那部分土壤碳素^[20],主要包括微生物生物量碳、易氧化有机碳和可溶性有机碳等。土壤呼吸是表征土壤质量和肥力的重要生物学指标,它反映了土壤生物活性和土壤物质代谢的强度,尤其是基础土壤呼吸部分,反应了土壤的生物学特征和土壤物质的代谢强度^[21]。由图 1 可见,石漠化过程中土壤微生物生物量碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳和基础呼吸量分别在 94.6 ~ 433.7 mg·kg⁻¹、1.05 ~ 6.07 g·kg⁻¹、61.8 ~ 178.3 mg·kg⁻¹和 13.3 ~ 32.9 μL·(g·h)⁻¹ 范围变化,各石漠化类型间存在显著差异 ($P < 0.05$),并均以未石漠化最高,潜在石漠化次之,而以重度石漠化最低。由此可见,随着喀斯特石漠化生境恶化,不仅土壤养分总体呈下降趋势,土壤活性有机碳及基础呼吸量也随之降低,这是因为活性有机碳和基础呼吸主要来源于有机质的水解和土壤动物及微生物的活动,石漠化一方面使得有机质随细粒物质的侵蚀而损失,另一方面导致地表植被盖度降低,生境逐渐干旱,有机质来源减少,不利于土壤动物和微生物生存,从而相应降低了土壤活性有机碳含量和基础呼吸量,这也反映出土壤因子的变化与石漠化的关系十分密切。

2.3 石漠化与土壤因子的 RDA 排序分析

为了将尽可能多的把土壤因子指标结合在一起,更好地揭示喀斯特土壤因子与石漠化之间的相互关系,本研究采用冗余分析 (RDA) 方法,将研究区域中的 16 块石漠化样地作为物种 (species),将 14 项土壤因子作为环境因素 (environments),将 2 个变量组进行 RDA 分析。RDA 可将研究对象(质心表示)排序和环境因子(箭头表示)排序表示在一个图上,可以直观地显示它们之间的关系,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性,箭头连线的长度代表着某个环境因子与研究对象分布相关程度的大小,连线越长,代表这个环境因子对研究对象的分布影响越大。箭头之间的夹角越大代表着环境因子的相关性越小,夹角越小,相关性越大。箭头与排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小。

RDA 排序图显示(图 2),未石漠化样地、潜在石漠化样地和轻度石漠化样地总体与土壤有效磷、交换性镁、全氮、碱解氮、有机碳、活性有机碳及基础呼吸呈正相关,且相关性大小表现为:未石漠化 > 潜在石漠化 > 轻度石漠化,中度石漠化和重度石漠化样地与土壤交换性钙、全钾、全磷及容重的关系较为密切,而与土壤主要因子呈负相关。这表明未石漠化样地类型(天然次生林)不仅维系了良好的生境景观,并且对其覆盖下的土壤也表现出了明显的正向反馈作用,而喀斯特山区纯粹的开垦和撂荒,在一定程度上加剧了土壤质量的衰退。第一排序轴与有效磷、碱解氮、速效钾、基础呼吸、有机碳及活性有机碳呈极显著的负相关 ($P < 0.01$),第二排序轴与土壤



ND: 未石漠化, PD: 潜在石漠化, LD: 轻度石漠化, MD: 中度石漠化, SD: 重度石漠化. 下同; 误差线表示均值 ± 标准误, 不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 不同石漠化阶段土壤活性有机碳含量和基础呼吸量

Fig. 1 Soil bulk density and nutrient pools at different stages of rocky desertification

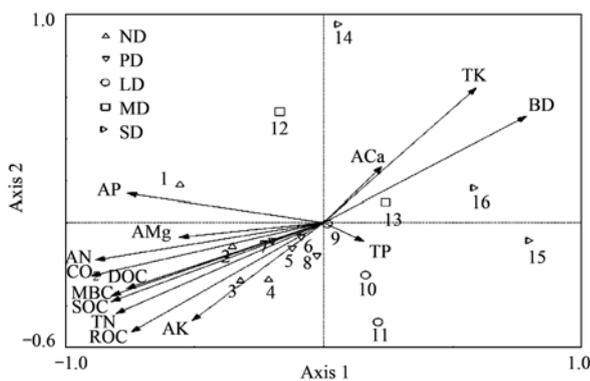


图 2 16 块样地与土壤因子的 RDA 二维排序图

Fig. 2 RDA two-dimensional ordination diagram of the 16 plots and the soil variables

全钾呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 累积解释信息量达 97.7%. 其中第一轴排序轴解释信息量达 86.0%, 第二轴排序轴为 11.7%. 由此可见, 第一排序轴可反映喀斯特地区石漠化过程中土壤因子的梯度变化特征, 这与 Zuo 等^[22]对科尔沁沙地沙漠化研

究获得的结论一致.

2.4 基于 RDA 的石漠化过程中土壤因子简化

石漠化过程驱动因素复杂, 利用过多的土壤因子表征石漠化的发展趋势, 不仅使工作程序繁冗, 还可能影响研究结果的准确性. 因此, 简化石漠化过程中土壤指示因子, 选择易测定分析, 对石漠化影响大的土壤因子, 对于喀斯特地区石漠化的判断和防治十分必要. 刘方等^[23]研究表明, 选用土壤有机碳、物理性黏粒及速效养分可以较好地指示石漠化的发展方向. 卢红梅等^[24]研究表明, 仅以土壤有机碳含量为核心的土壤理化指标评价石漠化过程中土壤质量不能反映生态系统的真实情况, 需考虑土壤的生物学特征. 在本研究中, 除受成土母质影响较大的全钾、全磷和交换性钙外, 其余土壤因子对石漠化均有良好的指示作用, 结合图 2 中土壤因子箭头连线长度以及研究过程中的简便性原则, 综合考虑下, 选取土壤有机碳、全氮、碱解氮及容重此 4 项指标作为石漠化过程土壤指示因子. RDA 分析结果显示 (图 3

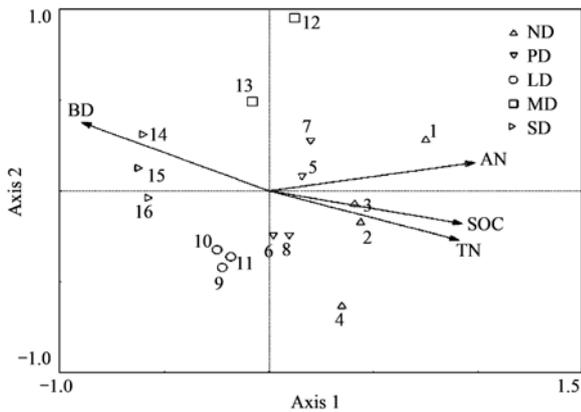


图3 16块样地与4项土壤因子RDA二维排序图
Fig. 3 RDA two-dimensional ordination diagram of the 16 plots and the 4 soil variables

和表3),利用此4项指标作为石漠化的土壤指示因子,石漠化与土壤因子的相关性仍表现为:未石漠化>潜在石漠化>轻度石漠化>中度石漠化>重度石漠化,并可解释土壤-石漠化74.4%的信息量,仅比14项土壤指标损失了23.3%。其中第一排序轴解释土壤-石漠化信息量高达69.2%,第二排序轴仅解释了5.2%的信息量,再次证明了第一排序轴可指示石漠化过程中土壤因子梯度变化的结论,表明利用土壤有机碳、全氮、碱解氮和容重此4项指标作为表征土壤-石漠化关系的敏感性土壤指示因子是可行的。

2.5 土壤因子间的相互关系

由图2和表4可以看出,土壤有机碳、易氧化有机碳、微生物生物量碳、可溶性有机碳、基础呼吸、碱解氮、全氮、有效磷、交换性镁和速效钾呈两两正相关。其中土壤有机碳与全氮的相关系数达0.96,这与土壤全氮90%存在于土壤有机质中有关^[25],全

氮与碱解氮的相关系数达0.86,表明碱解氮的含量在很大程度上受到全氮含量的影响。土壤微生物生物量碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳和基础呼吸量与土壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷和交换性镁等土壤因子含量呈正相关,表明土壤活性有机碳组分和基础呼吸可以作为判断喀斯特山区土壤肥力状况的敏感性指标,同时也可为提高土壤肥力水平和土壤培肥效果提高依据。土壤微生物生物量碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳和基础呼吸量分别与土壤有机碳均达到极显著正相关($P < 0.01$),相关系数分别高达0.97、0.90、0.88和0.88。可见,土壤有机碳含量水平在很大程度上决定了土壤活性有机碳各组分及基础呼吸量的大小。

表3 4个土壤因子指标变量的RDA分析结果¹⁾

Table 3 RDA results using four soil variables as indicators

项目	排序轴			
	SPX1	SPX2	SPX3	SPX4
有机碳	0.835 5 **	-0.116 3	0.161 2	0.007 1
全氮	0.820 1 **	-0.175 3	0.122 2	-0.030 1
碱解氮	0.887 2 **	0.100 1	-0.023 7	-0.010 3
容重	-0.804 6 **	0.242 4	0.101 5	-0.022 1
特征值	0.692	0.053	0.005	0.000
"种"-环境相关性	0.901	0.646	0.496	0.156
累积方差	69.2	74.4	75.0	75.0

1) **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$,下同

综上所述,喀斯特地区土壤各因子间相互影响,相互制约,但土壤有机碳在很大程度上制约了其他土壤养分因子的含量水平,而土壤有机碳主要来源于地上生物量的释归,因此,注重喀斯特山区地表植被的保护和生态修复,保证地表覆被状况,对于喀斯特生态系统中土壤养分的保持乃至石漠化的防治具有重要现实意义。

表4 14项土壤因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of fourteen soil variables

	SOC	TN	AN	TP	AP	TK	AK	ACa	AMg	MBC	ROC	DOC	CO ₂	BD
SOC	1.00													
TN	0.96 **	1.00												
AN	0.87 **	0.86 **	1.00											
TP	-0.22	-0.20	-0.04	1.00										
AP	0.65 **	0.64 **	0.73 **	-0.32	1.00									
TK	-0.78 **	-0.78 **	-0.67 **	-0.20	-0.28	1.00								
AK	0.46 *	0.54 *	0.45	-0.04	0.37	-0.57 *	1.00							
ACa	-0.01	-0.03	0.02	0.05	0.04	0.26	-0.38	1.00						
AMg	0.65 **	0.61 **	0.66 **	-0.26	0.44	-0.52 *	0.24	0.16	1.00					
MBC	0.97 **	0.94 **	0.85 **	-0.34	0.69 **	-0.77 **	0.45	0.00	0.67 **	1.00				
ROC	0.88 **	0.90 **	0.75 **	-0.25	0.60 **	-0.75 **	0.55 *	-0.20	0.66 **	0.91 **	1.00			
DOC	0.90 **	0.88 **	0.82 **	-0.38	0.75 **	-0.66 **	0.39	0.07	0.59 **	0.95 **	0.85 **	1.00		
CO ₂	0.88 **	0.89 **	0.86 **	-0.38	0.75 **	-0.75 **	0.60 *	-0.21	0.65 **	0.94 **	0.88 **	0.88 **	1.00	
BD	-0.84 **	-0.84 **	-0.82 **	0.05	-0.57 *	0.75 **	-0.57	0.29	-0.41	-0.85 **	-0.85 **	-0.80 **	-0.87 **	1.00

2.6 喀斯特山区人工用地植被选择探讨

在喀斯特地区,由于地表破碎,成土过程缓慢,生态系统稳定性差,人为活动(不合理利用等)是喀斯特环境石漠化的主要原因。前人研究表明,在喀斯特山区种植花椒对土壤水分及养分的保持具有积极意义^[26,27]。本研究所选取的3类人工林中,与中度石漠化的玉米地(F5)及火龙果地(F6)相比,人工种植的花椒林地(S1、S2、S3、S4)不仅保持了良好的生境景观,RDA分析结果也表明,花椒林与土壤主要养分因子的正相关性仅次于天然次生林,而玉米-红薯轮番地及火龙果园地与土壤主要养分因子呈负相关性。然而,花江喀斯特地区的水热状况,非常适合火龙果的生长,并可为当地带来良好经济收益。火龙果冠幅低下,地表裸露,雨滴可直接溅蚀地面,地表径流冲刷作用明显,易增加水土流失风险。因此,本研究建议在火龙果园地中适当植入一定的豆科牧草如苜蓿等,不仅可防止雨滴直接溅蚀地表,分散、减缓地表径流,还可增加土壤氮素含量,从而降低水土流失风险。综合考虑地上植被的生态功能及经济效益,认为花椒可作喀斯特山区农业生产或生态恢复过程中首选的植被类型,而火龙果的种植所产生的生态效应还需进一步考察,可采用较小规模示范区(坡度较小)的形式小规模种植。

3 结论

(1)随着石漠化程度的加剧,土壤有机碳、活性有机碳、全氮及速效养分流失明显,土壤容重增加,土壤基础呼吸性能减弱,表明土壤质量退化明显,植物可利用养分的数量减少,增加了喀斯特石质荒漠化的风险。

(2)RDA分析表明,随石漠化程度的加剧,除土壤全磷、全钾、交换性钙和容重外,土壤因子与石漠化的相关性逐渐降低,并且利用土壤有机碳、全氮、碱解氮及容重可解释74.4%的土壤-石漠化信息量,表明此4项指标可以作为表征土壤-石漠化关系的敏感性土壤指示因子。此外,综合考虑地上植被的生态系统功能和土壤质量水平,认为花椒可作为喀斯特石漠化山区生态恢复过程中优先考虑的植被类型。

(3)本研究利用RDA分析手段综合研究了土壤因子与石漠化之间的关系,不仅能够直观描述出土壤因子间的相互关系,而且能够区分出土壤因子对石漠化的影响程度,但研究区域只局限与小尺度空间范围,因此大尺度下的土壤因子与石漠化的关

系有待进一步研究探讨。

参考文献:

- [1] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21-29.
- [2] 龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 419-427.
- [3] 甘露, 万国江, 梁小兵, 等. 贵州岩溶荒漠化成因及其防治[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 69-74.
- [4] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical karst of south China[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1997, 108(2): 81-90.
- [5] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 115-121.
- [6] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.
- [7] 蓝安军, 熊康宁, 安裕伦. 喀斯特石漠化的驱动因子分析—以贵州省为例[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 19-23.
- [8] 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 等. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 314-320.
- [9] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 29-32, 79.
- [10] 王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 192-195.
- [11] 李阳兵, 王世杰, 容丽. 关于喀斯特石漠和石漠化概念的讨论[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 689-695.
- [12] 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.
- [13] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 10-13.
- [14] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [15] 孙波, 车玉萍, 林心雄. 测定土壤有机物质中¹²C及¹⁴C分解速率的密闭培养法[J]. 土壤, 1997, 29(1): 51-53.
- [16] 刘世梁, 郭旭东, 连纲, 等. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析——以横山县为例[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 105-108.
- [17] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 人为干扰对桂西北喀斯特生态系统土壤有机碳、氮、磷和微生物量剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 164-169.
- [18] 杨珊, 何寻阳, 苏以荣, 等. 岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1596-1602.
- [19] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4306-4316.
- [20] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1412-1417.
- [21] 李国辉, 陈庆芳, 黄懿梅, 等. 黄土高原典型植物根际对土

- 壤微生物生物量碳、氮、磷和基础呼吸的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(4): 976-983.
- [22] Zuo X A, Zhao H L, Zhao X Y, *et al.* Vegetation pattern variation, soil degradation and their relationship along a grassland desertification gradient in Horqin Sandy Land, northern China [J]. *Environmental Geology*, 2009, **58**(6): 1227-1237.
- [23] 刘方, 王世杰, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 639-644.
- [24] 卢红梅, 王世杰. 喀斯特石漠化过程对土壤活性有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2009, **29**(1): 12-17.
- [25] 何电源. 中国南方土壤肥力与栽培作物施肥[M]. 北京: 科技出版社, 1994. 63-74
- [26] 何腾兵, 刘元生, 李天智, 等. 贵州喀斯特峡谷水保经济植物花椒土壤特性研究[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(2): 55-59.
- [27] 彭熙, 钱晓刚, 杨滨. 贵州省喀斯特峡谷花椒林地土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报, 2007, **27**(6): 170-173.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjcx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjcx.ac.cn

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 Yunmeng 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 Fluorescence Characteristics 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-cao, 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