

# 贵阳次生林土壤有机碳含量对土壤生物学活性的影响

彭艳<sup>1</sup>, 李心清<sup>2</sup>

1. 贵州民族学院发展规划处, 贵阳 550025

2. 中国科学院地球化学研究所; 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

**摘要** 次生林是喀斯特森林生态系统的组成部分, 未来的森林可能就是次生林。土壤有机碳(SOC)是土壤有机质的重要组成, 其含量是土壤肥力的重要指标, 对土壤生物学活性有重要影响。为了解次生林土壤有机碳对土壤生物学活性的影响, 在贵阳市郊设置灌丛、女贞林、马尾松林 3 个样点, 于 2008 年 6 月—2009 年 5 月进行为期 1a 的采样, 并与农田土壤进行对比分析。结果显示, 灌丛 SOC 含量最高, 基于 SOC/g 来看, 其含 C 底物的利用率却最低, 土壤生化过程弱, 植物和微生物可利用的营养物质较少; 女贞林 N 转化速率较快, 林下具有反硝化能力的菌群的酶丰富, 气态 N 流失严重; 马尾松林基于每克 SOC 的土壤有机残体分解的速度快、强度高, 微生物活性、土壤酶活性高, 土壤生化过程强烈, 气态氮流失率最低。总的来说, 研究区域土壤 SOC 含量限制了微生物群落规模, 对灌丛土壤酶活性影响较大, SOC 含量也间接地影响了微生物体 N 转化速率和有机物的分解速率, 但对反硝化作用的影响不显著; 建议在土壤恢复初期优先让草或灌木生长, 改善立地条件, 之后再选择适宜的树种按照针阔混交模式植树造林。

**关键词** 有机碳; 生物学活性; 反硝化作用; 土壤酶活性

**中图分类号** S154.2, S718.5

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.14.004

## Influence of Soil Organic Carbon on Soil Biological Activities Among Secondary Forests of Guiyang City

PENG Yan<sup>1</sup>, LI Xinqing<sup>2</sup>

1. Development and Planning Office, Guizhou University for Nationalities, Guiyang 550025, China

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

**Abstract** The secondary forest, as an integral part of Karst forest ecosystem, may be the future of a forest. The soil organic carbon is an important part of the soil organic matter and its content has a major impact on soil biological activities and is also an important indicator of the soil fertility. To understand the effects of soil organic carbon on soil biological activities, three sample plots are taken, including a shrub, a *Ligustrum lucidum* forest and a pine forest and they are compared with the tilled field in the suburbs of Guiyang City during the sampling time (June, 2008–May, 2009). The data show that the shrub is characterized by low substrate carbon utilization, weak biochemical processes and less available nutrients of plants and microbes based on per gram soil organic carbon, although with the highest soil organic carbon among the sample plots. The *Ligustrum lucidum* forest is marked by high nitrogen cycle rate, rich in denitrification enzyme and serious gaseous nitrogen loss, while, the pine forest is characterized by high decomposition speed and strength, high soil microbial and enzyme activities, strong soil biochemical processes and low gaseous nitrogen loss based on per gram soil organic carbon. Generally speaking, the organic carbon content limits the size of soil microbial communities, affects soil enzyme activities in

收稿日期: 2010-10-29; 修回日期: 2011-04-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-306-3); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB403205); 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划; 贵州民族学院人才科研基金资助项目

作者简介: 彭艳, 博士研究生, 研究方向为环境地球化学, 电子信箱: pengyan0502@mails.gyig.ac.cn; 李心清(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S130010216S), 教授, 研究方向为环境地球化学, 电子信箱: xingqinglee@hotmail.com



shrubs, influences the microbial nitrogen conversion rate and organic matter decomposition rate indirectly but has no significant effects on denitrification in the study area. Therefore, the most appropriate way to the remediation of degraded desertification soil is to allow the natural plant communities to develop in order to improve site conditions in the early stage of the soil remediation and then to select appropriate tree species with the mixed model of coniferous-broadleaved species.

**Keywords** soil organic carbon; soil biological activity; denitrification; soil enzyme activity

0 引言

喀斯特地区生态环境脆弱, 人口压力和土地利用方式的不合理使土壤严重退化, 目前贵阳市区原生植被已全部被破坏, 现有植被均为次生植被。喀斯特次生林是喀斯特森林生态系统的组成部分, 未来的森林可能就是次生林<sup>[1]</sup>, 而对喀斯特次生林尤其是人工林养分循环和生物学活性的研究相对薄弱。土壤有机碳(SOC)是土壤肥力的重要指标, 土壤有机质的重要组成部分, 土壤肥力的高低不仅决定于土壤库容大小, 还取决于流通快慢, 需要相适应的物质转化动力, 这种动力主要来自氧化还原过程、微生物活动和酶活性<sup>[2]</sup>。土壤有机质组成和稳定性控制着呼吸和土壤酶活性<sup>[3]</sup>, 生物肥料能提高养分、物质代谢和根圈酶活性<sup>[4]</sup>。土壤生物学活性对土壤变化高度敏感, 近年来越来越受到重视<sup>[5-7]</sup>, Ajwa等<sup>[8]</sup>认为微生物生物量和土壤酶活性可以被用作生态稳定的灵敏指示物。此外, 在对西南喀斯特地区生态环境生物地球化学循环的研究中发现养分大量流失, 但何种过程和机制制约营养元素的流失并不清楚<sup>[9]</sup>。Maier等<sup>[10]</sup>认为, 在C源受限制、电子受体丰富的环境中, 反硝化作用将成为优先过程。本文从土壤微生物生物量、微生物呼吸、土壤酶活性和气态N流失率等研究SOC含量对次生林土壤生物学活性的影响, 并与农田进行对比分析, 以期对喀斯特地区退化生态系统恢复、重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样本的采集与处理

贵阳地理位置处于 106° 27' 20"E—107° 03' 00"E, 26°11'00"N—26°54'20"N, 位于云贵高原东斜坡地带, 地形、地貌走势大致呈东西向延展, 地势起伏较大, 南北高, 中部低, 海拔 506—1762m, 喀斯特地貌大量分布, 主要的土壤类型有石灰土、黄壤和水稻土等, 属于中亚热带季风湿润区, 年均温 15.3℃, 年均降雨量 1200mm。贵阳市辖六区一市三县, 城区面积约 495km<sup>2</sup>, 现有林地面积 18.3 万 km<sup>2</sup>, 森林覆盖率为 31.7%。

以植被、土壤类型、土地利用方式和人为干扰等因素为指标在贵阳市郊选择农田、灌丛(火烧扰动后生长 0—1a)、女贞林(约 10a)和马尾松林(约 30a)进行研究, 详见表 1。农田样地约 10m×3m, 次生林样地约 10m×10m, 灌丛位于坡度约为 20°的山腰平地。2008 年 6 月—2009 年 5 月每月一次按 S 形法在每个样地内随机布设 4 个点, 采集 0—10cm 的表层土壤, 并混合成一个土壤样品。土壤装入自封袋保存带回实验室后拣出树根、石头等, 立即过筛, 充分混匀后于 4℃保存。采样期间土壤温度依次为春季 15.4℃, 夏季 23.1℃, 秋季 19.2℃, 冬季 9.1℃, 2008 年 8 月观测到最高土温 24.3℃, 2009 年 1 月观测到最低土温 3.8℃。

表 1 实验样地概况  
Table 1 Experimental sites description

| 样地                | 地理位置                           | 土壤类型 | pH 值 | 土壤充水孔隙度<br>(WFPS)/% | 主要植被                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------|--------------------------------|------|------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 农田                | 26°32'43.4"N,<br>106°46'43.5"E | 石灰土  | 7.2  | 48.9                | 玉米 ( <i>Zea mays</i> L.), 豆类 (beans)                                                                                                                                                                                                   |
| 灌丛                | 26°32'32.2"N,<br>106°46'22.6"E | 石灰土  | 6.7  | 60.1                | 蒿类 ( <i>Artemisia</i> sp.), 蕨类 ( <i>Pteridium Scop.</i> ), 女贞 ( <i>Ligustrum lucidum</i> ), 五节芒 ( <i>Miscanthus floridulus</i> ), 黄茅 ( <i>Heteropogon contortus</i> ) 等                                                                |
| 女贞纯林<br>(简称女贞林)   | 26°32'35.7"N,<br>106°46'42.0"E | 石灰土  | 6.5  | 61.1                | 女贞 ( <i>Ligustrum lucidum</i> ), 小果蔷薇 ( <i>Rosa cymosa</i> ), 蒿类 ( <i>Artemisia</i> sp.), 荩草 ( <i>Arthraxon hispidus</i> ), 五节芒 ( <i>Miscanthus floridulus</i> ), 黄茅 ( <i>Heteropogon contortus</i> ), 百合 ( <i>Lilium brownii</i> .) 等 |
| 马尾松纯林<br>(简称马尾松林) | 26°32'41.3"N,<br>106°46'46.9"E | 石灰土  | 6.0  | 72.6                | 马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ), 野桐 ( <i>Mallotus tenuifolius</i> ), 小果蔷薇 ( <i>Rosa cymosa</i> ), 云南鼠刺 ( <i>Itea yunnanensis</i> ), 蒿类 ( <i>Artemisia</i> sp.) 等                                                                       |

1.2 分析方法

土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)测定, 采用 0.1mol/L HCl 浸泡 24h 去除土壤无机碳后, 在元素分析仪(PE2400II)上测定。

土壤微生物生物量碳(SMBC)、微生物量氮(SMBN)采用氯仿熏蒸提取-UV<sub>280nm</sub>法测定, 并基于 UV 的回归方程进行换算<sup>[11]</sup>。土壤微生物呼吸(MR)采用改进的密闭室法<sup>[11]</sup>。



反硝化酶活性(DEA)测定采用  $C_2H_2$  抑制-瓶培养法<sup>[12]</sup>,潜在反硝化作用(Dp)与 DEA 测定类似,取 5g 过 2mm 筛的鲜土放入密闭瓶,真空泵抽气 5min 后充入 99.99%He 气和  $C_2H_2$  (>10kPa),加入 5mL 溶液(250mg(N)/kg(soil)和 250mg(C)/kg(soil)),于 30℃ 恒温水浴箱中培养,1、5h 分别抽取顶空气体 5mL 至已抽真空的密闭瓶中。

土壤蔗糖酶和淀粉酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土壤脲酶活性采用苯酚钠比色法测定;土壤蛋白酶采用茚三酮比色法测定;土壤过氧化氢酶活性采用  $KMnO_4$  滴定法测定。具体方法参见文献[13]。

### 1.3 数据分析

数据采用 Excel 2003 计算处理,用  $\bar{x}+s$  表示,采用 SPSS 13.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分含量分析

研究区域 SOC 变幅为 26.8—57.9g/kg,不同植被类型间的变异系数为 24.0%,按灌丛→女贞林→马尾松林→农田的

顺序依次降低,其年均值分别为 51.4,46.7,36.1,31.9g/kg,LSD 最小显著差法分析结果表明,农田、马尾松林与灌丛、女贞林差异显著( $P<0.05$ )。土壤 TN 含量在 2.5—5.0g/kg 之间,相同植被类型不同季节间的变异系数在 11.4%—17.1%之间,不同植被类型之间的变异系数为 23.0%,植被间差异较大。

### 2.2 土壤微生物活性分析

图 1 给出了 4 个研究样地的土壤微生物生物量 C、N 差异。由图 1(a)可知,基于 soil/g 的 SMBC 在不同植被间差异显著,表现为灌丛>女贞林>马尾松林>农田,其年均值依次为  $756.40 \pm 67.08$ ,  $663.52 \pm 40.34$ ,  $540.43 \pm 63.81$ ,  $439.63 \pm 41.86$ mg/kg;基于 SOC/g,研究区域 SMBC 差异不显著,即单位土壤 SOC 上土壤微生物群落大小无显著差异。

微生物量自身含有一定数量的 C、N 等营养元素,可以看作是一个有效养分的储备库,土壤微生物体 N 能够表征土壤的供 N 能力。由图 1(b)可知,基于 soil/g 研究区域 SMBN 介于 76.66—176.89mg/kg,表现为灌丛>人工纯林>农田,三者差异显著;基于 SOC/g,灌丛与农田、马尾松林之间差异不显著,女贞林则显著低于其他 3 个样点。

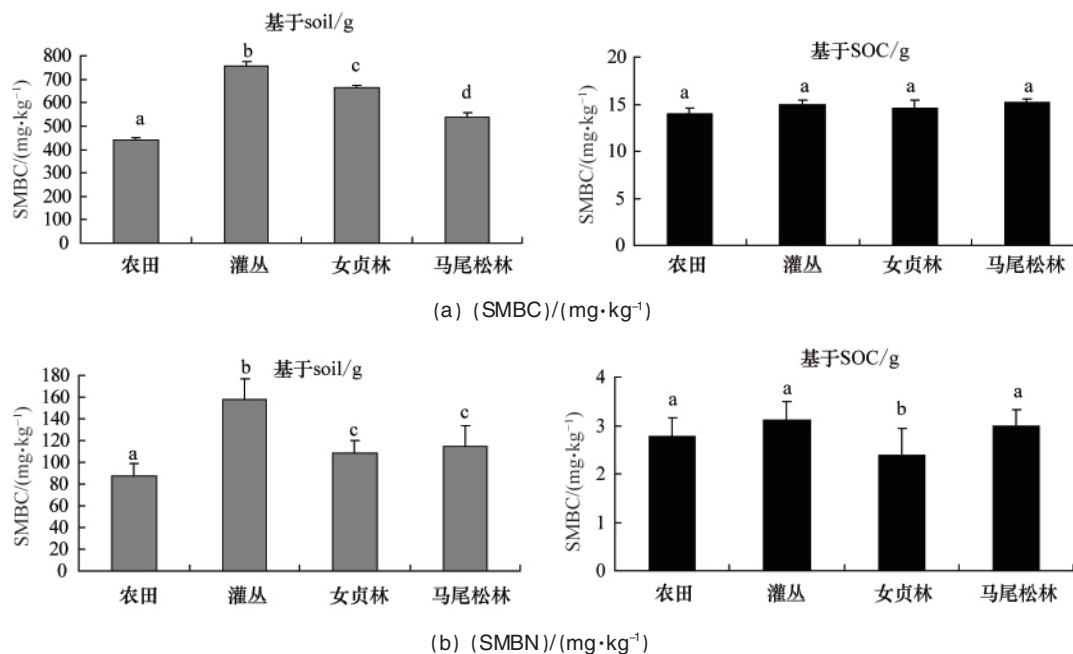


图 1 基于 soil/g 和 SOC/g 土壤微生物量差异

Fig. 1 Difference of microbial biomass based on per gram soil and per gram organic carbon

土壤微生物呼吸(MR)是指示土壤微生物活性的重要参数,常用于判断土壤有机残体的分解速度和强度。图 2 给出了不同植被类型下土壤微生物呼吸速率的差异。由图 2 可知,基于 soil/g,农田微生物呼吸速率( $(0.54 \pm 0.22)\mu g(CO_2-C)/(g \cdot h)$ )与次生林差异显著,有机残体分解慢,可利用基质少,微生物群落相对较小;灌丛( $(0.98 \pm 0.35)\mu g(CO_2-C)/(g \cdot h)$ )和马尾松林( $(0.96 \pm 0.32)\mu g(CO_2-C)/(g \cdot h)$ )稍高于女贞林( $(0.83 \pm 0.41)\mu g(CO_2-C)/(g \cdot h)$ ),次生林之间无显著性差异;但基于 SOC/g,马尾松林却显著高于其他样地,有机残体分解

的速度快、强度高,微生物活性高。

### 2.3 土壤反硝化作用差异

反硝化作用对 N 循环的贡献归结于反硝化菌群的大小,反硝化酶活性能反映采样时样品中具有反硝化能力菌群的酶的丰度<sup>[14]</sup>,能作为石漠化地区林地土壤气态 N 流失率的指示器<sup>[15]</sup>。图 3 给出了各样地 DEA 和 Dp 的差异。由图 3(a)可以看出,基于 soil/g,DEA 年均值范围为 144.08—549.58ng( $N_2O-N$ )/(g·h),与 Oehler 等测得的反硝化酶活性范围(76.48—530.63ng( $N_2O-N$ )/(g·h))<sup>[16]</sup>相符,表现为女贞林>灌

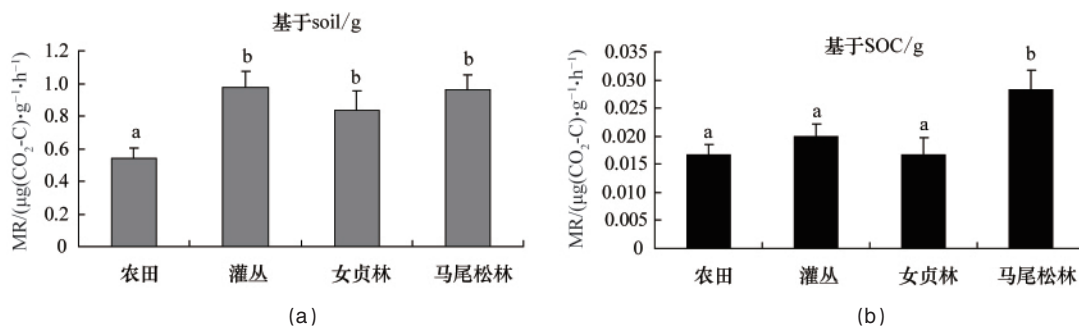


图2 基于 soil/g(a) 和 SOC/g(b) 的土壤微生物呼吸差异

Fig. 2 Difference of microbial respiration based on per gram soil and per gram organic carbon

丛>农田>马尾松林,其年均值依次为  $549.58\pm543.38, 425.97\pm348.14, 231.81\pm125.8, 144.08\pm96.22\text{ng}(\text{N}_2\text{O-N})/(\text{g}\cdot\text{h})$ , 女贞林与农田、马尾松林差异显著;基于 SOC/g, 女贞林 DEA 也高于其他 3 个样地, 马尾松林最低。

由图 3(b)可知, 基于 soil/g 的次生林地 Dp 表现为灌

丛>女贞林>农田>马尾松林, 灌丛约为马尾松林的 8.4 倍, 土壤微生物群落的潜在反硝化作用最强, 但灌丛 Dp 与农田、女贞林之间差异不显著;LSD 最小差法表明, 马尾松林基于 soil/g 和 SOC/g 的 Dp 均显著低于其他样地, 潜在 N 流失率低。

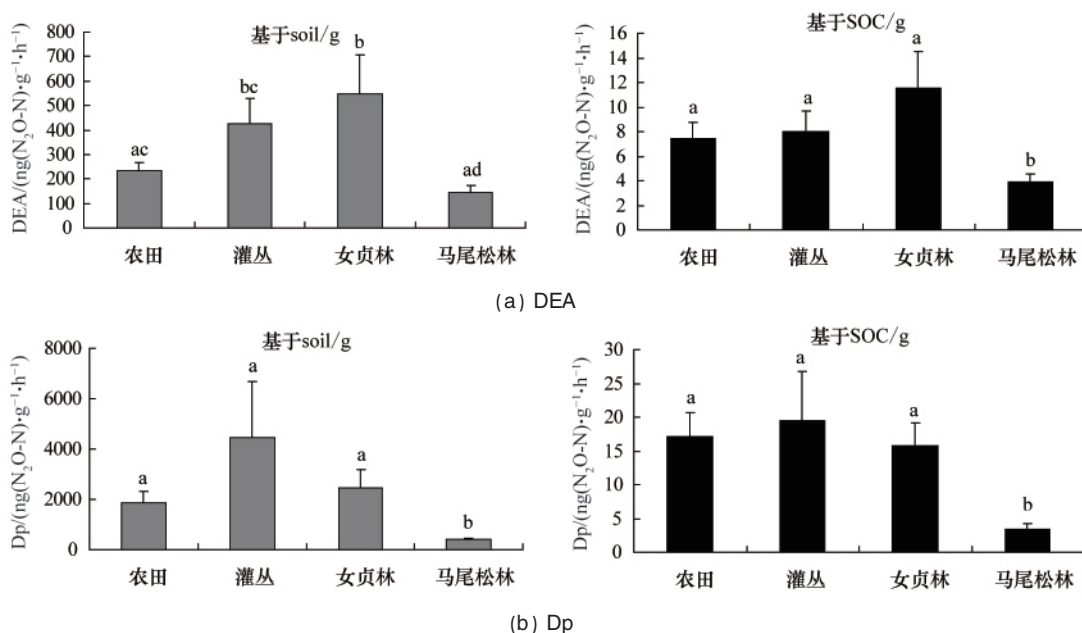


图3 基于 soil/g 和 SOC/g 的土壤反硝化作用差异

Fig. 3 Difference of denitrification based on per gram soil and per gram organic carbon

## 2.4 土壤酶活性差异

土壤有机质含量显著影响着土壤酶的活性,是土壤中酶促底物的主要供源,土壤肥力的主要物质基础<sup>[17]</sup>。土壤酶活性能比土壤有机质更早地反映出管理措施和环境因子引起的土壤生物学和生物化学的变化<sup>[6]</sup>,其环境敏感性可被用作土壤变化的早期预警生物指标。图 4 给出了 4 个样地 5 种酶活性的差异。蔗糖酶主要来自植物的根,由图 4(a)可知,基于 soil/g 的蔗糖酶活性依次为马尾松林>女贞林>灌丛>农田,随植被生长年限的增加而增加;基于 SOC/g,灌丛蔗糖酶活性显著低于马尾松林。

土壤淀粉酶来自植物的根和微生物,可诱导生成。由图 4(b)可知,基于 soil/g 的淀粉酶活性依次为女贞林>农田>马尾

松林>灌丛;基于 SOC/g,灌丛淀粉酶活性显著低于其他样地。

土壤脲酶是参与土壤生态系统 N 循环的重要酶类之一,主要来源于微生物,在林木生长过程中的养分转化方面起着基础功能的作用<sup>[18]</sup>。由图 4(c)可知,基于 soil/g 的脲酶活性依次为灌丛>女贞林>农田>马尾松林,灌丛土壤中可溶性有机氮(SON)转化最快,但不同植被间差异不显著;基于 SOC/g,农田脲酶活性高于次生林,单位 SOC 上含 N 有机物降解速度快,但不同植被间差异仍不显著。

土壤蛋白酶活性常用来表征土壤 N 素的供应程度<sup>[9]</sup>。由图 4(d)可知,基于 soil/g 的蛋白酶活性年均值介于 1.40—1.86 ( $\text{NH}_2\text{-N}$ )mg/g,依次为女贞林>灌丛>马尾松林>农田,女贞林与农田差异显著,农田土壤含 N 有机物降解速度慢,土壤 N 素供

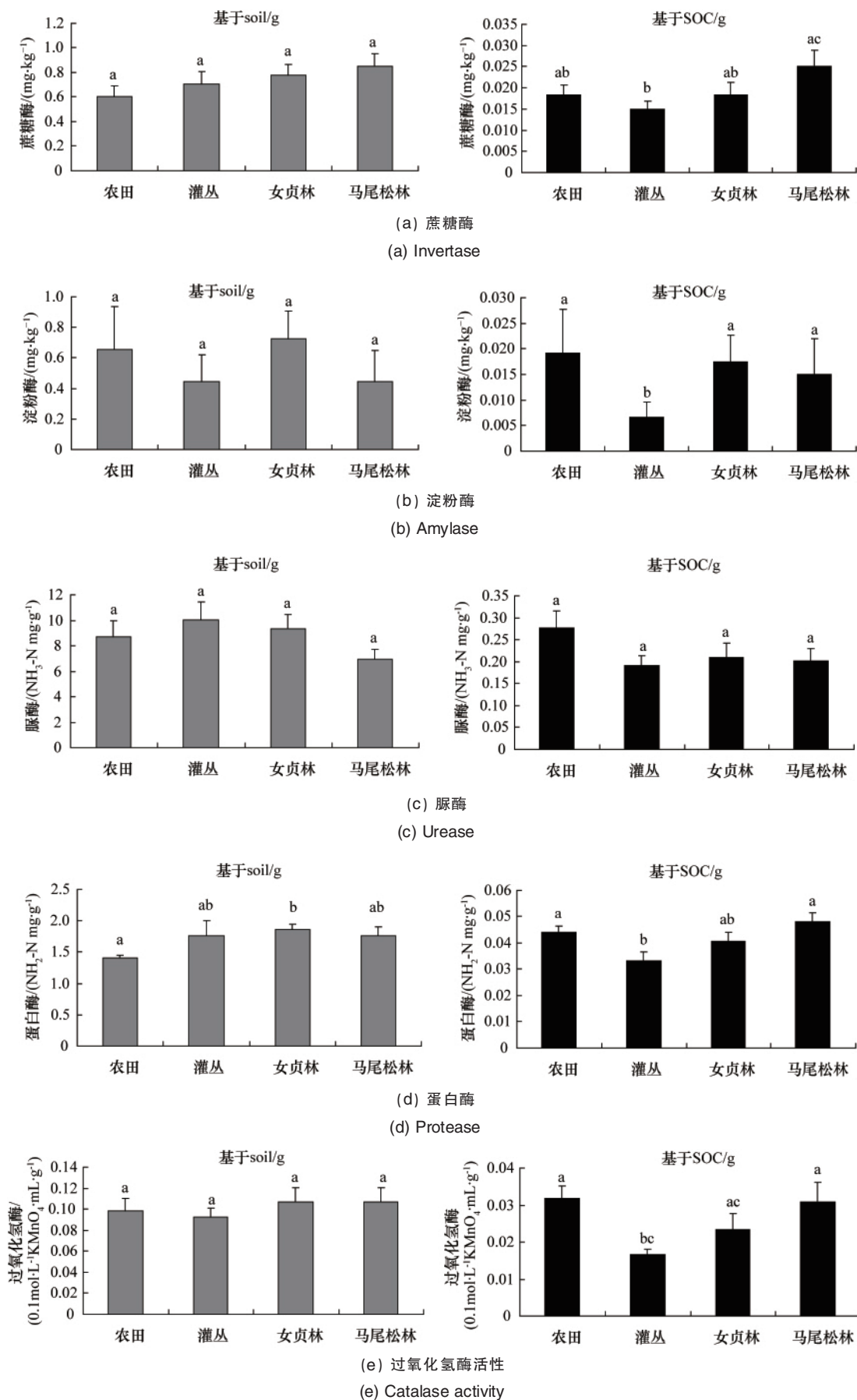


图 4 基于 soil/g 和 SOC/g 的土壤酶活性差异

Fig. 4 Difference of soil enzyme activities based on per gram soil and per gram organic carbon

应能力较弱;基于 SOC/g,则表现为灌丛土壤蛋白酶显著较低。

土壤过氧化氢酶有利于防止其对生物体的毒害作用,其活性表征土壤腐殖化强度和有机质积累程度<sup>[20]</sup>,在一定程度上反映土壤生物化学过程的氧化还原能力。由图 4(d)可知,基于 soil/g 的过氧化氢酶活性年均值为 0.09—0.11 0.1mol·L<sup>-1</sup> (KMnO<sub>4</sub>)·mL·g<sup>-1</sup> 之间,依次为女贞林=马尾松林>农田>灌丛,不同植被间差异不显著;基于 SOC/g,则表现为灌丛显著低于马尾松林和农田。

## 2.5 Pearson 相关分析

表 2 给出了研究区域土壤养分与生物学活性间的 Pearson 相关分析。SMBN 与基于 SOC/g 的土壤脲酶、蛋白酶呈显著负相关( $r=0.300,P<0.05$ ),即基于 SOC/g 的脲酶、蛋白酶活性越高,微生物体 N 越低,微生物矿化有机含氮物而非

转化为生物体 N。由表 2 可知,DEA 与脲酶呈显著正相关,Dp 与淀粉酶显著相关,与脲酶呈极显著正相关,说明土壤酶尤其是脲酶对反硝化作用引起的气态 N 流失有重要影响。脲酶活性的增强使得土壤中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>不断累积,硝化速率加快,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量与 DEA 的强相关关系 ( $r=0.464,P<0.01$ )(待发表),表明氮的积累有利于反硝化菌群的增长,并进一步影响潜在反硝化作用。

酶促反应时不仅有专一性,也存在一些共性。由表 2 可知,土壤酶蔗糖酶与淀粉酶呈极显著正相关,与脲酶、蛋白酶和过氧化氢酶呈显著正相关;淀粉酶与脲酶、过氧化氢酶均呈极显著正相关。从蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、蛋白酶之间的关系中得出,土壤含 N 有机化合物的转化与蔗糖酶、淀粉酶的转化是相互影响的,存在着相互刺激机制。

表 2 研究区域土壤养分、生物学活性 Pearson 相关分析

Table 2 Pearson correlation analysis of soil nutrients and biological activities in study area

|      | SOC | SMBC   | SMBN   | MR     | DEA    | Dp     | 蔗糖酶   | 淀粉酶    | 脲酶     | 蛋白酶    |
|------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| SOC  | 1   | .813** | .687** | .321*  | .479** | .411** | .043  | -.038  | .223   | .324*  |
| SMBC |     | 1      | .891** | .389** | .410*  | .344*  | .183  | -.047  | .164   | .377** |
| SMBN |     |        | 1      | .348*  | .222   | .291*  | .119  | -.129  | .099   | .253   |
| MR   |     |        |        | 1      | .178   | .224   | .285* | .100   | -.022  | .256   |
| DEA  |     |        |        |        | 1      | .592** | .250  | .165   | .339*  | .218   |
| Dp   |     |        |        |        |        | 1      | .260  | .308*  | .375** | .117   |
| 蔗糖酶  |     |        |        |        |        |        | 1     | .589** | .286*  | .311*  |
| 淀粉酶  |     |        |        |        |        |        |       | 1      | .692** | .021   |
| 脲酶   |     |        |        |        |        |        |       |        | 1      | .124   |
| 蛋白酶  |     |        |        |        |        |        |       |        |        | 1      |

注:\*\*为 0.01 水平显著;\*为 0.05 水平显著。

Notes: \*\*, significant at 0.01 level; \*, significant at 0.05 level.

## 3 讨论

### 3.1 喀斯特地区森林土壤 SOC 含量分析

茂兰原始森林 SOC 含量在 40.1—203.5g/kg 之间<sup>[21]</sup>,明显高于研究区域(26.8—57.9g/kg)。喀斯特原生林内润湿、富钙的土壤环境、强烈的微生物活动使有机物质不断降解形成腐殖质,石灰土多分布于坡面地表,不同部位、不同微地域形态内土壤遭受侵蚀的程度不同,使其 SOC 具有高度的变异性<sup>[9]</sup>。与同样发育于贵州石灰岩的棕黄壤玉米地<sup>[22]</sup>相比,研究区域农田(玉米地)的 SOC 含量高于棕黄壤(21.0g/kg),也表明石灰土上的玉米地土壤养分含量较棕黄壤丰富。

对贵州其他地区的研究显示,不同植被类型下土壤有机质含量范围为 87.9—198.8g/kg (阔叶林地)、32.8—147.5g/kg (灌木林地)、38.1—84.3g/kg (灌丛草地)和 17.4—33.9g/kg (稀疏草地)<sup>[21]</sup>,研究区域次生林土壤有机质含量则介于 50.1—99.8g/kg(SOC 含量×1.72),表现为灌丛、人工林高于农田,人工阔叶林高于人工针叶林。灌丛土壤有机质含量(78.3—99.8g/kg)略高于贵州其他地区的灌丛草地,在灌木林地的含量范围内。

土壤中 SOC 与 TN 的比值多介于 10:1—28:1,与土壤利用方式、耕作、施肥和土壤性质等有密切关系,能反映土壤 SOC 的累积与分解状况。研究区域土壤 SOC/TN 值较低(<15:1),表现为土壤 SOC 的损失。

### 3.2 土壤 SOC 含量对微生物活性的影响

基于 soil/g,SMBC 表现为各样地间差异显著,灌丛最高(图 1(a))。灌丛高 SMBC 可能与火烧扰动后灰分沉积、根与微生物死亡、SON 矿化增强等因素造成的 N 有效性增加及斜坡条件有关<sup>[23]</sup>。对太行山石灰岩山地的研究也表明灌丛土壤微生物数量和微生物量均大大超过其他植被类型,落叶阔叶林和针阔混交林微生物量也高于针叶纯林和针叶混交林<sup>[24]</sup>。而基于 SOC/g,SMBC 则无显著差异,土壤 SOC 含量限制了微生物群落规模,灌丛土壤浅表层有较多的根系及其分泌物,为土壤微生物提供了丰富的能源物质,光合产物主要集中在该区域,使得灌丛土壤有机质积累较快,刘满强等<sup>[25]</sup>认为凋落物的质量和数量是林地微生物生物量的决定因子。

SMBN 研究也有类似结果,基于 soil/g 表现为灌丛高于人工纯林和农田,基于 SOC/g 则表现为除女贞林外各样地差异

不显著(图 1(b)),单位土壤 SOC 上女贞林的 SMBN 转化速率高于其他样地,参与调控土壤 N 循环的对应的微生物的数量较多,土壤 SOC 含量影响了微生物体 N 的转化速率。

基于 soil/g, 马尾松林土壤微生物呼吸速率与其他次生林无显著差异,基于 SOC/g 则表现为显著高于其他样地(图 2),即单位 SOC 上马尾松林土壤有机残体分解快,微生物活性高。

### 3.3 SOC 含量对反硝化作用的影响

由图 3 可知,土壤 SOC 含量对研究区域土壤反硝化作用影响不显著,均表现为女贞林 DEA 最高,马尾松林最低,说明女贞林下具有反硝化能力的菌群的酶最丰富,气态 N 流失严重;马尾松林具有反硝化能力菌群的酶的丰度显著低于其他 3 个样地,气态 N 流失率低。对土壤潜在反硝化作用的研究也表明土壤 SOC 的影响不显著,总体上灌丛潜在气态 N 流失较高,马尾松林则显著低于其他样地。

### 3.4 SOC 含量对土壤酶活性的影响

土壤 SOC 含量对土壤酶活性的影响各异。对与 C 循环有关的蔗糖酶、淀粉酶来说,土壤 SOC 含量对灌丛影响较大,使得灌丛明显低于其他样地,与马尾松林有显著差异。野外观察到生长近 30a 的马尾松林根系较女贞林、灌丛和玉米粗大,根际分泌物多,其胞外酶在土壤中大量累积能使蔗糖酶活性增强;人工林土壤对 C 的转化能力强于自发恢复的灌丛,阔叶林高于针叶林,阔叶林的枯落物比针叶林易分解,SOC 和 SMB 的增加有利于淀粉酶的累积,虽然灌丛 SOC、SMBC 最高,但其枯落物、根际分泌物较少,土壤中累积的淀粉酶相应较少。

对与 N 循环有关的脲酶、蛋白酶来说,没有发现土壤 SOC 对脲酶活性的显著影响,但对灌丛土壤蛋白酶影响较大,单位 SOC 上灌丛土壤的 N 素供应能力显著低于农田和马尾松林。基于 SOC/g,灌丛土壤过氧化氢酶活性也显著低于马尾松林和农田,单位 SOC 上马尾松林和农田土壤的腐殖化强度、氧化还原能力较自发恢复的灌丛高,土壤积累了较多的有害物质。

总体来看,4 个样地基于 soil/g 的土壤酶活性各异,而基于 SOC/g,蔗糖酶、蛋白酶活性均按马尾松林→农田→女贞林→灌丛的顺序依次减弱,人工针叶纯林高于阔叶纯林,人工林高于自然恢复的灌丛;淀粉酶、脲酶活性则按农田→女贞林→马尾松林→灌丛的顺序依次减弱,农田高于次生林,人工林高于自然恢复的灌丛。次生林中马尾松林基于 SOC/g 的土壤酶活性相对较高,土壤生化过程强烈;灌丛的土壤酶活性低于农田和人工林,尽管灌丛土壤 SOC 含量最高,其含 C 底物的利用率却最低,土壤生物化学过程的强度弱,植物和微生物可利用的营养物质较少。

## 4 结论

土壤 SOC 含量限制了研究区域的微生物群落规模,影响了土壤酶活性尤其是灌丛的土壤酶活性,但对反硝化作用的影响不显著。基于 SOC/g 的脲酶、蛋白酶活性越高,微生物体

N 越低,微生物矿化有机含 N 物而非转化为生物体 N。灌丛土壤 SOC 含量最高,但含 C 底物的利用率最低,植物和微生物可利用的营养物质较少;女贞林 N 转化速率较快,气态 N 流失严重;马尾松林基于 SOC/g 的土壤有机残体分解速度快,生物学活性高,气态 N 流失率低。建议在石漠化治理初期让灌丛先生长,待有机质积累到一定程度再采用针阔混交模式进行植树造林。

### 参考文献 (References)

- [1] Quesada M, Sanchez-Azofeifa G A, Alvarez-Añorve M, *et al.* Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258 (6): 1014–1024.
- [2] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 1990.  
Chen Enfeng. Material base of soil fertility and its regulation[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [3] Leinweber P, Jandl G, Baum C, *et al.* Stability and composition of soil organic matter control respiration and soil enzyme activities [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(6): 1496–1505.
- [4] Aseri G K, Jain N, Panwar J, *et al.* Biofertilizers improve plant growth, fruit yield, nutrition, metabolism and rhizosphere enzyme activities of Pomegranate (*Punica granatum* L.) in Indian Thar Desert [J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 117(2): 130–135.
- [5] 赵中秋, 后立胜, 蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨 [J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 185–189.  
Zhao Zhongqiu, Hou Lisheng, Cai Yunlong. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 185–189.
- [6] 孙波, 赵其国. 土壤质量与持续环境 III. 土壤质量评价的生物学指标 [J]. 土壤, 1997, 29(5): 225–234.  
Sun Bo, Zhao Qiguo. *Soils*, 1997, 29(5): 225–234.
- [7] 路鹏, 苏以荣, 牛铮, 等. 土壤质量评价指标及其时空变异 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 190–194.  
Lu Peng, Su Yirong, Niu Zheng, *et al.* *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(4): 190–194.
- [8] Ajwa H A, Dell C J, Rice C W. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tallgrass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(5): 769–777.
- [9] 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 等. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势[J]. 地学前缘, 2009, 16(6): 1–12.  
Liu Congqiang, Lang Yunchao, Li Siliang, *et al.* *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 1–12.
- [10] Maier R M, Pepper L L, Gerba C P. 环境微生物学: 下册 [M]. 张甲耀, 宋碧玉, 郑连爽, 等译. 北京: 科学出版社, 2004: 443–455, 475–477.  
Maier R M, Pepper L L, Gerba C P. *Environment microbiology: Second volume* [M]. Zhang Jiayao, Song Biyu, Zheng Lianshuang, *et al.* Trans. Beijing: Science Press, 2004: 443–455, 475–477.
- [11] 彭艳, 李心清, 程建中, 等. 贵阳喀斯特地区植被类型与季节变化对土壤微生物生物量和微生物呼吸的影响 [J]. 地球化学, 2010, 39(3): 266–273.  
Peng Yan, Li Xingqing, Cheng Jianzhong, *et al.* *Geochimica*, 2010, 39 (3): 266–273.
- [12] 彭艳, 李心清, 程建中, 等. 贵阳次生林不同演替阶段土壤微生物生物量与反硝化酶活性的研究[J]. 地球化学, 2009, 38(6): 600–606.  
Peng Yan, Lee Xingqing, Cheng Jianzhong, *et al.* *Geochimica*, 2009, 38 (6): 600–606.

- [13] 关荫松. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.  
Guan Songyin. Soil enzymes and its methodology [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [14] Smith M S, Tiedje J M. Phases of denitrification following oxygen depletion in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1979, 11(3): 261-267.
- [15] 彭艳. 贵阳石漠化地区不同植被类型下土壤生物学活性差异 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2010.  
Peng Yan. Differences in soil biological activities under different vegetation types in desertification area, Guiyang City [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [16] Oehler F, Bordenave P, Durand P. Variations of denitrification in a farming catchment area [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 120(2-4): 313-324.
- [17] 吕国红, 周广胜, 赵先丽, 等. 土壤碳氮与土壤酶相关性研究进展[J]. 辽宁气象, 2005(2): 6-8.  
Lu Guohong, Zhou Guangsheng, Zhao Xianli, et al. *Liaoning Meteorological*, 2005(2): 6-8.
- [18] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
Zhou Likai. Soil enzymology[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [19] 范燕敏, 朱进忠, 武红旗, 等. 伊犁绢蒿荒漠退化草地土壤微生物和酶活性的研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(6): 1288-1293.  
Fang Yanmin, Zhu Jinzhong, Wu Hongqi, et al. Study on soil microorganisms and enzyme activities of the degraded seriphidium transiliense desert grassland [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2009, 46(6): 1288-1293.
- [20] 万忠梅, 宋长春. 小叶章湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机 C 表征指标的关系[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 249-257.  
Wan Zhongmei, Song Changchun. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 249-257.
- [21] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机 C 的空间变异性与代表性土样采集方法 [J]. 土壤学报, 2007, 44 (3): 475-483.  
Wang Shijie, Lu Hongmei, Zhou Yunchao, et al. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 475-483.
- [22] 张平究. 不同生态条件下土壤微生物生物化学和分子生态变化及其土壤质量指示意义——以太湖地区水稻土和西南喀斯特土壤为例 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.  
Zhang Pingjiu. Changes in microbial biochemistry and molecular ecology under different ecological conditions and the significance in soil quality indicators—Taking examples of a paddy soil under different fertilization and karst soils in a land degradation sequence[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [23] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 采伐和火烧对森林氮动态的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4460-4468.  
Guo Jianfen, Yang Yusheng, Chen Guangshui, et al. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4460-4468.
- [24] 杨喜田, 宁国华, 董惠英, 等. 太行山区不同植被群落土壤微生物学特征变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1761-1764.  
Yang Xitian, Ning Guohua, Dong Huiying, et al. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1761-1764.
- [25] 刘满强, 胡锋, 何园球, 等. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 937-944.  
Liu Manqiang, Hu Feng, He Yuanqiu, et al. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 937-944.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·



## “第六届全国腐蚀大会”征文

由中国腐蚀与防护学会主办的“第六届全国腐蚀大会”将于 2011 年 8 月在银川召开,会议主题为:耐蚀长寿绿色新材料新技术新产品。

征文范围:自然环境腐蚀(大气、海洋及土壤腐蚀);环境敏感断裂(应力腐蚀、疲劳腐蚀与氢脆);高温氧化与热腐蚀;腐蚀测试与防腐蚀检测技术;腐蚀模拟分析与数据库;典型工业腐蚀失效分析案例;腐蚀教育、管理与科普;耐蚀金属材料与非金属材料;重防腐涂层与涂装;金属镀层(化学镀、电镀、热浸镀等)与喷涂技术;缓蚀剂;航空航天领域的腐蚀与防护;新能源(核能、风能、太阳能)工业中的腐蚀与防护;建筑工程中的腐蚀与防护;石油化工、化工过程中的腐蚀与防护;电力(火电、水电)工业中的腐蚀与防护;承压设备的腐蚀与防护;汽车及轨道交通中的腐蚀与防护;电子及信息材料腐蚀与防护;生物医学材料腐蚀与防护;腐蚀控制及工程应用。

征文截止日期:2011 年 6 月 30 日。

通信地址:北京市学院路 30 号中国腐蚀与防护学会(100083)。

联系电话:010-62332201, 62333931-518, 62397591;传真:010-82372302。

电子信箱:qinjing\_zhang@yahoo.com.cn, lan\_xin33@163.com。

会议网址:www.cscp.org.cn/6th。