

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率对模拟 N 沉降的响应 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O_3 及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑擘,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)
景观、区域和全球生态	
南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)
资源与产业生态	
基于GIS的山西省矿产资源规划环境影响评价	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)
学术信息与动态	
全球土地计划第二次开放科学大会(GLP 2 nd Open Science Meeting)会议述评	段宝玲,卜玉山 (2796)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05	



封面图说: 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201301030012

杨宁, 邹冬生, 杨满元, 林仲桂, 宋光桃, 陈志阳, 赵林峰. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变. 生态学报, 2014, 34(10): 2693-2701.
Yang N, Zou D S, Yang M Y, Lin Z G, Song G T, Chen Z Y, Zhao L F. Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2693-2701.

衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变

杨 宁^{1,2}, 邹冬生^{2,*}, 杨满元¹, 林仲桂¹, 宋光桃¹, 陈志阳¹, 赵林峰¹

(1. 湖南环境生物职业技术学院园林学院, 衡阳 421005; 2. 湖南农业大学 生物科学技术学院, 长沙 410128)

摘要:采用空间代替时间序列方法,对衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段的土壤理化性质、土壤微生物数量、土壤微生物学性质和主要酶活性特征以及它们之间的相互关系进行研究。结果表明:不同恢复阶段土壤理化特征存在明显差异,从狗尾草群落阶段(I)、紫薇-狗尾草群落阶段(II)、牡荆+刺槐群落阶段(III)到枫香+苦楝-牡荆群落阶段(IV),0—40cm 土壤含水量、容重、非毛管孔隙度、孔隙比、大于 0.25mm 水稳性团聚体含量、有机碳(SOC)、全氮(TN)、碱解氮(AN)与速效磷(AP)显著增加,土壤容重显著减小,土壤 pH 值逐渐减小,土壤全磷(TP)、全钾(TK)与速效钾(AK)其差异变化不大,土壤理化特征的差异引起土壤微生物数量、微生物学性质与土壤酶活性的变化;不同恢复阶段土壤微生物总数显著增加,其中细菌数量显著增加,而真菌与放线菌数量显著减少;不同恢复阶段土壤基础呼吸(SBR)、土壤微生物量碳(SMBC)、土壤微生物量氮(SMBN)、土壤微生物量磷(SMBP)、土壤微生物熵(Cmic/Corg)显著增加,而代谢熵或呼吸熵(qCO_2)显著减小,碳氮比(C/N)逐渐减小;不同恢复阶段均显著地增加了脲酶(URE)、蔗糖酶(INV)与磷酸酶(APE)的活性;土壤理化性状、土壤微生物数量、土壤微生物学性质与土壤酶活性之间存在密切的相关性。

关键词:植被恢复;土壤微生物量;微生物种群数量;土壤酶活性;紫色土;衡阳

Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China

YANG Ning^{1,2}, ZOU Dongsheng^{2,*}, YANG Manyuan¹, LIN Zhonggui¹, SONG Guangtao¹, CHEN Zhiyang¹, ZHAO Linfeng¹

1 College of Landscape Architecture, Hunan Environmental-Biological Polytechnic College, Hengyang 421005, China

2 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Abstract: The purpose of the paper was to study the purple soil's physico-chemical characteristics, microbial populations, microbial properties, enzyme activities, and the relationships between them in different stages of re-vegetation on sloping-land in Hengyang of Hunan Province, South-central China. We took soils of 0—40cm depth in typical areas in *Setaria viridi* community stage (I); *Lagerstroemia indica*-*Setaria viridi* community stage (II); *Vitex negundo* var. *cannabifolia*+*Robinia pseudoacacia* community stage (III); and *Liquidambar formosana*+*Melia azedarach*-*Vitex negundo* var. *cannabifolia* community stage (IV) as our test objects by using the space series to replace time courses. The results showed that: (1) From I, II, III to IV, the soil water content, total soil porosity, ratio of non-capillary porosity to capillary porosity, >0.25mm water stable aggregates content, SOC (Soil Organic C), TN (Total N), AN (Available N) and AP (Available P) increased significantly. In contrast, soil bulk density decreased significantly, pH decreased slightly, and there were no significant differences in TP (Total P), TK (Total K) and AK (Available K). The changes in the number of soil

基金项目:湖南省重点项目(62020608001);湖南省科技厅项目(S2006N332);湖南省教育厅科学研究项目(12C1057);湖南省普通高校优秀青年骨干教师培养对象资助项目;湖南环境生物职业技术学院南岳学者基金项目(湘环职院[2012]4号)资助

收稿日期:2013-01-03; **网络出版日期:**2014-02-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zoudongsheng2@sina.com

microbes, microbial properties and the soil enzyme activities have resulted from the differences in the soil physico-chemical characteristics. (2) The number of soil microbes increased significantly, with a significant increase in the number of bacteria, but the numbers of fungi and actinomycetes decreased significantly in the process of the succession. (3) The SBR (Soil Base Respiration), SMBC (Soil Microbial Biomass C), SMBN (Soil Microbial Biomass N), SMBP (Soil Microbial Biomass P) and Cmin/Corg increased significantly. The $q\text{CO}_2$ decreased significantly, and C/N decreased, with no significant difference in the process of succession. The activities of URE (Urease), INV (Invertase) and APE (Alkaline phosphatase) significantly increased in the process of the succession. (4) There were close correlations among the soil physico-chemical characteristics, the number of soil microbes, the soil microbial properties and the soil enzyme activities. This study will, to some degree, enrich the restoration ecology of this area and provide a theoretical basis for the re-vegetation and reconstruction of ecosystems on sloping land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, South-central China.

Key Words: re-vegetation; soil microbial biomass; soil microbial populations; soil enzyme activities; purple soils; hengyang

植被恢复是充分利用土壤-植物复合系统的功能改善局部环境,促进生物物种多样性形成的一种手段^[1]。植被恢复的生态效应不但影响退化生态系统本身,也影响其相邻的系统,进而对区域与全球的生态平衡起到调节作用。土壤性质的改善以及土壤质量的改良是植被恢复的一个重要目标^[2]。因此,关于植被与土壤环境之间关系的研究,一直是生态学的一个重要领域。

衡阳紫色土丘陵坡地面积 $1.625 \times 10^5 \text{ hm}^2$,是湖南省环境最为恶劣的地区之一,因紫色土有机质与氮的含量较低,渗透性较差,加上紫色土颜色深吸热性强,蒸发量大,以及区域性水、热分布等不利环境影响和不合理的开发,致使该区域不仅植被稀疏(有的区域出现大面积基岩裸露,几乎无土壤发育层,植被恢复极度困难),而且水土流失与季节性旱灾严重^[3]。而植被恢复是治理该区域生态环境的关键措施^[4]。长期以来,该区域实施的植被恢复与退耕还林还草政策取得了良好的生态效益,但以往对植被恢复的研究与评价多集中于减少径流与养分的流失^[5],有关植被恢复对土壤生态系统,特别是土壤微生物、土壤酶活性影响的研究相对薄弱。大量的研究表明,土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,参与土壤有机质分解、腐殖质形成、土壤养分转化和循环等过程^[6]。土壤微生物量是衡量土壤质量、维持土壤肥力与植物生产力的一个重要指标^[7-8];而土壤酶是土壤生物化学的一个重要指标,其活性高低可以反映土壤转化能力的强弱^[9]。本研

究以衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段为研究对象,采用“空间序列代替时间序列”的方法^[1,10],从土壤理化性状、生物学性状等的角度进行对比分析,探讨它们之间的相互关系,旨在了解植被恢复过程中土壤特性的演变,为该区域的生态恢复与重建提供科学依据。

1 研究区概况

该区域位于湖南省中南部,湘江中游,地理坐标为 $110^\circ 32' 16''$ — $113^\circ 16' 32'' \text{ E}$, $26^\circ 07' 05''$ — $27^\circ 28' 24'' \text{ N}$ 。属亚热带季风湿润气候,年平均气温 18°C ;极端最高气温 40.5°C ,极端最低气温 -7.9°C ,年平均降雨量 1325 mm ,年平均蒸发量 1426.5 mm 。平均相对湿度 80% ,全年无霜期 286 d 。地貌类型以丘岗为主。紫色土呈网状集中分布于该区域中部海拔 60 — 200 m 的地带,东起衡东县霞流、大浦,西至祁东县过水坪,北至衡阳县演陂、渣江,南达常宁市官岭、东山和耒阳市遥田、市炉一带,以衡南、衡阳两县面积最大。

2 研究方法

2.1 样地设置

2009 年 8 月,选择坡度、坡向、坡位和裸岩率等生态因子基本一致的坡中下部沿等高线有代表性的、按照植被恢复阶段从低到高顺序的样地分别为(表 1): I. 狗尾草(*Setaria viridi*)群落阶段, II. 紫薇(*Lagerstroemia indica*)-狗尾草群落阶段, III. 牡荆

(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*) + 刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 群落阶段, IV. 枫香 (*Liquidambar formosana*) + 苦楝 (*Melia azedarach*) - 牡荆群落阶段, 代表不同植被恢复阶段, 且每个样地的面积 > 1 hm², 群落演替的初始条件均为退耕封育地, 在耕作期间其种植的农作物均为玉米。在每个 > 1 hm² 的样地内各设置 3 块 400 m² (20 m × 20 m) 样方, 且样方间距 >

20 m, 在每个样方内按 S 型采取 15 个土样 (0—40 cm) 混合为一个混合样, 去掉土壤中可见植物根系和残体, 将混合土样分成 2 部分, 一部分过筛 (2 mm) 放置于密封的大塑料桶内 (25 ℃, 10 d) 供测定土壤微生物种群数量与微生物生物量, 另一部分土壤风干后过筛, 供测定土壤理化性质等。

表 1 样地概况

Table 1 The condition of sampling sites

恢复阶段 Re-vegetation stage	I	II	III	IV
演替年限 Succession years/a	2	5—8	20—25	50a 左右
坡度/坡向 Slope/(°)/Aspect	25/SW	20/SW	30/SW	25/SW
海拔 Altitude/m	125	115	120	130
盖度 Coverage/%	40	50	65	80

2.2 测定项目与方法

2.2.1 物理性状

土壤水分测定采用烘干法 (105 ℃, 12 h), 容重、毛管孔隙度与非毛管孔隙度采用环刀法测定, 土壤水稳团聚体的测定采用湿筛法。

2.2.2 化学指标

土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾氧化-外加热法、全氮 (TN) 采用半微量开氏法、碱解氮 (AN) 采用扩散吸收法、全磷 (TP) 采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法、速效磷 (AP) 采用 NaHCO₃ 提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法, 全钾 (TK) 采用 NaOH 熔融-原子吸收法, 速效钾 (AK) 采用 NH₄Ac 浸提-原子吸收法, pH 值采用电极电位法测定^[11]。

2.2.3 土壤微生物学性质

土壤微生物量碳 (SMBC) 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定, 转换系数 *K* 采用 0.45^[12]; 土壤微生物量氮 (SMBN) 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取-氮自动分析仪法, 转换系数 *K* 采用 0.45^[13], 土壤微生物量磷 (SMBP) 采用氯仿熏蒸-NaHCO₄ 提取-Pi 测定-外加 Pi 校正法, 转换系数 *K* 采用 0.4^[14]。土壤基础呼吸 (SBR) 测试参照《土壤农业化学分析方法》, 通常采用土壤中氧气的吸收量或二氧化碳和释放量来表达^[15], 代谢熵或呼吸熵 (*q*CO₂) 是 SBR 与 SMBC 的比值, 微生物熵 (MQ) 是 SMBC 与 SOC 的比值 (Cmic/Corg)。

2.2.4 土壤微生物与酶活性

土壤微生物数量采用稀释平板法计数测定, 其

中细菌用牛肉膏蛋白胨培养基培养基, 真菌用马丁氏培养基, 放线菌用改良高氏 1 号培养基^[16]; 酶活性采用比色法测定, 其中脲酶 (URE) 采用苯酚-次氯酸钠比色法, 蔗糖酶 (INV) 采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法, 磷酸酶 (APE) 采用对硝基苯磷酸二钠比色法测定^[17]。

2.2.5 数据分析

采用 SPSS 13.0 软件进行数据处理与分析, 采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同数据间的差异, 用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系, 所有数据均为 3 次重复的平均值, 表中数据为平均数 ± 标准差。

3 结果与分析

3.1 恢复阶段的土壤理化性状

由表 2 可见, 随着恢复的演替进行, 后 2 个恢复阶段的土壤含水量显著高于前 2 个恢复阶段的土壤含水量 (*P* < 0.05); 可能受土壤颗粒组成差异的影响, 前 2 个恢复阶段的土壤容重显著高于后 2 个恢复阶段的土壤容重 (*P* < 0.05); 土壤总孔隙度逐渐增加 (*P* > 0.05), 非毛管孔隙度增加显著 (*P* < 0.05), 说明随着恢复的演替进行, 土体构造变得疏松土壤容蓄能力升高; 用来表征土壤通气性、渗透性与保水性的孔隙比 (土壤非毛管孔隙度与毛管孔隙度的比值) 显著增加 (*P* < 0.05); > 0.25 mm 水稳团聚体的含量在 4 个恢复阶段增加显著 (*P* < 0.05), 其数量对土壤的通气、水分状况及抗蚀性乃至植物根系的生长有着重

大的影响。

随着恢复演替进行, SOC、TN、AN、AP 显著增加 ($P<0.05$), 由于 SOC、TN、AN 的增加, 土壤中有机酸的相应增加, pH 值逐渐减小 ($P>0.05$), 由于衡阳紫

色土含有丰富的正长石等矿物, 其风化后保留了相当数量的 K, 因此紫色土中的 K 的含量相对较高, TK 的变化范围在 1.98%—2.12%, AK 的变化范围在 260.87—268.12 mg/kg, 其差异变化不大。

表 2 恢复阶段 0—40 cm 土壤的理化性状
Table 2 Soil layer (0—40cm) physico-chemical properties in re-vegetation stages

恢复阶段 Re-vegetation stage	I	II	III	IV
含水量 Water content(g/kg)	143.2 ± 2.10b	181.6 ± 0.20b	258.3 ± 0.50a	327.6 ± 0.40a
容重 Bulk density(g/cm ³)	1.421 ± 0.121a	1.399 ± 0.100a	1.116 ± 0.102b	1.113 ± 0.112b
总孔隙度 Total soil porosity/%	41.226 ± 3.431a	42.013 ± 4.872a	42.564 ± 1.894a	43.784 ± 2.936a
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	4.673 ± 0.543a	6.009 ± 0.768ab	7.021 ± 0.665ab	9.237 ± 0.579b
毛管孔隙度 Capillary porosity/%	36.553 ± 4.654a	36.004 ± 4.876a	35.543 ± 3.998a	34.547 ± 4.001a
孔隙比 Ratio of non-capillary porosity to apillary porosity	0.128 ± 0.032a	0.167 ± 0.019ab	0.198 ± 0.015ab	0.267 ± 0.021b
>0.25 mm 水稳团聚体含量 >0.25 mm water stable aggregates content/%	34.327 ± 2.985a	47.871 ± 4.875a	66.123 ± 6.546ab	83.984 ± 7.321b
有机碳 Soil organic C(g/kg)	0.105 ± 0.012a	0.215 ± 0.022ab	0.218 ± 0.020ab	0.333 ± 0.032b
全氮 Total N/%	0.67 ± 0.02b	0.78 ± 0.08b	0.83 ± 0.04b	1.26 ± 0.02a
全磷 Total P/%	0.09 ± 0.01a	0.08 ± 0.00a	0.07 ± 0.00a	0.08 ± 0.02a
全钾 Total K/%	2.10 ± 0.52a	2.09 ± 0.49a	1.98 ± 0.51a	2.12 ± 0.60a
碱解氮 Available N(mg/kg)	34.40 ± 2.11b	33.65 ± 0.06b	81.70 ± 2.11a	81.51 ± 0.56a
速效磷 Available P (mg/kg)	8.34 ± 0.63a	7.66 ± 1.29a	11.48 ± 1.15ab	15.04 ± 0.52b
速效钾 Available K(mg/kg)	268.12 ± 6.45a	256.87 ± 5.98a	266.45 ± 6.87a	260.87 ± 5.34a
pH	8.71 ± 0.05a	8.40 ± 0.04a	8.15 ± 0.07a	7.49 ± 0.05a

同行不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

3.2 恢复阶段土壤微生物数量

表 3 可知, 随着恢复的演替进行, 土壤细菌数量显著增加 ($P<0.05$); 真菌数量、放线菌数量的变化规律与细菌数量的变化规律基本相反, 真菌数量从大至少的排序为: 紫薇-狗尾草群落阶段(II)、狗尾草群落阶段(I)、牡荆+刺槐群落阶段(III)、枫香+苦楝-牡荆群落阶段(IV), 差异达显著水平 ($P<0.05$);

放线菌的数量从多至少的排序为: 狗尾草群落阶段(I)、牡荆+刺槐群落阶段(III)、紫薇-狗尾草群落阶段(II)、枫香+苦楝-牡荆群落阶段(IV), 差异也达显著水平 ($P<0.05$)。

各恢复阶段土壤微生物数量组成不同, 细菌数量占 95% 以上, 据绝对优势, 真菌的比例很小, 不足 1%。

表 3 恢复阶段 0—40 cm 土壤微生物数量
Table 3 The number of soil microbes in re-vegetation stages

恢复阶段 Re-vegetation stage	I	II	III	IV
细菌数量 Number of bacteria / (×10 ⁶ cfu/g)	12.900±0.39a	21.450±0.86b	29.090±0.41ab	94.090±1.45c
真菌数量 Number of fungi / (×10 ⁴ cfu/g)	5.872±0.041a	7.433±0.035b	3.484±0.098ab	0.235±0.012c
放线菌数量 Number of actinomycetes / (×10 ⁵ cfu/g)	10.661±0.540a	5.658±0.211b	7.865±0.328ab	0.145±0.075c
细菌比例 Percentage of bacteria/%	91.979±3.997a	97.103±0.876ab	97.258±0.889ab	99.982±0.986b
真菌比例 Percentage of fungi/%	0.419±0.085a	0.337±0.045ab	0.117±0.000b	0.003±0.000c
放线菌比例 Percentage of actinomycetes/%	7.601±0.067a	2.561±0.014b	2.630±0.021b	0.015±0.000c

从表 4 可知, 土壤细菌数量与 SOC、TN、AN 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 AK 呈显著正相关 ($P<$

0.05), 真菌数量与 SOC、TN 呈显著正相关 ($P<0.05$), 其余的它们之间的相关性不明显。

表 4 土壤微生物数量与其它性质的相关分析

Table 4 Correlation analysis between the microbe quantity and other properties

项目 Item	细菌数量 Number of bacteria	真菌数量 Number of fungi	放线菌数量 Number of actinomycetes
有机碳 Soil organic C	0.876 **	0.564 *	0.480
全氮 Total N	0.901 **	0.574 *	0.453
全磷 Total P	0.385	0.292	0.321
全钾 Total K	0.467	0.378	0.384
碱解氮 Available N	0.861 **	0.394	0.412
速效磷 Available P	0.432	0.453	0.425
速效钾 Available K	0.587 *	0.444	0.455
pH	0.465	-0.291	0.304

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

3.3 土壤微生物学性质

从表 5 可以看出,随着恢复的演替进行,SBR 显著增加($P<0.05$),枫香+苦楝-牡荆群落阶段(Ⅳ)的 SBR 值高达 $(0.63\pm 0.03)\mu\text{g}(\text{CO}_2\text{-C})\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$;SMBC、SMBN 与 SMBP 均显著增加($P<0.05$),增加幅度分

别达 133.31—433.20 mg/kg 、9.11—25.94 mg/kg 、5.11—13.11 mg/kg ;MQ (Cmic/Corg) 增加幅度为 1.25—2.56,达显著水平($P<0.05$); $q\text{CO}_2$ 显著减小($P<0.05$),减小幅度为 0.76—1.39;C/N 比逐渐减小($P>0.05$)。

表 5 恢复阶段 0—40cm 土壤微生物学性质

Table 5 Soil microbial properties(0—40cm) in re-vegetation stages

恢复阶段 Re-vegetation stage	I	II	III	IV
土壤基础呼吸 Soil base respiration/ $(\mu\text{g}(\text{CO}_2\text{-C})\text{g}^{-1}\text{h}^{-1})$	0.38±0.02a	0.49±0.03ab	0.53±0.02ab	0.63±0.03b
土壤微生物量碳 Soil microbial biomass C/(mg/kg)	154.34±19.12a	287.65±20.76ab	321.78±19.65ab	587.54±23.87b
土壤微生物量氮 Soil microbial biomass N/(mg/kg)	19.65±1.76a	28.76±3.34ab	32.17±3.87ab	45.59±3.99b
土壤微生物量磷 Soil microbial biomass P/(mg/kg)	12.65±0.98a	17.76±1.02ab	18.00±1.01ab	25.76±2.32b
微生物熵 Microbial quotient/(Cmic/Corg)	1.91±0.10a	3.16±0.12ab	3.52±0.11ab	4.47±0.13b
呼吸熵 Respiration quotient($q\text{CO}_2$)	2.46±0.21a	1.70±0.16ab	1.65±0.15ab	1.07±0.11b
碳氮比 C/N	12.05±0.98a	11.68±1.32a	11.02±1.50a	10.44±1.62a

从表 6 可知,SBR、SMBC、SMBN、SMBP 与 SMBC、SMBN、SMBP、SOC、TN、AN、AP 之间存在显著或极显著正相关关系(* $P<0.05$ 或 ** $P<0.01$),

由于土壤 pH 值变化范围较小,在 7.49—8.71 之间,因此,各种酶的活性与 pH 值的相关性不大。

表 6 土壤微生物学性质与其它性质间的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between microbial and other properties

项目 Item	土壤微生物量碳 SMBC	土壤微生物量氮 SMBN	土壤微生物量磷 SMBP	土壤有机碳 SOC	全氮 TN	碱解氮 AN	速效磷 AP	pH
土壤基础呼吸 SBR	0.888 **	0.876 **	0.859 **	0.799 **	0.854 **	0.812 **	0.615 *	-0.274
土壤微生物量碳 SMBC		0.875 **	0.850 **	0.865 **	0.897 **	0.884 **	0.686 *	-0.265
土壤微生物量氮 SMBN			0.679 **	0.800 **	0.913 **	0.823 **	0.556 *	-0.229
土壤微生物量磷 SMBP				0.699 **	0.614 *	0.556 *	0.898 **	-0.298

SBR, SMBC, SMBN, SMBP, SOC, TN, AN and AP in the table indicate soil base respiration, soil microbial biomass C, soil microbial biomass N, soil microbial biomass P, soil organic C, total N, available N and available P, respectively

3.4 土壤酶活性

从表 7 可以看出,在 4 个恢复阶段中,INV 的活

性差异显著($P<0.05$),牡荆+刺槐群落阶段(Ⅲ)的 INV 的活性高达 $(16.659\pm 1.342)\text{mg}\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}$,可能与

该阶段植物多样性较高有关;URE 与 APE 的活性均表现出相同的规律,即随恢复的演替进行而显著增强($P<0.05$),其中,URE 增加幅度在 $0.162\text{--}0.240\text{ mg g}^{-1}\text{ d}^{-1}$,说明随着演替的进展进行,促进了土壤氮

磷养分的转化,有利于植物的生长与土壤的改良,加速植被恢复的演替进程;在枫香+苦楝-牡荆群落阶段(Ⅳ),APE 分别高达 $(876.903\pm64.459)\text{ }\mu\text{g g}^{-1}\text{ d}^{-1}$,可能与该阶段植物的种类及其凋落物的量有关。

表 7 恢复阶段土壤酶活性
Table 7 Soil enzyme activities in re-vegetation stages

恢复阶段 Re-vegetation stage	I	II	III	IV
脲酶 Urease($\text{mg g}^{-1}\text{ d}^{-1}$)	$0.172\pm0.021\text{a}$	$0.234\pm0.019\text{ab}$	$0.298\pm0.033\text{ab}$	$0.412\pm0.021\text{b}$
蔗糖酶 Invertase($\text{mg g}^{-1}\text{ d}^{-1}$)	$8.654\pm1.650\text{a}$	$9.004\pm1.007\text{a}$	$16.659\pm1.342\text{b}$	$10.763\pm1.985\text{a}$
磷酸酶 Alkaline phosphatase($\mu\text{g}^{-1}\text{ g}^{-1}\text{ d}^{-1}$)	$154.985\pm24.098\text{a}$	$453.675\pm38.009\text{ab}$	$567.985\pm43.096\text{ab}$	$876.903\pm64.459\text{b}$

从表 8 可知,URE、INV、APE 与 INV、APE、SBR、SMBC、SMBN、SMBP、SOC、TN、AN、AP 之间存在显

著或极显著正相关关系($*P<0.05$ 或 $**P<0.01$),与 pH 值的相关性不明显。

表 8 土壤酶活性与其它性质间的相关系数
Table 8 Correlation coefficients between soil enzyme activities and other properties

项目 Item	蔗糖酶 INV	磷酸酶 APE	土壤基 础呼吸 SBR	土壤微生 物量碳 SMBC	土壤微 生物量氮 SMBN	土壤微 生物量磷 SMBP	土壤 有机碳 SOC	全氮 TN	碱解氮 AN	速效磷 AP	pH
脲酶 URE	0.726**	0.704**	0.856**	0.833**	0.858**	0.766**	0.670**	0.787**	0.899**	0.500*	-0.029
蔗糖酶 INV		0.576*	0.689*	0.667**	0.698**	0.659**	0.562*	0.609*	0.613*	0.523*	-0.030
磷酸酶 APE			0.700**	0.681**	0.734**	0.752**	0.667**	0.658**	0.666**	0.887**	-0.043

URE, INV, APE, SBR, SMBC, SMBN, SMBP, SOC, TN, AN and AP in the table indicate urease, invertase, alkaline phosphatase, soil base respiration, soil microbial biomass C, soil microbial biomass N, soil microbial biomass P, soil organic C, total N, available N and available P, respectively

4 讨论

4.1 恢复对土壤理化特征的影响

SOC、N 和 P 等是土壤主要的养分指标,而且 SOC 还是形成土壤结构的重要物质,直接影响土壤肥力、持水能力、抗蚀能力、土壤容重和 pH 等,有利于增强土壤孔隙度、通气性和结构性,有显著的缓冲作用和持水力,土壤养分含量尤其是 SOC 含有大量的植物营养元素,是土壤微生物的营养源和能源,能激发土壤微生物酶活性,有利于地下死根和凋落物的及时降解。衡阳紫色土丘陵坡地在恢复过程中,植物的生长增加了植被的盖度,减少了径流、泥沙和养分的流失,而根系分泌物与凋落物增加了 SOC 的输入^[1],随着恢复年限的增长,土壤理化性状得到较大程度的改善(表 2)。这种变化趋势与 Garcia 等^[18]与 Gil-Sotress 等^[19]研究结果一致。

4.2 恢复对土壤微生物数量与组成的影响

细菌是土壤中的主要微生物类群,最大的数量

达 $9.409\times10^7\text{ cfu/g}$,占 95% 以上,其次是放线菌,真菌数量最少(表 3),说明细菌分解土壤物质能力最强。由于细菌占微生物总数的绝大多数,微生物总数在各恢复阶段的变化规律取决于细菌数量,这与细菌、真菌与放线菌生态属性的差异有关,细菌个体小,繁殖方法简单,速度快,加之测试的土壤为根区,调查取样时间为 8 月份,水热条件适宜,有利于细菌的发育,而真菌和放线菌发育缓慢,当微生物繁殖与生长的环境得到改善时,真菌、放线菌与细菌竞争处于弱势地位,细菌数量增加从而抑制了真菌和放线菌的生长发育^[1]。以往研究认为,细菌与放线菌适宜于中性或微碱性的土壤环境中生长,真菌在微碱性的环境中生长较差^[20-21],而研究区域呈弱碱性,因此导致细菌比例与放线菌比例明显高于真菌所占的比例。有研究发现,细菌数量在某些土壤中较高,如祁连山山杨(*Populus davidiana*)灌木林土壤细菌的数量达 $4.27\times10^9\text{ cfu/g}$ ^[22],四川洪雅县退耕还林模式下土壤细菌在秋季达到 $1.86\times10^9\text{ cfu/g}$ ^[23]。

4.3 恢复对土壤微生物学性质的影响

SMBC、SMBN 与 SBR 反映微生物群落容量及活性,受植被凋落物、植物残体及根系分泌物的影响较大^[24],也即对 SOC 较为敏感^[25],表 6 的相关系数亦有所表现,随着恢复的进行,SMBC、SMBN 与 SBR 的值增加,这与蒋平安等^[26]的研究结果一致,但是 Aikio 等^[27]在芬兰冰川前沿的研究发现 SMBC、SMBN 在恢复初期呈下降趋势,并指出主要原因是砂质土壤养分的淋失和腐殖质层厚度的减少;土壤微生物熵 MQ (Cmic/ Corg) 是衡量一个生态系统 SOC 积累或损失的指标,该比值越高表示土壤 C 的积累越高,随着恢复的演替进行,由于 SOC 的增加,MQ 显著增加; $q\text{CO}_2$ 反映土壤微生物对基质的利用效率,该值低表示利用效率高,因此,随着恢复的演替进行,土壤环境对土壤微生物产生的生存压力减小,导致 $q\text{CO}_2$ 的减小,这与 C/N 比的研究结论一致。

C/N 比是表征土壤微生物生长是否受到碳限制或氮限制的重要指标,影响到土壤微生物的群落结构。当土壤 $\text{C/N} \geq 30$ 和 $\text{C/N} \leq 20$ 时,土壤微生物生长分别受到氮源和碳源的限制,而 $\text{C/N} = 25$ 时对土壤微生物生长最有利,有利于土壤微生物在自然生态系统中的正常功能^[28],在衡阳紫色土丘陵坡地的恢复过程中,C/N 的值处于 10.44—12.05 之间(表 5),说明 C 源供给数量是土壤微生物生长的主要限制因子。

4.4 恢复对土壤酶活性的影响

土壤酶活性的变化在一定的程度上反映了土壤与植被的演替规律,演替年限越长,土壤 URE、INV、APE 活性越高(表 7),这一结论与胡海波、邱莉萍等^[29-30]等的研究结果一致。植被恢复对土壤酶活性的改善可能与以下几个因素有关:1) 植被恢复后, SOC 在土层积累,显著改善土壤理化性状,为酶类物质提供丰富的 C 源;2) 植被恢复后在土层形成大量的植物根系,根系代谢释放大量的酶类,从而提高土层酶活性;3) 植被恢复后,土壤含水量升高,土壤容重减小,土壤入渗性能和渗水性增强,有利于土壤物质随水分运动的迁移,从而促进了酶类物质的运动与活性,表 8 的相关系数亦有所表现,因此,土壤酶活性也是土壤肥力的一个潜在性指标,可作为土壤质量评价的一个重要组成部分^[31]。但也有相反的意见,如张猛、孙秀山^[32-33]等认为因为土壤酶活性不

能提供土壤生物状况的完整描述,且其测定时不能提供鉴定土壤总生物活性的恒值,不支持把土壤酶活性作为评价土壤肥力的参数。本研究的结论一部分与前人研究的结果一致,另一部分也不尽相同。造成这些差异的原因可能是研究的对象、研究对象所处的环境、以及研究对象土壤中各种成分的相互作用等不同,从而造成各种成分之间的耦合变化也不同。这些研究的不一致体现了土壤酶、养分与微生物之间关系的复杂性,也说明了它们之间的关系还需要进一步研究。

References:

- [1] Yang N, Zou D S, Yang M Y, Hu L Z, Zou F P, Song G T, Lin Z G. Relationships between vegetation characteristics and soil properties at different restoration stages on slope land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, South-central China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 90-96.
- [2] Yang N, Zou D S, Yang M Y, Chen S B, Chen Z Y, Lin Z G. Analysis on soil physio-chemical characteristics in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(6): 757-761.
- [3] Yang N, Zou D S, Li J G. Spatial pattern of main populations of the natural recovery shrub stage community in sloping-land with purple soils in Hengyang. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 996-1001.
- [4] Yang N, Zou D S, Yang M Y, Chen J, Chen Z Y, Lin Z G, Song G T. Soil enzyme activities in different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1516-1524.
- [5] Xie T S, He Y H. Research on the rule of soil erosion and allowable eroding amount in the purple soil upland of the middle part of Hunan province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(1): 61-64.
- [6] Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(2): 111-129.
- [7] Powlson D S, Brookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19(2): 159-164.
- [8] Yang N, Zou D S, Yang M Y, Zhao L F, Song G T, Lin Z G. The change of soil microbial biomass carbon and the relationship between it and soil physio-chemical factors in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(1): 25-30.

- [9] Zhou L K. Soil Enzymology. Beijing: Science Press, 1987.
- [10] Yang N, Chen J, Yang M Y, Guo R, Zhao L F, Lin Z G, Chen Z Y. Ramet population structures of *Sinarundinaria basihirsuta* on different canopy conditions of *Taiwania flousiana* forest in Leigong Mountain of Guizhou Province. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2013, 33(11): 2326-2331.
- [11] Bao S D. Soil Assay on Properties of Agro-Chemistry. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [13] Sparling G P, Gupta V V S R, Zhu G Y. Release of ninhydrin-reactive compounds during fumigation of soil to estimate microbial C and N. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(12): 1803-1805.
- [14] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329.
- [15] Lu R K. Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000; 12-13, 106-108, 146-195, 266-266.
- [16] Wu J H, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Soil Microbial Biomass-Methods and Application. Beijing: Weather Press, 2006.
- [17] Guan S Y. Soil Enzymes and Research Methods. Beijing: Agriculture Press, 1983; 182-226.
- [18] Garcia C, Hemanderz T, Roldan A, Martin A. Effect of plant cover decline on chemical and microbiological parameters under Mediterranean climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(5): 635-642.
- [19] Gil-Sotress F, Trasar-Cepeda C, Leirós M C. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5): 877-887.
- [20] Li Y M, Hu J C, Wang S L, Wang S J. Function and application of soil microorganisms in forest ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1943-1946.
- [21] Yang M Y, Yang N, Guo R, Zou F P, Zhao L F, Lin Z G. Numerical properties of soil microbial population in re-vegetation stages on sloping land with purple soils in Hengyang. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(2): 229-232.
- [22] Guo Y B, Xu X Y. Three kinds of soil microbe community quantity distribution in different vegetable soil. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2005, 12(1): 16-18.
- [23] Liu Z X, Zhu T H, Zhang J. Analysis on communities of soil microbes under different models of forest rehabilitation. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2005, 29(4): 45-48.
- [24] Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 2002, 59(3): 233-253.
- [25] Jia G M, Cao J, Wang C Y, Wang G. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziulin, northwest China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(1): 117-125.
- [26] Jiang P A, Luo M, Jiang Y H, Yang Y H, Ai E K. Soil microbial florae and their q_{MB} and q_{CO_2} values in the fields of different-year-aged *Medicago sativa*. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1): 115-119.
- [27] Aikio S, Väre H, Strömmer R. Soil microbial activity and biomass in the primary succession of a dry heath forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(8/9): 1091-1100.
- [28] Zhang L Q, Peng W X, Song T Q, Zou D S, Zeng F P, Song M, Yu Z, Liu Y. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a Karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2056-2065.
- [29] Hu H B, Zhang J C, Chen S W, Kang Z X, Gao Z H. Study on soil enzyme activity of main forest types in rocky coastal Area. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2001, 25(4): 21-25.
- [30] Qiu L P, Liu J, Wang Y Q. Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 277-280.
- [31] Moscatelli M C, Fomck M, De Angelis P, Larbi H, Macuz A, Rambelli A, Grego S. Mediterranean natural forest living at elevated carbon dioxide: soil biological properties and plant biomass growth. *Soil Use & Management*, 2001, 17(3): 195-202.
- [32] Zhang M, Zhang J. Advance in research on microbe and enzyme activity in forest soil. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2003, 21(4): 347-351.
- [33] Sun X S, Feng H S, Wan S B. Changes of main microbial strains and enzymes activities in peanut continuous cropping soil and their interactions. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(5): 617-621.

参考文献:

- [1] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 胡利珍, 邹芳平, 宋光桃, 林仲桂. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 90-96.
- [2] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 陈盛彬, 陈志阳, 林仲桂. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析. *农业现代化研究*, 2012, 33(6): 757-761.
- [3] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地自然恢复灌丛阶段主要种群空间分布格局. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 996-1001.
- [4] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 陈璟, 陈志阳, 林仲桂, 宋光桃. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤酶活性特征研究. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1516-1524.

- [5] 谢庭生, 何英豪. 湘中紫色土丘岗区水土流失规律及土壤容许侵蚀量的研究. 水土保持研究, 2005, 12(1): 61-64.
- [8] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 赵林峰, 宋光桃, 林仲桂. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤微生物量碳的变化及其与土壤理化因子的关系. 生态环境学报, 2013, 22(1): 25-30.
- [9] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987.
- [10] 杨宁, 陈璟, 杨满元, 郭锐, 赵林峰, 林仲桂, 陈志阳. 贵州雷公山秃杉林不同林冠环境下箭竹分株种群结构特征. 西北植物学报, 2013, 33(11): 2326-2331.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12-13, 106-108, 146-195, 266-266.
- [16] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1983: 182-226.
- [20] 李延茂, 胡江春, 汪思龙, 王书锦. 森林生态系统中土壤微生物的作用与应用. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1943-1946.
- [21] 杨满元, 杨宁, 郭锐, 邹芳平, 赵林峰, 林仲桂. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物数量特征. 生态环境学报, 2013, 22(2): 229-232.
- [22] 郭银宝, 许小英. 祁连林区不同植被类型下三种土壤微生物群落的数量分布. 青海农林科技, 2005, 12(1): 16-18.
- [23] 刘子雄, 朱天辉, 张健. 不同退耕还林模式下土壤微生物区系分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(4): 45-48.
- [26] 蒋平安, 罗明, 蒋永衡, 杨玉海, 艾尔肯. 不同种植年限苜蓿地土壤微生物区系及商值(qMB, qCO₂). 干旱区地理, 2006, 29(1): 115-119.
- [28] 张利青, 彭晚霞, 宋同清, 邹冬生, 曾馥平, 宋敏, 俞孜, 刘艳. 云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布. 生态学报, 2012, 32(7): 2056-2065.
- [29] 胡海波, 张金泄, 陈顺伟, 康志雄, 高智慧. 亚热带基岩海岸防护林土壤的酶活性. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2001, 25(4): 21-25.
- [30] 邱莉萍, 刘俊, 王义权. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 277-280.
- [32] 张猛, 张健. 林地土壤微生物、酶活性研究进展. 四川农业大学学报, 2003, 21(4): 347-351.
- [33] 孙秀山, 封海胜, 万书波. 连作花生田主要微生物类群与土壤酶活性变化及其交互作用. 作物学报, 2001, 27(5): 617-621.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

Autecology & Fundamentals

- Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern
marginal zones of the Tarim Basin, China GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic
productivity classification ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*
plantations YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation
of winter wheat SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes
in Poyang Lake YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera)
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 祖元刚

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元