

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第5期 Vol.34 No.5 **2014**

中国生态学学会  
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 5 期      2014 年 3 月    (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 干旱指标研究进展..... 李柏贞,周广胜 (1043)
- 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展..... 李堃清,吴正云,张 强,等 (1053)
- 森林生态系统中植食性昆虫与寄主的互作机制、假说与证据 ..... 曾凡勇,孙志强 (1061)
- 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展..... 陈云峰,韩雪梅,李钰飞,等 (1072)
- 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析 ..... 赵良仕,孙才志,郑德凤 (1085)
- 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例..... 高 云,谢苗苗,付梅臣,等 (1094)
- 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例.....  
..... 赵明月,赵文武,钟莉娜 (1105)
- 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响.....  
..... 陈旭飞,张 池,戴 军,等 (1114)

### 个体与基础生态

- 钾与信号抑制剂对外生菌根真菌分泌乙酸的调控作用..... 杨红军,李 勇,袁 玲,等 (1126)
- 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应..... 薛美昭,仪慧兰 (1134)
- 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性..... 胡 婷,谷 洁,甄丽莎,等 (1140)
- 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究..... 付 川,余顺慧,黄怡民,等 (1149)
- 播种期对晚季稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量和产量的影响 ..... 杨晓娟,唐湘如,闻祥成,等 (1156)
- 外源钙(Ca)对毛葱耐镉(Cd)胁迫能力的影响 ..... 王巧玲,邹金华,刘东华,等 (1165)
- 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究..... 高明亮,官兆宁,赵文吉,等 (1178)
- 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较..... 李 西,王丽华,刘 尉,等 (1189)
- 恩施烟区无翅桃蚜在烤烟田空间动态的地统计学分析..... 夏鹏亮,王 瑞,王昌军,等 (1198)
- 啮齿动物捕食和搬运蒙古栎种子对种群更新的影响..... 张晶虹,刘丙万 (1205)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响.....  
..... 李倩倩,赵 旭,郭正刚 (1212)
- 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应..... 谢晓玲,周 蓉,邓自发 (1224)

### 种群、群落和生态系统

- 人工巢箱繁殖鸟类主要巢捕食者及其影响因素..... 张 雷,李东来,马锐强,等 (1235)
- 泉州湾埭埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布..... 卓 异,蔡立哲,郭 涛,等 (1244)

不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响..... 张海萍,武大勇,王赵明,等 (1253)

呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子..... 陆欣鑫,刘 妍,范亚文 (1264)

江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价..... 李 佳,李言阔,缪沪君,等 (1274)

景观、区域和全球生态

中国自然保护综合地理区划..... 郭子良,崔国发 (1284)

近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应 ..... 缪丽娟,蒋 冲,何 斌,等 (1295)

人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响 ..... 刘可群,梁益同,周金莲,等 (1302)

2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化 ..... 谈永利,王宏志,张 欢,等 (1311)

资源与产业生态

三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布..... 李 芬,吴志丰,徐 翠,等 (1318)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 282 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2014-03



**封面图说:** 插秧季节的桂西——2009—2011 年,我国广西、云南、贵州、四川、重庆等西南地区遭受了百年不遇的特大旱灾,其中广西西北部、云南大部、贵州西部等石漠化地区最为严重,农作物大面积绝收,千百万人 and 大牲畜饮水困难,这种危害是巨大的、现实的。从对 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响结果显示:2009—2011 年西南地区年均降水量和湿润指数明显低于 1980—2008 年均值,植被净初级生产力低于 2001—2008 年均值,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%。全球气候变暖给大气环流提供了动力,也造成了许多极端灾害天气,因此如何应对气候变化形势显得更加紧迫。

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/stxb201306091524

陈旭飞, 张池, 戴军, 郭彦彪, 刘婷. 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响. 生态学报, 2014, 34(5): 1114-1125.

Chen X F, Zhang C, Dai J, Guo Y B, Liu T. Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill sludge. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1114-1125.

## 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响

陈旭飞<sup>1</sup>, 张池<sup>1,\*</sup>, 戴军<sup>1</sup>, 郭彦彪<sup>1</sup>, 刘婷<sup>1,2</sup>

(1. 华南农业大学资源环境学院/农业部华南耕地保育重点实验室, 广州 510642; 2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

**摘要:**将赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 和毛利远盲蚓 (*Amyntas morrisi*) 接种于混合 15% 造纸污泥的旱地土和水稻土中, 研究不同蚯蚓对不同混合污泥土壤的化学和生物学性状的作用。主成分分析结果显示蚯蚓对混合污泥土壤化学和生物学性质影响与土壤类型和蚯蚓种间差异密切相关 ( $P < 0.05$ )。方差分析结果显示: (1) 在混合污泥旱地土处理中, 与对照相比, *E. foetida* 处理的混合污泥土壤 pH 和 Eh 分别显著降低了 0.22 和 13 个单位 ( $P < 0.05$ ), 有机碳和微生物量碳含量, 以及过氧化氢酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、脲酶和酸性磷酸酶活性分别降低了 22.8%、43.8%、12.4%、48.4%、44.0% 和 40.7% ( $P < 0.05$ ), 而荧光素二乙酸酯酶活性增加了 57.4% ( $P < 0.05$ ); *A. morrisi* 处理的混合污泥土壤碱解氮含量、过氧化氢酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶和脲酶活性分别明显下降了 16.5%、12.4%、33.9% 和 45.5% ( $P < 0.05$ )。另外, 两种蚯蚓相比较, *E. foetida* 活动后混合污泥旱地土壤 pH 和 Eh 值、有机碳含量和碳氮比分别比 *A. morrisi* 活动后土壤降低 0.17 和 10 个单位、24.9% 和 2.26 个单位, 而代谢熵和荧光素二乙酸酯酶活性显著增高 ( $P < 0.05$ )。 (2) 在混合污泥水稻土处理中, 与对照相比, *E. foetida* 处理的混合土壤有机碳含量和碳氮比显著提高 20.9% 和 1.02 个单位 ( $P < 0.05$ ), 全钾含量和呼吸速率明显降低 6.11% 和 33.8% ( $P < 0.05$ ); 而与对照相比, *A. morrisi* 处理的混合土壤的速效钾含量和过氧化氢酶活性显著提高 13.2% 和 10.8% ( $P < 0.05$ ), 但  $\beta$ -葡萄糖苷酶和荧光素二乙酸酯酶活性分别下降 46.7% 和 34.4% ( $P < 0.05$ )。两种蚯蚓相比较, *E. foetida* 处理后混合污泥水稻土的有机碳含量比 *A. morrisi* 处理显著增加了 15.7%, 碳氮比增加 0.84 个单位, 速效钾、呼吸速率和过氧化氢酶活性减少 11.4%、36.5% 和 5.51% ( $P < 0.05$ )。综上所述, 蚯蚓能显著影响混合造纸污泥土壤的化学和生物学特征。蚯蚓在高有机碳和低粘粒含量旱地土壤中活动, 能够加速有机碳的分解和释放, 降低与土壤有机质分解和养分转化相关的酶活性和微生物量, 但增加微生物总体活性; 而蚯蚓在低有机碳和高粘粒含量水稻土中活动, 则能够有助于土壤有机碳储存, 对养分和微生物活性的影响相对较小。与 *A. morrisi* 相比较, *E. foetida* 对混合污泥旱地土有机碳的分解和释放、微生物活性的提高, 以及混合污泥水稻土有机碳的储存等方面的能力均较强, 而对混合污泥水稻土钾素转化能力相对较弱。由于造纸污泥具有高有机碳和低养分含量特征, 因此污泥农用仍需考虑按一定比例配施高养分含量有机物料。同时, 进一步根据土壤类型和选择适宜的蚯蚓品种进行较长期的小区和大田试验, 将能够为污泥农用提供更多科学参考。

**关键词:** 蚯蚓; 造纸污泥; 土壤; 化学和生物学性质

## Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill sludge

CHEN Xufei<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>1,\*</sup>, DAI Jun<sup>1</sup>, GUO Yanbiao<sup>1</sup>, LIU Ting<sup>1,2</sup>

1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (South China) of Ministry of Agriculture, Guangzhou 510642, China

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金项目(41201305); 广东省自然科学基金博士启动项目(S2012040007806); 中国博士后科学基金资助项目(2012M511819); 广东省教育部产学研结合项目(2011A09020003)

收稿日期: 2013-06-09; 修订日期: 2013-09-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangchi121@163.com



2 Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China

**Abstract:** Two earthworm species (*Eisenia foetida* and *Amyntas morrissi*) were inoculated in dryland and paddy soil mixed with 15% paper mill sludge for 30 days. Effects of earthworm on soil chemical and biological properties were evaluated, which included pH and Eh value, contents of organic carbon and dissolved organic carbon, contents of total nitrogen, phosphorus and potassium and their available contents, the ratio of C and N, contents of microbial biomass carbon, soil respiration rate, metabolic quotient, microbial quotient, and activities of catalase, urease, invertase, acid and alkaline phosphatase,  $\beta$ -glucosidase, N-acetyl-glucosaminidase and fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis. PCA results showed that: effects of earthworms on the chemical and biological properties of soil mixed with paper mill sludge depend on soil types and earthworm special species ( $P<0.05$ ). ANOVA results showed that: (1) in dry land treatments, compared with the control, 0.22 and 13 units of soil pH and Eh values and 22.8% contents of organic carbon were reduced by *E. foetida* significantly, respectively ( $P<0.05$ ). In the meantime, *E. foetida* reduced contents of microbial biomass carbon, activities of catalase, N-acetyl-glucosaminidase, urease and acid phosphatase by 43.8%, 12.4%, 48.4%, 44.0% and 40.7%, respectively, but increased FDA hydrolysis by 57.4% as well ( $P<0.05$ ). Compared with the control, 16.5% reduction of available N contents and 12.4%, 33.9% and 45.5% reduction of activities of catalase, N-acetyl-glucosaminidase and urease were shown by *A. morrissi* ( $P<0.05$ ). In addition, compared to *A. morrissi*, reductions of 0.17 and 10 units, 24.9% and 2.26 ratio of soil pH and Eh values, organic carbon content and the ratio of carbon to nitrogen were observed significantly by *E. foetida*, respectively ( $P<0.05$ ). Higher of soil metabolic quotient and FDA hydrolysis were shown in *E. foetida* than *A. morrissi* treatments. (2) in paddy soil, compared with the control, 20.9% and 1.02 units increase of soil organic carbon and C:N ratio were shown in *E. foetida* treatments significantly, but 6.11% and 33.8% decreases of total K contents and soil respiration rate were observed as well ( $P<0.05$ ). For *A. morrissi* treatments, 13.2% and 10.8% increases of soil available K contents and catalase activities was observed significantly ( $P<0.05$ ), but 46.7% and 34.4% decreases of  $\beta$ -glucosidase activities and FDA hydrolysis were observed as well. Moreover, in paddy soil treatments, 15.7% and 0.84 units increase of organic carbon contents and C:N ratio were shown in *E. foetida* than *A. morrissi* treatments, but 11.4%, 36.5% and 5.51% decrease of total K contents, respiration rate and catalase activities were observed as well ( $P<0.05$ ). In summary, earthworm had significant effects on the chemical and biological properties in soil amended with the paper mill sludge. In dry land soil with higher contents of organic matter and lower contents of clay, earthworm accelerated organic matter decomposition, released organic carbon, reduced microbial biomass and the related enzyme activities in organic matter decomposition and nutrient transformation, but increased the potential overall microbial activity. In paddy soil with lower contents of organic matter and higher contents of clay, earthworm contributed to soil organic carbon storage, but had less effect on soil nutrient contents and microbial characteristics. To compare with *A. morrissi*, *E. foetida* had stronger abilities on accelerating soil organic matter decomposition, releasing organic carbon and enhancing microbial activities in dry land soil, but increasing organic carbon storage in paddy soil. *A. morrissi* had stronger ability on potassium cycling than *E. foetida* in paddy soil. The paper mill sludge was rich in organic matter and poor in nutrient contents in our study. According to proportion, other organic matters rich in nutrient contents should be chose and used together with sludge in the further agricultural application. It is recommended that more studies should be performed in plot and field experiment according to soil types and earthworm species as well.

**Key Words:** earthworm; the paper mill sludge; soil; chemical and biological properties

造纸污泥产量大、含水量高、成分复杂,处理难度大。常见的污泥焚烧和填埋等处置方法不仅带来巨大的资源浪费,也容易引起严重的环境污染。由

于造纸污泥含有丰富的有机质、养分和微量元素<sup>[1-3]</sup>,而且其较低的重金属含量也不会导致污染风险<sup>[3-4]</sup>,因此造纸污泥作为一种良好的资源逐渐应用

于农业生产。

近些年,国内外研究学者已通过蚯蚓对造纸污泥进行生物处理、生产优质有机肥<sup>[5-9]</sup>。这些研究主要以赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)为研究对象,通过设置蚯蚓堆制处理,探讨其吞食污泥或污泥与其他有机废物的混合物形成的有机肥料的特征。由于造纸污泥能促进土壤良性结构形成<sup>[10-11]</sup>,降低土壤酸化和提供作物和微生物养分<sup>[12-13]</sup>;而蚯蚓作为土壤中“生态工程师”,对土壤结构的形成、通气和透水性、有机物质的分解、养分转化以及微生物种群结构和活性的变化都有重要作用<sup>[14]</sup>。因此,将适宜种类蚯蚓和造纸污泥直接施用于土壤具有一定的可行性,但是目前很少研究将二者联合添加到自然土壤、观察蚯蚓对混合污泥土壤的作用。

本研究选取华南地区典型旱地土和水稻土,并分别混合 15%造纸污泥、在短时间内接种赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)和毛利远盲蚓(*Amyntas morrisi*)于土壤中,进行常规室内培养。通过研究蚯蚓活动后土壤有机碳、全量氮磷钾养分及其速效养分、微生物碳含量、土壤呼吸速率、微生物熵和代谢熵,过氧化氢酶、转化酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、脲酶、酸性和碱性磷酸酶以及荧光素二乙酸酯酶活性的变化,探讨不同蚯蚓对不同混合造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响,为进一步造纸污

泥农用提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)和毛利远盲蚓(*Amyntas morrisi*),前者购自广州某养殖场,后者采自广州市郊区农田土壤。所有蚯蚓在实验室稳定培养一周后,挑选鲜重分别约 0.3 和 0.5 g/条、具有成熟环的健壮赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓进行试验。

造纸污泥取自广州造纸集团有限公司无氯漂白污泥,两种供试土壤(旱地土和水稻土)采自广州郊区华南农业大学教学农场。污泥和土壤均在自然风干后,分别研磨过 0.15mm 和 2 mm 筛备用。过 0.15mm 筛的污泥和土壤样品主要用于分析土壤基本理化性状中总有机碳、全量氮磷钾和金属等指标。过 2mm 筛的污泥和土壤一部分用来分析样品 pH、Eh、速效养分等样品的基本理化性状,另一部分则用于布置盆栽试验。

另外,造纸污泥、旱地土和水稻土的基本理化性状如表 1 所示。其中,污泥的金属铜、锌、铅、镉含量分别为 45.1、152、29.7 和 2.83mg/kg,低于国家农用污泥污染物控制标准(GB 4284—84)中重金属的限制含量 1000、200、1000 和 20 mg/kg(pH>6.5 土壤)。

表 1 供试造纸污泥和土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the paper mill sludge and the parent soil

	pH	粘粒含量 Clay /%	有机质 Organic matter /(g/kg)	全氮 Total N /(g/kg)	全磷 Total P /(g/kg)	全钾 Total K /(g/kg)	速效磷 Available P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)
造纸污泥 Paper mill sludge	7.39	—	261	1.35	1.68	5.09	2.62	168
旱地土 Dry land	7.87	24.0	21.1	1.79	1.53	9.33	12.6	81.0
水稻土 Paddy soil	7.10	38.7	10.4	0.887	2.06	6.85	31.9	65.0

### 1.2 研究方法

根据预试验结果,15%污泥添加入土壤较适宜蚯蚓生长。因此本研究试验共设置 6 个处理:(1)混合 15%污泥的旱地土壤对照(简写为 DL);(2)混合 15%污泥的旱地土壤+毛利远盲蚓(简写为 DL+A);(3)混合 15%污泥的旱地土壤+赤子爱胜蚓(简写为 DL+E);(4)混合 15%污泥的水稻土壤对照(简写为 PS);(5)混合 15%污泥的水稻土壤+毛利远盲蚓(简写为 PS+A);(6)混合 15%污泥的水稻土壤+赤子爱

胜蚓(简写为 PS+E)。每个处理 5 次重复。

称取过 2 mm 筛的造纸污泥(150g)和土壤(850g),将二者充分混匀,装于 2 L 的塑料盆中(盆高 20 cm,底直径 10 cm)。调节混合土壤水分至 60%的饱和含水量。稳定 24 h 后,根据处理布置要求向每盆接种 6 g 蚯蚓,每 3 d 采用称重法调节土壤水分含量。整个培养试验持续时间为 30 d,培养结束后将混合污泥土壤进行风干、过 2 mm 筛、备测。

### 1.3 土壤样品的测定方法

土壤 pH 和 Eh 值的测定用 pH/Eh 计电位法(水土比 2.5:1);有机质、全量和速效氮磷钾养分以及重金属全量测定采用土壤农化常规分析法<sup>[15]</sup>;土壤溶解性碳的测定采用 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提,重铬酸钾消化法测定<sup>[16]</sup>。

土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法<sup>[17]</sup>。10g 样品调至 60% 田间持水量并稳定 24 h 后,在 28℃ 黑暗条件下培养 7 d。用无酒精氯仿 28℃ 黑暗真空条件下熏蒸 24 h,与不熏蒸的对照样品同时用 0.5mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、按质量与体积比 1:4 土液比振荡浸提 30 min(200 r/min),5100 g 力下离心 10 min 后过滤,浸提液中的有机碳采用重铬酸钾消化法测定。土壤微生物量碳(Bc)按下列公式计算: $Bc = Ec/0.38$  其中,Ec 为熏蒸和不熏蒸样品的浸提液中有机碳的差值<sup>[18]</sup>。微生物熵通过微生物量碳与有机碳的百分比来确定。土壤呼吸测定采用 NaOH 吸收法,测定标准条件下微生物碳源矿化过程中 CO<sub>2</sub> 的产生量<sup>[19]</sup>。15 g 样品(干重)调至 60% 田间持水量并稳定 24 h 后,在 28℃ 黑暗条件下 1 L 玻璃瓶中密封培养,用 NaOH 吸收瓶中产生的 CO<sub>2</sub>,在 7 d 后用过量 1 mol/L BaCl<sub>2</sub> 沉淀碱吸收瓶中的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,用标准酸滴定剩余的 NaOH 以计算 CO<sub>2</sub> 产生量。呼吸速率为单位时间内单位有机碳含量的呼吸量;另外,微生物代谢熵( $qCO_2$ )以单位微生物量碳每天产生的 CO<sub>2</sub> 量来确定<sup>[20-21]</sup>。

土壤过氧化氢酶采用 KMnO<sub>4</sub> 容量法测定,酶活性以每克土壤消耗的 KMnO<sub>4</sub> (0.02 mol/L) 毫升数表示;脲酶采用苯酚钠比色法,在 578 nm 波长处比色测定,酶活性以 37℃ 恒温培养 24 h 后 1 g 土壤中 NH<sub>3</sub>-N 的毫克数表示(NH<sub>3</sub>-N mg/g 土壤, 37℃, 24 h)。转化酶采用滴定法测定,酶活性以 37℃ 恒温培养 24 h 后 1 g 土壤消耗的 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.1 mol/L) 毫升数表示<sup>[22]</sup>。另外,酸性和碱性磷酸酶、β-葡萄糖苷酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶和荧光素二乙酸酯酶均利用各自酶促反应试剂、采用比色法进行测定<sup>[23-24]</sup>:称取 2 g 样品调至 60% 田间持水量并稳定 48 h,加入 3 ml 蒸馏水混匀,获得样品溶液。酸性和碱性磷酸酶测定采用对硝基苯酚磷酸盐为酶底物,pH 5 柠檬酸盐(酸性磷酸酶)或 pH 9 硼酸盐(碱性磷酸酶)为缓冲液,测定在标准环境下单位土壤每小时释放对

硝基苯酚的量( $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$ )。β-葡萄糖苷酶和 N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶,则分别使用 β-葡萄糖苷-苯二酚和 N-乙酰-氨基葡萄糖苷-苯二酚作为酶底物,以及磷酸缓冲液(pH 5)测定对硝基苯酚的释放量( $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ 土壤 h}^{-1}$ )。荧光素二乙酸酯酶(FDA)利用磷酸缓冲液(pH 7.0)、在波长 490 nm 处比色、测定荧光素的量,其酶活性单位为单位土壤每小时产生荧光素的量( $\mu\text{g 荧光素}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )。

### 1.4 数据分析方法

试验数据均采用平均值±标准差,并利用 SAS 统计软件(SAS 8.0 Software, SAS Institute Inc.)和 R (ADE-4)多元数据分析软件<sup>[25-26]</sup>进行分析。其中,T 检验、方差分析和多重比较(DMRT)用于比较培养前后蚯蚓数量和生物量变化以及不同处理间土壤各化学和生物学指标的差异,显著性水平用  $P=0.05$  表示。主成分分析通过在 R 中导入 ADE-4 软件包,将各处理中相互关联的多个变量合成少数独立而又能反映总体信息的指标,并应用置换检验比较不同处理间土壤化学和生物性质综合特征的差异;多元数据分析结果利用二维空间载荷图和得分图直观而形象的进行反映,处理间的差异显著性水平用  $P=0.05$  表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 蚯蚓生长状况

如表 2 所示,在混合污泥的旱地土和水稻土中,蚯蚓接种 30 d 后,*A. morrissi* 数量分别减少 1.67% ( $P>0.05$ ) 和 11.7% ( $P<0.05$ ),*E. foetida* 数量则分别显著增加 19.0% 和 15.0% ( $P<0.05$ )。另外,在接种 30 d 后,在混合污泥的旱地土壤中 *A. morrissi* 和 *E. foetida* 生物量均显著增加 ( $P<0.05$ );而在混合污泥的水稻土壤中则情况相反,两种蚯蚓生物量均呈下降趋势,特别是 *A. morrissi* 生物量下降达到显著水平 ( $P<0.05$ )。

### 2.2 蚯蚓活动后土壤化学和生物学性质分析

各处理土壤性质的主成分分析结果如图 1 所示,第一主成分(PC<sub>1</sub>)和第二主成分(PC<sub>2</sub>)的累计方差贡献率达到 59.4%。主成分载荷图显示:第一主成分(PC<sub>1</sub>)的方差贡献率为 46.3%,其分别与大多数碳氮磷钾养分含量、呼吸速率、微生物熵、过氧化氢酶、脲酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、β-葡萄糖苷酶、

荧光素二乙酸酯酶活性密切相关。第二主成分的方差贡献率为 13.1%,其主要与微生物量碳、碱性磷酸酶、转化酶、脲酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、β-葡萄糖苷酶活性有关。主成分得分图显示:各处理之间的差异达到极显著水平( $P<0.001$ )。两种土壤的化学和生物学综合性质差异主要体现在第一主成分相关指标上:PS 土壤具有较高的 Eh 值、全磷、全钾和碱解氮含量、呼吸速率、微生物熵、N-乙酰-氨基葡萄糖

糖苷酶和过氧化氢酶活性,而 DL 土壤则具有较高 pH 值、丰富的有机碳、全氮、速效钾含量、碳氮比、β-葡萄糖苷酶、荧光素二乙酸酯酶和脲酶活性。另外,蚯蚓与对照处理土壤差异则主要体现在第二主成分相关指标上:PS 土壤中 *E. foetida* 处理显著区别于对照土壤和 *A. morrissi* 处理;DL 土壤中 *E. foetida* 和 *A. morrissi* 处理的土壤特征差异不明显,但 *A. morrissi* 与对照土壤差异较为显著( $P<0.001$ )。

表 2 混合污泥土壤中蚯蚓的生物量和数量变化

Table 2 Variations of earthworm biomass and quantity in soil amended with the paper mill sludge											
处理 Treatments	蚯蚓数量 Earthworm quantity						蚯蚓生物量 Earthworm biomass				
	旱地土/水稻土		旱地土		水稻土		旱地土			水稻土	
	DL/PS		DL		PS		DL			PS	
	(条/盆)		(条/盆)		(条/盆)		(g 条/kg 土)			(g 条/kg 土)	
	0 d	30 d	<i>P</i>	30 d	<i>P</i>	0 d	30 d	<i>P</i>	0 d	30 d	<i>P</i>
毛利远盲蚓 <i>A.morrisi</i>	12±0.00	11.8±0.447	0.374	10.6±0.894	0.025	6.29±0.114	8.27±0.363	0.000	6.17±0.250	5.36±0.451	0.034
赤子爱胜蚓 <i>E.foetida</i>	20±0.00	23.8±1.92	0.012	23.0±2.35	0.046	6.16±0.164	7.52±0.231	0.002	6.08±0.077	5.93±0.248	0.263

平均值±标准差,n=5

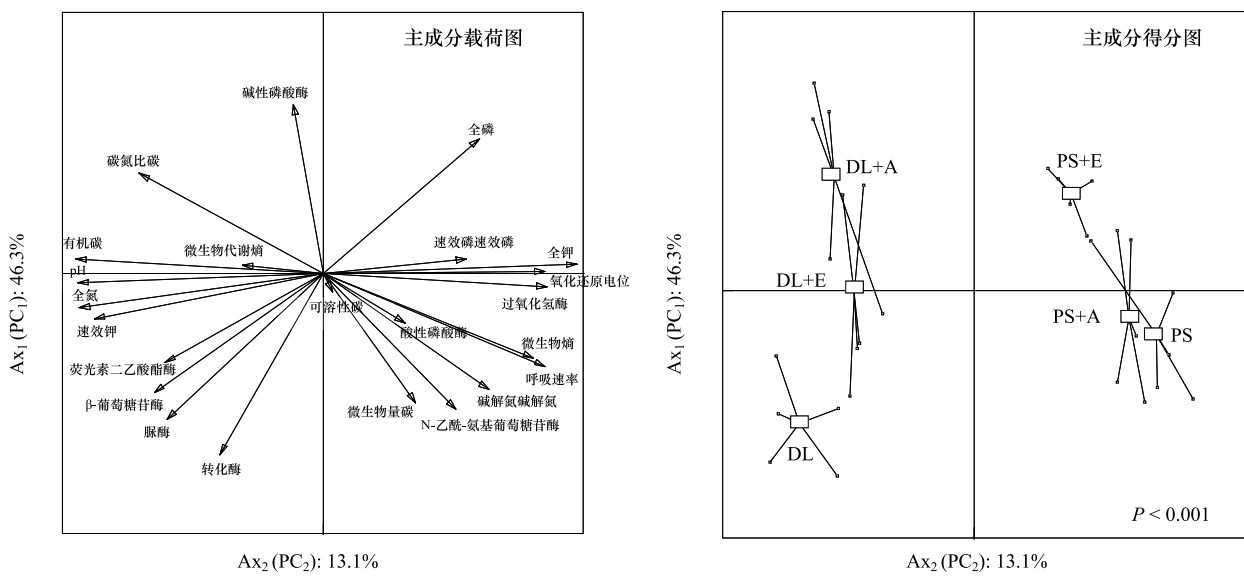


图 1 各处理土壤化学和生物学性质的主成分分析

Fig.1 Principal Component analysis of soil chemical and biological properties in treatments

### 2.2.1 蚯蚓对两种添加污泥土壤化学性质的影响

在混合污泥的旱地土壤中,各处理间土壤的 pH 和 Eh 值、有机碳和碱解氮含量、碳氮比差异显著(表 3)。与对照土壤相比,*E. foetida* 处理的 pH 显著降低了 0.22 个单位和 Eh 显著增加了 13 个单位,有机碳含量降低了 22.8%;*A. morrissi* 处理土壤的碱解氮含量明显降低了 16.5%。与对照土壤相比,两种蚯蚓处理的全氮、速效钾含量有一定程度的降低,全磷

和全钾含量有微弱上升,但这些指标处理间差异未达到显著水平( $P>0.05$ )。另外,两种蚯蚓相比较,*E. foetida* 处理的 pH 和 Eh 值、有机碳含量和碳氮比均显著低于*A. morrissi*处理 0.17 和 10 个单位、24.9%和 2.26 个单位( $P<0.05$ )。

在混合污泥的水稻土壤中,各处理间土壤的有机碳、全钾和速效钾含量、碳氮比差异显著(表 4)。与对照土壤相比,*E. foetida*处理的有机碳含量显著



表 3 旱地土壤各处理化学性质变化  
Table 3 Variations of soil chemical properties in treatments of Dry land

	pH	氧化还原电位 Eh /mv	有机碳 Organic C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碳氮比 C:N ratio	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	可溶性碳 Dissolved organic C (mg/kg)	碱解氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
DL	7.91±0.130a	-64±7a	21.9±1.89a	2.65±0.207a	8.28±0.381ab	0.994±0.589a	6.28±0.319a	229±28.9a	176±19.8a	22.5±1.86a	192±42.0a
DL+A	7.86±0.105a	-61±6a	22.5±2.97a	2.41±0.413a	9.45±1.40a	1.73±0.213a	6.47±0.269a	212±35.5a	147±18.9b	25.9±2.66a	157±27.3a
DL+E	7.69±0.076b	-51±5b	16.9±1.37b	2.36±0.175a	7.19±0.587b	1.38±0.807a	6.38±0.445a	267±34.1a	163±9.76ab	22.4±2.90a	158±25.8a
F	6.12	6.59	9.83	1.43	7.85	1.93	0.390	3.64	3.91	3.10	1.90
P	0.015	0.012	0.0003	0.277	0.007	0.088	0.688	0.058	0.049	0.082	0.192

平均值±标准差 (n=5), 表中同一列数据后跟相同小写字母者在方差分析中(DMRT 法)于 0.05 水平上无显著差异

表 4 水稻土壤各处理化学性质变化  
Table 4 Variations of soil chemical properties in treatments of Paddy soil

	pH	氧化还原电位 Eh /mv	有机碳 Organic C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碳氮比 C:N ratio	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	可溶性碳 Dissolved organic C (mg/kg)	碱解氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
PS	7.29±0.076a	-41±5a	8.77±0.576b	1.40±0.061a	6.26±0.567b	2.03±0.097a	9.33±0.236a	295±120a	194±8.85a	43.6±4.51a	80.4±4.04b
PS+A	7.28±0.079a	-40±4a	9.16±0.818b	1.42±0.025a	6.44±0.511b	2.06±0.063a	9.07±0.257ab	233±119a	189±17.3a	37.1±24.7a	91.0±4.18a
PS+E	7.30±0.052a	-41±3a	10.6±0.489a	1.45±0.060a	7.28±0.582a	2.04±0.163a	8.76±0.255b	169±54.1a	183±16.5a	28.7±9.08a	80.6±2.88b
F	0.080	0.040	10.8	1.21	4.85	0.120	6.490	1.860	0.680	1.17	13.1
P	0.926	0.967	0.002	0.333	0.029	0.891	0.012	0.197	0.526	0.343	0.001

平均值±标准差 (n=5), 表中同一列数据后跟相同小写字母者在方差分析中(DMRT 法)于 0.05 水平上无显著差异

提高 20.9%, 碳氮比提高 1.02 个单位, 全钾含量降低 6.11%; *A. morrisoni* 处理的速效钾含量显著提高 13.2% ( $P < 0.05$ )。与对照土壤相比, 两种蚯蚓处理的全氮和全磷含量有一定程度的提高, 可溶性碳、速效磷和碱解氮含量有微弱下降, 但这些指标处理间差异未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。另外, 两种蚯蚓相比较, *E. foetida* 处理的有机碳含量显著高于 *A. morrisoni* 处理 15.7%, 碳氮比高 0.84 个单位, 速效钾含量则显著低于其 11.4% ( $P < 0.05$ )。

### 2.2.2 蚯蚓对两种添加污泥土壤生物学性状的影响

在混合污泥的旱地土壤中, 各处理间土壤的微生物量碳含量、代谢熵、过氧化氢酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶和荧光素二乙酸酯酶活性差异显著 (表 5)。与对照土壤相比, *E. foetida* 处理的土壤微生物量碳含量显著降低了 43.8%, 过氧化氢酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、脲酶和酸性磷酸酶活性分别降低了 12.4%、48.4%、44.0% 和 40.7%, 荧光素二乙酸酯酶活性增加了 57.4%; *A. morrisoni* 处理的土壤过氧化氢酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶和脲酶活性分别显著降低了 12.4%、33.9% 和 45.5%。与对照土壤相比, 两种蚯蚓处理后的土壤微生物熵和转化酶活性有一定程度的降低, 但这些指标处理间差异未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。另外, 两种蚯蚓相比较, *E. foetida* 处理土壤的代谢熵和荧光素二乙酸酯酶活性显著高于 *A. morrisoni* 处理 ( $P < 0.05$ )。

在混合污泥的水稻土壤中, 各处理之间土壤的呼吸速率、过氧化氢酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和荧光素二乙酸酯酶活性差异显著 (表 6)。与对照土壤相比, *E. foetida* 处理的呼吸速率显著降低了 33.8%; *A. morrisoni* 处理的过氧化氢酶活性显著提高 10.8%, 但  $\beta$ -葡萄糖苷酶和荧光素二乙酸酯酶活性分别下降了 46.7% 和 34.4% ( $P < 0.05$ )。与对照土壤相比, 两种蚯蚓处理的土壤微生物量碳含量、微生物熵、代谢熵、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性均有一定程度的下降, 但这些指标处理间差异未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。另外, 两种蚯蚓相比较, *E. foetida* 处理的土壤呼吸速率和过氧化氢酶活性显著低于 *A. morrisoni* 处理 36.5% 和 5.51%, 而  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性明显较高 ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 不同土壤类型影响蚯蚓对混合污泥土壤的化学和生物学特征的作用

本研究结果表明土壤类型是影响蚯蚓改变土壤

化学和生物学性状的的决定性因素之一 (图 1,  $P < 0.05$ )。本研究所用旱地土为高有机碳、低粘粒含量土壤, 水稻土则为低有机碳、高粘粒含量土壤。两种蚯蚓对混合污泥的旱地土壤化学和生物学特征的影响均明显大于水稻土壤。其中, 与对照相比, *E. foetida* 活动后旱地土壤的 pH、Eh、有机碳和微生物量碳含量、过氧化氢酶和 N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、荧光素二乙酸酯酶活性等 7 个指标均有显著影响; 而在水稻土壤中, 其仅对有机碳含量、碳氮比、全钾含量和呼吸速率等 4 个指标有显著作用。同时, 与对照相比, *A. morrisoni* 在旱地土壤中活动后, 土壤碱解氮含量、过氧化氢酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、脲酶活性、荧光素二乙酸酯酶活性均发生显著变化, 而水稻土壤中, 该蚯蚓活动后土壤中只有速效钾含量、过氧化氢酶活性、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和荧光素二乙酸酯酶活性 4 个指标显著变化。具体分析如下:

本研究结果显示蚯蚓在混合污泥的水稻土中对 pH 的作用并不明显; 而在混合污泥的旱地土壤中 *E. foetida* 活动后的 pH 降低 (表 3 和表 4)。与水稻土相比, 旱地土壤有机碳含量相对较高 (表 1), 蚯蚓分解有机物质形成较多有机酸可能是造成这一现象的原因之一<sup>[27]</sup>。另外, 目前较少研究显示蚯蚓作用后土壤的氧化还原电位变化情况。本研究结果显示: 与对照相比, 蚯蚓活动后混合污泥的旱地土的氧化还原电位显著降低, 特别是 *E. foetida* 处理达到显著水平; 而在水稻土壤中这种现象并未发现。由于氧化还原电位与土壤通气性密切相关<sup>[28]</sup>。本研究中旱地土壤粘粒含量相对较少、土质疏松, 土壤通气性较好。由于蚯蚓具有将原本疏松或紧实的土壤, 通过自身吞食和挖掘行为将其变为中间状态的能力<sup>[29]</sup>。因此, 原本疏松的、通气性较好的旱地土壤经蚯蚓活动后可能变的相对紧实、通气性降低, 从而使其氧化还原电位随之下降。

本研究将 *E. foetida* 接种于土壤中发现: 在原本高有机碳含量的混合污泥旱地土壤中, 该蚯蚓活动显著降低了有机碳含量; 而在相对较低有机碳含量的混合污泥水稻土壤中, 蚯蚓活动则促进了土壤有机碳含量的升高 (表 3 和表 4)。结合前人研究: 蚯蚓在普通土壤中活动能够明显提高其有机碳含量<sup>[30-31]</sup>; 但是, 在蚯蚓接种于有机废弃物后, 物料有机碳含量并未升高、反而呈现显著降低的趋

势<sup>[6, 27, 32-35]</sup>。因此,本研究得出蚯蚓可能也具有一种能力:其在有机碳较低的基质中,能选择性吞食有机物颗粒,提高基质中碳素的储备;但是在丰富有机碳物质中,蚯蚓则与大量微生物联合作用,将有机物快速分解并以 CO<sub>2</sub> 形式将其释放<sup>[32, 34, 36-37]</sup>,从而降低其有机碳含量。已有研究结果显示蚯蚓处理污泥后,污泥的全氮、磷含量明显增加<sup>[6, 27, 33, 38-39]</sup>。本研究结果显示两种污泥混合土壤接种蚯蚓后其全氮和全磷含量的变化与对照相比并不显著,两种土壤和污泥本身较低的氮和磷含量可能是造成这种现象的重要原因。较多研究结果显示蚯蚓处理后的污泥全钾含量显著增加<sup>[6, 27, 33, 38-39]</sup>。而本研究结果显示蚯蚓处理的混合污泥旱地土壤全钾变化不明显、水稻土全钾含量显著降低。造成这种现象的原因可能是蚯蚓生理代谢对钾素的利用<sup>[40]</sup>, Vig 等<sup>[34]</sup> 也曾研究发现 *E. foetida* 处理的污泥和牛粪混合物全钾含量显著下降的现象。前人研究结果显示经蚯蚓处理后的污泥或有机物料的碱解氮、速效磷和速效钾含量明显增高<sup>[9, 33, 35]</sup>。而王小利等<sup>[38]</sup> 和刘鸿雁等<sup>[39]</sup> 研究显示蚯蚓处理后污泥的碱解氮、速效磷、速效钾含量呈下降趋势。本研究结果显示两种蚯蚓处理的混合污泥土壤碱解氮含量均呈现下降趋势,特别是旱地土壤的碱解氮降低量达显著水平。由于本研究所用造纸污泥为富含大量有机质、未经腐解的物料,在蚯蚓活动过程中,有机质的好氧分解很可能加大了物料温度升高幅度,促进了其氨氮挥发率和硝化速度,因此混合污泥土壤的碱解氮含量呈现下降趋势<sup>[39]</sup>。本研究结果显示蚯蚓对两种混合污泥土壤的速效磷含量影响不大,而对速效钾含量的影响主要体现在混合污泥的水稻土壤中:与对照相比, *A. morrissi* 处理后水稻土的速效钾含量显著增加表明了该种蚯蚓活动促进土壤全钾向有效钾的转化能力。Yadav 和 Garg<sup>[27]</sup>、Vig 等<sup>[34]</sup> 和 Garg 等<sup>[35]</sup> 研究显示 *E. foetida* 堆制处理污泥和不同有机废弃物混合物后,物料的碳氮比显著降低。本研究结果显示 *E. foetida* 在混合污泥的旱地土壤中显著降低其碳氮比,但是在混合污泥水稻土壤中显著增加碳氮比;而 *A. morrissi* 则在两种土壤混合物中均有增加物料碳氮比的趋势。在混合物料中,蚯蚓和微生物协同作用对有机质分解造成的碳富集或损失、氮含量降低或增加,以及蚯蚓作用后物料的熟化度变化都可能是

造成这种现象的重要原因<sup>[34]</sup>。

与对照相比,本研究结果总体显示:蚯蚓处理两种混合污泥土壤后,土壤微生物碳量、呼吸速率、微生物熵和代谢熵呈下降趋势(表 5 和表 6);特别是 *E. foetida* 处理在旱地土和水稻土中显著降低微生物量碳含量和呼吸速率 ( $P < 0.05$ )。这与 Gómez-Brandón 等<sup>[41]</sup> 和郭瑞华等<sup>[9]</sup> 研究发现 *E. andrei* 或 *E. foetida* 处理的有机物料和污泥后,物料的微生物量减少、土壤呼吸释放 CO<sub>2</sub> 量显著减弱的结果相一致。由于土壤微生物量碳和呼吸速率分别是反映微生物量大小和微生物活性的重要指标。因此,本研究中较低的微生物量碳和呼吸速率可能是蚯蚓在混合污泥土壤中吞食某些有害微生物种群而造成的<sup>[9]</sup>。

酶是土壤生物化学反应的重要参与者,它不仅能够对土壤微生物活性有较为敏感的反应,而且能够反映土壤碳氮磷等养分的转化和利用状况。已有研究结果显示,蚯蚓在土壤或有机物料中活动后土壤酶活性呈显著增加的趋势<sup>[9, 42-44]</sup>。而本研究结果显示蚯蚓处理不同类型土壤后,不同种类酶活性变化差异较大。在混合污泥的水稻土中,两种蚯蚓活动均能提高过氧化氢酶活性;而在混合污泥的旱地土中,则呈现相反的趋势(表 5 和表 6)。由于过氧化氢酶对不同农田土壤的有机碳和养分含量变化较为敏感<sup>[45]</sup>,因此本研究中两种土壤有机碳和养分含量差异可能是造成过氧化氢酶活性差异的重要原因。 $\beta$ -葡萄糖苷酶和转化酶分别是降解纤维素和水解蔗糖成为葡萄糖和果糖的重要酶。在混合污泥旱地土壤中,本研究结果显示蚯蚓对这两种酶活性的影响与其对过氧化氢酶活性影响一致。但是,在混合污泥的水稻土壤中,蚯蚓的作用并没有一定的规律,不同蚯蚓取食特性的差异很可能是造成这种现象的原因之一。由于过氧化氢酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和转化酶与土壤的腐殖质形成、有机质含量紧密相关,因此上述研究结果也进一步说明蚯蚓对不同类型土壤的碳素转化有不同作用。N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶是降解几丁质和肽聚糖、水解氨基葡萄糖的酶类,而脲酶是催化尿素水解的酶,二者均是参与土壤氮循环的重要物质。磷酸酶在土壤有机磷化合物水解中起重要作用,是参与土壤磷素循环的关键酶类。在本研究中,蚯蚓处理旱地土后,显著降低的土壤 N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶活性可能

表 5 旱地土壤各处理生物学性状变化

Table 5 Variations of soil biological characteristics in treatments of Dry land												
	呼吸速率 Respiration rate /(g kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	微生物量碳 Microbial biomass C /(mg/kg)	微生物熵 Microbial quotient /%	代谢熵 Metabolic quotient /(mg Cco <sub>2</sub> / mg Cbio)	过氧化氢酶 Catalase /(mL/g)	β-葡萄糖苷酶 β-glucosidase /(μg pNP g/ ± h <sup>-1</sup> )	转化酶 Invertase /(mg/g)	N-乙酰-氨基 葡萄糖苷酶 N-acé tyl-glucosaminidase /(μg pNP g <sup>-1</sup> ± h <sup>-1</sup> )	脲酶 Urease /(mL/g)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase /(μg pNP g <sup>-1</sup> ± h <sup>-1</sup> )	酸性磷酸酶 Acid phosphatase /(μg pNP g <sup>-1</sup> ± h <sup>-1</sup> )	荧光素二 乙酸酯酶 FDA /(μg 荧光素 g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )
DL	3.49±1.18a	536±101a	2.47±0.551a	1.07±0.458ab	1.78±0.169a	93.1±21.3a	4.40±1.51a	117±22.1a	0.334±0.051a	34.5±19.4a	248±58.9a	115±18.8b
DL+A	2.35±0.833a	453±158ab	2.09±0.994a	0.821±0.1175b	1.56±0.100b	80.5±12.1a	2.58±0.937a	77.3±12.1b	0.182±0.067b	23.3±11.6a	179±34.6ab	136±13.7b
DL+E	3.58±0.365a	301±103b	1.79±0.594a	1.53±0.509a	1.56±0.119b	76.0±18.4a	3.02±1.78a	60.4±12.6b	0.187±0.126b	43.1±10.2a	147±63.9b	181±29.7a
F	3.21	4.62	1.06	3.93	4.40	1.25	2.15	16.1	4.89	2.40	4.62	11.9
P	0.076	0.033	0.378	0.049	0.037	0.322	0.160	0.000	0.028	0.133	0.032	0.001

表 6 水稻土壤各处理生物学性状变化

Table 6 Variations of soil biological characteristics in treatments of Paddy soil												
	呼吸速率 Respiration rate/( $\text{g kg}^{-1}$ $\text{d}^{-1}$ )	微生物量碳 Microbial biomass C ( $\text{mg/kg}$ )	微生物熵 Microbial quotient /%	代谢熵 Metabolic quotient ( $\text{mg Cco}_2/\text{mgChio}$ )	过氧化氢酶 Catalase ( $\text{mL/g}$ )	$\beta$ -葡萄糖苷酶 $\beta$ -glucosidase ( $\mu\text{g pNP g}^{-1}$ $\pm \text{h}^{-1}$ )	转化酶 Invertase ( $\text{mg/g}$ )	N-乙酰-氨基 葡萄糖苷酶 N-acé tyl-glucosaminidase ( $\mu\text{g pNP g}^{-1}$ $\pm \text{h}^{-1}$ )	脲酶 Urease ( $\text{mL/g}$ )	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase ( $\mu\text{g pNP g}^{-1}$ $\pm \text{h}^{-1}$ )	酸性磷酸酶 Acid phosphatase ( $\mu\text{g pNP g}^{-1}$ $\pm \text{h}^{-1}$ )	荧光素二乙酸酯酶 FDA ( $\mu\text{g 荧光素}$ $\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ )
PS	7.37±1.05a	589±246a	6.86±3.18a	0.911±0.475a	2.13±0.043b	180±34.2a	2.26±0.721a	75.0±15.3a	0.115±0.025a	24.4±17.5a	182±78.3a	227±43.1a
PS+A	7.69±1.93a	560±131a	6.19±1.65a	0.883±0.126a	2.36±0.118a	96.0±27.4b	2.63±1.39a	47.3±9.49a	0.147±0.096a	50.2±26.1a	159±70.3a	149±26.8b
PS+E	4.88±1.10b	423±136a	4.01±1.30a	0.837±0.285a	2.23±0.070b	196±33.2a	1.16±0.478a	67.2±22.5a	0.071±0.023a	37.6±15.8a	145±34.4a	190±18.9ab
F	5.88	1.24	2.29	0.070	9.23	14.4	3.26	3.68	0.110	2.01	0.44	7.55
P	0.017	0.323	0.143	0.937	0.004	0.001	0.074	0.057	0.894	0.177	0.651	0.008
平均值±标准差(n=5),表中同一列数据后跟相同小写字母者表示在方差分析中(DMRT法)于0.05水平上无显著差异												



与处理中下降的碱解氮和速效磷养分含量有一定的关系;在水稻土壤中也呈现相似的结果,但均未达到显著水平。由于酶活性变化与土壤有效养分特征密切相关<sup>[46]</sup>,旱地土和水稻土中较为相似的氮磷含量可能是造成蚯蚓处理后两种土壤氮磷转化相关的酶类变化趋于一致的原因之一。另外,荧光素二乙酸酯水解酶是通过土壤中蛋白酶、脂肪酶及酯酶等水解产生的荧光素二乙酸活性来评价微生物的总体活性的重要酶类。本研究结果显示两种蚯蚓在不同混合污泥土壤中荧光素二乙酸酯水解酶活性明显不同:在旱地土壤中,蚯蚓活动能显著增加荧光素二乙酸酯酶活性,而在水稻土壤中则呈现相反的结果。两种土壤有机碳和养分含量差异、微生物种群特征差异可能是造成这种现象的重要原因,更多的相关研究需深入进行。

### 3.2 蚯蚓种间差异是影响蚯蚓对混合污泥土壤化学和生物学特征作用的重要原因

*E. foetida* 是一种人工养殖的表层种蚯蚓,对有机物料的分解能力较强,也具有较高的繁殖率和较短的代际时期,对环境的忍耐力强,适用范围较广,因此其被广泛的应用于污泥、食物、农业废弃物的生物处理<sup>[47]</sup>。目前,大多数研究结果显示 *E. foetida* 在处理纯污泥进程中的积极作用<sup>[5-9]</sup>,但对其他种类蚯蚓的研究则较为少见。本研究首次引入本地种 *A. morrisi* 和常规人工养殖蚯蚓 *E. foetida* 于混合造纸污泥的土壤中进行研究。由于 *A. morrisi* 是一种华南地区本地自然生长的表-内层种蚯蚓,其主要以有机物和土壤为主要食源。因此,当高有机碳含量的造纸污泥混入两种土壤中,*A. morrisi* 与 *E. foetida* 的食性不同及在土壤中取食行为的差异成为蚯蚓影响混合污泥土壤化学性质和生物学特征的重要原因。在高有机碳含量的旱地土壤中,和 *A. morrisi* 相比,*E. foetida* 处理的土壤 pH、Eh、有机碳和碳氮比较低(表 3),这种现象一定程度上再次证实了该种蚯蚓较强的有机质吞食和分解能力,较多的有机酸生成、有机碳以 CO<sub>2</sub> 释放的形式损失是上述指标值或含量较低的重要原因。另外,在旱地土壤中,*E. foetida* 处理的土壤的微生物代谢熵和荧光素二乙酸酯酶活性较高(表 5),一定程度上也显示了该种蚯蚓活动对于该土壤微生物种群,特别是年轻微生物群落活性的提高有一定的积极作用<sup>[48]</sup>。同样,在水稻土壤中,有

机碳含量、碳氮比、速效钾含量、呼吸速率、过氧化氢酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性特征变化是造成 *A. morrisi* 和 *E. foetida* 处理的混合土壤化学和生物学性质差异的重要因素(表 4 和表 6)。*E. foetida* 处理相对较高的有机碳含量、碳氮比、 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性和较低的呼吸速率一定程度上凸显了该蚯蚓在低有机碳含量的水稻土中具有较强的储备有机碳能力;而 *A. morrisi* 处理土壤具有较高的速效钾含量,这些现象则表明了该蚯蚓在混合污泥水稻土壤中具有一定的钾素养分转化能力。

## 4 结论

(1) 蚯蚓对混合污泥土壤化学和生物学性质影响与土壤类型密切相关。具有高有机碳和低粘粒含量的旱地土壤混合 15% 的造纸污泥后,蚯蚓活动能够显著降低土壤 pH 和 Eh、加速有机碳分解和减少碳含量、减小微生物量、以及降低与土壤有机质分解和养分转化相关的酶活性,提高微生物总体活性。而具有低有机碳和高粘粒含量水稻土壤混合 15% 造纸污泥后,蚯蚓活动则主要作用于土壤有机碳的储存、对养分和微生物活性的影响相对较小。

(2) 本研究使用的造纸污泥为高有机碳和低养分含量的有机物料,在土壤中添加后蚯蚓对混合污泥土壤的作用显示:在混合污泥的高有机碳和低粘粒含量旱地土壤中,*E. foetida* 对土壤有机碳分解能力和微生物活性提高的能力显著高于 *A. morrisi*。在混合污泥的低有机碳和高粘粒含量的水稻土壤中,*E. foetida* 对土壤有机碳的储存能力则显著高于 *A. morrisi*,而 *A. morrisi* 对钾素的转换能力相对较强。

综上所述,蚯蚓能显著影响混合 15% 造纸污泥土壤化学和生物学特征。由于造纸污泥具有高有机碳和低养分含量特征,该污泥农用仍需按一定比例配合施用高养分有机物料。进一步根据土壤类型、选择适宜蚯蚓品种,进行长期小区和大田试验将更具参考价值。

## References:

- [1] Bellamy K L, Chong C, Cline R A. Paper sludge utilization in agriculture and container nursery culture. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24: 1074-1082.
- [2] Gagnon B, Lalande R, Simard R R, Roy M. Soil enzyme activities following paper sludge addition in a winter cabbage-sweet

- corn rotation. Canadian Journal of Soil Science, 2000, 80: 91-97.
- [ 3 ] Wang D H, Peng J J, Dai M. Evaluation of paper mill sludges as fertilizer and its agricultural test. Paper and Paper Making, 2003, 3: 47-50.
- [ 4 ] Du W, Zheng G D, Chen T B, Fu B T, Lei M, Gao D, Yue B, Liu B, Zhang J. Value and potential contamination risk of paper mill sludge land application; a review. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 5095-5103.
- [ 5 ] Gupta R, Garg V K. Vermiremediation and nutrient recovery of non-recyclable paper waste employing *Eisenia fetida*. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162: 430-439.
- [ 6 ] Kaur A, Singh J, Pal Vig A, Dhaliwal S S, Rup P J. Composting with and without *Eisenia fetida* for conversion of toxic paper mill sludge to a soil conditioner. Bioresource Technology, 2010, 101: 8192-8198.
- [ 7 ] Li D, Wang D H, Zeng T, Li L, Xie X L. Study on Pulp and Paper Mill Sludge Vermicomposting by Using *Eisenia foetida*. Transactions of China Pulp and Paper, 2010, 25(1): 22-26.
- [ 8 ] Yang M, Duan J J, Wang X L, Cui W W, Huang C, Guo D H. Advances in earthworm biological treatment of paper mill sludge and application of vermicompost. Guizhou agricultural sciences, 2011, 39(8): 116-119.
- [ 9 ] Guo D H, Fan M, Zhao L J, Liu H Y. Effect of Earthworms Treatment on Bioactivities of Bamboo Pulp Sludge. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(5): 103-105.
- [ 10 ] Nemati M R, Caron J, Gallichand J. Using paper de-inking sludge to maintain soil structural form; field measurements. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 275-285.
- [ 11 ] Zibilske L M, Clapham W M, Rourke R V. Multiple applications of paper mill sludge in an agricultural system; soil effects. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 1975-1981.
- [ 12 ] Pearce T G, Boone G C. Responses of invertebrates to paper sludge application to soil. Applied Soil Ecology, 1998, 9: 393-397.
- [ 13 ] Chantigny M H, Angers D A, Beauchamp C J. Active carbon pools and enzyme activities in soils amended with de-inking paper sludge. Canadian Journal of Soil Science, 2000, 80: 99-105.
- [ 14 ] Lavelle P, Spain AV. Soil Ecology. London: Kluwer Academic Publishers. 2001; 285-289, 463-494.
- [ 15 ] Lu R K. Analytical Method of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 2000: 12-292.
- [ 16 ] Dai J, Becquer T, Rouiller J H, Reversat G, Berhard-Reversat F, Lavelle P. Influence of heavy metals (zinc, cadmium, lead and copper) to some micro-biological characteristics of soils. Applied Soil Ecology, 2004, 25: 99-109.
- [ 17 ] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [ 18 ] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. Australia Journal of Soil Research, 1992, 30: 195-207.
- [ 19 ] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, Smith C J. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35: 273-284.
- [ 20 ] Zibilske L M. Carbon mineralization//Weaver R W, Angle S, Bottomley P, Bezdicek D, Smith S. Methods of Soil Analysis Part2-Microbiological and Biochemical Properties. Soil Science Society of America, 1994: 835-859.
- [ 21 ] Anderson T H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 98: 285-293.
- [ 22 ] Guan S Y. Soil enzyme and its methods. Beijing: Agricultural Press, 1986: 234-279.
- [ 23 ] Mora P, Miambi E, Jimenez J J, Decaens T, Rouland C. Functional complement of biogenic structures produced by earthworms, termites and ants in the neotropical savannas. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37: 1043-1048.
- [ 24 ] Li Y T, Rouland C, Benedetti M F, Li F B, Pando A, Lavelle P, Dai J. Microbial biomass, enzyme and mineralization activity in relation to soil organic C, N and P turnover influenced by acid metal stress. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41: 969-977.
- [ 25 ] R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, 2009. URL <http://www.R-project.org>.
- [ 26 ] Thioulouse J, Chessel D, Doledec S, Olivier J M. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. Statistics and Computing, 1997, 7: 75-83.
- [ 27 ] Yadav A, Garg V K. Recycling of organic wastes by employing *Eisenia fetida*. Bioresource Technology, 2011, 102: 2874-2880.
- [ 28 ] Huang C Y. Soil Science. Beijing: Agricultural Press, 2000: 179-183.
- [ 29 ] Barré P, McKenzie B M, Hallet P D. Earthworms bring compacted and loose soil to a similar mechanical state. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41: 656-658.
- [ 30 ] Jouquet P, Hartmann C, Choosai C, Hanboonsong Y, Brunet D, Montoroi J P. Different effects of earthworms and ants on soil properties of paddy fields in North-East Thailand. Paddy Water Environ, 2008, 6: 381-386.
- [ 31 ] Zhang C, Langlest R, Velasquez E, Pando A, Brunet D, Dai J, Lavelle P. Cast production and NIR spectral signatures of *Aporrectodea caliginosa* fed soil with different amounts of half-decomposed *Populus nigra* litter. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(8): 839-844.
- [ 32 ] Elvira C, Sampedro L, Benitez E, Nogales R. Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia Andrei*: A pilot-scale study. Bioresource Technology, 1998, 63: 205-211.

- [33] Suthar S. Vermistabilization of municipal sewage sludge amended with sugarcane trash using epigeic *Eisenia fetida* (Oligochaeta). *Journal of Hazardous materials*, 2009, 163: 199-206.
- [34] Vig A P, Singh J, Wani S H, Dhaliwal S S. Vermicomposting of tannery sludge mixed with cattle dung into valuable manure using earthworm *Eisenia fetida* (Savigny). *Bioresource Technology*, 2011, 102: 7941-7945.
- [35] Garg V K, Suthar S, Yadav A. Management of food industry waste employing vermicomposting technology. *Bioresource Technology*, 2012, 126: 437-443.
- [36] Aira M, Monroy F, Dominguez J. Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry. *Science of the Total Environment*, 2007, 385: 252-261.
- [37] Hait S, Tare V. Vermistabilization of primary sewage sludge. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 2812-2820.
- [38] Wang X L, Huang C, Duan J J, Yang M, Guo D H. Effect of Earthworm Biological Treatment on Nutrients and Heavy Metals of Paper Mill Sludge. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (2): 472-476.
- [39] Liu H Y, Guo D H, Fan M, Chen M. The study of earthworm biological treatment on paper sludge. *Guizhou Chemical Industry*, 2009, 34(5): 33-35.
- [40] Singh J, Kaur A, Vig A P, Rup P J. Role of *Eisenia fetida* in rapid recycling of nutrients from bio sludge of beverage industry. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2010, 73: 430-435.
- [41] Gómez-Brandón M, Aira M, Lores M, Domínguez J. Epigeic earthworms exert a bottleneck effect on microbial communities through gut associated processes. *PLoS ONE* 6(9): e24786. doi: 10.1371/journal.pone.0024786.
- [42] Sen B, Chandra T S. Do earthworms affect dynamics of functional response and genetic structure of microbial community in a lab-scale composting system? *Bioresource Technology*, 2009, 100: 804-811.
- [43] Aira M, Domínguez J. Microbial and nutrient stabilization of two animal manures after the transit through the gut of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny, 1826). *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161: 1234-1238.
- [44] Zhang C, Chen X F, Zhou B, Li J L, Yang C F, Dai J. Effects of *Amyntas robustus* and *Amyntas corticis* on enzyme activities and microbe characteristics in South China. *Scientia agricultura sinica*, 2012, 45(13): 2658-2667.
- [45] Liu J X. Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35 (4): 523-525.
- [46] Ernst G, Henseler I, Felten D, Emmerling C. Decomposition and mineralization of energy crop residues governed by earthworms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1548-1554.
- [47] Edwards C A. *Earthworm Ecology*. Boca Raton: CRC Press. 2004.
- [48] Zhang B Q, Li G T, Shen T S. Influence of the earthworm *Pheretima guillelmi* on soil microbial biomass and activity. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 168-172.

#### 参考文献:

- [3] 王德汉, 彭俊杰, 戴苗. 造纸污泥作为肥料资源的评价与农用试验. *纸和造纸*, 2003, 3: 47-50.
- [4] 杜伟, 郑国砥, 陈同斌, 付本田, 雷梅, 高定, 岳波, 刘斌, 张军. 造纸污泥土地利用的资源价值与潜在风险. *生态学报*, 2008, 28(10): 5095-5103.
- [7] 李丹, 王德汉, 曾婷, 李亮, 谢锡龙. 接种蚯蚓堆制处理造纸污泥的试验研究. *中国造纸学报*, 2010, 25(1): 22-26.
- [8] 杨明, 段建军, 王小利, 崔雯雯, 黄春, 郭端华. 蚯蚓生物处理造纸污泥及蚓粪应用的研究进展. *贵州农业科学*, 2011, 39 (8): 116-119.
- [9] 郭端华, 范敏, 赵柳军, 刘鸿雁. 蚯蚓生物处理对竹浆造纸污泥生物活性的影响. *贵州农业科学*, 2011, 39(5): 103-105.
- [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: 12-292.
- [22] 关松荫. *土壤酶及其研究法*. 北京: 农业出版社, 1986: 234-279.
- [28] 黄昌勇. *土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 2000: 179-183.
- [38] 王小利, 黄春, 段建军, 杨明, 郭端华. 蚯蚓对造纸污泥的养分和重金属处理效应的研究. *土壤通报*, 2012, 43 (2): 472-476.
- [39] 刘鸿雁, 郭端华, 范敏, 陈敏. 造纸污泥蚯蚓生物处理效应研究. *贵州化工*, 2009, 34(5): 33-35.
- [44] 张池, 陈旭飞, 周波, 黎建龙, 杨成方, 戴军. 华南地区壮伟环毛蚓和皮质远盲蚓对土壤酶活性和微生物学特征的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(13): 2658-2667.
- [45] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究. *土壤通报*, 2004, 35(4): 523-525.
- [48] 张宝贵, 李贵桐, 申天寿. 威廉环毛蚯蚓对土壤微生物量及活性的影响. *生态学报*, 2000, 20(1): 168-172.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.5 Mar., 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Advance in the study on drought index ..... LI Bozhen, ZHOU Guangsheng (1043)
- State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops .....  
..... LI Longqing, WU Zhengyun, ZHANG Qiang, et al (1053)
- Mechanism, hypothesis and evidence of herbivorous insect-host interactions in forest ecosystem .....  
..... ZENG Fanyong, SUN Zhiqiang (1061)
- Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web .....  
..... CHEN Yunfeng, HAN Xuemei, LI Yufei, et al (1072)
- A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China .....  
..... ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng (1085)
- Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China; a case study in Xining .....  
..... GAO Yun, XIE Miaomiao, FU Meichen, et al (1094)
- Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon; a case study in the  
hilly and gully area of Northern Shaanxi Province ..... ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, ZHONG Lina (1105)
- Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill  
sludge ..... CHEN Xufei, ZHANG Chi, DAI Jun, et al (1114)

### Autecology & Fundamentals

- Regulation of potassium supply and signal inhibitors on acetate effluxes by ectomycorrhizal fungi .....  
..... YANG Hongjun, LI Yong, YUAN Ling, et al (1126)
- Arsenic induces guard cell death in leaf epidermis of *Vicia faba* ..... XUE Meizhao, YI Huilan (1134)
- Identification and characteristics of phenol degrading bacteria ad049 screened from oil contaminated soil .....  
..... HU Ting, GU Jie, ZHEN Lisha, YANG Jiu, et al (1140)
- Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy .....  
..... FU Chuan, YU Shunhui, HUANG Yimin, et al (1149)
- Effects of sowing date on 2-acetyl-1-pyrroline content and yield of late season aromatic rice .....  
..... YANG Xiaojuan, TANG Xiangru, WEN Xiangcheng, et al (1156)
- Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress .....  
..... WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, et al (1165)
- The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices .....  
..... GAO Mingliang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1178)
- Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses ..... LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, et al (1189)
- Geostatistical analysis on spatial dynamics of the apterous *Myzus persicae* in flue-cured tobacco fields of Enshi tobacco area, China ...  
..... XIA Pengliang, WANG Rui, WANG Changjun, et al (1198)
- Patterns of seed predation and removal of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) by rodents .....  
..... ZHANG Jinghong, LIU Bingwan (1205)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant  
plants and soil in alpine meadow ..... LI Qianqian, ZHAO Xu, GUO Zhenggang (1212)



- Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses ..... XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa (1224)

### Population, Community and Ecosystem

- The main nest predators of birds breeding in artificial nest-boxes and its influencing factors ..... ZHANG Lei, LI Donglai, MA Ruiqiang, et al (1235)
- Temporal and spatial variation of macrobenthic communities in the intertidal zone of Xunpu, Quanzhou Bay ..... ZHUO Yi, CAI Lizhe, GUO Tao, et al (1244)
- The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin ..... ZHANG Haiping, WU Dayong, WANG Zhaoming, et al (1253)
- Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland ..... LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen (1264)
- Habitat assessment of sika deer (*Cervus nippon*) in the Taohongling National Nature Reserve, Jiangxi Province, China ..... LI Jia, LI Yankuo, MIAO Lujun, et al (1274)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation ..... GUO Ziliang, CUI Guofa (1284)
- Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years ..... MIAO Lijuan, JIANG Chong, HE Bin, et al (1295)
- Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought ..... LIU Kequn, LIANG Yitong, ZHOU Jinlian, et al (1302)
- Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010 ..... DAN Yongli, WANG Hongzhi, ZHANG Huan, et al (1311)

### Resource and Industrial Ecology

- The spatial distribution of *Ophiocordyceps sinensis* suitability in Sanjiangyuan Region ... LI Fen, WU Zhifeng, XU Cui, et al (1318)

# 《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 象伟宁

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 5 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 5 (March, 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