

DOI: 10.5846/stxb202106281713

张孟豪, 吴玲, 陈静, 潘伯桂, 刘科学, Elena Velasquez, Patrick Lavelle, 戴军, 张池. 蚯蚓对废纸屑再利用及养分贫瘠土壤综合质量的影响. 生态学报, 2022, 42(12): 5034-5044.

Zhang M H, Wu L, Chen J, Pan B G, Liu K X, Velasquez Elena, Lavelle Patrick, Dai J, Zhang C. Impacts of earthworms on the reutilization of office wastepaper and the comprehensive quality of nutrient-poor soil. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 5034-5044.

蚯蚓对废纸屑再利用及养分贫瘠土壤综合质量的影响

张孟豪¹, 吴玲¹, 陈静^{2,3}, 潘伯桂¹, 刘科学^{2,3}, Velasquez Elena⁴, Lavelle Patrick⁵,
戴军¹, 张池^{1,*}

¹ 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642

² 广东华南空间规划研究院, 广州 510651

³ 广州新华学院资源与城乡规划系, 广州 510520

⁴ Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia 111321

⁵ Université Paris Sorbonne, IEES-BIODIS, Paris, France 75006

摘要:办公废纸屑作为常见有机废弃物,由于体积小且转化为再生纸成本高,因而再利用很难。但其含有大量有机碳(特别是纤维素)可能有助于退化土壤修复。蚯蚓对土壤有机质分解和其他土壤功能有重要影响,办公废纸屑和蚯蚓共同作用如何影响养分贫瘠土壤质量至今未知。研究以赤子爱胜蚓为接种蚯蚓,将办公废纸屑添加到养分贫瘠土壤中,分别设置纯土壤培养为对照组(S)、单独添加废纸屑(SP)、单独接种赤子爱胜蚓(SE)和添加废纸屑并接种赤子爱胜蚓的处理(SPE),比较培养 90 d 后各处理理化指标(pH、有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、交换性阳离子钾、钠、钙、镁等)、微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)总含量和微生物结构的差异,在此基础上综合评价土壤质量,阐明废纸屑和赤子爱胜蚓在养分贫瘠土壤改良修复中的作用。结果显示:SPE 处理较 SP 处理显著提高废纸屑的分解率 89.48%。与对照相比,SP 处理能够显著提高土壤 pH 值 2.94 个单位,SPE 处理能够使其维持在中性水平;前者显著提高土壤有机碳(SOC)125.76%,交换性钠钙镁(Na_{Ex} 、 Ca_{Ex} 、 Mg_{Ex})154.00%、65.28%、55.25%,后者则明显增加 SOC 含量 522.88%,全氮(TN)1365.29%,全磷(TP)36.26%,速效钾(AK)42.84%,交换性钾(K_{Ex})、 Na_{Ex} 、 Ca_{Ex} 、 Mg_{Ex} 42.69%、160.35%、386.00%、110.36%。与对照 S 相比,SP 和 SPE 处理均能显著提高真菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、一般细菌和总 PLFAs 含量以及真菌/细菌,显著降低了革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌($P<0.05$)。主成分分析中 S、SP、SPE 处理土壤综合质量差异显著($P<0.05$),不同处理的质量指数呈现废纸屑+蚯蚓处理>废纸屑处理>对照,且土壤质量与微生物结构及生物量的关系更为密切。综上所述,在养分贫瘠土壤中赤子爱胜蚓堆肥废纸屑可以通过调节微生物群落结构,改变土壤 pH 和养分含量来提高土壤综合质量。这为废纸屑的资源化利用和养分贫瘠土壤的改良修复提供科学参考。

关键词:办公废纸屑;赤子爱胜蚓;养分贫瘠土壤;土壤综合质量

Impacts of earthworms on the reutilization of office wastepaper and the comprehensive quality of nutrient-poor soil

ZHANG Menghao¹, WU Ling¹, CHEN Jing^{2,3}, PAN Bogui¹, LIU Kexue^{2,3}, VELASQUEZ Elena⁴, LAVELLE Patrick⁵,
DAI Jun¹, ZHANG Chi^{1,*}

¹ College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

² Guangdong South China Institute of spatial planning, Guangzhou 510651, China

基金项目:国家自然科学基金项目(41601227, 41201305);广东省自然科学基金项目(2021A1515011543);国家科技基础性工作专项(2018FY100301)

收稿日期:2021-06-28; 采用日期:2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangchi2012@scau.edu.cn

3 Department of Resources and the Urban Planning, Guangzhou Xinhua University, Guangzhou 510520, China

4 Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia 111321

5 Université Paris Sorbonne, IEES-BIODIS, Paris, France 75006

Abstract: Office wastepaper, as a common organic waste, is not easy to reuse because of their small size and high costs of converting into recycled paper. A large amount of organic carbon (especially cellulose) in wastepaper may improve the remediation of degraded soil. Earthworm plays an important role on organic matter decomposition and other soil functions. Effects of office wastepaper and earthworms on the comprehensive quality of nutrient-poor soil are still largely unknown. In this study, *Eisenia fetida* were inoculated into the nutrient-poor soil along with office wastepaper in the laboratory for 90 days. Four treatments were conducted as follows: soil (S), soil+wastepaper (SP), soil+*E. fetida* (SE), and soil+wastepaper+earthworms (SPE). Soil pH, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK), cation exchange capacity (Na_{Ex} , K_{Ex} , Ca_{Ex} , Mg_{Ex}), phospholipid fatty acid (PLFAs) were determined in different treatments. Effects of wastepaper and *E. fetida* on the comprehensive quality of nutrient-poor soil were evaluated. Results were shown as follows: 89.48% increase of wastepaper decomposition were found in the SPE than SP treatment. Significant increases of soil pH value were observed in SP (8.37) than that of S treatment ($P<0.05$). Soil pH value was at a neutral level in SPE. Compared with control (S), the SOC, Na_{Ex} , Ca_{Ex} and Mg_{Ex} of SP treatment increased by 125.76%, 154.00%, 65.28%, and 55.25%. SOC, TN, TP, AK, K_{Ex} , Na_{Ex} , Ca_{Ex} , and Mg_{Ex} of SPE increased by 1365.29%, 36.26%, 42.84%, 42.69%, 160.35%, 386.00% and 110.36%. The addition of office wastepaper significantly improved soil microbial PLFAs contents ($P<0.05$). PLFAs contents of fungi (F), actinomycetes (ACT), gram-positive bacteria (G^+), gram-negative bacteria (G^-), common bacteria (CB), and total PLFAs (T-P) contents of SP and SPE treatments significantly increased ($P<0.05$). Moreover, the value of fungi PLFAs/bacteria PLFAs (F/B) of SP and SPE treatment significantly increased while gram-positive PLFAs / gram-negative PLFAs (G^+/G^-) remarkably reduced ($P<0.05$). Principal component analysis and general indicator quality showed that the addition of wastepaper and the inoculation of earthworm improved soil comprehensive quality significantly ($P<0.05$). The average soil quality index showed that $\text{SPE}>\text{SP}>\text{S}$ and more close relationship were observed between soil quality and microbial PLFAs. In summary, effects of office wastepaper and earthworm could improve soil comprehensive quality by adjusting microbial community structure and biomass, and changing soil pH and nutrient content in the nutrient-poor soil. It provided a scientific base on the resource utilization of office wastepaper and the remediation of nutrient-poor soils.

Key Words: office wastepaper; *Eisenia fetida*; nutrient-poor soil; soil comprehensive quality

办公废纸屑是社会生产中常见的有机废弃物,其尺寸较小,且转化为再生纸的成本较高^[1-3],因而不易回收再利用。但是废纸屑本身含有大量有机碳,将其作为有机物料进行还田可以明显提高土壤质量、改良退化土壤。已有研究显示在土壤中添加废纸屑可以增加土壤的透气性、提高养分、改变生物学特性、最终提高土壤质量^[4]。然而,废纸屑的主要组分为纤维素,其在土壤中自然分解速度较慢^[5],如何加速其在土壤中的分解是废纸屑能否高效再利用的关键。

蚯蚓作为土壤的生态系统工程师,是土壤自组织系统的重要因子^[6]。已有研究显示,将蚯蚓接种入土壤中可以加速土壤有机物质的分解、提高土壤养分含量、促进微生物活性、帮助退化土壤构建自组织系统、恢复并维持土壤生态系统稳定,最终提高土壤质量^[6-8]。赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)作为联合国粮农组织认证的模式蚓^[9-10],繁殖能力强且易获取,被广泛用于有机废弃物堆置处理和退化土壤的改良修复中^[11-13]。但是,赤子爱胜蚓如何促进废纸屑的分解、二者联合如何改良退化土壤质量至今未见报道。

综上所述,本研究通过添加废纸屑和蚯蚓于华南地区养分贫瘠土壤中,分析废纸屑和蚯蚓对土壤 pH、养

分、交换性盐基离子和微生物 PLFAs 的影响,利用土壤质量综合指数 GISQ 法^[14]对改良前后的土壤进行综合评价,以期为废纸屑资源化利用、废纸屑和蚯蚓联合改良养分贫瘠土壤提供新的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为采自华南农业大学校园 0—20 cm 的赤红壤(23°9′33″N, 113°21′22″E)。供试土壤的基本理化性质如下:pH (5.45±0.11),有机碳(2.97±0.71) g/kg,全氮(0.12±0.11) g/kg,全磷(138.38±7.53) mg/kg,全钾(12.34±0.14) g/kg。将采集的土壤自然风干,去除石砾等杂质,过 2 mm 筛,备用。

供试有机物料为取自办公室碎纸机的废纸屑。废纸屑尺寸为长 10 mm,宽 2 mm。pH 9.48±0.11,有机碳(334.33±5.13) g/kg,全氮(0.50±0.11) g/kg,全磷(51.86±8.36) mg/kg,全钾(0.25±0.07) g/kg。

供试蚯蚓为赤子爱胜蚓 *Eisenia fetida*,购自广州市某养殖场,将购得的蚯蚓在适宜环境中培养 1 周后,挑选单条质量约 0.5 g 的大小一致、具有成熟环的健壮蚯蚓进行土壤接种。

1.2 试验方法

本试验分别设置空白土壤对照 S、单独添加废纸屑处理 SP、单独接种蚯蚓处理 SE 和废纸屑+蚯蚓 SPE 处理。养分贫瘠的土壤中蚯蚓无法生存,因此 SE(单独接种蚯蚓)处理最终取消。

(1) S: 2 kg 土壤,不添加有机物料和蚯蚓,培养 90 d。

(2) SP: 1.8 kg 土壤+0.2 kg 有机物料,培养 90 d。

(3) SPE: 1.8 kg 土壤+0.2 kg 有机物料,培养 30 d 后接种赤子爱胜蚓 50 g,继续培养 60 d。

试验培养过程使用 3 L 的圆柱形塑料盆钵(10 cm×14 cm×20 cm),每个处理设置 4 次重复。试验期间,温度保持在 25 ℃左右,土壤水分保持田间持水量的 40%—60%,每两天通过称重法保持土壤含水量。养分退化土壤营养元素匮乏,为了赤子爱胜蚓的生存和土壤养分的提升,需要外源有机物料的投入,本试验中投入废纸屑作为有机物料。培养 90 d 后进行土壤样品采集。采集新鲜土壤置于-20 ℃冰箱保存,冻干处理后待测土壤微生物 PLFAs。余下土壤样品经风干后,分离去除未完全分解的废纸屑,过 2 mm 筛,备用待测。

1.3 测试方法

废纸屑 pH 采用无 CO₂水以土水比 1:10 提取,pH 计(雷磁 PHS-3C)测定^[15];有机碳含量采取重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮含量通过硫酸-过氧化氢消煮,半微量开氏法测定;全磷用硫酸-过氧化氢消煮,钼钒黄法测定;全钾用硫酸-过氧化氢消煮,原子吸收法测定。

土壤 pH 采用无 CO₂水以土水比 1:2.5 提取,pH 计(雷磁 PHS-3C)测定;有机碳含量通过重铬酸钾氧化-外加热法进行测定;全氮含量通过凯氏定氮法测定;全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;全钾的测定采用氢氧化钠熔融-火焰原子吸收法;碱解氮的测定采用碱解扩散法;速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰原子吸收法测定^[16]。

土壤 CEC 通过乙酸铵(1 mol/L 的 CH₃COONH₄, pH 7.0)交换-原子吸收分光光度法测定;土壤交换性 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量采用 1 mol/L 的 CH₃COONH₄(pH 7.0)浸提,原子吸收分光光度法测定^[17]。

通过脂类提取以及磷脂脂肪酸分析进行土壤微生物 PLFAs 测定。脂类提取步骤包括单相提取液提取、固相抽提柱层析分离脂类和脂类的碱性甲醇水解和甲基化。气相色谱(型号:HP6890/MSD5973,色谱柱为 Agilent 19091B-102)进行磷脂脂肪酸的分析,气相色谱的升温程序由 MIDI 软件的要求设置,甲基十九烷脂肪酸(19:0)为内标,总量用 n mol/g 表示^[18]。本研究中 14:00、15:00、17:00、18:00 表征一般细菌(CB);18:2 w6c、18:1 w9c 表征真菌(F);10Me 16:0、10Me 17:0、10Me 18:0 表征放线菌(ACT);14:0 iso、15:0 iso、15:0 anteiso、16:0 iso、17:0 iso、17:0 anteiso 表征革兰氏阳性菌(G⁺);16:1 w7c、18:1 w7c、17:0 cyclo、19:0 cyclo w8c 表征革兰氏阴性菌(G⁻);细菌(B)数量以革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌以及一般细菌加和表示^[19—20]。

1.4 数据处理

使用 Excel 2010 进行数据整理,使用 SPSS 23.0 对试验数据进行分析,不同处理间的差异采用单因素方

差分析 (One-way ANOVA) 和 Duncan's 多重比较进行分析,分别在 R 中导入 ADE-4 软件包对不同土壤样本 pH、养分状况、交换性盐基离子和微生物 PLFAs 进行主成分分析 (Principal component analysis, PCA)^[21]。在此基础上,研究根据土壤综合质量指数评价方法^[14],将上述土壤肥力和微生物指标作为综合质量评价变量,通过 $I_n = F1 \times (\alpha_1 a + \beta_1 b + \gamma_1 c) + F2 \times (\alpha_2 a + \beta_2 b + \gamma_2 c)$,计算每个样点的亚指标综合指数 I_n 。其中, $F1$ 和 $F2$ 为第一和第二主成分中方差累积贡献率, α 、 β 和 γ 代表变量对各自主成分的贡献, a 、 b 和 c 是所选变量在其对应轴上的得分值。将 I_n 进行数学标准化转化,使其在 0.1—1.0 区间,最终得出各处理的土壤综合质量指数 Y 。

2 结果与分析

2.1 赤子爱胜蚓对有机物料的分解作用

蚯蚓的添加有效加速了废纸屑在土壤中的分解过程。如图 1 所示,SP 处理的土壤中仍然存在大量的未分解废纸屑,SPE 处理的残存的未分解废纸屑数量极少。由图 2 可知,SP 处理未分解废纸重量极显著高于 SPE 处理 ($P < 0.01$);SPE 废纸分解率高达 98.28%,极显著高于 SP 处理 ($P < 0.01$)。

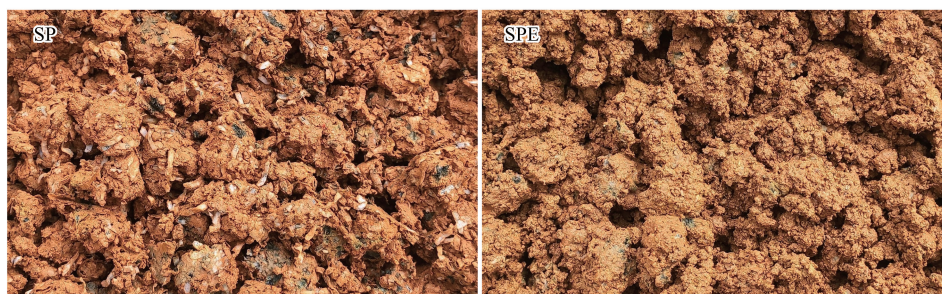


图 1 SP 和 SPE 处理的土壤外观图

Fig.1 Photos of soil appearance in SP and SPE treatments

SP:土壤+废纸屑 Add wast paper to the soil;SPE:土壤+废纸屑+蚯蚓 Add wastepaper and earthworm to the soil

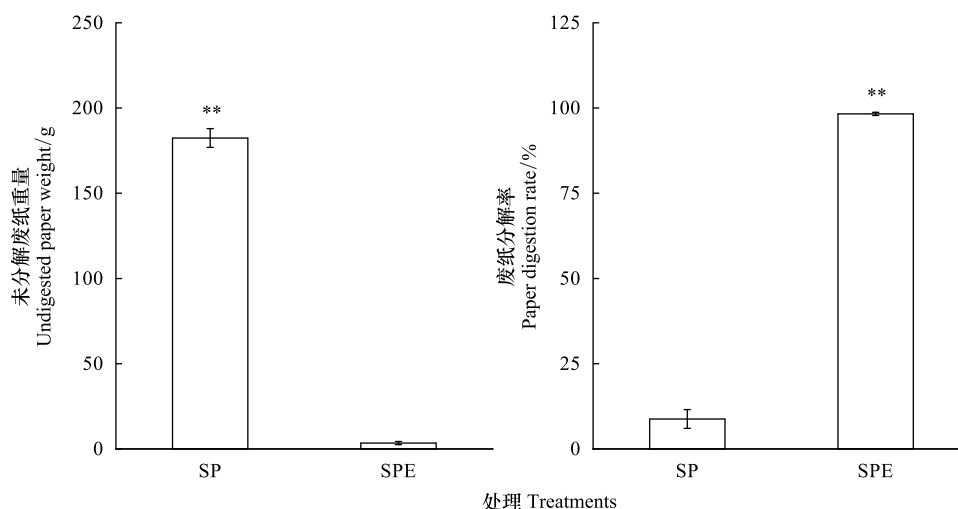


图 2 蚯蚓对办公废纸屑的分解作用

Fig.2 Effects of earthworms on decomposition of office wastepaper

图中数值表示平均值±标准差, $n=4$;采用 t 检验比较同种指标不同处理间的差异, * * 表示不同处理之间差异极显著 ($P < 0.01$)

2.2 赤子爱胜蚓对土壤的 pH 和养分的影响

如图 3 所示,对照 S 的土壤 pH 为 5.43,呈酸性。有机物料的添加有效提升了土壤 pH,相比对照 S,SP 处理的土壤 pH 显著提升到 8.37 ($P < 0.05$),呈碱性;SPE 处理的土壤 pH 显著提升到 7.26 ($P < 0.05$),呈中性。废

纸的添加显著提高了土壤有机碳含量, SPE 处理的有机碳含量显著高于 SP 处理, 且 SP 处理显著高于对照 S ($P<0.05$)。

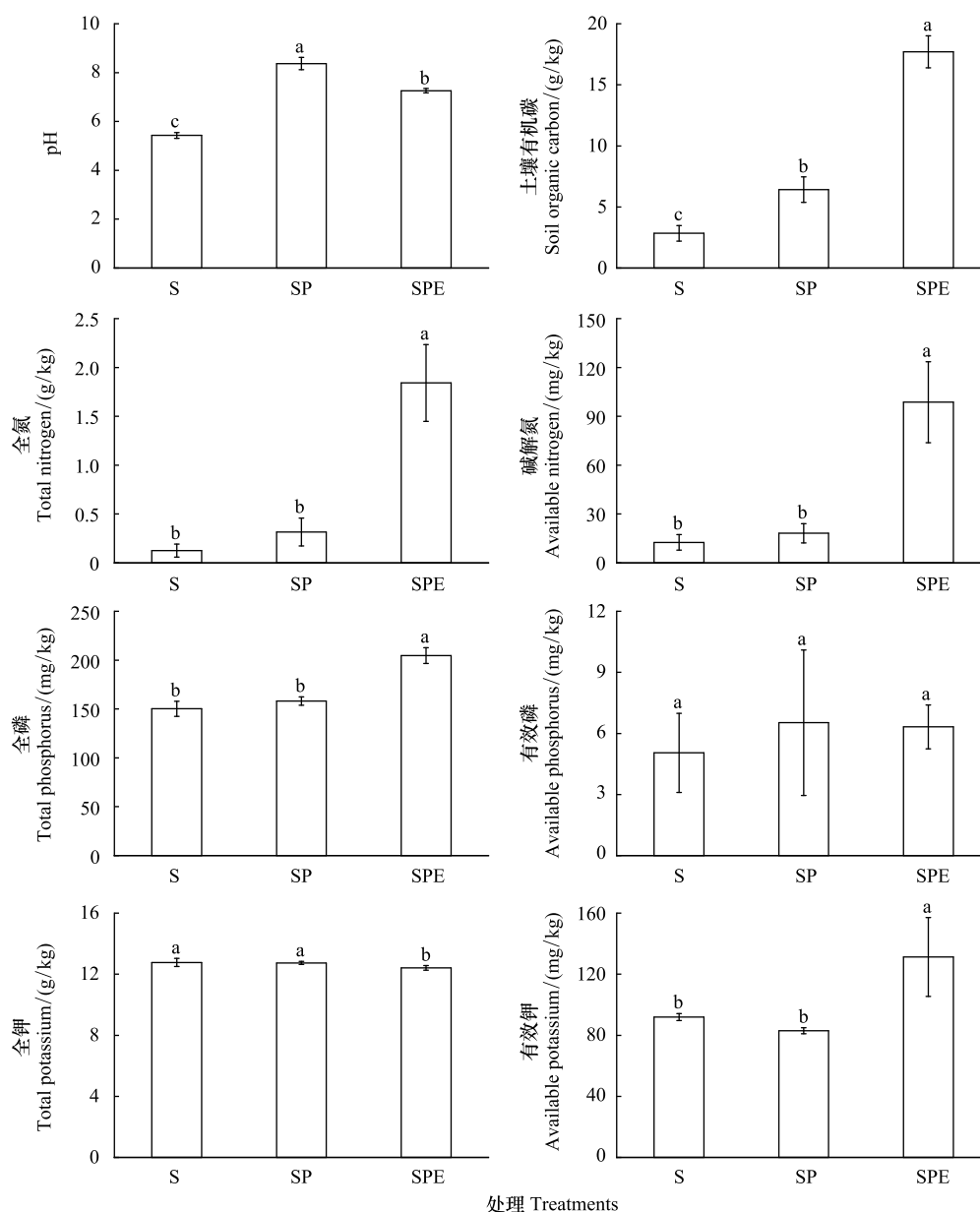


图3 不同处理土壤的 pH 和养分状况

Fig.3 Soil pH value and nutrient contents in different treatments

图中数值表示平均值 $\pm$ 标准差, $n=4$; 不同字母表示同种指标不同处理之间差异显著 ($P<0.05$); S: 对照土壤 Control

赤子爱胜蚓的接种有效提高了土壤的全氮和有效氮含量(图3)。土壤全氮和碱解氮含量整体呈现为 $S<SP<SPE$, 其中, SPE 处理的土壤全氮和碱解氮含量显著高于对照 S 和 SP 处理 ($P<0.05$)。SPE 处理的全磷含量显著高于对照 S 和 SP 处理 ($P<0.05$), SP 处理的全磷含量稍高于对照 S。对照 S、SP 和 SPE 处理的速效磷含量整体呈现为 SP 和 SPE 处理高于对照 S, 但不存在显著差异。对照 S 和 SP 处理的全钾含量不存在显著差异, 且两者的全钾含量显著高于 SPE 处理 ($P<0.05$)。对照 S 和 SP 处理的速效钾含量不存在显著差异, 且 SPE 处理的速效钾含量显著高于前两者 ($P<0.05$)。

2.3 赤子爱胜蚓对土壤中交换性盐基离子含量的影响

如图 4 所示,与对照 S 相比,SP 和 SPE 处理中交换性钾、钠、钙、镁和阳离子交换量均有提高,特别是 SPE 处理。具体到各项指标,对照 S、SP 和 SPE 的阳离子交换量无显著差异;SPE 处理的交换性钾显著高于对照 S 和 SP($P<0.05$);对照 SP 和 SPE 处理的交换性钠显著高于对照 S($P<0.05$);对照 S、SP 和 SPE 处理的交换性钙和镁呈现为: $S<SP<SPE$ ($P<0.05$)。

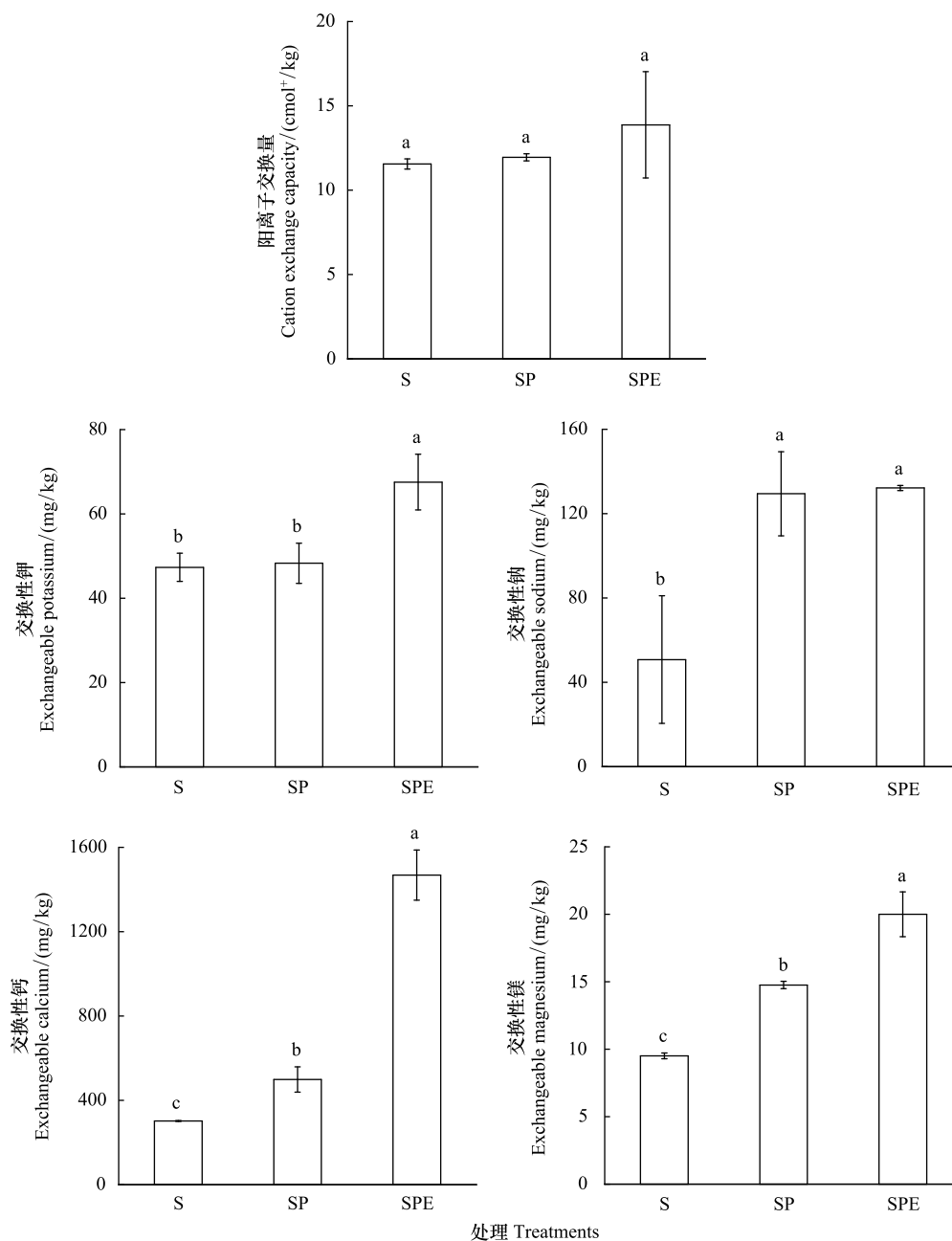


图 4 不同处理土壤的交换性盐基离子含量

Fig.4 Contents of exchangeable base cations in different treatment soils

图中数值表示平均值±标准差, $n=4$; 不同字母表示同种指标不同处理之间差异显著 ($P<0.05$)

2.4 赤子爱胜蚓对土壤微生物 PLFAs 的影响

有机物料的添加显著提高了土壤微生物 PLFAs (表 1)。相比对照土壤,对照 SP 和 SPE 处理的真菌、放线

菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、一般细菌和总 PLFAs 显著提高 ($P<0.05$)。赤子爱胜蚓的接种进一步显著提高土壤微生物 PLFAs ($P<0.05$), SPE 处理的真菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、一般细菌和总 PLFAs 显著高于 SP 处理 ($P<0.05$)。

对照 S 的革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌显著高于 SP 和 SPE 处理 ($P<0.05$), SP 和 SPE 处理的革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌不存在显著差异。对照 S 的真菌/细菌显著低于 SP 和 SPE 处理 ($P<0.05$), 而 SP 和 SPE 处理的真菌/细菌值无显著差异。

表 1 不同处理土壤微生物 PLFAs
Table 1 Microbial PLFAs in different treatments

	F	ACT	G ⁺	G ⁻	CB	T-P	G ⁺ /G ⁻	F/B
	n mol/g soil							
S	0.12±0.02 c	0.19±0.03 c	0.7±0.11 c	0.36±0.1 c	0.18±0.03 c	1.55±0.27 c	2.04±0.49 a	0.1±0.01 b
SP	3.71±1.77 b	0.74±0.35 b	4.21±1.92 b	4.45±2.91 b	1.46±0.7 b	14.57±7.58 b	1.08±0.34 b	0.37±0.04 a
SPE	9.75±0.76 a	1.95±0.15 a	11.39±0.64 a	12.21±2.95 a	4.51±0.49 a	39.81±4.73 a	0.97±0.23 b	0.35±0.03 a

表中数值表示平均值±标准差, n=4。不同字母表示同种指标不同处理之间差异显著 ($P<0.05$); F: 真菌 Fungi; ACT: 放线菌 Actinomycetes; G⁺: 革兰氏阳性菌 Gram-positive bacteria; G⁻: 革兰氏阴性菌 Gram-negative bacteria; CB: 一般细菌 Common Bacteria; T-P: 总磷脂脂肪酸 Total phospholipid fatty acid; G⁺/G⁻: 革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌 Gram-positive PLFAs / gram-negative PLFAs; F/B : 真菌/细菌 Fungi PLFAs/bacteria PLFAs; B: 细菌 (一般细菌、革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌之和) Bacteria; S: 对照土壤 Control; SP: 土壤+废纸屑 Add wast paper to the soil; SPE: 土壤+废纸屑+蚯蚓 Add wastepaper and earthworm to the soil

如图 5 所示,不同处理土壤微生物生物量占比有明显差异。对照 S 的革兰氏阳性菌和放线菌占比明显高于 SP 和 SPE 处理,后两者之间占比相近。SP 和 SPE 处理的真菌占比相近,且两者明显高于对照 S。一般细菌、革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌之和为细菌。图 5 显示,随着废纸屑的添加,细菌在总 PLFAs 中的占比有所降低。

2.5 赤子爱胜蚓作用下土壤化学和微生物指标的综合分析

各处理的土壤 pH、养分状况、交换性盐基离子和微生物 PLFAs 的主成分分析如图 6 所示,第一主成分和第二主成分累计方差贡献率达到了 85.3%,可以反映不同土壤参数的大部分信息。其中 Axis1 方差贡献率为 75.8%,其主要与 pH、交换性钠、真菌/细菌、革兰氏阳性菌、交换性镁、细菌、总 PLFAs、真菌、革兰氏阳性菌、放线菌、有机碳、丛枝菌根真菌、交换性钙、全磷、全氮、交换性钾、有效氮、有效钾、全钾和革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌的变化有关; Axis2 方差贡献率为 9.5%,主要与 pH、全磷和革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比值的变化有关。

图 6 主成分荷载图中,代表各土壤变量的箭头间余弦角度显示了各变量的相互关系,角度越小,相关性越高。相关分析结果显示 pH、交换性钠和真菌细菌比之间有明显的正相关关系,与革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌之间有明显的负相关关系;革兰氏阴性菌、交换性镁、细菌、总 PLFAs、真菌、革兰氏阳性菌、放线菌、有机碳、交换性钙、全磷、全氮、交换性钾和有效氮之间有明显的正相关关系,与全钾存在明显的负相关关系。图 6 主

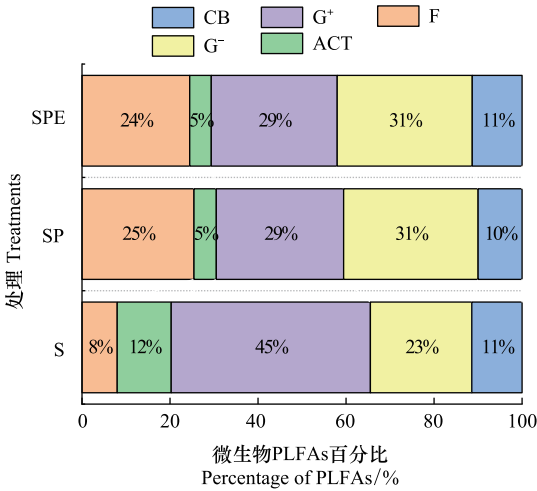


图 5 不同处理微生物 PLFAs 分布
Fig.5 Percentage of various microbial PLFAs in different treatments

F: 真菌 Fungi; ACT: 放线菌 Actinomycetes; G⁺: 革兰氏阳性菌 Gram-positive bacteria; G⁻: 革兰氏阴性菌 Gram-negative bacteria; CB: 一般细菌 Common Bacteria

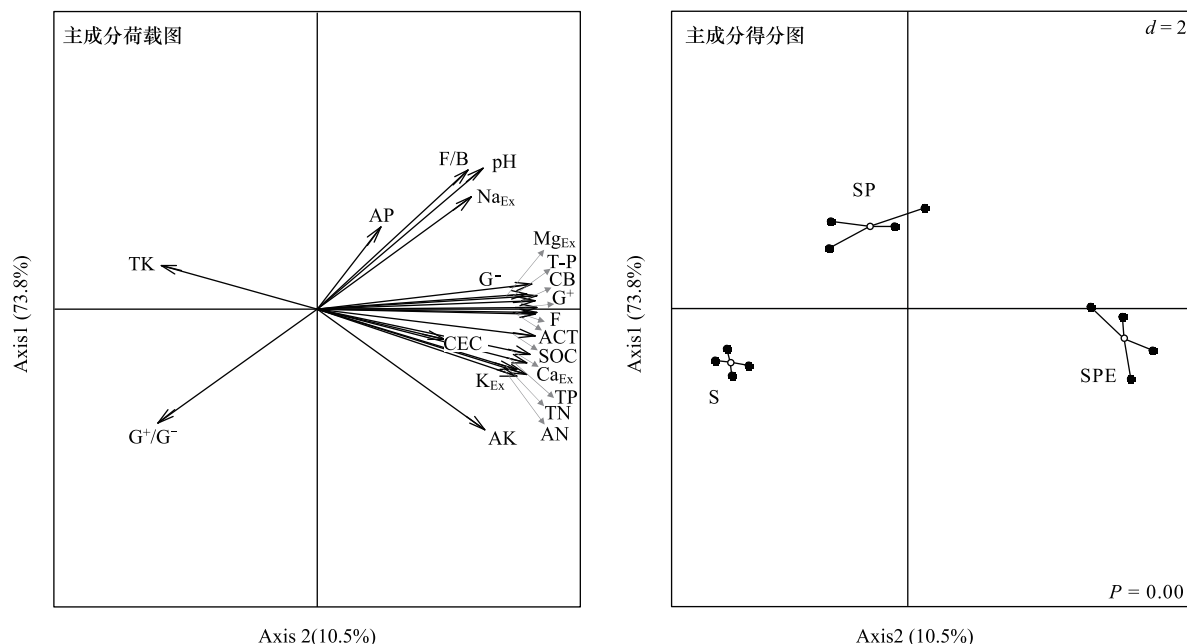


图 6 不同处理土壤性质的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis of soil properties in different treatments

SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; TN:全氮 Total nitrogen, AN:碱解氮 Available nitrogen, TP:全磷 Total phosphorus, AP:有效磷 Available phosphorus, TK:全钾 Total potassium, AK:速效钾 Available potassium。CEC:阳离子交换量 Cation exchange capacity, K_{Ex} :交换性钾 Exchangeable potassium, Na_{Ex} :交换性钠 Exchangeable sodium, Ca_{Ex} :交换性钙 Exchangeable calcium, Mg_{Ex} :交换性镁 Exchangeable magnesium; T-P:总磷脂脂肪酸 Total phospholipid fatty acid; B:细菌(一般细菌、革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌之和) Bacteria;

成分得分图显示,对照 S、SP 和 SPE 处理之间差异显著($P=0.001$),对照 S 明显偏向革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌较高, pH、交换性钠和真菌/细菌较低的方向; SP 处理明显偏向全钾较高,有效钾较低的方向; SPE 处理明显偏向 pH、交换性钠、真菌/细菌、革兰氏阳性菌、交换性镁、细菌、总 PLFAs、真菌、革兰氏阳性菌、放线菌、有机碳、交换性钙、全磷、全氮、交换性钾、有效氮较高,全钾较低的方向。对照 S 与 SP 处理的差异体现在 Axis1 和 Axis2 上;而对照 S 与 SPE 处理的差异主要体现在 Axis1 上。整体来讲,对照 S、SP 和 SPE 处理的差异主要体现在 Axis1,即不同处理的差异主要表现在 pH、交换性钠、真菌/细菌、革兰氏阳性菌、交换性镁、细菌、总 PLFAs、真菌、革兰氏阳性菌、放线菌、有机碳、交换性钙、全磷、全氮、交换性钾、有效氮、有效钾、全钾和革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌。

如图 7 所示,通过对主成分分析的结果进一步计算,得出各处理的土壤综合质量指数。三个处理的土壤综合质量指数得分分别为 0.13、0.46 和 0.94,三者差异显著,呈现为 $S < SP < SPE$ ($P < 0.05$)。相比对照 S, SP 处理的土壤综合质量指数得分提升了 0.23 个单位, SPE 处理提升了 0.81 个单位。相比 SP 处理, SPE 处理的土壤综合质量指数得分提升了 0.48 个单位。

3 讨论

废纸屑的主要成分是纤维素,在自然界中分解速度较慢。蚯蚓堆置处理将废弃有机物再利用的研究已较为广泛^[22-23],但是单一废纸屑湿润后孔隙度极小且呈碱性,不适宜蚯蚓生存,无法直接进行蚯蚓堆肥^[2]。赤子爱胜蚓在养分贫瘠的土壤中无法生存,但大量研究证实土壤中有有机物质充足可以保证赤子爱胜蚓较高的存活率^[24-26]。因此,本研究将废纸屑与蚯蚓共同添加入土壤后,一方面能极大的增加土壤有机物质和孔隙度、改善土壤 pH、创造适宜蚯蚓生存的环境,使蚯蚓能够正常存活;另一方面,接种蚯蚓后,能够直接吞食消化腐

解或半腐解的有机物料^[27]以及蚯蚓的肠道纤维素分解菌等菌种的快速生长繁殖^[28-29],也极大的促进了废纸屑的分解(图1和图2),有效地改良土壤性质,提高土壤质量(图7)。

废纸屑和蚯蚓共同作用优化了土壤 pH 值。本研究土壤 pH 值在二者作用下由弱酸性变为碱性再到中性(图3)。废纸屑呈碱性,其单独添加极大的提高了土壤 pH 值;而蚯蚓吞食碱性废纸屑后,将其与土壤在肠道中进一步混合,中性肠道分泌物随蚓粪排出体外导致土壤 pH 趋于中性^[30-32]。

废纸屑和蚯蚓共同作用显著改变土壤养分及盐基离子含量。本研究用废纸屑碳氮含量较高而土壤碳氮含量极低。当蚯蚓吞食消化废纸屑后,废纸屑在蚯蚓肠道与土壤进一步充分混合,大量养分经肠道微生物快速分解转化后随蚓粪排入土壤,因而造成了土壤中有有机碳和全氮含量显著提高(图2, $P < 0.05$)。同时,尽管废纸屑磷含量明显低于土壤,但是接种蚯蚓后土壤全磷含量却提高了,蚯蚓自身分泌磷素或死亡蚯蚓残体中的磷素释放到土壤中可能是造成上述现象的原因^[33]。另外,本研究显示蚯蚓活动能够显著提高土壤碱解氮和速效钾的含量,却并未显著提高土壤速效磷含量。土壤碱解氮与全氮呈现明显的正相关,碱解氮含量的提高可能归因于全氮的提高;而土壤速效钾的提高是由于蚯蚓能够通过消化作用将矿物钾转化为速效钾,提高速效钾含量^[34]。蚯蚓在土壤取食消化废纸屑的过程中显著增加了土壤微生物的数量,从而导致对磷素的需求过大而被消耗。当磷素成为微生物和蚯蚓生长繁殖的限制因子时,微生物活动会导致有效磷含量降低^[35]。再者,本研究显示交换性盐基离子随着废纸屑的添加和蚯蚓的接种变化显著,这与 Wu 的研究结果相似^[36](图4)。交换性钙和镁是土壤中主要的两种盐基离子,尽管二者含量与成土母质以及成土过程中钙和镁的优先固持作用密切相关,但是有机物的添加和赤子爱胜蚓钙腺的影响也可能造成上述两种离子含量的明显增加^[37]。另外,本研究结果还显示土壤交换性钾的改变受到蚯蚓的影响较大,交换性钠受到废纸屑的影响较大,造成上述现象的原因有待进一步深入探究。

废纸屑和蚯蚓显著提高土壤微生物结构和生物量(真菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、一般细菌和总 PLFAs)(表1)。由于废纸屑带来了大量可被土壤微生物分解利用的碳源和氮源,为土壤微生物繁殖提供了物质基础^[38-39]。蚯蚓体内特殊的肠道环境内定殖着丰富多样的微生物,特别是独有微生物^[40]。这些微生物受进入肠道的纸屑养分的影响,生长旺盛,因而造成土壤中微生物总生物量大幅度增加(表1)。同时,随着废纸屑和蚯蚓的添加,土壤革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌显著降低(表1)。自然生态系统中的革兰氏阳性菌常在细菌中占优势地位^[41-42],废纸屑含有大量纤维素可能会增加革兰氏阴性菌的量^[43-44],同时系统内土壤 pH 的提高会导致细菌群落向革兰氏阴性菌增加的趋势发展^[45]。土壤真菌/细菌随着废纸屑和蚯蚓的添加显著提高(表1)。添加废纸屑有利于真菌的生长繁殖,这与前人研究发现有机物归还量大的土壤真菌细菌比较高的结果相似^[42,46]。

废纸屑和蚯蚓添加能够有效提升土壤质量。本研究中,使用 Velasquez 等^[14]的方法进行土壤综合质量指标分析。这一方法区别于前人单一专注土壤肥力^[47-50]或土壤污染物^[51-53]等指标进行质量评价,而将土壤理化及生物学指标纳入指标体系,综合、直观的评价不同处理土壤的综合质量。本研究利用这一方法证明了废纸屑的添加使土壤综合质量从 0.13 提升至 0.46(图7),而赤子爱胜蚓的接种使其进一步提高至 0.94。主成分分析结果显示,土壤质量的提升与土壤微生物量和结构变化的关系更为密切(图6)。Zhu 等指出蚯蚓等土壤动物具有大量独有微生物^[40]。本研究中蚯蚓体内存在哪些独有微生物以及这些微生物对养分退化土壤质

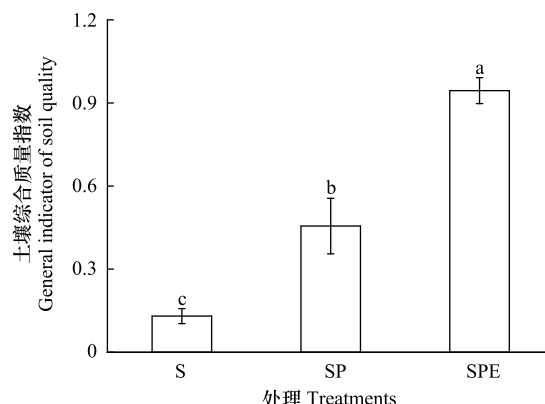


图7 不同处理的土壤综合质量指数

Fig.7 Soil quality indices in different treatments

图中数值表示平均值±标准差, $n=4$; 不同字母表示同种指标不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

量的提升起到什么作用,有待深入研究。

4 结论

废纸屑用于养分贫瘠土壤的改良修复材料,能显著提高土壤 pH 值、增加土壤有机碳、全氮和全磷含量,并提高土壤微生物量。同时添加废纸屑和接种赤子爱胜蚓于土壤,能够进一步加速废纸屑的分解,中和土壤 pH,明显提高土壤碳氮磷含量 0.36—13.65 倍,促使革兰氏阴性菌和真菌在微生物种群中的占比明显增高,最终显著提高养分贫瘠土壤的综合质量。本研究可为废纸屑的资源化利用及贫瘠土壤的质量提升提供理论指导。

致谢:感谢张卫信老师对写作的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Lei W Q, Fang C Q, Zhou X, Yin Q, Pan S F, Yang R, Liu D H, Ouyang Y. Cellulose nanocrystals obtained from office waste paper and their potential application in PET packing materials. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 181: 376-385.
- [2] Abbasi S A, Hussain N, Tauseef S M, Abbasi T. A novel FLippable units vermireactor train system-FLUVTS-for rapidly vermicomposting paper waste to an organic fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 917-930.
- [3] Su H B, Zhu P L, Zhang L C, Zhou F R, Li G, Li T X, Wang Q, Sun R, Wong C. Waste to wealth: a sustainable and flexible supercapacitor based on office waste paper electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, 786: 28-34.
- [4] Gunapala N, Scow K M. Dynamics of soil microbial biomass and activity in conventional and organic farming systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(6): 805-816.
- [5] Karak T, Paul R K, Boruah R K, Sonar I, Bordoloi B, Dutta A K, Borkotoky B. Major soil chemical properties of the major Tea-Growing areas in india. *Pedosphere*, 2015, 25(2): 316-328.
- [6] Lavelle P, Spain A, Blouin M, Brown G, Decaens T, Grimaldi M, Jiménez J J, McKey D, Mathieu J, Velasquez E, Zangerlé A. Ecosystem engineers in a self-organized soil: a review of concepts and future research questions. *Soil Science*, 2016, 181(3/4): 91-109.
- [7] Jouquet P, Dauber J, Lagerlöf J, Lavelle P, Lepage M. Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32(2): 153-164.
- [8] 袁向华, 周艳玲, 宋清姿, 脱红梅, 马沁沁, 王一丁. 蚯蚓吞食过程中土壤理化性质与放线菌多样性的变化特征. *生态学报*, 2017, 37(4): 1199-1210.
- [9] Nahmani J, Hodson M E, Black S. Effects of metals on life cycle parameters of the earthworm *Eisenia fetida* exposed to field-contaminated, metal-polluted soils. *Environmental Pollution*, 2007, 149(1): 44-58.
- [10] Shi Z M, Tang Z W, Wang C Y. A brief review and evaluation of earthworm biomarkers in soil pollution assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(15): 13284-13294.
- [11] Almutairi M. Vermiremediation strategy for remediation of Kuwaiti oil contaminated soil. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(11): 1312.
- [12] Liu X Y, Xiao R, Li R H, Amjad A, Zhang Z Q. Bioremediation of Cd-contaminated soil by earthworms (*Eisenia fetida*): enhancement with EDTA and bean dregs. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115191.
- [13] Xiao R, Liu X Y, Ali A, Chen A L, Zhang M Y, Li R H, Chang H, Zhang Z Q. Bioremediation of Cd-spiked soil using earthworms (*Eisenia fetida*): enhancement with biochar and *Bacillus megaterium* application. *Chemosphere*, 2021, 264: 128517.
- [14] Velasquez E, Lavelle P, Andrade M. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(12): 3066-3080.
- [15] Ravindran B, Mkeni P N S. Bio-optimization of the carbon-to-nitrogen ratio for efficient vermicomposting of chicken manure and waste paper using *Eisenia fetida*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(17): 16965-16976.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Moro H, Kunito T, Saito T, Yaguchi N, Sato T. Soil microorganisms are less susceptible than crop plants to potassium deficiency. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(12): 1807-1813.
- [18] 白震, 何红波, 张威, 解宏图, 张旭东, 王鸽. 磷脂脂肪酸技术及其在土壤微生物研究中的应用. *生态学报*, 2006, 26(7): 2387-2394.
- [19] Frostegård A, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 22(1/2): 59-65.
- [20] Moore-Kucera J, Dick R P. PLFA profiling of microbial community structure and seasonal shifts in soils of a Douglas-fir chronosequence. *Microbial Ecology*, 2008, 55(3): 500-511.
- [21] Thioulouse J, Chessel D, Dolédec S, Olivier J M. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing*, 1997, 7(1): 75-83.
- [22] Lim S L, Lee L H, Wu T Y. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 111: 262-278.

- [23] Ravindran B, Karmegam N, Yuvaraj A, Thangaraj R, Chang S W, Zhang Z Q, Awasthi M K. Cleaner production of agriculturally valuable benignant materials from industry generated bio-wastes; a review. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124281.
- [24] 陈旭飞, 张弛, 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.
- [25] 龙建亮. 赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)对土壤化学、生物学性状及细菌群落结构的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [26] 吴迪, 刘满强, 焦加国, 薛利红, 李辉信, 胡锋, 杨林章. 不同有机物料接种蚯蚓对设施菜地土壤培肥及作物生长的影响. *土壤*, 2019, 51(3): 470-476.
- [27] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 王晓丽, 傅声雷. 土壤动物多样性及其生态功能. *生态学报*, 2015, 35(20): 6614-6625
- [28] Nozaki M, Miura C, Tozawa Y, Miura T. The contribution of endogenous cellulase to the cellulose digestion in the gut of earthworm (*Pheretima hilgendorfi*; Megascolecidae). *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(4): 762-769.
- [29] Eisenhauer N, Hörsch V, Moeser J, Scheu S. Synergistic effects of microbial and animal decomposers on plant and herbivore performance. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(1): 23-34.
- [30] Edwards C A, Lofty J R. *Biology of Earthworms*. London: Chapman and Hall, 1977.
- [31] 徐坤, 刘雅心, 成杰民, 冯凤玲. 蚯蚓对印度芥菜修复 Zn、Pb 污染土壤的影响. *土壤通报*, 2019, 50(1): 203-210.
- [32] 郝月崎, 孙扬, 李晓晶, 周斌, 翁莉萍, 李永涛, 赵丽霞. 赤子爱胜蚓对乙草胺污染土壤微生物群落的影响. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2456-2466.
- [33] Whalen J K, Parmelee R W, McCartney D A, Vanarsdale J L. Movement of N from decomposing earthworm tissue to soil, microbial and plant N pools. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(4): 487-492.
- [34] 刘殿锋, 连宾, 吴春昊. 蚯蚓对土壤中有机化学成分组成的影响. *地球与环境*, 2016, 44(3): 318-328.
- [35] Zhang B G, Li G T, Shen T S, Wang J K, Sun Z. Changes in microbial biomass C, N, and P and enzyme activities in soil incubated with the earthworms *Metaphire guillelmi* or *Eisenia fetida*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2055-2062.
- [36] Wu J L, Zhang C, Xiao L, Motelica-Heino M, Ren Z L, Deng T, Dai J. Impacts of earthworm species on soil acidification, Al fractions, and base cation release in a subtropical soil from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(27): 33446-33457.
- [37] 姜勇, 张玉革, 梁文举. 温室蔬菜栽培对土壤交换性盐基离子组成的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 78-81.
- [38] Stark C H, Condron L M, O'Callaghan M, Stewart A, Di H J. Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(6): 1352-1363.
- [39] 王芳, 张金水, 高鹏程, 同延安. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 702-709.
- [40] Zhu D, Delgado-Baquerizo M, Ding J, Gillings M R, Zhu Y G. Trophic level drives the host microbiome of soil invertebrates at a continental scale. *Microbiome*, 2021, 9(1): 189.
- [41] De Vries F, Hoffland E, Van Eekeren N, Brussaard L, Bloem J. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2092-2103.
- [42] 毕明丽, 宇万太, 姜子绍, 马强, 张璐, 徐永刚. 利用 PLFA 方法研究不同土地利用方式对潮棕壤微生物群落结构的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(9): 1834-1842.
- [43] Sato K. Relations between soil microflora and CO₂ evolution upon decomposition of cellulose. *Plant and Soil*, 1981, 61(1): 251-258.
- [44] Sato K, Antheunisse J, Mulder E G. A possible effect of cellulose-decomposition on soil bacterial flora. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 1984, 30(1): 1-14.
- [45] 王笑, 王帅, 滕明姣, 林小芬, 吴迪, 孙静, 焦加国, 刘满强, 胡锋. 两种代表性蚯蚓对设施菜地土壤微生物群落结构及理化性质的影响. *生态学报*, 2017, 37(15): 5146-5156.
- [46] Van Der Wal A, Van Veen J A, Smant W, Boschker H T S, Bloem J, Kardol P, Van Der Putten W H, De Boer W. Fungal biomass development in a chronosequence of land abandonment. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(1): 51-60.
- [47] Alfaia S S, Ribeiro G A, Nobre A D, Luizão R C, Luizão F J. Evaluation of soil fertility in smallholder agroforestry systems and pastures in western Amazonia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 102(3): 409-414.
- [48] Mowo J G, Janssen B H, Oenema O, German L A, Mrema J P, Shemdoe R S. Soil fertility evaluation and management by smallholder farmer communities in northern Tanzania. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 116(1/2): 47-59.
- [49] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 黄标, 孙维侠. 基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 100-105.
- [50] 叶回春, 张世文, 黄元仿, 周志明, 沈重阳. 粗糙集理论在土壤肥力评价指标权重确定中的应用. *中国农业科学*, 2014, 47(4): 710-717.
- [51] 章海波, 骆永明, 李志博, 王国庆, 宋静, 滕应, 夏家淇, 赵其国. 土壤环境质量指导值与标准研究——Ⅲ. 污染土壤的生态风险评估. *土壤学报*, 2007, 44(2): 338-349.
- [52] 米艳华, 王红华, 陶祖盛, 和丽忠, 潘艳华, 陈锦玉, 沙凌杰, 张晓林. 云南 3 种耕地类型土壤环境质量监测及评价分析. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1836-1841.
- [53] Teng Y G, Wu J, Lu S J, Wang Y Y, Jiao X D, Song L T. Soil and soil environmental quality monitoring in China: a review. *Environment International*, 2014, 69: 177-199.