

袁中友, 任宗玲, 杨淇钧, 等. 不同肥料及接种蚯蚓对高速公路建设损毁土壤的短期培肥效应[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(3): 575-584.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.03.014

不同肥料及接种蚯蚓对高速公路建设损毁土壤的短期培肥效应

袁中友^{1,2}, 任宗玲^{2,3}, 杨淇钧^{2,3}, 刘青^{2,3}, 戴军^{2,3}

(1. 华南农业大学公共管理学院, 广东 广州 510642; 2. 农业部耕地保育重点实验室/国土资源部建设用地再开发重点实验室/广东省土地利用与整治重点实验室, 广东 广州 510642; 3. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要: 利用温室盆栽类芦试验, 选取 21 个土壤物理、化学、微生物学和酶活性指标, 采用因子分析等方法, 对短期内不同肥料及“蚯蚓-有机物料”协同对被高速公路建设损毁的赤红壤的培肥效应进行综合评价。结果表明: 养分释放控制因子、养分供应容量因子和养分供应强度因子是影响土壤综合质量的 3 个主因子, 反映了 21 个土壤指标所提供的 90.04% 信息量。同等施肥水平, 施蚓粪、牛粪比施化肥能显著改善土壤养分释放控制因子, 提高土壤养分供应容量, 提升土壤综合质量, 促进类芦生长, 增加类芦生物量; 单施化肥仅能显著提高土壤养分供应强度, 但由于肥效释放过快抑制了类芦生长, 类芦生物量甚至低于对照 ($P < 0.05$); 用因子分析法得到不同处理土壤综合质量的排序为 5.0% 牛粪 > 5.0% 蚓粪 > 5.0% “牛粪+蚯蚓” > 2.5% 蚓粪 > 2.5% 牛粪 > 2.5% “牛粪+蚯蚓” > 5.0% 化肥 > 蚯蚓 > 2.5% 化肥 > 对照, 与系统聚类分析结果和类芦生物量的排序基本吻合。短期内, 对于被高速公路建设损毁的土壤, 施有机肥是最优的培肥改良方式。利用因子分析对不同土壤培肥改良方式下土壤综合质量进行评价是可行的。

关键词: 牛粪; 蚯蚓粪; 蚯蚓; 高速公路; 类芦; 土壤肥力; 因子分析

中图分类号: S156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)03-0575-10

Comprehensive effect of fertilization and earthworm inoculation on fertility of soils degraded by highway construction

YUAN Zhong-you^{1,2}, REN Zong-ling^{2,3}, YANG Qi-jun^{2,3}, LIU Qing^{2,3}, DAI Jun^{2,3}

(1. College of Public Management, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation of Ministry of Agriculture/Key Laboratory of the Ministry of Land and Resources for Construction Land Transformation/Guangdong Provincial Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China; 3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A pot experiment on *Neyraudia reynaudian* was carried out to evaluate the effects of different fertilizers (chemical fertilizer, vermicompost, and cattle manure) and earthworm inoculation on the fertility of lateritic soil degraded by highway construction. Factor analysis was applied on 21 selected soil physicochemical and microbiological indices to evaluate the comprehensive the short-term fertilization effect. The results showed that the comprehensive soil quality was controlled by three principal factors, i.e. the controlling of nutrient release, the capacity of nutrient supply, and the intensity of nutrient supply. The cumulative contribution of the three factors was up to 90.04%. Chemical fertilizer significantly increased the intensity of nutrient supply in soil, however,

the rapid release of nutrients inhibited the growth of *N. reynaudian*. Compared with chemical fertilizer treatment, the application of vermicompost or cattle manure at the same level not only improved the controlling factor of nutrient release and the capacity of nutrient supply in soil, but also promoted the growth of *N. reynaudian*, there by in-

收稿日期: 2016-12-22

基金项目: 广东省交通运输厅科技项目(科技-2012-02-064)

作者简介: 袁中友(1974-), 男, 河南商水人, 博士, 副教授, 主要从事土地整治、耕地保护等方面的研究。(E-mail) yuanzhongyou@scau.edu.cn

通讯作者: 戴军, (E-mail) jundai@scau.edu.cn

creasing the biomass. The effects on the comprehensive soil quality followed the order of 5.0% cattle manure>5.0% vermicompost>5.0% cattle manure +earthworm> 2.5% vermicompost>2.5% cattle manure>2.5% cattle manure +earthworm> 5.0% chemical fertilizer> earthworm>2.5% chemical fertilizer>control, in agreement with the results of hierarchical clustering analysis and the biomass ranking of *N. reynaudiana*. To conclude, for the soil degraded by highway construction, the application of organic fertilizer was the optimal approach for the improvement of soil fertility, and factor analysis was feasible for the evaluation of the effect of fertilization modes on the comprehensive soil quality.

Key words: cattle manure; vermicompost; earthworm; *Neyraudia reynaudiana*; soil fertility; factor analysis

高速公路建设占用和损毁了大量的土地资源,并带来水土流失等一系列环境问题,因此,必须对其损毁的土地进行复垦利用和生态重建。但由于被占用土地的土壤理化性状被严重破坏,致使土地复垦和生态重建效果一直不好^[1]。土壤是植物生长的基础,要想实现对损毁土地的快速复垦利用和生态重建,就必须对土壤进行快速培肥和改良。长期以来,人们多采用施化肥来快速恢复土壤肥力,但由于化肥施用的种种负面效应,近年来人们开始探索施高品质有机肥以及接种土壤生物等对土壤进行改良培肥。研究表明,施高品质有机肥、蚓粪及接种蚯蚓在改善土壤理化和生物学性状,增加作物产量,改善作物品质方面具有重要作用^[2-14]。但当前对施蚓粪等对土壤培肥改良的研究大多存在施肥量过大的问题,施肥量一般为土壤质量的10%和20%^[13-14]。施肥量过大,一方面会给土壤和环境带来不利影响^[15];另一方面也会使作物生长受到抑制,降低作物产量和品质^[14-16]。因此,需要评价研究肥料低施入量对土壤培肥改良的机理和改良效果。

土壤质量评价指标主要包括土壤物理、化学和生物学指标三大类,以往在进行土壤质量评价时,指标选取多以土壤理化性质指标为主,土壤微生物学和酶活性指标选取较少。在评价方法上,多以土壤理化性质指标与作物产量的相关关系来表征改良后土壤质量的变化,较难综合反映土壤培肥改良的效果。近年来的研究表明,土壤微生物可以调控土壤酶和土壤养分的可利用性^[17-18],土壤微生物学性状比土壤有机质、养分含量等理化性状更能敏感反映土壤质量的变化^[19]。土壤酶活性是土壤微生物活性和土壤理化性状的感应器^[20],是土壤理化和微生物性状的综合表征^[21]。因此,本研究选择高速公路建设损毁的赤红壤为研究对象,以土壤微生物学性状和酶活性指标分析测定为主,采用因子分析法评价肥料低施入量以及“蚯蚓-有机物料”协同在

短期内对赤红壤综合质量的影响,旨在阐明不同肥料以及“蚯蚓-有机物料”协同对土壤综合质量的改良机理,为寻求损毁土壤科学培肥改良方法提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 土壤 供试土壤采自被高速公路建设破坏的发育于花岗岩的赤红壤,样品经自然风干,过2 mm筛,备用。土壤基本理化性质:pH为6.09,有机质为10.05 g/kg,全氮为0.12 g/kg,碱解氮为39.21 mg/kg,全磷为0.31 g/kg,全钾为11.23 g/kg,速效磷为0.67 mg/kg,速效钾为66.03 mg/kg。

1.1.2 蚓粪 供试蚓粪来自华南农业大学土壤与生态实验室,是用自制牛粪喂养的赤子爱胜蚓生产的蚓粪,自然风干、研磨,过2 mm筛,备用。蚓粪基本理化性质:pH为6.76,有机质为450.71 g/kg,全氮为21.05 g/kg,碳氮比为12.42,全磷为5.79 g/kg,全钾为17.30 g/kg。

1.1.3 牛粪 供试牛粪取自华南农业大学养牛场新鲜牛粪,自然风干、粉碎,备用。牛粪基本理化性质:pH为7.96,有机质为311.31 g/kg,全氮为17.98 g/kg,碳氮比为10.11,全磷为7.76 g/kg,全钾为17.55 g/kg。

1.1.4 化肥 施用量按照蚓粪实际养分含量折算后,按照等氮、磷、钾量用尿素、过磷酸钙、氯化钾计算。尿素(分析纯),含氮46.67%;过磷酸钙,含磷17.5%;氯化钾,含钾(K_2O)63.09%。

1.1.5 蚯蚓 供试赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),表栖型,为华南农业大学土壤与生态实验室养殖。成熟蚯蚓稳定培养7 d后,挑选鲜质量约为每条0.36 g,活泼健壮,具有成熟环的赤子爱胜蚓备用。

1.1.6 类芦 供试植物类芦(*Neyraudia reynaudiana*)种子采集于华南农业大学校内野生类芦,将种

子播种于以河沙为基质的苗床中培养,在幼苗长至高约 15 cm 时,从苗床中取出,随机选取 40 组株高、分蘖数、鲜质量均无显著差异的幼苗,备用。

1.2 试验方案

试验共设置 10 个处理,4 次重复,其中,CK 为空白对照;2.5% YF 和 5.0% YF 为施蚓粪处理,蚓粪施入量(分别为 75 g 和 150 g)为土壤质量的 2.5% 和 5.0%;2.5% NF 和 5.0% NF 为施牛粪处理,牛粪施入量(分别为 75 g 和 150 g)为土壤质量的 2.5% 和 5.0%;2.5% HF 和 5.0% HF 为施化肥处理,化肥施入量与 2.5% YF 和 5.0% YF 处理所含氮、磷、钾量一致,其中,2.5% HF 处理为 3.38 g 尿素、2.48 g 过磷酸钙和 2.48 g 氯化钾调配而成,5.0% HF 处理为 6.77 g 尿素、4.96 g 过磷酸钙和 4.96 g 氯化钾调配而成;E 为仅接种蚯蚓处理,蚯蚓接种水平为每 1 kg 干土 10 条蚯蚓;2.5% NFE 和 5.0% NFE 为施牛粪后再接种蚯蚓处理,牛粪施入量分别为 75 g 和 150 g,蚯蚓接种水平为每 1 kg 干土 10 条。

称取 3 kg 过 2 mm 筛风干土,混合肥料后装于 4 L 的塑料盆中,有机肥作为底肥一次性施入,化肥按照 4:3:3 比例分 3 次施入,作为底肥施入 40%,类芦生长期间追肥 2 次,各施入 30%。土壤装盆后浇水至饱和持水量的 60%,静置 5 d 后移苗,每盆栽入植株幼苗 2 株,培养 90 d。待类芦植株定根成活后接种蚯蚓,并用细沙网封闭盆表面,防止蚯蚓逃逸。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤理化性质测定 土壤容重测定采用环刀法,田间持水量测定采用威尔科克斯法,有机质测定采用重铬酸钾容量法,全氮测定采用开氏消煮法,全磷测定采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法,全钾测定采用 NaOH 熔融—火焰光度法,碱解氮测定采用碱解扩散法,速效磷测定采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法。

1.3.2 土壤微生物学性状测定 土壤微生物量碳、氮测定采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法^[22],土壤呼吸测定采用 NaOH 吸收法测定,细菌、真菌和放线菌计数采用稀释平板法。

1.3.3 土壤酶活性测定 土壤转化酶采用 Na₂S₂O₃ 滴定法测定,脲酶采用苯酚钠比色法测定,过氧化氢酶采用 KMnO₄ 容量法测定^[22],酸性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶、多酚氧化酶和过氧化物酶采用比色法测

定^[23-24],分别以对硝基苯磷酸盐、对硝基苯乙酰氨基葡萄糖苷和二羟苯丙氨酸为底物。

1.3.4 类芦生物量测定 培育结束时,将类芦植株地上部(地表 1 cm 以上)和地下部分开收割,植株样品 105 ℃ 杀青 30 min 后,70 ℃ 烘干至恒质量,分别测定类芦地上和地下部干质量。

1.3.5 蚯蚓数量及质量测定 采用人工分拣法,分拣出存活蚯蚓,记录成蚓和幼蚓数量,清洗干净后测定蚯蚓鲜质量。

1.4 数据处理

利用 SAS9.0 统计软件对试验数据进行多重比较分析,显著性水平取 $\alpha=0.05$ 。利用 SPSS17.0 软件对试验数据进行因子分析和聚类分析。图表中的数据均为各测定数据的平均值 \pm 标准误。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓数量和生物量

相对于接种时的密度,经过 90 d 的培养,蚯蚓数量和生物量均发生显著变化($P<0.05$)(表 1)。5.0% NFE 处理的蚯蚓数量显著增多。由于部分成蚓死亡,新增主要为幼蚓,所以生物量平均下降了 55%。2.5% NFE 处理,蚯蚓数量平均减少 1 条,但新增幼蚓 4 条,生物量下降了 67%。仅接种蚯蚓处理,蚯蚓数量显著减少,平均减少 17 条,且没有幼蚓出生,生物量下降了 89%。蚯蚓数量和生物量均呈现 5.0% NFE>2.5% NFE>E 的趋势。

表 1 蚯蚓数量和生物量的变化

Table 1 Changes of earthworm quantity and biomass

处理	蚯蚓数量(条)		蚯蚓生物量(g)	
	0 d	90 d	0 d	90 d
E	30 \pm 0a	13 \pm 2.00c	10.85 \pm 0.08a	1.19 \pm 0.15c
2.5% NFE	30 \pm 0a	29 \pm 1.00b	10.81 \pm 0.14a	3.54 \pm 0.09b
5.0% NFE	30 \pm 0a	37 \pm 1.00a	10.82 \pm 0.14a	4.86 \pm 0.14a

同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。E:接种蚯蚓;2.5% NFE:2.5%牛粪+蚯蚓;5.0% NFE:5.0%牛粪+蚯蚓。

2.2 不同施肥及接种蚯蚓处理土壤改良效果评价方法和指标选取

根据先进性、全面性和可比性的土壤质量评价原则,结合所评价土壤情况,选取土壤物理性质指标 2 个、化学性质指标 6 个、微生物学性状指标 6 个、酶活性指标 7 个,共 21 个评价指标(表 2),具体包括:容重(x_1)、田间持水量(x_2)、有机质(x_3)、全氮

(x_4)、碱解氮(x_5)、全磷(x_6)、全钾(x_7)、速效磷(x_8)、微生物量碳(x_9)、微生物量氮(x_{10})、土壤呼吸(x_{11})、细菌(x_{12})、真菌(x_{13})、放线菌(x_{14})、转化酶(x_{15})、脲酶(x_{16})、酸性磷酸酶(x_{17})、 β -葡萄糖苷酶(x_{18})、多酚氧化酶(x_{19})、过氧化物酶(x_{20})和过氧化

氢酶(x_{21}),利用因子分析法对土壤综合质量进行评价。所选取指标间相关系数绝大部分大于 0.3,同时原有变量通过了 Bartlett 球形度检验($P=0$)和 KMO 检验(KMO 值为 0.844),均符合因子分析的前提条件,可采用因子分析法进行综合评价。

表 2 各指标测定结果

Table 2 Measured values of each index of soil quality

处理	CK	2.5% YF	5.0% YF	2.5% NF	5.0% NF	2.5% HF	5.0% HF	E	2.5% NFE	5.0% NFE	F 值	P 值
容重 (g/cm ³)	1.25± 0.01c	1.14± 0.02d	1.11± 0.02ef	1.13± 0.01de	1.10± 0ef	1.28± 0.01b	1.33± 0.01a	1.22± 0.01c	1.09± 0.02ef	1.07± 0.01f	45.96	<0.001
田间持水量 (%)	12.55± 0.44c	24.88± 0.56a	26.40± 0.68a	24.50± 0.53a	26.48± 1.24a	12.16± 0.53c	12.36± 0.50c	15.55± 0.33b	24.51± 0.64a	26.50± 0.63a	100.04	<0.001
有机质 (g/kg)	15.94± 1.06d	41.05± 1.00b	46.58± 1.23a	40.77± 1.30b	46.57± 1.91a	16.22± 0.87d	16.45± 0.30d	19.56± 1.10d	29.75± 0.89c	37.61± 1.56b	118.17	<0.001
全氮 (g/kg)	0.19± 0.01ef	0.57± 0.02b	0.80± 0.03a	0.40± 0.02c	0.79± 0.02a	0.07± 0.01g	0.09± 0.01g	0.16± 0.02f	0.24± 0.02e	0.34± 0.02d	209.46	<0.001
碱解氮 (mg/kg)	16.30± 1.61f	60.41± 2.98d	99.21± 2.23a	57.46± 3.55d	82.30± 0.87c	59.39± 3.41d	90.14± 2.37b	13.67± 0.51f	48.60± 2.52e	76.97± 3.56c	124.28	<0.001
全磷 (g/kg)	0.23± 0.01e	0.38± 0.04cd	0.59± 0.07ab	0.34± 0.03d	0.44± 0.03cd	0.49± 0.03bc	0.62± 0.07a	0.18± 0.01e	0.36± 0.02d	0.48± 0.01bc	14.06	<0.001
全钾 (g/kg)	7.88± 0.29e	8.70± 0.31de	10.80± 0.38a	8.54± 0.42e	9.92± 0.23ab	9.65± 0.51bcd	10.57± 0.18ab	8.12± 0.28e	8.45± 0.23e	9.53± 0.22cd	10.13	<0.001
速效磷 (mg/kg)	1.21± 0.04e	15.85± 1.36d	33.21± 1.21b	12.16± 1.12d	32.18± 1.55b	20.98± 1.37c	39.11± 1.56a	1.41± 0.12e	12.86± 0.91d	31.35± 2.02b	112.51	<0.001
微生物量碳 (mg/kg)	171.53± 15.32de	267.31± 18.39b	339.46± 5.00a	251.71± 13.58b	336.74± 14.84a	138.11± 8.26e	165.99± 4.09de	185.60± 7.96d	218.03± 5.64c	315.40± 7.47a	44.69	<0.001
微生物量氮 (mg/kg)	19.49± 0.93f	47.37± 4.46bc	84.21± 4.37a	40.39± 2.36cd	80.42± 5.16a	20.59± 1.61f	21.99± 1.48f	25.66± 2.86ef	33.03± 1.19de	54.76± 2.33b	62.44	<0.001
土壤呼吸 [g/(kg·d)]	17.7± 2.00f	47.26± 1.59c	59.43± 1.36a	40.61± 2.31d	53.95± 0.85b	3.03± 0.20g	6.07± 0.67g	31.68± 2.88e	38.12± 2.26d	48.00± 1.98c	120.17	<0.001
细菌 (×10 ⁵ CFU/g)	0.14± 0.01f	4.35± 0.14c	6.28± 0.22a	4.41± 0.08c	6.49± 0.17a	1.10± 0.15e	1.25± 0.12e	3.86± 0.08d	5.31± 0.06b	6.67± 0.13a	344.81	<0.001
真菌 (×10 ² CFU/g)	1.17± 0.18g	2.54± 0.14f	3.33± 0.24e	7.51± 0.18b	9.62± 0.39a	0.60± 0.11g	1.05± 0.07g	4.78± 0.25d	5.69± 0.21c	7.50± 0.39b	177.02	<0.001
放线菌 (×10 ⁴ CFU/g)	3.57± 0.29f	14.47± 0.49c	23.11± 0.74a	13.99± 0.79c	18.47± 1.37b	3.76± 0.28f	4.11± 0.29f	6.35± 0.24e	7.11± 0.81e	9.68± 0.44d	103.88	<0.001
转化酶 (ml/g)	0.91± 0.14e	1.86± 0.14c	2.28± 0.10ab	1.80± 0.09c	2.59± 0.14a	1.12± 0.20e	1.24± 0.14de	1.07± 0.09e	1.58± 0.16cd	1.97± 0.16bc	16.06	<0.001
脲酶 (ml/g)	0.52± 0.02e	0.79± 0.05c	1.55± 0.10a	0.77± 0.01e	1.48± 0.10a	0.56± 0.02de	0.66± 0.08dee	0.53± 0.02e	0.72± 0.02cd	1.08± 0.02b	46.98	<0.001
酸性磷酸酶 [μg/(kg·h)]	0.20± 0.01f	0.40± 0.03bc	0.68± 0.01a	0.35± 0.02cd	0.45± 0.03b	0.26± 0.04ef	0.20± 0.01f	0.27± 0.01ef	0.30± 0.02de	0.37± 0.01c	44.08	<0.001
β -葡萄糖苷酶 [μg/(kg·h)]	9.16± 0.27d	18.42± 0.70c	26.2± 0.58a	17.76± 0.72c	23.31± 1.57b	8.09± 0.16d	8.50± 0.20d	10.34± 0.11d	19.09± 0.80c	24.04± 1.14ab	82.04	<0.001
多酚氧化酶 [μmol/(g·h)]	0.14± 0.01d	0.32± 0.01e	0.52± 0.04b	0.38± 0.02c	0.64± 0.07a	0.02± 0e	0.02± 0.01e	0.12± 0.02d	0.40± 0.01c	0.69± 0.04a	63.32	<0.001
过氧化物酶 [μmol/(g·h)]	0.18± 0.01c	0.49± 0.02b	0.54± 0.02b	0.47± 0.03b	0.65± 0.07a	0.17± 0.01c	0.21± 0.01c	0.20± 0.02c	0.49± 0.03b	0.68± 0.04a	39.51	<0.001
过氧化氢酶 (ml/g)	0.17± 0.01e	0.52± 0.02d	0.81± 0.01b	0.64± 0.05c	0.89± 0.02a	0.10± 0.01e	0.14± 0.01e	0.16± 0.03e	0.49± 0.03d	0.55± 0.03d	130.52	<0.001

同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。CK:空白对照;2.5% YF:2.5%蚓粪;5.0% YF:5%蚓粪;2.5% NF:2.5%牛粪;5.0% NF:5%牛粪;2.5% HF:2.5%化肥;5.0% HF:5.0%化肥;E:接种蚯蚓;2.5% NFE:2.5%牛粪+蚯蚓;5.0% NFE:5%牛粪+蚯蚓。

2.3 不同施肥及接种蚯蚓处理土壤综合质量因子分析

首先,运用 SPSS17.0 软件对选定指标相关性进

行分析,尽量剔除相关性小于 0.3 的指标,各指标相关系数矩阵如下(表 3)。

表3 各指标相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficients between indices

指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}
x_1	1.000	-0.960**	-0.857**	-0.696*	-0.261	-0.018	-0.017	-0.113	-0.853**	-0.735*	-0.915**	-0.915**	-0.760*	-0.688**	-0.789**	-0.659*	-0.669*	-0.931**	-0.934**	-0.926**	-0.853**
x_2		1.000	0.949**	0.791**	0.445	0.147	0.145	0.276	0.909**	0.811**	0.937**	0.934**	0.737*	0.802**	0.890**	0.732*	0.746*	0.959**	0.919**	0.961**	0.922**
x_3			1.000	0.916**	0.543	0.233	0.278	0.357	0.945**	0.902**	0.926**	0.861**	0.665*	0.932*	0.951**	0.826**	0.844**	0.932**	0.866**	0.909**	0.969**
x_4				1.000	0.522	0.237	0.361	0.363	0.905**	0.950**	0.867**	0.721*	0.488	0.967**	0.910**	0.893**	0.891**	0.839**	0.750*	0.757*	0.922**
x_5					1.000	0.935**	0.919**	0.955**	0.568	0.644*	0.318	0.435	0.158	0.568	0.688*	0.720*	0.602	0.555	0.446	0.544	0.550
x_6						1.000	0.945**	0.942**	0.277	0.384	0.005	0.158	0.140	0.291	0.403	0.496	0.395	0.287	0.169	0.266	0.239
x_7							1.000	0.945**	0.365	0.519	0.094	0.229	-0.052*	0.411	0.476	0.633*	0.507	0.323	0.208	0.264	0.312
x_8								1.000	0.451	0.531	0.162	0.332	0.116	0.380	0.565	0.640*	0.429	0.415	0.359	0.435	0.385
x_9									1.000	0.955**	0.936**	0.890**	0.677*	0.891**	0.948**	0.912**	0.851**	0.964**	0.936**	0.929**	0.941**
x_{10}										1.000	0.864**	0.819**	0.566	0.938**	0.951**	0.980**	0.922**	0.906**	0.839**	0.828**	0.926**
x_{11}											1.000	0.916**	0.691*	0.866**	0.853**	0.773**	0.817**	0.934**	0.883**	0.874**	0.904**
x_{12}												1.000	0.795**	0.748*	0.860**	0.763*	0.739*	0.931**	0.904**	0.917**	0.854**
x_{13}													1.000	0.482	0.684*	0.524	0.341	0.672*	0.798**	0.770**	0.719*
x_{14}														1.000	0.897*	0.878**	0.944**	0.843**	0.715*	0.736*	0.918**
x_{15}															1.000	0.922**	0.825**	0.921**	0.878**	0.918**	0.964**
x_{16}																1.000	0.888**	0.866**	0.809**	0.787**	0.882**
x_{17}																	1.000	0.846**	0.687*	0.687*	0.831**
x_{18}																		1.000	0.953**	0.958**	0.935**
x_{19}																			1.000	0.971**	0.892**
x_{20}																				1.000	0.905**
x_{21}																					1.000

x_1 :容重; x_2 :田间持水量; x_3 :有机质; x_4 :全氮; x_5 :全磷; x_6 :全钾; x_7 :速效磷; x_8 :碱解氮; x_9 :微生物量氮; x_{10} :微生物量碳; x_{11} :土壤呼吸; x_{12} :细菌; x_{13} :真菌; x_{14} :放线菌; x_{15} :转化酶; x_{16} :脲酶; x_{17} :酸性磷酸酶; x_{18} : β -葡萄糖苷酶; x_{19} :多酚氧化酶; x_{20} :过氧化氢酶; x_{21} :氧化氢酶。*和**分别表示相关性达 0.05 显著水平和 0.01 显著水平。

其次,对逆向指标进行正向化和标准化。逆向指标正向化用公式(1)进行。

$$Y_i = 1/x_i \quad (1)$$

第三,对标准化后的指标进行因子分析,得出各指标变量旋转后的因子载荷矩阵、各因子所对应的特征值、贡献率和累计贡献率等(表4)。其中,前3个主因子贡献率已达90.04%,说明前3个主因子能把土壤全部指标的90.04%信息反映出来,利用因子分析法来评价土壤综合质量是可靠的。

由表4可以看出,在第一主因子(F_1)构成中,容重、田间持水量、微生物量碳、土壤呼吸、细菌、真菌、转化酶、 β -葡萄糖苷酶、多酚氧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶等指标具有较大正值。由于土壤微生物对土壤有机物质转化和养分循环有重要影响^[25],土壤酶是土壤营养代谢的重要驱动力^[26],土壤养分释放、供应与土壤物理、微生物学性状以及酶活性密切相关,因此,第一主因子可定义为养分释放控制因子。第二主因子(F_2)构成中,有机质、全氮、微生物量氮、放线菌、脲酶和酸性磷酸酶有较大正值。土壤微生物量是土壤活性养分的储存库^[25],有机质和全氮可反映土壤养分的总贮量^[27],与土壤养分储存、释放供应能力密切相关^[28],故可定义为养分供应容量因子。第三主因子(F_3)构成中,碱解氮、速效磷和全钾有较大正值,其中碱解氮、速效磷反映了土壤供给作物养分强度的大小,故可定义为养分供应强度因子,全钾虽不能直接作为养分供应强度因子考虑,但其含量高低与钾素供应强度存在较高的相关性。

第四,计算不同处理土壤质量综合得分与排名。为更清楚直观地比较不同处理土壤综合质量的情况,需要计算各处理的因子得分。因子得分用公式(2)计算得出。

$$Z_i = b_i x \quad (2)$$

把各因子的特征值贡献率作为权数进行加权求和[公式(3)],得到综合评价指标值(表5)

$$Z_{\text{综}} = \sum_{i=1}^m (V_i/P) Z_i \quad (3)$$

由表5可知,第一主因子得分最高的是5.0% NFE处理,表明“蚯蚓-牛粪”协同能显著改善土壤物理性质,提高土壤微生物和酶活性,有效控制土壤养分释放速率;得分较高的是5.0% NF、2.5% NFE、2.5% NF、2.5% YF和5.0% YF处理,表明施蚓粪

表4 旋转因子载荷矩阵

Table 4 Rotated component matrix

指标	F_1	F_2	F_3
x_1	0.872	0.362	-0.031
x_2	0.823	0.487	0.095
x_3	0.661	0.683	0.162
x_4	0.414	0.862	0.179
x_5	0.228	0.294	0.898
x_6	0.002	0.052	0.914
x_7	-0.074	0.254	0.840
x_8	0.164	0.124	0.955
x_9	0.665	0.646	0.231
x_{10}	0.495	0.750	0.344
x_{11}	0.699	0.673	-0.051
x_{12}	0.830	0.438	0.135
x_{13}	0.889	0.118	-0.071
x_{14}	0.394	0.868	0.207
x_{15}	0.609	0.560	0.355
x_{16}	0.463	0.666	0.469
x_{17}	0.309	0.849	0.282
x_{18}	0.742	0.563	0.234
x_{19}	0.844	0.415	0.152
x_{20}	0.852	0.361	0.247
x_{21}	0.676	0.662	0.194
特征值	8.067	6.673	4.168
方差贡献率(%)	38.414	31.778	19.849
累积方差贡献率(%)	38.414	70.192	90.041

x_1 :容重; x_2 :田间持水量; x_3 :有机质; x_4 :全氮; x_5 :碱解氮; x_6 :全磷; x_7 :全钾; x_8 :速效磷; x_9 :微生物量碳; x_{10} :微生物量氮; x_{11} :土壤呼吸; x_{12} :细菌; x_{13} :真菌; x_{14} :放线菌; x_{15} :转化酶; x_{16} :脲酶; x_{17} :酸性磷酸酶; x_{18} : β -葡萄糖苷酶; x_{19} :多酚氧化酶; x_{20} :过氧化物酶; x_{21} :过氧化氢酶。 F_1 :第一主因子; F_2 :第二主因子; F_3 :第三主因子。

和牛粪能有效改善土壤物理性状,提高土壤微生物活性,控制养分有序释放;2.5% HF和5.0% HF处理得分最低,表明仅施化肥不利于土壤物理和微生物学性状的改良。第二主因子得分最高的是5.0% YF处理,其次为5.0% NF、2.5% YF和2.5% NF处理,表明施蚓粪和牛粪均可提高土壤有机质和全氮的含量,提升土壤养分供应容量;得分最低的是5.0% HF和2.5% HF处理,甚至低于CK。表明单施化肥不能有效促进土壤有机质和全氮含量提高,提升土壤养分供应容量。第三主因子得分最高的是5.0% HF处理,表明施化肥处理能迅速提升土壤速

效养分含量,提高土壤养分供应强度;其次是 5.0% YF、5.0% NFE 和 5.0% NF 处理,表明施用 5.0%的

蚓粪或牛粪以及 5.0%的牛粪-蚯蚓协同既能提高土壤养分供应容量,也能提高养分供应强度。

表 5 不同处理各主因子得分、综合得分及排名

Table 5 Scores and general scores of principal components in different treatments

处理	F_1		F_2		F_3		$F_{\text{综}}$	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名
CK	-1.038	9	-0.251	6	-1.220	9	-0.800	10
2.5% YF	-0.171	5	1.046	3	-0.565	7	0.171	4
5.0% YF	-0.532	6	2.460	1	0.912	2	0.842	2
2.5% NF	0.410	4	0.269	4	-0.672	8	0.122	5
5.0% NF	0.937	2	1.277	2	0.192	5	0.893	1
2.5% HF	-1.220	10	-0.739	8	0.554	4	-0.659	9
5.0% HF	-1.064	8	-1.160	10	1.820	1	-0.462	7
E	-0.546	7	-0.138	5	-1.432	10	-0.597	8
2.5% NFE	0.765	3	-0.573	7	-0.513	6	0.011	6
5.0% NFE	1.890	1	-0.938	9	0.617	3	0.611	3

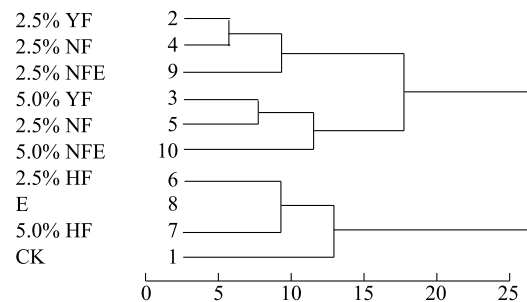
CK:空白对照; 2.5% YF;2.5%蚓粪;5.0% YF;5%蚓粪;2.5% NF;2.5%牛粪;5.0% NF;5%牛粪;2.5% HF;2.5%化肥;5.0% HF;5.0%化肥;E:接种蚯蚓;2.5% NFE;2.5%牛粪+蚯蚓;5.0% NFE;5%牛粪+蚯蚓。 F_1 :第一主因子; F_2 :第二主因子; F_3 :第三主因子; $F_{\text{综}}$:综合因子。

由表 5 可知,5.0% NF 处理综合得分最高,且主要分布在养分释放控制和养分供应容量因子得分上,表明施 5.0%牛粪不但能有效提高土壤养分储量,还能增强土壤微生物量和酶活性,有利于土壤养分平稳释放。5.0% YF 处理综合得分次之,主要集中在养分供应容量和养分供应强度因子得分上,表明施 5.0%蚓粪既能提高土壤养分容量,也能增强养分供应能力。5.0% NFE 处理综合得分排名第三,主要集中在养分释放控制因子得分上,表明“5.0%牛粪-蚯蚓”协同能极大提高土壤微生物量和酶活性。其他综合得分较高的分别是 2.5% YF、2.5% NF 和 2.5% NFE 处理,表明施 2.5%蚓粪、牛粪以及“2.5%牛粪-蚯蚓”协同也有助于土壤理化性状、微生物量和酶活性的提升。综合得分最低的是 E、5.0% HF 和 2.5% HF 处理,5.0% HF 和 2.5% HF 处理在养分供应强度因子上得分较高,但在养分释放控制和养分供应容量因子上得分较低,表明单施化肥虽然有利于提高养分供应强度,但不利于提升土壤养分供应容量,改善土壤物理性状和微生物活性。E 处理在各个因子上得分均较低,表明仅接种蚯蚓对土壤综合质量的影响较小。

2.4 不同施肥及接种蚯蚓处理土壤综合质量聚类分析

将各处理主因子得分作为评价其综合质量的新

指标,采用最短距离法进行系统聚类,用欧氏距离衡量各处理土壤综合质量差异的大小。根据系统聚类分析结果(图 1),可以把 10 个处理分为 5 类:一类为{5.0% NF,5.0% YF};二类为{5.0% NFE};三类为{2.5% YF,2.5% NF};四类为{2.5% NFE};五类为{5.0% HF,2.5% HF,E,CK}。表明同等施肥量,单施牛粪和蚓粪最有利于土壤综合质量的提高,“蚯蚓-牛粪”协同处理次之,单施化肥和仅接种蚯蚓对土壤综合质量的改良培肥效果有限。由表 5 因子分析结果可以看出,各处理土壤质量综合得分排序



CK:空白对照; 2.5% YF;2.5%蚓粪;5.0% YF;5%蚓粪;2.5% NF;2.5%牛粪;5.0% NF;5%牛粪;2.5% HF;2.5%化肥;5.0% HF;5.0%化肥;E:接种蚯蚓;2.5% NFE;2.5%牛粪+蚯蚓;5.0% NFE;5%牛粪+蚯蚓。

图 1 不同处理土壤质量评价系统聚类图

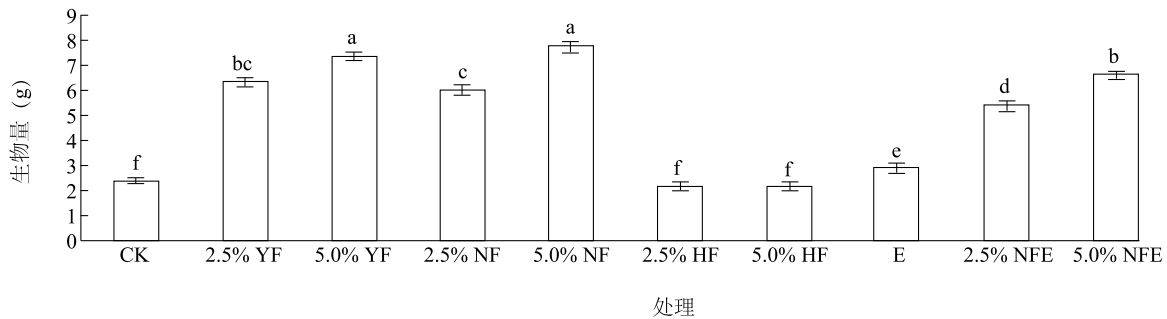
Fig.1 Hierarchical clustering of soil quality assessment in different treatments

为:5.0% NF>5.0% YF>5.0% NFE>2.5% YF>2.5% NF>2.5% NFE>5.0% HF>E>2.5% HF>CK, 这和聚类分析结果一致。

2.5 不同施肥及接种蚯蚓处理土壤综合质量与类芦总生物量的关系

作物生物量是土壤肥力的综合表征,施肥对肥力的影响必然反映到作物生物量的变化上^[29]。施

有机肥及接种蚯蚓处理类芦总生物量与 CK 差异显著,仅施化肥处理与 CK 差异不显著(图 2)。不同施肥及接种蚯蚓处理类芦总生物量呈现 5.0% NF>5.0% YF>5.0% NFE>2.5% YF>2.5% NF>2.5% NFE>E>CK>5.0% HF>2.5% HF 的顺序。类芦总生物量排名顺序与通过因子分析得到的土壤质量综合得分排名顺序基本一致(表 6)。



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。CK:空白对照;2.5% YF:2.5% 蚓粪;5.0% YF:5% 蚓粪;2.5% NF:2.5% 牛粪;5.0% NF:5% 牛粪;2.5% HF:2.5% 化肥;5.0% HF:5.0% 化肥;E:接种蚯蚓;2.5% NFE:2.5% 牛粪+蚯蚓;5.0% NFE:5% 牛粪+蚯蚓。

图 2 不同处理类芦生物量

Fig.2 Biomass of *Neyraudia reynaudiana* under different treatments

表 6 不同处理类芦生物量与土壤质量综合得分排名

Table 6 Ranking of biomass of *N. reynaudiana* and general score of different treatments

处理	生物量		综合得分	
	数值(g)	排名	数值(g)	排名
CK	2.42±0.11f	8	-0.800	10
2.5% YF	6.40±0.19bc	4	0.171	4
5.0% YF	7.43±0.18a	2	0.842	2
2.5% NF	6.04±0.20c	5	0.122	5
5.0% NF	7.84±0.21a	1	0.893	1
2.5% HF	2.21±0.16f	9	-0.659	9
5.0% HF	2.20±0.20f	10	-0.462	7
E	2.97±0.22e	7	-0.597	8
2.5% NFE	5.43±0.21d	6	0.011	6
5.0% NFE	6.68±0.17b	3	0.611	3

3 讨论

短期内,施有机肥是对被工程建设损毁土壤培肥改良的有效方式。同等施肥水平,施蚓粪和牛粪比施化肥能显著改善土壤养分释放控制,提高土壤

养分供应容量,提升土壤综合质量,促进类芦生长;单施化肥仅能快速提高土壤养分供应强度,但过高的养分供应强度可能导致盐渍危害和养分失衡反而抑制类芦生长;高蚓粪施用量处理与高牛粪施用量处理的土壤综合质量得分差异较小,类芦生物量差异不显著,但低施用量,施蚓粪对土壤改良的效果显著优于牛粪;“蚯蚓-牛粪”协同对土壤综合质量和类芦生物量的影响低于单施牛粪。

利用因子分析法得出不同处理土壤综合质量排列顺序为 5.0% NF>5.0% YF>5.0% NFE>2.5% YF>2.5% NF>2.5% NFE>5.0% HF>E>2.5% HF>CK,这与系统聚类分析结果施有机肥土壤综合质量最高,单施化肥土壤综合质量最低的结果吻合,也与类芦生物量大小排序 5.0% NF>5.0% YF>5.0% NFE>2.5% YF>2.5% NF>2.5% NFE>E>CK>5.0% HF>2.5% HF 结果基本吻合。表明利用因子分析对不同土壤改良方式下土壤综合质量进行评价是可行的。

科学施肥有利于改善土壤理化性质和微生物区系,并提高土壤肥力和综合质量^[30]。研究结果表明,施蚓粪和牛粪能显著降低土壤容重^[6,14],增强土

壤持水能力,提高土壤有机质及速效养分含量^[13-14],提高土壤微生物总量^[7-8,13]、细菌多样性^[8]、酶活性^[8,13],调节土壤肥力,提高作物产量和生物量^[8,14]。本研究结果显示,位居因子分析综合得分前2位的分别是5.0% NF和5.0% YF处理,且主要分布在养分释放控制因子、养分供应容量因子和养分供应强度因子得分上,表明施蚓粪和牛粪既能有效改善土壤理化性状,又能提高土壤微生物活性,保证养分长期平稳有效供应,土壤改良效果最好,类芦生物量也最高,这与前人研究结果一致。同等有机肥施用量,5.0% YF和5.0% NF处理土壤因子综合得分分值差别较小,类芦生物量差异也不显著,表明高蚓粪和牛粪施用量对土壤综合质量和作物生长的影响差异不大;降低施用量后,2.5% YF土壤综合因子得分远高于2.5% NF,其差异主要体现在第2主因子得分上,类芦生物量也呈显著差异,表明减少肥料施用量后,蚓粪对损毁土壤的改良效果优于牛粪。原因可能与蚓粪有机质含量远高于牛粪有关,这有待进一步研究证明。5.0% HF和2.5% HF虽然能提高土壤养分供应强度,但不利于土壤物理性状的改良,在提升土壤养分储量、微生物和酶活性方面也不明显,短期内养分供应强度过大,可能产生盐渍危害和养分失衡,反而抑制类芦生长,这与前人研究结果类似^[14]。

5.0% NFE和2.5% NFE处理综合得分分别排名第三和第六,得分主要分布在养分释放控制因子和养分供应强度因子,类芦生物量也显著高于CK。表明“蚯蚓-牛粪”协同能降低土壤容重,增强土壤田间持水能力,提高土壤微生物和酶活性,提高养分供应能力,促进作物生长。这与前人发现施有机物料后接种蚯蚓能显著降低土壤容重,提高土壤保水保肥能力^[10],提高土壤微生物量碳^[31]和氮含量^[10,32],提高细菌和真菌数量^[33-34],增强土壤呼吸速率^[33],提高土壤酶活性^[32,34],活化土壤养分,改善土壤性状,促进作物生长,提高作物生物量和产量^[34]的研究结果一致。“蚯蚓-牛粪”协同处理在土壤养分释放控制因子得分和排名均高于单施牛粪处理,但土壤养分供应容量因子、养分供应强度因子得分以及土壤综合得分和排名均低于相应的单施牛粪处理,类芦生物量排名也低于相应的单施牛粪处理。这可能因为接种的蚯蚓取食牛粪,使土壤有机质减少,致使短期内土壤养分供应能力和强度减弱,进而影响

了类芦生长,这与前人发现施牛粪后接种蚯蚓并没有提高紫花苜蓿生物量的结果类似^[11]。仅接种蚯蚓处理综合得分排名第八,土壤综合质量排名高于CK,类芦生物量高于CK。这是因为蚯蚓在土壤中通过挖掘洞穴和排泄蚓粪促进了团聚体结构形成,降低了土壤容重^[35],提高了土壤养分循环的速率,增加了土壤中有效氮、磷、钾的含量,进而促进了植物生长^[36]。

参考文献:

- [1] 袁中友,郭彦彪,李强,等. 有机无机肥配施对生态重建先锋植物类芦生长的影响[J]. 水土保持学报,2014,25(5): 302-308.
- [2] 王长军,王肇陟,王世荣. 生物有机肥、腐殖酸对水稻产量和土壤化学性质的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(1): 93-95.
- [3] 李苹,付弘婷,张发宝,等. 蚕沙有机肥对作物产量、品质及土壤性质的影响[J]. 南方农业学报,2015,46(7): 1195-1199.
- [4] 王海候,陆长婴,沈明星,等. 炭基有机肥对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(7): 104-107.
- [5] 王永和,高亚娟,李建龙,等. 蚯蚓粪土壤改良剂克服草莓连作障碍的效果[J]. 江苏农业学报,2013,29(5): 1039-1042.
- [6] 崔玉珍,牛明芬. 蚯蚓粪对土壤的培肥作用及草莓产量和品质的影响[J]. 土壤通报,1998,29(4): 13-14.
- [7] 杨丽娟,杨启迪,周崇峻,等. 施用蚓粪堆肥对温室番茄产量和品质及土壤微生物数量的影响[J]. 土壤通报,2013,44(6): 1455-1459.
- [8] 周东兴,宁玉翠,徐明明,等. 蚯蚓粪对温室黑土土壤酶活性及细菌多样性的影响[J]. 土壤通报,2014,45(4): 835-840.
- [9] 陈小锦,丛玮玮,陈永林,等. 蚯蚓粪改良红壤的效果及对不结球白菜生长的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(8): 248-250.
- [10] 李辉信,胡锋,沈其荣,等. 接种蚯蚓对秸秆还田土壤碳、氮动态和作物产量的影响[J]. 应用生态学报,2002,13(12): 1637-1641.
- [11] 伍玉鹏,吕丽媛,毕艳孟,等. 接种蚯蚓对盐碱土养分、土壤生物及植被的影响[J]. 中国农业大学学报,2013,18(4): 45-51.
- [12] WACHENDORF C, POTTHOFF M, LUDWIG B, et al. Effects of addition of maize litter and earthworms on C mineralization and aggregate formation in single and mixed soils differing in soil organic carbon and clay content[J]. Pedobiologia, 2014, 57(3): 161-169.
- [13] 张池,陈旭飞,周波,等. 不同比例蚓粪对旱地土壤微生物学特性以及酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报,2014,19(1): 118-124.
- [14] 李静娟,周波,张池,等. 中药渣蚓粪对玉米生长及土壤肥力特性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(9): 2651-2657.
- [15] 杭琼,胡伟,时佩佩,等. 利用蚯蚓粪改良果园底层土壤的效果[J]. 江苏农业科学,2015,43(8): 351-353.
- [16] ATIYEH R M, ARANCON N, EDWARDS C A, et al. Influence of

- earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75(3): 175-180.
- [17] SINSABAUGH R L, ANTIBUS R K, LINKINS A E, et al. Wooddecomposition: nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extracellular enzyme activity[J]. *Ecology*, 1993, 74(5): 1586-1593.
- [18] 石元豹, 曹兵, 宋丽华. CO₂ 浓度倍增对宁夏枸杞种植地土壤养分及微生物的影响[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(1): 201-206.
- [19] DORAN J W, SARRANTONIO M, LIEBIG M A. Soil health and sustainability[J]. *Advances in Agronomy*, 1996, 56(8): 1-54.
- [20] BAUM C, LEINWEBER P, SCHLICHTING A. Effects of chemical conditions in re-wetted peats on temporal variation in microbial biomass and acid phosphatase activity within the growing season[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(2): 167-174.
- [21] SINSABAUGH R L, HILL B H, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, 462(7274): 795-798.
- [22] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [23] IYYEMPERUMAL K, WEI S. Soil enzyme activities in two forage systems following application of different rates of swine lagoon effluent or ammonium nitrate[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38(2): 128-136.
- [24] EIVAZI F, TABATABAI M A. Glucosidases and galactosidases in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20(5): 601-606.
- [25] TAYLOR J P, WILSON B, MILLS M S, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(3): 387-401.
- [26] DICK W A. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(3): 569-574.
- [27] 武天云, JEFF J S, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 717-722.
- [28] GALANTINI J, ROSELL R. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 87(1): 72-79.
- [29] 王生录, 陈炳东. 陇东旱塬土壤施肥培肥效果研究[J]. *土壤通报*, 1999, 30(4): 28-30.
- [30] ALBIACH R, POMARES F I F, CANET R. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75(1): 43-48.
- [31] 胡锋, 王霞, 李辉信, 等. 蚯蚓活动对稻麦轮作系统中土壤微生物量碳的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(6): 965-969.
- [32] 申为宝, 杨洪强, 乔海涛, 等. 蚯蚓对苹果园土壤生物学特性及幼树生长的影响[J]. *园艺学报*, 2009, 36(10): 1405-1410.
- [33] 焦加国, 朱玲, 李辉信, 等. 蚯蚓活动和秸秆施用方式对土壤生物学性质的动态影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 209-213.
- [34] 陶军, 张树杰, 焦加国, 等. 蚯蚓对秸秆还田土壤细菌生理菌群数量和酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1306-1311.
- [35] MILLERET R, LE BAYON R C, LAMY F, et al. Impact of roots, mycorrhizas and earthworms on soil physical properties as assessed by shrinkage analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(3): 499-507.
- [36] FUSILERO M A, MANGUBAT J, RAGAS R E, et al. Weed management systems and other factors affecting the earthworm population in a banana plantation[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 56: 89-94.

(责任编辑: 陈海霞)