

利用不同有机和无机固体废物配制人工土壤的研究*

姚粉霞^{1,2} 陈贵屏¹ 胡伟¹ 徐冰¹ 陈亚军¹ 封克^{1,2*}

(1.扬州大学环境科学与工程学院,江苏 扬州 225127;

2.江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心,江苏 南京 210095)

摘要 以生活污水、牛粪、蚓粪、菌菇渣、粉煤灰、脱硫石膏、钢渣和煤矸石8种固体废物为原料配置人工土壤,探讨不同有机和无机固体废物配比对人工土壤性质的影响。结果表明,获得的人工土壤中,粒径 $>0.250\text{ mm}$ 的水稳性团聚体质量分数总体在20%~50%,接近或达到正常的自然土壤标准,制得的人工土壤为弱碱性,pH实测值在7.12~8.14。培养过程中,人工土壤中有有机碳含量大大降低。生活污水组、蚓粪组人工土壤在培养过程中呈现铵态氮向硝态氮的转化,而牛粪组人工土壤在培养过程中虽然有较多的有机氮被矿化,但同时也有较多的硝态氮被重新同化成有机氮。合成的人工土壤在物理、化学、养分和生物毒理学性质方面均已达到自然土壤相关参数的正常范围值,可以满足植物生长的要求。但由于部分固体废物原料重金属超标,则应尽量避免用于种植可食用类植物。

关键词 有机固体废物 无机固体废物 人工土壤 技术新成土 理化性质

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2016.01.002

Exploration of the artificial soil made of different organic and inorganic solid wastes YAO Fenxia^{1,2}, CHEN Guiping¹, HU Wei¹, XU Bing¹, CHEN Yajun¹, FENG Ke^{1,2}. (1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225127; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing Jiangsu 210095)

Abstract: Artificial soil were synthesized with eight types of solid wastes (sewage sludge, cow dung, vermicompost, mushroom residue, fly ash, gypsum, steel slag and coal gangue) as raw materials. Effects of different ratios of organic and inorganic wastes on physical, chemical and biological properties of artificial soils were investigated. The results showed that content of water stable aggregates with diameter of $>0.250\text{ mm}$ was generally ranged 20%-50% in artificial soils, closing to or meeting the normal standard of natural soil. The obtained artificial soil was weak alkaline with monitored pH of 7.12-8.14. During the process of incubation, content of organic carbon in artificial soils was significantly decreased. Ammonium-N was converted to nitrate-N in the sewage sludge group and the vermicompost group. More organic nitrogen was mineralized in cow dung group and in the meantime more nitrate-N was assimilated into organic nitrogen. The physical, chemical, biological, nutritional and toxicological characteristics of the artificial soil obtained in this experiment had reached similar range value of natural soil. The artificial soil could meet the requirements of plant growth, but considering the high content of heavy metals in some solid waste, the products should be avoided to be used for production of edible plants.

Keywords: organic solid waste; inorganic solid waste; artificial soil; technosols; physical and chemical property

社会经济的高速发展产生大量有机和无机固体废物,如不合理处置,将对周边环境产生一定污染,同时也造成资源的极大浪费^[1]。固体废物的处理处置不仅要考虑技术问题,还需考虑环境和经济等方面的问题。目前,固体废物主要通过回收、加工等方式对其进行综合利用。由于许多工农业和生活废弃物具有良好的物理性状或含有较高的养分和有机质,可在不同方面、不同程度上用于改善土壤性状。

申俊峰等^[2]研究发现,粉煤灰、水库淤积物和污泥均能显著增加土壤的养分含量。霍晓君等^[3]研究发现,施用粉煤灰和污泥后的土壤其饱和含水率提高了79.46%,持水时间提高了14 d。杨尽等^[4]研究了粉煤灰、磷石膏在不同配比下对新增耕地土壤的培肥效果及培肥前后土壤有效氮、磷、钾、有机质及pH的变化。ASENSIO等^[5]的实验表明,废弃矿地土壤添加污泥等废弃物后,土壤的平均直径、水稳性团

第一作者:姚粉霞,女,1981年生,博士,讲师,主要从事技术新成土研究。*通讯作者。

*国家自然科学基金资助项目(No.41301308、No.31272228);国家重点基础研究发展计划(No.2013CB127404);国家公益性行业(农业)科研专项(No.201103004)。

聚体含量以及团聚体稳定性指数显著提高。

近年来,有研究者利用有机和无机固体废物特性,将两者按一定比例混合制造新型人工土壤^[6],并赋予其某些特殊功能,如作为环境修复材料修复污染土壤等。此类土壤被命名为“技术新成土”,特指所有性质和成土过程均由技术决定的土壤,并于2006年被国际土壤学会正式列为土壤学分类中的一个新土类。本研究将不同有机和无机固体废物按一定比例进行混合配制人工土壤,并对人工土壤的物理性质、化学性质、养分组成和生物毒理学性质进行研究,为实现有机和无机固体废物的资源化利用提供理论依据与技术参数。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究所用原料主要来自江苏省扬州市工农业生产和生活中产生的较多且暂时未得到合理处置的有机和无机固体废物。通过筛选,最终确定8种固体废物作为基本原料,其中有机固体废物原料(以下简称有机原料)包括生活污水泥、牛粪、蚓粪、菌菇渣、无机固体废物原料(以下简称无机原料)包括粉煤灰、脱硫石膏、钢渣、煤矸石,固体废物原料的基本理

化性质及重金属质量浓度如表1、表2所示。

1.2 试验方法

试验根据混配的主要有机原料分为生活污水组、牛粪组、蚓粪组,每组设置3个处理,有机原料与无机原料质量比分别为1:1、1:2、1:3。各处理中添加一定菌菇渣,提高孔隙度和微生物含量。混配的主要无机原料为粉煤灰,添加一定脱硫石膏、钢渣及煤矸石作为矿物质补充。人工土壤制备方法如下:将固体废物原料在阴凉干燥处风干过2 mm筛,按表3中的配比充分混匀,测定混合物最大持水量后,添加水分至最大持水量的50%,置于人工气候室25℃恒温培养,每天通过称重法补充因蒸发而损失的水分。培养期间,每10天搅拌一次,共培养70 d制得人工土壤。

1.3 分析方法

培养结束后,采用湿筛法测定人工土壤中不同粒级水稳性团聚体含量;采用2 mol/L KCl浸提,AA3型流动注射分析仪(FIA,德国seal公司)测定人工土壤中铵态氮和硝态氮含量;pH采用电位法测定;有机碳采用自动TOC仪测定;速效磷采用钼蓝比色法测定;速效钾采用乙酸铵浸提火焰光度计测定。

表1 原料基本理化性质¹⁾

Table 1 The physical and chemical properties of raw materials

原料	容重 /(g·cm ⁻³)	pH	有机碳 ²⁾ /%	全氮 /(g·kg ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	速效钾 /(g·kg ⁻¹)
生活污水泥	0.74	7.13	12.42	23.14	18.38	0.43
牛粪	0.31	8.17	37.52	32.69	10.30	16.70
蚓粪	0.65	7.56	31.07	29.00	21.81	4.59
菌菇渣	0.49	8.32	17.68	19.47	8.09	4.64
粉煤灰	1.15	7.76	—	0.12	0.04	—
脱硫石膏	0.67	11.42	—	0.09	0.32	0.05
钢渣	1.57	10.10	—	—	3.75	0.06
煤矸石	1.22	9.24	—	—	0.21	0.35

注:1)“—”指低于检出限,表2同;2)以质量分数计,表6同。

表2 原料中主要重金属质量浓度

Table 2 The contents of main heavy metals in raw materials

项目	Cu /(mg·kg ⁻¹)	Zn /(mg·kg ⁻¹)	Pb /(mg·kg ⁻¹)	Cd /(mg·kg ⁻¹)	Cr /(mg·kg ⁻¹)	Ni /(mg·kg ⁻¹)
生活污水泥	307.0	730.0	90.2	1.7	395.1	185.8
牛粪	180.0	412.0	121.3	0.1	7.0	10.3
蚓粪	80.7	466.0	148.5	0.1	7.0	20.3
菌菇渣	40.6	150.0	40.4	2.8	30.8	30.6
粉煤灰	10.1	280.0	190.0	2.7	7.0	20.9
脱硫石膏	90.1	330.0	80.0	1.7	128.0	80.2
煤矸石	26.0	73.0	19.2	—	70.0	42.0
钢渣	30.0	2 995.0	49.0	—	2 560.0	—
标准值 ¹⁾	≤400	≤500	≤500	≤1.0	≤300	≤200

注:1)指《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的三级标准值。

表 3 各原料的配比设置
 Table 3 The matching of organic and inorganic solid waste

处理	生活污水	牛粪	蚓粪	菌菇渣	粉煤灰	脱硫石膏	钢渣	煤矸石
1	25			5	25	1	2	2
2	15			5	35	1	2	2
3	10			5	40	1	2	2
4		25		5	25	1	2	2
5		15		5	35	1	2	2
6		10		5	40	1	2	2
7			25	5	25	1	2	2
8			15	5	35	1	2	2
9			10	5	40	1	2	2

表 4 各处理人工土壤中水稳性团聚体形成总量
 Table 4 The content of water-stable aggregates of each treatment

处理	主要有机原料	有机原料：无机原料 ¹⁾	水稳性团聚体总量 ²⁾ / %
1	生活污水	1：1	50.21
2	生活污水	1：2	43.69
3	生活污水	1：3	38.77
4	牛粪	1：1	33.18
5	牛粪	1：2	41.10
6	牛粪	1：3	37.16
7	蚓粪	1：1	31.74
8	蚓粪	1：2	26.15
9	蚓粪	1：3	20.29

注：¹⁾质量比，表 5 同；²⁾以质量分数计。

2 结果与分析

2.1 原料配比对水稳性团聚体的影响

水稳性团聚体是衡量土壤物理结构性的重要指标之一^[7]，本研究采用 DIK-2001 土壤团粒分析仪对人工土壤中的水稳性团聚体进行分析。该分析仪将人工土壤中的水稳性团聚体划分为 >2.000、>1.000~2.000、>0.500~1.000、>0.250~0.500、>0.106~0.250 mm 共 5 个粒级。通常将粒级 >0.250 mm 的水稳性团聚体作为水稳性团聚体总量^[8]，因此在以下分析中，水稳性团聚体总量均指粒级 >0.250 mm 的水稳性团聚体加和。不同原料配比的人工土壤中水稳性团聚体总量见表 4。

由表 4 可见，不同处理合成的人工土壤水稳性团聚体总量有着较大的差异，其中处理 1 的水稳性团聚体总量最大，为 50.21%，处理 9 的水稳性团聚体总量最小，为 20.29%，其余处理的水稳性团聚体总量处于 25%~45%，与自然土壤的水稳性团聚体（黑土 52%，褐土 27%）相比^[9]，人工土壤的水稳性团聚体含量基本达到正常范围，说明本研究合成的人工土壤具有良好的结构性。

由表 4 还可见，水稳性团聚体总量主要与有机原料及有机原料与无机原料的质量比决定。总体来

看，生活污水组和牛粪组合成的人工土壤水稳性团聚体总量高于蚓粪组。生活污水组和蚓粪组的水稳性团聚体总量随有机原料占比的增加而增加，而牛粪组在此方面的特征表现不明显。

2.2 原料配比对人工土壤 pH 的影响

采用 pH 临界法^[10]计算人工土壤 pH 的理论预测值。该计算方法基于以下两个基本假设：(1)电位法测定 pH 过程中不同物质间不发生明显的化学反应；(2)混合物中的 H⁺（或 OH⁻）由主要原料提供，且提供 H⁺（或 OH⁻）的量与该原料的质量呈线性关系。

以处理 1 为例，人工土壤的主要有机原料为生活污水，主要无机原料为粉煤灰，通过电位法测得生活污水的 pH 为 7.13，粉煤灰 pH 为 7.76，可知人工土壤中生活污水为 H⁺ 的提供者，粉煤灰为 OH⁻ 的提供者。由粉煤灰 pH 可得其 pOH = 14.00 - 7.76 = 6.24，已知处理 1 中生活污水与粉煤灰以质量比 1：1 混合，经计算得到混合后人工土壤的 pH 为 7.45。按照该方法，计算各处理所得人工土壤 pH 的理论预测值见表 5。

由表 5 可见，生活污水组和牛粪组中有机原料与无机原料质量比为 1：1 时，人工土壤 pH 的理论预测值与实测值最接近。随着无机原料所占比例的

表 5 人工土壤 pH 的理论预测值与实测值
Table 5 The theoretical predicted pH and measured pH of artificial soil

处理	主要有机原料	有机原料 : 无机原料	pH 理论预测值	pH 实测值
1	生活污水	1 : 1	7.45	7.44
2	生活污水	1 : 2	7.62	7.59
3	生活污水	1 : 3	7.74	7.64
4	牛粪	1 : 1	7.96	7.99
5	牛粪	1 : 2	8.15	8.09
6	牛粪	1 : 3	8.27	8.14
7	蚓粪	1 : 1	7.66	7.12
8	蚓粪	1 : 2	7.84	7.46
9	蚓粪	1 : 3	7.96	7.71

表 6 各处理合成人工土壤培养前后的养分变化
Table 6 The nutrient content of artificial soil before and after the cultivation

处理	培养阶段	全氮 /(g · kg ⁻¹)	铵态氮 /(mg · kg ⁻¹)	硝态氮 /(mg · kg ⁻¹)	速效磷/(g · kg ⁻¹)	速效钾 /(g · kg ⁻¹)	有机碳/%
1	培养前	11.26	331.70	75.80	0.28	0.57	6.65
	培养后	10.09	3.39	892.13	0.02	0.70	6.31
2	培养前	7.41	200.00	65.80	0.26	0.49	4.58
	培养后	6.24	5.05	334.61	0.01	0.50	3.59
3	培养前	5.48	131.90	60.80	0.25	0.46	3.54
	培养后	5.29	2.30	186.88	0.01	0.27	2.36
4	培养前	15.24	10.80	746.70	2.05	7.35	17.71
	培养后	9.67	45.20	90.48	0.21	8.29	12.25
5	培养前	9.80	7.50	468.30	1.32	4.56	10.85
	培养后	7.66	14.56	55.84	0.20	4.96	6.59
6	培养前	7.07	5.83	329.20	0.95	3.17	7.73
	培养后	4.75	25.72	22.28	0.19	3.14	4.12
7	培养前	13.71	27.50	546.70	1.37	2.30	14.42
	培养后	7.80	7.50	875.45	0.31	2.14	9.95
8	培养前	8.87	17.50	248.30	0.91	1.53	9.24
	培养后	5.71	7.91	352.15	0.29	1.56	5.24
9	培养前	6.46	12.50	149.20	0.68	1.15	6.65
	培养后	3.91	6.72	259.40	0.16	1.17	3.04

增加, pH 理论预测值逐渐高于实测值, 但总体相差不大。而蚓粪组合成人工土壤 pH 的理论预测值均高于实测值, 说明 pH 临界法更适于预测生活污水、牛粪与粉煤灰间混合培养的人工土壤 pH, 但对于蚓粪组而言预测值略偏高。

2.3 原料配比对人工土壤养分性质的影响

土壤养分指由土壤提供给植物生长所必需的营养元素^[11], 即土壤中能直接或经转化后被植物根系吸收的矿物营养成分。有机原料在人工土壤中起到为植物生长提供所需养分和帮助形成土壤结构的作用。在人工土壤培养过程中, 由于有机碳发生降解导致最终残留量大大减少, 而人工土壤中无机原料所能提供的营养元素很少, 这与自然土壤中矿物本身也可以提供大量营养的情况有较大区别, 因此在

考虑人工土壤的合成时, 应适当加大原料中有机原料的比例。本试验各处理人工土壤培养前后养分含量变化见表 6。

由表 6 可见, 培养后所有处理合成的人工土壤中有机碳含量均有不同程度的降低。在同一有机原料处理组内, 随着无机原料占比的增加, 合成的人工土壤中有机碳含量降低越明显。培养前后各处理间有机碳含量变化的差异非常显著, 生活污水组有机碳下降了 5.11%~33.33%, 而牛粪组、蚓粪组的有机碳含量均下降 30%~55%, 说明在培养过程中, 与生活污水相比, 牛粪和蚓粪中有机碳被分解的比例更大。

在人工土壤培养过程中, 微生物的参与使部分养分的形态和数量发生变化, 这也将影响人工土壤

对植物的养分供应特点。由表6可见,处理1培养前铵态氮质量浓度达331.70 mg/kg,处理4、处理7培养前铵态氮分别为10.80、27.50 mg/kg,培养后铵态氮则分别为3.39、45.20、7.50 mg/kg;培养前后硝态氮也发生较大变化,处理1、处理4、处理7的硝态氮分别从培养前的75.80、746.70、546.70 mg/kg变为培养后的892.13、90.48、875.45 mg/kg。当有机原料与无机原料质量比分别为1:2、1:3时也得到相似的结果,说明生活污水组与蚓粪组合成人工土壤培养后铵态氮含量显著降低,硝态氮明显升高,而牛粪组人工土壤培养后铵态氮含量明显升高,硝态氮明显降低。《绿色食品 产地环境技术条件》(NY/T 391—2000)中规定二级土壤中速效磷、速效钾的质量浓度应分别大于0.000 5、0.05 g/kg,从表6可见,各处理人工土壤中的速效养分均可达到二级土壤的要求。

2.4 原料对比对人工土壤生物毒理学性质的影响

人工土壤是否可实际应用于植物生产不仅取决于其结构和养分含量,还要看其是否含有对植物生长有害的物质。由于人工土壤的原料复杂多样,对原料中有害物质的种类和含量难以预测,可通过植物毒性检验直接判断人工土壤的生物安全性。

本研究抽取人工土壤的饱和溶液,通过室内培养法进行生物毒理学发芽试验,发芽指数计算式如下:

$$I = (N/N_0) \times (L/L_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: I 为发芽指数,%; N 为处理组发芽数; N_0 为空白对照组(蒸馏水培养)发芽数; L 为处理组平均芽长,cm; L_0 为空白对照组平均芽长,cm。

根据生物毒理学指标,发芽指数在85%以上表示无生物毒性,在>75%~85%时表示有低毒性,在>50%~70%时表示有中等毒性;在50%以下表示有重度毒性。本研究9个处理中,处理5合成人工土壤的发芽指数最低,为124.69%,远高于85%的无生物毒性指标,说明本研究所有合成的人工土壤对植物生长均无毒害作用,甚至对植物生长具有一定的刺激作用。

3 讨论

利用有机固体废物和无机固体废物配制人工土壤是保护环境和开展资源循环利用的一个有效途径。作为人工土壤必须具备与自然土壤相似的基本物理性质,自然土壤是以无机矿物为主,有机质为辅所构成的具有一定物理结构和化学特性的可为植物提供生长所需养分的物质。因此,在人工土壤合成

中无机原料作为人工土壤的骨架,有机原料一方面用于为植物提供养分,另一方面可起到将分散的无机颗粒黏连到一起的聚合作用,从而使人工土壤形成与自然土壤类似的物理结构,具有良好的通气和保水、透水功能。本试验所选择的几种无机原料中,粉煤灰、煤矸石与自然土壤的容重相似,钢渣容重偏大,脱硫石膏容重偏轻(见表1),在人工土壤中加入少量钢渣及脱硫石膏可以平衡人工土壤的容重。从质地组成看,钢渣和煤矸石的颗粒较粗,而粉煤灰和脱硫石膏的颗粒较细,4者混合可起到调节人工土壤质地组成的作用。

人们将水稳性团聚体含量作为衡量土壤是否具有良好结构的一个基本指标,该指标可代表土壤的抗侵蚀能力,对提高土壤肥力和增加作物产量具有极其重要的作用^[12]。本研究9个处理合成的人工土壤中,除处理9合成人工土壤的水稳性团聚体含量较低外,其他几种处理合成的人工土壤水稳性团聚体均接近或已达到自然土壤的水平。可见,本研究制得的人工土壤已具备了土壤的基本物理性质。

适合植物生长的pH环境是弱酸性至弱碱性范围^[13-14],因此在合成人工土壤前必须考虑各固体废物原料的化学特点,使其混合培养后的pH落在适当的范围内。从表1可见,4种无机原料中钢渣、脱硫石膏、煤矸石、粉煤灰的pH分别为10.10、11.42、9.24、7.76,均处于碱性范围,其中钢渣和脱硫石膏的碱性较强,仅粉煤灰的碱性较弱,因此在配置人工土壤时应该加大粉煤灰的比例,尽量减少其他几种无机原料的比例。从最终结果看,本研究制得的人工土壤pH总体处于7~8(见表5),说明本研究采用的无机原料配比是适宜的。

人工土壤合成过程中有机碳含量将会大大减少,因此在配制人工土壤时应加大有机原料的比例。本研究设计了3种有机、无机原料混合比例,以处理3、处理6、处理9为例,其有机原料与无机原料的质量比均为1:3,人工土壤培养后有机碳质量分数分别为2.36%、4.12%、3.04%(见表6),接近自然土壤的下限,增加人工土壤中无机原料的占比已不合适。由此可见,本研究所采用的有机原料与无机原料配比基本适当。

从试验结果可见,生活污水组与蚓粪组人工土壤在培养过程中无机氮含量增加,且部分铵态氮向硝态氮方向转化,说明在此过程中,有机氮的矿化作用较强。而牛粪组人工土壤在培养过程中铵态氮含量明显增加,硝态氮含量明显减少,全氮的总量也明

显减少,说明在培养过程中发生了有机氮的矿化,释放出较多的铵态氮,另一方面又同时存在着无机氮的生物固定,使硝态氮大量减少。出现这种情况与牛粪的碳氮比较高有关。在高碳氮比的情况下,微生物在分解有机质的过程中通常会将分解出的氮用于自身繁殖而将其固定。对于磷和钾来说,总量不会发生变化,但形态会有所改变。从试验结果可以看出,各处理人工土壤培养后速效磷含量虽有一定程度的降低,但速效磷和速效钾的含量都达到了NY/T 391—2000中的二级土壤标准。

通过种子发芽试验可以看出,制得的人工土壤均具备较好的生物安全性。但根据GB 15618—1995中的三级标准,生活污水、钢渣中的Zn含量超标,生活污水、菌菇渣、粉煤灰和脱硫石膏中的Cd含量超标(见表2)。按照《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(CJ/T 291—2008)及《农用粉煤灰中污染物控制标准》(GB 8173—87),生活污水农用时Zn的允许上限值为4 000 mg/kg, Cd为20 mg/kg;粉煤灰农用时Cd的允许上限值为10 mg/kg,脱硫石膏农用时Cd含量暂无标准,可参考粉煤灰的情况^[15-16]。由此可见,本试验制备的人工土壤作为一般土壤改良剂使用是可行的,但应避免直接用于种植可食用类植物。

4 结 论

(1) 以生活污水、牛粪和蚓粪为主要有机原料,粉煤灰为主要无机原料,配以一定比例的菌菇渣、脱硫石膏、钢渣以及煤矸石,经培养后合成的人工土壤中粒级>0.250 mm的水稳性团聚体质量分数总体在20%~50%,与自然土壤相近。

(2) 合成的人工土壤为弱碱性,pH实测值在7.12~8.14。其中生活污水组、牛粪组人工土壤的pH可以通过pH临界法计算,所得到的理论预测值与实测值相近。蚓粪组人工土壤的理论预测值偏高。

(3) 人工土壤制备过程中有机碳会发生降解,最终残留量大大减少。人工土壤培养前后铵态氮和硝态氮含量发生较大变化。生活污水组、蚓粪组人工土壤体现为铵态氮向硝态氮转化,而牛粪组人工土壤中较多有机氮被矿化出,同时也有较多的硝态氮被重新同化成有机氮。

(4) 本试验所获人工土壤的物理、化学、养分性质已达到自然土壤相关参数的正常范围值,基本符合植物生长的要求。制得的人工土壤对植物不存在

生物毒性,可以用于替代自然的自然土壤。但考虑到部分固体废物原料中重金属超标,应避免直接用于可食用类植物的生产。

参考文献:

- [1] 周富春. 固体废物的处理现状及研究进展[J]. 山西建筑, 2009, 35(10): 352-353.
- [2] 申俊峰, 李胜荣, 孙岱生, 等. 固体废弃物修复荒漠化土壤的研究——以包头地区为例[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 267-270.
- [3] 霍晓君, 李楦, 李胜荣, 等. 粉煤灰和城市污泥配施改良荒漠土壤的持水性影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(6): 170-174.
- [4] 杨尽, 刘莉, 孙传敏, 等. 新增耕地土壤物质组分特征及其培肥研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 102-105.
- [5] ASENSIO V, VEGA F A, ANDRADE M L, et al. Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils[J]. Chemosphere, 2013, 90(2): 603-610.
- [6] ASENSIO V, VEGA F A, ANDRADE M L, et al. Technosols made of wastes to improve physico-chemical characteristics of a copper mine soil[J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 1-9.
- [7] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 49-53.
- [8] NEUFELD H, AYARZA M A, RESCK D V S, et al. Distribution of water-stable aggregates and aggregating agents in Cerrado Oxisols[J]. Geoderma, 1999, 93(1/2): 85-99.
- [9] 赵玉明, 高晓飞, 姜洪涛. 我国五种主要土壤水稳性团聚体含量研究[J]. 中国水土保持, 2013(4): 32-35.
- [10] 王凯雄, 胡勤海. 环境化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] 郭保银, 张文平, 马啸, 等. 酉阳主要植烟区土壤养分状况分析[J]. 重庆与世界(学术版), 2013, 30(12): 123-128.
- [12] WU Yan, LIU Shiquan, FU Xiuqin, et al. Study on improving soil's water-stable aggregates amounts by botanic roots[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(1): 45-49.
- [13] 赵静, 沈向, 李欣, 等. 梨园土壤pH值与其有效养分相关性分析[J]. 北方园艺, 2009(11): 5-8.
- [14] 陈婵婵, 肖斌, 余有本, 等. 陕南茶园土壤有机质和pH值空间变异及其与速效养分的相关性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 182-188.
- [15] CJ/T 291—2008, 城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质[S].
- [16] GB 8173—87, 农用粉煤灰中污染物控制标准[S].

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2015-07-20)