

雷勋杰,曾正中,苟剑锋,等.堆肥污泥施入黄土后有机质和氮磷的淋滤特征[J].江苏农业科学,2015,43(8):344-347.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.08.112

# 堆肥污泥施入黄土后有机质和氮磷的淋滤特征

雷勋杰,曾正中,苟剑锋,高冬香,王厚成,南忠仁

(兰州大学资源环境学院,甘肃兰州 730000)

**摘要:**以堆肥污泥中的有机质、氮、磷为研究对象,通过土柱模拟淋滤试验,研究 1 年灌溉水量淋滤条件下,堆肥污泥施入黄土后有机质、氮、磷在黄土中的迁移特征,以及淋滤前后土柱剖面的养分变化规律。结果表明:施加堆肥污泥后可以明显改善黄土肥力,经淋滤后,堆肥污泥除部分氮素在黄土中较易迁移外,其余营养物质仍大部分或绝大部分滞留于耕作层中。堆肥污泥中氮、磷的迁移能力表现为:有效氮 > 全氮,全磷 > 有效磷,磷素在黄土中的迁移特征受氮素在黄土中迁移的影响较大,堆肥污泥中重金属种类多含量高是影响氮、磷在土柱易淋滤迁移的因素之一。

**关键词:**堆肥污泥;有机质;氮磷;黄土;淋滤迁移

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)08-0344-04

截至 2010 年年底,我国城镇污水处理量约  $3.43 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,每年产生的脱水污泥近  $2.2 \times 10^7 \text{ t}$ ,其中 80% 污泥未得到处理。污泥已成为威胁我国城镇环境的又一污染源。污泥既是污染物,又是“生物固体”资源。当前,土地利用被认为是最有发展潜力的污泥处置方式之一<sup>[1]</sup>。污泥土地利用过程中人们往往只关注重金属的迁移与积累问题,而忽略了对污泥进行研究<sup>[2-4]</sup>。污泥中含有丰富的有机质和氮、磷、钾等营养元素以及植物生长必需的各种微量元素<sup>[5-6]</sup>。随着人

们环保意识的提高,我国城市污泥中重金属含量呈现逐渐降低趋势<sup>[7-8]</sup>。欧美国家超过 40% 的污泥被施用于农田,我国也制定了相应的政策,规定在污泥泥质符合公众健康、环境保护要求的前提下,鼓励对污泥进行土地利用<sup>[8-9]</sup>。我国黄土连续分布面积达  $4.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,主要分布在我国西北部地区黄河中上游一带,是世界上黄土沉积最广阔的地区<sup>[10]</sup>,黄土有机质含量低于 1.0%,有效养分极低,难以满足作物生长需要。若将黄土地区城镇污泥施用于黄土中,一方面污泥可以改良土壤结构,弥补黄土水稳性团粒少、保水保肥性差等缺陷,增加土壤肥力;另一方面可以有效解决黄土地区城镇污泥的处置难题。目前,关于污泥农用过程中营养成分迁移问题的研究相对较少。本研究通过土柱模拟淋滤试验,探讨堆肥污泥施入黄土后有机质、氮、磷在黄土中的迁移特征以及淋滤前后土柱剖面的养分变化规律,以期对堆肥污泥在黄土地区

收稿日期:2014-09-01

基金项目:国家自然科学基金(编号:51178209)。

作者简介:雷勋杰(1988—),男,湖南永州人,硕士研究生,主要从事固体废物处置与资源化研究。E-mail:leixj@lzu.edu.cn。

通信作者:苟剑锋,硕士,讲师,主要从事固体废物处置与资源化研究。E-mail:goujif@lzu.edu.cn。

*capitata* [J]. The Science of the Total Environment, 2009, 407 (4): 1461-1468.

[29] Nel A, Xia T, Mädler L, et al. Toxic potential of materials at the nanolevel [J]. Science, 2006, 311 (5761): 622-627.

[30] Donaldson K, Stone V, Clouter A, et al. Ultrafine particles [J]. Occupational and Environmental Medicine, 2001, 58 (3): 211-216.

[31] Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles [J]. Environmental Health Perspectives, 2005, 113 (7): 823-839.

[32] Sharma V, Shukla R K, Saxena N, et al. DNA damaging potential of zinc oxide nanoparticles in human epidermal cells [J]. Toxicology Letters, 2009, 185 (3): 211-218.

[33] Eom H J, Choi J. p38 MAPK activation, DNA damage, cell cycle arrest and apoptosis as mechanisms of toxicity of Silver nanoparticles in jurkat T cells [J]. Environmental science & technology, 2010, 44 (21): 8337-8342.

[34] Yang H, Liu C, Yang D, et al. Comparative study of cytotoxicity, oxidative stress and genotoxicity induced by four typical nanomaterials: the role of particle size, shape and composition [J]. Journal of Applied Toxicology, 2009, 29 (1): 69-78.

[35] Zhang C, Zhu H, Yang X, et al. P53 and p38 MAPK pathways are involved in MONCPT-induced cell cycle G2/M arrest in human non-small cell lung cancer A549 [J]. Journal of Cancer Research and Clinical Oncology, 2010, 136 (3): 437-445.

[36] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using Real-Time quantitative PCR and the  $2^{-\Delta\Delta C_t}$  method [J]. Methods, 2001, 25 (4): 402-408.

[37] Tubbing D M J, Admiraal W, Cleven R F M J, et al. The contribution of complexed copper to the metabolic inhibition of algae and bacteria in synthetic media and river water [J]. Water Res, 1994, 28 (1): 37-44.

[38] Reeves J F, Davies S J, Dodd N J, et al. Hydroxyl radicals ( $\cdot\text{OH}$ ) are associated with titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) nanoparticle-induced cytotoxicity and oxidative DNA damage in fish cells [J]. Mutat Res, 2008, 640 (1/2): 113-122.

[39] Wang Y, Aker W G, Hwang H M, et al. A study of the mechanism of in vitro cytotoxicity of metal oxide nanoparticles using catfish primary hepatocytes and human HepG2 cells [J]. The Science of the Total Environment, 2011, 409 (22): 4753-4762.

合理应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用堆肥污泥是将取自甘肃省兰州市七里河污水处理厂的脱水污泥与农田麦秸(以干质量之比 7 : 1)混合,人工翻堆静态好氧堆肥化 2 个月后的稳定化污泥。堆肥污泥中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni 等重金属含量分别为 72.978 5、297.861 1、2.059 0、44.943 9、250.057 0、39.704 9 mg/kg,均

未超出 CJT 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》A 级污泥浓度限值,符合污泥农用泥质要求。黄土取自兰州大学榆中校区萃英山脚处,为去除表层 30 cm 的马兰黄土( $Q_3^{2eol}$ ),质地以粉粒(0.005 ~ 0.075 mm)为主,约占 80%。根据污泥改性黄土的盆栽试验结果可知,最适植物生长的污泥与黄土干质量之比为 0.045 ~ 0.091,堆肥污泥掺入比例取 0.07。掺入堆肥污泥的黄土称为混合土。试验淋滤液为自来水,pH 值为 6.92。马兰黄土的组成特征见表 1。

表 1 马兰黄土的组成特征

理化指标	马兰黄土	堆肥污泥	混合土	马兰黄土化学成分		马兰黄土 $Q_3^{2eol}$ 颗粒组成	
				指标	含量(%)	粒径(mm)	含量(%)
干密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.36			SiO <sub>2</sub>	63.03	>0.250	0.39
含水率(%)	7.24	6.46		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.46		13.93
有机质含量(g/kg)	6.81	337.32	27.87	CaO	8.87	0.075~0.250	79.88
全氮含量(g/kg)	3.07	20.29	7.53	FeO	1.39		5.80
有效氮含量(mg/kg)	63.00	1 590.75	154.70	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.24	0.005~0.075	
全磷含量(g/kg)	6.11	85.35	19.30	MgO	2.81		
有效磷含量(mg/kg)	0.70	169.86	22.62	Na <sub>2</sub> O	2.65	<0.005	
pH 值	8.49	6.81	8.32	K <sub>2</sub> O	2.25		

1.2 方法

试验装置由自制模拟土柱、支撑角钢台架、马氏供液瓶、盛液量筒等组成(图 1)。模拟土柱为长 100 cm、内径 18.6 cm 的透明有机玻璃圆柱管。土柱装样前先用自来水清洗内壁,再用蒸馏水洗 3 次并风干。然后在柱内底面放 1 层尼龙粗滤网,其上铺 2 cm 厚的清洗干净的石英砂,再上覆 1 层尼龙细滤网,细滤网上填充 60 cm 厚的黄土。分层分次称量填充,每次填充黄土厚 2 cm,按黄土的自然干密度 1.36 g/cm<sup>3</sup> 控制填充密度;采用直径 5 cm 的木棍端面人工自然压实,同时配合直径 2 cm 的小木棍对土柱内壁环绕压实,防止产生内壁效应。装入 20 cm 厚的掺入堆肥污泥的黄土即混合土,此层摊平自然沉实,以模拟耕作层;混合土上覆 1 层尼龙粗滤网后再铺 3 cm 厚的清洗干净的石英砂(进液缓冲)。模拟试验采取马氏瓶供液装置从土柱上端进液,保持柱顶面液层厚 5 cm,使淋滤液在重力作用下近似活塞式渗透流出,在底部采用 1 000 mL 量筒承接产生的渗滤液。

为使模拟试验尽量接近实际且具代表性,同时又能兼顾重金属淋滤迁移研究,设计 A、B、C 3 种土柱同时进行模拟试验,A 柱代表堆肥污泥,B 柱堆肥污泥 Cd 浓度为 5.468 4 mg/kg,C 柱堆肥污泥 Cd、Cu、Zn 浓度分别为 5.377 3、507.946 0、1 452.848 6 mg/kg。3 种试验污泥按黄土干质量 7% 掺入混合后分别作为 A、B、C 柱的表层耕作层。

为了模拟堆肥污泥在黄土地区土地利用后灌溉条件下的耕作层养分在黄土中的淋滤迁移行为,灌溉水采用自来水进行淋滤试验。农田灌溉用水量取 5 250 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup> · 年)<sup>[11-12]</sup>,1 年模拟土柱的灌溉淋滤水量为 14 L,一次性连续供液完成灌溉入渗,试验自 2013 年 5 月 30 日开始,6 月 10 日结束,历时 12 d。

1.3 土柱取样及分析方法

淋滤试验期间每天 10:00 观察并记录,当土柱底部连续 3 d 淋滤液渗出量为 0 时,视为淋滤试验结束。淋滤试验结束后,土柱顶部混合土层下降约 1 cm,其下黄土层均未发生明

显变化。土柱取样方法:先将土柱顶层石英砂取出,去除 1 cm 厚的混合土层,用深 5 cm 的环刀以 10 cm 厚为单位依次往下分层取样,每层所取土样分别放置在陶瓷盘中自然风干,碎块研磨后用自封样袋密封备用。采用海能 K9840 自动凯氏定氮仪测定土样全氮含量,分别采用碱解扩散法、碱熔-钼锑抗分光光度法、钼锑抗比色法、重铬酸钾-硫酸油浴法测定土样有效氮、全磷、有效磷、有机质含量。

2 结果与分析

有机质、氮、磷是土壤肥力的重要指标。全氮含量是土壤

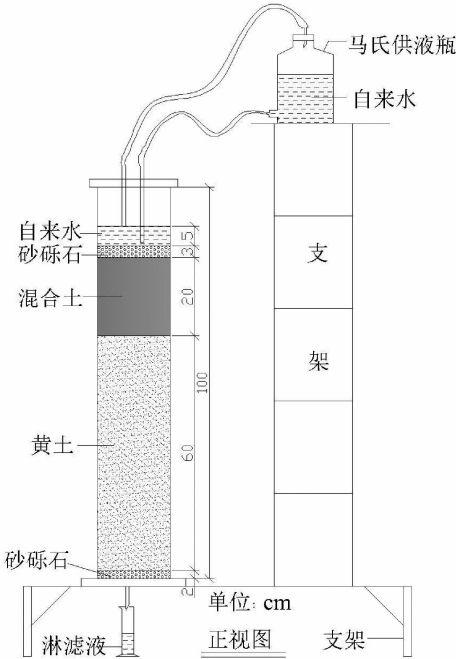


图1 试验淋滤土柱装置

中各种形态氮素含量之和,包括有机态氮、无机态氮,但不包括土壤空气中的分子态氮及气态氮化物。有效氮包括矿质态氮和结构简单比较易于分解且能为作物直接吸收利用的有机态氮。土壤中各种形态磷含量之和为全磷含量。有效磷是土壤中可被植物吸收的磷组分,包括全部水溶性磷、部分吸附态磷及有机态磷,有的土壤还包括某些沉淀态磷。由于堆肥污泥中有机质、氮、磷等养分明显高于黄土背景值,故在淋滤条件下,堆肥污泥施入黄土后必然会引起耕作层养分在垂直方向的迁移变化。

### 2.1 有机质的淋滤迁移特征

有机质是土壤养分的主要来源,堆肥污泥施入黄土的主要目的之一是增加黄土的有机质含量,改善其贫瘠性状。堆肥污泥有机质含量为 337.32 g/kg,符合 CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》规定的污泥农用有机质含量应大于 200 g/kg 的要求,混合土、黄土有机质含量分别为 27.87、6.81 g/kg,即黄土掺入堆肥污泥后其有机质含量增加了 309.25%。淋滤前后 A、B、C 柱有机质含量垂向分布及变化见图 2。经 1 年灌溉用水量淋滤后, A、B、C 柱 0~20 cm 耕作层有机质均发生了一些淋滤损失,但堆肥污泥有机质大部分仍滞留在表层 0~20 cm 混合土中,且 3 个土柱的有机质迁移特征几乎一致,每个耕作层的有机质平均损失量仅为 6% 左右。20~32 cm 土层段有机质含量稍微增加,且上层段较明显,深度 32 cm 以下土层中有机质含量接近黄土本底含量。可见,灌溉对耕作层污泥有机质的淋滤损失并不大,只有少量的污泥有机质随入渗水迁移、流失,且在黄土中的迁移距离短,迁移能力较差。有机质在土壤中的吸持现象主要存在着 2 种机制:分配作用,即在自来水的淋滤条件下,堆肥污泥有机质通过溶解作用分配到黄土有机质中,经过一定时间会达到分配平衡;吸附作用,即黄土矿物质对有机质的表面吸附作用<sup>[13]</sup>。分配作用与吸附作用共同影响,导致了有机质在黄土中的迁移能力差。淋滤试验还表明,污泥重金属含量对有机质的淋滤迁移影响很小。

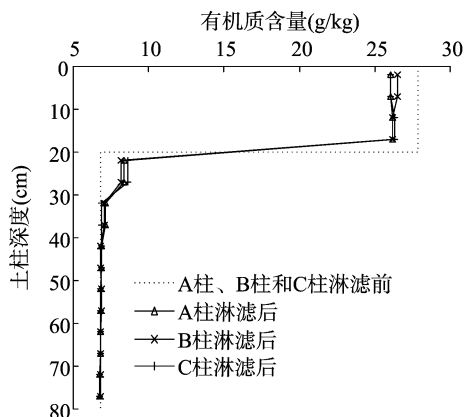


图2 淋滤前后土柱剖面有机质分布特征

### 2.2 氮的淋滤迁移特征

全氮含量是土壤氮素养分的贮备指标(或容量指标),在一定程度上反映土壤氮的供应能力。有效氮能够较灵敏地反映土壤氮素动态及供氮水平,而且土壤有效氮的含量与作物氮素吸收有较好的相关性。因此,有效氮在一定程度上更能反映农田土壤肥力状况。由图 3 可知,堆肥污泥施入黄土后,

混合土的全氮量由黄土的 3.07 g/kg 增至 7.53 g/kg,有效氮含量由 63.00 mg/kg 增至 154.70 mg/kg,说明堆肥污泥可以显著提高土壤含氮量。作物所吸收的氮素 50%~70% 来自土壤,因此在贫瘠的黄土中施入堆肥污泥对植物的生长具有重要意义<sup>[14]</sup>。

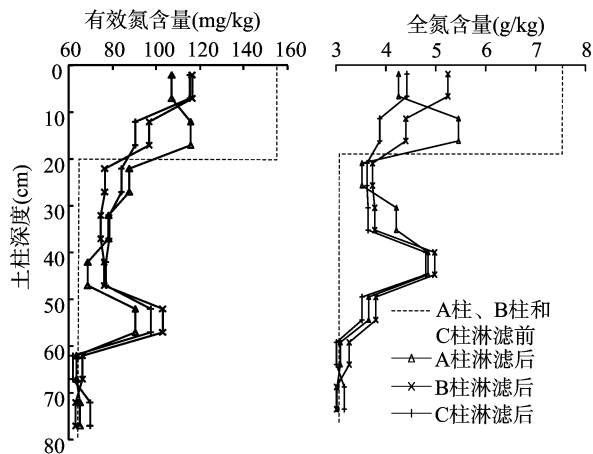


图3 淋滤前后土柱剖面有效氮和全氮的分布特征

图 3 表明,经 1 年灌溉用水量淋滤后,耕作层中的氮元素在土柱垂直剖面显示明显向下迁移现象。3 根土柱耕作层氮素的淋滤迁移特征表现出一定差异,即淋滤后 A 柱耕作层中氮素的迁移特征与 B、C 柱相反, A 柱耕作层上层中氮素较下层更易迁移, B、C 柱耕作层下层中的氮素更易迁移。淋滤后 A、B、C 柱耕作层的有效氮平均损失量分别为 28.05%、31.11%、33.59%,耕作层的全氮平均损失量分别为 35.49%、35.92%、44.89%。耕作层有效氮与全氮平均损失量大小顺序都为 A 柱 < B 柱 < C 柱,且耕作层的全氮较有效氮更易往下层迁移,说明污泥重金属种类与含量对氮素的淋滤迁移影响显著,且污泥重金属含量越多,氮素越易迁移,也说明耕作层氮素除了有效氮在土柱迁移外还有其他形态的氮也在迁移。A、B、C 柱 3 个土柱 20~62 cm 层段氮素较淋滤前明显增加,62 cm 以下土层中氮素含量接近黄土的氮素含量,3 土柱中的氮素迁移规律大致表现一致,即经淋滤后堆肥污泥中氮素在土柱中发生了纵向迁移,迁移距离约为 42 cm,说明堆肥污泥氮素在黄土中易于迁移,这是因为氮素很难被土壤颗粒所吸附<sup>[17]</sup>。堆肥污泥全氮迁移过程中在土柱剖面 42~47 cm 处具有积累现象,有效氮在 52~57 cm 处具有明显积累现象,说明有效氮比全氮的迁移能力强。可见淋滤条件下,堆肥污泥氮素在黄土中易于迁移,迁移距离约 42 cm,且堆肥污泥中有效氮迁移能力强于全氮,而且污泥重金属含量是影响氮素在黄土层中淋滤迁移的主要因素之一。

### 2.3 磷的淋滤迁移特征

磷是植物生长的重要营养元素之一,可以同时提高植物的抗寒性、抗旱性<sup>[18]</sup>。堆肥污泥富含磷,黄土掺入堆肥污泥后,全磷含量、有效磷含量分别增加了 215.9%、3131.42%,且中国黄土地区气候寒冷干燥,因此堆肥污泥施入黄土中更有利于植物生长。

由图 4 可知,经 1 年灌溉水量淋滤后,3 根土柱中的全磷与有效磷的迁移分布特征存在明显差异,尤其是在耕作层以下的黄土层中差异明显。A、B、C 柱耕作层中的有效磷平均

损失量分别为 11.72%、5.20%、9.43%，耕作层中的全磷平均损失量分别为 13.72%、16.63%、17.55%，耕作层有效磷平均损失量由大到小顺序为 B 柱 < C 柱 < A 柱，耕作层全磷损失量由大到小顺序为 A 柱 < B 柱 < C 柱，说明耕作层的全磷较有效磷更易迁移，全磷中含有除有效磷的其他形态磷在淋滤过程中迁移，堆肥污泥未作重金属强化处理的 A 柱耕作层中的有效磷更易迁移，而且污泥重金属种类多、含量高有利于耕作层全磷的迁移。土柱经淋滤后，有效磷大部分仍保留于 0~20 cm 的耕作层，只有小部分有效磷随着淋滤液往土柱下层迁移，20~32 cm 层段有效磷含量有稍微增加，且上层段较明显，32 cm 以下土层有效磷含量接近黄土。3 根土柱剖面的全磷在 20~42 cm 层段增加明显，且在 32~37 cm 处具有富集现象，42 cm 以下土层全磷含量与此段淋滤前含量相近。

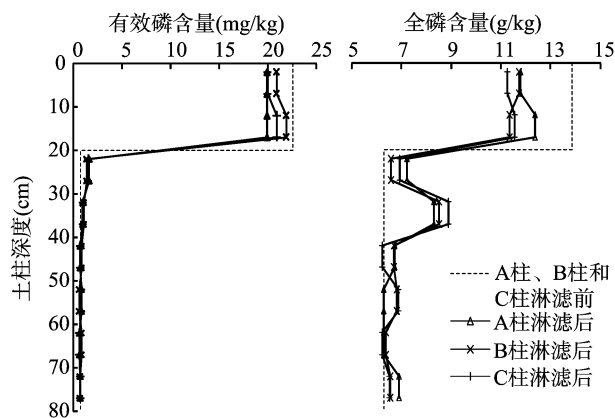
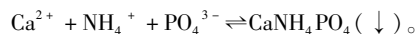
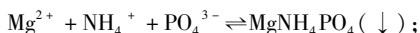


图4 淋滤前后土柱剖面有效磷和全磷的分布特征

淋滤条件下，土柱中存在以下平衡：



由上式可知，浓度增加有利于反应生成沉淀。淋滤过程中氮素在黄土中的迁移能力较强，迁移致使土柱 20~62 cm 层段有效氮含量增加(图 3)。堆肥污泥中的磷素在黄土中的迁移能力变弱，即有效磷、全磷仍大部分滞留于耕作层，只有少部分发生迁移并滞留于土柱中上部。可见，1 年灌溉水量淋滤条件下，堆肥污泥中全磷的迁移能力要强于有效磷，耕作层中的有效磷不易迁移，有利于植物直接吸收利用磷素，而且，磷素在黄土中的迁移转化与氮素在黄土中的迁移有很大联系；再者，磷素在土柱剖面的淋滤迁移特征与堆肥污泥中重金属种类含量关系密切，污泥重金属种类多、含量高有利于耕作层全磷迁移，不利于有效磷迁移。

### 3 结论

堆肥污泥中富含植物所需的有机质、氮、磷等营养物质，将堆肥污泥施入黄土后可以明显改善黄土肥力。土柱经 1 年灌溉水量淋滤后，堆肥污泥有机质仍绝大部分持留于耕作层(0~20 cm)，只有少量的堆肥污泥有机质随入渗水迁移、流失，且在黄土中迁移能力差。淋滤条件下，堆肥污泥氮素在黄土中易于纵向迁移，且迁移距离约 42 cm，而且堆肥污泥中有

效氮的迁移能力要强于全氮；堆肥污泥中全磷的迁移能力强于有效磷，有效磷绝大部分仍保留于耕作层中，而且磷素在黄土中的迁移转化易受氮素在黄土中迁移的影响；堆肥污泥中氮素、全磷在土柱中的淋滤迁移特征与堆肥污泥中重金属种类、含量关系密切。总体而言，经 1 年灌溉水量淋滤，堆肥污泥除部分氮素在黄土中较易迁移外，其余营养物质仍大部分或绝大部分滞留于耕作层中，若仅考虑营养物质的迁移问题，则堆肥污泥在黄土地区土地利用是可行的。

### 参考文献：

- [1] Stabnikova O, Goh W K, Ding H B, et al. The use of sewage sludge and horticultural waste to develop artificial soil for plant cultivation in Singapore[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(9): 1073–1080.
- [2] Soriano – Disla J M, Gómez I, Navarro – Pedreño J, et al. The transfer of heavy metals to barley plants from soils amended with sewage sludge with different heavy metal burdens[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013: 1–10.
- [3] 高 定, 郑国砥, 陈同斌, 等. 城市污泥土地利用的重金属污染风险[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(15): 102–105.
- [4] 雷勋杰, 曾正中, 苟剑锋, 等. 污泥堆肥化过程中重金属 Cu、Zn、Cd 的生物有效性研究[J]. *环境工程*, 2014, 32(6): 109–113.
- [5] Cesar R, Silva M, Colonese J, et al. Influence of the properties of tropical soils in the toxicity and bioavailability of heavy metals in sewage sludge – amended lands[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(8): 2281–2292.
- [6] Martinez F, Cuevas G, Calvo R, et al. Biowaste effects on soil and native plants in a semiarid ecosystem[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(2): 472–479.
- [7] 陈同斌, 黄启飞, 高 定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(5): 561–569.
- [8] 杨 军, 郭广慧, 陈同斌, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(13): 122–124.
- [9] 马 娜, 陈 玲, 熊 飞. 我国城市污泥的处置与利用[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 92–95.
- [10] 刘东生, 孙继敏, 吴文祥. 中国黄土研究的历史、现状和未来——一次事实与故事相结合的讨论[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(3): 185.
- [11] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 175–300.
- [12] 戴树桂. 环境化学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 214–235.
- [13] 李宇庆, 陈 玲, 赵建夫. 土壤全氮测定方法的比较[J]. *广州环境科学*, 2006, 21(3): 28–29.
- [14] Wedin D A, Tilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands[J]. *Science*, 1996, 274(5293): 1720–1723.
- [15] Abbasi F, Onodera H, Toki S, et al. OsCDPK13, a calcium – dependent protein kinase gene from rice, is induced by cold and gibberellin in rice leaf sheath[J]. *Plant Molecular Biology*, 2004, 55(4): 541–552.