

# 城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果

黄殿男, 谭杰, 傅金祥, 张贺凯, 赵玉君, 马兴冠, 席风祥

(沈阳建筑大学辽河流域水污染防治研究院 市政与环境工程学院, 沈阳 110168)

**摘要:** 为探究城市生活污水处理厂脱水污泥作为土地改良剂对沙漠化土壤的改良效果, 确定合适的污泥掺混量, 试验以离心脱水污泥与沙漠表层土壤按污泥掺混量为 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% 充分掺混, 以土壤物理指标、营养指标为考察指标, 研究不同污泥掺混量对沙土的改良效果, 并与 3 种适于耕作土壤平行对比。试验表明沙土经污泥掺混后, 随着污泥掺混量的增大, 其土粒密度、土壤容重降低; 污泥掺混量与土粒密度和土壤容重呈负相关, 相关系数可达  $-0.99$ ,  $-0.89$ , 而土壤孔隙度增加, 呈正相关 ( $r=0.79$ ), 当污泥掺混量大于 10% 后, 污泥掺混量对土壤容重、孔隙度的改良效果减缓; 改良沙土中有机物含量、含水率随污泥掺混量增加呈线性增加 ( $r>0.99$ ), 持水能力与污泥掺混量呈显著正相关 ( $r=0.99$ )。改良沙土较对比土壤有更强的保水能力; 氮、磷元素含量和污泥投加量呈显著正相关 ( $r>0.95$ ), 污泥掺混量为 15%~25% 时, 改良沙土氮磷含量均接近对比土壤含量, 污泥掺混对土壤全钾含量改善不大, 但能有效提高土壤有效钾含量。污泥掺混量为 10%~25% 时, 改良沙漠化土壤的理化性质接近对比适宜耕作土壤。

**关键词:** 脱水污泥; 沙化土; 含水率; 土壤改良

中图分类号: S156.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0323-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.053

## Amelioration Effect of Municipal Sewage Sludge on Desertification Soil

HUANG Diannan, TAN Jie, FU Jinxiang, ZHANG Hekai,

ZHAO Yujun, MA XingGuan, XI Fengxiang

(Liaohe River Basin Water Pollution Control Institute Municipal and Environmental Engineering Institute Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168)

**Abstract:** To explore the improvement effect of desertification soil by adding of dewatering sludge from sewage treatment plant as soil amendment and determine the appropriate adding amount of sludge, the soil structure, nutrition index, water retention character were tested under the dewatering sludge doping content of 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%. Three kinds of soil which were suitable for farming were chose as control test sample. The results showed that density of soil particles and soil bulk density reduced ( $r=-0.99$ ,  $r=-0.89$ ), while soil porosity increased when the addition of sludge to the desertification soil ( $r=0.79$ ). When the sludge adding amount was more than 10%, the improvement effects of soil bulk density and porosity reduced. However, organic matter content, moisture content and water-holding capacity appeared linear growth with mixing amount of sludge ( $r>0.99$ ). The water retention ability of improved desertification soil was better than contrast soil. Amounts of nitrogen and phosphorus were significantly positive linear correlated with the adding amount of sludge. ( $r>0.95$ ). The content of total nitrogen and phosphorus of improved soil were closed to the comparative soil when the sludge amount was 15%—25%, while the content of total potassium was almost no changed. However, the effective potassium content of sludge effectively increased. The best blending amount was 10%—25% the physical and chemical properties of ameliorative desertification soil was closed to contrasted soil and suitable to vegetation growth.

**Keywords:** dewatering sludge; desertification soil; water content; soil amelioration

收稿日期: 2016-09-15

资助项目: 沈阳建筑大学学科涵育项目(XKHY2-116); 沈阳建筑大学青年基金项目(2015010); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07202-011); 沈阳建筑大学博士后基金(SJZUBSH201625); 辽宁省教育厅科学研究项目(LJZ2016028)

第一作者: 黄殿男(1983—), 女, 副教授, 主要从事污泥处理处置研究。E-mail: 7nan@163.com

通信作者: 傅金祥(1955—), 男, 博士, 教授, 主要从事污泥减量资源化研究。E-mail: jinxiangfu1955@sina.com

我国污泥产量逐年加大,且污泥妥善处理处置率很低<sup>[1]</sup>。但污泥中富含氮、磷和植物必须的微量元素,使污泥成为一种极具潜力的肥料<sup>[2-4]</sup>;富含的有机物和污泥脱水车间投加的 PAM 等药剂,又使得污泥成为一种极具潜力的土壤改良剂<sup>[5-6]</sup>。而我国土壤沙漠化严重,土壤蓄水、保肥能力较差,使得沙漠化土壤不利于植物生长。目前对于沙漠化土地治理主要采用建立大型固沙防护林带的方式,但却没有解决沙化土壤生态修复所需的营养源等问题,沙漠化的土质情况也没有得到有效改善<sup>[7]</sup>。利用污泥改良沙漠化土壤具有很高的可行性和潜力,污泥中重金属等污染物质也可以通过源头控制和相关技术手段稳定化,减少对环境的影响<sup>[18]</sup>。李霞<sup>[7]</sup>利用室内土柱淋溶法模拟降雨,认为不同的污泥施用量对表层沙土养分提升明显,且氮素淋溶风险高于磷素淋溶风险。李祯等<sup>[15]</sup>发现,用粉煤灰和城市污泥作荒漠土壤树肥,荒漠土壤的蓄水性能和持水性能均有所提高;邹通等<sup>[9]</sup>通过模拟淋溶发现,施用污泥后风沙土各土层除钾外,各养分含量较未施用污泥时均有显著提高,且 Cu、Cd、Pb、Zn 的总量在各土层中均有增加;华正伟等<sup>[13]</sup>发现,风沙土施用污泥后随着污泥用量的增加,土壤孔隙度增大,土粒密度变小,结构性增加,且施用城市污泥能够显著提高杨树幼苗株高、胸径、叶面积及成活率。随着国家“十三五”规划的出台及“水十条”、“土十条”的颁布,污水厂污泥处理处置问题和土壤沙漠化等环境问题将会越发凸显,但目前利用污泥治理沙漠化土壤的研究相对较少,关于对比量化污泥施用对沙漠化土壤改良效果的研究也相对匮乏,导致我国目前在污泥进行沙漠化土壤改良过程中缺乏具有借鉴意义的技术参数和工程经验。本文旨在量化污泥施用对沙漠化土壤改良效果,为污泥改良沙漠土壤相关规范标准制定和工程应用提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验沙土于 2016 年 4 月取自辽宁省昌图县福德店(42°58'33.7" N, 123°32'41.2" E)荒漠化土壤 0—20 cm 土层,污泥取自抚顺三宝屯污水处理厂污泥离心脱水车间。样品取回后存放于 4℃ 冰箱内,取回当日测样品含水率、pH 值和有机质,污泥和土壤样品在避光处自然风干后剔除其中杂质和石块等废物,用研钵磨碎过 100 目筛后测定总氮、总磷、总钾和重金属含量等指标。其中沙土含水率、pH 值和有机质含量分别为 4.77%, 7.44, 4.3 g/kg, 总氮、总磷、全钾含量分别为 4.022, 0.035, 2.045 g/kg, 有效磷、速效

钾、铵氮含量分别为 2.783, 34.0.81 mg/kg, 沙土容重、土粒密度、孔隙度分别为 0.81 g/cm<sup>3</sup>, 2.62 g/cm<sup>3</sup>, 47%。污泥含水率、pH 值和有机质分别为 80.3%, 7.21, 664 g/kg, 总氮、总磷、全钾含量分别为 35.84, 14.13, 2.27 g/kg, 污泥中重金属含量分别为 Cu(117 mg/kg), Zn(395 mg/kg), Pb(36 mg/kg), Cr(398 mg/kg), Ni(170 mg/kg), Cd(0.92 mg/kg)。

对沙土土质和污泥泥质的相关指标进行检测,结果表明:试验用沙土为中性土壤,含水率及有机物含量极低,土壤紧实,孔隙度较小,磷、钾等营养元素匮乏。试验用污泥含水率为 80.3%, 超过《城市污水处理厂土地改良用泥质》GB/T 24600—2009 规定的 65% 限值,但沙漠降雨量少,其土壤含水率极低;因此施加离心脱水污泥用作沙漠土壤改良,在有效提升沙漠土壤含水率方面较含水率小于 65% 的污泥更具优势。试验用污泥有机物含量是试验沙土的 150 多倍,氮、磷含量均较高,是极好的土壤肥料来源,总钾含量亦比沙地土壤含量高,能在一定程度的补充土壤钾素。污泥中 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr 等重金属含量均低于《农用污泥中污染物控制标准》(GB4284—84)中规定限值。

### 1.2 试验方法

本试验将离心脱水污泥直接作为土壤改良剂和肥料与沙土充分掺混,使掺杂后土壤中污泥(湿重计)含量分别为 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%。掺杂后土壤一部分装入已称重的 500 ml 烧杯中,使得各烧杯中改良沙土质量均为 500 g;另一部分改良沙土,当日测量土壤初始含水率、有机物含量。一周后测量土壤饱和含水率、土粒密度、土壤容重、营养元素等相关指标。烧杯中改良沙土统一置于干燥环境,避免灰尘和明水进入其中,每隔一段时间测量烧杯中总质量;通过土壤原始含水率和烧杯质量,计算出不同掺杂比土壤的水分散失量和其含水率。

为与正常耕作土壤对比,分别在校园内的自然土壤(1#)、田地(2#)、草地(3#)采集 3 种不同土壤作为对照组,与上述试验平行进行。文中所有数据均为 3 组平行重复测定的平均值。

### 1.3 主要仪器与分析方法

试验污泥和土壤的有机物测定采用灼烧法;含水率采用重量法;pH 采用电极法;全磷采用 NaOH 熔融—分光光度法;土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提—分光光度法;全钾采用 NaOH 熔融—火焰原子吸收法;速效钾采用醋酸铵—火焰原子吸收法;全氮采用碱性过硫酸钾—紫外分光光度法;铵氮采用氯化钾浸提—

纳氏试剂分光光度法；土壤容重、孔隙度采用环刀—重量法；重金属指标采用湿法消解—AAS 法或 ICP—MS 法。

主要仪器：SP—752 型紫外可见分光光度计：上海光谱仪器有限公司；Sevенеasy S20 型精密 pH 计：瑞士 TOLEDO 公司；BPG—9070A 博讯电热鼓风干燥箱：上海博讯实业有限公司；YX—HF 马弗炉：上海娥江仪器；HITACHIZ—5000 原子吸收光谱仪：日本日立公司。

1.4 数据统计与分析

利用 Excel 2010 统计数据并绘制图表，利用 IBM SPSS Statistics 19.0 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 污泥掺混对沙土物理性质的影响

将离心脱水污泥与沙土充分掺混，掺杂后土壤视为改良沙土，其污泥（湿重计）投加量分别为 5%，10%，15%，20%，25%，30%，35%。土壤改良后通过比重瓶法、环刀法<sup>[16]</sup>测定土粒密度、土壤容重、孔隙度等，并以原始沙土、校园内自然土壤（1#）、田地土壤（2#）、草地（3#）土壤平行对比，因改良沙土在改良过程被充分掺混扰动，平行对比土壤采集过程中也需通过充分扰动。改良沙土与对比土壤的物理性质测定结果见表 1。

从表 1 中可看出，随着污泥掺杂量的增加，改良沙土土粒密度随着污泥掺混量的增加而逐步降低（ $r=-0.99$ ），随着污泥施用量的增加污泥容重逐渐下降（ $r=-0.89$ ），孔隙度逐渐增加（ $r=0.79$ ），改良沙土土粒密度、土壤容重、孔隙度与污泥投加量呈显著相关，这与邹通等<sup>[9]</sup>研究结果趋势一致。其原因是污泥中含有大量有机物，污泥密度小于沙土土粒密度，随着改良沙土中污泥量的增加，土粒密度逐渐减小。污泥与沙土掺混后，污泥的掺入使得沙土中有机质和粘粒含量增加，改善了土壤状况，使得土壤颗粒胶结，形成了较大的团聚体，进而使沙土孔隙度增大，容重降低<sup>[21]</sup>。而当污泥施用量大于 10% 后，改良沙土孔隙度增大和容重降低趋势减缓，造成这种现象的原因可能是污泥掺混沙土形成的团聚体稳定性较弱，随着污泥掺杂量的增大，土壤含水量增加，下层团聚体因上层土壤重力挤压作用而塌陷，进而导致改良沙土孔隙度和容重随污泥施用量增大变化趋势不明显。与对比适宜耕作土壤比较发现，污泥投加量为 10%~20% 时，改良沙土与 1#、2# 对比土壤的物理性质接近。

2.2 污泥掺混对营养元素的影响

沙漠土壤的营养元素极低，污泥作为土地改良

剂，在改良沙土结构的同时，会补充沙土中的营养元素，使得改良沙土利于植物生长，而沙漠土壤植被覆盖会带来巨大的环境效益，使得沙漠环境进一步改善，但若污泥施用量过大，会发生营养源过盛而抑制植物生长的现象<sup>[9]</sup>，并带来一系列的环境风险<sup>[7-12]</sup>。试验以改良沙土全氮、全磷、全钾、铵氮、有效磷、速效钾等指标，考察污泥掺混量对沙漠化土壤营养指标的改善效果，并与适宜耕作的 3 种土壤含量对比，以确定出合适的污泥掺混量。

表 1 改良沙土与对比土壤的物理性质

| 掺混量 | 土粒密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 土壤容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 孔隙度/% |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|-------|
| 0%  | 2.597                          | 1.361                          | 47.6  |
| 5%  | 2.590                          | 1.112                          | 57.2  |
| 10% | 2.494                          | 0.965                          | 60.4  |
| 15% | 2.386                          | 0.970                          | 58.3  |
| 20% | 2.326                          | 0.943                          | 59.5  |
| 25% | 2.273                          | 0.898                          | 60.5  |
| 30% | 2.223                          | 0.867                          | 61.9  |
| 35% | 2.148                          | 0.806                          | 62.1  |
| 1#  | 2.326                          | 0.973                          | 58.2  |
| 2#  | 2.703                          | 0.902                          | 66.6  |
| 3#  | 2.326                          | 0.988                          | 57.5  |

从表 2 中可看出，污泥中总氮含量很高，试验用污泥总氮含量约 35 g/kg，高出沙土含量约 9 倍，约是对比土壤 1#（11.42 g/kg）、2#（12.16 g/kg）、3#（11.77 g/kg）总氮含量的 3 倍，是退化土壤理想的氮素补充源。改良沙土中总氮含量随污泥掺混量的增加而增加，掺混量为 15%~25% 的改良沙土总氮含量与 3 种对比土壤含量相当；掺混量为 30% 的改良沙土总氮约是初始沙土总氮含量的 3.4 倍，掺杂污泥改良沙土中总氮含量显著提高。

沙地土壤改良后，随着污泥掺杂量的增加，土壤全磷、有效磷含量上升趋势极为明显，且呈现良好的二次线性相关性，其原因是沙土磷含量极低，而污泥磷含量较高，污泥是良好的磷肥，与 1#（0.70 g/kg）、2#（1.13 g/kg）、3#（0.63 g/kg）等土壤的总磷含量相比，污泥掺杂比为 15%~25% 时，改良沙土总磷含量与对比土壤总磷含量接近。在对比有效磷含量时发现，当污泥投加量为 5% 时，改良沙土中的有效磷含量（29 mg/kg）接近 1#（31 mg/kg），高于 3#（18 mg/kg）土壤含量；污泥投加量为 15% 时，有效磷含量（81 mg/kg）与 2# 土壤（83 mg/kg）接近，其原因可能是污泥总磷中有效磷占比相对较高，污泥对土壤磷素的补充较大程度上以有效磷形式参与。

由表 2 可以看出,投加污泥后土壤全钾含量变化不大,表明污泥对沙土全钾补充效果不佳。但改良后土壤中有效钾含量升高趋势明显,污泥投加为 5% 的改良沙土有效钾含量比初始沙土高 71.4% 左右,投加量为 35% 的改良沙土有效钾是初始沙土含量 8.74 倍。其原因可能是污泥总钾中有效钾占比很高,投加到土壤中可直接被植物利用,但存在随时间推移改良

沙土土壤钾素缺乏的可能性。对比土样 1#、2#、3# 总钾含量约为 4.11~5.26 g/kg,有效钾含量为 180~290 mg/kg,与之相比改良沙土总钾含量略低,20%~30% 污泥掺混量的改良沙土有效钾含量接近对比土壤含量。相关性分析表明,除全钾外,随着污泥掺混量增加,各营养指标显著提高,均呈现显著正相关( $r>0.99$ ),这与邹通<sup>[9]</sup>研究结果一致。

表 2 改良沙土与对比土壤的营养元素含量

| 掺混量                        | 0%   | 5%   | 10%  | 15%  | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 1#    | 2#    | 3#    |
|----------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )   | 4.02 | 5.81 | 7.40 | 8.59 | 10.60 | 11.78 | 13.66 | 15.36 | 11.42 | 12.16 | 11.77 |
| 铵氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )  | 0.81 | 1.10 | 1.15 | 1.38 | 1.93  | 2.06  | 2.23  | 2.76  | 2.26  | 4.38  | 3.72  |
| 全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )   | 0.07 | 0.23 | 0.44 | 0.67 | 0.92  | 1.21  | 1.52  | 1.86  | 0.70  | 1.13  | 0.63  |
| 有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 3    | 29   | 52   | 81   | 117   | 156   | 188   | 230   | 31    | 83    | 18    |
| 全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )   | 2.05 | 2.05 | 2.05 | 2.06 | 2.06  | 2.06  | 2.07  | 2.08  | 4.11  | 5.26  | 4.65  |
| 有效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 30   | 60   | 80   | 130  | 170   | 220   | 280   | 330   | 180   | 290   | 210   |

2.3 污泥掺混对沙土有机物含量、持水保水能力的影响

污泥掺混后沙土的含水率和有机物得到充分补充,并随着污泥量的增加而呈现良好的线性关系( $r>0.99$ ),本文以土壤持水度表示改良沙土的持水保水能力,土壤持水度用土壤能持有的最大含水量与土壤干重之比计算<sup>[16]</sup>,图 1 中可以看出,污泥掺混在提高土壤有机物含量和含水率的同时,对土壤持水度有也极大改善。污泥持水度随污泥投加量的增加而增加,且呈现显著正相关( $r=0.99$ ),其原因可能是污泥中有机物极大的影响了改良沙土中的饱和含水量。刘纯甫等<sup>[14]</sup>人也认为,有机质含量是土壤持水能力的重要影响因素,污泥掺混对土壤水分保持量有明显改善,施用有机物含量越高的污泥,可能对沙漠改良沙土持水能力提升越大,而沙漠地区一般降雨量较少,良好的土壤持水能力对应用植被修复改良沙漠土壤过程具有重要意义。

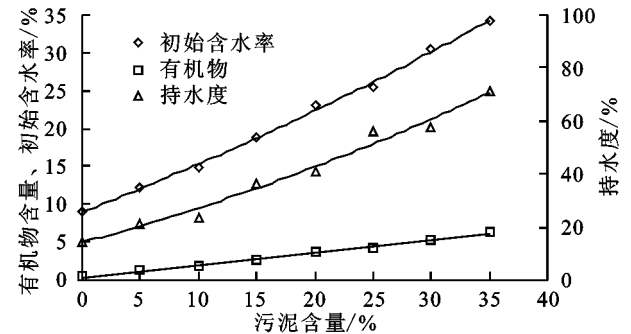


图 1 污泥掺混量对土壤含水率、有机物和持水度的影响

为验证改良沙土的保水效果,本试验将污泥投加量为 5%,10%,15%,20%,25%,30%,35% 的改良沙土与初始采集沙土分别装入已称重的 500 ml 烧杯中,保证烧杯中改良沙土质量均为 500 g,统一干燥放置。试验初期每天称量各烧杯,考察放置不同时

间各烧杯中水分散失量,并根据烧杯总量和改良沙土的初始含水率计算出不同时期土壤的含水率,并与 1#、2#、3# 正常土壤平行对比,试验后期根据含水率变化适当降低测量频率。

从图 2 可看出,与 1#、2#、3# 土壤对比,各改良沙土含水率下降趋势较平缓,改良沙土保水能力对比土壤更强,导致此现象的原因可能是有机质含量高的土壤,土壤团粒结构多且稳定性好,土壤孔隙分布比较均匀,且毛管孔隙数量较多,可以贮存大量的水分,因此土壤的保水和持水能力增强。另外,脱水污泥中含有一定量的 PAM 等高分子聚合物,也对提高沙土保水能力具有一定贡献作用。从图 2 也可以看出,污泥掺混后,虽然改良沙土初始含水率梯次增高,但含水率下降趋势线几乎平行,没有出现理想中的随污泥掺杂量增加而含水率下降更平缓的现象,其原因可能是由于随着污泥掺混量的增加,改良沙土的孔隙度和初始含水率增大,进而加快水分散失速率。

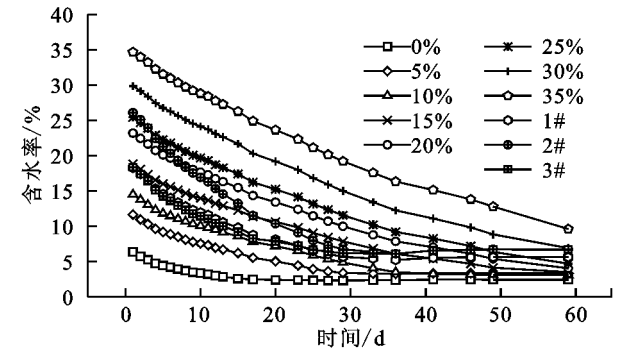


图 2 不同污泥掺混量对土壤保水效果的影响

3 结论

(1)沙土经污泥掺混后,其土粒密度、容重降低,土壤孔隙度增加,当污泥掺混量大于 10% 以后,由于

污泥与沙土直接掺混形成的团聚体稳定性较差,导致改良沙土孔隙度增大和容重降低趋势减缓。

(2)污泥中全氮、全磷含量远高于一般土壤,能充分补充沙漠化土壤的氮素、磷素,试验污泥掺混量为15%~25%时,改良沙土总氮、总磷均接近对比耕作土壤含量,且改良沙土铵氮、有效磷均随污泥掺混量的增加而呈极显著增加。

(3)改良沙土中有效钾含量提高明显,污泥掺混量20%~30%的改良沙土有效钾与对比土壤含量相当。

(4)污泥掺混后,改良沙土含水率、有机物含量、持水度随掺混量增加而呈线性增长,改良沙土的持水度与有机物含量呈极显著相关,施用有机物含量越高的污泥对沙漠土壤持水能力改良效果越好。

(5)与对比土壤相比,改良沙土含水率随时间推移下降趋势明显平缓,改良沙土保水能力强于试验对比土壤。

#### 参考文献:

- [1] 张辉. 污泥处理处置现状的思考与展望[J]. 给水排水, 2012, 38(增刊1): 234-239.
- [2] 崔春红. 污泥农肥化施用效果及肥料中有机质质量的评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [3] 明银安. 城市污泥果肥利用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [4] 李东洁, 刘树庆, 李鹏, 等. 高肥料投入条件下不同污泥用量对油菜生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1752-1757.
- [5] 周金倩. 干化污泥对盐碱土改良及植物生长的影响初探[D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [6] 李霞. 城市污泥在科尔沁沙地土壤改良中的应用及风险分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [7] 李霞, 李法云, 荣湘民, 等. 城市污泥在科尔沁沙地土壤改良中的应用及风险分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 93-102.
- [8] 唐凤德, 彭丽曼, 华正伟, 等. 城市污泥对沙地杨树苗木成活生长及生理特征的影响[J]. 东北林业大学学报,

2013, 41(7): 36-39.

- [9] 邹通. 污泥对风沙土养分与重金属效应的淋溶模拟研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2012.
- [10] Alessandra C, Tania M, Lorenza M, et al. PBDEs in Italian sewage sludge and environmental risk of using sewage sludge for land application[J]. Environmental Pollution, 2011, 161(11): 229-234.
- [11] Zhou S Q. Effects of heavy metals on planting water-cress in kailyard soil amended by adding compost of sewage sludge[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010, 88(4): 263-268.
- [12] Corra R S, White R E, Wcatherley A J. Effects of sewage sludge stabilization on organic-N mineralization in two soils[J]. Soil Use and Management, 2012, 28(1): 12-18.
- [13] 华正伟. 城市污泥对风沙土改良及杨树生长的影响[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2012.
- [14] 刘纯甫. 脱水污泥对盐碱化土壤改良效果及污染物分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [15] 李桢, 李胜荣, 申俊峰, 等. 粉煤灰和城市污泥配施对荒漠土壤持水性能影响的实验研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(2): 74-78.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 115-317.
- [17] 郝瑞娟. 城市污泥施肥对绿化苗木生长生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(8): 972-975, 994.
- [18] 王磊, 香宝, 苏本营, 等. 城市污泥应用于我国北方沙地生态修复的探讨[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(5): 485-493.
- [19] 王晓东, 聂剑文, 商侃侃. 污泥施用对4种绿化植物叶片性状和光合作用的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(13): 44-50.
- [20] 李萍萍, 薛彬, 孙德智, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤理化性质及白三叶生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 127-131.
- [21] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 等. 晋西黄土区退耕还林22年后林地土壤物理性质的变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 1-9.