

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): 484-492.

WANG L, XIANG B, SU B Y, et al. Application of urban sludge in restoration of sandy-land in north of China: a viewpoint[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(5): 484-492.

城市污泥应用于我国北方沙地生态修复的探讨

王磊^{1,2}, 香宝^{1,2*}, 苏本营^{1,2}, 方广玲^{1,2}, 胡钰^{1,3}, 潘丽波^{1,2}, 王玥^{1,2}

1. 中国环境科学研究院, 北京 100012

2. 中国环境科学研究院, 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

摘要 我国北方地区土壤退化和沙化严重, 如何改良沙地土壤, 恢复沙地植被, 是当前区域生态保护工作的重点, 也是推进区域生态文明建设进程的重要内容之一。针对北方沙地土壤流动性大、有机质浓度低、保水性能差等现状, 在综述前人研究成果基础上, 得出: 城市污泥具有物源充足、有机质浓度高、矿物质养分(N、P、K)等营养物质富集、黏性物质浓度大、有利于促进沙地植物生长等优良特性, 可以通过废物循环利用, 实施沙地土壤改良, 用于沙地植被修复与重建。但是, 由于城市污泥主要来源于工业或生活污水处理厂, 其中含有一定量的重金属、有机污染物和病原微生物等有害物质, 直接应用可能对沙地生态环境带来潜在的环境风险。因此, 必须采取污染源头控制、生物堆肥发酵、固化/稳定化预处理等措施, 制订相应的应用技术规范以及严格施用范围和施用量, 并实施长期的跟踪监测与风险评价, 才能确保城市污泥在沙地生态修复中的有效性。

关键词 北方沙地; 城市污泥; 生态修复; 风险防控

中图分类号: X703 文章编号: 1674-991X(2016)05-0484-09 doi: 10.3969/j.issn.1674-991X.2016.05.071

Application of Urban Sludge in Restoration of Sandy-land in North of China: A Viewpoint

WANG Lei^{1,2}, XIANG Bao^{1,2}, SU Benying^{1,2}, FANG Guangling^{1,2}, HU Yu^{1,3}, PAN Libo^{1,2}, WANG Yue^{1,2}

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. State Environment Protection Key Laboratory of Regional Ecological Processes and Functions Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract Soil degradation and desertification were widely and severely existed in Northern China. The amelioration of the sandy soil and restoration of the sandy plants were currently the key tasks for protection of regional ecological environment, and also the important content for promotion of regional ecological civilization construction. Given the large fluidity, low concentrations of organic compounds and deficient water-retaining ability of northern sandy soil and based on review of previous literature, it was suggested that municipal sludge could be recycled and used to ameliorate sandy soil and restore sandy plants since the municipal sludge has the good properties of sufficient resources, high amount of organic compounds and glutinous matters, enrichment of nutrients (i. e., N, P, K, etc.), facilitating the growth of sandy plants, etc. However, since the municipal sludge is mainly originated from industrial and municipal wastewater treatment plant, it contains certain amounts of heavy metals, organic compounds, pathogenic microorganisms and other hazardous components which may provoke the

收稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAD14B02); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-009-01)

作者简介: 王磊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态修复、污泥资源化利用研究, mywlei@yeah.net

* 责任作者: 香宝(1965—), 男, 研究员, 博士, 主要从事生态学、农业面源、遥感与GIS等方面研究, xiangbao@craes.org.cn

potential risk to the ecological environment of sandy land if directly applied. Therefore, to ensure the availability of utilizing municipal sludge in ecological restoration of sandy land, several measures were recommended to be taken such as controlling the source of pollutants, applying the biological compost/fermentation and solidification/stabilization pretreatment technologies, formulating corresponding technical guidelines, rigidly managing its application scopes and amounts, and exerting a long-term tracked detection and risk assessment.

Key words northern sandy land; urban sludge; ecological restoration; risk prevention and control

20世纪60年代以来,受人类活动和气候变化的影响,我国北方地区草原和绿洲出现大面积的退化和沙化,并引起沙暴频发等一系列生态环境问题,对我国北方生态安全和社会经济可持续发展构成严重威胁。沙漠化是我国北方草原区存在的突出问题之一,为有效遏制风沙危害和保护沙地生态环境,通过以植被重建为主要措施的生态恢复与重建工程,可有效缓解区域沙漠化,促进沙地生态恢复^[1]。

在沙地生态修复过程中,改良沙地土壤发挥着至关重要的作用。影响修复效果的关键因素之一是增加土壤肥力和土壤持水力,而城市污泥作为污水生物处理过程中产生的副产物,是由多种微生物形成的菌胶团及其吸附的有机物和无机物组成的集合体^[2],含有丰富的N、P、K、有机质和植物生长所需要的其他微量元素,无害化处理的污泥能改善土壤理化性质,提高土壤持水力和肥力,增加土壤微生物多样性等,是很好的土壤改良剂^[3-5]。但城市污泥中含有重金属、有机污染物及病原菌等有害物质,直接用于退化沙地生态恢复可能具有一定的生态环境风险^[6-10]。笔者将对城市污泥用于沙地生态修复的必要性和可行性进行探讨,分析当前城市污泥用于

沙地生态修复过程中存在的问题,并提出相应解决对策,以期能降低城市污泥生态修复的环境风险,并有效提升城市污泥的资源化利用率。

1 沙地生态修复技术现状及限制因素

1.1 修复技术现状

土地荒漠化和沙化问题仍是目前我国最为严重的生态问题,是实施区域生态恢复的重点和难点。第五次全国荒漠化和沙化监测^[11]结果表明,中国荒漠化土地面积为 $261.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占我国土地面积的27.2%,全国因风蚀沙化每年损失土壤有机质、氮素和磷素高达5 590万t。北方沙地又是我国沙漠化最为严重的地区,沙地生态环境破坏严重,其土壤改良和植被恢复十分迫切。为防止沙地面积进一步扩大,当前采取的修复技术包括植物修复技术、微生物修复技术、设置沙柳沙障、功能高分子材料组装技术、节水灌溉技术等。经过多年生态修复实践研究发现,这些技术针对不同沙地区域特征解决了一系列问题,对几种常见的沙地修复技术的内涵、适宜利用区域及在我国某些地区影响效果进行了分析对比,结果见表1。

表1 沙地修复技术及其应用

Table 1 The technology of soil desertification prevention-control and application

修复技术	技术内涵	适宜区域	实施效果	应用区域	数据来源
植物修复	在沙漠地区筛选播种沙生植物,通过植物生长过程改善土壤条件,以阻止沙漠扩张及改善沙地	退化草地、农田及绿洲、道路、工矿企业周边区域	土壤有机碳、全氮、速效钾、水分、植被盖度、生物量等指标明显增加,造林植株成活率达80%以上	河北省丰宁县、内蒙古阿拉善	文献 [12-13]
沙柳沙障	根据不同沙丘特征设置草方格沙障、黏土沙障、篱笆沙障等,在沙丘上覆盖一些致密膜状物或植被防护林,进而达到防风固沙的目的	风沙危害区、流动沙丘区域	沙障能明显降低风速,导致近地表风沙流结构发生变化;沙柳沙障能明显提高0~60 cm土壤中养分浓度	内蒙古伊金霍洛旗、库布齐沙漠中段七里明	文献 [14-15]
功能高分子材料组装	采用高分子化学材料制成防止土壤侵蚀、风蚀的被覆层,上下层是高分子材料的覆盖层,中间夹有植物种子、有机物和无机物等	风沙大、土壤保水保肥能力差的区域	明显提高沙土保水保肥性、种子萌发率和植株成活率	山西省	文献 [16-17]

(续表 1)

修复技术	技术内涵	适宜区域	实施效果	应用区域	数据来源
微生物修复	利用土壤微生物的生命活动,分解有机质促进土壤团粒结构的形成,改善植物立地环境	土壤条件退化严重,不利于植物修复的区域	沙地区域土壤产生结皮,结皮层微生物量明显增加,其中细菌数量最多,表层土中脲酶、蛋白酶、转化酶活性增强	内蒙古准格尔旗十二连城乡	文献 [18]
节水灌溉	通过建立地下井汲水工程,结合喷灌、滴管等节水灌溉技术有效利用水资源	极度干旱区域	与大水漫灌相比,防渗渠灌节水 40.4%,滴灌节水 49%~55.6%,喷灌节水 59.2%	甘肃省民勤县	文献 [19]

1.2 关键限制因素及存在问题

我国沙地区域面积大,不同区域特征差异明显,限制沙地修复的主要因素包括:土壤结构破坏,保水保肥能力差;土壤极度贫瘠,养分(N、P、K)和有机质浓度低,碳氮比不平衡;干旱少雨或雨水太集中,影响植被的生长;风沙大,已经恢复的植被容易被流沙掩埋。除了自然条件限制因素外,目前修复技术也存在一些问题:1)植物修复技术依靠种植植物来改善土壤条件,但是植物成活率低,后期养护成本高;2)沙障、化学高分子材料、节水灌溉等技术能很好地解决沙地区域风沙大、保水保肥差、水资源缺乏等问题,但前期一次性费用高、使用年限短;3)微生物修复技术通过微生物分解有机质增加土壤养分含量,促进土壤团粒结构形成,存在微生物筛选时间长、接种后难适应性问题,导致沙地生态修复的可持续性受到质疑,修复后的沙地又面临沙化的危险。

与其他技术相比,城市污泥具有黏性、保水性好及养分含量高的特性,根据不同沙地区域特征,将城市污泥与植物修复、沙障、节水灌溉等技术相结合,将其作为沙地土壤改良先行技术,从改善沙地土壤开始,优化植物生长环境,促进植物生长,使沙地生态修复具有可持续性。

2 城市污泥产生现状及其物质特性

2.1 产生现状

据《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》统计,我国“十一五”期间的污水处理率已达 77.5%,污水排放量为 $1.25 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。位于我国北方沙地周边五省/区(内蒙古自治区、甘肃省、宁夏回族自治区、陕西省、山西省)2014 年城镇生活污水排放量高达 $4.12 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$,按污泥产量占处理水量的 0.3%~0.5%(以含水率 97%计)计算^[20],污泥产量为 $1.24 \times 10^7 \sim 2.06 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。根据国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部、环境

保护部联合编制的《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》,到 2015 年,污水处理率进一步提高,城市污水处理率达到 85%(直辖市、省会城市和计划单列市城区实现污水全部收集和处理,地级市达 85%,县级市达 70%),县城污水处理率平均达 70%,建制镇污水处理率平均达 30%。因此,北方五省/区城市污泥的产生量将进一步增加,处置与资源化利用更加迫切。城市污泥除了含有大量的养分资源外,还有一些有害污染物,如何对其有效处理并实现安全利用是环境科学领域的研究热点。

2.2 物质特性

城市污泥中养分含量丰富,但不同地区存在差异。李艳霞等^[21]通过分析全国 96 家污水处理厂污泥发现,城市污泥中含有丰富的 N、P、K 和有机质(表 2),养分含量跟畜禽粪便等农家肥相当^[22-25],纯猪粪中 N、P、K 和有机质浓度分别为 20.7、9.0、11.2 和 714 g/kg^[26],而城市污泥中有机质浓度最高可达 696 g/kg,平均浓度为 384 g/kg,是纯猪粪有机质平均浓度的 54%,城市污泥与猪粪和猪厩肥相比,可制成有机肥并加以利用。然而,城市污泥中含有的重金属种类多,主要有 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 等。郭广慧等^[27]统计了 2006—2013 年国内外文献报道的中国城市污泥重金属浓度,并分析了其区域分布特征和变化趋势,结果表明,城市污泥中 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 浓度分别为 182.5、65.3、729.6、2.1、1.4、11.5、97.5 和 44.9 mg/kg,与 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》相比均有不同程度的超标。此外,城市污泥中有机污染物种类复杂,常见的微量有机污染物主要有多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、多氯代二苯并二英/呋喃(PCDD/Fs)、可吸附有机卤化物(AOX)、直链烷基苯磺酸盐(LAS)、壬基酚(NP)、邻苯二甲酸酯类(DEHP)、氯苯(CBs)、氯酚(CPs)

等^[28]。污泥中的有机污染物因地区及工业类型不同而异,即使同一污水处理厂在不同时期产生的污泥,其中有机污染物的种类和浓度也不尽相同。城市污泥中还含有烷基酚、有机氯农药、硝基苯类、氨基类、卤代烃类、醚类等化合物^[29]。另外,受到处理技术等因素限制,填埋、焚烧等处理方式存在造成二次污染和处理代价高等问题,每年污泥处理的费用占整个污水处理厂费用的50%左右,限制了污水处理厂作为污水净化设施的作用。因此,通过有效技术手段,因地制宜地将沙地周边城市污泥资源化用于沙地土壤改良和植被恢复是较好的处理方式,具有广阔应用前景。

表2 城市污泥中的养分及有机质浓度^[21]

Table 2 The concentration of nutrients and organic matter in the sewage sludge g/kg

项目	最小值	最大值	算术平均	标准差
总氮	2.5	51.6	27.1	13.5
总磷	2.2	46.0	14.3	11.6
总钾	3.2	12.5	6.9	2.7
有机质	96	696	384	127

3 城市污泥用于沙地生态修复的优势

3.1 改良退化沙地土壤的理化性质

土壤沙化导致土壤环境劣化,土壤剖面形态毁损,肥力减退,从而使土壤熟化过程受阻,各肥力要素间调节功能减弱,对环境的适应能力降低,最终造成生产力下降或自然肥力消失^[30]。城市污泥含有丰富的有机质和矿物质养分(N、P、K)的特性,其施用能快速有效地提高沙地土壤的有机质浓度,改变土壤结构,增强土壤水分维持能力,从而达到防止沙化的目的。华正伟等^[31-32]将厌氧消化后的脱水污泥(含水率为85%)静置7 d后,直接与沙土按一定比例混合,结果发现,随着污泥施用量的增加,沙地中养分和有机质浓度不断提高,其理化性质也会发生明显变化,通常二者表现为正相关。土壤孔隙度、团粒结构、持水保水能力、团聚体稳定性等随着污泥施用量的增加而增加^[33-35],土壤容重则会随之降低^[34]。另外,城市污泥具有较强的黏性、持水性和保水性,因此,在施入城市污泥早期有利于提高沙地土壤结构稳定性和持水保水能力。沙地土壤结构和性质的改善及保水保肥能力的增强,为植物营造适宜于生长发育的土壤环境,防止进一步沙化的可能。

3.2 提高土壤养分浓度并促进植物生长

植被恢复与重建是综合防治沙漠化最主要和最基本的措施。对沙地生态系统来说,其特点是植被覆盖度极低,风蚀严重、土壤极度贫瘠且基质极不稳定,植被自我恢复能力十分微弱,必须辅以人工手段才能在短时期内使沙地植被得以恢复。城市污泥中含有N、P、K及大量的有机质,可提高沙化土壤中的营养成分,增强土壤肥力,改善植物生长,将其应用于退化沙地土壤的改良越来越受关注。

杨涛等^[36]利用抽滤脱水风干后的污泥,与土壤按照5%、10%、15%和20%比例混合后种植黑麦草、高羊茅,研究发现,污泥比例为5%和10%时,黑麦草和高羊茅的生物量、叶绿素含量均较高,表现出污泥促进黑麦草、高羊茅生长效应。王淑影等^[37]利用二沉池的污泥经絮凝自然风干后与土壤混合进行花卉种植试验,结果表明,当污泥施用比为3%~5%时,可促进波斯菊的生长,其株高、花数、叶绿素含量均大于对照组。城市污泥对于改善沙土中养分元素浓度方面表现显著,且随着施泥量的增加,有机质、速效氮、速效磷浓度明显增加^[35]。Su等^[38]研究表明,在污泥处理的土壤中总磷和速效磷浓度在0~25 cm土层中显著增加,同时磷绝大部分保留在土壤表层(0~25 cm)或者被植物利用。李霞^[39]利用城市污泥改良科尔沁沙地土壤,将城市污泥按照0、30、60和90 t/hm²与沙土直接混合后填充到土柱中,研究发现,随着城市污泥的施加能明显改善沙地土壤中氮、磷浓度;不同深度土壤硝态氮的浓度均随污泥施用量的增加而明显增加,污泥施用量为60和90 t/hm²时,土壤中氮浓度的最低值分别是对照组的6和8.3倍。华正伟^[31]的研究表明,城市污泥的施入能促进杨树幼苗的生长,随污泥量的增加效果更加明显,当污泥与沙土的比例为1:1时,与对照组相比杨树幼苗的株高、胸径、叶面积分别提高3.95倍、1.68 mm和1.55倍。由此可见,城市污泥的施入显著提高沙土中总氮、总磷浓度,养分的提高有利于恢复沙地植被和促进植物生长。

3.3 提高沙地土壤微生物活性

污泥的施入使沙地土壤环境得到改善,为微生物活动提供了场所。土壤微生物的分解、腐化等活动能促进土壤中物质的循环,提高土壤的肥力。城市污泥的施入,一方面输入了大量的N、P、K、有机质和微量元素等,有利于促进沙土中原有微生物的生长和繁殖;另一方面城市污泥本身就含有丰富的

微生物,从而大大提高了土壤中微生物的数量和种类。张鑫等^[40]采用 PCR-DGGE (polymerase chain reaction & denaturing gradient gel electrophoresis) 方法分析污泥对土壤中微生物的影响,结果表明,施肥 1 周后土壤中细菌和真菌的群落结构均发生了较大变化。污泥对土壤微生物不同种群及其群落功能多样性均有所影响,在旱地上施用污泥复混肥(旱地施用的污泥比例占 20%),并与等量化肥相比,对反应较为敏感的反硝化细菌和好氧性纤维素分解细菌具有明显的促进作用,对好氧细菌、真菌、放线菌和氨化细菌有激活其活性的趋势,同时其激活作用随污泥复混肥中污泥浓度的提高而增强^[41]。Sciubba 等^[42]利用厌氧污泥、好氧污泥分别与米糠按照氮浓度为 50、150 和 300 mg/kg 组成混合基质,施用到砂质土壤中进行试验,结果表明,所有施用污泥的土壤中微生物种类保持稳定,但是土壤中生物量碳、 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶、蛋白酶和碱性磷酸单酯酶活性均较对照组有较大提升。因此,城市污泥的施用,可以提高沙地土壤微生物多样性及土壤酶活性,微生物在土壤中的活动反过来增加沙地土壤的营养含量,促进土壤改良和植被恢复,最终达到生态修复的目的。

4 城市污泥用于沙地生态修复的潜在环境风险及防控对策

4.1 潜在环境风险

4.1.1 重金属污染

城市污泥中的重金属是限制其在沙地生态修复利用的主要因素之一。污泥中的重金属主要有 Cu、Pb、Zn、Ni、Co、Cr、Hg、Cd 和 Mo 等。不同地区的城市污泥所含重金属的种类和数量有所差异,主要是不同城市的工业类型不同,排放的污水有所差异,致使污泥中重金属的种类和浓度也有所不同。一般来说,以处理生活污水为主的污水处理厂所产生的污泥重金属浓度较低。如广西省城市污泥的总养分为 87.11 g/kg,有机质占 34.63%,具有较高的农用价值,然而 Zn 和 Cd 平均浓度分别为 1 095.75 和 16.22 mg/kg,超过 GB 4284—1984 标准限值^[48];广州市不同类型城市污泥中 Cu、Zn、Mn 和 Ni 浓度较高,变化幅度较大,而 Pb 和 Cr 浓度较低^[49]。污泥中重金属会抑制植物的生长发育,并在植物体内累积,有关污泥的施用导致沙地植物体内重金属的累积鲜有报道。但污泥的农用会导致农田土壤中重金属累积,致使小麦、大豆、蔬菜等作物可食用部位重

金属浓度超标^[43-47];抑制作物的生长,降低其品质^[46];加重土壤的盐渍化,抑制苗木种子的发芽率及苗木生长等相关的研究很多。因此,需进一步研究污泥施用于沙地时,重金属在植物体内的累积情况。另外,由于污泥施用量过大或长时间施用,重金属具有易迁移的特性,可能会对地下水造成不同程度的污染风险。

4.1.2 N、P 累积性污染

城市污泥中丰富的 N、P 对沙地土壤是很好的补充,但如果施用量过大或者长期施用会导致养分过剩,多余的 N、P 通过地表径流和地下渗漏使地表水和地下水受到污染。Surampalli 等^[50]的研究表明,长期(85 a)施用污泥的土壤及地下水中未见重金属的累积,但在地下水中却检测出硝态氮的存在。Kumar 等^[51]的研究发现,当城市污泥中氮浓度达到土地利用标准时,磷浓度会超出相应的标准,存在向水体迁移的风险。Shober 等^[52-53]通过简单脱水干化后直接将城市污泥施用到土壤中,经过多年连续研究发现,除了导致 Zn、Cu 浓度增加外,有效态 N、P 浓度也大幅增加,可能会导致水体富营养化及地下水污染。但堆肥熟化后的污泥中,可溶性 N、P 的量有所减少,可降低该风险。李霞^[39]在研究城市污泥用于科尔沁沙地土壤改良过程中发现,随着污泥施用量的增加,深层土壤中硝态氮浓度远远高于表层,存在硝态氮向地下水迁移的风险。通过国内外研究发现,过量或长期施用城市污泥存在 N、P 污染风险,因此有必要加强 N、P 施用阈值的研究。

4.1.3 有机污染物致癌

近年来,城市污泥中有机污染物日益受到人们的关注。国内外报道较多的是多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs),其为广泛分布于环境中的一类持久性有机污染物,部分多环芳烃具有强致癌性与致突变性,且易被生物富集^[54-56],是目前城市污泥土地利用关注的重点。由于 PAHs 具有疏水性和亲脂性,污水处理过程中 PAHs 易吸附到污泥颗粒中^[57],如果不加以处理或施用不当,会导致 PAHs 在土壤中富集并污染周边土地、地下水,对植物产生持续的毒害作用^[51,58-59],从而破坏其生态系统,通过食物链及饮用水对人体产生致癌风险。含 PAHs 的污泥用于沙地生态修复时应谨慎施用。

4.2 对策建议

针对城市污泥施用到沙地过程中,其中含有的复杂污染物类型,对沙地生态环境构成潜在的污染

风险提出以下对策:

(1)城市污泥中的重金属、有机污染物大多来自工业废水处理,对工业企业排放的废水中重金属、有机污染物浓度严格控制,达标排放,从源头上控制污染物在污泥中的累积。同时,将生活污水和工业废水分流,集中到不同污水处理厂处理,工业污泥和生活污泥分开处理利用,将大大减少城市污泥处理成本。另外,考虑对工业废水采取一些前处理的措施,将重金属从废水中分离出来。并对企业排放的废水、烟气中有机污染物进行处理达标后排放,结合生物法在污水处理过程中分离纯化并接种特异性微生物来降解 PAHs 等有机污染物。

(2)城市污泥中含有重金属、有机污染物、病原菌、虫卵等有害物质,且含水量高、性质不稳定,直接施用沙地上不仅易引起环境的二次污染,还存在作物烧苗和病害等问题,应进行适当的预处理。采用高温好氧堆肥并在堆肥中添加复合微生物菌剂来钝化重金属、杀灭病原菌、降解 PAHs、降低可溶性 N、P 的浓度、提高有机质的腐殖化程度^[60-63],从而提高其土地利用的可行性和安全性。研究表明^[64-67],在改良土壤中施用污泥堆肥,可促进土壤团粒结构形成,改善土壤通气状况,提高土壤对重金属、有机污染物等有害物质的缓冲能力,降低有机污染物的生物有效性等。

(3)采用固化/稳定化技术可有效减少污泥中重金属的浸出^[68],近年来被广泛应用到重金属污染土壤修复和农用污泥重金属固化等方面。有关土壤中重金属的固化/稳定化药剂有多种,硅酸钙、碳酸钙和熟石灰等石灰性物质应用较多。金属氢氧化物的溶解度都较低,如果使用石灰作为碱制剂,则可通过与钙的共沉淀现象促进沉淀产生,从而实现污泥中重金属的固定去除。施用石灰除可固定重金属外,还能使污泥富集钙,钙可促进受施土壤的胶体凝聚,增加土壤团聚性,改善土壤结构^[67]。但在施用时应注意使污泥 pH 保持在碱性范围。

目前,研究重点大多是城市污泥在农田中的利用,参考污泥农用的研究成果及存在的问题,结合沙区区域特征提出以下建议:

(1)针对沙地区域特征开展技术应用研究。我国北方沙地广阔,沙化区域环境差别较大,因此应针对不同区域沙化特点采取不同措施。对风沙大、沙丘易流动的区域,主要的防治措施应是设置沙障、覆盖致密物等,将沙土固定,在后续植被修复时利用城

市污泥黏性大、保水性好的特点,利于种子附着、萌发;而对于养分极度贫瘠、水土流失严重的区域,城市污泥施用应作为主要治理措施,辅以微生物修复、水资源有效利用等其他技术,因地制宜采取不同技术手段将会达到更好修复效果。另外,分析沙地可以达到的修复状况及修复后用途,针对修复后可作为农田、牧场等沙化区域,应采取堆肥、固化等措施降低污染物浓度,减少施用年限、施用量,防止污染物进入食物链。

(2)制订污泥沙地利用相关标准。2009年,住房和城乡建设部发布了 CJ/T 209—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》,对城镇污水处理厂污泥农用的养分、重金属浓度、有机污染物及微生物指标等给出了具体阈值,但施用量、施用年限和施用方式没有给出具体准则。有关城市污泥用于沙地生态修复的相关标准及参考标准还没有具体的规定。因此,需进一步研究城市污泥中污染物在沙地植被、土壤和地下水系统中迁移转化规律及其机制,加紧制订有关重金属、有机污染物、病原体及 N、P 等阈值,制订针对不同土壤类型污泥施用量、施用年限和施用方式等方面的控制标准。

(3)加强长期综合性风险评估。尽管城市污泥中含有一些有害污染物,但污泥中含有大量的营养物质,对于被破坏的沙地是很好的补充,污泥回归于土地,相对于焚烧、填埋、投海等是较合理的处理方式。但是,必须明确污泥施用过程中存在的生态环境风险,从植物、土壤和地下水三方面对沙地进行综合性风险评估。可能短时间内污泥施入对沙地生态环境没有负面影响,仍需长期定位监测,对污泥施入后的 5 a 甚至 10 a 内连续评估其对沙地生态环境的影响。

5 结语

生态修复最终目的是增加沙地区域植物盖度。城市污泥施入沙地中可改善土壤环境,为植物营造良好的立地环境,促进植物生长,在理论上是可行的;国家针对城市污泥安全处置有专项资金补贴,以此为基础修复退化沙地,可有效降低修复成本,并产生一定经济效益,在经济上是可行的;尽管城市污泥中含有一些污染物,但随着经济技术的发展,污水处理技术的提高,污泥中重金属、有机污染物等浓度将逐渐降低,结合堆肥、固化/稳定化等技术及相关政策、标准管控使污泥达到利用标准,在技术上是可行

的。然而,城市污泥中成分复杂,资源化用于沙地生态修复可能存在一定环境风险,未来有必要加强重金属、有机污染物在沙地土壤和植物中迁移转化机理、氮和磷在土壤中迁移转化及施加阈值等方面的研究;充分考虑沙地区域风沙大、干旱少雨、沙土疏松易渗漏等自然气候特点,以及当地区域经济发展水平,结合城市污泥堆肥施肥、植物修复、高分子保水材料等其他修复技术,加强技术整装集成;构建城市污泥用于沙地生态修复的生态环境风险评价模型,通过对污染物在沙地中迁移转化机理研究,从水环境、大气环境、土壤环境三方面评估污泥应用过程中可能存在的环境风险。加强以上三方面的研究,安全有效地将城市污泥应用到沙地中将是解决当前我国北方沙地区域城市污泥难处理处置的新途径。

参考文献

- [1] XIAO D. Ecologic environment of engineering of shelter-belt network in North, Northwest and Northeast China [J]. Science and Technology Review, 1994, 12: 38-41.
- [2] SMITH S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge [J]. Environment International, 2009, 35 (1): 142-156.
- [3] RICHARD B K, STEENHUIS T S, PEVERLY J H, et al. Effect of sludge-processing mode, soil texture and soil pH on metal mobility in undisturbed soil columns under accelerated loading [J]. Environmental Pollution, 2000, 109 (2): 327-346.
- [4] MAGESAN G N, WANG H L. Application of municipal and industrial residuals in New Zealand forests: an over-view [J]. Australian Journal of Soil Research, 2003, 41 (1): 557-569.
- [5] GONZALEZ M, MINGORANCE M D, SANCHEZ L, et al. Pesticide adsorption on a calcareous soil modified with sewage sludge and quaternary alkyl-ammonium cationic surfactants [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2008, 15 (1): 8-14.
- [6] 李霞, 李法云, 荣湘民, 等. 城市污泥改良沙地土壤过程中氮磷的淋溶特征与风险分析 [J]. 水土保持学报, 2013, 27 (4): 93-97.
LI X, LI F Y, RONG X M, et al. Risk and leaching characteristic of nitrogen and phosphorus in sandy soil amend with sewage sludge [J]. Journal of Water and Soil Conservation, 2013, 27 (4): 93-97.
- [7] 颜紫云, 刘鸿雁, 王雨生, 等. 重金属在污泥长期施用土壤-作物系统的累积状况及淋溶特性 [J]. 安全与环境学报, 2014 (2): 254-259.
YAN Z Y, LIU H Y, WANG Y S, et al. Analysis of heavy-metal accumulation and leaching features in the soil-plant system due to long-term application of sewage sludge [J]. Journal of Safety and Environment, 2014 (2): 254-259.
- [8] SURAMPALLI R Y, LAI K C K, BANERJI S K, et al. Long-term land application of biosolids: a case study [J]. Water Science & Technology, 2008, 57 (3): 345-352.
- [9] KIDD P S, DOMINGUEZ-RODRIGUEZ M J, DIEZ J, et al. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge [J]. Chemosphere, 2007, 66 (8): 1458-1467.
- [10] ESTELLER M V, MARTÍNEZ-VALDÉS H, GARRIDO S, et al. Nitrate and phosphate leaching in a phaeozem soil treated with biosolids, composted biosolids and inorganic fertilizers [J]. Waste Management, 2009, 29 (6): 1936-1944.
- [11] 屠志方, 李梦先, 孙涛. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析 [J]. 林业资源管理, 2016 (1): 1-5.
TU Z F, LI M X, SUN T. The status and trend analysis of desertification and sandification [J]. Forest Resources Management, 2016 (1): 1-5.
- [12] 傅华, 陈亚明, 周志宇, 等. 阿拉善荒漠草地恢复初期植被与土壤环境的变化 [J]. 中国沙漠, 2003, 23 (6): 661-664.
FU H, CHEN Y M, ZHOU Z Y, et al. Changes of vegetation and soil environment of desert grassland in the early period of restoration in Alxa, Inner Mongolia [J]. Journal of Desert Research, 2003, 23 (6): 661-664.
- [13] 张伟华, 关世英, 李跃进, 等. 不同恢复措施对退化草地土壤水分和养分的影响 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2000, 21 (4): 31-35.
ZHANG W H, GUAN S Y, LI Y J, et al. Effect of different restoration measure on the moisture and nutrient of soil of degraded grassland [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2000, 21 (4): 31-35.
- [14] 高永, 邱国玉, 丁国栋, 等. 沙柳沙障的防风固沙效益研究 [J]. 中国沙漠, 2004, 24 (3): 365-370.
GAO Y, QIU G Y, DING G D, et al. Effect of salix psammophila checkerboard on reducing wind and stabilizing sand [J]. Journal of Desert Research, 2004, 24 (3): 365-370.
- [15] 高菲, 高永, 高强, 等. 沙柳沙障对土壤理化性质的影响 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27 (2): 39-42.
GAO F, GAO Y, GAO Q, et al. Effects of Salix psammophila checkerboard of physical and chemical characteristics of sandy soil [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2006, 27 (2): 39-42.
- [16] 陈洁璐, 颜景莲, 张云泽. 功能高分子材料在改善西部荒漠化中的应用 [J]. 塑料, 2002, 31 (1): 17-19.
CHEN J R, YAN J L, ZHANG Y Z. Functional polymers to improve the desertization in the West Areas of China [J]. Plastics, 2002, 31 (1): 17-19.
- [17] 白日军, 张强. 功能高分子材料在山西省土地荒漠化防治中的应用 [J]. 山西农业科学, 2003, 31 (3): 87-91.
BAI R J, ZHANG Q. Functional polymers to control desertization in Shanxi Province [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2003, 31 (3): 87-91.
- [18] 陈永胜. 沙漠化土地治理中土壤微生物对生物结皮作用的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2007.
- [19] 李怀林. 金沟河流域旱地农业节水灌溉技术应用现状分析 [J]. 吉林农业, 2012 (11): 234.
- [20] 尹军, 谭学军, 廖国盘, 等. 我国城市污水污泥的特性与处置现状 [J]. 中国给水排水, 2004, 19 (增刊 1): 21-24.
- [21] 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 等. 中国城市污泥有机质及养分含量

- 与土地利用[J].生态学报,2003,23(11):2467.
- LI Y X, CHEN T B, LUO W, et al. Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11):2467.
- [22] GUERRERO F, GASCO J M, HERNANDEZ-APAOLAZAA L. Use of pine bark and sewage sludge compost as components of substrates for pinus pinea and cupressus arizonica production [J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(1):129-141.
- [23] 岳星慧. 城市污泥在园林植物上的应用试验研究[J]. 宁夏农业科技, 2006(3):15-26.
- YUE X H. Urban sludge application experimental study on garden plants [J]. Ningxia Agricultural Science and Technology, 2006(3):15-26.
- [24] MCBRIDE M B, EVANS L J. Trace metal extract ability in soils and uptake by brome grass 20 years after sewage sludge application[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2002, 82(3):323-333.
- [25] 李艳霞, 薛澄泽, 陈同斌. 污泥和垃圾堆肥用作林木育苗基质的研究[J]. 生态与农村环境学报, 2000, 16(1):60-63.
- LI Y X, XUE C Z, CHEN T B. Sludge and garbage compost used for studies of forest tree nursery substrates[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2000, 16(1):60-63.
- [26] National Agricultural Technology Extension and Service Center. The compilation of organic fertilizer of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999:6-29.
- [27] 郭广慧, 陈同斌, 杨军, 等. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J]. 环境科学学报, 2014, 34(10):2455-2461.
- GUO G H, CHEN T B, YANG J, et al. Regional distribution characteristics and variation of heavy metals in sewage sludge of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(10):2455-2461.
- [28] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 城市污泥中有机污染物的研究进展[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4):273-276.
- MO C H, CAI Q Y, WU Q T, et al. Research advances on organic pollutants in municipal sludge [J]. Agri-environmental Science Protection, 2001, 20(4):273-276.
- [29] 赵晓莉, 徐德福, 方华, 等. 污泥中有机污染物对农田植物影响研究综述[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(18):7880-7882.
- ZHAO X L, XU D F, FANG H, et al. Summary of research on the influences of organic pollutants in sludge on farmland plants[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(18):7880-7882.
- [30] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地旱作农田土壤退化的过程和特征[J]. 水土保持学报, 2004, 16(1):25-28.
- SU Y Z, ZHAO H L, ZHANG T H, et al. Process and character of soil degradation of rainfed farmland in Horqin sandy land [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 16(1):25-28.
- [31] 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.
- [32] OJIDA G, ALCANIZ J M, ORTIZ O. Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge [J]. Land Degradation and Development, 2003, 14(6):563-573.
- [33] CHENG H F, XU W P, LIU J L. Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turf grass growth [J]. Ecological Engineering, 2007, 29(1):96-104.
- [34] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施[J]. 林业科学, 2001, 37(2):131-138.
- JIAO S R. Report on the causes of the early decline of pinus slyvestris var mongolica shelterbelt and its preventative and control measures in Zhang Gutai of Liaoning Province [J]. Scientia Silvae Science, 2001, 37(2):131-138.
- [35] 李雪. 施用城市污泥对樟子松幼苗生长和风沙土改良的影响[D]. 沈阳:辽宁大学, 2011.
- [36] 杨涛, 林逢凯, 陈秀荣, 等. 城市污泥对黑麦草和高羊茅生长的影响[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(5):33-39.
- YANG T, LIN F K, CHENG X R, et al. The impact of excess sludge on the growth of *Lolium perenne* L. and *Festuca arundinacea* [J]. Environmental Pollution and Control, 2014, 36(5):33-39.
- [37] 王淑影, 林逢凯, 王寒可, 等. 基质施入污泥对马尼拉草和波斯菊生长的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1):374-380.
- WANG S Y, LIN F K, WANG H K, et al. Influence of soil with addition of municipal sludge on growth of *Zoysia matrella* and *Cosmos bipinnatus* [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1):374-380.
- [38] SU J J, WANG H L, KIMBERLEY M O, et al. Fractionation and mobility of phosphorus in a sandy forest soil amended with biosolids [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2007, 14(7):529-535.
- [39] 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.
- [40] 张鑫, 党岩, 冯丽娟, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤微生物群落结构变化的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(2):716-722.
- ZHANG X, DANG Y, FENG L J, et al. Microbial community dynamics in soil amended with sewage sludge compost [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(2):716-722.
- [41] 戴雅婷, 闫志坚, 吴洪新. 沙地土壤微生物固沙作用概述[C]//中国草学会青年工作委员会学术研讨会论文集(下册). 北京:中国草学会青年工作委员会, 2010.
- [42] SCIUBBA L, CAVANI L, NEGRONI A, et al. Changes in the functional properties of a sandy loam soil amended with biosolids at different application rates [J]. Geoderma, 2014, 221/222(6):40-49.
- [43] 卢振兰, 刘锐敏, 白莉萍, 等. 施用城市污泥对土壤生态系统影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1):172-179.
- LU Z L, LIU R M, BAI L P, et al. Review on the effects of municipal sewage sludge application on soil ecosystem properties [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1):172-179.
- [44] PIREZ-MURCIA M D, MORAL R, MORENO-CASELLES J, et al. Use of composted sewage sludge in growth media for broccoli [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(1):123-130.
- [45] MANTOVI P, BALDONI G, TODERI G. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop [J]. Water Research, 2005, 39(2/3):289-296.
- [46] TOPCUOGLU B. Heavy metal accumulation in sugar beet plants grown in soil enriched with sewage sludge and municipal solid

- waste compost[J]. *Listy Cukrovarnickéa Reparské*, 2004, 120(9/10): 263-265.
- [47] 赵晓莉, 朱伟. 城市污泥农用对生菜理化指标和品质的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(1): 99-104.
ZHAO X L, ZHU W. The effect of municipal sewage sludge land application on physiological property and quality of lettuce[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(1): 99-104.
- [48] 张军, 张征世, 王敦球, 等. 广西城市污水厂污泥分析及其土地利用潜在生态风险评价[J]. *环境工程*, 2014, 32(1): 108-112.
ZHANG J, ZHANG Z S, WANG D Q, et al. physicochemical property and potential ecological risk assessment [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(1): 108-112.
- [49] 刘敬勇, 孙水裕, 许燕滨, 等. 广州城市污泥中重金属的存在特征及其农用生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(12): 2545-2556.
LIU J Y, SUN S Y, XU Y B, et al. Heavy metal characteristics in sewage sludge and its potential ecological risk assessment for agriculture use in Guangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(12): 2545-2556.
- [50] SURAMPALLI R Y, LAI K C, BANERJI S K, et al. Long-term land application of biosolids; a case study[J]. *Water Science & Technology*, 2008, 57(3): 345-352.
- [51] KUMAR M K. Assessing phosphorus-transport from biosolids land application sites in Utah[D]. Logan: Utah State University, 2011.
- [52] SHOBER A L, SIMS J T. Phosphorus restrictions for land application of biosolids[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(6): 1955-1964.
- [53] MANTOVI P, BALDONI G, TODERI G. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land; effects of long-term application on soil and crop [J]. *Water Research*, 2005, 39(2): 289-296.
- [54] TRABLY E, PATUREAU D. Successful treatment of low PAH-contaminated sewage sludge in aerobic bioreactors [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2006, 13(3): 170-176.
- [55] 张生银, 李双林, 董贺平, 等. 南黄海中部表层沉积物中多环芳烃分布特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(7): 1263-1270.
ZHANG S Y, LI S L, DONG H P, et al. Distribution and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbon of surface sediments from the center part of South Yellow Sea, China[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(7): 1263-1270.
- [56] 舒卫先, 李世杰. 太湖流域典型湖泊表层沉积物中多环芳烃污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1409-1414.
SU W X, LI S J. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface sediment from two typical lakes in the Taihu basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1409-1414.
- [57] SALIHOGLU N K, SALIHOGLU G, TASDEMIR Y, et al. Comparison of polycyclic aromatic hydrocarbons levels in sludges from municipal and industrial wastewater treatment plants [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 58(3): 523-534.
- [58] BARRET M, DELGADILLO-MIRQUEZ L, TRABLY E, et al. Anaerobic removal of trace organic contaminants in sewage sludge: 15 years of experience [J]. *Pedosphere*, 2012, 22(4): 508-517.
- [59] BARRET M, CARRÉRE H, DELGADILLO L, et al. PAH fate during the anaerobic digestion of contaminated sludge: do bioavailability and/or cometabolism limit their biodegradation [J]. *Water Research*, 2010, 44(13): 3797-3806.
- [60] 杨玉荣, 穆国俊, 魏静. 重金属在污泥堆肥过程中的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 226-228.
YANG Y R, MU G J, WEI J. Dynamics of heavy metals during composting process of sewage sludge [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 226-228.
- [61] 张雪英, 周顺桂, 周立祥, 等. 堆肥处理对污泥腐殖物质形态及其重金属分配的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 30-33.
ZHANG X Y, ZHOU S G, ZHOU L X, et al. Component changes of humic substances and heavy metal distribution before and after sewage sludge composting[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 30-33.
- [62] 张陇利, 刘青, 徐智, 等. 复合微生物菌剂对污泥堆肥的作用效果研究[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(2): 266-269.
ZHANG L L, LIU Q, XU Z, et al. Research on effect of compound microbial inoculant on sewage sludge composting [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(2): 266-269.
- [63] 李明. 高温堆肥与蚯蚓堆肥对城市污泥重金属形态的影响[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(10): 1407-1412.
LI M. Effects of high-temperature and earth worm composting on heavy metal speciation changes in municipal sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(10): 1407-1412.
- [64] SELIVANOVSKAYA S Y, LATYPOVA V Z. Effects of composted sewage sludge on microbial biomass, activity and pine seedlings in nursery forest [J]. *Waste Management*, 2006, 26(11): 1253-1258.
- [65] 李慧君, 殷宪强, 谷胜意, 等. 污泥及污泥堆肥对改善土壤物理性质的探讨[J]. *陕西农业科学*, 2004(1): 29-31.
LI H J, YIN X Q, GU S Y, et al. Sewage sludge and sludge compost to improve soil physical properties [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2004(1): 29-31.
- [66] 王慎强, 蒋其鳌, 钦绳武, 等. 长期施用有机肥与化肥对潮土土壤化学及生物学性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(4): 67-69.
WANG S Q, JIANG Q A, QIN S W, et al. Influence of chemical and biological properties under long-term applying manure chemical fertilizers on fluvo-aqueic soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(4): 67-69.
- [67] WONG J W C, LAI K M, SU D S, et al. Availability of heavy metals for brassica chinensis grown in an acidic loamy soil amended with a domestic and an industrial sewage sludge [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2001, 128(3/4): 339-353.
- [68] 马娜, 陈玲, 何培松, 等. 城市污泥资源化利用研究[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 86-89.
MA N, CHEN L, HE P S, et al. Study on resource reuse of municipal sewage sludge [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 86-89. □