环境工程

Environmental Engineering

城市污泥的直接施用对矿区土壤修复的影响

潘志强1，2 张淑琴1，2 任大军1，2 刘 爽1，2 张晓晴1，2

( 1． 武汉科技大学 资源与环境工程学院，武汉 430081; 2． 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，武汉 430081)  
摘要: 为探讨城市污泥直接用于矿区土壤修复的可行性，以矿山废弃土壤为基质，直接施入不同含量的城市污泥进行  
盆栽试验，研究污泥施入量对矿山土壤理化性质的影响，以及本地植物鸭跖草对施加污泥土壤的毒害性响应及其去除  
土壤中重金属的效果。结果表明:城市污泥能够有效提高矿区土壤肥力，改善土壤结构，使其达到 NY/T 391—2000  
《绿色食品 产地环境技术条件》土壤肥力一级标准，但同时也加了重金属( Cu、Zn、Pb、Cd) 污染程度; 而种植本土植物

鸭跖草对Cu、Zn、Pb、Cd有着一定的去除作用，在短期内去除率为7%~10%。通过控制污泥直接施入量为15%以及长 期种植本地植物能够有效实现矿区废弃土壤的修复。

关键词:城市污泥; 废弃矿区土壤; 重金属; 土壤修复

DOI: 10. 13205 /j．hjgc．201911031

EFFECTS OF DIRECT APPLICATION OF SEWAGE SLUDGE ON SOIL

REMEDIATION IN ABANDONED MINING AREA

PAN Zhi-qiang12, ZHANG Shu-qin12, REN Da-un12, LIU Shuang12, ZHANG Xiao—qing2

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China； 2． Hubei's Key Laboratory of Highly Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgical Mineral Resources， Wuhan 430081， China)

**Abstract**: In order to understand the feasibility of applying sewage sludge directly to soil remediation in mining areas, a series of potted experiments were designed to determine the influence of spiked sewage sludge with different proportions on physical and chemical properties of abandoned mining soil. The toxicity response and removal effect of Commelina communis as the native plant on soil heavy metals was researched, too. The results showed that mining soil fertility was effectively enhanced even reaching level I of fertility standard and the soil structure was also improved, while the soil heavy metal contents ( Cu, Zn, Pb and Cd) were increased. However, the Commelina communis was observed to remove soil heavy metals in certain extent and their removal rate could reach 7% 〜10% in a short term. Therefore, the combination application of 15% sewage sludge addition and native plants was an promising way for soil remediation in mining area.

**Keywords**: sewage sludge; abandoned mining soil; heavy metal; soil remediation

**0**引言 矿产资源的开发利用为国家的经济建设做出了 巨大贡献,但矿业开采产生的矿山废弃地也带来了一 系列的生态环境问题。矿业废弃地不仅破坏和占用 大量土地资源,且这些废弃土壤物理结构差、有机质 含量低、营养元素缺乏,不利于植物生长［1］。其次, 矿山土壤重金属含量过高,易通过风蚀雨淋扩散,加 之重金属的富集和生物放大作用,对周围的生态环境

\*国家自然科学基金(41501537**,**1571306**)；**冶金矿产资源高效利用与

造块湖北省重点实验室开放基金**(** 2017zy003**)** 。

收稿日期**:** 2018－11－27 和人类生产活动产生严重威胁。因此,如何合理修复 废弃矿山土壤已成为当前亟待解决的问题。近年来, 不少学者或研究单位提出利用城市污泥改良矿山土 壤,以期实现废弃土壤的修复。城市污泥是一种含有 丰富有机质及氮、磷、钾等元素的生物固体［2］,将其 用于矿山土壤修复中,不仅可以减轻污泥处理量,还 可以提高矿山土壤肥力,改善土壤结构,从而有利于 植株生长,具有十分广泛的应用前景［3］。

但城市污泥中含有难降解有机物、病原菌及重金 属等有毒有害物质,存在一定的潜在环境风险,若控 制不当,势必会对环境造成二次污染［4］。目前城市

污泥用于退化土壤修复中，常需加入生石灰、粉煤灰、 水泥等钝化剂来增加其稳定性[5]。其次，城市污泥 直接施用于矿区土壤的案例很少有人报道，大多数用 于矿区土地利用的污泥都是经过消化的发酵污泥，以 达到熟化和稳定效果。而对污泥进行发酵处理又需 要固定场所和一定的资金投入，显然增加了城市污泥 的处理成本，限制了其在矿区土地中的利用。

针对以上问题，本文提出直接施加未经处理的城 市污泥于矿区土壤中，以 GB 15618—2018《土壤环境 质量 农用地土壤污染风险管控标准（ 试件） 》为依 据，通过控制污泥施入量，研究城市污泥的直接施用 对矿区土壤性质的影响。其次，通过种植本土植物鸭 跖草研究施加污泥土壤的毒理性，进一步探讨城市污 泥用于矿山废弃土壤修复的可行性，从而为矿山废弃 地生态修复的实际工程应用提供数据支撑，以同时实 现污泥的循环利用和废弃矿区土壤的综合治理。 **1** 材料与方法 **1. 1** 供试材料

试验所用污泥取自武汉市某污水处理厂。经测 定，其含水率为 80. 5%。试验土壤来自湖北某废弃 矿区回填土。试验选用植物为湖北本土植物鸭跖草。 **1. 2** 试验设计

将取回的矿区土壤与城市污泥按不同比例混合 均匀，配制成盆栽土壤。试验设计如下:对照组（ CK）: 仅土壤;T1： 85% 土壤 + 15% 污泥;T2： 70% 土壤+30% 污 泥;T3： 55% 土壤+45% 污泥;T4： 40% 土壤+60% 污泥， 每组设 3 个重复。置于阴凉处，稳定 1 个月后，种植 鸭跖草种子， 观察其发芽和植株生长情况， 并定期采 集土样进行各项理化指标测定。 **1. 3** 样品处理及测定

待测土壤样品自然风干， 磨碎过 0. 25 mm 或 1 mm筛，用于化学分析用。本试验样品检测指标包 括含水率、pH、有机质、土壤肥力（速效N、速效P、速 效 K） 、阳离子交换量 （ CEC） 、重金属（ Cu、 Zn、 Pb、 Cd）等。将土壤样品在（105±2）*弋*下烘至恒重，计算 其含水率風；pH利用PB-10 pH计测定（水土比为 2.5 ml：1 g） [7 ；有机质测定采用重铬酸钾-硫酸加热 法08 ；速效N采用碱解扩散法测定;速效P采用碳酸 氢钠浸提—钼锑抗比色法测定[9];速效 K 采用醋酸 铵浸提，火焰原子吸收分光光度法测定010];阳离子交 换量采用乙酸钙浸提，然后NaOH滴定测定； Cu、 Zn、Pb、Cd 利用 HNO3-HF-HClO4 消解，采用火焰原子 吸收分光光度法测定012-13 。

**2** 结果与讨论

**2. 1** 单一污泥和土壤理化性质分析 供试污泥和供试土壤的理化性质详见表1。

表 **1** 供试土壤 、供试污泥的理化性质

**Table 1 The physico-chemical properties of the**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **tested and sewage** | | | |
| 理化指标 | 供试土壤 | 供试污泥 | GB /T 24600—2009 |
| pH | 6. 68 | 6. 50 | 5. 5 〜10. 0 |
| 含水率/% | — | 80. 5 |  |
| *w(*有机质**)**/ (g・kgT **)** | 10. 82 | 260. 00 | =3 100 |
| w (速效 N**) / (**mg・kgT **)** | 35. 00 | 882. 00 |  |
| **w(**速效 P**)** /(mg・kgT **)** | 70. 12 | 307. 76 |  |
| **w (**速效 K**)** / (mg・kgT **)** | 82. 23 | 406. 55 |  |
| CEC/ (cmol・kgT**)** | 17. 70 | 25. 20 |  |
| **w (**Cu**) / (**mg・kgT **)** | 1001. 75 | 951. 50 | W1500 |
| w (Zn**) / (**mg\*kg 1**)** | 603. 00 | 126. 55 | W4000 |
| **w(** Pb**)** /( mg・kgT **)** | 390. 75 | 341. 25 | W1000 |
| **w (**Cd**) / (**mg・kgT **)** | 71. 35 | 44. 45 | W20 |

污泥的pH为6. 50,呈弱酸性;pH、有机质、氮磷 钾含量均符合 GB/T 24600—2009《城镇污水处理厂 污泥处置土地改良用泥质》要求， 说明污泥养分充 足，具有很高的肥力;污泥中铜、锌、铅含量均在标准 之内，而镉超出标准将近1. 5 倍。

土壤 pH 为 6.68，矿区土壤发生酸化现象，土壤 产生一定退化。 速效磷含量为 70.95 mg/kg， 远超 NY/T 391—2000《绿色食品 产地环境技术条件》土 壤肥力指标I级标准（表2）；有机质、速效钾、阳离子 交换量含量分别为 10. 82 g/kg，82.23 mg/kg， 17. 70 cmol/kg,均刚达到NY/T 391—2000 土壤肥力指标H 级标准。速效氮为35. 00 mg/kg，远低于NY/T 391— 2000皿级标准。这说明矿区土壤养分含量差异较 大，总体来说， 土壤较为贫瘠， 保肥能力处于较差水 平， 不利于植株正常生长， 这与福建省某矿山废弃红 壤的肥力调查结果类似014 。 土壤中铜、锌、铅、镉含 量分别为 1001. 75， 603. 00， 390. 75， 71. 35 mg/kg， 均 超过 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污 染风险管控标准（ 试行） 》（ 表 3） 。

表 2 土壤 ( 旱地 ) 肥力分级参考指标

Table 2 Reference indexes for soil *(*for dry land) fertilizer grading criteria

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| NY/T 391— | 有机质/ | 速效 N/ | 速效 P/ | 速效 K/ | CEC/ |
| 2000 | (g・kgT **)** (mg・kgT **)** | | (mg・kgT**)** | (mg・kgT**)** (cmol・kgT**)** | |
| I级（优良**）** | >15 | >150 | >10 | >120 | >20 |
| "级（尚可**）** | 10 〜15 | 120-150 | 5-10 | 80-120 | 15-20 |
| 皿级（较差**）** | <10 | <120 | <5 | <80 | <15 |

总体而言， 城市污泥含有丰富的有机质和营养元 素，用于矿山土壤改良潜力巨大， 是一种值得合理

利用的有机肥源［15］。但污泥中含有重金属等有毒物 质,在施加过程中需严格控制污泥量,以防其对土壤 造成二次污染。

| 污染项目 | pHw5. 5 | 5. 5<pH^6. 5 | 6. 5<pH W7. 5 | pH>7. 5 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| w **(** Cu**)** | W50 | W50 | W100 | W100 |
| w **(** Zn **)** | W200 | W200 | W250 | W300 |
| w**(** Pb**)** | W70 | W90 | W120 | W170 |
| w **(** Cd **)** | W0.3 | W0.3 | W0.3 | W0.6 |

表 3 土壤环境质量 －农用地土壤污染风险管控标准 Table 3 Soil environmental quality-controlling standards

for soil pollution risk on agricultural land mg /kg

**2. 2** 城市污泥对矿区土壤质量的影响

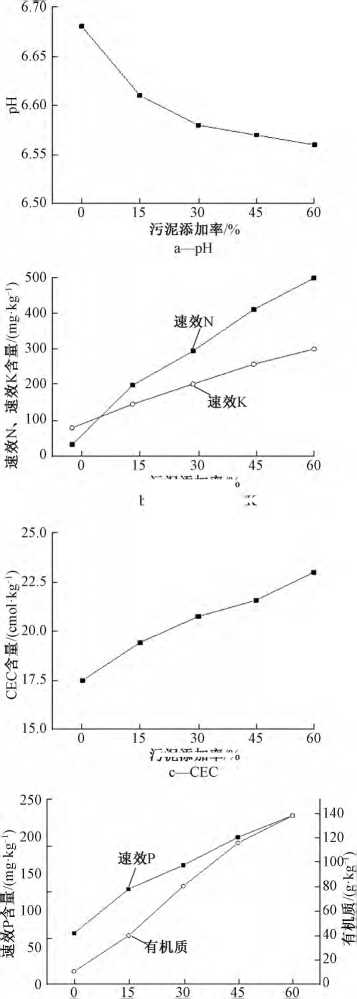
**2. 2. 1** 污泥比对土壤性质的影响

将城市污泥按照 0%、15%、30%、45%、60% 与矿 区废弃土混合,平衡 1 个月后,采集混合土样进行测 定,结果如图 1 所示。

随着污泥量的增加,土壤 pH 由 6.68 逐渐下降 到 6. 56; 速效 N、P、K 含量分别由 35. 00,70. 12, 82.03 mg/kg 上升到 497.31,230.63,300.06 mg/kg; 阳离子交换量由 17. 50 cmol /kg 上升到 23. 1 cmol / kg; 土壤有机质由 10. 82 g/kg 提高到 138. 50 g/kg。 土壤速效N、P、K在污泥添加率为15%时，增长幅度 最大,增幅分别为 462.4%、83.1%、109.6%; 有机质、 CEC整体上也呈递增趋势。土壤pH下降与污泥呈 弱酸性有关,但下降幅度不大。同时,污泥中的有机 质、氮磷钾、阳离子交换量含量较高,随着污泥添加率 逐渐提高，土壤中有机质、氮磷钾、CEC含量均相应 增加,这与吴志强［16］、李霞［17］的研究结果一致,许晓 玲等［18］将城市污泥施入土壤中发现,污泥施用可显 著提高土壤中有机质和养分含量并促进大豆增产,其 肥效优于普通化肥; 李霞［17］研究了城市污泥在沙化 土壤中的应用,发现污泥的添加能不同程度提高土壤 中养分含量。实验表明,城市污泥能够积极改善矿区 贫瘠土壤的性质,施入一定剂量的城市污泥即可有效 提高土壤养分和有机质。

**2.2.2** 污泥比对土壤中重金含量的影响 将城市污泥与矿区土壤按不同比例混配后,土壤 中重金属含量变化如图2 所示。

由图2 可知: 随着污泥添加率的增加,土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均成上升趋势,分别由 929. 75, 523. 32,312. 75,68. 40 mg/kg 上 升 到 992. 52, 703.46,394.50,80.55 mg/kg。相比于对照组土壤， 不同污泥处理水平下的土壤中重金属增长幅度有一

定的差异, Cu、 Zn、 Pb、 Cd 分别增加 了 1. 16% 〜

污泥瘵加率/%

Fig.1 Variation of soil indicators under different sludge ratios

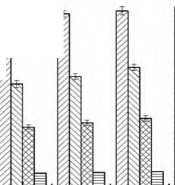
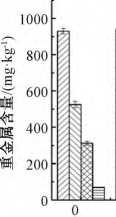
污泥添加率/%

d—速效P,有机质

图 1 不同污泥添加率下土壤中各项指标变化

污泥添加率/%  
b—速效N、速效K

2. 62%,6. 16% 〜20. 67%, 4. 01% 〜5. 69%, 1. 58% 〜 5. 98%。其中，当污泥比为15%时,Cu、Pb、Cd的增幅 较小, Zn 的增幅稍高。 由此可见, 城市污泥的直接施 入在一定程度上会造成土壤中重金属累积,这与戴亮 等［19］的研究结果是一致的。 根据 GB 15618—2018 可知, 矿区土壤中 Cu、 Zn、 Pb、 Cd 均处于超标状态。 因此,当城市污泥作为矿区土壤改良剂, 必须控制其 施入量,以降低其对土壤中重金属的累积作用。

乡芳 Cu；—二 Zi i藤:Pb；'-二 Cd。

15 30 45

污泥添加率/%

图 2 不同污泥比下土壤重金属含量变化

Fig．2 Variation of heavy metal contents in soil under  
different sludge ratios

**2. 3** 城市污泥对鸭跖草去除土壤重金属的可行性 研究

**2. 3. 1** 城市污泥对鸭跖草萌发及生长的影响

城市污泥的添加能够改善土壤结构，增加土壤养 分含量，但施入污泥后的土壤重金属含量高。 为探讨 施加污泥后土壤的重金属毒害性以及其对植物生长 的影响，验证城市污泥施用于矿山土壤的可行性，实 验选取本土植物鸭跖草进行种植。 挑选颗粒饱满的 鸭跖草种子在37 T的水温中浸泡过夜，然后每盆均 匀播撒种子 100粒，观察其发芽情况以及不同时期的 长势， 结果见表 4。

表 **4** 不同污泥比下鸭跖草的发芽率与平均株高

**Table 4 Germination rate and average height of**

Commelina commumis under different sludge addition ratios

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 污泥比/% | 5d | 7d | 10 d | 14 d |
| CK | 10**;** 0．82 | 15**;** 0．91 | 37**;** 1．68 | 51**;**3．12 |
| 15 | 15**;** 1．03 | 23**;** 1．45 | 53**;** 2．41 | 88**;** 4．83 |
| 30 | 12**;** 0．90 | 18**;** 1．23 | 45**;** 2．17 | 75**;** 4．50 |
| 45 | 10**;** 0．82 | 13**;** 1．15 | 32**;** 1．64 | 46**;** 3．08 |
| 60 | 8**;** 0．75 | 11**;** 0．90 | 25**;** 1．59 | 33**;** 2．85 |

注:数据格式为“发芽率/ % ；平均株高/ cm”

陆生植物的毒理试验方法包括根伸长试验、种子萌 发试验和早期植物幼苗试验020 。 植物发芽率在一定程 度上反映土壤对其生长的毒害性。 实验发现：种植鸭跖 草5-7 d后,鸭跖草种子开始萌发，不同污泥处理水平 下的鸭跖草发芽率不同，当污泥添加率为 15%和30% 时，发芽率高于对照组，当污泥添加量＞30%，鸭跖草发芽 率明显下降。 而污泥添加率为 15%时，发芽率最高。 由 此可见，当污泥施入量控制在15%以内，既可提高土壤 养分含量，又对鸭跖草的毒害性较小。

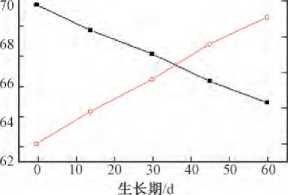
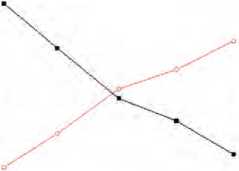
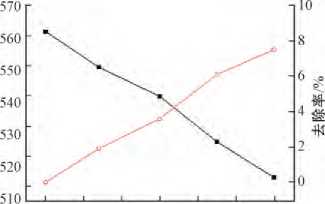
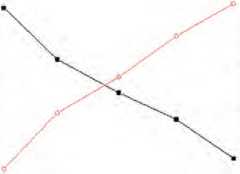
随着种植时期的增加，鸭跖草的生长情况差异较 大。 相比于其他处理组，污泥比为 15%时，鸭跖草长 势最好;当污泥比超过 15%， 随着污泥的添加， 其生 长逐渐变缓慢甚至死亡。 有研究表明，造成这种情况 的原因主要有2 点：一是污泥中含有大量有机质和营 养物质，添加量过高，易造成植物“烧苗”现象021 ;二 是污泥中的有毒物质可能随着污泥量的增加对鸭跖 草的毒害加深，致其死亡。 朱影影022 研究了植物中 的重金属形态、分布及毒害性，发现当铜含量过高时， 会使植物光合、呼吸受阻滞，显著影响生长发育;赵杨 迪等023 研究发现，当铅、镉浓度过高时会使花叶冷水 花根部生长受阻。 根据实验结果， 控制污泥比在 15%以内，既能提高土壤肥力，又可避免土壤中重金 属摄取量过多，有利于鸭跖草的生长发育，从而实现 对矿区废弃土壤的有效修复。

**2.3.2** 鸭跖草对土壤中重金属的去除效果

城市污泥的添加提高了矿区土壤肥力， 但同 时也加深了土壤重金属污染程度。 而大量研究表 明，植物对重金属具有一定的生物富集能力。 因 此，在控制合适污泥比的基础上， 利用一些矿区本 土优势植物对重金属进行去除显得尤为关键。 通 过初期试验发现，鸭跖草在污泥施入量为15%时， 生长情况最为良好， 检测该污泥含量下种植鸭跖 草后土壤中重金属变化， 研究其对土壤重金属的 去除效果，其结果如图4 所示。

由图4 可知：鸭跖草对土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 均 有一定的去除作用，但对Cu的去除效果要明显高于 Zn、Pb、Cd。 种植 60 d 之后， 鸭跖草对土壤中 Cu 的 去除率达到 10.8%， 而对 Zn、Pb、Cd 的去除率均在 7%左右。 随着鸭跖草的生长，土壤中的 Cu 含量下降 明显;Zn、Pb、Cd含量的下降幅度均比较小。

基于上述现象，分析其原因可能如下：1) 植物能 够利用根系或分泌物，改变土壤根际环境，并通过累 积、沉淀、螯合、氧化还原等作用降低土壤中重金属毒 性024 。 因此，种植鸭跖草后，其根系会产生特定分泌 物，如甲酸、乙酸和苹果酸等有机酸以及以酸形式存 在的黏胶，其对土壤的酸化作用增加了土壤中重金属 离子的溶解度025 ;其次，根系的黏胶和聚醛酸能够与 重金属形成螯合体， 将重金属固定在植物根部。 故土 壤中 Cu、Zn、 Pb、Cd 含量均有下降。 2) 鸭跖草具有 超富集特性。 李江遐等026 研究了鸭跖草对重金属的 富集特征，发现鸭跖草对铜有较高的耐性，可以考虑 作为矿山废弃地植被重建的先锋植物。 故鸭跖草对 重金属 Cu 的去除效果要好于 Zn、 Pb、Cd。

■—重金属含量;一°—去除率。

r空"E)、«^uzw+I

%、>俺根

72

图 4 土壤中重金属含量变化

Fig.4 Variation of heavy metal content in soil during the growth of  
Commelina communis

实验发现, 鸭跖草能够起到去除土壤重金属的作 用, 但对不同重金属的去除能力有所差异。 而本试验 侧重于可行性分析, 鸭跖草种植时期较短, 虽对土壤 中重金属有一定的去除效果, 但处理结束时 Cu、Zn Pb、Cd 的含量仍未达到 GB 15618－2018 标准。 而根 据相关研究报道,鸭跖草等耐受性植物生长成熟后对 重金属具有超强富集能力,转移系数均＞1[26]。 因此, 在后续的试验中将开展长期研究,以期使土壤中重金 属含量能够下降到土壤农用地标准限值之内,实现其 生态修复。

**3**结论

1. 城市污泥的添加可以显著提高矿区土壤中有 机质、CEC含量和土壤肥力(速效N、P、K),使其达到 NY/T 391-2000 I级标准，但同时也加重了重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的污染程度。
2. 将污泥添加量控制在 15%, 土壤养分含量得 到有效提高,且重金属毒害性较小, 鸭跖草生长情况 良好,同时对矿区土壤中重金属有着较好的去除效 果, 在短期内去除率为 7% 〜10%。
3. 控制城市污泥直接施入量为 15%对于修复废 弃矿区土壤是适宜的。

参考文献

**[**1 **]** 罗珂.不同施肥条件下植物对矿山废弃地土壤肥力改良的研究 D .咸阳：西北农林科技大学**,**2016.

**[** 2 **]** Yang Guo-hang **,** Zhu Guang-yun **,** et al. Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat / maize system with long-term sewage sludge amendments **[**J**]**. Journal of Integrative Agriculture**,** 2018**,** 17**(**0**):** 60345-7.

1. 王逊•堆肥污泥对林地土壤及植物的影响研究D -南京：南京 林业大学**,** 2011.
2. 朱红霞**,** 汪海英**,** 王华春**,**等.剩余活性污泥用于铅污染土地复 垦的初步研究J •环境科学与技术**，**2015(增刊1**)** :281-284.
3. 杨文娟•不同添加剂处理污泥农用资源化试验研究D -扬州： 扬州大学**,** 2012.
4. 中华人民共和国农业部. 土壤水分测定法**:** GB 7172—1987

S •北京:国家标准局**,**1987.

1. 中华人民共和国农业部•土壤检测第2部分：土壤pH的测定: NY/T-1121.2—2006 S •北京：中国标准出版社**,**2006.

**[** 8 **]** Fan T T **,** Wang Y J**,** Li C B **,** et al. Evaluating the fraction of electrically associated cations on surfaces of soils particles by extrapolation of strong - field Wien effect measurements in dilute suspensions**[**J**]**. Journal of Soils ＆ Sediments**,** 2016**,** 16 **(** 6 **) :** 1683-1689.

**[**9 **]** Su J**,** Zhu L S**,** Li X H**,** et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer on atrazine degradation and detoxification by degrading strain HB-5**[**J**]**. Environment Science**,** 2010**,** 31**(** 10**) :**2475-2480.

10 刘凤枝**，**李玉浸•土壤监测分析技术M -北京：化学工业出版 社**,** 2015**,** 294-295.

11**]** 戴树桂•环境化学M •北京：高等教育出版社**，**2007.

**[**12**]** 国家环境保护局.土壤质量 铜、锌的测定-火焰原子吸收分光

光度法：GB/T 17138—1997 S •北京：中国标准出版社**,**1997.

13**]** 国家环境保护局•土壤质量铅、镉的测定玉1 -MIBK萃取火焰原

子吸收分光光度法：GB/T 17140—1997 S •北京：中国标准出 版社**,** 1997.

[14 张书光•城市污泥改良矿山废弃地土壤理化性质的研究J -湖

北农业科学**,** 2016**(**17**):** 4416-4419**,**4423.

( 下转第 **183** 页 )

污染扩散特征J •环境科学,2013,34( 12**)** :4619-4626.

1. 北京市环境保护局**，**北京市质量技术监督局．大气污染物综合 排放标准**：** DB 11 /501—2017**0**S .2017.
2. 李佳**，**曹兴涛**，**隋红**，**等.石油污染土壤修复技术研究现状与展 望J •石油学报(石油加工**),**2017,33(5**)** :811-833.

15**]**何黎，白娟，殷俊，等•苯系物污染治理的研究进展J -应用化 工**，**2017**，**46**(**10**)：**2039-2047.

1. 白洪亮•活性炭吸附法脱除低浓度苯系物的研究D -大连：大 连理工大学**，**2006.
2. 赵中华**，**李晓东**，**陈彤**，**等.多氯联苯污染土壤热脱附研究综述 **0**J .生态毒理学报**，**2016**，**11**(**2**)：** 61-68.
3. Lee I**，**Kim J S**，**Jung T Y**，**et al. J. The study of crude oil contaminated soil remediation by indirect thermal desorption**0**J . J Soil Groundw Environ**，**2016**，**21 **(**3**) ：** 14-20.
4. 李晓东**，**伍斌**，**许端平**，**等.热脱附尾气中 DDTs 在模拟水泥窑中 的去除效果J -安全与环境学报,2017,17(6**)** :2393-396.
5. Lemming G**，** Nielsen S G**，** Weber K**，** et al. Optimizing the environmental performance of in situ thermal remediation technologies using life cycle assessment **0** J . Groundwater Monitoring & Remediation**,** 2013, 33(3**)** :38-51.
6. Ellis D E**，**Hadley P W. Sustainable remediation white paper**：** integrating sustainable principles**,** practices**,** and metrics into remediation projects**0**J .Remediation Journal**,** 2009**,** 19**(**3**) ：** 5-114.
7. 谷庆宝**,** 侯德义**,** 伍斌**,** 等.污染场地绿色可持续修复理念、工程 实践及对我国的启示J •环境工程学报,2015,9(8**)** :4061-4068.
8. 胡波**,**曹亚丽**,**殷承启**,**等.绿色可持续修复理念在修复设计中

V 3

( 上接第 **193** 页)

1. 李丽**,** 马达**,** 赵志宾**,**等.秦皇岛市城市污泥堆肥土地利用的可 行性研究J .环境科学与技术**，**2016(增刊2**)** :223-226.
2. 吴志强**,** 顾尚义**,** 李海英. 城市污泥用于铅锌矿区重金属污染 修复的试验研究J .安全与环境工程**，**2012**,** 19⑷：49-53.
3. 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 **0**D .长沙**：** 湖南农业大学**,** 2013.
4. 许晓玲**,**呼世斌**,**刘晋波**,**等.施用污泥堆肥对土壤中重金属累 积和大豆产量的影响J .环境工程**，**2018**,** 36(3): 108-111.
5. 戴亮**,** 任珺**,** 陶玲**,** 等.污泥施用对土壤及小麦生理特性的影 响J .农业环境科学学报**，**2012**,** 31(2): 362-368.
6. 邓桂荣**,** 梅承芳**,** 张宏涛**,** 等.醋酸钠对种子发芽和根伸长的 生态效应研究J .毒理学杂志**，**2017( 1**)** :38-41.
7. 王瀚起.污泥与菇渣好氧堆肥及其施用土壤—植物效应研究 **0**D .南京**：** 南京林业大学**,** 2013.
8. 朱影影.植物中的重金属形态、分布及其毒性研究进展J .淮 南职业技术学院学报**,** 2011**,** 11**(**3**)：**68-70.

的应用J .污染防治技术,2016,29(4**)** : 1-5.

**0**24 Jiang W X**,** Zhang W**,** Li B J**,** et al. Combined fenton oxidation and

biological activated carbon process for recycling of coking plant effluent **0**J .Journal of Hazardous Materials**,**2011**,**189**(**1/2**) ：** 308-314.

25**]** 李品君，孟冠华,刘宝河.Fenton试剂+活性炭吸附处理焦化废

水的试验研究J .安徽工业大学学报(自然科学版),2011,28 **(**2**) ：** 152-157.

26 刘璞，张垒，王丽娜，等.Fenton氧化-混凝工艺处理焦化废水的 研究J .武钢技术**,**013(1**)** :47-49.

**0**27 北京市环境保护局、北京市质量技术监督局.水污染物综合排

放标准**：** DB 11 /307—2013**0**S .2013.

**0**28 Yi Y M**,** Oh C T**,** Kim G J**,** et al. Changes in the physicochemical

properties of soil according to soil remediation methods**0**J . Journal of Soil & Groundwater Environment**,** 2012**,** 17 **(**4**) ：** 36-43.

**0**29 O'Brien P L**,** Desutter T M**,** Casey F X**,** et al. Thermal remediation

alters soil properties － a review **0**J . Journal of Environmental Management**,** 2017**(**206**) ：** 826-835.

**0**30 Zihms S G**,** Switzer C**,** Irvine J**,** et al. Effects of high temperature

processes on physical properties of silica sand**0**J . Engineering Geology**,**2013**,**164**(**18**)：**139-145.

第一作者:孟祥帅**(**1986－**) ,**男**,**博士研究生**,**主要研究方向为地下水 环境。 mengxiangshuai@ ceri. com. cn

通信作者:陈鸿汉**(**1956－**) ,**男**,**博士**,**教授**,**主要研究方向为地下水污 染评价与防治技术。 chenhh56@ 126. com

23**]** 赵杨迪**，**潘远智**，**刘碧英**，**等.Cd、Pb单一及复合污染对花叶

冷水花生长的影响及其积累特性研究J .农业环境科学学报**，** 2012**,** 31**(**1**)：** 48-53.

**0**24 Dixit R**,** Wasiulah**,** Malaviya D**,** et al. Phytoremmediation**：** an

interim landscape architecture strategy to improve accessibility of contaminated vacant lands in Canadian municipalities**0**J . Urban forestry and urban greening**,** 2016**,** 18**(**8**) ：** 242-256.

**0**25 徐卫红**,** 黄河**,** 王爱华**,** 等.根系分泌物对土壤重金属活化及

其机理研究进展J .生态环境学报**，**2006**,** 15(1**)** : 184-189.

**0**26 李江遐**,** 张军**,** 黄伏森**,** 等.铜矿区土壤重金属污染与耐性植

物累积特征J . 土壤通报**，**2016**,** 47(3**)**:719-724.

第一作者:潘志强**(**1994－**),**男**,**硕士研究生**,**主要从事土壤生态修复 工作。 2211694325@ qq.com

通信作者:张淑琴**(**1977－**),**女**,**博士**,**副教授**,**主要从事土壤生态修复 工作。 zhangshuqin@ wust. edu. cn