



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.014

孔祥科, 黄国鑫, 韩占涛, 等. 制革污泥堆存场地典型土壤剖面中污染物的垂向分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 96-100. KONG X K, HUANG G X, HAN Z T, et al. Vertical distribution characteristics of pollutants in a typical soil profile in the tannery sludge landfill site[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 96-100. (in Chinese)

制革污泥堆存场地典型土壤剖面中 污染物的垂向分布特征

孔祥科^{1,2}, 黄国鑫³, 韩占涛^{1,2}, 李志涛³, 王平^{1,2}, 许有明^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 河北省地下水污染机理与修复重点实验室, 石家庄 050061; 3. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 为了查明制革污泥对包气带土壤的污染状况, 以某制革污泥堆存场地内典型土壤剖面为研究对象, 研究污泥渗滤液中特征污染物在包气带土壤埋深 0~200 cm 内的垂向分布特征, 探讨不同形态氮及铬的分布规律, 并采用高通量测序对土壤中的菌群组成进行了初步分析。结果表明: 制革污泥成分复杂、浓度高, 高浓度的含盐量(99 000 mg/kg)、氮素(30 900 mg/kg)及铬(30 970 mg/kg)已对埋深 20 cm 以上的浅层土壤造成严重污染, 污泥中大量有机质及酸性物质导致浅层土壤 pH 降低和总有机碳(TOC)增大。随着土壤埋深增加, 各污染物浓度呈明显下降趋势, 但在埋深 200 cm 处土壤中仍有一定浓度的有机氮(723 mg/kg)及含盐量(7 070 mg/kg)检出。研究区呈碱性的壤土对铬迁移具有明显的阻滞作用, 当土壤埋深大于 40 cm, Cr(VI)浓度即下降至 200 mg/kg, Cr(III)浓度下降至小于 2 mg/kg。高盐度、高铬污染对土壤中部分微生物生长具有抑制作用, 变形杆菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)及拟杆菌门(Bacteroidetes)成为受污染土壤中的优势种群。

关键词: 制革污泥; 土壤; 氮; 铬; 垂向分布

中图分类号: X508 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0096-05

Vertical distribution characteristics of pollutants in a typical soil profile in the tannery sludge landfill site

KONG Xiangke^{1,2}, HUANG Guoxin³, HAN Zhantao^{1,2}, LI Zhitao³, WANG Ping^{1,2}, XU Youming^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology & Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Contamination Remediation, Shijiazhuang 050061, China; 3. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: To find out the pollution status of tannery sludge to the soil in the unsaturated zone, we investigated the soil samples at the depth of 0~200 cm in a typical soil profile, and identified the vertical distribution characteristics of the main pollutants, especially the different forms of nitrogen and chromium. High throughput sequencing was further applied to reveal the bacterial community structures of the soils. The results showed that the tannery sludge contained a variety of high concentration contaminants, such as high salinity (99 000 mg/kg), total nitrogen (30 900 mg/kg) and total chromium (30 970 mg/kg), which had caused heavy contamination to the surface soil above 20 cm depth. The sludge leachate containing a large amount of organic matter and acid compounds caused a decrease in pH and an increase in TOC of the surface soil. The concentration of pollutants decreased obviously with the increase in soil depth. However, low concentration organic nitrogen (723 mg/kg) and salinity (7 070 mg/kg) were still detected in the soil at the depth of 200 cm. The alkaline soil in the study area had a distinct retardation effect on the transfer of chromium. When the soil depth was deeper than 40 cm, the concentrations of Cr(VI) and Cr(III) decreased to less than 200 mg/kg and 2 mg/kg, respectively. High salinity and high chromium contamination can inhibit the growth of some microorganisms in the soil.

收稿日期: 2016-12-23 修回日期: 2017-06-16 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.1025.013.html>

基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2016504014); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目(SK201613)

Funds: Hebei Natural Science Foundation of China (D2016504014); Basic Scientific Research Funds of Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (SK201613)

作者简介: 孔祥科(1987-), 男, 山东济宁人, 助理研究员, 主要从事地下水污染修复研究。E-mail: kongxiangke1987@163.com

通讯作者: 许有明(1971-), 男, 工程师, 主要从事工程地质研究。E-mail: xymwxr@163.com

and Proteobacteria, Firmicutes and Bacteroidetes will become the dominant microbial population in the contaminated soil.

Key words: tannery sludge; soil; nitrogen; chromium; vertical distribution

目前, 中国已成为世界皮革工业的大国, 皮革工业在给人们带来经济利益的同时, 也带来了巨大的环境问题, 并威胁到了公众的生命健康^[1]。制革过程中除产生大量的废水外, 还会产生大量的污泥。据统计, 只有大约 20%~25% 的原料皮最终加工成皮革, 大部分损失的物质变成了废弃物^[2]。制革污泥成分复杂, 含有大量的有毒物质, 其中高浓度的盐类、氮素及铬盐极易造成土壤和地下水污染^[3-4]。虽然国内大部分皮革企业对生产中的污泥进行了有效处理, 但是制革污泥产生量大、处理成本高, 仍有一些企业采用粗放方式处理。由于堆存处往往没有修建防渗保护层, 污泥中可溶性污染物会随雨水淋滤下渗, 严重污染包气带土壤并进一步污染地下水。然而, 由于该类污染场地的敏感性, 现有研究多是对土壤或地下水污染现状的调查与评价, 对于制革污泥中污染物在包气带和含水层中的分布和迁移规律缺乏深入研究^[5-6]。

河北省辛集市是全国最大的制革、制衣和皮具的生产基地。然而, 制革过程产生的大量污泥没有得到有效地处置, 少部分制革厂将污泥随意在农田中堆存和填埋, 给当地农村土壤环境造成了严重的破坏^[7]。本研究以河北省辛集市某皮革制造厂的污泥堆存场地为研究对象, 选取典型土壤剖面开展垂向上污染物特征、分布趋势及迁移规律研究, 以期查明制革污泥随意露天堆存可能对包气带土壤造成的污染, 为制革污泥堆存场地的污染防控与治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 场地概况

所研究的污泥堆存场地位于河北省辛集市某皮革制造工业区旁的农田区, 地表堆存的污泥主要来自于 2016 年制革废水处理过程中产生的污泥。根据研究区场地勘察结果, 包气带浅层土壤至上向下大体可划分为 3 层, 分别是壤土(0~8 m)、砂质壤土(8~12 m)及黏壤土(12~19 m)。另外, 研究区位于华北平原地下水漏斗区, 浅层地下水位埋深达到 45 m。

1.2 样品采集

为了解制革污泥对下部包气带土壤的污染情况, 在污染场地利用土壤取样器(Eijkkamp)进行钻孔取样。清除表层污泥后, 从地表往下 200 cm 每隔约 30 cm 采集一个土壤样品(浅层加密取样)。每组样品采集量不少于 1 kg, 用于污染组分测试的样品放置于保温箱, 用于微生物测试的样品放置于干冰箱中, 密封保存, 快速送至实验室测试。另外, 在表层采集污泥样品 1 组及渗滤液 1 组, 在远离污染场地的上风向农田区采集未污染土壤样品 1 组。

1.3 样品理化性质

根据样品的现场观察及实验测定结果(表 1), 制革污泥含有高含水率(64.1%)及有机质含量(TOC 12.2%)。场地包气带土壤质地主要以壤土为主(按国际制土壤质地分类标准进行划分), 土壤含水率在 14.4%~26.0% 之间, 土壤 TOC 值在 0.14%~0.73% 之间, 土壤 pH 值在 7.94~8.42 之间, 其中埋深 10 cm 处土壤的 pH 值异常偏小(7.94), TOC 值异常偏大(14.3%)。

表 1 不同层位土壤样品的理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of soils at different depths

样品	埋深 / cm	土壤质地	含水率 (%)	TOC (%)	pH	颗粒分级 (%)		
						< 0.002 mm	0.002~ < 0.02 mm	0.02~ 2 mm
未污染土	-	粉砂质壤土	14.4	0.23	8.30	5.01	46.48	48.51
表层污泥	-	-	64.1	12.2	7.67	-	-	-
S1	10	砂质壤土	26.0	14.3	7.94	1.17	13.76	85.07
S2	20	壤土	17.9	0.73	8.37	4.76	44.32	50.92
S3	40	砂质壤土	18.1	0.34	8.12	4.61	36.99	58.40
S4	70	壤土	21.1	0.31	8.39	4.27	42.38	53.35
S5	100	砂质壤土	18.5	0.21	8.31	3.49	31.61	64.90
S6	130	粉砂质壤土	19.5	0.20	8.06	8.28	48.95	42.77
S7	160	壤质砂土	21.5	0.14	8.42	2.43	7.28	90.29
S8	200	壤土	18.9	0.27	8.20	11.64	39.37	48.99

1.4 样品测试

采集的土壤样品置于阴凉通风处自然风干,剔除样品中的残渣、植物根系等,碾碎过 100 目筛。污泥及土壤中污染物浓度由澳实分析(上海)检测有限公司检测(CNAS 和 CMA 认证),检测指标主要包括土壤含盐量、总氮、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、硫化物、Cr(Ⅲ)、Cr(Ⅵ),相关测试方法参照国家或行业标准。其中,土壤总氮为消解处理后采用紫外分光光度法测定,氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定采用氯化钾溶液提取-分光光度法测定,有机氮浓度通过总氮浓度减去无机氮浓度计算求得。Cr(Ⅵ)的测定采用二苯碳酰二肼分光光度法,总铬测定采用电感耦合等离子体原子发射光谱,铬形态分析利用改进的 BCR 连续提取法,并将土壤中铬的形态分为水溶态、弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态 5 种类型。微生物测试土样送往上海美吉生物医药有限公司进行高通量测序,按照 DNA 提取、PCR 扩增和产物纯化、PCR 产物定量和均一化、Illumina PE 文库制备、Illumina 高通量测序的基本实验流程对土壤微生物 16S rRNA 基因进行高通量测序。

2 结果与讨论

2.1 污泥中特征污染物在土壤中的垂向迁移

场地内制革污泥组分检测结果表明,污泥中污染物以无机组分和重金属(铬)为主,含盐量 99 000 mg/kg、总氮 30 900 mg/kg、硫化物 4 910 mg/kg 及总铬 30 970 mg/kg。有机组分仅检测出少量酚类和多环芳烃,包括苯酚 0.37 mg/kg、2,4-二氯酚 6.03 mg/kg、2,4,5-三氯酚 31.9 mg/kg、萘 0.18 mg/kg、菲 0.49 mg/kg、荧蒽 0.26 mg/kg 及比 0.21 mg/kg。

制革污泥在堆放过程中易发生分解,产生渗析水分,并将其中的易溶污染物溶出,从而造成下部土壤的污染^[7]。污泥渗滤液检测分析表明,渗滤液中含有高浓度的含盐量、氮素及重金属(铬), Na^+ 11 508 mg/L、 Cl^- 16 228 mg/L、总氮 2 344 mg/L、化学需氧量 30 300 mg/L 和总铬 27.2 mg/L。由图 1 可以看出,污泥堆存处下部埋深 10 cm 处土壤污染严重,其含盐量、总氮及总铬浓度分别达到 17 500 mg/kg、28 400 mg/kg 及 29 500 mg/kg。表 1 中浅层土壤样品 S1 的 TOC 及 pH 值异常也说明该层土壤受上部制革污泥污染,淋滤液中大量的有机质及酸性物质导致土壤 TOC 值升高和 pH 值下降。随着土壤埋深增加,含盐量、总氮、总铬浓度呈明显下降趋势,但在埋深 200 cm 处土壤中仍有一定浓度的总氮及含盐量检出(图 1)。由于污泥中盐类组分浓度高且易淋滤下渗,因此其在包气带土壤中浓度高、

垂向迁移距离最远。污泥中大量氮素(总氮 37 100 mg/kg)在向下迁移过程中会受到浅层土壤的吸附及土著微生物的生物降解等作用,导致埋深 200 cm 处氮素浓度降低至 700 mg/kg 以下。尽管污泥中检出大量铬盐(主要是 Cr(Ⅲ)),图 2),但是由于 Cr(Ⅲ)在土壤中易被吸附和沉淀,因此其只在浅层土壤有高浓度检出,土壤埋深超过 40 cm 后浓度迅速降至 200 mg/kg 以下。

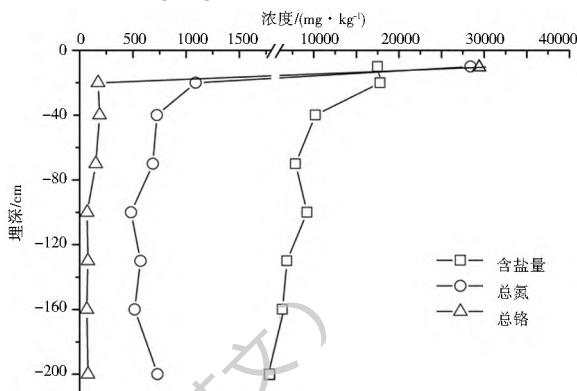


图 1 土壤剖面中特征污染物浓度分布

Fig. 1 Distribution of specific pollutants in the soil profile

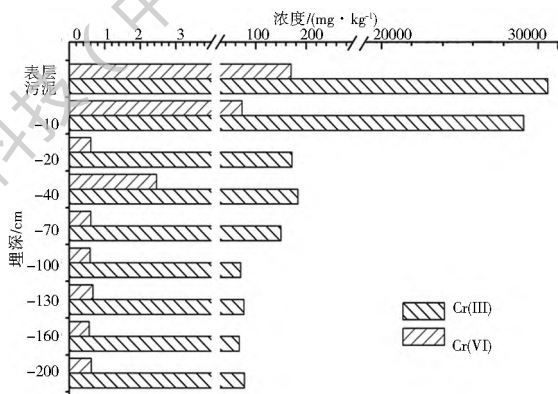


图 2 土壤剖面中不同形态铬分布

Fig. 2 Distribution of different chromium forms in the soil profile

2.2 土壤剖面中不同形态铬的分布

由图 2 可以看出,制革污泥中含有高浓度的 Cr(Ⅲ)(30 800 mg/kg)及较高浓度的 Cr(Ⅵ)(170 mg/kg)。制革工艺中使用三价铬盐作为鞣剂,因此制革污泥中铬主要以三价形态存在^[8]。对于制革污泥中 Cr(Ⅵ)产生的原因,分析认为,制革材料中可能含有少量 Cr(Ⅵ)或制革加工过程中 Cr(Ⅲ)转化为 Cr(Ⅵ)^[9];另一方面,污泥在长期堆放过程中,由于 Cr(Ⅲ)不稳定,光照和加热条件下部分被空气氧化成 Cr(Ⅵ)^[10]。

当土壤埋深大于 40 cm, Cr(Ⅲ)浓度快速降低至 180 mg/kg,说明 Cr(Ⅲ)污染主要集中在污泥以下的表层土壤。由于 Cr(Ⅲ)化合物易被土壤胶体吸附固定,活性较弱;加之研究区土壤 pH 趋于碱性(pH > 8)(表 1),易于 Cr(Ⅲ)沉淀并减小其进一步

转化 $\text{Cr}(\text{O})$ 的可能^[11]。因此, $\text{Cr}(\text{O})$ 很难在包气带土壤中向下迁移。 $\text{Cr}(\text{O})$ 除在浅层土壤(埋深 < 10 cm) 中浓度达到 73 mg/kg 之外, 深层土壤中 $\text{Cr}(\text{O})$ 浓度普遍小于 2 mg/kg。土壤中高含量的有机质(表 1) 促使 $\text{Cr}(\text{O})$ 迅速还原为 $\text{Cr}(\text{O})$, 使其转变为沉淀态和有机结合态固定下来, 从而对 $\text{Cr}(\text{O})$ 的迁移具有重要的阻滞作用^[12-15]。土壤中铬的 5 种形态分析结果表明(表 2), 浅层受污染土壤中铬以可还原态、可氧化态和残渣态为主, 所占比例分别达到 62.6%、26.2% 和 10.8%。随着土壤埋深增加,

各种形态铬的含量显著下降。水溶态和弱酸提取态铬仅在埋深 20 cm 以上土壤中少量检出, 在更深层土壤中检出浓度很低。对于埋深 20 cm 以上土壤中较高浓度的可还原态铬(如较易还原的铁锰氧化物结合态), 当土壤氧化还原电位降低或处于缺氧环境时, 铁-锰氧化物结合态中的重金属键可被还原而转化成其它形态, 导致土壤中铬的环境风险增加。当土壤埋深大于 20 cm, 土壤中的铬基本以三价的残渣态存在, 说明铬在浅层土壤中的固定能力较强, 迁移能力较弱。

表 2 土壤中不同形态铬的含量
Tab. 2 Content of different forms of chromium in the soil

样品	埋深/cm	水溶态/(mg·kg ⁻¹)	弱酸提取态/(mg·kg ⁻¹)	可还原态/(mg·kg ⁻¹)	可氧化态/(mg·kg ⁻¹)	残渣态/(mg·kg ⁻¹)
污泥	0	153	229	21700	3860	2880
S1	10	11.2	124	18100	7580	3110
S2	20	< 0.5	1.7	35.4	29.3	88.3
S3	40	< 0.5	0.9	29.8	19.6	81.2

2.3 土壤剖面中不同形态氮的分布

由图 3 可以看出, 污泥中有机氮和氨氮含量分别达到 16 500 mg/kg 及 14 400 mg/kg, 并含有少量的硝酸盐(503 mg/kg)。包气带埋深 40 cm 以上土壤中以有机氮和氨氮为主, 埋深 40 cm 以下土壤中以有机氮为主。污泥中高浓度的有机氮及氨氮主要来源于制革过程中使用的皮毛原料、铵盐脱灰和有机氮水解^[14]。由于包气带介质主要以细颗粒的壤土为主, 不利于污染物的迁移, 当土壤埋深大于 40 cm, 不同形态氮素浓度即明显下降。天然条件下, 有机氮易被微生物氨化作用或新陈代谢代谢利用^[15], 当土壤埋深大于 20 cm, 其浓度迅速下降至 700 mg/kg 左右。在埋深 40~200 cm 土壤中有机氮浓度变化不明显, 深层缺氧环境可能抑制了微生物氨化作用。氨氮易被细颗粒土壤吸附, 当埋深超过 70 cm, 氨氮浓度即降低至 20 mg/kg 以下。不同埋深土壤中亚硝酸盐氮浓度均小于 5 mg/kg。除埋深 10 cm 土壤中硝酸盐氮含量达到 113 mg/kg, 硝酸盐氮浓度随土壤埋深增加迅速降低至 10 mg/kg 以下, 表明土壤中存在较强的异养反硝化作用。

2.4 土壤剖面中微生物群落分析

通过系统发育分析, 土壤样品中细菌序列分类包含 12 个门(图 4)。未污染土壤样品所含的细菌门类最丰富, 而土壤剖面中样品的优势菌包括厚壁菌门(Firmicutes)(2.0%~62.4%)、变形杆菌门(Proteobacteria)(11.6%~57.5%)和拟杆菌门(Bacteroidetes)(0.6%~69.0%), 这与制革废水生物处理过程中活性污泥内检出的细菌群落相一致^[16]。Firmicutes 为土壤中的优势种类, 其含有很

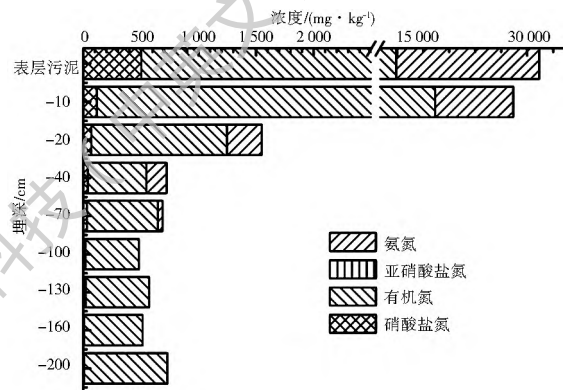


图 3 土壤剖面中不同形态氮分布

多氨化细菌的优势菌属(芽孢杆菌属和假单胞菌属); Proteobacteria 和 Bacteroidetes 也是土壤中的优势菌群, 它们的丰度一般与环境中含氮量呈正相关^[17]。浅层土壤 S1 中 Bacteroidetes 丰度相比污泥和深层土壤增加明显, 而 Firmicutes 丰度明显降低(图 4), 且 S1 中有机氮浓度并没有降低(图 3), 表明 Firmicutes 生长繁殖可能受高盐和高铬的影响, 进而影响其对有机氮的降解过程。随着剖面土壤埋深增加, 深层污染较轻土壤中微生物多样性及丰度显著增加(图 4), 说明高盐和高铬污染对浅层土壤中部分微生物生长具有抑制作用。

3 结论与建议

- (1) 制革污泥成分复杂, 含有高浓度的盐类、氮素及总铬。场地埋深 20 cm 以上浅层土壤污染严重, 随土壤埋深增加, 各污染物浓度呈明显下降趋势, 但少量易迁移盐类、氮素经淋滤仍会进入更深层土壤。
- (2) 制革污泥中铬以 $\text{Cr}(\text{O})$ 为主, 包气带土壤中铬赋存形态以可还原态、可氧化态和残渣态为主。

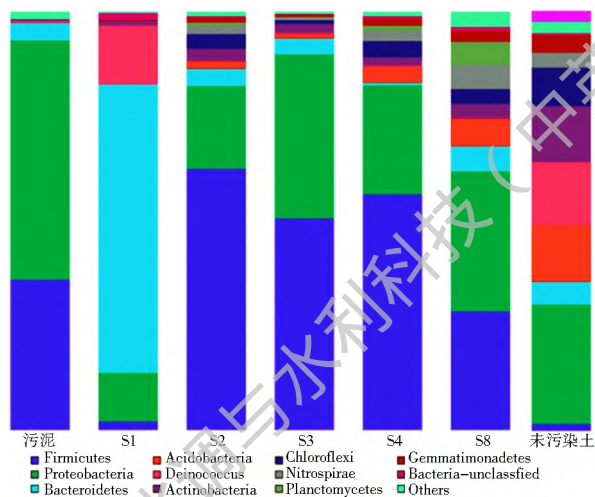


图 4 微生物群落结构组成

Fig. 4 The bacterial community structures of the soils

研究区呈碱性壤土对铬迁移具有明显的阻滞作用,当埋深大于 20 cm, $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度即降低至 100 mg/kg 以下, $\text{Cr}(\text{III})$ 浓度降低至小于 2 mg/kg。

(3) 制革污泥带来的高盐度、高铬污染对土壤中部分微生物生长具有抑制作用, Proteobacteria、Firmicutes 及 Bacteroidetes 为受污染土壤中的优势种群。

参考文献(References):

[1] 段建平, 吕生华, 侯明明, 等. 皮革生产过程中主要污染物的处理与控制[J]. 西部皮革, 2011, 33(14): 40-46. (DUAN J P, LYU S H, HOU M M, et al. Solution and controlling of pollutant produced during leather making process[J]. West Leather, 2011, 33(14): 40-46. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1602.2011.14.014.

[2] 李彦春, 侯立杰. 皮革化学品产生的污染及控制[J]. 陕西科技大学学报, 2004, 22(3): 56-62. (LI Y C, HOU L J. Pollution of leather chemical products and control[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2004, 22(3): 56-62. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-5311.2004.03.013.

[3] KUDABAeva A, SAKHY M, USIMBAeva S, et al. Evaluation of hygienic properties and ecological safety of glove haberdashery leather[J]. World Applied Sciences Journal, 32(1): 99-103, 2014. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.32.01.14508.

[4] 马宏瑞, 王晓蓉, 牛晓君, 等. 制革污泥污染土壤矿化过程中 $\text{Cr}(\text{VI})$ 和氮的释放[J]. 农业环境科学学报, 2004(1): 136-139. (MA H R, WANG X R, NIU X J, et al. Releases of $\text{Cr}(\text{VI})$ and nitrogen from contaminated soil with tannery sludge during organic matter mineralization[J]. Journal of Agr Environment Science, 2004(1): 136-139. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2004.01.032.

[5] 张达政, 李海明, 詹晓燕, 等. 典型制革污染场地地下水盐污染特征[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 18-23. (ZHANG D Z, LI H M, ZHAN X Y, et al. Characteristics of groundwater salt pollution in a typical leather contaminated site[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 18-23. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2014.02.020.

[6] 马宏瑞, 李桂菊, 章川波, 丁绍兰, 俞从正. 施用制革污泥土壤中铬的积累、化学形态及其植物有效性[J]. 环境科学, 2001, 03: 70-73. (MA H R, LI G J, ZHANG C B, et al. $\text{Cr}(\text{VI})$ accumulation and biochemical response of wheat seedling in tannery

sludge contaminated soils[J]. Journal of Agr Environment Science, 2014, 02: 57-62. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjxx.2001.03.015.

[7] 丁绍兰, 潘崇. 制革污泥农用对生态的影响[J]. 皮革科学与工, 2010(6): 24-26. (DING S L, PAN D. The ecological impact of agriculture reuse of tannery sludge[J]. Leather Science and Engineering, 2010(6): 24-26. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7964.2010.06.006.

[8] 马宏瑞, 蔡勇, 王晓蓉. 制革污泥污染土壤中铬对小麦的富集及生化效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 846-851. (MA H R, CAI Y, WANG X R. $\text{Cr}(\text{VI})$ accumulation and biochemical response of wheat seedling in tannery sludge contaminated soils[J]. Journal of Agr Environment Science, 2006, 25(4): 846-851. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2006.04.005.

[9] 李洋, 白子竹, 张琦. 皮革制品中 Cr^{6+} 产生的原因及检测[J]. 西部皮革, 2009, 31(23): 43-46. (LI Y, BAI Z Z, ZHANG Q. Formation cause analysis and determination methods of chromium(VI) in leather products[J]. West Leather, 2009, 31(23): 43-46. (in Chinese))

[10] 裴廷权, 王里奥, 钟山, 等. 典型铬渣简易掩埋场铬渣及土壤铬污染特征和处置分析[J]. 环境工程学报, 2008, 2(7): 994-999. (PEI T Q, WANG L A, ZHONG S, et al. Pollution characteristics and treatment analysis of chromium residue and soil chromium in typical chromium residue simple stock[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(7): 994-999. (in Chinese))

[11] SHAMS K M, TICHY G, SAGER M, et al. Soil contamination from tannery wastes with emphasis on the fate and distribution of tri- and hexavalent chromium[J]. Water Air and Soil Pollution, 2009, 199(1/4): 123-137. DOI: 10.1007/s11270-008-9865-y.

[12] 郑春荣, 陈满怀. 土壤植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 126-157. (ZHENG C R, CHEN M H. Heavy metal pollution in soil and plants system[M]. Beijing: Science Press, 1996: 126-157. (in Chinese))

[13] 桂新安, 杨海真, 王少平, 等. 铬在土壤中的吸附解吸研究进展[J]. 土壤通报, 2007, 05: 1007-1012. (GUI X A, YANG H Z, WANG S P, et al. Advance in studies of chromium sorption and desorption in soils[J]. Journal of Soil Science, 2007, 05: 1007-1012. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0564-3945.2007.05.037.

[14] 丁绍兰, 李玲, 赵梦君. 牛皮制革废水 COD 和氮素排放特征研究[J]. 皮革科学与工, 2009, 19(2): 19-21. (DING S L, LI L, ZHAO M J. Investigation on the characteristic of COD and nitrogen in waste water from making cattle leather[J]. Leather Science and Engineering, 2009, 19(2): 19-21. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7964.2009.02.003.

[15] 贺纪正, 张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制[J]. 微生物学通报, 2013(1): 98-108. (HE J Z, ZHANG L M. Key processes and microbial mechanisms of soil nitrogen transformation[J]. Microbiology China, 2013(1): 98-108. (in Chinese)) DOI: 10.13344/j.microbiol.china.2013.01.004.

[16] 张兆鑫, 马宏瑞, 罗羿超, 等. 毛皮染色废水工艺的处理效率及微生物群落的影响[J]. 环境科学与技术, 2015(2): 25-31. (ZHANG Z X, MA H R, LUO Y C, et al. Efficiency of different treatment process of fur dyeing wastewater and impact of bacterial community in activated sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2015(2): 25-31. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2015.02.005.

[17] 王亚男. 不同施氮量对稻田土壤中氨氧化细菌群落结构的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2007. (WANG Y N. The effects of different nitrogen levels on the community structure of ammonia oxidizing bacteria in the rice paddy[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese))