

Review of Acidic Pollution of Tailing Pond Treatment Technology

Weimin Gao*, Hanfei Cheng, Ming Li, Jing Ran, Yi Xia, Qiaohong Zhu

Huatian Engineering & Technology Corporation, Nanjing Jiangsu
Email: gaowmchem@126.com

Received: Jun. 2nd, 2017; accepted: Jun. 19th, 2017; published: Jun. 21st, 2017

Abstract

The tailing pond is a waste bin which is made up of fine tailings. In this paper, environmental harm caused by acidic pollution of tailing pond is summarized. And the causes of acidic pollution are analyzed. The disposal technology and its advantages and disadvantages are introduced from three aspects which include source, water and soil. The comprehensive control of source control, chemical neutralization and constructed wetland are summarized, which is the effective measure of comprehensive treatment of acidic pollution of tailing pond.

Keywords

Tailing Pond, Acidic Pollution, Treatment

尾矿库酸性污染治理技术概述

高卫民*, 程寒飞, 李明, 冉景, 夏溢, 朱巧红

中冶华天工程技术有限公司, 江苏 南京
Email: gaowmchem@126.com

收稿日期: 2017年6月2日; 录用日期: 2017年6月19日; 发布日期: 2017年6月21日

摘要

尾矿库是由采矿排出的细粒尾砂堆筑而成的废渣库。本文概述了尾矿库酸性污染对环境造成的危害及其成因, 并从尾矿库源头、水和土壤三个层面分别介绍了处置技术及其优缺点, 总结出源头控制, 化学中和+人工湿地相结合的综合治理措施是未来尾矿库酸性污染综合治理的有效措施。

*通讯作者。

关键词

尾矿库, 酸性污染, 治理

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 尾矿酸性污染的背景、危害和成因

矿山作为自然资源开采、加工利用的场所, 在人们获取有益矿物原料的同时, 也不可避免地破坏了自然地貌与环境, 产生了大量的在目前的经济和技术条件下难以回收利用的固体废弃物或废水, 对周边环境造成了一定程度的破坏[1]。矿业活动产生的各种废水主要包括矿坑水, 选矿、冶炼废水及尾矿池水等。其中煤矿、各种金属、非金属矿业的废水以酸性为主, 并多含大量重金属及有毒、有害元素、以及 COD、BOD、悬浮物等[2]。在一些地方, 未经达标处理的废水任意排放, 直接和间接地污染了地表水和地下水及周围的农田。矿山废水的环境污染被日益重视, 而矿山废水中污染范围最广、危害程度最大的是矿山活动中排放的酸性废水, 酸性废水直接流入自然水系及汇入区域水系, 对下游居民的生产、生活及其赖以生存的生态环境造成了极大的影响和危害[3]。这种污染现象无论是生产矿山还是闭坑矿山都不同程度地存在。生成酸有可能威胁到河流和野生生物。ARD (酸性岩石水)能破坏鱼类和其他水生生物, 而且, 一旦发生, 实际上它不可能逆转。因此对矿山酸性污染的治理已迫在眉睫。

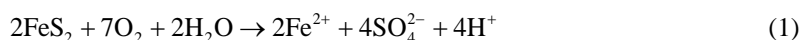
矿山酸性污染的危害

- 1) 腐蚀管道、水泵、钢轨等设备设施, 同时直接威胁拦污、蓄污设施(如污水坝等)的安全与稳定。
- 2) 含重金属离子的矿山废水排入农田, 对大多数植物都具有毒副作用, 导致大部分植物枯萎, 死亡, 严重影响农作物的产量和质量。少部分植物吸收重金属后, 通过食物链危害人类健康。
- 3) 矿山废水直接排入河流、湖泊或渗入地下, 导致水质恶化, 对鱼类、藻类和人类构成极大威胁。

尾矿库酸性污染的成因

尾矿库是由矿山开采排出的细粒(绝大部分小于 200 μm)尾砂堆筑而成的废渣库。由于尾砂颗粒小, 当它暴露在空气中时, 比大块矿岩更易氧化分解; 又由于浮选工艺中添加了黄药、氰化物等试剂, 使尾矿库废水比矿坑水和废石淋滤水含有更多的污染物。特别是金属硫化物, 由于尾矿中含有大量的细粒金属硫化物(矿山一般仅选出 1 种或 2 种金属, 少数 3 种以上)和单硫元素, 其废水的 pH 值可能更低。

尾矿中废石黄铁矿在淋滤过程中发生氧化溶解时会产生部分硫酸, 如 FeS_2 在水淋滤过程中氧化溶解的过程为:



H_2O 和 O_2 参与了硫化矿物氧化的全过程, Fe^{3+} 则在溶液呈酸性时对硫化矿物(MS)的氧化起主要作用。 Fe^{3+} 被硫化矿物(MS)还原成 Fe^{2+} 的过程, 也就是废水酸化和重金属离子溶出的过程。之后, Fe^{2+} 很快又被 O_2 氧化成 Fe^{3+} 再次参与硫化矿物的氧化反应, 使尾矿库废水进一步酸化、pH 值降低[4]。尾矿中的酸化作用不仅仅有硫化物的氧化作用, 而且还伴随有机物的氧化作用、中和作用、沉淀作用、结晶作用、胶

结作用、矿物交代蚀变作用、吸附作用、离子交换作用、生物作用。

所以，尾矿中酸产生的主要原因是硫化物的氧化，特别是黄铁矿和磁黄铁矿。

2. 尾矿酸性污染控制对策和技术

(一) 尾矿源头处置

在进行尾矿管理和处置时，阻止大气氧扩散进入尾矿，可以有效阻止尾矿中硫化物氧化，从而防止尾矿酸性排水和重金属对环境的污染。国外使用的处置技术包括水下处理、湿地处理系统、显微封闭技术、包覆技术、覆盖处理。值得注意的是，复垦绿化也可以阻止大气氧进入，使尾矿堆场或尾矿库处于无氧状态，有效防止尾矿造成的环境污染，这一技术方法特别适用于已废弃或关闭的矿山[5] [6]。

保持尾矿处于中性或偏碱性条件也可以有效阻止硫化物氧化，防止酸性水和重金属污染。常用的技术方法是碱性物质中和。使用的中和材料包括石灰、碳酸盐矿物。在停止使用的尾矿库或堆场多使用石灰。在正在使用的尾矿库多使用碳酸盐，方法是在排放尾矿时添加碳酸盐矿物以补充原矿石中碳酸盐矿物的不足。在废石场中使用电石渣覆盖技术，以隔绝废石与 H_2O 、 O_2 、的接触、中和 $[\text{H}^+]$ ，收到非常好的治理效果。理论和实践证明，密闭覆盖技术对根治废弃尾矿库的酸性废水和重金属离子污染是行之有效的[7] [8] [9]。

上述各种方法的有效性已在加拿大 Inco 公司的铜崖尾矿区得到检验。通过对尾矿库废水酸化与重金属离子溶出机理研究发现，造成尾矿库废水污染的主要因素是 H_2O 、 O_2 、 $[\text{H}^+]$ 参与了硫化矿物的氧化。阻止 H_2O 、 O_2 、与尾矿的接触，可以有效阻止尾矿中硫化矿物氧化，从而防止尾矿废水酸化和重金属离子的产生。

(二) 酸性废水处置

矿山酸性废水的处置方法主要分为中和法、微生物法和人工湿地法 3 种。

1) 中和法

中和法是最常用的方法，即向酸性废水中投加碱性中和剂(碱石灰、消石灰、碳酸钙、高炉渣、白云石等)，一方面使废水的 pH 值提高，另一方面废水中的重金属离子与中和剂发生化学反应形成氢氧化物沉淀、去除水体中的重金属离子[10] [11]。为了提高处理效果，中和法通常与氧化或曝气过程(如将 Fe^{2+} 转变为 Fe^{3+})相结合使用。王洪忠等人利用中和法对排入孝妇河的矿山酸性废水进行处理，出水 pH 值达到 7.5，硫酸根和总铁含量为微量[12]。

自然曝气法去除中和生成的 CO_2 的同时，使 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 和 Mn^{4+} ，使之在较低的 pH 值下形成氢氧化物沉淀与水分离，这样一方面防止出水产生“酸化”现象，另一方面可以减少石灰用量，节省处理费用[13]。

a) 石灰、石灰乳中和法。原理是以石灰石或石灰乳为中和剂来处理酸性废水。将石灰配制成石灰乳，投入反应沟流入反应池，对水中的 Fe^{2+} ，要进行曝气氧化，中和生成物 CaSO_4 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，在沉淀池中沉淀后除去。该方法具有就地取材，来源丰富，效能较好，反应快等特点，可适应酸性水水质和水量变化的要求。缺点是沉渣多，需及时处理。该方法的工艺流程是：酸性废水→搅拌池(投放石灰)→沉淀池(3~4 h)→排放。该方法的优点是操作方便，价格合理，适应性强；缺点是反应池中易形成较大颗粒沉淀于池底，降低石灰的利用率，泥渣量大，管理复杂。

b) 石灰石中和滚筒法。将石灰石置于滚筒内，由于滚筒的旋转，石灰石相互撞击摩擦，破坏其表面生成的难溶性 CaSO_4 膜，扩大酸性水与石灰石的接触面，使中和反应继续进行下去，生成的 CO_2 以及水中原有的 Fe^{2+} 要在曝气池曝气，促使 CO_2 从水中溢出，使 Fe^{2+} 离子氧化成 Fe^{3+} 离子，后者水解后生成沉淀除去。其工艺流程是：酸性废水 → 氧化池 → 石灰石中和滚筒 → 反应池 → 排放。该方法的优点

是滤料粒径、形状不受严格限制,可处理较高浓度的酸性废水,废水中悬浮物可不经沉淀池直接进入滚筒;但因大量 CaSO_4 在滚筒内壁出水口处产生沉淀,造成滚筒内径有效尺寸减少,堵塞出水口,故需经常清洗,降低设备利用率,且设备庞大,结构复杂,投资大,运转时噪声大。

c) 升流式变滤速膨胀中和法。将细颗粒石灰石或白云石装入圆锥体形的中和塔,水流自下而上通过滤料,滤速下部快上部慢,中和反应得以充分进行,出水含有 CO_2 经曝气装置吹脱后 pH 值升高, Fe^{2+} 离子也被氧化为 Fe^{3+} 离子去除。该方法的优点是设备简单,体积较小,处理效率高,泥渣量少;但因酸性矿井水中含有大量的悬浮物,容易造成升流式膨胀滤池的堵塞,故滤料粒径要求严格,同时,对于废水含酸浓度有限制,处理后 pH 值较低,需补充处理才能排放,处理设备不能超负荷运行。

用碳酸钙作沉淀剂,原料来源广且价廉。从矿山开采的石灰石,只需碎磨,就可直接使用。所以,在废水处理时,应大力推广应用。但必须指出,用碳酸钙作中和沉淀剂只适用于酸性废水,其所能达到的最终 pH 只有 5 左右,达不到一般排放要求。若要达到排放要求,应先用碳酸钙中和废水至 pH 为 4.5 左右,再改用氢氧化钙继续升高 pH,以达到排放要求[14] [15] [16]。

对于含硫酸根的酸性废水,国内多采用以石灰乳为中和剂的一段中和法,但是如果酸性废水的 pH 值较低,采用石灰乳为中和剂的一段中和法,一方面治理每吨废水需要的石灰量较大、处理成本较高;另一方面将产生大量的废渣,给环境带来潜在的二次污染风险。因此,国内许多学者试图探索新的处理方法,以达到在环境保护目标的基础上,减少处理成本、节约处理费用。

2) 微生物法

微生物法处理酸性废水就是利用硫酸盐还原菌(Sulfate Reducing Bacteria, SRB)通过异化硫酸盐的生物还原反应,将硫酸盐还原为 H_2S ,并利用某些微生物将 H_2S 氧化为单质硫[17] [18]。由于利用硫酸盐还原菌的微生物法处理酸性废水费用低,适用性强,无二次污染,还可以回收重要的物质—单质硫,因此受到环境工作者的广泛关注。在自然界,硫以三种形态存在:单质硫、硫化物和硫酸盐。三者化学和生物作用下相互转化,构成硫的循环。微生物法处理含硫酸盐酸性废水就是利用自然界中的硫循环反应原理,分三个阶段将硫酸根还原为单质硫[19]:

第一阶段在厌氧条件下,通过异化硫酸盐生物还原反应,利用硫酸盐还原菌(SRB)将硫酸还原为硫化物;

第二阶段利用光合硫细菌或无色硫细菌(CSB)将硫化物氧化为单质硫;

第三阶段为出水中单质硫的分离及回收问题。

微生物法处理废水已成为矿山治理酸性废水的前沿课题。国外应用微生物法处理矿山酸性废水的实例较多,如美国蒙大拿州对某矿山酸性废水建立(硫化还原菌)处理系统,出水 pH 值达到 7, Fe, Al, Cd 和 Cu 的去除率也较高。随着科学的进步,矿山酸性废水的处理技术不断得到新的发展,如湿地处理法、生物膜吸附处理法和生化材料过滤法等[20] [21]。

微生物技术的处理效果较好,成本也较低,且无二次污染,因而受到广泛关注。

3) 人工湿地

在一定长宽及地面坡降的洼地中,填充一定的填料(土壤砂碎石等)构建填料床,在填料床表层土壤中种植一些处理性能良好、成活率高、抗水性强、生长周期长、美观及具有经济价值的水生植物(如芦苇、席草、大米草等),构建一个独特的动植物生态环境,即湿地生态系统[22] [23]。

人工湿地是一项新型的污水处理技术,一般由人工基质(多为碎石)和生长在其上的水生植物组成,是一种独特的土壤-植物-微生物生态系统,植物、基质、微生物与自然生态系统通过物理、化学和生化反应三重协同作用净化污水[24]。

人工湿地由五个部分组成：各种透水性的基质、土壤砂碎石；适合在饱和水及厌氧基质中生长的植物，如芦苇；水体(在基质表面下或上流动的水)；无脊椎或脊椎动物；好氧或厌氧微生物种群。湿地系统的介质粘土、矿渣、砾石、土壤对酸性水中溶解性 Fe、悬浮物和 pH 值都有明显的处理效果。在建造湿地时,最好选择耐受性能好的植被品种，如香蒲、灯心草、宽叶香蒲等。

根据生物需氧情况可以分为：好氧湿地、厌氧湿地。

好氧湿地：酸性废水中的金属离子经氧化作用和水解作用以氢氧化物的形式沉淀下来；

厌氧湿地：酸性废水中的硫酸根在厌氧细菌的作用下被还原成硫化氢，硫化氢与金属作用生产不溶的技术硫化物[25] [26]。

人工湿地对矿区酸性水处理的三重作用机理：

- a) 是金属的氧化和水解；
- b) 是植物、藻类和有机质对金属的吸附和交换作用；
- c) 是厌氧细菌对硫酸盐的还原作用。

我国采用人工湿地生态工程技术处理铁矿排放的酸性废水已有成功经验，在人工湿地栽植植物后，酸性废水的 pH 值由 2.16 提高到 6.11，同时，Cu\Fe\Mn 三种金属离子去除率达 70.19%~99.18%，均达到国家排放标准。

所以，人工湿地是一个完整的生态系统，具有投资低、出水水质好、抗冲击力强、增加绿地面积、改善和美化生态环境、视觉景观优异、操作简单、维护和运行费用低廉等优点。在处理矿山酸性废水的同时，又可以用鲜花绿叶装饰环景。但是也由于人工湿地是一个完整的生态系统，造成的结果一是处理速率较慢，需要经过很长时间的流动和处理，才能达到出水标准；二是生态系统容易遭到恶劣环境的影响，对于污染严重的酸性废水，会造成生态系统的破坏，达不到出水标准。

(三) 酸性土壤处置

1) 石灰改良

石灰或者石灰石粉作为改良酸性土壤是一种传统而有效的材料，通过石灰或者石灰石粉与土壤中的水反应产生 OH^- ，再跟土壤中 H^+ 中和，并产生氢氧化物沉淀，从而迅速有效的降低酸性土壤的酸度，还能增加土壤中交换性钙的含量[27] [28] [29]。但是石灰或者石灰石粉在土壤剖面上的移动性很慢，大量或长期施用石灰或者石灰石粉不但会引起土壤板结而形成“石灰板结田”，而且会引起土壤钙、钾、镁 3 种元素的平衡失调而导致减产。在酸性土壤施用石灰或者石灰石粉还可能引起镁与铝水化氧化物的共沉淀，降低土壤溶液中的 Mg^{2+} 的活度和植物有效性。

2) 矿物和工业废弃物改良

除了利用石灰改良酸性土壤的传统方法外，近年来，随着矿产资源的开发和工业的发展，很多废弃物被研究发现对酸性土壤也有很好的改良效果，其主要原理是酸碱中和及提供微量元素，所以既能提高土壤 pH 值，又可以促进植物生长，如：白云石、磷石膏、粉煤灰等。

白云石粉的化学成分为 $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ 。通过离子交换，可以提高土壤 pH 值和交换性钙、镁的含量，显著提高作物产量，且有明显的酸性土壤改良效果。研究表明：在酸性土壤中施用白云石粉后第 2~6 季作物分别较对照增产 21.5%~48.6%、9.4%~16.2%、10.9%~44.6%、7.9%~22.0%和 6.6%~29.8% [30]。

磷石膏是磷复肥和磷化工行业的副产物，其质量和组成与所用的磷矿和工艺流程有关。磷石膏的主要成份是硫酸钙，还有一定量的 PO_4^{3-} 、 F^- 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 及未分解的磷矿粉和酸不溶物等。不但可以改良碱性土壤，还可以改良酸性土壤。磷石膏改良底层土壤可概括为“自动加石灰效应”，即土壤与硫酸钙反应后， SO_4^{2-} 和 OH^- 之间的配位基交换作用产生碱度。将“自动加石灰效应”具体化[31] [32]，从而可以提高土壤 pH 值。

粉煤灰是火力发电厂的煤经高温燃烧后由除尘器收集的细灰，尺寸从几微米到几百微米，粉煤灰的主要化学成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SO_3 等和未燃烧的碳，pH 值在 10~12 之间。通过粉煤灰中的 CaO 、 MgO 等碱性物质与土壤中的酸性物质发生中和反应，从而改良酸性土壤[33] [34]。

碱渣又称白泥，是制碱厂的废弃物，其主要成分为 CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 等，pH 值为 9.0~11.8，呈碱性。碱渣中含有大量农作物所需的 Ca 、 Mg 、 Si 、 K 、 P 等多种元素，因而可以用于土壤改良剂改良酸性、微酸性土壤，调整土壤的 pH 值，加强有益微生物活动，补充微量元素的不足，使农作物增产效果[35]。

木质素污泥是造纸制浆废水处理产生的沉淀固体物，其中含有大量的石灰质，与石灰、粉煤灰等具有某些相似的物理化学性质。木质素污泥具有较强的碱性，且含有多种植物生长需要的常量和微量元素及有机质。将其施用于酸性土壤，不仅能中和土壤的酸度，还能补充酸性土壤所缺乏的 Ca 等有益于植物生长的元素[36]。

3) 生物质炭改良

在厌氧或者绝氧的条件下对生物质材料进行热解，可以生成 CO_2 、可燃性气体、挥发性油类和焦油类物质，还有一种含碳丰富的固体物质，一般称之为生物质炭。生物质炭具有较高的 pH，添加到酸性土壤中可以提高土壤的 pH，降低土壤酸度；还可以加强土壤对有机质、土壤矿物及氮、磷等元素的保持力，从而提高酸性土壤的肥力[37] [38]。机理研究结果表明有机官能团和碳酸盐是生物质炭中碱的主要存在形态。采用 X-射线衍射分析和 CO_2 容量法的测定结果表明，生物质炭中碳酸盐的总量和结晶态碳酸盐的含量均随其制备温度的升高而增加，碳酸盐对生物质炭总碱含量的贡献也随制备温度的升高而增加。红外光声光谱的研究结果表明，生物质炭表面含有丰富的含氧官能团，如羧基和酚羟基等，在较高 pH 下这些官能团以阴离子形态存在，它们能与酸性土壤中的 H^+ 发生缔合反应，中和土壤酸度。

4) 有机肥改良

绿肥分解产生的有机阴离子与土壤表面羟基的配位交换反应将 OH^- 释放至土壤溶液中，可以中和土壤酸度[39]。

施用草木灰对酸性贫瘠土壤主要有两方面的作用：一是草木灰在土壤中会产生石灰效应，使土壤的 pH 值大幅度升高， Ca 、 Mg 、无机碳、 SO_4^{2-} 含量增加，而 SO_4^{2-} 和 OH^- 之间的配位基交换作用也提高了碱度；另一方面，草木灰能增加土壤养分含量，特别是 K 含量丰富能极大提高土壤钾含量。

5) 植物物料改良

某些植物物料对土壤酸度具有明显的改良作用，这种改良作用不仅仅是通过增加土壤的有机质来增加土壤 CEC，而且由于植物物料或多或少含有一定量的灰化碱，能对土壤酸度起到直接的中和作用，可在短期内见效。在一定条件下，豆科类植物物料比非豆科类植物物料的改良效果更佳，如将羽扇豆的茎和叶与酸性土壤一起培养，其 pH 增加的最大值可达 1~2 个单位。豆科植物物料对土壤酸度具有较好改良效果的原因与这类植物生长过程中其根系对无机阴、阳离子的不平衡吸收有关，由于生物固氮作用，豆科植物在生长过程中其根系会从土壤中大量吸收无机阳离子如 Ca 、 Mg 、 K 等，导致植物体内无机阳离子的浓度高于无机阴离子的浓度，为保持植物体内电荷平衡，植物体内有机阴离子浓度增加，这些有机阴离子是碱性物质，当植物物料施于酸性土壤时，这些碱性物质会很快释放，并中和土壤酸度[40]。测定结果表明，羽扇豆茎和叶所含灰化碱的量是小麦秸秆的 7 倍多。豆科类植物物料能够提高土壤 pH 的另一个原因是有机氮的矿化，豆科植物的固氮作用使其体内积累了大量的有机氮，有机氮的矿化反应是一个消耗质子的过程，这一过程也使土壤 pH 升高。但矿化反应产生的铵离子的硝化反应是一个释放质子的过程，这一过程将抵消豆科植物物料对土壤酸度的中和作用。

因此, 豆科植物物料对酸性土壤的改良效果决定于上述灰化碱、矿化反应和硝化反应等 3 方面作用的总和, 而植物物料中无机阳离子的浓度和总氮的含量起着决定性作用。

我国农村废弃的植物物料资源丰富, 如能利用这些植物物料资源, 开发绿色环保型酸性土壤改良剂, 一方面可以解决农业生产对改良剂的需求和农村废弃物的处置问题, 另一方面还节约了农业的成本, 也符合目前我国建设资源节约型社会的总体方针。

3. 结语及展望

尾矿库酸性污染是当前矿山开采造成的主要环境问题, 其有效治理也是广大科技工作者面临的紧迫性问题。尾矿库的源头治理难度大, 周期长, 投入成本高; 酸性水处置方法多样, 但都存在一定的缺陷; 酸性土壤改良处置虽然快, 但存在二次污染的风险。尾矿库源头复垦, 酸性渗出液采用化学中和+人工湿地的综合治理方案是今后研究和发展的方向, 其基本思路是有机糅合化学中和和人工湿地的处理优点, 通过酸性中和先快速将酸性较强的尾矿库渗出液处置到 pH4~5 的状态, 而且不会产生较多的硫酸钙残渣, 大大降低二次污染; 同时 pH4~5 的水对人工湿地生态不会造成威胁, 人工湿地的处理效率大大提高, 出水速率加快, 确保出水 pH6~8, 达到地表水排放标准, 不会对土壤造成污染, 降低对周围居民健康的危害。

基金项目

江苏省青年基金项目(编号: BK20160155)。

参考文献 (References)

- [1] 宋斌, 赵瑞先, 田园. 矿山地质环境治理恢复方案建议[J]. 中国科技信息, 2012(16): 35.
- [2] 杨涛, 朱承斌. 硫铁矿矿山地质环境破坏问题及工程治理对策[J]. 四川地质学报, 2014, 34(增刊): 178-182.
- [3] 杨根祥, 沙日娜, 乌云高娃, 等. 酸性矿山废水的污染与治理技术研究[J]. 西部探矿工程, 2000(6): 26-28.
- [4] 阳正熙. 矿区酸性废水的成因及其防治[J]. 世界采矿快报, 1999(10): 42-45.
- [5] 田文旗, 薛剑光. 尾矿库安全技术与管理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 102-105.
- [6] 常前发, 王运敏. 中国尾矿综合利用的现状与对策[J]. 中国矿业, 1999(2): 23-26.
- [7] 罗守敬. 矿区土地复垦与生态重建技术研究[J]. 分析研究, 2008, 3(3): 26-28.
- [8] 李华, 王湘桂, 李海良. 我国矿山土地复垦及生态重建[J]. 矿业快报, 2008(8): 8-9; 31.
- [9] 周锦华, 胡振琪, 高荣久. 矿山土地复垦与生态重建技术探讨现状与展望[J]. 金属矿山, 2007, V37(10): 45-47.
- [10] 饶运章, 徐水太, 张见. 含硫矿山酸性废水及其金属离子污染防治方法的探讨[J]. 中国钨业, 2004, 19(4): 33-35.
- [11] 祝玉学. 矿山酸性水的处理[J]. 国外金属矿山, 1998(5): 62-68.
- [12] 王洪忠. 孝妇河废水处理方法的研究[J]. 建材新科技, 1998(1): 4-8.
- [13] 胡文容, 高廷耀. 酸性矿井水的处理方法和利用途径[J]. 煤矿环境保护, 1994, 8(1): 17-21.
- [14] 邵剑, 曹首英. 煤矿矿区环境污染现状及控制对策[J]. 工业安全与环保, 2002, 28(10): 26-28.
- [15] 陈海峰. 酸性矿井水的成因和防治对策[J]. 煤矿环境保护, 1992, 7(1): 7-10.
- [16] 刘志勇, 陈建中, 康海笑, 等. 酸性矿山废水的处理研究[J]. 四川环境, 2004, 23(6): 50-57.
- [17] 钱泽澎. 硫酸盐对厌氧消化的影响[J]. 中国沼气, 1994, 12(3): 3-6.
- [18] 赵宇华, 叶央芳, 刘学东. 硫酸盐还原菌及其影响因子[J]. 环境污染与防治, 1997, 19(5): 41-43.
- [19] 关卫省, 朱浚黄. 厌氧生物法处理富硫酸盐有机废水的新进展[J]. 中国沼气, 1995, 13(2): 1-3.
- [20] 竺建荣, 胡纪萃, 顾复声. 硫酸盐还原作用对厌氧消化过程的影响与控制[J]. 中国沼气, 1993, 11(1): 13-18.
- [21] 李亚新, 苏冰琴. 硫酸盐还原菌和酸性矿山废水的生物处理[J]. 环境污染治理技术与设备, 2000, 1(5): 1-11.

- [22] 姚运先, 王艺娟. 人工湿地在酸性矿山废水处理中的应用[J]. 湖南有色金属, 2005, 21(4): 26-29.
- [23] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 51-59.
- [24] 张宗元, 赵志怀, 陈宇松. 人工湿地处理酸性煤矿废水的机理研究及展望[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(5): 158-160.
- [25] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 51-59.
- [26] 唐述虞. 铁矿酸性排水的人工湿地处理[J]. 环境工程, 1996, 14(4): 3-7.
- [27] 孟赐福, 傅庆林, 水建国, 等. 浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 129-136.
- [28] 王敬华, 孔小玲. 施用石灰石粉对红壤酸度的影响[J]. 中国科学院红壤生态实验站. 红壤生态系统研究(第一集). 北京: 科学出版社, 1992: 141-145.
- [29] 王文军, 郭熙盛, 武际, 等. 施用白云石对酸性黄红壤作物产量及化学性质的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 723-726.
- [30] 朱洪霞, 狄彩霞, 王正银, 等. 钙对酸性土壤不同品种茼蒿产量和品质的效应[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(4): 456-463.
- [31] 沈永金, 章守陶. 磷石膏在农业上的应用[J]. 上海化工, 1996, 21(5): 8-42.
- [32] 叶厚专, 范业成. 磷石膏改良红壤的效应[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(2): 181-185.
- [33] 刘丽霞, 辛克敏, 张德美, 等. 粉煤灰的理化性质及其对粘土影响研究初报[J]. 贵州科学, 1998, 16(1): 62-68.
- [34] 万贵怡, 周茂林, 李玲, 等. 粉煤灰改良红壤性中低产田(地)的实验研究[J]. 江西农业科技, 1994(4): 30-34.
- [35] 王艳彦, 梁英华, 芮玉兰. 碱渣的综合利用发展状况研究[J]. 工业安全与环保, 2005, 31(2): 29-31.
- [36] 穆环珍, 何艳明, 杨问波, 等. 制浆废液处理污泥改良酸性土壤的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 508-511.
- [37] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779-785.
- [38] 陈福兴, 姚造华, 徐明岗, 等. 红壤复合改良剂研制及其功效[J]. 土壤肥料, 2000(1): 42-44.
- [39] 郭荣发, 廖宗文, 陈爱珠. 活化磷矿粉在砖红壤上的施用效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(3): 233-235.
- [40] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(1): 23-27.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org