基于沟渠库厂联合运用的金属矿区酸性废水防控措施研究

廖建文[1], 陈三雄[1], 谢江松[1], 张卫根[2], 程 勇[3], 汪新波[1], 彭志祥[1], 常 进[1]

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610;
2. 广东省乐昌峡水利枢纽管理处, 广东 韶关 512200; 3. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘 要: [目的] 金属矿区酸性矿山废水外排防控一直是个难题。探索酸性矿山废水源头控制与末端治理相结合的防控技术体系,为金属矿区酸性废水的防控提供新的解决思路。[方法] 以广东省大宝山矿区为研究案例,坚持"源头防控,末端治理"的原则,构建基于沟渠库厂联合运用的酸性废水综合防控技术体系。[结果] 建设截排水系统实施雨污分流,从源头上减少酸性废水产生量;清淤腾空拦泥库调蓄库容 2.81×10^6 m^3,并建设 4.50×10^4 t/d 处理规模的污水处理厂,对酸性废水进行末端治理,达到在 5 a 一遇降雨条件下丰水期酸性废水不外排的防控目标。[结论] 通过沟(截水沟)、渠(排水渠)、库(拦泥库)、厂(污水处理厂)的联合运用,可以控制酸性矿山废水在设计标准下不外排,该技术体系可用于类似矿山酸性废水的治理。

关键词: 雨污分流; 酸性废水; 清淤扩容; 污水处理厂; 金属矿区

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2018)05-0288-05 **中图分类号**: X703, X522

文献参数: 廖建文, 陈三雄, 谢江松, 等. 基于沟渠库厂联合运用的金属矿区酸性废水防控措施研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 288-292. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.046. Liao Jianwen, Chen Sanxiong, Xie Jiangsong1, et al. Prevention and control measures of acid mine drainage based on combined utilization of ditches, mud storehouse and sewage treatment plant[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 288-292.

Prevention and Control Measures of Acid Mine Drainage Based on Combined Utilization of Ditches, Mud Storehouse and Sewage Treatment Plant

LIAO Jianwen[1], CHEN Sanxiong[1], XIE Jiangsong[1],
ZHANG Weigen[2], CHENG Yong[3], WANG Xinbo[1], PENG Zhixiang[1], CHANG Jin[1]

(1. *China Pearl River Water Resources Planning Designing & Surveying Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong* 510610, *China*; 2. *Management Office of Lechang Gorge Water Control Project in Guangdong, Shaoguan, Guangdong* 512200, *China*; 3. *Jiangsu Institute of Geological Investigation and Research, Nanjing, Jiangsu* 210008, *China*)

Abstract: [Objective] The discharge of acid mine drainage in metal mining area causes serious environmental pollution, and is difficult to control. This study designed and implemented the technology system of acid mine drainage control based on the combination of source controlling and terminal treatment, which provided a new solution for the treatment of acid mine drainage. [Methods] Based on the principle of "source control and terminal treatment", a comprehensive prevention and control technology system for acid mine drainage was established in Dabaoshan mining area of Guangdong Province. [Results] A cut-off drainage system was established to implement rainwater and sewage diversion, and to reduce the amount of acid mine drainage generated from the source. The storage capacity of the mud tank was 2.81×10^6 m^3. The new sewage treatment plant could process acid wastewater as much as 4.50×10^4 t/d. The mine acid wastewater treatment system established in this study can achieve the goal of prevention and control in acidic wastewater during the rainy

收稿日期: 2018-05-24 **修回日期**: 2018-06-15
资助项目: 广东省水利厅政府采购项目"广东省矿山开发水土流失治理及生态修复研究"(GPCGD132197FG083F1)
第一作者: 廖建文(1968—),男(汉族),广东省梅州市人,高级工程师,主要从事水土保持研究。E-mail: Ljw7054@126.com。
通信作者: 陈三雄(1976—),男(汉族),湖北省黄冈市人,博士,教授级高工,主要从事南方水土流失治理、矿区生态修复研究。E-mail: chinacsx409@126.com。

season. [Conclusion] Based on combined utilization of ditch (cutting ditch), canal (drainage), reservoir (blocking mud), and plant (sewage treatment plant), it is possible to achieve the goal of prevention and control in acidic wastewater under certain conditions. The technical system constructed in this study can be used for acid mine drainage treatment in similar mining areas.

Keywords: rain and sewage diversion; acid mine drainage; silt dredging; sewage treatment plant; metal mines

中国金属矿主要为硫化矿,采选过程中残留的金属硫化物暴露在氧化环境中,在水、空气和生物的共同作用下会产生大量含重金属离子的酸性矿山废水(acid mine drainage, AMD)[1-2]。酸性矿山废水具有pH值低、氧化性强、重金属离子浓度大、成分复杂、污染面广、影响时间长等特点[3-4],对环境影响极大[5-7],给人们的健康安全构成巨大风险[8-9],酸性矿山废水的有效防控是一个非常重要的研究课题。目前国内对酸性矿山废水的防控多注重末端治理,常用处理技术有中和法、沉降法、吸附法等[10],但这些末端处理方法都存在运行处理费用高昂、产生二次污染等问题。近些年来,诸如雨污分流、覆盖法、表面钝化处理法等酸性矿山废水源头控制技术得到了重视[11-12],可从源头上减少酸性废水的形成,但这些源头控制技术还不成熟,在工程上尚未得到广泛应用。

广东省大宝山矿位于粤北山区,始建于1958年,是一座大型多金属硫化物伴生矿床。经过近60 a露天开采,加上缺乏有效管制的民采,导致大量含重金属离子的酸性废水进入下游水系和农田,给周围环境带来严重污染,对该地区人群健康造成威胁,其下游的上坝村是有名的"癌症村",已引起广泛关注和报道[13-15]。据林初夏等[16-17]的调查和研究,大宝山矿区外排的酸性废水主要源自李屋拦泥库,李屋拦泥库外排酸性废水的治理已成为一项重要而紧迫的任务。本文拟对广东省大宝山矿李屋拦泥库酸性废水防控策略进行研究,探讨将酸性矿山废水源头控制与末端治理技术联合应用的途径,以期为矿区外排酸性废水的治理提供科学依据。

1　研究区概况

广东省大宝山矿位于韶关市曲江区沙溪镇,1958年建矿,1966年建成投产。大宝山矿是南岭成矿带的主要组成部分,蕴藏有铁、铜、硫、铅、锌、钼、钨等多种金属矿产资源。矿区地处南岭低山区,属中亚热带季风气候,多年平均气温约20.3 ℃,多年平均降雨量约为1 673 mm。矿区出露地层绝大多数为晚古生代沉积岩系,地带性土壤类型为红壤,地带性植被类型为典型常绿阔叶林。

李屋拦泥库位于大宝山矿东南部,距矿部约5.0 km。拦泥坝最大坝高49.0 m,库容约2.25×10^7 m^3,主要作用是拦挡露天采场排土可能引发的泥石流,1978年建成投入使用,2005年对拦泥坝进行了加高,并在拦泥库上游新建了梯级钢筋石笼拦泥坝。工程建成及后续的加高改造,在一定程度上控制了矿区水土流失和酸性废水的外排。李屋拦泥库区为一狭长"V"型山谷,地形高程在330～1 022 m,平均坡度40°～50°,局部地段达60°～80°。在拦泥库上游,矿区露采的剥离弃土由上向下往李屋拦泥库方向排土,顺坡堆放在沟谷,加上20世纪90年代大宝山一带的民采激增,在拦泥库集水区内乱采乱挖乱堆乱放,经几十年的径流冲刷,巨量泥沙进入下游的拦泥库,致使库容已基本淤满。库内堆积物中残留有金属硫化物(主要为黄铁矿FeS_2),氧化后形成大量酸性废水,同时将有毒有害重金属释放出来。由于缺少拦泥库的拦蓄,一遇降雨,酸性废水便通过拦泥库溢洪道下泄进入下游,造成酸性水危害,是大宝山矿地区最主要的污染源[18],必须进行治理。

2　酸性废水防控总体思路

李屋拦泥坝上游控制集水面积约13.32 km^2,根据周边凉桥雨量站1982年以来日雨量系列资料分析,库区5 a一遇年降雨量$H_{年.p=20\%}$为2 107.48 mm,10 a一遇年降雨量$H_{年.p=10\%}$为2 263.12 mm,径流系数根据库区下垫面条件确定为0.7,推算得5 a一遇径流量$W_{年.p=20\%}$为1.965×10^7 m^3,10 a一遇径流量$W_{年.p=10\%}$为2.11×10^7 m^3。如果这些降雨径流全部入库将在拦泥库内形成酸性废水,处理这些废水的成本极高。库区内含酸性物质的堆积物主要集中在"V"型山谷的谷底。而山谷两侧山坡为未被采矿破坏的林地,植被生长良好,该区域径流在入库之前尚未污染,可以将该区域清水截至拦泥库下游天然沟道,实现雨污分流。剩余径流将进入李屋拦泥库后受到污染形成酸性废水,对于这部分废水,通过拦泥库的调蓄后进入污水处理厂处理,实现达标排放。

基于以上的分析,外排酸性废水治理的总体思路是:坚持"源头防控,末端治理"的原则,建设截排水工程对李屋拦泥库集水区地表径流进行雨污分流,在最大限度减少酸性废水产生量的基础上,合理利用拦泥

库拦蓄调节作用和污水处理厂的末端处理，通过沟（截水沟）、渠（排水渠）、库（拦泥库）、厂（污水处理厂）的联合运用，对酸性废水进行控制和处理，达到一定标准下废水不外排的目的。酸性废水防控技术体系见图 1。

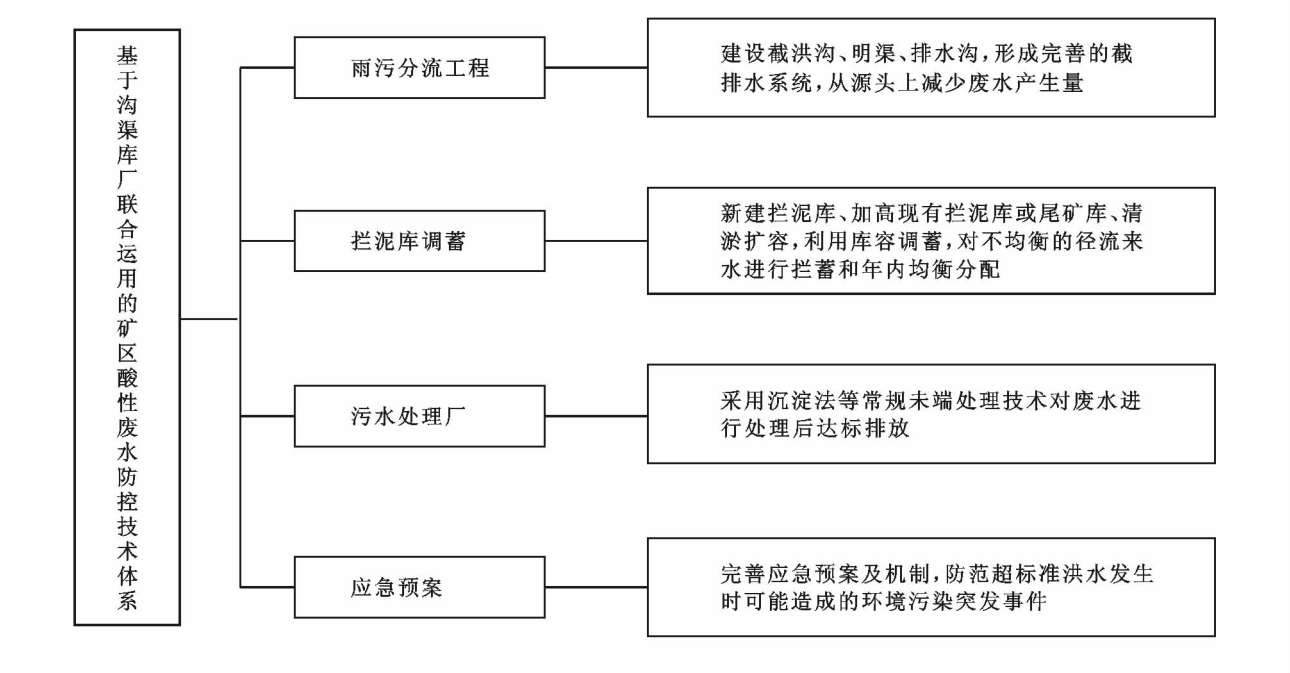


图 1 研究区酸性废水防控技术体系

3 防控技术体系及工程规模

3.1 雨污分流

根据对李屋拦泥库集水区现状的调查，污水区主要包括“V”型山谷谷底排土覆盖范围、民采破坏及拦泥库库面范围，面积约 7.33 km^2，此范围内的污水汇流到李屋拦泥库，后经污水处理厂处理；清水区包括“V”型山谷两侧山坡植被生长良好的区域，面积约 5.99 km^2。此范围内的清水经截洪沟、排洪渠引至李屋拦泥库下游河道。

工程区域无实测流量资料，雨污分流工程的洪水计算采用设计暴雨推求法计算洪峰流量，设计标准为一年一遇，采用明渠均匀流公式计算截排水工程水力断面要素。雨污分流工程包括建设 1#—11#截洪沟、明渠、1#—14#截洪坝、排洪主隧洞、1#—5#竖井，形成完善的截排水系统，将清水区降雨径流截流后排至库区下游沟道。雨污分流主要工程断面及过流情况见表 1。

表 1 研究区雨流分污工程基本情况

项 目	纵坡 I	糙率 n	底宽 B/m	设计侧墙高度 $H_{墙}$/m	设计水深 $H_{水}$/m	过流面积 A/m^2	湿周 X/m	水力半径 R/m	谢才系数 C/($m^{0.5}\cdot s^{-1}$)	最大过流流量 Q/($m^3\cdot s^{-1}$)
1#截洪沟	0.010	0.014	0.8	0.8	0.8	0.64	2.4	0.27	57.31	1.89
2#截洪沟	0.015	0.014	0.6	0.6	0.6	0.36	1.8	0.2	54.62	1.08
3#截洪沟	0.027	0.014	0.6	0.6	0.6	0.36	1.8	0.2	54.62	1.45
4#截洪沟	0.010	0.014	2.2	2.0	2.0	4.40	6.2	0.71	67.46	25.01
5#截洪沟	0.020	0.014	1.4	1.4	1.4	1.96	4.2	0.47	62.91	11.91
6#截洪沟	0.020	0.014	1.1	1.1	1.1	1.21	3.3	0.37	60.43	6.26
7#截洪沟	0.015	0.014	1.1	1.1	1.1	1.21	3.3	0.37	60.43	5.49
8#截洪沟	0.015	0.014	0.6	0.6	0.6	0.36	1.8	0.20	54.62	1.08
9#截洪沟	0.010	0.014	1.3	1.3	1.3	1.69	3.9	0.43	62.14	6.91
10#截洪沟	0.010	0.014	1.3	1.0	1.0	1.30	3.3	0.39	61.16	4.99
11#截洪沟	0.010	0.014	0.7	0.7	0.7	0.49	2.1	0.23	56.04	1.33
排洪渠	0.015	0.014	1.6	1.5	1.5	2.40	4.6	0.52	64.09	13.61

3.2　拦泥库调蓄及污水处理厂

拦泥库基本淤满,已无调蓄能力,为减小下游污水处理厂规模,需进行扩容增加其调蓄能力。扩容最直接有效的方法是加高拦泥坝,但拦泥坝西侧有一国道通过,而且拦泥坝于 2005 年已进行过加高,在国道不改造的情况下拦泥坝已无加高空间,只能采用清淤的方法来腾出库容,清淤腾库时可分片分区采用绞吸式清淤船进行施工。清淤扩容后,进入拦泥库的不均衡径流经拦泥库的拦蓄调节,由管道均匀排至污水处理厂处理,污水处理厂采用"二级混凝沉淀反应"工艺,处理污水中的 Mn,Zn,Cu,Fe 等金属污染物及其他污染物,废水处理后排入下游天然河道。

考虑到当前投入水平和经济承受能力,采用 5 年一遇降雨条件下污水不外排作为设计标准。清淤扩容及污水处理厂规模由径流调节计算结果确定,径流调节的原理为水量平衡原理,水量平衡方程为:

$$\Delta V=(Q_{入}-q_{出})\Delta t。$$

式中:$Q_{入}$——计算时段 Δt 内的入库流量(m^3/s);$q_{出}$——计算时段 Δt 内水库出库流量(m^3/s),包括用水量、蒸发损失量、渗漏损失量等;ΔV——计算时段 Δt 内蓄水量的变化值。

参照年调节水库兴利库容的计算方法,根据李屋拦泥库设计代表年来水过程,扣除雨污分流的清水量、水库蒸发和渗漏等损失水量,结合设定的用水量进行径流调节(完全年调节)计算,求得的兴利库容即为清淤扩容量,设定的用水量即为污水处理厂规模。依据径流调节计算结果,要保证 $p=20\%$ 典型年丰水期酸性废水不外排,清淤扩容库容为 2.81×10^6 m^3,污水处理规模为 4.50×10^4 t/d,污水处理厂年运行天数为 312 d。即在建设清污分流工程的基础上,清淤腾空拦泥库调节库容 2.81×10^6 m^3,建设处理规模为 4.50×10^4 t/d 的污水处理厂。

4　讨 论

通过雨污分流工程的实施,最大截流能力约为 35 m^3/s,年均截流量约 3.80×10^6 m^3,年均截流量约占库区总径流量的 45%,大大减少了酸性废水产生量。理论上讲,雨污分流截流量越大,未端治理的污水量就越小,外排水防控的标准就可越高,但截流工程规模的确定受集水区地形条件、施工和投资等多方面的限制。文中提出的雨污分流工程规模按能截走一年一遇洪水计算确定,是基于地形条件、投资和已有截排水工程现状等多因素的综合考虑。如按满足更高过流标准实施建设,如 20 年一遇洪水过流要求确定截洪沟规模,以 4# 截洪沟为例,断面尺寸为宽 4.1 m,高 2.1 m。以工程区现有地形,除本身施工难度较大外,还会产生较大挖填方量,形成高陡边坡,可能引发水土流失甚至是滑坡等地质灾害。因此,单一扩大截洪沟断面来提高外排酸性废水的防控标准不可取。

拦泥库位于山区,山区洪水的特点是暴涨暴落,流量大,历时短,径流在年际年内的分布极不均衡。雨污分流后,入库径流通过拦泥库的库容调节,将洪水期产生的短历时高洪量酸性废水蓄存在拦泥库中,通过污水管道均衡的、有计划排至污水处理厂处理。由于拦泥库调节库容及污水处理厂规模采用完全年调节水库兴利库容的计算方法确定,显而易见,经拦泥库调蓄后,不均衡径流来水按照污水处理厂规模重新进行了年内分配,重新分配后的流量要远小于洪峰流量,且全年不发生弃水(即达到完全处理),不仅降低了短历时暴雨下大规模处理高洪量废水的风险,也减小了污水处理厂建设规模和投入。此外,为进一步减轻污水处理厂的处理压力,还可对拦泥库蓄滞的酸性废水采取石灰中和法进入预处理。

本文提出的基于沟渠库厂联合运用的李屋拦泥库外排水防控方案,可以达到在 5 a 一遇降雨条件下丰水期酸性废水不外排的防控目标。然而,由于洪水发生是一个随机事件,需应对可能遭遇的超标准洪水。可在下游建设应急坝,并设置抛洒石灰等中和剂和絮凝剂的作业平台,同时完善应急预案及机制,防范超标准洪水发生时可能造成的环境污染突发事件。

5　结论与展望

广东省大宝山矿外排酸性废水已对下游的农田和水系造成污染,必须进行治理。本文构建的大宝山矿酸性废水综合防控技术体系包括雨污分流、拦泥库调蓄、污水处理 3 个部分。确定防控标准后,采用通用的洪水、径流调节等水文计算方法比选确定各部分的工程规模,通过沟(截水沟)、渠(排水渠)、库(拦泥库)、厂(污水处理厂)的联合运用,可以控制酸性废水在设计标准下不外排。该技术体系的基础是雨污分流,从源头上减少酸性废水产生量;核心是拦泥库调蓄,对不均衡的径流来水进行拦蓄和年内均衡分配;关键是污水处理厂,最终的废水通过沉淀法等常规未端处理技术进行处理后达标排放。

据统计[19],在中国每开采 1 t 矿石,废水的排放量约为 1 m^3,全国酸性矿山废水年排放量约为 3.60×10^9 t,占全国工业废水总排放量的 10%左右,而处理率却仅为 4.28%[20],这与"绿水青山就是金山银

山”的生态战略思想极不相称，酸性矿山废水治理任务艰巨。本研究提出的将酸性矿山废水源头控制技术与末端治理技术相结合的综合技术体系，为金属矿区酸性矿山废水的防控提供了一个全新的解决思路，可用于类似矿山酸性废水的治理。在应用本技术体系时应注意：①防控标准应根据酸性废水污染现状、经济水平、施工难度等综合确定，并制定超标准洪水条件下的应急预案；②末端污水处理厂的规模与雨污分流、拦泥库调蓄库容直接相关，雨污分流工程规模和拦泥库调蓄库容越大，末端污水处理厂的规模就越小。由于雨污分流工程、拦泥库均是一次性投资，而污水处理厂的运行费用较高且是长期投入，在可能的条件下，应尽量提高雨污分流工程规模和拦泥库调蓄库容；③调蓄库容可根据矿山条件采用新建拦泥库、加高现有拦泥库或尾矿库、清淤扩容等多种方法实现，新建拦泥库、加高拦泥库或尾矿库必须按照行业规程规范进行设计、施工和管理，确保安全运行。

[参 考 文 献]

[1] 倪师军，李珊，李泽琴，等. 矿山酸性废水的环境影响及防治研究进展[J]. 地球科学进展，2008，23(5)：501-508.

[2] 李海东，沈渭寿，司万童，等. 中国矿区土地退化因素调查：概念、类型与方法[J]. 生态与农村环境学报，2015，31(4)：445-451.

[3] 张春辉，吴永贵，付天岭，等. 酸性矿山废水对稻田上覆水理化特征及氮转化的影响[J]. 环境科学与技术，2016，39(1)：114-120.

[4] 熊琳媛. 硫化矿山酸性废水资源综合回收技术及工艺研究[D]. 江西 赣州：江西理工大学，2013.8.

[5] 朱继保，陈繁荣，卢龙，等. 广东凡口 Pb-Zn 尾矿中重金属的表生地球化学行为及其对矿山环境修复的启示[J]. 环境科学学报，2005，25(3)：414-422.

[6] 阎思诺，冯秀娟. 金属矿区土壤治理研究进展[J]. 有色金属科学与工程，2010，1(3)：67-71.

[7] 刘敬勇. 矿区土壤重金属污染及生态修复[J]. 中国矿业，2006，15(12)：66-69.

[8] 李海东，沈渭寿. 金属和非金属矿山土地退化因素调查[J]. 生态与农村环境学报，2016，32(3)：351-354.

[9] 徐师，张大超，吴梦，等. 硫酸盐还原菌在处理酸性矿山废水中的应用[J]. 有色金属科学与工程，2018，9(1)：92-97.

[10] 杨群，宁平，陈芳媛，等. 矿山酸性废水治理技术现状及进展[J]. 金属矿山，2009(1)：131-134.

[11] 吴义千，占幼鸿. 矿山酸性废水源头控制与德兴铜矿杨桃坞、祝家废石场和露天采场清污分流工程[J]. 有色金属，2005，57(4)：101-105.

[12] 郑先坤，冯秀娟，王佳琪，等. 酸性矿山废水的成因及源头控制技术[J]. 有色金属科学与工程，2017，8(4)：105-110.

[13] 付善明，周永章，张澄博，等. 河流沿岸环境对粤北大宝山矿废水锰污染的环境响应[J]. 中山大学学报：自然科学版，2007，46(2)：92-96.

[14] 邹晓锦，仇荣亮，周小勇，等. 大宝山矿区重金属污染对人体健康风险的研究[J]. 环境科学学报，2008，28(7)：1406-1412.

[15] 吴永贵，林初夏，童晓立，等. 大宝山矿水外排的环境影响(Ⅰ)：下游水生生态系统[J]. 生态环境，2005，14(2)：165-168.

[16] 林初夏，卢文洲，吴永贵，等. 大宝山矿水外排的环境影响(Ⅱ)：农业生态系统[J]. 生态环境，2005，14(2)：169-172.

[17] 林初夏，黄少伟，童晓立，等. 大宝山矿水外排的环境影响(Ⅲ)：综合治理对策[J]. 生态环境，2005，14(2)：173-177.

[18] 陈清敏，张晓军，胡明安. 大宝山铜铁矿区水体重金属污染评价[J]. 环境科学与技术，2006，29(6)：64-65，71.

[19] 赵玲，王荣锌，李官，等. 矿山酸性废水处理及源头控制技术展望[J]. 金属矿山，2009(7)：131-135.

[20] 王宁宁. 酸性矿山废水的危害及处理技术研究进展[J]. 环境与发展，2017，29(7)：99-100.