

矿区初期径流污染物特征及生态化净化处置技术研究

张彩琳

天津市丹晟环安科技有限公司 天津 300457

摘要: 矿区初期径流是降雨冲刷采矿场、排土场、尾矿库及运输道路形成的携污染径流,具有突发性强、污染负荷高、成分复杂等特点。本文系统分析矿区初期径流污染物的来源、类型及时空分布特征,阐明重金属、悬浮物、酸性废水及有机物在多介质界面的迁移转化规律,综述沉淀塘、人工湿地、生态浮岛、生物滞留系统及矿渣基质过滤等生态化净化技术,分析各技术的适用条件与处理效果。组合式生态净化系统对矿区初期径流具有良好的处理效果,可为矿区雨水资源化利用和水环境改善提供技术支撑。

关键词: 矿区; 初期径流; 污染物特征; 生态净化; 水环境治理

引言: 矿区开发产生大量裸露采场、排土场和尾矿库,降雨冲刷形成的初期径流携带高浓度悬浮物、重金属及酸性物质,对周边水体造成严重污染。与城市初期雨水不同,矿区初期径流具有污染物浓度高、毒性强、生态风险大的特点,其污染负荷可占矿区降雨径流总负荷的 60%~80%。当前治理多以简单沉淀为主,处理效率低且缺乏生态友好性。生态化净化技术因绿色、低碳、可持续的优势,逐步成为重要发展方向。本文从污染物特征分析入手,系统梳理各类生态化净化技术的原理与应用进展,为矿区水环境治理提供理论依据和技术参考。

1 矿区初期径流的形成过程与影响因素

1.1 初期径流的形成机制

矿区初期径流是降雨初期形成的表层径流,受降雨特征、下垫面条件和前期干燥期长度共同控制。降雨初期,裸露地表堆积的细颗粒物在雨滴击溅和径流冲刷下被剥离、分散并随水迁移,形成高浓度含沙水流。其过程符合“冲刷—运移—输出”三阶段模式,污染物浓度通常在产流后 10~30 分钟达到峰值,随后随径流稀释下降,呈现典型“初期冲刷效应”。冲刷强度受降雨强度、坡度、植被覆盖度等因素影响,前期干燥期越长,污染负荷越高。理解初期径流形成机制是开展污染控制和治理的前提。

1.2 矿区下垫面条件的特殊性

矿区下垫面在物质组成和结构上显著区别于城市区域。采矿场和排土场由松散堆积物构成,降雨时形成“表层径流+壤中流”双重产流模式。尾矿库细粒尾砂富含硫化物和重金属,氧化后产生酸性排水,降雨淋溶

携带高浓度重金属进入水体。运输道路沉积物以矿粉为主,重金属含量极高。此外,历史遗留废弃地表层土壤严重酸化、植被覆盖度低,加剧污染物释放。矿区下垫面复杂性使得径流污染物的来源识别和负荷估算面临较大挑战,需针对不同类型下垫面开展精细化研究,为后续治理提供准确依据^[1]。

1.3 影响污染物释放的关键因素

矿区初期径流污染物释放受多种因素耦合控制。降雨特征是直接外部驱动力:强度决定冲刷能力,雨量影响稀释程度,间隔决定累积时间,高强度短历时暴雨产生的初期冲刷效应最为严重,污染物浓度可达低强度降雨的 3~5 倍。温度影响硫化物氧化速率和重金属溶解度,高温季节释放强度增加。pH 值控制重金属溶解度,酸性条件下金属离子溶解度大幅提高。开采方式影响污染源分布,露天开采产生更多裸露面。植被覆盖率每提高 10%,悬浮物释放量降低 15%~20%。

2 矿区初期径流污染物特征

2.1 污染物的主要类型与来源

矿区初期径流污染物分为悬浮物、重金属、酸性物质和有机污染物四类。悬浮物主要来源于采场裸露面、排土场和运输道路,浓度高达数千毫克每升,超标数十至数百倍。重金属包括铜、铅、锌、镉、砷、铬等,来自硫化矿物氧化和尾矿颗粒迁移,铅浓度可达 5~10mg/L,超标数百倍。酸性物质源于含硫矿物氧化生成硫酸,使径流 pH 低至 2~4,加速重金属溶出。有机物来自采矿药剂残留、油污和生活污水,对局部水体生态毒害不容忽视。四类污染物常以复合形式存在,相互影响、协同致毒,增大了环境风险。

2.2 污染物的时空分布特征

矿区初期径流污染物呈现显著时空变化规律。时间上,单场降雨内浓度“先升后降”,峰值在产流后15~30分钟,初期30分钟污染负荷占全场的60%~80%;雨季初期首场降雨负荷最高,可达后期单场降雨的2~3倍。空间上,不同下垫面污染特征差异显著:尾矿库径流以重金属和酸性为主,排土场悬浮物与重金属并重,运输道路以悬浮物和石油类为主。低洼汇聚区悬浮物浓度较高,排水出口附近溶解态污染物浓度较低^[2]。矿区初期径流污染具有“源强汇变”特点,源头控制与末端治理需统筹考虑时空差异。

2.3 污染物在多介质界面的迁移转化

污染物在“水—土—固—气”多介质界面发生复杂迁移转化。悬浮物迁移受粒径和流速控制,粗颗粒快速沉降,细颗粒远距离输送并吸附重金属。重金属以溶解态和颗粒态存在,pH降低时溶解态占比升高,生物毒性增强。硫化物氧化生成的硫酸影响径流酸碱缓冲能力。次生铁/铝氧化物胶膜对重金属有吸附固定作用,降低释放速率,但在还原条件下被固定的金属可能重新释放。污染物迁移中还可能发生络合、沉淀、共沉淀等过程,改变存在形态和迁移能力。理解多介质界面过程对于选择合理的生态化治理技术具有重要意义。

3 生态化净化处置技术

3.1 物理生态协同净化技术

物理生态协同净化技术将物理沉降与生态净化有机结合,主要包括沉淀塘—生态塘系统和矿渣基质过滤系统。沉淀塘—生态塘系统利用沉淀塘去除粗颗粒悬浮物和颗粒态重金属,再通过生态塘中水生植物吸收拦截和根系微生物降解转化去除溶解态污染物。设计关键在于沉淀塘水力停留时间(一般不少于6小时)和生态塘植物筛选。菖蒲、芦苇、香蒲等挺水植物对重金属富集能力强,其根系分泌物可促进硫酸盐还原菌活性,加速重金属硫化物沉淀。矿渣基质过滤系统利用废弃矿渣作过滤介质,通过截留、吸附和沉淀去除污染物,实现废弃物资源化利用。赤泥、钢渣等碱性矿渣可中和酸性径流,重金属去除率70%~90%。该技术投资低、运行省,适用于大流量低浓度径流处理,但占地面积较大,需结合矿区地形合理选址^[3]。

3.2 人工湿地处理技术

人工湿地通过模拟天然湿地的物理、化学和生物协同作用净化污染物,由基质层、水生植物和微生物群落组成。石灰石、沸石和火山岩对重金属吸附容量高,可显著降低溶解态重金属浓度。植物宜采用挺水—沉水—浮叶立体混种,利用不同植物在吸收和泌氧方面的功能互补。水平潜流湿地对悬浮物和重金属去除率达80%~95%,COD去除率60%~80%;垂流湿地对氨氮去除效果更佳,达70%~85%,垂流—水平流串联可兼顾两者优势。人工湿地在矿区治理中应用日益广泛,但需注意寒冷气候下运行维护和冬季效率下降问题,可通过覆盖保温层或采用地下式结构缓解低温影响。湿地植物刈割管理和基质堵塞定期维护是保障系统长效运行的关键。

3.3 生物滞留系统与生态浮岛技术

生物滞留系统以植物和土壤介质为核心,通过渗滤、吸附、吸收和微生物降解去除污染物,典型结构包括蓄水层、种植土层、过渡层和排水层。针对矿区重金属浓度高的特点,可在种植土中添加生物炭或有机质提高吸附能力,选择蜈蚣草、东南景天等重金属耐受性强的植物。系统对悬浮物和重金属去除率达85%以上,氨氮去除率60%~80%,但长期运行存在介质饱和问题,需定期更换表层介质。生态浮岛技术将植物种植于浮体上,根系悬浮水中吸收吸附污染物,适用于矿区内积水区和水塘生态修复。浮岛植物通过根系分泌有机酸和酶类促进重金属络合沉淀,同时为微生物提供栖息载体。浮岛结构简单、施工便捷,但单级处理能力有限,宜与其他技术联合使用,特别适用于已有水体的原位生态修复。

3.4 组合式生态净化系统

鉴于矿区初期径流污染物复杂性,单一技术难以全面达标,组合式系统已成为主流模式。典型组合工艺为“沉淀塘+人工湿地+生态稳定塘”:沉淀塘去除悬浮物和颗粒态重金属,人工湿地去除溶解态重金属、有机物和氨氮,生态稳定塘进一步稳定出水水质并提供景观功能。各单元通过跌水或管道连接,利用高差实现无动力或微动力运行,降低能耗。设计参数需根据水质特征和出水要求确定:沉淀塘水力停留时间6~12小时,人工湿地水力负荷 $0.1 \sim 0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在山东铁矿区工程实践中,组合系统对悬浮物、COD、铜、铅、锌的总去除率分别达95%、82%、89%、92%和87%,出水满足地表水Ⅲ类标准。组合式系统兼顾处理效率、生态效益和景

观效果,是矿区初期径流生态化治理的推荐模式^[4]。

4 工程实践案例与效果分析

4.1 案例概况

以我国西南地区某有色金属矿区初期径流治理工程为例进行分析。该矿区开采历史超过 30 年,主要矿种为铅锌矿,矿区面积约 2.8 平方公里,包括采场区、排土场区、尾矿库区和运输道路区四类主要功能区。矿区年均降雨量约 1100 毫米,雨季集中在 5 月至 9 月,初期径流主要汇集于矿区下游一处天然洼地,汇水面积约 1.2 平方公里,雨季日径流量变化范围 500~3000 立方米。治理前初期径流监测数据显示,悬浮物浓度 800~3500 毫克每升、pH 值 3.5~5.5、铅浓度 3.2~8.5 毫克每升、锌浓度 5.6~15.2 毫克每升、化学需氧量 80~200 毫克每升,远高于地表水环境质量标准限值,下游农田灌溉和饮用水安全受到严重威胁。

4.2 生态化净化系统设计方案

基于该矿区的场地条件和径流水质特征,设计了“三级沉淀塘+垂直流—水平流复合人工湿地+生态稳定塘”的组合式生态净化系统。工程利用天然洼地地形,自上而下依次布置三级串联沉淀塘,总有效容积约 12000 立方米,总水力停留时间约 12 小时。沉淀塘出水进入复合人工湿地系统,湿地总面积约 15000 平方米,其中垂直流湿地单元面积 6000 平方米、水平流湿地单元面积 9000 平方米。湿地基质采用沸石、石灰石和矿渣分层装填,厚度 0.8~1.2 米;植物选用菖蒲、芦苇、香蒲和美人蕉混种,栽种密度 12 株每平方米。生态稳定塘位于系统末端,面积约 8000 平方米,放养滤食性水生动物,种植睡莲、菱角等浮叶植物,兼具水质净化和生态景观功能。系统设计处理规模为每日 2000 立方米,设计出水水质目标为地表水 III 类标准^[5]。

4.3 运行效果与评价

系统投入运行后进行了为期 12 个月的连续监测。监测数据显示,悬浮物平均去除率 93.6%,出水悬浮物浓度稳定在 25 毫克每升以下;pH 值由进水的 4.2~5.0 提升至出水的 6.8~7.3,中和效果显著;铅平均去除率 91.2%,出水铅浓度 0.035~0.045 毫克每升;锌平均去除

率 88.7%,出水锌浓度 0.45~0.62 毫克每升;化学需氧量平均去除率 78.5%,出水化学需氧量 32~45 毫克每升。各项指标均达到地表水 III 类标准要求。系统在不同季节运行稳定,雨季高峰期虽处理负荷增加,但出水水质未出现显著恶化。经济性方面,该组合式系统建设投资约 480 万元,吨水运行费用仅 0.35 元,年运行维护费用约 8.5 万元,较传统加药混凝沉淀工艺节省运行费用约 65%。实践证明,生态化净化系统对有色金属矿区初期径流具有良好的治理效果和显著的经济优势,尤其适用于用地条件允许的中小型矿区。

结束语

矿区初期径流污染具有污染物浓度高、成分复杂、生态毒性强的显著特征,其治理不能简单套用城市雨水的处理模式。本文从污染物来源、类型、时空分布和多介质迁移转化角度系统分析了污染特征,梳理了沉淀塘—生态塘、人工湿地、生物滞留系统、生态浮岛及组合式生态净化系统的技术原理与应用条件。未来,应在以下方向持续深化研究:矿区特征污染物的生态净化机理与动力学模型、净化系统的长效运行稳定性与维护管理策略、净化副产物的安全处置与资源化利用途径,以及智慧化监测与运行管理技术的研发应用,为矿区水环境质量持续改善提供更加科学系统的技术支撑。

参考文献

- [1] 代文豪,康小兵,韩熙,等.四川筠连矿区关闭煤矿矿井涌水特征污染物识别[J].煤炭科学技术,2025,53(12):304-314.
- [2] 魏怀斌,徐洽菲,刘静,等.淮河流域矿区滞水塌陷区及排污河流溶解性有机物特征解析及污染溯源[J].光谱学与光谱分析,2025,45(z1):708-717.
- [3] 丁浩然,程天航,黄沿畅,等.中国高硫煤矿区地下水特征污染物筛选[J].高校地质学报,2025,31(1):48-57.
- [4] 赵清英,张泽民,谭昭,等.西南三个典型锑矿区锑砷赋存形态与污染特征[J].环境科学研究,2024,37(7):1612-1625.
- [5] 幸仁杭.某地煤矸石矿区遗留固体废物对周边污染特征分析[J].清洗世界,2025,41(11):69-71.