

高寒高纬度地区膏体排放尾矿库干滩扬尘治理研究

隋亭¹, 翟菊彬², 刘影², 张大勇²

(1. 中国黄金集团内蒙古矿业有限公司; 2. 长春黄金研究院有限公司)

摘要:高寒高纬度地区膏体湿排尾矿库扬尘产生机理及特征、治理技术等相关研究相对较少。针对某高寒高纬度地区大型平地型尾矿库自然条件和扬尘形成原因,提出尾矿库扬尘短期控制方案,利用定向监测方案对实施扬尘抑制策略前后的总悬浮颗粒物浓度进行监测。结果表明:在特定气象条件和操作管理实践下采取的抑尘措施对降低扬尘具有显著效果,同时讨论了中长期抑尘措施,为优化尾矿库的环境管理及高寒高纬度地区膏体湿排尾矿库扬尘治理技术提供了可借鉴的经验。

关键词:高寒高纬度;膏体排放尾矿;尾矿库;扬尘;抑尘效果;总悬浮颗粒物

中图分类号:TD926.4 X831

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)09-0127-05

doi:10.11792/hj20250916

引言

尾矿是矿石经过破碎、磨矿等处理选出有用矿物后剩余的固体废物^[1],通常以干式或湿式的方式被排放到尾矿库内堆存^[2]。尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的用以堆存尾矿或其他工业废渣的场所。随着环境保护要求的不断提高,尾矿库的环境效应日益受到重视。尾矿通常具有粒径分布窄、中值粒径小、累积量大及胶结作用差等特性,导致其在空气动力学作用下极易发生颗粒迁移现象,从而引发严重的扬尘污染,对大气环境质量造成威胁^[3-6]。因此,如何有效控制尾矿库扬尘,降低乃至消除其对大气环境的不利影响,已成为当前大气污染防治领域亟待解决的关键科学问题与工程技术难题。鉴于此,众多学者针对尾矿库扬尘的产生机制、扩散规律及防治技术等展开了深入研究,并已取得了一系列具有理论价值与实践意义的研究成果,为尾矿库扬尘的有效控制提供了科学依据与技术支撑^[7-9]。

本文对某高寒高纬度地区平地型尾矿库扬尘产生原因进行分析,提出尾矿库扬尘短期及中长期控制方案,并利用定向监测方案对实施扬尘抑制策略前后的总悬浮颗粒物(TSP)浓度进行监测,抑尘效果显著。

1 尾矿库工程概况

某高寒高纬度地区尾矿库分西区尾矿库和东区尾矿库。主沟长约4.0 km,库内地形平坦,呈宽浅形状,两岸山坡地面坡度为5°~10°。尾矿库占地总面积为672.3 hm²,为二等尾矿库。其中,西区尾矿库占

地235.3 hm²,有效库容3 943万 m³;东区尾矿库占地437 hm²,有效库容14 371万 m³。尾矿采用上游法排放方式,经深锥浓密及浓缩后矿浆浓度达66%,由给料泵供给隔膜泵,经无缝钢管输送至尾矿库堆存。东区尾矿库沿主坝、南侧副坝和北侧副坝轴线方向干滩总长度约5 800 m,垂直于坝轴线方向干滩长度约400 m,干滩面积192.56 hm²。西区尾矿库目前为备用尾矿库,从2013年开始基本停止放矿,因此其库面已基本形成尾矿膏体干滩。尾矿库干滩面积及分布情况见图1。



图1 尾矿库干滩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tailings dam dry beach

矿区处于高纬度地带,属干旱型寒温带气候,冬季严寒,春季有暴风雪。年降雨量平均为278.34 mm,最大降雨量558.5 mm,最小降雨量99.8 mm,日最大降雨量97.5 mm;年蒸发量平均为1 304.13 mm,最大蒸发量1 833 mm;年平均气温为-0.71℃,2月平均气温为-19.64℃,最低气温-42.7℃,7月平均气温为19.82℃,最高气温37.9℃;冻土最大深度3.89 m;风向多为西南风,风速最大达40 m/s,平均风速3.4~

5.5 m/s;绝对平均湿度 5.4 g/m³。

2 尾矿库扬尘产生原因

尾矿库扬尘主要发生在每年初冬和初春特定时间,昼夜温差较大(夜间零下,白天零上),阵风风速大于六级风时,细颗粒会发生冻干升华,水气携带细颗粒扬起形成扬尘。该尾矿库尾矿为一般 I 类固体废物,主要成分为二氧化硅。

1)干旱多风、瞬时风速大。矿区位于干旱地区,据气象站统计资料,矿区年降雨量平均为 278.34 mm,年蒸发量平均为 1 304.13 mm,蒸发量约是降雨量的 4 倍。根据近 30 年的风速统计资料,月平均风速统计结果见表 1,年平均风速的月变化见图 2。

表 1 月平均风速统计结果

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
风速	3.7	3.8	4.3	5.4	5.5	4.3	3.7	3.4	3.9	4.1	3.8	3.5	4.1

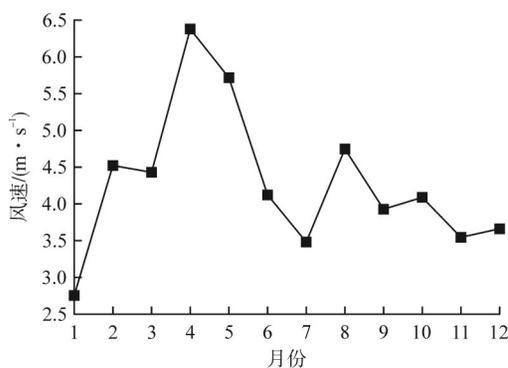


图 2 年平均风速的月变化

Fig. 2 Monthly variation of annual average wind speed

从表 1 和图 2 可以看出:当地多年月平均风速为 3.4~5.5 m/s,月平均风速平均值为 4.1 m/s。月平均风速最大的为 4 月和 5 月,分别为 5.4 m/s 和 5.5 m/s,其次为 3 月、6 月和 10 月,月平均风速均大于 4.1 m/s。瞬时风速最大达 40 m/s。根据近年气象统计数据,极端天气(大于六级风,风速大于 10.8 m/s)为 2020 年初春和初冬,约 9 d,以及 2021 年约 11 d。

地表微颗粒运移,最关键的是风速。地表颗粒实现运移的最小风速被称为临界起动摩阻风速,即使地表颗粒发生运动所需要的最低摩阻风速值^[10]。根据尾矿起尘风洞试验研究结果,尾矿起尘风速一般为 4.0 m/s;风速达到 5.0 m/s 后,扬尘明显增加;当风速达到 8.0 m/s 后,扬尘显著增加^[11]。张鸿雁等^[12]针对马钢公司南山铁矿尾矿库的尾矿进行了风洞试验研究,给出了以 125 μm 为分界线的起动摩阻风速计算公式及相应起尘量与摩阻风速的关系式,同时指出尾

矿干滩面完整时,在一般风力作用下不会起尘,并得出尾矿扬尘的起动摩阻风速(u)与粒径(d)的平方根之间存在线性增加关系。极细粒($d < 125 \mu\text{m}$): $u = 117.73 + 497.38\sqrt{d}$; 细粒 ($125 \mu\text{m} < d < 250 \mu\text{m}$): $u = 218.5 + 210.45\sqrt{d}$ 。

2)天气寒冷、反复冻融、膏体尾矿保护层破坏严重。矿区年平均气温为 $-0.71 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 月平均气温为 $-19.64 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低气温为 $-42.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 7 月平均气温为 $19.82 \text{ }^\circ\text{C}$, 最高气温为 $37.9 \text{ }^\circ\text{C}$;绝对平均湿度为 5.4 g/m³;冻土最大深度为 3.89 m。冻融循环作用下,尾矿库表层结构发生疏松化,并伴随含水率降低,内聚力、抗剪强度和硬度下降,从而降低了抗风蚀能力。结合矿区气候特征,春秋季节强风易导致风蚀扬尘的发生。此外,初春和初冬气温变化速率、幅度、表层冻结持续时间及冻结温度共同影响冻结深度和冻融循环强度,冻结程度越高,尾矿库表层物理损伤和机械损伤越显著^[13]。尾矿冻融过程受控于尾矿含水率,冻融作用强度与温度变化幅度、含水率及冻结深度密切相关。当气温低于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,尾矿膏体表层析出的水分会在尾矿表面形成冰层,该冰层在冬季可有效抑制扬尘;然而,初春和初冬气温反复波动,加剧冻融循环,导致尾矿表层结构稳定性及含水率发生显著变化,在干燥、强风条件下极易引发扬尘^[14]。

3 尾矿库抑尘措施及效果

3.1 尾矿库抑尘措施

3.1.1 东区尾矿库干滩抑尘措施

1)制订严格排尾计划,控制干滩面积。干滩膏体尾矿表面保护层冻融破坏是尾矿扬尘产生的根本原因^[15-16],夏天保护层不易破坏,冬天保护层结冰也不易破坏,在冬春、秋冬之交,冻融变化剧烈,保护层易被破坏产生扬尘。因此,控制尾矿库扬尘的关键是控制冬春、秋冬之交干滩面积,需要制订严格的尾矿排放计划。当地主导风向为西北风,冬春、秋冬之交在尾矿库主导风向的上风侧进行尾矿排放,利用尾矿库沉积滩水面沉降吸收部分干滩扬尘;其他季节在尾矿库主导风向的下风侧排放尾矿。

2)干滩表面铺设抑尘网。每年从 11 月底到次年 3 月底,需在形成的干滩上铺设抑尘网,以此减少干滩产生的扬尘。在实际生产中,夏季排矿会覆盖原有的干滩表面,导致之前铺设的抑尘网被覆盖,因此每年冬季都要对以往铺设过抑尘网的区域进行重新铺设。

3)多管交替排放控制干滩面积及湿度。尾矿库

为南、东、北三面筑坝,东主坝、南子坝和北子坝的坝体长约3 500 m,干滩沿坝分布长度较长,干滩宽度为100~200 m,采取多管交替间隔排放,控制排尾间隔

时间,保证膏体尾矿在干滩上形成湿矿滩面,减小干滩面积,增加干滩尾矿湿度,起到抑尘作用。东、西区尾矿库排矿管路布置及多点排矿情况见图3。

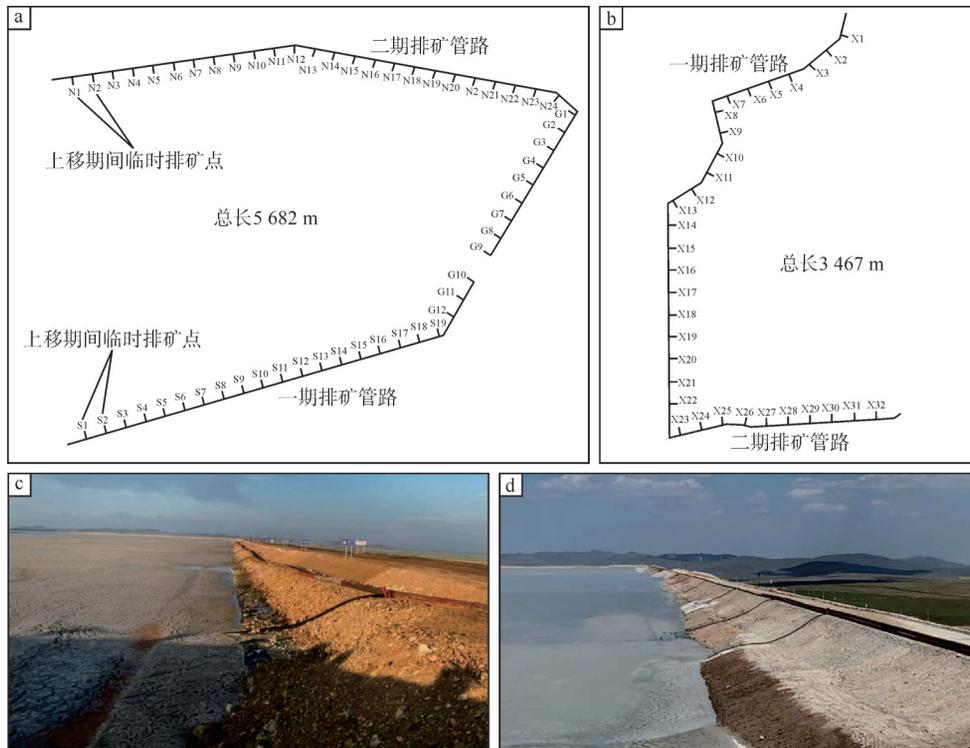


图3 东、西区尾矿库排矿管路布置及多点排矿情况

Fig. 3 Layout of ore-discharge pipelines in the east and west areas of the tailings dam and multi-point ore-discharge conditions

3.1.2 西区尾矿库干滩抑尘措施

西区尾矿库短期抑尘措施为在干滩面上覆盖露天采场剥离的表土,覆土厚度30 cm左右,平整压实。西区尾矿库排矿后会覆盖现有的砂土层,形成新干滩面,后期按照东区尾矿库干滩抑尘措施开展抑尘工作。

3.1.3 尾矿库坝体抑尘措施

1)尾矿库坝体坡面复垦抑尘。尾矿库外坡面达到复垦条件的区域,为永久性坡面,按照《矿山地质环境保护与土地复垦方案》进行复垦,主要措施为:①覆盖尾矿库前期剥离的表土,覆土厚度50 cm,沉实厚度30 cm;②按1:1:1比例混合撒播当地的克氏针茅、羊草、披碱草乡土草种,撒播密度约为25 kg/hm²;③栽种时间一般以夏季雨季为宜,并根据实际情况及时复垦;④定期洒水养护。

2)尾矿库坝体马道洒水抑尘。尾矿库需要日常巡检,而坝体马道日常性行车,需循环洒水降尘,防止路面扬尘。

3.2 尾矿库抑尘效果评价

3.2.1 尾矿库抑尘措施评价

1)通过制订合理的排尾计划,在保证坝体安全的情况下,控制了干滩长度,有效降低了扬尘污染。

2)多管交替排矿方式可使尾矿库滩面始终保持湿润,即在各分区的干滩面上覆盖一层细粒级尾矿,其风干后形成结实的表皮层,类似天然龟裂黏土层,不仅可用于短期的生产防尘,而且可用于长期固定尾矿库的表面^[17]。

3)采用抑尘网来抑制尾矿库干滩扬尘是一种相对有效的措施,有效阻挡风力携带的沙尘颗粒,降低干滩扬尘的强度和范围,且相比大规模绿化或频繁洒水,抑尘网的初期投资成本相对较低,安装简单,施工周期短,能够快速投入使用。但是,其效果和适用性受多种因素影响,如易受风力、暴雨等自然因素的影响而被损坏,需要定期检查和维修,甚至需要更换,增加了后期维护成本;抑尘网的防尘效果受网孔、材质、风力等因素影响,在强风条件下抑尘效果可能降低。如果抑尘网材质选择不当,一些大颗粒物可能穿透网孔;其长期暴露于阳光和风沙中易老化降解,可能会造成二次污染。

3.2.2 尾矿库周边扬尘现状监测

采取抑尘措施后,在尾矿库周边共设置了5个无组织颗粒物监测点,采用GB 3095—2012《环境空气质量标准》、GB/T 15432—1995《环境空气 总悬浮颗粒物的测定 重量法》,连续7 d对总悬浮颗粒物进

行监测。尾矿库扬尘监测点位置见表3、图4。

表3 尾矿库扬尘监测点

Table 3 Dust monitoring points of the tailings dam

序号	监测点	经度	纬度
1	尾矿库上风向2~10 m	117°20'11.04"	49°24'28.42"
2	尾矿库下风向矿区周界外10 m	117°21'26.62"	49°25'46.38"
3	尾矿库下风向矿区周界外50 m	117°21'28.16"	49°25'47.52"
4	尾矿库下风向矿区周界外100 m	117°21'29.28"	49°25'49.22"
5	尾矿库下风向矿区周界外500 m	117°21'40.37"	49°26'0.61"

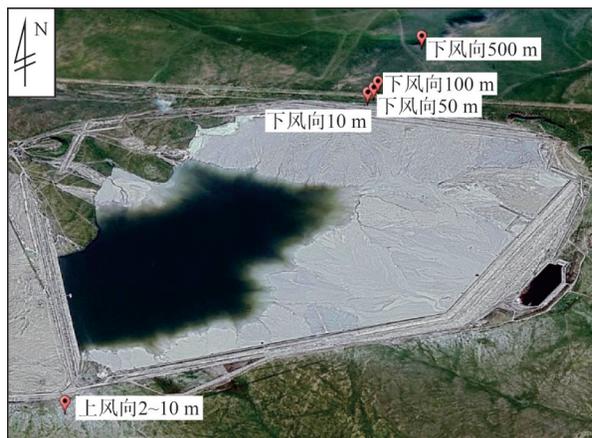


图4 尾矿库总悬浮颗粒物监测点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of total suspended particulates monitoring points in the tailings dam

监测数据经整理计算后发现,风向为西南风向时段下,TSP 1 h平均浓度最大值出现在监测第3天16时—17时尾矿库下风向矿区周界外500 m处(风速0.1 m/s),为0.063 mg/m³;各监测点1 h平均浓度均满足GB 25467—2010《铜、镍、钴工业污染物排放标准》中边界大气污染物限值,最大浓度占标率为5.36%~6.26%。TSP 24 h平均浓度最大值也出现在监测第3天尾矿库下风向矿区周界外500 m处,为0.046 mg/m³;各监测点24 h平均浓度均满足GB 3095—2012《环境空气质量标准》二级标准,最大浓度占标率为12.94%~15.45%。尾矿库扬尘现状监测数据见图5,历史监测数据见图6。

与历史监测数据相比,风向为西南风向时段下,各监测点TSP 1 h平均浓度较近3年平均浓度均低,一季度降低66.10%~93.58%,二季度降低76.61%~88.12%,三季度降低63.96%~87.24%,四季度降低72.80%~87.65%。

4 结论

1)该尾矿库为国内首个在高寒高纬度地区采用尾矿膏体湿排工艺的尾矿库,扬尘产生机制不同于常

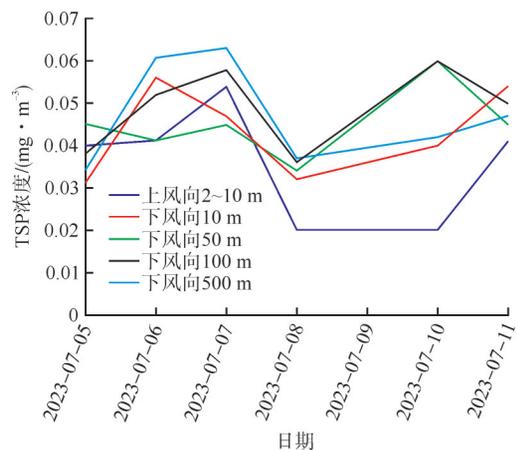


图5 尾矿库扬尘现状监测数据

Fig. 5 Current dust monitoring data of the tailings dam

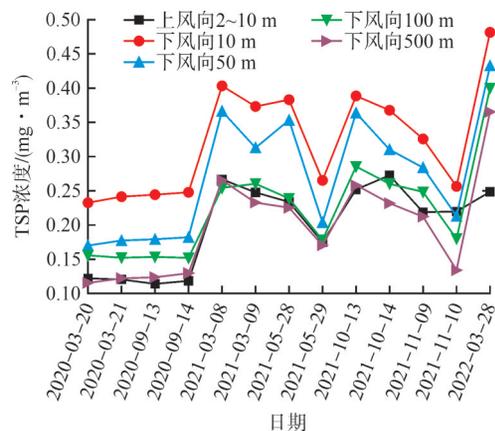


图6 尾矿库历史监测数据

Fig. 6 Historical monitoring data of the tailings dam

规湿排尾矿库和干排尾矿库。目前,高寒高纬度地区的膏体湿排尾矿库扬尘治理技术相关研究还处于空白阶段,没有可供借鉴的成功经验。尾矿库的扬尘机理及特征尚不明确,为给中长期抑尘措施设计提供理论支撑,需对该尾矿库扬尘机理及特征开展相关研究。

2)结合现场调查情况及现状监测结果分析,在短期扬尘控制措施、环境管理手段、气象条件综合作用下,现阶段尾矿库扬尘情况得到了有效控制。由于东、西区尾矿库均为在用尾矿库,且冻融现象发生于初冬及初春,气象条件、干滩及湿滩面积都将发生显著变化,故应对后续扬尘情况及抑尘效果持续关注,及时开展跟踪监测工作。

3)抑尘控制措施研究可分为中期、长期。中期即尾矿库服役期研究工作内容包括膏体尾矿排放扬尘产生机制及特征、扬尘综合控制技术、高寒高纬度地区膏体尾矿库扬尘抑制与材料研究。长期控制措施即封场控制措施,主要研究内容包括膏体尾矿综合利用技术、膏体排放尾矿库复垦技术。高寒高纬度地区膏体尾矿排放扬尘机制研究是中长期抑尘措施研究

的工作基础,应予以优先开展。

[参考文献]

- [1] 黄燕. 金属尾矿库扬尘影响分析及污染防治措施建议——以金矿尾矿库为例[J]. 化学工程与装备, 2009(7): 218-219, 216.
- [2] 温亮. 四川省尾矿库环境保护现状分析[J]. 黄金, 2022, 43(11): 82-87.
- [3] 刘强. 中国黄金工业污染场地特征、修复技术现状与发展方向[J]. 黄金, 2021, 42(11): 85-89.
- [4] 申思. 浅议尾矿库防尘建议方案[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2018(3): 54-55, 62.
- [5] HAYES S M, WEBB S M, BARGAR J R, et al. Geochemical weathering increases lead bioaccessibility in semi-arid mine tailings[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(11): 5 834-5 841.
- [6] 丁冉伟. 浅析尾矿库扬尘综合治理[J]. 中国金属通报, 2022(7): 162-164.
- [7] 赵筠康. 尾矿库扬尘防治研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [8] 邵靖超, 钱斌. 山西某尾矿库扬尘治理措施[J]. 矿业工程, 2020, 18(4): 55-57.
- [9] 李颖, 陈天福, 张雄天. 尾矿库干滩扬尘的湿盖固化方法研究[J]. 世界有色金属, 2023(6): 160-162.
- [10] 朱升贺. 农田地表粉尘释放特征野外实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [11] 霍汉鑫, 夏长亮, 王新, 等. 风速和含水率对铜金属矿尾矿颗粒起尘的影响研究[J]. 价值工程, 2016, 35(24): 218-219.
- [12] 张鸿雁, 王元, 陈祥芬. 铁矿尾矿库区粉尘污染源强研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1998, 30(4): 396-398.
- [13] 王亚涛. 冻融循环对微生物固化工程渣土抗风蚀扬尘影响试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
- [14] 陈典助. 固体矿山尾矿堆存技术与综合利用分析与研究[J]. 湖南有色金属, 2016, 32(4): 5-8.
- [15] 杨自然, 王广平, 王铁刚, 等. 宝山尾矿库扬尘治理措施[J]. 矿冶工程, 2016, 36(3): 6-8.
- [16] 朱宁, 陈玉明, 刘相纯, 等. 尾矿库环境污染分析与预防对策[J]. 黄金, 2014, 35(2): 67-70.
- [17] 迟崇哲, 刘影, 王超, 等. 有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术研究进展[J]. 黄金, 2024, 45(12): 8-12.

Study on dust control in tailings dam dry beaches with paste discharge in high-cold and high-latitude regions

Sui Ting¹, Zhai Jubin², Liu Ying², Zhang Dayong²

(1. Inner Mongolia Mining Co., Ltd., China National Gold Group Co., Ltd.;

2. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: Research on the mechanism, characteristics, and control technologies of dust generation from paste wet-discharge tailings ponds in high-cold and high-latitude regions is relatively limited. Focusing on the natural conditions and causes of dust generation in a large flat-type tailings dam located in a high-cold and high-latitude region, a short-term dust control scheme for the tailings dam was proposed. A directional monitoring program was employed to measure the concentration of total suspended particulates before and after implementing dust suppression strategies. The results indicate that, under specific meteorological conditions and operational management practices, the adopted suppression measures effectively reduced dust emissions. Medium- and long-term dust control measures are also discussed, providing valuable experience for optimizing environmental management of tailings dams and for dust suppression technologies for tailings dams with wet paste discharge in high-cold and high-latitude areas.

Keywords: high-cold and high-latitude; tailings of paste discharge; tailings dam; dust; dust suppression effect; total suspended particulates