【环境与能源 / Environment and Energy】

露天煤矿冬季坑底粉尘污染特征及影响因素

罗怀廷^{1,2}, 周伟¹, 刘宇², 王志明¹, 时旭阳¹, 丁小华¹, 陆翔¹

1) 中国矿业大学露天矿山高新技术研究中心, 江苏徐州 221116;

2) 中国神华能源股份有限公司哈尔乌素露天煤矿, 内蒙古鄂尔多斯 017100

摘要: 为揭示中国北方干旱地区冬季低温条件下颗粒物的污染特征, 为露天矿山粉尘污染防治提供理论依据, 以内蒙古哈尔乌素露天煤矿为研究地点, 通过矿坑布设的2个监测点对冬季粉尘颗粒的物质质量浓度、风速及温湿度和温差等多项环境指标进行监测, 运用多元统计学方法分析坑矿低温条件下一周内的粉尘颗粒物变化特征及其与气象因素关系。结果表明, 检测时间段内露天矿坑的颗粒物平均质量浓度未超过国家环境空气质量标准(GB 3095—2012)的2级标准限值, 但部分时间内超过了1级标准限值; 湿度、温度、风速、温差(逆温强度)均与颗粒物质量浓度呈正相关, 其中, 湿度正相关最为显著; 低温条件下, 气象因子对坑底颗粒物质量浓度影响显著程度从高到低为: 湿度>温度>温差(逆温强度); 小粒径颗粒物对环境因素敏感性更高。气象因素对粉尘颗粒物的污染扩散影响大, 因此, 露天矿山冬季开采强度可结合气象条件进行调整, 以降低坑底粉尘污染水平。

关键词: 露天开采; 露天矿; 粉尘颗粒物; 粉尘浓度; 污染水平; 气象因子; 相关性分析; 主成分分析; 回归分析; 多元统计

中图分类号: TD714

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.06637

Pollution characteristics and influencing factors of dust at the bottom of open-pit coal mine in winter

LUO Huaiting^{1,2}, ZHOU Wei¹, LIU Yu², WANG Zhiming¹,
SHI Xuyang¹, DING Xiaohua¹, and LU Xiang¹

1) High-Tech Research Center for Open Pit Mines, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221116, Jiangsu Province, P. R. China

2) Haerwusu Open-Pit Coal Mine, China Shenhua Energy Co. Ltd., Ordos 017100, Inner Mongolia, P. R. China

Abstract: Haerwusu open-pit coal mine in Inner Mongolia has serious pollution of dust particles at the bottom of the pit in winter, which has posed great impacts on production and the surrounding environment. This article aims to reveal the characteristics of particulate pollution under low temperature in the arid areas of northern China in winter and provide the foundation for the prevention and control of dust pollution in open-pit mines. We took the Haerwusu open-pit coal mine as the research site, monitored a number of environmental indicators including the mass concentration of dust particles, wind, temperature and humidity in winter through two monitoring sites arranged in the pit, and used multivariate statistical methods to analyze the varying characteristics of dust particles within a week under low temperature conditions in pits and mines and their relationship with meteorological factors. The results show that

Received: 2020-05-05; **Accepted:** 2020-09-16

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51574222); National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (51804299)

Corresponding author: Professor ZHOU Wei. E-mail: loutian1982@126.com

Citation: LUO Huaiting, ZHOU Wei, LIU Yu, et al. Pollution characteristics and influencing factors of dust at the bottom of open-pit coal mine in winter [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(6): 637-644. (in Chinese)

average mass concentration of particulate matter during the detection period of the open-pit mine does not exceed the second-level standard limit of the National Ambient Air Quality Standard (GB 3095—2012), but exceeds the first-level standard limit for some time. Humidity, temperature, wind speed, temperature difference (ie. inversion intensity) are all positively correlated with the concentration of particulate matter, among which the positive correlation of humidity is the most significant. Under low temperature conditions, the significant degree of influence of meteorological factors on the mass concentration of particles at the pit bottom is as follows: humidity > temperature > temperature difference. Small particles are more sensitive to environmental factors. Meteorological factors have a great influence on the diffusion of dust particles, so the winter mining intensity of open-pit mines can be adjusted in conjunction with meteorological conditions to reduce dust pollution at the bottom of the pit.

Key words: open pit mining; open pit mine; dust particulate matter; dust density; pollution levels; meteorological factors; analysis of correlation; main components analysis; regression analysis; multivariate statistics

露天煤矿开采实质为开放空间内的巨型土石方移运工程,包括穿孔、爆破、采装、运输和破碎等多个作业环节,各个环节均会产生大量的粉尘颗粒物^[1-2].中国露天煤矿超过 90% 产能来自北纬 38° 以北的严寒干旱气候区,这些地方冬季大气温度低,无风频率高,易出现长时间的静稳天气,形成显著的逆温现象,大气结构较为稳定,加上露天煤矿深凹地形条件,冬季坑底粉尘污染较为严重^[3].露天煤矿产生的粉尘粒径小,易吸附重金属等有毒有害物质,降低大气能见度^[4],同时粉尘会严重损害矿工的呼吸系统,造成尘肺等职业疾病^[5-6].据中国 2019 年发布的《卫生健康事业发展统计公报》显示,全国共报告职业性尘肺病 15 898 例,占各类职业病总数的 81.83%^[7].此外,露天矿粉尘还会在自然风力的作用下向周边扩散,对周边的生态环境造成一定污染,会威胁周边居民的身体健康^[8-9].可见,露天煤矿粉尘污染已经成为一个突出的社会问题,国务院 2018 年 6 月专门印发《打赢蓝天保卫战三年行动计划》明确要求加强露天矿山扬尘综合整治^[10].

随着“绿色矿山”理念的提出,诸多学者对露天煤矿粉尘污染方面开展了大量的研究.葛少成等^[11]采用基于欧拉-拉格朗日方程的离散相模型模拟了露天煤矿爆破粉尘起爆过程中的扩散规律;陈举师等^[12]依据气固两相流动及梯度输送理论,运用数值模拟软件模拟了露天矿穿孔作业中的粉尘扩散规律;荆德吉等^[13]采用 COMSOL 数值模拟软件模拟分析了露天煤矿破碎站卡车卸料时的粉尘扩散规律;陈曦等^[14]采用动网格技术及离散相模型的粒子跟踪技术的耦合计算方法,模拟分析了露天矿不同车速下自卸卡车周围气流与粉尘的分布特征;TANG 等^[15]使用 FLUENT 软件模拟分析了露天矿采

场内不同粒径粉尘在自然风流作用下向矿坑外部的逸散规律;田冬梅等^[16]通过正交试验和多元回归统计分析,得到了露天矿运输扬尘质量浓度的计算模型;刘芳等^[17]基于现场实测数据分析了不同季节准东露天矿周边环境 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的污染特征.当前针对露天矿山粉尘的研究成果多集中在不同作业环节下的粉尘起尘机理及运移规律方面,而露天矿坑内部飘散粉尘污染物的特征及与气象因子间的关系研究较少.而掌握露天矿坑粉尘污染物特征是从气象学角度揭示解决矿坑粉尘污染的前提.

生产作业期间露天矿坑内污染较为严重,能见度显著降低,冬季尤甚,相关研究表明,低温度、高湿度与颗粒物污染有着密切的关系^[18].因此,掌握露天煤矿冬季低温条件下的粉尘污染情况及演化特征,揭示气象因子对粉尘浓度的影响规律,对露天煤矿粉尘治理十分重要.

1 测试方案

1.1 监测地点

哈尔乌素露天煤矿(以下简称哈矿)位于内蒙古鄂尔多斯准格尔旗薛家湾镇,属陕蒙交界地区.该矿地处温带大陆性季风气候区,具有冬季寒冷漫长,夏季炎热短促,春秋温差大的气候特征.冬季时间长达 4 个月,平均气温在 -11 ~ 1 °C,最低气温可达 -30 °C,多有 4 ~ 6 级大风,结冰期为 11 月上旬到翌年 4 月上旬,约 150 d.春秋季多风干燥,平均温度在 -10 ~ 3 °C,气温变化剧烈,早晚温差大.夏季炎热,平均气温在 10 ~ 23 °C,雨水多集中于 7 ~ 9 月,约占全年降水量的 65%,盛行东南风.薛家湾年降水量约为 400 mm,而蒸发量是降水量的 5 倍,干旱多风,如图 1.

图 1 哈尔乌素露天煤矿矿坑航拍图
Fig. 1 Aerial photos of Haerwusu open-pit coal mine

1.2 设备选型及布置

采用山东仁科测控技术有限公司生产的噪声扬尘监测站(型号 RS-ZSYC-9S-4G)监测风速、风向、温湿度及粉尘质量浓度,设备参数见表 1. 设备布置位置如图 2 所示,其中,1 号测点布置在地表 1 130 水平,用于监测同时间段内的地表大气温度,得到地表与坑底的大气温度之差,分析温差(逆温强度)对坑底污染物的影响. 另外,由于哈矿在开采时受韩留宝征地影响,目前其工作区位于韩留宝以北区域,为更加真实的反映哈矿在开采过程中坑底粉尘污染情况,将 2 号测点布置在工作区的采场煤底板 930 水平中部. 监测设备通过移动网络将数据实时上传至云端服务器,本次实验数据的采集频率均为 1 h.

表 1 设备指标参数
Table 1 Equipment parameters

监测指标	空气温度/℃	空气湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)	风向/个	ρ(颗粒物)/(μg·m ⁻³)
测量范围	-40~70	0~100	0~60	8	0~1 000
分辨率	0.1	0.1	0.1		1
误差	±0.2	±3	±0.3		±10

2 结果与分析

2.1 颗粒物质量浓度特征

受哈矿内排作业影响,本次实验监测时间段为 2018-12-23 至 2019-01-01,但整理数据发现 12 月 24、25 日数据缺失,因此本研究选择 2018-12-26 至 2019-01-01 的监测数据来对低温条件下的坑底颗粒物污染情况作进一步说明与分析,其中,2018-12-

图 2 测点布置位置
Fig. 2 Location of monitoring sites

29 出现全年温度最低值. 我国最新发布的《环境空气质量标准》(GB3095—2012)中明确规定了颗粒物日均质量浓度限值的 1 级和 2 级标准,见表 2^[19]. 统计监测时间段内 2 号测点(坑底)的总悬浮颗粒物(total suspended particulate, TSP)、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 实测结果,见表 3. 可以发现,监测时间段内 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 均未超过国家 2 级标准限值,但 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 分别超过国家 1 级标准限值 3、4 和 3 次,表明冬季低温条件下哈矿坑底污染较为严重.

表 2 24 h 颗粒物质量浓度限值^[19]
Table 2 Mass concentration limits of PM in 24 h^[19]

级别	μg·m ⁻³		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
1 级	0~80	0~50	0~35
2 级	81~120	51~150	36~75

表 3 颗粒物质量浓度监测数据
Table 3 Descriptive statistics of PM mass concentration

时间	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
2018-12-26	62.88 ± 40.72	50.63 ± 35.71	32.08 ± 25.38
2018-12-27	7.67 ± 6.28	4.75 ± 3.93	3.08 ± 2.81
2018-12-28	25.42 ± 16.61	16.83 ± 10.91	11.54 ± 7.26
2018-12-29	49.17 ± 36.88	32.08 ± 23.85	20.33 ± 11.86
2018-12-30	88.45 ± 45.83	55.33 ± 35.54	37.62 ± 23.01
2018-12-31	90.04 ± 19.24	63.92 ± 19.19	48.79 ± 18.32
2019-01-01	94.38 ± 42.55	76.75 ± 31.64	62.17 ± 25.32

为进一步分析颗粒物质量浓度之间的关系,绘制监测期间颗粒物的具体变化规律,如图 3 所示. 由图 3 可知, TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度变化范围

分别为 $0 \sim 200$ 、 $0 \sim 175$ 和 $0 \sim 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。3 种颗粒物质量浓度变化特征较为一致, 污染物质量浓度在正午前后出现峰值, 且峰值后明显降低, 主要原因是日出后向阳帮坡和背阳帮坡受热情况不同, 采场内部出现由背阳坡流向向阳坡的低风速局部环流, 在哈矿地形条件下具体表现为由工作面流向排土场, 由于排土场边坡角较大, 所以粉尘难以扩散出矿坑; 加上生产作业持续产尘, 所以从日出到正午, 采场内部污染持续加重。哈矿粉尘质量浓度峰值出现时间不同于城市大气污染。文献[20]研究表明, 城市大气颗粒物浓度在日出前出现峰值, 日出后由于大气边界层抬升, 颗粒物浓度逐渐降低。另外, 2018-12-27 的颗粒物质量浓度明显小于其他统计时间, 查询当日天气, 发现并无降雨和降雪天气出现, 对比该周生产量(表 4)发现 27 日产煤量显著低于其他时间段, 因此当天监测的颗粒物质量浓度较低。

图 3 颗粒物变化趋势
Fig. 3 Trend of PM

图 4 颗粒物占比
Fig. 4 Proportion of PM

表 4 哈矿日产量

Table 4 Daily output of Haerwusu open-pit coal mine

日期	产煤量/t	剥离量/ m^3
2018-12-26	28 600	42 040
2018-12-27	9 630	58 770
2018-12-28	11 180	22 250
2018-12-29	16 290	45 270
2018-12-30	21 560	54 790
2018-12-31	15 160	58 740
2019-01-01	21 220	47 470

研究时间段内的颗粒物质量浓度占比情况如图 4。其中, $\rho(\text{PM}_{10})/\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{TSP})$ 分别表示 TSP 中 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度占比; $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 表示 PM_{10} 中 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度占比。由图 4 可知, 研究区内的 $\rho(\text{PM}_{10})/\rho(\text{TSP})$ 大致在 $60\% \sim 80\%$; $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{TSP})$ 大致在 $30\% \sim 60\%$; $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 大致在 $50\% \sim 80\%$ 。一般认为, $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 为 $30\% \sim 40\%$ 时污染较轻, 为 $50\% \sim 70\%$ 时污染较重^[17]。综合分析可知, 哈矿低温下坑底颗粒物主要是粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 且以粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物居多, 表明低温下坑底污染较重, 空气质量差, 对人体危害严重。

另外, 从图 4 可以发现, 1 天内的 $\rho(\text{PM}_{10})/\rho(\text{TSP})$ 最小值一般出现在正午前后, 而该时间段坑底存在明显风流, 表明风速对小颗粒污染物稀释作用更为明显。此外, 结合图 3 可以发现, 当颗粒物质量浓度较低时(如 27 日), 颗粒物组成比例波动较大, 而颗粒物质量浓度较大时, 颗粒物组成比例较为稳定。

2.2 气象因子对颗粒物质量浓度的影响

对统计时间研究区内的气象因素取均值,其中平均湿度、平均温度和平均风速(均来自2号测点)分别为46.0%、-17.30℃和0.23 m/s,平均温差(温差为1号测点温度值减去2号测点温度值)为1.13℃.表明研究时间段内坑底温度低、风速小,且存在明显的逆温现象.

将TSP、PM₁₀和PM_{2.5}的质量浓度与湿度、温度、风速和温差等气象因子进行Spearman秩相关分析,结果见表5.从表5可见,低温条件下,坑底颗粒物质量浓度与湿度存在明显的正相关关系,表明湿度越大,坑底颗粒物质量浓度越大;与 ρ (TSP)相比, ρ (PM₁₀)、 ρ (PM_{2.5})与相对湿度的相关系数更大,表明湿度对小粒径颗粒物影响更为显著.温度、风速与颗粒物质量浓度呈正相关,表明低温小风速下,坑底颗粒物质量浓度会随温度、风速的增大而增大.温差(逆温强度)与颗粒物质量浓度呈正相关,表明逆温会阻碍颗粒物向外扩散.

为了更加直观的显示气象因子与颗粒物质量浓度的关系,可以进一步作因子分析.进行因子分析前需要对变量进行Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)样本测度和Bartlett球体检验.KMO是用于比较变量间简单相关系数和偏相关系数的指标,其值越接近1,表明变量越适合进行因子分析.Bartlett球体检验的

统计量是根据相关系数矩阵的行列式得到的,如果通过显著性检验即适合进行因子分析.

表5 颗粒物与气象因子的秩相关系数¹⁾
Table 5 Rank correlation coefficient of PM and meteorological factors

颗粒物	湿度	温度	风速	温差
TSP	0.741 **	0.125	0.001	0.035
PM ₁₀	0.770 **	0.174 *	0.027	0.016
PM _{2.5}	0.779 **	0.205 **	0.036	0.007

¹⁾ **表示 $P \leq 0.01$; *表示 $P \leq 0.05$

对研究数据进行KMO和Bartlett球体检验,得到KMO值为0.698,且显著性为0,通过了Bartlett球体检验.说明相关系数矩阵与单位矩阵有显著性差异,可以进行因子分析.通过因子分析,共提取了3个主成分,累积方差贡献率为76.71%,说明原有变量的数据丢失较少,旋转后3个成分的方差贡献率发生了变化,但累计方差贡献率并没有改变,即没有影响原有变量的共同度,所以因子分析效果较为理想,采用主成分分析法进行分析,结果见表6.由图5可见,公因子1包括湿度、TSP、PM₁₀和PM_{2.5},公因子2包括温度和风速,公因子3包括风向和温差,进一步说明湿度对颗粒物质量浓度的影响更为显著.

表6 总方差解释
Table 6 Explanation of total variance

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差/%	累积/%	总计	方差/%	累积/%	总计	方差/%	累积/%
1	3.534	44.175	44.175	3.534	44.175	44.175	3.526	44.079	44.079
2	1.549	19.359	63.534	1.549	19.359	63.534	1.426	17.822	61.901
3	1.054	13.179	76.712	1.054	13.179	76.712	1.185	14.811	76.712
4	0.940	11.749	88.461						
5	0.593	7.415	95.875						
6	0.240	3.001	98.876						
7	0.072	0.895	99.772						
8	0.018	0.228	100.000						

2.3 颗粒物质量浓度与气象因子的多元回归模型

通过上述分析可知,影响坑底颗粒物质量浓度的因素较多,需要对颗粒物质量浓度及气象因子进行多元回归分析.本研究采用的是多元逐步回归分析,其步骤是先剔除对因变量影响不显著的变量,再逐个引入对因变量影响显著的变量,通过该方法可以有效确定对颗粒物质量浓度影响显著的气象因

子.利用多个气象因子构建颗粒物质量浓度的多元回归估算模型,具体结果见表7.其中, x_1 、 x_2 和 x_3 分别为湿度、温度和温差.由表7可见,利用选择的几个变量对颗粒物质量浓度的估算结果较好,在考虑多个气象因素共同对颗粒物质量浓度影响后,由回归模型可以发现对颗粒物质量浓度影响显著的气象因素包括湿度、温度和温差.且显著程度关系

图 5 旋转后空间成分

Fig. 5 Spatial composition after rotation

为湿度 > 温度 > 温差. 回归模型的拟合程度顺序为 $PM_{2.5} > PM_{10} > TSP$, 表明小颗粒对气象因子敏感性更高.

表 7 颗粒物的回归模型

Table 7 Regression models of different PM

颗粒物类别	回归模型	R^2 值	F 值	P 值
TSP	$y = 2.181x_1 + 2.062x_2 + 9.561x_3 + 4.527$	0.561	69.973	0.000
PM_{10}	$y = 1.791x_1 + 2.088x_2 + 7.342x_3 + 3.812$	0.644	99.057	0.000
$PM_{2.5}$	$y = 1.411x_1 + 1.899x_2 + 4.891x_3 + 3.047$	0.706	131.177	0.000

利用相对权重的方法计算气象因素的贡献率, 如图 6 所示, 可定量评估气象因素对颗粒物质量浓度影响的贡献, 其中, 贡献率越高的自变量对颗粒物质量浓度影响的贡献越大. 以 TSP 为例, 自变量湿度、温度和温差对 R^2 (0.561) 的贡献率分别为 84.9%、8.7% 和 6.4%. PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 也表现出相同的规律, 其中, 湿度的贡献率显著大于温度和温差. 另外, 可以发现随颗粒物粒径减小, 温度对贡献率逐渐增高, 这与秩相关分析结果具有一致性, 表明温度对小颗粒影响更为明显.

3 讨论

利用相关性和因子分析研究冬季气象因子与颗粒物质量浓度的关系. 分析发现: ① 低温下湿度

图 6 气象因素对颗粒物质量浓度的贡献率

Fig. 6 Contribution rate of meteorological factors to the mass concentration of PMs

对颗粒物质量浓度影响较为明显, 表现出正相关关系, 表明湿度越大, 越容易造成坑底严重污染, 主要原因是冬季相对湿度较低, 空气中水汽含量不足以使颗粒物粒径增大而大量沉降, 反而会形成霾现象, 减少太阳对坑内的辐射, 加重颗粒物污染, 这与刘芳等^[17]的研究结果较为一致. ② 温度与颗粒物质量浓度呈正相关关系, 风速与颗粒物质量浓度也表现出正相关关系, 表明低温低风速下, 随风速的增大, 坑底污染物质量浓度会进一步升高, 与其他学者^[21-23]研究结果存在一定差异, 主要原因是坑内风速增大, 且风向多由采场吹向排土场, 导致工作面粉尘吹向排土场, 坑内颗粒物质量浓度上升. ③ 温差与颗粒物质量浓度呈正相关关系, 主要原因是温差较大时, 逆温强度大, 大气结构稳定, 不利于颗粒物扩散. 气象因素整体上对小粒径颗粒物影响更为显著.

通过多元逐步回归分析和相对权重方法可以发现, 在同时考虑多气象因子的条件下, 湿度依然对颗粒物质量浓度影响最显著, 其次是温度和温差, 且湿度的影响程度明显高于其他因素. 从回归模型的 R^2 值大小可以发现, 颗粒物粒径越小, 方程拟合度越高, 表明小粒径颗粒物对气象因素的敏感性更高.

本研究采用监测仪器对哈尔乌素露天煤矿冬季粉尘颗粒物质量浓度及气象因子进行了连续监测, 选择了一周的监测数据来分析低温下颗粒物污染特征, 所以对研究区污染特征的揭示在一定程度上存在不充分性, 但可以在一定程度上概括低温条件下的颗粒物污染特征. 因此, 要想更细致准确掌握露

天煤矿冬季颗粒物污染特征,在后续研究中还需要加大样点密度,增加监测数据的长时性及连续性。

4 结 论

1) 研究区监测时间段内的颗粒物质量浓度整体上均低于国家环境空气质量的2级标准限值,但部分时间内超过国家1级标准限值,坑底颗粒物主要为粒径小于10 μm 的颗粒物,其中又以粒径小于2.5 μm 的颗粒物居多,表明哈尔乌素露天煤矿冬季以小粒径颗粒物污染为主,空气质量较差。

2) 低温条件下,湿度与颗粒物质量浓度正相关性较高;温度、风速、温差(逆温强度)与颗粒物质量浓度呈正相关关系。

3) 考虑多气象因子共同影响,对冬季颗粒物质量浓度影响显著程度从大到小为:湿度>温度>温差;小粒径颗粒物的回归模型拟合度最高,对气象因素的敏感性最强。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574222);国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(51804299)

作者简介:罗怀廷(1985—),中国矿业大学博士研究生。研究方向:露天开采。E-mail: hewslht@126.com

引 文:罗怀廷,周伟,刘宇,等.露天煤矿冬季坑底粉尘污染特征及影响因素[J].深圳大学学报理工版,2020,37(6): 637-644.

参考文献 / References:

- [1] QI Chongchong, ZHOU Wei, LU Xiang, et al. Particulate matter concentration from open-cut coal mines: a hybrid machine learning estimation [J]. Environmental Pollution, 2020, 263(PtA): 114517.
- [2] 刘金刚,刘观全.露天矿开采过程中粉尘污染控制[J].世界有色金属,2017(14): 95-96.
LIU Jingang, LIU Guanquan. Dust pollution control during open-pit mining [J]. World Nonferrous Metals, 2017 (14): 95-96. (in Chinese)
- [3] 汤万钧,才庆祥.露天矿内粉尘聚集机理及影响因素分析[J].矿业安全与环保,2017,44(4): 95-98.
TANG Wanjun, CAI Qingxiang. Analysis on dust accumulation mechanism and influencing factors in open pit mine [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(4): 95-98. (in Chinese)
- [4] HUERTAS J, HUERTAS M E, CERVANTES G, et al. Assessment of the natural sources of particulate matter on the opencast mines air quality [J]. The Science of the Total Environment, 2014, 493: 1047-1055.
- [5] 李刚,吴将有,金龙哲,等.我国金属矿山粉尘防治技术研究现状及展望[J/OL].金属矿山.(2020-08-19)[2020-09-18]. <https://doi.org/10.19614/j.cnki.jsks.202101001>.
LI Gang, WU Jiangyou, JIN Longzhe, et al. Study status and prospect of dust control technology for metal mines in China [J/OL]. Metal Mine. (2020-08-19) [2020-09-18]. <https://doi.org/10.19614/j.cnki.jsks.202101001>. (in Chinese)
- [6] 马海渊,韩进,刘永刚.平朔东露天矿作业中存在的职业危害及防治措施[J].露天采矿技术,2018,33(2): 105-108.
MA Haiyuan, HAN Jin, LIU Yonggang. Occupational hazards and prevention measures in pingshuo east open-pit mine operation [J]. Opencast Mining Technology, 2018, 33(2): 105-108. (in Chinese)
- [7] 国家卫生健康委员会.2019年我国卫生健康事业发展统计公报[EB/OL].(2020-06-06)[2020-09-17]. <http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s10748/202006/ebfe31f24cc145b198dd730603ec4442.shtml>
National Health Commission. The 2019 statistical bulletin of china's health development [EB/OL]. (2020-06-06) [2020-09-17]. <http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s10748/202006/ebfe31f24cc145b198dd730603ec4442.shtml>. (in Chinese)
- [8] SAEDPANAH S, AMANOLLAHI J. Environmental pollution and geo-ecological risk assessment of the Qhorveh mining area in western Iran [J]. Environmental Pollution, 2019, 253: 811-820.
- [9] 樊强,李素英,关塔拉,等.露天煤矿生产中产生的粉尘对周边植物和土壤的影响[J].北方环境,2013,25(9): 100-104.
FAN Qiang, LI Suying, GUAN Tala, et al. The ecological effect on plant and soil around opencast coal mine from the mineral dust [J]. Inner Mongolia Environmental Sciences, 2013, 25 (9): 100-104. (in Chinese)
- [10] 国务院办公厅.国务院印发《打赢蓝天保卫战三年行动计划》[EB/OL].(2018-07-03)[2020-09-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-07/03/content_5303212.htm
General Office of the State Council. Three-year action plan to win the blue sky defense war [EB/OL]. (2018-07-03) [2020-09-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-07/03/content_5303212.htm. (in Chinese)
- [11] 葛少成,黄志辉,荆德吉,等.露天矿爆破扬尘规律及水炮泥配比优化[J].辽宁工程技术大学学报自然科学版,2017,36(3): 225-231.
GE Shaocheng, HUANG Zhihui, JING Deji, et al. <http://journal.szu.edu.cn>

- Blasting-dust diffusion rule and water stemming ratio optimization for open-pit mine [J]. Journal of Liaoning Technical University Natural Science Edition, 2017, 36(3): 225-231. (in Chinese)
- [12] 陈举师, 姜 兰, 蒋仲安. 边坡钻孔作业中粉尘分布及其影响因素的数值模拟[J]. 工程科学学报, 2015, 37(6): 685-692.
- CHEN Jushi, JIANG Lan, JIANG Zhong'an. Numerical simulation of dust distribution and influencing factors in slope drilling [J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(6): 685-692. (in Chinese)
- [13] 荆德吉, 梁 冰, 葛少成, 等. 卸载破碎区域气动喷雾联合抑尘网除尘的数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(12): 176-180.
- JING Deji, LIANG Bing, GE Shaocheng, et al. Numerical simulation on dust-removal by pneumatic spray combined with porous fence at unloading and crushing area [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(12): 176-180. (in Chinese)
- [14] 陈 曦, 葛少成, 邓存宝, 等. 露天矿自卸卡车车速对粉尘扩散的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(4): 151-156.
- CHEN Xi, GE Shaocheng, DENG Cunbao, et al. Study on influence of self-discharging truck speed on dust spreading in open-pit [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(4): 151-156. (in Chinese)
- [15] TANG Wanjun, CAI Qingxiang. Dust distribution in open-pit mines based on monitoring data and fluent simulation [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(11): 632.
- [16] 田冬梅, 蒋仲安, 姚 建, 等. 基于正交试验与回归统计方法的露天矿运输扬尘影响因素分析[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(8): 957-963.
- TIAN Dongmei, JIANG Zhongan, YAO Jian, et al. Influencing factors analysis of dust mass concentration by transportation in open-pit mines based on orthogonal experiment and multiple regression statistics [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(8): 957-963. (in Chinese)
- [17] 刘 芳, 塔西甫拉提·特依拜, 高宇潇, 等. 新疆准东露天煤矿开采区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3062-3068.
- LIU Fang, TASHPOLAT Tiyp, GAO Yuxiao, et al. Pollution characteristics of PM_{10} and $PM_{2.5}$ around the opencast coal mining area of east junggar basin in Xinjiang [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3062-3068. (in Chinese)
- [18] LIAO Tingting, GUI Ke, JIANG Wanting, et al. Air stagnation and its impact on air quality during winter in Sichuan and Chongqing, Southwestern China [J]. The Science of the Total Environment, 2018, 635: 576-585.
- [19] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3095—2012 环境空气质量标准[S].
- Ministry of Environmental Protection, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 3095—2012 Ambient air quality standard national standard [S]. (in Chinese)
- [20] 李昕翼, 罗 衣, 朱育雷, 等. 成都市大气污染物演变特征及气象影响因子分析 [C]//《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(上册), 北京: 工业建筑杂志社, 2018: 192-197.
- LI Xinyi, LUO Yi, ZHU Yulei, et al. The evolution of atmospheric pollutants and meteorological factor sin Chengdu [C]//“Environmental Engineering” 2018 National Academic Annual Conference Proceedings: Volume 1. Beijing: Industrial Construction Magazine, 2018: 192-197. (in Chinese)
- [21] 王翠连, 张 军, 郑 瑶, 等. 郑州城区 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征及其对气象因子的响应[J]. 环境保护科学, 2019, 45(6): 76-83.
- WANG Cuilian, ZHANG Jun, ZHENG Yao, et al. Variation characteristics of PM_{10} and $PM_{2.5}$ mass concentrations and their response to meteorological factors in Zhengzhou city [J]. Environmental Protection Science, 2019, 45(6): 76-83. (in Chinese)
- [22] 吴 健, 齐晓宝, 苏敬华, 等. 2015 年上海崇明岛 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化特征及气象因素影响分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(3): 1-8.
- WU Jian, QI Xiaobao, SU Jinghua, et al. Analysis on variation characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentration and influence of meteorological factors in Shanghai Chongming island in 2015 [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(3): 1-8. (in Chinese)
- [23] 黄 俊, 王超群, 周宝琴, 等. 广州 $PM_{2.5}$ 污染特征及与气象因子的关系分析[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(2): 176-181.
- HUANG Jun, WANG Chaoqun, ZHOU Baoqin, et al. Characteristics of $PM_{2.5}$ pollution and its relationship with meteorological factors in Guangzhou [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(2): 176-181. (in Chinese)

【中文责编: 晨 兮; 英文责编: 天 澜】