



## 外排土场宏观尺度的区域微气象因子影响特征

马力 徐甜新 毕银丽 彭苏萍 薛飞 李天翔 刘晨东 韩流

### 引用本文:

马力, 徐甜新, 毕银丽, 等. 外排土场宏观尺度的区域微气象因子影响特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 313–323.  
MA Li, XU Tianxin, BI Yinli. Influence characteristics of regional micrometeorology on macroscopic scale of external dump[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 313–323.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0565>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 干旱区露天矿外排土场隔水层重构材料试验研究

Experimental study on reconstruction material of impervious layer in open-pit mine external dump in arid area  
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 345–353 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0195>

##### 露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性研究

Ecological stability evaluation of revegetation community on open-pit coal mine dump slopes  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 334–344 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1933>

##### 黄土沟壑基底排土场滑坡的空间演化机制

Spatial evolution mechanism of landslide in loess gully basement dump  
煤炭科学技术. 2023, 51(3): 77–84 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0749>

##### 生态脆弱区复垦排土场干扰类型划分及影响因素分析

Classification of disturbance types and influencing factors of reclamation dump in ecological fragile area  
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 280–288 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ec54a337-039d-4115-819c-153feb457a24>

##### 露天矿背斜区内排土场边坡基底处理方式优选研究

Study on optimization of treatment methods for inclined basement of inner dump slope in anticline area of open-pit mine  
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 77–84 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.010>

##### 排土场植被覆盖度及地形变化对流域水土流失的影响

Influence of dump vegetation coverage and topographic changes on soil and water loss in drainage basin  
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 299–308 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4049b57f-cf06-42da-ab17-3af86b3030c3>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

马力, 徐甜新, 毕银丽, 等. 外排土场宏观尺度的区域微气象因子影响特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 313–323.

MA Li, XU Tianxin, BI Yinli, *et al.* Influence characteristics of regional micrometeorology on macroscopic scale of external dump[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 313–323.

## 外排土场宏观尺度的区域微气象因子影响特征

马力<sup>1</sup>, 徐甜新<sup>1</sup>, 毕银丽<sup>2</sup>, 彭苏萍<sup>3</sup>, 薛飞<sup>1</sup>, 李天翔<sup>1</sup>, 刘晨东<sup>1</sup>, 韩流<sup>4</sup>

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 地质与环境工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 4. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了研究露天煤矿外排土场对周围微气象因子的影响关系, 进而为矿区生态修复提供基础, 以矿区周围气流运动及水分分布为影响因子, 进一步探索外排土场尺度及形态的生态效应。以红沙泉露天煤矿为例, 运用 Fluent 流体模拟软件, 采用大涡模拟和组分传输模型, 分别建立不同高度与角度的外排土场模型进行模拟。通过红沙泉露天煤矿所处地区气象站点, 得到该地区 2020 年逐月温度与露点数据, 从而得出该地区逐月凝结高度。分析不同条件下得到的气流速度云图, 水分质量分数云图, 获得不同外排土场尺寸对周围气流运动及水分分布的影响规律, 并与该地区凝结高度进行对比。数值模拟结果表明: 随着外排土场高度增加, 气流爬坡速度缓慢增加, 爬升最大高度也随之增长, 迎风坡以及外排土场顶部的水分质量分数均增大, 背风坡形成越来越明显的卡门涡街现象, 涡流数量增加且影响范围变大, 涡流区域内气流速度、水分质量分数均增加并达到最大值, 外排土场角度增大对气流最大爬升高度影响较大, 对周围微气象因子影响不大。在极限高度 360 m 条件下, 当外排土场角度达到 26° 临界值时, 会使气流最大爬升高度达到该地区夏季凝结高度; 或在排土场极限角度 22° 条件下, 当外排土场高度达到 380 m 临界值时, 会使气流最大爬升高度达到该地区夏季凝结高度, 从而对矿区周围降水产生促进作用。

**关键词:** 露天煤矿; 外排土场; 微气象因子; 气流运动; 水分分布; 卡门涡街

**中图分类号:** TD824

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2023)08-0313-11

## Influence characteristics of regional micrometeorology on macroscopic scale of external dump

MA Li<sup>1</sup>, XU Tianxin<sup>1</sup>, BI Yinli<sup>2</sup>, PENG Suping<sup>3</sup>, XUE Fei<sup>1</sup>, LI Tianxiang<sup>1</sup>, LIU Chendong<sup>1</sup>, HAN Liu<sup>4</sup>

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Geology and Environmental Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116 China)

**Abstract:** To study the relationship of external dump of opencast coal mine impacting on surrounding micrometeorological factors, and then provide the foundation acknowledge for the ecological restoration in mining area, the airflow movement and water distribution around the mine area were regarded as the influencing factors to furtherly explore the ecological effects of the scale and form of the external dump. Taking Hongshaquan open-pit coal mine as an example, using Fluent fluid simulation software, adopting large eddy simulation and component transfer model, the external dump models with different heights and angles were established for simulation. The monthly temperature and dew point data of the area in 2020 were obtained through the regional meteorological station where Hongshaquan open-pit coal mine located, thereby reaching the monthly condensation height of the area. By analyzing the cloud diagrams of air velocity and moisture mass fraction under different conditions, the influence law of different sizes of external dump on the surrounding air flow movement and water distribution was obtained, and compared with the condensation height in the area. The numerical simulation results showed that: with the increasing dump height, the air climbing speed increased slowly, while the maximum climbing height increased, as well as the

收稿日期: 2022-08-05

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0565

基金项目: 国家重点研发计划专项资助项目(2022YFF1303302); 国家能源集团重大先导资助项目(GJNY2030XDXM-19-03.2)

作者简介: 马力(1986—), 男, 黑龙江集贤人, 副教授, 博士。E-mail: mali217@xust.edu.cn

通讯作者: 徐甜新(1997—), 女, 陕西韩城人, 硕士研究生。E-mail: xtx199719@163.com

moisture mass fraction on the windward slope and the dump top ascended. More and more obvious Karman vortex street phenomenon was formed along the leeward slope. The number of vortices increased and the influence range became larger. Both of the airflow velocity and moisture mass fraction in the vortex area increased and reached their maximum values. The increase in the angle of the external dump presented a significant impact on the maximum climb height of the airflow, but showed little impact on the surrounding micrometeorological factors. Under the condition of 360 m limit height, when the external dump Angle reached the critical value of  $26^\circ$ , the maximum airflow climbing height would reach the summer condensation height in this area. Alternatively, under the condition of  $22^\circ$  limit Angle of the outer dump, when the height of the outer dump reached the critical value of 380 m, the maximum climbing height of airflow would reach the summer condensation height of the region, thereby promoting the precipitation around the mining area

**Key words:** open-cut coal mine; external dump; micrometeorological factors; airflow movement; water distribution; karman vortex street

## 0 引 言

露天开采以土岩剥离、煤层揭露为主要作业方式,废弃土岩堆弃形成外排土场,从其形式上看如同构造山区地形。从资源角度看,外排土场作为露天开采剥离废弃物排放场地,不具备经济价值、具有一定安全风险且需要进行高成本的复垦与生态修复。另一方面,山区地形的存在对区域微气象循环有一定影响,表现为山地降水量比平地多的趋势。地形与降水有很重要的关系,它既能促进降水的形成,又能影响降水的强度和时空分布<sup>[1-2]</sup>。依据降水形成条件及从产生降水的主要过程来看,地形抬升是其中主要影响因素之一。暖湿气流在运行时,遇到较高端的山地阻挡后,气流在迎风坡被迫抬升,气流上升时绝热冷却而凝结成云,在一定条件下便形成降水,是地形雨形成的主要作用过程<sup>[3-5]</sup>。地形高度和坡度越大,动力抬升作用越强,越有利于强对流的发生<sup>[6-8]</sup>。其中,地形雨的降水机制主要包括 3 种类型:①地形性的强迫上升运动导致凝结和降水;②从先前存在的云中下落的降水物,再由局地性地形上升所形成的地层碎云冲刷的结果,在越过小山时降水出现增强;③由于日射引起上坡加热造成上坡风,从而造成山峰上的对流云。究其原因,地形性强迫气流上升及暖湿空气凝结是引起地形降水的关键因子。而露天矿外排土场具有一定区域地形特征,因此基于地形与降水的耦合机制,研究外排土场宏观尺度的区域微气象因子影响特征,探究露天开采对区域环境作用机制<sup>[9]</sup>,对转变露天开采的开发模式及其损害生态环境的传统印象具有重要积极意义。

针对地形对气候产生的影响,许多学者进行了大量观测和研究。翟朝阳等<sup>[10]</sup>研究微地形对大西沟野杏幼苗生境的气候和土壤温湿度的影响。得出坡向与空气湿度负相关,坡度与空气湿度相关,坡位与空气湿度无明显相关性;孟青等<sup>[11]</sup>以秦岭腹地为研究对象,采用 Anusplin 插值法、稳健回归方法等研究

气候变化地形特征及空气温湿度变化特征,得出温度随高度上升呈现明显下降趋势,年降水呈现不同程度上升趋势;黄菊梅等<sup>[12]</sup>基于典型的中小尺寸地形,研究其对降雨的影响。得出地形与降雨密切相关,迎风坡由于动力强迫抬升、较其他地区降雨强度偏大;文迁等<sup>[13]</sup>认为相对高程的 70%~80% 附近出现最大降水,山坡脚的降水量反而比山顶上高。山坡坡度、坡面风速大小、风向与迎风坡交角等因素决定了气流的上升运动速度,从而影响了降水分布;孙继松<sup>[14]</sup>研究太行山东侧低空东风气流下不同垂直分布气流对降水落区的影响。得出当垂直于山体的气流随高度减小时,造成气旋式涡度增加,产生风场切变;当气流的垂直分布随高度增加时,迎风坡方向表现为反气旋涡度增强,而在背风坡方向产生辐合作用,同样发生风场切变;Linda Schneider<sup>[15]</sup>为了了解地形如何影响降水的发生和强度,对平坦的山脉和逐渐平滑的地形进行了灵敏度运行。发现低水平收敛对于深对流的开始至关重要。其强度因模拟而异,对于具有锋面带天气的情况,降水的大规模平流与局部效应具有相互作用;范广洲<sup>[16]</sup>利用 NCAR RegCM2 模式就地形对华北地区夏季降水的影响进行了模拟研究。发现地形高度降低,迎风坡地形抬升作用减弱,山前降水减少。低地形抑制了背风坡气旋的发展,因此也减少了山后降水;郭璇<sup>[17]</sup>研究川西高原地形特点对降水的影响,得出在川西高原地区,高山和山地为迎风坡,随着高度的增加,降水量由山脚向上递增。故川西地区海拔较高的高原、山地地区的降水量尤为明显,而其他海拔较低地区的降水量远不及高海拔地区。

地形抬升作用与地形高度和坡度有关,而露天煤矿外排土场地形尺度由外排土场高度及外排土场边坡角度直接决定。露天煤矿外排土场由松散破碎岩石堆积而成,松散堆积体的岩体力学参数是决定外排土场高度和边坡角度的重要参数<sup>[18]</sup>。针对露天矿山外排土场的地形尺度影响方面,目前尚无相关



研究与探索。新疆准东矿区地处干旱荒漠区,受降水影响小且岩石物理力学参数较大,对外排土场边坡稳定性及提高外排土场边坡角度有利。本文以新疆准东矿区红沙泉为例,进一步结合当地微气象条件及外排土场工程条件,探索外排土场尺度的区域微气象特征效应,揭示干旱区露天煤矿开采扰动对区域微气象的影响关系,为矿山生态修复提供重要科学指导与规划。

## 1 地形对越山气流的宏观影响

山脉会对水平尺度 1 ~ 100 km 的越山气流运动产生影响,进而对毗邻地区的天气有着重要的意义<sup>[19]</sup>。据此进一步探索外排土场微地形对局地气流的影响,对荒漠区微气象的影响具有重要基础意义。

其中,越山气流的运动特征主要取决于:风的垂

直廓线、大气稳定度结构及山脉的形状。在稳定大气条件下(位温随高度增加)与气流垂直的简单的条形山脉的作用下,可根据风速的垂直廓线将气流分为 3 种基本类型<sup>[20]</sup>: ①在风速随高度基本不变的微风情况下,空气呈平流波状平滑地越过山脊(图 1a),所以气流仅微弱地垂直上升,这称为片流。②当风速比较强且随高度逐渐增加时,气流在山脉背风侧翻转而形成定常涡流(图 1b)。③当风速的垂直梯度大时,由山地产生的扰动引起波列(图 1c),它可在下风侧伸展到 25 km 或更远的距离(图 1d)。如果气流状态保持不变,它们就成为定常重力波。背风波通常是当深厚气流与山脊线所成交角在 30°以内且风向随高度变化很小时才形成。但风速向上必须是增加的。对于低矮的山脊(1 km)最小的水平风速必须为 7 m/s 左右,而高度为 4 km 的山脊,风速必须为 15 m/s 左右才能导致背风波形成。

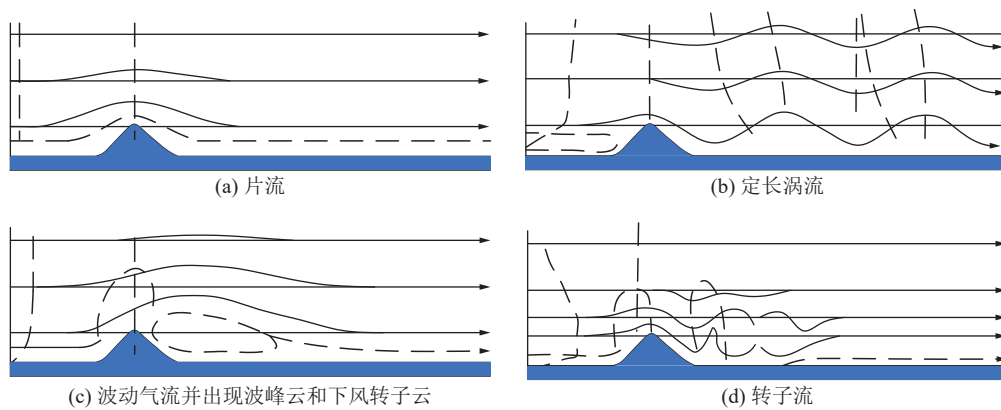


图 1 越山气流类型与风速垂直廓线关系

Fig.1 Relationship between the type of cross-mountain airflow and the vertical profile of wind speed

从图 1b、图 1c、图 1d 的流线中可以看出气流与整体脱离的情况。当这种情况发生时,出现转子运动而在波峰下部形成单个涡流。转子形成激烈的乱流区,有时可达到山脉一般的尺度。在下降气流中,由于气流沿坡运动,所以气流分离出来的倾向受到了抑制。而在对流情况下(特别是在背风坡),气流分离出来的可能性得到加强。而当上层空气不能维持必要的稳定运动时,就要发生部分气流分离出来,而这种分离可减弱背风坡波动的振幅进而减小山地对高空气流的影响。当风速为 8 ~ 15 m/s 时,则气流乱流性增强并在背风坡的低层引起连续的转子。如果风速不变,则波的振幅随高度增大。如果大气是稳定的,则波动较强。当风速大于 15 m/s 时,乱流情况与风速为 8 ~ 15 m/s 时类似。背风坡波长及其振幅和转子的发生都取决于大气稳定度和风速垂直梯

度。如果层结构稳定且风速随高度有规律地增加,则转子流运动往往很弱。

## 2 地形抬升凝结高度

凝结高度,是空气中的水汽在上升运动中,达到一定饱和状态时的高度,而水汽饱和是降水的必要条件之一。因此凝结高度高,山地降水带也随之增高,抬升凝结高度的计算公式<sup>[21]</sup>为:

$$\begin{cases} H = a(T_s - \tau_s) \\ a = \frac{1}{\gamma_a + d\tau/dT} \\ \frac{d\tau}{dT} = -\frac{R_v}{R_d} \frac{g\tau^2}{LT_v} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $H$  为抬升凝结高度, m;  $T_s$  为抬升起始高度上的温度, °C;  $\tau_s$  为抬升起始高度上的露点, °C;  $R_v$  和  $R_d$  分别为水汽和干空气的比气体常数,  $R_v/R_d \approx 1.608$ ;  $g$  为



重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $L$  为凝结潜热,  $\text{J/kg}$ ;  $\gamma_a$  为干空气的绝热温度递减率;  $d\tau/dT$  为干绝热抬升过程中的  $\tau$  和  $T$  的函数。

为了简化计算, 令  $a=124 \text{ m/}^\circ\text{C}$ , 可以近似计算地形抬升凝结高度<sup>[22]</sup>。从式(1)可以看出, 凝结高度与温度和露点之差呈正相关关系, 结合新疆奇台县气象站(站点编号: 51379)2020 年温度、露点数据, 获得其 2020 年凝结高度变化趋势如图 2 所示。从图中可以看出, 1—4 月, 凝结高度逐渐增大至最高, 主要原因为该时期内露点为负值, 温度逐渐增大使温度与露点之差达到最大。5—7 月, 露点温度逐渐增大, 温度与露点两者之差降低使凝结高度逐渐减小, 8 月份气温增大使凝结高度有所增加, 后随温度逐渐降低, 使凝结高度逐渐减小。

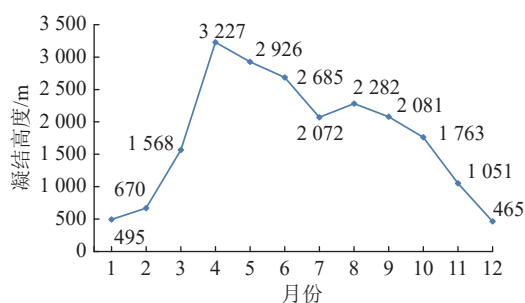


图 2 新疆奇台 2020 年逐月凝结高度

Fig.2 Xinjiang Qitai 2020 monthly condensation height

红沙泉露天煤矿露天矿位于准噶尔盆地东南, 区内地势东南高、北西低, 地貌形态为残丘状的剥蚀平原, 海拔+657~753 m, 最大比高 96 m, 相对高差一般在 30 m 左右, 属大陆干旱荒漠气候, 年温差和昼

夜温差较大, 6—8 月为夏季, 气候炎热, 白天气温常在  $40^\circ\text{C}$  以上, 绝对最高气温达  $43.2^\circ\text{C}$ 。11 月至次年 2 月为冬季, 气候严寒, 绝对最低气温达  $-49.8^\circ\text{C}$ 。4—5 月份是该地区植物种植的最佳时期, 9 月份之后植物进入休眠期, 因此 4—8 月是该地区生态修复的最佳时期, 研究该时间范围内的外排土场微气象因子影响规律对植物修复具有重要意义。剥离物料堆弃形成的外排土场造就了区域微地形, 从地形降水形成机理角度来看, 为了研究外排土场尺度对区域降水产生影响, 由外排土场地形尺度引起的气流抬升高度应达到该区域的凝结高度。故以 4—8 月凝结高度均值 2 638 m 为红沙泉露天煤矿区域凝结高度, 进一步探索红沙泉露天煤矿外排土场地形尺度对降水影响及区域微气象特征。

### 3 外排土场表层区域气流运动规律

为了得到红沙泉露天煤矿外排土场下垫面 2 m 高度范围内对微气象因子的影响, 综合该区域西北风特点, 采用图 3a 所示外排土场平台测点布置(图中+666 为+666 m 水平), 分别在外排土场西、北两侧平台各布置一条测线。通过 Davis 气象站分别对红沙泉露天煤矿外排土场地表及外排土场平盘上布置测点, 对风向、风速进行了监测, 如图 3b 所示。

西、北两条测线均为迎风坡, 从图 4 获得的风速监测数据结果可以看出, 随外排土场高度增加, 风速逐渐增大, 均反映出外排土场高度对风速产生一定影响。外排土场表层低平盘地形对周围风速、风向产生了一定影响。

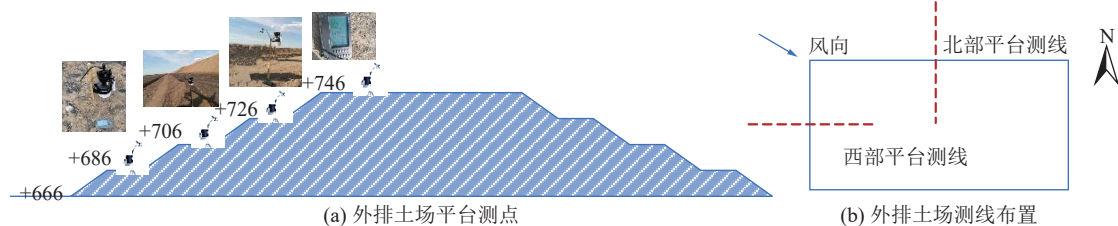


图 3 外排土场不同位置布点

Fig.3 Layout of different locations of the external dump

## 4 基于组分传输与大涡模拟的外排土场高层气流运动规律

### 4.1 外排土场稳定临界高度

红沙泉露天煤矿外排土场排弃混合物料密度  $1.99 \text{ g/cm}^3$ , 混合物料再生黏聚力取  $14.15 \text{ kPa}$ , 内摩擦角  $24^\circ$ 。按照红沙泉露天煤矿初步设计排土台阶高度 20 m, 外排土场高度 80 m, 外排土场边坡角度

$22^\circ$ , 排土平盘宽度 20 m。以此参数为依据进一步探索外排土场临界高度, 外排土场高度从 80 m 开始模拟, 以 40 m 为步长增加外排土场高度至 400 m, 探索外排土场高度变化对外排土场边坡稳定性影响, 确定其计算结果见表 1, 表 1 中 Ordinary 为瑞典条分法, Bishop 为简化毕肖普法, Janbu 为简布法。

根据上表绘制外排土场稳定系数与高度关系曲线, 如图 5 所示。外排土场高度从 80 m 增加到 120 m

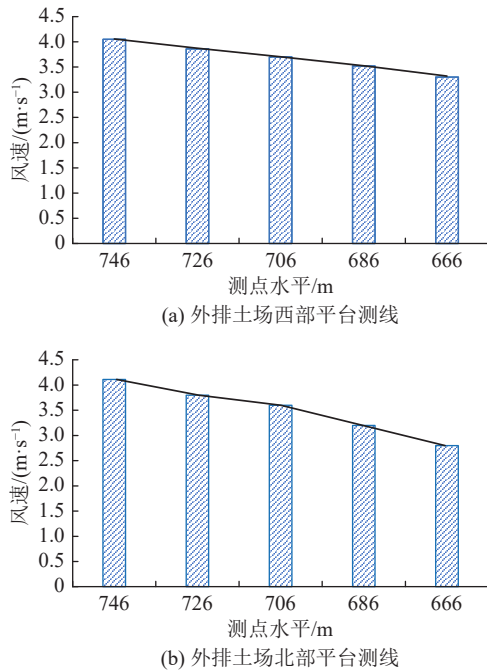


图 4 不同水平平台风速

Fig.4 Wind speed of different horizontal platform

表 1 外排土场高度变化的边坡稳定系数

Table 1 Slope stability coefficient of external dumping Yard Height Variation

高度/m	角度/(°)	各计算方法下外排土场稳定系数			稳定系数均值
		Ordinary	Bishop	Janbu	
80	24	1.39	1.44	1.39	1.41
120	23	1.45	1.53	1.45	1.48
160	22	1.24	1.26	1.14	1.21
200	22	1.22	1.24	1.22	1.23
240	22	1.21	1.24	1.21	1.22
280	22	1.21	1.22	1.20	1.21
320	22	1.20	1.21	1.20	1.20
360	22	1.19	1.21	1.19	1.20
400	22	1.19	1.20	1.19	1.19

时,外排土场边坡角度从 24°边为 23°,稳定系数稍有增大;而增加至 160 m 时,外排土场整体边坡角度变为 22°,稳定系数降低至 1.21,随着继续增加外排土场高度至 360 m 后,外排土场边坡稳定性维持在 1.20~1.23 范围内,而当外排土场高度增加至 400 m 时,稳定系数降至 1.20。

由此可见,外排土场高度从 160 m 增至 360 m 范围内,外排土场边坡角度始终在 22°,稳定系数变化不大。红沙泉地处干旱区,外排土场边坡稳定储备系数取为 1.2 时,外排土场极限高度可以达到 360 m,边坡角 22°。

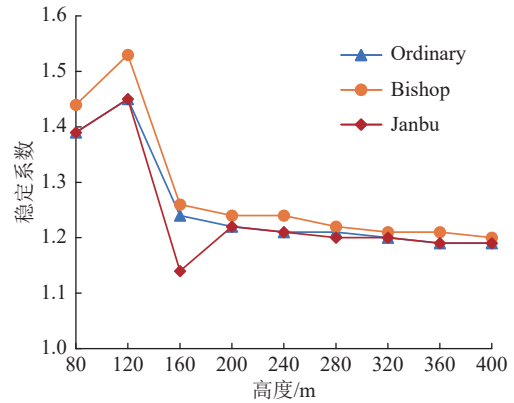


图 5 外排土场稳定系数与高度关系

Fig.5 Relationship between stability factor of external dump with dump height

## 4.2 大涡模拟与组分传输原理

### 4.2.1 大涡模拟

湍流的大涡结构强烈依赖于流场的边界形状和边界条件,其受流场影响较大,小尺度涡则可以认为是各向同性的,可以将大涡计算与小涡计算分开处理,并用统一的模型计算小涡。大涡模拟(LES)方法即对湍流脉动部分直接模拟,将 N-S 方程在一个小空间域内进行滤波,以便从流场中去掉小尺度涡,导出大涡模拟所满足的方程。小涡对大涡的影响会出现在大涡方程中,再通过建立亚格子尺度模型来模拟小涡的影响。

大涡模拟采用过滤方法消除湍流中中小尺度脉动,积分过滤过程<sup>[23]</sup>为:

$$\overline{u_i}(x, t) = \frac{1}{\Delta^3} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} u_i(\xi, t) G(x - \xi) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \quad (2)$$

式中,  $G(x - \xi)$  为过滤函数,因此得到大涡数值模拟的控制方程<sup>[24]</sup>如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} + \overline{f_i} \\ \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

不可压缩牛顿流体湍流大涡模拟的未知量是  $\overline{u_i}$  和  $\overline{p}$ , 而方程左边还有新的未知量  $\overline{u_i u_j}$ 。需要对  $\overline{u_i u_j}$  构造模型,以封闭大涡数值模拟方程。利用过滤运算,将湍流样本流动分解为大尺度运动和小尺度运动的关系为

$$u_i(x, t) = \overline{u_i}(x, t) + u_i''(x, t) \quad (4)$$

式中,  $\overline{u_i}$  已由式(2)定义,它是湍流样本流动中的大尺度部分;式中  $u_i''(x, t)$  为样本流动中的小尺度脉动成分。由式(4)可得  $\overline{u_i u_j}$  的表达式为

$$\overline{u_i u_j} = \overline{[\overline{u_i}(x, t) + u''_i(x, t)][\overline{u_j}(x, t) + u''_j(x, t)]} = \overline{u_i(x, t)\overline{u_j}(x, t)} + \overline{u_i(x, t)u''_j(x, t)} + \overline{u_j(x, t)u''_i(x, t)} + \overline{u''_i(x, t)u''_j(x, t)} \quad (5)$$

式中:  $\overline{u_i u_j}$  为总的动量运输的低通过滤;  $\overline{u_i} \overline{u_j}$  为可解尺度的动量运输;  $\overline{u_i} \overline{u_j}$  为  $\overline{u_i u_j}$  的低通过滤;  $\overline{u_i u''_j}$  和  $\overline{u''_i u_j}$  为由可解尺度和不可解尺度脉动相互作用产生的动量运输;  $\overline{u''_i u''_j}$  为亚格子脉动间的动量运输。

#### 4.2.2 组分传输

Fluent 可以通过求解描述每种组成物质的对流, 扩散和反应源的守恒方程来模拟混合和运输, 基于第  $i$  种物质的对流扩散方程预估每种物质的质量分数  $Y_i$ 。守恒方程采用以下的通用形式<sup>[25]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (6)$$

式中,  $R_i$  为化学反应的净产生速率;  $S_i$  为离散相及用户定义的源项导致的额外产生速率。

当系统中出现  $N$  种物质时, 需要解  $N-1$  个这种形式方程。由于质量分数和必须为 1, 第  $N$  种物质的分数通过 1 减去  $N-1$  个已解得的质量分数得到。为了使数值误差最小, 第  $N$  种物质必须选择质量分数最大的物质, 如组分是空气时第  $N$  种物质设置为  $N_2$ 。Fluent 提供了 4 种模拟反应的模型<sup>[26]</sup>: 通用有限速率模型, 非预混燃烧模型, 预混燃烧模型和部分预混燃烧模型。在本模拟中, 选用的是通用有限速率模型, 即基于组分质量分数的输运方程解, 根据所定义的化学反应机制, 对化学反应进行模拟。本试验中设置了 2 种流体, 分别是空气和水蒸汽, 根据模拟结果中水分质量分数的大小来判断外排土场对矿区周围空气湿度的影响。

#### 4.3 外排土场高度对区域气流运动影响规律

以外排土场高度 360 m, 角度 22° 为例, 构建 10 000 m×3 500 m 的二维网格模型, 在底中部构建如上参数尺寸的外排土场轮廓边界以及长度 500 m 的水分源。并利用 ICEM CFD 划分网格模型, 设置 Maximum Size=20, 划分后网格尺寸为 NODES=95 808, QUADS=95 118, 如图 6 所示。



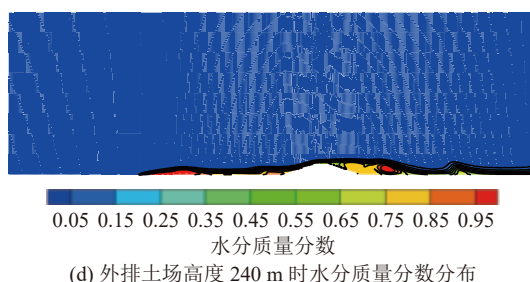
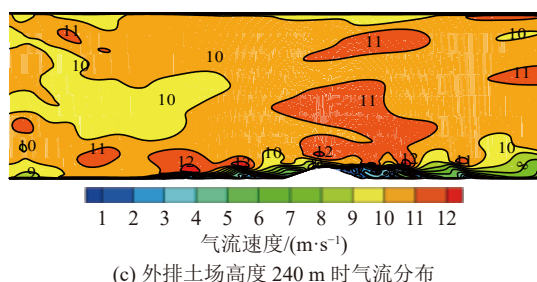
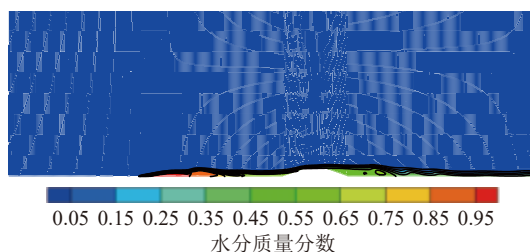
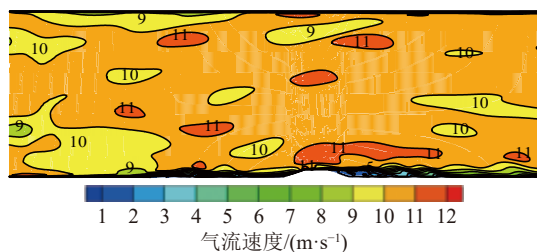
图 6 网格模型

Fig.6 Grid model diagram

将模型导入 FLUENT 中, 启动 LES-2D 大涡模式以及组分传输模型, 依据现场检测情况如图 4 所示, 边界条件设置为左侧速度 10 m/s 流入, 底部水分源速度 0.75 m/s 流入, 右侧自由流出, 并设定内部  $K-\varepsilon$  湍流运动模型, 记录迭代 5 000 步的内部气流速度, 水分运动趋势。

在外排土场极限角度 22° 前提下, 分析得出不同外排土场高度对周围气流分布以及水分质量分数的影响, 分别以 160, 240, 360, 370, 380, 390, 400 m 外排土场高度变化进行建模分析, 确定气流分布云图及水分质量分数分布云图如图 7 所示。

根据以上模拟结果, 获得外排土场高度变化对过山气流速度影响及对周围水分质量分数影响关系, 如图 8a、图 8b 所示, 外排土场高度与气流最大爬升高度关系如图 9 所示。





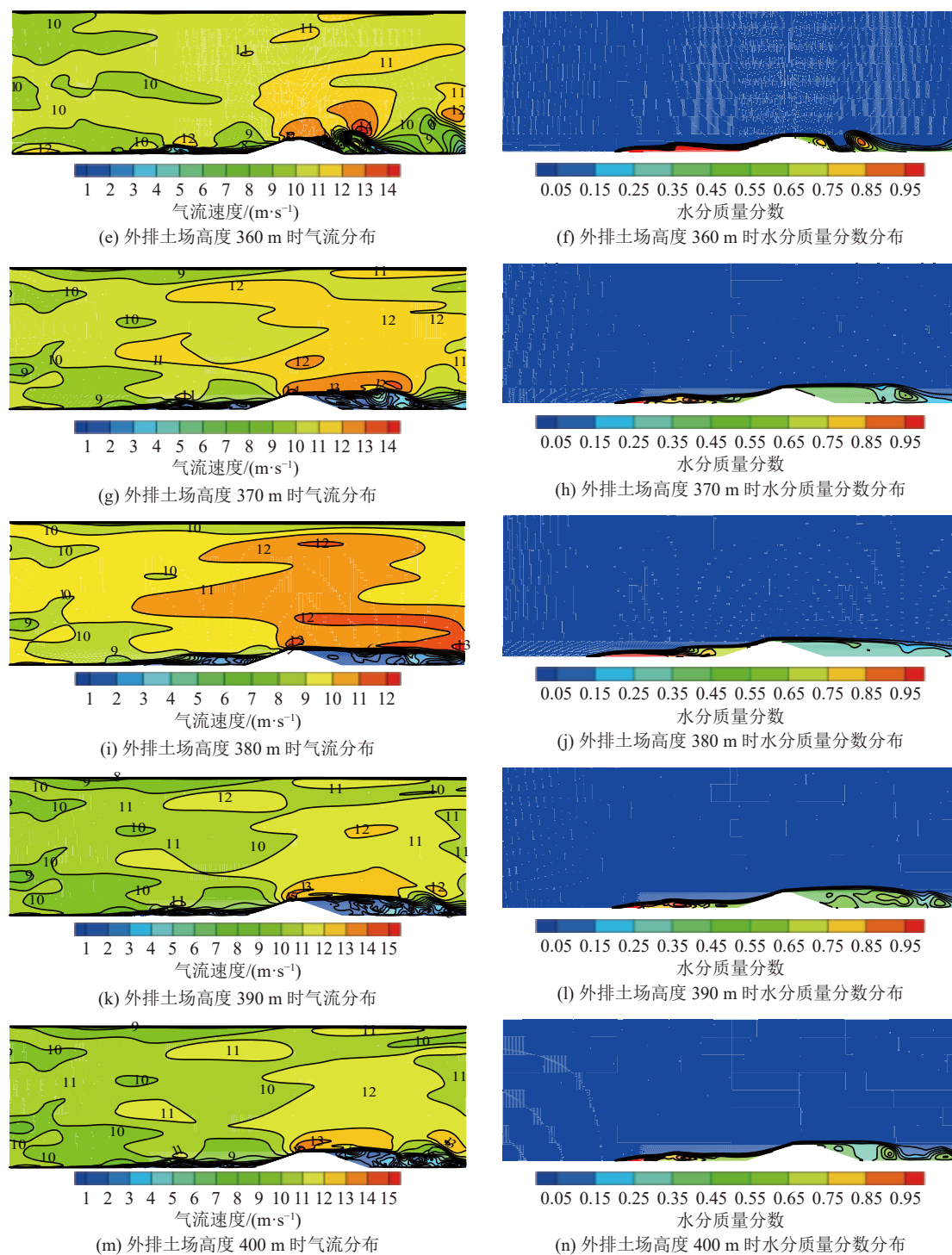


图 7 不同外排土场高度对气流以及水分质量分数影响模拟云图

Fig.7 Simulated cloud map of the influence of different external dump heights on airflow and moisture content

从图 8 和图 9 可以看出,随着高度增加,气流经过外排土场最大爬坡速度为 15 m/s,外排土场顶部最大速度值为 13 m/s,在背风坡涡流区域上方最大速度达到 14 m/s,背风区涡流区域影响范围大、卡门涡街现象显著。外排土场高度为 160 m 时,气流爬升速度最高为 725 m,外排土场高度为 360 m 时达到 2 270 m,低于计算凝结高度。外排土场高度达到

380 m 时,凝结高度高于该地区 4—8 月凝结高度均值;高度达到 400 m 时,凝结高度高于该地区 4—8 月凝结高度最大值。爬坡时水分质量分数降低,在下坡时质量分数增大,且随外排土场高度的增大,外排土场顶部的水分质量分数增大,涡流区水分质量分数达到最大,背风坡形成了明显的卡门涡街现象,涡流区内湍流漩涡显著。显然,随着外排土场高度

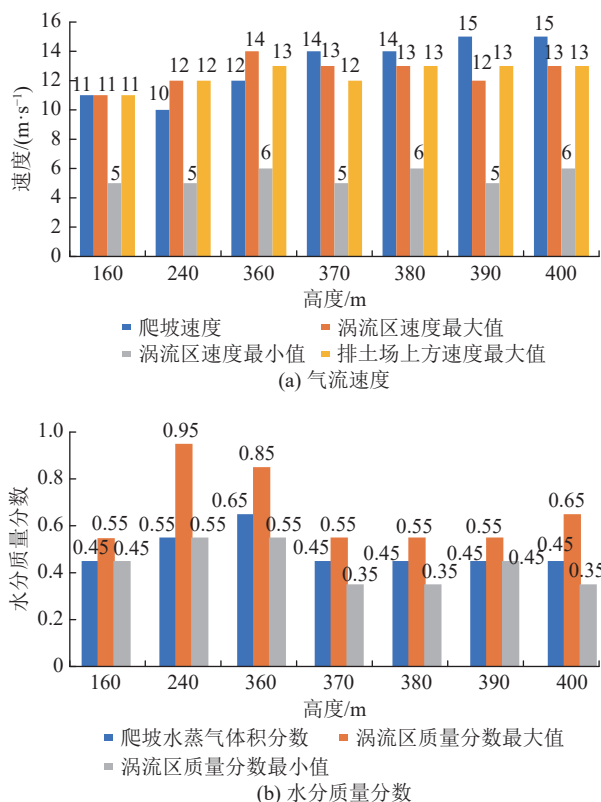


图 8 不同外排土场高度下气流速度与水分质量分数关系

Fig.8 Relationship between air velocity and moisture mass fraction at different external dump heights

的增大,其气流爬升最大高度也随之增加。

## 5 讨 论

气流抬升产生的垂直运动除与地形高度密切相关以外,还受爬坡角度影响。进一步对比研究相同外排土场极限高度 360 m 条件下,角度因素对气流影响特征。分别以外排土场角度为  $24^\circ$ 、 $26^\circ$ 、 $27^\circ$ 、 $28^\circ$  变化进行建模分析,确定气流分布云图及水分质

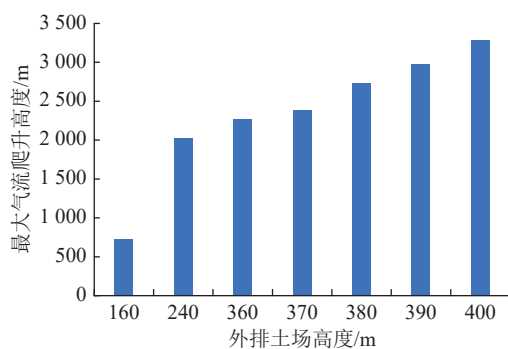


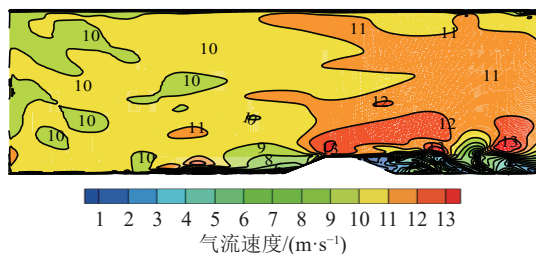
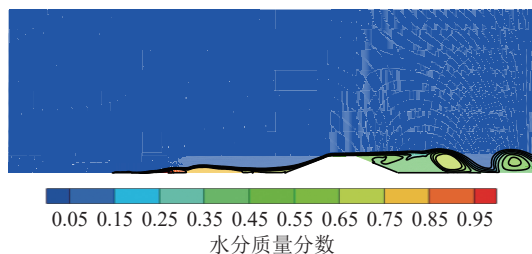
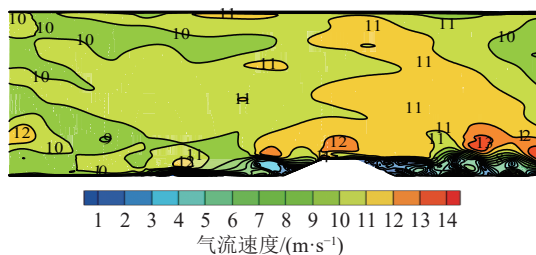
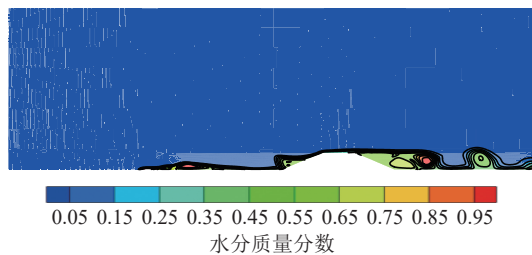
图 9 外排土场高度与气流最大爬升高度关系

Fig.9 Relationship between height of external dump and maximum climbing height of air flow

量分数分布如图 10 所示。

根据以上模拟结果,获得外排土场角度变化对过山气流速度影响及对周围水分质量分数影响关系,如图 11a、图 11b 所示,外排土场角度与气流最大爬升高度关系如图 12 所示。

从图 11、图 12 可以看出,角度为  $24^\circ$  时,最大爬坡速度为 13  $\text{m/s}$ ,背风坡涡流区最大速度为 13  $\text{m/s}$ ,气流爬升最大高度为 2476 m,角度增加到  $26^\circ$  时,迎风坡最大爬坡速度增至 14  $\text{m/s}$ ,背风坡涡流区最大速度仍为 13  $\text{m/s}$ 。角度为  $24^\circ$  时,水分爬坡时最大质量分数为 0.45,背风坡涡流区域内最大质量分数为 0.75,角度增至  $26^\circ$  时,爬坡时最大质量分数为 0.35,背风坡涡流区域数量变大,影响范围变大,涡流区内最大质量分数为 0.85,气流最大爬升高度为 2817 m,超过该地区 4—8 月凝结高度均值。角度为  $27^\circ$  时,气流运动各参数变化不明显,随着外排土场角度增大到  $28^\circ$ ,涡流区最大水分质量分数降至 0.35,气流最大爬升高度为 3222 m。因此随着外排土场角度增加,周围气流爬升速度变化微弱,但角度增大对气流的垂直运动影响较大。

(a) 外排土场角度为  $24^\circ$  时气流分布(b) 外排土场角度为  $24^\circ$  时水分质量分数分布(c) 外排土场角度为  $26^\circ$  时气流分布(d) 外排土场角度为  $26^\circ$  时水分质量分数分布

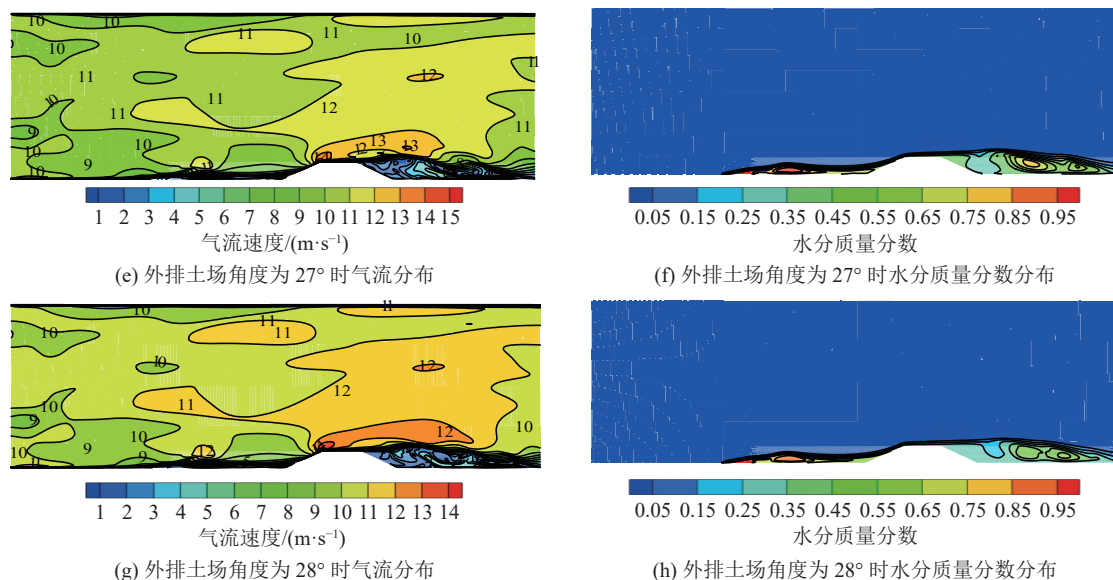


图 10 不同外排土场角度对气流以及水分质量分数影响模拟云图

Fig.10 Simulated cloud map of the influence of different external dump angles on airflow and moisture content

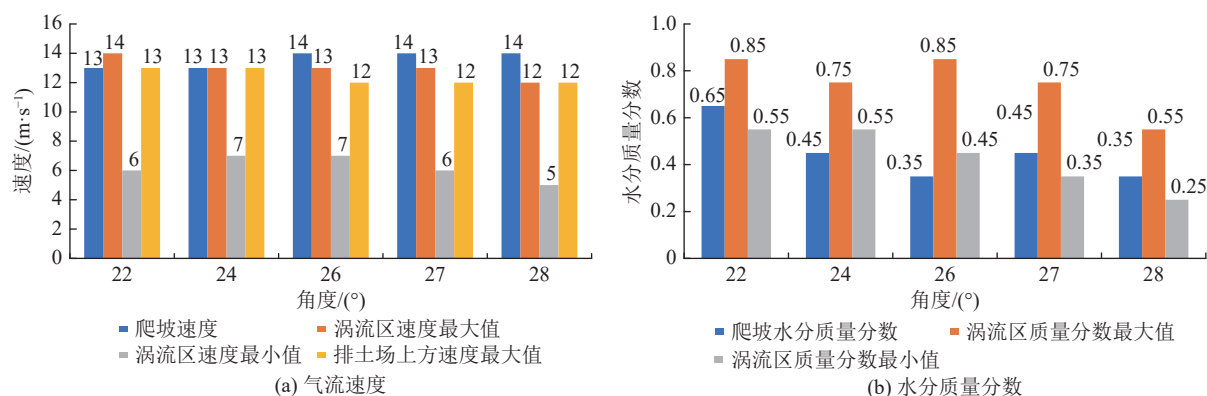


图 11 不同外排土场角度下气流速度与水分质量分数关系

Fig.11 Relationship between air velocity and water mass fraction at different external dump angles

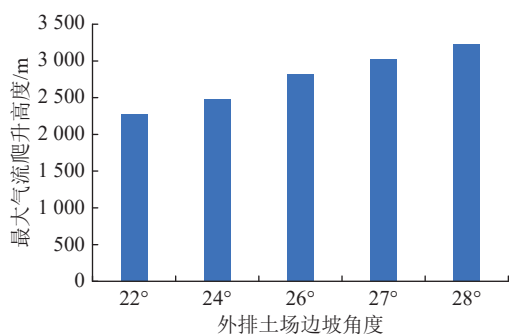


图 12 外排土场角度与气流最大爬升高度关系

Fig.12 Relationship between the angle of external dump site and the maximum climbing height of air flow

由模拟结果可以得出, 在外排土场边坡角度为 22° 条件下, 当外排土场高度达到极限高度 360 m 时, 红沙泉露天煤矿外排土场对微气象因子影响不大。而在极限高度 360 m 条件下, 当外排土场角度达到

26° 临界值时, 会使气流最大爬升高度达到该地区 4—8 月凝结高度; 或在外排土场极限角度 22° 条件下, 当外排土场高度达到 380 m 临界值时, 会使气流最大爬升高度达到该地区 4—8 月凝结高度。因此, 在工程条件允许及外排土场边坡稳定的前提下, 应结合排土工程措施提高外排土场高度至 380 m 以上或角度 26° 以上, 从而促进外排土场对区域微气象影响的积极作用。但在目前外排土场边坡稳定性的要求下, 该外排土场高度与角度均未能达到临界值。

## 6 结 论

1) 地形对区域过山气流运动产生影响, 凝结高度是衡量其影响的重要指标。依据红沙泉露天煤矿所在地奇台县 2020 年温度以及露点温度, 估算了该地区 4—8 月凝结高度为 2 638 m。

2) 外排土场高度对矿区周围气流运动的影响较



大,气流爬升速度随着外排土场高度增大而缓慢上升,背风坡出现明显的卡门涡街现象,且外排土场高度越高,涡流区域数量及影响范围越大,涡流区域会出现速度最大值以及水分质量分数最大值。

3)外排土场边坡角度对气流爬升速度及周围水分质量分数影响微弱,但边坡角度的增大对促进气流向凝结高度爬升有积极效应。

4)在边坡稳定性条件下,综合岩体力学参数及开采影响条件,采用极限平衡法确定了红沙泉露天煤矿外排土场极限稳定高度为360 m,稳定边坡角度为22°。在此范围内气流有所抬升但未达到凝结高度,对周围区域微气象因子影响不显著。

#### 参考文献(References):

- [1] 钟水新. 地形对降水的影响机理及预报方法研究进展[J]. [高原气象](#), 2020, 39(5): 1122–1132.  
ZHONG Shuixin. Research progress on the mechanism and forecast methods of the influence of topography on precipitation[J]. [Plateau meteorological](#), 2020, 39(5): 1122–1132.
- [2] COLLE Brian. Sensitivity of orographic precipitation to changing ambient conditions and terrain geometries: An idealized modeling perspective[J]. [Journal of the Atmospheric Sciences](#), 2004, 61(5): 588–606.
- [3] 孟英杰, 李丽平, 王珊珊, 等. 中尺度暴雨过程中地形抬升作用分析[J]. [安徽农业学](#), 2010, 38(12): 6333–6336, 6402.  
MENG Yingjie, LI Liping, WANG Shanshan, *et al.* Analysis of topographic uplift during mesoscale rainstorm[J]. [Anhui Agriculture](#), 2010, 38(12): 6333–6336, 6402.
- [4] 把黎. 祁连山地区大气背景场及地形云降水过程的特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 39–44  
BA Li. Characteristic analysis of atmospheric background field and orographic cloud precipitation process in Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2020: 39–44
- [5] KATZFEY Jack. Simulation of extreme New Zealand precipitation events. part I: sensitivity to orography and resolution[J]. [Monthly Weather Review](#), 1995, 123(3): 737–754.
- [6] 安小艳. 天山山区地形对降水空间分布的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015: 31–38  
AN Xiaoyan. Effect of topography on spatial distribution of precipitation in Tianshan Mountains [D]. Shihezi: Shihezi University, 2015: 31–38
- [7] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. [气象科技](#), 2007, 35(3): 309–316.  
LIAO Fei, HONG Yanchao, ZHENG Guoguang. Research overview of the effect of topography on precipitation[J]. [Meteorological Science and Technology](#), 2007, 35(3): 309–316.
- [8] COLLE Brain, ZENG Yanguang. Bulk microphysical sensitivities within the MM5 for orographic precipitation. part II: Impact of Barrier Width and Freezing Level[J]. [Monthly Weather Review](#), 2005, 132(12): 2802–2815.
- [9] 马英武. 准东矿区露天煤矿排土场水土保持防治措施分析[C]// 首届干旱半干旱区域水土保持生态保护论坛论文选编. 2013: 271–273.  
MA Yingwu. Analysis of soil and water conservation prevention and control measures of dump in Zhundong Mine area[C]// [Selected papers of the first Forum on Soil and Water Conservation and Ecological Protection in arid and Semi-arid Regions](#). 2013: 271–273.
- [10] 翟朝阳, 陈高安, 杨新峰, 等. 微地形对大西沟野杏幼苗生境的气候和土壤温湿度的影响[J]. [中国农学通报](#), 2019, 35(27): 114–120.  
ZHAI Chaoyang, CHEN Gaoan, YANG Xinfeng, *et al.* Effects of microtopography on climate and soil temperature and humidity of daxigou Apricot seedling habitat[J]. [Chinese Agricultural Science Bulletin](#), 2019, 35(27): 114–120.
- [11] 孟清, 白红英, 赵婷, 等. 秦岭山地气候变化的地形效应[J]. [山地学报](#), 2020, 38(2): 180–189.  
MENG Qing, BAI Hongying, ZHAO Ting, *et al.* Terrain effects of climate change in the Qinling Mountains[J]. [Journal of Mountain Science](#), 2020, 38(2): 180–189.
- [12] 黄菊梅, 邹用昌, 赵光平, 等. 中小尺度地形对降水影响研究[J]. [人民长江](#), 2013, 44(S1): 28–31.  
HUANG Jumei, ZOU Yongchang, ZHAO Guangping, *et al.* Impact of mesoscale topography on precipitation. [J] [Yangtze River](#), 2013, 44(S1): 28–31.
- [13] 文迁, 谭国良, 罗嗣林. 降水分布受地形影响的分析[J]. [水文](#), 1997(S1): 64–66.  
WEN Qian, TAN Guoliang, LUO Silin. Analysis of precipitation distribution influenced by topography[J]. [Hydrology](#), 1997(S1): 64–66.
- [14] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. [高原气象](#), 2005, 24(1): 62–69.  
SUN Jisong. Influence of Vertical Distribution of Air Flow on Topographic Rainfall Area[J]. [Plateau Meteorology](#), 2005, 24(1): 62–69.
- [15] SCHNEIDER Linda, BARTHOLOTT Christian, BARRETT Andrew, *et al.* Corinna Hoose The precipitation response to variable terrain forcing over low mountain ranges in different weather regimes[J]. [Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society](#), 2018, 144(713): 970–989.
- [16] 范广洲, 吕世华. 地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究[J]. [高原气象](#), 1999(4): 659–667.  
FAN Guangzhou, Lv Shihua. Numerical simulation of the effect of Topography on summer precipitation in North China[J]. [Plateau Meteorology](#), 1999(4): 659–667.
- [17] 郭璇, 田苗, 洪程之, 于瑞波, 陈权亮. 川西高原地形特征对降水的影响[J]. [新疆农垦科技](#), 2017, 40(12): 40–42.  
GUO Xuan, TIAN Miao, HONG Chengzhi, *et al.* Effects of topographic characteristics on precipitation in western sichuan plateau[J]. [Xinjiang agricultural reclamation technology](#), 2017, 40(12): 40–42.
- [18] 陈印, 杨溢, 刘磊, 等. 排土场边坡稳定性分析及台阶高度的确定[J]. [中国锰业](#), 2016, 34(2): 21–24.

- CHEN Yin, YANG Yi, LIU Lei, *et al.* Stability analysis of dump slope and determination of step Height[J]. China Manganese Industry, 2016, 34(2): 21-24.
- [ 19 ] 高登义. 中国山地环境气象学[M]. 河南科技出版社, 2005: 90-92.
- [ 20 ] 于晓晶, 赵 勇. 地形对天山夏季降水影响的模拟[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1133-1143.
- YU Xiaojing, Zhao Yong. Simulation of the effect of topography on summer precipitation in tianshan Mountains[J]. The Chinese desert, 2016, 36(4): 1133-1143.
- [ 21 ] 王沛霖, 许丽章. 抬升凝结高度的精确计算[J]. 中山大学学报论丛, 1993(1): 146-149.
- WANG Peilin, Xu Lizhang. Precise calculation of uplift condensation height[J]. Journal of Sun Yat-sen University, 1993( 1 ): 146-149.
- [ 22 ] 陈创买, 郭英琼. 气象常用参数和物理量查算表 [M]. 北京: 气象出版社, 1980. 3-4.
- [ 23 ] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 57-60.
- [ 24 ] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流理论与模拟[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 236-248.
- [ 25 ] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016: 395-397.
- [ 26 ] 凌桂龙. Fluent 19.0流体计算从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 221-222.