

许可证排放总量指标时,系统数据成为核定依据,有助于排污权分配与使用效率评估。对月度、季度、年度污染物达标率评估,系统可自动生成累计排放曲线,对照法定限值形成可视化分析报告。在重点时段如采暖季或重污染天气预警期间,系统数据可用于动态调整企业限排系数,实现差异化总量控制。自动数据记录与定期评估机制结合,为环保绩效考核与生态补偿制度提供坚实的数据支撑^[4]。

5.3 政策调整与治理绩效反馈

大气污染治理政策的调整需依托客观数据反馈,自动监控系统生成的高时效、高精度数据可用于评估治理措施实施效果。区域性限排、产业结构优化、燃料替代等政策出台后,监测数据反映污染物排放强度是否下降以及波动范围是否收窄。某地区实施工业企业限产政策后,NO_x日均浓度下降幅度达到38%,表明措施产生直接成效。系统数据可对比政策执行前后的排放趋势,验证治理方案的适用性与精准度,同时也能发现未达预期的环节,为下一轮政策修订提供依据。监控数据还能反映区域间政策执行效果差异,支持横向评估与跨区域协同治理机制的设计。

6 大气重点污染源自动监控能力的优化路径

6.1 监控对象动态扩展与布设优化

现有自动监控系统覆盖范围仍存在盲区,部分排放量不大的重点企业尚未纳入监控范围。通过排放清单动态更新,将年排放量超过10吨SO₂或NO_x的企业全部纳入监测对象,有助于提升覆盖率。监测点布设应结合污染物扩散模拟与风场分析,避免出现空间空白或数据冗余。在排放强度高但企业密度小的区域,可通过区域监控点进行代表性监测,减少成本支出。监控点位间距应控制在5公里以内,以确保数据具备区域代表性与可对比性。对于重点行业或敏感区域,可部署微型监测站与无人机搭载监控设备,构建分层分级的多维监控网络。

6.2 监测指标体系的升级与拓展

现行监控指标多集中在SO₂、NO_x、颗粒物等传统污染物,对VOCs、重金属、恶臭类物质监测覆盖率不足。应结合排放源特征增加甲苯、苯乙烯、氨气等特征因子监测,提高对特定行业的识别能力。监测数据粒度由小时值提升为分钟级别,可更精确捕捉排放瞬变行为。系统应支持多参数联动监测,在同一时间窗口内同步获取气态、颗粒态和气象条件数

据,提升污染行为识别的准确性。数据接口标准需与国家环保平台对接,采用统一传输协议与编码格式,增强数据互联互通能力。指标体系更新还应同步修订超标判定阈值与响应机制,形成闭环监管结构。

6.3 数据融合与质量控制策略

多源数据融合是提升监控准确性的重要手段,应将自动监控数据与企业运行参数、视频监控、气象观测数据融合分析,构建多维数据交叉验证机制。通过机器学习算法挖掘污染行为模式,提升异常识别精度与提前预警能力。数据质量控制方面,可采用双通道采样与周期性校准技术,将SO₂、NO_x监测误差控制在±3%以内。建立自动数据审核系统,对每日监测值进行完整性、合理性和趋势判断,剔除漂移、断点与零值异常。数据回传率与故障率纳入企业年度考核体系,对频繁中断或虚报行为进行信用惩戒,推动系统数据的规范使用与高质量运行。

7 结语

大气重点污染源的自动监控体系已成为环境监管的重要基础支撑,其在实时识别、数据支撑、政策评估等方面发挥着不可替代的作用。通过对污染源类型、排放特征、监控能力与监管效果的系统分析,可以发现当前系统在技术集成、指标拓展与数据质量控制方面仍有提升空间。未来应以监测网络智能化、数据应用多维化、监管机制协同化为方向,持续优化监控体系的覆盖广度与分析深度,提升环境治理的科学性与实效性,为实现空气质量持续改善与生态安全构建提供坚实保障。

参考文献

- [1] 梁彦坡.生态环境监测在大气污染治理中的运用分析[A].智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(二)[C].重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会:2025:717-720.
- [2] 张丽娟,霍春雪,陈健.环境检测技术在水质、大气和土壤污染监测中的应用研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(14):83-85.
- [3] 侯善勇.大气环境监测中大数据技术的应用实践探究[A].全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(二)[C].中国电力设备管理协会:2024:201-202.
- [4] 李杰.浅谈废气污染源监测流程及质量控制[J].低碳世界,2019,9(08):19-20.

Wind characteristics and aerodynamic roughness at different heights in Mu Us Desert

Yanfen Qiao¹ Kai Wu² Xiaoning Wang¹ Xin Zhao¹ Yiqin Liu³

1. China Electric Power Engineering Consultants Group North China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Beijing, 100120, China

2. State Grid Corporation of China, Beijing, 100000, China

3. Beijing Forestry University, Beijing, 100053, China

Abstract

This study systematically investigates the spatiotemporal variation patterns of wind speed within the 10-140m vertical gradient using annual observational data from a wind tower at Maowusu Sandy Land in Wushen Banner, Ordos City. The research focuses on wind direction distribution at 80-140m altitudes and wind shear index characteristics between 50-140m and 10m wind speeds. Results indicate: Wind speed shows significant seasonal variations across all altitudes; daily wind speed fluctuations are pronounced; correlation analysis demonstrates similar diurnal variation patterns between wind shear indices at different altitudes and the 10m height; aerodynamic roughness values measured in the study area are determined as $Z_0=0.015\text{m}$, providing quantitative characterization of underlying surface characteristics.

Keywords

Mu Us sandy land; wind signal characteristics; wind speed profile; aerodynamic roughness; sand movement

毛乌素沙地不同高度的风信特征与空气动力学粗糙度

乔彦芬¹ 吴凯² 王晓宁¹ 赵鑫¹ 刘懿琴³

1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 中国·北京 100120

2. 国家电网公司, 中国·北京 100000

3. 北京林业大学, 中国·北京 100053

摘要

本研究基于鄂尔多斯市乌审旗毛乌素沙地一座测风塔的一年观测数据, 系统揭示了10~140m垂直梯度内风速的时空变化规律, 重点探讨了80~140m高度风向分布及50~140m风速与10m风速间的风切变指数特征。结果表明: 各高度风速均呈现显著季节性变化; 风速日变化特征显著; 相关性分析表明, 各高度与10m高度的风切变指数具有相似日变化规律; 测定研究区的空气动力学粗糙度值为 $Z_0=0.015\text{m}$, 定量表征了下垫面特征。

关键词

毛乌素沙地; 风信特征; 风速廓线; 空气动力学粗糙度; 风沙运动

1 引言

干旱、半干旱区是全球陆地系统的重要组成部分, 我国干旱、半干旱区面积占国土面积的 42%^[1]。沙漠和沙地是干旱半干旱区最主要的地表景观类型之一, 在气候变化的影响下, 风沙运动形成各种风沙地貌, 造成风沙危害, 进而影响区域的生态环境^[2]。自 Bagnold^[3] 以来国内外许多学者对风沙运动进行了大量的研究, 取得了一定进展。已有研究表明, 近地表的风速廓线及其变化是揭示风沙运动的有效途径之一, 且近地表风场的垂直分布特征及与地表粗糙度的相互

作用直接调控着风沙运动强度与空间格局^[4-6]。随着风能资源的开发, 精确评估风场垂直结构特征及地表空气动力学参数的需求日益迫切, 其中测风塔的实测数据可真实客观地反映区域内的风能资源分布情况, 是进行风能资源评估的基础^[7-8]。已有研究基于理论模型或短时间观测数据探讨风场特征, 但对半干旱区复杂下垫面条件下不同高度风速的长期连续观测及垂直关联性分析仍显不足^[9]。

毛乌素沙地位于中国北方干旱、半干旱过渡区, 是典型的农牧交错带和生态脆弱区^[10]。尽管“三北防护林”等生态工程显著提升了沙地植被覆盖率, 但频繁的风沙活动仍威胁着区域内的生态安全。此外, 毛乌素沙地风向的季节差异特征及其对风蚀格局的影响机制尚未系统研究, 制约了区域防风固沙措施的精准设计。因此, 系统揭示毛乌素沙地近

【作者简介】乔彦芬 (1980-), 女, 中国山西阳泉人, 硕士, 正高级工程师, 从事环境保护、水土保持研究。

地表风信的垂直分布规律，并量化空气动力学粗糙度 (Z_0) 的动态特征，对优化防风固沙措施、评估生态工程效益具有重要科学意义。

本研究以毛乌素沙地腹地乌审旗为研究区，依托测风塔长期观测数据 (2022年5月—2023年5月)，系统分析了10~140m垂直梯度内风速的时空变化规律、风向分布特征及风切变指数动态响应，并基于改进的中性层结估算区域的空气动力学粗糙度。研究旨在揭示风场垂直结构的动态机制，为风蚀防治工程优化、风电场选址及风沙运动模型参数化提供科学依据，为风能评估提供参考。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区域概况

毛乌素沙地 (37.45°—39.37°N、107.67°—110.50°E) 地处鄂尔多斯高原向黄土高原的过渡地带，属中国四大沙地之一，面积约为4.22万 km²。乌审旗位于内蒙古自治区鄂尔多斯市西南部，地处毛乌素沙地腹部，地势由西北向东南倾斜，海拔在1300~1400m左右。该区域属温带大陆性季风气候，年均温度8℃左右；年降水量约300mm，集中于7—9月；常年日照充足，年平均日照时间为2886h；蒸发强烈，年蒸发量为2500mm；平均风速3—4m·s⁻¹[12]。该区域风沙土分布最广，约占土壤总面积的78.4%，地表物质松散，风沙源丰富，北部是流动沙丘为主的荒漠地带，南部为宽阔的滩地和河谷地段，其间分布有流动、半固定、固定沙丘。生态环境较为脆弱，受沙漠化影响较为敏感。因此，以地处毛乌素沙地腹地的乌审旗为研究区，对研究区进行长时间序列观测，研究空气动力学粗糙度等风沙运动特征具有典型意义。

2.2 数据来源

在研究区内布设一座测风塔 (38°53'N, 108°59'E)，安置在区域内并采集不同高度的风速数据，选取2022年5月21日~2023年5月20日一整年采样间隔时间为10min的连续风、温度和大气压观测数据作为研究基础资料。测风塔数据完整率超过90%，处理过程中筛选明显不合理部分，对余下有效数据进行对比分析，探讨毛乌素沙地测风塔不同高度的风信特征与空气动力学粗糙度。

测风设备满足《风电场风能资源测量方法》GB/T 18709-2002[13]、《风电场工程风能资源测量与评估技术规范》NB/T 31147-2018[14]、《风电场风能资源测量和评估技术规范》(发改能源[2003]1403号)标准。近地面风速设有10层观测高度，分为10m, 50m, 80m, 90m, 100m, 110m, 115m, 120m, 123m和140m；风向设有4层观测高度，分为10m, 80m, 120m和140m；温度设有1层观测高度，为10m；大气压设有1层观测高度，为8m。

2.3 研究方法

根据施密特半经验理论导出的风切变指数公式[10]，计

算风切变指数 α ，公式为

$$v=v_1\left(\frac{h}{h_1}\right)^\alpha \quad (1)$$

式(1)中， v 为离地高度 z 处的平均风速； v_1 为参考高度10m处的平均风速； h 为离地高度； h_1 为参考高度，此处为10m。

按照风速、风向传感器所在高度开展要素的特征分析。风向的平均采用常用的最大频率分风向法[11]，把风向从0~360°划分为8个方向，取频率最高的风向为主风向。在实际操作中，通常收集到的测风塔数据只有一层温度数据，所以基于Monin Obukhov相似理论，项雯等[7]提出了一种以测风塔实测数据为基础筛选中性风速并以此计算地表粗糙度的方法。经过实例对比分析，相比传统的方法，采用新方法计算的粗糙度值唯一且准确性较高[7]，因此本文采用此方法进行风塔数据的处理。

在近地面层 (即产生地点为贴地层至其上方50~100m高度处[15]) 风速随高度是否遵从对数规律分布主要由当时的大气层结决定。大气层结分为不稳定、稳定和中性三种，在静力中性条件下，风速随高度呈现对数变化规律。

对风速廓线的气象剖面时间序列数据进行处理，在中性稳定大气条件下，计算公式如下：

$$u=\frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{Z-d}{Z_0} \quad (1)$$

式中： u 为风速 (m/s)； u_* 为摩擦速度风速 (m/s)； κ 为Von Karman常数 (取值0.4)； Z_0 为空气动力学粗糙度 (m)； d 为零平面位移 (m)； Z 为参考高度 (m)。

在描述近地面层结构时常用Monin Obukhov相似理论，即近地面层的无量纲风速[16]：

$$\frac{\kappa Z}{u_*} \frac{\partial \bar{u}}{\partial Z} = \phi_m \left(\frac{Z}{L} \right) \quad (2)$$

式中： Z 为距离地面高度，m； \bar{u} 为 Z 高度上平均水平风速，m/s； κ 为von Karman常数，通常取值0.4； u_* 为摩擦风速，m/s； L 为Monin Obukhov长度，m。

在中性层结时， $L \rightarrow \infty$ ， $\phi(Z/L) \rightarrow 1$ ，对式(2)进行高度积分，得到各层高度风速：

$$U_i = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{Z_i}{Z_0}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

式中： Z_i 为地表粗糙度。 Z_i 为测风塔第 i 个风速仪安装高度 (以下简称“第 i 层高度”)，m； \bar{u}_i 为第 i 层高度在中性大气层结下的风速平均值 (以下简称“第 i 层高度中性风速平均值”)，m/s。

将测风塔第一层高度中性风速平均值作为参照风速，则由式(3)得：

$$\bar{u}_i = \frac{\bar{u}_1}{\ln(Z_1/Z_{01})} \ln Z_i - \frac{\bar{u}_1 \ln Z_{01}}{\ln(Z_1/Z_{01})} \quad (4)$$

由式(4)可以看出若粗糙度 Z_{01} 、第一层高度 Z_1 和与之对应的中性风速平均值 \bar{u}_1 确定，则 \bar{u}_i 与 $\ln Z_i$ 呈线性相

关系，可以采用最小二乘法拟合散点 $(\ln Z_i, \bar{U}_i)$ 得到斜率 a ，即：

$$a = \frac{\bar{\Delta U}_i}{\Delta \ln Z_i} = \frac{\bar{U}_1}{\ln(Z_1/Z_{01})} \quad (5)$$

$$Z_{01} = \exp\left(\ln Z_1 - \frac{\bar{U}_1}{a}\right) \quad (6)$$

考虑到参照风速也可选为其他层高度风速，因此分别计算第 i 层高度风速作为参照风速时与之对应的粗糙度 Z_{0i} ，再对所有 Z_{0i} 求平均值得到最终所求粗糙度 Z_0 ，即：

$$Z_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\exp\left(\ln Z_i - \frac{\bar{U}_i}{a}\right) \right] \quad (7)$$

3 结果分析

3.1 不同高度风速的时间变化

3.1.1 年变化特征

不同高度的年平均风速变化情况见表 1，从表 1 可知，随测风高度的增加，年平均风速呈递增的趋势，这是因为地面附近的空气运动受到地形等摩擦力的影响，导致风速降低。随着高度增加，摩擦力减弱，风速相应增大。

表 1 不同高度年平均风速

测风高度 /m	年平均风速 / (m/s)
10	3.37
50	5.14
80	5.72
90	6.03
100	6.33
110	6.52
120	6.7
140	6.72

3.1.2 月变化与季节变化特征

不同高度月平均风速及最大风速见表 2。由表 2 可知，月平均风速最大值为 7.69m/s，最小值为 2.72m/s。采用常用的四季划分：春季（3—5 月）、夏季（6—8 月）、秋季（9—11 月）、冬季（12 月—次年 2 月），分析得出，平均风速

和最大风速均有明显的季节变化，各高度层风速在春季达到最大。平均风速夏冬季次大、秋季最小；最大风速为夏季次大、秋冬季最小。

为了研究大风天气的时间变化，气象学上将平均风速达到 6 级及以上的风称为大风^[17]，

定义当日 10m 高度最大平均风速大于 10.8m/s（6 级）为大风日，用大风日的平均最大风速值表征大风强度，进一步分析大风日数及大风强度的季节变化。经本位分析，研究区 4—5 月大风日数最多（平均 5.5d），3 月、7 月、11 月、12 月次之（平均 3d），1 月、2 月未发生大风天气。在每个月发生的大风天气中，大风天数最多的月份其大风强度并不一定最强，在 4 月和 7 月的大风强度最强，为 15.74 m/s 和 14.17 m/s，而 6 月大风强度最弱，为 10.83m/s。综上所述，春季发生大风天气的频次最高，这与前人的研究结果一致^[18]。

3.1.3 日变化特征

湍流强度的变化是影响风速日变化的关键因素。经本文分析得出各高度层风速均呈现出显著的日变化特征：在 00—09 时段，多数高度层风速呈现逐渐减弱的趋势，而 10m 高度的风速则经历了先减弱后增强的过程。10—23 时段整体呈现出持续增强的趋势，在 22—23 时段 50~140m 高度平均风速达到日峰值，这可能与夜间地表辐射冷却过程密切相关—夜间地表冷却，近地面空气温度下降，形成稳定的边界层，而上层空气冷却较慢，导致出现较大的垂直风切变，且中高层大气中可能存在活跃的湍流活动所致。在 8-11 时段表现出明显风速低谷特征，此时段地表受热不充分，地表温度的升高需要一定时间，导致地表与大气之间的热力差异相对较小，不利于形成强烈的热力环流和风速的增大，使得这一时段内 50~140m 高度平均风速达到最小值。此外，通过对比分析日变化曲线显示，不同高度风速日变化特征大体相似，其中 10m 和 50m 高度的风速日变化趋势相似度较高，10m 高度的日振幅较大；100m、110m、120m 和 140m 高度的风速日变化趋势相似度较高，且日振幅均较大。

表 2 不同高度月平均风速

测风高度 /m	月平均风速 / (m/s)											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
10	2.96	3.29	4.01	4.24	3.68	3.30	3.69	2.98	3.07	2.72	3.37	3.11
50	4.76	5.11	5.85	6.15	5.58	4.89	5.28	4.79	4.92	4.35	5.15	4.87
80	5.32	5.64	6.40	6.72	6.19	5.39	5.81	5.45	5.53	4.94	5.77	5.42
90	5.69	6.04	6.73	7.03	6.46	5.65	6.07	5.74	5.83	5.22	6.12	5.77
100	6.03	6.37	7.04	7.30	6.73	5.91	6.37	6.04	6.13	5.52	6.46	6.07
110	6.22	6.57	7.25	7.47	6.93	6.07	6.55	6.19	6.30	5.68	6.66	6.27
120	6.41	6.80	7.47	7.66	7.13	6.24	6.73	6.34	6.46	5.85	6.85	6.47
140	6.31	6.83	7.43	7.69	7.20	6.32	6.91	6.36	6.47	5.83	6.84	6.38

3.2 风向的变化特征

3.2.1 主风向

10m 和 80m 高度的风向频率分布见表 3，高度 120m 和 140m 的风向频率分布与高度 80m 的趋势一致，风向数据显示 SE（东南）和 W（西）方向的风向频率占比显著，分别占总数的 18.49% 和 15.70%，表明东南风和西风是该区域的主导风向。不同高度风向分布的一致性揭示了沙地近地层风场的稳定性和方向集中性，主风向的分布特征可能受到区域地形（如沙丘走向）及大气环流（如季风或局地热力环流）的共同影响。

表 3 高度 10m 和 80m 风向频率分布

10m 风向频率分布表			80m 风向频率分布表		
扇区	数据个数	频率	扇区	数据个数	频率
N	3756	7.26%	N	4233	8.12%
NE	3655	7.07%	NE	3491	6.70%
E	5967	11.54%	E	4988	9.57%
SE	8943	17.29%	SE	10261	19.68%
S	7121	13.77%	S	7041	13.50%
SW	7813	15.11%	SW	5908	11.33%
W	7959	15.39%	W	8343	16.00%
NW	6503	12.57%	NW	7876	15.11%

3.2.2 季节变化特征

以高度 140m 的数据为代表，根据不同的季节将数据进一步划分得到各季节的风向特点：春季：风向集中分布于 N~W 扇区和 S~E 扇区，盛行南风（S）和西北风（NW）；夏季：风向集中分布于 S~E 扇区，盛行东南风（SE）和南风（S）；秋季：风向集中分布于 N~W 扇区和 S~W 扇区，盛行西北风（NW）和南风（S）；冬季：主风向集中分布于 N~W 扇区，盛行西风（W）和西北风（NW）。结果表明该地区风向的季节性变化明显，春季和秋季的风向较为分散，而夏季和冬季的风向相对集中，反映了季风的转换特征。

3.3 风切变指数变化规律及空气的管理学粗糙度特征

经分析，白天风速增大时，由于不稳定层结的作用，垂直方向上的运动增加，风切变指数明显降低。50 m、80 m、100 m 和 120m 高度的风切变指数日变化特征相似，具体来说，9-17 时风切变指数较小，而 21 时至翌日 07 时风切变指数较大。

空气动力学粗糙度是表征地表空气动力学特性的重要参数，是影响近地面风速的重要指标。本文采用最小二乘法拟合散点（ $\ln Z_i$, U_i ），拟合直线斜率 $a=1.9585$ ，结合式（7）求得空气动力学粗糙度值为 0.015m。

4 结论与讨论

毛乌素沙地 10—140m 高度范围内风速垂直梯度显著，随着高度的增加，年平均风速呈递增的趋势。季节特征表现为春季平均风速最大，大风天气发生频次最高，且大风强度

最强，4 月平均风速达峰值 7.69 m/s，大风频次 5.67d，强度 16.85m/s，秋季最弱，10 月出现平均风速极小值 2.72 m/s，与区域沙尘活动周期相吻合。日变化显示风速在白天先减弱后增大，夜间 22—23 时风速达到最大值，而 8—11 时因地表热力环流未充分发展形成风速低谷，揭示了热力驱动与机械湍流的协同作用机制。

主风向受到东南风和西风的影响，春季和秋季的主导风向为南风和西北风，夏季的主导风向为东南风和南风，冬季的主导风向为西风和西北风，春季和秋季的风向较为分散，而夏季和冬季的风向相对集中。风切变指数日变化与大气稳定度紧密相关，白天风速增大时垂直风速差异较小，对应风切变指数也较小。50 m、80 m、100 m 和 120m 高度的风切变指数日变化特征相似，9—17 时风切变指数较小，而 21 时至翌日 07 时风切变指数较大。

通过改进中性层结的筛选方法，测得研究区的空气动力学粗糙度 Z_0 为 0.015m，介于流动沙丘与半固定沙丘之间，这表明稀疏植被与地形起伏对地表阻力起着双重作用，研究区内障碍物稀少，植被覆盖度较低，地表对风的阻碍作用较弱，风速随高度的增长较平缓。

毛乌素沙地风信特征和空气动力学粗糙度的研究，揭示了风沙活动的动力学机制及其与地表植被的关系，研究成果为毛乌素沙地及周边地区风电项目建设及防沙治沙工程和区域气候模型的改进提供了重要支持。目前，单塔观测难以表征地表粗糙度的空间异质性，且当前研究主要集中在近地面层，对较高高度的风信特征研究较少，未来需布设多塔进行分析，注重多尺度、多方法的综合应用，以进一步推动该领域的发展。

参考文献

- [1] 马柱国,符淙斌.1951~2004年中国北方干旱化的基本事实[J].科学通报,2006,(20):2429-2439.
- [2] Dong G, Chen H, Wang G, et al. The evolution of deserts with climatic changes in China since 150 ka BP[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1997, 40: 370-382.
- [3] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. Courier Corporation, 2012.
- [4] Dong Z B, Fryrear D W, Gao S Y. Modeling the development of sand transport[J]. Soil Science, 1999, 12: 930-935.
- [5] Dong Z, Gao S, Fryrear D W. Drag coefficients, roughness length and zero-plane displacement height as disturbed by artificial standing vegetation[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(3): 485-505.
- [6] 王洪涛,董治宝,钱广强,等.关于风沙流中风速廓线的进一步实验研究[J].中国沙漠,2003,(06):118-121.
- [7] 项雯,彭秀芳,施晨,等.基于测风塔数据的地表粗糙度计算方法研究[J].电力勘测设计, 2022, (01): 73-79. DOI:10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.01.014.