含菌气溶胶扩散对人群的潜在影响风险

袁文燕[1],王 鹏[1],伯 鑫[2*],郭 静[3],杨朝旭[4],薛晓达[3],常象宇[5],张金良[6],田 军[7],王 刚[8],马 岩[2](1.北京化工大学数理学院,北京 100029；2.生态环境部环境工程评估中心,北京 100012；3.北京航空航天大学经济管理学院,北京 100191；4.吉林化工学院资源与环境工程学院,吉林 吉林 132022；5.西安交通大学管理学院,陕西 西安 710049；6.中国环境科学研究院,北京 100012；7.南京大学环境规划设计研究院股份公司,江苏 南京 210093；8.三捷环境工程咨询(杭州)有限公司,浙江 杭州 310012)

摘要: 为分析生物气溶胶释放对人群潜在影响风险的情况,利用 CALPUFF 模型定量模拟了 2019 年 7 月 24~8 月 20 日中牧兰州生物药厂含菌气溶胶扩散、浓度空间分布、对人群潜在健康风险,并结合公开报道的检测数据开展验证.结果显示: 生物药厂的含菌气溶胶排放源附近高值区主要集中于厂区四周,影响范围主要以厂区为中心,并向四周逐渐扩散;检测结果中兰州兽研所 1#,兰州大学 2#地区健康风险比例 41.49:1,在模拟的相对风险大小的误差区间(36.15±8.48)范围内,说明本研究含菌气溶胶对人群潜在影响风险的模拟结果可信.

关键词：含菌气溶胶模型；CALPUFF 模型；健康风险

中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2020)07-3173-06

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0355

The potential impact of bioaerosol emissions on human health threats. YUAN Wen-yan[1], WANG Peng[1], BO Xin[2*], GUO Jing[3], YANG Zhao-xu[4], XUE Xiao-da[3], CHANG Xiang-yu[5], ZHANG Jin-liang[6], TIAN Jun[7], WANG Gang[8], MA Yan[2] (1.College of Mathematics and Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；2.Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China；3.School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China；4.School of Resources and Environmental Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China；5.School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China；6.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China；7.Academy of Environmental Planning & Design, Co., Ltd, Nanjing University, Nanjing 210093, China；8.Trinity Consultants, Hangzhou 310012, China). *China Environmental Science*, 2020,40(7)：3173~3178

Abstract：The aim of the study is to analyse the potential impact of bioaerosol emissions on health threats. In particular, CALPUFF model was employed to quantitatively simulate the diffusion of bioaerosol emissions from the Lanzhou Zhongmu Bio-pharmaceutical Factory during July 24-August 20, 2019. Based on the simulated spatial distribution of the bioaerosol, the potential impact on human health was explored. The reliability of our results was validated by compared to public reported detection data. The spatial distribution of bioaerosol emission impact was highly intensive at the Lanzhou Zhongmu Bio-pharmaceutical Factory, and exhibited downtrend around the factory. The health risk ratio of Lanzhou Institute of Veterinary Research 1# and Lanzhou University 2# was 41.49:1, and was within the error interval of relative health risk (i.e., 36.15±8.48), which therefore verify the reliability of our estimates.

Key words：bioaerosol emissions；CALPUFF model；human health risk

含菌气溶胶(粒径范围 0.25~8μm)在大气中扩散、传播会引起人类疾病的感染、流行[1-5].国内外研究者利用不同尺度的扩散模型,模拟了生物(细菌、病毒等)气溶胶大气扩散、空间分布等,Kritana 等[6]对比分析了各种口蹄疫预测模型优缺点,认为空气质量模型是预测口蹄疫传播的重要工具,现在的研究大多采用以下模式,应用于对人类和牲畜具有致病性的生物气溶胶研究之中,如 RegAQMS 模型[1]、CALPUFF 模型[7]、高斯扩散模型[8-9]、ADM 模型[10],这些模型研究微生物气溶胶向环境释放后的气溶胶浓度和分布情景.

从上述结果可知,空气质量模型在生物(病毒、细菌等)气溶胶模拟研究,多集中在病毒或细菌在大气的扩散、沉降、分布等过程,较少分析生物气溶胶释放对人口的潜在影响,本课题组在分析生物药厂环境影响评价报告书[11]等资料时发现,一些生物药厂建设在城市建成区内,对相关企业风险源强、微生

收稿日期：2020-03-23

基金项目：国家自然科学基金资助项目(71673107)

* 责任作者, 高级工程师, boxin@acee.org.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

物(病毒、细菌)环境中传播对人群潜在健康具体影响,无法定量评价,仅做定性分析和简要评价.

针对上述问题,本研究根据兰州兽研所布鲁氏菌抗体阳性事件公开报道数据[12-13],利用 CALPUFF 模型定量模拟了 2019 年 7 月 24~8 月 20 日,中牧兰州生物药厂含菌气溶胶扩散、传播、空间分布情况,分析了含菌气溶胶对人口潜在影响情况,并结合公开报道的检测数据开展验证,为突发公共卫生事件应急响应、环境健康影响,生物药厂(利用活体病原体行制备生物预防疫苗制备企业)、生物安全实验室布局等提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域与对象

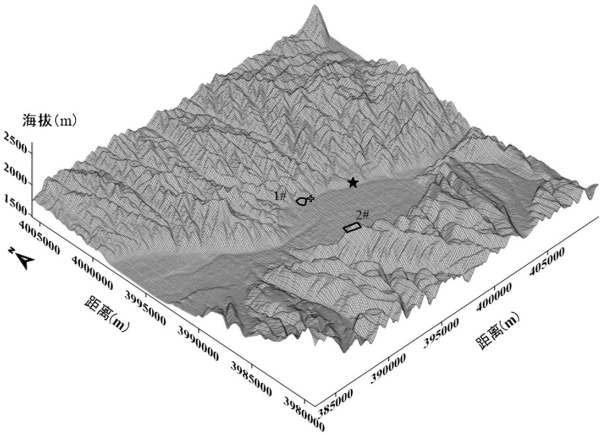


图 1 研究区域地形

Fig.1 Topography of Lanzhou

＋为排放源,1#为兰州兽研所,2#为兰州大学,★为兰州市气象站,UTM 坐标系,单位:m

兰州市东西黄河横穿全境,峡谷与盆地相间,周围群山环绕,受这种复杂峡谷地形的影响,兰州市存在山谷风、城市热岛环流等复杂气象场,造成静风频率高、逆温条件频繁等不利气象条件[14-15].研究时段为2019年7月24~8月20日,模拟情景来自2019年 12 月甘肃省卫生健康委员会发布的《中国农科院兰州兽研所布鲁氏菌抗体阳性事件调查处置情况通报》[13]:中牧兰州生物药厂在兽用布鲁氏菌疫苗生产过程中使用过期消毒剂,致使生产发酵罐废气排放灭菌不彻底,携带含菌发酵液的废气形成含菌气溶胶,释放到大气环境.模拟源强基本信息来自中牧实业股份有限公司兰州生物药厂生产区整体搬迁项目环境影响报告书[11] 等,涉及布氏杆菌 2 种(S2 株、A19 株),生产周期 34d,研究范围为 14km×14km,从图 1 可知,生物药厂排放源(+)靠近东边的兰州兽研所(1#),离兰州大学(2#)相对较远(约 4km).根据兰州市气象站,研究时段当地的主导风向为 E、ENE(图 2),平均风速 1.2m/s,静风频率 2.4%,平均温度 23.6℃.

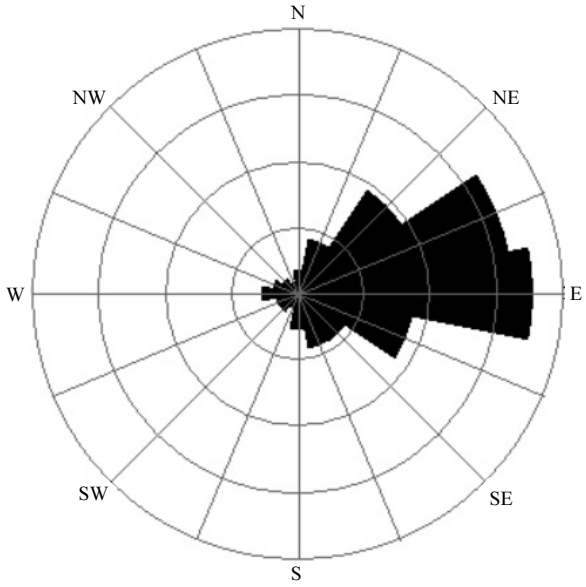


图 2 2019 年 7 月 24~8 月 20 日兰州市地面气象站风玫瑰

Fig.2 Wind rose map at Lanzhou Weather Station from July 24 to August 20, 2019

1.2 空气质量模型

CALPUFF 模型属于非稳态三维拉格朗日烟团模型[16],拉格朗日烟团模型克服了高斯模型在复杂地形、复杂气象场等条件下在精度和有效性上的不足,广泛应用到生物恐怖危害评估和生物气溶胶模拟等方面[17],CALPUFF 模型系统也是中国生态环境部、美国环保署推荐的用于模拟污染物扩散的法规模式之一[18].CALPUFF 模型能较好反映山谷风环流等复杂气象条件的大气预测,在国内多个复杂地形-复杂气象场项目中得到了应用,取得了很好的模拟效果[19-22].

本研究搜集了 2019 年 7 月 24~8 月 20 日模拟区域内或周围的 3 处地面气象站数据(兰州、榆中、皋兰),气象因子包括:风速、风向、相对湿度、降水量、温度与气压等;高空气象数据为中尺度数据大气模式 WRF 模拟提供的三维气象场数据;区域地形资料来自美国地质勘探局(USGS),地形数据精度为 90m,土地利用类型数据精度为 30m[23].本研究建模

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

网格分辨率 100m,东西向 140 个格点,南北向 140 个格点.

本研究定量模拟布鲁氏杆菌气溶胶在大气环境长期浓度分布情况,布鲁氏菌(Brucella)是一种人畜共患的传染病[23],大小约 0.5~1.5μm 之间[25],布鲁氏菌可经呼吸道、消化道、损伤的皮肤等多途径传播[26].布鲁氏菌在不同环境中生存的时间各不相同,但无论在哪种环境下布鲁氏菌的存活时间都比较长,在有的环境下布鲁氏菌可生存长达 18 个月.布鲁氏菌在合适的条件下能生存很长时间,有较高的抗灭活能力,对湿热、紫外线、常用的消毒剂、抗生素等比较敏感;对干燥、低温有较强的抵抗力.而且,由于贮存宿主不断被发现,宿主转移现象越来越多,各种影响因素下,变异菌株的数量及类型不断增加,因此,形成布鲁氏菌属种型的一个演变过程[27].

关于含菌气溶胶模拟的研究报道,采用了 PM_{10} 作为炭疽杆菌战剂释放传播过程的载体.本研究采用 $PM_{0.56}$ 作为模拟物质($PM_{0.56}$ 比 PM_{10} 大小更接近布鲁氏菌),考虑了干湿沉降影响,不考虑含菌气溶胶的繁殖、爆发、衰变等过程.由于公开资料[12-13]中,没有关于本次事故泄漏源强排放量信息,本研究假设源强为定值[1g/(s·m^2)].CALPUFF 模型的研究区域污染物排放以面源形式输入,排放源参数如下:排放高度为 5m、排放速率为 1g/(s·m^2)、海拔高度为 1524m.

1.3　人口空间分布数据

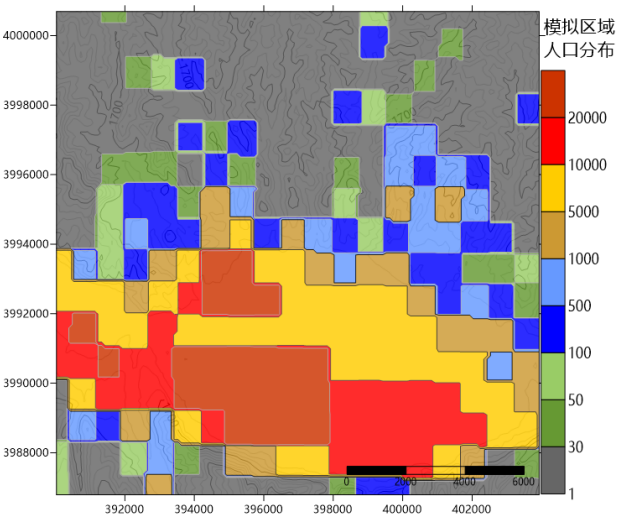


图 3　模拟区域人口分布示意

Fig.3　Population distribution of simulated regions

本研究所用数据来自 1km 分辨率的 2018 年全球人口动态统计分析数据库(LandScan),该数据库基于地理因子(土地利用类型、夜间灯光、道路坡度、城市密度等)、自然环境(海拔高度等)及社会经济因子(道路、河流、铁路等)而产生,其开发过程利用地理信息系统、针对全球不同国家地区的生活文化、统计数据的质量、可获得性、精确性及尺度等方面的差别而建立的人口分配算法和遥感等方法,是目前涉及人口数据研究中被广泛采用的相对权威和准确的人口空间数据[28].由于中国官方未发布过高精度的人口分布,LandScan 数据在中国人口的研究问题中广泛运用[29-30].图 3 为兰州地区模拟区域的分布情况.

1.4　含菌气溶胶扩散对人群潜在影响风险分析方法

基于 2018 年 LandScan 人口空间数据和 CALPUFF 模拟的大气污染物浓度数据,将研究区域划分 100m×100m 的网格 i (i=1,2,……,N),根据每个网格的人口数量和大气污染物浓度,计算出每个网格的人口数量占区域总人数的比例 R_i 和每个网格的大气污染物浓度数值占所有网格的浓度的比例 C_i,计算健康风险值 P_i 由公式(1)得出:

$$P_i = R_i \times C_i \tag{1}$$

由于 $\sum_{i=1}^{N} R_i = 1$, $\sum_{i=1}^{N} C_i = 1$,使得 $\sum_{i=1}^{N} P_i = \sum_{i=1}^{N} R_i \times C_i \leqslant 1$,如公式 2,因此需要归纳统一样本的统计数据分布特征,把 P_i 做归一化处理为 $\overline{P_i}$,表征相对风险大小.

$$\overline{P_i} = \frac{P_i}{\sum_i P_i} = \frac{R_i \times C_i}{\sum_i R_i \times C_i} \tag{2}$$

2　结果与讨论

2.1　含菌气溶胶的环境浓度分布

根据排放源对研究区域含菌气溶胶浓度模拟结果(图 4),高值区主要集中于厂区四周,含菌气溶胶浓度长期平均浓度范围为 1.21×10^{-3}~44.70(假设源强为定值,分析 2019 年 7 月 24 日至 8 月 20 日平均浓度的相对大小,无量纲).含菌气溶胶浓度影响范围主要以厂区为中心,并向四周逐渐扩散,浓度影响大小与距离厂区有关,距离厂区越近的区域,含菌气溶胶浓度影响越大;距离厂区越远的区域,含菌气溶胶浓度影响越小.距离厂区西侧 233m 的 1#地区浓度影响范围为 0.1~20,距离厂区西南处 3697m 的 2#地区

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的浓度影响范围为 0.01~0.02.此次含菌气溶胶扩散模拟过程中,含菌气溶胶浓度最大值出现在 1#区域附近,单位区域最大值为 44.70,对比地面气象站风玫瑰图,含菌气溶胶长期平均浓度分布趋势与研究时段的主导风向并不完全一致,主要还与所在区域的复杂地形等其他因素有关.

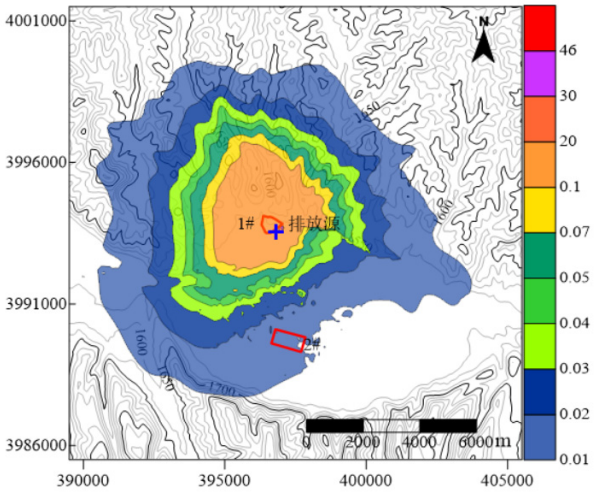


图 4 含菌气溶胶的环境浓度分布

Fig.4 Spatial distribution of the ocntribution of bioaerosol emission to air quality

2.2 排放含菌气溶胶对人群健康影响风险分析

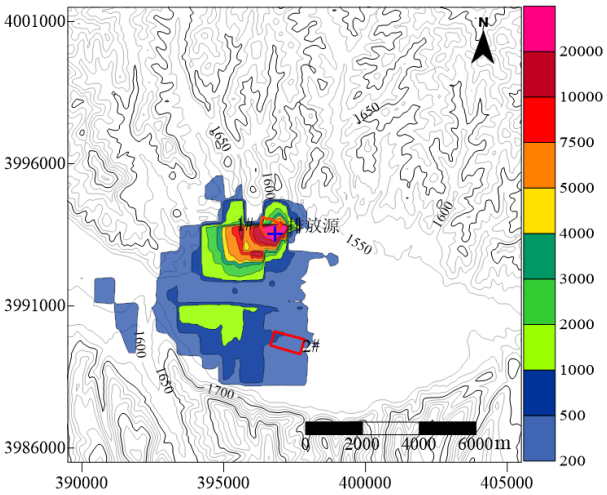


图 5 含菌气溶胶排放对人群健康影响风险值分布

Fig.5 Spatial distribution of the impact of bioaerosol emission on human health risk

本研究区域为含菌气溶胶排放源扩散易感染人群密集的地方,每一网格的人口密度越高,大气污染物浓度越高,人群暴露风险就越大,所产生的健康影响也随之增大(图 5).根据公式(1)计算对人群健康影响风险,以 1#,2#区域为例,其中位于排放源附近的 1#地区受到含菌气溶胶对人群健康的影响值范围约为 253.08~117886(平均值 24135.7,方差 30031),2#地区的人群健康影响值范围约为 198.36~763.29(平均值 340.44,方差 127.35),含菌气溶胶对 1#地区所在的人群健康影响较大,对于 2#地区所在人群健康影响较小.含菌气溶胶对人群健康的影响最高值分布在排放源附近,高值区范围内的人群需要重点关注.

2.3 模型验证

为验证模型模拟健康风险与发病人数的准确性,根据公式(2)计算每个网格的人群健康的影响风险,计算地区 1#和 2#范围内的特征分布, 1#和 2#地区的健康风险近似服从正态分布.根据每个地区的统计值(均值、标准差)服从正态分布,抽取长度为网格个数的一组随机数值,对地区网格的健康相对风险值求和作为地区的健康相对风险.做 10000 次模拟实验得到 10000 次模拟结果,求每次模拟的相对风险值,10000 次模拟的均值(作为健康相对风险估计值)、标准差(作为误差区间).

根据结果求 1#,2#地区的健康风险比值的均值与标准差,该标准差作为本次研究误差区间,均值为 36.15,标准差为 8.48.根据大数法则,1#,2#地区的健康风险比值将收敛于期望值.因此,基于人口分布和气溶胶扩散模拟健康相对风险为,兽研所健康风险:健康风险=36.15:1.根据中国农科院兰州兽研所布鲁氏菌抗体阳性事件调查处置情况通报[13],兰州大学学生和教职工中陆续检出抗体阳性,目前共检测 3365 人次,检出布鲁氏菌抗体阳性 22 人,阳性率 0.65%,兰州兽研所学生和职工血清布鲁氏菌抗体初筛检测累计 671 份,实验室复核检测确认抗体阳性人员累计 181 例,阳性率 26.97%,检测结果中兽研所健康风险:兰州大学健康风险=41.49:1,该结果在模拟健康风险的误差区间(36.15±8.48)范围内,说明本研究含菌气溶胶对人口潜在影响的模拟结果可信.

2.4 不确定性分析

本研究不确定性主要为以下几点:(1)源强不确定性,本研究源强基本信息来自兰州兽研所布鲁氏菌抗体阳性事件公开报道数据、公开环评报告数据等,无法获得真实事故下含菌气溶胶的浓度、排放量、时间谱等信息.(2)含菌气溶胶不确定性,含菌气

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

溶胶具有物理特性(直径、密度等),是活的生命有机体,具有生物学衰减特性,并受到温度、湿度、紫外辐射等因素影响[31],本研究未考虑生物学衰减、含菌气溶胶物理性质等特性,可能造成结果高估.(3)受体人群不确定性,含菌气溶胶感染能力与人群的性别、年龄、体重、健康等情况有关,与人群是否在户外、室内有关,人群空间坐标是随着时间变化的,本研究未考虑此部分[31].

3　结论

3.1　本研究预测结果显示,在复杂峡谷地形-气象场条件下,含菌气溶胶排放源扩散主要分布在排放源厂区四周,并向外扩散.对于含菌气溶胶排放源浓度相对越高、人口密度相对越高的地方,人群暴露健康风险就越大.

3.2　以大数法则为依据,模拟健康风险大小与实际发病人数的关系,模拟结果显示,1#和 2#地区健康风险比例在误差区间范围内,说明本研究含菌气溶胶对人口潜在影响的模拟结果可信.

参考文献:

[1] 刘　丽,王体健,蒋自强,等.东南沿海生物气溶胶的扩散模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2012,32(11):2670-2683.
Liu L, Wang T J, Jiang Z Q, et al. Numerical study on bioaerosol dispersion over southeast coast of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(11):2670-2683.

[2] 刘　丽.东南沿海污染气象特征及生物气溶胶的扩散模拟研究 [D]. 南京:南京大学, 2011.
Liu L. Study on the pollution meteorological characteristics simulation of bioaerosols dispersion over southeast coastal area of China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.

[3] 张宝莹,刘　凡,白雪涛.病原微生物气溶胶对人群健康风险评价研究进展 [J]. 环境卫生学杂志, 2015,5(3):287-292.
Zhang B Y, Liu F, Bai X T. Progress on health risk assessment of pathogenic microorganism aerosol [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2015,5(3):287-292.

[4] 王　莹,韩云平,李　琳.卫生填埋场微生物气溶胶的逸散及潜在风险 [J]. 微生物学通报, 2020,47(1):222-233.
Wang Y, Han Y P, Li L. Emission and potential risks of bioaerosols in sanitary landfill [J]. Microbiology China, 2020,47(1):222-233.

[5] 孙　琳,杨春华.美国近年生物恐怖袭击和生物实验室事故及其政策影响 [J]. 军事医学, 2017,41(11):923-928.
Sun L, Yang C H. United States bioterror attacks and laboratory accidents in recent years and the impact on its policy-making [J]. Military medical sciences, 2017,41(11):923-928.

[6] Kritana P, Taehyeung K, Soyoung K, et al. Review of air dispersion modelling approaches to assess the risk of wind-borne spread of foot-and-mouth disease virus [J]. Journal of Environmental Protection, 2012,3:1260-1267.

[7] Mackereth G F, Stone M A B. Veterinary intelligence in response to a foot-and-mouth disease hoax on Waiheke Island, New Zealand [C]// Proceedings of the 11th International Symposium on Veterinary Epidemiology and Economics, 2006.

[8] 李林中,陈　峰,吴尔翔,等.口岸炭疽事件危害范围的模拟研究 [J]. 口岸卫生控制, 2017,22(2):7-11.
Li L Z, Chen F, Wu E X, et al. Simulation study on the hazard range of anthrax incidents at ports [J]. Port Health Control, 2017,22(2):7-11.

[9] 刘　健,祖正虎,许　晴,等.炭疽恐怖事件人员危害定量评估研究状况和前瞻 [J]. 军事医学, 2011,35(11):819-823.
Liu J, Zu Z H, Xu Q, et al. Quantitative hazard assessment of persons against anthrax terrorism:research actualities and prospects [J]. Military medical sciences, 2011,35(11):819-823.

[10] Van Leuken J P G, Swart A N, Havelaar A H, et al. Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock–A review to inform risk assessment studies [J]. Microbial Risk Analysis, 2016,1:19-39.

[11] 中牧实业股份有限公司兰州生物药厂生产区整体搬迁项目环境影响报告书 [EB/OL]. http://www.doc88.com/p-3847854021729.html. 2019-01-09.
Environmental impact report of the overall relocation project of the production area of Lanzhou Biopharmaceutical Factory of China Animal Husbandry Industrial Co., Ltd. [EB/OL]. http://www.doc88.com/p-3847854021729.html.2019-01-09.

[12] 中牧实业股份有限公司兰州生物药厂生产区整体搬迁项目环境影响评价第二次公示 [EB/OL]. http://www.gscxhj.com/htm/20189/13_942.htm. 2018-09-12.
The second announcement of the environmental impact assessment of the overall relocation project of the production area of Lanzhou Biopharmaceutical Factory of China Animal Husbandry Industrial Co., Ltd. [EB/OL]. http://www.gscxhj.com/htm/20189/13_942.htm. 2018-09-12.

[13] 中国农科院兰州兽研所布鲁氏菌抗体阳性事件调查处置情况通报 [EB/OL]. http://wsjk.gansu.gov.cn/single/10910/80993.html.2019-12-26.
Bulletin of Brucella antibody positive incident investigation and disposal of veterinary Institute, Chinese Academy of Agricultural [EB/OL]. http://wsjk.gansu.gov.cn/single/10910/80993.html.2019-12-26.

[14] 杨雪玲.兰州市重污染天气过程环流形势与气象条件研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2018.
Yang X L. The synoptic type and meteorological condition during extreme air pollution events in Lanzhou city [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

[15] 刘丽珺,吕　萍,梁友嘉.基于 CFD 技术的河谷型城市风环境模拟——以兰州市城关区为例 [J]. 中国沙漠, 2013,33(6):1840-1847.
Liu L J, Lü P, Liang Y J. Simulating wind environment of valley city based on CFD technology:A case study of Chengguan district of Lanzhou,china [J]. Journal of desert research, 2013,33(6):1840-1847.

[16] 伯　鑫.CALPUFF 模型技术方法与应用 [M]. 北京:中国环境出版社, 2016:23-35.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Bo X. Technical method and application of CALPUFF model [M]. Beijing: China Environment Press, 2016:23-35.

[17] 刘 健.城市小区环境中生物剂气溶胶的扩散模拟方法研究 [D]. 北京:中国人民解放军军事医学科学院, 2012.
Liu J. Research on the simulation method of bioaerosols' in a housing estate [D]. Beijing:Academy of Military Medical Sciences, 2012.

[18] 伯 鑫,王 刚,温 柔,等.京津冀地区火电企业的大气污染影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):364-373.
Bo X, Wang G, Wen R, et al. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Environmental Science, 2015,35(2):364-373.

[19] 史梦雪,伯 鑫,田 飞,等.基于不同空气质量模型的二噁英沉降效果研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):24-30.
Shi M X, Bo X, Tian F, et al. Study on deposition effects dioxins based on different air quality models [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):24-30.

[20] 田 飞,伯 鑫,薛晓达,等.基于复杂地形-气象场的二噁英污染物沉降研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(4):1678-1686.
Tian F, Bo X, Xue X D, et al. Study on settlement dioxin pollutants under complex terrain-weather conditions [J]. China Environmental Science, 2019,39(4):1678-1686.

[21] 马 岩.基于 CALPUFF 模型西固石化工业集中区对兰州市主城区污染贡献研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2016.
Ma Y. The pollution contribution research of Xigu petrochemical Industrial zone to the main area of Lanzhou based on CALPUFF model [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.

[22] 张玉麟.兰州市冬防期间火电厂管控对空气质量的影响研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2018.
Zhang Y L. The Changing of air influenced by reducing the pollutants discharging from the Coal-fired power plants during winter in Lanzhou city [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

[23] 伯 鑫,王 刚,田 军,等.AERMOD模型地表参数标准化集成系统研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(9):2570-2575.
Bo X, Wang G, Tian J, et al. Standard systems of surface parameters in AERMOD [J]. China Environmental Science, 2015,35(9):2570-2575.

[24] 崔步云.中国布鲁氏菌病疫情监测与控制 [J]. 疾病监测, 2007, 22(10):649-651.
Cui B Y. Brucellosis surveillance and control in China [J]. Disease Surveillance, 2007,22(10):649-651.

[25] 金 山,乌 尼.布鲁氏菌生物学特性研究进展 [J]. 内蒙古畜牧科学, 2000,21(1):26-28.
Jin S, Wu N. Research progress of Brucella biological characteristics [J]. Inner Mongolian Journal of Animal Sciences and Production, 2000,21(1):26-28.

[26] 陈永亮,王小梅,郑兰紫,等.北京市密云区 2013~2017 年布鲁氏菌病流行特征及调查结果分析 [J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2020, 31(1):100-104.
Chen Y L, Wang X M, Zheng L Z, Deng. Epidemiological characteristics and investigation results of human brucellosis in Miyun district of human brucellosis in Miyun district of Beijing, China, 2013~2017 [J]. Chinese Journal of Vector Biology and Control, 2020,31(1):100-104.

[27] 姜 海.布鲁氏菌病诊疗及防控手册 [M]. 北京:人民卫生出版社, 2020:5-37.
Jiang H. Brucellosis diagnosis treatment and prevention manual [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2020:5-37.

[28] Bhaduri B, Bright E, Coleman P, et al. LandScan [J]. Geoinformatics, 2002,5(2):34-37.

[29] Li Y, Zhu K, Wang S. Polycentric and dispersed population distribution increases $PM_{2.5}$ concentrations: Evidence from 286 Chinese cities, 2001~2016 [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248:119202.

[30] Liu X, Wang M. How polycentric is urban China and why? A case study of 318cities [J]. Landscape and urban planning, 2016,151:10-20.

[31] 冯 丹.生物战剂气溶胶施放损伤效应模型的建立 [D]. 北京:中国人民解放军军事医学科学院, 2004.
Feng D. Establishment of injury effect model of aerosol release biological warfare agents [D]. Beijing:Academy of Military Medical Sciences, 2004.

致谢：感谢中节能中咨华瑞科技有限公司的杜康老师、贵州省生态气象和卫星遥感中心的刘丽老师,为本研究提供指导和帮助.

作者简介：袁文燕(1969-),女,江西南昌人,副教授,主要研究领域为最优化理论及应用.发表论文 14 篇.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net