

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 ..... 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 ..... 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化及来源分析 ..... 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 ..... 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 ..... 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO<sub>2</sub> 来源解析 ..... 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 ..... 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 ..... 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 ..... 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 ..... 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 ..... 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 ..... 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 ..... 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 ..... 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 ..... 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 ..... 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 ..... 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 ..... 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 ..... 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 ..... 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 ..... 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 ..... 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 ..... 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 ..... 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 ..... 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 ..... 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 ..... 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 ..... 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 ..... 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 ..... 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 ..... 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 下 SBR 中硝化微生物特性 ..... 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 ..... 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 ..... 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 ..... 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 ..... 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 ..... 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO<sub>2</sub> 排放的综合影响 ..... 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 ..... 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 ..... 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 ..... 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 ..... 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 ..... 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 ..... 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 ..... 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 ..... 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 ..... 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 ..... 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 ..... 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 ..... 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 ..... (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

# 畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究

张兰河<sup>1</sup>, 贺雨伟<sup>1,2</sup>, 陈默<sup>3</sup>, 高敏<sup>2\*</sup>, 仇天雷<sup>2</sup>, 王旭明<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学化学工程学院, 吉林 132012; 2. 北京市农林科学院生物技术研究中心, 农业基因资源与生物技术北京市重点实验室, 北京 100097; 3. 中国农业大学生物学院, 北京 100094)

**摘要:** 畜禽养殖场被认为是空气环境中耐药基因和致病菌的重要来源. 本研究对北京地区 22 个畜禽养殖场逸散细菌、四环素和红霉素耐药菌气溶胶的浓度进行检测, 对其粒径分布和动力学粒径进行分析. 结果表明, 所调查的 3 种生物气溶胶(细菌、四环素耐药菌和红霉素耐药菌), 在猪舍内浓度最高, 牛舍内最低. 蛋鸡舍内两种抗生素耐药菌气溶胶的浓度均低于肉鸡. 本研究在蛋鸡和肉鸡舍外空气中检测到了四环素和红霉素耐药菌, 所占丰度分别为 8.81%、15.89% 和 23.19%、36.53%. 不同养殖场舍内外细菌、四环素耐药菌和红霉素耐药菌气溶胶浓度的粒径分布特点存在差异. 动力学粒径研究结果显示, 4 种动物舍内的四环素和红霉素耐药菌气溶胶主要沉降在人体的咽喉和支气管. 本研究结果将为评价养殖场生物气溶胶对周边空气环境污染及人类健康造成的危害提供基础数据.

**关键词:** 畜禽养殖; 四环素耐药菌; 红霉素耐药菌; 粒径分布; 动力学粒径

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4531-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201604176

## Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations

ZHANG Lan-he<sup>1</sup>, HE Yu-wei<sup>1,2</sup>, CHEN Mo<sup>3</sup>, GAO Min<sup>2\*</sup>, QIU Tian-lei<sup>2</sup>, WANG Xu-ming<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Beijing Key Laboratory of Agricultural Genetic Resources and Biotechnology, Beijing Agro-Biotechnology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. College of Biological Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Animal feeding operations is considered as a source of airborne human pathogens and antibiotics genes. In this study, we investigated the concentration, size distribution and aerodynamic diameter of airborne bacteria, tetracycline resistant bacteria and erythromycin resistant bacteria from 22 animal feeding operations in three districts of Beijing. The results indicated that the highest and lowest concentrations of these three types of bioaerosol were detected in pig and cow house, respectively. The concentration of airborne bacteria was higher in layer house, whereas concentration of antibiotic resistant bacteria was higher in broiler house. Tetracycline and erythromycin resistant bacteria were detected from the atmospheric environment from out door of layer and broiler house with the percentages of 8.81%, 15.89% and 23.19%, 36.53%, respectively. The size distribution and aerodynamic diameter varied from inside and outside of pig, cow, and layer and broiler house. Most of tetracycline resistant bacteria and erythromycin resistant bacteria from current four types of animal feeding operations mainly deposited in pharynx, larynx and bronchus of respiratory system. This study would offer the base data for evaluating the detriment of bioaerosol from animal feeding operations to the worker and environment.

**Key words:** animal feeding operations; tetracycline resistant bacteria; erythromycin resistant bacteria; size distribution; aerodynamic diameter

随着集约化畜禽养殖场数量不断增加、养殖规模不断扩大,养殖场作为一个重要的环境污染源逐渐引起人们关注. 畜禽在养殖过程中,动物自身、其粪便以及垫料携带的微生物易于逸散至空气中形成生物气溶胶<sup>[1]</sup>. 这些空气微生物包含大量致病微生物,不仅直接影响动物和从业人员的健康<sup>[2]</sup>,而且可通过空气流动进行长距离传播,污染周围环境<sup>[3-5]</sup>.

值得注意的是,近年来作为促生长和预防疾病的抗生素在现代集约化畜禽养殖过程中大量使用. 抗生素在动物体内不能被完全吸收,据报道约有 60%~90% 的药物随动物粪便排出体外<sup>[6]</sup>. 抗生素

的不规范使用导致动物体内和环境中抗生素耐药菌的产生,可能直接威胁人类健康<sup>[7-9]</sup>.

目前,国内外学者已经对养殖场空气中的抗生素耐药菌展开研究<sup>[1, 10, 11]</sup>,但缺乏对不同养殖动物间耐药菌污染现状的对比,特别是对抗生素耐药菌的粒径分布及动力学粒径特点的研究仍属空白. 为

收稿日期: 2016-04-22; 修订日期: 2016-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308047); 家禽产业技术体系北京市创新团队专项(BAIC04-2016); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20151204); 北京市科技新星项目(Z15110000315058); 北京市优秀人才项目(2014000020060G178)

作者简介: 张兰河(1971~),男,博士,主要研究方向为环境生物技术, E-mail: zhanglanhe@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: gm\_baafs@126.com

此,本研究对北京市上风向3个区县的22家养殖场空气中细菌和抗性菌的浓度及粒径进行调查,以期评价畜禽养殖场对城市空气污染和人类健康的影响提供依据.

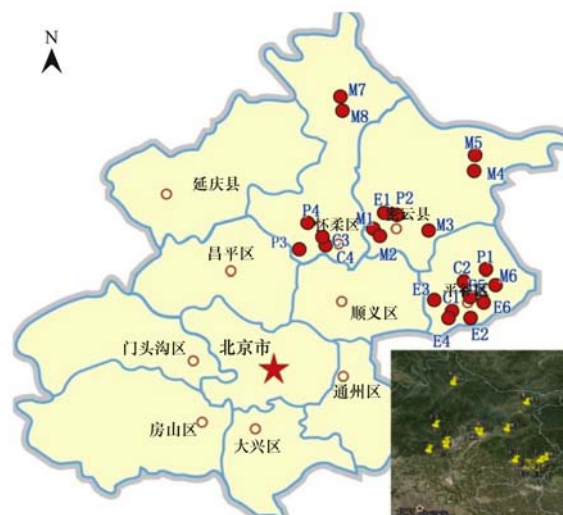
## 1 材料与方法

### 1.1 养殖场的选择

选取北京密云、平谷和怀柔这3个地区的22个养殖场进行研究,具体坐标位置如图1所示.其中,对猪(采样4次)和牛(采样4次)舍内细菌气溶胶进行采样,对蛋鸡(采样6次)和肉鸡(采样8次)的舍内外细菌气溶胶同时进行采样,采样日期在2015年8~10月之间.相应的采样信息见表1,其中E、M、P、C分别代表蛋鸡场、肉鸡场、猪场和牛场.

### 1.2 采样方法

生物气溶胶的采集使用FA-I撞击式采样器



右下角是养殖场所在地点对应卫星图

图1 22个养殖场采样地点示意

Fig. 1 Sampling sites of the 22 animal feeding operations

表1 畜禽养殖场舍内外生物气溶胶采样信息<sup>1)</sup>

Table 1 Sampling information from indoor and outdoor of animal feeding operations

养殖场	代码	采样地点	日龄/d	面积/m <sup>2</sup>	数量/只	舍内PM <sub>2.5</sub> /μg·m <sup>-3</sup>	舍内PM <sub>10</sub> /μg·m <sup>-3</sup>	舍内TSP/μg·m <sup>-3</sup>	舍内温度/°C	舍内湿度/%	舍外PM <sub>2.5</sub> /μg·m <sup>-3</sup>	舍外PM <sub>10</sub> /μg·m <sup>-3</sup>	舍外TSP/μg·m <sup>-3</sup>	舍外温度/°C	舍外湿度/%
蛋鸡	E1	密云	135	450	3 800	8.5	130.5	239.8	31	38	5.5	67.6	130.8	35.0	27.0
	E2	平谷	371	1 260	10 000	6.4	81.1	225.4	25	61	4.7	33.8	62.3	26.0	59.3
	E3	平谷	300	700	10 000	8.6	119.0	237.8	28	51	8.8	62.0	113.8	28.0	48.0
	E4	平谷	480	840	9 000	8.1	108.6	204.2	32	58	3.3	71.3	71.3	32.0	27.0
	E5	平谷	190	790	9 000	10.4	82.7	155.7	25	57	9.0	35.9	51.4	26.0	56.0
	E6	平谷	400	790	9 000	12.2	72.8	118.7	25	59	9.0	35.9	51.4	26.0	56.0
肉鸡	M1	密云	9	600	15 300	5.0	48.4	98.2	31	45	2.4	24.7	49.0	36.7	27.0
	M2	密云	6	140	8 000	33.4	392.4	812.8	32	56	25.0	79.9	108.7	32.0	27.0
	M3	密云	9	1 000	18 000	19.5	154.1	252.3	34	44	18.9	132.5	181.3	37.0	35.0
	M4	密云	34	1 100	8 500	2.5	60.5	173.1	28	45	1.8	18.2	42.4	31.3	40.3
	M5	密云	34	1 100	8 500	4.9	218.5	610.8	30	50	1.8	18.2	42.4	31.3	40.3
	M6	平谷	42	700	4 500	7.1	181.3	181.3	23	81	—	—	—	—	—
	M7	怀柔	15	500	4 500	3.8	235.1	752.6	24	34	4.6	179.7	566.5	28.7	16.3
	M8	怀柔	20	600	5 000	4.6	179.7	566.5	—	—	1.3	28.3	60.2	—	—
猪	P1	平谷	45	540	480	21.9	363.0	428.8	24	62	—	—	—	—	—
	P2	平谷	—	200	50	12.1	249.7	599.9	28	50	—	—	—	—	—
	P3	怀柔	—	410	400	66.8	781.9	1 056.2	24	58	—	—	—	—	—
	P4	怀柔	90	240	99	71.7	498.2	925.8	21	64	—	—	—	—	—
牛	C1	平谷	—	264	29	16.1	108.7	140.6	30	41	—	—	—	—	—
	C2	平谷	—	200	50	18.3	149.4	182.8	28	47	—	—	—	—	—
	C3	怀柔	—	280	400	57.8	125.0	141.2	23	47	—	—	—	—	—
	C4	怀柔	—	33 000	380	69.3	136.2	154.0	21	65	—	—	—	—	—

1)“—”表示未获得相关信息

(辽阳,中国).该仪器将空气中的带菌粒子按粒径大小分别捕获在各级培养皿上: Stage VI: 0.65 ~ 1.1 μm, Stage V: 1.1 ~ 2.1 μm, Stage IV: 2.1 ~ 3.3 μm, Stage III: 3.3 ~ 4.7 μm, Stage II: 4.7 ~ 7.0 μm 和 Stage I: >7.0 μm. 采样高度 1.5 m, 经条

件优化,细菌与抗生素耐药菌样品采集时间分别为 1 min 和 2 min, 气体流量 28.3 L·min<sup>-1</sup>, 每次采样前用流量计(余姚,中国)对采样泵的流量进行校正,每个采样点对细菌和抗生素耐药菌分别重复取样 3 次. 空气温度和相对湿度用温湿度计(WD-35612,

OAKTON, Germany) 检测。

### 1.2.1 细菌气溶胶的培养

本研究采用 9 cm 培养皿, 灭菌后在无菌条件下加入约 20 mL 培养基。细菌采用 LB 营养琼脂培养基, 28℃ 培养箱内培养 2 d; 采集样品在进行菌落计数时, 采用 Positive hole method 方法对菌落数进行相应校正。

### 1.2.2 耐药菌气溶胶的培养

将四环素和红霉素分别配成初始浓度为 16 mg·mL<sup>-1</sup> 和 48 mg·mL<sup>-1</sup> 的母液, 使用时分别取适量上述抗生素母液, 过滤除菌后, 加入到已灭菌的 LB 营养琼脂培养基中, 使其最终浓度分别为四环素 16 mg·L<sup>-1</sup> 和红霉素 48 mg·L<sup>-1</sup>, 制备成单种抗生素耐药平板。

### 1.3 计算方法

#### 1.3.1 生物气溶胶的总浓度

根据采样时间和气体流量, 利用公式 (1) 计算各级生物气溶胶总浓度。

$$c = \frac{N \times 1000}{t \times F} \quad (1)$$

式中,  $c$  为细菌或耐药菌气溶胶浓度, CFU·m<sup>-3</sup>;  $N$  为各级菌落数, CFU;  $t$  为采样时间, min;  $F$  为采样时的气体流量, L·min<sup>-1</sup>。

#### 1.3.2 耐药菌气溶胶占总细菌气溶胶的丰度

$$\eta = \frac{c_{\text{抗性菌}}}{c_{\text{总细菌}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $\eta$  为耐药菌的丰度;  $c$  为耐药菌或细菌气溶胶浓度, CFU·m<sup>-3</sup>。

#### 1.3.3 空气环境中细菌和抗性菌的动力学粒径计算

动力学粒径几何平均值 ( $d_g$ ) 和几何标准偏差 ( $\sigma_g$ ) 计算方法如下<sup>[12]</sup>:

$$d_g = \exp\left(\frac{\sum c_i \ln d_i}{S}\right) \quad (3)$$

$$\ln \sigma_g = \left(\frac{\sum c_i (\ln d_i - \ln d_g)}{S}\right) \quad (4)$$

式中,  $c_i$  指在第  $i$  个粒径区间测量的细菌或耐药菌气溶胶的平均浓度, CFU·m<sup>-3</sup>;  $d_i$  指在第  $i$  个粒径区间的中径,  $\mu\text{m}$ ;  $S$  指所有粒径平均浓度的总和, CFU·m<sup>-3</sup>。

### 1.4 数据统计分析

采用 SPSS 21.0 来对数据进行差异显著性和相关性分析。当  $P$  值小于 0.05 时, 表明在 95% 的置信区间内具有统计学意义上的显著差异; 当  $P$  值小于 0.01 时, 表明在 99% 的置信区间内具有统计学意义

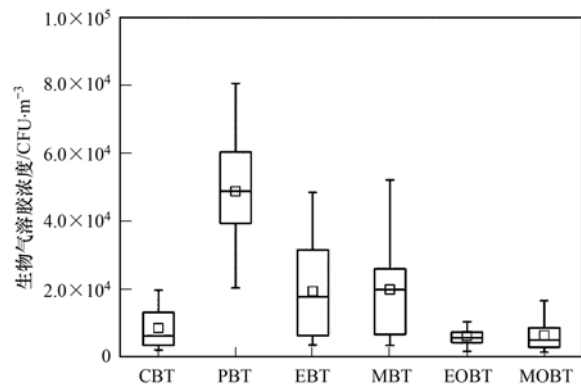
上的显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 畜禽养殖场舍内外生物气溶胶浓度

#### 2.1.1 畜禽养殖场舍内外细菌气溶胶浓度

首先, 对北京 3 个郊区县畜禽养殖场, 包括蛋鸡、肉鸡、猪和牛舍内外空气环境中细菌和抗生素耐药菌气溶胶样本进行培养和计数, 结果如图 2 所示。



CBT、PBT、EBT、MBT、EOBT 和 MOBT 分别代表牛舍内、猪舍内、蛋鸡舍内、肉鸡舍内、蛋鸡舍外和肉鸡舍外

图 2 养殖场舍内外空气中细菌气溶胶浓度

Fig. 2 Concentration of airborne bacteria from indoor and outdoor of animal feeding operations

对 4 种动物舍内空气中细菌污染调查结果显示, 最高浓度和最低浓度的空气细菌在猪舍和牛舍内检测到, 浓度分别为  $4.87 \times 10^4$  CFU·m<sup>-3</sup> 和  $0.85 \times 10^4$  CFU·m<sup>-3</sup>。蛋鸡舍内细菌的平均浓度略低于肉鸡, 两种鸡舍外细菌气溶胶浓度较相应舍内浓度低一个数量级 ( $P < 0.05$ )。值得注意的是, 所调查 4 家猪舍内空气中细菌浓度范围为  $2.03 \times 10^4 \sim 8.06 \times 10^4$  CFU·m<sup>-3</sup>, 均高于我国《畜禽场环境质量标准》(NY/T 388-1999) 中关于猪舍区生态环境质量的空气细菌限值 ( $1.7 \times 10^4$  CFU·m<sup>-3</sup>), 与李基棕等<sup>[13]</sup>对贵州地区猪舍内细菌气溶胶调查的浓度范围相似, 略低于山东省夏秋两季猪舍内浓度<sup>[14]</sup>。牛舍内空气中细菌气溶胶的最大浓度为  $1.96 \times 10^4$  CFU·m<sup>-3</sup>, 低于先前对牛舍内需氧菌的研究结果<sup>[15]</sup>。本研究对蛋鸡和肉鸡舍内细菌的平均浓度的研究结果与国外研究相一致<sup>[2]</sup>。

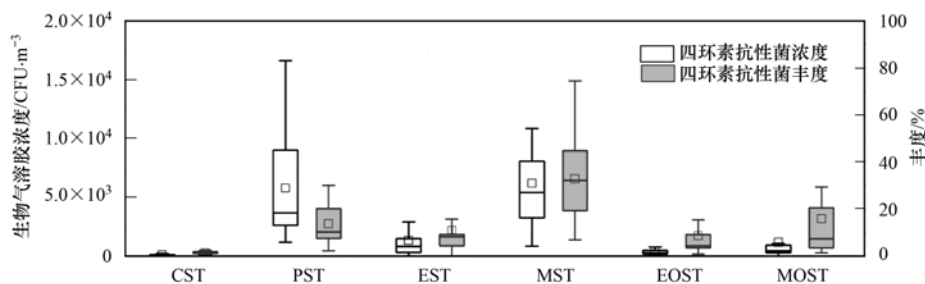
目前, 国内外对不同种类动物养殖过程中逸散生物气溶胶的比较研究少有报道<sup>[1, 17]</sup>。动物舍内生物气溶胶的浓度受到多种因素的影响, 如动物类型和数量、养殖方式、粪便处理方式和养殖模式

等<sup>[3, 18, 19]</sup>. 本研究分析了细菌气溶胶的浓度与日龄、面积、数量、密度、颗粒物浓度以及温度和湿度(表1)相关性. 结果显示,4种养殖动物舍内细菌气溶胶的浓度整体上与颗粒物浓度  $PM_{10}$  ( $P < 0.01$ ) 和 TSP ( $P < 0.01$ ) 显著正相关. 造成牛场内细菌气溶胶浓度较低的原因可能主要有两方面:一方面,牛场内牛的养殖密度较低;另一方面,与猪和鸡舍采用的封闭式饲养不同,牛舍采用开放式养殖方式.

牛舍生物气溶胶的浓度受环境影响较大<sup>[20]</sup>. 牛舍内产生的生物气溶胶可以通过气体传播到周边环境,导致舍内浓度较低.

### 2.1.2 畜禽养殖场舍内外四环素耐药菌气溶胶浓度及丰度

在本研究所调查的4种养殖动物舍内,以及蛋鸡和肉鸡舍外空气中均检测出四环素耐药菌(图3).



CBT、PBT、EBT、MBT、EOBT 和 MOBT 分别代表牛舍内、猪舍内、蛋鸡舍内、肉鸡舍内、蛋鸡舍外和肉鸡舍外

图3 养殖场舍内外四环素耐药菌气溶胶的浓度及其占总细菌浓度的丰度

Fig. 3 Concentration of airborne tetracycline resistant bacteria from indoor and outdoor of animal feeding operations and its abundance in total bacterial concentration

整体上,猪舍和肉鸡舍内四环素耐药菌的浓度 ( $6.98 \times 10^3$  CFU·m<sup>-3</sup> 和  $6.21 \times 10^3$  CFU·m<sup>-3</sup>) 高于牛舍和蛋鸡舍内 ( $P < 0.01$ ). 目前,为了促进动物生长和预防疾病,抗生素在养殖业使用越发频繁,其中猪场和肉鸡场使用尤为严重<sup>[6]</sup>. 虽然国内外已严禁在产蛋鸡及奶牛饲料<sup>[21]</sup>中使用抗生素,但是根据以往报道<sup>[6]</sup>以及本研究组调查中发现有许多养殖户仍在继续违规使用. 该现象导致了4种动物舍内空气中均有四环素耐药菌检出,而猪舍和肉鸡舍内浓度和比率均较高. 其中,肉鸡舍内空气中四环素耐药菌占总细菌气溶胶的平均值高达38.69%,远远高于蛋鸡舍内空气中四环素耐药菌的平均值(11%),这与鸡舍四环素类抗性基因检测结果相符<sup>[22]</sup>. 影响因素分析结果显示,4种养殖动物舍内四环素耐药菌的浓度与细菌浓度 ( $P < 0.01$ )、 $PM_{10}$  ( $P < 0.01$ ) 和 TSP ( $P < 0.01$ ) 呈显著正相关,而与舍内温度 ( $P < 0.05$ ) 和日龄 ( $P < 0.05$ ) 负相关. 四环素耐药菌浓度与日龄负相关可能与四环素在不同日龄动物的使用量有关,据报道幼年鸡和猪粪中抗生素耐药菌和多重抗性细菌要高于成年,且养猪场在养猪过程中,抗生素的使用一般在幼猪期,成年猪则很少使用<sup>[6]</sup>. 虽然蛋鸡和肉鸡舍外四环素耐药菌浓度较低,但其所占总细菌丰度分别达8.81%和15.89%. 这说明养殖场舍内生物气溶胶,包括耐药细菌已经能够传播到舍外,对周边空气环境造成影响.

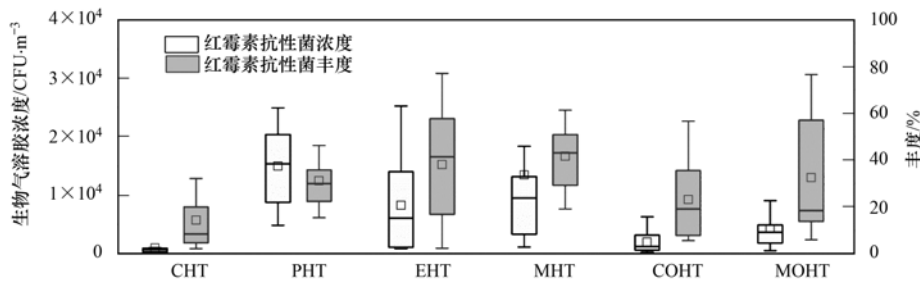
### 2.1.3 畜禽养殖场舍内外红霉素耐药菌气溶胶浓度及丰度

红霉素耐药菌的浓度和丰度在4种动物中的整体变化趋势与总细菌和四环素耐药菌气溶胶浓度一致,但其浓度以及所占丰度均高于四环素耐药菌.

由图4可知猪舍内红霉素耐药菌气溶胶的平均浓度最高,为  $1.50 \times 10^4$  CFU·m<sup>-3</sup>,其次是肉鸡、蛋鸡和牛. 已有研究发现,鸡舍内金黄色葡萄球菌对红霉素耐药率达75.2%<sup>[23]</sup>. Heuer等<sup>[9]</sup>认为,如果一个细菌种群对一种抗生素产生耐药,就会在抗生素的选择压力下占优势,从而产生多重抗生素耐药. 以往研究在鸡粪和猪粪中检测到了多重耐药菌<sup>[6]</sup>. 本研究发现空气中红霉素耐药菌和四环素耐药菌具有显著正相关性 ( $P < 0.05$ ),对比分析图3和图4,推测具有红霉素耐药的细菌气溶胶,很可能同时也具有四环素耐药性. 本研究结果显示,肉鸡舍内的红霉素耐药菌浓度和丰度均高于蛋鸡,蛋鸡和肉鸡舍外红霉耐药菌平均浓度和丰度分别为  $1.9 \times 10^3$  CFU·m<sup>-3</sup>、 $4.2 \times 10^3$  CFU·m<sup>-3</sup> 和23.19%、36.53%,且舍内外趋势相同. 进一步说明养殖场是舍外生物气溶胶污染的来源.

### 2.2 畜禽养殖场舍内外生物气溶胶粒径分布特点

动力学粒径是生物气溶胶的重要属性之一<sup>[24]</sup>,不同粒径的颗粒物可以沉降在人体呼吸道的不同位置. 本研究对FA-I撞击式采样器6个粒径所收集



CBT、PBT、EBT、MBT、EOBT 和 MOBT 分别代表牛舍内、猪舍内、蛋鸡舍内、肉鸡舍内、蛋鸡舍外和肉鸡舍外

图 4 养殖场舍内外红霉素耐药菌气溶胶的浓度及其占总细菌浓度的丰度

Fig. 4 Concentration of airborne erythromycin resistant bacteria from indoor and outdoor of animal feeding operations and its abundance in total bacterial concentration

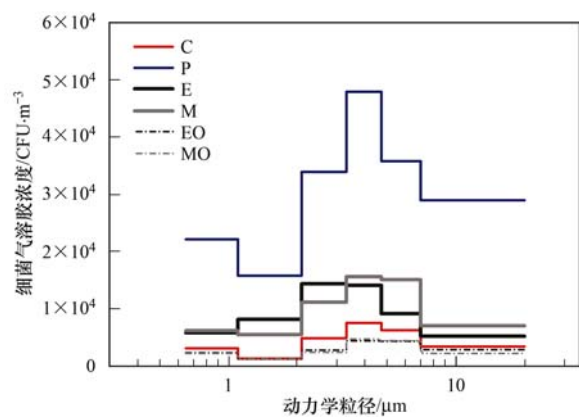
的细菌,四环素和红霉素耐药菌的浓度和分布特点进行分析,并计算动力学粒径的几何平均值(表 2),对细菌、四环素和红霉素耐药菌气溶胶的可能造成的危害进行初步评估。

2.2.1 畜禽养殖场舍内外细菌气溶胶粒径分布特点

由图 5 可知,整体上,细菌气溶胶主要分布在中间粒径范围内,而在大粒径和小粒径范围内浓度较低.除了蛋鸡舍内之外,其他 5 个采样点的最高浓度值均在 Stage III 检测到.这与城市环境<sup>[25]</sup>以及污水处理厂中细菌气溶胶的粒径分布特点相似,最高浓度出现在 Stage IV ~ III 范围内<sup>[26]</sup>.4 种养殖动物舍内细菌气溶胶在 6 个粒径范围的分布特点存在差异.根据公式(3)可知,生物气溶胶在单位粒径上的浓度以及总浓度决定了其整体的动力学粒径几何平均值.例如,猪舍中细菌气溶胶在 Stage VI ~ I 内单位粒径的浓度分别为  $2.21 \times 10^4$ 、 $1.58 \times 10^4$ 、 $3.39 \times 10^4$ 、 $4.79 \times 10^4$ 、 $3.58 \times 10^4$  和  $2.90 \times 10^4$   $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ .其动力学粒径几何平均值( $4.39 \mu\text{m}$ )高于其他养殖环境,这主要是由于在大粒径范围内细菌气溶胶的单位粒径浓度较高,而在小粒径范围内细菌气溶胶的单位粒径浓度较低造成的。

2.2.2 四环素耐药菌气溶胶浓度粒径的分布特点

整体上,四环素耐药菌气溶胶与细菌气溶胶粒径的分布特点有所差异(图 6).蛋鸡和肉鸡的最高浓度在 Stage III ( $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ )检测到.而猪舍和牛舍内最高浓度分别在 Stage I ( $>7 \mu\text{m}$ )和 Stage IV ( $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ ),为  $4.49 \times 10^3$   $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 和  $2.37 \times 10^2$   $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ .蛋鸡和肉鸡舍外的最高浓度均分布在 Stage II ( $4.7 \sim 7 \mu\text{m}$ )范围内.舍内四环素耐药菌最大动力学粒径几何平均值在猪舍内检测到,为  $6.10 \mu\text{m}$ .造成这一现象的主要原因可能是猪舍的最高浓度分布在 Stage I ( $>7 \mu\text{m}$ ).同样,蛋鸡



C、P、E、M、EO 和 MO 分别代表牛舍内、猪舍内、蛋鸡舍内、肉鸡舍内、蛋鸡舍外和肉鸡舍外

图 5 养殖场舍内外细菌气溶胶粒径分布特点

Fig. 5 Size distribution of airborne bacteria from indoor and outdoor of animal feeding operations

和肉鸡舍外四环素耐药菌气溶胶在大粒径范围内浓度较高,导致蛋鸡和肉鸡舍外动力学粒径几何平均值较高,分别为  $5.68 \mu\text{m}$  和  $9.58 \mu\text{m}$ 。

2.2.3 红霉素耐药菌气溶胶浓度粒径的分布特点

由图 7 可知,虽然每种养殖动物细菌、红霉素和

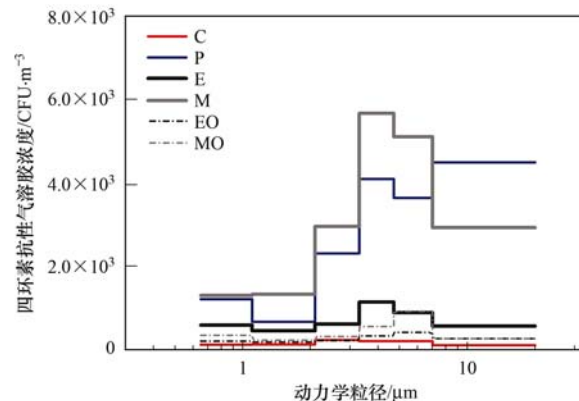


图 6 养殖场舍内外四环素耐药菌气溶胶粒径分布特点

Fig. 6 Size distribution of airborne tetracycline resistant bacteria from indoor and outdoor of animal feeding operations

四环素耐药菌的粒径分布存在差异,但整体上所考察各养殖场舍内红霉素耐药菌气溶胶主要分布在中间粒径范围内,在大粒径和小粒径粒子范围内分布较少. 最高单位粒径浓度在 Stage III 检测到,蛋鸡、肉鸡、猪和牛舍内分别为  $4.91 \times 10^3$ 、 $1.01 \times 10^4$ 、 $1.55 \times 10^4$  和  $0.66 \times 10^3$  CFU·m<sup>-3</sup>. Stage V 范围内浓度最低,蛋鸡、肉鸡在 Stage V 浓度较为接近,分别为  $0.250 \times 10^3$  CFU·m<sup>-3</sup> 和  $0.252 \times 10^3$  CFU·m<sup>-3</sup>.

综合分析发现,不同养殖场空气环境中同种生物气溶胶的粒径分布规律有所不同,同一养殖场不同种类生物气溶胶也存在差异. 畜禽养殖过程中,生物气溶胶的粒径分布受多种因素影响,如气溶胶化的方式<sup>[27]</sup>和粒子的吸湿性<sup>[28]</sup>等. 除此之外,动物的活动、通风、垫料以及地板类型也会影响粒径分布<sup>[29]</sup>. 本研究考察了空气动力学粒径同表 1 中各个参数之间的相关性,只检测到细菌生物气溶胶的动力学粒径同 PM<sub>2.5</sub> 显著正相关 ( $P < 0.05$ ). 因畜禽舍内生物粒子粒径分布影响因素复杂,很难独立分析. 本研究结果显示了北京地区 4 种动物养殖场空气环境中细菌、四环素耐药菌和红霉素耐药菌的粒径分布特点,为后续深入研究其影响因素以及危害评估提供参考.

#### 2.2.4 生物气溶胶动力学粒径

动力学粒径几何平均值通常用来判定某一生物气溶胶粒子在人体呼吸道的整体沉降位置. 如,粒径  $d_g < 10 \mu\text{m}$  可进入鼻腔; 粒径  $d_g < 7 \mu\text{m}$  可进入咽喉; 粒径在  $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$  可进入支气管; 粒径在

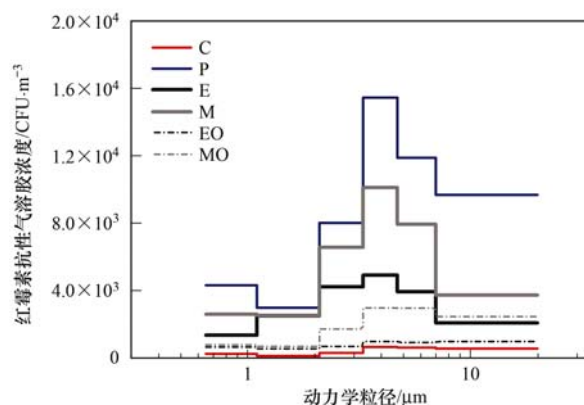


图 7 养殖场舍内外红霉素耐药细菌气溶胶粒径分布特点

Fig. 7 Size distribution of airborne erythromycin resistant bacteria from indoor and outdoor of animal feeding operations

$2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$  可进入二支气管; 粒径在  $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$  可进入末端支气管; 粒径在  $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$  可直接沉降于肺泡,从而进入血液循环. 本研究调查的各养殖场舍内细菌气溶胶的空气动力学粒径  $d_g$  几何平均值在  $3.4 \sim 4.4 \mu\text{m}$  之间 (表 2),表明这些细菌绝大部分可直接进入支气管. 而四环素和红霉素耐药菌空气动力学粒径  $d_g$  在不同养殖动物中的波动较大,分别是  $3.2 \sim 6.1 \mu\text{m}$  和  $3.6 \sim 7.1 \mu\text{m}$ . 整体上,鸡舍外 3 种生物气溶胶粒子的空气动力学粒径  $d_g$  高于舍内 (除肉鸡场细菌气溶胶),这说明所考察的 3 种生物气溶胶在传播至舍外后,空气动力学粒径的增大导致其在人体呼吸道的沉降位置上移. 国外研究人员在养猪场工人的鼻腔检测到了四环素耐药基因<sup>[30]</sup>,这说明不同动力学粒径可导致耐药基因或者

表 2 畜禽养殖场生物气溶胶空气动力学粒径<sup>1)</sup>

Table 2 Aerodynamic diameter from indoor and outdoor of animal feeding operations

养殖场	细菌气溶胶		四环素耐药菌气溶胶		红霉素耐药菌气溶胶	
	$d_g/\mu\text{m}$	$\sigma_g$	$d_g/\mu\text{m}$	$\sigma_g$	$d_g/\mu\text{m}$	$\sigma_g$
P	4.39	2.53	6.10	2.39	5.35	2.32
C	4.22	2.34	4.16	2.69	7.07	2.24
EI	3.42	2.34	4.58	2.41	3.57	2.28
EO	3.87	2.68	5.68	2.60	4.67	2.62
MI	3.94	2.47	3.23	2.37	4.39	2.37
MO	3.85	2.52	9.58	2.49	5.60	2.44

1) " $d_g$ " 表示空气动力学粒径几何平均值; " $\sigma_g$ " 表示表示空气动力学粒径几何标准偏差

耐药菌沉降在呼吸道的主要位置产生差异.

### 3 结论

本研究在 2015 年夏秋两季对北京周边养殖场生物气溶胶的调查. 结果显示,畜禽养殖场细菌、抗生素耐药菌气溶胶的浓度分别为  $10^4$  CFU·m<sup>-3</sup> 和  $10^3$  CFU·m<sup>-3</sup> 左右. 猪舍和肉鸡舍内耐药菌气溶胶浓度和丰度较高. 鸡舍外部检测到四环素和红霉素耐药菌. 不同养殖场空气中气溶胶的粒径分布以及

动力学粒径几何平均值存在差异,导致其在人体呼吸道的沉降主体位置不同. 本研究结果将为评估畜禽养殖场空气环境质量,评价生物气溶胶对人类的危害提供基础数据.

#### 参考文献:

- [1] 姚美玲,张彬,柴同杰. 鸡兔舍耐药大肠杆菌气溶胶向环境扩散的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(8): 60-64.  
Yao M L, Zhang B, Chai T J. Antibiotic resistance of airborne *Escherichia coli* from hen house and rabbitry and their spreading



- to surroundings [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2007, **35**(8): 60-64.
- [ 2 ] Just N, Kirychuk S, Gilbert Y, *et al.* Bacterial diversity characterization of bioaerosols from cage-housed and floor-housed poultry operations [J]. *Environmental Research*, 2011, **111**(4): 492-498.
- [ 3 ] 高敏, 贾瑞志, 仇天雷, 等. 畜禽养殖中逸散生物气溶胶特征的研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(1): 12-21. Gao M, Jia R Z, Qiu T L, *et al.* Progress in research on characteristics of bioaerosol diffused during livestock breeding [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(1): 12-21.
- [ 4 ] McEachran A D, Blackwell B R, Hanson J D, *et al.* Antibiotics, bacteria, and antibiotic resistance genes: aerial transport from cattle feed yards via particulate matter [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, **123**(4): 337-343.
- [ 5 ] Seltner N. Dust emissions from cattle feed yards: a source of antibiotic resistance? [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, **123**(4): A96.
- [ 6 ] 祁诗月, 任四伟, 李雪玲, 等. 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究[J]. *生态学报*, 2013, **33**(13): 3970-3977. Qi S Y, Ren S W, Li X L, *et al.* Multidrug-resistant bacteria in livestock feces [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(13): 3970-3977.
- [ 7 ] Allen H K, Donato J, Wang H H, *et al.* Call of the wild: antibiotic resistance genes in natural environments [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(4): 251-259.
- [ 8 ] Gibbs S G, Green C F, Tarwater P M, *et al.* Airborne antibiotic resistant and nonresistant bacteria and fungi recovered from two swine herd confined animal feeding operations [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2004, **1**(11): 699-706.
- [ 9 ] Heuer H, Schmitt H, Smalla K. Antibiotic resistance gene spread due to manure application on agricultural fields [J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2011, **14**(3): 236-243.
- [ 10 ] 高敏, 贾瑞志, 仇天雷, 等. 集约化养鸡场空气环境中生物气溶胶特点研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(4): 787-794. Gao M, Jia R Z, Qiu T L, *et al.* Characteristics of bioaerosols in air environment of confined poultry feeding operations [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(4): 787-794.
- [ 11 ] Brooks J P, McLaughlin M R, Scheffler B, *et al.* Microbial and antibiotic resistant constituents associated with biological aerosols and poultry litter within a commercial poultry house [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(20): 4770-4777.
- [ 12 ] Yamamoto N, Bibby K, Qian J, *et al.* Particle-size distributions and seasonal diversity of allergenic and pathogenic fungi in outdoor air [J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(10): 1801-1811.
- [ 13 ] 李基棕, 高颖, 杜海燕, 等. 规模化养猪场环境细菌的调查与分析[J]. *中国畜牧兽医*, 2010, **37**(8): 199-203.
- [ 14 ] 袁文. 猪舍环境气载需氧菌的检测及大肠杆菌气溶胶的发生与传播[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010. 9-66.
- [ 15 ] 段会勇, 朱永红, 梁岩. 牛舍内微生物气溶胶含量检测[J]. *疾病防控*, 2013, **33**(3): 47-51.
- [ 16 ] 柴同杰, 赵云玲, 刘文波, 等. 鸡舍环境耐药细菌气溶胶及其向环境传播的研究[J]. *中国预防兽医学报*, 2003, **25**(3): 209-214. Chai T J, Zhao Y L, Liu W B, *et al.* The resistance against antibiotics of bacteria from a poultry house and their spreading to surroundings of the house [J]. *Chinese Journal of Preventive Veterinary Medicine*, 2003, **25**(3): 209-214.
- [ 17 ] Radon K, Weber C, Iversen M, *et al.* Exposure assessment and lung function in pig and poultry farmers [J]. *Occupational & Environmental Medicine*, 2001, **58**(6): 405-410.
- [ 18 ] Smets W, Moretti S, Denys S, *et al.* Airborne bacteria in the atmosphere: presence, purpose, and potential [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **139**: 214-221.
- [ 19 ] Guan D X, Guo C M, Li Y J, *et al.* Study on the concentration and distribution of the airborne bacteria in indoor air in the lecture theatres at Tianjin Chengjian University, China [J]. *Procedia Engineering*, 2015, **121**: 33-36.
- [ 20 ] Hristov A N, Hanigan M, Cole A, *et al.* Review: ammonia emissions from dairy farms and beef feedlots [J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2011, **91**(1): 1-35.
- [ 21 ] Ling A L, Pace N R, Hernandez M T, *et al.* Tetracycline resistance and Class 1 integron genes associated with indoor and outdoor aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(9): 4046-4052.
- [ 22 ] 段会勇. 动物舍微生物气溶胶及其向周围环境的传播[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008. 50-60.
- [ 23 ] 柳敦江. 养鸡场舍环境携带耐药基因的金黄色葡萄球菌的气溶胶形成及传播研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [ 24 ] 苏捷, 赵普生, 陈一娜. 北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1208-1218. Su J, Zhao P S, Chen Y N. Characteristics of number concentration size distributions of aerosols under different weather processes in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1208-1218.
- [ 25 ] 高敏, 仇天雷, 贾瑞志, 等. 北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4415-4421. Gao M, Qiu T L, Jia R Z, *et al.* Concentration and size distribution of bioaerosols at non-haze days and haze days in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4415-4421.
- [ 26 ] 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 等. 城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2191-2196. Qiu X H, Li Y P, Niu T J, *et al.* Pollution characteristics of microbial aerosols generated from a municipal sewage treatment plant [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2191-2196.
- [ 27 ] Verreault D, Moineau S, Duchaine C. Methods for sampling of airborne viruses [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2008, **72**(3): 413-444.
- [ 28 ] Stärk K D C. The role of infectious aerosols in disease transmission in pigs [J]. *The Veterinary Journal*, 1999, **158**(3): 164-181.
- [ 29 ] Preller L, Heederik D, Kromhout H, *et al.* Determinants of dust and endotoxin exposure of pig farmers: development of a control strategy using empirical modelling [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 1995, **39**(5): 545-557.
- [ 30 ] Létourneau V, Nehmé B, Mériaux A, *et al.* Human pathogens and tetracycline-resistant bacteria in bioaerosols of swine confinement buildings and in nasal flora of hog producers [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2010, **213**(6): 444-449.

## CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation .....	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing .....	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing .....	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou .....	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	..... YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City .....	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
<sup>13</sup> C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO <sub>2</sub> During Youth Olympic Games, Nanjing .....	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff .....	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations .....	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure .....	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions .....	..... LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds .....	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province .....	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake .....	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs .....	..... HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir .....	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake .....	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi .....	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons .....	..... WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization .....	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake .....	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media .....	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example .....	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin .....	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China .....	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics .....	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs .....	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation .....	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO <sub>2</sub> Using QCM-D and AFM .....	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling .....	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank .....	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Addition .....	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition .....	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield .....	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor .....	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits .....	..... WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) .....	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO <sub>2</sub> Emission from Soils of Summer-maize Field .....	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China .....	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis .....	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City .....	..... CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin .....	..... LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain .....	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots .....	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration .....	..... CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures .....	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake .....	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal .....	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSW Fly Ash with Various Particle Sizes .....	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行