

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

南京工业区分冬季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 ..... 刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 ..... 梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 ..... 高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 ..... 金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 ..... 段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 ..... 梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 鄢晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 ..... 邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 ..... 姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 ..... 武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例 ..... 姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 ..... 董小芳, 邓黄月, 张杰, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 ..... 张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 ..... 张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 ..... 王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 ..... 孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 ..... 肖骁, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 ..... 李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 ..... 陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 ..... 姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 ..... 李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 ..... 丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 ..... 刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 ..... 徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 ..... 王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)

树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 ..... 陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 ..... 朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 ..... 桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 ..... 周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 ..... 金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)

Fe<sup>(0)</sup>-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 ..... 吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 ..... 李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 ..... 闰刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 ..... 范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 ..... 杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 ..... 徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 ..... 万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 ..... 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 ..... 许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 ..... 曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 ..... 秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 ..... 田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N<sub>2</sub>O 的排放特征 ..... 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 ..... 熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 ..... 孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 ..... 张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 ..... 王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 ..... 李秋言, 赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 ..... 吴志娟, 毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 ..... 王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 的吸附特性 ..... 杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)

C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 ..... 鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

# 南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性

梁静舒, 安俊琳\*, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇

(南京信息工程大学, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

**摘要:** 使用宽范围颗粒粒径谱仪(WPS)对2015年1月和4月南京北郊大气气溶胶数浓度进行观测,使用多路径粒子剂量测量模型(MPPD)v.3.04模式估算不同空气质量指数(AQI)级别下、休息与运动状态下,细粒子在人体呼吸系统不同部位的沉积分数(DF)和沉积数浓度。结果发现,核模态和爱根核模态DF在休息和运动状态下近似,积聚模态DF在运动时是休息时的2.49倍。肺部对核模态和爱根核模态总沉积分数(TDF)贡献最大,休息时约占48.17%,运动时约占54.23%,头部对积聚模态TDF贡献最大,休息时约占41.23%,运动时约占80.47%。冬季人体内颗粒物沉积数浓度明显低于春季,各部位中总沉积数浓度大小为:肺部>气管支气管>头部。与休息时相比,运动时肺部核模态沉积增多,气管及支气管和头部积聚模态沉积增多,且头部表现出空气质量越差,运动较休息增长越多的特点。地区间DF的差异主要由于生理参数不同,沉积数浓度的差异主要由于当地环境中粒子数浓度不同。

**关键词:** 细粒子;数浓度;MPPD模式;沉积分数;人体呼吸系统

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1743-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610040

## Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing

LIANG Jing-shu, AN Jun-lin\*, WANG Hong-lei, ZHANG Yu-xin, WANG Jun-xiu, SHI Shuang-shuang, WANG Xiao

(Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The particles number concentrations were determined by Wide-range Particle Spectrometer (WPS) in northern suburb of Nanjing in January and April 2015. The information of size distributions was applied in the multiple-path particle dosimetry model (MPPD) v. 3.04 to quantify deposition fractions (DF) and number concentration (NC) depositions of fine particles in different regions of human airway, at different air quality levels, at rest and exercise. DF of nucleation mode and Aitken mode at rest and exercise were similar, while DF of accumulation mode at exercise was 2.49 times of that at rest. DF of nucleation mode and Aitken mode in pulmonary (PUL) was the highest, about 48.17% of total deposition fractions (TDF) at rest and 54.23% of TDF at exercise. DF of accumulation mode in head was the highest, about 41.23% of TDF at rest and 80.47% of TDF at exercise. The particle NC deposition in human airway in winter was lower than that in spring, and the total NC deposition in 3 regions was in the order of PUL > tracheobronchial (TB) > head. Compared with resting, nucleation mode deposition in PUL and accumulation mode deposition in TB and head increased at exercise. The worse the air quality, the higher the deposition growth rate of exercising to resting in head. DF difference among regions was mainly due to the different physiological parameters, while NC deposition difference was mainly due to the different particle NC in the local environment.

**Key words:** fine particles; number concentration; MPPD mode; deposition fraction; human airway

大气颗粒物现已成为影响人类身体健康的主要因素之一。流行病学研究表明,当人体暴露在颗粒物浓度较高的环境下并且吸入颗粒物时,颗粒物在人体中的沉积是造成多种疾病发生或加重的原因之一,尤其是心血管疾病<sup>[1,2]</sup>和呼吸系统疾病<sup>[3,4]</sup>,颗粒物浓度增加与患者的入院率和死亡率上升有关<sup>[5,6]</sup>;不同粒径颗粒物在不同沉积部位诱发的疾病类型也有所不同<sup>[7]</sup>。国际癌症研究总局已将大气颗粒物归为致癌物之一<sup>[8,9]</sup>。

近年来,我国霾现象日渐频发,颗粒物对人体健康的影响引起了政府和公众的广泛关注。目前国内对于颗粒物对健康影响的研究主要集中在细

收稿日期: 2016-10-09; 修订日期: 2016-12-02

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(XDB05020206);国家自然科学基金项目(91544229, 41305135);江苏省高校“青蓝工程”项目;江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 梁静舒(1993~),女,硕士,主要研究方向为大气环境与大气化学,E-mail: ljsh@sohu.com

\* 通信作者,E-mail: junlinan@nuist.edu.cn

粒子与心血管疾病和呼吸系统疾病的关系<sup>[10,11]</sup>, 以及对人体内颗粒物传输与沉积的数值模拟<sup>[12,13]</sup>. 许多研究表明, 颗粒物的毒性效应与其粒径关系密切, 而且细粒子较粗粒子毒性更强<sup>[14,15]</sup>; 在北京, 局部缺血性心脏病的死亡率与 30 ~ 100 nm 粒径段粒子的数量关系最为密切<sup>[16]</sup>. 然而在国内对于人体内颗粒物沉积量的定量分析还较为欠缺.

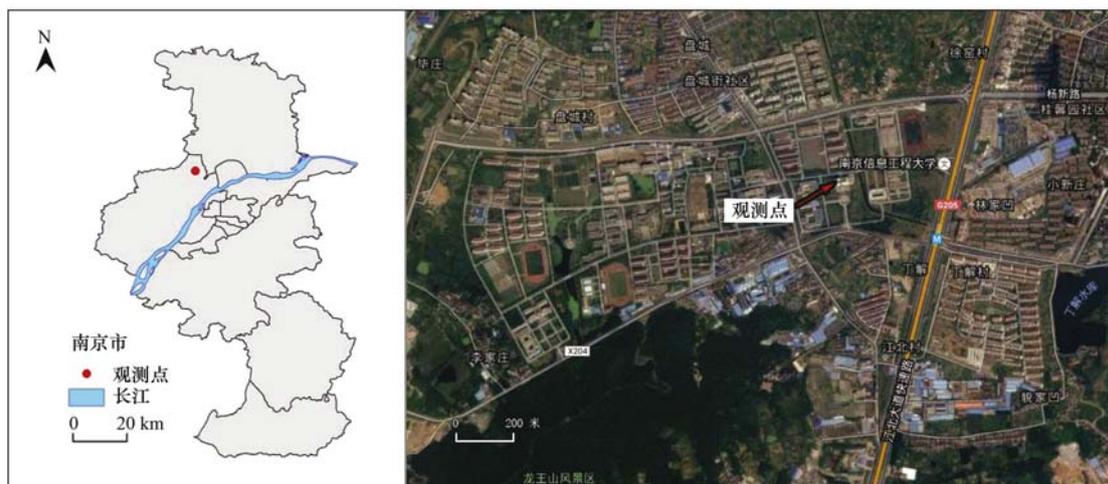
长江三角洲一直是霾污染高发区域, 南京近年来的空气质量更是不容乐观. 吉贵祥等<sup>[17]</sup>发现 2013 ~ 2014 年南京市 PM<sub>2.5</sub> 与非肿瘤类呼吸疾病住院人数显著相关, 可见南京地区空气污染与人体健康关系密切. 方叠<sup>[18]</sup>发现南京较周边城市对 PM<sub>2.5</sub> 致死的耐受性更强, 自然环境、人为环境以及污染成分不同都可能导致南京地区人体内颗粒物沉积特性有别于其他地区. 所以, 本研究时段选择了呼吸系统疾病高发的冬季(2015 年 1 月 1 日至 2015 年 1 月 31 日)和春季(2015 年 4 月 1 日至 2015 年 4 月

30 日), 应用多路径粒子剂量测量模型 (multiple-path particle dosimetry model, MPPD, v. 3.04) 对南京北郊地区细粒子在人体内不同部位的沉积特性进行定量分析, 以期评价细粒子的暴露风险、剂量和健康效应提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测站点

观测点位于南京北郊的南京信息工程大学气象楼大气物理学院及中国气象局气溶胶与云降水重点实验室(32°12'N, 118°42'E, 海拔 62 m), 其东面约 500 m 为主干道路宁六路, 双向六车道, 上空有高架快速路和轻轨; 其西南方向约 900 m 为南京龙王山风景区, 海拔约 100 m; 其西侧和北侧为南京信息工程大学校园主体、城镇住宅区和农田, 无明显的污染排放源. 观测点周边情况如图 1 所示. 冬季观测时间为 2015 年 1 月 1 日至 2015 年 1 月 31 日, 春季观测时间为 2015 年 4 月 1 日至 2015 年 4 月 30 日.



来源: <http://www.sosyes.cn>

图 1 观测点地理位置及周边环境示意

Fig. 1 Location of observation station and the surrounding environment

### 1.2 观测仪器和分析方法

气溶胶粒子数浓度 (number concentration, NC) 的观测采用美国 MSP 公司生产的宽范围颗粒粒径谱仪 (WPS), 测量直径范围为 10 nm ~ 10 μm, 仪器原理介绍见文献<sup>[19]</sup>. 由于 WPS 适应的环境湿度为 0% ~ 90%、非冷凝, 根据观测的实施情况, 剔除了部分无效数据.

PM<sub>2.5</sub> 浓度的观测使用美国热电公司生产的 FH62C14 型 β 射线测尘仪, 仪器采用 C-14 密封放射源来感知堆积在移动滤带上的尘粒, 时间分辨率为 30 min. 该仪器使用前已标定, 符合美国 EPA 的

技术规格<sup>[20]</sup>.

SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO 及 O<sub>3</sub> 的观测均采用美国赛默飞世尔环境设备公司生产的大气污染物环境监测分析仪. 仪器参数及标定方法见文献<sup>[21]</sup>. 为保证观测数据的有效性和可靠性, 观测期间对分析仪每月进行一次校准, 并剔除部分无效数据.

### 1.3 空气质量指数级别的划分

空气质量指数 (AQI) 级别按中华人民共和国环境保护部发布的《环境空气质量指数 (AQI) 技术规范 (试行)》<sup>[22]</sup> 划分. 污染物项目 P 的空气质量分指数按式 (1) 计算.

$$IAQI_P = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(c_P - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \quad (1)$$

式中,  $IAQI$  为污染物项目  $P$  的空气质量分指数;  $c_P$  为污染物项目  $P$  的质量浓度值 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  或  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $BP_{Hi}$  为与  $c_P$  相近的污染物浓度限值的高位值 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  或  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $BP_{Lo}$  为与  $c_P$  相近的污染物浓度限值的低位值 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  或  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $IAQI_{Hi}$  为与  $BP_{Hi}$  对应的空气质量分指数;  $IAQI_{Lo}$  为与  $BP_{Lo}$  对应的空气质量分指数. 空气质量指数按式(2)计算:

$$AQI = \max\{IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \dots, IAQI_n\} \quad (2)$$

式中,  $IAQI$  为空气质量分指数;  $n$  为污染物项目.

#### 1.4 MPPD 模式

MPPD v. 3. 04 是由美国哈姆纳健康科学研究院与荷兰国家公共卫生和环境研究所共同开发的计算模型, 其功能介绍见官方网站<sup>[23]</sup>. 模式中包含的多路径模式可以基本反映人类呼吸系统的真实结构, 原理见文献<sup>[24]</sup>.

本研究选用模式中的随机肺模型, 参考 Li 等<sup>[25]</sup>研究中所选用的代表北京地区人体生理特征的参数, 肺部尺寸选取第 60 百分位点; 参考 Roy 等<sup>[26]</sup>研究结果, 选取适合中国人生理特征的参数为, 功能性余气量 2 950.0 mL (其数值变化与是否运动无直接关系, 故视为常数<sup>[27]</sup>), 上呼吸道体积 44.7 mL, 休息状态下呼吸频率为 16 次 $\cdot\text{min}^{-1}$ , 潮气量为 537.5 mL; 参考运动生理学教材<sup>[28]</sup>内容, 选取运动状态下呼吸频率为 50 次 $\cdot\text{min}^{-1}$ , 潮气量为 2 000.0 mL. 由于气溶胶粒子密度与粒径大小相关, 本文参考了 Hu 等<sup>[29]</sup>的研究结果, 即北京地区 1  $\mu\text{m}$  以下粒子的实际密度和有效密度均在 1.5  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  附近浮动, 并且 Li 等<sup>[25]</sup>也将其设定为 1.5  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 故本次研究中将 1  $\mu\text{m}$  以下粒子的平均密度估计为 1.5  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . 其他参数, 如重力加速度、呼吸过程中吸气和暂停的时间比例等, 均使用模式中的默认值.

本研究主要使用模式计算所得的沉积分数 (deposition fraction, DF), 呼吸系统的总沉积分数 (total deposition fraction, TDF) 定义如式(3)所示.

$$TDF = (N_i - N_e)/N_i \quad (3)$$

式中,  $N_i$  为人体吸入的粒子总数 (个);  $N_e$  为随后呼出的粒子总数 (个)<sup>[30]</sup>.

在可吸入颗粒物经呼吸道进入人体内的过程

中, 一方面, 其粒径大小会决定其在呼吸系统中的沉降部位, 粒子形状也会造成一定影响<sup>[31]</sup>; 另一方面, 粒径会影响粒子的悬浮时间和沉降速度, 是决定其 DF 的最主要原因<sup>[32]</sup>. 同时 DF 也受呼吸型显著影响, 主要包括上呼吸道体积、潮气量、功能性余气量、呼吸频率、吸入停顿时间等<sup>[26]</sup>; 同时也受颗粒物密度、形状、电荷、吸湿效应、温度<sup>[33]</sup>以及呼吸者年龄<sup>[34]</sup>、性别<sup>[34]</sup>、健康状况 (影响气道通畅程度) 等因素影响<sup>[35,36]</sup>. 如 Yamada 等<sup>[34]</sup>的研究中, 不同分组人体的总肺容量、功能性余气量和肺活量的大小关系为: 成年男性 > 成年女性 > 10 岁儿童, 该差异致使肺部的沉积效率峰值大小关系为: 成年男性 > 成年女性 > 10 岁儿童, 同时, 儿童胸外区域中 1  $\mu\text{m}$  粒子沉积效率比成年男性和女性高出 5% ~ 7%, 且微米级粒子沉积较高, 但其肺部沉积效率是三组中最低的, 且纳米级粒子沉积较高. 再如, Chalupa 等<sup>[36]</sup>的研究结果表明, 哮喘病人体内沉积分数普遍高于健康人; 休息时较为明显, 高出约 0.15, 运动时差异不大, 高出约 0.02; 其主要原因是哮喘病人潮气量整体水平高于健康人.

本研究假设大气气溶胶粒子形状为球体, 未考虑其他形状的情况; 呼吸型参数的选取仅符合中国成人呼吸特征的平均水平, 未考虑年龄、性别、健康状况等因素, 以及长时间运动过程中的生理变化.

## 2 结果与讨论

### 2.1 数浓度谱分布

图 2 为南京北郊冬春两季各 AQI 级别下的细粒子数浓度谱分布平均值. 其中 1 月有效数据 30 d, 含 AQI 二级 10 d、三级 12 d、四级 5 d、五级 3 d, 样本量 7 213 个; 4 月有效数据 27 d, 含 AQI 一级 3 d、二级 20 d、三级 2 d、四级 2 d, 样本量 7 311 个.

冬季数浓度谱分布 [图 2(a)] 在不同 AQI 级别间差异不大, 平均总数浓度为  $35.16 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ . 各级别的最大值分别为二级  $1.27 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、三级  $1.26 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、四级  $1.44 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、五级  $1.57 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ; 总体最大值出现在 AQI 五级的 105 nm 粒径附近. 五级数浓度谱为单峰分布; 三级和四级为结构相似的明显双峰分布, 二级也有较小的双峰结构, 第一个峰值均出现在 55 ~ 65 nm 粒径段, 第二个峰值略大于第一个峰值, 出现在 70 ~ 105 nm 粒径段, 且位置随空气质量降低而向大粒径移动. 各级别的最高峰值均在 70 ~ 115 nm 随空气质量降低而向大粒径移动, 可以说明空气质量越差, 较大粒径段

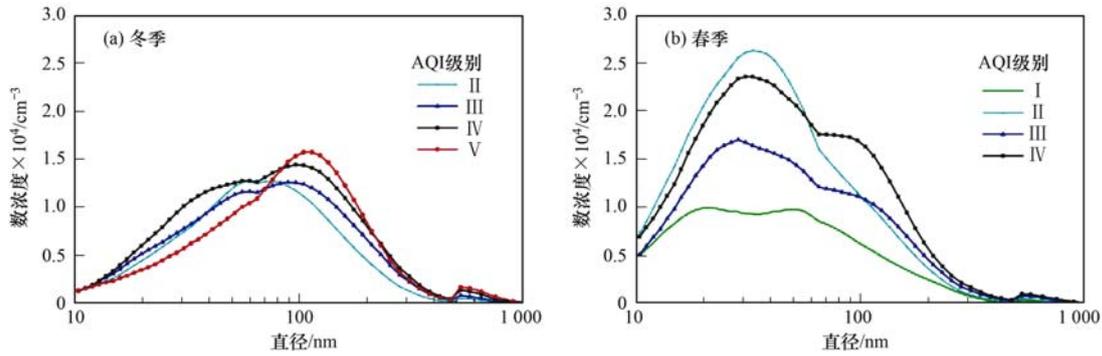


图2 南京北郊冬季和春季在不同AQI级别下的数浓度谱分布

Fig. 2 Particle size distributions of NC at different AQI levels in winter and spring in northern suburb of Nanjing

数浓度越高. 其中积聚模态(100 ~ 1 000 nm)数浓度与空气质量的相关性更加明显,空气质量越差,积聚模态数浓度越高.

春季数浓度谱分布[图2(b)]在不同AQI级别之间差异较大,这点与冬季明显不同. 平均总数浓度为  $52.62 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,明显高于冬季. 各级别的最大值分别为一级  $1.00 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、二级  $2.63 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、三级  $1.70 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、四级  $2.36 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ; 总体最大值出现在二级的30 ~ 35 nm 粒径段. 一级数浓度谱有微弱的双峰特征且两峰值差异不大,分别出现在20 nm 和50 nm 粒径附近;二级为单峰分布;三级和四级与冬季分布类似,但实际上65 ~ 100 nm 范围内仅是斜率明显减小,并没有第二个峰值出现. 各模态数浓度与空气质量之间未表现出明显的相关性.

### 2.2 不同生理状态下的沉积分数

在休息和运动两种状态下,人体内颗粒物TDF及呼吸系统中各部位的DF均表现出明显差异[图3(a)和图3(b)].

休息时TDF最大值出现在10 nm 附近可达0.80,在<350 nm 粒径段TDF随粒径增长而降低,最小值出现在310 ~ 380 nm 约为0.17,之后有所回升,在1 000 nm 附近增长至0.31. 头部(主要包括鼻腔、口腔、咽部和喉部)DF也呈现随粒径增长先降低再回升的分布,在10 nm 和1 000 nm 附近分别达到0.22和0.18,最低值出现在90 ~ 105 nm 约为0.04. 气管及支气管DF呈递减趋势,10 nm 附近约为0.38,100 nm 附近约为0.05. 肺部DF呈一峰一谷分布,峰值出现在20 ~ 25 nm 约为0.29,谷值出现在380 ~ 475 nm 约为0.06.

运动时TDF呈“U”形分布,10 nm 附近约为0.81与休息时差异不大,最低值出现在120 ~ 145 nm 粒径段约为0.25,而在1 000 nm 附近回升至

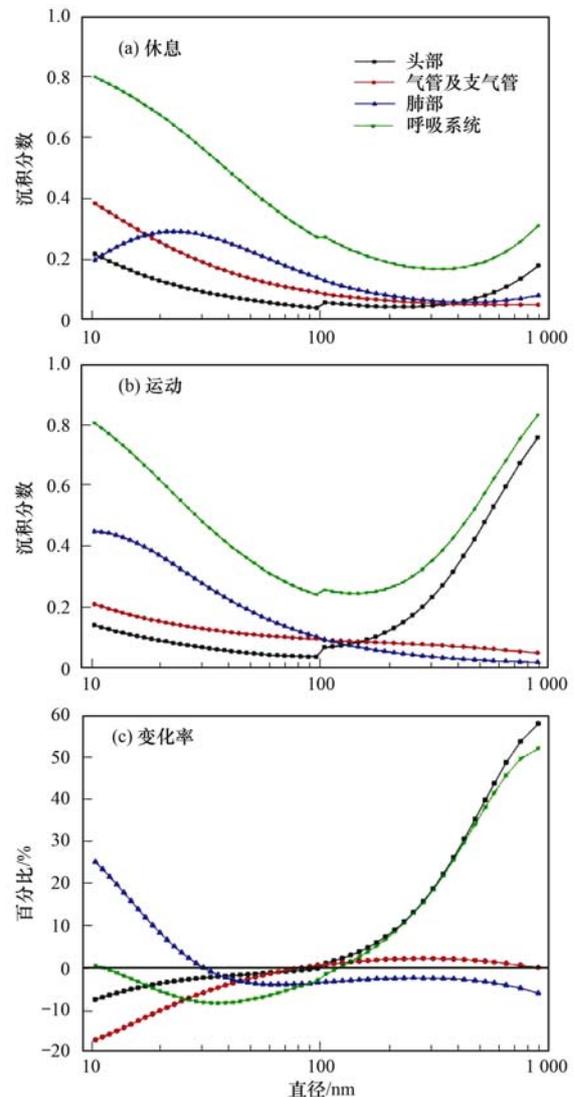


图3 人体在休息与运动状态下的颗粒物DF及变化率

Fig. 3 DF and change rate in human airway at rest and exercise

0.83,甚至超过了10 nm 处的TDF,远大于休息状态. 头部DF在10 nm 附近约为0.14,略低于休息时;在100 ~ 1 000 nm 范围内DF急剧增长,在1 000 nm 附近约为0.76. 气管支气管中DF分布型与休息时类似,

但斜率相对减小,最大值出现在 10nm 附近约为 0.21,较休息时减少 17.00%;1 000 nm 处约为 0.05,与休息时差异不大.肺部 DF 随粒径增大而降低,分布型与休息时不同,最大值约为 0.45 出现在 10 nm 附近,最小值约为 0.02 出现在1 000 nm 附近.

两种状态下核模态(10 ~ 25 nm)和爱根核模态(25 ~ 100 nm)TDF 非常近似,而运动时积聚模态 TDF 是休息时的 2.49 倍;肺部对核模态和爱根核模态 TDF 贡献最大,休息时约占 48.17%,运动时约占 54.23%,头部对积聚模态 TDF 贡献最大,休息时约占 41.23%,运动时约占 80.47%.

从运动状态较休息状态的 DF 变化率[图 3 (c)]来看,TDF 在 < 115 nm 粒径段为运动小于休息,在 115 nm ~ 1 000 nm 为运动大于休息.各部位中,肺部 DF 变化率始终随粒径增长而减小,在 30nm 附近由正转负;头部和气管支气管中 DF 变化率分别在 100 nm 和 80 nm 附近由负转正. 10 ~ 40 nm 范围内,各部位运动较休息 DF 变化率的大小关系为:肺部 > 头部 > 气管支气管,110 ~ 1 000 nm 范围内为:头部 > 气管支气管 > 肺部.可见,核模态粒子在休息时易沉积在头部和气管中,运动时更易沉积在肺部;爱根核在各部位均是休息状态沉积更多;

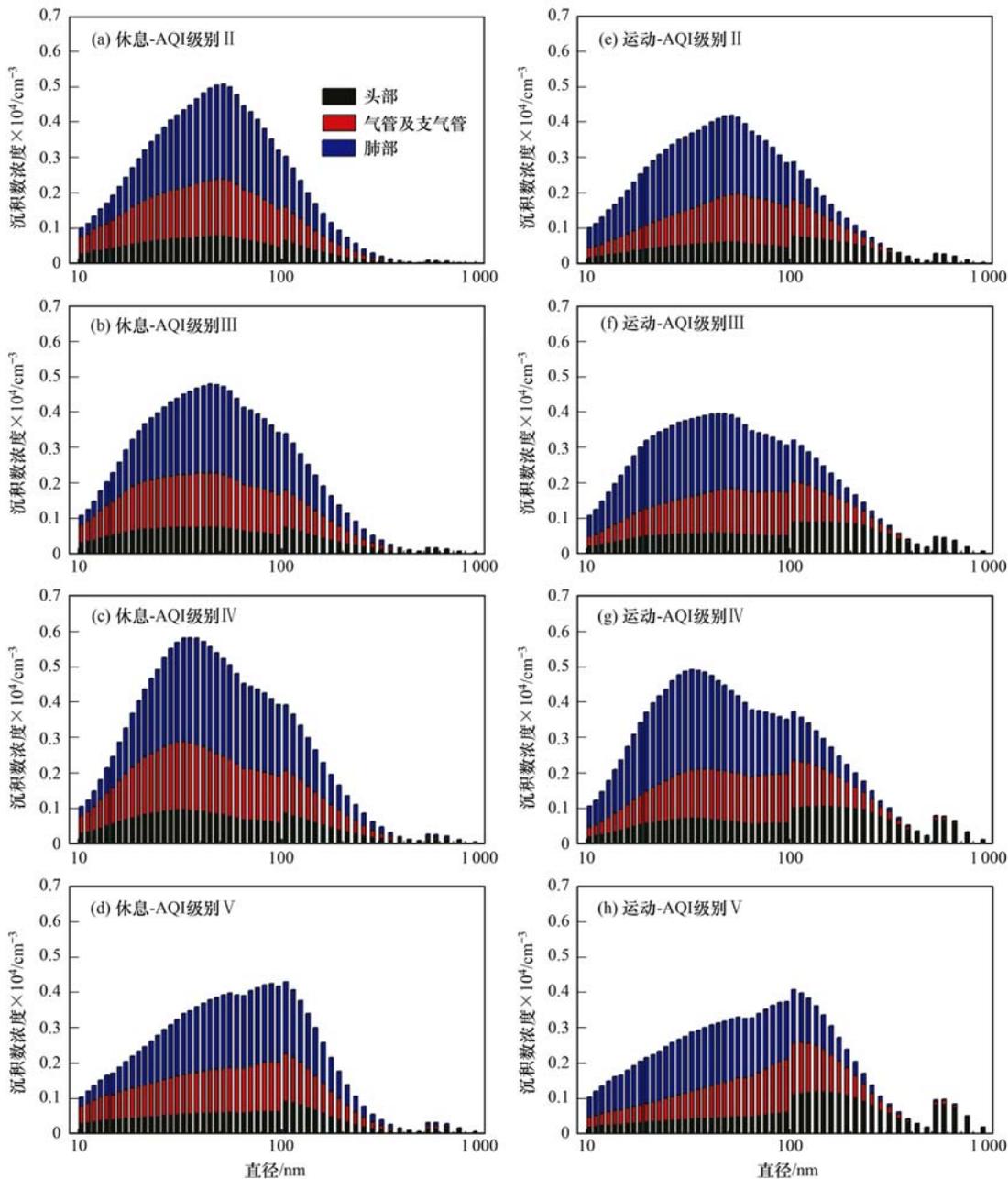


图 4 冬季人体内颗粒物沉积数浓度

Fig. 4 Particle NC deposition in human airway in winter

积聚模态在休息时易沉积在肺部,运动时多数沉积在头部.

### 2.3 不同空气质量下的沉积数浓度

图4和图5为南京北郊冬春两季在各AQI级别下的人体内细粒子沉积数浓度谱分布. 冬季(图4)总沉积数浓度均呈单峰分布. 从空气质量来看,二、三、四级的总沉积数浓度峰值和各部位沉积数浓度峰值均出现在爱根核模态,且峰位置随空气质量下降而轻微向小粒径移动;五级的总沉积数浓度峰值出现在积聚模态,其主要原因是头部积聚模态粒子

沉积增多,肺部和气管中的沉积数浓度较二至四级略有增长. 沉积数浓度大小与空气质量无明显关系,可见总空气质量较高时也可能影响人体健康. 从两种生理状态来看,休息状态下平均总沉积数浓度为  $13.53 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,各级别峰值分别为二级  $0.51 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、三级  $0.48 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、四级  $0.58 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、五级  $0.43 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ;运动状态下平均总沉积数浓度为  $12.79 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,各级别峰值分别为二级  $0.42 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、三级  $0.40 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、四级  $0.49 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、五级  $0.41 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ . 可以发现运动状态

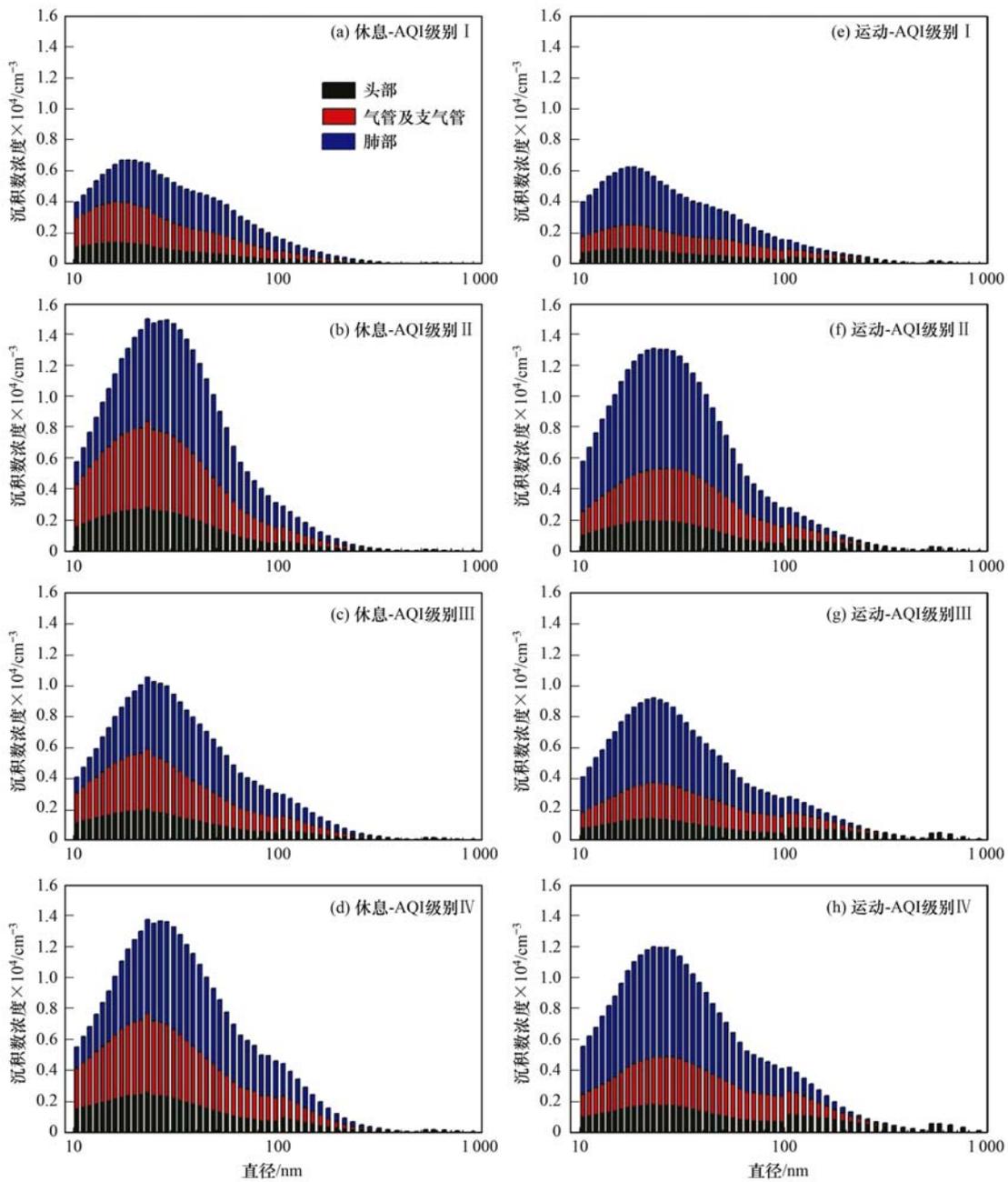


图5 春季人体内颗粒物沉积数浓度

Fig. 5 Particle NC deposition in human airway in spring

的总沉积数浓度及其峰值均略低于休息状态,核模态和爱根核模态在休息时沉积较高,积聚模态在运动时沉积较高,这一点在头部体现得更加显著。

春季(图 5)总沉积数浓度均呈单峰分布,且明显高于冬季。从空气质量来看,一级总沉积数浓度峰值和各部位沉积数浓度峰值均出现在核模态,且总量远小于其他几级;二至四级的峰值均在 20~35 nm 粒径段浮动。休息状态下平均总沉积数浓度为  $25.89 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , 约为冬季的 1.92 倍,各级别峰值分别为一级  $0.67 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、二级  $1.50 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、

三级  $1.05 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、四级  $1.37 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ;运动状态下平均总沉积数浓度为  $0.24 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , 约为冬季的 1.84 倍,各级别峰值分别为一级  $0.63 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、二级  $1.31 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、三级  $0.92 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、四级  $1.20 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。可见不同季节中,人体内沉积数浓度分布的差异很大程度取决于环境中粒子数浓度分布的差异,而两种生理状态下的差异基本不受季节影响。

### 2.4 各模态在不同部位的沉积数浓度

图 6 为各 AQI 级别下,休息和运动状态中,各

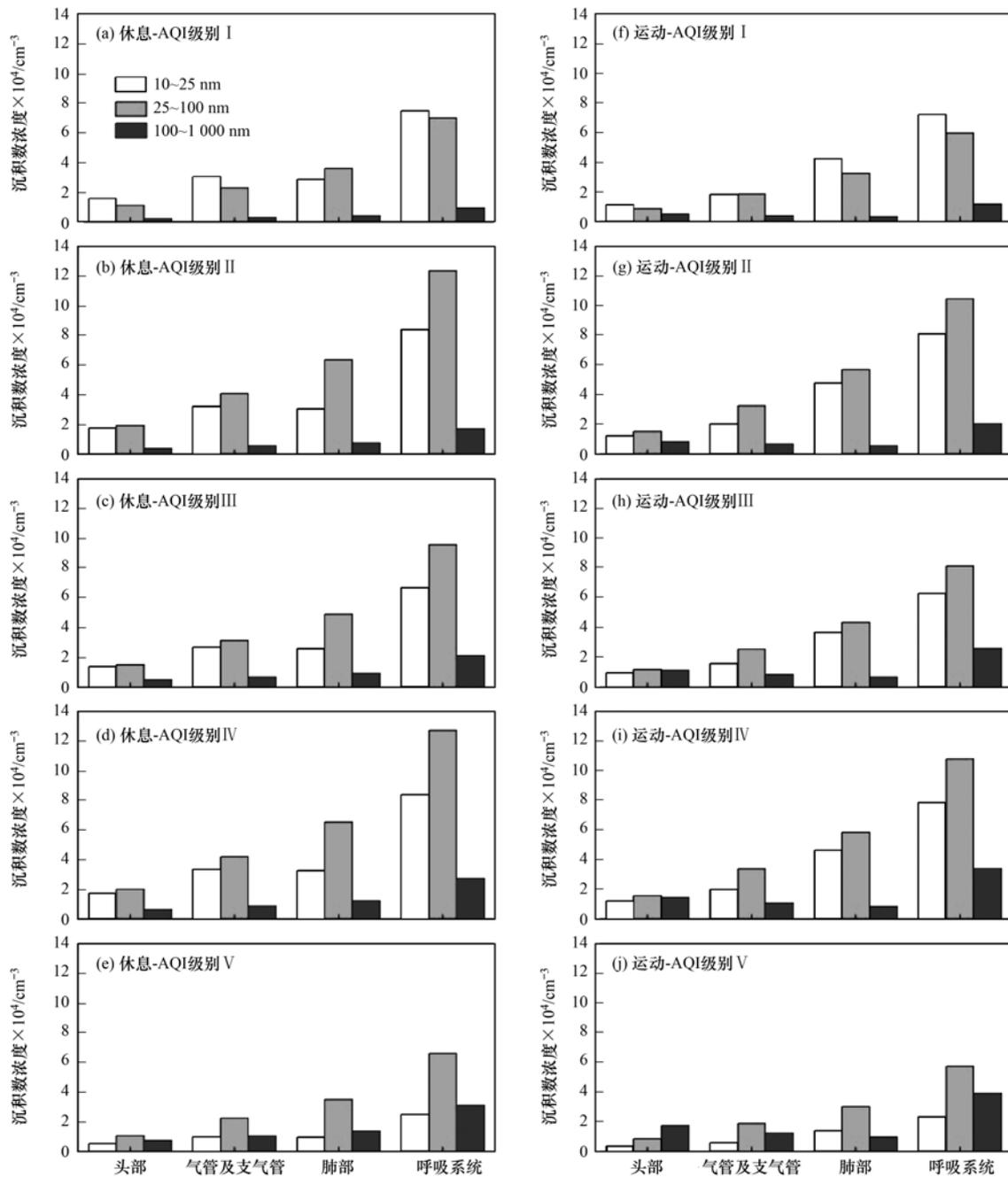


图 6 各模态在人体不同部位沉积数浓度

Fig. 6 Total NC of deposited particles in different modes in human airway

模态粒子在人体不同部位的沉积数浓度. 从不同空气质量来看,一级核模态沉积数浓度高于爱根核模态;二至四级爱根核模态高于核模态,且各模态总沉积数浓度均相对较高;五级总沉积数浓度明显较低. 积聚模态沉积数浓度随空气质量下降而增长,这一点在运动状态下体现得更为显著,原因在于污染空气中粗粒子数浓度高于洁净大气. 休息时各模态平均沉积数浓度分别为核模态  $6.76 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、爱根核模态  $9.66 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、积聚模态  $2.12 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ;运动时为核模态  $6.35 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、爱根核模态  $8.21 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、积聚模态  $2.63 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ .

各部位的总沉积数浓度大小关系为:肺部 > 气管支气管 > 头部,休息和运动状态下的沉积分布差异明显. 运动时核模态和爱根核模态在头部、气管支气管和呼吸系统中的总沉积数浓度均低于休息状态,积聚模态反之;肺部在运动时的核模态沉积为休息状态的 1.44 倍,而爱根核模态

和积聚模态均低于休息状态. 对于两种运动状态下的相对变化,各模态中总沉积数浓度变化程度最大的是积聚模态,其增长的主要贡献来源为头部,运动时为休息时的 2.26 倍,且大体趋势表现出空气质量越差,运动较休息增长越多的特点,因此污染较为严重时进行室外运动更易患上呼吸道疾病. 核模态和爱根核模态的沉积情况,以及积聚模态在气管和肺部的沉积情况,均保持在较稳定水平.

## 2.5 不同地区的人体沉降特性对比

目前常用的计算人体内颗粒物沉积情况的模式,除 MPPD 外还有国际辐射防护委员会开发的人体呼吸道模式 ICRP Model(1994),以及美国国家辐射防护委员会开发的 NCRP(1997)模式. 3 种模式均被广泛应用,计算结果也有较高的一致性<sup>[36]</sup>. 本研究选取了国内外研究中使用这 3 种计算模式的 5 个地区进行对比讨论,具体内容见表 1.

表 1 选取地区及研究内容介绍

Table 1 Introduction of selected regions and research contents

地区	时间	模式	主要结论
南京	2015-01,2015-04	MPPD v. 3.04	①TDF 最大值在休息时约为 0.80 位于 10 nm 附近,运动时约为 0.83 位于 1000 nm 附近;最小值在休息时约为 0.17 位于 310 ~ 380 nm,运动时约为 0.25 位于 120 ~ 145 nm. 肺部最大值在休息时约为 0.29 位于 20 ~ 25 nm,运动时约为 0.45 位于 10 nm 附近 ②冬季沉积数浓度( $13.53 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ )低于春季( $25.89 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ),冬季粒径 >100 nm 的颗粒物沉积量高于春季;各 AQI 级别的总沉积数浓度均呈单峰分布
日本 <sup>[34]</sup>	— <sup>1)</sup>	ICRP Model	日本成年男性在轻运动状态下,胸外区域粒子沉积效率的峰谷值相差超过 40.00%;气管支气管中沉积效率受粒径影响较弱,始终处在较低值;肺部沉积效率峰值约为 53.00% 位于 15 nm 附近;总沉积效率最低值约为 16.10% 位于 150 nm 附近
纽约 <sup>[36]</sup>	—	ICRP Model, NCRP, MPPD v. 1.0	运动状态下细粒子 DF 略高于休息
西班牙(水泥工厂) <sup>[37]</sup>	2014 年冬、夏季	MPPD v. 2.11	冬夏两季 DF 没有差异,DF 与环境颗粒物浓度无关
西班牙(北部城郊车站) <sup>[38]</sup>	2013-07 ~ 2014-07	ICRP Model	细粒子在肺泡区域沉积明显,粗粒子更易沉积在呼吸道外端,如胸外区域
北京 <sup>[25,39]</sup>	2011-12,2012-04	MPPD v. 2.11	①11 ~ 641 nm 粒子总沉积数浓度为,冬季重污染天 $2.89 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,洁净天 $2.56 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ;春季重污染天 $1.78 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,洁净天 $1.41 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ;冬季总沉积量高于春季,但粒径 <10 nm 与 >100 nm 的粒子沉积量低于春季;两种污染等级的沉积量差异不大 ②重污染天总沉积数浓度呈双峰分布,峰值位于 13 nm 和 40 ~ 100 nm;洁净天呈单峰分布,峰值位于 13 nm

1)“—”表示文中没有明确时间

在普适沉积规律方面,DF 与环境颗粒物浓度无关<sup>[37]</sup>;细粒子在肺泡区域沉积量较高,粗粒子更易沉积在呼吸道外端,如胸外区域(包括鼻腔、口腔、咽部、喉部)<sup>[38]</sup>;运动时的细粒子 DF 略高于休息时<sup>[36]</sup>.

在人体内 DF 方面,日本<sup>[34]</sup>成年男性在轻运动

状态下的 DF 与本实验结果非常相近,但肺部沉积效率峰值远大于南京地区休息和运动时的最大值,其位置也略有差异,可能是由于不同地区人群体质的不同或运动状态参数不同;总沉积效率最低值与本实验休息时接近但位置出现在较小粒径段. 研究发现,日本成年男性与白种人沉积型很相似,两者总

沉积效率在 1 500 nm 粒径处出现最大差值仅为 2.80%; 白种人肺部沉积效率峰值为 53.40%, 与日本仅差 0.40%; 虽然两者肺体积相差超过 20.00% 且呼吸频率不同, 但沉积效率差异非常小. 可以看出 DF 基本不受人种影响, 但是仍然受不同地域所造成的不同人群体质的影响.

在定量分析方面, 北京的研究结果表明<sup>[25,39]</sup>, 粒径 < 300 nm 的大气细粒子的沉积数浓度随粒径增长而减小, 并主要沉积至肺泡内, 而粒径 > 300 nm 时粒子在人体头部的沉积量逐渐增加至超过肺部; 肺部沉积数浓度最高, 约占总吸入颗粒物的一半, 且绝大部分为超细颗粒 (冬季 90.00%, 春季 86.00%), 这些都与南京相似. 但两地沉积数浓度分布型不同, 季节变化特征相反, 南京的人体各部位沉积数浓度均明显低于北京. 此外, 北京与洛杉矶同为受交通源影响显著的国际大都市, 北京交通干线附近人群体内沉积的粒子总数为洛杉矶的 1.50 倍, 北京人群体内不同部位的沉积量均明显高于洛杉矶. 沉积数浓度取决于该地区环境中的颗粒物数浓度, 其分布型也与环境中的颗粒物的分布情况密切相关. 3 个地区数值上的差异主要来源于气溶胶数谱分布的差异以及空气质量的的不同.

### 3 结论

(1) 核模态和爱根核模态在休息和运动状态下 DF 近似, 积聚模态在运动时 DF 是休息时的 2.49 倍. 肺部对核模态和爱根核模态的 DF 贡献最大 (休息时 48.17%, 运动时 54.23%), 头部对积聚模态 DF 贡献最大 (休息 41.23%, 运动 80.47%).

(2) 冬春两季的人体内细粒子沉积数浓度均呈单峰分布, 且冬季明显低于春季; 沉积数浓度峰值出现的位置与空气质量有关, 无污染时出现在核模态, 轻度至中度污染时出现在爱根核模态, 污染较严重时出现在积聚模态. 运动状态的总沉积数浓度和峰值均略低于休息状态, 核模态和爱根核模态在休息时沉积较高, 积聚模态在运动时沉积较高.

(3) 人体各部位的总沉积数浓度大小关系为: 肺部 > 气管支气管 > 头部. 与休息时相比, 运动时肺部核模态沉积增多, 气管及支气管和头部积聚模态沉积增多, 且头部表现出空气质量越差, 运动较休息增长越多的特点.

(4) 南京北郊人体内沉积数浓度的分布型与北京不同, 季节变化特征与北京相反, 各部位中沉积量均明显低于北京.

### 参考文献:

- [ 1 ] Brook R, Brook J R, Urech B, *et al.* Inhalation of fine particulate air pollution and ozone causes acute arterial vasoconstriction in healthy adults[J]. *Circulation*, 2002, **105**(13): 1534-1536.
- [ 2 ] Simkhovich B Z, Kleinman M T, Kloner R A. Air pollution and cardiovascular injury: epidemiology, toxicology, and mechanisms [J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2008, **52** (9): 719-726.
- [ 3 ] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *JAMA*, 2002, **287** (9): 1132-1141.
- [ 4 ] Delfino R J, Sioutas C, Malik S. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2005, **113**(8): 934-946.
- [ 5 ] Pope III C A, Burnett R T, Thurston G D, *et al.* Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease[J]. *Circulation*, 2004, **109**(1): 71-77.
- [ 6 ] Dominici F, Peng R D, Bell M L, *et al.* Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases[J]. *JAMA*, 2006, **295**(10): 1127-1134.
- [ 7 ] Brown D M, Wilson M R, MacNee W, *et al.* Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2001, **175** (3): 191-199.
- [ 8 ] International Agency for Research on Cancer. IARC: outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths[J]. *Air Quality & Climate Change*, 2013, **47**(4): 16.
- [ 9 ] Hamra G B, Guha N, Cohen A, *et al.* Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: a systematic review and meta-analysis [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, **122**(9): 906-911.
- [ 10 ] Chen R J, Kan H D, Chen B H, *et al.* Association of particulate air pollution with daily mortality: the china air pollution and health effects study [J]. *American Journal of Epidemiology*, 2012, **175**(11): 1173-1181.
- [ 11 ] Meng X, Ma Y J, Chen R J, *et al.* Size-fractionated particle number concentrations and daily mortality in a Chinese city[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, **121** (10): 1174-1178.
- [ 12 ] 周鑫. 颗粒物在人体呼吸系统中传输与沉积的数值模拟研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
Zhou X. Numerical investigation on the transport and deposition of particulate matter in human pulmonary airways [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [ 13 ] 欧翠云. 颗粒物在人体气管支气管模型中传输与沉积的数值模拟研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
Ou C Y. Numerical simulation of the particle transport and deposition in human tracheobronchial airways [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [ 14 ] Kan H D, London S J, Chen G H, *et al.* Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China[J]. *Environment International*, 2007, **33**(3): 376-384.
- [ 15 ] Valavanidis A, Fiotakis K, Vlachogianni T. Airborne particulate

- matter and human health; toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part C: Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*, 2008, **26**(4): 339-362.
- [16] Breinert S, Liu L Q, Cyrus J, *et al.* Sub-micrometer particulate air pollution and cardiovascular mortality in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(24): 5196-5204.
- [17] 吉贵祥, 徐诚, 顾爱华, 等. 南京市PM<sub>2.5</sub>污染特征及人群健康效应研究[A]. 见: 中国毒理学会. 中国毒理学会第七次全国毒理学大会暨第八届湖北科技论坛论文集[C]. 武汉: 中国毒理学会, 2015. 47-47.
- [18] 方叠. 中国主要城市空气污染对人群健康的影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.  
Fang D. Impact assessment of air pollution on the population health in major cities of China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [19] Gao J, Wang T, Zhou X H, *et al.* Measurement of aerosol number size distributions in the Yangtze River Delta in China; formation and growth of particles under polluted conditions[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(4): 829-836.
- [20] United States Environmental Protection Agency. Air monitoring methods-criteria pollutants [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/amt/criteria.html>, 2016-09-30.
- [21] 邵平, 安俊琳, 杨辉, 等. 南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4031-4043.  
Shao P, An J L, Yang H, *et al.* Variation characteristics of surface ozone and its precursors during summertime in Nanjing Northern Suburb[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4031-4043.
- [22] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].  
HJ 633-2012, Technical regulation on ambient Air Quality Index (on trial)[S].
- [23] ARA. Multiple-path particle dosimetry model (MPPD v 3.04) [EB/OL]. <https://www.ara.com/products/multiple-path-particle-dosimetry-model-mppd-v-304.html>, 2016.
- [24] Anjilvel S, Asgharian B. A multiple-path model of particle deposition in the rat lung [J]. *Fundamental and Applied Toxicology*, 1995, **28**(1): 41-50.
- [25] Li X Y, Yan C Q, Patterson R F, *et al.* Modeled deposition of fine particles in human airway in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 387-395.
- [26] Roy M, Becquemin M H, Bouchikhi A. Ventilation rates and lung volumes for lung modelling purposes in ethnic groups[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 1991, **38**(1-3): 49-55.
- [27] 杨海平. 关于《运动生理学》教材中氧债功能余气量的探讨[J]. *沈阳体育学院学报*, 1991, (3): 73-76.
- Yang H P. Discussion on the functional residual capacity in Exercise Physiology[J]. *Journal of Shenyang Sport University*, 1991, (3): 73-76.
- [28] 曹志发, 孟昭琴, 姚为俊. 新编运动生理学[M]. 北京: 人民体育出版社, 2004. 130.
- [29] Hu M, Peng J F, Sun K, *et al.* Estimation of size-resolved ambient particle density based on the measurement of aerosol number, mass, and chemical size distributions in the winter in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(18): 9941-9947.
- [30] Kim C S, Jaques P A. Analysis of total respiratory deposition of inhaled ultrafine particles in adult subjects at various breathing patterns[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2004, **38**(6): 525-540.
- [31] Bunchatheeravate P, Curtis J S. Deposition of non-spherical particles in bifurcating airways[J]. *Pharmaceutical Development and Technology*, 2014, **19**(8): 942-951.
- [32] Hussain M, Madl P, Khan A. Lung deposition predictions of airborne particles and the emergence of contemporary diseases Part I[J]. *TheHealth*, 2011, **2**(2): 51-59.
- [33] 尹景娟. 颗粒物在人体上呼吸道内运动沉降规律的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.  
Yin J J. Study on the characteristics of transporation and deposition of inhalational particles in respiratory tract [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [34] Yamada Y, Fukutsu K, Kurihara O, *et al.* Influences of biometrical parameters on aerosol deposition in the ICRP 66 Human Respiratory Tract Model: Japanese and Caucasians[J]. *Eurozoru Kenkyu*, 2007, **22**(3): 236-243.
- [35] Horemans B, Van Holsbeke C, Vos W, *et al.* Particle deposition in airways of chronic respiratory patients exposed to an urban aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(21): 12162-12169.
- [36] Chalupa D C, Morrow P E, Oberdörster G, *et al.* Ultrafine particle deposition in subjects with asthma[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, **112**(8): 879-882.
- [37] Sánchez-Soberón F, Mari M, Kumar V, *et al.* An approach to assess the Particulate Matter exposure for the population living around a cement plant; modelling indoor air and particle deposition in the respiratory tract[J]. *Environmental Research*, 2015, **143**(Part A): 10-18.
- [38] Megido L, Suárez-Peña B, Negral L, *et al.* Relationship between physico-chemical characteristics and potential toxicity of PM<sub>10</sub> [J]. *Chemosphere*, 2016, **162**: 73-79.
- [39] 郑玫, 李小滢, 闫才青, 等. 大气细颗粒物在人体不同部位沉降特性研究[A]. 见: 中国环境科学学会. 第19届中国环境科学与技术大会暨中国环境科学学会大气环境分会2012年学术年会论文集[C]. 青岛: 中国环境科学学会, 2012. 103.

## CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District .....	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing .....	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province .....	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhe, Shennongjia, China .....	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City .....	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing .....	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant .....	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma .....	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng .....	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou .....	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai .....	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle .....	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China .....	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method .....	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas .....	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill .....	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater .....	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark .....	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production .....	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells .....	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters .....	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus .....	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values .....	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water .....	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms .....	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network .....	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System .....	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process .....	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe <sup>(0)</sup> -activated Carbon and Its Influencing Factors .....	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies .....	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR .....	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe .....	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater .....	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 .....	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization .....	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge .....	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region .....	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin .....	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N <sub>2</sub> O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping .....	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N <sub>2</sub> O Emissions from Soils of Different Surface Conditions .....	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China .....	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China .....	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake .....	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil .....	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil .....	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar .....	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch .....	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar .....	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr Composite Photocatalyst .....	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)