

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响

柯馨姝¹, 盛立芳², 孔君¹, 郝泽彤¹, 屈文军²

(1. 中国海洋大学海洋气象学系, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋大气相互作用与气候实验室, 物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 为研究青岛地面大气颗粒物数浓度的变化及对能见度的影响, 2010 年 9 月 ~ 2011 年 8 月使用便携式 light house 激光粒子计数器进行了大气颗粒物数浓度观测, 利用 Hysplit 模式计算大气颗粒物的后向轨迹, 运用统计分析方法初步探讨了气象因子对大气颗粒物数浓度和能见度的影响。结果表明, 青岛大气颗粒物数浓度冬春最高, 秋季次之, 夏季最低; 源自新疆、甘肃一带的气团颗粒物数浓度偏高, 而来自于东北方向及海上的大气颗粒物数浓度较低; 大气颗粒物数浓度变化与风速、相对湿度和混合层高度的变化呈现较好的负相关关系。当气团来源于西或西北方向, 地面风向为南到东南风且混合层高度较低时, 细粒子数浓度较高, 容易出现低能见度现象。

关键词: 青岛; 大气颗粒物; 数浓度; 气象条件; 能见度

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2014)01-0015-07

Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility

KE Xin-shu¹, SHENG Li-fang², KONG Jun¹, HAO Ze-tong¹, QU Wen-jun²

(1. Department of Ocean Meteorology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Laboratory, Key Laboratory of Physical Oceanography of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Atmospheric particle number concentrations were measured from September 2010 to August 2011 with portable light house laser particle counter to study the variation of atmospheric particle concentrations and its impact on visibility in Qingdao. Backward trajectory was calculated by Hysplit model. Statistical analysis was done to discuss the influence of meteorological factors on the atmospheric particle number concentrations and visibility. It was shown that the atmospheric particle number concentrations were the highest in winter and spring, followed by autumn, and the lowest in summer. Air mass from Xinjiang and Gansu regions resulted in higher particle concentrations, while the atmospheric particles from the northeast and the ocean had lower concentrations. The variation of atmospheric particle number concentrations presented a good negative correlation with the variation of wind speed, relative humidity and mixed-layer height. When the air mass came from west or northwest, the surface wind direction was south or southeast and the mixed-layer height was low, the number concentration of fine particles was likely to be higher, which tended to cause low visibility phenomenon.

Key words: Qingdao; atmospheric particle; number concentrations; meteorological conditions; visibility

大气颗粒物是大气重要组成部分, 粒子数浓度是大气颗粒物污染的重要特征之一^[1]。由于大气颗粒物污染, 最近一段时间, 我国中东部地区持续雾霾天气, 给人们的生产和生活带来了巨大影响。为了定量研究大气颗粒物对空气质量的影响, 需要详细了解其微物理特征, 包括颗粒物的数密度、粒子谱分布等^[2]。研究表明大气颗粒物来源复杂, 受气象条件的影响很大, 具有很大的时空变化^[3~9]。我国大气颗粒物呈现大气复合型污染特征, 不同地区不同季节大气颗粒物主要来源和相对贡献存在差异^[10]。

国内学者在多个城市研究了颗粒物数浓度的粒径谱分布, 其与风速、相对湿度的关系^[11~14], 但是

许多研究的采样时间较短, 除北京、杭州外^[15~16], 季节变化研究比较少。另外关于颗粒物与气团来源、混合层高度的相关关系研究比较少。气象条件对大气气溶胶的影响是多种因素综合作用的结果, 但在一定条件下某些特定因素起主要作用^[17~27]。青岛是海滨城市, 内陆污染物输送和海洋排放以及局地污染都会对大气气溶胶浓度的变化产生影响, 以前针对青岛地区大气颗粒物的研究主要集中在海洋因子对大气颗粒物的贡献、气溶胶成分、沉降通

收稿日期: 2013-04-26; 修订日期: 2013-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41276009)

作者简介: 柯馨姝 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气气溶胶, E-mail: kexinshu2008@163.com

量,以及气象条件对气溶胶光学特性的影响等方面^[28~35],但是针对数浓度观测研究还不多. 本研究的目的是通过现场观测研究青岛地区大气颗粒物数浓度的变化特征并分析颗粒物来源和其对能见度的影响.

1 材料与方法

1.1 观测地点及时间

粒子浓度观测在中国海洋大学校园内的八关山(120°20.134'E,36°3.809'N)上进行,海拔高度大约为82.4 m. 观测点视野开阔,人为干扰因素少. 观测时间为2010年9月18日~2011年8月24日,约每周观测一次,每次观测时间固定在13:00~17:00左右. 雨雪天气时停止观测.

1.2 观测仪器及方法

用便携式 light house 激光粒子计数器 HANDHELD 5016 测量最小粒径为0.5 μm的气溶胶粒子数浓度以及温湿度. 计数器具有0.5、0.7、1.0、3.0、5.0、10.0 μm共6个粒子通道,流量为0.1 ft³·min⁻¹. 每30 s采样一次,每次的采样容积为0.05 ft³. 采样同时观测和记录天气现象.

青岛气象台距离观测站点约1 km,海拔高度相近. 从气象台获取观测时间内每1 h间隔的风、气温、气压、相对湿度、水汽压和每10 min自动观测的能见度等气象要素.

1.3 分析方法

利用 Hysplit 模式,计算大气颗粒物的后向轨迹,后推出大气颗粒物的源地. 利用观测当日14:00气温和08:00青岛站的探空资料,用干绝热法计算出14:00混合层高度. 运用统计分析方法,初步探讨大气颗粒物粒子数浓度变化与气象因子的关系.

2 结果与讨论

2.1 大气颗粒物数浓度变化特征

2.1.1 大气颗粒物数浓度分布

表1为粒子数浓度分布表. 颗粒物粒子数浓度随粒径呈指数减小,0.5~0.7 μm粒子数浓度量级达10⁰~10²个·cm⁻³,而10.0 μm以上粒子数浓度量级仅10⁻⁴~10⁻²个·cm⁻³. 从多日平均来看,各粒径粒子数浓度在下午一段时间内没有显著变化,说明气溶胶粒子在较短的时间内浓度是较稳定的,但不同的观测日间相差较大. 图1和图2给出了颗粒物数浓度随季节的变化和月变化,结合图1和图2可以看出,颗粒物粒子数浓度季节变化较明显,除了0.5~0.7 μm的小粒子秋季较高以外,其他粒径都是冬春较高;除了大于10 μm的大粒子夏季较高以外,其他粒径都是夏季最低;0.5~3.0 μm颗粒物数浓度11月最高,9月最低;3.0 μm以上颗粒物数浓度3月、12月较高,6、7、8月较低.

表1 粒子数浓度统计表

Table 1 Statistic of the particle concentrations

项目	0.5~0.7 μm	0.7~1.0 μm	1.0~3.0 μm	3.0~5.0 μm	5.0~10.0 μm	≥10.0 μm
平均值/个·cm ⁻³	3.54E+01	6.05E+00	2.92E+00	4.52E-01	5.41E-02	1.21E-03
最大值/个·cm ⁻³	1.97E+02	5.80E+01	3.34E+01	5.04E+00	4.97E-01	2.50E-02
最小值/个·cm ⁻³	1.01E+00	1.83E-01	1.15E-01	1.93E-02	0.00E+00	0.00E+00
中位值/个·cm ⁻³	3.17E+01	5.19E+00	2.51E+00	3.51E-01	3.93E-02	7.14E-04
标准差/个·cm ⁻³	2.93E+01	5.61E+00	3.05E+00	5.90E-01	6.23E-02	2.19E-03
百分比/%	78.88	13.48	6.50	1.01	0.12	0.00

与其他地区观测结果比较,春季各粒径粒子数浓度都低于广州地区^[39],夏季粒子数浓度低于济南^[36]、南京^[37]、兰州^[38],秋冬季0.5~1.0 μm颗粒物数浓度与上海地区^[39]相当,高于北京地区^[39];1.0~2.5 μm颗粒物数浓度较低. 可能是由于13:00以后海风发生频率较高^[40],有利于大气污染物浓度的降低;观测时段没有涵盖早晚高峰,也可能是造成颗粒物数浓度较低的原因之一.

冬春季节冷气压控制本地区,常有下沉逆温出现,大气层结较为稳定,水平扩散减弱,因此颗粒物数浓度较高;夏季受西太平洋副热带高压的影响,

大气水平扩散增强^[24],对大气颗粒数有稀释作用. 另外,冬季采暖、春季沙尘等因素也会对大气颗粒物浓度增加有显著影响. 观测期间3月19日、5月1日有沙尘,12月2日有雾. 沙尘一般为较粗粒径颗粒物,由外源输送而来,使颗粒物浓度增加;雾是水汽附着在凝结核上形成,颗粒粒径较大,因此使观测期间粗颗粒浓度明显偏高. 张仁健等^[32]研究了青岛大气气溶胶的质量浓度随季节的分布,发现青岛气溶胶质量浓度春季最高,冬秋季次之,夏季最低,这与本研究结果基本一致.

2.1.2 气团来源对颗粒物数浓度的影响

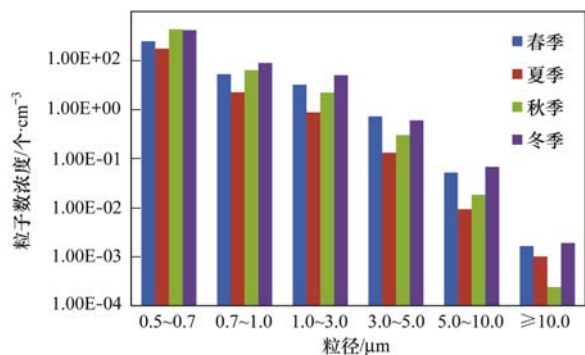


图1 颗粒物数浓度随季节的变化

Fig. 1 Seasonal variation of the particle number concentrations

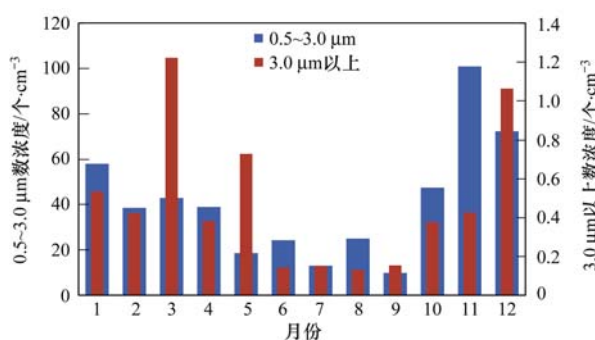


图2 颗粒物数浓度的月变化

Fig. 2 Monthly variation of the particle number concentrations

利用 Hysplit 模式对观测当天大气颗粒物进行 72 h 溯源分析(以观测中间时刻 15:00 开始往前溯源 72 h,起始高度为 500 m)。图 3 给出了观测期间颗粒物的后向轨迹,图 4 是各方向粒子平均值的统计结果,从北向开始顺时针各方向数据所占的比例分别为 6.98%、6.98%、16.28%、2.33%、4.65%、4.65%、20.93% 和 37.21%。结合图 3 和图 4 可以看出,从西向新疆、甘肃一带地区和西南方向长江中下游一带输送的颗粒物数浓度较高,西北方向大粒径粒子数浓度偏高;从东北方向及东南向海上输送的气团空气质量较好,大气颗粒物数浓度较低,其中东向大粒径粒子数浓度较低。

冬季颗粒物主要来源于西、西北方向的长距离输送(西、西北向气团来源占 75%,地面风向为偏北的占 66.7%),颗粒物数浓度较高,尤其是粗粒子数浓度较高;夏季气团主要来源于偏东方向(占 50%),颗粒物主要来源于海上及局地源的影响。夏季观测的 10 d 中,有 8 d 为有雾天气,相对湿度较高,混合层高度较低,大气较稳定,暖湿气流经过冷海面形成海雾,且青岛站多处于高压入海后的东南气流影响下,有利于海雾传输至观测点。为验证以

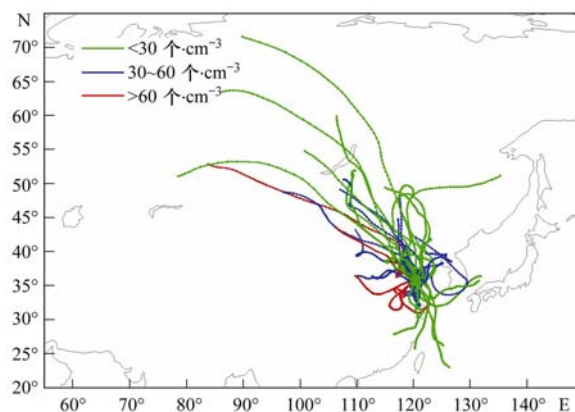


图3 观测期间气团轨迹

Fig. 3 Air mass trajectory during the observation period

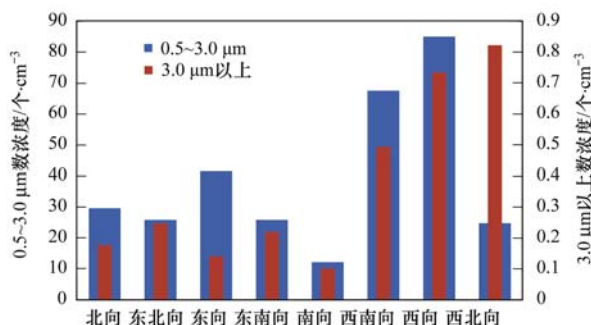


图4 各方向粒子数浓度平均值

Fig. 4 Mean value in every direction

上分析结果,选取了冬季 12 月 2 日和夏季 7 月 10 日的观测资料,利用 Hysplit 模式计算了当观测中间时刻(15:00)一个单位质量浓度的颗粒物扩散到青岛时前 3 h 0~50 m 近地层的颗粒物质量浓度(图 5)。从图 5 可以看出,12 月 2 日风向为西北风,污染物主要来自青岛西北方向,当天风向有利于颗粒物向青岛输送;而 7 月 10 日污染物主要集中在青岛东南沿海,在偏东风的作用下颗粒物向青岛输送。刘咸德等^[41]的研究表明,冬季土壤扬尘和燃煤飞灰,硫酸盐二次颗粒物为大气颗粒物的主要来源,因此粗粒子数浓度较高;而在夏季,海盐颗粒的浓度水平是冬季的 4 倍,说明颗粒物主要来自于海上。这与本研究的分析结果吻合。

2.2 气象因子对大气颗粒物数浓度的影响

2.2.1 风和相对湿度对大气颗粒物数浓度的影响

分析表明,大气颗粒物粒子数浓度变化与风速以及相对湿度的变化基本上呈现负相关关系,其中风速与较小粒径(0.5~3.0 μm)粒子数浓度负相关比较明显;大气颗粒物数浓度与气温、气压的相关关系不是很明显(图略)。

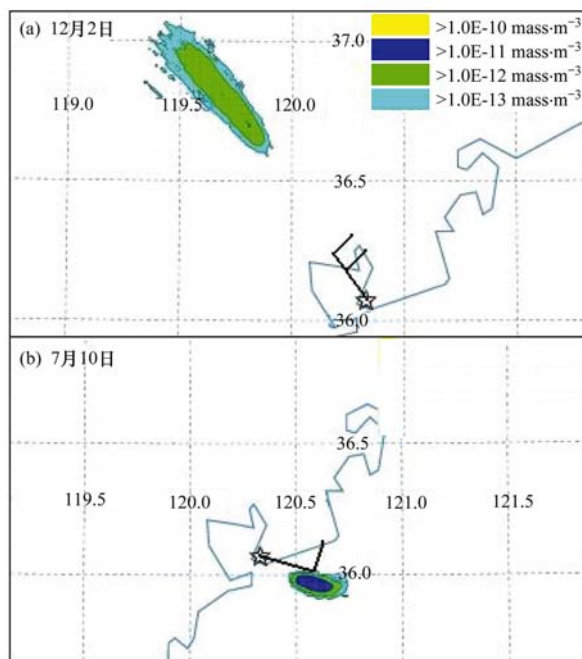


图5 观测前3小时扩散到青岛站的颗粒物质量浓度与青岛站观测期间的平均风速风向

Fig. 5 Particle mass concentrations 3 hours before observation and the average wind speed and direction at Qingdao station

将风速按照蒲福风力分级,与对应时刻各粒径段的粒子数浓度观测结果比较得到图6;将相对湿度按20%以下、20%~30%、30%~40%、40%~50%、50%~60%、60%~70%、70%~80%和80%以上分为8个等级,与对应时刻各粒径段的粒子数浓度观测结果比较得到图7。结合图6和图7可以看出,对于较小粒径粒子($0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$),当风速较低(1~3级),相对湿度在40%~60%时,颗粒物数浓度最大;当风速在5级以上时, $0.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 粒子数浓度较高;当相对湿度在30%以下和40%~60%时, $0.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 粒子数浓度较高;风速和相对湿度对较大粒径粒子($3.0 \mu\text{m}$ 以上)数浓度影响不大。

根据报道,当风速小于 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,扩散作用占主导^[33],一般情况下随着风速的增大,单位时间内从污染源排放出来的污染物很快地扩散,这时混入的大气量越多,气溶胶浓度越小,因此在其他条件不变的情况下,气溶胶浓度与风速成反比^[22];相对湿度 $<60\%$ 时,水汽不是影响颗粒物浓度变化特征的第一要素,但相对湿度会促进超细颗粒物的聚积,使之生成较大粒径颗粒物^[13];而对于更大粒径的大气颗粒物,由于聚积的作用会使其增大,质量增加,引起沉降,从而大气中的颗粒物数浓度降低。风

速与相对湿度的结论与林俊等^[13]关于较粗粒径($0.2 \sim 2.4 \mu\text{m}$)颗粒物的研究结论基本一致,但其并未对更大粒径(大于 $2.4 \mu\text{m}$)颗粒物数浓度与气象因子的关系做讨论,这可能是不同地区大气颗粒物性质的差异和采样条件的限制所致。

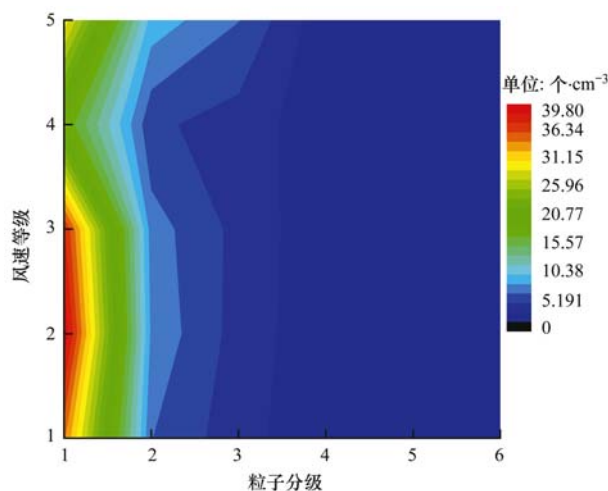


图6 不同风速下大气颗粒物数浓度

Fig. 6 Atmospheric particle number concentrations under different wind speed

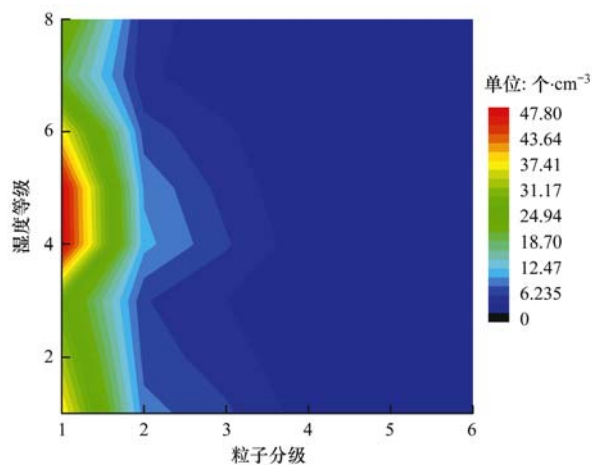


图7 不同相对湿度下大气颗粒物数浓度

Fig. 7 Atmospheric particle concentrations under different relative humidity

2.2.2 稳定度对大气颗粒物数浓度的影响

为研究稳定度对大气颗粒物数浓度的影响,利用观测当日14:00地面温度和08:00青岛站的探空资料,用干绝热法计算出午后混合层高度,此混合层高度即为14:00混合层高度,一般为当日最大混合层高度,可以代表由于湍流混合作用而使污染物在铅直方向能充分稀释、扩散的最大范围。图8绘出了大气颗粒物数浓度和混合层高度的变化,从中可以看出大气颗粒物数浓度基本上和混合层高度之间

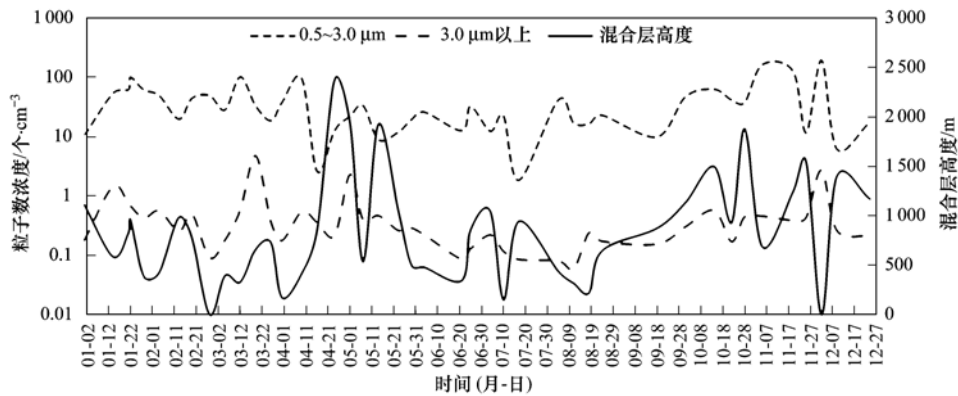


图8 大气颗粒物数浓度和混合层高度的变化

Fig. 8 Variation of atmospheric particle concentrations and mixed-layer height

呈负相关关系,其中 $0.5\sim3.0\text{ }\mu\text{m}$ 粒子数浓度与混合层高度之间的简单相关系数达到 -0.27 . 颗粒物数浓度较大的12月2日和2月27日,地面都存在明显的贴地逆温,温度露点温度差较大,大气处于极稳定的状态. 这与王开燕等^[23]对番禺地区秋季气溶胶浓度与气象条件的关系研究一致. 混合层高度越低,大气越稳定,使颗粒物在混合层内堆积,浓度升高.

2.2.3 大气颗粒物数浓度与气象因子相关分析

为定量讨论风、温度、压强、相对湿度等气象要素对大气颗粒物粒子数浓度的影响,经过计算,得到了大气颗粒物粒子数浓度与各气象要素的偏相关系数(表2). 选择风速、气温、相对湿度、气压、水

汽压作为可能的因子,利用逐步回归,建立各粒径粒子数浓度与气象因子的回归方程. 回归系数列于表3.

结合表2和表3可以看出,风速和相对湿度与大气颗粒物的粒子数浓度基本上呈负相关,而气温与气压对大气颗粒物数浓度的相关性不太明显. 这与定性分析的结论基本一致.

温度主要对大气垂直对流产生影响. 温度较高时,大气垂直对流作用加剧,有利于大气扩散,因而一般与气溶胶浓度呈负相关^[13]. 温度和各粒径粒子数浓度相关性不太明显,可能是测量时大多是晴好天气,垂直对流较弱,从而大气扩散也较弱造成的.

表2 偏相关系数计算¹⁾

Table 2 Partial correlation coefficient

项目	0.5~0.7 μm	0.7~1.0 μm	1.0~3.0 μm	3.0~5.0 μm	5.0~10.0 μm	10.0 μm 以上
风速	-0.213 68	—	—	—	-0.216 19	-0.113 44
气温	-0.192 76	-0.179 35	-0.145 48	—	-0.298 41	—
相对湿度	—	—	-0.189 94	-0.339 26	-0.473 78	-0.286 55
气压	0.182 92	0.152 86	—	—	0.245 87	—
水汽压	-0.172 13	-0.211 74	-0.243 14	-0.227 76	-0.395 71	-0.140 82

1)表中“—”表示没有通过显著性水平为0.05的检验

表3 回归系数计算¹⁾

Table 3 Regression coefficient

项目	0.5~0.7 μm	0.7~1.0 μm	1.0~3.0 μm	3.0~5.0 μm	5.0~10.0 μm	10.0 μm 以上
风速	-16 038.0	0	0	0	-11.806 8	0
气温	2 893.96	0	0	0	-5.281 29	-0.190 95
相对湿度	2 066.87	0	0	0	-2.083 68	-0.048 4
气压	-4 901.53	-1 486.29	-874.058	-94.268 6	-4.336 71	-0.335 10
水汽压	-11 879.4	-1 204.95	-764.315	-93.445 9	0	0

1)表中0表示没有引入,回归方程效果均显著,显著性水平为0.05

2.3 颗粒物数浓度对能见度的影响

计算了各粒径粒子数浓度与能见度的简单相关

系数分别为 $-0.705\ 0$ 、 $-0.657\ 1$ 、 $-0.376\ 7$ 、 $-0.137\ 1$ 、 $-0.139\ 5$ 、 $0.113\ 7$,均通过了显著性水

平为 0.05 的检验,可以看出粒子数浓度与能见度呈现较好的负相关关系,其中 $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 、 $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 粒径段粒子数浓度与能见度的负相关关系最为明显. 图 9 是不同粒径粒子数浓度与能见度的散点图,并对其做了线性和乘幂的拟合. 从中可以看出细粒子数浓度与能见度有较好的负相关关系.

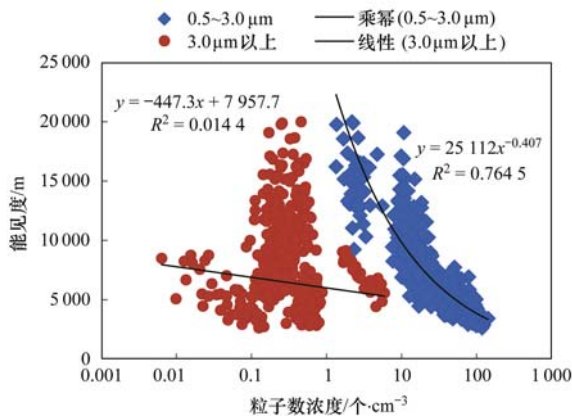


图 9 粒子数浓度与能见度散点图

Fig. 9 Scatter plot of particulate number concentrations and visibility

图 10 显示了低于 6 000 m 能见度下气团来源与地面风向各方向日数. 总体来看,低能见度下粒子数浓度较高,气团主要来源于西向和西北向(总共占 50%),地面风向为南到东南风(75%),地面风速较低,混合层高度较低. 由此可见,粒子数浓度是影响能见度的重要因子,当细粒子数浓度较高时,在西到西北向气团来源,较低风速和混合层高度条件下,容易出现低能见度现象.

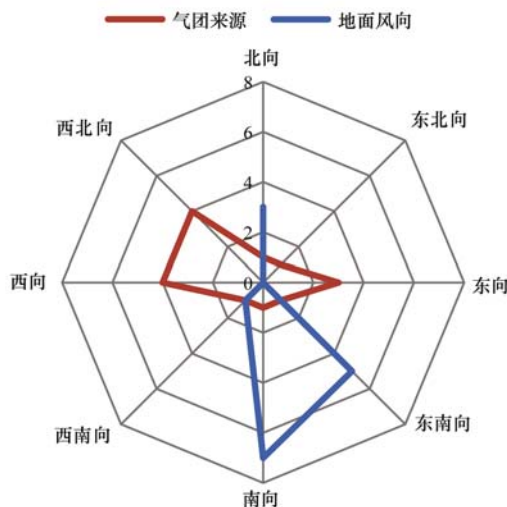


图 10 低于 6 000 m 低能见度下气团来源与地面风向玫瑰图

Fig. 10 Rose diagram of air mass source and surface wind direction when the low visibility was below 6 000 m

3 结论

(1) 青岛大气颗粒物浓度季节变化比较明显,冬春最高,秋季次之,夏季最低.

(2) 气团来源对大气颗粒物浓度有重要影响. 气团源自新疆、甘肃及长江中下游一带的颗粒物数浓度较高,而来自于东北方向及海上的大气颗粒物数浓度较低.

(3) 大气颗粒物粒子数浓度变化与风速、相对湿度以及混合层高度的变化有较好的负相关关系,而与气温、气压的相关关系不是很明显.

(4) 在西到西北向气团来源,较低风速和混合层高度条件下,细粒子数浓度较高,容易出现低能见度现象.

参考文献:

- [1] 杨柳, 吴烨, 宋少洁, 等. 不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 694-700.
- [2] 黄红莲, 黄印博, 饶瑞中. 合肥地区气溶胶数浓度和谱分布特征的观测研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S3): 390-395.
- [3] 银燕, 崔振雷, 张华, 等. 2006 年中国地区大气气溶胶浓度分布特征的模拟研究[J]. 大气科学学报, 2009, 32(5): 595-603.
- [4] 刘毅, 周明煜. 中国近海大气气溶胶的时间和地理分布特征[J]. 海洋学报, 1999, 21(1): 32-40.
- [5] 何炳文, 胡振菊, 张东之, 等. 2006 年 9~10 月常德市太阳山大气中 PM_{10} 气溶胶变化特征[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(5): 2107-2108, 2125.
- [6] 潘小乐, 王自发, 王喜全, 等. 2008 北京奥运会前后城区黑碳气溶胶浓度的变化特征[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(5): 616-623.
- [7] 周家茂, 曹军骥, 张仁健. 北京大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 及其碳组分季节变化特征与来源[J]. 过程工程学报, 2009, 9(2): 248-252.
- [8] 谭建成, 林国杨, 陈政豪, 等. 利用激光雷达测量都市上空气溶胶的浓度分布[J]. 光散射学报, 2008, 20(4): 375-378.
- [9] Ji J H, Bae G N, Hwang J. Characteristics of aerosol charge neutralizers for highly charged particles[J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(11): 1347-1358.
- [10] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. 环境与可持续发展, 2011, 36(5): 15-19.
- [11] 孙俊玲, 刘大锰, 扬雪. 北京市海淀区大气颗粒物污染水平及其影响因素[J]. 资源与产业, 2009, 11(1): 96-100.
- [12] 张涛, 陶俊, 王伯光, 等. 2008 年 1 月广州颗粒物数浓度污染特征[J]. 中国环境监测, 2009, 25(2): 31-34.
- [13] 林俊, 刘卫, 李燕, 等. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(1): 1-5.

- [14] 徐鹏伟, 徐乔根, 蔡菊珍. 杭州城市可吸入颗粒物污染与气象条件关系的分级评价和 BP 神经网络评估[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(6): 92-95.
- [15] 姜忠, 石广玉, 陈焕森. 北京市 1998~2001 年大气气溶胶粒子数浓度分析[J]. 气候与环境研究, 2003, **8**(4): 495-502.
- [16] 谢小芳, 孙在, 付志民, 等. 杭州市大气超细颗粒数浓度谱季节性特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 434-440.
- [17] 梁延刚, 胡文志, 杨敬基. 香港能见度、大气悬浮粒子浓度与气象条件的关系[J]. 气象学报, 2008, **66**(3): 261-269.
- [18] 姚青, 孙玫玲, 张长春, 等. 潮州沿海大气气溶胶无机离子浓度分布与气象要素的相关分析[J]. 气象与环境学报, 2007, **23**(4): 39-42.
- [19] 王开燕, 王雪梅, 唐建辉, 等. 番禺秋季气溶胶浓度的变化与气象条件的关系[J]. 广东气象, 2008, **30**(6): 9-12.
- [20] 冯建军, 沈家芬, 梁任重, 等. 广州市 PM₁₀ 与气象要素的关系分析[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(1): 78-82.
- [21] 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2154-2163.
- [22] 申占营, 陆斌, 陈海波, 等. 降水过程中气象条件对郑州市区气溶胶浓度的影响[J]. 气象与环境科学, 2009, **32**(3): 55-58.
- [23] 王开燕, 王雪梅, 张仁健. 气象条件对北京北郊冬季气溶胶污染的影响[J]. 过程工程学报, 2006, **6**(2): 70-74.
- [24] 金维明. 主要气象因素对可吸入颗粒物浓度影响规律探讨[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(4): 71-75.
- [25] Wróbel A, Rokita E, Maenhaut W. The influence of meteorological parameters on short range transport of aerosols[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1999, **150**(1-4): 403-408.
- [26] Stulov E A, Plaude N O, Monakhova I A. Weather effects on the aerosol characteristics in the surface layer of the atmosphere[J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2010, **35**(2): 94-100.
- [27] Hussein T, Karppinen A, Kukkonen J, et al. Meteorological dependence of size-fractionated number concentrations of urban aerosol particles[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(8): 1427-1440.
- [28] Manton M J, Ayers G P. On the number concentration of aerosols in towns[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1982, **22**(2): 171-181.
- [29] 徐新华, 姚荣奎, 李金龙. 青岛地区大气气溶胶海洋因子贡献研究[J]. 海洋环境科学, 1997, **16**(2): 55-59.
- [30] 陈静静, 盛立芳, 郑元鑫. 2006 年春季青岛气溶胶光学厚度与气溶胶指数、能见度的关系分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, **40**(1): 10-16.
- [31] 邱明燕, 盛立芳, 房岩松, 等. 气象条件对青岛地区气溶胶光学特性的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, **34**(6): 925-930.
- [32] 张仁健, 浦一芬, 徐永福, 等. 青岛大气气溶胶的浓度分布和干沉降的观测研究[J]. 气候与环境研究, 2004, **9**(2): 390-395.
- [33] 盛立芳, 耿敏, 王园香, 等. 2002 年春季沙尘暴对青岛大气气溶胶的影响[J]. 环境科学研究, 2003, **16**(5): 11-13.
- [34] Smirnov A, Villevalde Y, O'Neill N T, et al. Aerosol optical depth over the oceans: Analysis in terms of synoptic air mass types [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, **100**(D8): 16639-16650.
- [35] 邱明燕. 青岛地区气溶胶特性的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. 12-35.
- [36] 高健, 王进, 程淑会, 等. 济南夏季大气颗粒物粒径分布特征及来源机理分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, **24**(5): 680-687.
- [37] 王红磊, 朱彬, 沈利娟, 等. 南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 701-710.
- [38] 赵素平, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 687-693.
- [39] 张涛, 陶俊, 王伯光, 等. 广州市春季大气颗粒物的粒径分布及能见度研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, **27**(3): 331-337.
- [40] 吴增茂, 龙宝森. 青岛局地风特征的分析[J]. 海洋湖沼通报, 1993, **1**(1): 16-22.
- [41] 刘咸德, 封跃鹏, 贾红, 等. 青岛市大气颗粒物来源的定量解析——化学质量平衡方法[J]. 环境科学研究, 1998, **11**(5): 51-54.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行