

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 ..... 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 ..... 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 ..... 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 ..... 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 ..... 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 ..... 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 ..... 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 ..... 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 ..... 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 ..... 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 ..... 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 ..... 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应 ..... 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 ..... 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 ..... 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析 ..... 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 ..... 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 ..... 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 ..... 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 ..... 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 ..... 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 ..... 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 ..... 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 ..... 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 ..... 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 ..... 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 ..... 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中 PM<sub>2.5</sub> 的特征分析 ..... 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 ..... 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> 低温催化还原 NO 性能研究 ..... 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的 CO<sub>2</sub> 吸收和再生特性 ..... 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 ..... 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 ..... 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 ..... 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 ..... 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 ..... 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 ..... 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 ..... 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施 CO<sub>2</sub> 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 ..... 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 ..... 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系 ..... 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫄,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 ..... 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 ..... 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 ..... 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell 生物传感器在 Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 冲击活性污泥系统分析中的应用 ..... 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 ..... 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 ..... 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 ..... 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 ..... 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究 ..... 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 ..... 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 ..... 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

# 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析

李小飞, 张明军\*, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:** 以 2001~2010 年我国 42 个城市逐日空气污染指数、主要污染因子、空气质量级别和空气质量状况资料为基础, 分析了近 10 a 我国空气质量的变化特征. 结果表明, 我国城市大气受燃煤影响较为严重, 可吸入颗粒物为主要污染因子, 空气质量状况以优、良和轻微污染居多; 空气质量季节变化明显, 冬季空气污染最严重, 夏季最轻; 从年际变化看, 空气质量表现出逐年好转趋势; 城市大气环境质量在区域上存在显著差异, 表现为由南到北、从沿海到内陆逐渐变差的趋势. 对空气污染影响因素的分析表明, 局地污染和西北地区沙尘传输造成的自然降尘是我国城市空气质量的主要污染源; 气象要素对大气污染物有制约关系, 空气污染指数与降水量、风速、逆温线性相关; 地形的空间差异影响着气象条件的分布, 进而对空气质量的空间变化产生影响; 人类活动对城市空气质量也存在一定的影响, 且具有双重作用.

**关键词:** 空气污染指数; 变化特征; 影响因素; 城市; 中国

**中图分类号:** X131.1; X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)06-1936-08

## Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China

LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, ZHAO Ai-fang, MA Qian

(College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Based on the daily air pollution index (API), primary pollutant, air quality level and status of 42 cities in China during 2001-2010, the characteristics of air quality were analyzed. The results showed that the atmosphere was significantly influenced by consumption of coal. The primary pollutant was  $PM_{10}$ , and the air quality status was excellent ( $0 < API < 50$ ), good ( $50 < API < 100$ ) and slightly polluted ( $100 < API < 150$ ) in the majority. The air pollution status varied seasonally, which was the most serious in winter, and slightest in summer. The air quality was better and better in the observed period generally; The spatial distribution of urban air environment displayed a worsening trend from the south to the north and from the coasts to the inland; The local emission and natural dust transmission from the Northwest China was the main sources of urban air pollution; The air pollutants were impacted by the meteorological elements, and the air pollution index correlated linearly with precipitation, wind speed and temperature inversion; The distribution of weather conditions, which was affected by the terrain, also could influence the air quality; In addition, the human activities had both positive and negative functions on the urban air quality.

**Key words:** air pollution index (API); variation characteristics; influencing factor; city; China

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高, 城市环境空气质量也越来越成为人们普遍关注的热点话题, 因而对城市大气环境质量做出客观、全面、实时的认识和评价是极其必要的. 大气环境质量评价是对大气环境状况优劣的定性和定量的评述<sup>[1]</sup>, 其将监测点的监测数据与国家规定的大气质量标准等级相比较, 进行综合评价, 不仅有利于人们认识和研究大气环境质量, 还为有效治理和控制大气污染提供必要的科学依据.

空气污染指数 (air pollution index, API) 是反映大气环境质量水平的重要指标<sup>[2]</sup>. 根据环境空气质量标准和各项污染物对人体健康和生态环境的影响, 将常规监测的几种空气污染物浓度简化成为单一的概念性指数值形式, 它将空气污染程度和空气质量状况分级表征, 适合于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势.

研究 API 指数时空分布特征对城市环境空气质

量分析与预报均具有宏观指导意义. 然而 API 指数时空分布一方面受局地和长距离输送污染源的共同影响, 另一方面气象场形势在一定程度上亦决定着污染扩散和污染水平. 因此, 多要素共同作用决定了 API 指数时空分布的复杂性<sup>[2]</sup>; 国外对此研究不多, 主要集中在对模型预测空气污染指数的研究以及计算方法的改进<sup>[3-5]</sup>. 在国内对空气污染指数的研究大多数局限于少数区域<sup>[5-7]</sup>、单一或少数几个城市<sup>[8-12]</sup>的空气污染指数 (分指数) 或主要污染物的分析, 仅仅得到的是特定地区和特定条件下空气污染指数的分布特征, 对大尺度区域, 特别是全国性空气污染的时空分布特征研究较少. 基于此, 本研究

收稿日期: 2011-08-05; 修订日期: 2011-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41161012); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-10-0019); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB951003)

作者简介: 李小飞 (1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: geoli2010@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: mjzhang2004@163.com

以全国 42 个主要城市 2001 ~ 2010 年的日空气质量数据对我国 API 的时空分布进行了分析,在较长时间和较大空间尺度上研究我国各站点城市 API 的季变化、年变化和空间变化及分布特性,并对其时空分布特征的驱动机制做了探讨;利用 API 研究城市较长时期空气质量状况和变化趋势,对于进一步揭示我国城市大气污染问题、制定合理科学的城市空气质量保护提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 空气质量分级标准

我国目前采用的空气污染指数 API 分为 5 个等级(I、II、III、IV、V),7 个档<sup>[13]</sup>,范围为 0 ~ 500。其中,50、100、200 分别对应我国空气质量标准中的日均值一、二、三类标准的污染物浓度限值,500 对应于人体健康产生明显危害的污染水平,分别与 API 值(0 ~ 50、51 ~ 100、101 ~ 200、201 ~ 300、301 ~ 500)相对应。指数越大,级别越高,说明污染越严重,对人体健康的危害也越明显。

### 1.2 数据来源

本研究所用空气污染指数资料取自中华人民共和国环境保护部网站重点城市空气质量日报数据(<http://datacenter.mep.gov.cn/>),选取 2000 年 12 月 ~ 2010 年 12 月记录完整的 42 个城市。日报资料主要包括逐日空气污染指数、主要污染因子、空气质量级别和空气质量状况。

## 2 结果与分析

### 2.1 季节变化特征

特定的季节、不同的天气气候条件会使得城市空气质量发生较大的变化;局地因素,即各个城市的气象条件、地貌状况、植被分布以及当地人们的活动状况是形成这种季节变化的关键因素<sup>[7]</sup>。全国 42 个城市 2000 年 12 月 ~ 2010 年 12 月 API 的季节变化均值显示(图 1),我国城市空气污染指数以夏季作为转折点,冬季至夏季 API 大幅度降低,夏季之后 API 趋于升高;也即冬季空气质量最差,春季大气污染指数次于冬季,夏秋两季相对较好,总体上空气污染指数 < 100 处于 I 或 II 级;污染指数季节顺序为冬季(88) > 春季(79) > 秋季(73) > 夏季(63)。

由图 2 可见,我国城市主要污染因子季节变化特征。依据我国环境污染的特点和污染防治重点,目前计入空气污染指数的项目为:二氧化硫、氮氧化物(二氧化氮)和总悬浮颗粒物(PM<sub>10</sub>),其中可吸入颗

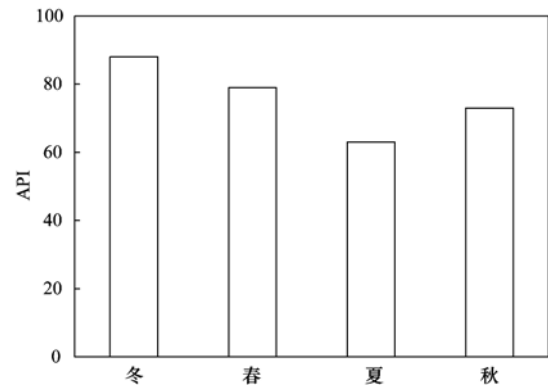


图 1 API 季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of air pollution index

颗粒物污染分指数的贡献率为 73.04%,其余 6.11% 来自二氧化硫和二氧化氮的贡献;各季节主要污染因子出现天数均表现为:可吸入颗粒物 > 无污染 > 二氧化硫 > 二氧化氮;可吸入颗粒物 10 a 的季度平均值排列顺序为:春 > 秋 > 冬 > 夏,无污染是夏 > 秋 > 春 > 冬,二氧化硫是冬 > 春 > 秋 > 夏,二氧化氮冬 > 秋 > 春 > 夏;污染因子二氧化硫、二氧化氮在四季中出现天数均较少,尤其夏季天数最少;无污染及可吸入颗粒物则相反,夏季出现天数较多。可吸入颗粒物可以被直接吸入呼吸道内造成危害,其主要的人为源是工农业生产和人类活动;大气中的二氧化硫则主要来源于含硫燃料(特别是煤)的燃烧,其余则来自于冶金、硫酸制造等工业过程;二氧化氮是大气中主要的含氮污染物,其人为源主要是燃料的燃烧,在城市则主要表现为汽车尾气的排放。

对各个城市空气质量状况季节分布特征统计(图 3),我国城市空气质量状况的季节变化总体上表现出,优或良在总天数中所占比例较大,其次为轻微污染和轻度污染,中度污染、中度重污染和重度污染所占比重最小;夏、秋季 I 和 II 级天数占总天数的 45.66%,冬、春季 IV1、IV2 和 V 级污染天数分别为 390、287 和 673 d;空气质量状况 10 a 的季度平均值排列顺序表现为:优是夏 > 秋 > 春 > 冬,良是秋 > 春 > 夏 > 冬,轻微污染、轻度污染、中度污染和重度污染的规律相同,均为冬 > 春 > 秋 > 夏,重度污染是春 > 冬 > 秋 > 夏,再次表明我国空气质量夏、秋季较好,春季次之,冬季最差。

综上,四季大气污染指数、主要污染因子以及空气质量状况 10 a 统计分析结果显示,冬季大气污染最为严重,秋、春次之,夏季污染最低。这种季节变化规律,表现出我国以煤烟和二次扬尘的为主的大气

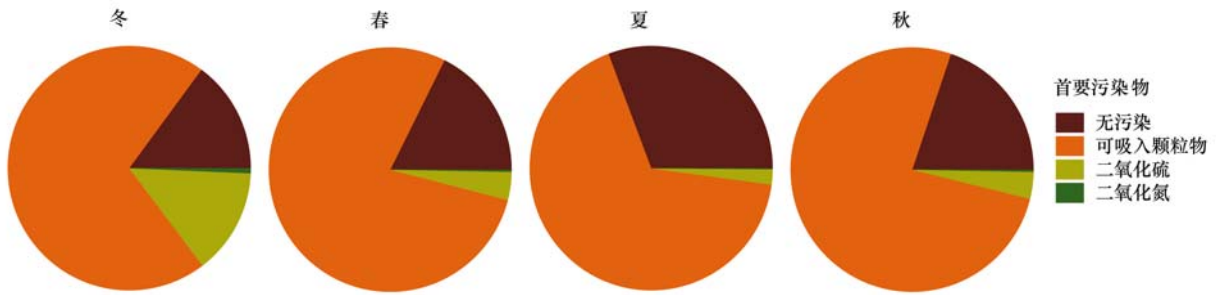


图 2 主要污染因子季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of the main pollution factors

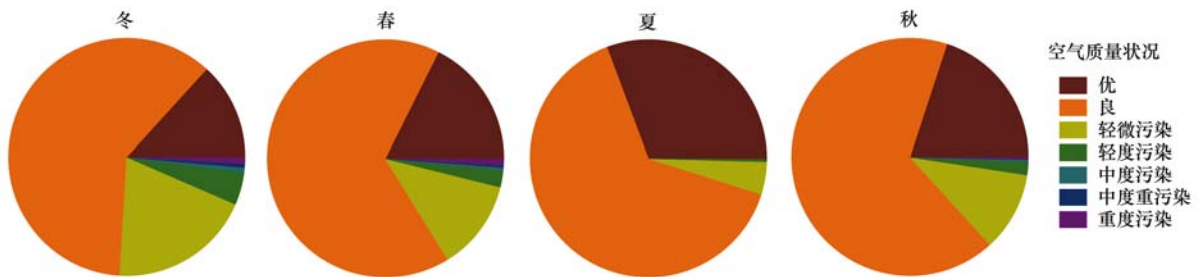


图 3 空气质量状况季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of air quality conditions

污染特征,也与天气气候条件以及局地因素的季节变化有关.冬季降水偏少,气候干燥,植被干枯,西北风强劲,易引发起沙、扬尘天气;另外冬季,尤其是早晚,容易出现逆温层抑制污染物在大气中的扩散,同时冬季为采暖期,燃料消耗量大,污染物排放量大,更加剧了大气污染<sup>[14]</sup>.春季是沙尘暴频发的季节,多发生于西北的沙尘暴借强劲的西北风可长距离输送影响中国的不少城市,有时会席卷大半个中国<sup>[15]</sup>,沙尘加大了空气中的含尘量,从而影响环境空气质量.然而,夏秋两季降水增多,湿度增大,植被覆盖度明显增大(相对于春、冬两季),而且太阳辐射强,近地面层热力对流旺盛,逆温出现的几率小,空气的扩散条件好,有利于污染物的稀释和扩散,空气质量无疑相对较好.

2.2 年变化特征

2001~2010年全国站点城市空气污染指数变化趋势见图4,API总体上表现为下降趋势.从2001~2005年API平均值表现出逐年下降的趋势,波动较小,在2006年API陡然升高,之后又表现出平缓下降趋势.

图5给出了2001~2010年各不同污染因子出现天数的年际变化.由图5(a)可以看出2001~2010年无污染出现天数虽有波动但整体上表现出逐年增大,2010年全国站点城市无污染的天数为4 038 d;可吸入颗粒物作为首要污染物的天数2001~2010

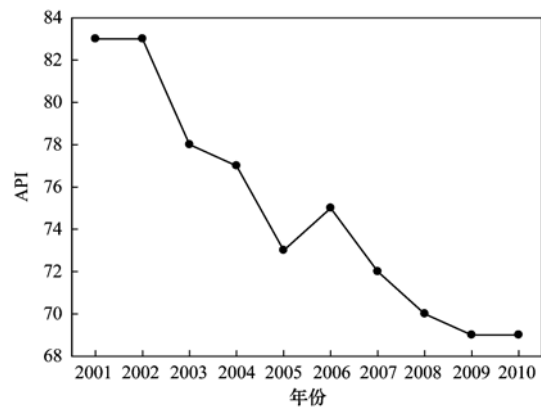


图 4 API 年际变化

Fig. 4 Inter-annual variation of air pollution index

年表现为下降趋势[图5(b)],2001~2006年下降幅度较小,甚至在2007年略微升高,但之后又急剧下降,至2010年趋于稳定;二氧化硫作为污染物出现天数较少,10a间分别于2003年和2008年出现一谷一峰;即2001~2003年二氧化硫天数呈减少趋势,2003~2008年表现为上升趋势,2008~2010年又趋于减少[图5(c)].主要污染因子中,二氧化氮出现天数最少,且年际变化波动较大,分别于2002年、2005年和2009年出现极小值,2004年和2007年出现2个峰值[图5(d)],总体上无规律可循.

全国站点城市2001~2010年空气质量状况的年际变化如图6所示.2001~2010年空气质量出现

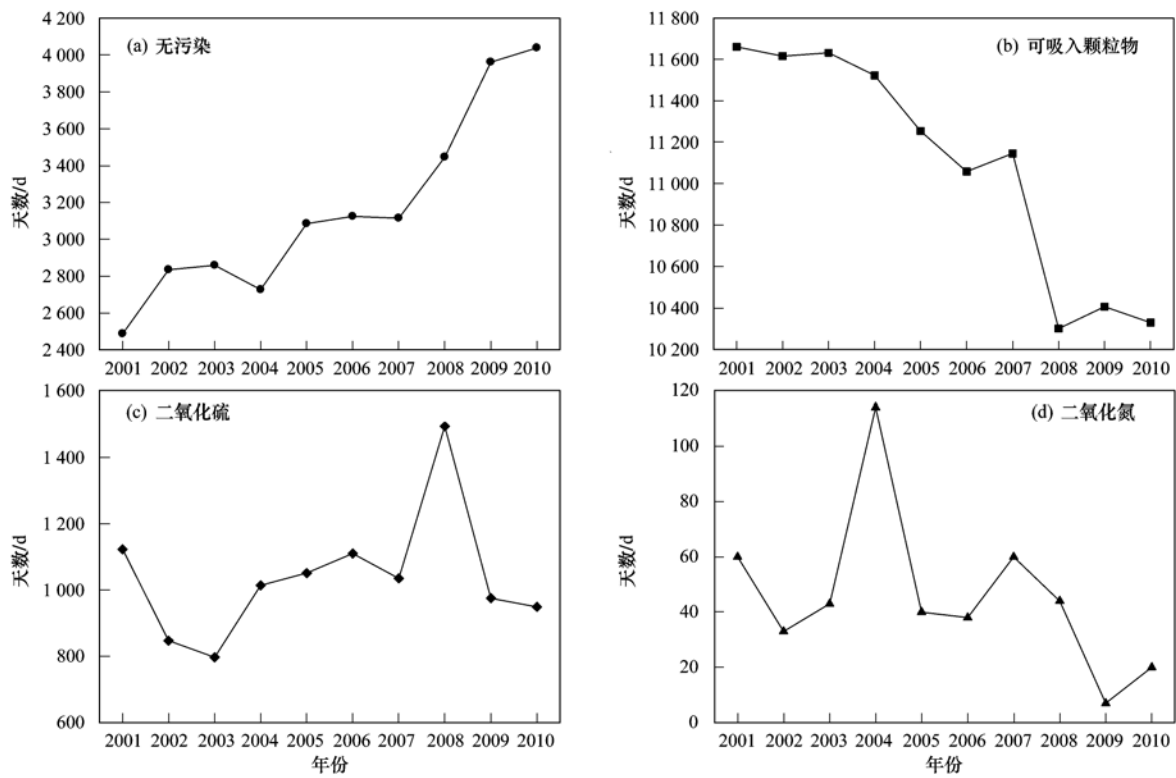


图 5 主要污染因子年际变化

Fig. 5 Inter-annual variation of the main pollution factors

优的天数虽略微有波动但整体上表现出逐年增大 [图 5(a)]; 良出现的天数在 2007 年发生了变化, 即 2001 ~ 2007 年良出现天数呈增大趋势, 2007 年之后则表现为趋于减小 [图 6(a)]; 2001 ~ 2010 年

轻微污染和轻度污染出现天数减小均趋势明显, 波动较小 [图 6(b) 和图 6(c)]; 中度污染、中度重污染和重度污染出现天数较少, 10 a 间虽有较大的波动但总的趋势是趋于减小; 同时, 本研究发现 3 种

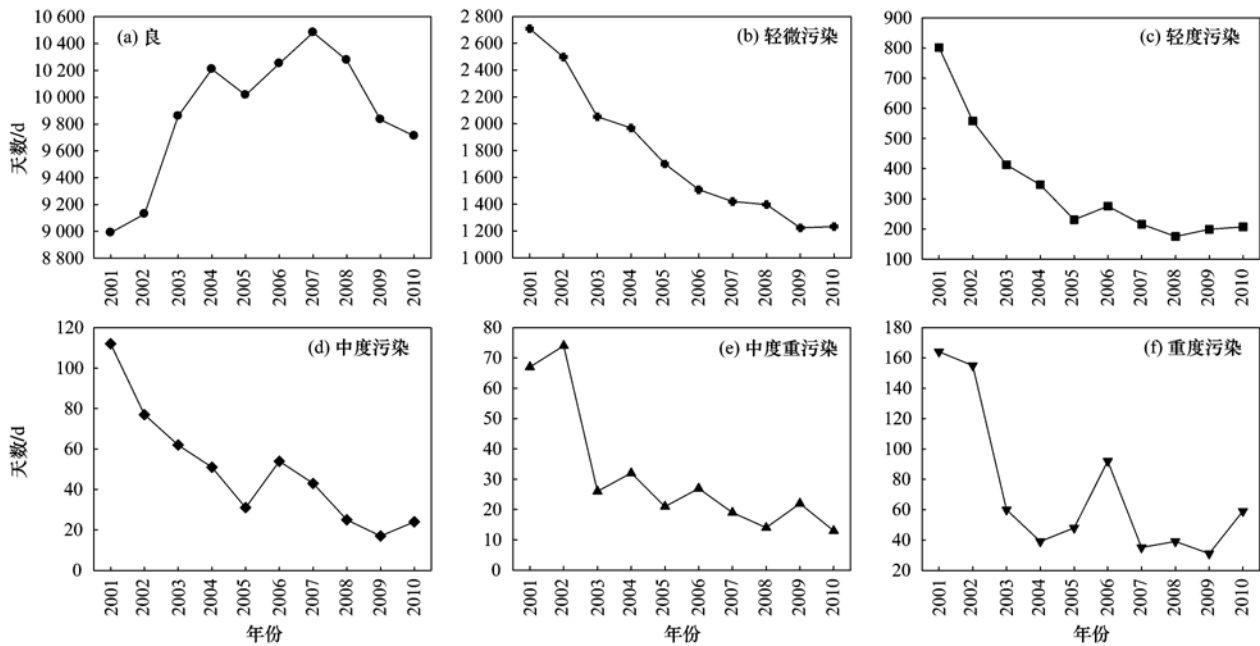


图 6 空气质量状况年际变化

Fig. 6 Inter-annual variation of air quality conditions

空气质量级别在 2006 年均表现出增大的转折,加之 API 在 2006 年的陡然升高,表明 2006 年全国出现了较大范围的空气污染。

综上,大气污染指数、主要污染因子以及空气质量状况 10 a 统计分析结果表明:API 的年际变化表现为逐年减小,空气污染趋于良好;主要污染因子当中无污染出现的天数逐年增大,可吸入颗粒物出现天数也明显趋于减少,二氧化硫和二氧化氮出现天数虽有波动,但减少趋势也较为明显;空气质量状况的年际变化也进一步表明了 2001~2010 年全国城市空气质量的好转趋势. 这与近年来各地方政府和环保部门在大气污染治理方面的工作密不可分,也与城市综合整治力度的加大,环境建设和环境管理工作的不断地深入,科学有效地治理措施以及全民的参与密不可分。

### 2.3 空间变化特征

选取中华人民共和国环境保护部网站重点城市空气质量日报数据,所有站点城市的空间分布如图 7(a) 所示,基本涵盖我国南北以及沿海内陆地区(东西差异)。

我国城市大气环境质量在区域上存在明显的差异,API、主要污染因子和空气质量状况均表现出从南向北,从沿海至内陆的变化趋势. 图 7(b) 为 API

的空间分布,虽然空气质量均表现为 I 或 II 级(兰州、乌鲁木齐表现为 III<sub>1</sub>),在区域上则南方和沿海城市 API 均值较低,其中珠海、湛江和海口表现为 I 级,北方与内陆城市空气质量皆为 II 级,且均是 API 高值区. 主要污染因子的空间分布如图 7(c) 所示,无污染的区域特征表现为南方及沿海城市出现天数较多,北方和内陆城市出现天数较少;可吸入颗粒物和二氧化硫则表现为北方和内陆城市出现天数较多,南方及沿海城市较少;二氧化氮作为污染物主要出现在南京、南通、上海、温州、福州、厦门、汕头、深圳、珠海、广州、南宁等沿海城市和西北干旱区的呼和浩特、银川和乌鲁木齐,以及兰州和哈尔滨,区域差异主要表现为沿海城市大于内陆城市,南方大于北方城市;海口、湛江、合肥以及拉萨等,10 a 从未出现过二氧化硫和二氧化氮的天数. 空气质量状况的区域分布特征也比较明显[图 7(d)],空气质量级别优或良出现天数表现为南方和沿海城市大于北方和内陆城市;轻微污染、轻度污染、中度污染、中度重污染和重度污染出现天数均表现为北方和内陆城市大于南方和沿海城市,并且南方和沿海的部分城市 10 a 来并没有出现过轻度污染或轻度污染以上的空气质量状况,如珠海、海口、湛江和昆明等城市。

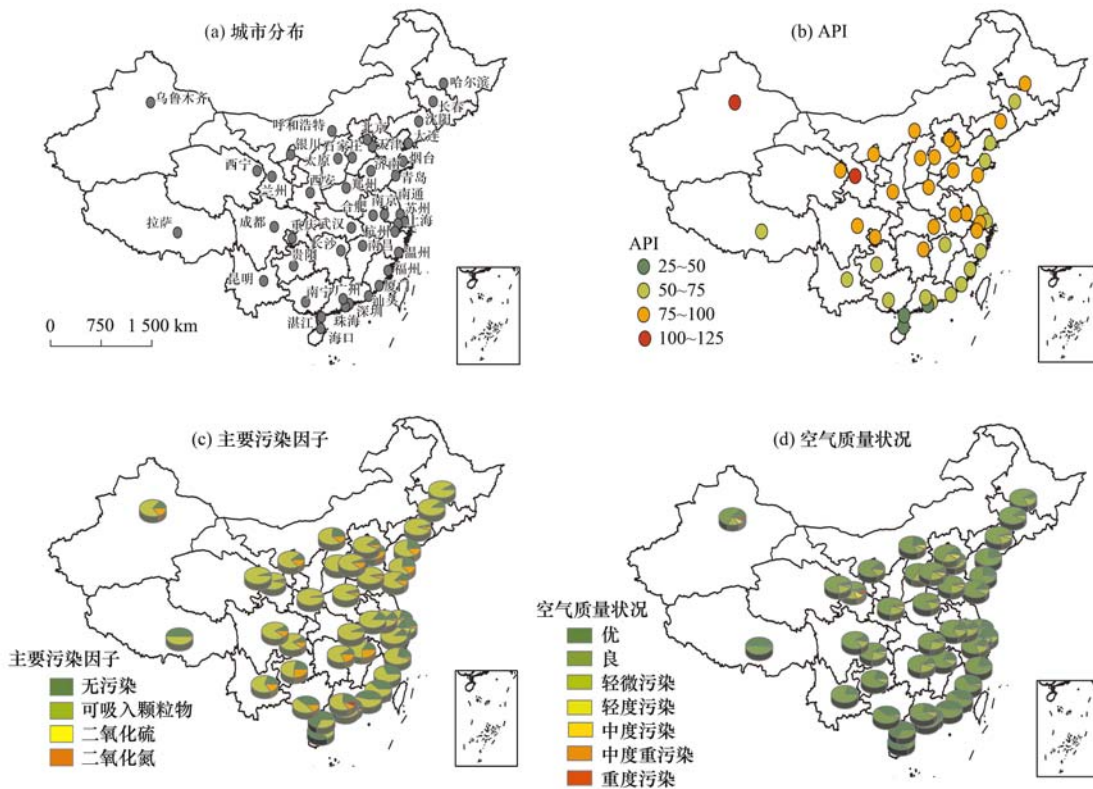


图 7 空气质量空间变化示意  
Fig. 7 Spatial variation of air quality

总之,我国城市大气环境质量在区域上存在显著差异,API、主要污染因子以及空气质量状况均表现出从南到北、从沿海到内陆的变化趋势.北方和内陆城市API较高,主要污染因子类型多且出现天数较多,空气质量级别齐全,I或II级的天数较少,III<sub>2</sub>级或III<sub>3</sub>级以上的污染出现天数较多;南方和沿海城市则相反,总体上表现出优质的大气环境质量.导致这种差异出现的原因是<sup>[14]</sup>:北方城市(尤其是进入采暖期),污染物的排放量显著增加,再加上北方地区受季风影响相对较弱,西北地区城市多以山谷盆地(特别是兰州)等特殊地形为主,更加重了大气环境污染;东部沿海地区多处于平原,地形平坦,季风气候显著,有利于污染物的扩散和稀释.可见,气象条件、地形以及人们的活动状况均对城市大气质量的区域变化和分布产生着重要影响.

### 3 讨论

#### 3.1 污染源对城市空气质量的影响

通过对各城市污染物的统计,可吸入颗粒物作为主要污染物出现的频率最高,可见中国城市大气污染受燃煤影响严重.燃煤,特别是在采暖期燃煤量急剧增加,导致了我国北方采暖期的颗粒物排放量、二氧化硫含量以及API值的升高,空气质量下降.

局地地面土壤扬尘及西北地区沙尘传输造成的自然降尘对API中可吸入颗粒物浓度的贡献也很大<sup>[16,17]</sup>.局地地面扬尘主要指绿化率和硬质覆盖度,地面裸露程度越高越容易引起扬尘,在多风干燥季节对局地城市空气质量的影响不容忽视.作为中亚沙尘暴区的重要组成部分——中国西北地区,主要包括南疆的塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地、内蒙古西部沙地(巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地、乌兰布和沙漠)、内蒙古东部沙地(浑善达克沙地和科尔沁沙地)和黄土高原;西北地区荒漠化和沙漠化的现状,再加上我国西高东低的地势,致使发生于我国西北地区的沙尘天气会顺势而下,并在高空强西北气流作用下,影响到我国华北广大地区和东部沿海地区<sup>[18]</sup>.

#### 3.2 气象条件对城市空气质量的影响

气象要素是制约污染物在大气中稀释、扩散、迁移和转化的重要因素.与大气污染有关的气象要素很多,主要包括降水量、风、逆温、地面气压、地面温度、相对湿度、云量等.污染物在水平方向上的扩散由风速决定,风速越大,污染物越容易扩散,风速小甚至静风时,污染物难以扩散,容易形成污染物局地

积累;污染物在垂直方向的扩散受到垂直方向上温度的分布状况控制,当地面空气温度高于高空中大气温度时,大气是不稳定的,在热力对流的作用下污染物向上扩散,地面污染物浓度降低,当高空中大气温度高于地面空气温度时,就形成了所谓的逆温现象,这时热力对流减弱甚至消失,大气状况变得稳定,污染物的垂直扩散受到抑制,地面污染物累积;降水(降雨、降雪)对空气污染物能起到清除和冲刷作用:在雨水作用下,大气中的一些污染气体能够溶解在水中,降低空气中污染气体的浓度,较大的雨雪对空气污染物粉尘颗粒也起着有效的清除作用.

冯宏芳等<sup>[19]</sup>对福州污染物浓度与气象条件的关系进行了较为全面的分析,结果表明污染物的浓度变化与空气污染气象条件的优劣密切相关,各气象要素对大气污染物有一定的制约关系.陈雷华等<sup>[20]</sup>在其研究中也对气象条件与空气污染的相关关系进行了分析.图8为API与降水量和风速相关关系曲线.乌鲁木齐API指数与月总降水量在0.05水平上呈负相关,其线性相关系数为-0.289[图8(a)];东南部城市API与月平均降水在0.05的水平上呈明显的负相关,其线性相关系数为-0.629[图8(c)].说明降水对污染物有显著的清除作用,降水量越大,API指数越小,反之亦然.乌鲁木齐API与风速在0.001的水平上呈明显负相关,相关系数为-0.812[图8(b)],说明风速的大小直接影响着乌鲁木齐API指数的变化,风速越大,越有利于污染物的扩散,API指数就越小.究其原因,风速加大更有利于污染物的扩散,虽然风速增大可能会带来沙尘天气,但北疆城市尤其是乌鲁木齐,污染日首要污染物更多的是SO<sub>2</sub><sup>[21]</sup>;东南部地区API与月平均风速在0.01的水平上呈正相关,相关系数较小仅为0.079[图8(d)],这是由于风速加大容易触发地面尘土的扬起,空气污染会因此而加重,表现出API与风速呈正相关.研究发现<sup>[11,19,21,22]</sup>,污染天气过程与近地层逆温层的出现相对应.由于季节因素,夏季逆温层厚度较薄,高度相对偏低;冬天逆温天气出现的频率较多,大气比较稳定,不利于空气污染物的扩散稀释,因此我国空气污染表现出明显的冬高夏低的季节特征.

#### 3.3 地形因素对城市空气质量的影响

由中国地形起伏度空间分布趋势和海拔高度规律可知<sup>[23]</sup>,西部地区地形起伏度高于东部,南部高于北部;最高值分布在藏东南—横断山区和天山地区,除一些巨大的盆地外,由此二处向两侧逐渐降



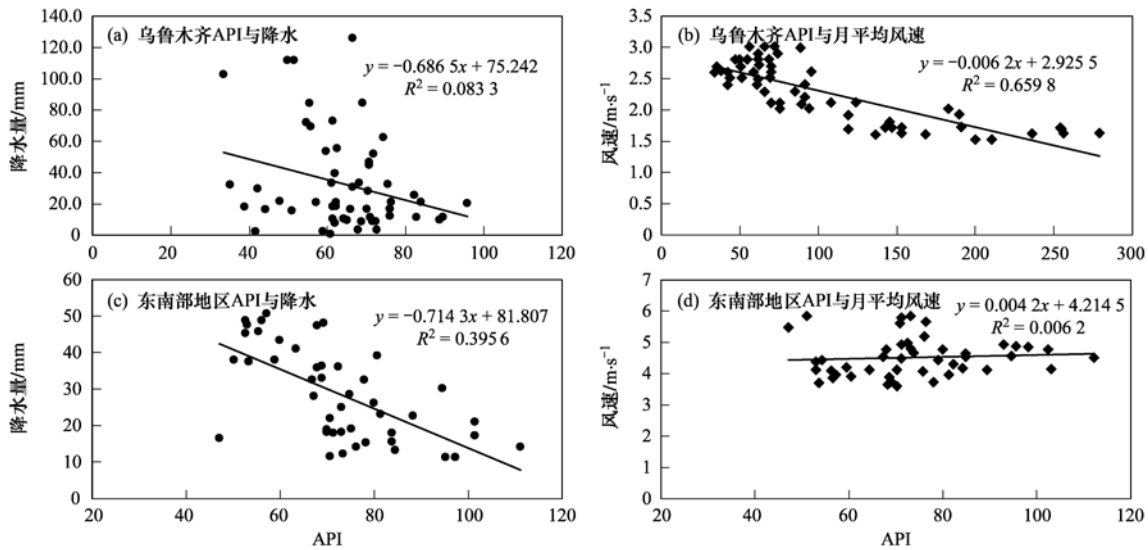


图 8 API 与降水和风速的关系曲线

Fig. 8 Correlations between API and precipitation, wind speed

低;最低值分布在东北平原、华北平原和塔里木盆地,四川盆地、内蒙古高原、江南地区、华南地区为次低值区域;全国低海拔地区以低值地形起伏度为主,高海拔地区以高值地形起伏度为主.中国的地貌类型复杂多样,地势西高东低,形成三大阶梯的总特征<sup>[24]</sup>,主要表现为:西北部多高原、盆地和山地,东南部以平原、丘陵和低山地貌为主,地势低平,沃野千里.我国地形的空间差异对气象条件分布产生着巨大影响<sup>[25~28]</sup>,进而影响着大气环境质量的区域变化.山谷盆地地形阻塞易出现闭合环流的小风,对气流产生阻挡效应,会使这一地区的污染加重;山区地形起伏使得接受的太阳日辐射强度和辐射冷却不均匀,由此引起的热力环流形成地形风,再加上山区逆温维持时间比平原地区长,限制了空气的扩散,加重了污染;平原地区则由于风向和风速在某一水平面上基本是均匀的,污染物的输送规律比较简单,主要由当地风向频率所决定,有利于污染物的扩散和稀释.

### 3.4 人类活动对城市空气质量的影响

人类活动对城市大气环境的影响既存在消极的方面同时也存在积极的方面<sup>[29]</sup>.随着城市人口递增,工业、生活炉灶与采暖锅炉排放量增加,机动车拥有量及排放量也逐年上升,能源消费量和燃油消耗量大幅增加,市政施工扬尘和道路扬尘加重,使大气污染不容忽视;另一方面,随着人类环保意识的增强,对城市大气环境产生着积极地影响:投资和产业结构的调整,提高能源利用率并积极开发新能源,逐年提高城市的绿化覆盖率和道路绿化总长度,制

定并实行新的经济指标(绿色 GDP、单位 GDP 能耗),加强污染的预防、治理和法律职能等,城市空气质量也表现出进一步好转趋势.

## 4 结论

(1)我国城市受燃煤影响较为严重,特别是在采暖期燃煤量急剧增加,导致了我国北方采暖期的颗粒物排放量、二氧化硫含量以及 API 值的升高;总体上,城市 API 处于 I 或 II 级,主要污染因子以可吸入颗粒物出现频率最高,空气质量状况较好,以优、良和轻微污染居多.

(2)API、主要污染因子以及空气质量状况表现出显著的时空变化.从时间变化上看,不同季节表现出不同的特征,冬春季较夏秋季空气污染最严重;从年际变化看,空气质量表现出逐年好转趋势;在空间变化上,东西南北差异较大,空气质量由南到北,从沿海到内陆的逐渐变差.

(3)我国城市空气质量主要受污染源、气象条件、地理因素和人类活动的影响.其中,污染源主要来自于局地污染及西北地区沙尘传输造成的自然降尘;各气象要素对大气污染物有一定的制约,其中空气污染指数与降水量、风速和逆温线性相关;地形的空间差异间接影响着空气质量的空间变化,人类活动则对其产生着双重作用;各影响因素并非孤立,而是相互交织共同作用于空气质量的变化.

### 参考文献:

- [1] 酃桂芬. 环境质量评价 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.

- [ 2 ] 段玉森, 魏海萍, 伏晴艳, 等. 中国环保重点城市 API 指数的时空模态区域分异 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 384-391.
- [ 3 ] Jiang D H, Zhang Y, Hu X, *et al.* Progress in developing an ANN model for air pollution index forecast [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(40): 7055-7064.
- [ 4 ] Cogliani E. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(16): 2871-2877.
- [ 5 ] 李向阳, 丁晓妹, 高宏, 等. 中国北方典型城市 API 特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(3): 96-101.
- [ 6 ] 王斌, 高会旺. 中国沿海城市空气污染指数的分布特征 [J]. 生态环境, 2008, **17**(2): 542-548.
- [ 7 ] 安俊岭, 张仁健, 韩志伟. 北方 15 个大型城市总悬浮颗粒物的季节变化 [J]. 气候与环境研究, 2000, **5**(1): 25-29.
- [ 8 ] 张新明, 柴发合, 王淑兰, 等. 沈阳市空气污染特征 [J]. 中国环境科学, 2006, **26**(6): 650-652.
- [ 9 ] 吴万友, 姚丽文, 徐卫民, 等. 江西省主要城市空气质量预报研究 [J]. 环境与开发, 2001, **16**(3): 9-11.
- [ 10 ] 熊美阳, 吕焕哲, 吴甫成. 湖南省大气污染特征与防治研究 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2003, **26**(1): 89-92.
- [ 11 ] 张凌, 付朝阳, 郑习健, 等. 广州市区大气污染特征与影响因素分析 [J]. 生态环境, 2007, **16**(2): 305-308.
- [ 12 ] 宋瑞金, 崔九思. 我国五城市大气污染动态观察的研究 [J]. 卫生研究, 1996, **25**(6): 338-342.
- [ 13 ] 金永民. 抚顺市 2005 年空气污染指数分析 [J]. 环境科学与管理, 2007, **32**(8): 41-43.
- [ 14 ] 潘虹梅, 李凤全, 王俊荆, 等. 基于 API 方法的城市大气污染评价 [J]. 环境科学与管理, 2008, **33**(2): 178-180, 184.
- [ 15 ] 黄美元, 王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计 [J]. 大气科学, 1998, **22**(4): 625-637.
- [ 16 ] 康晓风, 张建辉, 刘红辉. 沙尘天气对我国城市空气质量影响的范围与强度分析 [J]. 资源科学, 2002, **24**(4): 1-4.
- [ 17 ] 刘伟, 韩毓. 天津地区沙尘天气与沙尘污染程度特征分析 [J]. 城市环境与城市生态, 2004, **17**(4): 21-23.
- [ 18 ] 张凯, 高会旺, 张仁健, 等. 我国沙尘的来源、移动路径及对东部海域的影响 [J]. 地球科学进展, 2005, **20**(6): 627-636.
- [ 19 ] 冯宏芳, 隋平, 邱丽霞. 福州市污染物浓度时空分布及影响因素分析 [J]. 气象科技, 2003, **31**(6): 356-360.
- [ 20 ] 陈雷华, 余晔, 陈晋北, 等. 2001~2007 年兰州市主要大气污染物污染特征分析 [J]. 高原气象, 2010, **29**(6): 1627-1633.
- [ 21 ] 刘新春, 钟玉婷, 何清, 等. 乌鲁木齐及周边城市空气质量变化特征及影响因素分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, **4**(4): 12-17.
- [ 22 ] 段宇辉, 景华. 河北省夏季空气污染过程气象条件 [J]. 气象科技, 2010, **38**(6): 715-720.
- [ 23 ] Feng Z M, Tang Y, Yang Y Z, *et al.* Relief degree of land surface and its influence on population distribution in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, **18**(2): 237-246.
- [ 24 ] 赵济. 中国自然地理 [M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [ 25 ] 卢爱刚, 康世昌, 庞德谦, 等. 地形对中国气温季节分布格局的差异影响 [J]. 生态环境, 2008, **17**(4): 1450-1452.
- [ 26 ] 舒守娟, 王元, 熊安元. 中国区域地理、地形因子对降水分布影响的估算和分析 [J]. 地球物理学报, 2007, **50**(6): 1703-1712.
- [ 27 ] 黄茂栋, 张璞. 乌鲁木齐市地理地形因素对降水空间分布的影响 [J]. 气象科技, 2009, **37**(1): 25-28.
- [ 28 ] 刘敏, 孙杰, 杨宏青, 等. 湖北省不同地形条件下风随高度变化研究 [J]. 气象, 2010, **36**(4): 63-67.
- [ 29 ] 周文华, 王如松, 张克锋. 人类活动对北京空气质量影响的综合生态评价 [J]. 生态学报, 2005, **25**(9): 2214-2220.

## CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China .....	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China .....	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed .....	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline .....	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone .....	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River .....	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland .....	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China .....	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea .....	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current .....	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System .....	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu .....	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow ( <i>Gobiocypris rarus</i> ) .....	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish ( <i>Brachydanio rerio</i> ) .....	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter .....	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM .....	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions .....	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater .....	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process .....	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process .....	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor .....	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters .....	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment .....	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition .....	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability .....	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China .....	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City .....	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in the Suburb of Shenzhen .....	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission .....	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO <sub>x</sub> -CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> Catalyst .....	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO <sub>2</sub> Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt .....	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil .....	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows .....	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers .....	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production .....	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil .....	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain .....	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings .....	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake .....	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi .....	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO <sub>2</sub> Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant .....	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis .....	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR .....	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil .....	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City .....	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose .....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor .....	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples .....	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma .....	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis .....	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill .....	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate .....	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis .....	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis .....	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

# 《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行