

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

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

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序 陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展 陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究 潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟 王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究 王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估 张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究 陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染来源研究 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究 张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估 张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素 刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性 胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应 隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征 杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异 孔祥胜, 祁士华, 孙寿, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究 马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 刘吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估 武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究 裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征 刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市市灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析 廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究 张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征 朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 孔建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究 周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究 沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为 肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究 孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究 李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究 陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究 王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究 郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究 谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测 季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氨水处理 庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究 钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究 季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中的降解的影响 宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究 陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为 王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究 江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析 傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录 (4434)
《环境科学》征订启事(4099) 《环境科学》征稿简则(4166) 信息(4180, 4219, 4225, 4275) 专辑征稿通知(4172)

松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究

马万里¹, 刘丽艳¹, 齐虹¹, 白杨², 沈吉敏¹, 陈忠林¹, 李一凡^{1*}

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室持久性有毒物质国际联合研究中心, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 在松花江流域的 3 个主要江段: 嫩江、第二松花江和松花江干流, 于 2010 年冰封期采集了 21 个水体样品, 分析了多环芳烃的污染特征. 结果表明, 15 种 PAHs 的浓度范围为 23.4 ~ 85.1 ng·L⁻¹, 平均浓度为 (50.3 ± 17) ng·L⁻¹, 与我国其它地区地表水中 PAHs 的污染程度相当. 松花江流域水体中 PAHs 具有明显的空间分布特征, 城市下游浓度高于上游, 说明沿岸城市的污水排放可能是松花江水体中 PAHs 的主要污染源, 主成分分析表明, PAHs 的主要来源是化石燃料的燃烧源. 商值法生态风险评价结果显示, 相对分子质量高的 PAHs 造成的生态风险可以忽略, 相对分子质量低的 PAHs 对松花江水体会造成一定的危害.

关键词: 多环芳烃; 地表水; 冰封期; 来源解析; 风险评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4220-06

Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season

MA Wan-li¹, LIU Li-yan¹, QI Hong¹, BAI Yang², SHEN Ji-min¹, CHEN Zhong-lin¹, LI Yi-fan¹

(1. International Joint Research Centre for Persistent Toxic Substances, State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water samples of the three major sections of the Songhua River Basin (the Nenjiang River, the Second Songhua River and the mainstream of the Songhua River) were studied. A total of 21 surface water samples were collected in icebound season in 2010 along the bank. The total concentrations of 15 species of PAHs ranged from 23.4 ng·L⁻¹ to 85.1 ng·L⁻¹, with an average concentration at (50.3 ± 17) ng·L⁻¹, which was comparable with those of other rivers in China. PAHs had higher concentration in lower reaches of the river around neighboring cities, which maybe caused by municipal/industrial effluents of the cities along the bank. The sources of PAHs were further identified by principal component analysis (PCA), which indicated that the main source of PAHs was fossil fuel related combustion in Songhua River. The potential ecosystem risk assessment of individual PAHs was characterized by risk quotient (RQ). The results indicated that the ecological risk of high molecular weight PAHs was negligible and low molecular weight PAHs possessed greater ecological risk.

Key words: PAHs; surface water; icebound season; source apportionment; risk assessment

多环芳烃 (PAHs) 是环境中普遍存在的一类有毒有机污染物, 因其具有致癌性、分布广泛、污染源多等特点, 已成为世界各国的研究热点. 由于 PAHs 的生物富集性和生物毒性, 其在水源水体等地表水环境中的存在已成为饮用水深度处理中需要特别关注的目标物之一^[1]. 地表水中 PAHs 的污染主要来自于工业生产废水、生活污水的排放和大气的干湿沉降作用. 近年来, 国内学者对我国的重要流域开展了广泛调查, 研究了我国不同地区地表水中 PAHs 类污染物的分布特征和生态风险^[2-5].

松花江流域位于我国东北地区, 流域面积 54.6 万 km², 为黑龙江右岸的一大支流, 占黑龙江流域面积的 30%. 松花江流域是我国东北地区人口和工农

业生产集中分布的区域, 也是当地生活和工农业生产用水的主要水源, 因此, 松花江水质的优劣直接关系到该区域居民的生活品质, 也直接影响着我国东北老工业基地的振兴与发展; 但是多年来不合理的工业布局, 使得松花江水质呈逐年恶化的趋势. 近年来, 学术界对松花江流域的污染开展了大量的研究, 但多集中于无机物和重金属方面^[6]. 关于 PAHs 类有机污染物的系统研究较少^[7,8], 针对 PAHs 类有机污染物对松花江水生生态系统和人类健康危害的评价鲜见报道^[9], 从目前的研究结果看, 缺少冰封期

收稿日期: 2012-02-06; 修订日期: 2012-04-11

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2011M500677); 国家自然科学基金青年项目 (41101493)

作者简介: 马万里 (1982 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为持久性有毒物质的迁移转化, E-mail: mawanli002@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ijrc_pts_paper@yahoo.com

的水体中 PAHs 污染特征和源汇关系的系统研究, 而长达数月的冰封期是松花江流域水体的特殊水文特征. 因而, 开展冰封期松花江流域典型有机污染物 PAHs 的污染特征和生态风险评价的系统研究, 对于科学认识松花江水体的污染现状、制定合理的控制措施尤为重要. 为此, 本研究于 2010 年冰封期对松花江流域的主要江段进行水体样品的采集, 探讨冰封期水体中 PAHs 的污染特征和来源, 并利用商值法进行了初步的生态风险评价, 以期为未来的进一步研究提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 水样的采集

为了探讨沿岸城市对于松花江水质的影响, 在

主要县级以上城市布设监测断面, 于 2010 年 11 ~ 12 月份对冰封期江水进行采集, 共采集 21 个水样, 主要采样的江段有: 嫩江江段(包括齐齐哈尔上、下游, 大安), 第二松花江江段(包括松花湖, 吉林, 松原上、下游)和松花江干流(包括肇源, 哈尔滨上、中、下游, 木兰上、下游, 通河上、下游; 依兰上、下游; 佳木斯上、下游, 富锦、同江), 采样点具体分布如图 1 所示. 水样采集于冰面下 0.5 m 的位置, 样品储存在玻璃瓶中, 并于当天带回实验室, 加入二氯甲烷后放在冰箱内冷藏保存.

1.2 水样的处理

水样中 PAHs 的提取采用传统的液液萃取法进行, 该方法经过国际持久性有毒物质联合研究中心(IJRC-PTS)实验室的优化, 回收率和重现性均通过



图 1 松花江流域地表水采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling sites in Songhua River Basin

加标的超纯水进行验证, 能够满足该实验的要求. 具体操作为: 将水样转移到 1 L 的分液漏斗中, 加入 4 种 PAHs 的代标 (naphthalene-D8, fluorene-D10, pyrene-D10, perylene-D12) 后, 用 100 mL 的二氯甲烷进行振荡萃取 5 min, 静置分层 10 min, 分离有机相, 重复上述萃取步骤 3 次, 将有机相合并后, 通过无水硫酸钠进行脱水处理. 脱水后的有机相加入 15 mL 正己烷后, 经过旋转蒸发仪进行浓缩处理到 4 mL 完成溶剂置换, 再利用柔和氮气定容到 1 mL, 通过活化后的硅胶层析柱进行净化处理, 淋洗液(二氯甲烷和正己烷的混合液)再次经过旋转蒸发仪和柔和氮气定容到 1 mL, 进行 GC-MS 分析.

1.3 PAHs 的测定

含有 16 种单体的 PAHs 混合标样购于美国 Supelco 公司, 其定性和定量由 Agilent 6890N 型气

相色谱仪和 Agilent 5973 质谱仪完成, 色谱柱为 HP-5 MS 型, 规格为 60 m × 0.25 mm × 0.25 μm, 载气为高纯氦气, 采用不分流进样方式, 进样量为 2 μL. 升温程序为: 柱温 90℃ 保持 1 min, 然后以 10 °C · min⁻¹ 的速度升温到 180℃, 保持 1 min, 再以 3 °C · min⁻¹ 的速度升温到 280℃, 保持 20 min. PAHs 的定性采用选择离子质谱图和保留时间进行, 定量通过外标法进行(选择 5 个浓度梯度的标样进行定量分析, 其浓度为 10、50、100、250 和 500 ng · mL⁻¹, 得出各目标物的相关系数在 0.99 以上).

1.4 质量保证与质量控制

在实际水样的处理过程中, 每 10 个水样作为一批进行处理, 同时进行一个空白实验(以 1 L 超纯水作为水样), 其处理方法与实际水样一样. 结果表明, 空白样品中能够检测到不同程度萘的干扰, 所以

在本研究的分析中,不包括萘的结果. 4 种 PAHs 代表的回收率分别为: naphthalene-D8 ($82\% \pm 10\%$), fluorene-D10 ($83\% \pm 9\%$), pyrene-D10 ($92\% \pm 14\%$), perylene-D12 ($90\% \pm 29\%$).

2 结果与讨论

2.1 PAHs 的污染现状

总体上,大分子 PAHs 的检出率要低于小分子的 PAHs,其中二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、苯并[g,h,i]芘 3 种单体在 21 个水样中的浓度均低于检出限,其余 12 种单体则有不同的检出率,其中萘、二氢萘、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、䓑、苯并[a]蒽的检出率为 100%,这是由于大分子 PAHs 的辛醇水分配系数(K_{ow})较高,在水中的溶解度低导致的,这种大分子 PAHs 在地表水中检出率低甚至未检出的现象在我国的很多江河中普遍存在^[10,11],并且本次采集的水样为冬季冰封期,水温很低,PAHs 在水中的溶解度会更低^[12]. 从组成上分析,松花江水体中以低分子量的化合物为主,三环 PAHs 占总 PAHs 的 75%,其中以菲的含量最高,约占总 PAHs 的 26%,四环 PAHs 占总 PAHs 的 24%,而五环 PAHs 的含量仅为总量的 1%,这种组成特征与我国的很多地表水中 PAHs 的组成相似^[11]. 松花江冰封期江水中 PAHs 的总浓度分布在 $23.4 \sim 85.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $50.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1} \pm 17 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,与国内其他地区地表水中 PAHs 的污染程度相当,与杭州市地面水中

PAHs 的浓度相当(平均浓度为 $30.82 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12],略低于河北省地表水中 PAHs 的浓度(平均浓度为 $84.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1} \pm 4.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[13],低于天津市地表水中 PAHs 的浓度(平均浓度为 $174 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[14]和黄河中下游水中 PAHs 的浓度(平均浓度为 $248.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[3].

2.2 PAHs 的空间分布特征

松花江流域(嫩江、第二松花江和松花江干流)冰封期水体中 PAHs 的空间分布特征如图 2 所示,可以看出,从上游到下游,沿着水流的方向,各监测断面水体中 PAHs 的浓度变化并不大,其中最大浓度出现在木兰上游的位置,PAHs 的总浓度为 $85.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,最小浓度出现在通河上游的位置,PAHs 的总浓度为 $23.4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,最大浓度是最小浓度的 4 倍,但是从整体上看,所有监测断面水体中 PAHs 的浓度在一个数量级内,说明冰封期松花江水体中 PAHs 的污染处于同一水平,不同规模的沿岸城市对于冰封期松花江水体中 PAHs 的污染程度的影响没有显著差异. 通常地表水体中的 PAHs 主要来自于大气沉降,城市径流和工业废水、生活污水的排放等^[2],而本研究中水体样品的采集时间为冬季冰封期,所以整个冬季的大气沉降和城市地表径流不会对松花江水体造成污染,其污染源可能主要来自于沿岸人类生产和生活污水的排放以及其他季节的污染源对于松花江的污染,而长期沉积在底泥中的 PAHs 也可能会释放到水中造成 PAHs 污染的增

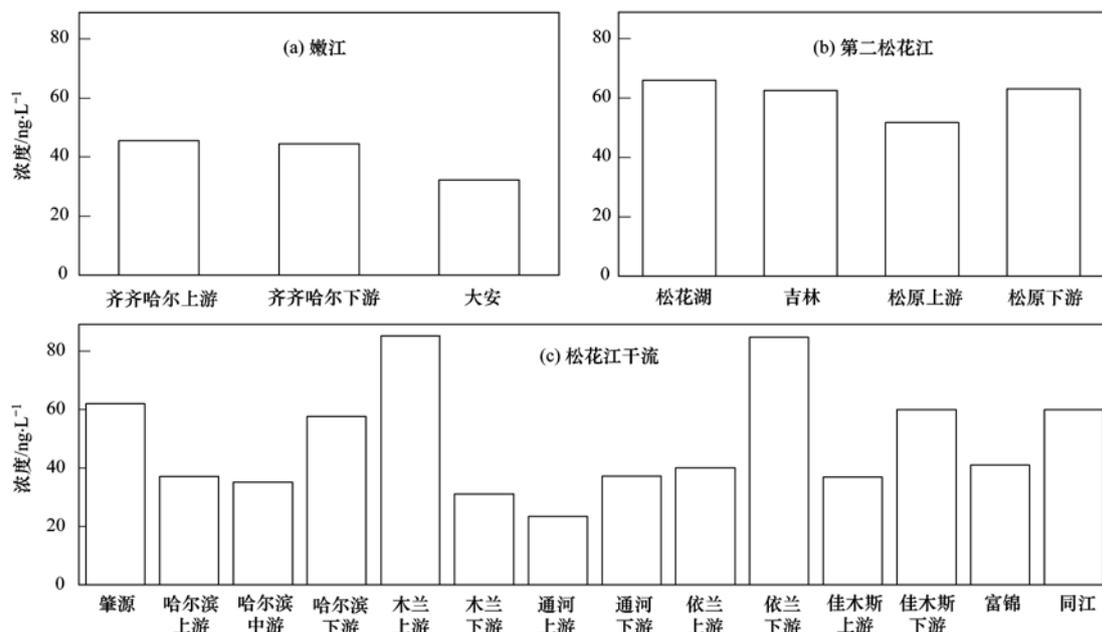


图 2 松花江流域冰封期水体中 PAHs 浓度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of PAHs concentrations in water of Songhua River Basin during the icebound season

加。从图 2 中可以明显地看出沿岸城市人类活动排放的污水对于松花江水体中 PAHs 的影响, 沿岸城市下游水体中 PAHs 的浓度相对于上游水体中 PAHs 的浓度, 都有不同程度的增加, 其中依兰下游是上游浓度的 2 倍, 其他城市下游的浓度也都增加了近 1.5 倍, 进一步说明了冰封期松花江水体中 PAHs 的污染可能来自沿岸城市工业或者生活污水的排放, 导致城市下游水体中 PAHs 的污染增加, 但是也有个别城市的分布特征与整体不同, 如在木兰县的监测断面, 其下游浓度反而小于上游浓度, 有可能上游采样点受到了局部污染源的影响, 使其 PAHs 的浓度出现了明显的增加, 这种局部污染源的识别将在后续的调查中进行深入研究, 以期找到松花江流域水体中 PAHs 的特殊污染源, 为制定更加有效的污染控制措施提供参考依据。

2.3 PAHs 的污染来源解析

从前面的分析可以看出, 对于松花江冰封期水体中 PAHs 的来源途径主要是沿岸城市废水的排放, 但是从松花江流域污染治理的角度, 还需要进一步从根源上分析, 找到 PAHs 的主要污染源。环境中 PAHs 的来源比较复杂, 但是其主要的来源包括: 煤、石油等化石燃料和生物质的燃烧, 以及石油等相关产品的泄漏^[15]。松花江流域是我国东北老工业基地的重要组成部分, 分布有中国最大的石油化工基地, 沿岸的石油和化工企业等对松花江的污染逐年增加, 但是对于松花江水体中 PAHs 的污染来源的研究较少^[8]。本研究采用美国环保署 (EPA) 推荐的源解析方法: 主成分分析法 (PCA), 用于对冰封期松花江流域水体中 PAHs 进行源解析, 该方法作为成熟的源解析方法, 能够同时进行污染源的定性和定量研究^[16], 其结果可以为该流域的污染治理提供参考依据。

由于苯并[b]荧蒹、苯并[k]荧蒹、苯并[a]芘 3 种单体的检出率较低, 所以本研究只对检出率为 100% 的 9 种单体进行主成分分析, 结果如表 1 所示, 根据特征值 > 1 的原则, 共提取了 3 个主要因子, 解释了 PAHs 总含量 80.4% 的变化, 说明提取 3 个因子能够很好地解释原始数据的结果。因子 1 解释了总变化的 43.2%, 是主要因子, 主要体现在菲、蒹、荧蒹和芘等 4 个单体上, 有研究表明, 这 4 个单体主要来自于煤的燃烧^[17], 所以因子 1 代表了煤的燃烧源。因子 2 的解释率为 23.5%, 在二氢萘和芴上具有较高的贡献率, 这 2 个单体主要来自于锅炉排放源^[18], 与实际情况相符, 东北地区的供暖和工

业生产仍在使用锅炉, 而锅炉在使用过程中会排放大量的污染物, 如 PAHs 等。因子 3 对于苯并[a]蒹具有很高的表征, 其解释率为 13.7%, 苯并[a]蒹是天然气燃烧后产生的主要特征物质之一^[18], 所以因子 3 表征了天然气燃烧源。综上所述, 通过主成分分析法获得的 3 个主要因子表征的污染源均属于高温燃烧源, 包括煤、石油和天然气等化石燃料的燃烧, 而这些污染源产生的 PAHs 主要被释放到大气中, 然后通过干湿沉降作用降落到地表面, 所以通过本研究可以得到初步的结论为: 冰封期松花江水体中的 PAHs 主要来自于沿岸城市污水的排放, 还有部分的 PAHs 来自于沉积到底泥中的 PAHs 的释放过程, 但是这 2 种污染源的根源是化石燃料的燃烧, 冬季城市污水中的 PAHs 可能主要来自于当地的工业生产和人们日常生活排放源, 而底泥中的 PAHs 则主要来自于其他季节的大气沉降、地表径流以及城市污水的排放。

表 1 松花江水体中多环芳烃的主成分分析

Table 1 Principal component analysis of PAHs in water in Songhua River Basin

PAHs	因子 1	因子 2	因子 3
萘	0.08	0.73	-0.10
二氢萘	-0.13	0.94	-0.02
芴	0.47	0.80	0.06
菲	0.92	0.09	0.14
蒹	0.86	0.26	0.00
荧蒹	0.91	0.01	0.10
芘	0.92	-0.05	0.18
苯并[a]蒹	0.02	0.09	0.90
蒹	0.26	-0.20	0.77
解释变化率/%	43.2	23.5	13.7

2.4 PAHs 的生态风险评价

本研究采用商值法对冰封期松花江水体中 PAHs 进行生态风险评价, 其基本原理是把实际测得的浓度与表示该物质具有危害的参考浓度进行比较, 如果比值 > 1 则认为是有风险的, < 1 则认为是无风险的。本研究所引用的参考浓度来自于文献 [19], 包括 2 个参考浓度: 可以忽略浓度 (the negligible concentrations, NCs) 和最大允许浓度 (the maximum permissible concentrations, MPCs), 生态风险商值 (risk quotient, RQ) 则通过实测浓度分别与这 2 个参考浓度比较获得, 分别命名为: $RQ_{(NCs)}$ 和 $RQ_{(MPCs)}$, 当 $RQ_{(NCs)} < 1$ 时, 表示当前水体中 PAHs 的生态风险很小, 可以忽略, 当 $RQ_{(MPCs)} > 1$ 时, 说明当前水体中 PAHs 的生态风险很大, 应当立即采取措施治理 PAHs 的污染, 减少其造成的风险, 当

$RQ_{(NCs)} > 1$, 而且 $RQ_{(MPCs)} < 1$ 时, 表示当前水体中 PAHs 造成的生态风险处于中等程度, 可以考虑采取相应的控制措施, 防止 PAHs 的进一步污染^[20]. 冰封期松花江水体中 PAHs 的风险商值结果如表 2 所示, 结果表明, 蒽、苯并[k]荧蒽和苯并[a]芘这 3 种单体的 $RQ_{(NCs)}$ 均 < 1 , 说明这 3 种物质对松花江

水体造成的危害可以忽略, 所有能够检测到的 PAHs 的 $RQ_{(MPCs)}$ 都远 < 1 , 而只有相对分子质量低的几个单体, 如菲、蒽、荧蒽和苯并[a]芘的 $RQ_{(NCs)} > 1$, 说明这几个单体会对松花江水体造成一定的危害, 从长期的环境暴露角度出发, 应当采用一些措施, 控制松花江水体中 PAHs 的进一步污染.

表 2 松花江水体中多环芳烃的风险商值

Table 2 Risk quotient of PAHs in Songhua River Basin

PAHs	NCs ^[19] /ng·L ⁻¹	MPCs ^[19] /ng·L ⁻¹	实测浓度 /ng·L ⁻¹	$RQ_{(NCs)}$	$R_{(MPCs)}$
菲	3	300	13.3	4.4	0.0
蒽	0.7	70	3.0	4.3	0.0
荧蒽	3	300	5.9	2.0	0.0
苯并[a]芘	0.1	10	0.8	8.0	0.1
蒽	3.4	340	0.9	0.3	0.0
苯并[k]荧蒽	0.4	40	0.1	0.3	0.0
苯并[a]芘	0.5	50	0.2	0.4	0.0

3 结论

(1) 松花江流域冰封期水体中 15 种 PAHs 的总浓度分布在 23.4 ~ 85.1 ng·L⁻¹ 之间, 沿岸城市下游的浓度普遍高于上游的浓度, 这种空间分布特征反映了城市污水排放对于松花江水体中 PAHs 的影响.

(2) 对水体中 PAHs 进行主成分分析表明, 松花江流域冰封期水体中 PAHs 的根源为化石燃料的燃烧, 通过工业废水或者生活污水的形式排放到水体中.

(3) 通过商值法对松花江流域冰封期水体中 PAHs 的初步生态风险评价表明, 相对分子质量低的 PAHs 具有一定的潜在生态风险, 应当采用一些措施, 控制松花江水体中 PAHs 的进一步污染.

参考文献:

- [1] Zhu L Z, Chen Y Y, Zhou R B. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, sediment and soil in drinking water resource of Zhejiang Province, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **150**(2): 308-316.
- [2] Guo W, He M C, Yang Z F, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River watershed, China [J]. Chemosphere, 2007, **68**(1): 93-104.
- [3] Li G C, Xia X H, Yang Z F, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the middle and lower reaches of the Yellow River, China [J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 985-993.
- [4] 欧冬妮, 刘敏, 许世远, 等. 长江口滨岸水和沉积物中多环芳烃分布特征与生态风险评价 [J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 3043-3049.
- [5] Luo X J, Mai B X, Yang Q S, et al. Distribution and partition of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface water of the Pearl River Estuary, South China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **145**(1-3): 427-436.
- [6] Zhang Z S, Sun X J, Wang Q C, et al. Recovery from mercury contamination in the Second Songhua River, China [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2010, **211**(1-4): 219-229.
- [7] Guo W, He M C, Yang Z F, et al. Comparison of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Songhuajiang River (China) during different sampling seasons [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2007, **42**(2): 119-127.
- [8] Feng Y J, Sun Q F, Gao P, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from the Songhua River of China [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2009, **18**(12): 2388-2395.
- [9] 孙清芳, 冯玉杰, 高鹏, 等. 松花江水中多环芳烃 (PAHs) 的环境风险评价 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, **42**(4): 568-572.
- [10] Deng H M, Peng P A, Huang W L, et al. Distribution and loadings of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Xijiang River in Guangdong, South China [J]. Chemosphere, 2006, **64**(8): 1401-1411.
- [11] Chen B L, Xuan X D, Zhu L Z, et al. Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediments and soils of Hangzhou City, China [J]. Water Research, 2004, **38**(16): 3558-3568.
- [12] 朱利中, 陈宝梁, 沈红心, 等. 杭州市地面水中多环芳烃污染现状及风险 [J]. 中国环境科学, 2003, **23**(5): 485-489.
- [13] 摆亚军, 刘文新, 陶澍, 等. 河北省地表水中多环芳烃的分布特征 [J]. 环境科学学报, 2007, **27**(8): 1364-1369.
- [14] Shi Z, Tao S, Pan B, et al. Contamination of rivers in Tianjin, China by polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**(1): 97-111.

- [15] 程家丽, 黄启飞, 魏世强, 等. 我国环境介质中多环芳烃的分布及其生态风险[J]. 环境工程学报, 2007, 1(4): 138-144.
- [16] Ma W L, Li Y F, Qi H, *et al.* Seasonal variations of sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to a northeastern urban city, China[J]. Chemosphere, 2010, 79(4): 441-447.
- [17] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U. K. [J]. Environmental Science and Technology, 1996, 30(3): 825-832.
- [18] Simcik M F, Eisenreich S J, Lioy P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(30): 5071-5079.
- [19] Kalf D F, Crommentuijn T, van de Plassche E J. Environmental quality objectives for 10 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1997, 36(1): 89-97.
- [20] Sun J H, Wang G L, Chai Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan reach of the Yellow River, Middle China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(5): 1614-1624.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musks in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-ke, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region; A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruo-yu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 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