

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

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

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)

基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)

湿地水环境健康评价方法及案例分析 李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)

北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)

漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)

黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)

沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)

长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 张文斌, 余辉 (399)

降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)

浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)

基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)

基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)

Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)

羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)

天然菱铁矿改性及强化除砷研究 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)

零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 廖娣劫, 杨琦, 李俊琦 (469)

水体中氧氟沙星的光化学降解研究 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)

阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)

蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)

ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 曹玉娟, 张扬, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)

丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄毓, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)

我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 李东玲, 吴焯, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)

北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)

Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)

我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)

典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)

电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)

北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)

海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)

大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)

应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)

软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)

固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)

五氟酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)

《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究

徐伟嘉^{1,2,3}, 幸鸿², 余志^{2,3}

(1. 中山大学先进技术研究院, 广州 510275; 2. 中山大学工学院, 广东省智能交通系统重点实验室, 广州 510275; 3. 东莞中山大学研究院, 东莞 523808)

摘要: 研究了道路绿化带对街道峡谷内流场与机动车尾气扩散的影响特征. 假设绿化带树冠为均匀多孔介质, 采用压力损失系数表征树冠对空气流动的阻碍作用, 建立可用于数值模拟的绿化带多孔介质物理模型. 采用稳态 $k-\epsilon$ 湍流模型结合组分输运方程模拟道路中央有绿化带街道峡谷内的尾气扩散过程, 模拟结果与风洞试验数据对比吻合较好. 分析发现, 有绿化带街道峡谷内存在一个围绕树冠的顺时针旋涡, 旋涡中心略偏向右上方, 背风面污染物浓度显著增大, 较无绿化带的污染物平均浓度增长 46.0%. 进一步模拟了不同绿化带树冠高度情况下街道峡谷内流场与浓度场, 发现随着树冠位置的上升, 峡谷内流场旋涡中心逐步上移且偏向迎风建筑物, 峡谷内整体气流速度下降, 污染物浓度逐步升高, 树冠底部高度为 8 m 时其污染物浓度可达 4 m 时的 2 倍多; 尤其是当树冠顶部超过屋顶高度时, 峡谷内污染物总体浓度增长迅速.

关键词: 街道峡谷; 绿化带; 多孔介质; 污染物扩散; 数值模拟

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0532-07

Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon

XU Wei-jia^{1,2,3}, XING Hong², YU Zhi^{2,3}

(1. Institute of Advanced Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Institute of Dongguan-Sun Yat-sen University, Dongguan 523808, China)

Abstract: The effect feature of greenbelt on flow field and pollutant dispersion in urban street canyon was researched. The greenbelt was assumed as uniform porous media and its aerodynamics property defined by the pressure loss coefficient. Subsequently, the pollutant dispersion in the street canyon of which there was greenbelt in the middle was simulated with the steady-state standard $k-\epsilon$ turbulence model and species transport equation. The simulated results agreed well with the wind-tunnel data. Compared with the treeless case, it finds that the street canyon contain a clockwise vortex, the pollutant concentration of the leeward was several times than the windward and the growth rate of pollutant concentration was 46.0%. The further simulation for the impact of tree crown position on the airflow and pollutant dispersion finds that the height of major vortex center in the street canyon increases with the height of tree crown and gradually closes the top of windward building. This causes that the average wind speed in the street canyon decreases. Especially when the top of tree crown over the roof and hinder the air flow above the street canyon, the average pollutant concentration increases with the height of tree crown rapidly.

Key words: street canyon; greenbelt; porous media; pollutant dispersion; numerical simulation

随着城市机动车保有量的逐渐增大, 城市中心区域交通堵塞问题日益严重, 与此同时, 城市中心区域的高楼大厦不断增多, 街道峡谷机动车污染问题已经成为城市大气污染的重要特征. 街道峡谷由于其特定的几何结构, 对机动车尾气的扩散和稀释有着明显的阻碍作用^[1], 加剧了峡谷内局部区域的尾气污染, 严重影响城市居民的身体健康^[2].

目前, 街道峡谷研究主要采用风洞试验^[3]、实地测量^[4]和数值模拟^[5,6]等方法, 而数值模拟方法可以得到较高时空分辨率的速度及污染物浓度计算结果, 而且可以提供流体和扩散现象的综合信息, 因此, 数值模拟方法逐渐成为研究街道峡谷问题的重要手段. 国内外学者应用该方法对街道峡谷几何结构^[7,8]、屋顶风^[9]、热^[10,11]等因素对污染物扩散影

响均进行了较为广泛的研究, 但在道路绿化的影响方法探索还较少.

城市道路绿化是城市道路重要的组成部分, 不仅具有一定的景观作用, 还能对各类交通起到分隔引导的安全功能, 更重要的是绿色植物能改善城市整体环境质量. 相关研究表明^[12~15], 植物对大气中的 SO_2 、颗粒物、 NO_x 、 Cl_2 、F、重金属等均有一定的净化作用. 但植物净化大气的过程较为缓慢, 对于街道峡谷这类局部的污染热点, 其对污染扩散的阻碍作用可能超过净化功能所带来的效益.

收稿日期: 2011-03-16; 修订日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808181)

作者简介: 徐伟嘉(1983~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为机动车尾气排放与扩散的模拟, E-mail: xuwjia@mail.sysu.edu.cn

为此, Gromke 等^[16, 17]通过风洞试验研究道路中央有绿化带时街道峡谷内的污染物扩散, 但风洞试验受测量方法的限制, 只能得到有限的几个采样点浓度数据, 无法完整反映街道峡谷内部污染物浓度的分布及影响特征, 而应用数值模拟方法对含绿化带的街道峡谷开展数值模拟工作仍少有研究. 因此, 本研究在风洞试验的基础上, 建立绿化带多孔介质物理模型, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型结合组分输运方程模拟道路中央有绿化带街道峡谷内的尾气扩散过程, 与风洞试验数据对比验证模拟方案的可行性, 并进一步模拟了不同位置树冠的情况, 分析树冠高度对峡谷内流场与污染物浓度分布的影响特征.

1 材料与方法

1.1 风洞试验

Gromke 等^[18]在德国 Karlsruhe 大学的中性层结大气边界层风洞中进行了道路绿化带对街道峡谷内机动车尾气扩散的风洞试验, 测试段长 2 m, 宽 2 m, 高 1 m; 模型与实际街道峡谷比例为 1:150, 试验过程中风向一直与街道峡谷轴线保持垂直. 道路绿化带风洞模型参照落叶乔木空气动力学特征建立, 树冠模型高、宽、厚分别为 $2/3H$ (8 cm)、 $1/2H$ (6 cm)、 $1/3H$ (4 cm), 将树冠作为多孔介质, 采用金属骨架与合成纤维材料均匀填充的, 使得模型树冠孔隙率为 96%, 测得压力损失系数 $\lambda = 200 \text{ m}^{-1}$.

风洞中的边界层流动由入口处的涡旋发生器和地面的粗糙元共同作用产生, 来流平均风速垂直廓线符合幂指数形式, 具体如下:

$$\frac{U(z)}{U(z_{\text{ref}})} = \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}}\right)^{\alpha} \quad (1)$$

式中, $\alpha = 0.30$, z_{ref} 为建筑物高度 H ; $U(z_{\text{ref}})$ 为高度 H 处的自由来流速度, $4.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $U(z)$ 为高度 z 处的自由来流速度.

来流湍流可采用 k 与 ε 形式描述, 具体表达式如下:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \quad (3)$$

式中, k 为湍动能强度, ε 为湍流耗散率, 边界层厚度 $\delta = 0.47 \text{ m}$, 摩擦速度 $u_* = 0.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\kappa = 0.40$ 为冯卡曼常数, $C_\mu = 0.09$.

风洞试验中, 污染物浓度采用无量纲形式表达, 具体如下:

$$K_c = \frac{c_m H U_H}{Q_l} = \frac{c_m H U_H}{Q/l} \quad (4)$$

式中, K_c 为无量纲浓度, c_m 为测量浓度 (质量分数), H 为建筑物高度 (m), U_H 为高度 H 处的风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), Q_l 为线源单位长度排放率 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), Q 为线源体排放率 ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), l 为线源长度.

1.2 多孔介质

树木是由树叶、枝干和主干组成的一个复杂结构. 当气流经过这种粗糙结构时, 其表面对空气流动产生明显的拖曳作用, 可导致空气流动速度迅速减小, 其影响范围可达到 4 倍树木高度. 通常情况下往往采用更容易获得的体积系数, 即孔隙率来代替表面积密度进行描述. 假设树木所覆盖的体积为 V , 其树叶与枝干所占体积为 V_0 , 树木的孔隙率为 $P = 1 - V_0/V$ ^[19, 20].

树冠具有很大的孔隙率且孔隙之间相互连通, 可将其假设为一个均匀的多孔介质体^[21, 22]. 其对空气流动的阻碍作用, 可采用流体通过树冠两侧的压力损失系数来描述, 即在强制流动条件下, 测量多孔介质上游静压与下游静压的差值, 并采用动压和多孔介质厚度进行规格化得到^[17], 具体表达式:

$$\lambda = \frac{\Delta p_{\text{stat}}}{\rho_{\text{dyn}} d} = \frac{p_{\text{windward}} - p_{\text{leeward}}}{(1/2)\rho u^2 d} \quad (5)$$

式中, Δp_{stat} 为强制对流条件下多孔介质上游流场和下游流场静态压力差, p_{dyn} 为动压, u 为平均流动速度, d 为沿流动方向的多孔介质厚度.

1.3 数值模拟

1.3.1 模拟对象

风洞试验中, 街道峡谷长高比 (L/H) 为 10:1, 来流一直保持垂直于街道峡谷轴线, 树冠模型紧密地连接并贯穿整个街道峡谷模型, 街道峡谷中部能够保持良好的二维特性^[19]. 为避免边界对真实流场的可能干扰, 选取了长 (x 轴正方向) 432 m, 高 (y 轴正方向) 108 m 的二维区域进行数值模拟, 道路两侧建筑高度与宽度均为 $18 \text{ m} \times 18 \text{ m}$, 与风洞试验模型比例为 1:150 的实际街道峡谷尺寸相同. 其中背风面建筑距入口 108 m (即 $6H$), 迎风面建筑距出口 276 m ($14H$), 计算区域采用 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 四边形结构化网格.

参照风洞试验相关参数, 树冠区域设置为多孔介质, 树冠高度为 $2/3H$ (12 m), 宽度为 $1/2H$ (9 m), 距两侧建筑物均为 $1/4H$ (4.5 m), 树冠底部 (即最低处树叶到地面的距离) 距路面 $1/3H$ (6 m), 树冠对应孔隙率 96% 的落叶乔木, 压力损失系数 $\lambda =$

200 m⁻¹; 源 A 与源 B 分别代表街道峡谷内的背风面与迎风面车道,如图 1 所示.

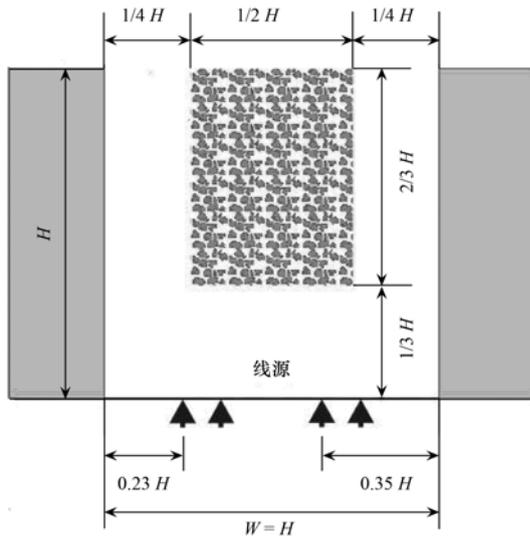


图 1 树冠与线源设置示意
Fig. 1 Sketch map of setup of cross and line source

1.3.2 控制方程和边界条件

将空气视为不可压流体,湍流模型采用稳态二维 $k-\epsilon$ 两方程模型,污染物扩散采用组分输运方程^[23]. FLUENT 对于多孔介质区域的流体运动,采用在动量方程中加入一个动量源项的方法来考虑多孔介质对流体运动的阻碍作用,具体表达式为^[24]:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^2 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^2 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (6)$$

式中, S_i 为动量第 i 方向的源项, μ 为动力粘性系数, v_j 为第 j 方向的流动速度, $|v|$ 为标量速度; D 和 C 为系数矩阵. 该动量源项由两部分组成,第一部分为粘性损失项,第二部分为惯性损失项. 由于树冠孔隙率很大,模拟中的空气流动属于高雷诺数流动,故忽略粘性损失,将压力损失系数 λ 代入惯性损失项的系数矩阵 C (均匀多孔介质各向同性).

入口风速采用指数型速度边界条件 $u(y) = 4.65(y/18)^{0.3}$, 湍流分布如风洞试验来流湍流表达式(2)和(3)所示,并采用 FLUENT 内 UDF 函数模拟. 计算域顶部为自由流且远离街道峡谷顶部,采用对称边界条件; 出流边界远离街区,采用充分发展边界条件; 地面和建筑物表面采用无滑移速度边界条件. 控制方程离散格式采用二阶迎风差分格式,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法,方程采用商业 CFD 软件包 FLUENT6. 1. 22™ 求解.

2 结果与分析

2.1 模型验证

为研究有绿化带街道峡谷内机动车尾气污染的特征,模拟了源 A 和源 B 都有均匀排放时街道峡谷内污染物的扩散,流场与无量纲浓度场分布如图 2 所示,浓度采用风洞试验的无量纲形式[详见式(4)].

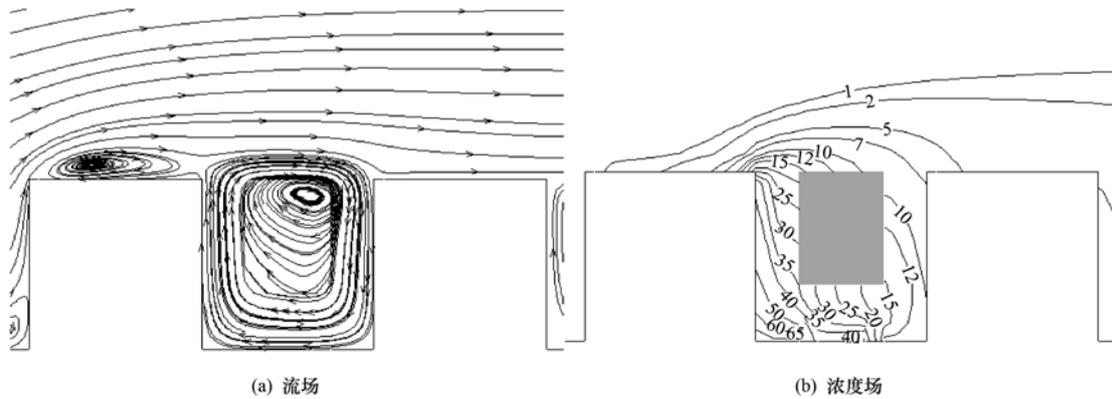


图 2 有绿化带街道峡谷内流场与无量纲浓度场
Fig. 2 Flow field and dimensionless concentration field of street canyon with greenbelt

如图 3 所示,取街道峡谷迎风面与背风面的模拟结果与风洞试验数据进行对比,数值模拟略有高估迎风面污染物浓度,略微低估背风面污染物浓度,模拟结果与风洞试验结果总体趋势一致. 因此,采用二维 $k-\epsilon$ 两方程模型与组分输运方程,并将树冠作为多孔介质的计算方案可以较好地模拟有绿化带街道峡谷内污染物的扩散.

2.2 绿化带对街道峡谷的影响

如图 2(a) 所示,在屋顶来流的作用下,街道峡谷内形成了一个围绕树冠的顺时针主旋涡,该旋涡主导了整个峡谷内的气流运动,同时受树冠的影响,旋涡中心略偏向右上方; 如图 2(b) 所示,街道峡谷底部污染物沿旋涡方向输送,并在背风面建筑物底部堆积,使背风面建筑附近污染物浓度明显高于迎

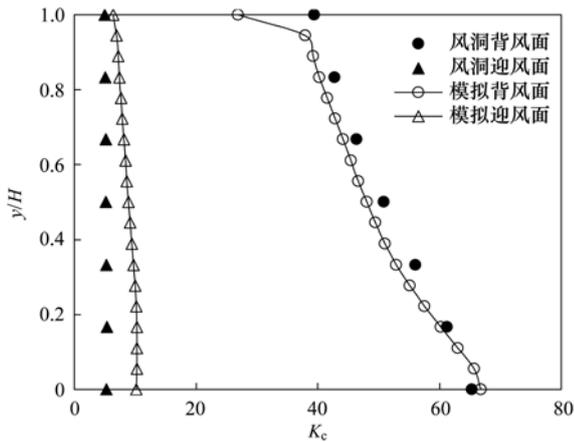


图3 风洞试验与数值模拟的无量纲浓度对比

Fig.3 Comparison of dimensionless concentrations between wind tunnel experiment and numerical modeling

风面. 为进一步分析道路绿化对街道峡谷内机动车尾气扩散的影响,对相同建筑几何及气象条件下,无绿化带街道峡谷内的尾气扩散进行了模拟. 如图4所示,有绿化带街道峡谷背风面污染物平均浓度增长46.0%,且底部污染物浓度增长更为突出;而迎风面除底部污染物浓度略有增大外,迎风面污染物整体浓度变化不大.

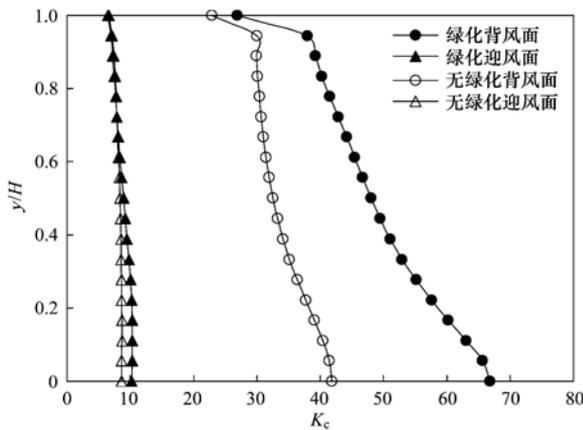


图4 有绿化与无绿化街道峡谷无量纲浓度对比

Fig.4 Comparison of dimensionless concentrations between street canyon with greenbelt and without greenbelt

街道峡谷内风速是影响机动车尾气扩散能力的主要因素,因此分析街道峡谷内风速有利于深入揭示绿化带对峡谷内污染物扩散的影响特征. 如图5(a)所示,有绿化带与无绿化带街道峡谷内迎风面风速均高于背风面,这主要是由于迎风建筑对屋顶来流的剪切作用,使气流沿迎风面下洗,驱动空气流动,在峡谷内产生一个顺时针旋涡. 有绿化带的街道峡谷内迎、

背风面风速均较无绿化带街道峡谷大幅下降,且迎风面风速下降更为明显;迎风面建筑与背风面建筑屋顶的入流与出流风速也呈现大幅下降,这将明显降低街道峡谷与外部大气的空气交换率.

根据相关研究成果^[25],街道峡谷中气态污染物的输送通常依赖于屋顶高度空气的垂直交换率和交叉口处空气的水平交换率. 因此,有绿化带的街道峡谷通过外界大气来清除污染物的能力将明显下降. 街道峡谷内近地面风速直接影响着道路上机动车尾气的扩散与稀释,为此选取了街道峡谷内距地面1.5 m高度处的风速进行分析[图5(b)]. 分析发现2种情况下均是街道峡谷中部的风速最大,有利于道路上机动车排放尾气的扩散,但有绿化街道峡谷底部的平均风速明显较低,尤其是中部风速仅为无绿化带街道峡谷风速的一半左右,导致街道峡谷底部空气质量进一步的恶化.

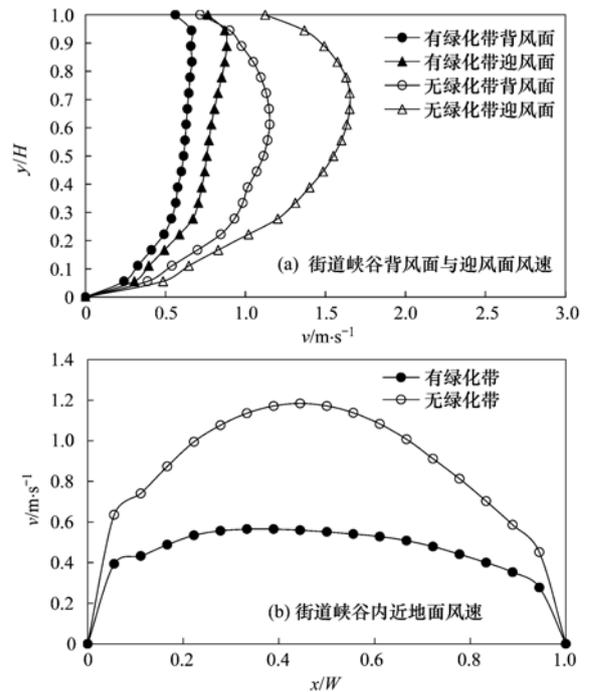


图5 有绿化带与无绿化带街道峡谷内风速对比

Fig.5 Comparison of wind speed between street canyon with greenbelt and without greenbelt

2.3 树冠位置对街道峡谷的影响

为进一步分析道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响规律,采用验证的计算方案模拟绿化带树冠底部高度变化情况下(即最低处树叶到地面的距离:4、5、7和8 m)街道峡谷内的气流运动与污染物扩散. 流场与无量纲浓度场分布如图6和7所示,浓度采用风洞试验的无量纲形式[详见式(4)].

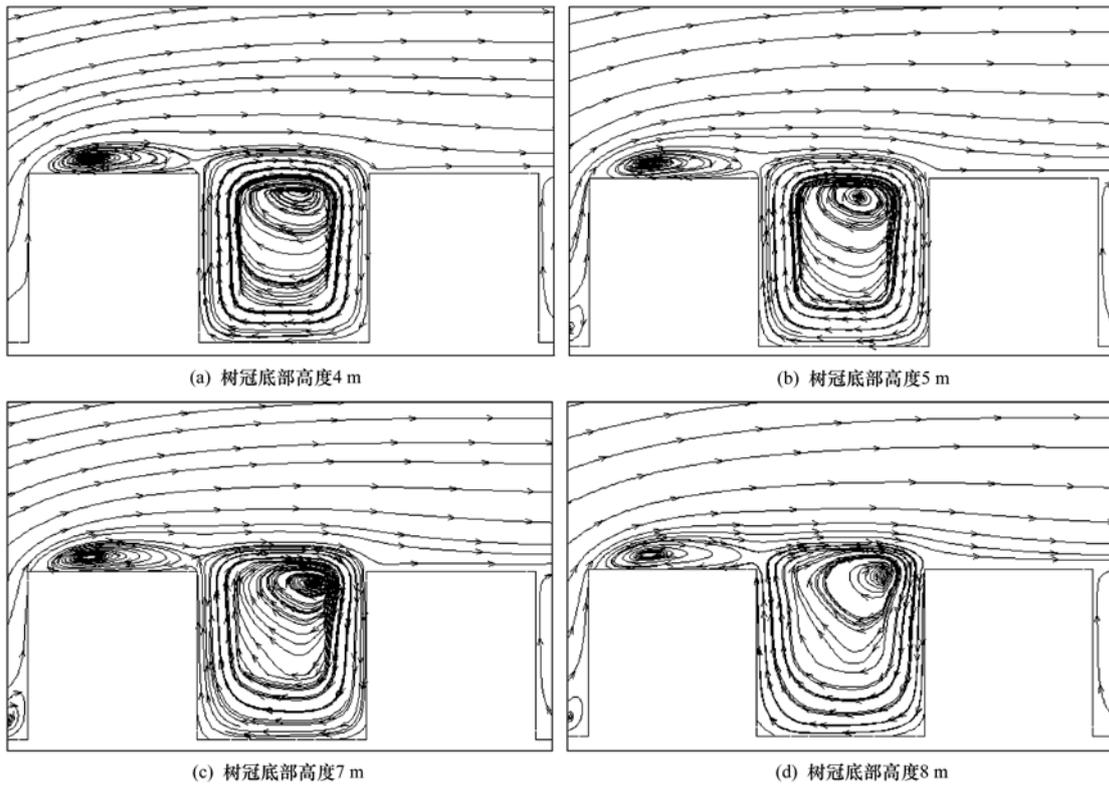


图 6 不同树冠高度街道峡谷内流场

Fig. 6 Flow field of street canyon with greenbelt of different heights of crown

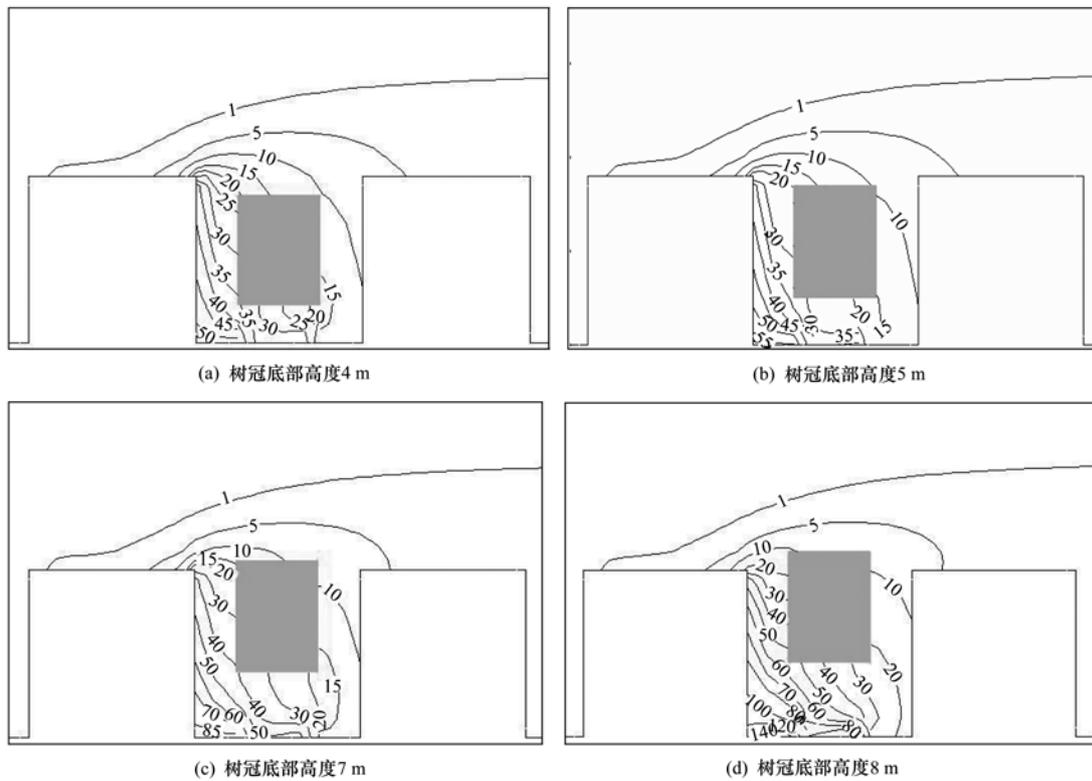


图 7 不同树冠高度街道峡谷内无量纲浓度场

Fig. 7 Dimensionless concentration field of street canyon with greenbelt of different heights of crown

如图 6 和图 2(a) 所示, 不同绿化带树冠位置情况下, 峡谷内仍保持一个顺时针主旋涡, 且旋涡中心位于树冠右上角附近. 随着树冠位置的上升, 旋涡中心有向右上方移动的趋势. 树冠顶部不超过屋顶 (即树冠底部高度为: 4、5 和 6 m) 时, 峡谷内气流围绕树冠顺时针流动, 迎风面与背风面流线对称性较好; 当树冠顶部超过屋顶时 (即树冠底部高度为: 7 m 和 8 m), 主旋涡中心明显偏向迎风面, 使得迎风面空气下洗通道受到挤压, 导致峡谷对外空气交换能力明显下降.

如图 7 与图 2(b) 所示, 在顺时针主旋涡的作用下, 污染物向背风面输送, 并在背风面建筑底部积累. 随着树冠位置的上升, 峡谷内污染物整体浓度逐步增长. 尤其是背风侧建筑底部, 在树冠底部高度为 8 m 时其污染物浓度可达 4 m 时的 2 倍多, 但树冠位置对屋顶高度的污染物浓度影响不大.

如图 8 所示, 背风面污染物平均浓度高于迎风面, 树冠顶部不超过屋顶高度时, 背风面污染物浓度随着树冠底部高度增大而缓慢增长, 超过屋顶后污染物浓度迅速上升; 迎风面污染物浓度受树冠位置影响不明显, 但当树冠底部高度为 8 m 时, 污染物浓度亦有一定上升, 这与前面发现的峡谷内旋涡中心右移, 挤压气流下洗通道的分析相一致 [图 6(a)].

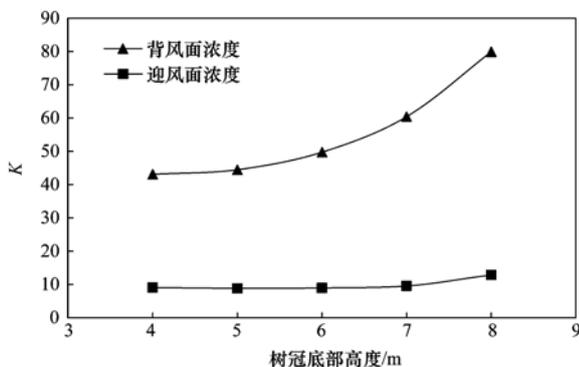


图 8 不同树冠高度峡谷内污染物浓度变化趋势

Fig. 8 Variation trend of pollutant concentration of street canyon with greenbelt of different heights of crown

如图 9 所示, 背风面平均风速随树冠位置上升而下降, 并呈现出加速下降的趋势; 迎面风平均风速在树冠底部高度为 5 m 时略有上升, 但树冠底部高度进一步增长时, 风速开始迅速下降; 峡谷底部平均风速亦呈逐步下降趋势. 街道峡谷内平均风速随着绿化带树冠位置的升高总体呈下降趋势, 导致峡谷与外界空气交换率下降, 从而出现峡谷内污染物浓度 (图 8) 随绿化带树冠底部高度上升而增大.

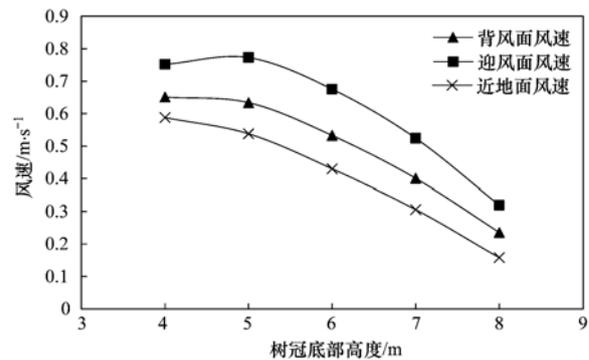


图 9 不同树冠高度峡谷内风速变化趋势

Fig. 9 Variation trend of wind speed of street canyon with greenbelt of different heights of crown

3 结论

(1) 采用稳态 $k-\varepsilon$ 湍流模型结合组分输运方程模拟道路中央有绿化带街道峡谷内的尾气扩散过程, 模拟结果与风洞试验数据进行了对比, 吻合较好.

(2) 有绿化带街道峡谷内存在一个围绕树冠的顺时针旋涡, 该旋涡主导了整个峡谷内的气流运动, 旋涡中心略偏向右上方, 污染物沿旋涡方向输送, 在背风面建筑物底部堆积, 使得峡谷内背风面污染物浓度明显高于迎风面.

(3) 绿化带的存在使得峡谷内风速明显下降, 背风面与峡谷底部污染物浓度明显增大, 而对迎风面污染物浓度影响不大, 因此, 绿化带可导致峡谷内总体污染水平的明显上升.

(4) 绿化带树冠底部高度增大, 导致旋涡中心逐步上移且偏向迎风建筑物, 峡谷内整体风速下降, 污染物整体浓度逐步增长. 当树冠顶部超过屋顶高度, 直接阻碍峡谷上方空气流动时, 峡谷内风速下降迅速, 污染物浓度迅速上升.

致谢: 感谢德国卡尔斯鲁厄大学的 Gromke 等提供的试验方案和试验结果.

参考文献:

- [1] N'Riain C M, Fisher B, Martin C J, et al. Flow field and pollution dispersion in a central London street [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, 52 (1-2): 299-314.
- [2] Tsai M Y, Chen K S. Measurements and three-dimensional modeling of air pollutant dispersion in an Urban Street Canyon [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(35): 5911-5924.
- [3] Kastner-Klein P, Plate E J. Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons [J]. Atmospheric Environment, 1999,

- 33(24-25): 3973-3979.
- [4] Xie X M, Wang J S, Huang Z. Traffic emission transportation in street canyons [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2009, **21** (1): 108-117.
- [5] 徐伟嘉, 余志, 蔡铭, 等. 街道峡谷内不同车道污染物扩散的数值模拟 [J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(8): 1007-1012.
- [6] Chan T L, Dong G, Leung C W, *et al.* Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36** (5): 861-872.
- [7] Assimakopoulos V D, Apsimon H M, Moussiopoulos N. A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(29): 4037-4049.
- [8] Li X X, Liu C H, Leung D Y C. Numerical investigation of pollutant transport characteristics inside deep urban street canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(15): 2410-2418.
- [9] Kim J J, Baik J J. Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2003, **91**(3): 309-329.
- [10] Kim J J, Baik J J. A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38**(9): 1249-1261.
- [11] 胡伟, 钟秦. 壁面加热作用对街道峡谷污染物扩散的影响 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(9): 908-913.
- [12] 鲁敏, 李英杰, 鲁金鹏. 绿化树种对大气污染物吸收净化能力的研究 [J]. *城市环境与城市生态*, 2002, **15**(2): 7-9.
- [13] 王爱霞, 张敏, 黄利斌, 等. 南京市 14 种绿化树种对空气中重金属的累积能力 [J]. *植物研究*, 2009, **29**(3): 368-374.
- [14] 薛皎亮, 谢映平, 李景平, 等. 太原市空气中硫污染物在植物体内积累的研究 [J]. *城市环境与城市生态*, 2001, **14** (1): 47-49.
- [15] 殷杉, 蔡静萍, 陈丽萍, 等. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益 [J]. *生态学报*, 2007, **27** (11): 4590-4595.
- [16] Gromke C, Ruck B. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(16): 3287-3302.
- [17] Gromke C, Ruck B. On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, **131**(1): 19-34.
- [18] Gross G. A numerical study of the air flow within and around a single tree [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1987, **40** (4): 311-327.
- [19] Ries K, Eichhorn J. Simulation of effects of vegetation on the dispersion of pollutants in street canyons [J]. *Metorologische Zeitschrift-Berlin*, 2001, **10**(4): 229-233.
- [20] 仵彦卿. 多孔介质污染物迁移动力学 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007. 38-44.
- [21] 贝尔, 李竞生, 陈崇希. 多孔介质流体动力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [22] Hunter L J, Watson I D, Johnson G T. Modelling air flow regimes in urban canyons [J]. *Energy and Buildings*, 1990-1991, **15-16**(3-4): 315-324.
- [23] Huang H, Akutsu Y, Arai M, *et al.* A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34** (5): 689-698.
- [24] Ansys. Fluent. 6. 2 user's manual [M]. NH: Ansys Ltd, 2005.
- [25] Liu C H, Leung D Y C, Barth M C. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(9): 1567-1574.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i>	(337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i>	(342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i>	(346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i>	(352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i>	(359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i>	(370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i>	(379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i>	(385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i>	(393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui	(399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i>	(407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i>	(412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i>	(421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo	(448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i>	(454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i>	(459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi	(469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai	(476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i>	(481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming	(488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i>	(495)
Biosorption of Chromium (VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i>	(499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i>	(505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i>	(511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i>	(518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong	(525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi	(532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i>	(539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i>	(545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i>	(551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i>	(565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i>	(574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i>	(580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i>	(587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i>	(592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i>	(599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i>	(606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i>	(612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i>	(618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i>	(625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i>	(633)
Detection of <i>Proocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i>	(640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i>	(647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG YA-lei, <i>et al.</i>	(652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i>	(658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i>	(665)

《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2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 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@reeces. 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@reeces. 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