

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

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

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究 吴起鑫, 韩贵琳 (2145)

成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建 岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)

太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)

环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)

南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布 张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)

青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征 刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)

城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)

基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)

浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究 高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)

福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析 李雪丁 (2210)

HSPF 水文水质模型应用研究综述 李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)

城市降雨径流模拟的参数不确定性分析 黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)

利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度 姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)

嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定 谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)

重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)

南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)

宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)

影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)

大型底栖动物生物评价指数比较与应用 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)

青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征 王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)

青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)

用物理-生态集成技术局部控制富营养化 李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)

太湖氮素出入湖通量与自净能力研究 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)

富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应 袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)

巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)

南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究 方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)

东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究 林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)

嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)

电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源 王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)

基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)

渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)

崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)

白洋淀底泥重金属形态及竖向分布 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)

西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究 刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)

氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制 刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)

Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性 张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)

声电氧化处理扑热息痛的研究 戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)

粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究 白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)

利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究 张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)

Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究 王小蓉, 吴平霄 (2432)

核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究 武国正, 徐宗学 (2438)

A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究 翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)

系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究 蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)

氧化还原介体催化强化 *Paracoccus versutus* 菌株 GW1 反硝化特性研究 李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)

1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析 刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)

蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化 秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)

双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放特征及品种筛选研究 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜 (2475)

闽江河口短叶茳芰湿地 CH₄ 和 N₂O 排放对氮输入的短期响应 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)

青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征 彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)

不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)

土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)

多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应 潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)

不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究 梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)

废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究 伊元荣, 韩敏芳 (2522)

中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析 卢愿清, 史军 (2528)

《环境科学》征稿简则(2431) 《环境科学》征订启事(2532) 信息(2157, 2271, 2367, 2418)

核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究

武国正, 徐宗学*

(北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 采用 EFDC 水动力-水质模型对咸宁核电站低放射性废水在封闭型水体富水水库中的输移过程进行了数值模拟, 重点分析了富水水库在不利来水条件下(97% 保证率), 4 台机组同时运行时, 低放射性废水中 6 种不同半衰期核素在水库中的浓度分布情况。结果表明, 低放射性废水浓度的分布主要受水库流场分布的影响, 浓度变化主要受核素半衰期及来水量多寡的影响; 同时, 随着核素半衰期的延长, 低放射性废水在水库中的影响范围逐渐增大, 当半衰期延长到 5 a 以上时, 影响范围趋于稳定; 此外, 由于水库流场流向下游的大坝处, 排水口的水流很难回流到上游的取水口处, 因此取水口处的水质不受下排水口低放射性物质回流的影响。

关键词: 核电站; 低放射性废水; 封闭水体; 输移规律; 数值模拟

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2438-06

Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body

WU Guo-zheng, XU Zong-xue

(Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The transport processes of low-level radioactive liquid effluent of Xianning nuclear power station in the closed water body Fushui Reservoir are simulated using the EFDC model. Six nuclides concentration distribution with different half-lives in the reservoir are analyzed under the condition of 97% guarantee rate incoming water and four-running nuclear power units. The results show that the nuclides concentration distribution is mainly affected by the flow field of the reservoir and the concentration is decided by the half-lives of nuclide and the volume of incoming water. In addition, the influence region is enlarged as increasing of half-life and tends to be stable when the half-life is longer than 5 years. Moreover, the waste water discharged from the outlet of the nuclear power plant has no effect on the water-intake for the outlet located at the upstream of the water-intake and the flow field flows to the dam of the reservoir.

Key words: nuclear power station; low-level radioactive liquid effluent; closed water body; transportation; numerical modeling

核电是世界公认的安全、清洁、高效的能源^[1], 它与水电、火电一起构成了电力能源三大支柱, 在世界能源结构中占有重要地位。在大力发展核电的同时, 其放射性物质泄漏和低放射性废水排放是最值得关注的问题。一旦核电站发生泄漏或低放射性废水超标, 将会给核电站周边的生态环境带来严重的影响, 直接威胁到民众和生态的健康。

出于安全考虑, 目前全世界的核电站多数建在海边, 核电站运行过程中所产生的带有放射性物质的废水经过处理后均排入了海洋, 因此对低放射性废水的研究也多集中于海岸。如潘萌^[2]、陈家军^[3]、张俊丽^[4]、Periáñez^[5,6]等分别对核电站放射性核素在接纳海水的迁移扩散规律进行了研究, 取得了较好的模拟效果。目前我国已建成的几座核电站也均位于海岸附近。随着核电事业的迅速发展, 我国内地也将逐步开始建设数座核电站。与近海建站的情况不同, 内陆核电站的放射性废水一般都排放到江河湖库中, 其影响程度与范围比沿海更深、更广, 一旦

发生核事故, 带来的危害更大, 后果更为严重。因此, 内陆核电站低放射性废水在接纳水体中的迁移扩散规律研究就成为了核电站建设及运行的重要组成部分。

本研究采用美国环保署(EPA)重点推荐的水动力-水质模型 EFDC (The Environmental Fluid Dynamics Code) 对我国内陆拟建的咸宁核电站低放射性废水在其接纳水体——富水水库中的迁移扩散过程进行数值模拟。重点分析 97% 保证率来水情况时(不利情况), 4 台机组同时运行条件下, 不同半衰期核素在接纳水体中的影响范围和浓度变化趋势, 以期为该核电站建设的环境影响评价提供理论依据和技术支持。

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2012-02-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-001)

作者简介: 武国正(1980~), 男, 博士后, 主要研究方向为水质模拟及水体富营养化生态动力学过程模拟, E-mail: wgz08@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

1 模型原理

1.1 模型介绍

EFDC 模型是由威廉玛丽大学海洋学院维吉尼亚海洋科学研究所的 Hamrick^[7] 开发的综合性水动力-水质模型, 可实现河流、湖泊、水库、湿地、河口、海湾以及海洋等水体的一、二、三维水动力和水质模拟, 是一个多参数有限差分模型. 模型包括水动力、水质、有毒物质、底质、风浪和泥沙六大模块, 用于模拟地表水流场、物质输移 (包括水温、盐分、示踪剂、粘性和非粘性泥沙) 以及水体富营养化等过程. 由于其强大的模拟功能, 目前该模型已在数百个水体中得到了应用.

1.2 控制方程

EFDC 模型水动力学方程是基于三维不可压缩的、变密度紊流边界层方程组, 包括动量方程、连续方程和物质输移方程. 为了便于处理由于密度差而引起的浮升力项, 常常采用 Boussinesq 假设^[8]. 在水平方向上采用曲线正交坐标变换和在垂直方向上采用 σ 坐标变换, 经过这 2 种变换后的控制方程如下.

动量方程:

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHuu) + \partial_y(m_xHvu) + \\ & \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv \\ = & -m_y H \partial_x (g\zeta + p) - m_y (\partial_x h - z\partial_x H) \partial_z p + \\ & \partial_z (mH^{-1}A_v \partial_z u) + Q_u \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \\ & \partial_z(mwv) + (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu \\ = & -m_x H \partial_y (g\zeta + p) - m_x (\partial_y h - z\partial_y H) \partial_z p + \\ & \partial_z (mH^{-1}A_v \partial_z v) + Q_v \end{aligned} \quad (2)$$

$$\partial_z p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (3)$$

连续方程为:

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (4)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_yH \int_0^1 u dz) + \partial_y(m_xH \int_0^1 v dz) = 0 \quad (5)$$

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (6)$$

物质输移方程为:

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHc) + \partial_x(m_yHuc) + \partial_y(m_xHvc) + \\ & \partial_z(mwc) = \partial_z (mH^{-1}A_b \partial_z c) + Q_c \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHT) + \partial_x(m_yHuT) + \partial_y(m_xHvT) + \\ & \partial_z(mwT) = \partial_z (mH^{-1}A_b \partial_z T) + Q_T \end{aligned} \quad (8)$$

式中, u, v, w 为边界拟合正交曲线坐标 x, y, z 方向上的水平速度分量; m_x, m_y 为水平坐标变换尺度因子; $m = m_x m_y$ 为度量张量行列式的平方根; A_v 为垂向紊动黏滞系数; A_b 为垂向紊动扩散系数; f 为科里奥利系数; p 为压力; ρ 为混合密度; ρ_0 为参考密度; c 为低放射性废水浓度; Q_u, Q_v 为动量的源汇项; Q_c 为低放射性废水的源汇项; Q_T 为温度的源汇项.

在各种系数已知的条件下, 联立公式 (1) ~ (8), 可以解出 u, v, w, p, ρ, c, T 和 ζ 这 8 个变量.

经过 σ 坐标变换后沿垂方向 z 的速度 w 与坐标变换前的垂向速度 w^* 间的关系为:

$$\begin{aligned} w = & w^* - z(\partial_t \zeta + um_x^{-1} \partial_x \zeta + vm_y^{-1} \partial_y \zeta) + \\ & (1 - z)(um_x^{-1} \partial_x h + vm_y^{-1} \partial_y h) \end{aligned} \quad (9)$$

$H = h + \zeta$ 为总水深, 是坐标变换前垂向坐标相对于 $z = 0$ 的平均水深 h 与自由水面波动 ζ 之和. 式 (5) 是由式 (4) 得到的沿深度积分的连续性方程, 积分时利用了垂向边界条件 $z = 0$ 和 $z = 1$ 处 $w = 0$.

1.3 紊流闭合模型

控制方程组中紊动黏性系数 A_v 和紊动扩散系数 A_b 由下式确定:

$$\begin{aligned} A_v = & \varphi_v ql = 0.4(1 + 36R_q)^{-1} \cdot \\ & (1 + 6R_q)^{-1} (1 + 8R_q) ql \end{aligned} \quad (10)$$

$$A_b = \varphi_b ql = 0.5(1 + 36R_q)^{-1} ql \quad (11)$$

$$R_q = \frac{gH\partial_z b}{q^2} \frac{l^2}{H^2} \quad (12)$$

式中, q^2 为紊动强度, l 为紊动长度, R_q 为 Richardson 数, φ_v 和 φ_b 是稳定性函数, 用来分别确定稳定和 non-stable 垂向密度分层条件下水体的垂直混合或运输的增减, 其中紊动强度和紊动长度由以下一组输移方程来确定.

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHq^2) + \partial_x(m_yHuq^2) + \partial_y(m_xHvq^2) + \\ & \partial_z(mwq^2) = \partial_z (mH^{-1}A_q \partial_z q^2) + Q_q \\ & + 2mH^{-1}A_v [(\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2] + \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & 2mgA_b \partial_z b - 2mH(B_1 l)^{-1} q^3 \\ & \partial_t(mHq^2 l) + \partial_x(m_yHuq^2 l) + \partial_y(m_xHvq^2 l) + \\ & \partial_z(mwq^2 l) = \partial_z (mH^{-1}A_q \partial_z q^2 l) + Q_l \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & + mH^{-1}E_1 A_v [(\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2] + \\ & mgE_1 E_3 l A_b \partial_z b - mHB_1^{-1} q^3 [1 + E_2 (\kappa L)^{-2} l^2] \\ & L^{-1} = H^{-1} [z^{-1} + (1 - z)^{-1}] \end{aligned} \quad (15)$$

式中, B_1, E_1, E_2, E_3 均为经验常数, Q_q 和 Q_l 为附加的源汇项, 如子网格水平扩散, 一般说来, 垂直扩散

系数 A_q 与垂直紊动黏滞系数 A_v 相等。

1.4 数值求解方法

上述方程组中,方程(1)、(2)和(4)采用二阶精度有限差分法求解,其水平方向采用交错网格离散^[9].时间积分采用三时间层格式的二阶精度有限差分法,将求解过程分为内模式和外模式,即把自由表面重力波和内切力分裂求解^[10].外模式求解采用半隐式差分格式,同步计算2维水面高程.该模式在求解前需要采用共轭梯度法进行预处理^[11].这种求解方法允许大尺度时间步长计算,而时间步长仅受显式中心差分稳定性准则或使用非线性加速算法的高阶迎风平流算法^[12]所约束.内模式求解采用考虑垂向扩散的隐式差分格式^[13].

三时间层、分步算法解决了物质输移方程中速度、 q^2 和 q^2l 的求解问题^[14].为了使数值扩散达到最小,模型采用了多维正有限平流迁移算法^[15,16].这种算法在空间上采用一阶精度,在时间上采用二阶精度.

2 模型构建及流场验证

2.1 研究区概况

咸宁核电站拟建于湖北省咸宁市通山县城东北的大畈镇大勘村狮子岩,地理坐标为东经 $114^{\circ}41'00''$ 、北纬 $29^{\circ}40'50''$.核电站采用美国西屋公司研发的 AP1000 核电机组,规划装机4台机组,单机额定功率1250 MW.核电站取水水源为富水水库,取水地点位于富水水库中段北岸,补给水泵房取水点设在龟木窝附近,排水口设在厂址下游3 km 处的库汉口(图1).

2.2 模型构建

富水水库共有4条主要支流汇入,其入流控制站分别为石航、牌楼、洪港和新屋.为了准确模拟水

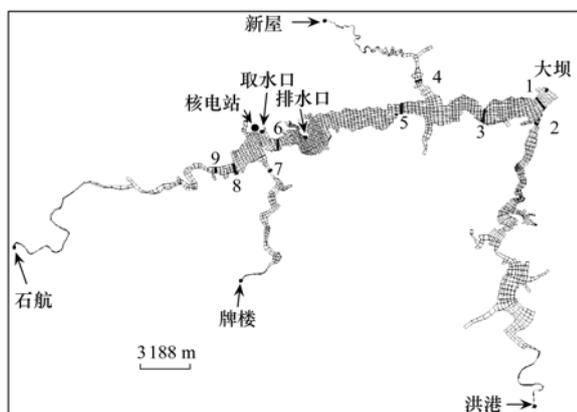


图1 富水水库入流控制断面及水文断面监测示意
Fig. 1 Inflow control sections and monitoring sections

库水动力学条件,有关部门于2006年6、7、8月针对4个人库控制站和9个库区水文监测断面进行了同步水文测验(图1),每个库区断面设3个监测点.测验项目主要有水位、水温、流速、流量、泥沙等.

根据富水水库实际地形,采用正交曲线网格对水体进行剖分,将水体划分为1982个单元格(图1),垂向上平均分层5层.模型流量条件包括4个人库控制断面的流量和大坝泄水流量.水库中的9个水文测验断面实测数据用于模型的验证.

核素在水体中的迁移转换过程主要受流场和泥沙交换的影响.由于富水水库径流含沙量低(平均含沙量为 $0.1619 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),且入库泥沙大部分沉积在入库汉口附近,这些汉口受排放废水的影响较小,因此,在本研究中忽略了泥沙吸附的影响.

2.3 流场验证

图2为水库水位实测与模拟结果对比,图3为水库内9个监测断面垂向平均流速、流向对比.从图2可以看出,模型可以充分反映水库水位的变化趋势.从实测数据及模拟结果来看,水库内流速较低,一般低于 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.通过图3不难发现,模型模拟结果可大致反映真实的流场情况;监测断面1的模拟精度较其它断面稍差,这主要是由于断面1距离大坝较近,大坝泄水导致该区域水动力场变得复杂所致.此外,地形、水库边界概化精度及监测时产生的误差也会对结果造成影响.总体而言,流场的模拟结果比较令人满意.

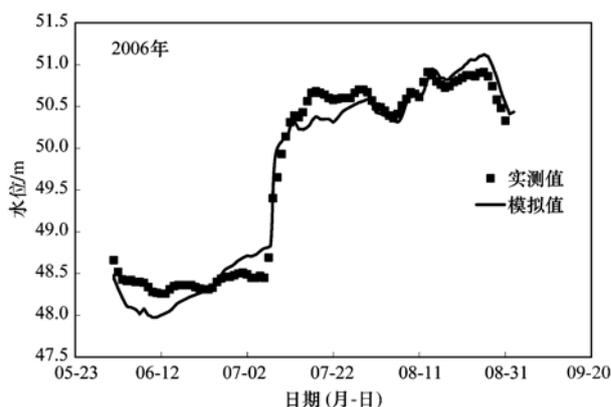
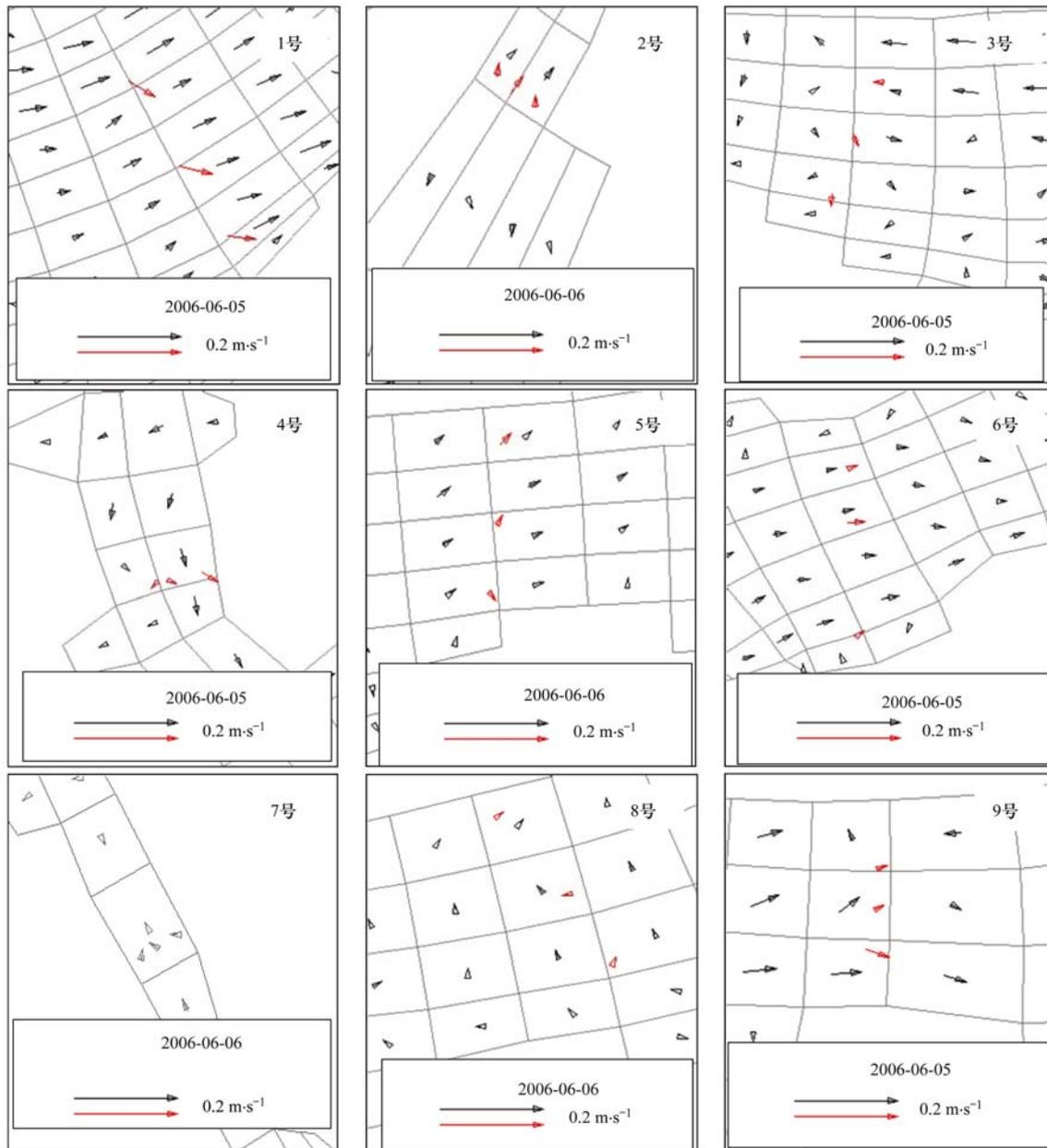


图2 库内实测水位与模拟水位比较

Fig. 2 Measured and simulated water - levels in Fushui Reservoir

3 结果与分析

本研究主要对 $P = 97\%$ 保证率来水条件下(表1)、4台机组同时运行时,低放射性废水中6种半衰期核素在富水水库中的迁移扩散规律,模拟时长为一个完整年(1月1日为第1 d).水库起始浓度设



黑色箭头表示模拟流场,红色箭头表示实测流场

图3 库内监测断面流场模拟与实测值对比

Fig. 3 Measured and simulated flow field at the monitoring sections in Fushui Reservoir

为0; 核电站低放射性废水假定为恒定排放单位浓度1; 4台机组运行时,取水口取水量为 $5.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,排水口排水量为 $1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 模拟核素的半衰期分别为1.5 h、8 d、70 d、250 d、5 a及12.3 a,相对应的衰减速率分别为 1.2836×10^{-4} 、 1.0028×10^{-6} 、 1.1461×10^{-7} 、 3.2090×10^{-8} 、 4.3959×10^{-9} 、 $1.7870 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 。

在水库入流保证率为97%时,低放物质从排放口排入水库后大约经过183 d到达水库大坝断面处.在第183 d时,不同半衰期核素垂向平均浓度分

布情况见图4,不同浓度的等值线包络面积统计信息如表2所示。

从图4和表2可以看出,不同半衰期核素浓度分布差别较大.随着核素半衰期的增加,水库下游的放射性物质浓度也不断升高.当半衰期为1.5 h时,浓度 >0.001 的包络面积仅为 0.101 km^2 ,当半衰期增加到8 d时,浓度 >0.001 的包络面积迅速增加到 10.082 km^2 ,而当半衰期 $\geq 70 \text{ d}$ 时,浓度 >0.001 、 0.005 和 0.01 的包络面积基本趋于稳定,达到了 20 km^2 左右;半衰期在250 d以上时,浓度 >0.02 的

表 1 97%保证率下富水水库出、入流量统计/ $m^3 \cdot s^{-1}$

Table 1 Inflows and outflows of Fushui Reservoir under 97% guarantee rate incoming water/ $m^3 \cdot s^{-1}$

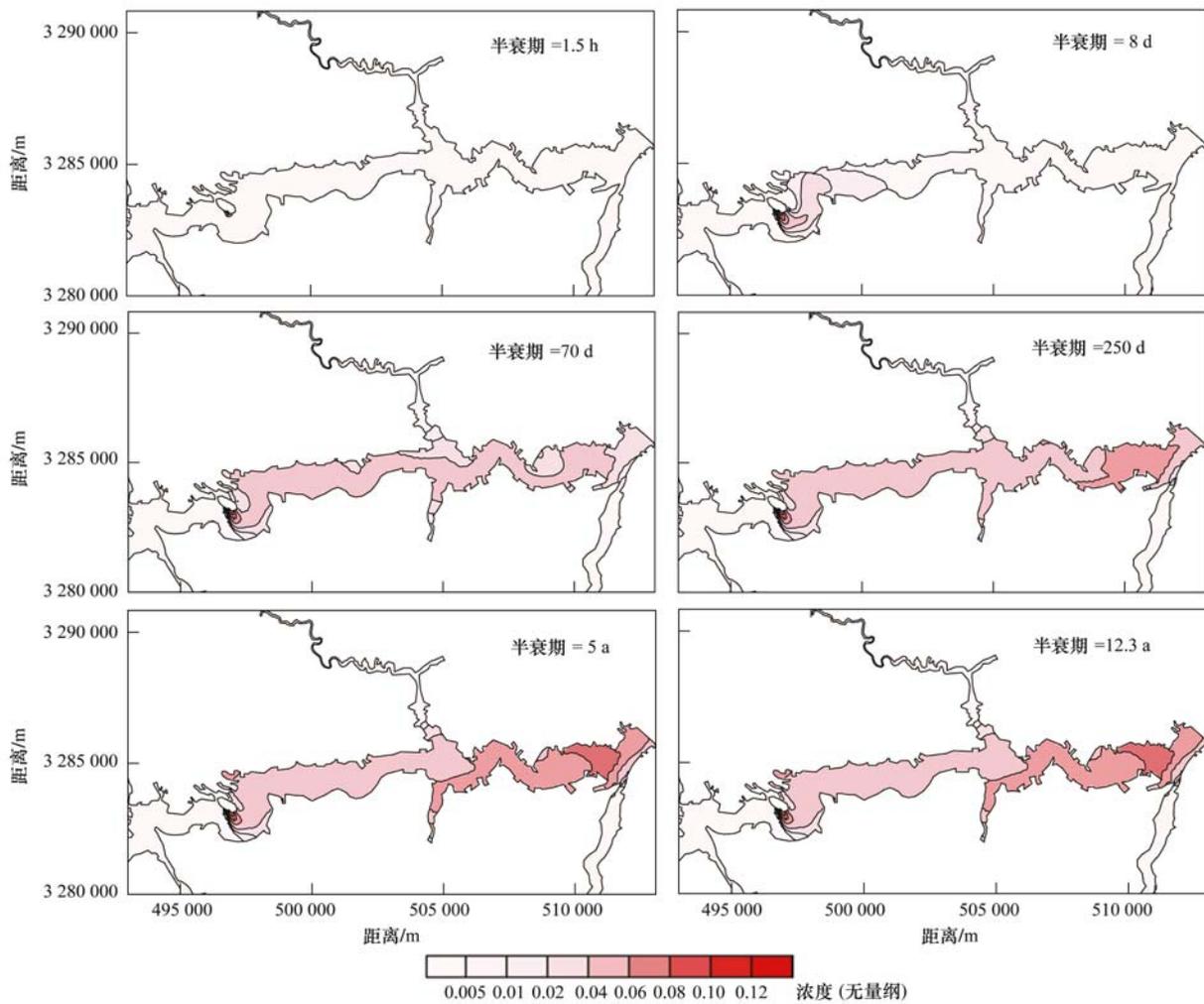
月份	总入库流量	入库流量				发电流量
		石航	牌楼	洪港	新屋	
1	6.13	2.51	1.84	1.59	0.18	11.42
2	5.26	2.16	1.58	1.37	0.16	7.61
3	26.39	10.82	7.92	6.86	0.79	6.92
4	70.84	29.04	21.25	18.42	2.13	6.92
5	90.29	37.02	27.09	23.48	2.71	30.46
6	97.57	40.00	29.27	25.37	2.93	76.15
7	33.28	13.64	9.98	8.65	1.00	7.61
8	13.01	5.33	3.90	3.38	0.39	7.61
9	0.95	0.39	0.29	0.25	0.03	26.65
10	12.89	5.28	3.87	3.35	0.39	38.07
11	2.82	1.16	0.85	0.73	0.08	38.07
12	6.13	2.51	1.84	1.59	0.18	34.27

包围面积约为 18 km^2 ；当核素半衰期达到 5 a 及以上时,浓度分布几乎完全一致,其 > 0.05 的包围面

积达到了 4.398 km^2 ,是半衰期为 250 d 时的 37 倍.因此可以认为,半衰期为 1.5 h 和 8 d 的低放射性废水为较不稳定废水,其特点是浓度衰减快,对水库下游影响较小;半衰期为 70 d 和 250 d 的低放射性废水为相对稳定废水;放射性物质对下游水体的影响增大,浓度相对较高;半衰期为 5 a 和 12.3 a 的低放射性废水为稳定废水,即半衰期在 5 a 以上的核素在水库中的浓度分布基本上不随半衰期的增加而变化,放射性物质对水库下游水体影响较大.

从表 2 来看,不论核素半衰期长短,在 97% 来水条件下(不利条件),浓度 > 0.1 的包围面积均不超过 0.002 km^2 ,几乎可以忽略不计,这主要归功于水库的稀释作用.

另外,从半衰期为 250 d、5 a 和 12.3 a 的浓度分布图可以明显地看到,靠近大坝的浓度相对较高,上溯到排污口附近时浓度逐渐减小,其原因主要是



图中坐标系为大地坐标,横坐标表示经度,纵坐标表示纬度

图 4 不同半衰期核素浓度分布

Fig. 4 Nuclides concentration distribution with different half-lives

由于 1~6 月的来水量逐渐增多(表 1), 稀释作用不断加大而造成的. 此外, 从模拟结果还可以看出, 水库流场基本上流向大坝(图 3), 排水口处于取水口

下游约 3.3 km 处, 排污口的低放射性废水对上游的回流影响很小(图 4), 因而不会影响到取水口的水质.

表 2 不同半衰期核素浓度包络面积统计/ km^2

Table 2 Envelop areas of nuclide concentration with different half-lives/ km^2

半衰期	浓度									
	>0.5	>0.4	>0.3	>0.2	>0.1	>0.05	>0.02	>0.01	>0.005	>0.001
1.5 h	—	—	—	—	—	—	0.001	0.009	0.033	0.101
8 d	—	—	—	—	0.001	0.086	0.453	2.191	4.881	10.082
70 d	—	—	—	—	0.002	0.114	13.715	18.736	19.431	19.861
250 d	—	—	—	—	0.002	0.118	18.250	19.256	19.561	19.980
5 a	—	—	—	—	0.002	4.398	18.523	19.326	19.596	20.057
12.3 a	—	—	—	—	0.002	4.398	18.523	19.326	19.596	20.057

4 结论

(1) 采用 EFDC 三维水动力-水质模型对我国内陆拟建的咸宁核电站低放射性排放废水在富水水库中的输移规律进行了研究, 模拟计算了 97% 来水条件下不同半衰期核素在水库中的浓度分布情况. 在 97% 来水条件下, 核电站排水口污染物到达大坝断面的时间约为 183 d.

(2) 低放射性废水浓度的分布主要受水库流场的影响, 核素半衰期及来水量的多寡在浓度变化过程中起主导作用.

(3) 随着半衰期的增加, 低放射性废水在水库中的影响范围逐渐增大, 当半衰期增加到 5 a 以上时, 影响范围趋于稳定.

(4) 由于水库流场基本流向下游的大坝方向, 取水口处的水质不受下游排水口低放物质回流的影响.

参考文献:

- [1] 秦玲玲, 杨中华, 彭文启, 等. 核电厂低放废水污染特性研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2009, (7): 9-12.
- [2] 潘萌, 张春舜. 核电站液态流出物在受纳海域中分布的计算机模拟和监测数据统计分析[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2002, 23(5): 5-11.
- [3] 陈家军, 张俊丽, 王红旗, 等. 考虑悬浮物吸附沉降作用的海湾放射性核素迁移数值模拟[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 28-32.
- [4] 张俊丽, 陈家军, 李源新, 等. ^{137}Cs 在大鹏澳中迁移分布的数值模拟与预测[J]. 中国环境科学, 2003, 23(1): 95-99.
- [5] Períñez R. Redissolution and long-term transport of radionuclides released from a contaminated sediment: a numerical modelling study[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2003, 56(1): 5-14.
- [6] Períñez R. Modelling surface radioactive spill dispersion in the

Alborún Sea[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2006, 90(1): 48-67.

- [7] Harnick J M. A Three-dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects [R]. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report 317. 1992.
- [8] Boussinesq J. Théorie analytique de la chaleur [M]. Paris: Gathier-Villars, 1903.
- [9] Arakawa A, Lamb V R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model[J]. Methods in Computational Physics, 1977, 17: 173-265.
- [10] Madala R V, Piacsek S A. A semi-implicit numerical model for Baroclinic Oceans[J]. Journal of Computational Physics, 1977, 23(2): 167-178.
- [11] Sheng Y P, Butler H L. Modeling coastal currents and sediment transport[A]. In: Proceedings of 18th international conference on coastal engineering [C]. New York: ASCE, 1982. 1127-1148.
- [12] Smolarkiewicz P K, Margolin L O. On forward-in-time differencing for fluids; extension to a curvilinear framework[J]. Monthly Weather Review, 1993, 121(6): 1847-1859.
- [13] Sheng Y P. Finite-difference models for hydrodynamics of lakes and shallow seas[A]. In: Gray W G (Ed.). Physics-based modeling of lakes, reservoirs, and impoundments [M]. New York: ASCE, 1986. 146-228.
- [14] Jin K R, Hamrick J H, Tisdale T. Application of three-dimensional hydrodynamic model for Lake Okeechobee [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(10): 758-771.
- [15] Smolarkiewicz P K, Clark T L. The multidimensional positive definite advection transport algorithm: further development and applications[J]. Journal of Computational Physics, 1986, 67(2): 396-438.
- [16] Smolarkiewicz P K, Grabowski W W. The multidimensional positive definite advection transport algorithm: nonoscillatory option[J]. Journal of Computational Physics, 1990, 86(2): 355-375.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients: A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jiashan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-Dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH ₄ ⁺ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH ₄ , N ₂ O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH ₄ and N ₂ O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures: A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 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