

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, 郝敬峰, 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, 李俊鎔 (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, 张杨, 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, 黄兢, 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, 吴烨, 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)
五氯酚对 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)	

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究

彭军霞¹, 赵宇波¹, 焦丽华¹, 曾路², 郑为民¹

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055; 2. 广东省科学技术发展战略研究院, 广州 510033)

摘要: 采用投入产出分析方法和目标规划方法, 以某建陶企业为代表, 建立了建筑陶瓷产业投入产出模型及低碳优化模型, 利用投入产出模型计量和预估了建筑陶瓷产业关键环节碳排放和产品碳足迹; 应用低碳优化模型对建筑陶瓷企业的产品计划进行了低碳优化. 结果表明, 建筑陶瓷企业年二氧化碳排放量达182 543.9 t, 单位产品碳排放量多于国外先进水平10%以上; 影响建筑陶瓷产业二氧化碳排放的关键环节为烧成和喷雾干燥过程, 烧成和喷雾干燥过程排放的二氧化碳占总排放的80%以上; 3种建筑陶瓷产品中, 坯砖、抛光砖、釉面砖的万平米产量碳足迹依次为150.2、168.0、159.6 t. 建筑陶瓷企业经低碳模型优化后可以在保证同样利润的同时降低5.4%的碳排放, 也可以在保证碳排放相同的条件下使利润提高5.6%.

关键词: 建筑陶瓷; CO₂ 排放; 碳计量; 低碳模型; 投入产出

中图分类号: X192 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)02-0665-08

Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry

PENG Jun-xia¹, ZHAO Yu-bo¹, JIAO Li-hua¹, ZENG Lu², ZHENG Wei-min¹

(1. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Institute of Science and Technology Development Strategies, Guangzhou 510033, China)

Abstract: Input-output model and low carbon programming model on building ceramic industry were established. Carbon dioxide emissions of key steps and carbon footprint of products were calculated and predicted using the input-output model. While products planning was optimized using the low carbon programming model. The results showed that CO₂ emission in the enterprise reached 182 543.9 t a year and CO₂ emission per unit product was 10% more than advanced level in the world. 80% of the total CO₂ was emitted during the processes of firing and drying. As a result, we should focus on these two steps in order to reduce carbon dioxide emission of building ceramic industry. Carbon footprint of blank tile, polished tile, and glazed tile were 150.2 t, 168.0 t, 159.6 t respectively. Optimized by the low carbon model, The ceramic enterprise could reduce carbon dioxide emission by 5.4% while not sacrificing any profit, and also could obtain profit 5.6% higher than before while unrise the carbon dioxide emission.

Key words: building ceramic; CO₂ emission; carbon measurement; low carbon model; input-output

全球气候变暖已经对人类生存和发展形成了严峻的挑战, 二氧化碳排放是导致全球变暖的主要原因之一. 建筑陶瓷产业是能源消耗大户, 也是工业二氧化碳排放的主要源头之一^[1]. 目前我国是世界上建筑陶瓷产量最大的国家, 2007年产量突破50亿m², 占世界总产量的50%左右^[2], 由此带来的二氧化碳排放约1亿t. 因此建筑陶瓷行业的二氧化碳减排已经迫在眉睫.

目前关于二氧化碳排放的研究多从宏观经济政策层面着手, 研究排放系数、经济增长、经济结构变化、能源密度等因素对国家乃至全球碳排放的影响程度^[3~8], 而针对产业层面的二氧化碳减排研究则较少. Liu等^[9]利用STIRPAT模型研究了水泥业二氧化碳排放的影响因素, 认为人口增长和经济增长是造成中国水泥业二氧化碳排放量大幅增加的主要原因. Mezquita等^[10]研究了西班牙陶瓷产业的碳排

放, 认为技术革新与参与碳排放贸易有利于该国陶瓷产业的碳减排.

以上研究虽然在一定程度上揭示了二氧化碳排放的影响因素与宏观减排措施, 但缺乏基于微观层面具有可操作性的产业碳计量与低碳解决方案, 因此本研究通过对建筑陶瓷产业关键工业过程的二氧化碳排放进行计量, 并建立低碳规划模型, 以期为建设陶瓷产业的碳减排提供理论依据与决策建议.

1 建筑陶瓷产业碳计量模型的建立

1.1 建筑陶瓷产业的投入产出流程

根据投入产出方法编制碳计量模型的基础是产

收稿日期: 2011-03-21; 修订日期: 2011-05-17

基金项目: 广东省重大科技专项计划项目(2010A080406010)

作者简介: 彭军霞(1983~), 女, 博士, 主要研究方向为低碳技术, E-mail: jx.peng@siat.ac.cn

业的投入产出流程. 建筑陶瓷产业关键生产环节主要包括球磨粉碎、喷雾干燥、压制成型、烧成、磨边抛

光、磨边上釉这 6 个环节. 其投入产出流程简图如图 1.

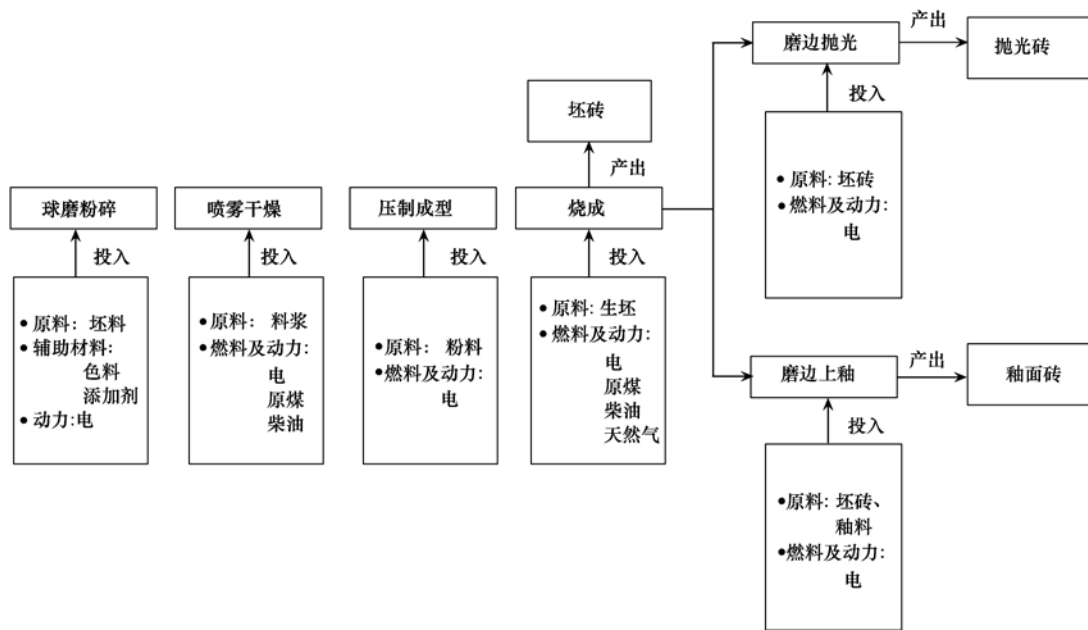


图 1 建筑陶瓷产业的投入产出流程示意

Fig. 1 Input-output schematic graph of building ceramic industry

1.2 碳计量投入产出表的结构

如表 1 所示, 建筑陶瓷企业碳计量投入产出表由 5 个部分组成. 从水平方向上看, 表 1 中第 I 和 II 部分反映出自制产品的使用情况, 第 I 部分反映本企业生产过程中的内部消耗, 即企业中间产品, 其元素 x_{ij} 是考察期内第 j 类产品对 i 类产品的实物消耗量; 第 II 部分反映最终产品量 Y_i 和总产品量 X_i . 表中第 III 部分反映出外购原材料、燃料、电力的使用情况, 其元素 v_{ij} 是考察期内第 j 类产品对 i 类外购料的实物消耗量; 第 IV 部分反映外购料的总消耗量 G_j . 从投入产出表的垂直方向上看, 说明产品的消耗构成. 企业中间产品的单位成本在表中以下 2 个部分得到反映. 第 I 部分反映本企业各种产品的生产过程中对自产品的消耗情况; 第 III 部分反映出对外购原材料、燃料、电力的生产消耗. 第 V 部分通过反映固定资产折旧、劳动者报酬、税金的支付、利润等情况来反映产品的增加值.

1.3 碳计量模型投入产出结构的建立

表 1 描述了企业统计期内各产品之间的数量关系, 它们存在着下列平衡关系:

$$\text{中间产品} + \text{最终产品} = \text{总产品}$$

由此可得方程组 (1), 但是要了解产品之间的生产技术联系程度, 还需要通过消耗系数来反映.

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + \cdots + x_{16} + Y_1 = X_1 \\ x_{21} + x_{22} + \cdots + x_{26} + Y_2 = X_2 \\ \vdots \\ x_{61} + x_{62} + \cdots + x_{66} + Y_6 = X_6 \end{cases} \quad (1)$$

1.3.1 直接消耗系数及模型

直接消耗系数可以体现建陶企业各生产环节的直接数量依存关系. 自产产品 j 对自产产品 i 的直接消耗系数记为 a_{ij} , 其系数矩阵为 A ; 自产产品 j 对外购产品 i 的直接消耗系数记为 v_{ij} , 其系数矩阵为 B .

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, 6) \quad (2)$$

$$b_{ij} = \frac{v_{ij}}{X_j} \quad (i = 1, 2, \cdots, 8; j = 1, 2, \cdots, 6) \quad (3)$$

式中, x_{ij} 为统计期内建陶产品生产过程中自产产品 j 所消耗的自产产品 i 的数量, v_{ij} 为统计期内建陶产品生产过程中自产产品 j 所消耗的外购产品 i 的数量, X_j 为 j 类产品的总产量. 则式 (1) ~ (3) 分别用矩阵计算公式可以表示为:

$$AX + Y = X \quad (4)$$

$$W = A \hat{X} \quad (5)$$

$$V = B \hat{X} \quad (6)$$

式中, X 为总产品列向量, $X = [X_1 X_2 \cdots X_6]^T$; $\hat{X}$ 是以

表 1 建陶企业投入产出表

Table 1 Input-output table of building ceramic enterprise

产品分配与使用 生产消耗				企业中间产品						最终产品			总产出
				计量单位	序号	料浆	粉料	生坯	坯砖	抛光砖	釉面砖	外销	
				1	2	3	4	5	6				
企业自产品	料浆	t	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{16}			Y_1	X
	粉料	t	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{26}			Y_2	X_2
	生坯	t	3	...								...	...
	坯砖	$\times 10^4 \text{ m}^2$	4	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ij}	...	x_{i6}			Y_i	X_i
	抛光砖	$\times 10^4 \text{ m}^2$	5	...								...	...
	釉面砖	$\times 10^4 \text{ m}^2$	6	x_{61}	x_{62}	...	x_{6j}	...	x_{66}			Y_6	X_6
										总消耗量			
中间投入	电	$\times 10^3 \text{ kW}\cdot\text{h}$	1	v_{11}	v_{12}	...	v_{1j}	...	v_{16}			G_1	
	煤	t	2	v_{21}	v_{22}	...	v_{2j}	...	v_{26}			G_2	
	柴油	t	3	...								...	
	天然气	$\times 10^3 \text{ m}^3$	4	v_{i1}	v_{i2}	...	v_{ij}	...	v_{i6}			G_i	
	坯料	t	5	...								...	
	色料	t	6	...								...	
	釉料	t	7	v_{71}	v_{72}	...	v_{7j}	...	v_{76}			...	
	添加剂	t	8	v_{81}	v_{82}	...	v_{8j}	...	v_{86}			G_8	
增加值	固定资产折旧												
	劳动者报酬												
	税金												
	利润												
	总投入			X_1	...	X_j	...	X_6					

以总产出 X 的元素组成的对角矩阵; Y 为最终产品列向量, $Y = [Y_1 Y_2 \cdots Y_6]^T$; W 为中间产品流量矩阵, V 为外购料流量矩阵.

$$W = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{18} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{28} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{81} & x_{82} & \cdots & x_{88} \end{bmatrix}$$
$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{18} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{28} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{81} & v_{82} & \cdots & v_{88} \end{bmatrix}$$

变换式(4)可得:

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad (7)$$

式中, $(I - A)^{-1}$ 叫做列昂锡夫逆阵, 式(7)描述了总产品量 X 与最终产品量 Y 的数量关系.

1.3.2 完全消耗系数及模型

完全消耗系数是生产单位最终产品所要直接消

耗某种产品的数量与全部间接消耗这种产品的数量之和. 计算完全消耗系数矩阵的公式如下:

$$C = A(I - A)^{-1} \quad (8)$$

$$D = B(I - A)^{-1} \quad (9)$$

式中, C 为自产品的完全消耗系数矩阵, D 为外购料的完全消耗系数矩阵.

2 建筑陶瓷产业碳计量方法

根据 IPCC 国家温室气体排放指南^[11], CO_2 排放量可用活动水平与排放因子的乘积表示, 如下式:

$$\text{Emission}_{\text{CO}_2} = \sum_i \text{FC} \times \text{EF}_i \quad (10)$$

式中, $\text{Emission}_{\text{CO}_2}$ 为二氧化碳排放量, FC_i 为消费 i 类能源的量, EF_i 为 i 类能源的排放因子. 一次能源的二氧化碳排放因子可依据 IPCC2006 国家温室气体排放指南中的排放系数与该能源的热值乘积计算得到, 建陶企业主要消耗的一次能源有原煤、柴油、天然气3种, 它们的排放因子见表2. 电力二氧化碳

表 2 一次能源 CO_2 排放因子

Table 2 CO_2 emission factor of primary energy

能源种类	IPCC 2006 年 CO_2 排放系数 $C^{[7]}$ / $\text{kg}\cdot\text{TJ}^{-1}$	我国热值 $G^{[13]}$ / $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	排放因子 $\text{EV} = C \times G$
原煤	94 600	20 908	1. 978
柴油	74 100	42 652	3. 161
天然气	56 100	38 931	$2. 184 \text{ t}\cdot(1 \times 10^3 \text{ m}^3)^{-1}$

排放因子采用火力发电二氧化碳排放系数^[12]:

$$EF_{\text{electricity}} = 1.052 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h}).$$

2.1 生产环节二氧化碳排放量计量

建筑陶瓷企业各生产环节的碳排放量计算公式为:

$$\text{Emission}_{\text{CO}_2j} = \sum_{i=1}^8 EF_i \times v_{ij} \quad (11)$$

将公式(3)代入(11),则式(11)也可表示为:

$$\text{Emission}_{\text{CO}_2j} = \sum_{i=1}^8 EF_i \times (X_j b_{ij}) \quad (12)$$

式中 $\text{Emission}_{\text{CO}_2j}$ 为 j 环节碳排放量。

2.2 产品碳足迹计量

产品碳足迹是指生产该产品所完全消耗的化石燃料燃烧释放的 CO_2 总量^[14]. 如果矩阵 D 的 6 个列向量为 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ [即 $D = (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6)$], 则根据式(11)产品碳足迹可由下式计算:

$$CF_j = EF \times D_j \quad (13)$$

式中, CF_j 为 j 产品的碳足迹, D_j 为矩阵 D 的第 j 列, EF 为外购料二氧化碳排放因子行向量[根据表 2 数据并规定坯料、色料、釉料、添加剂的二氧化碳排放因子均为 0, 则 $EF = (1.052 \ 1.978 \ 3.161 \ 2.184 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$].

2.3 企业二氧化碳排放总量计算和预估

将企业生产环节碳排放量加和,即可得到企业生产造成的二氧化碳排放总量,可用式(14)计算得到统计期企业的二氧化碳排放总量。

$$\text{Emission}_{\text{CO}_2} = \sum_{j=1}^6 \text{Emission}_{\text{CO}_2j} \quad (14)$$

如果已知建陶企业计划年的商品计划矩阵 Y' (即计划期内各种产品的外销量), 则可以利用公式(7)计算为保证计划期商品任务的完成企业各种产品的总产出矩阵 X' , 再利用公式(12)和(14)即可估算出计划期的企业二氧化碳排放量。

3 建筑陶瓷企业低碳优化模型的建立

投入产出模型是一组线性平衡方程, 可以作为线性规划模型的一组约束条件, 结合经济、环境等条件和目标函数, 建立低碳优化模型, 将经济目标、碳减排目标结合, 使企业各方面的指标达到最优。

3.1 以最小碳排放为目标函数的优化模型(模型 I)

该模型适用于决策机构, 使决策机构在不损害企业利润计划的前提下, 衡量企业的二氧化碳减排空间, 为机构制定碳减排指标提供依据。该模型可以

用以下公式表述:

$$(A - I)X + Y = 0 \quad (15)$$

$$\sum_{i=4}^6 L_i Y_i \geq L \quad (16)$$

$$0 \leq Y_i \leq M_i \quad (17)$$

求:

$$Z = \sum_{j=1}^6 (X_j \sum_{i=1}^8 e_i b_{ij}) = \min \quad (18)$$

式中, L_i 为 i 类产品单位利润; L 为总利润指标; M_i 为 i 类产品产量上限(根据市场需求); Z 为企业计划期的碳排放量。

式(15)包括 6 个产品平衡方程, 式(16)是利润约束条件, 式(17)是产量约束条件。

3.2 以碳排放量为限制条件的优化模型(模型 II)

该模型适用于企业管理者, 使企业管理者在保证完成碳减排任务的同时, 实现企业的利润最大化。该模型可以用以下公式表述:

$$(A - I)X + Y = 0 \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^6 (X_j \sum_{i=1}^8 e_i b_{ij}) \leq N \quad (20)$$

$$0 \leq Y_i \leq M_i \quad (21)$$

求:

$$Z = \sum_{i=4}^6 L_i Y_i = \max \quad (22)$$

式中, N 为碳排放量上限; 式(19)包括 6 个产品平衡方程, 式(20)是碳排放约束条件, 式(21)是产量约束条件。

4 结果与讨论

以所分析建陶企业 2009 全年的投入产出数据(该企业 2009 年建陶产量约为 1 112 万 m^2)为基础, 编制建陶企业投入产出表, 计算直接消耗系数和完全消耗系数得到表 3 和表 4。

4.1 建陶企业二氧化碳排放特性分析

依据表 3 和表 4 数据, 并根据碳计量计算公式可得生产环节二氧化碳排放量, 产品碳足迹及企业统计期碳排放总量, 列于表 5, 并将各生产环节碳排放份额示于图 2。

由表 5 可知, 建陶企业统计期(即 2009 年)碳排放总量为 182 543.9 t, 万平米产品碳排放量为 164.2 t, 比国外先进水平高 10% 以上^[15]. 因此建陶企业碳排放控制不仅是国家碳减排任务的重要组成部分, 也是建筑陶瓷工业可持续发展的重要条件。由图 2 可知所分析建陶企业统计期各生产环节中, 烧

表 3 直接消耗系数表

Table 3 Direct consumption coefficient									
产品分配与使用 生产消耗		计量单位	序号	企业中间产品					
				料浆	粉料	生坯	坯砖	抛光砖	釉面砖
				1	2	3	4	5	6
企业自产品	料浆	t	1	0	1.56	0	0	0	0
	粉料	t	2	0	0	0.101	0	0	0
	生坯	t	3	0	0	0	2 257.1	0	0
	坯砖	× 10 ⁴ m ²	4	0	0	0	0	1	1
	抛光砖	× 10 ⁴ m ²	5	0	0	0	0	0	0
	釉面砖	× 10 ⁴ m ²	6	0	0	0	0	0	0
中间投入	电	× 10 ³ kW·h	1	0.022	0.009	0.003	3.87	17	9
	煤	t	2	0	0.087	0	44.1	0	0
	柴油	t	3	0	0.000 8	0	0.804	0	0
	天然气	× 10 ³ m ³	4	0	0	0	0.000 5	0	0
	坯料	t	5	0.632	0	0	0	0	0
	色料	t	6	0.022	0	0	0	0	0
	釉料	t	7	0	0	0	0	0	14.39
	添加剂	t	8	0.002	0	0	0	0	0

表 4 完全消耗系数

Table 4 Total consumption coefficient									
产品分配与使用 生产消耗		计量单位	序号	企业中间产品					
				料浆	粉料	生坯	坯砖	抛光砖	釉面砖
				1	2	3	4	5	6
企业自产品	料浆	t	1	0	1.56	0.16	355.7	355.7	355.7
	粉料	t	2	0	0	0.101	228.0	228.0	228.0
	生坯	t	3	0	0	0	2 257.1	2 257.1	2 257.1
	坯砖	× 10 ⁴ m ²	4	0	0	0	0	1	1
	抛光砖	× 10 ⁴ m ²	5	0	0	0	0	0	0
	釉面砖	× 10 ⁴ m ²	6	0	0	0	0	0	0
中间投入	电	× 10 ³ kW·h	1	0.022	0.042	0.007	19.66	36.66	28.66
	煤	t	2	0	0.087	0.009	63.88	63.88	63.88
	柴油	t	3	0	0.000 8	8.29	0.99	0.99	0.99
	天然气	× 10 ³ m ³	4	0	0	0	0.000 5	0.000 5	0.000 5
	坯料	t	5	0.632	0.986	0.1	224.8	224.8	224.8
	色料	t	6	0.022	0.034	0.003	7.82	7.82	7.82
	釉料	t	7	0	0	0	0	0	14.39
	添加剂	t	8	0.002	0.003	0.000 3	0.71	0.71	0.71

表 5 企业碳计量模型计算结果

Table 5 Results calculated by carbon measurement model						
生产环节	球磨粉碎	喷雾干燥	压制成型	烧成	磨边抛光	磨边上釉
环节碳排放量/t·a ⁻¹	9 034. 6	46 522. 6	7 153. 6	104 274. 4	12 926. 6	2 632. 1
产品名称	坯砖		抛光砖		釉面砖	
产品碳足迹/t·(10 ⁴ m ²) ⁻¹	150. 2		168. 0		159. 6	
企业碳排放总量/t	182 543. 9					
单位产品碳排放量/t·(10 ⁴ m ²) ⁻¹	164. 2					

成环节碳排放量最高,占企业总排放量的 57%;其次是喷雾干燥环节,占总排放量的 26%;再次是球磨粉碎与压制成型环节.磨边上釉环节碳排放量较低,只占总排放量的 1%;而磨边抛光环节则较高,占总排放量的 7%.由于磨边抛光环节主要用于生产抛光砖,而磨边上釉环节主要用于生产釉面砖,因此这也使得产品碳足迹抛光砖高于釉面砖(见表

5);坯砖由于不需要冷处理环节(抛光或上釉),因此产品碳足迹最低.由于烧成环节和喷雾干燥环节的碳排放占建陶企业生产流程总排放的 83%,因此建陶企业碳减排措施可以优先选择烧成环节和喷雾干燥环节的减排技术,如低温快烧技术、一次烧成新工艺、空气快速干燥技术、新型保温耐火材料、新型窑炉结构等.

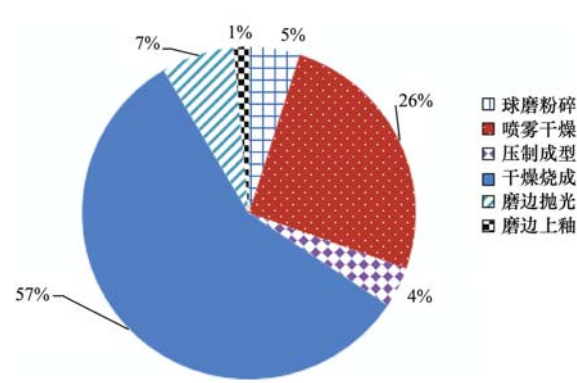


图2 建陶企业生产环节碳排放份额

Fig. 2 CO₂ emission of key steps in building ceramic enterprise

4.2 低碳优化模型在建陶企业碳排放控制中的应用结果及分析

令坯砖产品利润为5元·m⁻²,抛光砖利润为12元·m⁻²,釉面砖产品利润为12元·m⁻²,计划期需求量各为:坯砖≤1 000×10⁴ m²,抛光砖≤1 000×10⁴ m²,釉面砖≤400×10⁴ m²,则所分析企业统计期的利润为12 565.6万元/a.

4.2.1 企业利润需求对优化结果的影响分析

利用模型 I 计算的优化结果如表 6 所示,其中利润增加率的计算是以L₀ = 12 565.6万元/a(统计

期利润值)为参考利润值.由表 6 可以看出,在企业利润保持12 565.6万元/a 不变的情况下,通过该模型优化后企业碳排放量可以降低 5.4%;但随利润增加率要求逐步提高到增加 50%,最小碳排放量逐渐增加,从172 604.9 t/a 上升到293 424.6 t/a,产品分布上抛光砖与坯砖的比例也逐渐增加,这是因为 3 种产品的碳足迹坯砖>抛光砖>釉面砖,因而在利润要求较低的情况下,为得到最小碳排放量必须尽量选择碳足迹较低的产品,然而在利润要求较高时,由于碳足迹最低的产品并不一定获利最高,因此碳足迹较高的产品也需要列入生产计划.根据表 6 的结果,计算优化后碳排放和利润增加率,并将之随约束条件变化而发生改变的情况示于图 3.由图 3 可知,随利润要求提高,优化后利润增加率线性上升,碳排放值也相应提高,并在利润要求≥16 300万元/a 之后碳排放增加率的上升速率开始增加,说明在追求利润过高时,碳排放上升速率显著增加,不利于企业的碳排放控制.另外在利润约束条件为≥17 591.81万元/a 的情况下,碳排放增加率与利润增加率曲线有一个交点,说明该约束条件下,碳排放增加率与利润增加率一致.该交点产生之前,碳排放增加率低于利润增加率;而在该交点之后,则碳排

表 6 模型 I 优化结果

Table 6 Results optimized by model I

约束条件 (利润增加率)/%	优化结果				
	最小碳排放/t·a ⁻¹	利润值/万元·a ⁻¹	产品分布		
			坯砖×10 ⁴ /m ²	抛光砖×10 ⁴ /m ²	釉面砖×10 ⁴ /m ²
≥0	172 604.9	12 565.2	0	647.1	400
≥10	190 202.1	13 821.6	0	751.8	400
≥20	207 799.2	15 079.2	0	856.6	400
≥30	225 396.3	16 335.6	0	961.3	400
≥40	255 685.9	17 592	158.4	1 000	400
≥50	293 424.6	18 848.5	409.7	1 000	400

放增加率高于利润增加率.

4.2.2 企业碳排放控制对优化结果的影响分析

利用模型 II 计算的优化结果如表 7 所示,表中碳排放增加率的计算是以N₀ = 182 543.9 t/a(统计期碳排放量)为参考排放量.由表 7 可知,当要求碳排放量保持182 543.9 t/a不变的情况下,通过模型 II 优化后企业利润值可以比统计期提高 5.6%;若要求碳排放量比统计期降低 10%,则最大利润值减少为11 971.8万元/a,比统计期降低 4.7%.从表 7 还可以看出,随碳排放控制量放宽,企业最大利润值逐渐上升,产品分布上抛光砖和坯砖的比例也在逐

渐上升,说明虽然抛光砖和坯砖的单位产品碳排放量较高,但由于这 2 种产品的市场需求量较高,使得碳排放控制量放宽的条件下生产计划中可以适当增加 2 种产品的份额.根据表 7 的结果,计算优化后碳排放和利润增加率,并将之随约束条件变化而发生改变的情况示于图 4.由图 4 可知,随碳排放约束条件放宽,碳排放增加率线性上升,利润增加率也逐渐上升,但在超过237 307.1 t/a之后,利润增加率趋势变缓,并在255 561.46 t/a(即要求碳排放量比统计期增加 40%)的情况下与碳排放增加率曲线相交,说明该约束条件下碳排放增加率与利润增加率一

表 7 模型 II 优化结果
Table 7 Results optimized by model II

约束条件 (碳排放增加率/%)	优化结果				
	最大利润值/万元·a ⁻¹	碳排放值/t·a ⁻¹	产品分布		
			坯砖 × 10 ⁴ /m ²	抛光砖 × 10 ⁴ /m ²	釉面砖 × 10 ⁴ /m ²
≤ -10	11 971.8	164 297.6	0	597.7	400
≤ 0	13 275.3	182 543.9	0	706.3	400
≤ 10	14 578.8	200 798.2	0	814.9	400
≤ 20	15 882.3	219 048.5	0	923.5	400
≤ 30	16 979.9	237 307	36	1 000	400
≤ 40	17 587.7	255 561.5	157.5	1 000	400
≤ 50	18 195.5	273 815.9	279.1	1 000	400

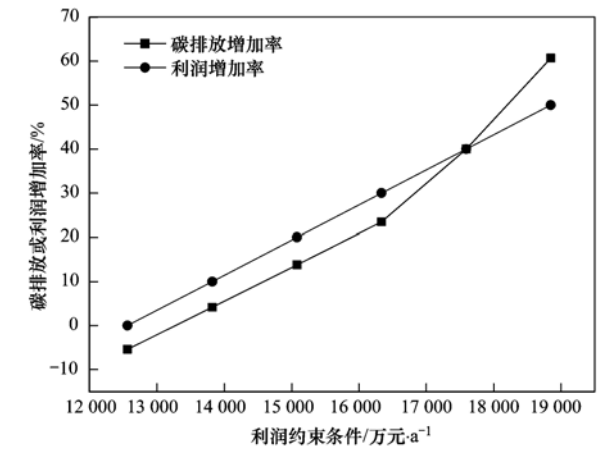


图 3 碳排放和利润增长率随利润约束条件变化的情况
Fig. 3 Variation of CO₂ emission and profit growth rate along with profit constraint condition

致,都为 40%,这与模型 I 计算结果一致.在该交点之前,利润增加率高于碳排放增加率,在该交点之后,利润增加率低于碳排放增加率,说明超过该点以后,继续放宽碳排放约束量,对利润的刺激程度降低.

5 结论

- (1)所分析的建筑陶瓷企业年二氧化碳排放量达 182 543.9 t,单位产品碳排放量为 164.2 t/(10⁴ m²),超过国外先进水平 10% 以上.
- (2)建陶企业各生产环节中烧成与喷雾干燥环节碳排放量最多,共占企业总排放量的 83%,建议引进低温快烧、空气快速干燥等技术以促进企业及建陶产业的低碳技术改造.
- (3)本研究提出的碳计量模型可用于建筑陶瓷产业二氧化碳排放特性分析;低碳优化模型可用于低碳规划研究,并能实现企业的市场要求、利润需求和碳排放控制三个目标的综合指标最优.从而为建

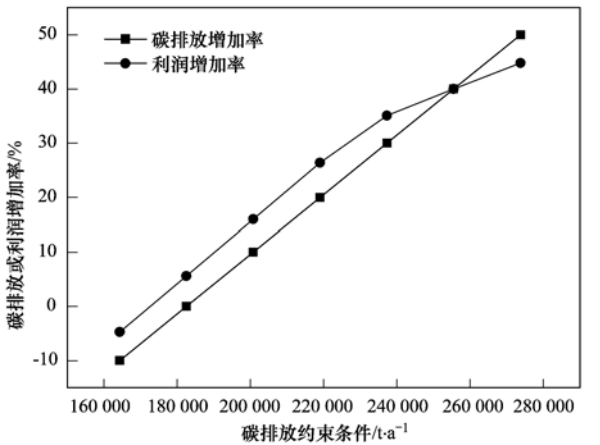


图 4 碳排放或利润增长率随碳排放约束条件变化的情况
Fig. 4 Variation of CO₂ emission and profit growth rate along with emission constraint condition

筑陶瓷产业的低碳技术发展提供碳计量方法和低碳产品规划的理论依据.

参考文献:

[1] Monfort E, Mezquita A, Granel R, *et al.* Analysis of energy consumption and carbon dioxide emissions in ceramic tile manufacture [J]. Boletín De La Sociedad Española De Cerámica Y Vidrio, 2010, **49** (4): 303-310.

[2] 杨辉,郭兴忠,樊先平,等.我国建筑陶瓷行业的发展现状及节能减排[J].中国陶瓷工业,2009, **16** (02): 20-23.

[3] 陈文颖,高鹏飞,何建坤.二氧化碳减排对中国未来 GDP 增长的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2004, **44** (06): 744-747.

[4] Weiss M, Neelis M, Blok K, *et al.* Non-energy use of fossil fuels and resulting carbon dioxide emissions: bottom-up estimates for the world as a whole and for major developing countries [J]. Climatic Change, 2009, **95** (3-4): 369-394.

[5] Lofgren A, Muller A. Swedish CO₂ emissions 1993-2006: An application of decomposition analysis and some methodological insights [J]. Environmental & Resource Economics, 2010, **47** (2): 221-239.

- [6] Wang C, Chen J N, Zou J. Decomposition of energy related CO₂ emission in China: 1957-2000 [J]. *Energy*, 2005, **30** (1): 73-83.
- [7] 胡初枝, 黄贤金, 钟太洋, 等. 中国碳排放特征及其动态演进分析 [J]. *中国人口资源与环境*, 2008, **18**(3): 38-42.
- [8] 谭丹, 黄贤金 胡初枝. 我国工业行业的产业升级与碳排放关系分析 [J]. *四川环境*, 2008, **116** (2): 74-78.
- [9] Liu Y, Kuang Y Q, Huang N S, *et al.* CO₂ emission from cement manufacturing and its driving forces in China [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2009, **37** (4): 369-382.
- [10] Mezquita A, Monfort E, Zaera V. Ceramic tiles manufacturing and emission trading scheme: reduction of CO₂ emissions, european benchmarking [J]. *Boletin De La Sociedad Espanola De Ceramica Y Vidrio*, 2009, **48** (4): 211-222.
- [11] 政府间气候变化专门委员会特别工作组. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南 [R]. 政府间气候变化专门委员会, 内罗毕, 2006.
- [12] 2050 中国能源和碳排放研究课题组 2050 中国能源和碳排放报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 888-889.
- [13] 国家统计局和国家能源局. 中国能源统计年鉴 2008 [M]. 2008.
- [14] Grubb E. Meeting the carbon challenge: the role of commercial real estate owners, users & managers [R]. Chicago, 2007.
- [15] 曾令可, 邓伟强, 刘艳春, 等. 陶瓷工业能耗的现状及节能技术措施 [J]. *陶瓷学报*, 2006, **27**(1): 109-115.

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>Prorocentrum 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@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

国内外公开发行人