

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究

张雪莹, 温宗国*

(清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 为评估工业水污染物减排潜力、探究污染防治技术模拟在污染物总量控制、污染物排放限值等环境管理中的应用, 按照“原料-工艺-技术-产品”的耦合关系建立了“工业污染物减排潜力分析及环境管理”模型, 集成自下而上建模和情景分析方法在我国造纸行业进行案例研究. 结果表明, 在政策组合情景下, 废水、COD、氨氮在2015年的减排潜力分别为 7×10^8 t、 39×10^4 t、 0.3×10^4 t, 2020年分别为 13.8×10^8 t、 56×10^4 t 和 0.5×10^4 t; 2010~2020年期间加强末端治理仍然是主要减排途径, 但2015~2020年间行业结构调整的作用将逐渐提升, 并使行业产污水平在2015年和2020年基本达到国内或国际先进水平, 废水和氨氮指标在2015年和2020年基本满足排放标准, 但COD难以达标.

关键词: 总量控制; 减排潜力; 环境管理; 自下而上建模; 造纸行业

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4395-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.049

Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation

ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To evaluate the reduction potential of industrial water pollutant emissions and to study the application of technology simulation in pollutant control and environment management, an Industrial Reduction Potential Analysis and Environment Management (IRPAEM) model was developed based on coupling of “material-process-technology-product”. The model integrated bottom-up modeling and scenario analysis method, and was applied to China’s paper industry. Results showed that under CM scenario, the reduction potentials of wastewater, COD and ammonia nitrogen would reach 7×10^8 t, 39×10^4 t and 0.3×10^4 t, respectively in 2015, 13.8×10^8 t, 56×10^4 t and 0.5×10^4 t, respectively in 2020. Strengthening the end-treatment would still be the key method to reduce emissions during 2010-2020, while the reduction effect of structure adjustment would be more obvious during 2015-2020. Pollution production could basically reach the domestic or international advanced level of clean production in 2015 and 2020; the index of wastewater and ammonia nitrogen would basically meet the emission standards in 2015 and 2020 while COD would not.

Key words: emission control; reduction potential; environment management; bottom-up modelling; paper industry

欧美国家大多在行业技术结构分析和成本效益分析的基础上, 建立以工业技术系统模型为核心的模型, 辅助开展确定污染物总量控制目标、环境排放标准等管理政策的制定^[1]. 我国“十一五”和“十二五”期间分别制定了污染物减排的约束性指标^[2,3], 并制定了企业清洁生产技术标准、行业污染物排放标准、淘汰落后产能规定以及鼓励推广技术目录等环境政策. 然而, 这些措施的制定大多依赖于专家判断, 以及对行业技术水平和发展趋势的主观评价, 往往导致污染物减排目标可达性和技术可行性与行业发展的实际情况不相符合. 本文围绕工业污染物减排管理需求, 以工业生产全流程为系统, 以“原料-工艺-技术-产品”为单元, 以造纸行业为例模拟了工业水污染防治技术体系, 结合情景分析方法开发了基于污染防治技术自下而上的“工业污染物减排潜力分析及环境管理(industrial reduction potential analysis and environment management,

IRPAEM)”模型, 开展行业水污染物减排的潜力分析, 探索污染防治技术在主要污染物总量控制和污染物排放限值等环境管理中的应用.

1 基于污染防治技术的环境管理方法

构建基于工业部门生产全流程的污染防治技术结构, 采用自下而上建模方法进行技术系统模拟, 是研究环境管理方法行之有效的途径^[4~13]. 其显著优点在于将污染物排放的分析建立在工业技术系统模拟的基础之上, 能将结构调整、清洁技术和末端治理过程的变化对环境目标的影响进行细致分解, 定量分析污染物排放总量和产排污强度的变化趋势,

收稿日期: 2014-04-10; 修订日期: 2014-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(71103110); 环境保护公益性行业科研专项(201209039)

作者简介: 张雪莹(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向工业节能减排, E-mail: doudouzhu1225@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wenzg@tsinghua.edu.cn

从而为行业主要污染物排放总量控制、污染物排放限值等环境管理方法的制定提供支撑(图1)。

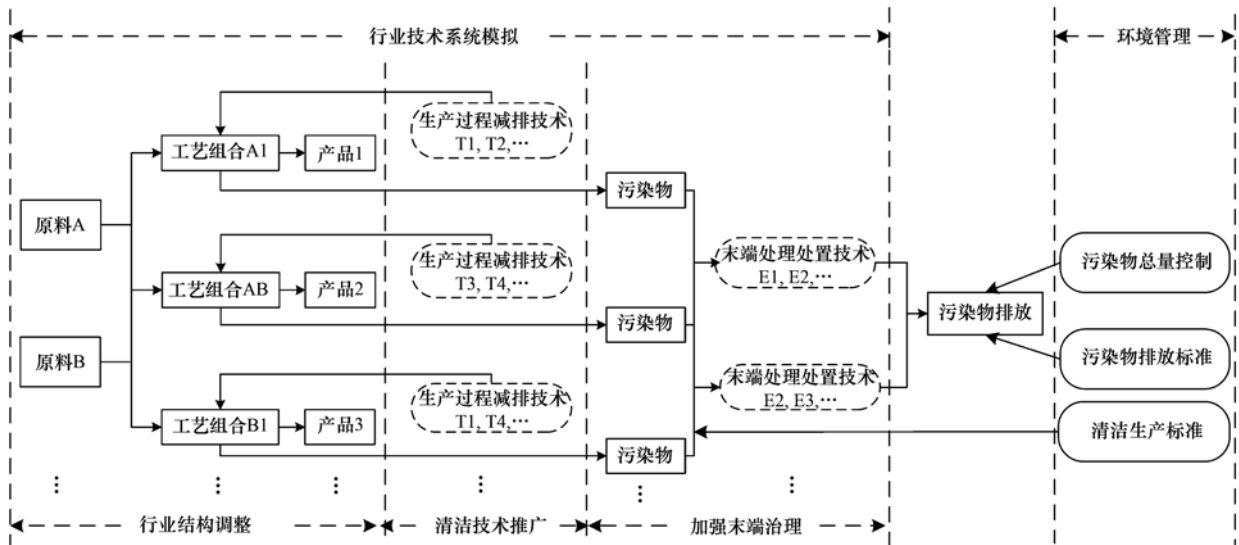


图1 基于污染防治技术模拟的环境管理方法示意

Fig. 1 Schematic diagram of environment management based on pollution control technology

2 IRPAEM 模型的建立

本研究建立的 IRPAEM 模型(图2)包括了:行业技术系统模拟,模型参数输入,情景设置,污染物排放计算以及结果分析等5个模块. 其中行业技术系统模拟是基础,将具体行业的关键技术、主导产品等按照“原料-工艺-技术-产品”的耦合关系和污水污染物产生、排放的路径特征,构建由产品的生产工艺(含规模因素)、生产过程减排技术(即清洁生产技术)、末端治理技术组成的工业技术系统结构(图1). 然后将行业水平参数和技术参数输入到

“原料-工艺-技术-产品”系统模拟模块和情景设置模块,经过计算即可获得不同技术政策情景下行业污染物减排潜力、产污强度和污染物排放水平等,从而为工业污染物排放总量控制目标、污染排放限值和污染防治技术政策的制定提供支撑.

3 造纸行业模型结构

3.1 技术系统模拟

造纸行业分为制浆和造纸两个子行业,按照每个子行业“原料-工艺-技术-产品”的耦合关系进行结构划分(图3),并筛选出非木纤维干湿法备料+横管连蒸技术、木材干法备料等14项关键生产过程减排技术(即清洁生产技术,见表1)以及①适用于污染负荷较低的单纯造纸企业的物化治理工艺;②活性污泥、氧化沟等传统好氧生物治理工艺;③适用于高浓度制浆废水的厌氧+好氧组合工艺;④二级生物治理后进一步采用微电解处理、高级氧化技术、膜分离技术、吸附技术等深度处理技术进行三级处理这四类具有不同治理效果的末端治理技术,嵌入到相应的生产工艺中,模拟造纸行业完整的工艺结构及技术系统.

3.2 模型参数输入

模型参数主要包括行业水平参数和技术参数两大类. 其中,行业水平参数主要是指不同产品产量,而技术参数与行业技术系统结构相对应,由生产工艺、过程减排技术和末端治理技术三大类技术参数构成(表2). 造纸行业模型中的相关参数通过文献

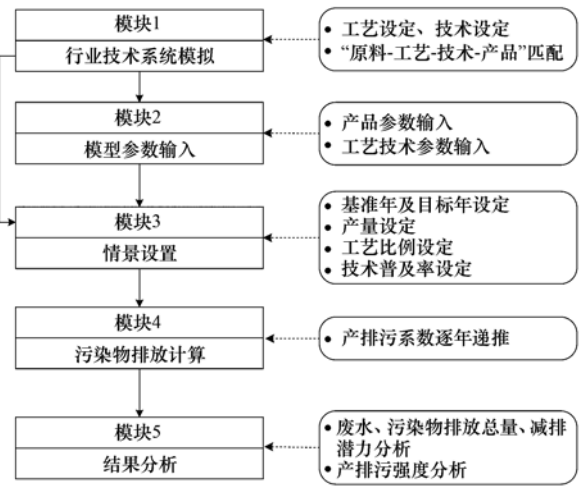


图2 工业污染物减排潜力分析及环境管理研究 (IRPAEM) 模型框架

Fig. 2 Framework of Industrial Reduction Potential Analysis and Environment Management (IRPAEM) Model

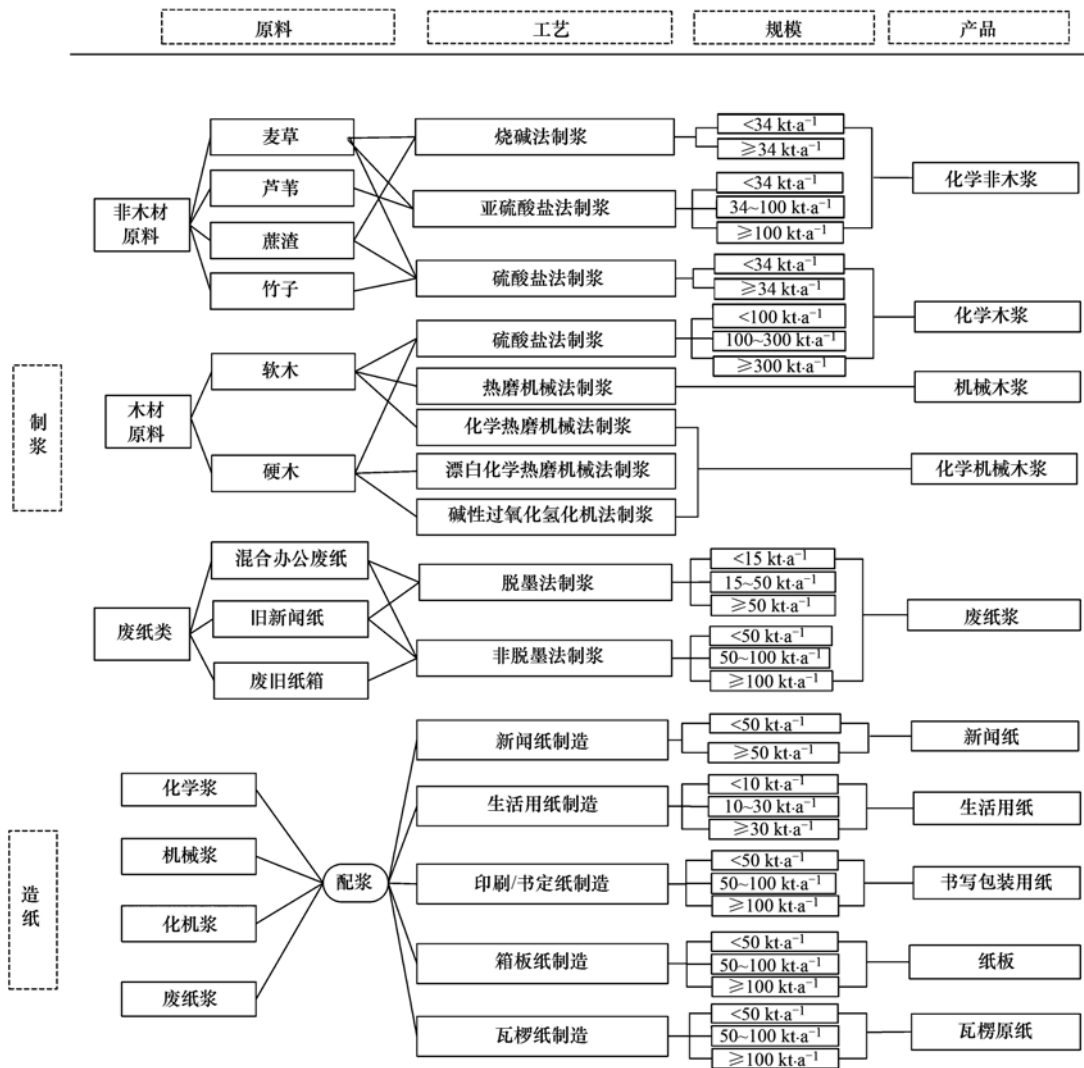


图3 制浆造纸行业工艺结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Process structure of pulp & paper industry in China

调研、现场调研、专家咨询以及参考文献[14~17]获得。

3.3 情景设置

情景分析法能解决行业未来生产和技术发展的不确定性,同时体现不同技术政策的强度和效果。模型共设置5种造纸行业技术发展情景,分别为基准情景、工艺规划情景、清洁技术推广情景、

强化末端治理情景和政策组合情景(表3)。根据行业历史产量增长率^[18],同时参考行业“十二五”规划^[19],产量设定2010~2015年纸及纸板总产量、纸浆总产量年均增长6.0%和6.2%,分别达到 $12\,405 \times 10^4$ t、 $11\,430 \times 10^4$ t; 2015~2020年年均增长5.1%和4.6%,分别达到 $15\,890 \times 10^4$ t、 $14\,320 \times 10^4$ t。

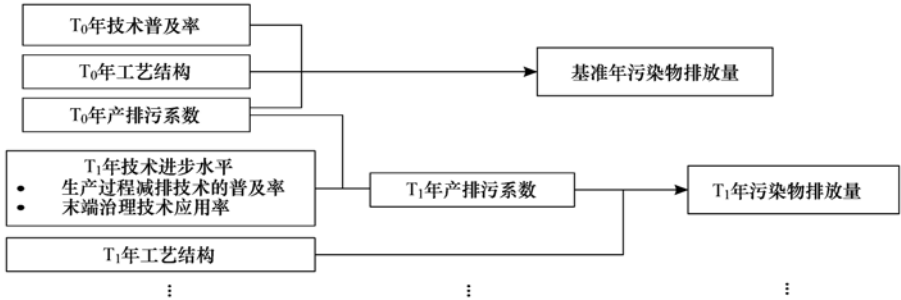


图4 环境污染排放量计算流程示意

Fig. 4 Schematic diagram of calculations of environmental pollutant emissions

表 1 造纸行业清洁生产技术概述

Table 1 Cleaner production technologies in paper industry		
技术名称	技术说明及适用范围	污染物削减情况
木材干法备料技术	适用于以木材和竹浆为原料的制浆工艺。与湿法剥皮技术相比,该技术可以减少废水量及有机污染物和 SS 的排放量	废水排放削减 80% 左右; 备料工段 COD 负荷削减 90% 左右
改良型间歇蒸煮技术	适用于化学漂白木浆工艺。主要包括快速置换加热(RDH)、超级间歇蒸煮及 DDS 置换蒸煮等工艺。该技术相对传统间歇蒸煮技术可减少漂白药品消耗量和 COD 排放量,有操作灵活的优点	降低漂白阶段废水 COD 负荷 10% ~ 25% ;
改良型连续蒸煮技术	适用于化学漂白木浆蒸煮。包括延伸改良连续蒸煮技术(EMCC)、低卡伯值连续蒸煮技术等	可是漂白废水 COD 降低 15% ~ 40%
非木纤维干湿法备料 + 横管连蒸技术	适用于以麦草、芦苇、蔗渣为原料的非木纤维化学纸浆工艺。能够更好地去除杂质	黑液提取率提高 3% ~ 5% ,从而减少中段废水污染负荷量
纸浆高效洗涤技术	适用于化学浆的洗涤工艺。通过挤压、扩散、置换等作用可显著降低废水中的溶解有机物	黑液提取率由 80% ~ 84% 提高至 88% ,减少了进入中段废水的污染负荷
先进黑液碱回收技术	适用于 $3.4 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上的化学制浆工艺黑液碱回收。包括黑液降膜蒸发技术等	降低中段废水 COD 负荷 10% ~ 40%
全封闭筛选技术	适用于各类化学浆。在筛选过程中采用压力筛等设备进行逆流洗涤,可以实现洗涤水完全封闭,减少中段废水排放	废水排放量降低 70% 左右,中段 COD 负荷减少 20% ~ 30%
漂前氧脱木素技术	适用于化学漂白浆生产工艺。氧脱木素技术是在蒸煮与漂白之间,可减少漂白剂用量减少漂白阶段污染负荷	漂白阶段废水排放量减少 20% ~ 25% ,COD 负荷降低 40% ~ 55%
无元素氯漂白技术	适用于化学漂白浆工艺。目前只有个别苇浆厂或草浆生产线使用该技术,从源头控制污染物排放	减少漂白废水量 25% ~ 35% ,COD 负荷削减 30% ~ 60%
全无氯漂白技术	适用于化学漂白浆生产工艺。是以过氧化氢、臭氧等不含氯漂剂替代含氯漂剂	漂白废水削减 65% ~ 80% ,COD 负荷降低 70% ~ 90%
生物酶法脱墨技术	适用于废纸脱墨浆工艺。脱墨过程使用纤维素酶替代传统化学脱墨剂	COD 负荷降低 25% ~ 50%
浮选法脱墨技术	适用于小型浆厂的废纸脱墨工艺。可有效减少纤维损失,大幅降低脱墨水耗和废水量	废水量减少 70% ~ 85% ,COD 负荷降低 10% ~ 20%
中高浓制浆技术	适用于化学浆和废纸浆工艺。采用中浓技术可降低制浆能耗、水耗	废水排放量降低 25% ~ 35% 左右
纸机白水封闭循环和回收技术	适用于造纸厂。采用多圆盘过滤、超效浅层气浮等技术回收纤维和纸机白水	造纸环节 COD 负荷降低 15% ~ 40%

表 2 模型参数输入说明

Table 2 Parameters of model database		
参数类别	参数	
行业水平参数	不同产品产量	
生产工艺参数	技术普及率,单位产品污染物产生系数	
技术参数	过程技术参数	技术普及率,污染物削减率
	末端治理技术参数	污染物去除率

3.4 污染物排放计算

如图 4 所示,行业水污染物排放计算的核心是对产排污系数逐年递推计算。

首先,清洁生产技术普及率的提高使与之耦合的生产工艺组合的产污系数逐年降低,并且某项生产工艺组合产污系数的变动是由应用的多项清洁生产技术共同决定的(假设多项技术的效果以单一技

表 3 造纸行业污染物控制技术情景设置

Table 3 Scenario design of China's paper industry	
情景名称	情景描述
基准情景(BAU)	行业外部政策环境基本保持为 2010 年情况,结构上,淘汰落后生产技术或产能的政策使得生产布局略有优化,各类生产工艺中小型企业比重在 2015 年下降 5% ~ 10% ,2020 年下降 10% ~ 15% ;技术上,已出台的相关政策的作用仍会延续,清洁生产技术在低惯性的情况下略微变化,2015 年各项技术普及率提高 5% ~ 15% ,2020 年提高 15% ~ 20% ;末端治理设施改造速度较慢,三级深度处理工艺在大中型企业中比重 2015 年占 20% ,2020 年占 40% 左右
工艺规划情景(SA)	依据相关政府部门出台的行业发展规划和政策,鼓励先进的清洁生产工艺推广,限制淘汰落后产能,原料上 2015 年木浆、非木浆、废纸浆比重由 2010 年 22.0%、15.3%、62.7% 调整为 24.3%、11.2%、64.5%。国内废纸浆比重由 38.0% 提高到 41.0% ,国产木浆比重由 8.4% 提高到 10.3%。2020 年延续此趋势其他浆种相对比重不变,工艺上 2015 年亚硫酸盐草浆减少 40% ,亚铵法减少 60% ,至 2020 年亚硫酸盐减少 80% ,亚铵法减少 90%。减排技术推广应用与基准情景相同
清洁技术推广情景(CT)	清洁生产技术得到大力推广应用,达到相关国家环保技术目录和技术推广政策的预期水平。到 2020 年先进污染物减排技术基本达到最大普及率,行业结构和末端治理技术方面变化与基准情景相同
强化末端治理情景(EOP)	行业执行更加严格的排放标准,加快末端治理环节的技术升级改造,三级深度处理工艺在大中型企业中比例大幅提高,2015 年达到 40% 左右,2020 年达到 80% 左右。行业结构和清洁生产技术普及情况与基准情景相同
政策耦合情景(CM)	工艺规划、清洁技术推广和强化末端治理的组合方案,各类水污染防治技术政策配套实施,产业结构调整、清洁技术推广的末端治理均达到理想效果

术效果乘积的形式表示).

$$G_{(m,i,s,a),p}^{t+\Delta t} = G_{(m,i,s,a),p}^t \cdot \prod_{ct \in SET_{(m,i,s,a)}^{ct}} \left(\frac{1 - \theta_{ct,(m,i,s,a),p} \cdot \beta_{ct,(m,i,s,a),p}^{t+\Delta t}}{1 - \theta_{ct,(m,i,s,a),p} \cdot \beta_{ct,(m,i,s,a),p}^t} \right) \quad (1)$$

式中, m 为原料, i 为生产工艺, s 为生产规模, a 为产品, (m, i, s, a) 代表生产工艺组合; p 为污染物, ct 为清洁生产技术; $G_{(m,i,s,a),p}^t$ 为 t 时间生产工艺组合 (m, i, s, a) 生产单位产品 a 的污染物 p 的产生系数; $\theta_{ct,(m,i,s,a),p}$ 为清洁生产技术 ct 应用于生产工艺组合 (m, i, s, a) 时对污染物 p 的削减率, 满足 $0 \leq \theta_{ct,(m,i,s,a),p} \leq 1$; $\beta_{ct,(m,i,s,a),p}^t$ 为 t 时间清洁生产技术 ct 在生产工艺组合 (m, i, s, a) 中以产量为基准的应用比例 (即普及率), 满足 $0 \leq \beta_{ct,(m,i,s,a),p}^t \leq 1$; Δt 表示时间跨度, 一般设定为 1 a; 集合 $SET_{(m,i,s,a)}^{ct}$ 为适用于生产工艺组合 (m, i, s, a) 的清洁生产技术集合.

获得生产工艺组合的产污系数之后, 再根据水污染末端治理技术的普及率, 计算该生产工艺组合的排污系数, 即:

$$E_{(m,i,s,a),p}^t = G_{(m,i,s,a),p}^t \cdot \left[\sum_{eop \in SET_{(m,i,s,a)}^{eop}} \gamma_{eop,(m,i,s,a),p}^t \cdot (1 - \varphi_{eop,(m,i,s,a),p}) \right] \quad (2)$$

式中, eop 为末端治理技术; $E_{(m,i,s,a),p}^t$ 为 t 时间生产工艺组合 (m, i, s, a) 生产单位产品 a 的污染物 p 的排放系数; $\gamma_{eop,(m,i,s,a),p}^t$ 为 t 时间末端治理技术 eop 在生产工艺组合 (m, i, s, a) 中的应用比例 (以对应的产量比重为基准); $\varphi_{eop,(m,i,s,a),p}$ 为末端治理技术 eop 应用于生产工艺组合 (m, i, s, a) 时对污染物 p 的去除率; $SET_{(m,i,s,a)}^{eop}$ 为与生产工艺组合 (m, i, s, a) 相耦合的末端治理技术集合.

将所有生产工艺组合的排污系数与对应产量相乘并加总后, 就得到了污染物 p 的行业排放总量:

$$TE_{A,p}^t = \sum_{(m,i,s,a) \in SET_A^{(m,i,s,a)}} D_{(m,i,s,a)}^t \cdot E_{(m,i,s,a),p}^t \quad (3)$$

式中, A 为行业, $TE_{A,p}^t$ 为 t 时间行业 A 的污染物的排放总量; $D_{(m,i,s,a)}^t$ 为 t 时间生产工艺组合 (m, i, s, a) 的产量; $SET_A^{(m,i,s,a)}$ 为行业 A 生产工艺组合 (m, i, s, a) 的集合.

4 结果与分析

造纸行业 COD 排放总量长期以来位居所有工业部门之首. 据统计, 2010 年造纸行业废水排放量达 39.4×10^8 t, 占工业排放总量的 18.6%, COD 排放量达 95.2×10^4 t, 占工业排放总量的 26%, 氨氮排放量达 2.5×10^4 t, 占工业排放总量的 10.2% [20]. 本研究以 2010 年为基准年, 应用“工业污染物总量控制及环境管理模型”分析 2015 年和 2020 年造纸行业废水、主要水污染物 (COD、氨氮) 的减排潜力、产污强度和污染物排放水平等.

4.1 减排潜力与污染物总量控制目标分析

4.1.1 减排潜力分析

造纸行业未来各技术政策情景下的废水、COD 和氨氮排放趋势 (图 5) 表明: 污染物和废水排放总量在任一情景下都没有持续增长, 而是保持了 2010 年水平或有所降低. 在基准情景 (BAU) 下, 2015 年、2020 年的废水排放量均在 40×10^8 t 左右, 氨氮排放总量在 1.7×10^4 t 左右, 基本与 2010 年持平; COD 排放总量得到有效控制, 呈现小幅下降趋势, 2015 年排放量比 2010 年降低约 16%. 与文献 [19] 提出的污染物排放的约束性指标——2015 年主要污染物 COD 排放总量比 2010 年降低 10% ~ 12%, 氨氮排放总量比 2010 年降低 10% 相比, 在延续现有政策和技术低惯性发展的基准情景下, COD 排放总量完全可以达到“十二五”规划目标, 但氨氮排放总量削减目标难以实现.

在工艺规划 (SA)、清洁技术推广 (CT) 和强化末端治理 (EOP) 三类情景下, 2015 年行业废水、COD 和氨氮的排放量与 2010 年相比分别削减 5%

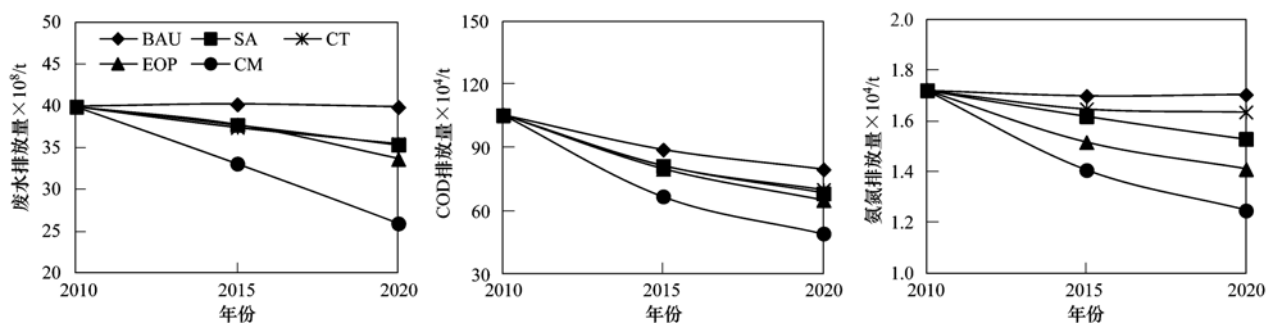


图 5 不同情景下造纸行业废水、COD、氨氮排放趋势

Fig. 5 Trends of wastewater, COD and ammonia nitrogen emissions in paper industry under different scenarios

~5.5%、23%~24%和4%~12%,2020年分别削减10%~15%、35%~38%和5%~18%。其中,废水和COD的减排幅度在这3种情景下基本相同,而对于氨氮的减排,强化末端治理情景的效果最为明显,在2015年可以实现“十二五”规划中氨氮的削减目标。

在政策耦合情景(CM)下,由于结构调整、清洁技术推广与末端强化治理的联合作用,行业污染物及废水排放量大幅下降:2015年废水、COD、氨氮排放量分别削减16%、37%和18%,可以超额完成行业“十二五”规划削减目标,原因可能是国家对行业未来结构调整力度、技术推广普及程度的估计与

本文情景设置相比偏保守;2020年废水、COD、氨氮排放量分别削减34%、53%和28%。该情景下污染物及废水减排的途径分解(图6)表明:①结构调整、清洁技术推广与末端强化治理对于废水和COD的削减贡献率在2015年基本相同;但在2020年,清洁技术推广的贡献率逐渐降低至25%,而末端强化治理的贡献率逐渐增加至45%左右,行业结构调整的贡献率则保持在30%左右。②在氨氮减排方面,2020年末端强化治理和清洁技术推广的贡献率与2015年相比略有降低,而结构调整的贡献比例则有所增加;不过末端强化治理仍是氨氮减排的主要途径,贡献率达60%左右。

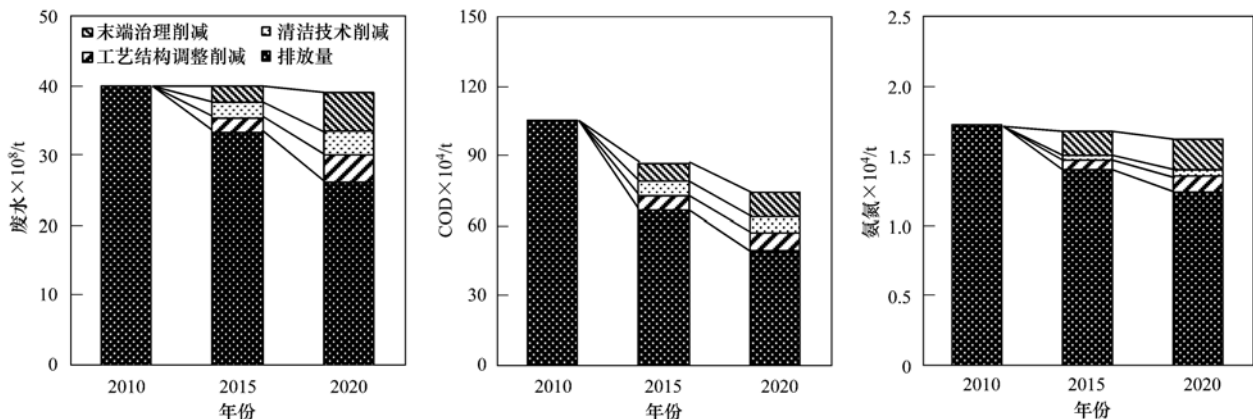


图6 造纸行业政策耦合情景下水污染减排途径分解

Fig. 6 Decomposition of reduction approaches in paper industry under CM scenario

整体而言,强化末端治理对废水、COD和氨氮的削减量较行业结构调整和清洁技术推广实现的削减量要高,是当前实现行业污染物及废水总量减排的主要途径。由于技术的普及力度和成熟度在未来行业应用中趋于饱和,清洁技术推广带来的减排潜力将逐渐停滞,而通过行业结构调整,加快淘汰落后产能,从源头上减少污染物及废水的产生,将成为造纸行业污染物及废水重要的技术减排途径。

4.1.2 减排控制目标建议

在造纸行业加大结构调整、清洁技术推广与末端强化治理力度(政策耦合情景)的情况下,2015年可实现废水减排量 7×10^8 t、COD减排量 39×10^4 t、氨氮减排量 0.3×10^4 t,2020年可实现废水减排量 13.8×10^8 t、COD减排量 56×10^4 t、氨氮减排量 0.5×10^4 t。

4.2 污染物产生和排放水平

4.2.1 污染物产生强度

针对制浆造纸工业,我国出台了不同生产工艺的清洁生产标准来推动、指导和规范制浆造纸企业的污染防治工作^[21~24]。其中,对废水和COD产生

的限值规定如表4所示。

政策耦合情景(CM)下,制浆造纸行业不同产品的产污强度(图7)计算表表明,不同类型的企业产污情况差异较大。这主要是由于采用的原料,使用的制浆造纸工艺的不同,不同产品其废水、COD和氨氮的浓度会有很大差异。非木材浆的单位产品废水及污染物产生量一般高于木材浆,化学浆的单位产品废水及污染物产生量一般高于机械浆。通过过程污染减排技术的普及应用,各种产品的产污强度均都有所降低,尤其是化学浆单位产品的产污量明显下降,2015年降低20%以上,2020年降低25%以上。将其与造纸工业清洁生产标准(表4)进行比较可以看到:2010年各种产品的产污水平基本满足清洁生产中的三级或二级指标,通过清洁生产技术推广,在2015年和2020年基本可以达到二级或是一级标准,这也就是国内或国际清洁生产先进水平。

4.2.2 污染物排放限值

文献[25]中对我国制浆造纸企业废水、COD和氨氮排放限值的规定如表5所示。政策耦合情景(CM)下,制浆造纸行业不同产品的废水、COD、氨

表 4 国内制浆造纸行业水污染物清洁生产标准

Table 4 Cleaner production standard for pulp & paper industry				
清洁生产指标等级	指标	一级	二级	三级
《造纸工业漂白化学烧碱法麦草浆生产工艺清洁生产标准》(HJ/T 339-2007)	废水产生量/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	90	100	120
	COD 产生量/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	160	200	250
《造纸工业硫酸盐化学木浆生产工艺清洁生产标准》(HJ/T 340-2007)	废水产生量/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	30(本色)	40(本色)	50(本色)
		45(漂白)	60(漂白)	80(漂白)
	COD 产生量/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	35(本色)	50(本色)	70(本色)
		55(漂白)	70(漂白)	100(漂白)
《造纸工业漂白碱法蔗渣浆生产工艺清洁生产标准》(HJ/T 317-2006)	废水产生量/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	100	120	135
	COD 产生量/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	110(烧碱法)	165(烧碱法)	230(烧碱法)
		130(硫酸盐法)	195(硫酸盐法)	265(硫酸盐法)
《清洁生产标准造纸工业废纸制浆》(HJ 468-2009)	废水产生量/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	8(非脱墨浆)	11(非脱墨浆)	15(非脱墨浆)
		11(脱墨浆)	15(脱墨浆)	20(脱墨浆)
	COD 产生量/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	28(非脱墨浆)	33(非脱墨浆)	
		36(脱墨浆)	44(脱墨浆)	

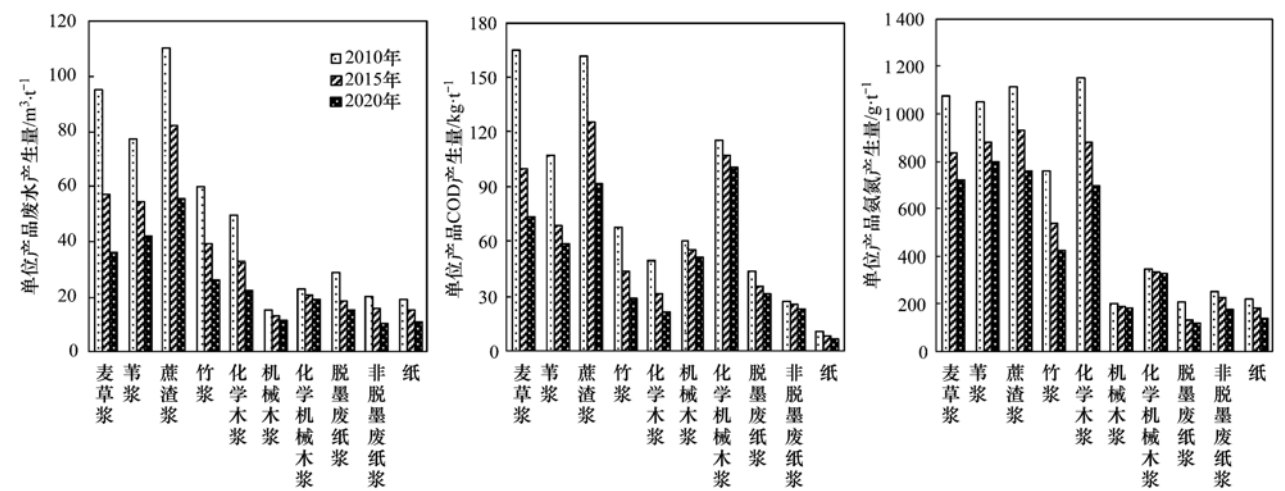


图 7 政策耦合情景下各种产品的产污强度

Fig. 7 Pollutant emissions per unit of product under CM scenario

氮排放水平(图 8)与文献[25]中规定的排放限值进行比较,可以看出:氨氮排放水平基本达标,而且在短期内不会有太大的变化;对于废水指标,2010 年非木材浆的废水排放水平基本不达标,但通过废水减排技术的应用,2015 年和 2020 年各种产品的废水排放水平基本满足排放标准;而行业的 COD 排放水平严重超标,即使是在各种减排技术大力推广应用的条件下,2015 年和 2020 年的产品 COD 排放水平依旧难以达标.可见,过程减排和末端治理技术虽然使造纸行业 COD 排放总量得到有效控制,但 COD 排放浓度却难以满足排放标准.

4.2.3 污染防治技术政策建议

分析结果表明,工业环境管理目标的制定应该建立在技术经济性和分解途径的模拟上,避免主观臆断影响了目标的可达性.根据计算结果可以清晰

表 5 《制浆造纸工业水污染物排放标准》
中主要水污染物排放限值

Table 5 Discharge standard of water pollutants
for pulp and paper industry

项目	制浆企业	制浆和造纸 联合生产企业	造纸企业
单位产品废水量/ $\text{t} \cdot \text{t}^{-1}$	50	40	20
化学需氧量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	100	90	80
氨氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	12	8	8

地得出造纸行业污染防治技术政策应着重:一是通过实施深度脱木素、无元素氯漂白、中高浓技术等加快发展林纸一体化,不断调整、优化制浆原料的结构,提高木浆比重,扩大废纸回收利用,同时合理利用非木材原料,逐步实现以木浆和废纸浆为主,以非木浆为辅的原料结构;二是加快淘汰落后产能,落后工艺与设备,淘汰高污染的企业类型,例如淘汰

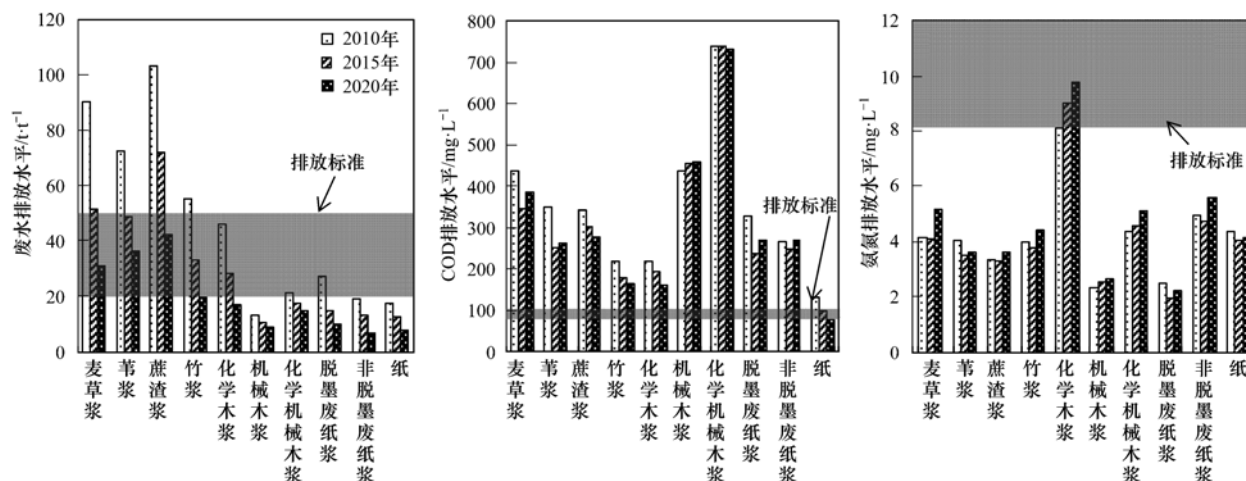


图8 政策耦合情景下各种产品的污染物排放水平

Fig. 8 Discharge level of water pollutants under CM scenario

年产5.1万t以下的化学木浆生产线、年产3.4万t以下的非木浆生产线和年产1万t以下的废纸浆生产线等、元素氯漂白等落后工艺和窄幅、低车速高消耗造纸机等落后设备；三是加快末端治理和各种清洁生产技术(包括组合脱墨技术、多段逆流洗涤、漂前氧脱木素、干湿法备料及横管连蒸、全封闭筛选等技术)的推广与应用。

5 结论

(1)虽然未来污染物排放量不会持续增长,但产排污量仍较大,强化末端治理是当前实现污染物及废水总量减排的主要途径,近期(2010~2015年)清洁技术推广和结构变化对废水和COD的削减贡献基本持平,而远期(2015~2020年)行业结构调整,加快淘汰落后产能的作用将逐渐提升。

(2)不同类型的企业产排污情况差异较大,不同原材料和制浆工艺的废水、COD和氨氮的浓度会有几倍到几十倍的差异,清洁生产技术的推广应用使行业在2015年和2020基本可以达到国内或国际清洁生产先进水平,废水和氨氮指标在2015年和2020年基本满足排放标准,但COD却难以达到排放标准。

(3)造纸行业的污染防治应通过实施深度脱木素、无元素氯漂白、中高浓技术等加快发展林纸一体化;同时加快淘汰小规模化学木浆、非木浆及废纸浆生产线等落后产能,元素氯漂白等落后工艺和窄幅、低车速高消耗造纸机等落后设备;加快末端治理和组合脱墨技术、多段逆流洗涤、低能耗蒸煮、全封闭筛选等清洁生产技术的推广与应用。

参考文献:

- [1] Wikipedia. Best Available Technology [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Best_available_technology, 2011-07-13.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_268766.htm, 2006-03-14.
- [3] 新华社. 国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm, 2011-03-16.
- [4] 杜斌. 中国工业节水潜力分析及技术选择研究[D]. 北京:清华大学, 2006. 41-42.
- [5] 张超, 温宗国. 中国造纸行业COD减排技术的预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2083-2084.
- [6] Zhang C, Wen Z G, Chen J N. An integrated model for technology forecasting to reduce pollutant emission in China's pulp industry [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 54(1): 62-72.
- [7] Zhang C, Chen J N, Wen Z G. Alternative policy assessment for water pollution control in China's pulp and paper industry [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 66: 15-26.
- [8] Zhang C, Chen J N, Wen Z G. Assessment of policy alternatives and key technologies for energy conservation and water pollution reduction in China's synthetic ammonia industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 25: 96-105.
- [9] Hasanbeigi A, Morrow W, Sathaye J, et al. A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry [J]. Energy, 2013, 50: 315-325.
- [10] Brunke J C, Blesl M. A plant-specific bottom-up approach for assessing the cost-effective energy conservation potential and its ability to compensate rising energy-related costs in the German iron and steel industry [J]. Energy Policy, 2014, 67: 431-446.
- [11] Loulou R, Goldstein G, Noble K. Documentation for the MARKAL family of models [EB/OL]. <http://www.etsap.org/>

- MrklDoc-I_StdMARKAL. Pdf.
- [12] Fleiter T, Fehrenbach D, Worrell E, *et al.* Energy efficiency in the German pulp and paper industry-A model-based assessment of saving potentials[J]. *Energy*, 2012, **40**(1): 84-99.
- [13] Karali N, Xu T F, Sathaye J. Reducing energy consumption and CO₂ emissions by energy efficiency measures and international trading: A bottom-up modeling for the U. S. iron and steel sector [J]. *Applied Energy*, 2014, **120**: 133-146.
- [14] 工业和信息化部. 《轻工行业节能减排先进适用技术目录(第一批)》[Z]. 2012.
- [15] 环境保护部. 《造纸行业木材制浆工艺污染防治可行技术指南(试行)》[Z]. 2013.
- [16] 环境保护部. 《造纸行业非木材制浆工艺污染防治可行技术指南(试行)》[Z]. 2013.
- [17] 环境保护部. 《造纸行业废纸制浆及造纸工艺污染防治可行技术指南(试行)》[Z]. 2013.
- [18] 中国印刷技术协会. 中国印刷年鉴[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013.
- [19] 国家发展改革委, 工业和信息化部, 国家林业局. 《造纸工业发展“十二五”规划》[Z]. 2011. 12-13.
- [20] 国家统计局. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [21] HJ/T339-2007, 清洁生产标准: 造纸工业(漂白化学烧碱法麦草浆生产工艺)[S].
- [22] HJ/T340-2007, 清洁生产标准: 造纸工业(硫酸盐化学木浆生产工艺)[S].
- [23] HJ/T 317-2006, 清洁生产标准: 造纸工业(漂白碱法蔗渣浆生产工艺)[S].
- [24] HJ 468-2009, 清洁生产标准: 造纸工业(废纸制浆)[S].
- [25] GB 3544-2008, 制浆造纸工业水污染物排放标准[S].

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(Ⅲ) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryIAc Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行