



季刊 · 2025年第2期 总第 41 期

宁波环境科学

— NingBo Environmental Science —

主管单位:宁波市生态环境局 / 主办单位:宁波市环境科学学会 / 支持单位:中国环境科学学会



4月15日，宁波市生态环境保护协会、宁波市环境保护科学学会、宁波市生态环境保护促进会联合宁波市生态环境局北仑分局，在北仑灵峰工业社区开展“宁距离”——“三送”助企惠企环保集市活动。



5月19日，以“万物共生和美永续”为主题的2025年国际生物多样性日宁波主题活动暨第四届生物多样性体验月启动仪式在北仑举行。

5月29日，宁波市生态环境局与宁波市气象局签订战略合作协议。双方将在应对气候变化、大气污染防治、数字化治理体系建设、科普宣传教育等方面开展全方位合作。



卷

首

语

执生态之笔，绘港城新韵

生态兴则文明兴。中华优秀传统文化是中华民族数千年生生不息、繁衍不绝的基因密码之一。习近平总书记站在人与自然和谐共生的高度谋划发展，为生态文明建设指明了方向，也为宁波这座千年滨海名城擘画了绿色发展的宏伟蓝图。

俯瞰甬城大地，四明山麓，苍翠的林海见证着生态文明的薪火相传；东海之滨，涌动的碧波吟唱着绿色发展的时代新篇。2024年，宁波以实干笃行交出了一份瞩目的生态答卷：不仅包揽美丽浙江建设工作考核优秀、深入打好污染防治攻坚战工作先进等荣誉，更首夺“五水共治”大禹鼎金鼎，所有区（县、市）实现治水夺鼎全覆盖，用实实在在的成效诠释了“绿水青山就是金山银山”的深刻内涵。

这份答卷上，跃动着鲜活的数字：98.9%的市控断面水质优良率，100%达标的饮用水水源地，91.3%的空气质量优良天数，383.5万吨/年的危废处置能力……这些数字，是宁波践行“两山”理念的生动注脚。

《宁波环境科学》以笔墨记录这场绿色变革。透过“工作聚焦”，我们看到了全面建设美丽中国的宁波实践；立足“创新之路”，我们见证了深化无废城市治理、推动“双碳”目标实施的变革成效；徜徉“学术园地”，我们解锁了甲烷控排、超微细气泡高效氧化等治污新技术；探寻“科普知识”，我们共享了镇海棘螈、中华凤头燕鸥等珍稀物种的生命张力。

古语云：“万物各得其和以生。”生态文明建设需要聚沙成塔的坚守。让我们继续汇聚治污智慧，共护四明山水，让绿色成为宁波这座现代化滨海大都市最动人的底色，让人民群众在碧水蓝天中收获实实在在的生态福祉。

本刊编辑部



宁波环境科学

— NingBo Environmental Science —

Vol.12 No.1

2025 年 第 2 期

(总第 41 期)

2025 年 7 月出版

主管单位:宁波市生态环境局

主办单位:宁波市环境科学学会

支持单位:中国环境科学学会

封 一: 梅山红桥(梁方卉/摄)

封 四: 中华凤头燕鸥(丁鹏/摄)

中 文 名:《宁波环境科学》

英 文 名: NingBo Environmental Science

编辑单位:《宁波环境科学》编辑部

出版周期: 季 刊

刊 号: (浙)内准字第 B190 号

责任编辑: 韩语笑

地 址: 宁波市海曙区益民街 48 弄 58 号

邮 箱: han.yuxiao012@outlook.com

目 录

CONTENTS

01 卷首语

工作聚焦

03 美丽宁波建设交出高分答卷

06 2024 年宁波市生态环境状况公报

创新之路

12 构建全生命周期管理体系 实现生活垃圾焚烧飞灰
“零填埋”

15 在双碳目标下推进宁波碳普惠体系建设

18 强化数字赋能 推进智慧监管 宁波上线 AI 平台遏
制车辆环检造假

21 推动环境污染治理向环境健康管理跃升 打造健康
优先环境提升绿色发展新模式

23 创新“环评瘦身”改革 助力投资项目降本增效

学术园地

26 “环境催化城市”:概念提出和研究展望

29 基于因子法与离线监测的污水处理甲烷排放差异性
分析及控排建议——以宁波市为例

36 种植业面源污染产生机制与防控技术研究进展

41 超微细气泡技术机理及其工业前沿应用

科普知识

47 镇海棘螈

47 中华凤头燕鸥

47 象鼻兰

48 银缕梅

48 抹香鲸

48 玳瑁

美丽宁波建设交出高分答卷

2024年,宁波市坚持以习近平生态文明思想为指导,忠实践行“绿水青山就是金山银山”理念,统筹推进降碳、减污、扩绿、增长各项工作,生态环境质量持续改善,生态文明建设取得显著成效。空气质量连续8年稳定达到国家二级标准,市控以上断面水质优良率创历史新高,达98.9%。市本级首次实现“三大奖”大满贯,荣获2024年美丽浙江建设工作考核优秀、深入打好污染防治攻坚战工作考核优秀,并首夺“五水共治”大禹鼎金鼎。同时,镇海、北仑、鄞州、慈溪、宁海获评2024年度美丽浙江建设工作考核优秀区(县、市);北仑、奉化、鄞州、镇海、余姚获评2024年度“五水共治”工作考核优秀区(县、市)。全市获评考核优秀的数量为历次之最,并首次实现“五水共治”夺鼎区(县、市)全覆盖。

一、高站位推进生态文明建设,答好政治自觉“必答题”

市委、市政府高度重视生态文明建设,成立市美丽宁波建设工作领导小组(中央生态环境保护督察宁

波市工作领导小组),建立集中统一高效的“指挥部”式领导机制。市委、市政府主要领导亲自部署、靠前指挥,年内主持召开市委常委会会议、市政府常务会议及专题会议20余次,系统研究部署生态环保工作,常态化开展实地调研和检查督导。印发实施《宁波市生态环境“双争双提创双优”攻坚行动方案》,建立落实“一把手”负责制,构建起主要领导亲自抓、分管领导具体抓、职能部门合力抓的工作格局,形成强大攻坚合力。

二、全方位推进污染防治攻坚,夯实生态环境“硬支撑”

聚焦蓝天、碧水、净土保卫战关键领域,精准发力、系统施治,生态环境基础不断夯实。大气治理方面,强化PM2.5与臭氧协同控制,完成“三大减排”项目3172个,淘汰老旧柴油货车1.2万辆,严格落实秸秆禁烧“1530”管控机制,PM2.5浓度23.4微克/立方米,位居全省第三。水环境提升方面,深入实施“甬有碧水”攻坚行动,全面开展入河(海)排口整治,修

图1 全省首批美丽河湖优秀案例——东钱湖



复河湖生态缓冲带 30 千米，东钱湖入选全省首批美丽河湖优秀案例；加强近岸海域污染防治，水质优良比例达 46.8%，象山东部诸湾成功创建省级美丽海湾。土壤固废治理方面，农用地安全利用率 98.57%，建设用地安全利用率 100%，危险废物无害化处置率 100%，生活垃圾分类工作成效位居全国大城市首位。

三、大力度推进绿色低碳转型，跑出绿色发展“加速度”

坚持标本兼治、治本攻坚，源头上强化减污降碳。优化国土空间发展格局，首个覆盖全域“多规合一”的国土空间总体规划获国务院正式批复。深入推进全域国土空间综合整治，11 个示范片区综合整治项

目加速推进。推进重点领域绿色低碳转型，迭代更新“361”万亿级产业集群，新增国家级先进制造业集群 2 个、国家级中小企业特色产业集群 2 个，国家级单项冠军企业达 104 家，成为全国首个数量破百的城市；实施双层集装箱海铁联运创新试点，海铁联运累计完成 141.7 万标箱。促进能源资源集约利用，新增光伏装机 185 万千瓦，居全省第一，新能源装机容量占比提高到 36.5%，工业用地平均容积率由 1.11 提高至 1.65。

四、一体化推进生态保护修复，绘就绿水青山“新画卷”

强化山水林田湖海一体化保护修复，深度筑牢蓝



图 2 宁海打造“光伏 + 储能”产业链



图3 北仑荣获联合国“生物多样性魅力城市”领奖现场

绿生态安全屏障。强化统筹治理保护,深入实施杭州湾湿地、遗留废弃矿山治理等重大保护修复工程,全面完成20.4万亩互花米草除治任务,生物多样性友好指数位居全省第二,北仑荣获联合国“生物多样性魅力城市”称号。强化统一监督管理,持续实施“绿盾”监督行动,开展人为活动卫星遥感监测,逐步推动自然保护地和生态保护红线由被动监管向主动监管转变。强化问题闭环管控,按期完成10项中央生态环境保护督察和长江经济带警示片问题整改,构建“大脚板大数据大协同”问题发现机制,排查整治各类生态环境问题2.8万余个。

五、深层次推进体制机制变革,激活治理升级“强引擎”

统筹美丽城市、美丽城镇和美丽乡村建设,打造各美其美、美美与共的诗画江南。深化城乡风貌蝶变,推进县城承载能力提升和新时代“千万工程”,新建未来社

区63个,新增绿地面积225公顷、海绵城市39平方千米,打造美丽乡村风景线4条、幸福河湖精品游线11条。深化生态价值实现机制,深入实施融资近50亿的EOD项目,落地全国首例建筑垃圾碳交易,设立全国首个跨省蓝碳生态账户。深化智治体系建设,打造全省首个生态环境数字化指挥平台,构建“空天地”一体化智慧监管体系,创设生态环境预防式执法监管服务机制,成为全国首批、全省首个生态环境非现场监管试点城市。

2025年,宁波将坚定不移贯彻习近平生态文明思想,全面落实省委、省政府决策部署,以全市生态环境“双争双提创双优”攻坚行动为抓手,坚持全领域转型、全方位提升、全地域建设、全社会行动,高标准完成污染防治攻坚战各项硬指标硬任务,持续擦亮高质量发展的生态底色,推动全市生态环境质量稳定改善向好,努力实现以高水平保护支撑高质量发展,加快打造更高品质、全域大美的现代化滨海大都市,为美丽中国、美丽浙江建设贡献更大的宁波力量。



图4 宁波市生态环境数字化指挥中心

2024 年宁波市生态环境状况公报

一、综 述

2024 年,宁波市生态环境保护工作始终紧跟时代步伐,深入践行习近平生态文明思想,全面落实党的二十届三中全会和省委、市委全会精神,牢固树立和践行“绿水青山就是金山银山”理念,以中央生态环境保护督察整改为契机,深入打好污染防治攻坚战,统筹推进绿色低碳发展、生态环境保护、城乡品质提升,加快打造更高水平的大美宁波,为争创共同富裕和中国式现代化示范引领的市域样板提供坚实的生态环境保障。

2024 年,宁波市生态环境质量稳中向好。环境空气质量六项常规污染物年均浓度连续 8 年稳定达到国家二级标准,环境空气质量优良率 91.3%;地表水断面水质优良率持续提升,市控及以上断面水质优良率 98.9%,水环境功能区达标率 100%;县级及以上集中式饮用水水源地水质达标率稳定保持在 100%;生态质量变化幅度处于稳定级别,生态质量指数(EQI) 67.67;声环境质量、近岸海域环境、地下水水质总体稳定。

二、生态环境质量状况

(一)大气环境

1. 环境空气质量

2024 年,环境空气质量综合指数为 3.16,同比上升 0.03;空气质量优良天数比率为 91.3%,同比下降 2.4 个百分点。全年环境空气质量达标 334 天,超标 32 天,其中臭氧污染天 23 天,同比增加 4 天,臭氧为我市环境空气主要污染物。六项常规污染物年均浓度均达到或优于国家二级标准,PM_{2.5} 年均浓度为 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,同比上升 4.5%;PM₁₀ 年均浓度为 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,同比持平;臭氧日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数为 142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,同比下降 2.1%;二氧化硫平均浓度为

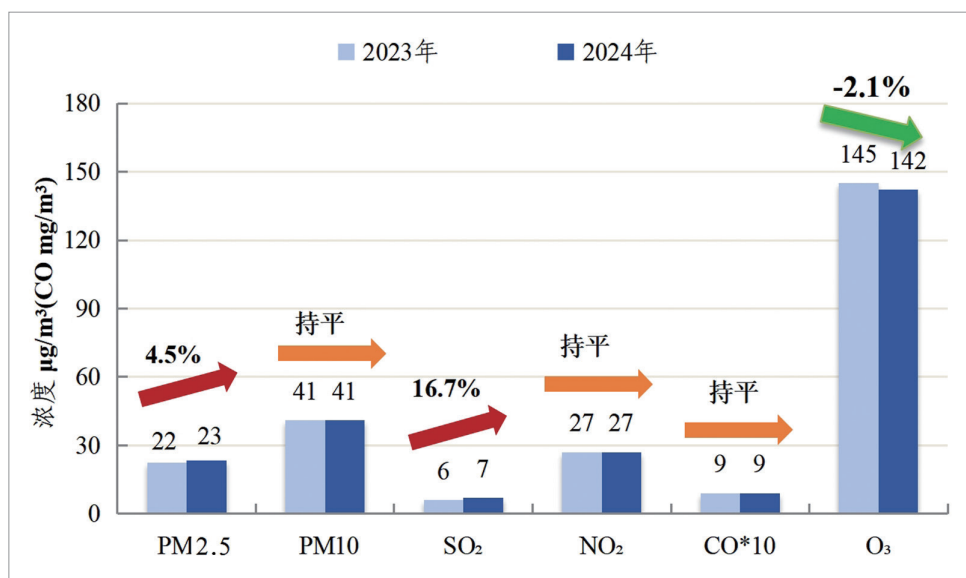


图 1 2023~2024 年宁波市环境空气六项污染物浓度状况

7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，同比上升 16.7%；二氧化氮年均浓度委 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，同比持平；一氧化碳日均浓度第 95 百分位数为 0.9 mg/m^3 ，同比持平。

2024 年，全市各区（县、市）和开发园区环境空气

质量综合指数范围在 2.73~3.42，平均为 3.15，同比上升 0.01；环境空气质量优良率范围在 86.0%~94.5%，平均为 90.3%，同比下降 2.1 个百分点。综合指数评价排名相对靠前的为象山县、宁海县和奉化区。

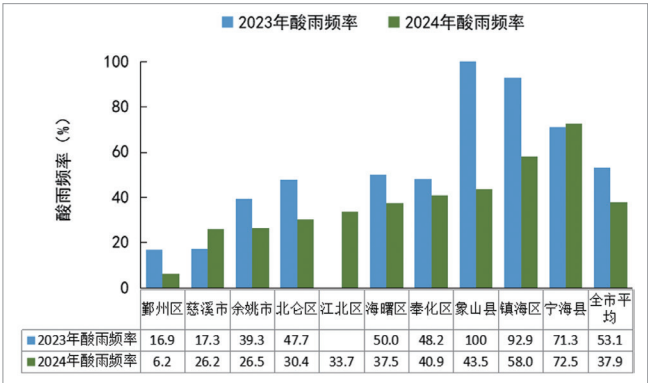
2023~2024 年宁波市环境空气质量状况（单位：天）

年份	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染	优良率（%）
2023 年	140	202	20	3	0	0	93.7
2024 年	141	193	31	1	0	0	91.3

2. 酸雨状况

（1）酸雨频率

2024 年，全市平均酸雨频率为 37.9%，同比下降 15.2 个百分点。各区（县、市）酸雨频率在 6.2%~72.5%。同比，慈溪市和宁海县酸雨频率有所上升，其余各区（县、市）酸雨频率同比均有所下降。



注：江北区自 2024 年开始酸雨监测，2023 年无数据。

图 2 2023~2024 年各区（县、市）酸雨频率

（2）降水酸度

2024 年，全市降水酸度均值为 5.46，同比上升 0.10，降水酸性程度有所好转。各区（县、市）降水 pH 年均值在 5.27~5.78，鄞州区为非酸雨区，其余各区（县、市）均为轻酸雨区。象山县由中酸雨区提升为轻酸雨区，慈溪市由非酸雨区调低为轻酸雨区，其他区域降水酸性等级不变，其中鄞州区连续第三年为非酸雨区。

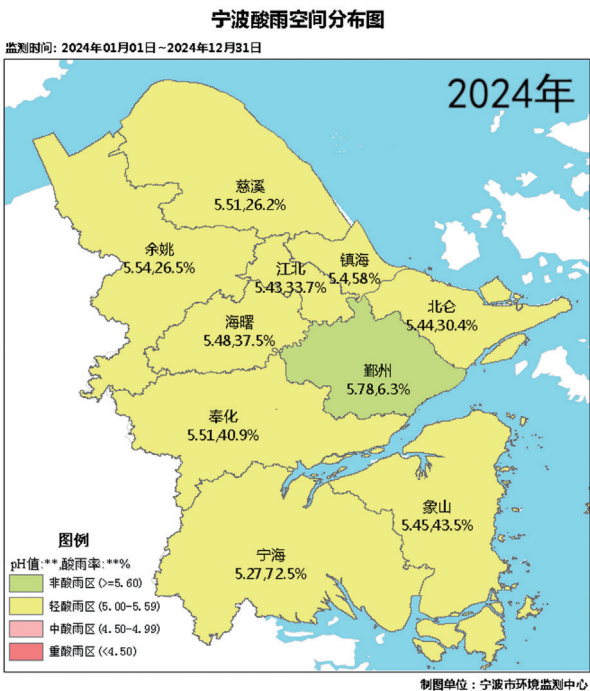


图 3 2024 年各区（县、市）酸雨污染程度空间分布状况

3. 降尘

2024 年，全市平均降尘量为 2.0 吨/（平方千米·30 天），同比下降 20.0%。各区（县、市）和开发园区降尘量范围为 1.4~2.6 吨/（平方千米·30 天），降尘量最大是慈溪市，最小为海曙区和鄞州区。

（二）水环境

1. 地表水

2024 年，我市地表水国控断面水质优良率

90.9%，同比上升 9.1 个百分点；省控及以上断面水质优良率 96.3%，同比上升 7.4 个百分点。市控及以上断面水质优良率 98.9%，同比上升 2.1 个百分点。水质功能达标断面比例为 100%，与上年相比提高 4.3 个百分点。

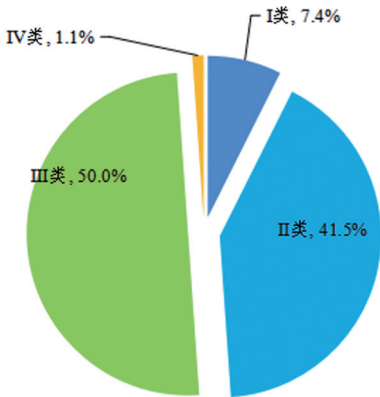


图 4 2024 年宁波市市控及以上断面水质类别比例

(1) 主要水系水质状况

2024 年，各水系水质均为优良，甬江水系、平原河网、入海河流和湖库总体水质均为优。平原河网中

余姚河网、鄞东河网、鄞西河网和北仑河网水质为优，慈溪河网、江北河网和镇海河网水质良好。同比，鄞东河网和象山入海河流水质有所好转，其他水系水质无明显变化。

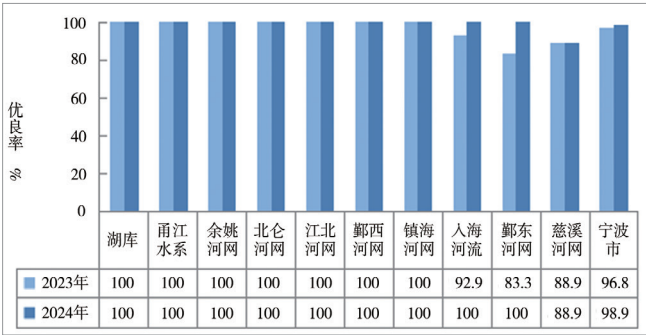


图 5 2023~2024 年宁波市各水系水质优良率

(2) 区（县、市）地表水水质状况

海曙区、江北区、镇海区、北仑区、鄞州区、奉化区、余姚市、慈溪市、宁海县、象山县参评断面水质综合评价为优，高新区为良好，前湾新区为轻度污染。同比，象山县水质有所好转。

2024 年各区（县、市）地表水水质状况

序号	区域	断面数(个)	综合污染指数及排名	总体水质状况		主要污染物及断面超Ⅲ类率
				2023 年	2024 年	
1	宁海	11	0.22（1）	优	优	
2	奉化	11	0.25（2）	优	优	
3	象山	7	0.28（3）	良好	优	
4	海曙	10	0.34（4）	优	优	
5	鄞州	11	0.34（4）	优	优	
6	余姚	11	0.37（6）	优	优	
7	北仑	10	0.38（7）	优	优	
8	镇海	6	0.41（8）	优	优	
9	江北	5	0.45（9）	优	优	
10	慈溪	9	0.47（10）	优	优	
11	高新区	1	0.49（11）	良好	良好	
12	前湾新区	2	0.52（12）	轻度污染	轻度污染	化学需氧量,50.0%

2. 集中式饮用水水源地水质状况

2024 年，全市 13 个县级以上集中式饮用水水源

地水质均达到或优于Ⅲ类标准，达标率 100%。营养状态除白溪水库为贫营养外,其他均为中营养。

2024 年宁波市县级以上集中式饮用水水源地水质状况

序号	水源地	所在区域	年均水质		综合营养 状态指数	营养状态
			类别	达标率 (%)		
1	★皎口 — 周公宅水库	海曙	Ⅱ类	100	37	中营养
2	★白溪水库	宁海	Ⅰ类	100	29	贫营养
3	★亭下水库	奉化	Ⅱ类	100	36	中营养
4	★横山水库	奉化	Ⅰ类	100	36	中营养
5	☆四明湖水库	余姚	Ⅱ类	100	37	中营养
6	☆梁辉水库	余姚	Ⅱ类	100	36	中营养
7	☆陆埠水库	余姚	Ⅱ类	100	36	中营养
8	☆双溪口水库	余姚	Ⅱ类	100	38	中营养
9	☆上林湖水库	慈溪	Ⅱ类	100	38	中营养
10	☆黄坛 — 西溪水库	宁海	Ⅰ类	100	31	中营养
11	☆溪口水库	象山	Ⅱ类	100	37	中营养
12	☆仓岙水库	象山	Ⅱ类	100	33	中营养
13	☆上张 — 隔溪张水库	象山	Ⅱ类	100	34	中营养

注：带“★”为市本级饮用水水源地，带“☆”为县级饮用水水源地。

(三)近岸海域环境

2024 年，我市近岸海域水质优良比例（即一类、二类比例）46.8%，同比下降 6.1 个百分点；四类与劣四类海水水质海域面积占比 43.8%，同比上升 11.2 个百分点。

(四)土壤环境与地下水

1. 土壤环境

2024 年，我市受污染耕地安全利用率为 98.57%，超额完成省定目标；供地前重点建设用地安全利用率为 100%，完成省定目标。结合年度评审情况，共有 2 个污染地块纳入浙江省管控和修复名录，6 个污染地块完成治理修复并移出浙江省管控和修复名录。

2. 地下水

2024 年，全市 6 个国控地下水水质监测点位中，3 个为Ⅲ类，3 个为Ⅴ类，总体保持稳定。

(五)固体废物

1. 一般工业固废

据初步统计，2024 年全市工业企业共产生一般工业固体废物 1485.78 万吨，综合利用 1482.68 万吨（其中综合利用往年贮存量 0.12 万吨），综合利用率为 99.78%；处置 3.05 万吨（其中往年贮存量 0.07 万吨），处置率为 0.21%；贮存量为 0.24 万吨。固废种类主要是粉煤灰、炉渣、冶炼废渣、脱硫石膏和废水处理污泥。

2. 危险废物

据初步统计，2024 年全市工业企业危险废物产生量为 201.2 万吨，其中利用量为 114.72 万吨（含利用往年贮存量 1.02 万吨），利用率为 56.73%；处置量为 86.89 万吨（含处置往年贮存量 0.64 万吨），处置率为 43.05%；贮存量为 1.25 万吨。危险废物种类主要是废碱（HW35）、废酸（HW34）、电镀污泥类表面处理废物（HW17）、废矿物油与含矿物油废物（HW08）和焚烧处置残渣（HW18），其中废酸（碱）和焚烧处置残渣主要由产生企业自行利用处置，表面处理废物和废矿物油全部为集中利用处置。

3. 处置能力

我市已建成危险废物集中利用处置企业 35 家，许可处置能力 193.1 万吨 / 年；企业自建危险废物处置设施 29 座，处置能力 190.4 万吨 / 年。全市危险废物总处置能力为 383.5 万吨 / 年，保持全省第一。

(六)自然生态环境

全市生态质量总体较好，生态质量指数(EQI)为 67.67,处于二类水平($55 \leq EQI < 70$)。10 个区(县、市)EQI 值降序排列依次为象山县、宁海县、奉化区、余姚市、海曙区、慈溪市、鄞州区、北仑区、镇海区和江北区。其中象山县、宁海县和奉化区生态质量处于一类水平，余姚市、海曙区、慈溪市和鄞州区处于二类水平，北仑区、镇海区和江北区处于三类水平。

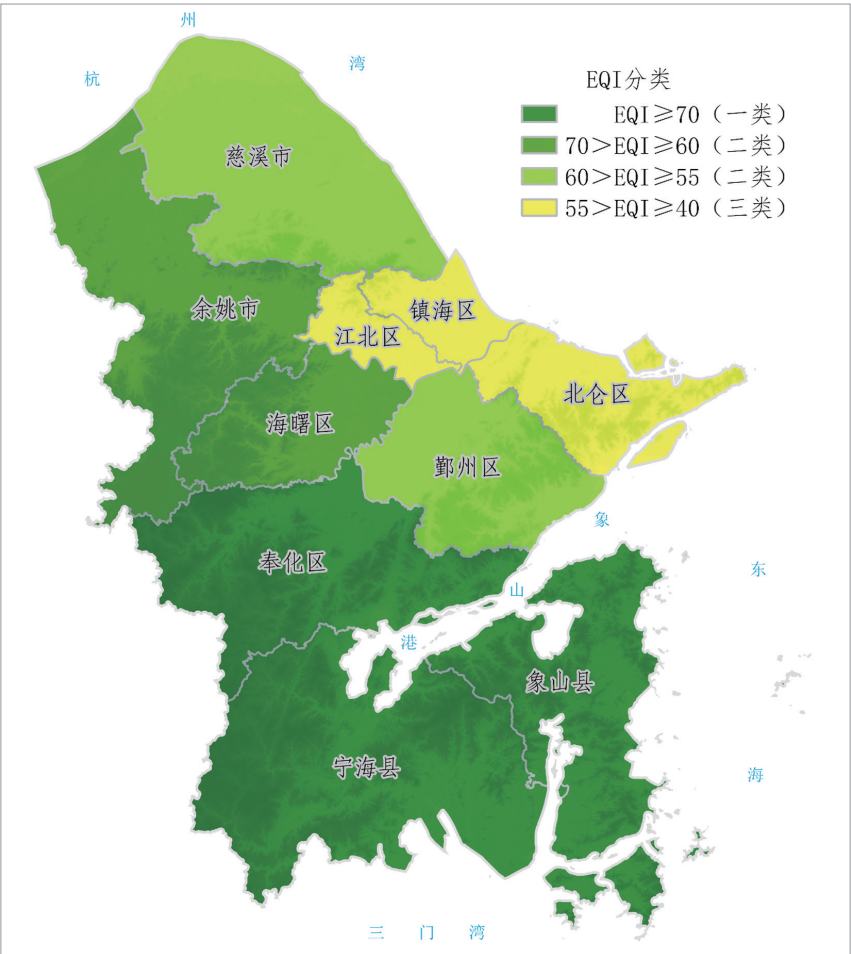


图 6 2024 年宁波市生态质量状况

(七)声环境

1. 功能区噪声

2024 年,宁波市功能区声环境昼间达标率 100%,夜间达标率 89.8%。

2. 区域环境噪声

2024 年,宁波市区昼间区域环境噪声为 55.2 分贝,声环境质量属于一般。宁海县、慈溪市、象山县、余姚市昼间区域环境噪声均值分别为 55.0 分贝、53.8 分贝、54.2 分贝、54.7 分贝,属较好。

3. 道路交通噪声

2024 年,宁波市区昼间道路交通噪声均值为 66.2 分贝,道路交通声环境质量属于好。象山县、宁海县、余姚市、慈溪市昼间道路交通噪声均值分别为 64.1 分贝、65.9 分贝、66.9 分贝、67.1 分贝,道路交通声环境质量均属于好。

(八)辐射环境

2024 年,宁波市辐射环境质量总体良好,电离、电磁辐射水平保持稳定,同比,均未见明显变化。

1. 放射源及射线装置

2024 年,宁波市涉源单位 99 家,申报登记各类放射源 1663 枚,其中,属于高危险源的 II 类放射源共 138 枚;射线装置应用单位 1422 家,申报登记各类射线装置 3680 台(套)。全年收贮、回收各类放射源 69 枚,所有放射源和射线装置均处于严格监管之中,未对环境造成污染。

2. 电离辐射

2024 年,常规环境监测点位瞬时环境 γ 辐射剂量率 76~89nGy/h,

累积环境 γ 辐射剂量率 99.1~106nGy/h, 处于正常环境本底水平范围内。地表水、饮用水、海水及土壤中的铀-238、钍-232、镭-226、钾-40、铯-90、铯-137等放射性核素活度与历年均值相比无明显变化, 处于正常范围内, 未出现异常。

3. 电磁辐射

环境电磁辐射水平总体情况较好, 电磁环境水平符合国家标准, 且集中在较低辐射水平范围。在公众正常活动区域内, 移动通信基站、高压输变电设施以及广播电视发射装置等电磁污染源的电磁辐射水平符合国家标准。高压输变电设施周围环境敏感点工频电场和磁感应强度, 广播电视发射系统、移动通信基站周围的环境敏感点电磁辐射水平均低于《电磁环境控制限值》(GB 8702—2014)规定的标准限值。

三、措施与行动

(一) 生态文明建设

统筹推进美丽宁波建设, 强化生态保护监管, 加强生物多样性保护, 深化生态环境损害赔偿等。

(二) 污染防治攻坚战

全力打好蓝天、碧水、净土保卫战, 深化海域综合治理, 扎实推进“无废城市”建设。

(三) 生态环境领域改革创新

深化试点建设, 强化数字赋能, 提升制度效能, 协同推进减污降碳。

(四) 生态环境问题查改

扎实抓好中央生态环境保护督察反馈问题、长江经济带警示片问题整改, 并将突出生态环境问题排查整治贯穿始终。

(五) 生态环境法治和监管执法

强化生态环境执法监管, 筑牢环境应急管理防线, 深化助企纾困工作。

(六) 公众参与与监督

持续开展生态环境宣传教育, 高效办理环境信访、人大建议和政协提案, 不断深化信息公开等。

构建全生命周期管理体系 实现生活垃圾焚烧飞灰“零填埋”

生活垃圾焚烧飞灰(以下简称“飞灰”)是指生活垃圾焚烧设施的烟气净化系统捕集物和烟道及烟囱底部沉降的底灰,因飞灰中二噁英及重金属超标,且氯化物含量在 15%~25%,被《国家危险废物名录(2021 年版)》列为 HW18 类危险废物。为深化贯彻全域“无废城市”建设要求,全面落实省委、省政府提出的危险废物“趋零填埋”目标任务,宁波自 2023 年起按照“分步走、成体系,构建飞灰处置全生命周期工作体系”工作目标,奋力推进飞灰资源化利用工

作,通过“机制确立、项目建设、资金激励”三管齐下,于 2025 年 4 月 1 日,实现全市飞灰“零填埋”。

一、科学决策,打好系统部署“组合拳”

坚持高位推动、系统谋划、压实责任,创新构建飞灰处置全生命周期管理体系,全面推进飞灰资源化利用工作。

一是高位部署,科学谋划体系构建。市政府多



图 1 生活垃圾处置——明州环境能源有限公司

次召开专题会议深入研究，明确以“构建飞灰全生命周期管理体系”为核心，坚持“分步走、成体系”原则，围绕生活垃圾治理提质增效，着力提升飞灰资源化水平，打通生活垃圾全链条“零填埋”最后一公里。

二是专班推进，压紧压实各方责任。成立副市长任组长、市生态环境局牵头，市发改委、市财政局、市住建局等9个相关部门和区（县、市）政府配合的攻坚行动工作专班，建立高效协同机制。各区（县、市）同步组建工作专班，形成上下联动的工作格局。坚持“任务清单化、责任具体化”，将飞灰资源化利用任务完成情况和项目建设进度纳入美丽宁波、“无废城市”建设和生活垃圾治理工作重点内容，确保责任落实到位。

三是系统施策，健全制度保障体系。印发《宁波市生活垃圾焚烧飞灰资源化利用全生命周期构建工作方案》和《关于生活垃圾焚烧飞灰资源化利用全生命周期构建工作的补充通知》，明确我市飞灰资源化利用工作推进时间节点，系统部署推动源头减量、谋划资源化项目、加快项目建设、制定指导价格、落实企业主体责任、加强日常监管、规范转移流程、拓宽产品出路八项重点任务，为飞灰资源化利用提供制度保障。

二、规划先行，下好项目推进“先手棋”

围绕危险废物利用处置“市域能力匹配”目标，科学规划5个飞灰资源化利用项目，构建“3+2”重点项目体系，通过三级联动机制推动飞灰资源化利用工作取得显著成效。



图2 外观

一是聚焦核心，打造三大骨干项目。将飞灰资源化利用项目纳入《宁波市危险废物综合利用设施建设方案（2023—2025年）》，全力推进位于北仑区、镇海区、宁海3地与全市处置需求匹配度高、建设进度快的重点项目，北仑海靖环保的5万吨/年的飞灰低温热分解资源化利用项目已于2024年9月投产，镇海、宁海项目预计今年内建成，将全面保障我市飞灰资源化利用需求。

二是完善配套，建设两大自用设施。除集中利用项目外，积极推动飞灰产生量大于2万吨/年的慈溪、余姚等地生活垃圾焚烧厂自建飞灰自行利用设施，实现“飞灰不出厂”，减少飞灰远距离运输风险。目前，余姚世茂能源的2.5万吨/年的飞灰低温热分解资源化利用项目已投产，基本满足本厂处置需求。慈溪中科众茂环保热电有限公司的飞灰资源化利用项目已启动前期工艺招标工作，预计今年年内可完成主体设施建设。

三是前瞻布局，谋划产业长远发展。一方面引导国有资本积极参与飞灰资源化利用行业，通过国企控股、参股联动、产业链协同等多种方式支持飞灰资源化利用产业良性稳定发展，在关键环节发挥兜

底保障作用,稳定市场预期、激发市场活力;另一方面加强技术引领与行业调控,密切关注飞灰资源化利用技术发展趋势,推动开展现有技术稳定性研究,鼓励企业创新升级,促进产业健康有序发展。

三、多维施策,织密政策支持“保障网”

科学构建多维协同的政策支撑体系,为行业高质量发展提供制度保障。

一是深入调研,精准测算成本价格。组织审计和技术专业团队对省内4个地市的飞灰资源化利用项目和本市在建的2个项目开展了实地调研,系统分析低温热分解、高温熔融、水泥窑协同等多种不同工艺路线的实际成本,建立产能规模与单位成本关联模型,精准估算市内拟建项目成本。同时,全面收集省内飞灰资源化利用公开招投标数据,通过成本测算、利润预估、招投标价格比对,形成科学的价格测算体系,为政策制定奠定数据基础。

二是因地制宜,实施动态奖补政策。以市美丽

办名义出台专项奖补政策,建立“基准指导价+差额补贴”机制,由生活垃圾焚烧厂自行采购确定飞灰资源化利用企业,签订处置协议并支付处置费用后,按照各焚烧厂原处置单价与年度奖补指导价差额的60%给予补贴,指导价参照省内公开采购最低价实行年度动态调整。这样,既保障飞灰资源化利用企业合理收益,又促进市场良性竞争,推动所有焚烧厂在今年4月1日完成飞灰“零填埋”。

三是分类推进,稳妥做好填埋厂善后。明确2025年4月1日起全市所有生活垃圾填埋场飞灰填埋专区全面停止接收飞灰,采用“一库区一政策”模式,分类处置全市6个填埋场、55万吨剩余库容和企业待回收投资,通过政企分担、财政统筹等方式实现平稳过渡,同步将剩余库容转为应急储备资源。

四是“三流合一”,实现飞灰资源化利用闭环监管。通过规范飞灰资源化产品二噁英送检频次并开展监督性监测,确保飞灰利用出厂产品合规。同时,联动后端飞灰利用企业资源综合利用增值税优惠监管制度,实现物流、资金流、发票流“三流合一”,切实筑牢飞灰资源化利用全流程闭环监管防线。

通过构建飞灰全生命周期管理体系,我市成功实现全域“零填埋”的重大突破,为飞灰资源化提供了系统解决方案,打通了生活垃圾全链条治理“最后一公里”,为全国落实危险废物“趋零填埋”目标提供了可复制的“宁波样板”,为“无废城市”建设提供新动力。

(宁波市生态环境局土壤和固体废物化学品处)



图3 中控室

在双碳目标下推进宁波碳普惠体系建设

“十四五”以来，以习近平同志为核心的党中央，统筹国内、国际两个大局，作出了“3060”碳达峰碳中和的庄严承诺，并通过构建碳配额强制减排为基础、自愿减排为补充的双重碳减排体系等举措推动碳减排。宁波作为制造业强市，近年来深入践行新发展理念，在绿色低碳发展领域积极探索实践，已取得了一系列显著成效。但在实现双碳目标的征程中，仍面临诸多挑战，还需从多维度持续发力，其中构建碳普惠体系，动员全社会力量参与碳减排，是极具潜力的路径。

一、开展建设碳普惠体系的必要性

（一）国家战略有部署。2024年党中央国务院印发《关于全面推进美丽中国建设的意见》，提出要探索建立碳普惠等公众参与机制，通过碳普惠体系将个人和小微企业绿色行为转化为可量化的价值，激发全民参与减碳内生动力，既是对国家探索建立碳普惠等公众参与机制部署的响应，也是将国家“双碳”战略目标

与我市发展实践相衔接，更是全市“双碳”目标顺利实现的重要保障。

（二）经济发展有需求。我市以制造立市，制造业

企业为提升竞争力均有碳排放抵消的迫切愿望，特别是受绿色低碳供应链以及欧美CBAM等国际经贸碳壁垒影响的企业，更有开展碳交易的强烈意愿，但因缺乏合规的交易体系导致企业需求未

能得到有效支撑。同时，我市具有丰富的海洋和森林碳汇，司法实践中大量生态损害赔偿资金因市场化运作机制缺位导致被闲置。此外，公众绿色低碳行为、大型活动和公共设施低零碳要求，也因缺乏有效的兑现途径或实现场景而被弱化。

（三）地方试点有经验。自2015年碳普惠机制提出以来，全国多地围绕碳普惠开展实践探索：广东省整合公交出行、垃圾分类等12个场景，创新推出“碳积分—碳币”双轨激励体系和市场化交易机制；武汉市开发建设“武碳江湖”小程序等，成立专业运营企业，近5.2万吨碳普惠减排价值实现；深圳市立法明确碳普惠体系建设要求，累计完成碳普





惠核证减排超 5.5 万吨。我市也积极探索，宁海得力文具、象山易锻精密、杭州湾吉利等制造业企业通过碳普惠实现产品碳排放抵消，海曙区以碳普惠为通道创新建立了“公益损害赔偿+竹林经营碳汇”模式。

二、我市碳普惠体系建设面临的问题

（一）碳普惠政策体系欠缺。碳普惠建设工作方案、管理办法等政策文件尚未制定，工作缺乏顶层设计和统筹协调，导致部门工作职责要求不清，发改、经信、生态环境等部门均依照自身理解推进，造成工作要求不同、标准不一、数据不通，部门间合力难以有效形成。同时，因缺乏统一的政策制度保障，试点工作经验未能有效转化为制度化的规则，影响了中小微企业和公众参与绿色低碳行动的积极性。

（二）碳普惠交易支撑能力不足。碳普惠交易和管理平台等硬件能力不完善，支撑连续稳定交易的碳普惠减碳量核证、备案、核销管理平台，以及公共减碳数据交换汇集等系统建设还未启动。碳普惠减排技术支撑体系未建立，生态碳汇，企业工艺减碳、资源循环降碳和公众低碳等领域“可衡量、可报告、

可核查”的方法学和碳普惠减碳量核算和评估技术支撑体系缺失，制约碳普惠市场交易的有效开展。

（三）碳普惠产品交易供需不平衡。据初步估算，目前在碳普惠供应方面，仅生态碳汇和轨道交通领域供应量较多，但在碳普惠应用场景方面，目前相对稳定的应用场景为生态环境赔偿（包括检察公益诉讼和行政赔偿磋商），其他企业低碳创建、重大会议和活动需碳量还无法有效估算，碳普惠稳定的应用场景与产品供应之间还存在较大差距，碳普惠应用场景还需进一步开发建设。



三、开展碳普惠体系建设的工作建议

(一)完善碳普惠政策与标准体系。加快推动全市碳普惠工作体系制度建设,围绕碳普惠工作要求,推动建立“1+1+2+N”的碳普惠工作推进政策制度体系,即1个碳普惠体系建设工作方案厘清部门责任,1个碳普惠管理办法强化碳普惠管理基本原则,2个碳普惠方法学和减排场景(项目)开发指南提供工作指引,N个方法学提供技术支撑,强化碳普惠体系的建设目标、实施主体、参与对象、交易流程、减量核定等要求内容,为碳普惠体系的建设和运行提供明确的政策依据和基础保障。同时,结合宁波能源产业特点,制定鼓励政策,支持行业协会和企业、科研机构 and 高校开发适合宁波实际的碳减排核算标准和方法学,并按照“谋划一批、成熟一批、发布一批”原则,按需进行

发布。

(二)打造碳普惠交易管理平台。结合我市试点工作经验,构建完善碳普惠交易和综合管理2个平台系统:完善和规范碳普惠交易平台,提升碳普惠交易便捷度,实现碳普惠价值的高效实现;积极谋划碳普惠综合管理平台建设,规范碳普惠核算、备案、登记、市场流转和利用核销等工作流程,并利用大数据、云计算、区块链等信息技术,将政府部门、企事业单位、社会组织数据对接,实现低碳行为数据自动采集和实时更新,为企业和个人提供统一、规范服务,为碳普惠服务监管和公众参与提供良好基础保障。

(三)组建碳普惠管理机构。组建市场化运作管理团队(建议以国资为主导),发挥其在整合市场资源、推动市场化运作和保障数据安全等方面的优势,开展碳普惠工作的推广和运行,形成专业化、市场化运作的碳普惠建设正向循环工作机制,并配套带动碳核算、碳认证、碳中和等涉碳服务产业发展。同时,成立以政府部门为主导,建设多行业、多领域专家组成的碳普惠专家团队,对相关碳普惠方法学开发、碳普惠减碳项目核算等进行技术支撑。

(四)拓展碳普惠供需两端产品开发应用。以碳普惠项目和公众碳普惠场景为支点,推进生态碳汇、资源循环和光伏碳减排、公众绿色低碳出行场景等产品开发,重点实施竹林碳汇、近岸海域养殖蓝碳项目的梳理和项目储备,深化搭把手建筑垃圾再生资源 and 光伏建设等项目减碳量核算,推动轨道交通、共享单车等低碳数据互联互通和精准识别,积极提供稳定持续和可量化、可核算的碳普惠产品供应。以企业绿色转型、低零碳建设、生态损害赔偿 and 活动碳中和为抓手,拓展碳普惠产品消纳场景,加大生态损害赔偿、低零碳工厂创建、上市公司ESG报告披露等碳普惠支持力度,带动碳普惠交易市场的持续性和活跃度。

(宁波市生态环境局综合规划与法规处)



强化数字赋能 推进智慧监管

宁波上线 AI 平台遏制车辆环检造假

随着蓝天保卫战的持续深入，移动源污染排放给空气质量持续改善带来了新的挑战，看似移动分散的“小微污染”可能成为影响空气质量的重要环节。生态环境部数据显示，目前全国机动车氮氧化物排放量占氮氧化物总排放量的 34%，机动车尾气已成为当前大气污染的主要来源之一。机动车排放检验作为控制车辆尾气排放的关键环节，其管理效能对于挖掘污染减排空间至关重要。为强化机动车排放检验监管，破解各类弄虚作假乱象难题，守牢机动车排放管控“最后一环”，近年来，宁波以非现场监管执法试点、移动源专项帮扶督导等工作为契机，开发上线“机动车排放检验‘AI 数智卫士’应用场景”，通过大数据 +AI 算法实施对机动车排放检验机构全方位

非现场监管，实时、精准发现问题线索，大幅提升执法监管效能。

一、构建智能化算法模型，实现检验过程“线上查”

全省首创基于深度学习机制的机动车排放检验监管平台，全面把控检验总体流程的规范性，基本实现机动车检验排放各类违法违规行系统智能化智能预警。一是全量构建模型算法。建立以质控管理、仪器设备、软件系统、操作过程为核心的算法模型（4 大模型、46 条逻辑、102 项规则），四大模型中的质控管理规范模型主要对检验机构资质备案、检测方法及

标准适用等项目智能分析，确保检验数据的可采性和科学性；仪器设备监控模型对设备检定超期、环境参数超范围、自检不规范等行为进行预警，确保检测仪器设备的正常运行；软件系统分析模型对发动机转速监控异常、传输数据缺项等站端软件问题进行预警，从软件层面减少违法违规行



图 1 宁波车检“AI 数智卫士”应用场景



图 2 平台算法模型体系

为的发生；操作过程监管模型对发动机额定功率错误、擅自减少检测项目、非工况法过程曲线异常等问题进行预警，及时发现篡改发动机功率、跳过检测项目出具合格报告、伪造检验数据结果等虚假检测行为。二是深度学习自我成长。通过建立“数据—检查—论证—修正”的深度学习机制，推动监管平台持续进化自我完善。一方面，以强化监管执法持续推动模型算法升级，通过各类监督检查和专项帮扶督导行动，持续积累各类问题线索核查数据库，系统平台以逻辑奖励函数（正面吸收和错误纠正双向调整）

二、建立分类化整改标准,推动预警问题“闭环治”

针对预警线索的问题性质、严重程度,按照“分类推送、分项整改、分层级闭环”的原则,有针对性地推进问题整改闭环。一是轻微问题立行立改。对检测过程中虽有轻微不规范但对检测结果数据不影响的问题线索(如公里数填写不准确、检测时间较实际偏差较大等),直接移交所在机动车排放检验机构,自行整改闭环。二是违法问题及时查处。对检验过程弄



图 3 平台预警问题典型案例

虚作假以及未按规定操作这两类违法行为，平台系统在智能识别预警的同时，将同步固定违法行为证据链条，第一时间移交执法人员开展现场调查取证，按大气法、省条例等相关条款实施行政处罚，并实行机动车排放检验机构记分处理。三是大案要案联合惩戒。对机动车排放检验过程中出现的性质严重、影响恶劣的典型问题，生态环境部门暂停检验机构数据联网采信，市场监管部门取消其检验机构资质，构成犯罪的，移送公安机关依法追究相关单位或个人的刑事责任。自平台上线以来，累计分析检测数据 127 万余条，发现违规问题 1250 个，违规问题识别准确率提升近百倍，查处环检造假违法行为 11 起。

三、完善标准化监管机制，落实检验机构“精细管”

坚持预防式监管执法理念，以数字化平台为支撑，建立健全机动车排放检验机构“画像评价 — 帮扶提升 — 正面激励”全流程监管服务机制。一是建立全维度画像评价机制。综合预警线索、问题查处、帮扶整治等情况，开展机动车排放检验机构“数字画像”，绘制检验机构质控管理、仪器设备、软件系统、操作规范、信访服务等多维度能力评价“玫瑰图”，全方位量化检验机构排放检验质量管理水平。二是建立点穴式帮扶督导机制。结合画像评价情况，定期梳理问题多发、频发的重点机构，共性问题易发、高发的重点环节，采取

行业专家会商、现场联合督导等形式，精准开展专项帮扶行动，综合提升车辆排放检验规范化、科学化水平。三是建立多元化正向激励机制。事前结合全国首批生态环境非现场监管试点，推行“无事不扰”监管模式，降低现场监督检查频次，事中通过 AI 实时推送问题，指导机构即时整改；事后依托平台固定证据，实现“线索发现 — 核实 — 处置”闭环管理，既保障监管力度，又减少对企业干扰，检测机构规范性和满意度同步提升。

下步，宁波市将紧扣移动源排放监管的新形势、新要求，持续推动“AI 数智卫士”迭代升级，完善平台功能设计，优化各类模型算法，结合各类前沿信息技术的发展，拓展视频图像分析，持续新增各类逻辑规则，不断提升预警预测的准确率和覆盖面；延伸监管链条，深化排放检验与维修治理（I/M）数据的互联互通，推动车辆排放检验与维修环检 AI 联动分析，实现虚假检测和虚假维修违法行为联合打击；积极探索建设“机动车全生命周期智慧监管”应用场景，推动机动车在上牌登记到淘汰报废的全生命周期内实现“一库统筹、一网统管、一体联动”，高质高效强化移动源污染物减排，助力空气质量持续改善提升。

（宁波市机动车排气污染防治管理中心）



图 4

推动环境污染治理向环境健康管理跃升 打造健康优先环境提升绿色发展新模式

北仑区作为临港工业强区，大港口、大工业、大制造等特征突出，环境健康风险管控压力大。近年来，北仑区坚持以城市三化转型为牵引，以更高站位先行推动环境健康管理在基层落地，建立健全以维护公众健康为核心的生态环境管理体系，全力打造工业经济发达地区环境健康管理创新样板。2023 年，宁波经济技术开发区入选首批省级环境健康友好创新试点。2024 年，宁波经济技术开发区成功入选，成为全国第二个、全省首个获批的试点经开区，2025 年，国家环境健康管理试点在市委深改委会议上通过审议并全面实施。

一、注重源头防控，构建全过程风险管理体系

一是全域筛查风险底数。针对化工园区新污染物风险评估管控技术标准空白、有毒有害化学物质基本信息库缺失等现状，开展化工企业新污染物摸底调查，聚焦青峙、临港、大榭三大重点化工区，系统梳理 64 家重点企业涉及新污染物的原辅料、产品及工艺废水、废气排放情况，于全市率先建立新污染物风险源清单，为精准治理打下坚实基础，目前，累计发现涉新污染物企业 23 家，排查出重点管控物质 2 种、详细调查物质 7 种。二是精准监测污染现状。针对新污染物种类繁多、风险隐蔽、监测监控体系不健全等挑战，构建“监测 + 评估”全域环境质量管控立体网络，对二氯甲烷、三氯甲烷等 104 种典型新污染物开展高精度监测，并



图 1 智慧监测监管

依托全省首个区县级 AI 智能实验室实现自动化检验、分析、评估，精准识别环境健康风险。截至目前，全域累计布局空气、土壤、地表水、地下水、海洋等各类环境监测点位 1200 个。三是科学建设智慧平台。针对新污染物风险点位数据多、管理难等问题，开发建设全省首个环境健康管理平台，全面集成企业环境健康友好指数、环境健康风险等数据，形成一张环境健康风险地图，并融入大数据模型分析，可以实现环境敏感点风险预测，推动环境健康风险动态监管、可视管理。

二、实施精准管控，提升全领域风险治理效能

一是实施差异化管控。将环境健康理念纳入“三线一单”动态更新、污染物总量控制等环境管理体系，严格控制污染排放多、风险大的项目盲目上马，针对重点片区、产业园区、重点企业开展分区分级管控，划定 17 个管控单元，实施差异化、精细化管控举措，提



图2 新污染物监测

升精细化管理水平。二是创新预防式监管。针对低环境健康风险的企业,深化项目白名单制度,实施正面清单管控,组织开展企业绿色体检、用电监控管理,落实专家帮扶、消除环境隐患,并对正面清单企业降低检查频次,实现“无事不扰、有事帮扶”,累计培育正面清单企业107家,远程帮扶800家次。三是深化多领域治理。针对环境健康风险突出的企业,一体推进水、气、土、废等传统污染物治理,同步强化新污染物管控,实施新污染物源头替代,引导企业将新污染物纳入重点管控范畴,并在全市率先推进涉新污染物产线淘汰、新污染物原材料停用,实现生产环节的绿色替代,源头削减环境健康风险。如,万华化学(宁波)容威聚氨酯有限公司停用涉新污染物生产线,淘汰内分泌干扰素壬基酚原料120吨/年。

三、推动价值转化,促进全产业链迭代升级

一是深化产业特色治理。以全域国土空间综合整治为牵引,加快空间、产业、交通、能源四个结构优化升级,创新实施产业“绿岛”集成管理,引导同类型、上下游企业向“绿岛”园区集聚,推进临港传统产业绿色化、低碳化改造,培育壮大绿色生产力。如,大碇高端汽配模具园区通过“绿岛”集成改革,园区汽配模具企业从30家扩容至88家,年产值从60亿元升至近400亿元,汽配模具产值占全区50%以上,9家企业

获评国家级绿色工厂、专精特新“小巨人”企业,以产业“含绿量”提升发展“含金量”。二是发展环境健康友好产业。推动海洋生物健康产业集聚发展、高校“智库”一体发展,集中培育一批健康旅游、运动、养老、富民等环境健康品牌,深挖梅山湾文体旅和生态资源禀赋,探索环境健康友好消费,打造环境健康应用场景,推动环境效益转化为经济效益、社会效益。

四、强化协同共治,带动全覆盖健康成果共享

一是设立“两山环境健康”基金。依托全国首个区县级“两山”环保基金会,吸纳全区50多家企业,筹集资金3000多万元,制定奖补细则,给环保技术研发、环保宣传教育、环保公益项目等发放补贴,鼓励实施各类环境健康友好管理实践,推动环境健康成果共建共享。二是畅通友好交流通道。参与制定环保设施向公众开放国家标准,建立环保设施全品类公众开放制度,打造全国环保设施开放标杆区,引导公众积极了解企业绿色发展模式,提升群众获得感和满意度。目前,累计持续培育市级以上环保设施开放单位18家,其中3家已列入国家开放名录,开放种类与数量均居全市第一。三是加强宣传普及力度。积极打造“绿满港城”生态宣教品牌,建立以宁波市生态文明教育馆为核心的“1+X”生态文明教育体系,全力创建全国生态环境宣教创新标杆区,成立1个“绿满港城”环保公益服务中心,统筹管理全区10支生态环境志愿队伍、超8100名志愿者,实现“专业监督+大众参与”绿色发展模式,形成环境保护公众参与新格局。

下一步,北仑区将以国家级环境健康管理试点为契机,持续健全以维护公众健康为核心的生态环境管理体系,加快探索将环境效益转化为经济效益、社会效益的新路径、新模式,努力在建设人与自然和谐共生的现代化上走在前列,真正让临港工业区山清水秀、绿色低碳、文明健康。

(宁波市生态环境局北仑分局)

创新“环评瘦身”改革 助力投资项目降本增效

针对当前建设项目环评报告普遍存在的内容冗杂、编制低效、成本虚高等痛点，江北区创新推出“环评瘦身”改革，通过规范内容形式、简化流程手续、强化监管审核等措施，助力投资项目降本增效。改革以来，累计 130 多个建设项目受益，实现环评报告内容平均简化 30%、编制周期缩短 33%，企业费用下降 20%。通过“速度提升 — 成本降低 — 效益释放 — 便利赋能 — 环境优化”的传导机制，形成“企业获利、政府提效、生态可持续”的多赢格局。

一、规范内容形式，环评报告“瘦身塑形”

一是政策对标“精准导航”。要求仅对照项目所在地最新政策文件，重点分析施工阶段生态环境影响显著的内容，淘汰多层文件重复比对模式。以往企业编制环评需分别对照国家、省、市、区四级政策，耗费企业大量比对时间。由于市、区政策贯通落实国家、省级政策核心条款，导致四级政策大量内容交叉重复。江北区协同环评机构编制国家、省、市、区四级政



图 1 召开建设项目环评专家评审会

策清单,明确告知企业,无须逐一比对,以清单上最低行政级别出台的政策为准。

二是内容约束“去繁就简”。明确环评报告中与项目环境影响关联性不大的条款,仅作结论性判定,禁止大篇幅摘录规划文本,环境质量数据直接采用达标结论,避免冗余论证。例如汽车零部件项目,不再大篇幅摘录区域规划情况及环境数据,空气质量达标区直接引用“合格”结论,不用列出PM_{2.5}、二氧化硫等环境数据,避免冗余论证,压缩报告篇幅。

三是数据呈现“一目了然”。在报告数据呈现上倡导“图表替代文字”,同类数据整合呈现,建立“结论前置+数据支撑”的模块化结构。如在化工项目环评报告中,通过图表展示各类污染物排放数据,重复性描述压缩30%以上。

二、简化流程手续,环评审批“换挡提速”

一是服务机制“两早两快”。建立“早介入、早服务+快审批、快落地”专班,依托“三线一单”生态环境分区管控和“浙里环评”数字化平台,在项目前期提前介入,分析项目是否符合生态环境准入清单要求,结合《建设项目环境影响评价分类管理名录》智能判定环评等级,帮助企业提前做好环评准备,推动建设项目投产周期提速60%以上。通过“智管家”系统等数字化工具,企业可在线提交环评文件、获取批复文件,实现“零跑腿”;信用较好的企业可获得“免踏勘”“即报批”绿色通道,进一步简化流程。

二是审查模式“双线并行”。同步推进专家审

核与行政审批,通过“线上预审反馈+线下集中会商”形式,专家线上预审提出意见,线下共同解决复杂问题,审核总时长从15天缩至10天,审批时效提升20%。通过提前介入与预审指导,协助企业梳理环评文本编制要点,避免因材料缺失或材料不符导致退回修改,问题解决率提升20%,进一步缩短环评文本准备周期。

三是审批流程“并联提速”。以“三线一单”等为抓手,实施名录外无审批、降级备案免审批等举措。截至目前,对89个非敏感项目简化审批手续,在2个省级园区和2个特色小镇实施“区域环评+环境标准”清单式管理,完成52个降级备案,审批项目缩减50%以上。通过“区域环评+环境标准”改革,项目环评可共享园区规划环评的环境现状、污染源调查、监测报告等数据,减少重复监测和分析。如宁波某新能源汽车公司在编制环评时引用了园区共享监测数据,环评编制周期从45天压缩至30天,整体流程提速了50%,环评提速使企业更早启动项目建设,按年化收益5%估算,可节省资金成本约6.8万元。同时环评瘦身又帮助企业及时申报国债,获得低成本资金支持(国债利率低于市场融资利率)



图2 现场对接上门服务企业

2~3个百分点)。此外,对符合准入标准且不增加重点污染物排放的项目,江北区推出“承诺备案制”,凡是技改项目未新增用地、污染可控均可适用该承诺制,大幅压缩审批等待时间。

三、强化监管审核,环评市场“强筋健骨”

一是多举措业务提升。

为进一步促进江北区环评行业健康发展,制定《江北区环境影响评价工程师管理措施》,每季度开展线下环评工程师技术交流会,邀请专家解读修编后的《江北区建设项目环境影响报告表编制规范》,对污染影响类环评报告表编制规范进行针对性和系统性讲解,不断提高环评单位环评报告编制能力,有效提升江北区开展业务的环评单位整体服务能力水平。自2024年以来,江北区共开展6期线下环评技术交流培训会,同步在线上交流群分享培训课件,形成线上线下闭环式交流平台,促进环评与服务质量双提升。

二是全闭环监管评价。进一步优化环评工程师管理措施,加强对环评工程师考核评价,对25家环评中介机构信息及名录排序实施动态更新,要求第三方环评机构环评工程师亲自现场踏勘和对接项目,确保



图3 召开环评工程师培训交流会

环评工程师实际参与项目,杜绝资质挂靠、弄虚作假等问题,倒逼中介机构业务能力提升。同时全程把控编制进度,编制时长要求从45天降至30天,同时构建线上共享平台,实现环境质量监测数据共享,截至目前,报告退回修改率下降20%,环评质量考核分从67分提升至72分。

三是严把关质控审核。组建环评专家团队全覆盖技术审核,复杂项目实施“三方会审+现场指导”,如对污染源源强核算方法错误、风险防控措施不完善等问题,提出针对性整改措施。截至目前,江北区环评报告抽查合格率保持在100%,在过去三年高强度抽查考核工作中,江北区系唯一未被上级部门通报环评质量问题的宁波市辖区。

(宁波市生态环境局江北分局)

“环境催化城市”:概念提出和研究展望

■ 马金珠^{1,4} 楚碧武^{1,4} 马庆鑫^{1,4} 何广智^{1,4} 刘 倩^{1,4} 王书肖³ 贺克斌³ 赵进才^{2,4} 贺 泓^{1,4,5} ■

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2. 中国科学院化学研究所, 北京 100080

3. 清华大学, 北京 100084

4. 中国科学院大学, 北京 101413

5. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021)

引 言

在城市化的进程中, 人口聚集和产业集中导致生产生活过程中大气污染物高强度排放。当大气污染物的排放总量超过大气环境容量, 即大气自净能力不足以去除排放的大气污染物时, 污染物将在大气中积累并发生复杂的二次转化过程, 进而导致大气复合污染, 对人体健康和可持续发展构成重大威胁。

环境微界面过程是大气复合污染形成的重要原因。在当今世界的很多发展中国家中, 由于高浓度大气颗粒物的界面催化作用, 导致大气氧化能力增强, 气态污染物向颗粒态污染物转化加快, 从而形成了一种新的大气“霾化学”污染。例如, 矿尘颗粒物和氮氧化物(NO_x)可以大大加快二氧化硫(SO_2)的界面氧化, 导致我国强霾期间硫酸盐快速增长; 黑碳颗粒物可以在自然条件下催化活化 H_2O 、 O_2 、 NO_x 等, 生成活性氧物种, 增强大气氧化性, 显著贡献大气二次污染。另一方面, 人类活动对大气下垫面的改造也被认为会对大气化学过程产生重要影响。例如, 建筑表面二氧化钛(TiO_2)材料的使用, 可能对大气中五氧化二氮(N_2O_5)、气态硫酸(H_2SO_4)以及新粒子的形成具有重要贡献。

大气环境中的界面催化过程对大气二次污染

[如细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)、臭氧(O_3)等]的形成产生重要作用的同时, 也可对大气中一次排放的气体污染物产生净化作用。快速的城市化过程改造了大气下垫面, 为人为干预净化大气污染物提供了可强化的条件, 城市大气下垫面调控有望在大气污染精细化管理中发挥重要作用, 并在人口聚集区取得显著的健康效应。

1. “环境催化城市”概念的提出和发展

环境催化包括人为的环境催化和自然界中自发的环境催化。自发的环境催化是指将整个地球大气层看成一个光和热的反应器, 研究和地球表面以及大气颗粒物有关的非均相大气化学中的界面催化过程。人为的环境催化主要是研究和利用催化科学与技术消除已经产生的污染物。光催化材料在光子的照射下, 价带中电子受激发跃迁到导带, 在价带中形成空穴, 电子和空穴分别与 O_2 和 H_2O (或表面羟基)作用形成超氧自由基和羟基自由基, 从而氧化降解污染物。室温催化材料不需要额外的热源, 在实际大气条件下就可以发挥催化作用, 净化环境污染物。光催化技术和室温催化技术为在城市环境中应用催化材料净化空气提供了技术基础。“环境催化城市”是指将城市中的建筑物外墙、硬化地

面等表面涂覆催化材料,从而在自然界的光、热等条件下即可实现环境中低浓度气态污染物自发催化净化的城市。

当今世界很多国家面临严峻的 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染问题,目前尚缺乏成熟的协同控制策略。在 PM_{2.5} 治理的过程中,出现了 PM_{2.5} 浓度下降而 O₃ 污染恶化的困境。近地面对流层 O₃ 主要是人类排放的挥发性有机物 (VOCs) 和 NO_x 发生大气光化学反应生成的,属于典型的二次污染物。NO_x 和 VOCs 共同影响对流层大气中 O₃ 的浓度。现阶段,我国 O₃ 污染在大多数城区主要受 VOCs 控制。理论上要实现城区 O₃ 浓度的快速下降, VOCs 减排量应远大于 NO_x。然而,由于 VOCs 人为源排放非常分散复杂,溶剂使用、居民生活等无组织排放缺乏成熟有效的控制技术手段,而且相当一部分 VOCs 来自天然源排放,难以人为控制。因此,在短期内还难以实现 VOCs 的大幅减排。与此同时,进一步降低 PM_{2.5} 浓度又需要我们大幅减排 NO_x。在 VOCs 减排较慢而 NO_x 快速减排的过程中,必然会造成 O₃ 的反弹。由于 O₃ 是气态污染物,而且 O₃ 分解为氧气属于放热反应,在热力学上可行,因此开发高效的催化材料可以实现对大气环境低浓度 O₃ 的直接分解。

目前国内多个科研团队通过长期的研究,开发了一系列具有自主知识产权的室温(低温)、高湿度、高空速条件下能够高效催化分解 O₃ 的催化剂。研究者对 O₃ 催化分解反应的活性位点和反应机理进行了系统研究,提出了室温(低温)条件下 O₃ 高效分解的三个限制因素:即活性位点不足,水分子对活性位点的竞争吸附和中间态氧物种的不脱附。通过调控活性位点种类(性质)和调变反应路径,成功研制了新型高效稳定的 O₃ 分解催化剂,揭示了新的氢转移反应机理,突破了限制室温(低温)条件下 O₃ 高效分解的三个因素,实现了 O₃ 催化分解材料的室温(低温)性能和高湿度、高空速条件下稳定性的提

升。基于催化剂具备常温、高湿度和高空速(百万体积空速)条件下高效分解 O₃ 的特点,大气霾化学研究团队和企业合作将催化剂添加到建筑外墙涂料中,在保留涂料原有功能的同时增加了分解 O₃ 的活性,实验室和外场测试结果均表明功能涂料能够有效分解 O₃。2021 年,在北京市大兴区进行了 5200 m² 的外场应用和现场评估,通过与 1km 内站点对比,证明在大兴区 5200 m² 的施工范围内,对 O₃ 的去除效果在 5%~20%。推广 O₃ 直接分解技术及其材料制品,应用于新建建筑和老旧城区改造建筑物外墙、硬化地面、机动车散热器表面等,构建“环境催化城市”,可以在无外加能耗条件下实现对大气环境中 O₃ 的消除,有效减缓 NO_x 深度减排过程中 O₃ 污染的反弹。

“环境催化城市”的应用对象,除了臭氧之外,还包括其他大气污染物,如国内外已经在 NO_x 环境催化净化方面开展了一系列研究和应用探索, VOCs 的一些净化技术也具有应用潜力。另外,室内空气质量与人体健康密切相关,室内空气污染去除也是“环境催化城市”的一个重要应用场景。

2. 研究展望

根据《2022 中国生态环境状况公报》,2022 年,全国 339 个地级及以上城市中, O₃ 日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数浓度在 90~194 微克/立方米,平均为 145 微克/立方米,比 2021 年上升 5.8%; 339 个城市中有 92 个城市 O₃ 超标,占 27.1%。相比 PM_{2.5} 等其他大气污染物, O₃ 已经成为近年来我国大多数城市的首要污染物。2022 年,以 O₃ 为首要污染物的超标天数占总超标天数的 47.9%。在夏季,全国范围内的污染天中,几乎所有的首要污染物都是 O₃。在珠三角地区, O₃ 作为首要污染物的超标天数在总超标天数中的比例已超 90%。更严峻的是,2022 年全国重点城市 O₃ 日 8 小时浓度最大值

与 2013 年相比上升约 18%。从月变化情况看, O_3 浓度出现高值的时间从春秋向早春和晚秋蔓延, 持续时间增长; 从区域分布的情况看, O_3 污染逐渐由点状向片状发展, 影响范围增大。总体看, O_3 污染呈恶化趋势。一方面, 随着大气污染防治行动计划(2013~2017)和蓝天保卫战行动计划(2018~2020)的顺利实施, 大气污染防治已经进入深水区, 一次污染物进一步减排的难度加大, 精准控制的需求日益突出; 另一方面, 按照空气质量持续改善行动计划的要求, 到 2025 年, 全国地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 浓度比 2020 年下降 10%, NO_x 和 VOCs 排放总量与 2020 年相比均下降 10% 以上。由于 O_3 污染和前体物排放之间具有复杂的非线性关系, 我国 O_3 污染存在进一步恶化的可能性, $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同控制成为当前我国大气污染防治的紧迫任务。在“双碳”目标背景下, 大气污染治理除源头减排外, 需要更加低碳有效的控制手段, 这些都对进一步完善“环境催化城市”理论和推动实践应用提出了新的、更高的要求。

需要指出的是, 能够应用于“环境催化城市”的材料必须具有高性能、长寿命、低成本等特点。完善“环境催化城市”理论的主要任务包括: 利用实验室模拟、外场试验和数值模拟评估等手段, 系统研究大气污染物在典型城市界面的非均相化学过程, 科学评估界面过程可能产生的大气环境影响, 如是否会导致其他污染物的生成, 推动对城市大气污染具有自净功能的建筑材料的开发使用, 构建环境友好的城市界面; 构建环境催化城市效果评估方法与技术体系, 科学定量评估环境催化城市方案的实施成本、对大气污染物的净化效果及健康收益; 拓展适用于环境催化城市构建的技术体系, 针对不同污染物(O_3 、 NO_x 、 SO_2 、 NH_3 、VOCs)开发新型高效、稳定、低成本的净化技术, 扩展环境催化城市净化污染物的范围; 探索我国不同气候与污染条件下环境催化城市适用的技术体系, 开发适应不同需求的环境催化城市技术方案; 探索功能材料在环境催化城市室内外空气净化中的应用方式, 全面构建“自净城市”。

基于因子法与离线监测的污水处理甲烷排放差异性分析及控排建议 ——以宁波市为例

■ 余旭东¹ 邱艳梅² 王 耿³ 赵世恩³ 毛佳儿³ 杜建村⁴ ■

(1. 宁波市发展规划研究院 2. 宁波市生态环境科学研究院
3. 宁波市甬环苑环保工程科技有限公司 4. 宁波华清环保技术有限公司)

摘 要 污水处理是人为甲烷排放的普遍来源,开展污水处理甲烷排放控制具有多重效益。本研究通过对典型案例离线监测,识别宁波市生活污水、工业污水处理过程甲烷排放的关键环节,比对分析温室气体清单核算与离线监测计算的甲烷排放量差异。结果表明,监测计算排放量远低于核算排放量,体现出建立地方污水处理甲烷排放因子的必要性,并对地方开展污水处理甲烷排放控制提出相关建议。

关键词 离线监测 污水处理 甲烷排放

Divergence Between Emission Factor–Based Estimates and Offline Monitoring of Methane Emissions from Wastewater Treatment: A Case Study in Ningbo, China

Yu Xudong¹, Qiu Yanmei², Wang Geng³, Zhao Shi'en³, Mao Jia'er³, Du Jiancun⁴

(1.Ningbo Development Planning Research Institute; 2.Ningbo Research Institute of Ecological and Environmental Sciences; 3.Ningbo Yonghuanyuan Environmental Protection Engineering Technology Co., Ltd.; 4.Ningbo Huaqing Environmental Protection Technology Co., Ltd)

Abstract: Wastewater treatment is a common source of anthropogenic methane emissions. Controlling methane emissions from wastewater disposal offers multiple benefits. This study conducted offline monitoring of typical cases to identify key methane emission points in domestic and industrial wastewater treatment processes in Ningbo City. By comparing the methane emissions calculated from the greenhouse gas inventory with those derived from offline monitoring, significant discrepancies were revealed. The results indicate that the monitored emissions are substantially lower than the calculated emissions, highlighting the necessity of establishing localized methane emission factors. Based on these findings, relevant recommendations are proposed for local enhancing methane emission control in wastewater treatment.

Keywords: Offline measurement; Wastewater treatment; Methane emissions

一、背景和意义

甲烷具有高增温潜势、短寿命的特点,在 20 年尺度下的全球增温潜势约是二氧化碳的 82 倍,在大气中的寿命约为 12 年。控制甲烷排放将对减缓全球变暖起到立竿见影的效果,并已成为全球应对气候变化的共识^[1]。近年来,中美加强气候领域合作^[2],在两国气候合作宣言、声明等文件中,专门突出甲烷排放控制研究合作。污水处理是城市可持续发展的重要支撑,也是人为甲烷排放的重要来源(8%)^[3]。控制污水处理甲烷排放具有协同控制污染、提高空气质量、减少温室气体排放、降低安全风险以及促进资源回收利用等多重效益。我国《甲烷排放控制行动方案》明确,未来污水处理厂需要定期报告甲烷排放数据,推动建立甲烷排放核算、报告和核查(MRV)制度,加强污水处理领域甲烷收集利用。但目前,污水处理甲烷及其他温室气体控排工作基础薄弱,技术、制度、标准、人才等支撑不足,需要试点先行探索。现有研究大多集中在生活污水领域,需要地方进一步探索包含工业污水等综合性的城市污水处理甲烷排放 MRV 制度和控制举措。

二、宁波污水处理甲烷排放特征

根据宁波工业型城市发展特点,本研究针对生活污水处理厂和工业污水处理厂开展甲烷排放监测实验,探索污水处理甲烷排放的实际情况,利用《宁波市国民经济和社会发展统计公报》《宁波市水资源公报》《宁波市生态环境状况公报》等公开数据,通过因子法分析宁波污水处理甲烷排放基本特征,为宁波探索污水处理甲烷排放 MRV 制度建设提供参考。

(一) 离线监测的污水甲烷排放

1. 实验设计与采样方法

在排摸宁波市污水处理厂的分布、规模和工艺基

础上,本研究选择位置相近、工艺相似、有代表性的一家生活污水处理厂和一家工业污水处理厂分别开展甲烷排放监测。污水处理厂大部分工艺环节已完成构筑物密封并安装有除臭系统,各除臭系统的排气出口作为有组织排放监测点,二沉池、出水排放口等敞口作为无组织排放监测点。有组织排放监测点采用电动抽气泵和铝箔气袋进行气体采样,无组织排放监测点通过氮气顶空法充分震荡后抽取气相部分采样^[4],采样后 48h 内通过气相色谱法(HJ 38-2017)完成离线测定。

本研究采样时间为 2024 年 7 月~11 月,采样频率为每月 1~3 次,同步记录气温、气压以及排气风速等参数。监测点位如图 1,每个监测点对应的污水处理环节如表 1。有组织监测点甲烷排放浓度在计算时扣除环境本底甲烷浓度。无组织监测点甲烷排放浓度,根据甲烷扩散通量与水—气接触面积计算,其中甲烷扩散通量基于扩散气体交换的薄边界模型法。

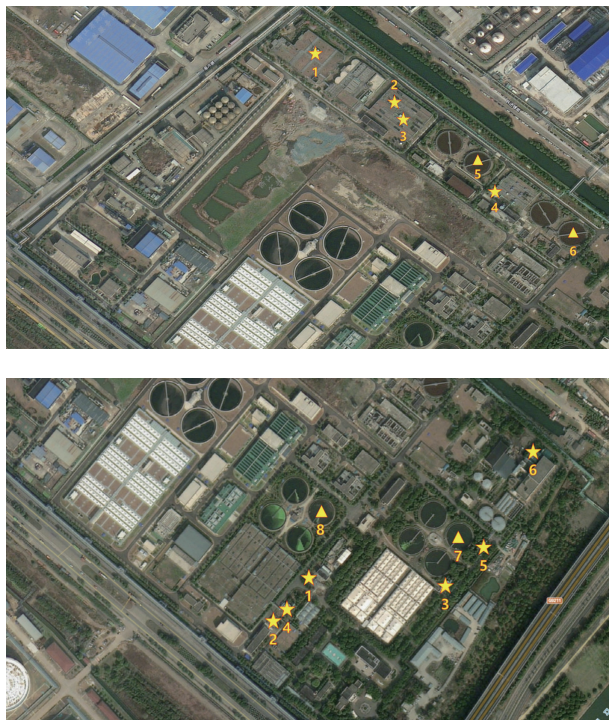


图 1 监测点位图

表 1 污水处理环节与监测点位

类型	点位名称	污水处理环节监测点
工业污水处理厂	一号除臭系统	均质池,事故应急池及隔油池
	二号除臭系统	1#A/O 生物反应池
	三号除臭系统	2#A/O 生物反应池
	四号除臭系统	曝气生物流化池、污泥池
	二沉池(东南侧)	二沉池(直径 36 米,设有 2 座)
	终沉池(东南侧)	终沉池(直径 38 米,设有 2 座)
生活污水厂	一号除臭系统	粗格栅、进水泵房、细格栅及曝气沉砂池
	二号除臭系统	调节池及水解酸化池(7 月底后停运)
	三号除臭系统	一期生物反应池
	四号除臭系统	二期生物反应池
	五号除臭系统	储泥池,污泥浓缩池,生物浸沥池
	六号除臭系统	污泥深度脱水车间
	一期二沉池(东侧)	一期二沉池(直径 40.5 米,设有 4 座)
	二期二沉池(东侧)	二期二沉池(直径 40.5 米,设有 4 座)

2. 污水处理各环节甲烷排放特征

污水甲烷排放主要集中在进水和预处理环节。监测的生活污水处理厂和工业污水处理厂,进水及预处理环节甲烷排放占比分别为 68.4% 和 77.1%,表明污水处理系统边界内甲烷排放 65% 以上的部分由污水管网带出。进水和预处理环节,生活污水处理厂和工业污水处理厂甲烷排放速率范围分别是 1.988~4.025kg/h 和 0.086~2.149kg/h,总体波动性较大,但夏秋变化不明显。进水和预处理环节甲烷排放主要与污水管网有关,夏季高温有利于污水管网甲烷产生,但夏季水流量大、留存时间短则不利于甲烷产生,这可能是导致进水和预处理环节甲烷排放夏秋变化不明显的原因。

生化处理环节甲烷排放对温度敏感。监测的生活污水处理厂和工业污水处理厂,生化处理环节甲烷排放占比分别为 30.7% 和 22.8%。这与上海某化工区污水处理厂的生化单元甲烷排放占污水处理厂甲烷排放的比例(40.8%)相近^[8]。工业污水处理厂甲烷排放平均速率,夏季为 2.598±0.746 kg/h,约为秋季的 4.6 倍;生活污水处理厂甲烷排放平均速率,夏季

为 0.874±0.703 kg/h,约为秋季的 2.5 倍。温度降低可能影响甲烷氧化菌和甲烷产生菌的活性,进而影响甲烷的释放通量^[5],导致生化处理环节夏季甲烷排放量要高于其他季节甲烷排放量。

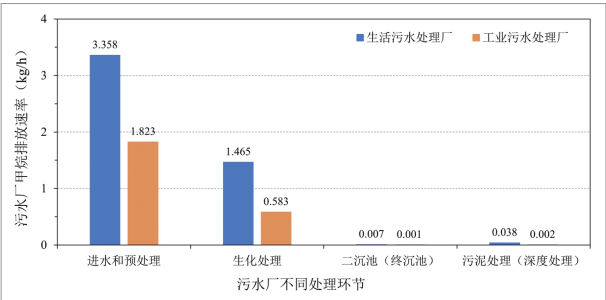


图 2 生活污水处理厂和工业污水处理厂甲烷排放占比

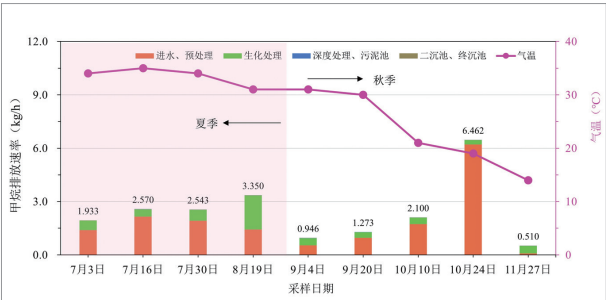


图 3 工业污水处理厂处理环节甲烷排放随温度变化

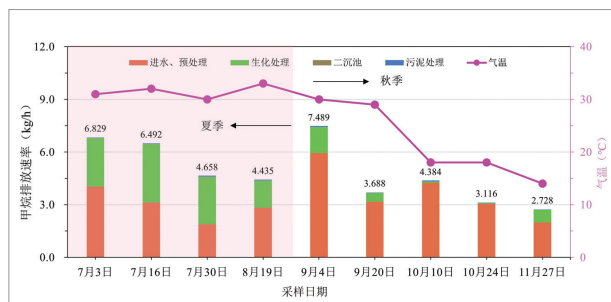


图4 生活污水处理厂处理环节甲烷排放随温度变化

3. 宁波污水甲烷排放因子核算

根据污水处理量与化学需氧量(COD)削减量测算污水处理厂甲烷排放因子,监测范围内的生活污水处理厂和工业污水处理厂的甲烷排放因子分别为 $3.59 \times 10^{-3} \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}_{\text{rem}}$ 和 $5.81 \times 10^{-3} \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}_{\text{rem}}$ 。

对比相关研究中^[6]的浙江省生活污水处理厂和工业污水处理厂甲烷排放因子,监测的生活污水处理厂甲烷排放因子偏低28%,而工业污水处理厂甲烷排放因子则高出10%,反映出污水处理厂甲烷排放因子的区域性差异。表2汇总了目前研究中各地污水处理厂甲烷排放因子实测数据,上海市生活污水处理厂甲烷排放因子为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}_{\text{rem}}$,与贵阳市 ($1.5 \times 10^{-3} \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}_{\text{rem}}$) 相近,但与南京市 ($45.7 \times 10^{-3} \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}_{\text{rem}}$) 相差近40倍。表明,污水甲烷排放因子具有明显区域特征,还受各地污水处理工艺差异等因素影响。因此,有必要深入研究符合宁波实际的污水处理甲烷排放因子,进一步有针对性地开展地方甲烷排放控制。

表2 各地污水甲烷排放情况对比

地区	来源	类型	甲烷排放因子 $\text{kgCH}_4/\text{kgCOD}_{\text{rem}}$
宁波市	本研究	生活污水处理厂	3.59×10^{-3}
南京市	张星等 ^[7]	生活污水处理厂	45.7×10^{-3}
上海市	宋宁宁 ^[8]	生活污水处理厂	1.2×10^{-3}
北京市	Yijun Yin 等 ^[9]	生活污水处理厂	13.4×10^{-3}
贵阳市		生活污水处理厂	1.5×10^{-3}
浙江省	蔡博峰 ^[6]	生活污水处理厂	4.6×10^{-3}
		工业污水处理厂	5.2×10^{-3}

(二) 基于因子法的污水甲烷排放

按照 IPCC 温室气体清单编制指南(2006年),利用公开数据测算,2019年至2023年宁波污水处理甲烷总排放量在2.9~3.8万吨/年波动,主要是受工业污水处理甲烷排放影响,其贡献在76%~85%。生活污水处理甲烷排放量相对较小(0.5~0.7万吨/年),工业污水处理甲烷排放量波动下降,2023年比2019年下降了18.4%。

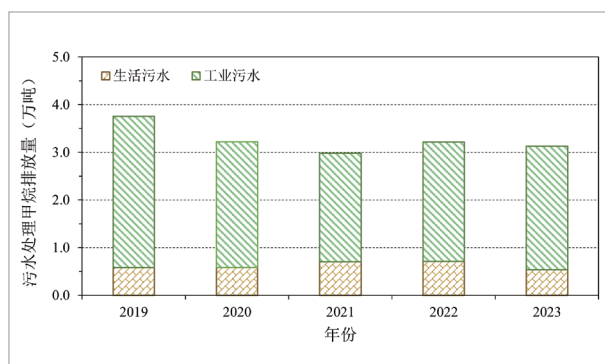


图5 2019~2023年宁波市污水处理甲烷核算排放

根据本次监测实验中获取的生活污水处理厂甲烷排放因子,测算 2019 年至 2023 年,宁波生活污水处理甲烷总排放量为 715~890 吨/年,远低于 IPCC 指南核算的生活污水处理甲烷排放量(0.5~0.7 万吨/年),后者高出前者一个数量级(近 10 倍)。

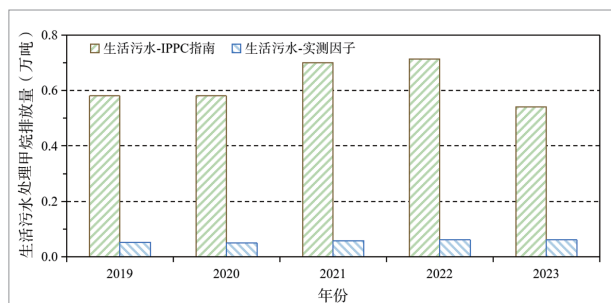


图 6 不同因子下 2019~2023 年宁波市生活污水处理甲烷排放对比

(三) 污水甲烷排放研究结果与讨论

基于理论分析、文献研究和现场实测,对宁波不同季节污水处理各环节甲烷排放特征进行分析,结果表明:

(1) 生活污水处理厂和工业污水处理厂甲烷的排放主要来源是进水及预处理阶段,对污水处理厂甲烷排放的贡献为 68.4%~77.1%,而生化处理阶段的贡献为 22.8%~30.7%,其他环节甲烷排放合计占比不足 1%(未含污水管网和污泥外运处置等环节的直接排放)。污水领域的甲烷排放控制应重视管网输水环节,但受污水水质、水动力、沉积历史、外部环境等因素影响,在实际污水管网中系统评估甲烷产排规律仍是难题^[10]。

(2) 在进水和预处理环节,生活污水处理厂甲烷排放速率高于工业污水处理厂,甲烷排放波动较大且无明显季节变化。夏季高温虽有助于产甲烷,但水流量大、留存时间短等因素不利于产甲烷,甲烷排放规律不明显可能与各因素拮抗作用有关。

(3) 在生化处理环节,生活污水处理厂甲烷排放速率高于工业污水处理厂,且有较明显的季节变化。

生活污水处理厂和工业污水处理厂的甲烷排放速率,夏季分别是秋季的 2.5 倍和 4.6 倍,均随温度降低而降低。温度降低可能影响甲烷氧化菌和甲烷产生菌的活性,导致生化处理环节甲烷排放量随温度下降而降低。

(4) 在生活污水甲烷排放量计算上,采用 IPCC 指南核算的结果比实测甲烷排放因子测算的结果高出一个数量级,说明 IPCC 指南难以准确反映地方排放实际,且笼统核算不能区分污水处理各环节甲烷排放量,无法满足针对污水处理环节制定有针对性的甲烷控排措施。

(5) IPCC 指南的工业污水甲烷排放主要来自企业污水自处理系统以及经污水处理厂处理污水所产生的甲烷,由于本次监测实验不包括企业污水自处理系统的甲烷排放,因此不适合进行比对分析。工业污水处理作为宁波市污水甲烷排放的主要来源,有必要进一步开展企业污水自处理系统和工业污水处理厂甲烷排放整体研究。

(6) 本项目是污水甲烷排放研究的本地化探索,受制于仪器精度限制、监测案例不足、试验周期偏短、监测频率不高等因素,从监测数据和分析结果看,研究仍存在较多的不足之处,但可为优化监测和深化研究提供参考。

三、探索污水处理甲烷排放控制的建议

从本次的监测和分析研究看,加快形成地方甲烷排放因子数据库,建立污水处理甲烷排放 MRV 制度,对推进污水处理行业绿色低碳发展至关重要。宁波应先行先试,从增强基础能力、构建 MRV 制度框架、研究有效控制举措等方面探索污水处理甲烷排放控制模式。

(一) 增强甲烷排放控制基础能力

一是拓展监测形成本地数据集。强化研究支撑,

进一步深化和拓展监测的时空范围,涵盖排水管网、不同处理工艺、不同行业等,形成具有参考价值的本地污水处理甲烷排放数据集。二是开展监测手段创新,鼓励大型污水处理厂试点创新甲烷排放监测技术,探索构建智能化的在线采集、分析与报告监测体系。三是加强甲烷排放控制的研究合作,鼓励企业、高校、科研单位开展产学研合作,在甲烷控制政策、技术、标准等方面加强国际合作与交流,培养复合型人才,宣传提高全社会对甲烷排放影响的认知。

(二)探索污水甲烷排放 MRV 管理框架

一是推动温室气体清单编制工作延伸到企业,建议参照温室气体排放清单编制指南,支持污水处理企业编制温室气体排放清单,相关排放因子以实测为基础,把清单报告作为 MRV 制度的实践基础。二是谋划开展典型污水处理厂甲烷排放 MRV 试点,支持典型污水处理厂开展试点项目,编制宁波污水处理厂甲烷排放核算、报告与核查技术指南,建立统一取样、监测、数据分析相关标准,探索建立符合本地的甲烷 MRV 体系。三是逐步完善甲烷排放管理工作架构,开展污水处理行业包括甲烷等温室气体排放核算方法研究,对甲烷等温室气体及其他空气污染物排放实施全生命周期的协同管控,将甲烷纳入温室气体排放综合管理系统建设。

(三)先行实践甲烷排放控制举措

一是强化源头排放控制,持续推进雨污分流,科学开展污水管网清淤管护,减少污水管网堵塞,通过药剂投加、断面优化、强制通风等措施抑制甲烷菌活性,从而减少甲烷产生和排放。二是优化污水处理工艺,通过污水处理单元参数优化、运行调整、曝气控制等措施,尽量减少甲烷和氧化亚氮的易产生条件,加强已产生甲烷的收集和利用。三是加快污泥资源化利用,减少污泥堆放时间,推广污泥厌氧消化沼气回收利用技术,通过沼气热电联产将能源回收利用。四

是开展污水协商排放,鼓励依法依规协商污水纳管浓度,将不含有毒有害物质、有机物含量高、可生化性较好的企业污水预处理后,作为优质碳源与生活污水协同处理,高效利用生产污水的同时大幅减少污水处理厂外购碳源。五是争取多元化资金支持,鼓励甲烷排放控制工程开展气候投融资试点,纳入生态环境导向(EOD)的开发项目库,鼓励提高污水行业减污降碳节能补贴,积极争取世行、亚行贷款等资金支持。

致 谢

本研究得到了宁波市科学技术局软课题重点项目《欧美国国家碳中和技术、战略路径与实践研究》(2022R014)、美国环保协会北京代表处合作项目《宁波废水处理甲烷排放及控制研究》(C202312376)的支持。感谢宁波华清环保技术有限公司和宁波市城市排水有限公司岚山净化水厂,为本研究提供了可靠的观测平台和数据支撑。

参考文献

- [1] 龙凤,董战峰,连超,等. 甲烷排放控制的国际经验及对我国的启示 [J]. 环境保护,2023,51 (Z1): 68-71.
- [2] 信强,杨慧慧. 中美气候技术合作:进程、动力与挑战 [J]. 美国问题研究,2024,(01): 1-25+287.
- [3] 气候与清洁空气联盟(CCAC),联合国环境规划署(UNEP)《2030 年全球甲烷评估:基线报告》, <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-2030-baseline-report#>.
- [4] 高洁,郑循华,王睿,等. 漂浮通量箱法和扩散模型法测定内陆水体 CH_4 和 N_2O 排放通量的初步比较研究 [J]. 气候与环境研究,2014,19 (03): 290-302.
- [5] Moore, T. R., Dalva, M. (1993). The influence of temperature and water table position on carbon dioxide

and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. Journal of Soil Science, 44 (4), 651-664.

[6] 蔡博峰,高庆先,李中华,等. 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015,25 (04): 118-124.

[7] 张星,陈敏东,高庆先,等. 生活污水处理厂甲烷的释放通量及其影响因素 [J]. 江西农业大学学报, 2018,40 (03): 657-662.

[8] 宋宁宁. 污水处理厂温室气体综合监测方法的建立与应用 [D]. 华东理工大学, 2023.

[9] Yijun Yin, Xiang Qi, Lan Gao, et al. Quantifying Methane Influx from Sewer into Wastewater Treatment Processes[J]. Environmental science & technology, 2024, 58: 9582-9590.

[10] 薛朝霞,冯骞,方芳,等. 城镇污水管道系统甲烷产排特性及发生机制 [J]. 环境工程, 2022,40 (6): 123-129,193.

作者介绍 -----

1. 余旭东 (1989.11-), 男, 博士, 副研究员, 研究方

向为绿色低碳发展, 宁波市鄞州区和济街 118 号发展大厦 A1804, 315040。联系方式: 15888069050, yxd20100910@163.com。

2. 邱艳梅 (1990.10-), 女, 博士, 中级工程师, 研究方向为碳达峰碳中和, 宁波市海曙区丽园南路 219 号, 315012。联系方式: 18811718538, ymqiu_bnu@163.com。

3. 王耿 (1997.1-), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向为水污染控制, 宁波市海曙区益民街 48 弄 58 号 407, 315000。联系方式: 15058288400, 841196291@qq.com

4. 赵世恩 (1996.5-), 女, 硕士, 研究方向为绿色低碳发展、生态环境保护规划, 宁波市海曙区丽园南路 219 号, 315012。联系方式: 15867296810, caoseeun@gmail.com。

5. 毛佳儿 (1999.1-), 女, 硕士, 研究方向为碳排放评价, 宁波市海曙区丽园南路 219 号, 315012。联系方式: 18094559217, 18094559217@163.com。

6. 杜建村 (1968.9-), 男, 高级工程师, 宁波华清环保技术有限公司总经理, 研究方向为化学工业污水处理与研究, 宁波市镇海区石化经济技术开发区海河路 88 号, 315200。联系方式: 13780018277, djc8277@126.com。

种植业面源污染产生机制与 防控技术研究进展

■ 程冰凌¹ 陈新春¹ 潘佳敏² 何 菲³ ■

(1. 宁波市甬环苑环保工程科技有限公司, 浙江省宁波市 315000

2. 宁波伊玛环境科技股份有限公司, 浙江省宁波市 315000

3. 浙江泽越环保科技有限公司, 浙江省宁波市 315000)

摘 要 种植业面源污染作为农业面源污染的主要来源,已成为农业绿色发展和水环境改善的核心制约因素。本文系统梳理了种植业面源污染的产生机制、迁移特征及其生态环境效应,探讨了国内外在污染源头削减、迁移过程拦截及终端处理等环节的全过程防控技术体系,进而提出了包含区域监测网络优化、源头精准防控体系完善、迁移路径阻断技术提升以及终端净化系统强化在内的综合治理方案。本研究可为种植业面源污染的全过程治理提供系统解决思路。

关键词 种植业面源污染 氮磷污染 源头减量 过程控制

Research Progress on Generation Characteristics and Control Technologies of Non-Point Source Pollution in Crop Production

Bingling Cheng¹, Xinchun Chen¹, PAN Jia-hui², HE Fei³

1.Ningbo Yonghuanyuan Environmental Protection Engineering Technology Co., Ltd, Ningbo, 315000, China

2.Ningbo Yima Environmental Technology Co., Ltd., Ningbo, 315000, China

3.Zhejiang Zeyue Environmental Protection Technology Co., Ltd., Ningbo, 315000, China

Abstract: As the primary contributor to agricultural non-point source pollution, non-point source pollution from crop production has become a critical bottleneck constraining green agricultural development and water environment restoration. This study systematically reviews the generation mechanisms, migration characteristics, and ecological-environmental impacts of crop production-related non-point source pollution. It comprehensively examines global prevention and control technologies, including source reduction, migration interception, and terminal treatment within the whole-process management framework. Furthermore, a comprehensive governance strategy is proposed, integrating optimized regional monitoring networks, refined source control systems, enhanced migration pathway interception technologies, and strengthened terminal purification mechanisms. The findings provide systematic insights into the integrated management of non-point source pollution throughout the entire crop production chain.

Keywords: Non-point source pollution in crop production; Nitrogen and phosphorus pollution; Source reduction; Process control

种植业面源污染作为农业面源污染的主要来源,指农作物生产过程中产生的氮、磷等营养物质过量积累,在降水或灌溉条件下,通过地表径流和地下渗流等途径迁移至水体和土壤环境,引发污染危害^[1-2]。根据2020年发布的《第二次全国污染源普查公报》数据,我国农业源排放的化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)分别占全国水污染物排放总量的49.8%、46.5%和67.2%,其中,种植业贡献的水污染物排放量分别占农业源COD、TN、TP排放总量的38.39%、50.85%和35.94%。种植业面源污染对各类水体环境造成的负面效应,已成为制约我国农业可持续发展乃至整体经济发展的关键因素。

随着工业点源污染和生活污水治理取得显著进展,农业面源污染问题日益凸显,科学应对我国种植业面源污染并实施有效防治已成为国内农业面源污染治理的重点任务之一。为深入贯彻习近平生态文明思想,打好污染防治攻坚战,2021年,国务院生态环境部办公厅等部门联合制定了《农业面源污染治理与监督指导实施方案(试行)》,旨在切实推进化肥农药减量化,为农业面源污染治理与监督指导提供政策支撑。为落实国家方案精神,浙江省发布了《浙江省农业面源污染治理与监督指导实施方案》,其核心任务在于全力推进农业面源污染治理并强化监督管理,目标在于实现全省农业面源污染状况的初步遏制。

本文将系统综述种植业面源污染的产生机制、迁移特征及其生态环境影响,并基于“全过程管理”理念,评述国内外研究进展,为种植业面源污染的治理提供科学依据。

1. 种植业面源污染的产生与迁移

1.1 种植业面源污染产生机制

种植业面源污染在空间上具有显著的不确定性与不均衡性,区域间差异明显^[3-4]。其空间不确定性一方面源于污染源的广泛分散性:污染源种类多样(如化

肥、农药、除草剂、农膜、畜禽粪便等),在水田、旱地等农业单元内呈点状或面状散布;另一方面,多种污染物往往协同汇入水体,加剧了污染的空间复杂性。在时空分布上,种植业面源污染受降水和极端天气驱动,呈现显著的季节性波动,同时,受耕作周期内人工排水活动的影响,污染排放也表现出周期性特征。

1.2 种植业面源污染的迁移途径

种植业面源污染物的迁移,是指农田中包括氮、磷等营养物质在内的污染物,通过径流和淋溶作用,经由地表、溪流、池塘、下水道或地下水等途径,最终汇入河流、水库、湖泊和海洋的过程。不同土地利用类型因土地特点与种植方式的差异,主要迁移途径亦不相同。以我国种植面积广泛且具代表性的稻田和旱地为例,两者产生的污染对生态环境影响显著。稻田面源污染主要源于农田排水,包括耕作周期内的农户主动排水以及降雨蓄满后的被动排水,退水携带的过量营养物质通过径流迁移至周边水体。旱地则因其土壤持水能力弱、蓄水性能差,自然降雨成为引发径流的主要驱动力,降雨量与径流量的相关性较高^[5],降雨条件下产生的面源污染问题更为突出。

1.3 种植业面源污染导致的环境问题

种植业面源污染产生的生态影响呈现多样性、广泛性、滞后性和长期性等特点。该类污染具有分布分散、来源广泛的特征,且受区域因素(如地势条件、水文特征、种植方式等差异)影响显著,导致其污染源复杂多变,污染程度空间异质性显著。当前,我国耕地化肥施用存在利用率低、流失率高的问题。大量未被作物有效吸收的营养物质随农田排水,通过径流和淋溶途径进入地表水体,造成污染。农田施用的化肥主要含氮、磷等营养元素,进入水体后极易造成水体富营养化^[6],富营养化水体中藻类过度繁殖后大量死亡分解,释放出刺激性气味,导致水体恶臭,进而污染内陆与沿海水域。

2. 种植业面源污染的源头控制

源头控制是对种植业面源污染控制最有效且最根本的措施,目前该研究方向内容较多且热度高^[7],主要包括肥料优化和耕作过程优化。

2.1 肥料优化

在传统施肥方式下,受土壤特性和作物养分吸收能力的限制,作物往往无法充分吸收养分,导致化肥浪费。化肥中过量的氮、磷等营养物质不仅超出环境承载力,还增加了种植成本。因此,合理施用化肥,提高化肥利用率能够有效降低生产过程中产生的污染,并提高经济效益。蒋婧媛等^[8]运用 SWAT 模型模拟“三控”施肥,发现应用“三控”施肥技术可减少氮肥、磷肥用量,降低稻田氮、磷流失,并使经济效益提高到 48.98%。焉莉等^[9]通过对比不同施肥处理对玉米产量和肥料利用率的影响,发现常规施肥处理下总氮流失负荷和肥料流失率分别为 18.22 kg/hm² 和 2.61%,而优化施肥处理后分别降低至 15.35 kg/hm² 和 0.87%。丁志磊等^[10]的研究表明,施用缓释肥显著降低了氮、磷流失量,与全部施用复合肥相比,处理 I (2/3 缓释肥 + 1/3 复合肥) 与处理 II (全部施用缓释肥) 的总氮流失量分别减少了 16.77% 和 24.99%,总磷流失量分别减少了 31.51% 和 34.60%。

优化施肥另一有效途径是采用测深施肥技术。该技术在水稻机械插秧过程中,利用水稻侧深施肥器将肥料定量、定位地一次性施入稻苗根侧下方的泥土中。研究表明,该技术在减肥增产方面效果显著:李亚娟等^[11]通过比较不同氮肥减量比例下侧深施肥对水稻产量的影响,发现施用减氮 7%~14% 的缓释型掺混肥料进行侧深施肥,既提高了氮肥的利用率,还达到优质丰产;郑仁兵^[12]的调查显示,应用侧深施肥技术的水稻田,其氮肥利用率(41.3%)显著高于常规施肥对照,且增产率达 7.0%,充分证明该技术具有减肥、增产、增收的良好效果。

2.2 耕作过程优化

农业生产过程中涉及到灌溉供水、农田耕作、过程排水、易产生种植污染的耕作方式。目前针对性的减排技术主要包括灌溉技术、耕作技术和栽培技术等。Shao 等^[13]研究发现,与传统灌溉方式相比,控制灌溉排水有效提高了水稻的水分利用率,在孕穗阶段可以获得最佳的产量。Xiao 等^[14]通过对比常规灌溉(W0)、薄露灌溉(W1)和间歇灌溉(W2)三种模式发现,与 W0 相比, W1 和 W2 的肥料氮淋溶损失量分别减少了 62% 和 64%,氮肥利用率分别提高了 5.0% 和 9.7%。马小艳等^[15]通过对比玉米—小麦轮作、大豆—小麦轮作、绿肥—小麦轮作模式的氮、磷盈余率,发现大豆—小麦轮作方式在减少化肥投入、降低土壤养分盈余及提高经济效益方面更具优势。汤秋香等^[16]通过调查洱海北部地区不同轮作模式下氮、磷含量情况发现,大蒜—水稻轮作模式总氮和可溶性氮流失量最高,与其相比,蚕豆—水稻轮作模式氮流失风险减少 38%。

3. 种植业面源污染的过程和终端阻断与净化

种植业面源污染的过程拦截、终端净化主要是通过物理化学生物方法,结合工程措施构建拦截或净化系统,实现生态拦截改善、水质净化的面源污染防控。生态沟渠、植被缓冲带、人工湿地、养分回用的技术目前在防控治理中较为广泛应用,产生了较好的社会效益。

3.1 生态沟渠

生态沟渠是一种通过模仿自然沟渠结构,结合生态工程原理设计的排水系统,主要用于农业面源污染控制、雨水管理、水质净化以及生物栖息地保护^[17]。Chen 等^[18]研究发现,生态沟渠比传统沟渠的净化效果更好,在带木栅栏墙的生态沟渠中, TN 和 TP 的去除

率分别可达到 89.61% 和 79.05%。张树楠等^[19]研究发现,将农业排水沟渠改建成生态沟渠后,对水体总氮和总磷的平均去除率分别达到 64.3% 和 69.7%。

3.2 植被缓冲带

植被缓冲带是由草本(如香根草、狼尾草)、灌木(如紫穗槐、沙棘)及水生植物按特定间距配置的条带状植物群,通过截留污染物、净化水质和保持水土等作用实现生态防护功能。植被缓冲带能够达到拦截泥沙和氮、磷污染物的良好效果,且一般为多年生,具有长期经济效益^[21]。张鸿龄等^[20]通过对比不同植被缓冲带对污染物的阻控效果发现,紫穗槐+黑麦草植被带的去除效果最好,对 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 TN 的阻控率平均可达到 91.3%、75.9% 和 82.9%。

3.3 人工湿地

人工湿地是模拟自然湿地构建于农田排水口的人工生态系统,通过植物吸收、填料过滤及微生物降解协同作用,拦截并去除径流中的氮、磷和重金属等面源污染物,实现水质净化,人工湿地是重要的终端处理手段。徐珊珊等^[22]的研究显示,人工湿地处理后, TN 浓度由入口处的 0.050~0.893 mg/L 降至出口处的 0~0.878 mg/L,净化效果显著,同时,对 TP 的平均去除率达 42%。汪庆兵^[23]等通过跟踪监测人工水塘—湿地复合系统对农业面源污染的治理效果发现,全年平均 TN 和 TP 去除率分别达到 60.4% 和 78.6%。多项研究发现,人工湿地技术具有成本较低、维护简单、去除污染物效果好等优势,近年来研究较多且成效显著,应用广泛^[24]。

4. 结论与展望

种植业面源污染因其分布广、污染物组成复杂、治理难度大,已成为我国环境治理领域的突出难题。当前研究主要聚焦于污染迁移路径解析、化肥农药高

效利用技术及径流污染控制技术的研发与推广。这些工作虽在降低污染负荷方面展现出潜力,但由于我国地域辽阔、区域差异显著,种植业面源污染的防控亟需构建因地制宜的综合防治体系。

(1) 强化种植业污染动态监测与评估: 目前,种植业面源污染的发生规律尚未完全明晰,空间上,区域差异性导致污染源分布不均;时间上,受降水和排水影响,污染负荷波动明显,使得污染防治方案及技术应用效果难以量化评估。因此,亟需结合区域种植特点,加强对种植田中氮、磷流失动态和污染物迁移规律进行长期定位监测与科学评估。

(2) 深化源头控制技术研究与应用: 源头控制在全过程治理策略中具有关键作用。当前,我国在肥料增效方面的研究相对集中,而在优化种植方式(轮作)、改进田间管理过程(如施肥、灌溉、排水)以及开发新型环境友好型肥料等方面仍需加强研究与应用力度,以从源头上有效削减氮、磷的流失。

(3) 创新末端治理技术与材料: 目前,过程拦截和末端净化领域的技术相对传统,需研发新技术和新材料。例如,碳基填料技术通过吸附氮、磷实现污染物截留,其饱和后可还田补充土壤有机质,实现过程截留和末端治理的闭环,体现了良好的资源循环利用理念。

(4) 构建系统性治理体系: 2025 年的中央一号文件明确提出“强化农业面源污染突出区域系统治理”,要求健全治理体系。因此,我国种植业面源污染防治亟需建立明确的监管框架并加大执法力度。唯有秉持系统性的思维,构建良性的“监测—评估—源头控制—过程阻断—末端治理—监管执法”综合防治体系,方能有效推进我国农业发展的全面绿色转型。

参考文献

- [1] Li X, Shang J. Spatial interaction effects on the relationship between agricultural economic and planting non-point source

pollution in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30 (18): 51607–51623.

[2] 邱捷, 余冬立, 夏永秋. 国家尺度种植业面源污染负荷估算方法研究 [J]. 农业现代化研究, 2021, 42 (02): 198–205.

[3] 宋孟斐, 何伟军, 安敏. 长江经济带种植业面源污染多尺度特征及其与耕地破碎化的相关性 [J]. 生态学报, 2024, 44 (24): 11387–11403.

[4] 冀玄玄, 姜军松. 中国种植业面源污染的区域差异及其脱钩效应 [J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45 (06): 49–61.

[5] 杨林沛. 基于高频监测的平原河网圩区典型种植业面源污染排放特征研究 [D]. 东华大学, 2023.

[6] Wang L, Liu Y, Lu H, et al. Recycling of phosphorus-containing plastic based on the dual effects of switchable hydrophilicity solvents[J]. Chemosphere, 2020, 259 (127402).

[7] 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 等. 种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测 [J]. 环境科学, 2020, 41 (08): 3870–3878.

[8] 蒋婧媛, 罗育池. 优化施肥技术的非点源污染控制环境与经济效益模拟研究 [J]. 环境污染与防治, 2024, 46 (12): 1767–1774.

[9] 焉莉, 操梦颖, 胡中强, 等. 施肥方式对东北玉米种植区氮磷流失的影响 [J]. 环境污染与防治, 2018, 40 (02): 170–175+180.

[10] 丁志磊, 李元, 蒋翔, 等. 不同缓释肥施用比例对桃树—大豆间作农田地表径流氮、磷流失及土壤养分的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29 (03): 301–305.

[11] 李亚娟, 董明辉, 江贻, 等. 缓混肥侧深减氮施用对水稻氮肥吸收利用及其产量与品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2023, 39 (36): 14–21.

[12] 郑仁兵. 霍山县水稻机插秧侧深施肥技术推广应用情况分析 [J]. 安徽农学通报, 2023, 29 (04): 36–39.

[13] Shao G, Deng S, Liu N, et al. Effects of controlled irrigation and drainage on growth, grain yield and water use in

paddy rice[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 53 : 1–9.

[14] Xiao M, Li Y, Wang J, et al. Study on the Law of Nitrogen Transfer and Conversion and Use of Fertilizer Nitrogen in Paddy Fields under Water-Saving Irrigation Mode[J]. Water, 2019, 11 (2182).

[15] 马小艳, 杨瑜, 黄冬琳, 等. 小麦化肥减施与不同轮作方式的周年养分平衡及经济效益分析 [J]. 中国农业科学, 2022, 55 (08): 1589–1603.

[16] 汤秋香, 任天志, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特性研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (03): 608–615.

[17] 钟珍梅, 黄毅斌, 李艳春, 等. 我国农业面源污染现状及草类植物在污染治理中的应用 [J]. 草业科学, 2017, 34 (02): 428–435.

[18] Chen L, Zhang W, Tan J, et al. Nitrogen and Phosphorus Pollutants Removal from Rice Field Drainage with Ecological Agriculture Ditch: A Field Case[J]. Phytom-International Journal of Experimental Botany, 2022, 91 (12): 2827–2841.

[19] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 [J]. 环境科学, 2015, 36 (12): 4516–4522.

[20] 张雪莲, 赵永志, 廖洪, 等. 植物篱及过滤带防治水土流失与面源污染的研究进展 [J]. 草业科学, 2019, 36 (03): 677–691.

[21] 张鸿龄, 李天娇, 赵志芳, 等. 辽河河岸植被缓冲带构建及其对固体颗粒物和氮阻控能力 [J]. 生态学杂志, 2020, 39 (07): 2185–2192.

[22] 徐珊珊, 王建英, 雷文文, 等. 人工湿地对面源污染中氮磷的去除效果研究——以铁冲小流域为例 [J]. 中国水土保持, 2017, (07): 28–29.

[23] 汪庆兵, 张建锋, 刘光彦, 等. 人工湿地系统对农业面源污染 TN/TP 的消减作用——以安吉县深溪河小流域为例 [J]. 中国农学通报, 2014, 30 (23): 197–204.

[24] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率 [J]. 生态学杂志, 2002, (04): 52–59.

超微细气泡技术机理及其工业前沿应用

■ 施 晨¹ 吴伟立¹ 揭小虎² 陈钰珺¹ ■

(1. 宁波长净环保材料工程有限公司, 浙江省宁波市 315000
2. 浙江锐碣科迅智造有限公司, 浙江省宁波市 315000)

摘 要 高级氧化技术作为水处理领域的高效处理技术,通过产生高活性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)实现对有机污染物的高效降解与矿化,在难降解废水处理中展现出显著优势。超微细气泡技术作为一种新型的高级氧化技术,其原理也是通过产生大量的羟基自由基来对污染物进行分解与矿化。本文将以超微细气泡为重点,系统阐述超微细气泡技术的反应机理,探讨其在工业废水、废气中的应用效果。

关键词 超微细气泡 高级氧化技术 工业废水 废气治理

引 言

微细气泡是指 $100\mu\text{m}$ 以下的气泡,其中超微细气泡是指直径在 $1\sim 1000\text{nm}$ 范围内的微小气泡,由于气泡在水中的上升速度与粒径有关,因此超微细气泡不会快速上浮至水面破裂,而是会在水中缩小甚至消失,正常状态下超微细气泡在水中的存在时间 > 90 天,上浮 1m 的时间 > 21 天。在收缩破裂时,气泡缩小的体积和增加的气泡内压使气泡内部产生超高温超高压的极限反应场,击穿气泡内气体,产生大量 $\cdot\text{OH}$,同时气泡快速缩小过程中,气泡表面所带电荷急剧聚集,产生的点式高能场也能够使水分子电离,生成大量 $\cdot\text{OH}$ 。

超微细气泡技术在工业废水、废气领域可起到节能降耗和工艺优化等作用,实现投资费用和运行费用的双节约,其发展与研究对于推动环保与可持续发展有着重要的意义。

1. 微细气泡的生成机理与特性

微细气泡有多种产生形式,常见的包括加压溶气法、电解法、超声空化法、微孔曝气法和文丘里法。加压溶气法通过高压溶气装置将空气在一定压力下溶解于水中,形成过饱和溶液,然后突然减压使空气以超微细气泡的形式释放出来;电解法通过电解水产生氢气和氧气,这些气体在电极表面形成超微细气泡;超声空化法利用超声波在液体中产生的空化效应,使液体中的微小气泡在超声波的作用下迅速膨胀和收缩,最终破裂产生超微细气泡;微孔曝气法将气体通过具有微小孔隙的曝气装置通入水中,使气体在微孔处形成超微细气泡;文丘里法是指液体经过截面收缩形成负压吸入气体,通过气液混合形成乱流紊动以产生微细气泡。本文以长净环保超微细气泡发生器为例,详细介绍采用“文丘里+回旋切割技术”产生超微细气泡,并着重介绍该方式的气泡产生机理及特性。

1.1 生成机理

长净超微细气泡发生器采用文丘里原理、高速回旋切割原理和分散空气法,进水端由水泵驱动进水,水流经文丘里管喉部时,因截面收缩从而在腔体内部形成超强真空区,利用压差效应自动从进气口自吸进气,实现无额外气泵条件下的气液混合,混合流体进入到腔体内部后,通过回旋切割结构,使得腔体内部形成强剪切流场,将气泡不断切割后产生大量尺寸小且均匀的超微细气泡,图1所示为超微细气泡发生器原理图。此外,为适应不同规模的处理量,长净超微细气泡发生器设计了多种规格型号的发生器,可以应对各种水量规模的处理项目,实现均质反应。

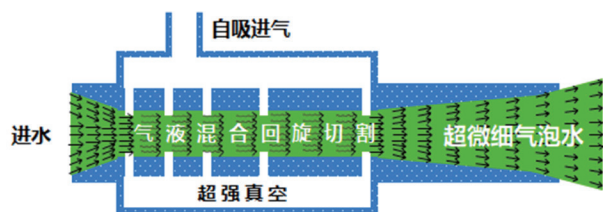


图1 文丘里 + 回旋切割混合技术

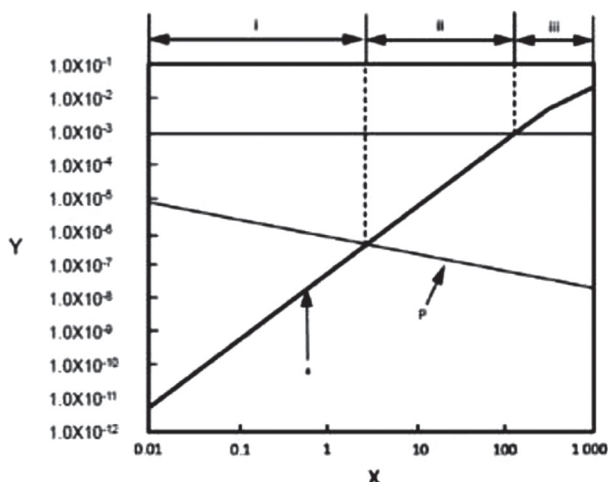
对比其他气泡产生技术,加压器法是使气体在高压容器中强制溶于液体并保持压力,使气体达到过饱和状态,再通过减压阀将液体喷射至常压环境来形成 $1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 的气泡,其缺陷在于运行过程中产生的大气泡占比较高比较适用于气浮工艺,加压机和空压机能耗较高,过程中使用的加压设备危险系数较高。

超声空化法的原理是当高强度超声波(频率通常在 20kHz 到 1MHz)在液体中传播时,会产生交替的压缩和稀疏(负压)区域,在稀疏相,液体承受巨大的负压。如果这个负压足够大(超过液体的抗拉强度),液体就会被“撕开”,形成微小的空腔或气泡。这些气泡通常以液体中预先存在的微小气核(溶解气体、尘埃颗粒或容器表面的微小缺陷)为中心形成。超声空化技术在大规模工业应用中的缺陷较为明显,一方面是大功率超声设备的能耗极高,另外在大规模的反应

容器中很难实现均质反应。

1.2 气泡特性

超微细气泡相较于普通气泡而言,其在水中的存在时间更长,因为气泡小导致浮力非常小,气泡粒径在 1000nm 时,其在水中上升1米需要的时间是 1800000 秒(21天),即可长时间留存于水体。



标引序号说明:

X——气泡直径,单位为微米(μm);

Y——最终上升速度,单位为米每秒($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

i——最终上升速度<布朗运动速度的区域;

ii——布朗运动速度<最终上升速度 $<1.0\times 10^{-3}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域;

iii——最终上升速度 $>1.0\times 10^{-3}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域;

P——当介质黏度为 $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ 时,超微细气泡布朗运动的随机速度;

a—— 20°C 水中超微细气泡最终上升速度。

图2 气泡粒径与上升速度的关系曲线

气泡粒径越小,其比表面积和表面张力就越大,气泡粒径在 1000nm 时内压可达 3.8bar ,高压使超微细气泡破裂收缩或消失溶于水。该特性使得水体中溶解氧达到过饱和时,超微细气泡仍可进行气体的传质过程并保持高效的传质效率。因为超微细气泡表面带负电,其界面电位值的范围通常为 $-100\sim -40\text{mV}$,根据古依—查普曼双电层模型,两气泡靠近时双电层重叠产生的排斥能(U_r)与 ζ 电位的关系为排斥能随 $|\zeta|$ 的增大而急剧增强,这使得气泡与气泡之间很难合并,从而使气泡表现出良好的稳定性与持久性。同时,气泡可吸附

在水中漂浮着的带正电荷的小颗粒物质(污浊物质等)上,正、负电荷接触,促进气泡的收缩破裂。

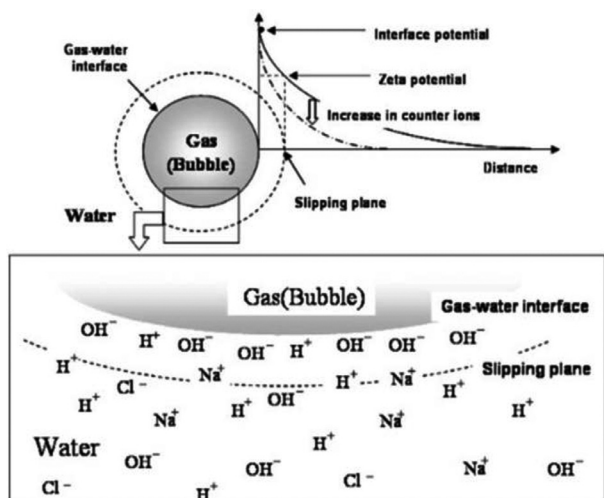


图3 气—水界面双电层结构及电位分布图

普通气泡在水中会快速上升至水面并破裂消失,而超微细气泡则会在水中缩小甚至消失。在收缩破裂时,气泡缩小的体积和增加的气泡内压使气泡内部产生超高温超高压的极限反应场,击穿气泡内气体,产生大量 $\cdot\text{OH}$ 。同时气泡快速缩小过程中,气泡表面所带电荷急剧聚集,产生的点式高能场能够使水分子电离,生成大量 $\cdot\text{OH}$ 。 $\cdot\text{OH}$ 是自然界中仅次于氟的强氧化剂,可强力分解难降解物质,实现水质提升。

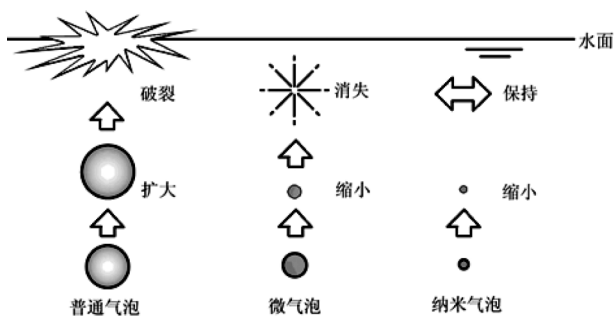


图4 不同尺度气泡在水中的行为变化图

2. 超微细气泡技术应用效果

相比于传统高级氧化技术,超微细气泡技术在工

业废水、废气处理领域具有良好的技术优势及应用前景,主要表现为难降解有机污染物的强化分解,实现废水深度处理;大幅增强气液接触面积,实现气液高效传质等。

2.1 10000m³/d 印染园区污水处理厂项目

该项目污水处理量为10000m³/d,污水处理厂进水水质执行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB4287-2012)之间接排放标准,出水水质执行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB4287-2012)之直接排放标准。由于周边印染厂产生的印染废水水质变化较大,废水可生化性较差,污水处理厂现有生化系统处理能力较弱,深度处理臭氧利用率低,再加上当地政府对出水标准的严格把控,因此该污水处理厂计划对现有工艺进行改造,以此来使出水达标排放。



图5

实验验证:取黄家埠污水处理厂进水80L,二沉池出水80L进行验证实验。

水质COD检测标准按HJ/T 399-2007《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》测定;水质BOD检测标准按HJ 505-2009《水质 五日生化需氧量(BOD₅)的测定 稀释与接种法》测定。

预处理实验:使用CJFQ01-05超微细气泡发生器并通入10g/h臭氧处理污水处理厂进水,从表1中可以看出,处理3个小时后,COD从274mg/L下降

至 120mg/L，去除率可达 56%；SS 从 90mg/L 下降至 23mg/L，去除率达到了 74%；废水 B/C 从 0.07 上升至 0.20，大幅提升了废水的可生化性。并且处理过程中废水色度明显下降，如图 6。

表 1 进水处理数据表

实验时间 (h)	臭氧用量 (g/h)	臭氧累计用量 (g)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	B/C
0	10	0	274	90	20	0.07
0.5	10	5	193	45	14	0.07
1	10	10	169	30	21	0.12
1.5	10	15	154	29	24	0.16
2	10	20	138	25	23	0.17
2.5	10	25	135	27	24	0.18
3	10	30	120	23	24	0.20

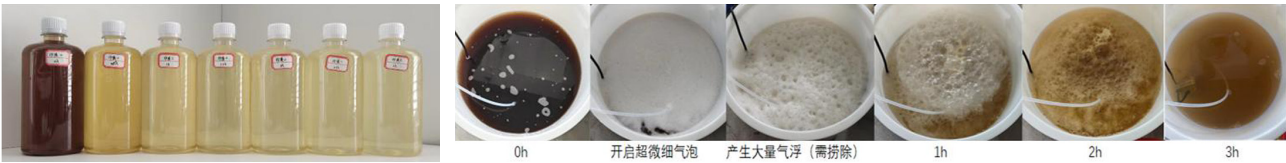


图 6

深度处理实验：使用 CJFQ01-05 超微细气泡发生器并通入 10g/h 臭氧处理污水处理厂二沉池出水，从表 2 可以看出，处理 5 个小时后，COD 从 104mg/L 下降至 33mg/L，去除率可达 62%，完全达到了要求的 COD 在 70mg/L 以内的排放目标；SS 从 90mg/L 下降至 36mg/L，去除率为 60%，并且运行期间废水颜色逐渐变淡，变清澈，如图 7。

表 2 二沉池出水处理数据表

实验时间 (h)	臭氧用量 (g/h)	臭氧累计用量 (g)	COD (mg/L)	SS (mg/L)
0	10	0	104	90
1	10	10	78	68
2	10	20	69	56
3	10	30	42	48
4	10	40	39	41
5	10	50	33	36

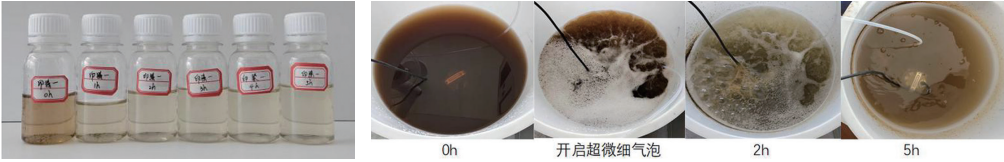


图 7

经过多方面的小试、中试实验验证及成本核算，与芬顿工艺相比，运行成本可节约 71.9%，同时设备投资低且安装便利，无需停水即可改造，项目运行无需投药，不产生污泥没有二次污染。因此，企业提标改造在芬顿工艺、臭氧超微细气泡工艺间选择了臭氧超微细气泡工艺。

表 3 芬顿工艺、臭氧超微细气泡工艺对照表

类别	芬顿工艺	臭氧超微细气泡工艺	对比
运行成本	1.67 元 / 吨	0.47 元 / 吨	节约 71.9%
主要设备	芬顿氧化塔 加药系统 吹脱系统 沉淀系统	CJ30*16	≤ 15000
药剂添加	硫酸亚铁 / 双氧水 / 盐酸 / 氢氧化钠	—	
其他问题	污泥产生 ≥ 30 吨 / 天	—	

结合现场情况我们使用超微细气泡技术结合厂内原有臭氧发生器，在原有水处理工艺基础上设计安装了 16 套超微细气泡水处理设备，其中 6 套安装在前端调节池，结合 2~3kg/h 臭氧用于提升废水可生化性，废水 B/C 由 0.07 提升至 0.20，解决了废水难生物化的问题；10 套安装在尾端臭氧接触氧化池，结合 8~12kg/h 臭氧用于尾端深度处理，解决了原臭氧催化氧化工艺臭氧利用率低的问题，最终实现了尾水稳定达标排放，出水 COD 稳定小于 70mg/L。

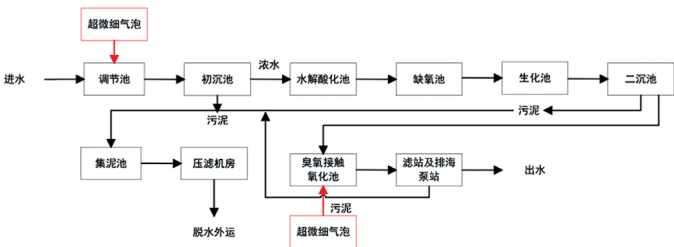


图 8

2.2 28000m3/d 山东大化工废水零排放项目

该项目原废水使用“RO 膜组 + 冷冻脱硝 + 臭氧”氧化工艺处理，臭氧曝气池出水与反渗透出水进行混合后进入纳滤系统，纳滤系统浓水重新回到冷冻脱硝系统，以此循环处理。其中高级氧化工艺段使用 30kg/h 臭氧催化氧化处理冷冻脱硝处理后的循环水，由于高盐导致催化剂失活无效，致使臭氧利用率低，水中臭氧未能充分与水中的污染物进行反应而从水面散逸，经

臭氧尾破处理后仍有大量臭氧散逸，导致现场臭氧臭味严重，这使得现场操作运行存在极大的安全隐患。不仅如此，由于臭氧曝气池出水 COD 未得到有效分解，长时间循环运行后会导致纳滤膜严重污堵，水中有机物不断富集，使得纳滤膜处 COD 富集高达每升十几万毫克，自该工艺建设运行以来，膜组件频繁更换，其运行投资成本远超预期，因此希望使用超微细气泡技术结合厂内原有臭氧系统，降低工艺运行成本。

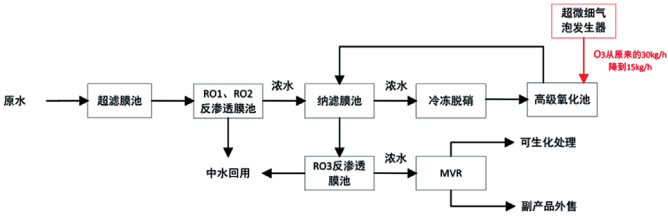


图 9

项目改造要求为设备运行无臭氧散逸且高级氧化池出水 COD 需稳定控制在 20000mg/L 以下，因此项目在原高级氧化池工艺段设计安装了 10 套超微细气泡水处理设备，并计划投用 15kg/h 臭氧。设备投用后，现场臭氧散逸消除，臭氧用量从原先的 30kg/h 减少到了 8kg/h，臭氧用量减少了 73.33%，高级氧化池出水 COD 可做到稳定 15000mg/L，成功实现了现场无臭氧散逸，并能确保纳滤膜不污堵，保证纳滤系统的稳定运行，无需周期性手动清洗和化学清洗，有效延长了膜组件寿命。

表 4 现场情况对照表

	臭氧用量 (kg/h)	臭氧散逸 情况	COD (mg/L)
使用前	30	有	> 20000
使用后	8	无	≤ 15000

通过使用“超微细气泡 + 臭氧”对水中大分子有机物进行断链，确保了后续 MVR 蒸发系统的换热器不结焦，提高了蒸发设备运行效率。同时蒸发产出的盐可做氯碱工艺原料使用，大幅节约了企业整体的运

行成本。MVR 冷凝水由原先的难生化转化给可生化废水,降低了 MVR 冷凝液处理难度和处理成本。



图 10

2.3 60000m³/h 人造板废气处理项目

该项目为 60000m³/h 人造板废气,废气主要污染物包含原料加工段产生的木屑粉尘、木制纤维,干燥喷漆过程中产生的甲醛及挥发性有机物。废气原工艺使用喷淋塔结合 20kg/h 臭氧处理废气,臭氧无效浪费,尾气臭味值达到 13000 倍,恶臭严重无法达标排放。因此我们使用超微细气泡技术解决尾气排放不达标、臭氧利用率低等问题。

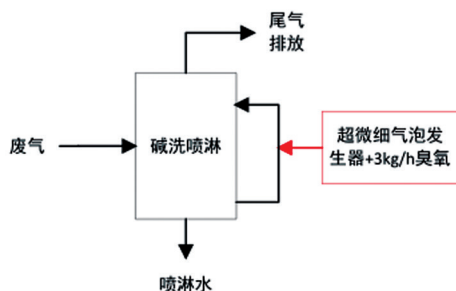


图 11

项目在原喷淋塔循环管路中安装了 2 套超微细气泡发生器,并将臭氧从超微细气泡发生器进气口引入,由于超微细气泡粒径小,比表面积大,喷淋期间可充分将含有臭氧超微细气泡的喷淋循环水与木材加工废气进行接触反应,从而大幅提升臭氧利用率,臭氧用量从原先的 20kg/h 减少到了 3kg/h,同时,臭氧在超微细气泡状态下可被催化,产生的羟基自由基将废气中的臭味物质和挥发性有机物氧化分解,并将废气

中难溶于水的物质氧化后醇、酸等易溶于水物质被水吸收,实现尾气达标排放。设备投用当天,尾气臭味阈值降至 800 倍以下,连续运行一周后,再次测量臭味阈值在 400 倍以下,实现了稳定达标。此外,臭氧超微细气泡通过将循环水中有有机污染物断链和矿化,减少循环水中污染物浓度,实现循环水排放减少并实现了后续废水的预处理。

表 5 现场情况对照表

	臭氧用量 (kg/h)	臭味消除 情况	臭味阈值
使用前	20	恶臭	13000
使用后	3	恶臭消除	≤ 400

3. 结语

超微细气泡水处理技术综合了气浮池、曝气池和氧化池的原理,有利于气体的传递、液体混合,是一种前沿的超高效水质净化技术。超微细气泡水处理技术可实现均质增加溶解氧并自发产生大量羟基自由基($\cdot\text{OH}$),针对不同工业废水、废气的特点,耦合不同的工艺技术,定制设计最优化的处理工艺,可实现投资少、运维少和功效佳的绿色处理目标。更值得关注的是,凭借超微细气泡发生器的自身特性和超强的技术匹配性,其在化工反应领域的探索已逐步展开,利用超微细气泡体积小,传质效率高的特点,能有效减少反应设备中的反应死区,减少或消除副反应的产生,提高反应物之间的接触面积,使反应物充分反应,比如气—液反应中可让气体分子更充分地溶解并与液体反应物接触,液—固反应中则能减少固体颗粒的团聚现象,使反应物在微观层面实现更均匀地混合与反应。这种全方位的优化不仅能显著提升产物的纯度,降低后续分离提纯的成本,还能大幅缩短反应时间,为化工生产的高效化、低能耗与绿色化发展提供全新的技术支撑。未来,超微细气泡技术还将在更多领域深入研究与探索,最终推动环保行业向更高效、更清洁、更智能的方向迈进。

科普知识

有尾目 | 蝾螈科 | 棘螈属

国家一级 中国特有种 CR (极危)

镇海棘螈是中国特有种，孑遗物种，被誉为“活化石”。夜行性，常隐匿于落叶、朽木或石隙中。繁殖期为3~5月，会寻找适合的水坑在陆地产卵，孵化时间大约1个月，“小鱼状”的棘螈冲破卵被膜，运用它们尾部的弹跳力跳进近旁的水坑，鳃呼吸阶段后，外鳃萎缩、体色转棕黑并出现疣粒，最终上岸。数量极少，其野外种群被评估约600尾，全国仅分布于宁波北仑狭窄区域。



Echinotriton chinlensis

镇海棘螈

鹤形目 | 鸥科 | 凤头燕鸥属

国家一级 CR (极危)

中华凤头燕鸥是曾被认为已经灭绝而又被重新发现的“神话之鸟”。体型中等，身着灰白色“外衣”；嘴呈橘黄色，尖端黑色；脚为黑褐色。它最显著的特征就是额部在繁殖期会变成黑色，冬季又变回白色。自2004年发现中华凤头燕鸥以来，象山一直致力于中华凤头燕鸥保护工作。从2013年在韭山列岛一铁墩岛实施人工招引项目以来，已成功孵化了179只中华凤头燕鸥雏鸟。目前铁墩岛已成为世界上中华凤头燕鸥繁殖种群最大的栖息地。



Thalasseus bernsteini
中华凤头燕鸥

天门冬目 | 兰科 | 蝴蝶兰属

国家一级 极小种群保护物种 EN (濒危)

象鼻兰属小型附生草本，植株小型，具多条稍扁的根。叶1~3枚，质地薄，倒卵形，叶背有暗紫色斑点。花序纤细，下垂，具8~20朵花；花白色，花被片具淡紫色横条纹；中萼片卵状椭圆形，唇瓣3裂，距半球形，距口前方有一个白色附属物。象鼻兰野生种群与个体数量稀少，濒临灭绝，曾见于鄞州。



Phalaenopsis zhejiangensis

象鼻兰



虎耳草目 | 金缕梅科 | 银缕梅属

国家一级 中国特有种 VU (易危)

作为最古老的植物物种之一，银缕梅在金缕梅科的系统研究中具有很大的价值。银缕梅原产地在三叠纪早中期是古青龙海浅海区和局部海陆交互地带，后海水退出，属华夏植物区系范围之内，银缕梅的发现使华夏植物区系又增添了新的证据。这给植物区系、植物地理、古生物等多学科的研究，提供了不可缺少的活材料。在宁波市仅见于余姚、奉化和北仑。

银缕梅

Shaniodendron subaequale

鲸偶蹄目 | 抹香鲸科 | 抹香鲸属

国家一级 CR (极危)

抹香鲸，是体型最大的齿鲸，整体呈圆锥形，头部尤其巨大。抹香鲸通常生活在 1000 米以下的深海区域，是潜水最深、潜水时间最长的哺乳动物。2022 年 4 月，巨型成年抹香鲸在宁波象山石浦海域的浅滩上搁浅，呼吸微弱、长时间脱水，一度生命垂危。经过救援人员争分夺秒的努力和当地有关部门及时合理的指挥调度，21 小时后抹香鲸被送回大海。这是中国首例搁浅巨型抹香鲸救援成功的案例，在全球范围内都十分罕见。



抹香鲸
Physeter macrocephalus



龟鳖目 | 海龟科 | 玳瑁属

国家一级 CR (极危)

玳瑁是已知唯一一种以海绵为食的爬行动物。玳瑁古名瑁、文甲，背上有十三块状如盾形、分三行作覆瓦状排列的鳞片，所以，玳瑁又叫“十三鳞”“长寿龟”。被誉为“长诗之圣”的《孔雀东南飞》中就有诗句“足下蹑丝履，头上玳瑁光”。由于玳瑁制品极具经济价值，玳瑁过去常遭捕杀，甚至面临灭绝的危机。相信通过教育、宣传和制定政策与执法框架等途径，可消除对玳瑁非法消费的威胁。

玳瑁

Eretmochelys imbricata



6月3日，以“美丽中国我先行”为主题的2025年全国青少年自然笔记征集活动启动仪式暨“六五”环境日宁波市主场活动，在宁波市海曙区龙观乡五龙潭生物多样性体验地成功举行。



6月25日，由宁波市生态环境局、市总工会、团市委、市妇联、鄞州区人民政府主办，市生态环境局鄞州分局承办的2025年度全市生态环境保护执法大练兵技能比武活动在鄞州区正式拉开帷幕。本次大练兵技能比武活动为期三天，设置了理论知识竞赛、无人机执法运用、执法新装备运用、污染源自动监控设施现场检查、VR模拟执法、机动车执法检查等6个项目。



6月21日，宁波市生态环境宣传教育信息中心与宁波儿童公园携手，共同举办了一场以“碳路先锋、绿动未来”为主题的“全国低碳日”亲子活动。

您参与了

**珍惜野生动植物，
爱护山水天湖林。**

就是参与美丽宁波建设



甬小环