

2026 电化学水处理技术及装备 暨水处理专项交流会

面向未来的电化学水处理技术发展思考与展望 ——绿色与智慧

张乐华 教授

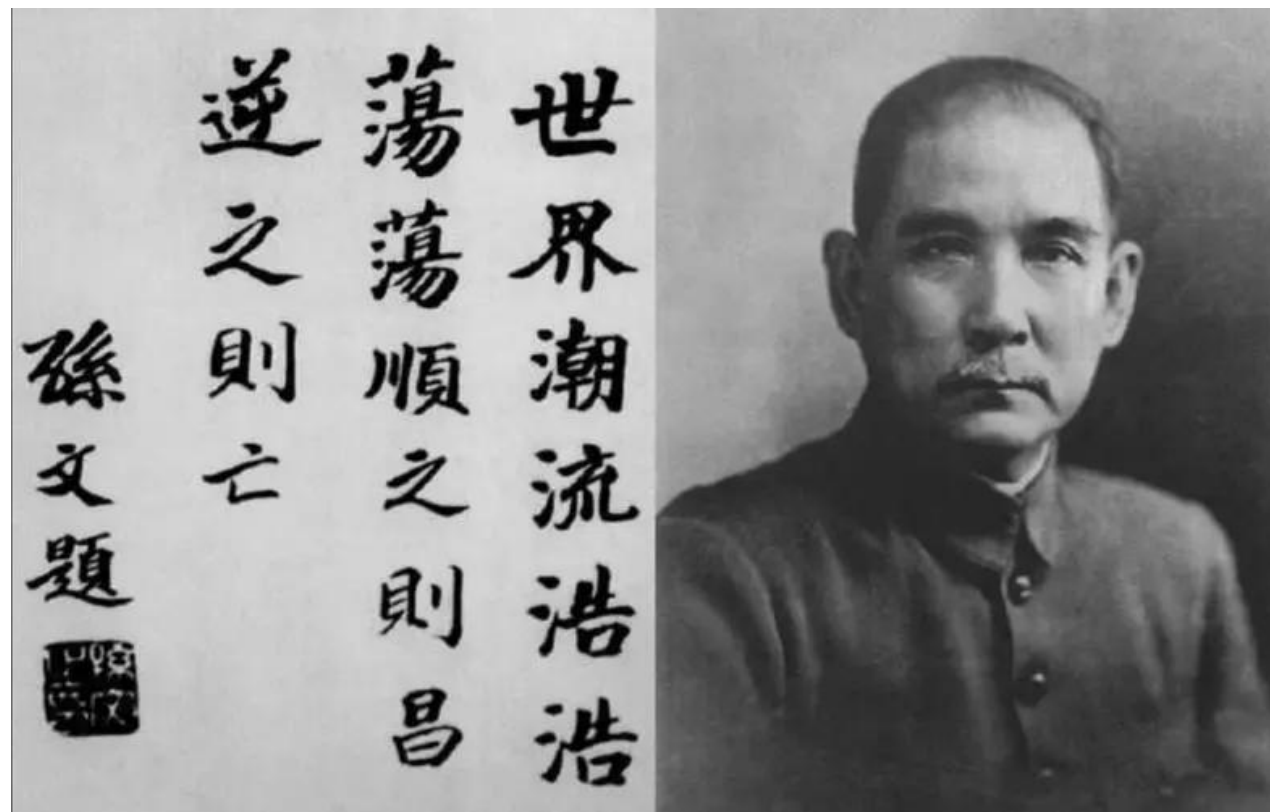
华东理工大学/石河子大学

工业废水无害化与资源化国家工程研究中心

汇报提纲

- 一、**时代背景与痛点**
- 二、**新时代背景下水处理**
- 三、**案例1 智慧型电化学水处理装备**
- 四、**案例2 污染预防与减量技术**
- 五、**案例3 无药剂水处理技术及装备**
- 六、**结论与建议**

1.1 通识

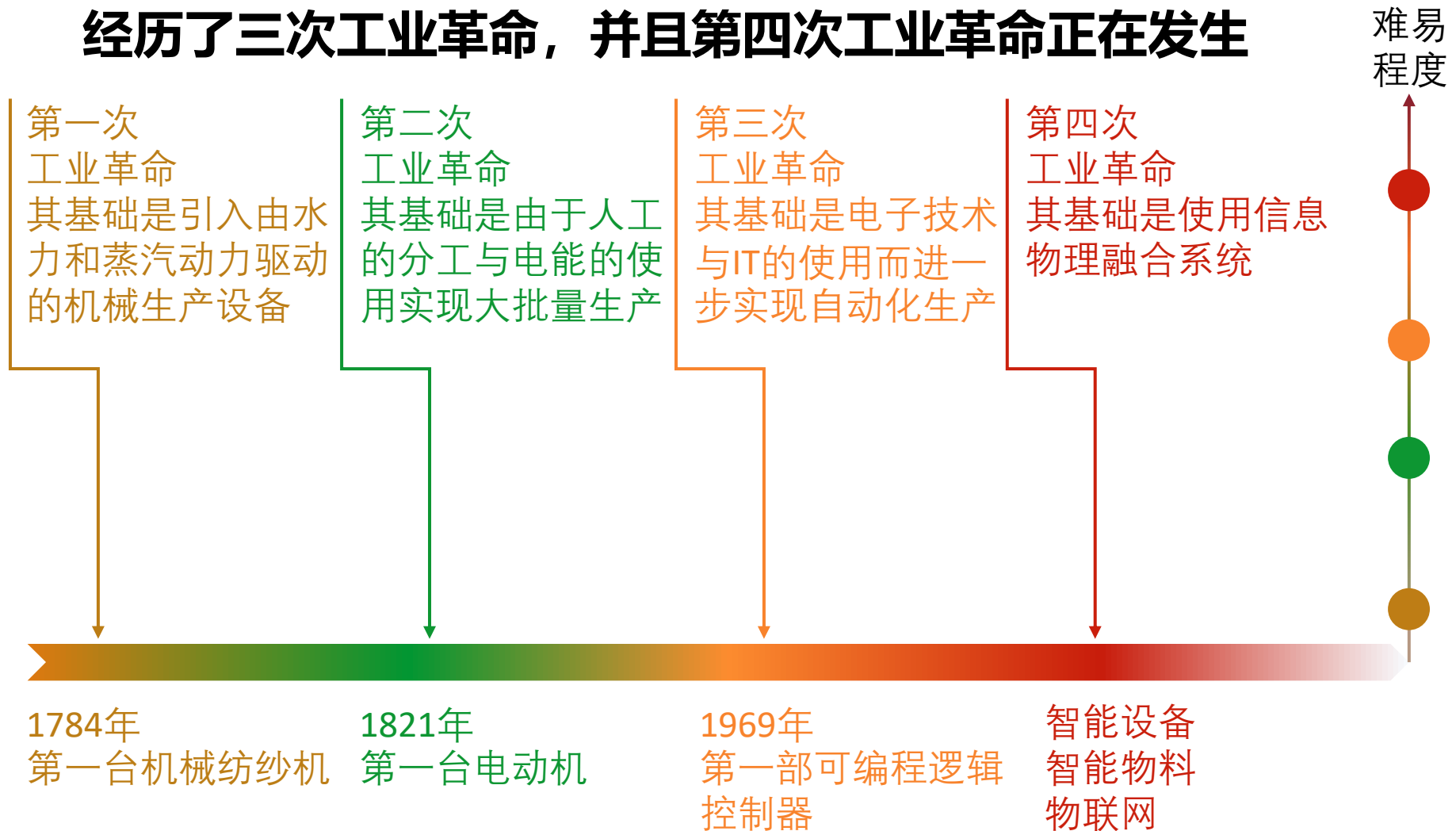


1. 当今新时代背景是什么源流或常？

2. 当今环境工程发展阶段与趋势？

1.2 工业革命

- ◆ 按照德国对工业革命发展的时代划分，当前工业发展已经经历了三次工业革命，并且第四次工业革命正在发生



世界的巨大变革

- ◆ 信息智能技术成为率先渗透到经济、社会和生活的先导技术

工业革命



知识革命

第一次产业革命1.0：18世纪，
蒸汽机使人类进入机械化；

第二次产业革命2.0：19世纪末-20世纪上半叶，
电机和化工使人类进入电气化；

第三次产业革命3.0：20世纪中-20世纪下半叶，
数字和电子使人类进入数字化；

第四次产业革命4.0：20世纪下半叶开始，
信息与物理融合技术使人类进入智能化；

1.3 人类的红色代码

~1.5°C



~90%减量

煤炭

减产

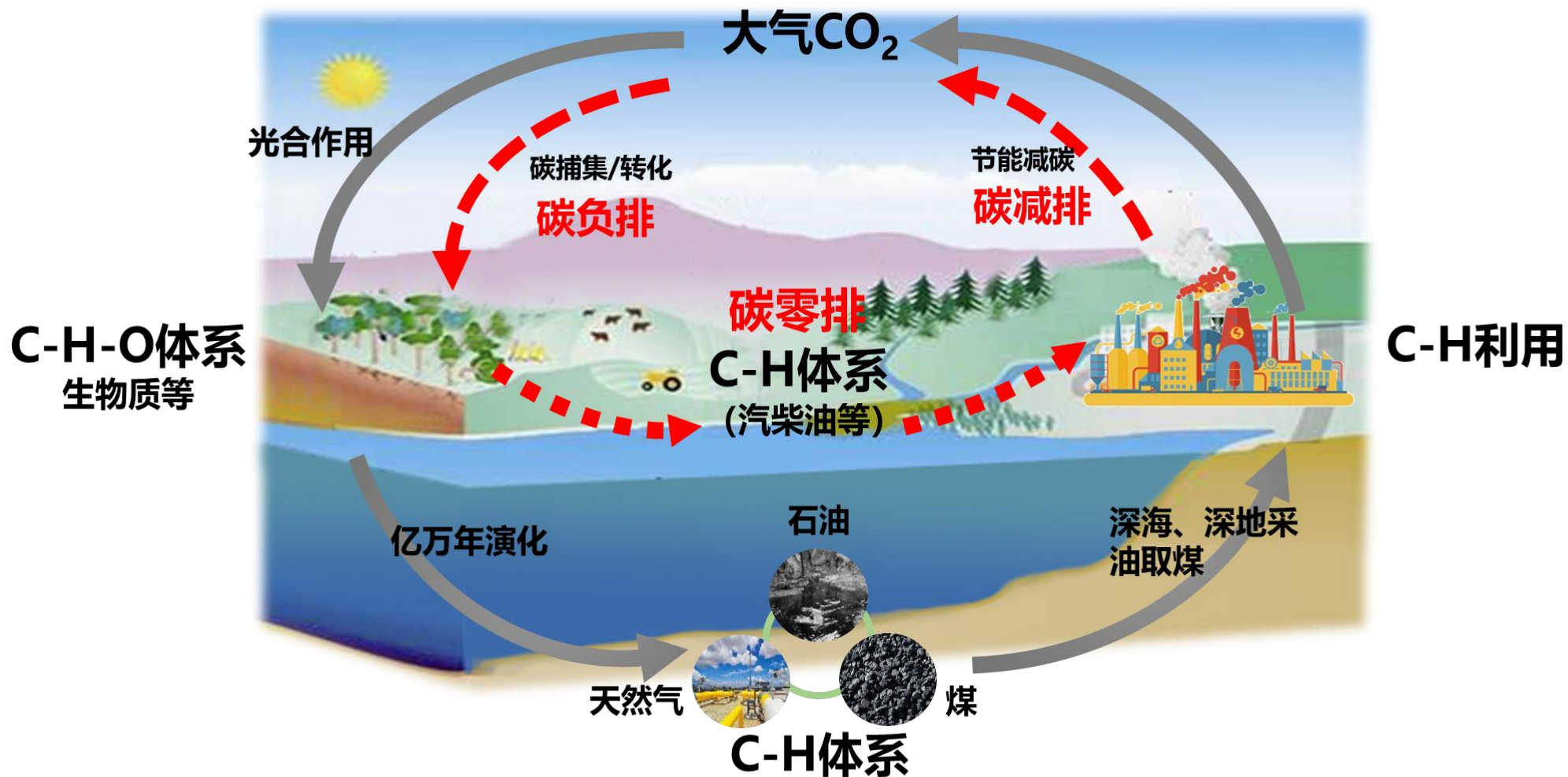
石油天然气

碳捕获与储存

从大气中

资源碳中和：起步萌芽

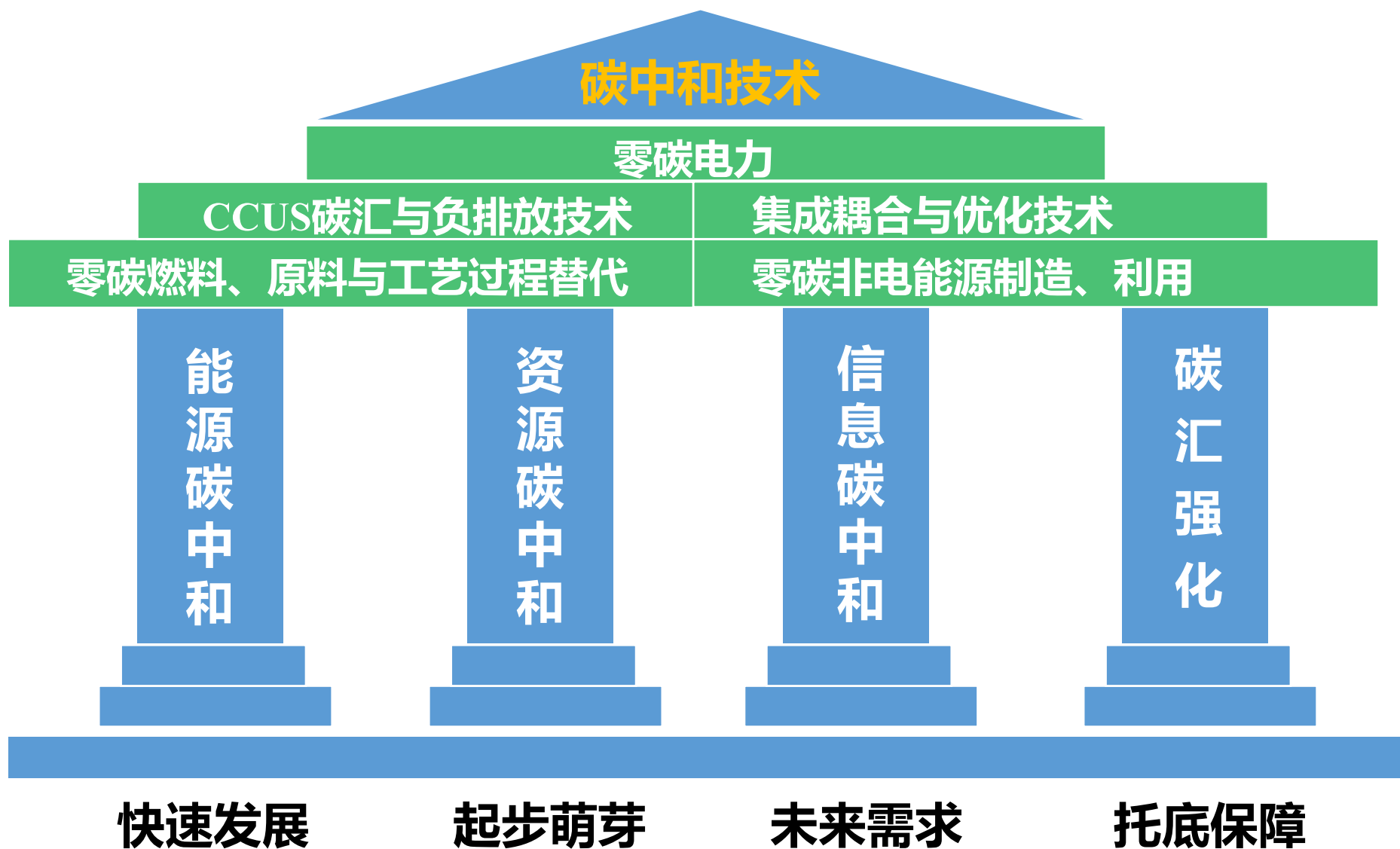
- 石油天然气、基础原材料从地下化石资源开发向地表二次资源循环变革



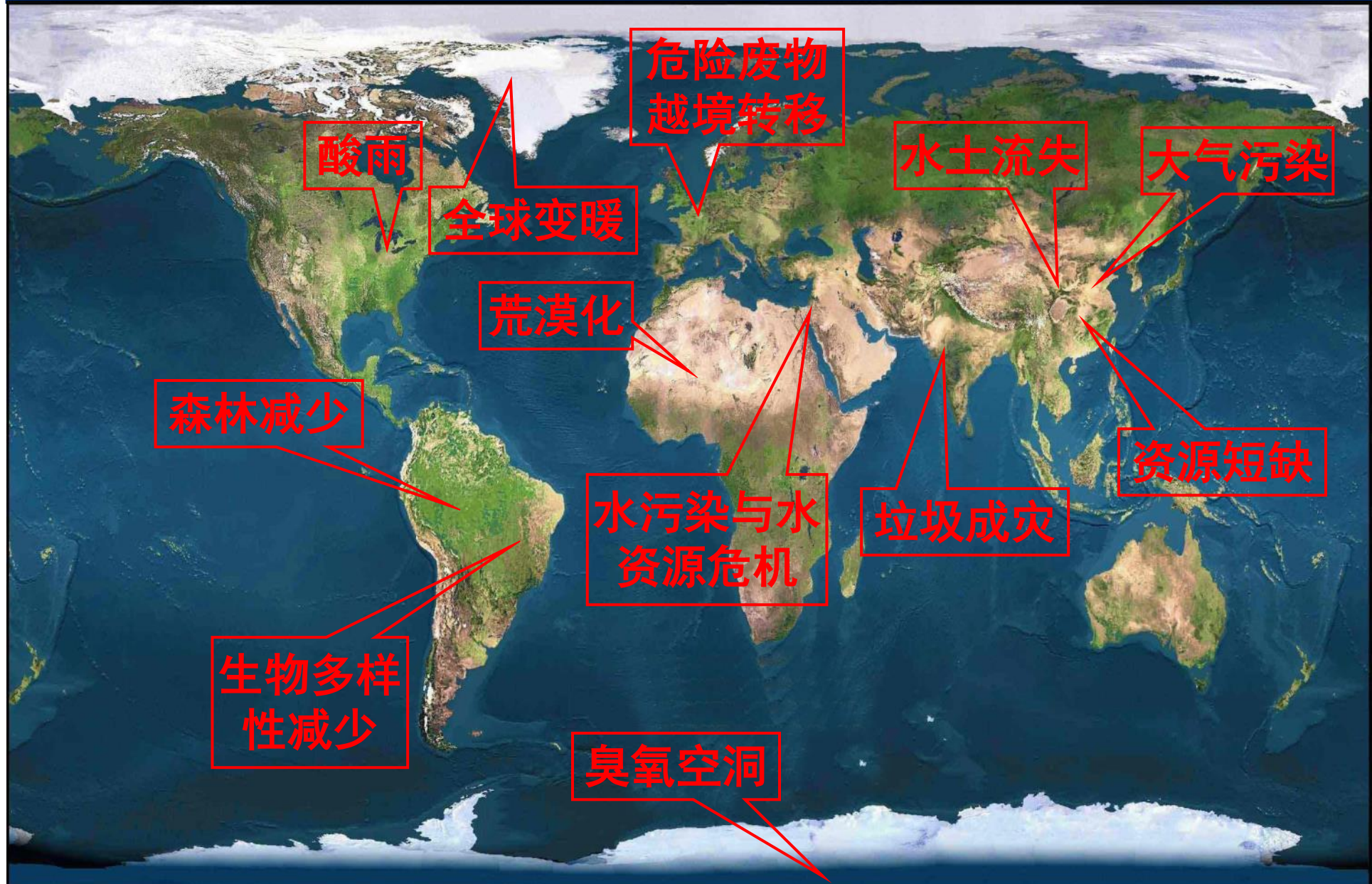
中国碳中和技术架构——“四柱五梁”

五梁

四柱



1.4 人类面临的全球性环境问题



汇报提纲

- 一、时代背景与痛点
- 二、新时代背景下水处理
- 三、案例1 智慧型电化学水处理装备
- 四、案例2 污染预防与减量技术
- 五、案例3 无药剂水处理技术及装备
- 六、结论与建议

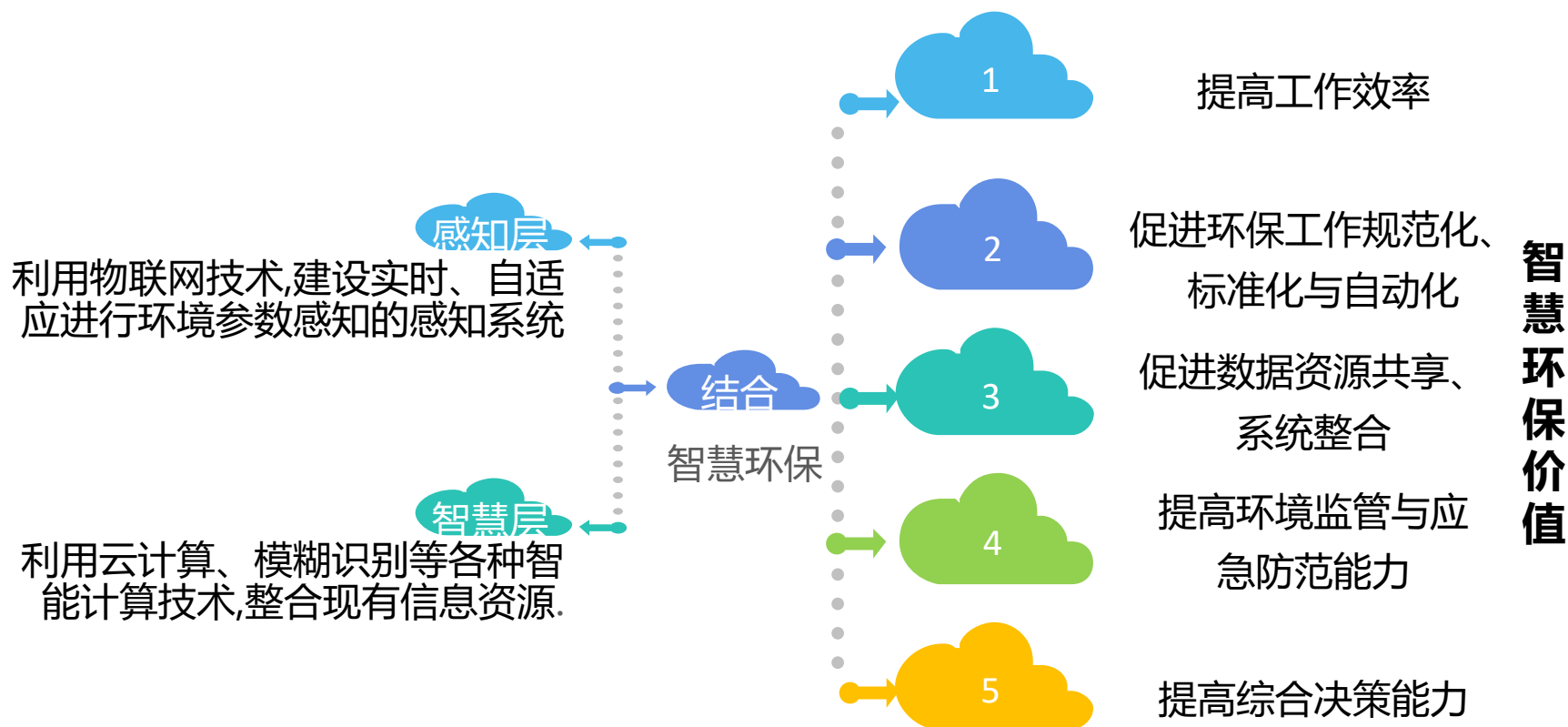
2.1 数字环保与智慧环保

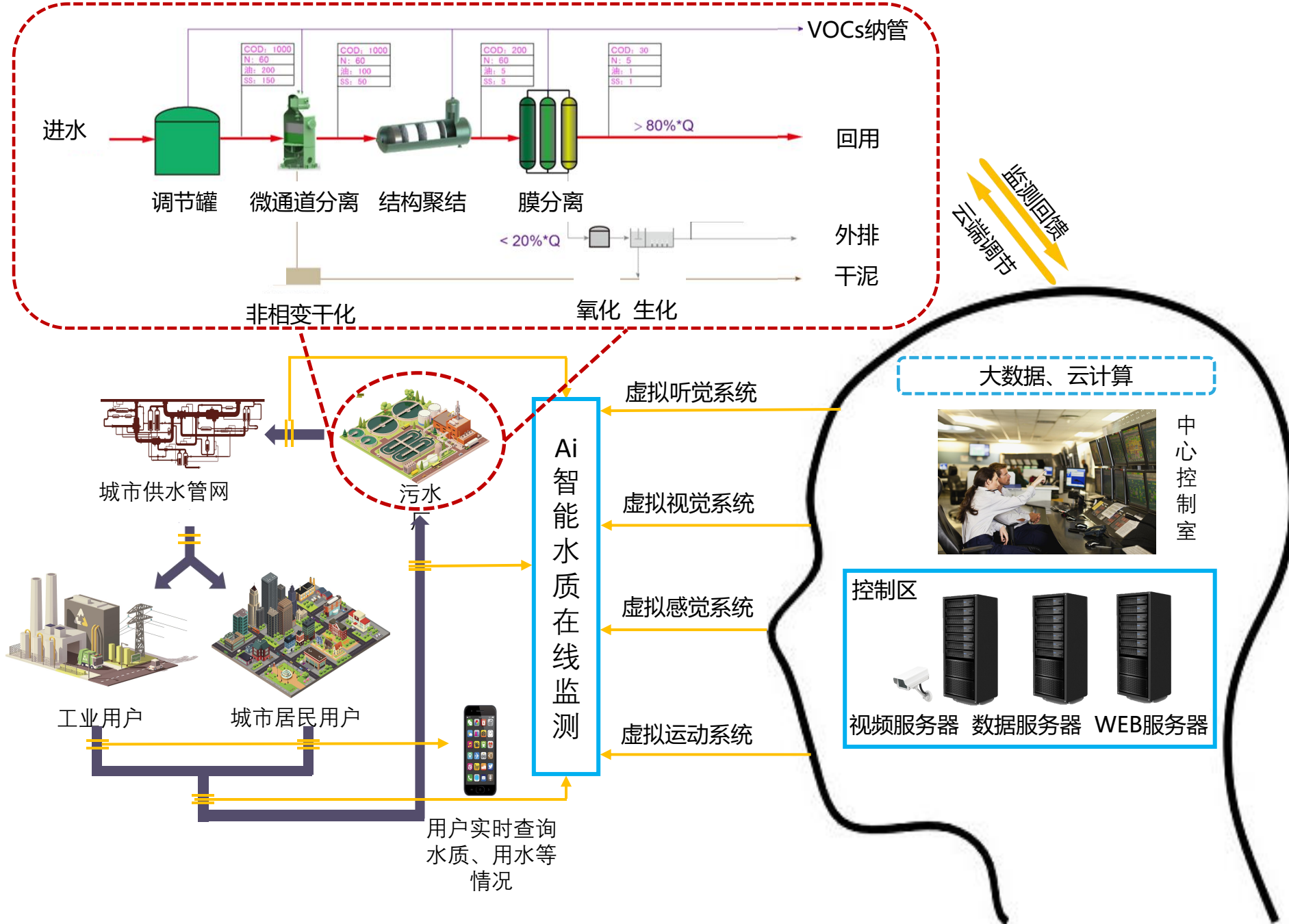
- ◆ 数字环保是智慧环保的前身
- ◆ 数字环保可以理解为以环保为核心，由基础应用、延伸应用、高级应用和战略应用的多层环保监控管理平台集成



数字环保到智慧环保

- ◆ 要实现从“数字环保”到“智慧环保”的跨越，关键是要在原有“数字环保”的基础上，重点加强感知层与智慧层的建设





智慧环保内涵

- ◆ “感知环境，智慧环保”工程将形成国家级的标准示范，在未来环保行业中发挥引领作用

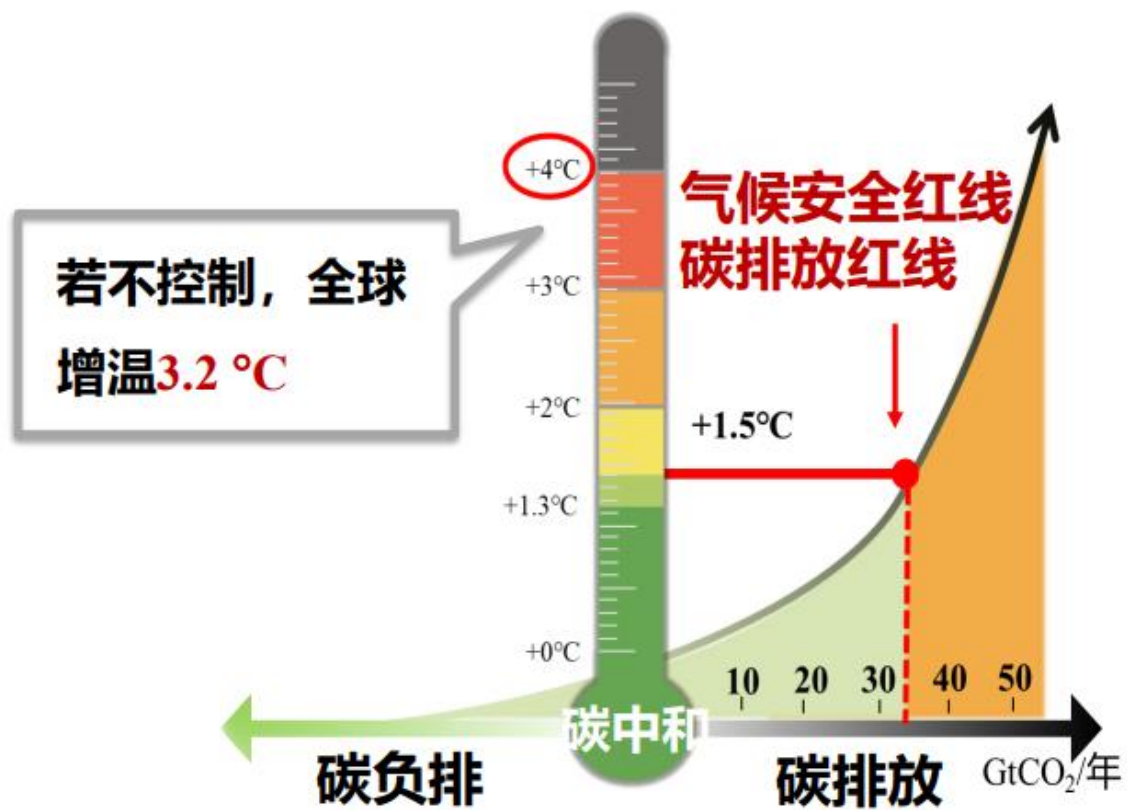


2.2 环境工程的绿色与低碳



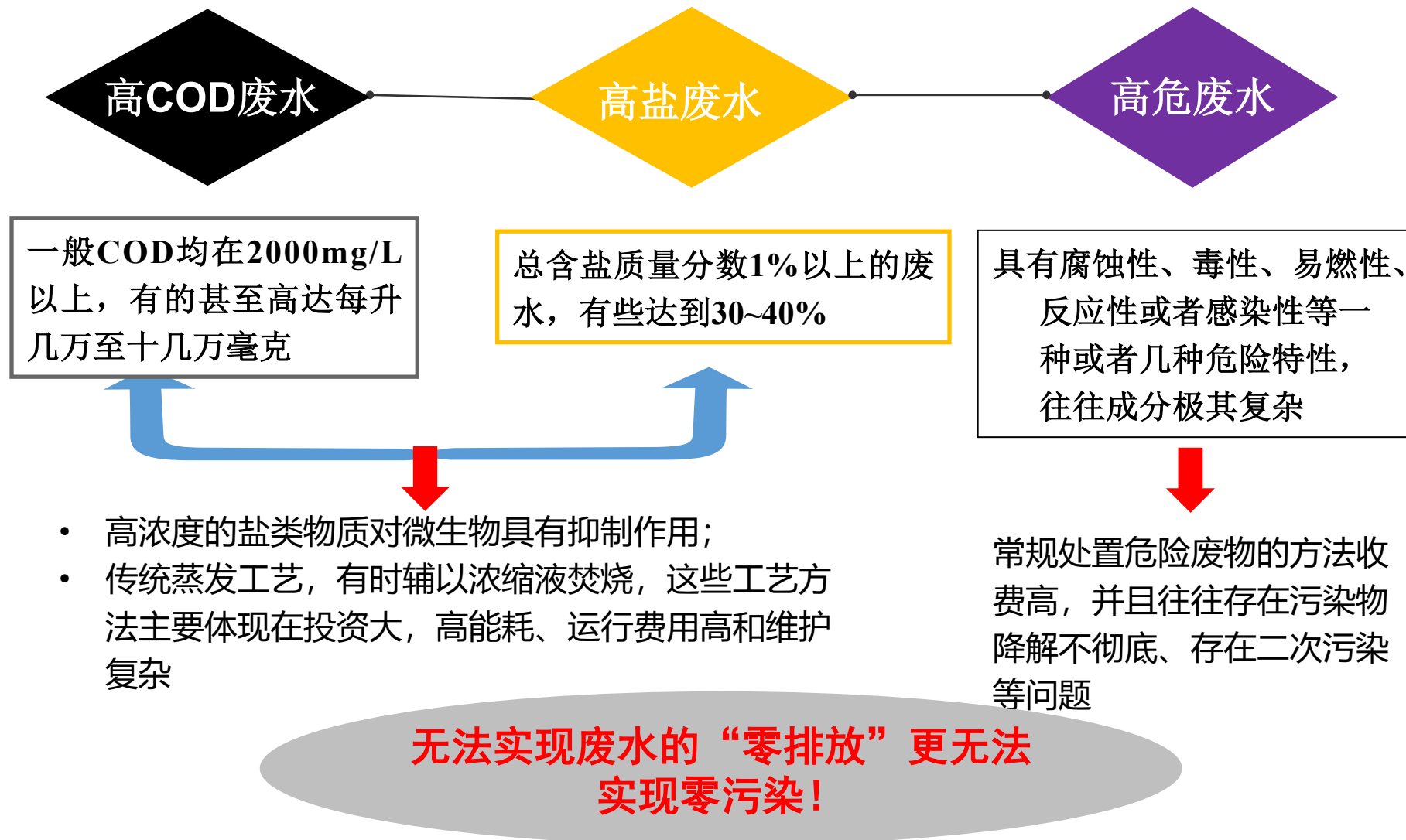
针对废水主体工艺

原则：绿色化与低碳化



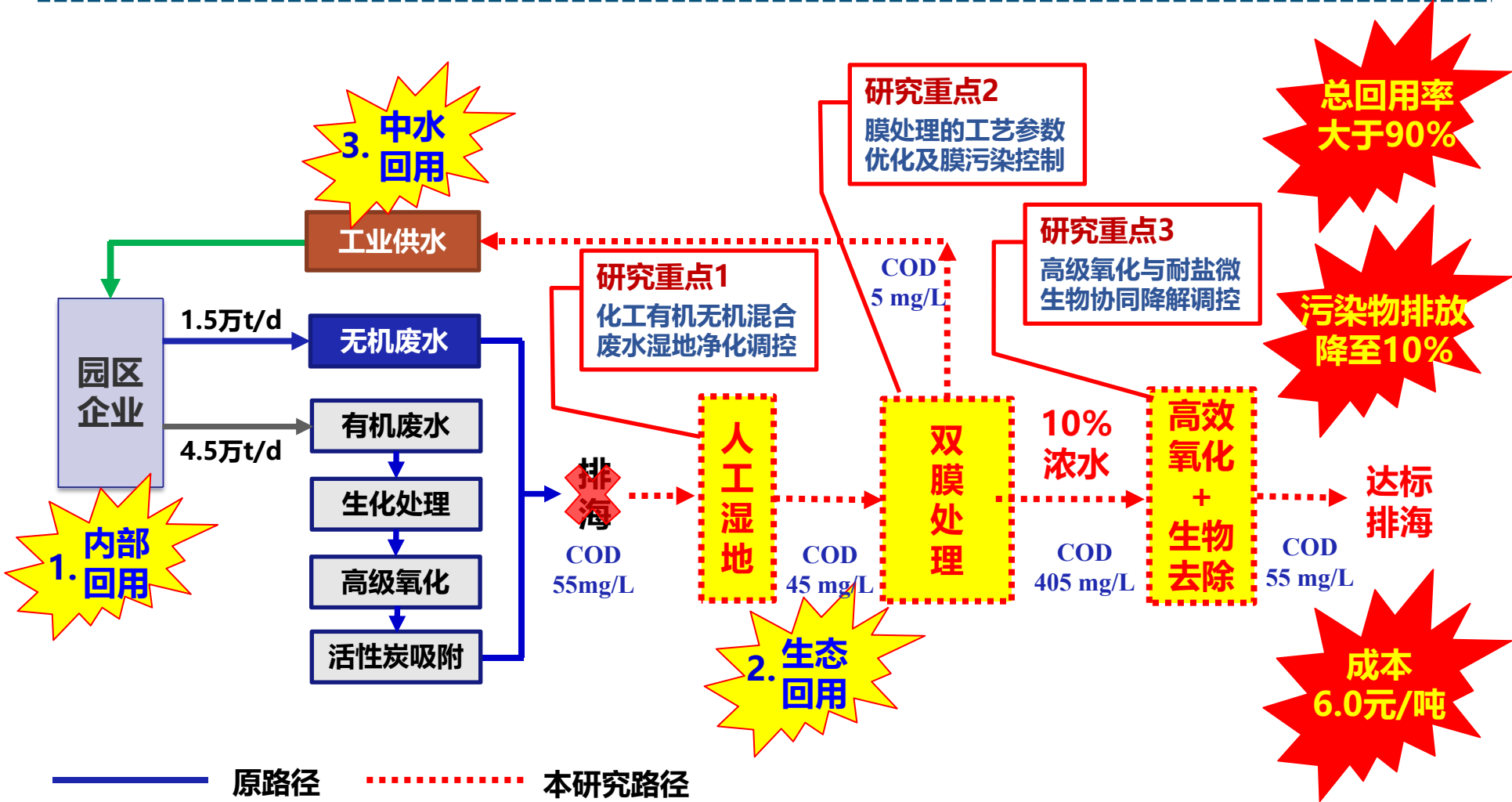
针对高浓高盐废水

原则：减量化与资源化



针对废水深度处理

原则：资源化与近零排放



汇报提纲

- 一、时代背景与痛点
- 二、新时代背景下水处理
- 三、**案例1 智慧型电化学水处理装备**
- 四、案例2 污染预防与减量技术
- 五、案例3 无药剂水处理技术及装备
- 六、结论与建议

感官

构建智能调控数据库

设计参数

- 电极面积
- 极间距
- 催化剂等

工艺参数

- pH
- DO
- ORP等

工艺参数

- 电流
- 电压
- 流量等

思考

建模与数据处理

数据分析与预处理

- 异常值剔除
- 聚类分析等

模型训练

- 神经网络
- 支持向量回归等

目标优化

- 多模型多目标比较分析
- 最优化模型

决策

智能型
电化学
反应器研发

传输

反馈

行动

运行智能型装备

智能控制
与反馈模
块开发

电化学水
处理过程
预测

效率、
能耗
优化

损耗、
寿命
优化



智慧型水处理系统的搭建

智慧型电化学硝酸盐氮还原水处理系统的中试试验

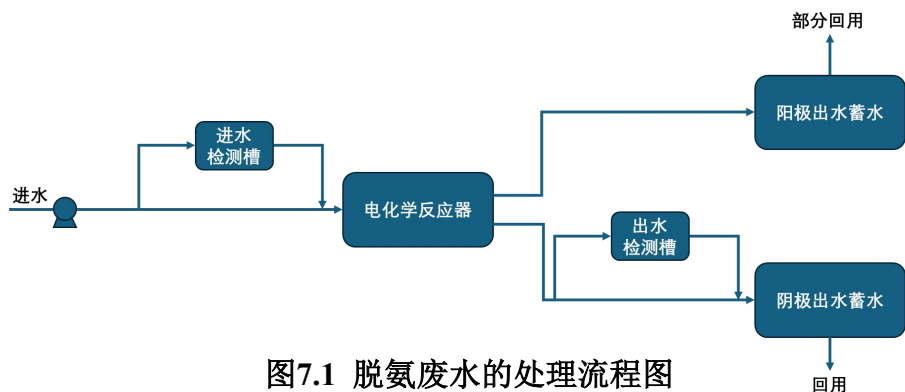


图7.1 脱氮废水的处理流程图

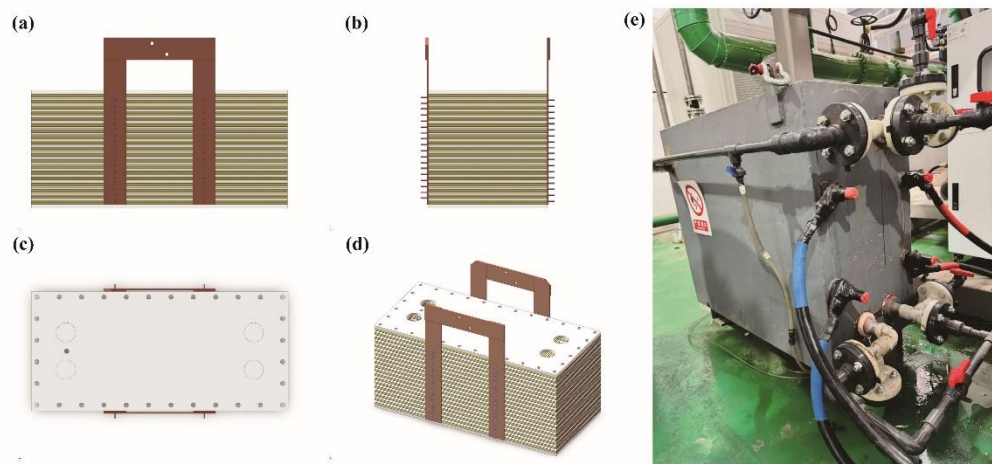


图7.2 电化学还原硝酸盐的反应装置

- 设置旁路的水质检测槽；
- 程控电源提供电流电压。

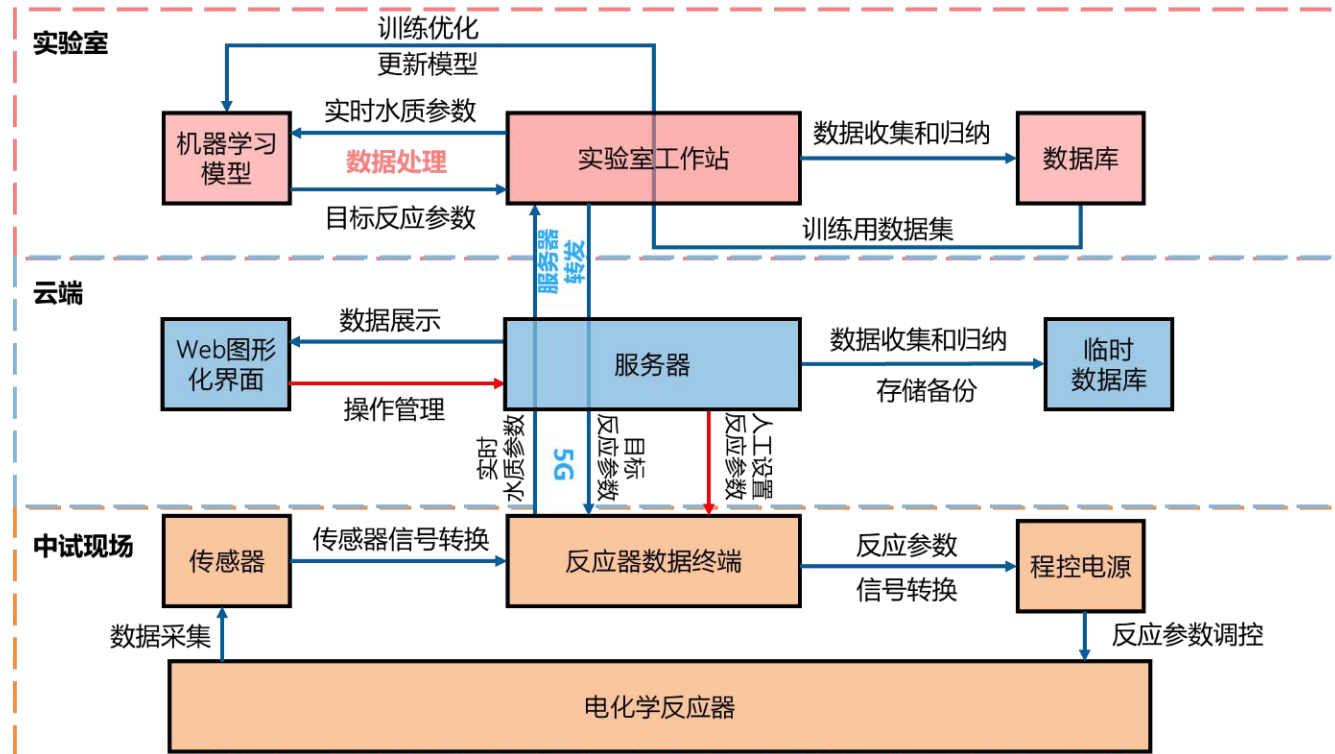


图7.4 智慧型电化学硝酸盐氮还原水处理系统流程图

实验室：负责数据的收集和归纳、模型的训练和优化、数据输入和控制参数输出功能；

云端部分：具有数据存储备份、数据展示和系统操作管理功能；

中试部分：实现远程控制、自动控制和实时监看数值参数等功能。



智慧型水处理系统的搭建-中试现场

智慧型电化学硝酸盐氮
还原水处理系统的中试试验

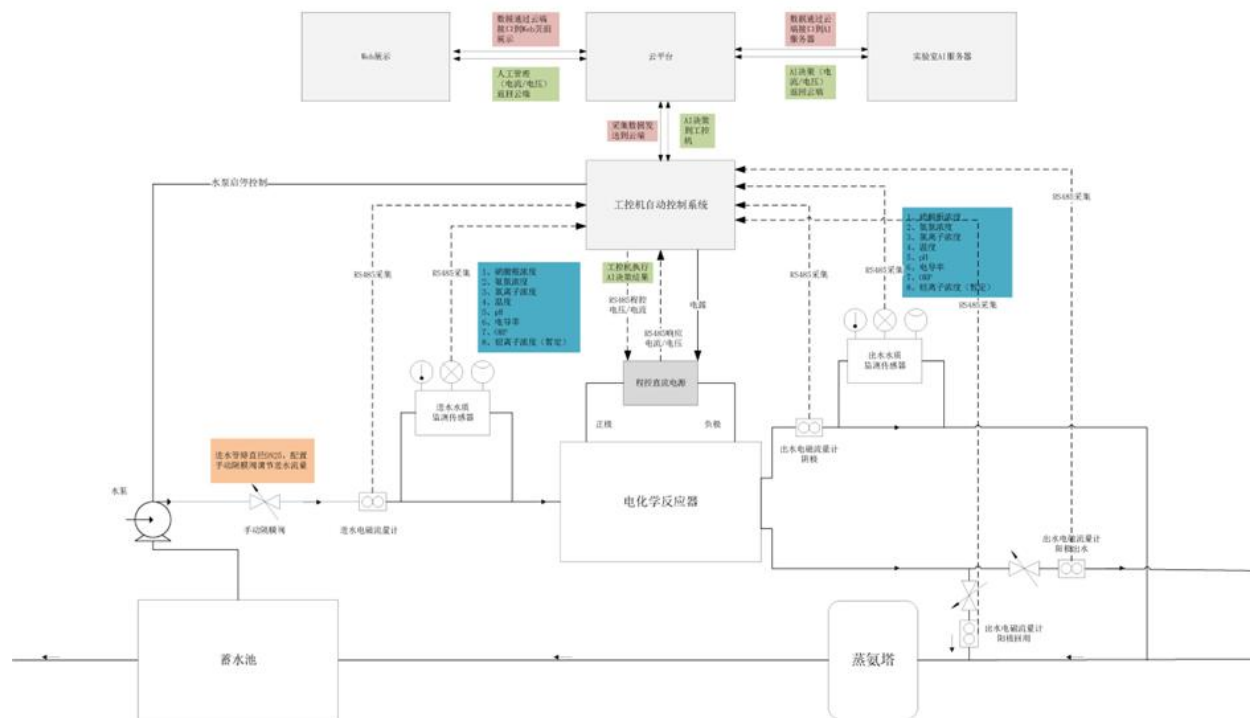
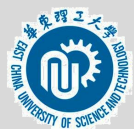


图7.5 智慧型电化学硝酸盐氮还原水处理系统逻辑图

- 系统的硬件设备包括电化学反应器、蒸氨塔、蒸氨塔出水蓄水池、服务器、程控电源、进水和出水水质传感器、工控机、水泵和实验室工作站。
- 中试现场设备间采用RS485串口进行连接；
- 工控机通过5G通信上传数据给服务器，服务器转发实验室工作站进行AI决策，决策参数再由云平台服务器回传工控机。



图7.31 (a) 中试现场电化学水处理系统；(b) 电化学反应器；(c) 传感器集成柜；(d) 终端工控机；(e) 程控电源；(f) 传感器测试槽；(g) 工控机运行界面



(a)



(b)



图7.6 数据平台的 (a) 前端和 (b) 后端的登录页

(a)



(b)



图7.7 (a) 移动平台的登录页和 (b) 数据查看界面

- 采用用户名加密码登录，配有JSP验证码；
- 可在电脑或智能手机上使用浏览器通过互联网对数据平台进行访问。



数据平台分为两个部分：**负责数据展示的前端**和**负责数据存储管理的后端**

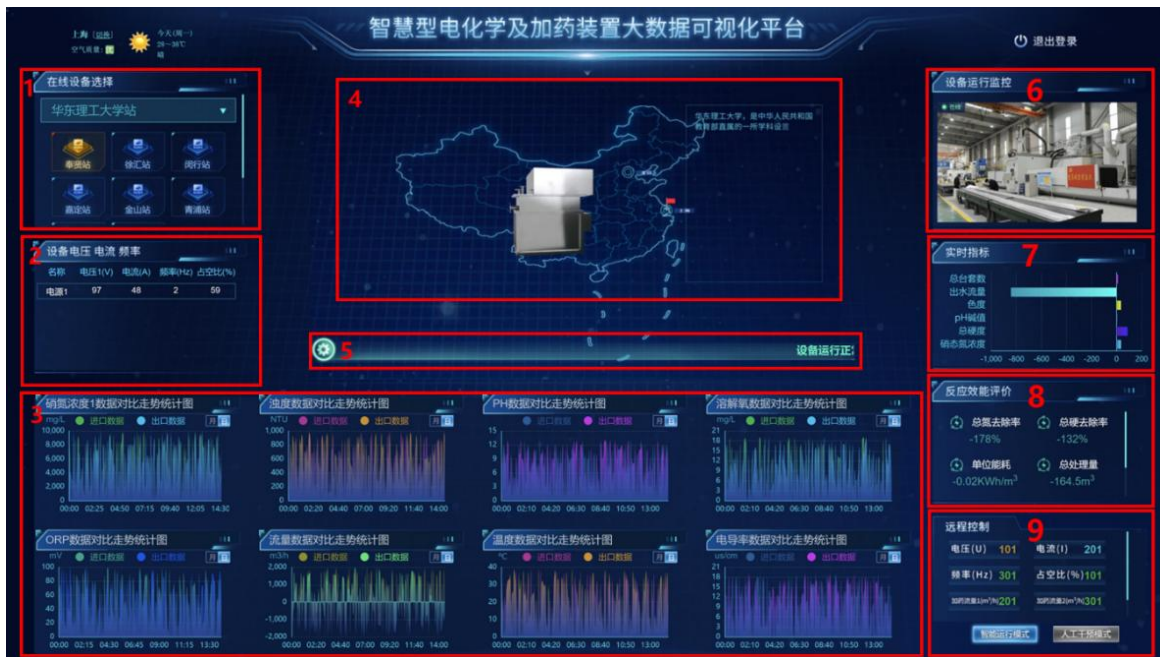


图7.8 智慧型水处理系统的前端数据展示平台



图7.9 智慧型水处理系统的后端数据存储管理平台

- 1站点设备选择;
- 2电源运行参数;
- 3水质参数对比折线图;
- 4设备站点地域分布;
- 5设备运行状态监测;
- 6设备运行监控;
- 7实时运行数据;
- 8能效评价;
- 9远程控制

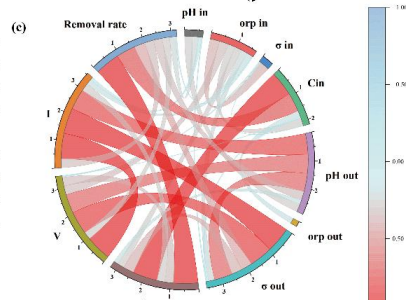
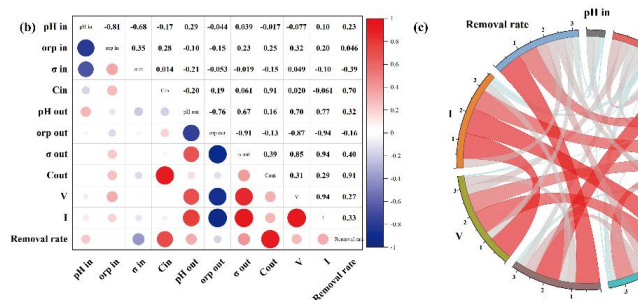
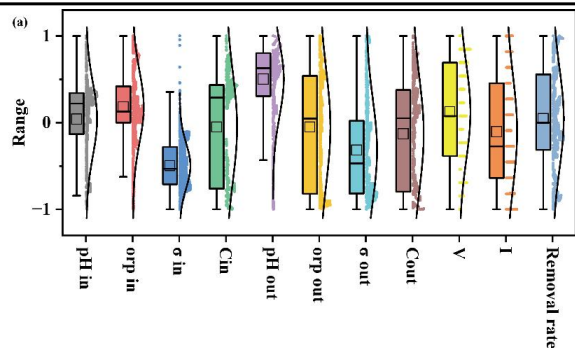
负责数据存储管理的后端主要包括两个子菜单，分别是：管理员管理和实验数据管理。实现对系统中**数据的读取**和**字典名称的定义**。



数据的收集和分析

实验数据集的特征

特征	最大值	最小值	平均值	标准差
pH	11.18	6.35	8.86	1.02
ORP / mV	288.00	54.00	192.33	47.99
电导率 / $\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$	18.93	15.21	16.14	0.48
硝酸盐浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	7738.38	749.45	4068.05	2175.29
电流 / A	300.00	25.00	148.21	90.55
电压 / V	3.10	1.80	2.53	0.36
去除率	0.89	0.16	0.54	0.21



数据集无
冗余特征

图7.25 中试实验的 (a) 含有正态分布曲线的箱线图; (b) 相关性Pearson热图; (c) 相关性弦图;

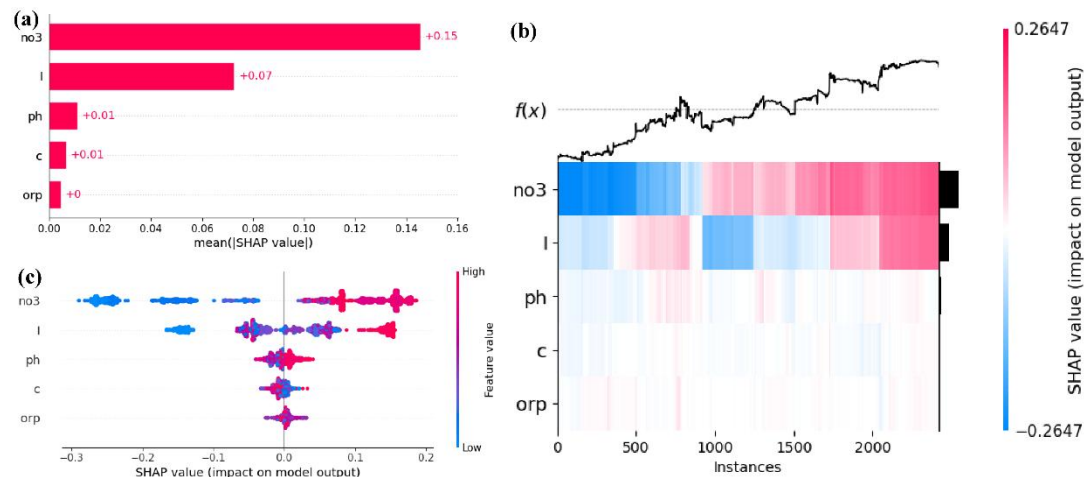


图7.26 (a) SHAP的全局特征重要性评价; (c) 特征全局分布蜂群图; (d) 特征热图

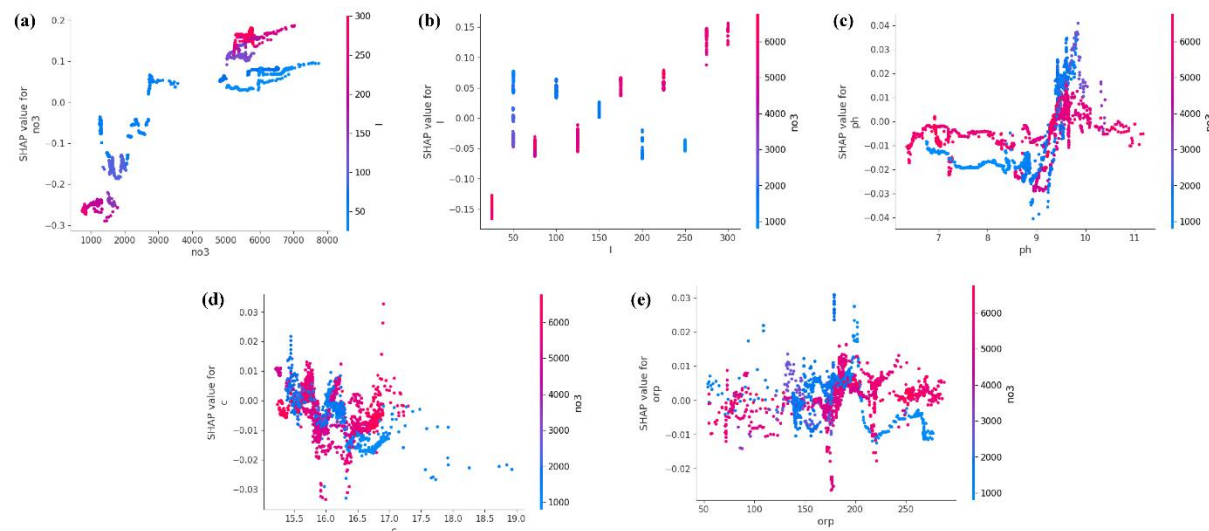


图7.27 SHAP部分特征依赖图: (a) 硝酸盐浓度 (no3), (b) 电流 (I), (c) pH, (d) 电导率 (c), (e) 氧化还原电位 (orp)



超参数优化

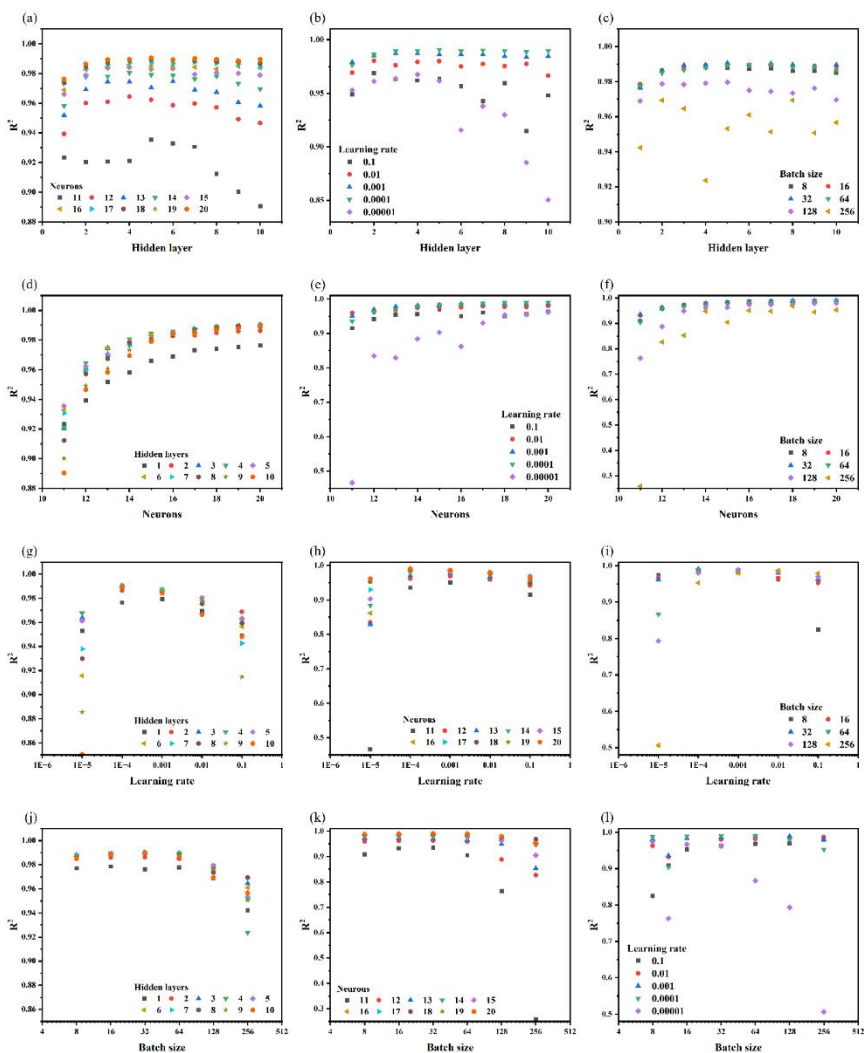


图7.27 不同隐藏层层数 (abc)、神经元数量 (def)、学习率 (ghi) 和批处理量 (jkl) 的 R^2

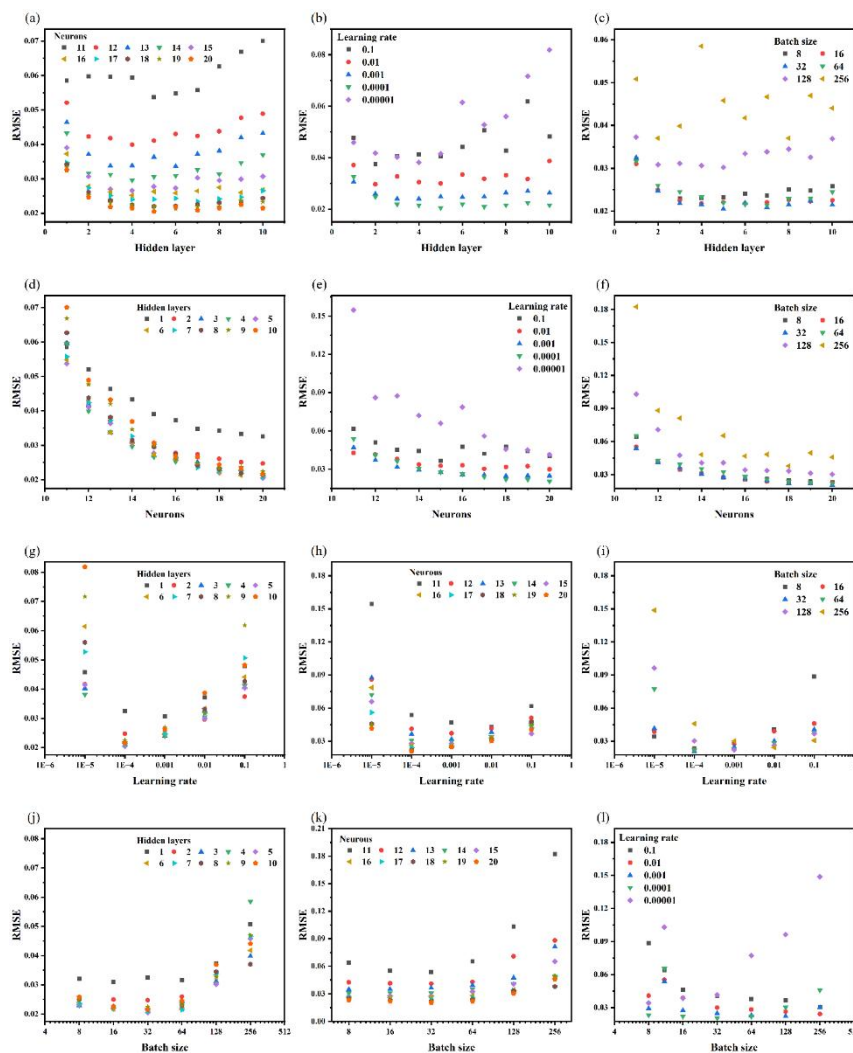


图7.28 不同隐藏层层数 (abc)、神经元数量 (def)、学习率 (ghi) 和批处理量 (jkl) 的RMSE

- ◆ 隐藏层层数
少→降低模型性能或导致模型欠拟合
多→学习噪音而非特征,造成过拟合
- ◆ 隐藏层神经元的数量
增加提高了模型的性能,逐渐平缓。
- ◆ 学习率
模型的收敛速度,模型的准确性 训练时间
- ◆ 批次样本 (Batch size)
模型的训练速度,模型的损失下降速度和训练精度



回调函数和模型性能

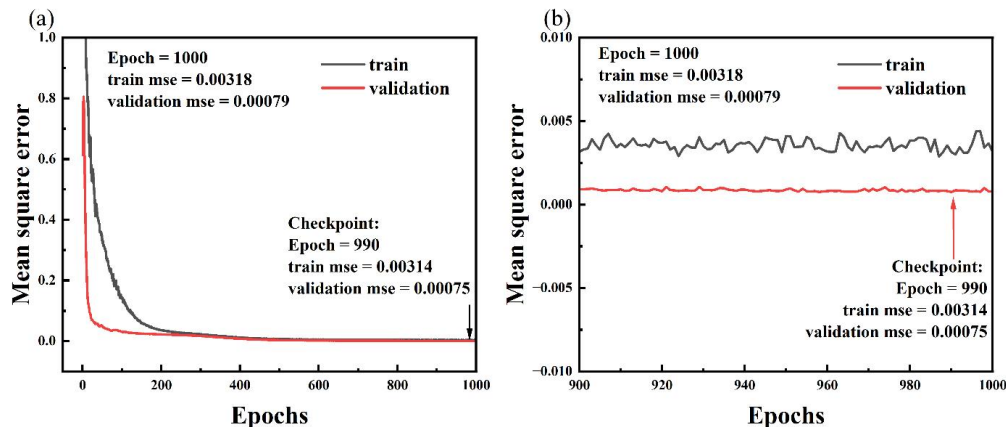


图7.29 (a) 人工神经网络模型训练集和验证集Mse; (b) 900 ~ 1000 Epoch的训练集和验证集Mse

- 在神经网络的训练和优化中，迭代算法引入了Keras中回调函数ModelCheckpoint;
- 回调函数可以保存1000次Epoch中性能最好的模型;
- 回调函数的引入有利于规避过拟合和欠拟合引起模型性能差的问题。

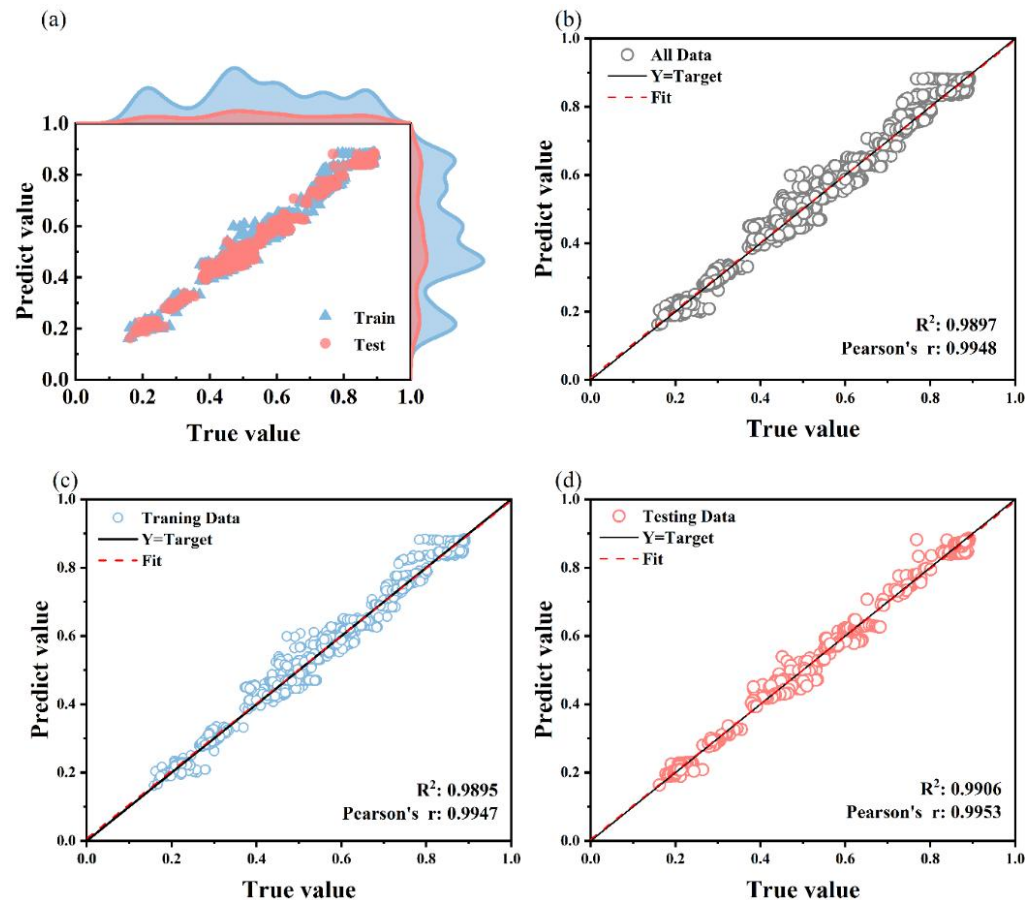


图7.30 (a) 训练集和测试集的划分和分布; 人工神经网络模型在总集 (b)、训练集 (c) 和测试集 (d) 上的输出值分布



运行稳定性测试

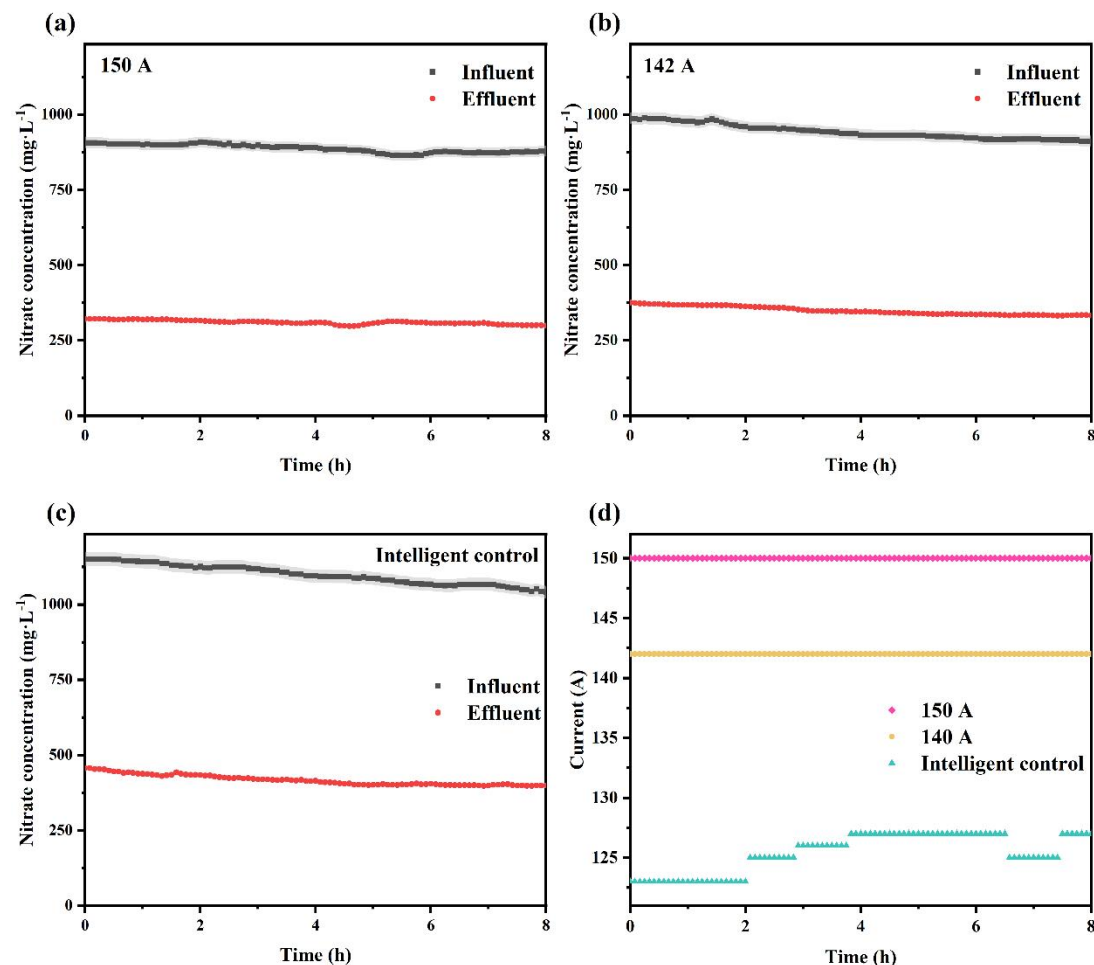


图7.32 (a) 150 A, (b) 142 A和 (c) 智能控制电流条件下反应器进水和出水硝酸盐浓度; (d) 150 A, 142 A和智能控制方案中电流随时间变化情况

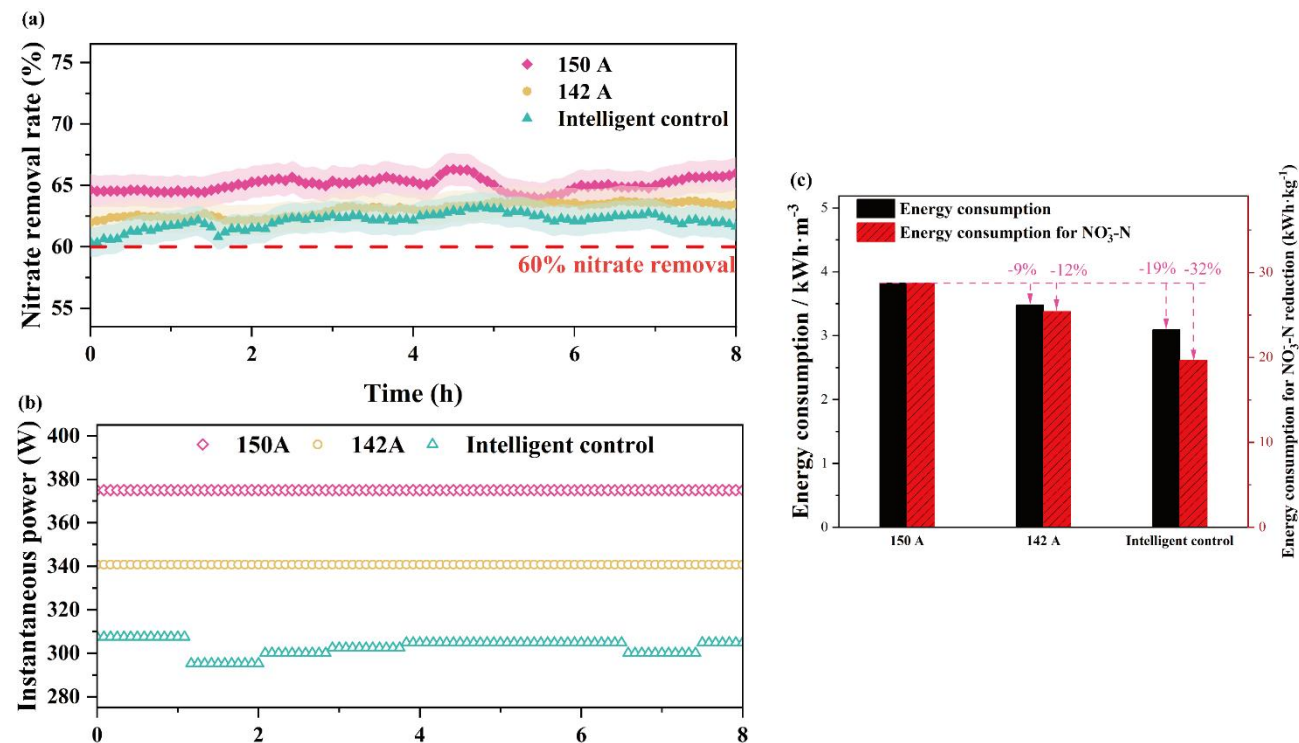


图7.33 150 A, 142 A和智能控制方案下随时间变化的 (a) 反应器中硝酸盐去除率和 (b) 程控电源输出功率; (c) 150 A, 142 A和智能控制方案的反应总功耗和硝酸盐氮还原单位能耗

- 三个方案的电化学功耗在 **2.47 ~ 3.06 kWh·m⁻³**;
- 硝酸盐氮还原的单位能耗 **19.66 ~ 28.77 kWh·kg⁻¹**;
- 智能控制方案的响应时间在6~8秒之间, **平均为7.2秒**

小结

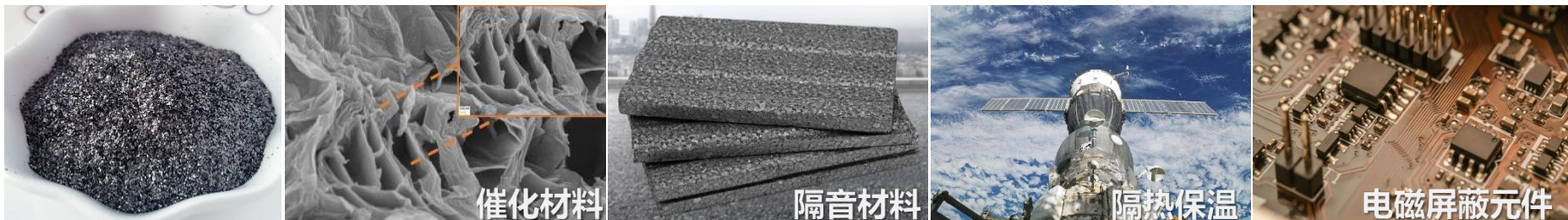
- ◆ 搭建了智慧型电化学硝酸盐氮还原水处理系统，通过互联网实现了对中试现场反应器水质**参数的实时收集**和根据水质参数**智能控制反应器参数**的功能。
- ◆ 编写了智慧型电化学硝酸盐氮还原水处理系统的**数据收集、数据展示和数据参数管理系统**，可在电脑或智能手机上使用浏览器通过互联网对数据平台进行访问。
- ◆ 根据网格搜索结果，优化后神经网络结构为5-5-1，回调函数提高了ANN模型的性能，Epoch 990后得到的模型性能最佳， **R^2 为0.9906，RMSE为0.0205**。
- ◆ 智慧型电化学硝酸盐氮还原水处理系统的智能控制方案平均响应时间**7.2秒**，保持硝酸盐去除率均在60%以上的同时，**总能耗下降19%**，硝酸盐氮**去除量提升18%**，硝酸盐氮去除的**单位能耗下降32%**。

汇报提纲

- 一、时代背景与痛点
- 二、新时代背景下水处理
- 三、案例1 智慧型电化学水处理装备
- 四、**案例2 污染预防与减量技术**
- 五、案例3 无药剂水处理技术及装备
- 六、结论与建议

1.1 研究背景

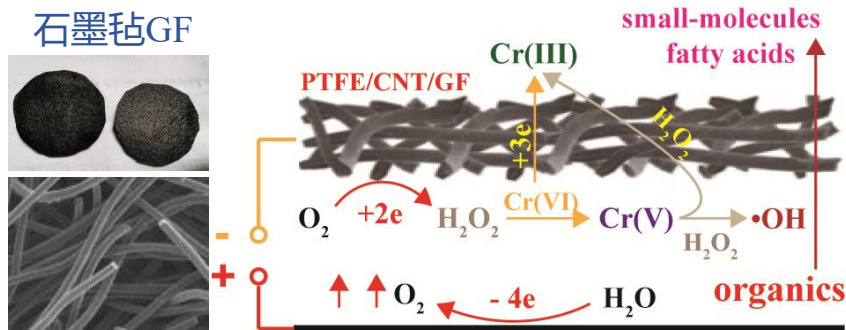
- ◆ **膨胀石墨**是天然鳞片石墨经氧化插层后的一种石墨插层化合物。经高温处理后，可瞬间形成蠕虫状膨胀石墨。
- ◆ **膨胀石墨**质地柔软、密封效果好、热导率高，良好的吸附性、防辐射性和自润滑性。广泛用于密封材料、环保、化工、能源、军事等领域。
- ◆ **制备膨胀石墨的方法**主要有**铬法**、锰法和双氧水等。铬法为经典方法之一。然而，**铬法膨胀石墨生产**过程产生大量的**含铬废硫酸**，其酸浓度大（5~50 wt%）、铬含量高（1000~6000 mg/L），有毒有害。



1.2 研究目的

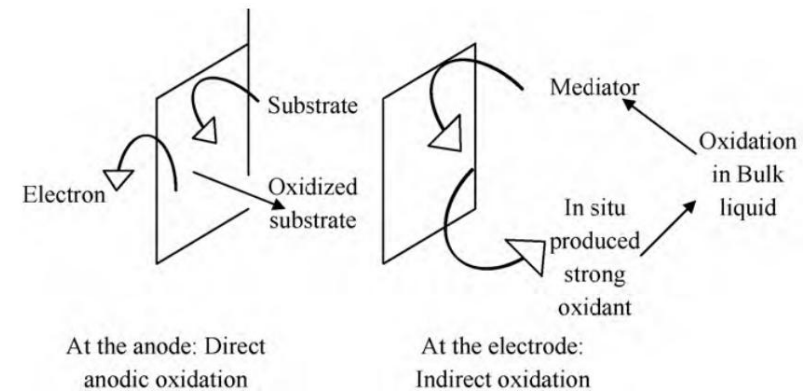
Cr(VI)→Cr(III) 降低毒性

- 针对Cr(VI) 利用电化学**阴极还原**过程直接实现Cr(VI)向Cr(III)的转化;
- 利用**阳极析氧**，**阴极原位合成H₂O₂**，构建**电还原+类电芬顿复合反应**，结合产生的 $\cdot\text{OH}$ 构建还原体系，将Cr(VI)还原为Cr(III)。

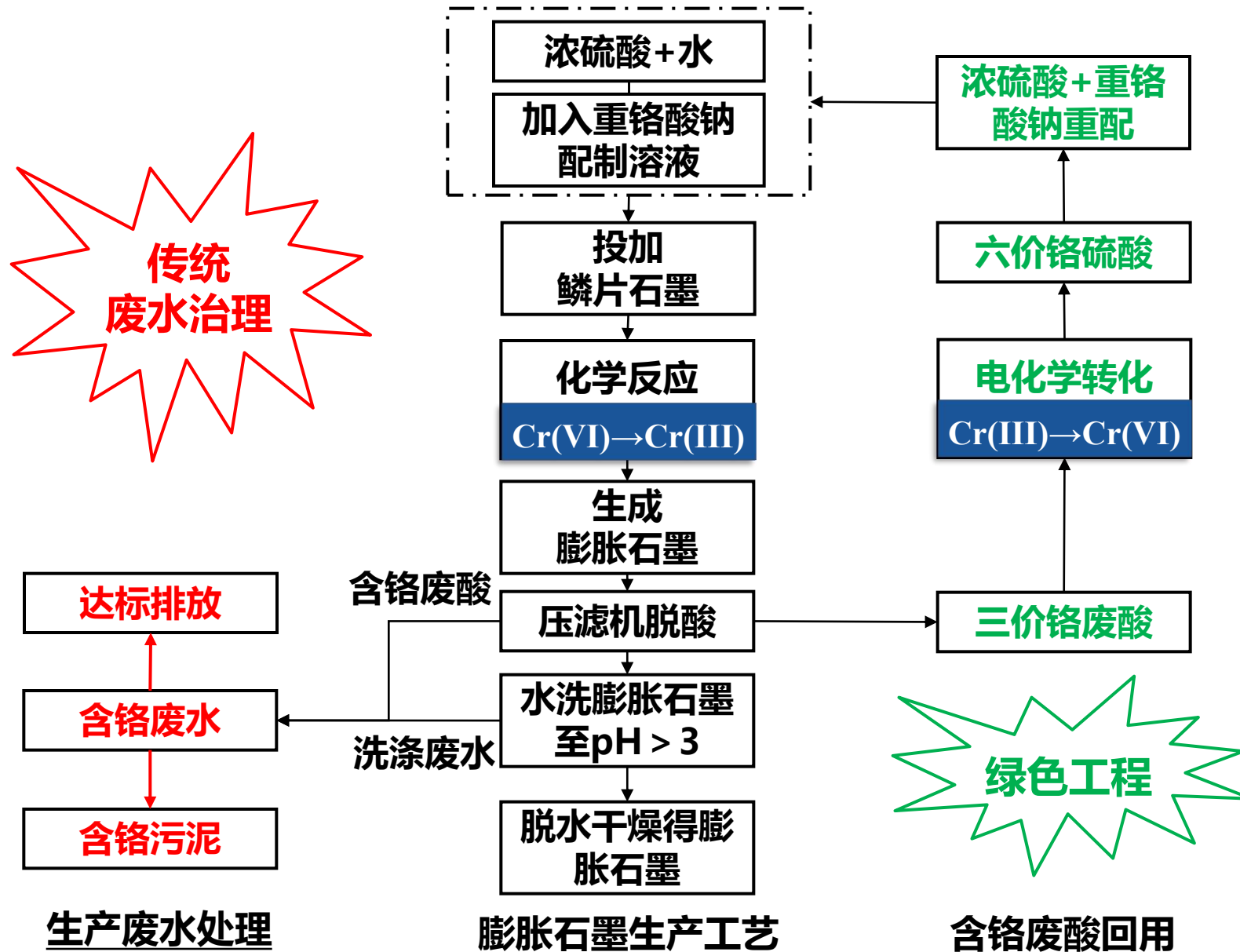


Cr(III)→Cr(VI) 资源回用

- 铬是工业生产过程的重要资源，常以Cr(VI)作为铬酸;
- 铬法膨胀石墨生产以Cr(VI)为原料，产生含Cr(III)的废酸，可以采用**电化学氧化**的方法，将Cr(III)氧化为Cr(VI)。



1.3 研究意义



1.4 拟解决关键问题



关键问题一

稳定高效催化剂，实现含铬废酸再生。存在催化剂腐蚀溶出现象，导致再生硫酸中出现杂质，影响石墨产品的性能。

关键问题二

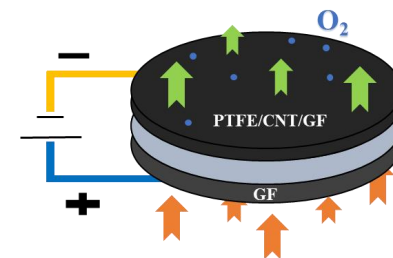
如何提高含铬废酸的再生效能。 **铬氧化**的再生效率较低，能耗较大。

2.2 关键核心技术（特色技术）



透过式电极电化学技术

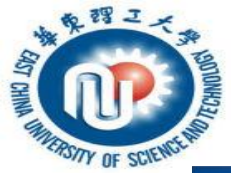
透过式电极是一种具有微小通道的电极，增大了电极与液相的接触面。当Cr(III)穿过电极时，电极可选择性地吸附/氧化。



电化学水处理工程化技术与成套装备

多元催化电化学水处理技术具有零药剂添加、绿色高效、易于自动化等特点。研发的**多元催化电化学水处理成套装备**，具有特别水力学特性，多元催化剂、高效氧化还原作用。





2.3 主要创新点

材料创新

将**透过式电极材料**应用于铬法膨胀石墨行业产生的含铬废酸处理，利用Cr在透过式电极的扩散、分布和氧化还原规律，实现**透过式电极的电氧化法再生含铬废酸的优良效果及较低能耗。**

方法创新

将**机器学习算法/模型辅助预测铬再生及铬回用流程**，建立预测模型并完善其性能，为**铬法膨胀石墨产业提供智能化控制为企业降低成本、提高产能。**

工艺创新

含铬废酸再生，铬氧化剂重配回用。将危害大、难处理的含铬废酸采用电催化氧化技术转化为具有高价值的生产原料，形成**铬法膨胀石墨生产行业的清洁生产、近零排放的新工艺。**

3.3.1 石墨毡基透过式电极的Cr(VI)元素转化机制

Cr元素
转化机制

问题

利用透过式电极电还原酸性废水中Cr(VI)，存在**电极材料制备过程繁琐、成本高、不利于实际工程应用**等问题

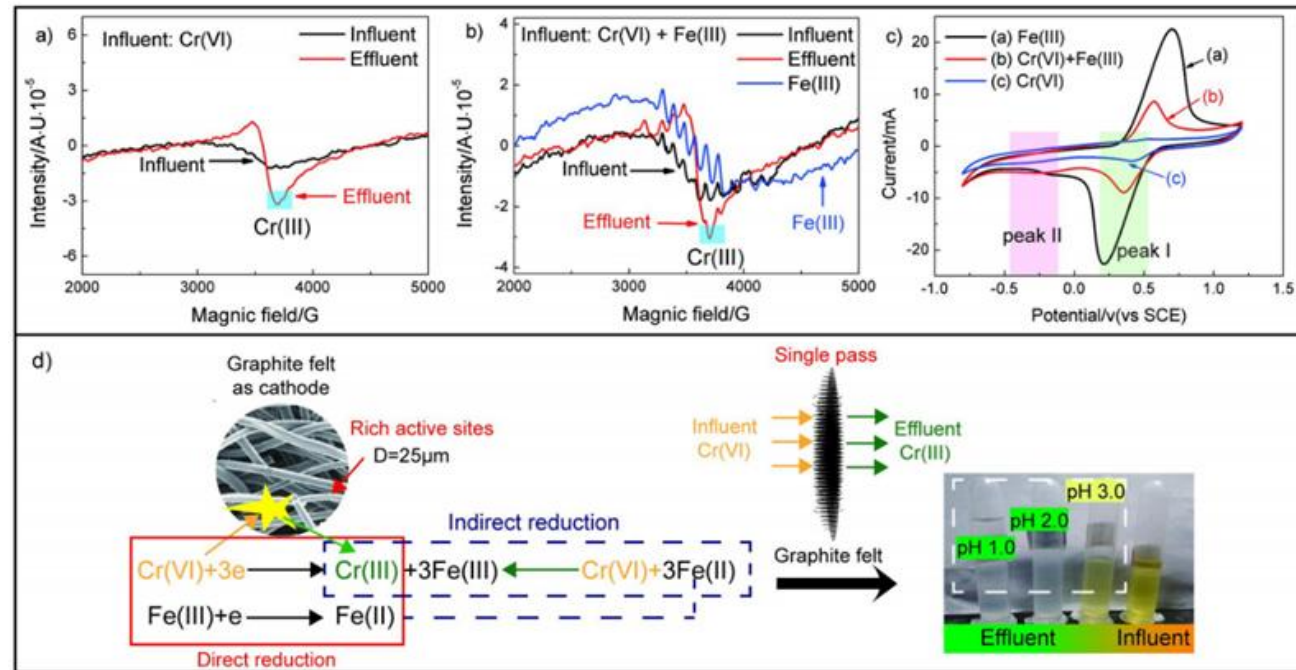
超疏水性
电极改性

电化学智能
调控策略

含铬废酸
电化学再生

电化学技术
与装备

石墨毡基透过式电极



通讯作者, *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125768.

透过式电极**允许水流穿过**的结构设计，增加了 Cr(VI)在电极表面的**对流传质**，使其在酸性条件下电化学效率达95%以上，电流效率是传统板式电化学系统**3-7倍**。

3.3.3 基于神经网络预测模型的电化学智能调控策略研究

Cr元素
转化机制

反向传播神经网络 (BPNN)

目的：提高电化学效率、降低能耗

通讯作者, *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 103122;

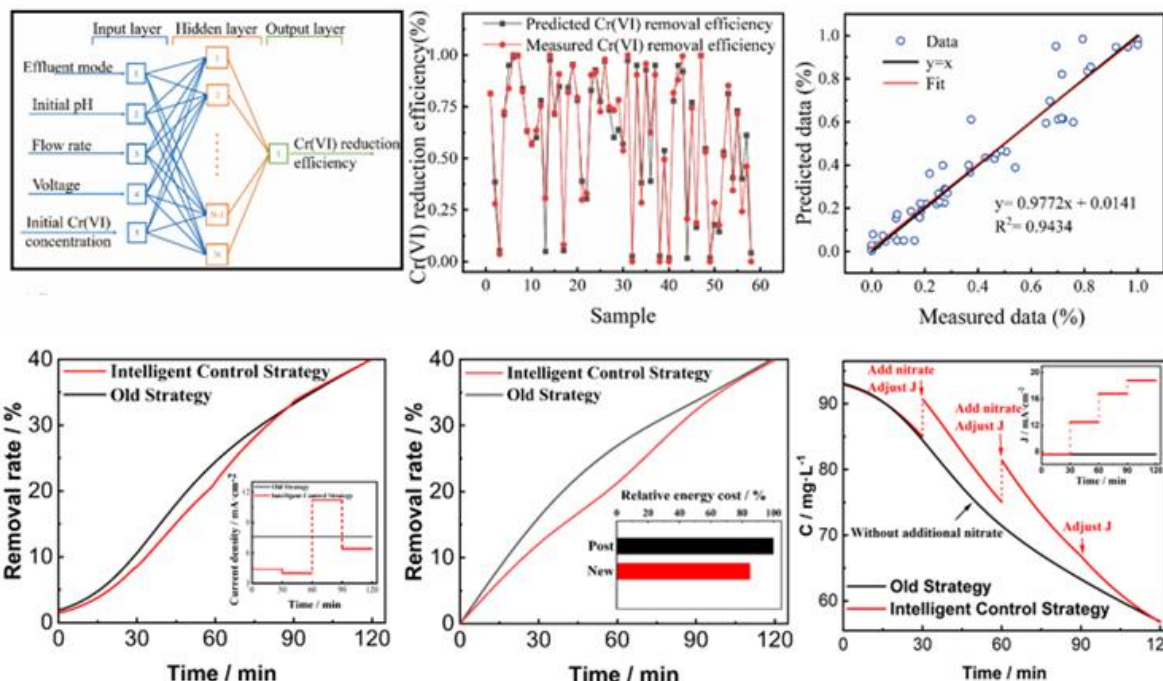
通讯作者, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2023, 17: 98.

超疏水性
电极改性

电化学智能
调控策略

含铬废酸
电化学再生

电化学技术
与装备



基于BPNN模型预测各种电化学反应条件下Cr(VI)电化学转化的演变规律。形成基于神经网络预测模型的**电化学智能调控策略**。与传统人工调控策略相比，智能控制策略将**电化学能耗降低15-50%**。

3.3.4 含铬废酸电化学再生的试验研究

Cr元素
转化机制

超疏水性
电极改性

电化学智能
调控策略

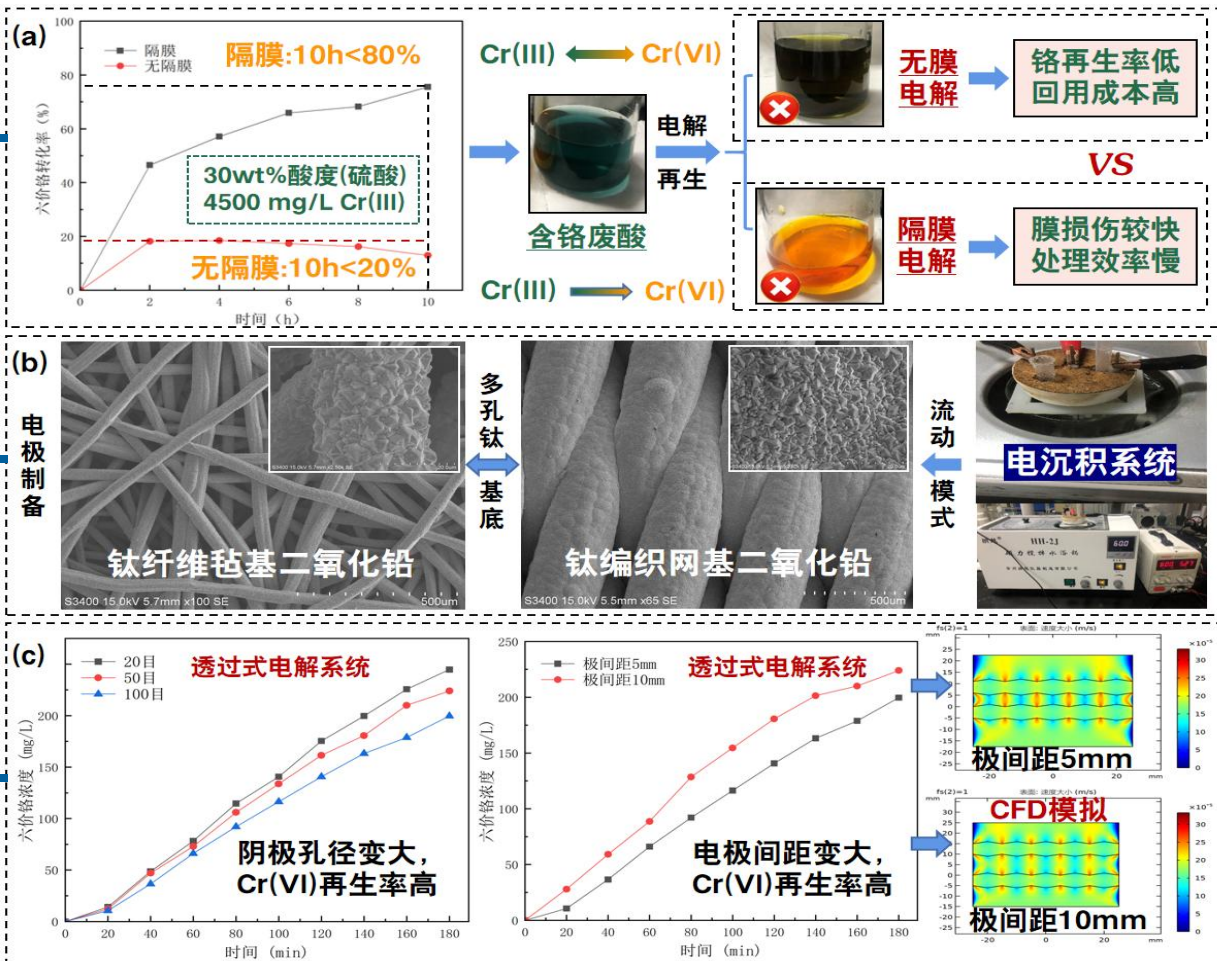
含铬废酸
电化学再生

电化学技术
与装备

有无隔膜

电极制备

电解系统



膨胀石墨生产工艺中产生的含铬废酸 (酸度在30 wt%, Cr(III) 浓度在4500 mg/L), 电化学氧化后Cr(VI)再生率达到80%以上。

汇报提纲

- 一、时代背景与痛点
- 二、新时代背景下水处理
- 三、案例1 智慧型电化学水处理装备
- 四、案例2 污染预防与减量技术
- 五、案例3 无药剂水处理技术及装备
- 六、结论与建议

2.2 环境工程的绿色与低碳



水处理药剂的使用特点与绿色理论

絮凝剂 AlCl_3 使用时，原子利用率是多少？ 25.0%

絮凝剂 FeSO_4 使用时，原子利用率是多少？ 16.7%

杀菌剂 NaClO 使用时，原子利用率是多少？ 66.7%

杀菌剂 O_3 使用时，原子利用率是多少？ 33.3%

调pH值加 H_2SO_4 ，原子利用率是多少？ 28.6%

调pH值加 NaOH ，原子利用率是多少？ 66.7%

水处理药剂能被替代吗？

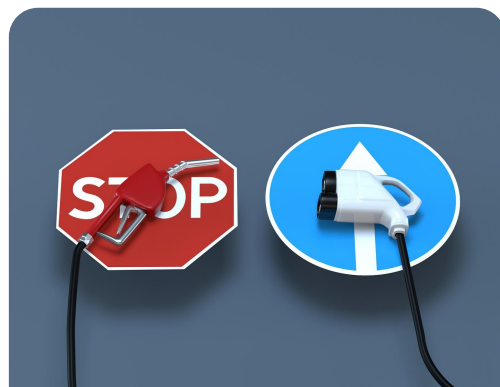
能不使用化学药剂而实现水质净化吗？



燃油汽车

与

新能源汽车



2.2 《无药剂水处理技术》

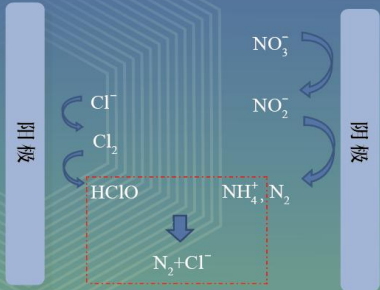
第1章 无药剂水处理系统导论.....	第4章 阻垢剂的无药剂替代技术.....	第6章 酸碱的无药剂替代技术.....	第8章 还原剂的无药剂替代技术.....	第10章 除磷剂的零药剂替代技术.....	第11章 无药剂水处理系统应用展望.....
1.1 水污染及处理工艺的选择.....	4.1 概述.....	6.1 电渗析技术概述.....	8.1 概述.....	10.1 药剂除磷技术.....	11.1 技术持续创新与突破.....
1.1.1 水污染过程.....	4.1.1 阻垢缓蚀剂与分散剂.....	6.1.1 传统电渗析.....	8.1.1 还原剂的定义.....	10.1.1 化学沉淀除磷技术.....	11.2 应用领域不断拓展.....
1.1.2 污水处理工艺的选择.....	4.1.2 阻垢剂的化学成分.....	6.1.2 新型电渗析.....	8.1.2 还原剂的分类.....	10.1.2 吸附除磷技术.....	11.3 环境与经济效益显著提升.....
1.2 水处理药剂及加药系统的现状.....	4.1.3 阻垢机理.....	6.2 双极膜.....	8.1.3 还原剂在水处理中的基本功能.....	10.1.3 高级氧化除磷技术.....	11.4 面临的挑战与应对策略.....
1.2.1 水处理常用的药剂.....	4.1.4 阻垢剂研究现状.....	6.2.1 离子交换原理.....	8.1.4 主要应用场景.....	10.2 无药剂除磷技术.....	附录.....
1.2.2 水处理加药系统的发展.....	4.2 阻垢剂替代技术.....	6.2.2 双极膜材料及制备方法.....	8.2 传统水处理还原剂.....	10.2.1 电化学除磷技术.....	
1.2.3 水处理药剂在生产和使用过程中.....	4.2.1 电化学合金催化法.....	6.2.3 双极膜的结构.....	8.2.1 金属单质.....	10.2.2 生物除磷技术.....	
1.3 水处理药剂替代方式.....	4.2.2 电化学电解吸垢法.....	6.2.4 双极膜的性能.....	8.2.2 非金属单质.....	10.3.3 人工湿地除磷技术.....	
参考文献.....	4.2.3 电磁阻垢处理技术.....	6.2.5 双极膜的应用.....	8.2.3.化合物.....	10.3.4 其他零药剂除磷技术.....	
第2章 絮凝剂的无药剂替代技术.....	4.2.4 超声波阻垢技术.....	6.3 双极膜电渗析制酸碱.....	8.2.4 传统还原剂的问题.....		
2.1 概述.....	4.2.5 静电阻垢.....	6.3.1 双极膜制酸碱的机理.....	8.3 无药剂替代技术.....		
2.1.1 絮凝剂的分类.....	4.2.6 量子阻垢技术.....	6.3.2 低品位废盐转化为高价值酸碱.....	8.3.1 光催化还原技术.....		
2.1.2 絮凝剂发展趋势.....	4.2.7 脉冲阻垢技术.....	6.3.3 经济效益分析.....	8.3.2 电催化还原技术.....		
2.2 絮凝剂的无药剂替代技术.....	4.2.8 新型物理处理技术.....	6.3.4 酸碱的原位利用.....	8.3.3 高级还原体系.....		
2.2.1 传统电絮凝技术.....		6.3.5 影响因素.....	8.4 应用与前景分析.....		
2.2.2 电絮凝集成技术.....		6.3.6 BMED 性能的改进.....	参考文献.....		
2.2.3 电化学原位合成技术.....		6.4 未来应用与展望.....			
2.3 电絮凝与化学絮凝对比.....		参考文献.....			
2.3.1 絮体对比.....					
2.3.2 经济性对比.....					
2.4 电絮凝技术的优势与挑战.....					
2.4.1 电絮凝技术的优势.....					
2.4.2 电絮凝技术面临的瓶颈与挑战.....					
2.5 应用与前景分析.....					
参考文献.....					
第3章 杀菌剂的无药剂替代技术.....	第5章 缓蚀剂的无药剂替代技术.....	第7章 氧化剂的无药剂替代技术.....	第9章 脱水剂的无药剂替代技术.....		
3.1 概述.....	5.1 概述.....	7.1 概述.....	9.1 概述.....		
3.2 杀菌剂.....	5.1.1 定义.....	7.1.1 氧化剂的定义.....	9.1.1 污泥脱水剂的定义.....		
3.2.1 定义.....	5.1.3 缓蚀剂保护的局限性.....		9.1.2 污泥脱水剂主要成分及其作用.....		
	5.2 缓蚀剂的无药剂替代技术.....		9.1.3 污泥脱水剂的基本水处理功能.....		



NON-CHEMICAL
WATER TREATMENT
TECHNOLOGY

无药剂 水处理技术

张乐华 常定明 王崇璞 等 编著



化学工业出版社

前言

水处理药剂是在水处理过程中用于调节 pH 值、絮凝沉淀或气浮、去除硬度、杀菌灭藻、除磷的化学药品，其作用非常广泛。同时，水处理药剂的应用领域也非常宽泛，从市政污水处理、工业废水处理、中水回用到自来水生产过程，从水处理的预处理、二级生化处理到深度处理，绝大多数水处理领域与水处理过程都会用到水处理药剂。

本书在概括各种水处理药剂的基础上介绍了各种水处理药剂的替代技术，可为水处理行业应用无药剂水处理工艺或减少水处理药剂的使用提供技术参考。水处理过程，或者说水质净化过程，主要是指通过一系列工艺去除水中的杂质或污染物，从而使水更加洁净或恢复水的功能。水处理药剂的使用，是指向原水中投加化学药剂的过程。有些情况下，化学药剂会进入污泥、废气等；有些情况下，化学药剂中某些元素仍会留在水中，仅部分进入污泥与废气；还有些情况下，所有化学药剂均进入水中，虽然实现了水处理功能，但增加了水中的化学物质含量。上述各种情况，与水质净化的基本思路，即降低水中杂质浓度，是矛盾的。因此，发展无药剂水处理工艺在水处理过程的绿色化方面具有较大优势。在此背景下，编著者结合多年的科研成果及经验，梳理了领域近年来的发展等，编著了本书，旨在促进无药剂技术在水处理领域中应用的推广，并为行业技术人员和科研人员提供理论指导、技术参考和案例借鉴。

本书共分 11 章。第 1 章为绪论，由常定明与张乐华撰写；第 2 章为絮凝剂的无药剂替代技术，由张静娴撰写；第 3 章为杀菌剂的无药剂替代技术，由王苒与张乐华撰写；第 4 章为阻垢剂的无药剂替代技术，由邱燕楠撰写；第 5 章为缓蚀剂的无药剂替代技术，由谢旺红撰写；第 6 章为酸碱的无药剂替代技术，由熊秋阁与常定明撰写；第 7 章为氧化剂的无药剂替代技术，由师雅琪与张乐华撰写；第 8 章为还原剂的无药剂替代技术，由徐文轩撰写；第 9 章为脱水剂的无药剂替代技术；第 10 章为除磷剂的无药剂替代技术，由肖诗撰写；第 11 章为无药剂水处理技术展望，由张乐华撰写。全书最后由张乐华、常定明与王崇璞统稿并定稿。另外，杨正武、常海荣与燕溪溪等也为本书的撰写提供了不少帮助，在此表示感谢。

限于编著者水平及编著时间，以及水处理药剂领域的快速发展等，书中不足和疏漏之处在所难免，敬请读者提出修改建议。

编著者
2025 年 6 月

内容简介

本书针对水处理的 10 个主要投药流程提出了采用无药剂技术的可能性，从基本原理、发展阶段、国内外应用案例、现存技术瓶颈、未来发展和应用方向等方面对无药剂技术进行了详细介绍，对比了无药剂技术与投加药剂方法在效果、运营和经济等层面上的优缺点，最后对无药剂水处理技术的创新与突破、应用领域拓展和效益提升途径进行了分析和展望。

本书具有较强的针对性和可操作性，旨在促进无药剂技术在水处理领域中的应用推广，可供水处理领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考，也可供高等学校环境科学与工程、市政工程及相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

ISBN 978-7-122-48989-0

责任编辑：刘 婧 刘兴春 文字编辑：李晓畅
责任校对：蔡轶设计：韩 飞

出版发行：化学工业出版社
(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装：787mm×1092mm 1/16 印张 21 1/2 字数 千字
2025 年 12 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888 售后服务：010-64518899
网 址：http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：元 版权所有 违者必究

汇报提纲

- 一、时代背景与痛点
- 二、新时代背景下水处理
- 三、案例1 智慧型电化学水处理装备
- 四、案例2 污染预防与减量技术
- 五、案例3 无药剂水处理技术及装备
- 六、结论与建议

结论与建议

资源化

水中物质再利用

绿色化

化学药剂零添加

智慧化

智慧化环境装备

2026 电化学水处理技术及装备 暨水处理专项交流会

**谢谢！
敬请各位专家批评指正！**

张乐华 教授

华东理工大学/石河子大学

工业废水无害化与资源化国家工程研究中心