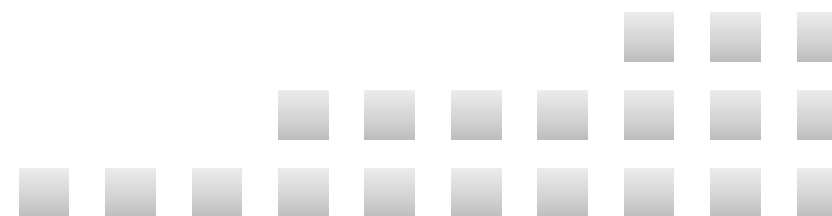


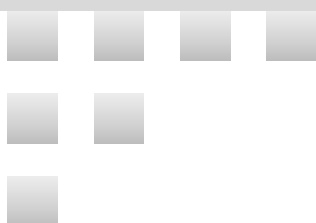


常州通用自来水有限公司
CHANGZHOU CGE WATER CO.,LTD.



城市供水系统全流程水质安全保障技术

——评价方法、控制策略与新技术展望



李伟英

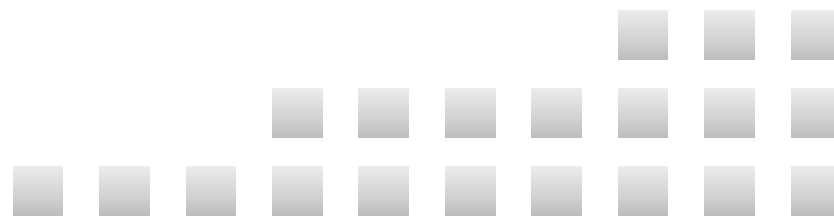
同济大学 环境科学与工程学院

E-mail: liweiyiing@tongji.edu.cn

2023.12.22



常州通用自来水有限公司
CHANGZHOU CGE WATER CO.,LTD.

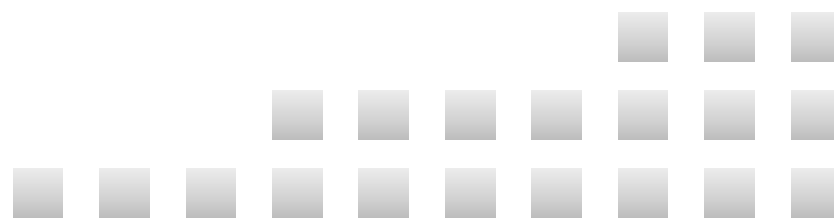


目 录

1. 供水系统水质化学与生物安全现状
2. 基于AI技术的水源污染物质的溯源
3. 供水水质稳定性评价及其案例分析
4. 供水系统管材腐蚀特征与优选研究
5. 供水水质安全保障策略与新技术展望



常州通用自来水有限公司
CHANGZHOU CGE WATER CO.,LTD.



1. 供水系统水质化学与生物安全现状

城市供水系统构成:

- ① 水源
- ② 给水处理厂
- ③ 供水管网
- ④ 建筑给水（二次供水系统）

水源隐患 传统水处理工艺难以去除的污染物质

■ 有机物

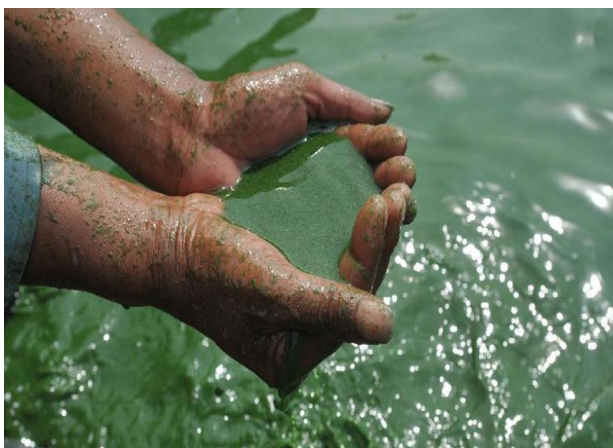
- 天然有机物NOM：腐殖质，耗氧有机物，藻类有机物等；
- 人工合成有机物SOC：农药、洗涤剂、化工原料等“三致”污染物
- 新污染物：MPs、ARB、ARGs、MC、EEDs

■ 无机物

- 酸性、碱性物质及各种无机离子（如重金属、硝酸盐、铵、磷酸盐等）

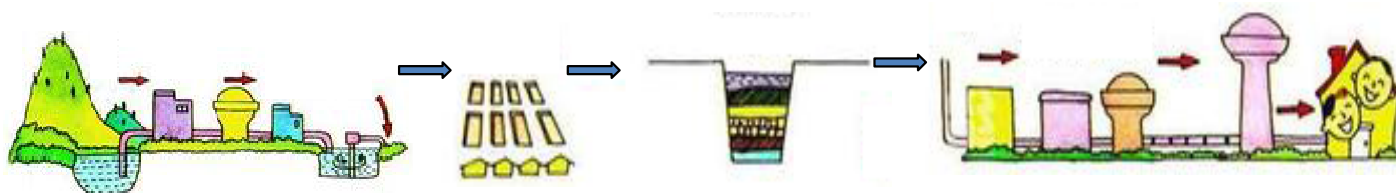
■ 病原微生物

- 致病菌，如分枝杆菌、金黄色葡萄球菌等。



1. 供水系统水质化学与生物安全现状

给水处理厂：存在问题？



功能

混凝沉淀

胶体，悬浮物
色度、有毒有害物
浮游生物和藻类

过滤

悬浮颗粒
部分NOM、微生物
部分重金属离子

消毒

微生物（细菌、
病毒、真菌等）

缺陷

■ 混凝沉淀

- 混凝剂：化学药剂污染、投加量不科学
- 沉淀：运行操作耗能等
- 工艺局限：去除新型痕量有机污染效果差

■ 过滤

- 运行参数不科学
- 滤料选择
- 高能耗

■ 消毒

- 消毒副产物
- 嗅味问题
- 耐氯细菌

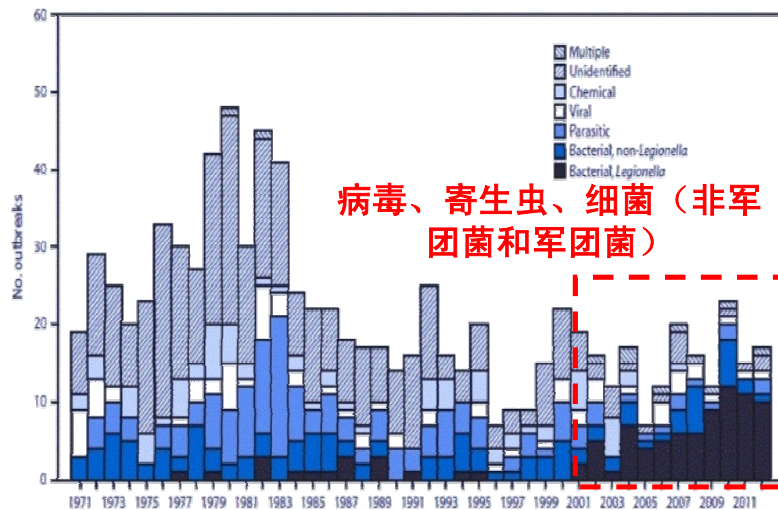
1. 供水系统水质化学/生物安全现状



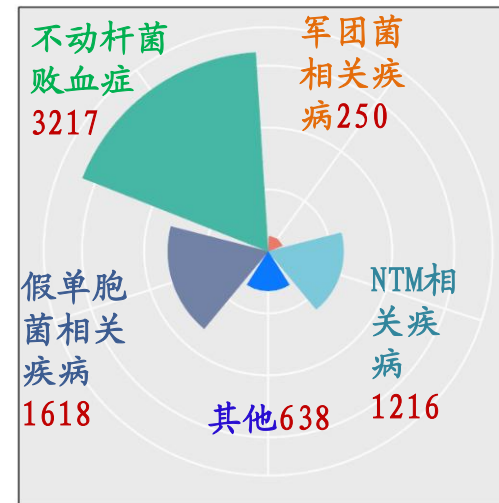
供水管网中的条件致病菌

不动杆菌	军团菌	金黄色葡萄球菌	非结核型分枝杆菌	铜绿假单胞菌	
尿道感染、肺炎、败血症等	军团病、庞蒂亚克热等	皮肤感染、术后伤口感染等	呼吸道、胃肠道和泌尿生殖道疾病	主要定植在受损伤部位	

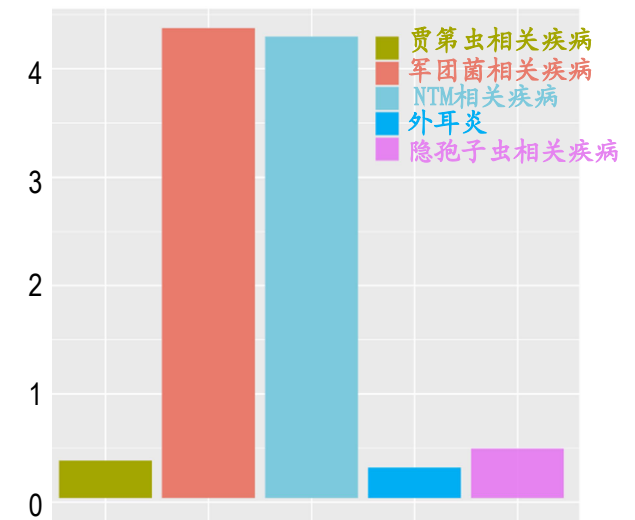
以美国为例，近年来介水疾病由**军团菌**造成的感染比例最大；供水系统中的条件致病菌经消毒工艺后表现出一定的**耐氯性**。



1971年至2012年期间美国与饮用水相关疾病爆发原因统计



2017年美国介水疾病导致的死亡人数（单位：人）

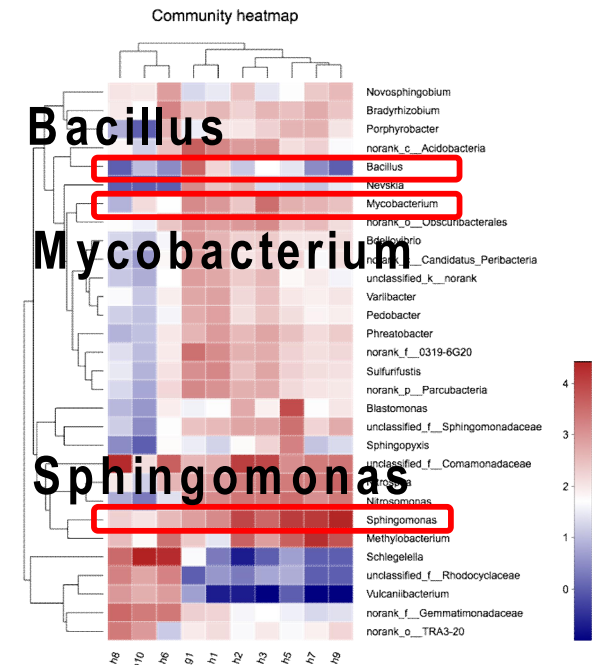
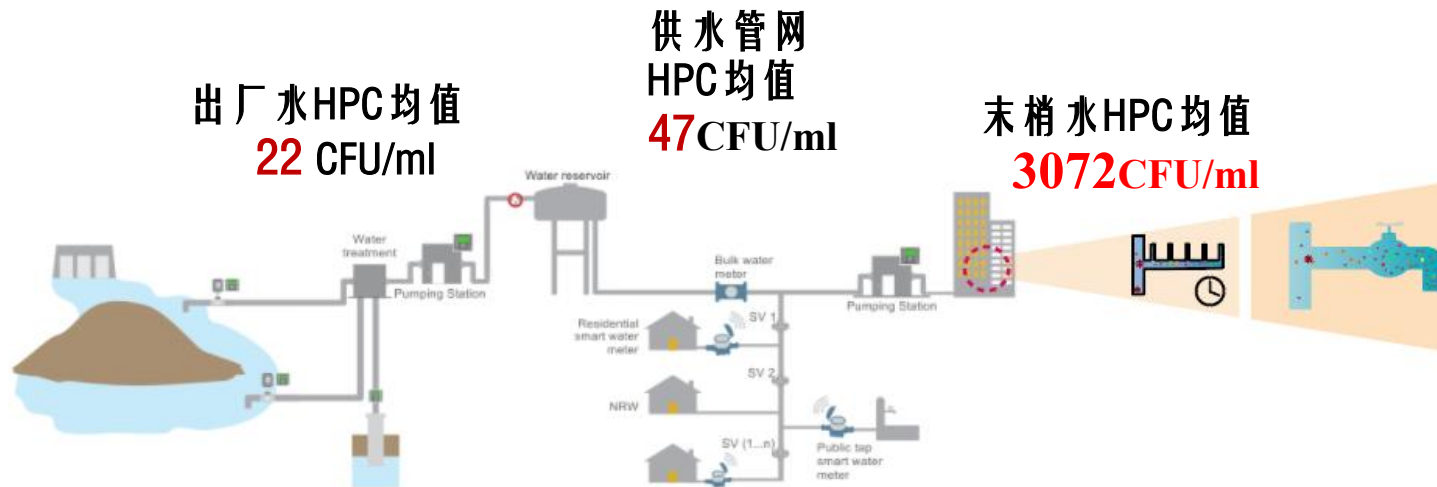


2017年美国介水疾病造成的年医疗费用（单位：亿美元）

1. 供水系统水质化学/生物安全现状



建筑给水系统生物风险



美国某地区从源头到龙头的生物风险变化

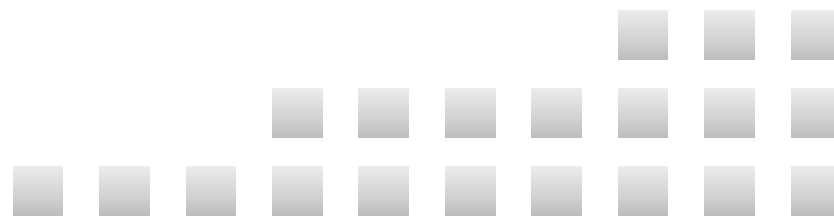
- 水温适宜微生物生长
- 消毒剂余量较低
- 水体间歇性滞留
- 管道面积/体积(surface to volume ratio)大

某建筑供水系统微生物群落结构*

净水厂出水到建筑给水系统末梢水，水质生物稳定与生物安全的风险呈上升趋势，致病菌检出风险高。



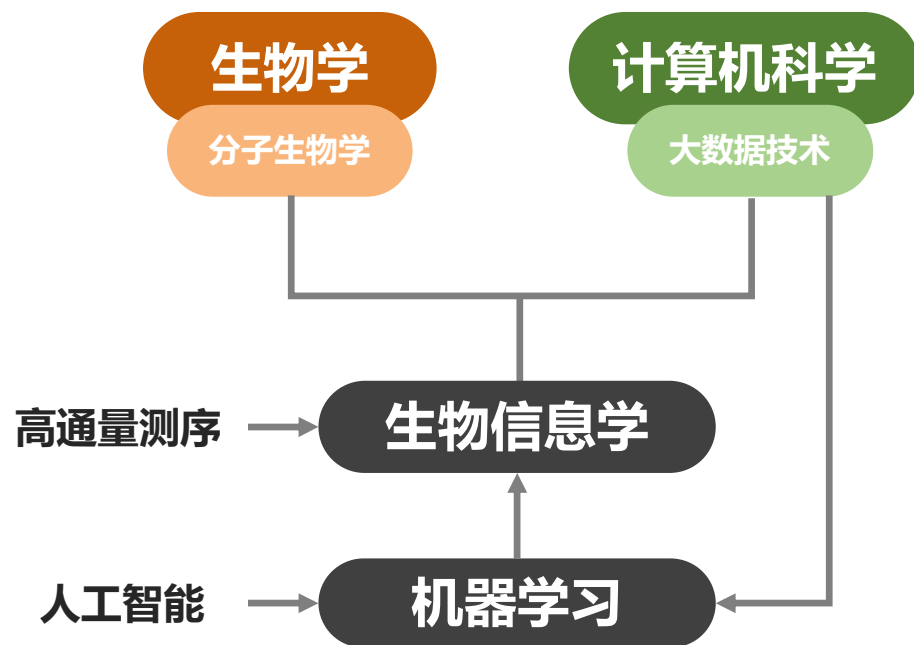
常州通用自来水有限公司
CHANGZHOU CGE WATER CO.,LTD.



2. 基于AI技术的水源污染物质的溯源

2. 基于AI技术的水源污染物质的溯源

机器学习应用于水体污染溯源



- **机器学习**：研究如何模拟或实现人类的学习行为，利用以往数据来改善已有的知识结构形成模型，并对未知样本做出预测分析。

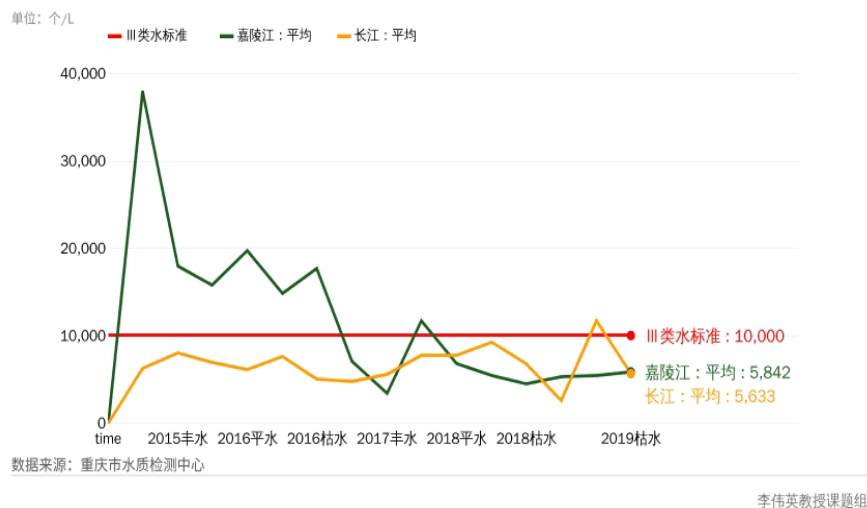
- ① **多学科融合的机器学习算法与水环境微生物组学**，引入高通量测序技术新的应用场景，为今后利用分子生物学、生物信息学进行环境微生物分析提供实践经验。
- ② **建立微生物溯源方法并应用于实际水体**粪便污染的监控与预测，对管理部门进行源头取证、责任追究、法律诉讼以及采取应急处理措施、中长期污染治理等方面均具有重要的现实意义和应用价值。

2. 基于AI技术的水源污染物质的溯源

长江上游水质特征及污染物特性

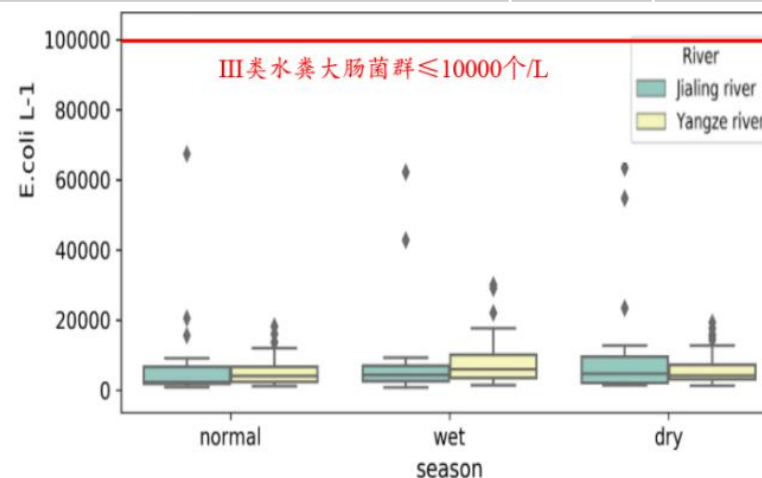
粪大肠菌群监测情况

长江（重庆段）和嘉陵江粪大肠菌群数量变化



粪大肠菌群年度变化图

GB 3838-2002	II类	III类
粪大肠菌群（个/L）≤	2000	10000



粪大肠菌群各水期分布图

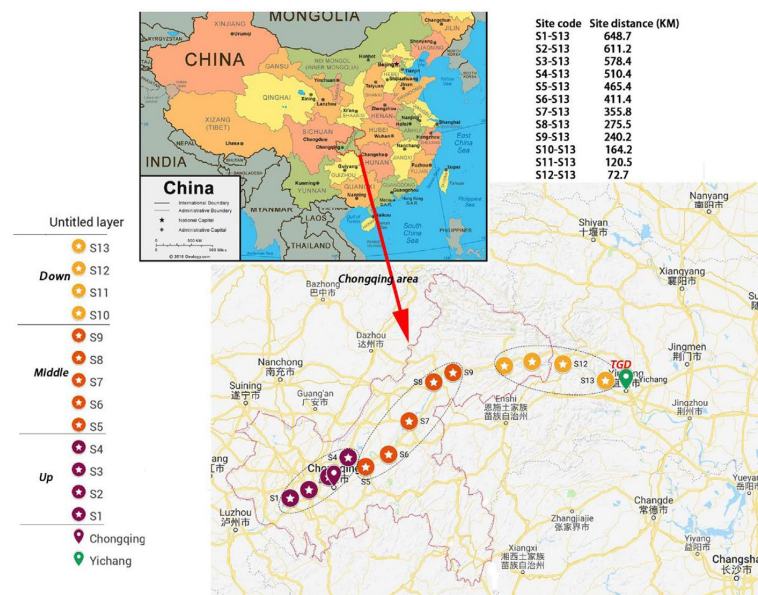
- 嘉陵江粪大肠菌群含量在2015和2016两年数值偏高，满足III类水标准；
- 总体而言，长江相较于嘉陵江粪大肠菌群低，自2018年以来粪大肠菌群指标明显下降。

——表明长江上游水源地保护治理工程取得了良好效果。

2. 基于AI技术的水源污染物质的溯源

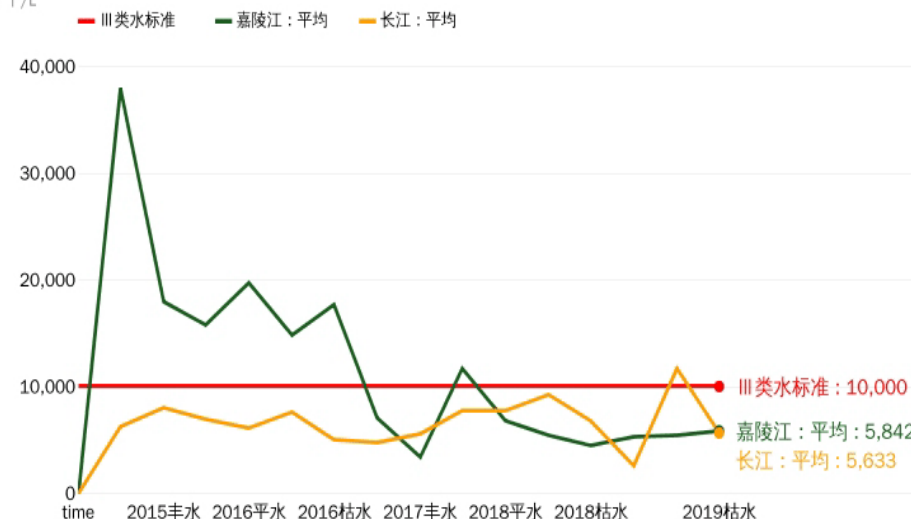
川渝地区跨界河流（长江）水中特征污染物调研与识别

微生物



长江（重庆段）和嘉陵江粪大肠菌群数量变化

单位：个/L



数据来源：重庆市水质检测中心

李伟英教授课题组

取样点分布图

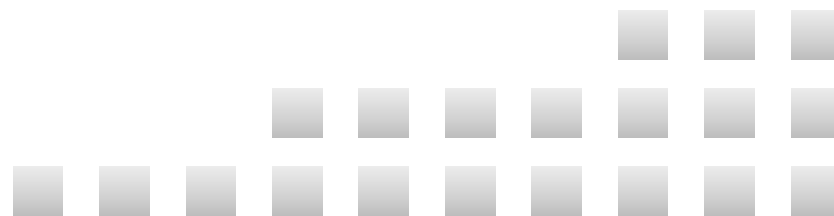
取样点主要物理与化学指标

Parameters	Upstream (S1–S4)	Midstream (S5–S9)	Downstream (S10–S13)
pH	8.21 ± 0.08	8.14 ± 0.13	8.11 ± 0.022*
Temp (°C)	16.4 ± 0.291	17.8 ± 0.846*	17.6 ± 0.33*
DO (mg/L)	8.95 ± 0.366	8.00 ± 0.475*	8.03 ± 0.074*
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.07 ± 0.03	0.03 ± 0.01*	0.021 ± 0.014*
TN (mg/L)	1.74 ± 0.21	1.90 ± 0.26	1.57 ± 0.090*
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	0.038 ± 0.004	0.07 ± 0.03*	0.07 ± 0.04*
TP (mg/L)	0.088 ± 0.026	0.14 ± 0.052*	0.113 ± 0.010*
COD (mg/L)	62.3 ± 31.7	34.4 ± 3.01*	50.0 ± 24.5

Note: * denotes that the values of the parameters in the other two streams were significantly different against that in the upstream ($p < 0.2$).



常州通用自来水有限公司
CHANGZHOU CGE WATER CO.,LTD.



3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析

某市多水源条件下供水管网
水质安全评价与风险控制研究

3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析



供水水质化学安全稳定性评价

水质的化学稳定性：水在管道输送过程中既不结垢又不腐蚀管道的特性。

化学稳定性评价指标：

- 朗格利尔饱和指数 LSI
- 雷诺兹稳定指数 RSI
- 侵蚀指数 AI

基于**碳酸钙溶解平衡**的稳定性指标

- 拉森比率 LR

基于**氯离子等**其他水质参数的稳定性指标

3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析



供水水质化学安全稳定性评价

朗格利尔 (Langelier) 饱和指数LSI从热力学平衡角度出发, 认为在某一水温下, 水中溶解的碳酸钙达到的饱和状态时, 存在一系列的动态平衡

$$LSI = pH - pH_s$$

式中: pH — 水的 pH 实测值
 pH_s — 水在碳酸钙饱和态的 pH 值

判断标准:

- 当 $LSI=0$ 时, 水质稳定;
- 当 $LSI>0$ 时, 碳酸盐处于过饱和, 有结垢的倾向;
- 当 $LSI<0$ 时, 碳酸盐未饱和, 二氧化碳过量, 有腐蚀的倾向。

pH_s计算的一种常用方法是查表法, 按下式计算:

$$pH_s = 9.3 + N_s + N_t - N_h - N_a$$

其中, N_s — 溶解固体常数 N_h — 钙硬度 (以 $CaCO_3$ 计, mg/L) 常数
 N_t — 温度常数 N_a — 总碱度 (以 $CaCO_3$ 计, mg/L) 常数

3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析



供水水质化学安全稳定性评价

A水厂

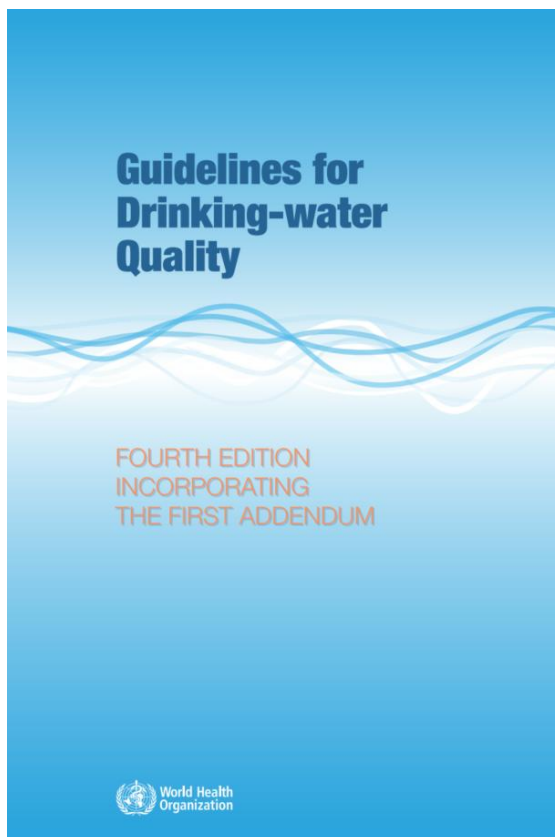
B水厂

- 年份：两水厂出厂水LSI指数基本相同。2013年以来出厂水LSI指数呈现**总体上升趋势**，由均值0.2升至0.4，呈现进一步**结垢倾向**。
- 月份：出厂水**呈现夏季结垢，冬季稳定或轻微腐蚀倾向**。夏季结垢主要集中在**7、8月份**，需要加强监控。

3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析



水质生物稳定性：水中有机营养基质能支持异养细菌生长的潜力，即细菌生长的最大可能性。



Control measures

Water entering the distribution system must be microbially safe and ideally should also be biologically stable. The distribution system itself must provide a secure barrier to contamination as the water is transported to the user. Maintaining a disinfectant residual throughout the distribution system can provide some protection against recontamination and limit microbial growth problems. Chloramination has proved successful in controlling *Naegleria fowleri* in water and sediments in long pipelines and may reduce the regrowth of *Legionella* within buildings.

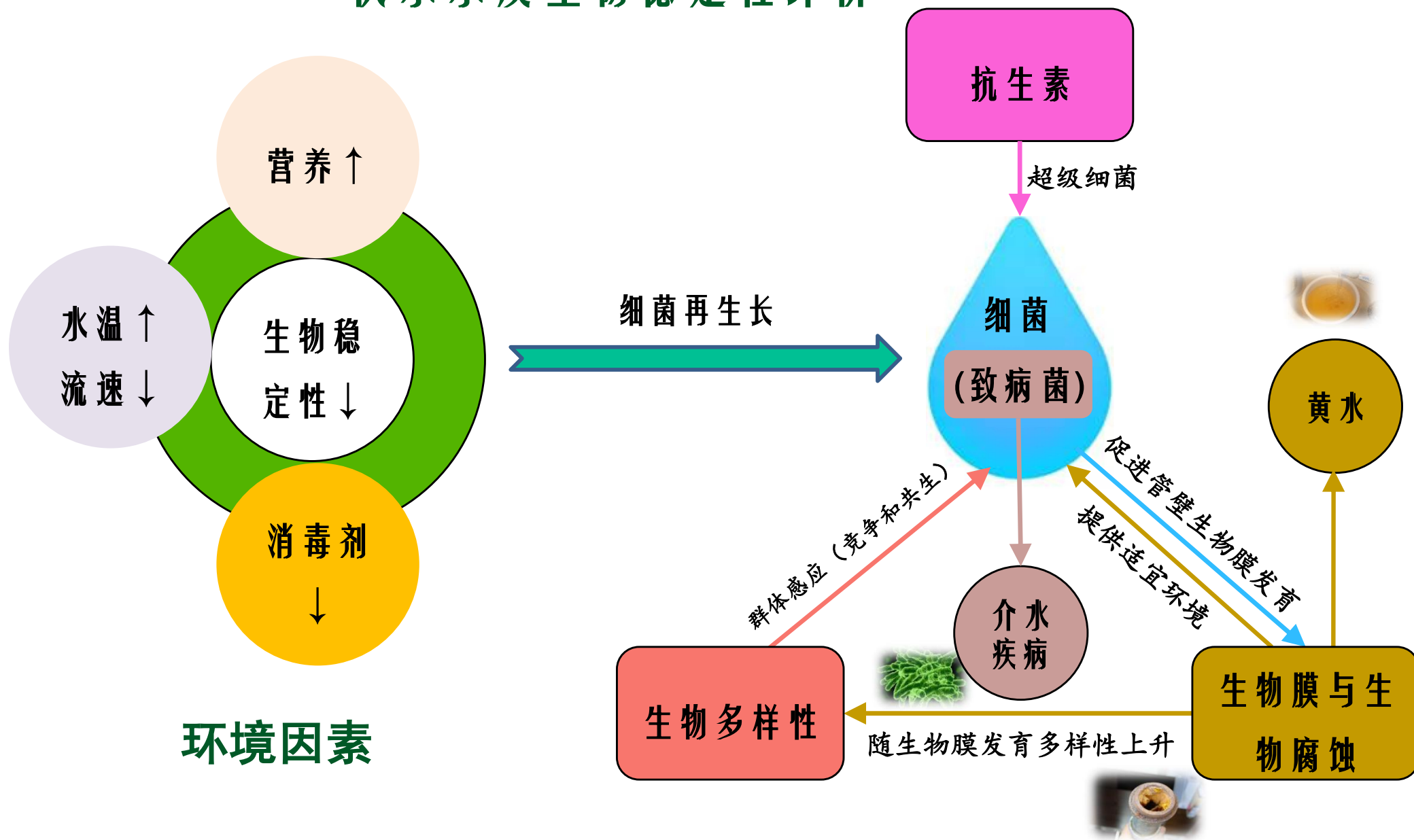
Residual disinfectant will provide partial protection against microbial contamination, but it may also mask the detection of contamination through the use of conventional faecal indicator bacteria such as *E. coli*, particularly by resistant organisms. Where a disinfectant residual is used within a distribution system, measures to minimize DBP production should be taken into consideration.

Water distribution systems should be fully enclosed, and storage reservoirs and tanks should be securely roofed with external drainage to prevent contamination.

3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析



供水水质生物稳定性评价



3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析

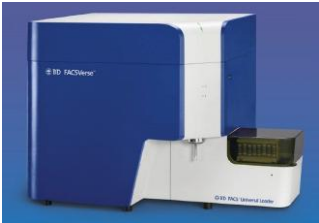


供水水质生物稳定性评价

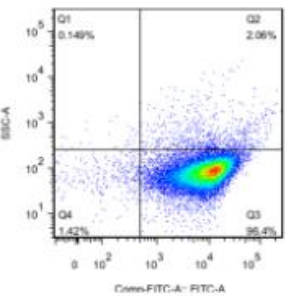
可同化有机碳（Assimilable organic carbon, AOC）为目前国际上使用最为普遍的用于评价生物稳定性的评价指标。AOC是可生物降解有机物中易于被细菌同化成细菌体的部分。生物稳定性评价指标还包括**BDOC**、**MAP**、**BRP**等。

生物稳定性评价方法

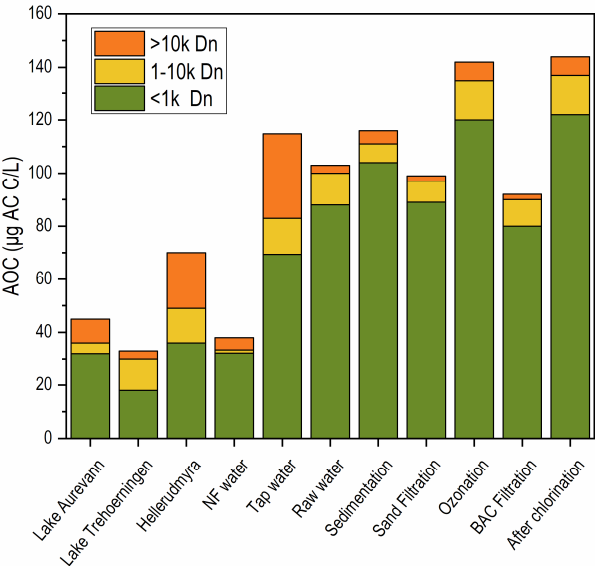
评价指标	接种物	测定方法	优点	缺点
AOC	P17和NOX菌	接种法	科学，应用范围广	操作复杂，需特殊菌种
BDOC	土著细菌	静态或动态培养法	科学	灵敏性较AOC差，操作复杂，检测周期长
MAP	P17菌	接种法	操作方便	精度低，应用范围窄
TP	无需接种	孔雀绿—磷钼杂多酸分光光度法	无需接种	灵敏性较差
BRP	土著细菌	接种法	操作简单	数据可对比性差



流式细胞仪



P17流式细胞仪检测图



AOC在不同水样中存在水平

3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析



供水水质生物稳定性评价

时间	学者	研究结论
1980s	van der Kooij (荷)	首次提出AOC概念与检测方法； $AOC < 100 \mu g/L$ ，细菌几乎不生长；AOC在 $10-20 \mu g/L$ （不加氯），确保水质安全（生物稳定）。
1996	Lechevallier (美)	氯消毒管网系统， $AOC < 100 \mu g/L$ ， <i>E. coli</i> 明显减少， $AOC < 54 \mu g/L$ ， <i>E. coli</i> 生长完全被抑制；
1999	Sathasivan (日)	首次提出BRP概念与检测方法；
2000	刘文君 吴红伟	改进AOC的检测方法，提出了我国管网水生物稳定近/远期AOC指标分别为： $200 \mu g/L$ 、 $100 \mu g/L$ ；
2003	桑军强	总磷(TP)控制在 $5 \mu g/L$ 内，提高饮用水生物稳定性；
2006	Hammes (瑞士)	基于流式细胞术开发了新的AOC检测方法；
2010		管网AOC低于 $32 \mu g/L$ ，水质生物稳定；
2016	李伟英 张骏鹏	优化了流式检测方法；南方某管网水中AOC低于 $135 \mu g/L$ 时，HPC与AOC呈显著正相关，HPC的生长速率较低。

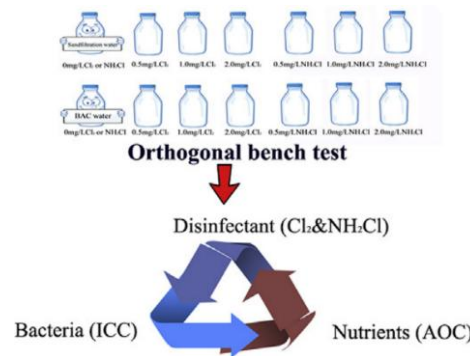
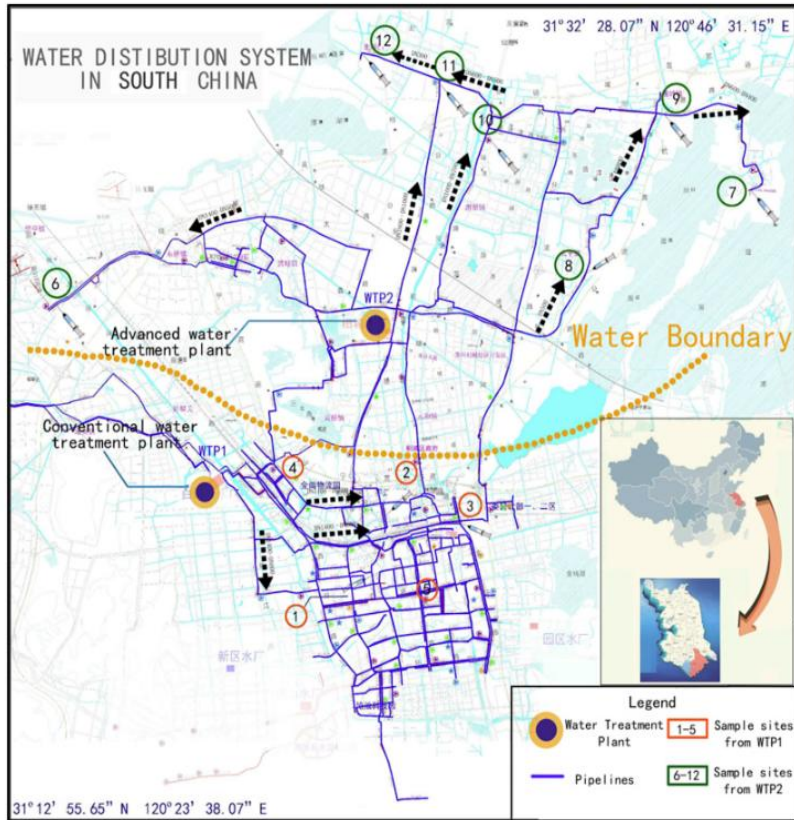
van der Kooij, J. Am. Water Works Assoc., 1982; Lechevallier, J. Am. Water Works Assoc., 1996; Sathasivan, WR, 1999; *刘文君, 环境科学. 2000; 桑军强, 水科学进展, 2003; Hammes,WR, 2006; Hammes,WR, 2010; *Li Weiying et al., Chemosphere 2016;

3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析

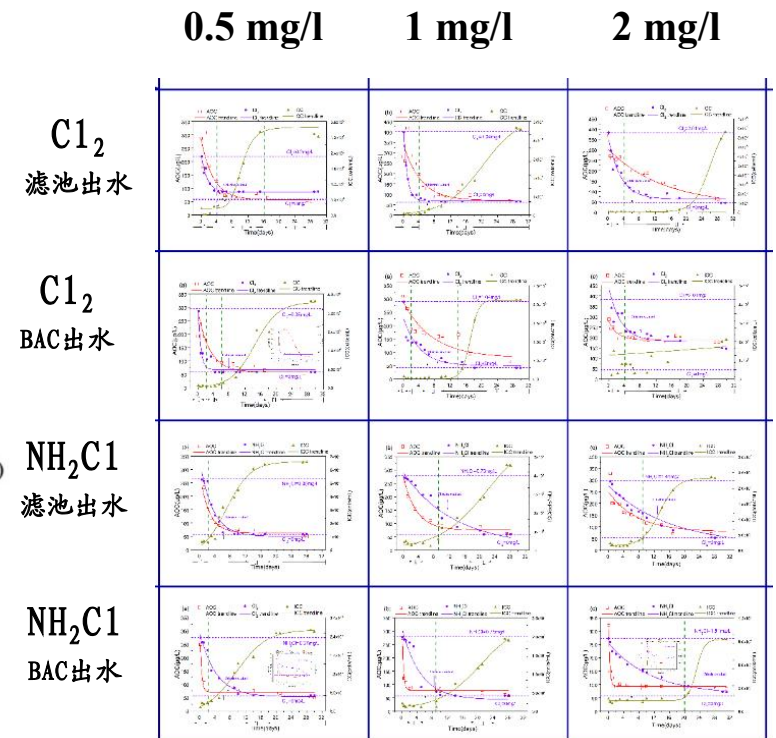


供水水质生物稳定性评价

通过实验室正交试验与实际供水系统的实践验证，研究供水系统水质生物稳定性评价方法与评价标准。



南方某地区实际给水系统生物稳定性研究



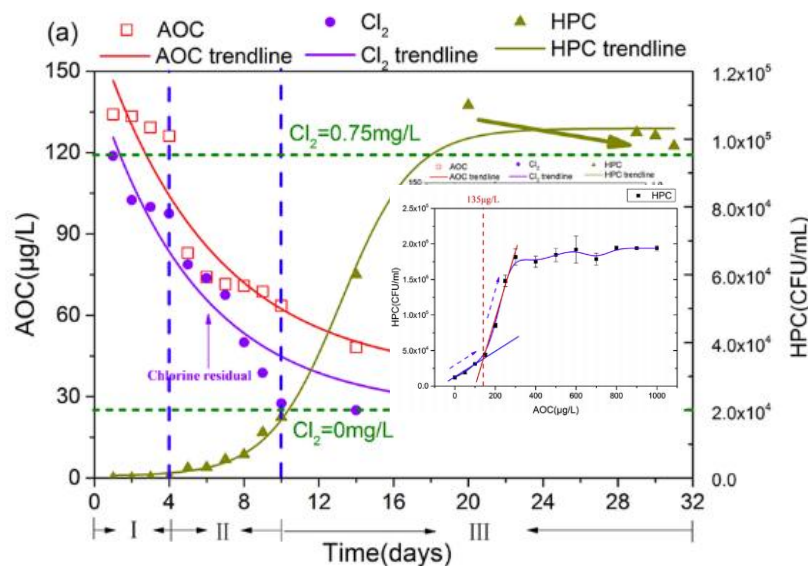
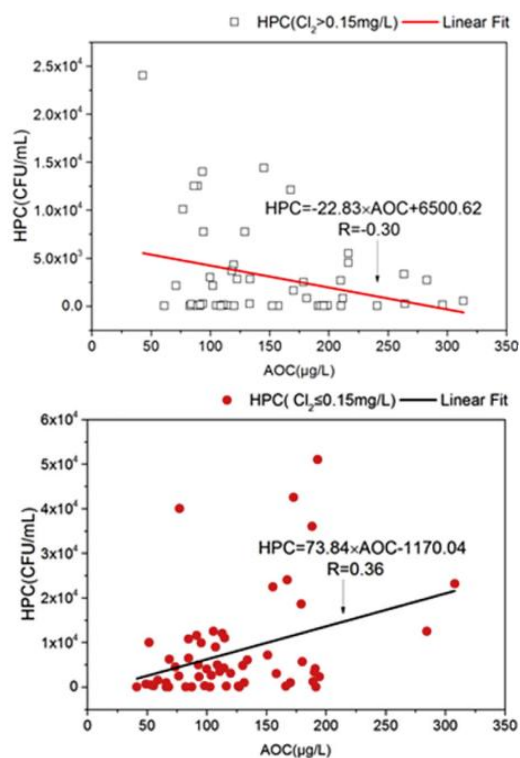
每月采集样品，对常规水质指标、生物稳定性指标、余氯、颗粒数、细菌细胞数等进行长期监测与分析研究。

3. 供水水质安全稳定性评价与案例分析

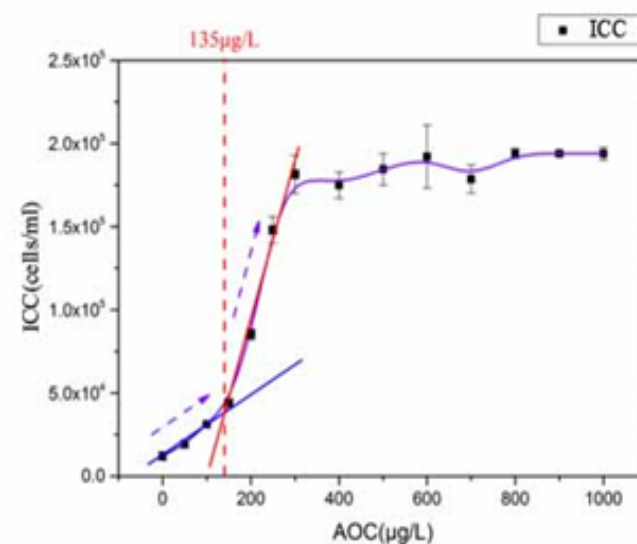


水质生物稳定性的评价标准（以南方某地区为例）：

- ① 氯残留量([Cl])>0.15 mg/L：氯有效抑制细菌生长，水质生物稳定；
- ② [Cl]>0.15 mg/L, AOC>135 $\mu\text{g/L}$ ：水质生物稳定；
- ③ [Cl]<0.15 mg/L, AOC>135 $\mu\text{g/L}$ ：水质存在安全隐患；
- ④ AOC<135 $\mu\text{g/L}$ ：ICC受到限制，从动力学上解释HPC生长受到抑制的现象。



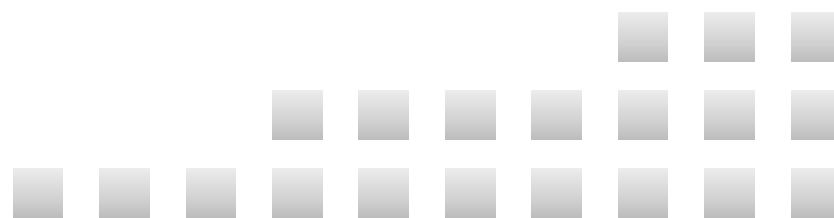
AOC与HPC的变化关系



AOC与ICC的变化关系



常州通用自来水有限公司
CHANGZHOU CGE WATER CO.,LTD.



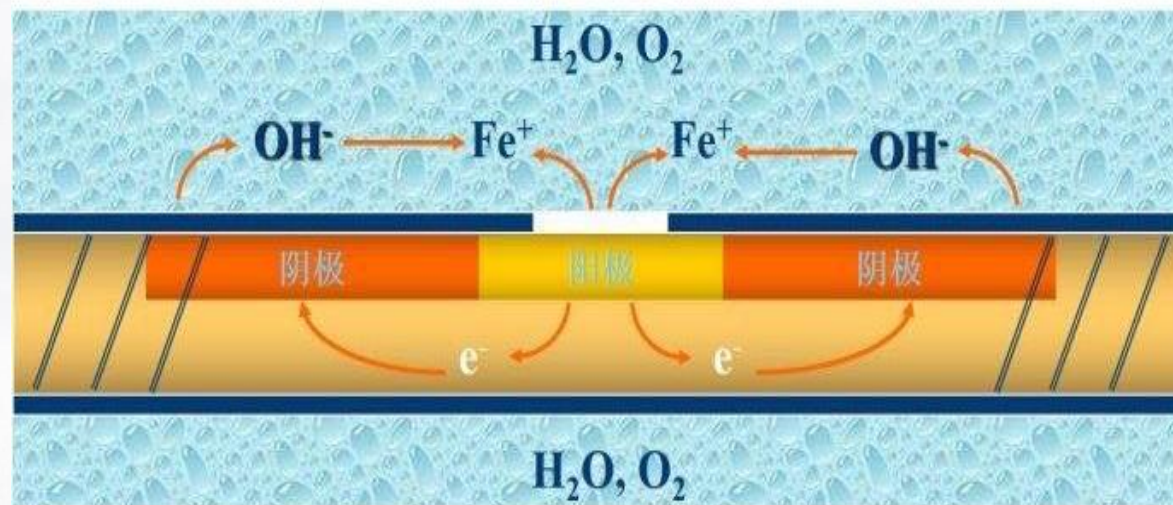
4. 供水系统管材腐蚀特征与优选研究

4. 供水系统管材腐蚀特征与优选研究



电化学腐蚀特征

- ◆ 由金属和电解质组成两个电极，组成腐蚀原电池；
- ◆ 金属表面上存在着在空间或时间上分开的阳极区和阴极区，阳极发生氧化反应，阴极发生还原反应；
- ◆ 腐蚀反应过程中电子的传递可通过金属从阳极区流向阴极区，其结果必有电流产生。



供水管道电化学腐蚀的危害:

- 加速管道腐蚀

输水水头损失增加，产销率降低，资源浪费。

- 出水水质指标恶化

腐蚀产物释放进入水体，引发“黄水”问题。

- 细菌生长

管壁腐蚀层阻碍消毒作用，促进微生物生长。

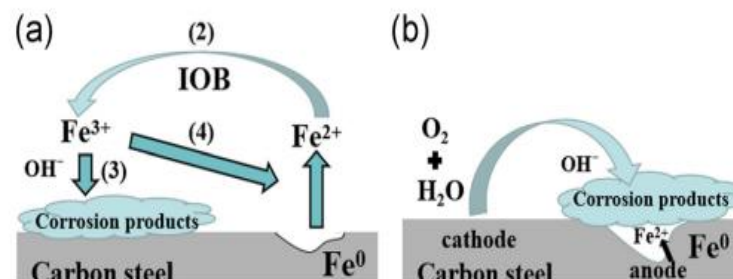
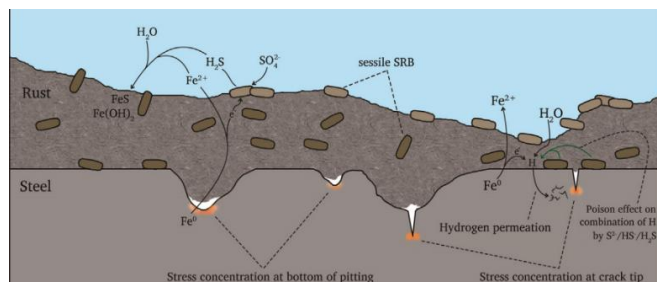


4. 供水系统管材腐蚀特征与优选研究



微生物腐蚀—参与腐蚀的主要微生物

细菌是参与金属腐蚀的主要微生物，与金属腐蚀有关的细菌中，比较重要的是参与硫循环的**硫氧化菌**、**硫酸盐还原菌 (SRB)**，参与铁循环的**铁氧化菌 (IOB)**，参与氮循环的**硝化细菌 (NRB)**。



- 另外，一些藻类（如**硅藻**）可通过光合作用增加水中溶解氧的浓度，**改变水的pH值**，可使**电化学腐蚀过程加速**。
- **霉菌属腐生性或寄生性营养**，产生大量的**有机酸**，能附着生长在多种基体上、破坏裸露的或涂漆的金属表面，为金属的**局部腐蚀创造条件**。

微生物腐蚀的危害

◆加速金属腐蚀速率

微生物的生命活动促进金属的电化学腐蚀过程，在金属和建筑材料腐蚀破坏中占比达20%；

◆引发水质“二次污染”

在管线腐蚀中微生物腐蚀占据50%~80%，腐蚀产物释放，造成“二次污染”。

◆经济损失

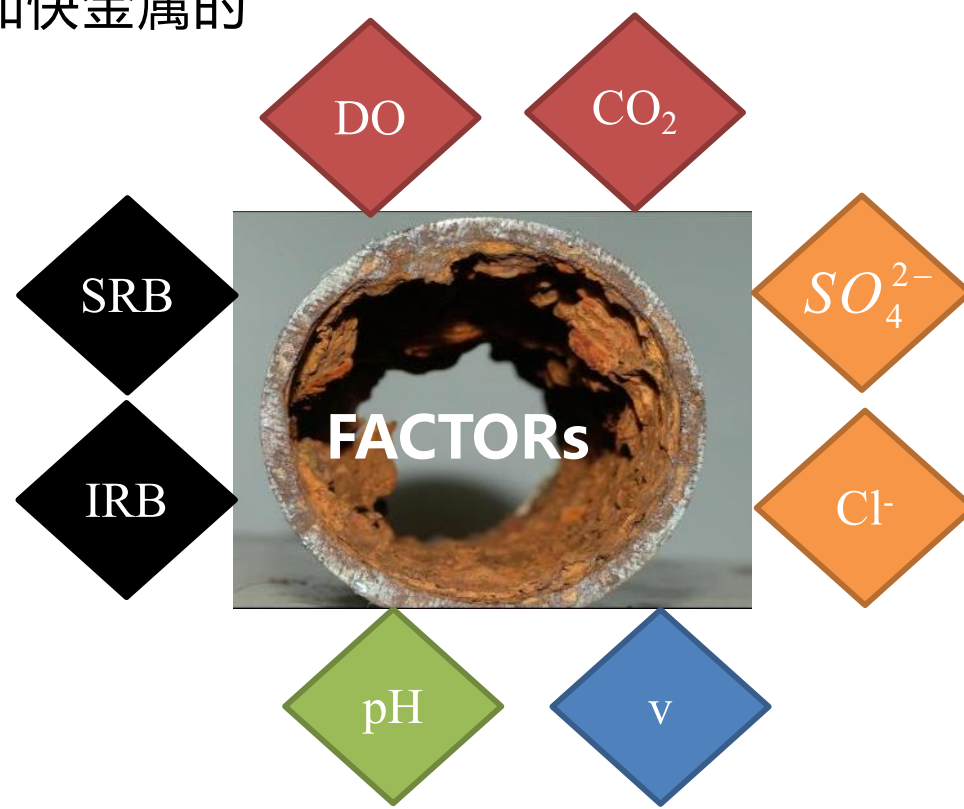
微生物腐蚀造成的损失约占金属腐蚀损失的10%，造成的损失每年约 300~500 亿美元。

4. 供水系统管材腐蚀特征与优选研究



供水管网生物腐蚀影响因素

- **水质参数：**溶解氧 DO 、 CO_2 、硫酸盐 SO_4^{2-} 、 pH 值等；
- **生物腐蚀功能菌：**铁细菌（IRB）、硫酸盐还原菌（SRB）等；
- **水力条件：**水流速度 v 、管材、管壁粗糙度等
其中水流速度与氧气到金属表面的速度成正比，
同时水流冲刷金属表面的腐蚀产物，加快金属的
腐蚀速率；
- **消毒剂：**自来水中的 Cl^- 会破坏钝化膜，并且作为腐蚀的催化剂，诱导 Fe^{2+} 水解，进而腐蚀管道。



4. 供水系统管材腐蚀特征与优选研究



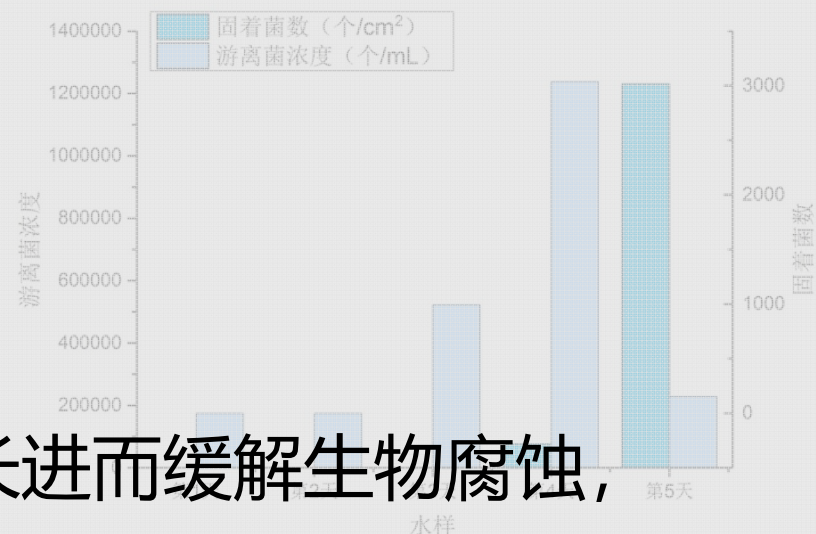
安装后效果图

4. 供水系统管材腐蚀特征与优选研究

消毒剂对生物腐蚀影响

0.75mg/L氯对IOB的灭活情况

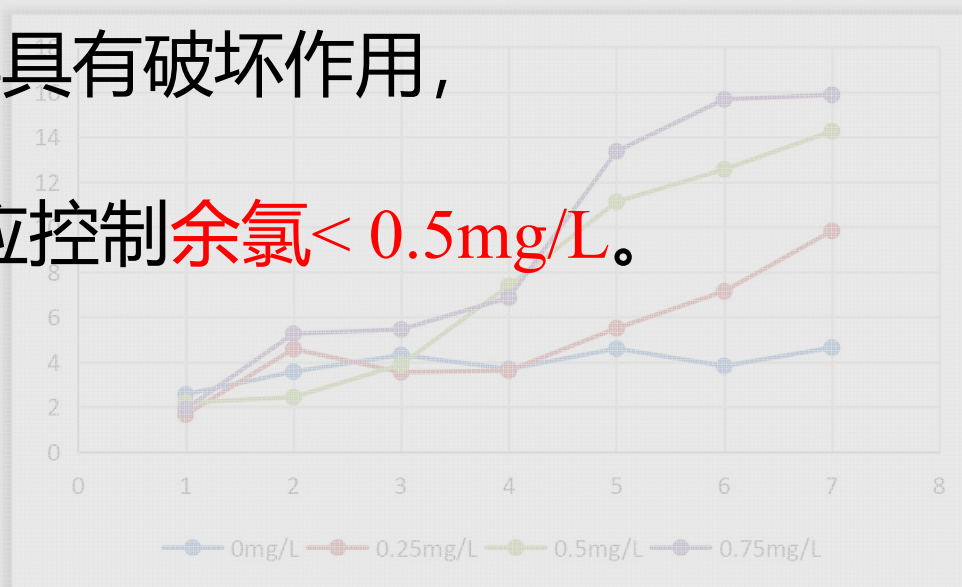
时间(min)	0	1	5	10	30	60	100
细菌去除率(%)	-	82.00	91.80	91.80	92.00	94.40	95.60
余氯浓度(mg/L)	0.75	0.63	0.52	0.46	0.35	0.26	0.22



余氯可以控制管道中IOB的生长进而缓解生物腐蚀，

但本身对管道同样具有破坏作用，

因此从腐蚀角度考虑，应控制余氯 $< 0.5\text{mg/L}$ 。

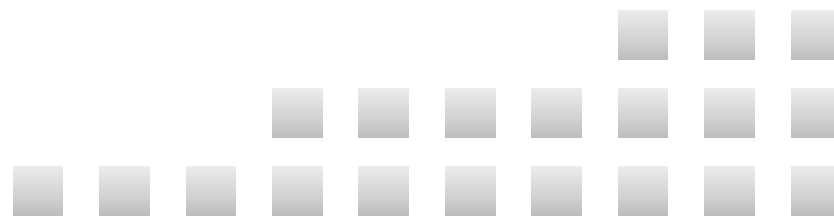


0.75mg/L氯浓度下不同粒径颗粒物的增加

不同氯浓度下7日水中铁离子浓度变化



常州通用自来水有限公司
CHANGZHOU CGE WATER CO.,LTD.



5. 供水水质安全保障策略与新技术展望

(1) 水源水质的改善与水质生物安全风险的研究

选择不同地表水体，研究不同水源水质与生物安全的相关特性。



实际管网生物膜取样点分布

取样点	供水长度 (km) - 距离 DWTP1	供水长度 (km) - 距离 DWTP2	平均流速 (m/s)
A	--	5.2	0.48
B	2.4	8.6	0.34
C	2.15	8.35	0.3

水源水质的改善可有效降低供水系统水质的化学和生物安全风险

DNA提取

低温
预冷
震荡
离心

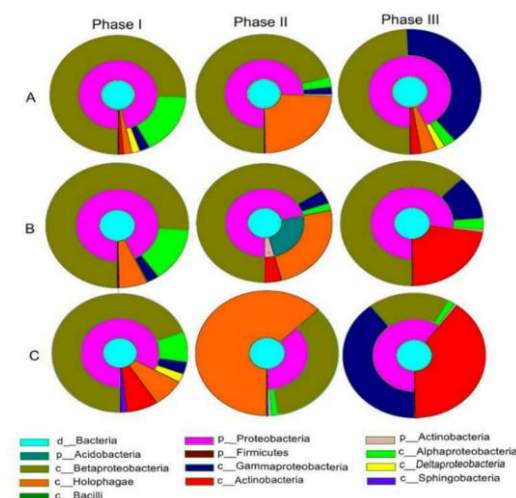
试剂盒
提取

生物膜样



取样过程及样品处理

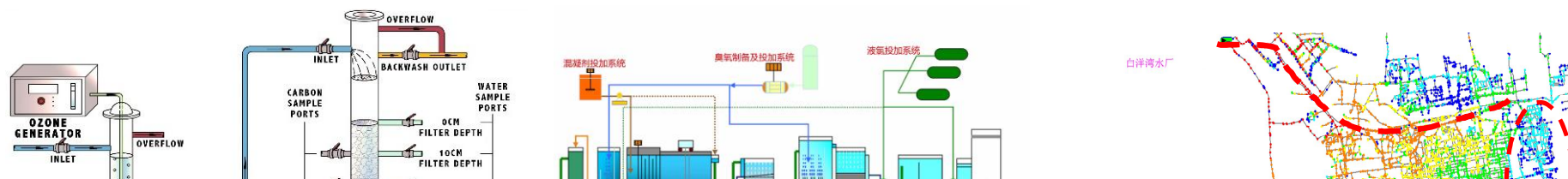
内圈——界
中圈——门
外圈——纲



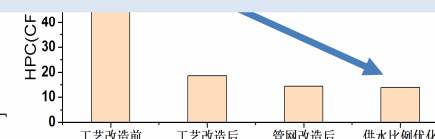
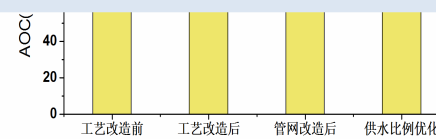
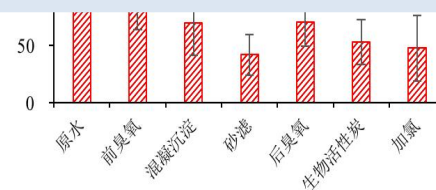
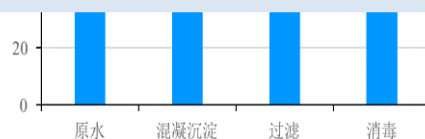
不同阶段各管网点生物膜群落组成

(2) O_3 /BAC深度水处理工艺研究

通过小试、中试以及示范工程，研究深度处理工艺对AOC的去除水平。

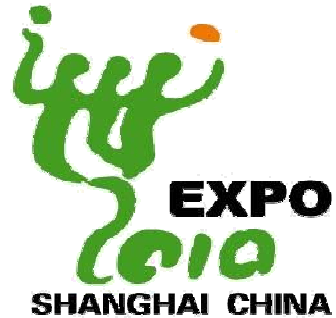


深度处理工艺改造后，出厂水的AOC平均值由改造前的97 $\mu\text{g/L}$ 降低至47 $\mu\text{g/L}$ ；经管网改造后，AOC存在水平进一步降低了3.87 %。



中试实验AOC去除水平

示范工程AOC与HPC变化水平



科技部-上海市科委世博科技专项

世博园区直饮水安全保障及优化布局研究

(07DZ5804-05)



给水管网二次污染

- 我国45个城市水质调研函件表明出厂水经给水管网及二次给水设施输送后，其水质总合格率平均下降到83.4%。其中浑浊度增加0.38 NTU，色度增加0.45CU，铁离子增加0.04mg/L，锰离子增加0.02mg/L，管网末端余氯下降到0.015mg/L；微生物常规指标细菌总数增加近4倍，而大肠杆菌增加0.4个/L。
- 供水出现色度和浑浊度升高、管道腐蚀与过水断面缩小、输水能力降低等现象，水质达不到国家饮用水标准。

水质下降



健康风险隐患



[1] 陈明吉. 城市给水管网水质二次污染与防治对策. 净水技术, 2008, Vol.27(5): 5-9

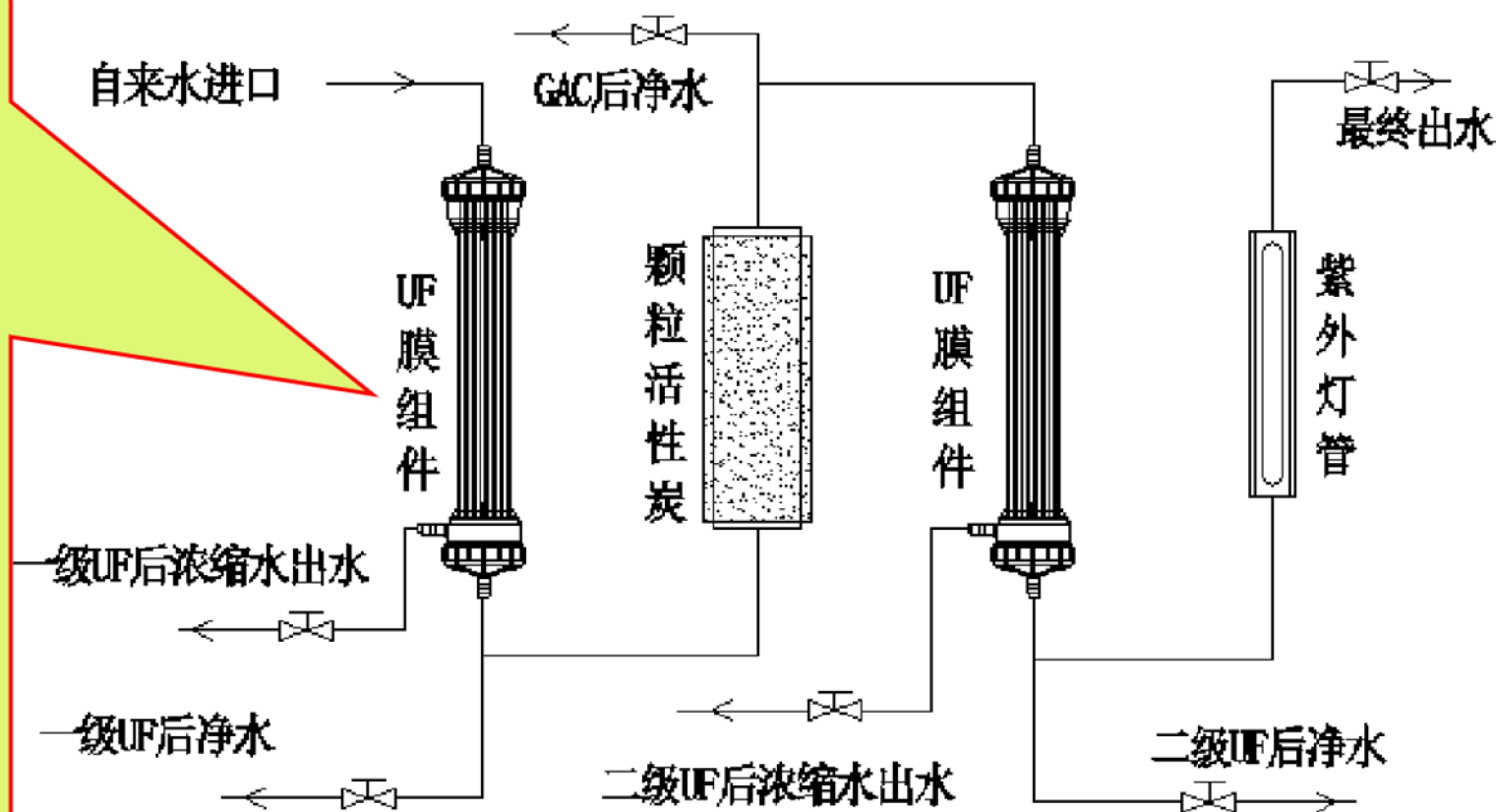
[2] 姜登岭, 倪国藏, 薄国柱等. 给水管网枝状末端的水质变化规律研究. 中国给水排水, 2009, Vol.25(23): 55-56,60

[3] 曲久辉. 饮用水安全保障技术原理. 北京: 科学出版社, 2007

(3) 膜过滤深度水处理工艺研究

世博园区直接饮用水技术

本研究试验在同济大学实验楼进行，实验选用的原水（自来水）与世博园区水有较大差异。为模拟其真实水力、水质情况，本研究设置了两道UF处理工艺。世博园区内仅设置一道UF。



5. 供水水质安全保障策略与新技术展望

(3) 膜过滤深度水处理工艺研究

世博园区直接饮用水技术



5. 供水水质安全保障策



实验室实验装置



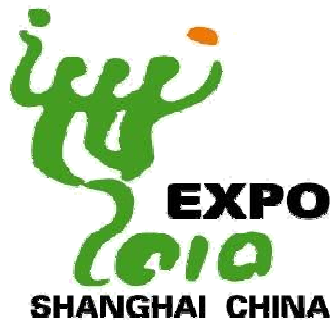
第二代直饮水装置



(3) 膜过滤深度水处理工艺研究

超滤膜、颗粒活性炭和紫外消毒组合工艺各个处理单元优势互补，对浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 和细菌总数的平均去除率分别达到了89.8%、90.7%、96.2%和94.5%，使自来水水质得到良好的净化，出水水质优于国家《饮用净水水质标准》（CJ94-2005），可应用于深度净化水工艺，为人们**实时**提供**安全可靠**的直接饮用水。

世博园区直接饮用水项目



《福布斯》将世博直饮水技术列为
“上海世博会十大科技”排名第**2**项目

世博园区直饮水技术应用总结（I）

经历高温、高人流、高水质标准要求等检验，
运行安全平稳。

科研成果及其全流程设备、材料均为中国
自主研发。

世博园区设直饮水点113个，饮水龙头1716个。
供水量15.1432 万吨，实现了低碳减排节能技术落

68.5%游客认为世博直饮水供给是最满意的举措，
是目前世界最大规模的公共直饮水项目。

(3) 膜过滤深度水处理工艺研究

世博园区直接饮用水技术

世博园区直饮水技术应用总结（2）

- ◆ 直接饮用水技术研究成果在世博园区得到成功实施，得益于国家科技部门立项支撑、高校提供理论技术支持、企业进行产业化生产、第三方客观评价与检验。
- ◆ 其管理模式、研究思路及产业化进程对于我国的饮用净水技术等相关**政产学研用**具有较高参考价值。

(3) 膜过滤深度水处理工艺研究

雄安新区管理委员会

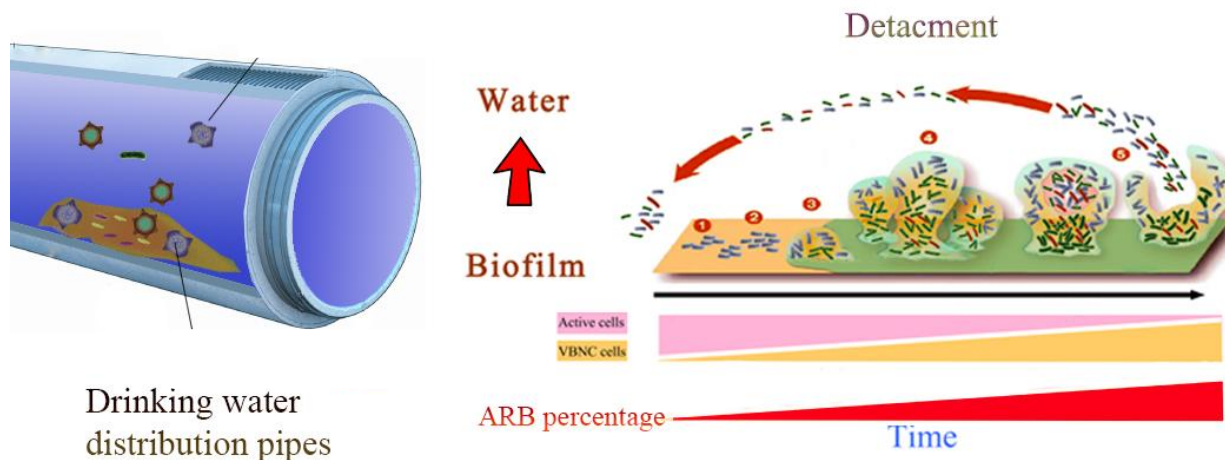
雄安新区管理委员会规划建设局

邵庄子饮用水安全保障技术

(3) 膜过滤深度水处理工艺研究

邵庄子饮用水安全保障技术

- **水源**：地下380米处的深层地下水，**水质理化指标优良**；
- 现三口水井抽水，**未经任何处理**，直接加压供全村居民使用；
- 村民反映**水龙头出水**中含沙概率较高；
- 水中泥沙在管道里积聚，**堵塞管道**，致使管道输水能力降低；
- 水中的细菌等**微生物**未经处理，**直接进入水体**，造成水质安全隐患；
- 供水管网中细菌、泥沙等，易形成管壁生物膜（**生物富集**），存在**较高的微生物安全风险**。

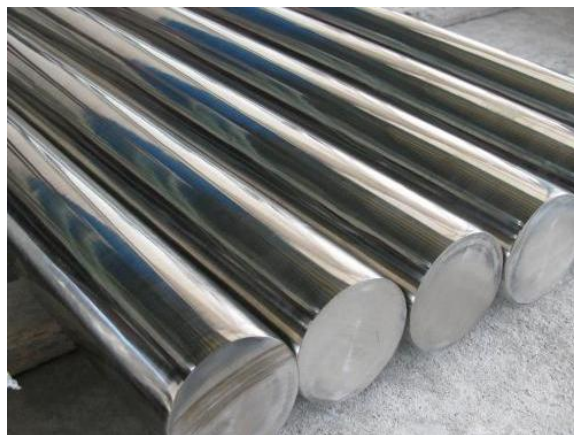


金属膜过滤工艺-膜材料绿色环保

邵庄子饮用水安全保障技术



使用过程中产生
废料、边角料



利用钢厂不锈钢、铁镍合金等边角料制备，**提高资源利用率。**



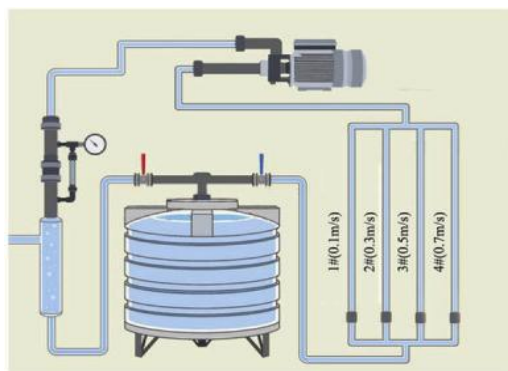
**金属膜便于回收
利用，绿色环保**



邵庄子饮用水安全保障技术



(4) 供水管网管材对生物风险的控制研究



小试实验

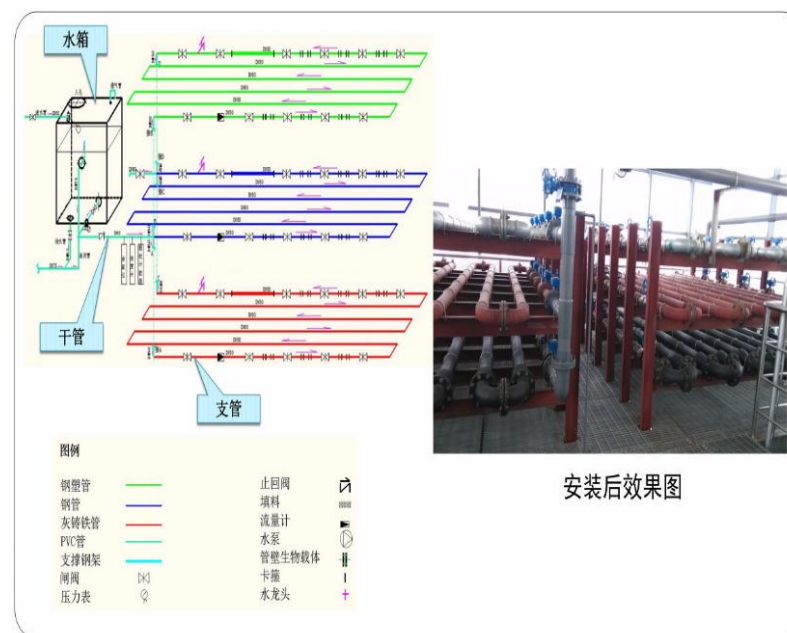
进水：实验室自来水、不同水源水

管材：铸铁，铜，不锈钢，HDPE，PVC

流速：0.1, 0.3, 0.5, 0.7 m/s;

起始余氯浓度：0, 2, 3, 4 mg/L(氯/氯胺消毒)

实验周期：8周

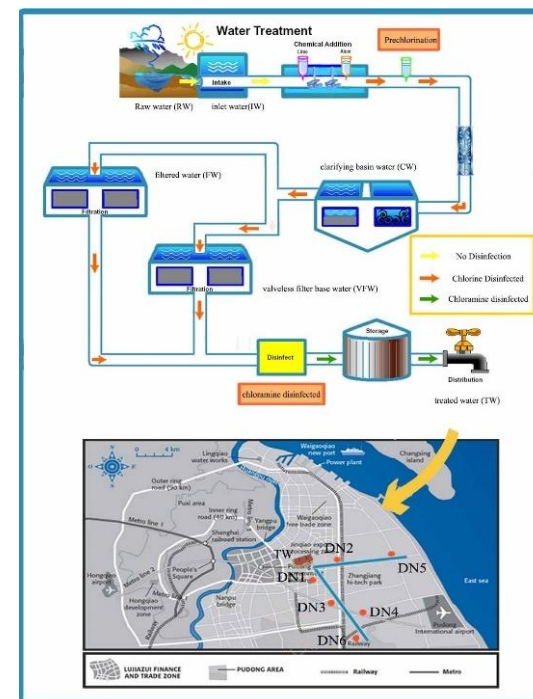


安装后效果图

中试实验



管材材质



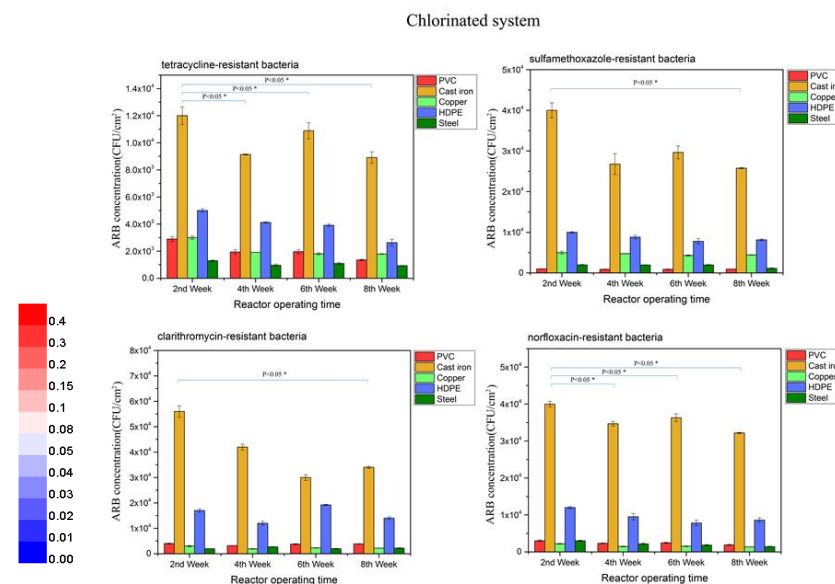
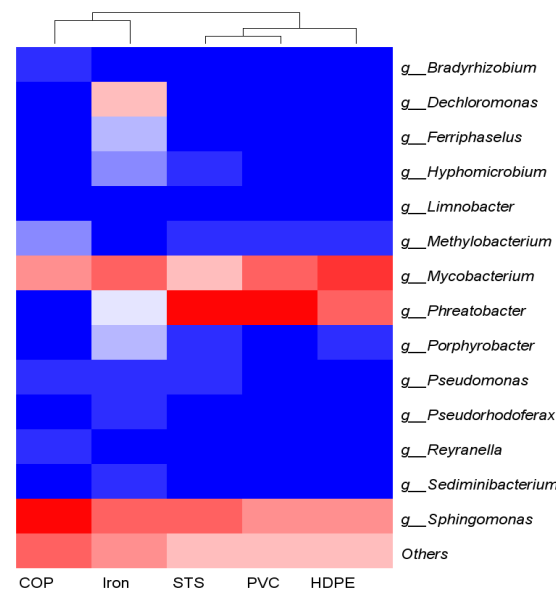
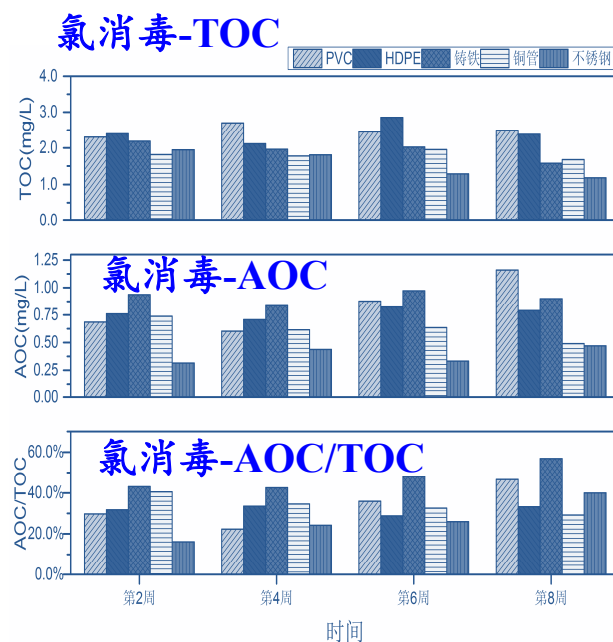
示范工程



(4) 供水管网管材对生物风险的控制研究

浸泡试验:

- 出水有机物含量: 塑料管>金属管>不锈钢管;
- 优势菌属: 具有耐氯特性的菌属、引起生物腐蚀菌属;
- ARB浓度: 铸铁>HDPE>铜>不锈钢>PVC

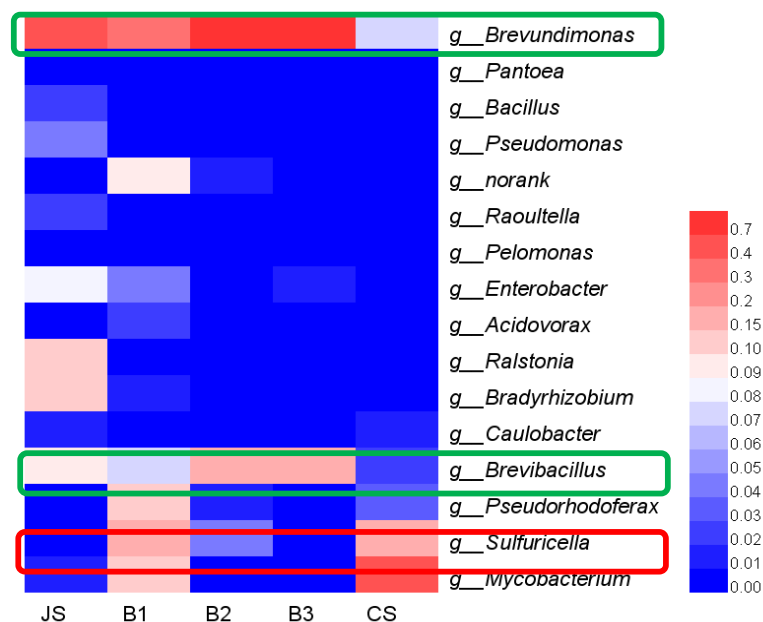


不同管材表面生物膜有机物、微生物群落、ARB存在水平变化

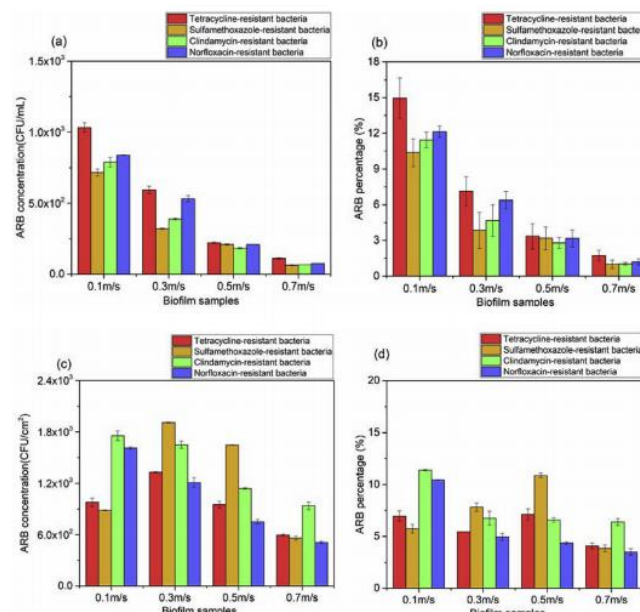
(5) 供水管网水力条件对生物风险的控制研究

增大供水管网水流流速可降低生物膜中耐氯细菌与ARB累积相对含量。

保障供水管网科学运行：管网水流流速具有一个优化取值区间。



氯消毒过程中优势菌群

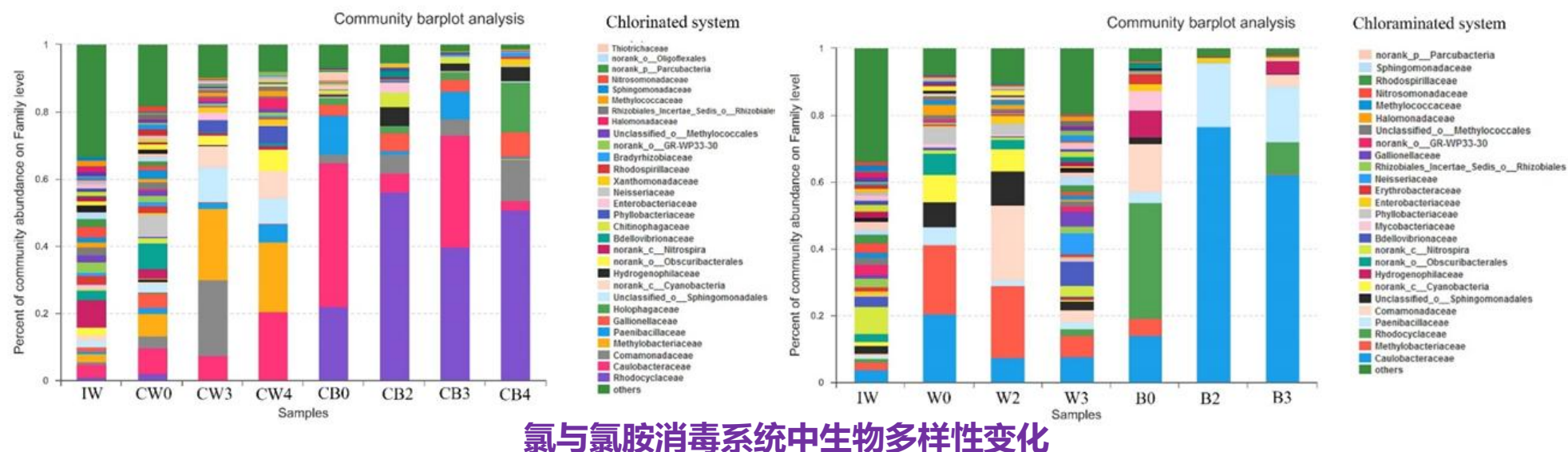


生物膜中ARB存在水平

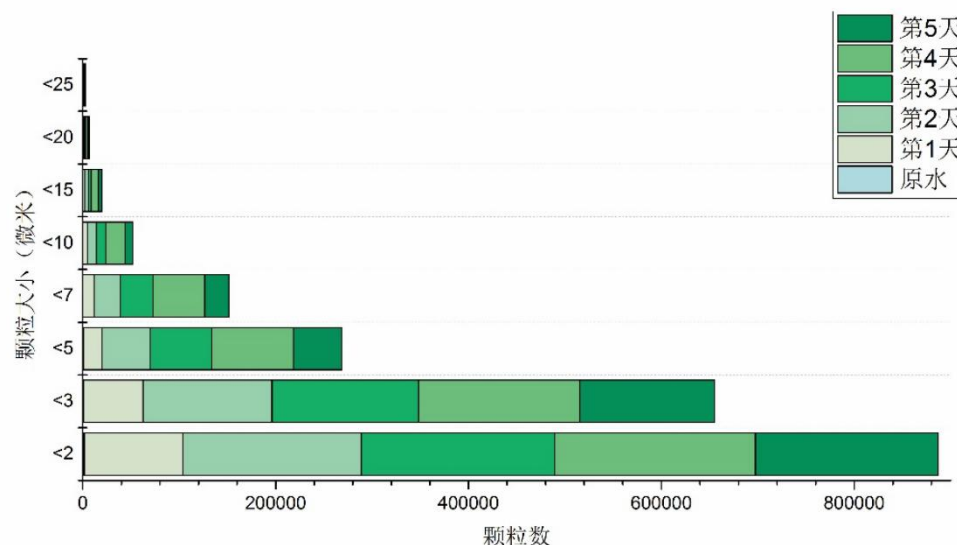


- 经济流速；
- 流速过大，致使生物膜脱落。

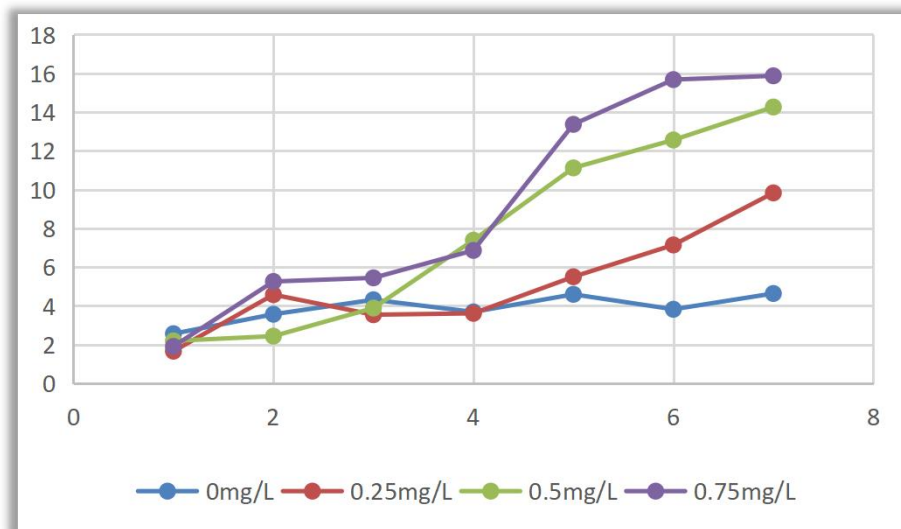
(6) 供水管网水质条件对生物风险的控制研究



氯与氯胺消毒系统中生物多样性变化



0.75mg/L 氯浓度下不同粒径颗粒物的增加

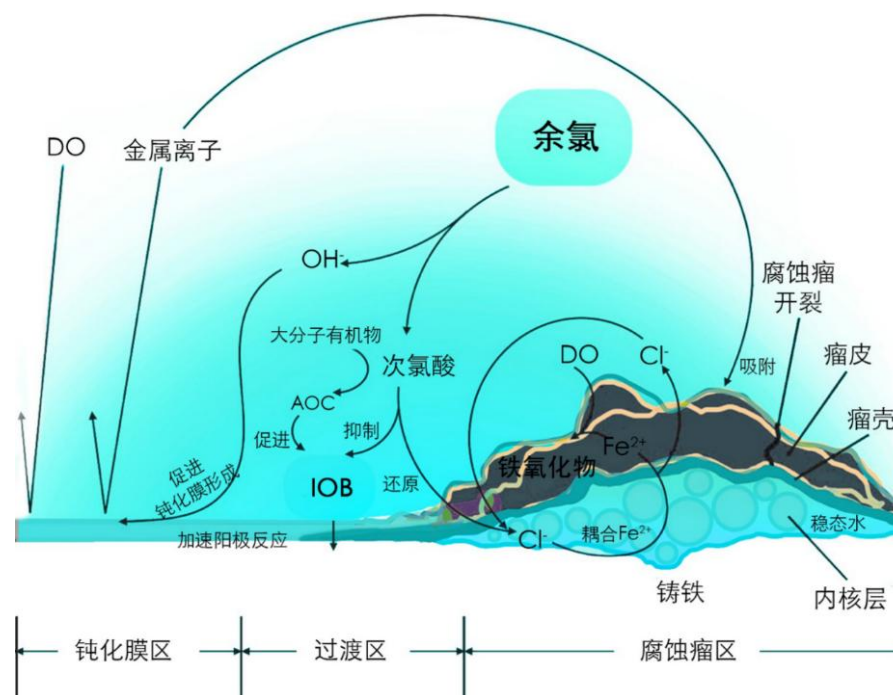


不同氯浓度下7日水中铁离子浓度变化

(6) 供水管网水质条件对生物风险的控制研究

1. 消毒剂可有效控制生物风险；
2. 余氯可控制管道中铁氧化菌（IOB）的生长进而缓解生物腐蚀，但其本身对管道同样具有破坏作用。

消毒剂的浓度应进行优化选择：结合生物安全、防腐蚀等因素综合考量。



铁细菌与余氯腐蚀的耦合机理

(7) 建筑末梢水质生物安全保障策略

■ 加热煮沸

加热煮沸可有效降低水中条件致病菌浓度

■ 优化建筑给水系统设计

- 优化建筑给水方式
- 优化贮水设备的设计
- 优选管道材料与质量

■ 提高热水系统水温

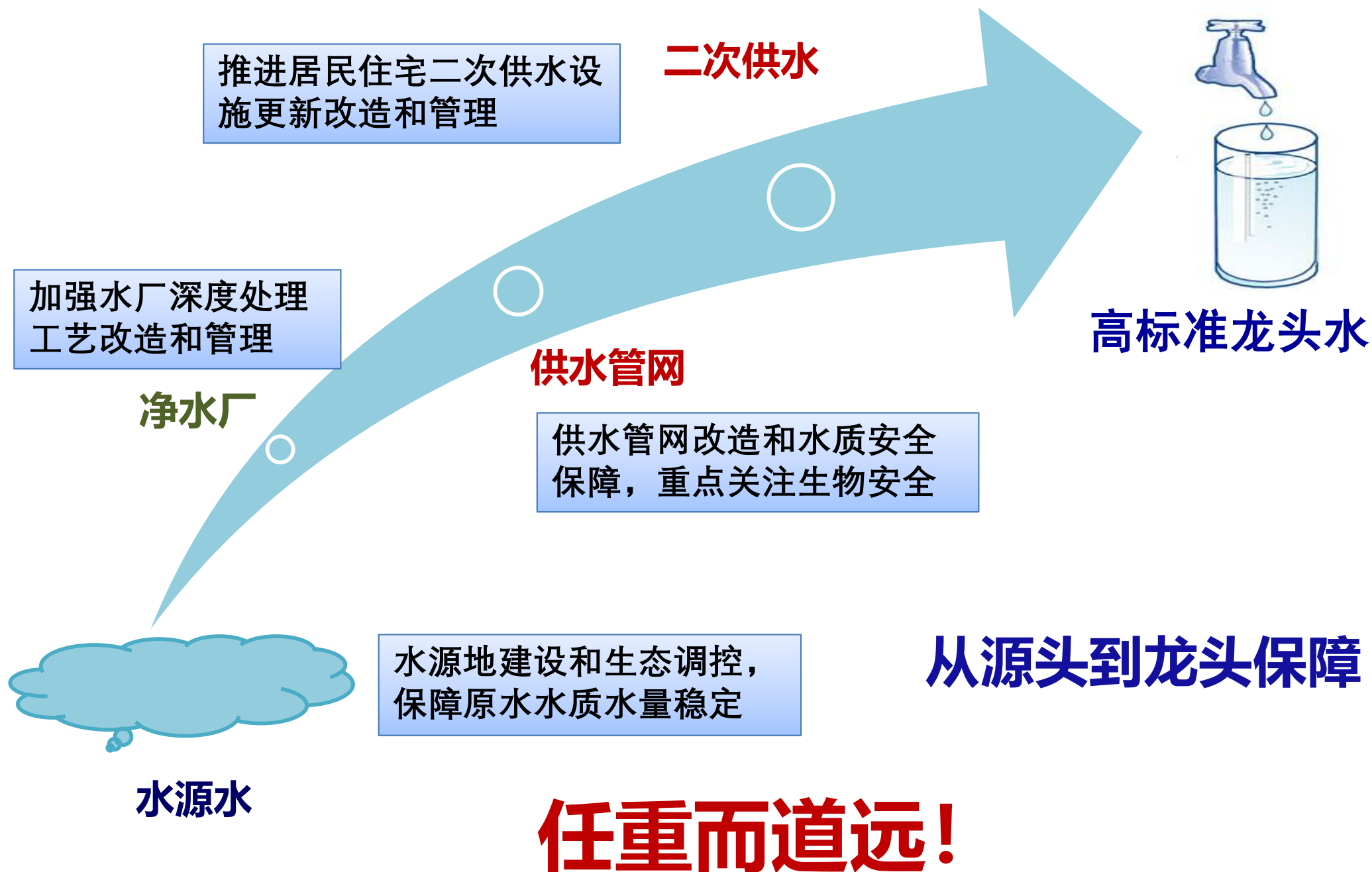
- 水温 $>53^{\circ}\text{C}$ 可控制分枝杆菌
- 水温 $>55^{\circ}\text{C}$ 可有效控制军团菌
- WHO建议控制热水水温大于 60°C 可有效控制铜绿假单胞菌

■ 科学的管理运营



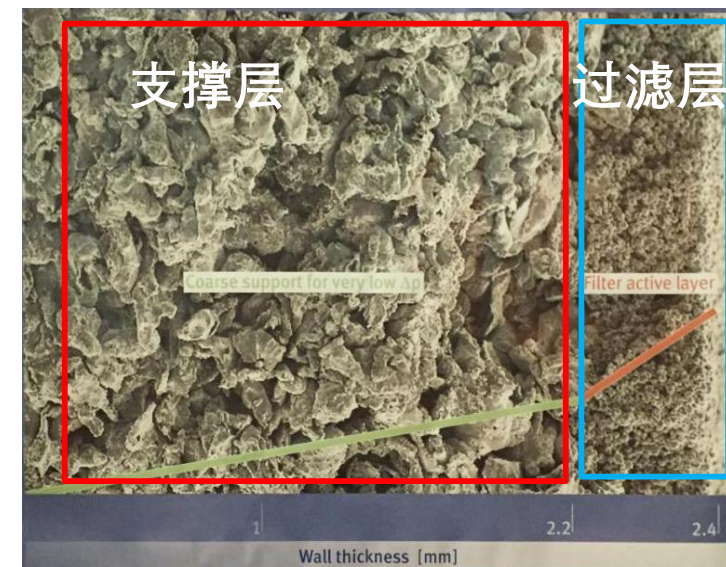
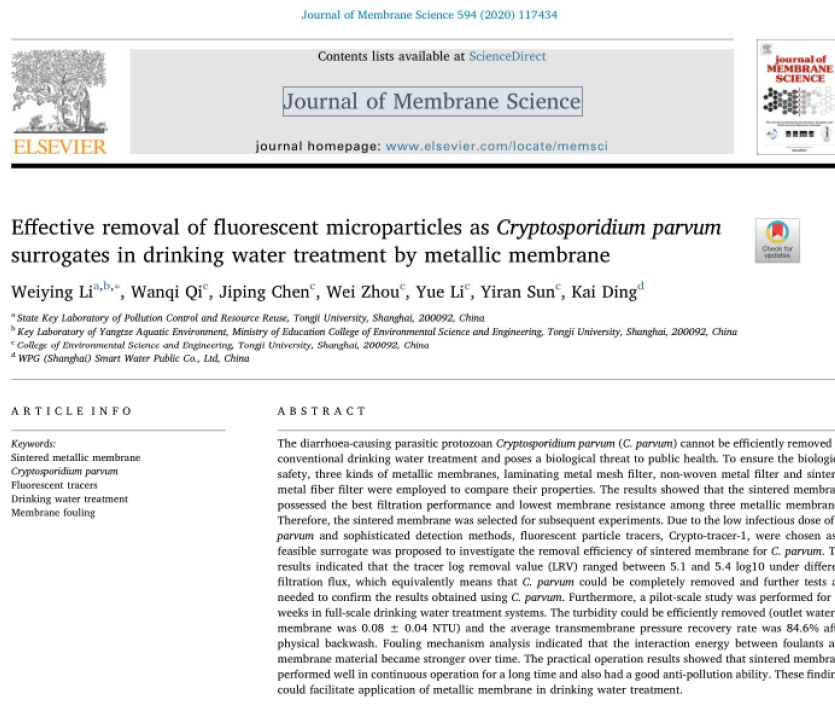
5. 供水水质安全保障策略与新技术展望

安全保障策略



(1) 深度水处理工艺—膜分离之材料应用研究

膜材质：有机和无机



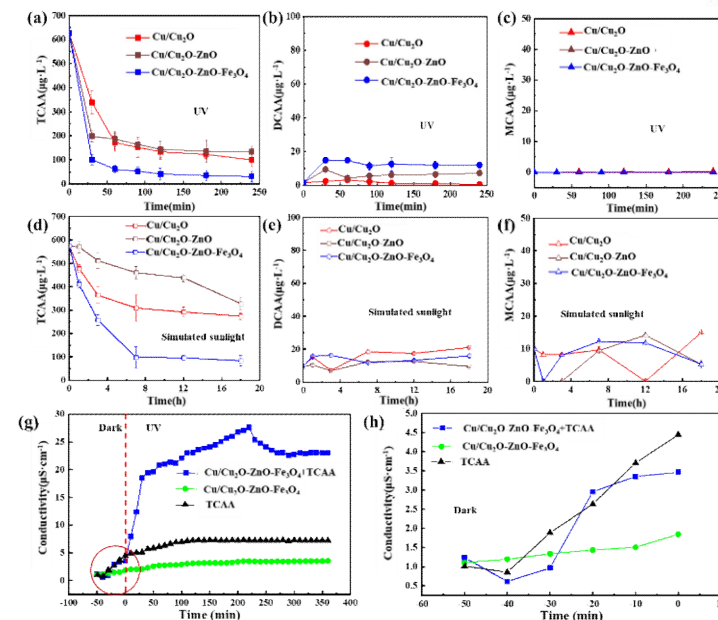
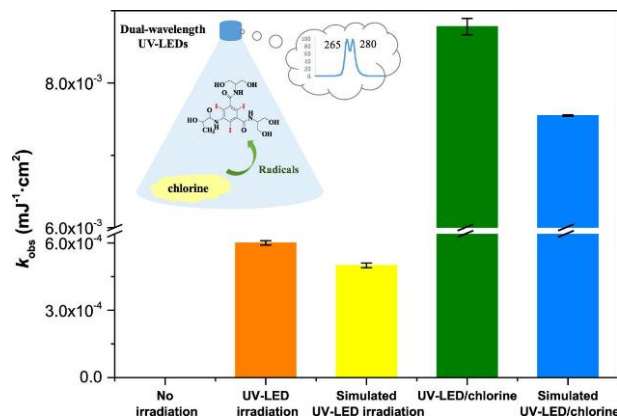
1. Introduction

Water quantity and quality underpin global development and sustainability. It is well known that the most of the raw waters in the world were polluted by pathogenic microorganisms, like *Salmonella*, *Vibrio cholera*, *Cryptosporidium parvum* (*C. parvum*) and so on [1]. The drinking water were threatened by biological contamination widely. A dramatic illustration of this effect was the outbreak occurred in Milwaukee, Wisconsin during the spring of 1993. Unfortunately, approximately 400,000 people were infected even though the utility met the requirements of the Safe Drinking Water Act [2]. And it has been generally recognized that *C. parvum* is a key significant diarrhoea-causing parasitic protozoan found both in humans and animals. Ensuring water security is a serious challenge from human health to the techno-economics of energy production [3]. Meanwhile *C. parvum* is so difficult to be inactivated with conventional treatment system [4–6], the United

States Environmental Protection Agency (US EPA) has promulgated the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule to control the concentration of *C. parvum* in drinking water for the first time. In China, the new standards for drinking water quality (GB5749-2006) has been fully implemented since July 1, 2007, in which both *Giardia* and *C. parvum* are not allowed to be detected. As for the water treatment processes, the Safe Drinking Water Act (SDWA) Amendments of USA has forced water treatment professionals to consider the non-conventional treatment processes, such as membrane technologies, which would be capable of meeting the anticipated standards [7]. As an advanced process compared with conventional processes (e.g., coagulation, sedimentation, sand-filtration and chlorine disinfection), membrane technologies, such as Ultrafiltration (UF) and Microfiltration (MF), have been demonstrated to be a very efficient process to meet the requirements for pathogens (such as *Giardia* and *C. parvum*), turbidity, and virus removal through their physical removal characteristic. The potential range of

* Corresponding author. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, 1239, Siping Road, Shanghai, PR China.
 E-mail address: liweiyang@tongji.edu.cn (W. Li).

(2) UV-LED/氯联合消毒工艺

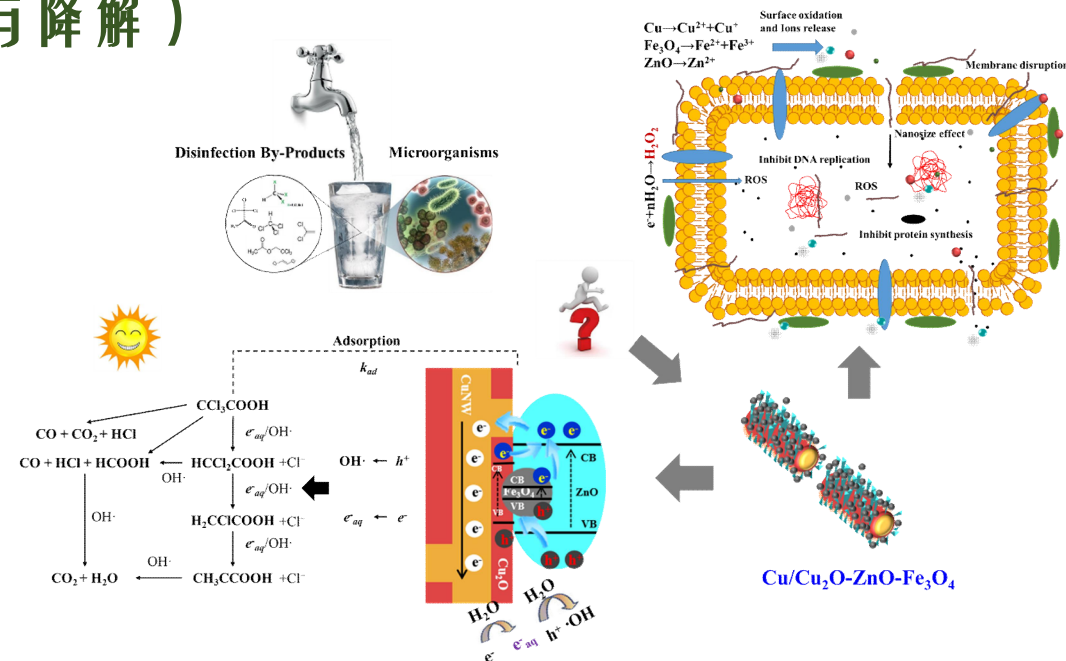


(3) 多功能新型纳米材料研究(杀菌与降解)

1) 芯鞘结构材料Cu/Cu₂O-ZnO-Fe₃O₄加入量为25.5mg/L, 可实现对10⁶ CFU/mL细菌的快速灭活 (5 min) ;

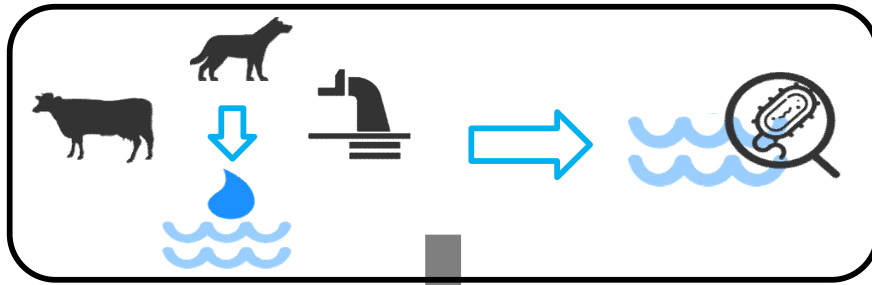
2) 材料对饮用水中代表性消毒副产物在模拟日光作用下, 降解效率>85%.

2) 开展饮用水处理的应用化研究。





(4) 基于人工智能的水体微生物污染溯源



水体粪便微生物污染导致重大生态、健康安全风险

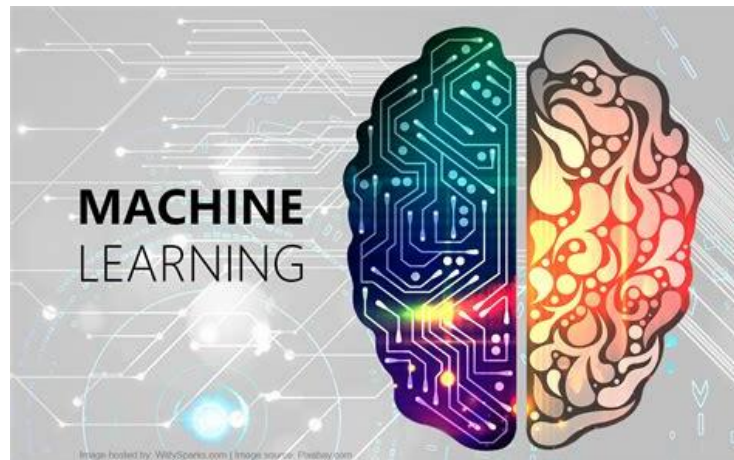
- 氮、磷化合物含量升高
- 致病微生物的接触风险

加重水体富营养化

(藻类爆发、水生态破坏...)

介水传染病疫情暴发

(痢疾、霍乱、病毒传染 ...)



人工智能：对人的意识、思维等信息过程进行模拟。

机器学习：人工智能的途径之一，不断改善计算机知识结构与性能。应用于饮食习惯分型、疾病诊断、植物亚种预测等领域。

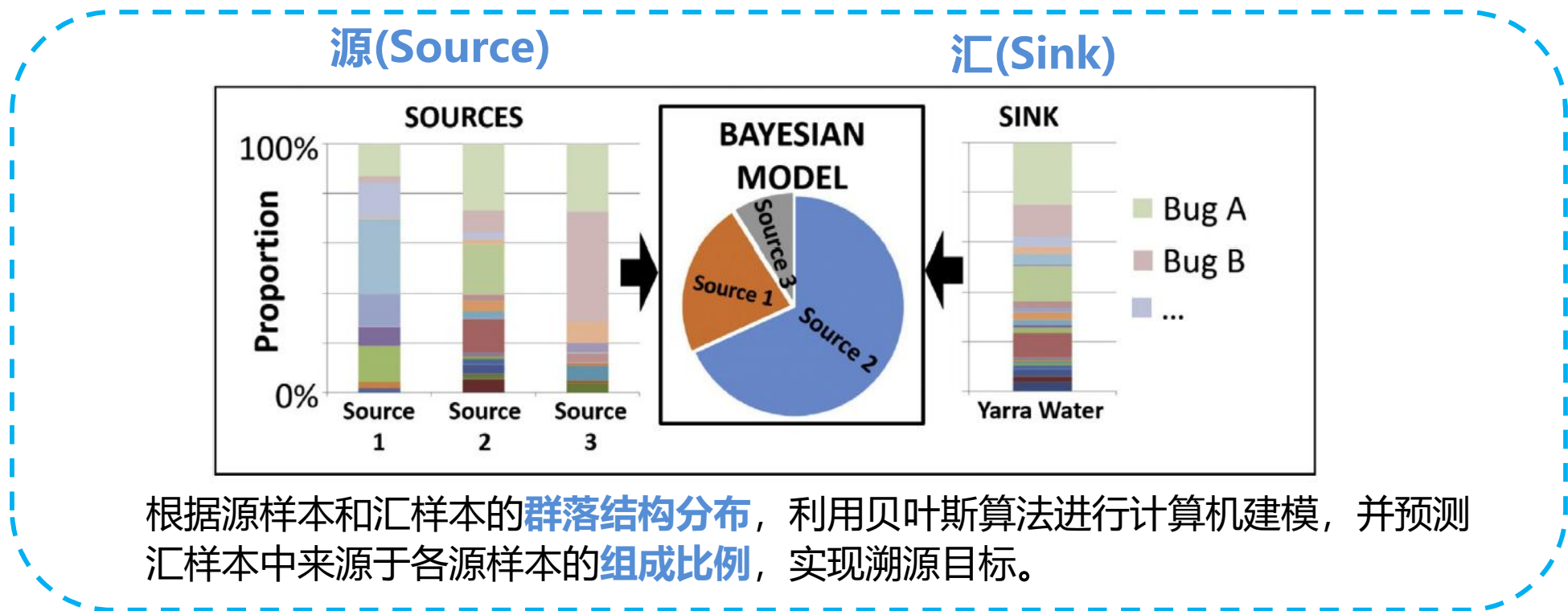
深度学习：机器学习的一个分支，运用人工神经网络进行建模。应用于抗性基因类型预测。



(4) 基于人工智能的水体微生物污染溯源

■ Rob Knight团队开发，在2011年发表在Nature Method的SourceTracker软件是近年来应用广泛的基于机器学习的计算机溯源技术之一。

■ 技术思路：



借助人工智能、水质大数据、生物信息学等技术，加快建立环境水体微生物污染溯源预警管理机制，健全国家公共卫生生物安全应急处理和管理体系，提高依法防控和治理能力，为科学精准对源头污染阻断与治理工作具有重要意义。

(5) “物联网+智能化+互联网”供水安全管理系统

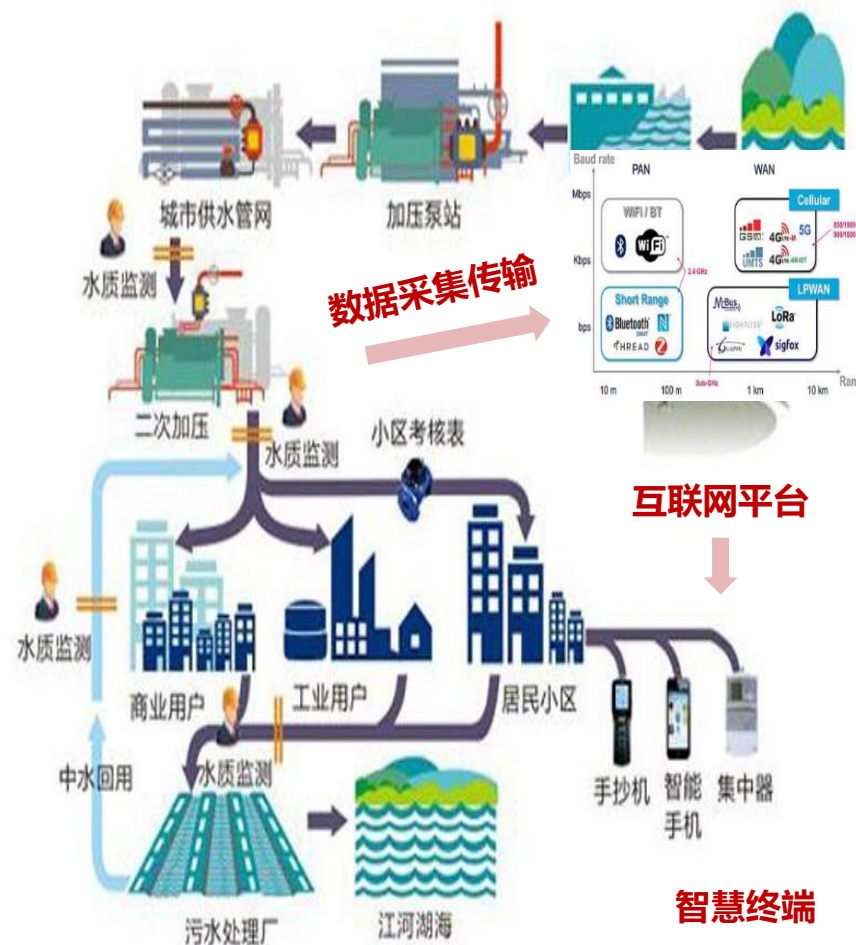
■ 2012年住建部[2012]42号文件：《关于开展国家智慧城市试点工作的通知》。

发展现状：

河流水水质预测进展顺利；智慧水务研究与建设尚需继续研究。

发展趋势：

- 1) “物联网+智能化+互联网”的集数据收集处理-水质生物安全预测诊断-决策控制一体化的水质管理系统；
- 2) 仿真模型；
- 3) 共享数据库下具有自主学习能力的智能模型。

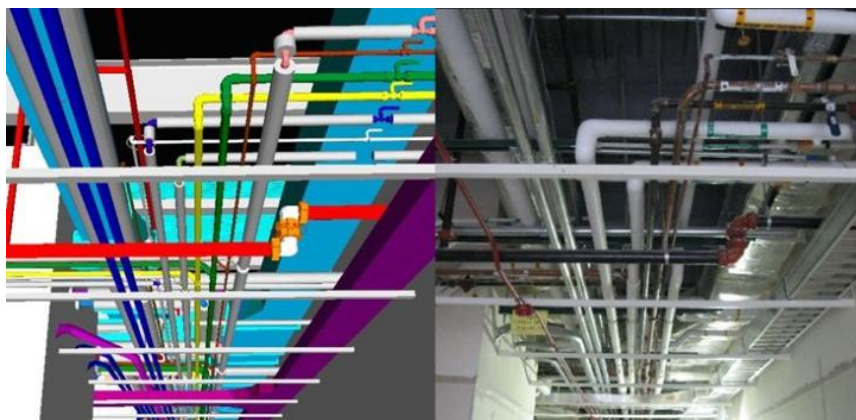
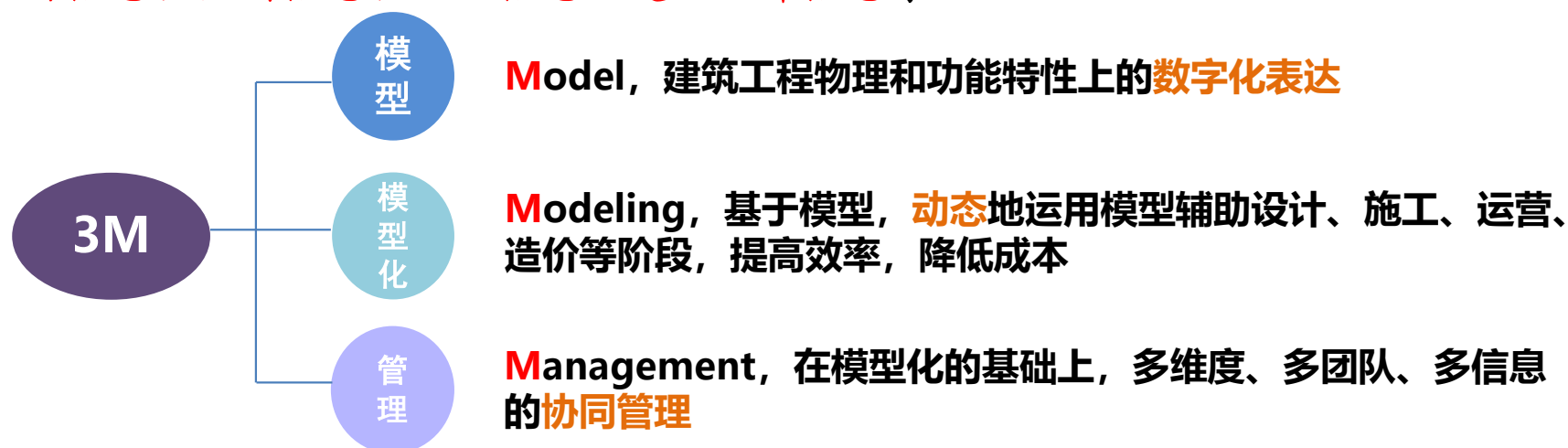




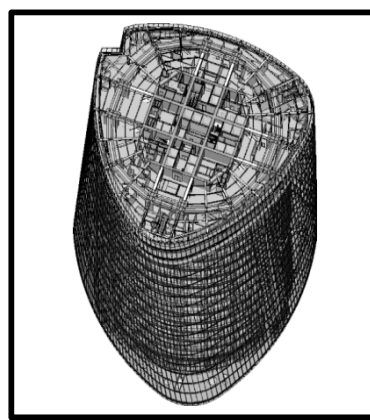
(6) 基于建筑信息模型 (BIM) 在给排水工程的全生命周期运维

BIM: 在建筑工程规划、设计、施工以及运行维护的**全生命周期**中创建及维护建筑信息的过程。

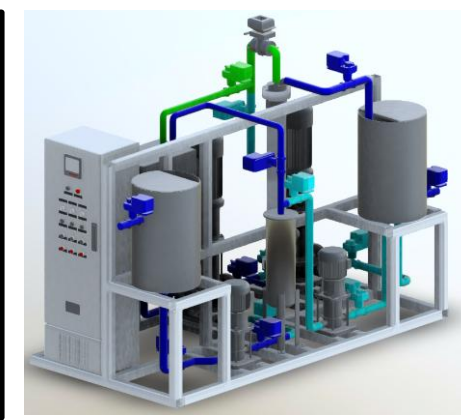
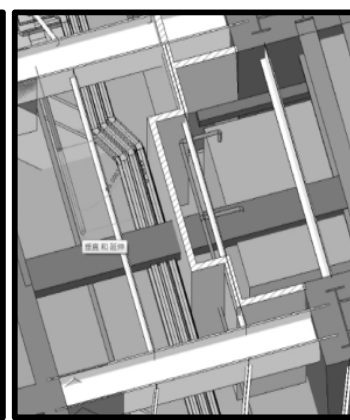
给排水工程全生命周期: BIM技术全过程应用**三维、实时、动态**的模型, 记录并展现工程的几何信息、空间信息、地理信息及建筑组件信息等。



BIM模型及实际现场对比图



上海中心BIM结构和给水管道设计



深度水处理工艺BIM模型

(7) 水处理耦合技术对新污染物的去除效能及资源回收研究

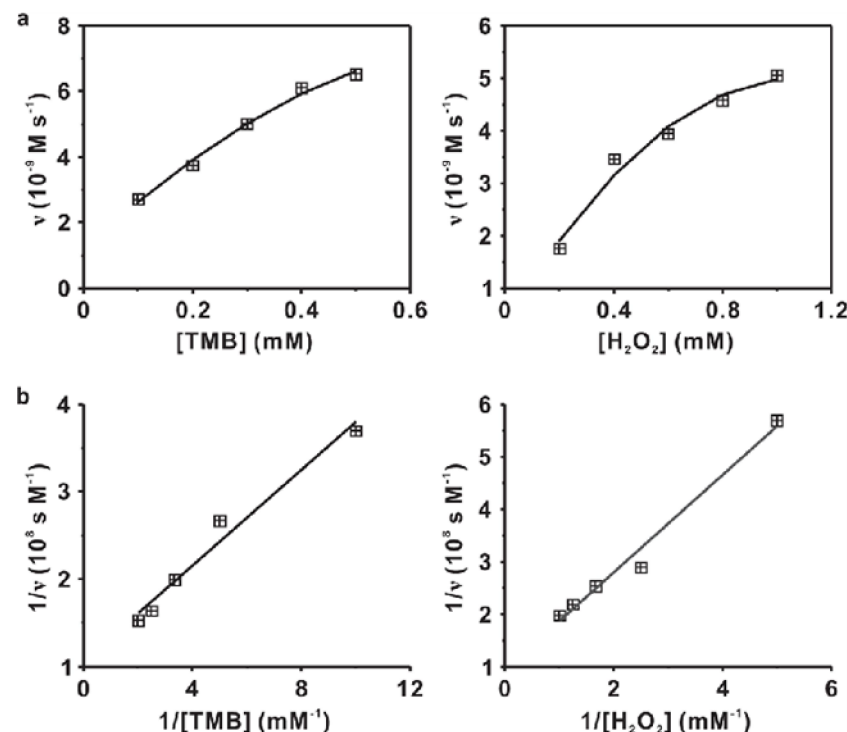
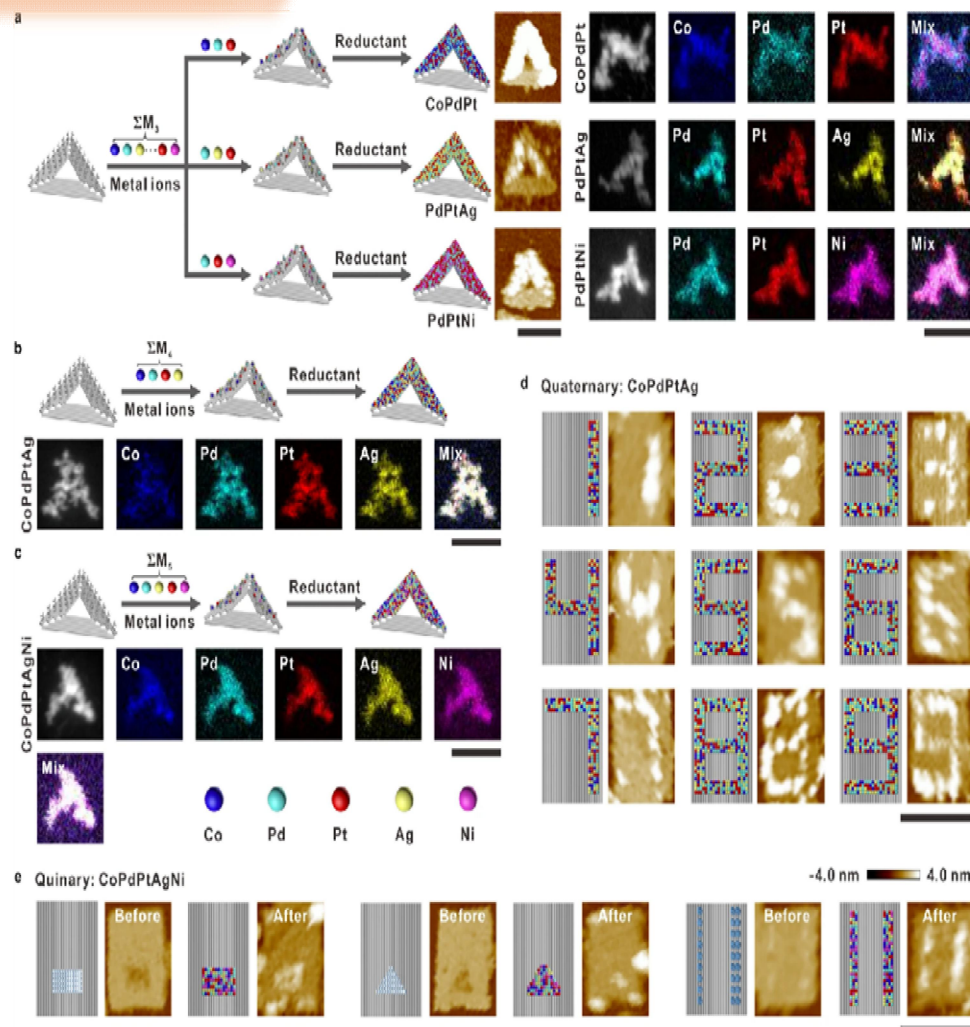
1) 基于DNA序列优化的吸附金属污染物的活性纳米材料制备研究

高熵合金制备

DNA折纸模板指导吸附沉积多种金属离子，原位形成具有特定纳米图案的三元以及四元型高熵合金。

纳米酶催化

DNA折纸模板指导原位形成的CoPdPt合金对四甲基联苯胺（TMB）和 H_2O_2 均有良好的催化活性，可作为一种理想的纳米酶。

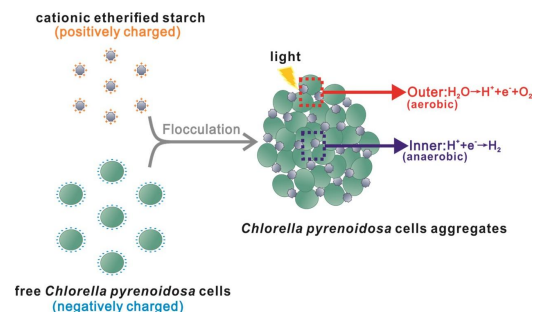


(7) 水处理耦合技术对新污染物的去除效能及资源回收研究

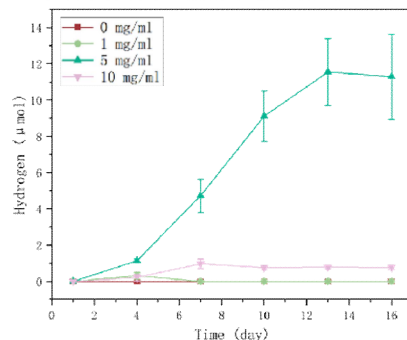
2) 基于水中微藻絮凝的光生物制氢耦合技术与资源化应用研究

天然水源水中藻类絮凝制氢

富含微藻的自然水体加入适量试剂可以直接光生物学制氢，16天内可持续产氢，制氢效率达到 $0.33 \mu\text{mol/mL}$ 。

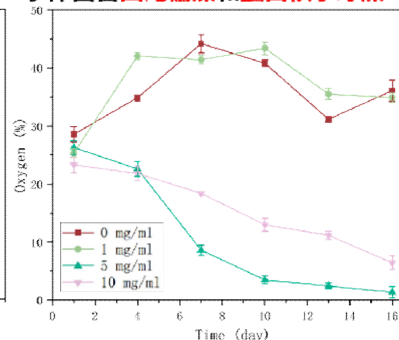


水体富含斜生栅藻和蛋白核小球藻

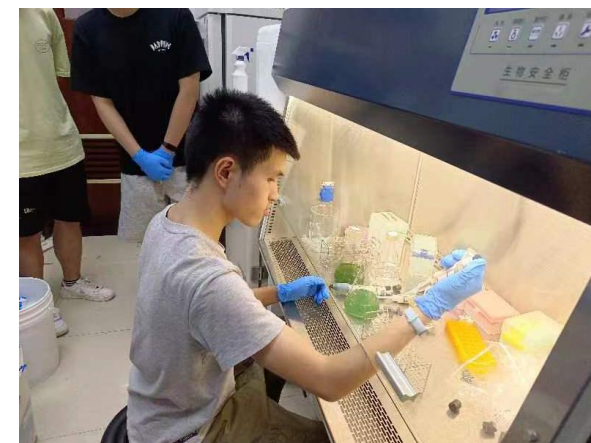


氢气产量变化统计图

水体富含四尾栅藻和蛋白核小球藻



氧气含量变化统计图





感谢同济大学李伟英教授课题组
全体成员的共同努力！



课题组 Web: <http://www.lwylab.com/>

