



IN CHANGSHA, CHINA  
中国·长沙

# 双碳背景下

## 城市污水处理厂的设计运营控制策略

Design and Operation Strategies of Municipal Wastewater Treatment Plants in a Dual  
Carbon Context

汇报人：刘 影

湖南省建筑设计院集团股份有限公司

# — ECG — CONTENTS — ECG —

— PART 01 —

## 政策背景



— PART 02 —

## 碳核算 碳排现状



— PART 05 —

## 典型案例



— PART 03 —

## 污水厂 潜能分析



— PART 06 —

## 创新技术



— PART 04 —

## 碳中和 综合策略



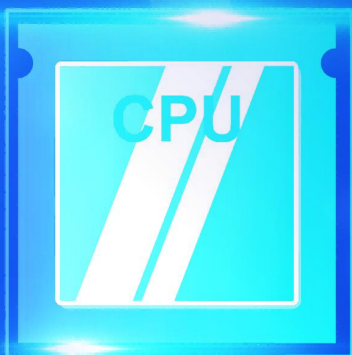


IN CHANGSHA, CHINA  
中国·长沙

# ONE

## 01

# 政策背景

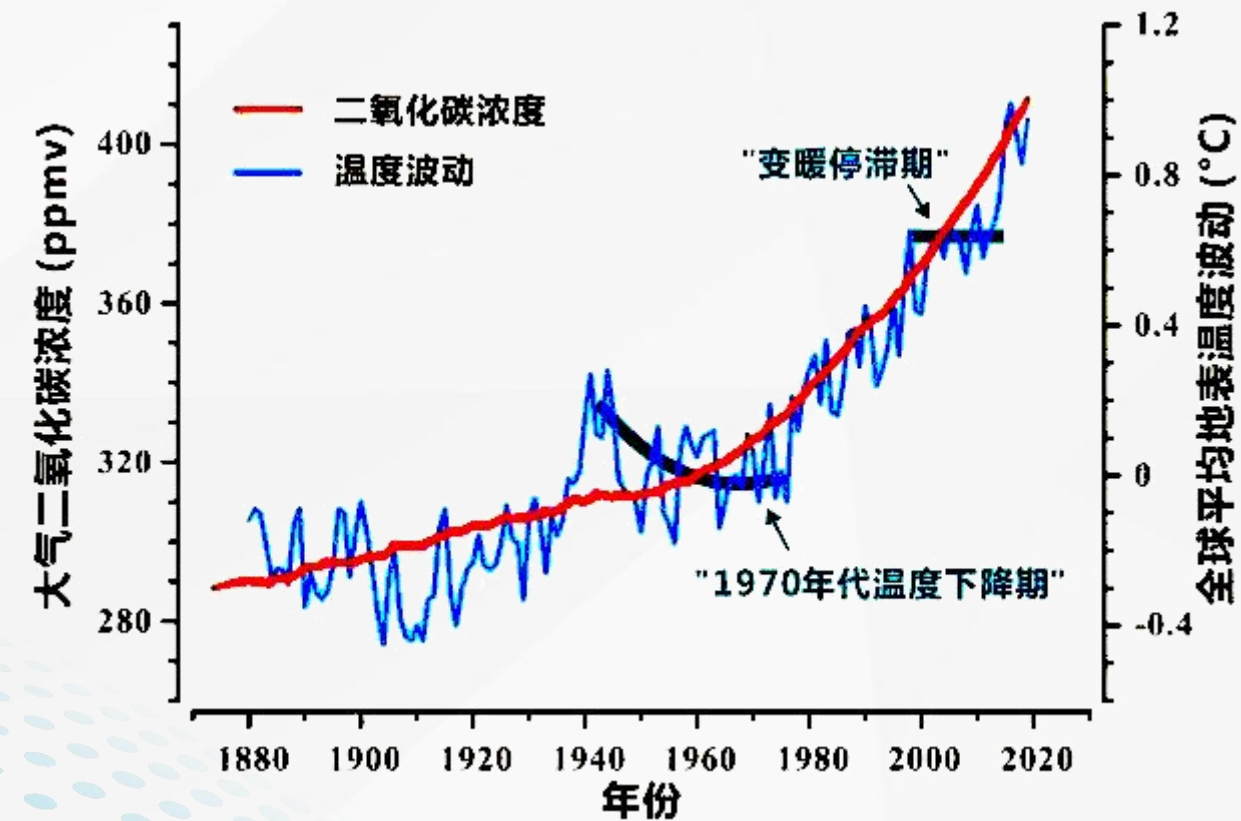




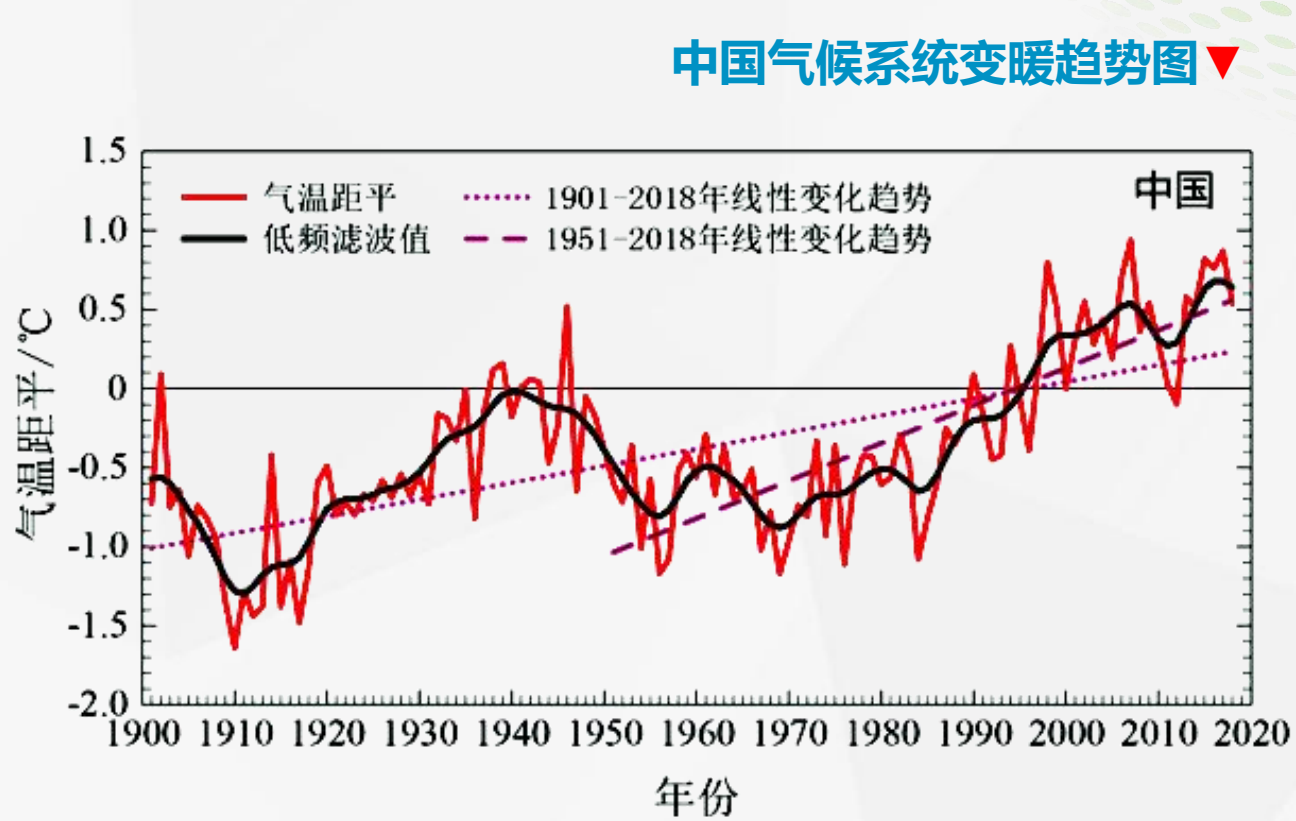
# 政策背景

## 全球变暖趋势加剧

### 中国气候系统变暖趋势图 ▼



▲ 全球平均地表温度与大气二氧化碳浓度关系图







# 政策背景

# 全球变暖主要影响因素

## 温室气体吸收长波辐射 导致增温效应



温室气体能吸收地表长波辐射，使大气变暖，与“温室”作用相似。

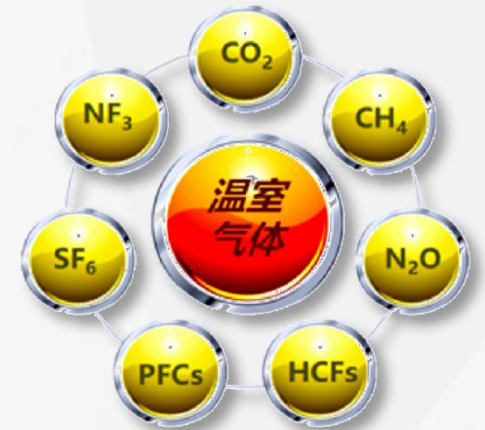
若无“温室效应”，地球表面平均温度是  $-18^{\circ}\text{C}$ ，而非现在的  $15^{\circ}\text{C}$ 。

《京都议定书》中规定控制的6种温室气体为：二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ )、氢氟碳化合物 (HFCs)、全氟碳化合物 (PFCs)、六氟化硫 ( $\text{SF}_6$ )。其中，二氧化碳是最主要的温室气体，占全球温室气体排放总量的70%以上。



## 变暖罪魁祸首

- ◆ **6大温室气体**使大气保温作用增强
- ◆ **二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化合物、全氟化碳、六氟化硫**





# 政策背景

## 应对气候变化



海洋酸化 海平面上升 高温热浪 冰川退缩 极端强降水



## 升温2°C 意味着什么?



动物减少 8%



珊瑚礁消失 99%



极端天气 频发



水资源 匮乏

## 全球变暖对自然的影响

## 升温5°C 意味着什么?



城市 淹没



生物 灭绝



## 全球变暖危害

- ◆ 全球平均气温每升高**1°C**，海平面上升大于**2米**
- ◆ 全球平均气温上升**5°C**，地球整体**环境完全破坏**，甚至**生物大灭绝**







# 政策背景

## 减排控温已成为全球共识

首个控温减排国际公约

1992.6



### 《联合国气候变化框架公约》

将大气温室气体浓度控制在一个稳定的水平，通过共同但有区别的责任原则等

1997.12



### 《京都协议书》

**首个设定强制性减排目标国际协议。**

2007.12



### 巴厘路线图

建立以《公约》和《协议书》为主的双轨谈判机制。

2009.12



### 《哥本哈根协议》

提出建立帮助发展中国家应对气候变化的绿色气候基金，但未能就《京都议定书》到期后的安排达成一致。

2015.12



### 《巴黎协定》

基于国家自主的长期目标：到本世纪下半叶实现净零排放，**全球平均气温升幅控制在2°C以内**。本世纪下半叶实现碳中和。

后巴黎时代  
缔约国大会



### 巴黎协定实施细则及落实

发达国家和发展中国家在1.5°C目标、资金支持、技术转移等方面存在分歧

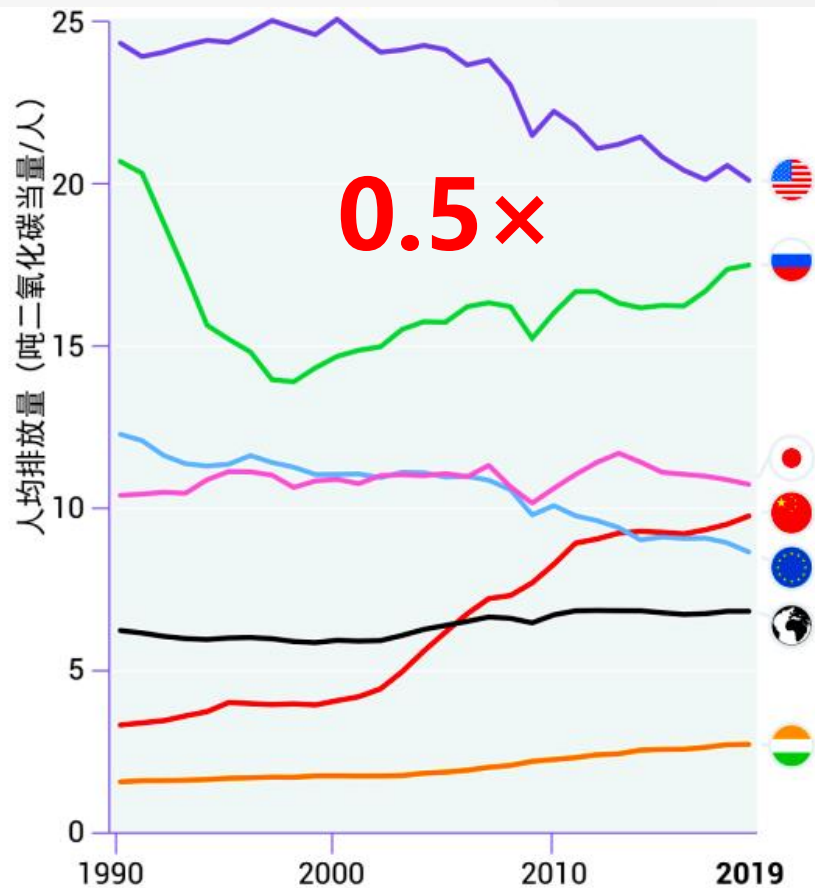
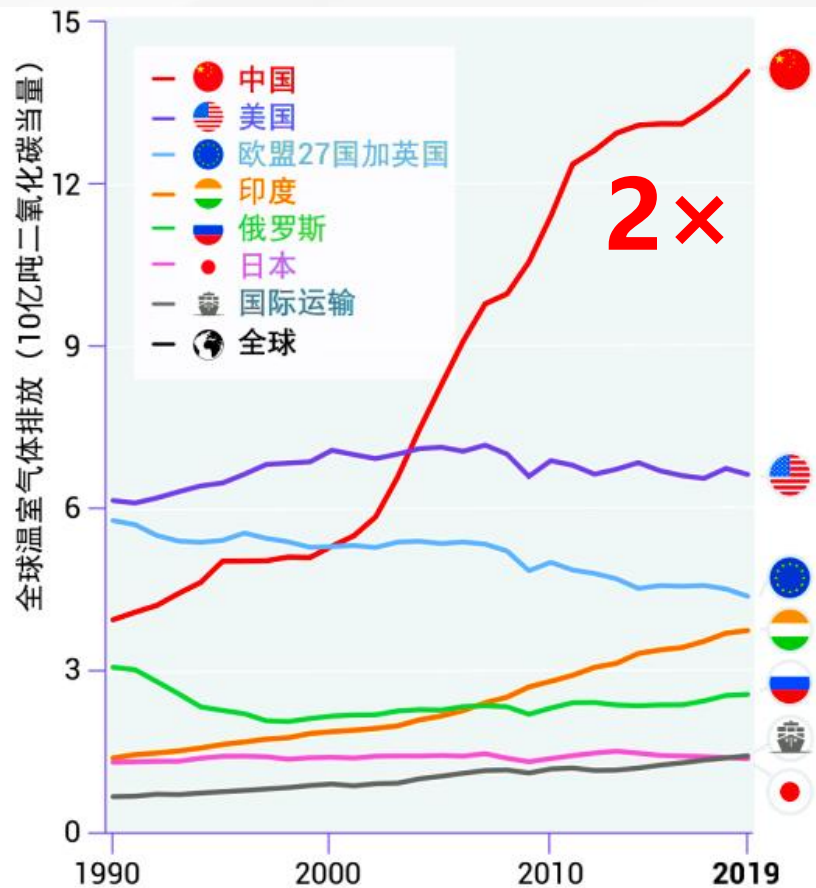


# 政策背景

## 中国碳排放全球第一，降碳迫在眉睫



### 全球主要经济体碳排放量对比图



### 全球主要能源需求分布图



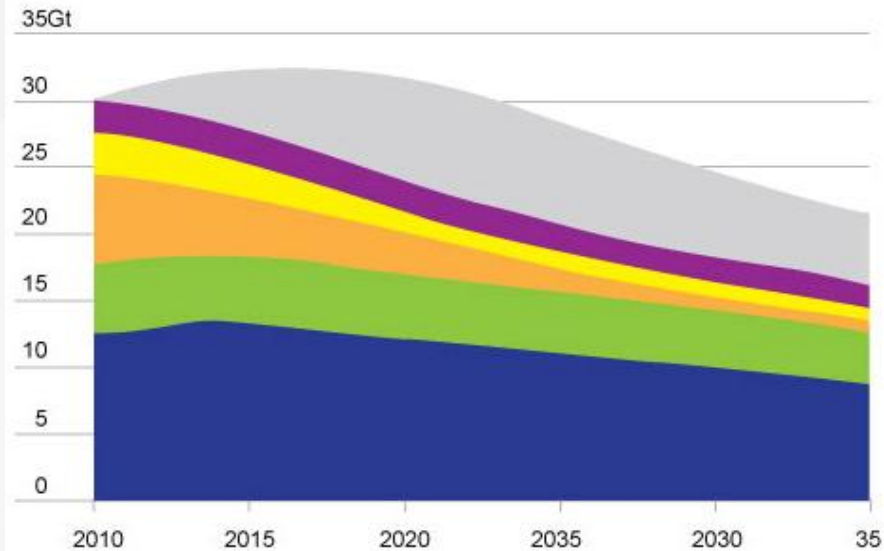
#### CO2 排放量

根据新协议下全球主要能源需求构成分布

到达 450 ppm 之前可调控空间

锁定碳排放：

其他 (Other)   交通 (Transport)   建筑 (Buildings)   工业设施 (Industry)   产能设施 (Energy Production)







# 政策背景

## 全球平均气温升高速度逐步加快<sup>1</sup>



- 全球平均气温较工业化前

↑ 1.1℃

- 上升速度是过去200年平均增速

7倍

## 《巴黎协定》确定全球气温上涨幅度控制目标<sup>2</sup>



- 到21世纪末，全球平均气温较工业化前水平上升的幅度控制



## 中国碳排放全球排名第一



- 2020年中国排放总量占全球总排放量的32%<sup>3</sup>

## 电力和工业碳排放量最高



- 2020年电力和工业碳排放量分别占全球总排放量的41%和29%<sup>3</sup>

# 我国主动顺应潮流积极布局碳中和

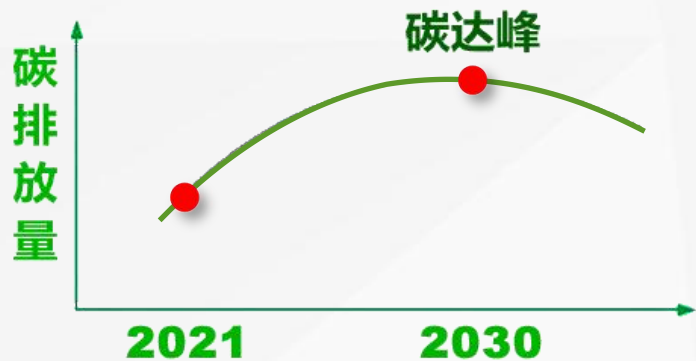
2015年6月	向联合国提交《强化应对气候变化行动-中国国家自主贡献》	确定自主贡献目标：单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%-65%；二氧化碳排放量2030年左右达到峰值，并争取尽早达峰。
2020年9月	联合国大会	习近平主席发言表示：中国将提高国家自主贡献力度，力争2030年前二氧化碳排放达到峰值，争取2060年实现碳中和。
2020年9月	联合国生物多样性峰会	习近平主席提出中国将采取更加有力的政策和措施，努力争取2060年前实现碳中和，为实现应对气候变化做出更大的努力和贡献。
2020年11月	第三届巴黎和平论坛	习近平主席在第三届巴黎和平论坛致辞表示：中方将为碳达峰、碳中和制定实施计划。
2020年11月	二十国集团领导人利雅得峰会“守护地球”主题边会	习近平主席会上致辞：加大应对气候变化力度，中国言出必行，将坚定不移加以落实。
2020年12月	气候雄心峰会	习近平主席在为纪念《巴黎协定》达成五周年举办的气候雄心峰会上，进一步宣布提高国家自主贡献力度的一系列新举措。



# 政策背景

# 碳达峰

某一个时刻，二氧化碳排放量达到历史最高值，之后逐步回落。



# 碳中和

通过植树造林、节能减排等形式，抵消自身产生的二氧化碳或温室气体排放量，实现正负抵消，达到相对“零排放”。



## 排放 = 吸收

# 碳达峰与碳中和

## 各国碳中和时间表

全球已有120余个国家承诺碳中和，其中全球10大煤电国家中的7个已做出碳中和承诺。



## 全球十大煤电国家碳中和承诺情况

序号	国家	承诺情况
1	中国	2060
2	印度	未承诺
3	美国	2050
4	日本	2050
5	韩国	2050
6	南非	2050
7	德国	2050
8	俄罗斯	2060
9	印度尼西亚	未承诺
10	澳大利亚	未承诺

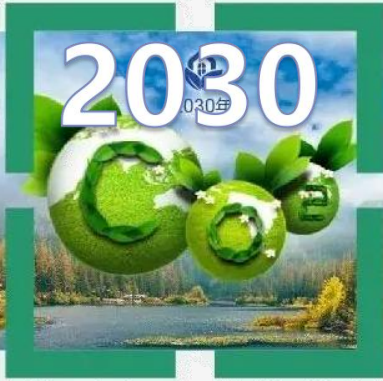




# 政策背景

## 2020年9月，提出“30·60”双碳目标

单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降**65%**以上



非化石能源占一次能源消费比重达到**25%**左右

森林蓄积量将比2005年增加**60亿**立方米

风电太阳能发电总装机容量将达**12亿**千瓦以上

2021年10月12日，习近平主席在《生物多样性公约》第十五次缔约方大会领导人峰会上强调为推动实现碳达峰、碳中和目标，中国将陆续发布重点领域和行业碳达峰实施方案和一系列支撑保障措施，构建起碳达峰、碳中和“1+N”政策体系。

## 我国双碳目标

### 2060年

- 非化石能源消费比重达到80%以上
- 碳中和目标顺利实现

2060



### 2025年

- 单位GDP二氧化碳排放比2020年下降18%
- 非化石能源消费比重达到20%左右

2025

CO<sub>2</sub>



中国2030年碳达峰是二氧化碳的达峰，中国2060年前要实现碳中和包括全经济领域温室气体的排放，不只是二氧化碳，还有甲烷、氢氟化碳等非二氧化碳温室气体，包括从二氧化碳到全部温室气体。



# 政策背景

2021年：“十四五”开局之年，中国开启“双碳”征程的元年

## 政策顶层设计 1+N 架构



1

### 中共中央、国务院印发

《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》

《意见》是党中央对“双碳”工作进行系统谋划和总体部署，覆盖“碳达峰”、“碳中和”两个阶段，侧重于目标和指导思路。

## 政策体系

### 一 国务院发布的文件

#### N-1 《2030年前碳达峰行动方案》

“N”中为首的政策文件，主要聚焦“碳达峰”目标，是“碳达峰”阶段的总体部署，相关指标和任务更加具体，侧重于第一个目标和具体措施。

### 二 行业政策

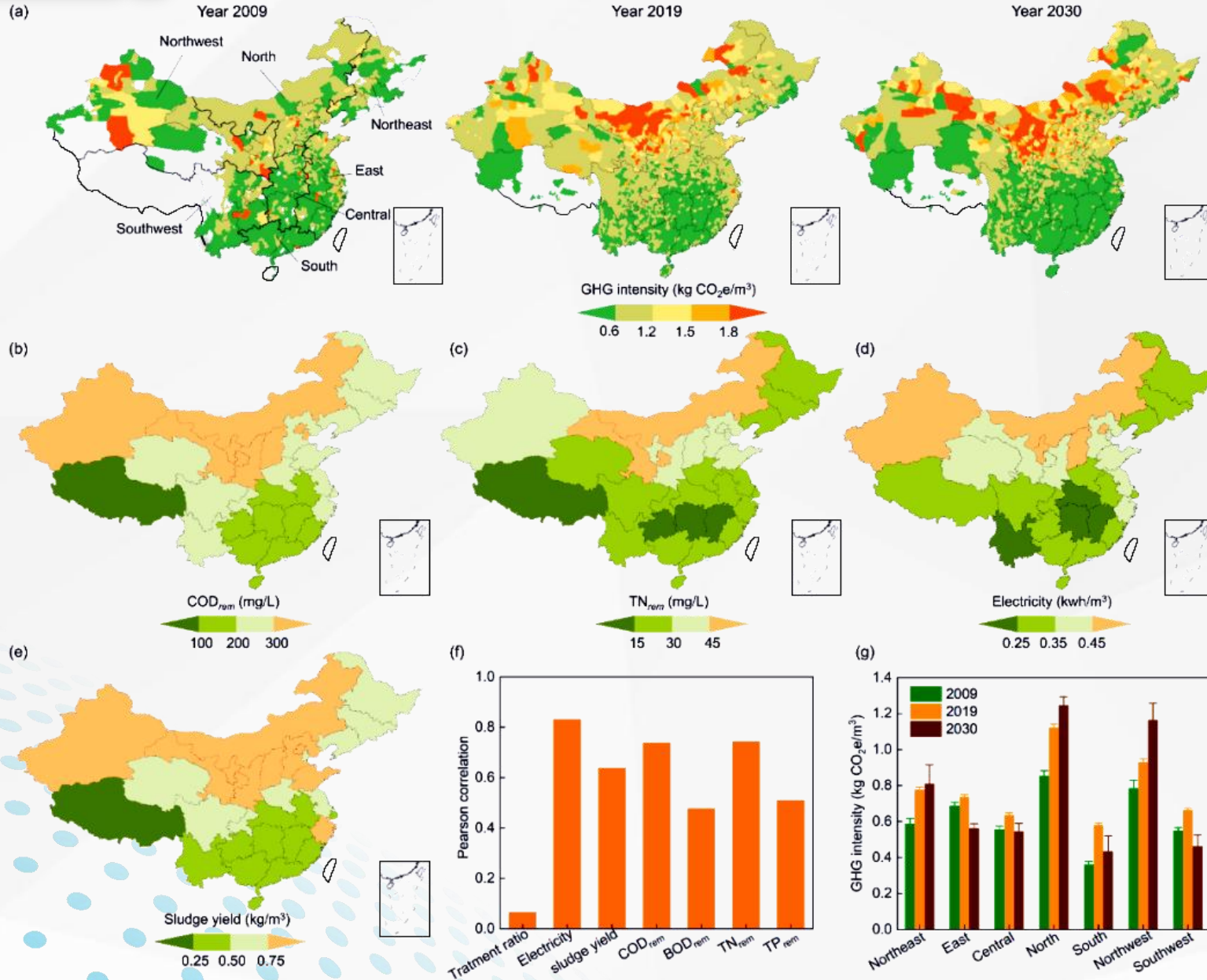
具体行业主管部门制定的“碳达峰”实施方案

### 三 省市地方政策

各地区政府根据自身资源条件制定的本地区“碳达峰”行动方案。



占社会总量 **1%-2%**



图a-c: 不同年度温室气体排放强度的地区分布



图b-e: 污水厂排放活动水平水质及运行状态的地区分布



图f: 不同活动水平与排放强度之间的相关度



图g: 不同地区在不同年度的排放强度变化

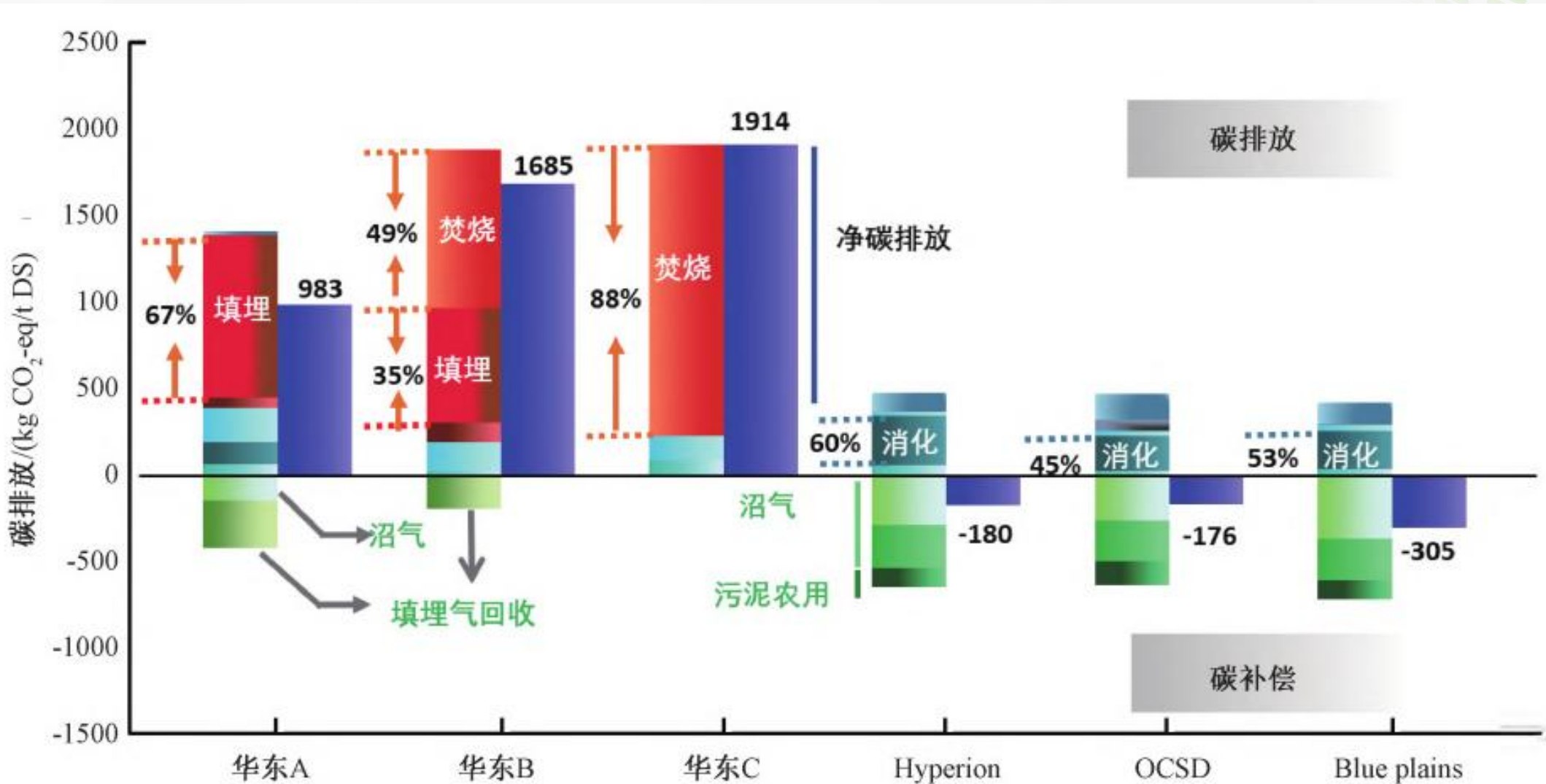






# 政策背景

## 中外污水厂在碳减排方面差距巨大



中外6个案例污水厂不同污泥处理处置路线的碳足迹



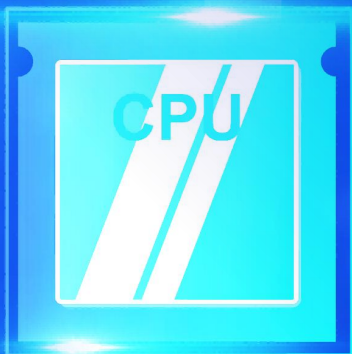


IN CHANGSHA, CHINA  
中国·长沙

# TWAO

## 02

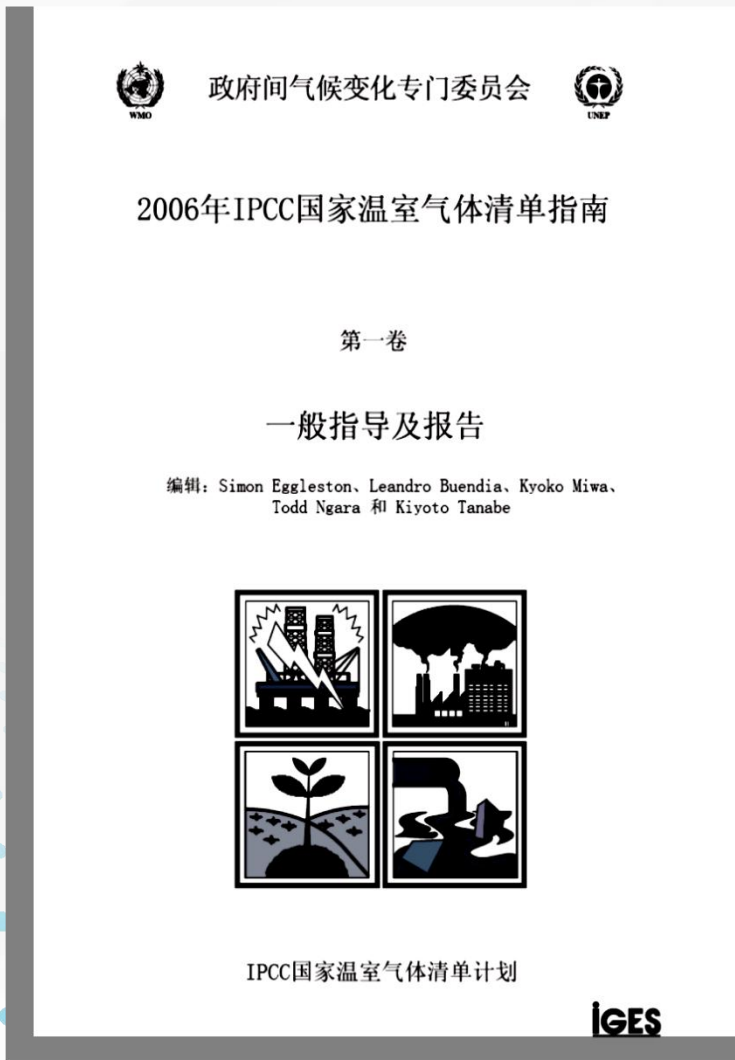
# 碳核算碳排现状



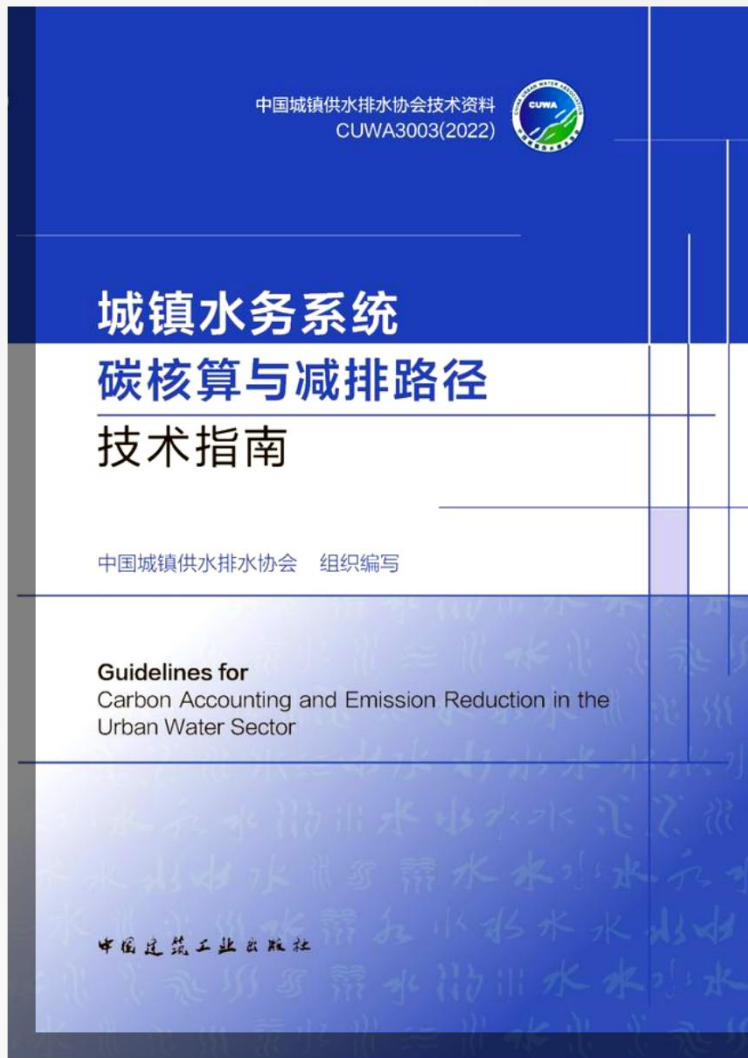


# 碳核算及碳排放现状

## 《IPCC 国家温室气体清单指南》 (国际核算指南)

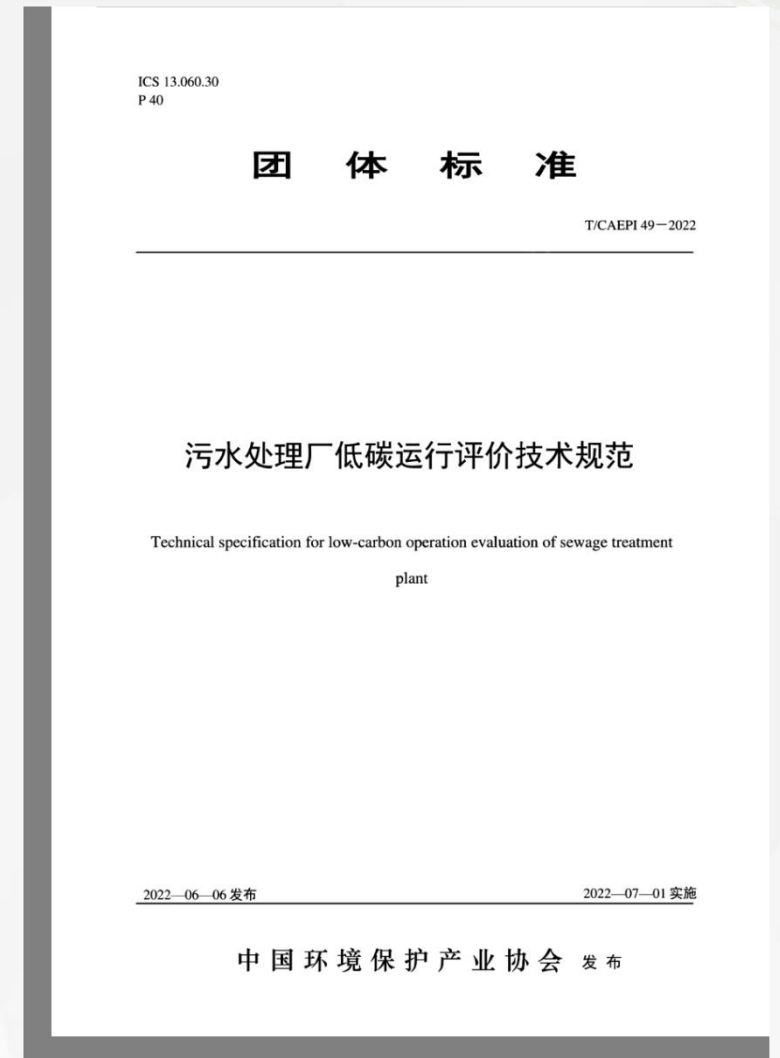


## 《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》 (给水、污水、雨水系统碳核算方法)



## 评价标准及方法

## 《污水处理厂低碳运行评价技术规范》 (污水处理厂核算、评价方法)







# 碳核算及碳排放现状

## 碳排放源分类及评价方法

### ▼ 污水处理系统碳排放源分类

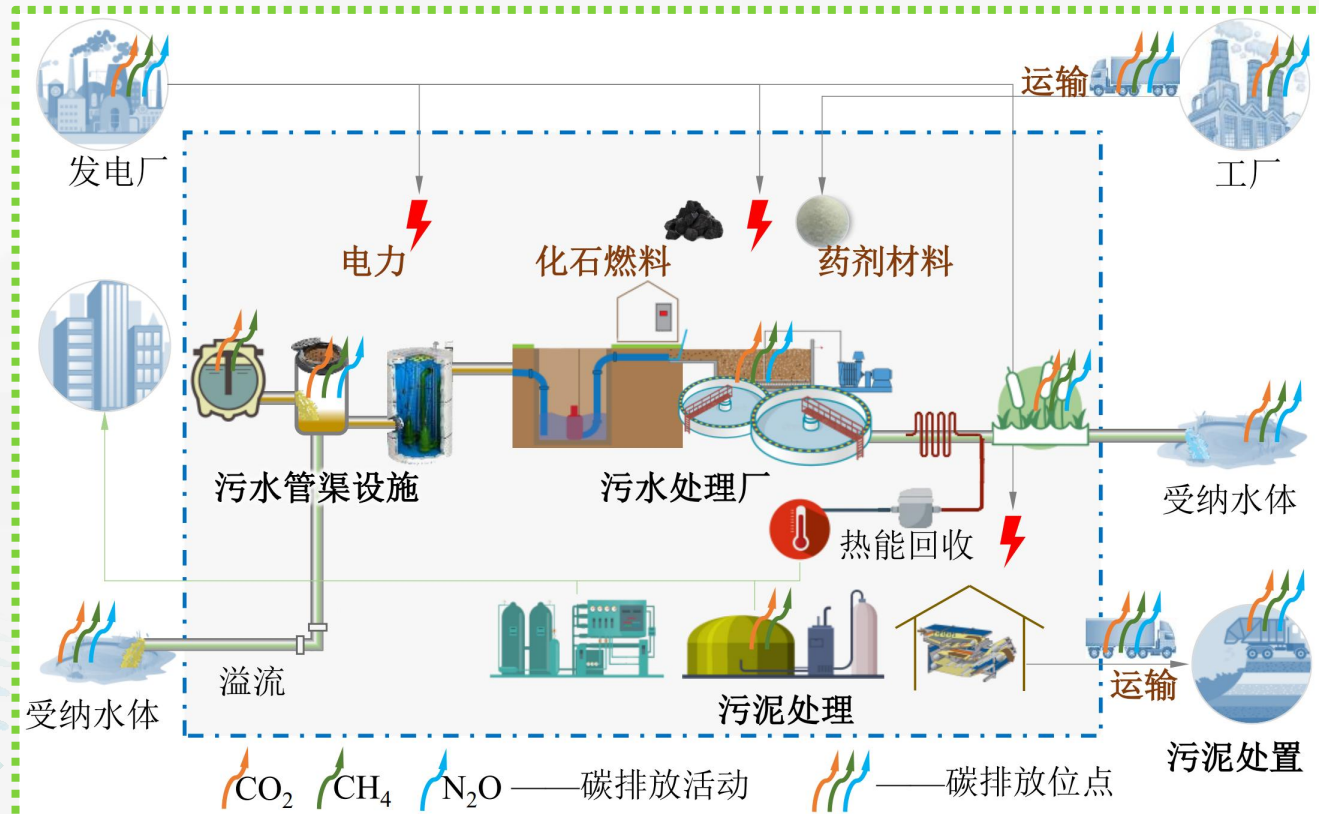
序号	物质类	能源类	物耗类	资源回收类	碳汇类
1	好氧分解	污水运输	消毒	沼气回收利用	稳定塘
2	内源代谢分解	污水提升	投加碳源	污水源头节水	人工湿地
3	厌氧消化	曝气	混凝剂及助凝剂	尾水回用	其它生态处理工艺
4	硝化反硝化	污泥浓缩脱水	其它药品消耗	/	碳捕集利用与封存
5	污泥处理处置	其它能源消耗	/	/	/

### ▼ 碳排放核算主要方法比较分析

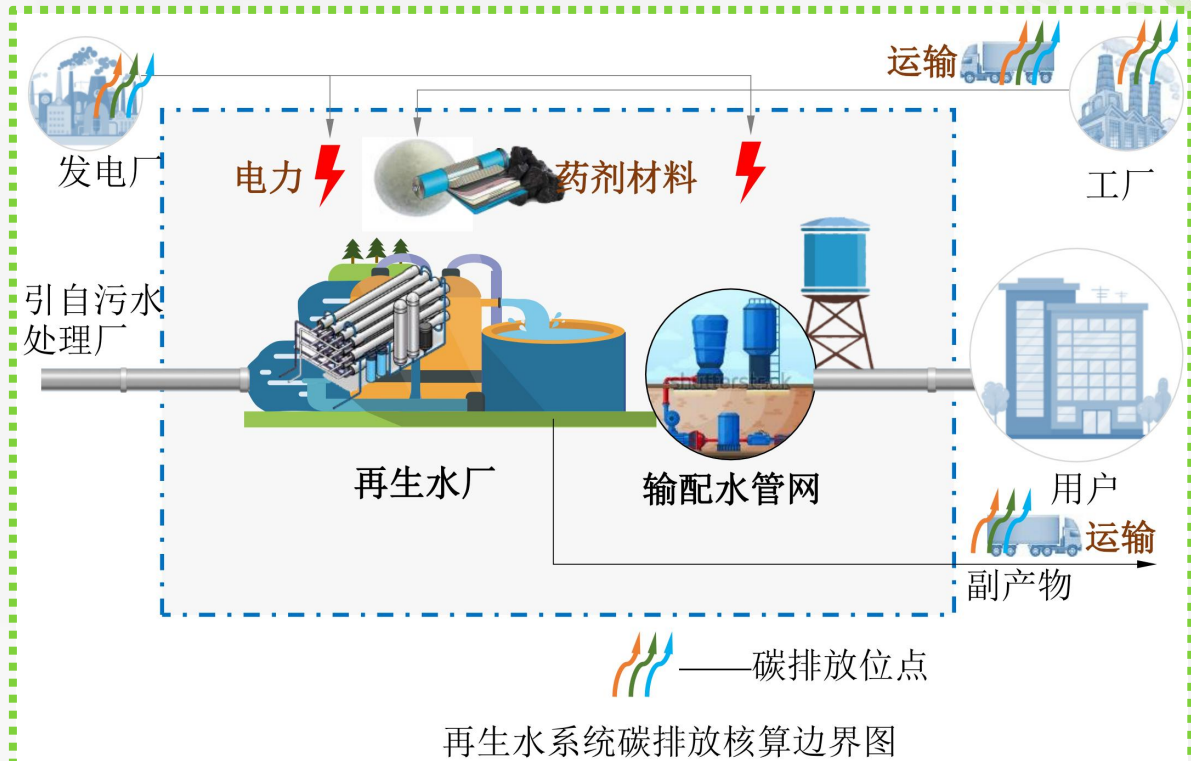
类别	原理	优-缺点	适用对象	应用现状
实测法	连续对点源进行实时测量	中间环节少，计算结果最接近真实值；数据获取难度和成本高，且监测结果易受到样品和仪器精度影响。	小区域的排放源；可监测的排放自然源	计算结果精准；应用范围窄
<b>排放因子法</b> (排放系数法)	根据统计数据核算	易掌握，有完备的数据和参考实例较多；不同工艺排放因子不确定性较大。	稳定的人为排放源；简单的自然排放源，对不同情况下的温室气体排放计算都具有适用性。	应用广泛， <b>国际通用</b> ，方法总结全面，计算结果可靠
质量平衡法 (物料平衡算法)	根据质量守恒定律计算	适用范围较广，数据收集较容易，方法简单。计算结果不准确，存在统计误差。	复杂的人为排放源；复杂的自然排放源	属于较新的方法，具体操作方法较多，结论精准性不好。
碳足迹法	根据生命周期评价方法评估研究对象在其生命周期中直接或间接产生的温室气体排放	一种自上而下的方法，适用范围较广，计算过程详细、具体；连续获取数据的难度较大、边界确定较为复杂。	衡量人类活动中释放的或是在产品或服务的整个生命周期中累计排放的二氧化碳和其他温室气体的总量	应用广泛，具体操作方法较多。
模型法	模拟碳排放过程	对特定工艺适用，中间步骤少，易于计算。	局部区域、过程简单的碳排放源，或局部区域、可以获取排放源的准确相关数据	方便计算，数据获取难度大，模型参数可靠性及普适性不高。

# 碳核算及碳排放现状

## 污水厂碳核算边界



污水系统碳排放核算边界示意图



## ▲ 城镇污水处理碳排放核算边界

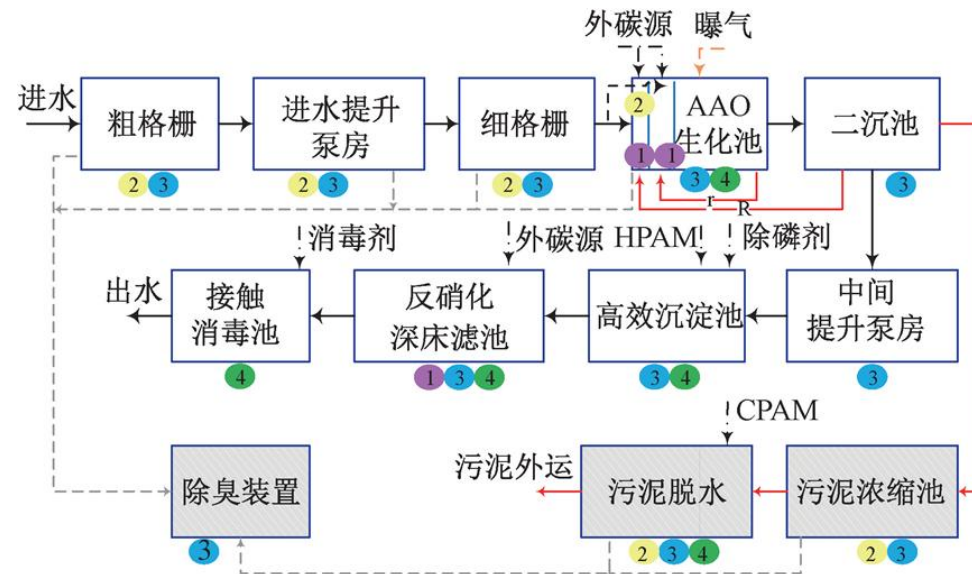
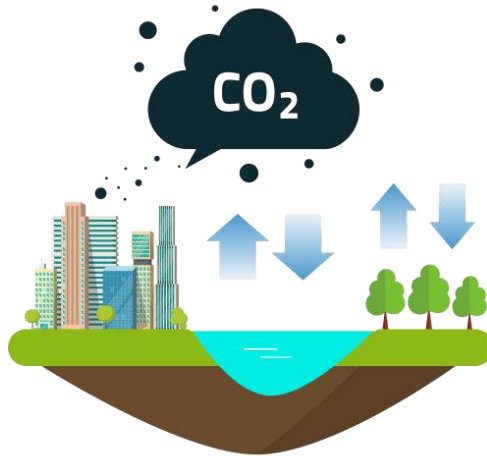




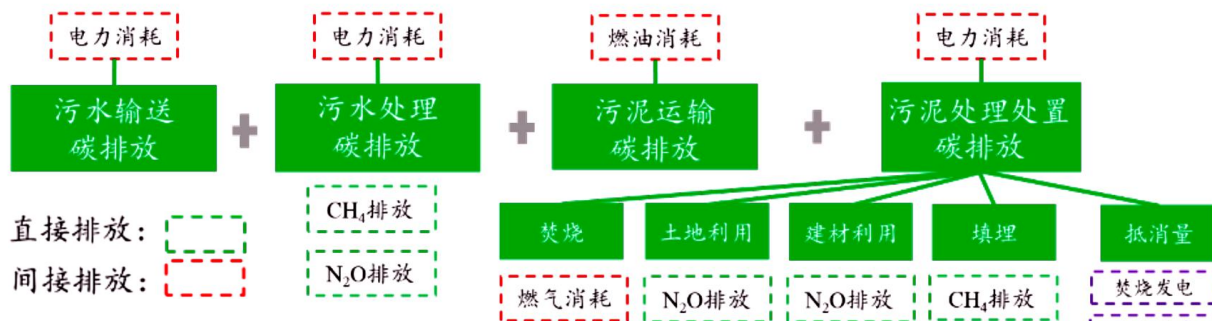
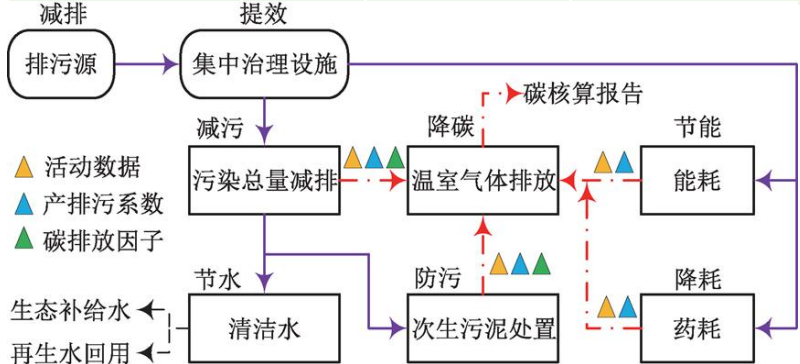
# 碳核算及碳排放现状

## 碳排放源识别

流程环节	工艺单元	碳减排	间接碳排放		直接碳排放		
			电能	药耗	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
污水处理与再生利用	预处理		√				
	厌氧		√				
	缺氧		√	√	√	√	√
	好氧		√				
	二沉池		√				
	深度处理		√	√			
	消毒		√				
污泥处理	环境用水	√	√				
	污泥浓缩		√	√			
	厌氧消化	√	√				
	好氧消化	√	√				
污泥处置	污泥脱水		√	√			
	卫生填埋					√	
	土地利用	√			√	√	
Σ			间接排放项		直接排放项		



碳排放源图示: ① N<sub>2</sub>O ② CH<sub>4</sub> ③ CO<sub>2</sub>(电耗) ④ CO<sub>2</sub>(药耗)



### 城镇污水处理全过程碳排放源识别

**直接排放:**  
城镇污水和污泥处理产生的CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O温室气体的排放

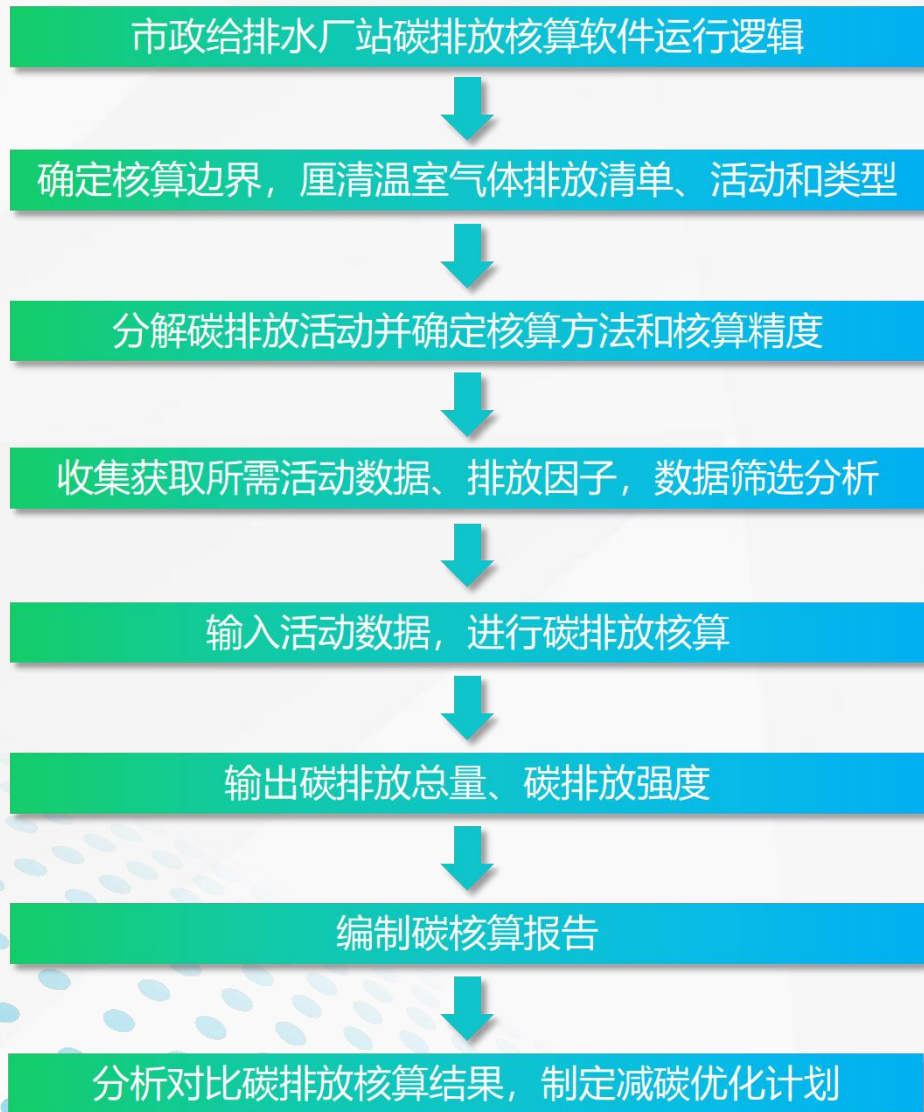
**间接排放:**  
城镇污水和污泥运输及处理过程中消耗燃油燃气和电力导致的碳排放





# 碳核算及碳排放现状

碳核算程序及开发的评估系统



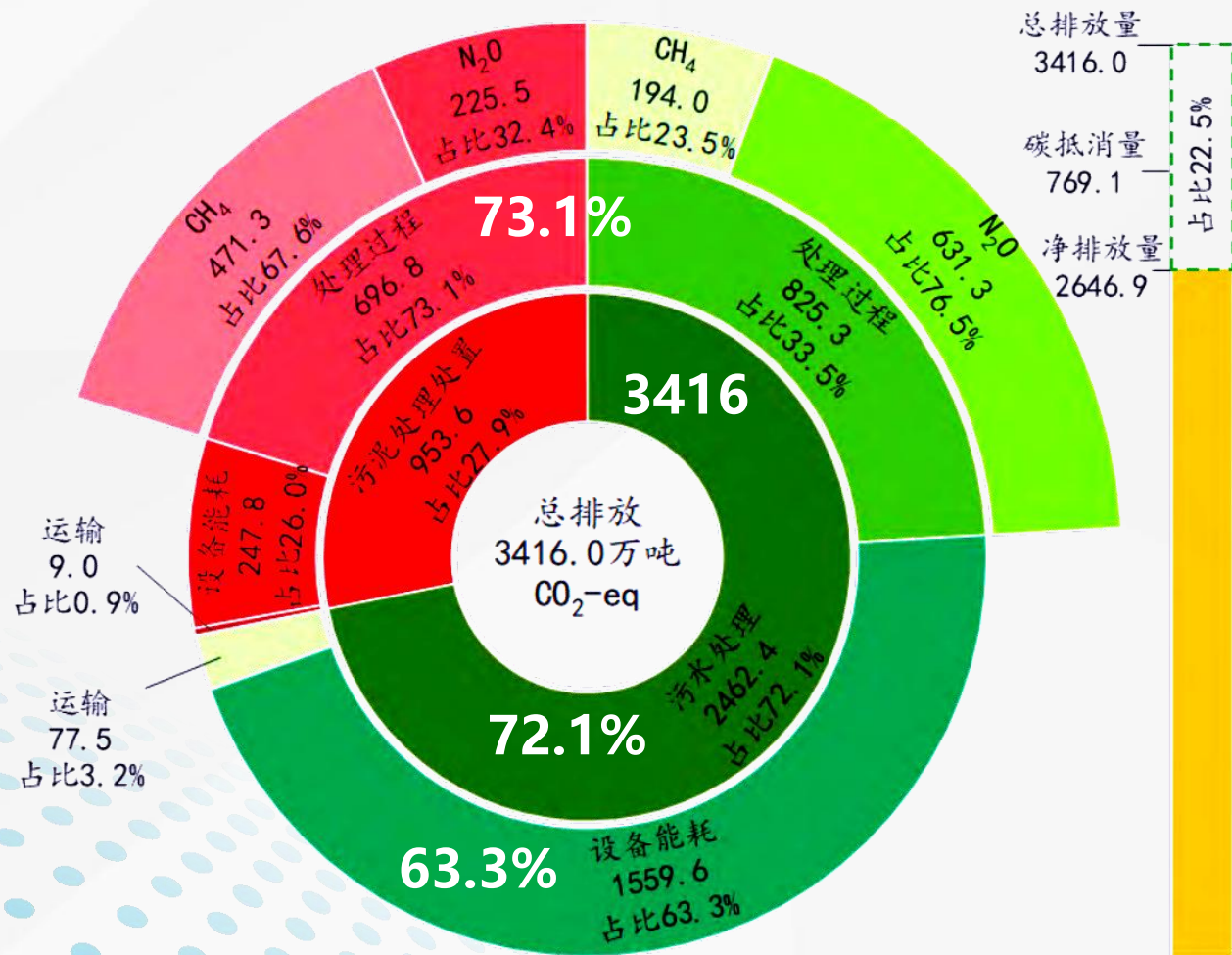
市政给排水厂/站碳核算评估程序 (HD开发)





# 碳核算及碳排放现状

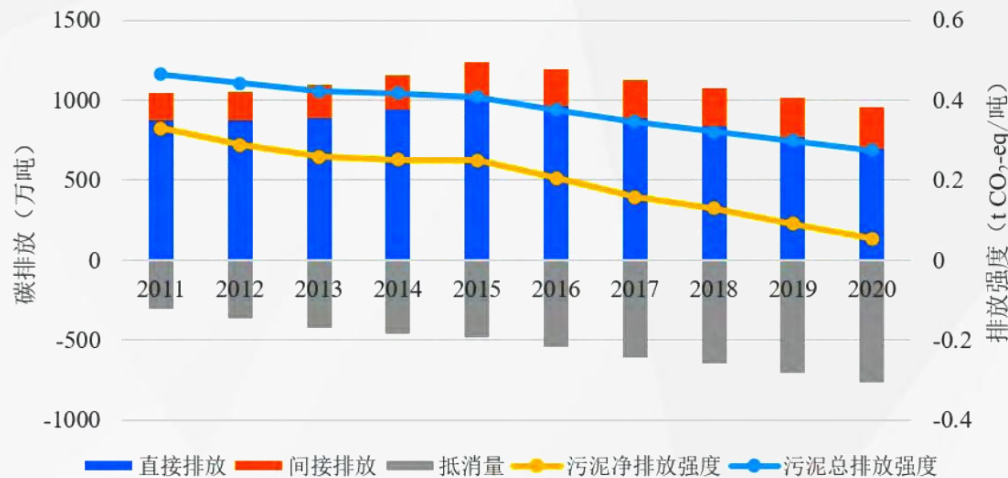
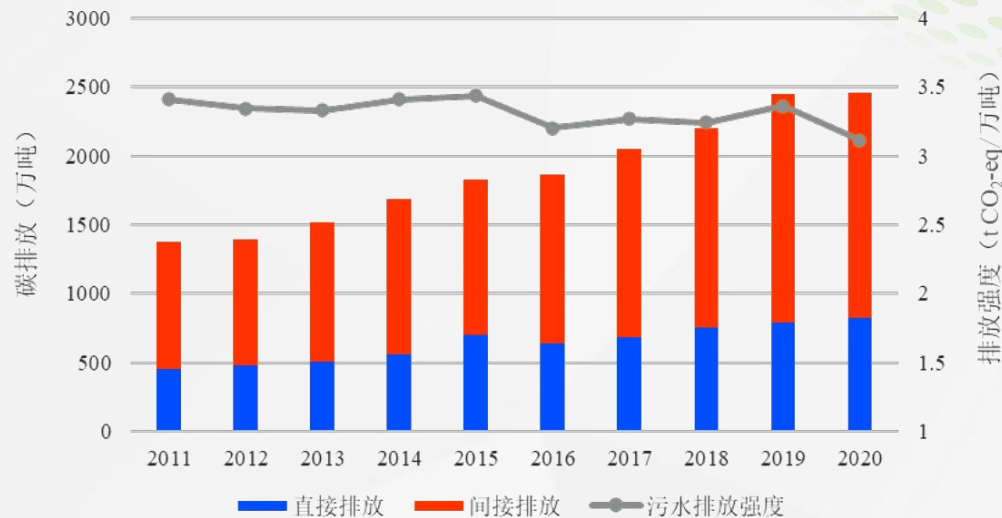
## ▼ 2020 年全国城镇污水处理全过程碳排放



(单位：万 t CO<sub>2</sub>-eq)

## 全国城镇污水碳排放现状

## ▼ 全国城镇污水、污泥碳排放及排放强度趋势

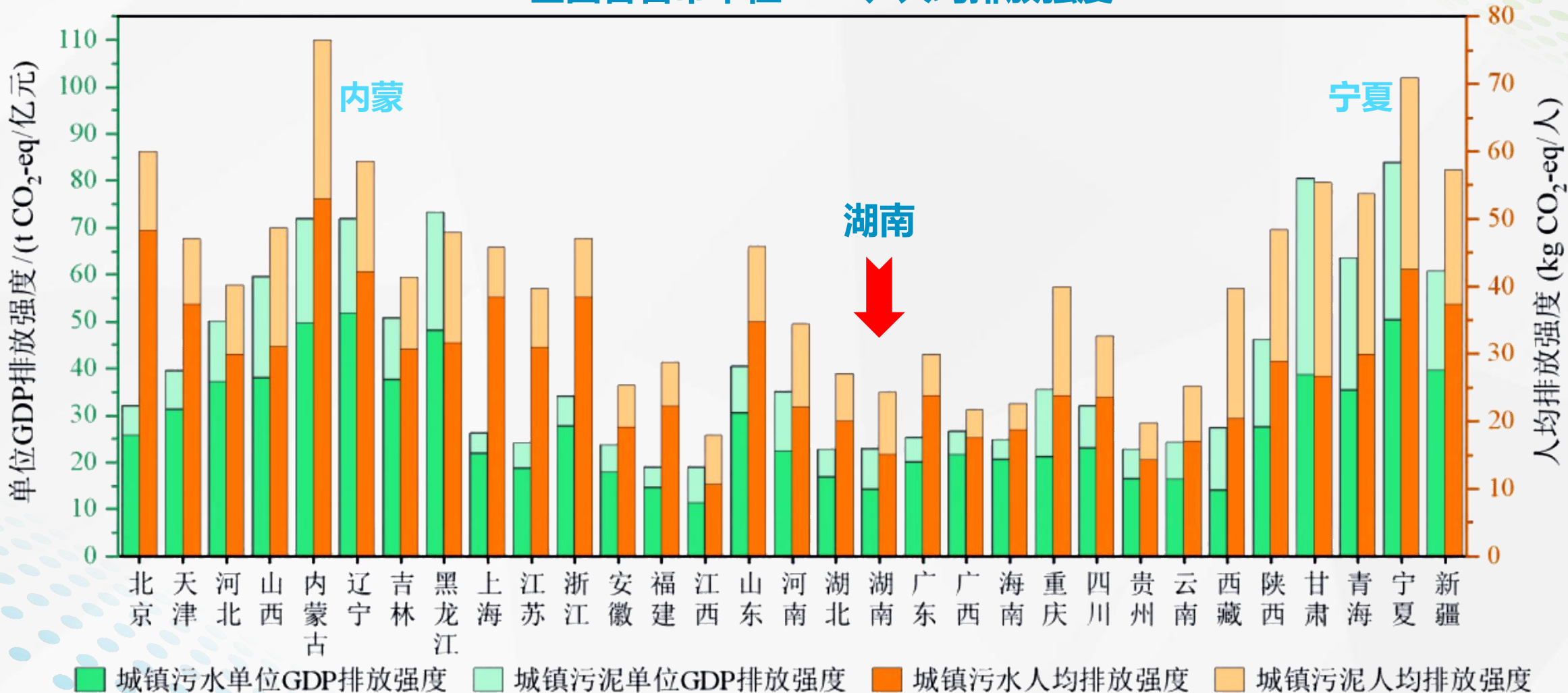




# 碳核算及碳排放现状

全国分省污水碳排放强度

## ▼ 全国各省市单位GDP、人均排放强度



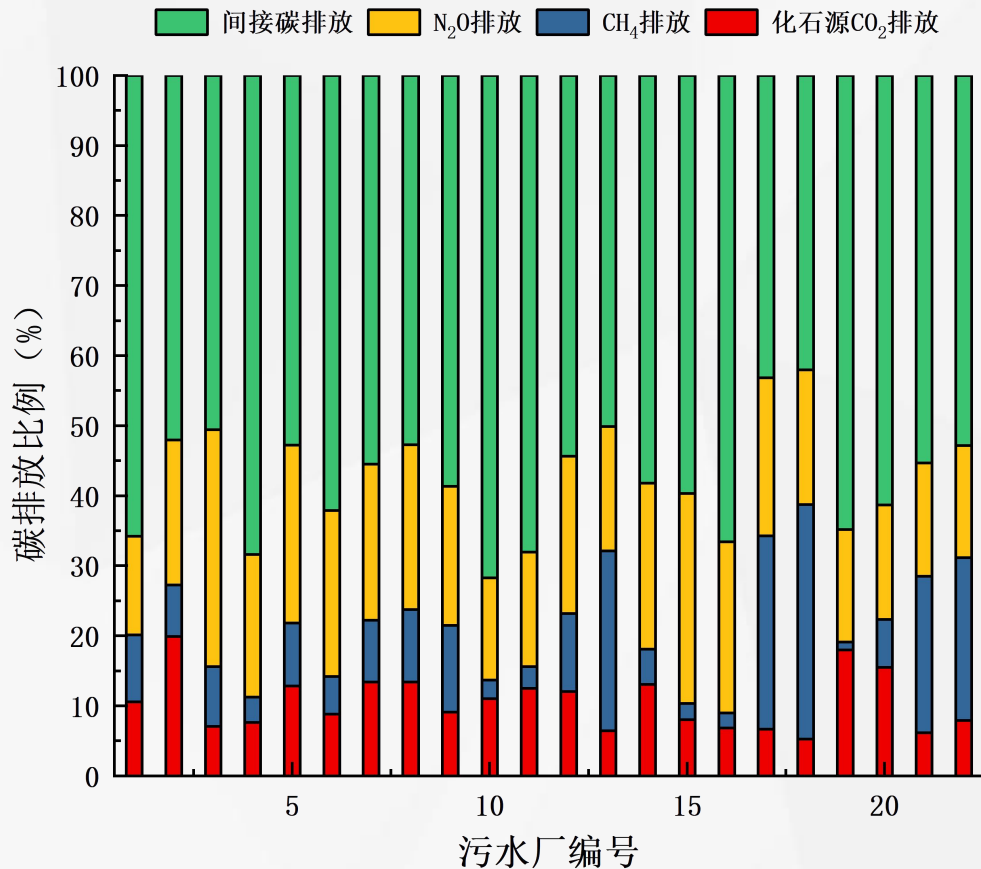
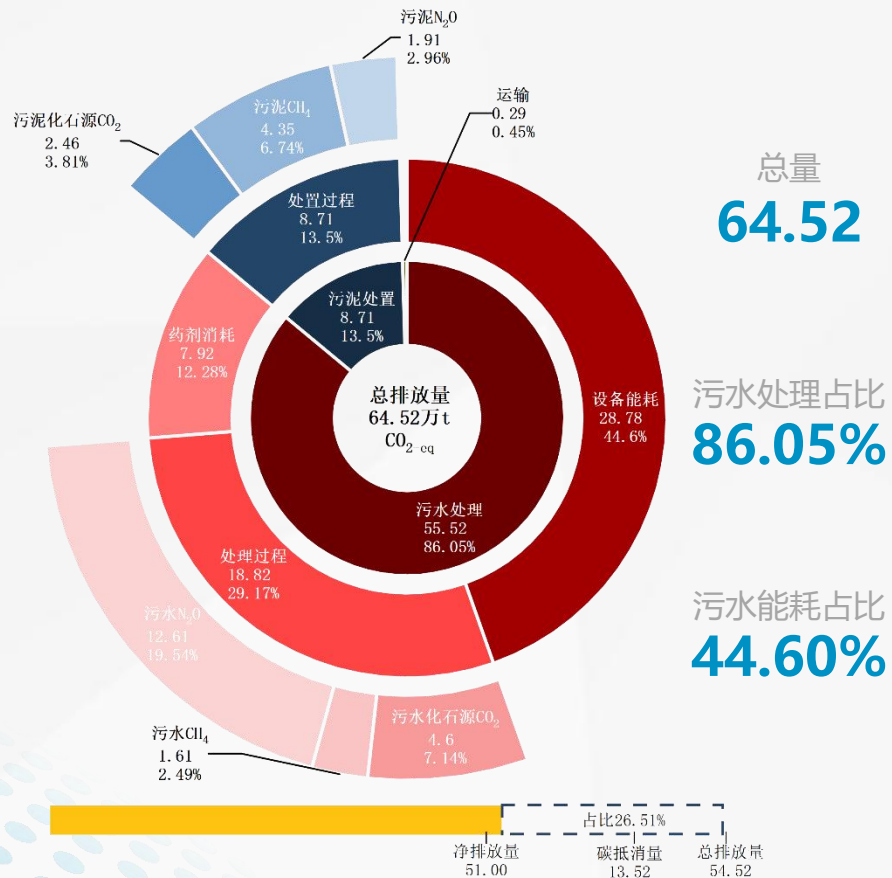




# 碳核算及碳排放现状

## 长沙市污水厂碳排放现状

### 2022年长沙市污水处理全过程碳排放现状



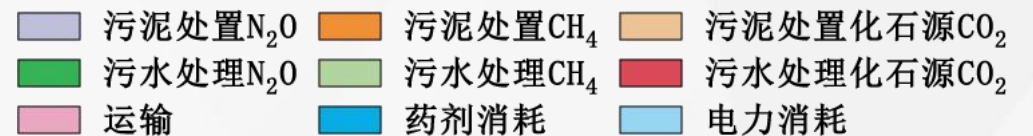
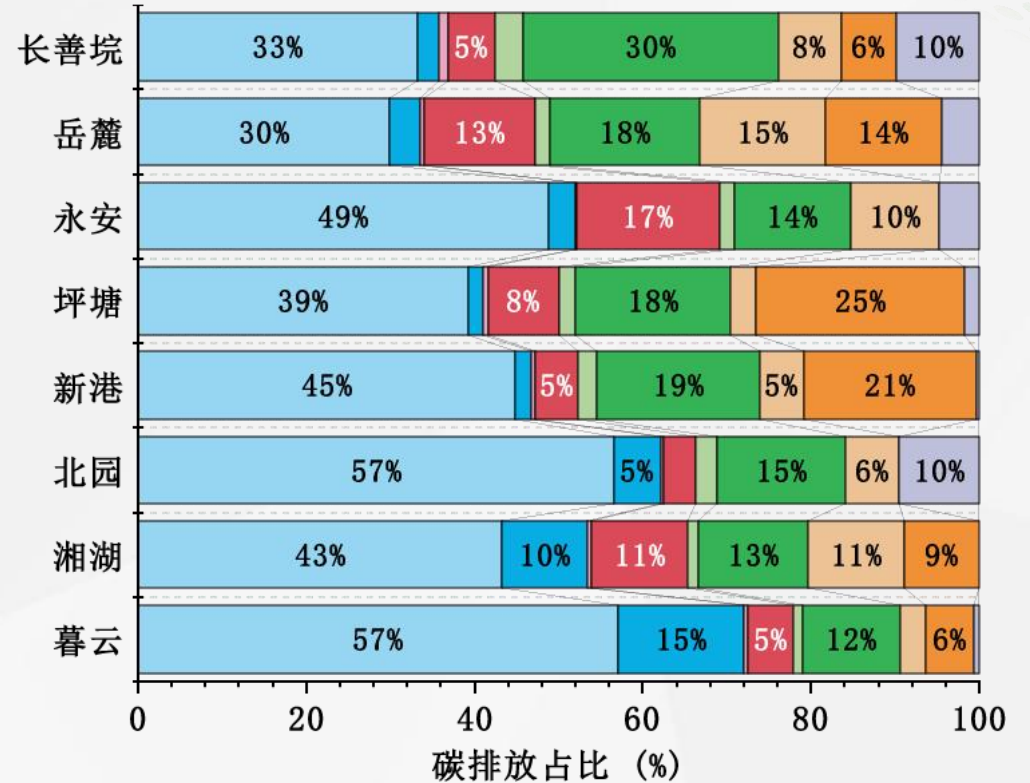


# 碳核算及碳排放现状

## 长沙市污水厂碳排放现状

### ▼ 2022年长沙市污水处理全过程碳排放现状

污水处理厂	设计规模 万m <sup>3</sup> /d	占地面积m <sup>2</sup>	处理工艺	设计出水标准
长善垸污水处理厂	36.0	287218	AAO	一级A
岳麓污水处理厂	45.0	262960	AAO	地表准IV类
永安污水处理厂	4.5	17681	AAO	一级A
坪塘污水处理厂	12.0	69411	MSBR+人工湿地	地表准IV类
新港污水处理厂	5.0	56870	MSBR	一级A
北园再生水厂	8.0	82181	MSBR	地表准IV类
湘湖污水处理厂	14.0	30667	AAO + MBR	地表准IV类
暮云污水处理厂	8.0	65000	AAO + MBR	地表准IV类

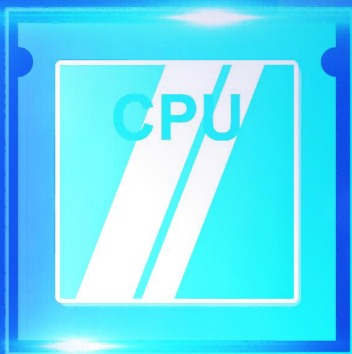




IN CHANGSHA, CHINA  
中国·长沙

# THP

## 03 污水厂潜能分析





# 污水厂能量潜能分析

厘清污水处理厂可用能源的“家底”

## 污水处理行业能否实现“碳中和”



### 行业发展现状

国外已有能量平衡或碳中和案例

### 担忧和质疑的聚焦点

污水处理厂真的有那么多可回收能量去实现‘碳中和’吗？

### 有机能量

污水中的有机物（COD）转化为污泥，再通过厌氧消化，产生甲烷后用于热电联产

### 再生水？

是资源，不是能源

01  
有机化  
学能



### 污水余温热量

市政污水流量稳定、水量充足、带有余温，蕴含大量热能

02  
余温  
热能

03  
光伏  
发电



### 光伏发电电能

处理设施上部空间，为太阳能光伏发电提供了必要的场地条件





# 污水厂能量潜能分析

## 有机化学能潜能测算

### 美国理论测算

1

美国原污水中80%为废热，20%为化学能。理论最大有机化学能为**1.93kW·h/m<sup>3</sup>** (COD = 500 mg/L)，热能理论最大值为**7.0 kW·h/m<sup>3</sup>** ( $\Delta t = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

### 国内理论测算

2

**1gCOD**可以产生**0.25gCH<sub>4</sub>**,即单位COD含化学能为**13.9 kJ/gCOD**,如按COD可转化为热值更高的甲酸、草酸、乙炔、甲醛考虑,则为17.8~28.7 kJ/gCOD。**COD = 400 mg/L**的污水理论最大化学潜能值为**1.54 kW·h/m<sup>3</sup>**,**COD = 500 mg/L**时,则为**1.93 kW·h/m<sup>3</sup>**,按**COD = 300 mg/L**计算,理论最大化学潜能值为**1.16 kW·h/m<sup>3</sup>**

测算: 郝晓地教授团队

### 测算案例



测算目的: 各种能源占比及其实际转化效率



规模 60万m<sup>3</sup>/d, AAO工艺



进出水水质、主要运行参数

初沉与剩余污泥经过厌氧消化稳定后脱水减量,厌氧消化池产生的沼气假设通过热电联产(CHP)加以利用。

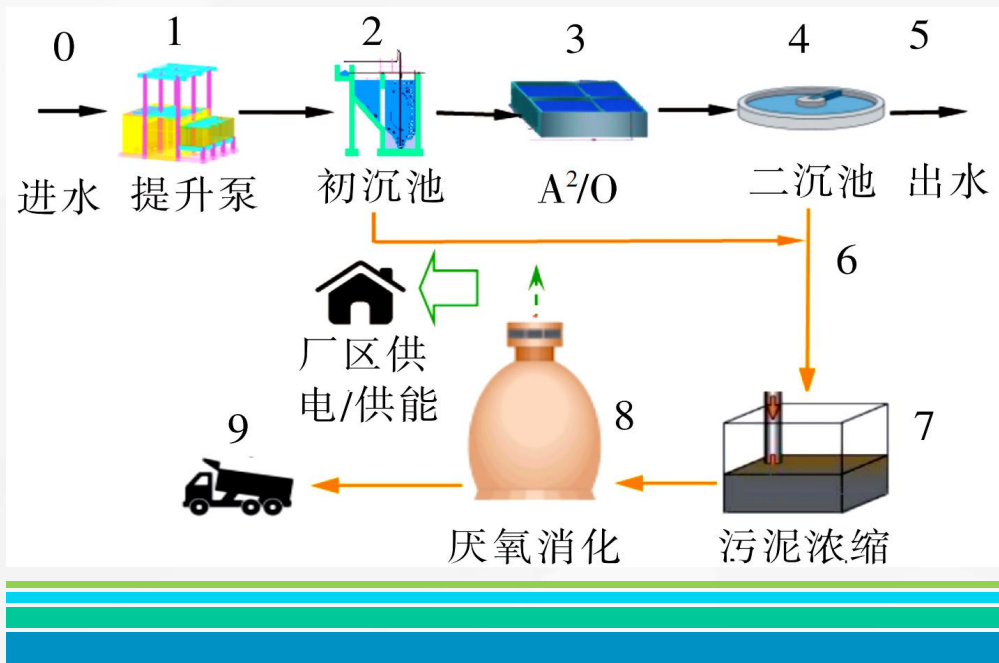
项目	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )		SCOD/ (mg · L <sup>-1</sup> )		TKN/ (mg · L <sup>-1</sup> )		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N/ (mg · L <sup>-1</sup> )		TP/ (mg · L <sup>-1</sup> )		外回流 比/%	内回流 比/%	曝气池 DO/ (mg · L <sup>-1</sup> )	厌氧消化污泥 停留时间/d
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水				
数值	400	42	312	0	37	5	0	13	5	1	100	150	2	20





# 污水厂能量潜能分析

## 有机化学能潜能测算



项目	理论能耗 /MJ	实际能耗 /MJ	碳排放 /kg	实测能耗 /MJ
提升泵	82320	147000	22108	142560
鼓风机	53485	411429	61878	379209
消化加热	192780	240975	29567	—
消化回收能量	-886426	-425484	-56626	-107142
衡算	-557840	373919	56928	—
平衡率	<b>270%</b>	<b>53.2%</b>	50%	—

### 案例污水厂化学能转化模型参考工艺流程

物料衡算中：

- 1 不考虑污泥外回流和混合液内回流
- 2 忽略初沉池和二沉池排泥对水量的影响
- 3 假定初沉池对COD截留不影响后续脱氮除磷效果
- 4 不考虑曝气池内COD挥发损失。

### 案例污水厂每天能量消耗/回收模型核算表

- ◆ 剩余污泥回收的能量可提供**能耗总量**的**53.2%**，缺口46.8%
- ◆ 能耗总量：**0.37kW·h/m<sup>3</sup>** 回收能量：**0.20 kW·h/m<sup>3</sup>**
- ◆ 有机化学能总量：**1.54kW·h/m<sup>3</sup>**
- ◆ 国内污水厂**厌氧消化有机化学能回收效率**：**0.20/1.54=13%**
- ◆ 其中：**能量回收有机物占比35%，热电联产电能转化率35%**





# 污水厂能量潜能分析



量大



稳定



绿色



环保

污水处理厂出水流量、水质稳定，水温变化不大，夏季20~24℃（低于环境温度），冬季10~15℃（高于环境温度），非常适用于水源热泵工程。

## 理论冷/热量

$$A = M \times \Delta t \times C$$

式中 A—城市污水冷/热量，kJ

M—污水质量，kg

$\Delta t$ —污水进、出水水源热泵机组温差，℃

C—污水比热容，取4.18 kJ/(kg·℃)

污水温差 $\Delta t=4\text{ }^\circ\text{C}$ ，理论热能值**4.64 kW·h/m<sup>3</sup>**

污水温差 $\Delta t=6\text{ }^\circ\text{C}$ ，理论热能值**7.00 kW·h/m<sup>3</sup>**

水源热泵系统能源回收率：（ $\Delta t=4\text{ }^\circ\text{C}$ ，具体测算见右表）

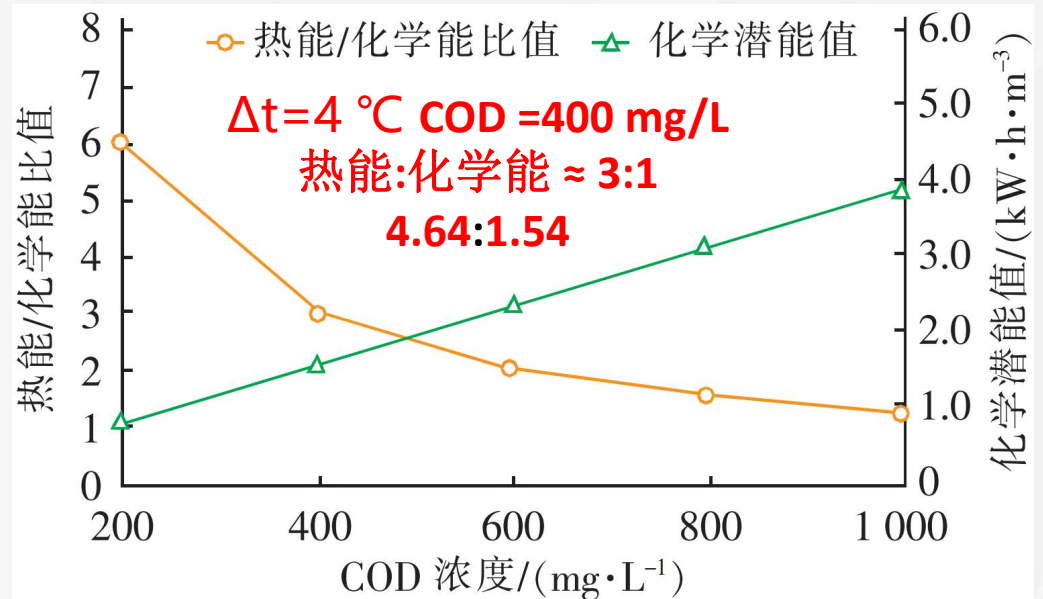
- ◆ 机组利用夏季：1.4148÷4.64=30.5%
- ◆ 机组利用冬季：2.3213÷4.64=50.0%
- ◆ 系统实际夏季：1.18÷4.64=25.43%
- ◆ 系统实际冬季：1.77÷4.64=38.15%

## 污水余温热能潜能测算

项目	夏/制冷	冬/制热
COP值（能效系数）	4.16	4.24
制冷/热量（10 <sup>4</sup> MJ）	1.68	2.74
电能当量（kW·h）	<b>总 18625</b>	<b>30377</b>
机组能耗（kW·h）	<b>损 4477</b>	7164
净产电能能量（kW·h）	<b>净 14148</b>	<b>23213</b>

### ▲水源热泵每万吨水产生当量电能测算表

### 不同COD浓度下污水热能与化学能比值及1m<sup>3</sup>污水所含化学潜能理论值▼





# 污水厂能量潜能分析

## 光伏发电电能潜能测算



### 万吨污水主要构筑物面积

我国污水厂处理**万吨污水**对应的主要构筑物平面面积**1147~1576 m<sup>2</sup>**，平均值**1402 m<sup>2</sup>**。  
考虑规模效应，处理水量越大，数值越小。



### 光伏板发电能量测算

#### E20-327型光伏板性能

单板占地面积 **4.65 m<sup>2</sup>**

单板发电电能 **1.09 kW·h**

案例厂可回收的太阳能总量 **82725 MJ/d**

污水厂运行能耗占比 **10.4%**

### 国内部分污水厂主要构筑物占地面积

项目所在地	设计水量 m <sup>3</sup> /d	总面积 m <sup>2</sup>	单位水量面 积m <sup>2</sup>
上海	10	13936	1393.6
西安	20	31528	1576.4
长春	39	59016	1513.2
重庆	60	82725	1378.8
上海	200	229486	1147.4



光伏发电总量  
“微不足道”





# 污水厂能量潜能分析

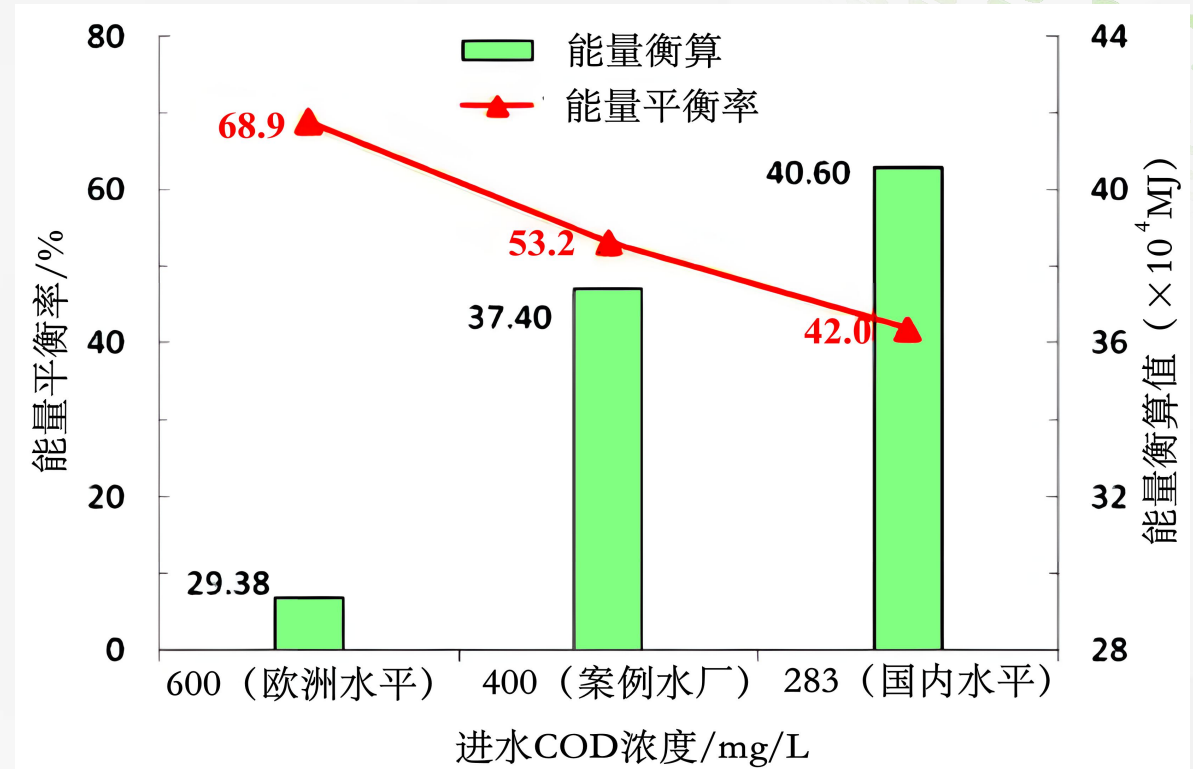
## 潜能分析结论

### 污水潜能 (按电当量折算 总能耗0.37 kW·h/m<sup>3</sup>)

- ◆ 案例厂实际运行能耗 **0.37 kW·h/m<sup>3</sup>** 化能赤字**46.8%**
- ◆ 热电联产化学能 **0.20 kW·h/m<sup>3</sup>** 占运行能量**53.2%**
- ◆ 供热、制冷热能(全部出水) **1.77 kW·h/m<sup>3</sup>、1.18kW·h/m<sup>3</sup>**
- ◆ 利用污水余温热能填补化能缺口, 污水余温利用水量百分比:  
**供热 9.8%、制冷 14.7% 均 < 15%**
- ◆ 有机化学能+污水余温热能, 不考虑太阳能即可实现“能量平衡”

### 基本结论

- ◆ 污水源热泵仅需**<15%**的较小出水量, 可覆盖**至少50%**运行能耗, 是污水处理厂实现“碳中和”的**实力担当**。
- ◆ 国内剩余污泥**有机化学能**回收量约占运行总能耗的**40.70%-53.2%**, 欧洲达**68.9%**, **COD=100**, 只能覆盖**13.57%**。
- ◆ **光伏发电**获得的能量约占运行总能耗的**10%**, 占比偏小。
- ◆ **热能: 有机化学能**潜能值总量之比=**90%: 10%**
- ◆ 传统工艺化学能综合转换效率: **12~13%** (国内)
- ◆ 污水余温转换效率: 夏季**25%**, 冬季**38%**



### 市政污水处理厂消耗能量 可回收能量关系

- ◆ 欧美国家 可回收能量潜能总值 = (9-10) × 能耗
- ◆ 中国北方 可回收能量潜能总值 = 4 × 能耗
- ◆ 中国南方 可回收能量潜能总值 = 2 × 能耗





# 污水厂能量潜能分析

进水COD 400mg/L  
余热温差 4°C

余热潜能:化学潜能=3:1

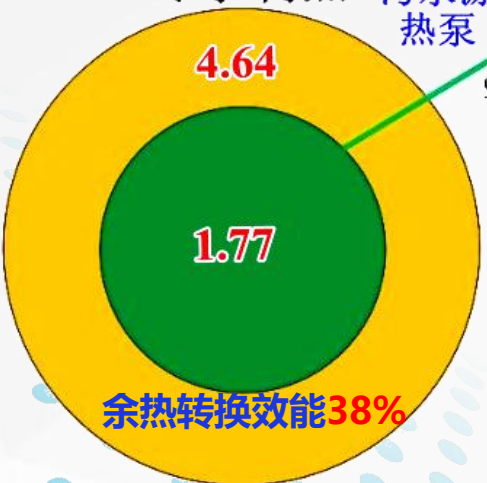
余热电能:化学电能=5~6:1

化学能覆盖总能耗53.2%

污水厂总能耗 WWTP 0.37  
COD=400 mg/L  
 $\Delta t=4^\circ\text{C}$

污水余温热能  
冬季制热

污水源热泵  
9.8%



- 理论能量
- 实际能源
- 能源消耗

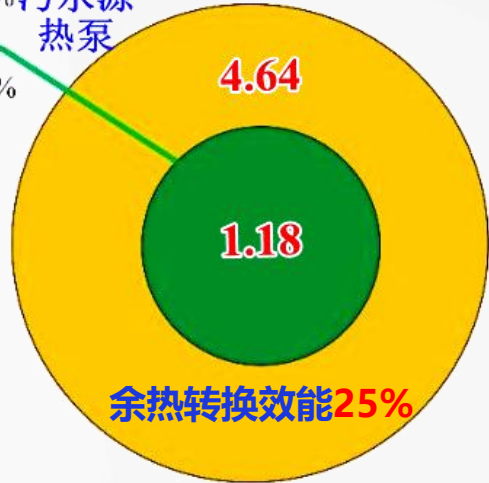
再生回用

kW·h/m<sup>3</sup>

- 理论能量
- 实际能源
- 能源消耗

污水余温热能  
夏季制冷

污水源热泵  
14.7%

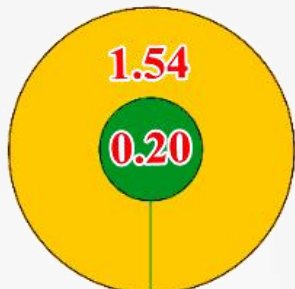


再生回用

kW·h/m<sup>3</sup>

- 理论能量
- 实际能源
- 能源消耗

化学能 kW·h/m<sup>3</sup>



有机物能源回收率35%  
有机物氧化/矿化 65%

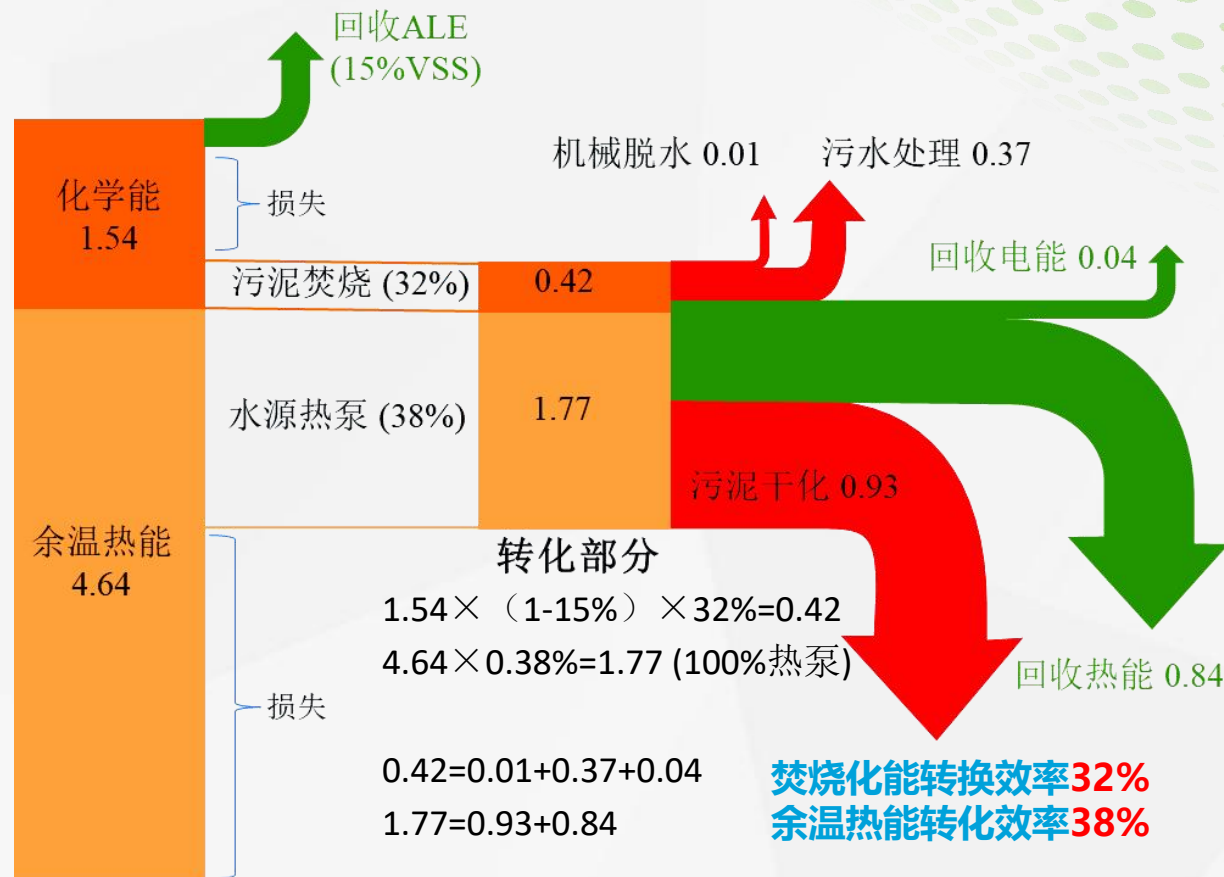
热电联产转换效率35%  
化学能总转化效率13%

余热能补缺: 46.8%

碳中和

污水源热泵  
14.7%

## 化学能热能关系及能量平衡图



潜能 kW·h/m<sup>3</sup> 厌氧消化并热电联产电能转换效率13% < 焚烧38%

污泥焚烧有机化学能回收与水源热泵余热热能回收结合完全可以实现污水处理厂能量平衡, 且有盈余能量可以外输使用

▲ 国内污水厂传统工艺回收能量平衡图解



IN CHANGSHA, CHINA  
中国·长沙

FOI

04

# 碳中和策略





# 污水厂碳中和设计运行策略

## 污水系统碳中和策略及路线图

### 污水系统碳减排路线图

01



●管理部门

#### 控制源头

- ◆ 合理设定出水标准
- ◆ 强化工业废水管理
- ◆ 推动源分离技术

污水不被稀释

02



●运营部门

#### 过程优化

- ◆ 清淤、修复及更新管道
- ◆ 智能传感器
- ◆ 投药抑制
- ◆ 水泵运行优化
- ◆ 曝气优化
- ◆ 数字模拟技术
- ◆ 剩余污泥处理优化

#### 减碳技术

03



#### 工艺升级

- ◆ 低碳型污水处理新技术
- ◆ 推动资源回收

- 设计部门
- 规划部门
- 管理部门

04



#### 低碳能源

- ◆ 强化能源回收
- ◆ 清洁能源使用

#### 替碳技术

- 运营部门
- 管理部门





# 污水厂能量潜能分析

## 污水系统碳减排技术行动策略

类型	策略	单位	技术内容	实时特点
源头控制	合理设定出水水质标准	管理部门	充分考虑出水排放水体水质状况和环境容量，因地制宜、宽严相济地制定地方出水标准。应充分发挥自然水体的自净能力，接纳水体较为洁净时，可适当放低出水标准；若接纳水体水质较差，则应提高出水标准，保护水环境	在保证不影响接纳水体水质条件下避免盲目追求高标准出水水质而导到高额电耗和药耗，实现碳减排，需要构建自然水体环境水质监测和评估赏罚机制、加强出水对自然水本环境影响的模拟和反馈，也依赖于其他行业或部门治理提标自然水体行动
	强化工业废水管理		严格工业废水排入市政污水管渠的水质标准，加强工业废水排入点的管理与水质监测	需要建立常规工业污/废水接入市政管网的监管和管理
	推动源分离技术		采用粪尿分离的卫生器具，将粪便尿液单独收集、输送、处置和利用	卫生器具并不在本指南限定管理边界中，但其升级为源分离便器不仅可对粪尿中营养物循环利用，还可节省用水量，降低污水处理厂氮磷负荷，降低能耗和碳排放量；需进行投资分析，同时依赖政策导向，打通上下游产业链条提升该技术吸引力；通过减少污染物负荷，可减少污水处理厂47-95kg CO <sub>2</sub> -eg/（人·a）碳排放量
过程优化	抑制污水管渠CH <sub>4</sub> 产生	运营部门	通过药剂投加、断面优化、强制通风等技术措施减少污水管渠中厌氧环境和死区，抑制甲烷菌活性，从而减少CH <sub>4</sub> 产生	药剂投加和强制通风需要进行成本能耗、碳排放分析，避免碳排放污染转嫁
	降低电力消耗		主要与提升泵和曝气设备有关，通过更新、升级设备或优化控制提升设备使用率，升级设备为变频水泵、高效曝气系统，更换为微气泡曝气头，采用前反馈或后反馈曝气优化控制技术，降低运行能耗，减少碳排放量	新式设备购置需要成本投资，投资回报期长降低升级设备积极性；节能潜力与所在地区高度有关，节能减排潜力有限；曝气设备和控制优化应考虑曝气调整对污水处理单元直接温室气体排放的影响；可减少20~50%能耗
	减少污水处理单元直接碳排放		通过污水处理单元参数优化、运行调整、曝气控制等措施，减少易生产CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O环境，如应用数学模型技术构建运行条件、污染物去除效率、温室气体生成三方关系，反馈控制优化，节约能量、药剂等消耗，降低碳排放量	数学模型技术比较成熟，也有较多应用案例参考，但其作用发挥依赖于传感器，控制电气设备等的发展；模型的建立与校正对专业知识要求较高
	剩余污泥处理优化		生成减少剩余污泥在厂区内堆放时间，及时进行处理、处置，减少污泥处理处置量，降低处理和场外运输能耗	应与污泥资源化协同进行考虑和设计
工艺升级	低碳型污水处理新技术	设计规划部门与管理部门	低碳型污水处理新技术指碳排放强度低于目前主流生物处理工艺革新技术，源于降低电力或化学药剂消耗或降低CH <sub>4</sub> 和NO生成环境条件和生成排放量，如紧凑型生物处理工艺和高效脱氮工艺，提高处理负荷	技术革新所需周期长、投入大，强化产学研合作；部分新技术仍处于初期阶段，国内应用并不广泛；约可降低50%运行电力消耗和碳排放量，部分新技术虽然能够减少电力或化学药剂消耗，但CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O直接碳排放量并不一定降低
	推动资源回收		通过水中资源回收代替去除，如磷、挥发性脂肪酸等	资源回收需要顶层设计与政策导向，资源回收项目前期需要大量成本投资，回报周期依产物而不同，应做好成本回报估算和碳排放平衡核算；资源回收需要与其他行业协作，通过碳补偿方式实现城镇水务系统碳减排
低碳能源	强化污水能源回收与清洁能源使用	管理部门与运营部门	提取或转化污水与剩余污泥中蕴含的化学能、热能等能源，以替代化石能源消耗，如推广或升级传统厌氧消化技术至先进厌氧消化技术（热水解预处理或高固浓度）和水源热泵技术，分别回收污泥中化学能和污水中热能，利用厂区面积收集太阳能与风能	能源回收需要政策导向，厌氧消化设施投资大，占地面积较大，但所产CH <sub>4</sub> 应用范围广，可污水厂自用，也可输入市政供气管道；污水热能回收潜力大，厂内自用量有限，需通过碳补偿实现碳减排，减排潜能与所在地区有关，需继续完成应用场景开发和评估；能源回收需要顶层设计和政策导向，如允许产生的CH <sub>4</sub> 、热能入网等；厂区光伏发电能力有限，以污水处理厂为例，约可补偿厂区10%耗电量。



# 污水厂碳中和设计运行策略

## 污水厂碳中和模型及宏观策略

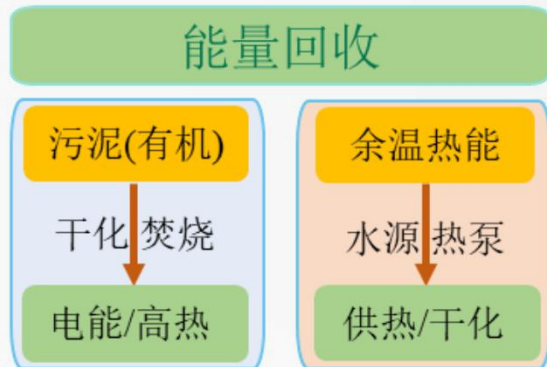
### 污水厂中和模型

◆ 传统污水处理模式本质

**以能耗换水质**



**回收**



**碳中和**

碳足迹模型

碳中和/负碳模型

碳汇模型

**吸收**

### 中和思路

- ◆ 把右边搞得多多的
- ◆ 把左边搞得少少的

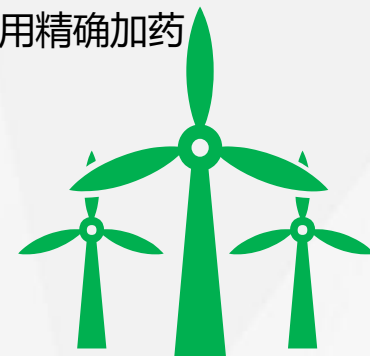
### 碳中和设计运行宏观策略

#### 开源

- ◆ 改善管网输送体系，提高污水有效收集率，切实提高污水厂处理效能
- ◆ 外部碳源协同处理
- ◆ 优化工艺，提升能量回收能力
- ◆ 自产清洁能源，推广光伏发电

#### 节流

- ◆ 采用能耗更低的创新型低碳污水工艺
- ◆ 改造升级曝气系统，采用精确曝气
- ◆ 优化原料投入环节，采用精确加药
- ◆ 用能设备节能降耗
- ◆ 精细化管理
- ◆ 智慧化运营







# 污水厂碳中和设计运行策略

## 污水厂碳减排路径

氧利用率提升  
> 30%

用电量节省  
10%

污泥产量降低  
10%

抗冲击负荷能力  
> 20%

### 污水处理厂减排路径

#### 减碳路径

##### 1、源头控制

强化工业废水管理  
推动源分离技术

##### 2、自动化控制

精确曝气  
水泵运行优化  
加药系统精细化控制

##### 3、紧凑型污水处理工艺

好氧颗粒污泥 (AGS) 工艺

##### 4、高效脱氮技术

短程硝化反硝化工艺  
厌氧氨氧化反应

##### 5、污水/污泥资源回收

磷回收  
    - 自含磷水相  
    - 自含磷固相  
    - 自污泥焚烧灰分  
剩余污泥回收藻酸盐 (ALE) 产品

#### 替碳路径

##### 1、化学能回收

污泥厌氧消化+热电联产  
污泥共消化

##### 2、污水余温热能提取

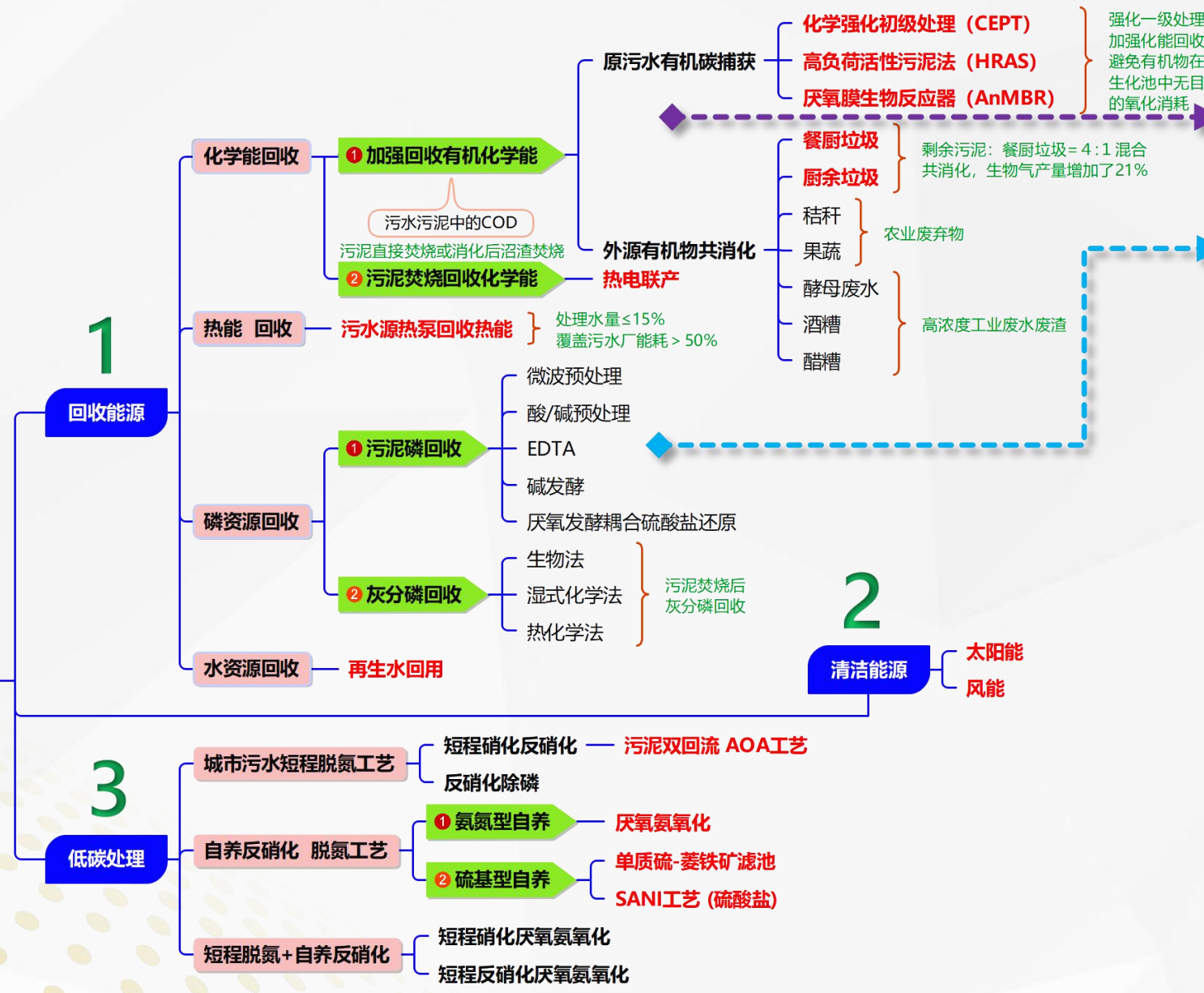
##### 3、光伏发电



# 污水厂碳中和设计运行策略

## 污水厂低碳处理·能源回收技术路线

设计  
双碳污水厂  
工艺关键  
创新技术



强化一级处理	COD 截留效率/%
CEPT	38.0~80.0
HRAS	40.0~71.6
AnMBR	60.0~92.0

方法	污泥类型	总磷	污泥浓度 / (g · L <sup>-1</sup> )	磷释放率
微波预处理 (348 K)	剩余污泥	30.96 mg/g 污泥	47.14	3%~3.5%
酸/碱预处理	剩余污泥	1 035.8 mg/L	32.84	40% (pH = 4) 39% (pH = 10) 58%~68% (pH = 11~12)
EDTA	剩余污泥	370.0 mg/L	18.6	62.2%
NaHS	剩余污泥	177.3 mg/L	14.6	44%
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	剩余污泥	385.9 mg/L	19.5	40.8%
碱发酵 (pH=11)	铁盐初沉污泥	29.6 mg/L	—	69.4%
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	铁盐初沉污泥	457.76 mg/L	24.6	56.2%

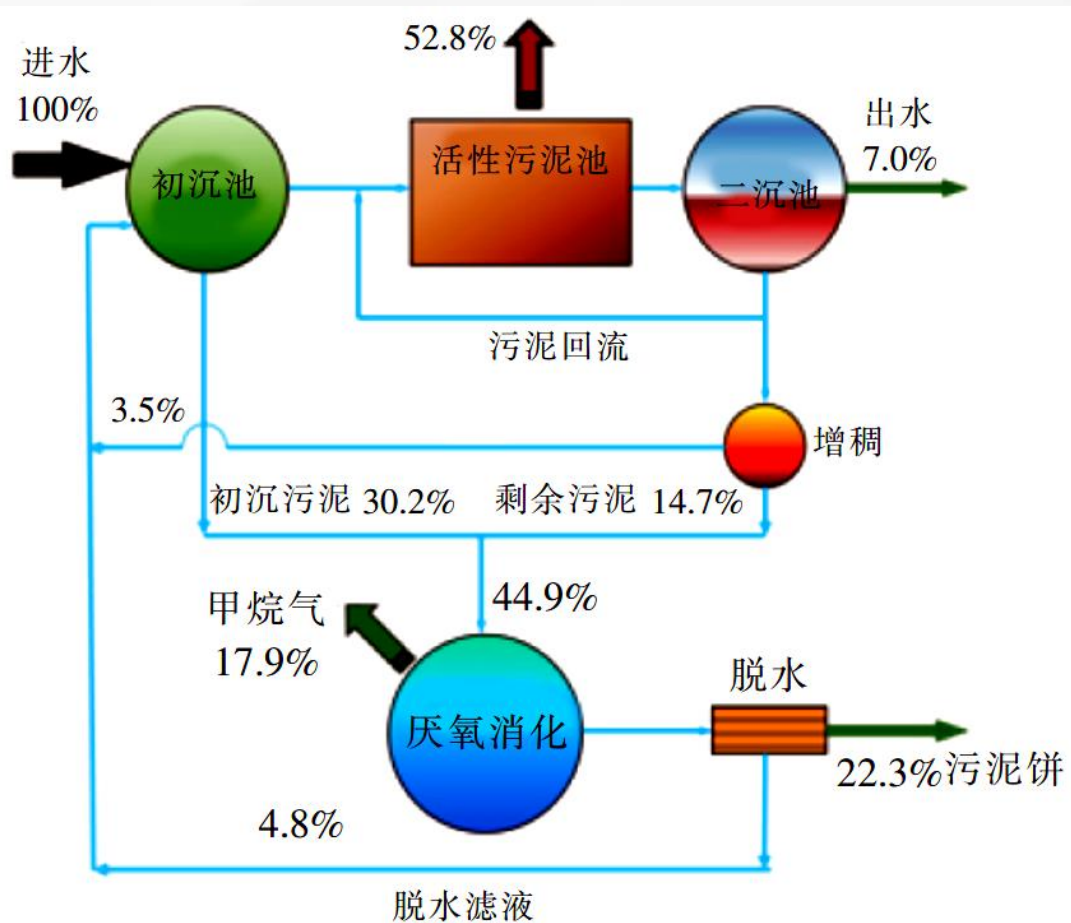






# 污水厂碳中和设计运行策略

## 污水厂碳捕获技术路线

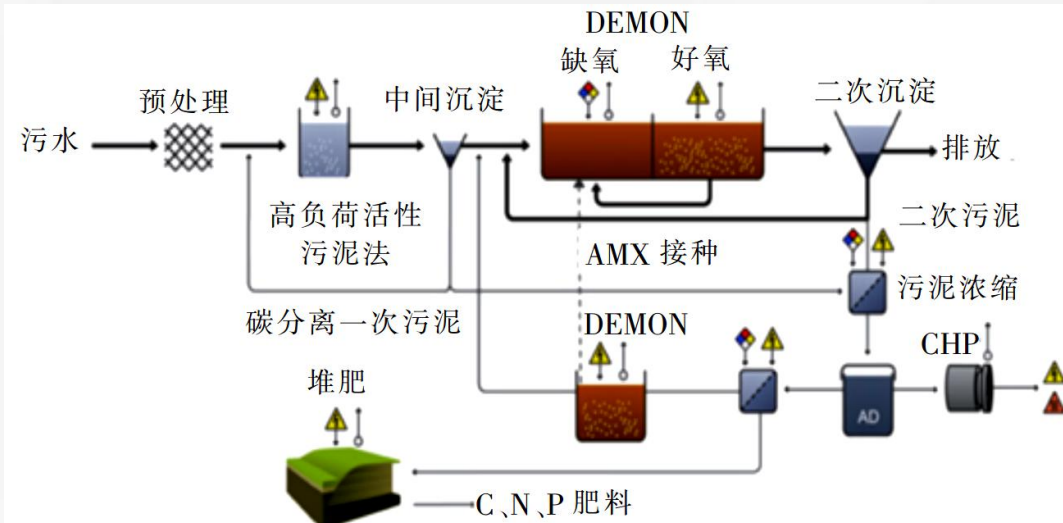


### 碳源捕获V1.0 技术路线

传统初沉池+二沉池截流污泥，消化+热电联产提取能量，40~60%COD进入消化，17.9%COD产气

### 碳源捕获V2.0 技术路线

通过引入外源有机废物协同消化，提高厌氧消化系统沼气产率



### ▲ AB工艺高效碳捕获 + 主流厌氧氨氧化 + 高效厌氧消化

特点：60%~75%COD进入污泥 缺点：B段碳源不够

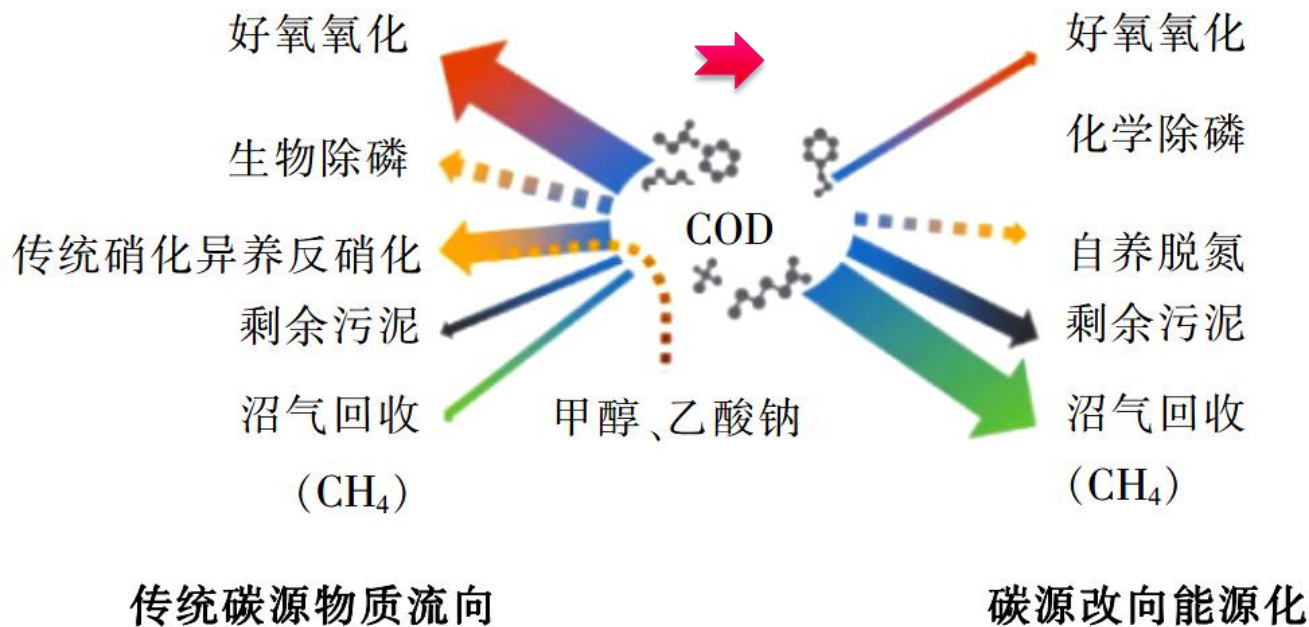
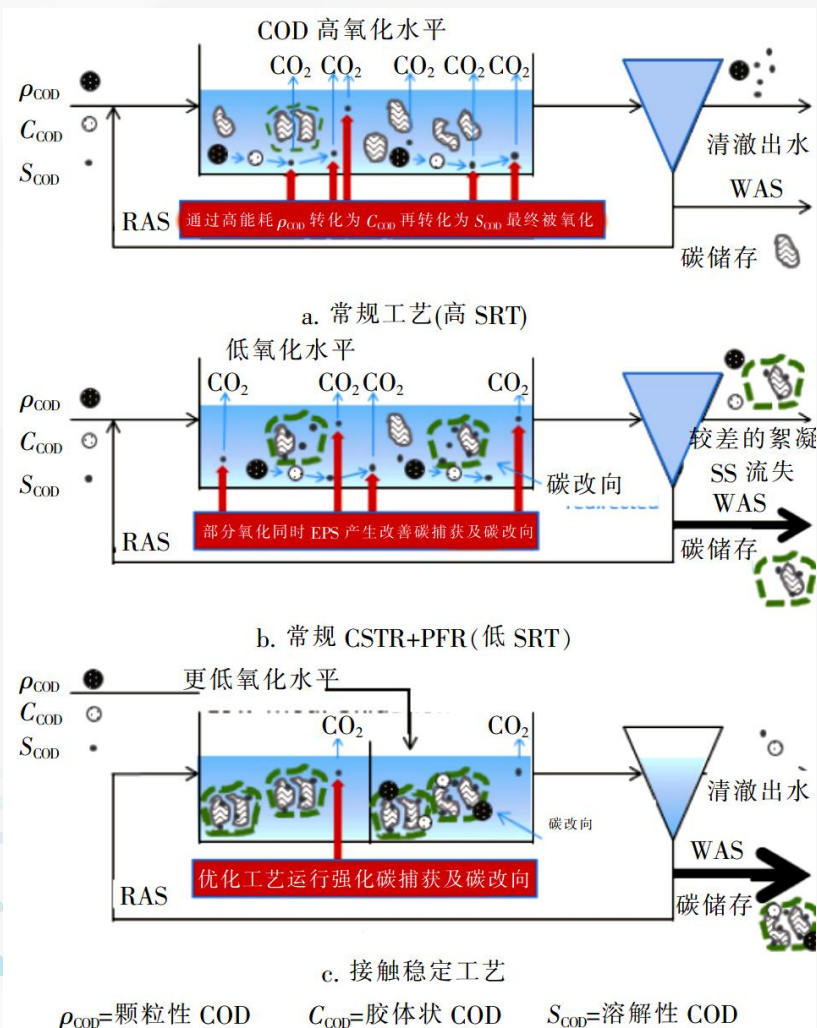
### 碳源捕获V3.0 技术路线

使COD在污水处理过程中由“污染物降解途径”转向到“能源化利用途径”转变，60%~75%COD可进入污泥消化产气。



# 污水厂碳中和设计运行策略

## 碳捕获：高负荷活性污泥法HRAS



### 高负荷活性污泥法HRAS工艺构型

特点：A 段污泥增量+后续自养脱氮+耦合污泥能源化。

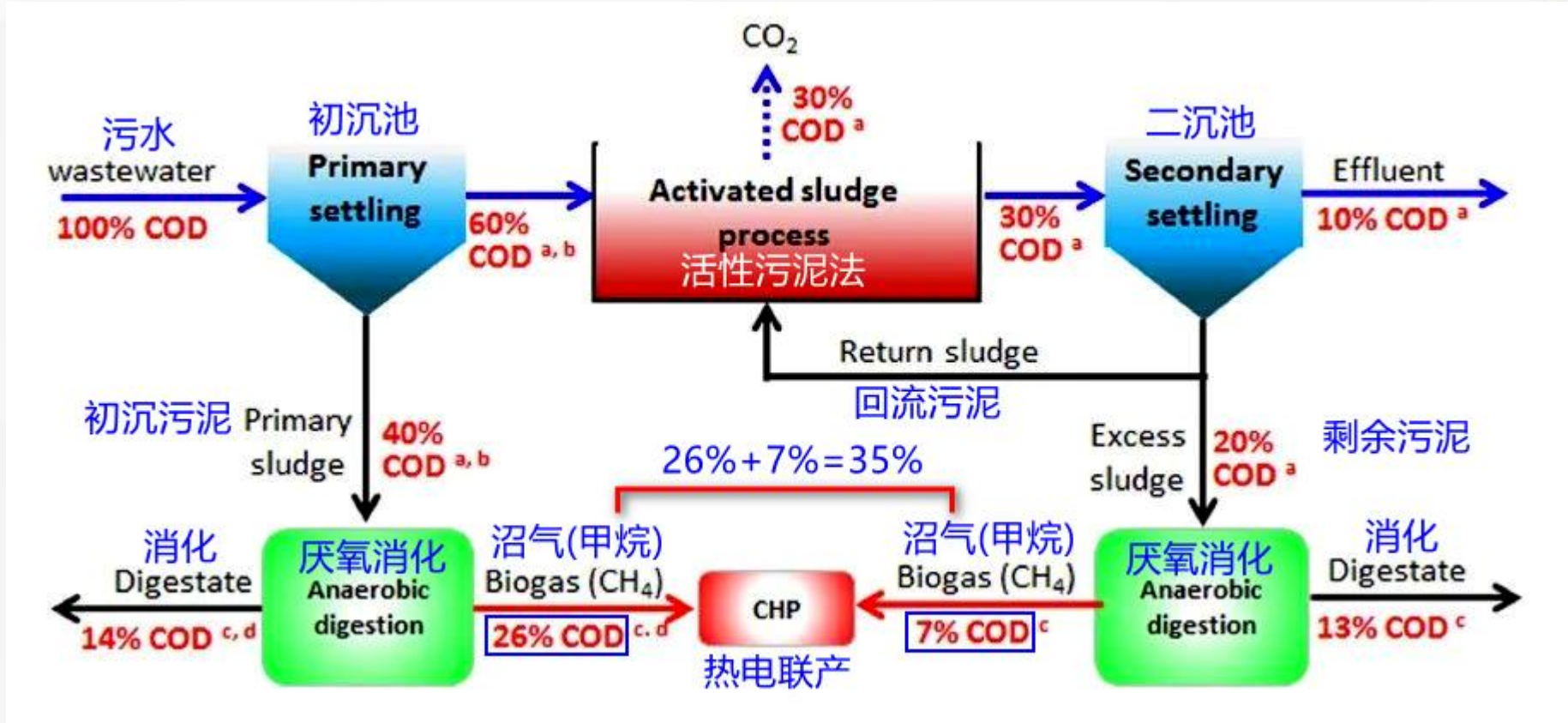
主要参数：A 段采用低SRT( $\leq 1$  d)、较短的HRT( $\sim 30$ min)及较低的DO( $\leq 1$  mg/L)实现对颗粒性、胶体状及部分溶解性COD的快速吸附及浓缩富集。





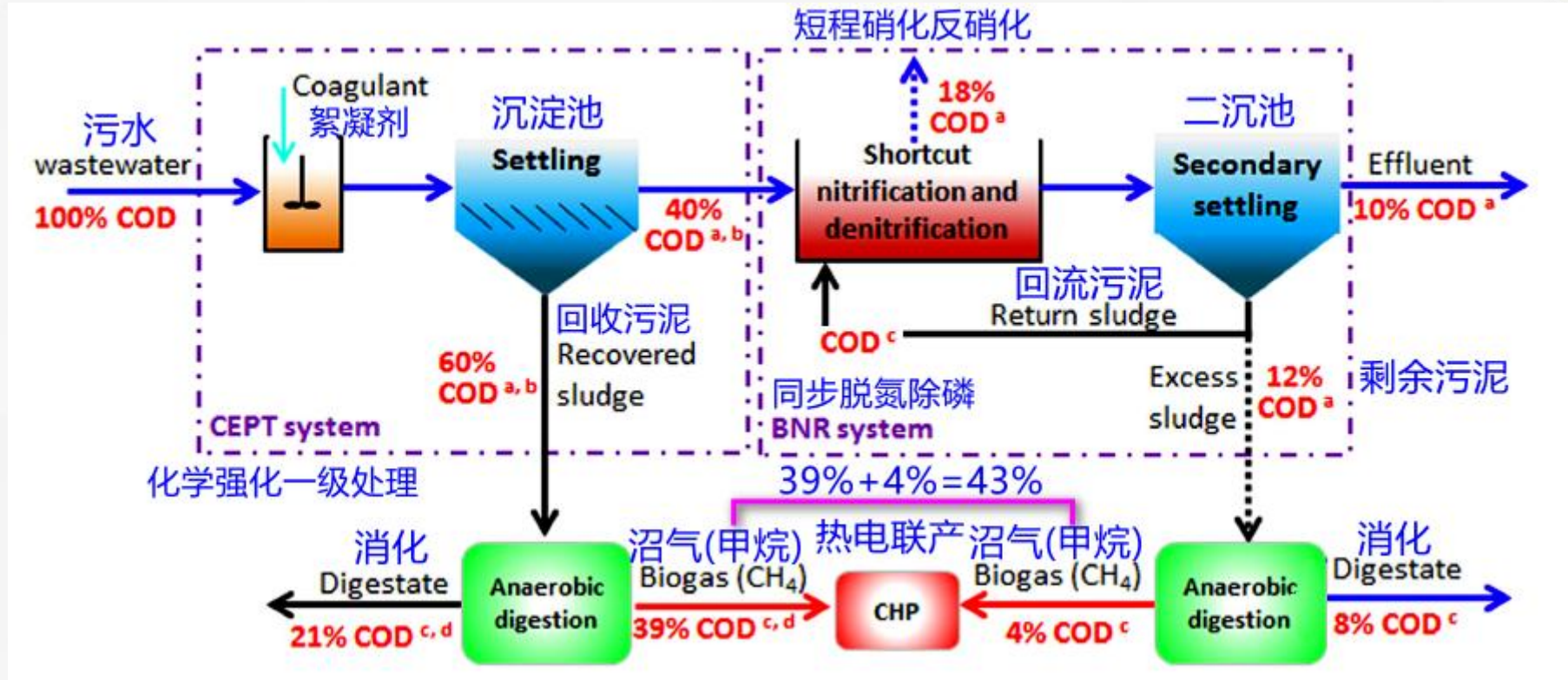
# 污水厂碳中和设计运行策略

传统工艺能源效率



## 传统工艺能源效率

市政污水处理工艺能耗0.3-0.6 kWh/m<sup>3</sup>，平均**0.45 kWh/m<sup>3</sup>**合1620 kJ/m<sup>3</sup>。COD=500mg/L (**1.93kWh**)，单位COD能耗为3.24 kJ/g COD。传统工艺有机物物质流情况表明，污泥厌氧发酵为甲烷可进行能量回收的有机物占比为**35%**（初沉污泥26%+二沉污泥7%），即4.87 kJ/g COD，**热电联产**电能转化效率**35%**，可转化电能1.70 kJ/g COD(**0.236kWh**)，能源效率仅为1.70/3.24×100%=**52.47%**。



### CEPT+短程硝化-反硝化工艺 能源效率

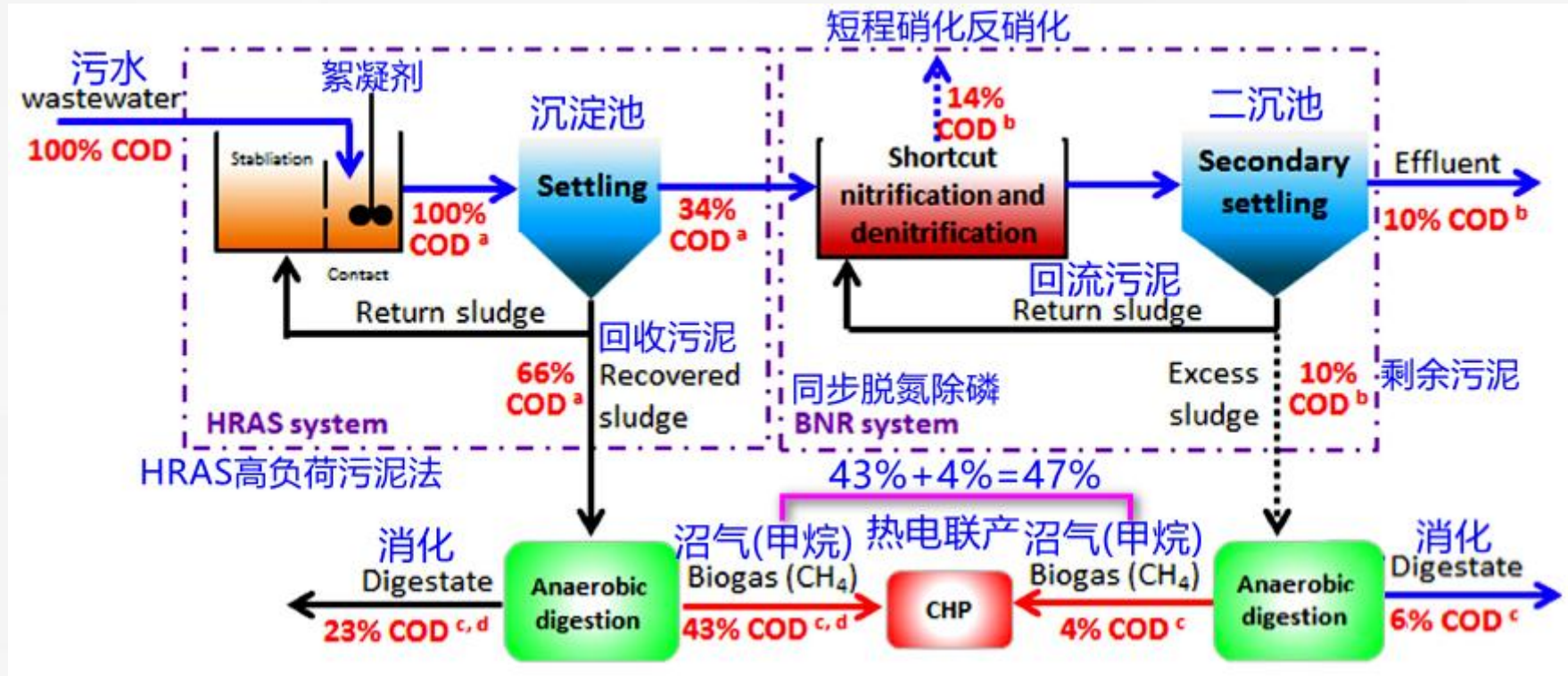
市政污水处理工艺能耗0.3-0.6 kWh/m<sup>3</sup>，平均**0.45 kWh/m<sup>3</sup>**合1620 kJ/m<sup>3</sup>。COD=500mg/L (**1.93kWh**)，单位COD能耗为3.24 kJ/g COD。CEPT工艺投加化学药剂，颗粒性有机物去除效果显著，溶解性有机物较差，几乎全部进入B段。厌氧氨氧化工艺对有机物敏感，一般采用短程硝化-反硝化与CEPT工艺耦合。该工艺组合可捕集污水中**43%**的有机物用于能量回收，产生电能2.09 kJ/g COD (**0.29kWh**)，能源效率为 $2.09/3.24 \times 100\% = \mathbf{64.51\%}$ 。





# 污水厂碳中和设计运行策略

## HRAS+短程硝化反硝化能源效率



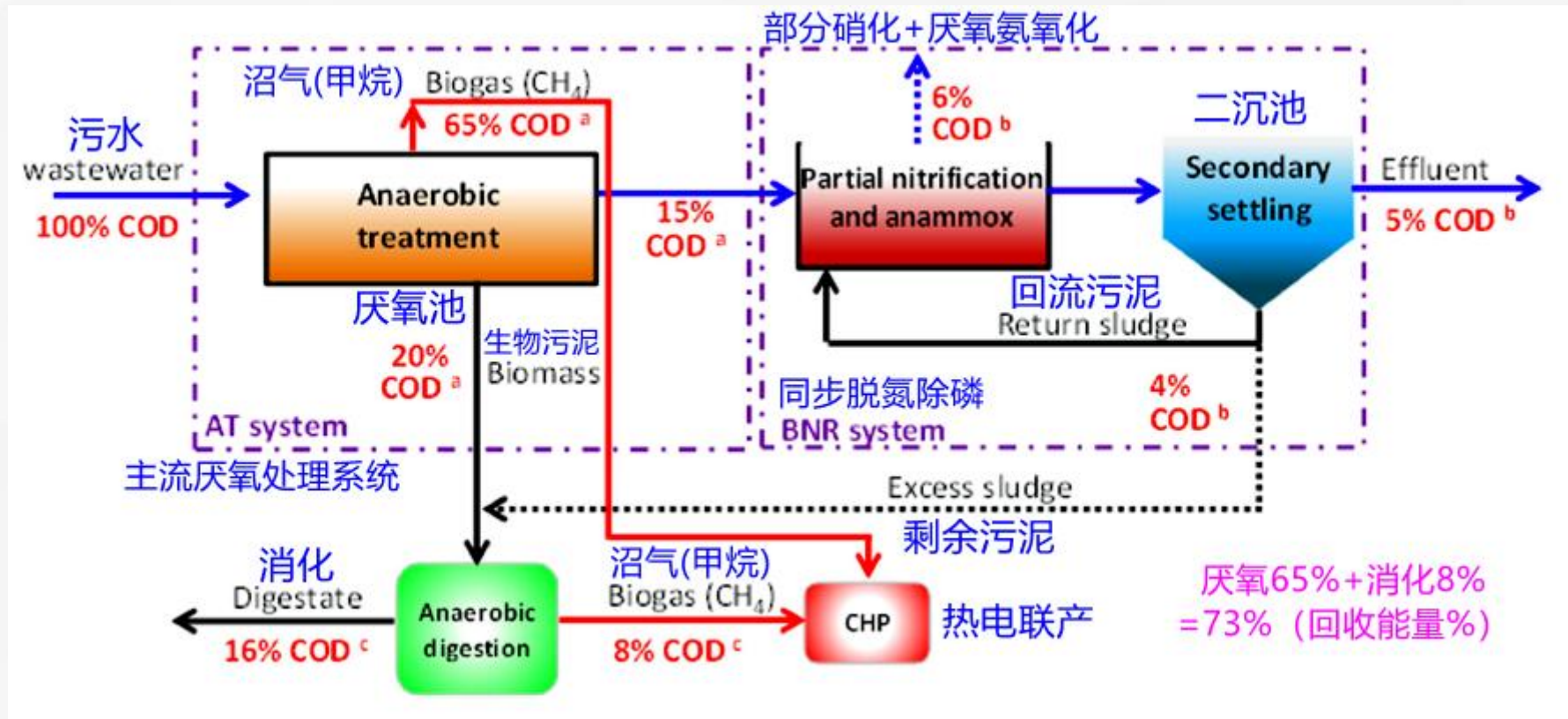
### HRAS+短程硝化-反硝化工艺 能源效率

市政污水处理工艺能耗0.3-0.6 kWh/m<sup>3</sup>，平均**0.45** kWh/m<sup>3</sup>合1620 kJ/m<sup>3</sup>。COD=500mg/L (**1.93**kWh)，单位COD能耗为3.24 kJ/g COD。HRAS工艺对有机物的去除效率为55-65%，仍大量有机物进入B段。采用短程硝化-反硝化工艺与HRAS工艺耦合，可捕集污水中**47%**的有机物用于能量回收，产生电能2.29kJ/gCOD (**0.317**kWh)，能源效率为2.29/3.24×100%=**70.68%**。



# 污水厂碳中和设计运行策略

## 厌氧+短程硝化反硝化能源效率



### 厌氧+短程硝化-反硝化工艺 能源效率

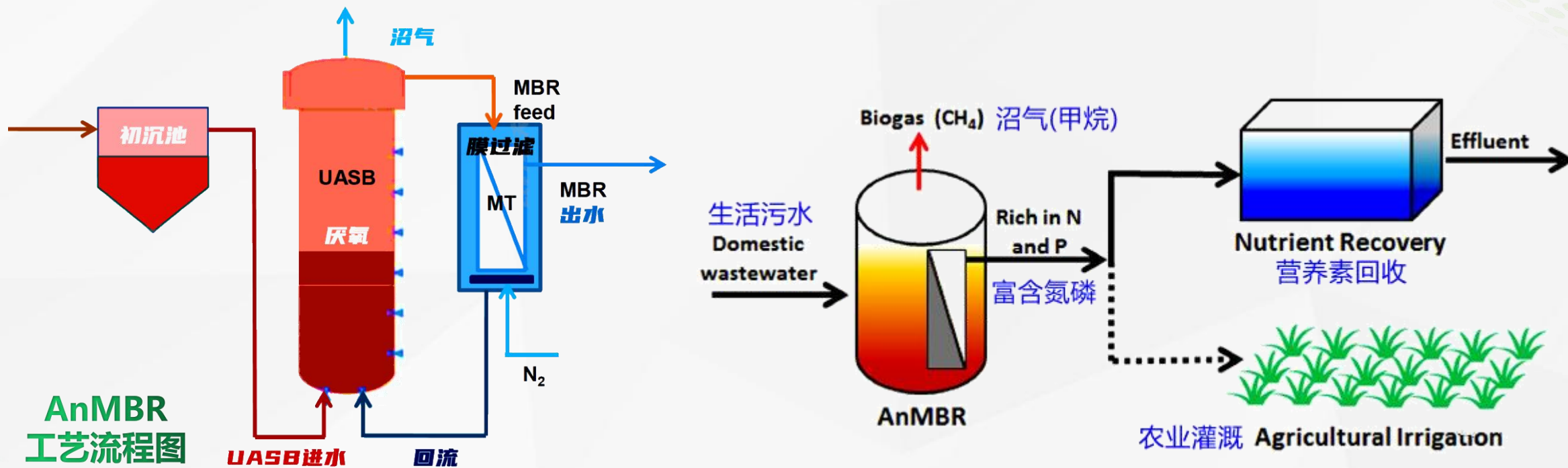
市政污水处理工艺能耗0.3-0.6 kWh/m<sup>3</sup>，平均0.45 kWh/m<sup>3</sup>合1620 kJ/m<sup>3</sup>。COD=500mg/L (1.93kWh)，单位COD能耗为3.24 kJ/g COD。主流厌氧处理通过厌氧微生物将有机物直接转化产生甲烷，B段进水C/N比较低，选用更为节能的短程硝化-厌氧氨氧化与其耦合，65%的有机物通过厌氧直接转化为甲烷，8%的有机物通过厌氧发酵产甲烷，最终可捕集有机物**73%**，产生电能3.55 kJ/g COD (0.493kWh)，能源效率为 $3.55/3.24 \times 100\% = 109.57\%$ 。





# 污水厂碳中和设计运行策略

## AnMBR+短程硝化反硝化能源效率



AnMBR  
工艺流程图

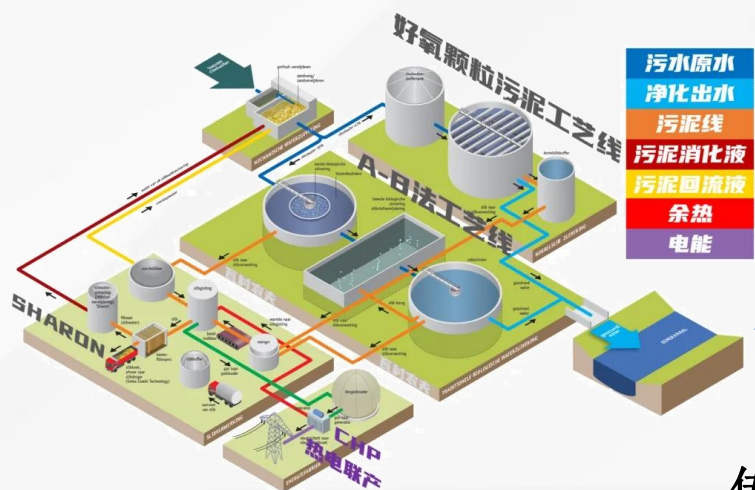
### AnMBR+短程硝化-反硝化工艺 能源效率

厌氧膜生物反应器 (AnMBR) 属于主流厌氧处理。①在低能耗情况下实现较高的有机物捕集/去除效率 (90%以上), 强化能源回收; ②出水富含氮、磷等, 有利于营养回收; ③膜对病原体等去除效果良好, 富氮、磷尾水亦可用于农业灌溉。碳捕捉率**90%**, 产生电能4.38 kJ/g COD, 能源效率为 $4.38/3.24 \times 100\% = 135.19\%$ 。



# 污水厂碳中和设计运行策略

## 积极采用关键创新工艺技术



碳排放强度: 0 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>



能量平衡  
碳中和

碳中和污水厂

好氧颗粒污泥

厌氧氨氧化、自养脱氮 03 好氧发酵

高负荷活性污泥

短程硝化反硝化 02 干化焚烧

传统活性污泥

传统全程硝化反硝化 01 脱水填埋

全程自养脱氮 04 厌氧发酵

A-B工艺

### 关键技术转变与创新

#### 能源供给+碳源捕获+深度脱氮+污泥厌氧消化

- 预处理: 悬浮颗粒→纤维素回收、微砂细砂去除
- 脱碳体系: 好氧颗粒污泥、A-B法、整体营养物回收
- 脱氮系统: 聚焦SDN、短程、厌氧氨氧化、自养脱氮
- 污泥处理: 传统填埋→碳化、能源化转变

碳排放强度  
0.86 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>



生化池

- 多模式
- 泥膜共生

传统污水厂: 以能消能







# 污水厂碳中和设计运行策略

## 污水厂能源的合理布局规划



### 01

#### 节能

10%~20%

主要针对好氧处理环节，采用**低碳创新工艺**、**高效精确曝气**、**智慧水厂**、**节能型设备**电机、风机和泵等，实现节能降耗



### 02

#### 可再生能源利用

10%~15%

利用污水厂的设施，有效利用**光伏发电**、风能、太阳热能、地热能等



### 03

#### 污水热能回收

2%-10%

**潜能巨大**

主要是**污水余温热能**，污水源热泵工程等。  
**15%**水回收余热可解决**50%**的能源消耗



### 04

#### 污泥处理产能

40%~55%

**欧洲约70%**

传统COD100: **13.6%**  
传统COD200: **27.1%**  
传统COD300: **40.7%**  
主要是**碳捕获**，**污泥厌氧消化产能**，**热电联产**

考虑污水源热泵的实际市场效应、政策导向，**能量平衡率为 60%~100%**

**掺入餐厨垃圾，提高有机质含量，可有效提高能量平衡率**

**能源中和≠碳中和，距碳中和仅一步之遥**

**碳中和必定实现了能源中和**



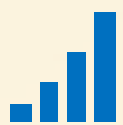






# 污水厂碳中和设计运行策略

## 污水厂污泥处理优选方式



碳排放主要来源

**深度脱水 填埋**



减排效应显著方式

厌氧消化产气, 供热消化、干化  
**厌氧消化产气利用**

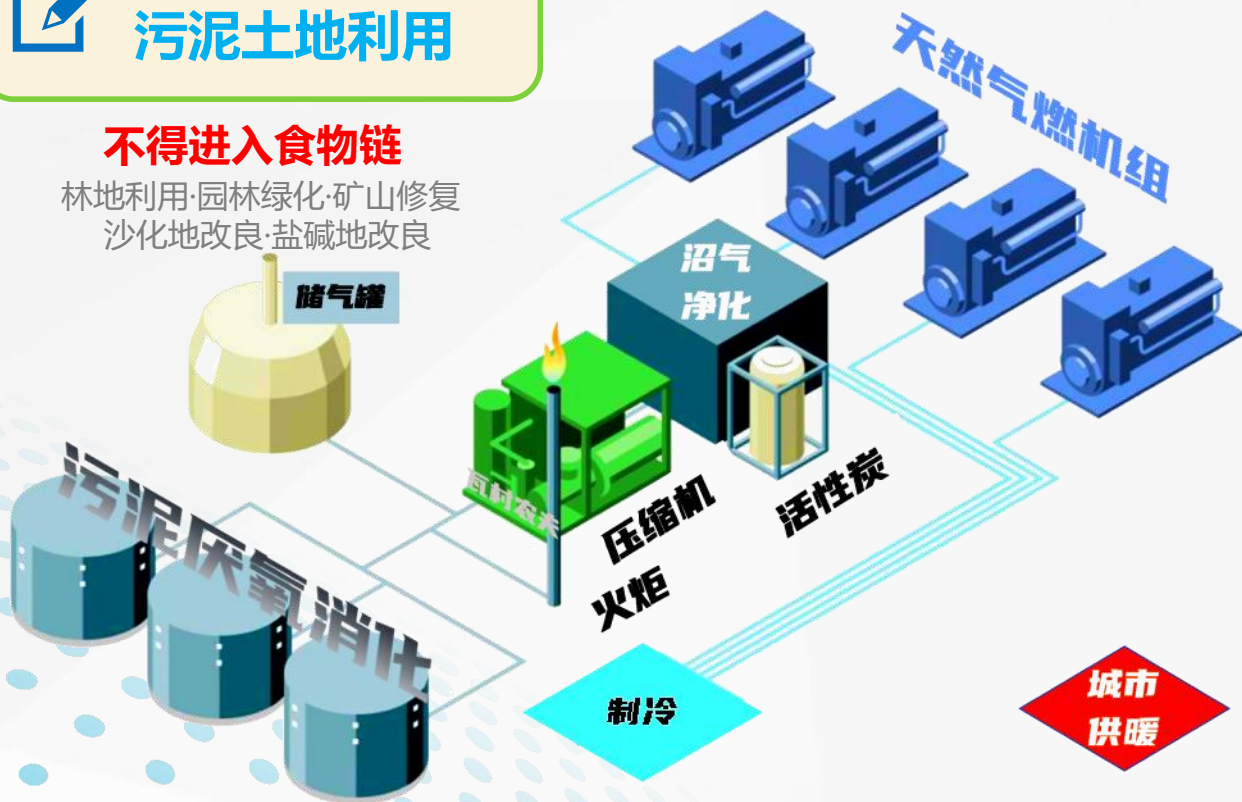


污泥处置优选模式

**污泥土地利用**

**不得进入食物链**

林地利用·园林绿化·矿山修复  
沙化地改良·盐碱地改良



编号	技术方法	碳足迹/碳排
1	热水解、厌氧消化、沼气利用、热干化(水分含量为10%)、煤替代品 (如在发电厂或水泥窑中)	-500
2	厌氧消化、沼气利用、填埋 (利用填埋气体)	0
3	热水解、厌氧消化、沼气利用、土地利用	200
4	厌氧消化、沼气利用、堆肥、土地利用	450
5	厌氧消化、沼气利用、土地利用	950
6	热干化(水分含量为10%)、煤替代品	1300
7	堆肥、土地利用	2400
8	热干化、气化法、能源回收	4750
9	石灰稳定法、土地利用	4900
10	热干化、焚烧、热回收	5900
11	填埋, 利用填埋气体	6200
12	厌氧消化、沼气利用、填埋(不进行填埋气体利用)	6300
13	热干化(水分含量为 65%)、土地利用	7600
14	热干化(水分含量为40%)、土地利用	10000
15	填埋 (不进行填埋气体管理)	30000

注: 以典型的城镇污水处理厂为例, 日处理污水10万立方米, 产生80吨水分含量为80%的脱水污泥; 碳足迹单位为年CO<sub>2</sub>当量排放 (吨)。

资料来源: 亚行东亚局。



IN CHANGSHA, CHINA  
中国·长沙

# EIV

## 05

# 典型案例





# 碳中和污水厂案例

## 荷兰蓝色水工厂

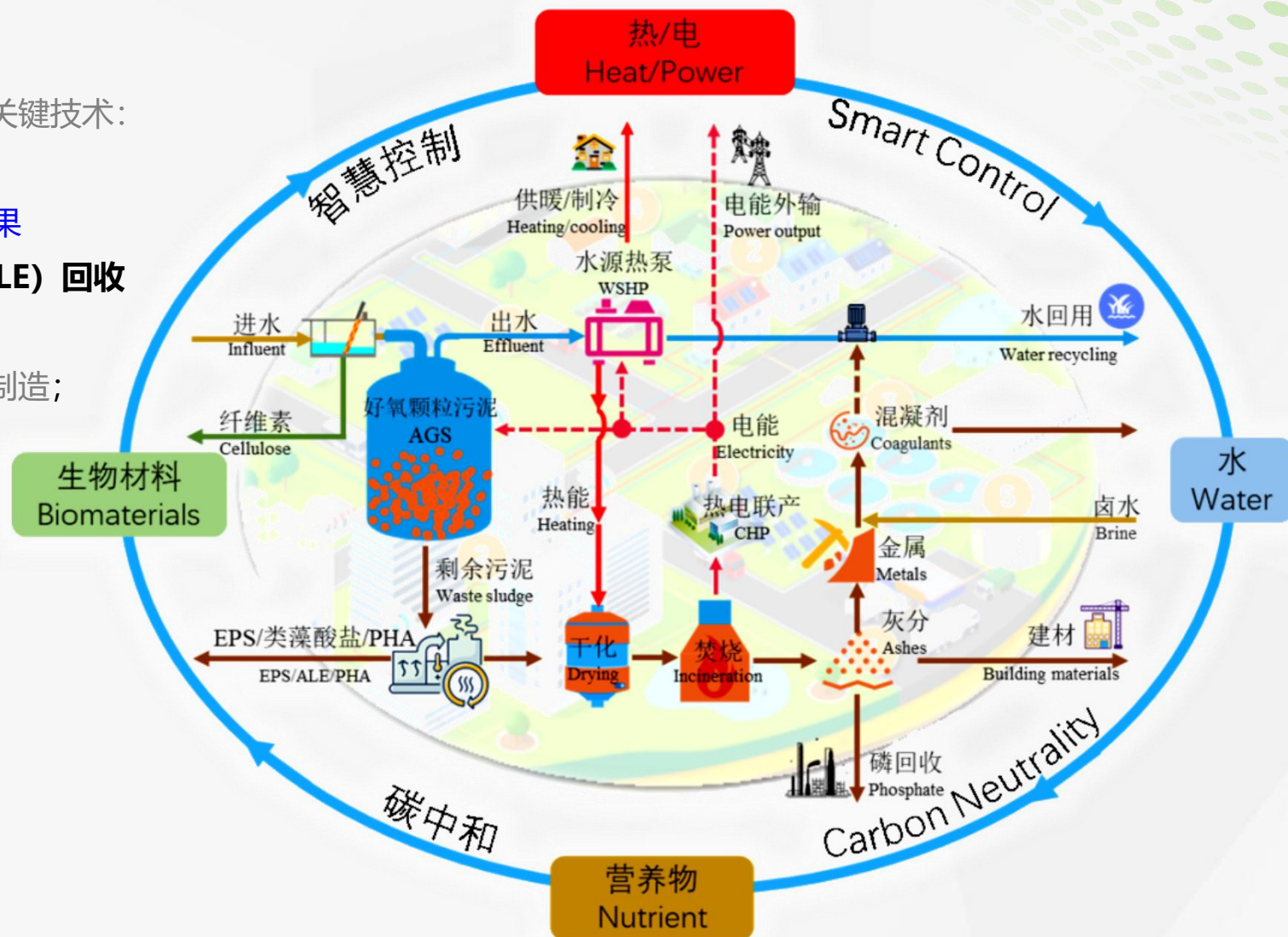
### 关键技术

营养物、生物材料、热/电和水回用**4个循环**。所涉及关键技术：

- ◆ **前端纤维素筛分回收**  
纤维素物质难降解，增加曝气量、影响污泥沉淀效果
- ◆ **好氧颗粒污泥脱氮除磷工艺及其高值类藻酸盐（ALE）回收**  
好氧颗粒污泥可降低运行成本**最低30%**
- ◆ 污泥干化**焚烧电/热、磷、金属回收**工艺与**混凝剂制造**；
- ◆ **水源热泵**提取出水热能后回用，**再生水回用**
- ◆ 全系统可在**智慧控制**下可实现碳中和运行。
- ◆ 前端纤维素回收与智慧控制 降低成本约**10%**

### 经济效益

- ◆ 化学能与热能经济效益 0.25元/m<sup>3</sup>， 1.06元/m<sup>3</sup>
- ◆ ALE回收经济效益 0.30元/m<sup>3</sup>
- ◆ 磷回收经济效益 0.05元/m<sup>3</sup>
- ◆ 再生水回用经济效益 1.10元/m<sup>3</sup>
- ◆ 碳交易经济效益 0.02元/m<sup>3</sup>
- ◆ 蓝色水工厂净利润 **2.33元/m<sup>3</sup>**



▲ 蓝色水工厂核心技术与框架





# 碳中和污水厂案例

## 荷兰蓝色水工厂国内应用减排效果



节地

减少占地面积 > 50%



经济

降低工程总投资 > 30%  
降低运行成本 > 20%



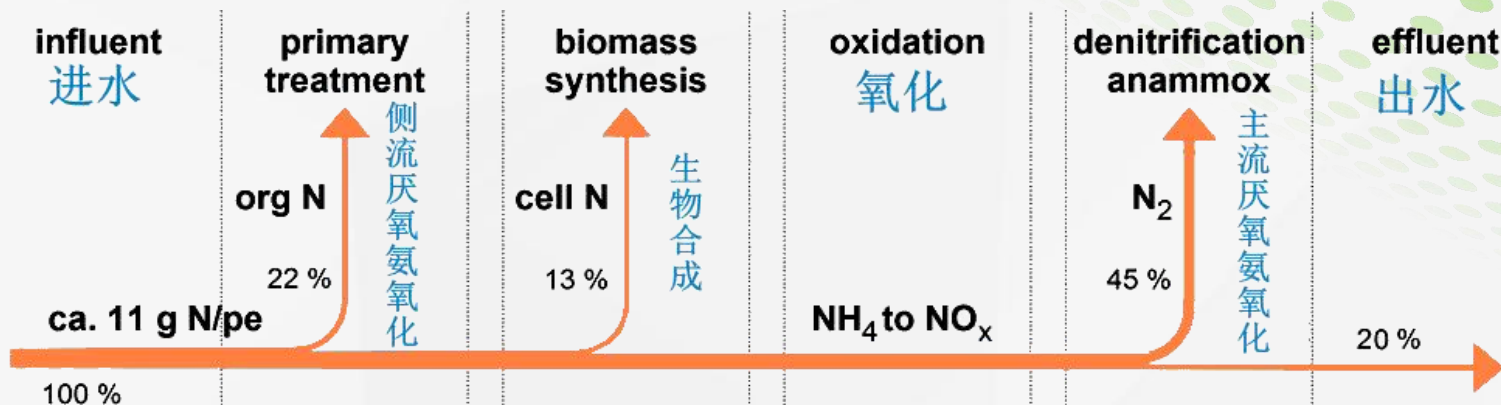
低碳

降低碳排放 > 30%



# 碳中和污水厂案例

## 奥地利斯特拉斯污水厂

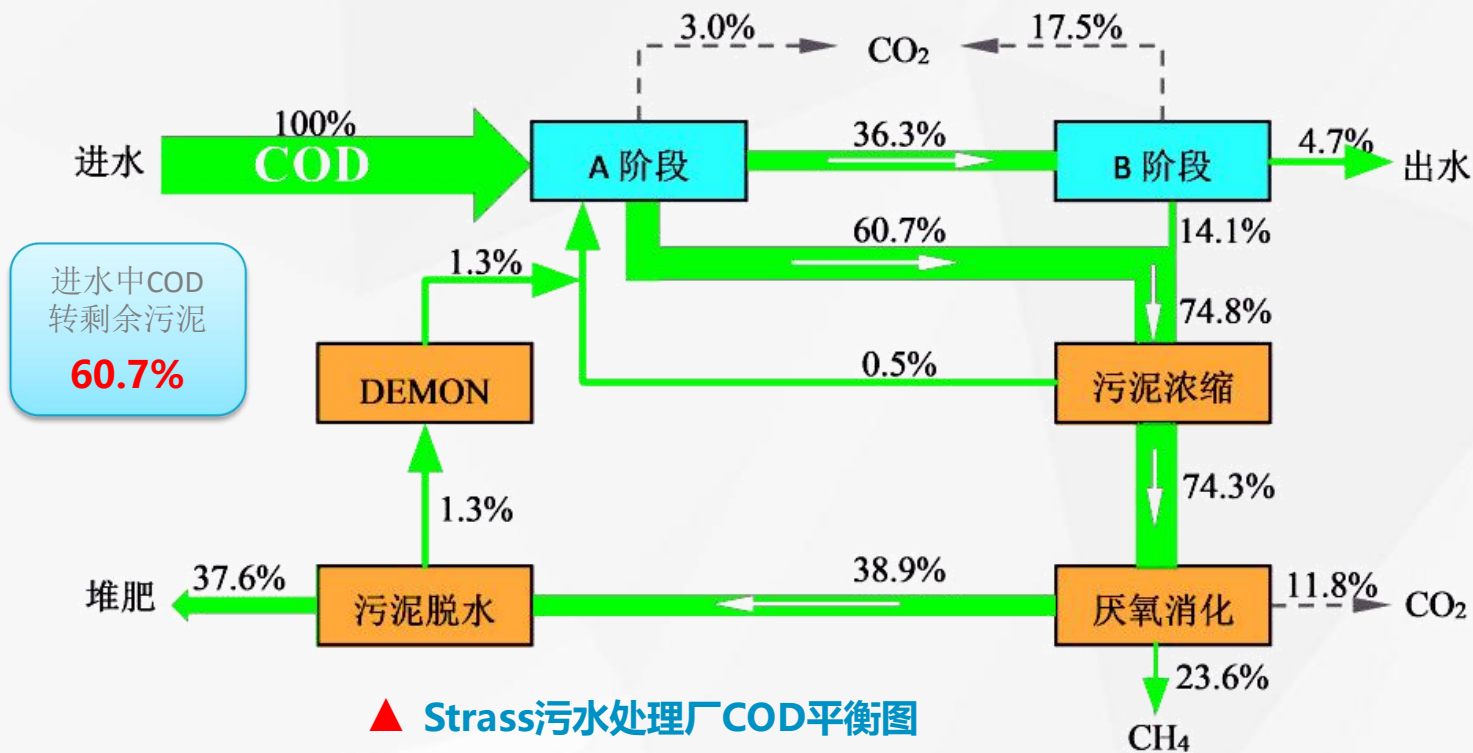


### 碳中和运行的国际先驱

斯特拉斯(Strass)污水厂以主流传统工艺(AB法)与侧流现代工艺(厌氧氨氧化)相结合方式实现剩余污泥产量最大化, 在2005年通过厌氧消化产甲烷并热电联产实现了**108%的能源自给率**, 成为**能源工厂**, 完全达到碳中和运行目标。

### 关键技术

- ◆ 主流：**AB法耦合厌氧氨氧化**, 剩余污泥量大, 工艺能耗低。
- ◆ 添加外源有机废物 (**厨余垃圾**) 增加厌氧消化所需有机底物, 以协同消化促进CH<sub>4</sub>增产。
- ◆ 污泥**消化液脱氮**改用DEMON自养脱氮工艺 (**厌氧氨氧化**) 取代SBR, 降低碳源使用量。
- ◆ 曝气、浓缩、脱水**换用高效节能设备**。





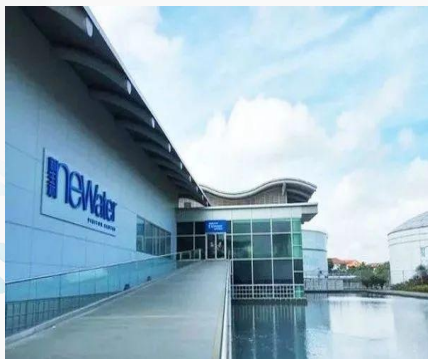


# 碳中和污水厂案例

## 新加坡新生水Newater 直接饮用

### 核心工艺

- ◆ 初沉+微滤/超滤+反渗透+紫外消毒
- ◆ 微滤：过滤掉微米级的颗粒和细菌
- ◆ 反渗透：去除不良污染物
- ◆ 紫外消毒：消毒，酸碱平衡
- ◆ 主流+侧流：厌氧氨氧化



### 技术特点

- ◆ 采用16英寸大直径膜组件  
省地20~30%，投资少10~27%，压力容器管道及连接件减少80%。
- ◆ 采用大功率水泵超滤反渗透一次加压  
RO能耗0.32kW·h/m<sup>3</sup>显著低于传统RO
- ◆ 采用深隧集中大量提升，增加水泵效能
- ◆ 回收一段反渗透浓水压力，节能10%

### ▲ 工艺流程示意



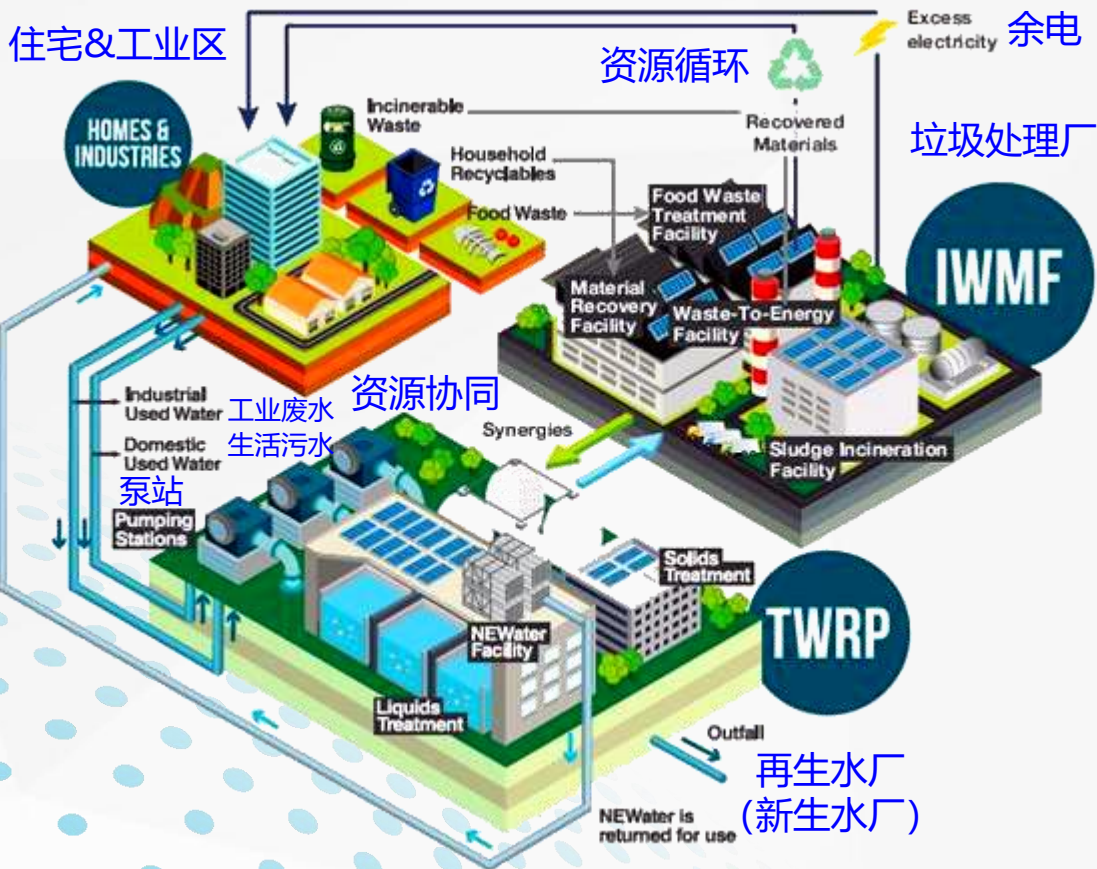




# 碳中和污水厂案例

再生水厂·垃圾处理厂 协同合作 水-能源-废弃物 循环

## TWRP 再生水厂



# 新加坡新生水厂垃圾处理厂协同处理

## ◆ 物料处理协同效应

- ✓ 垃圾处理厂的**厨余垃圾**运送到**新生水厂**，与剩余污泥进行协同消化
- ✓ 新生水厂脱水后的**污泥**运输到**垃圾处理厂**进行处理与**发电**
- ✓ **沙砾**从新生水厂运送到**垃圾处理厂**去处理

## ◆ 水协同效应

- ✓ 新生水厂处理后的**水**提供给**垃圾处理厂**进行使用
- ✓ 垃圾处理厂使用后的**污水**再由**新生水厂**进行处理

## ◆ 其他协同效应

- ✓ 新生水厂产生的**恶臭气体**运送到**垃圾处理厂**进行燃烧

## ◆ 能量协同效应

- ✓ 将垃圾处理厂产生的**电能**传输给**新生水厂**使用
- ✓ 将产生的**沼气**从新生水厂传输给**垃圾处理厂**可以生产更高效的热能
- ✓ **蒸汽**从垃圾处理厂传输到**新生水厂**用于污泥的热水解和油脂的处理

## ◆ 工程目标

- ✓ **能量回收最大化**：通过采用**先进的锅炉**设计实现
- ✓ **最大化资源回收**：通过先进的**材料分选系统**和烟气中金属的回收实现
- ✓ **最小化环境影响**：通过高效的**湿式烟气**处理系统实现，确保清洁空气排放和最少的残渣处置
- ✓ **最大化系统弹性**：通过采用**模块化设计**来实现灵活性
- ✓ **土地利用优化**：通过**创新利用空间**，工厂设计和设备布局实现
- ✓ 通过与TWRP协作取得最大优化协同效应：通过整合IWMF-TWRP流程获得**水-能源-废弃物循环**收益





# 碳中和污水厂案例

## 中国城市污水资源概念厂

### 诗意的表达

美丽深邃的外观，标新立异的构造，取之不尽的源泉，智慧轻松的大脑，技术成长的高地，充满爱意的花园。

**发起** 2013年9月26日  
曲久辉等六专家



#### 水质永续

出水水质满足水环境变化和水资源可持续循环利用的需要



#### 能量自给

在有适度外源有机废弃物协同处理的情况下,大幅提高污水处理厂能源自给率



#### 环境友好

建设感官舒适、建筑和谐、环境互通、社区友好的绿色基础设施



#### 资源循环

追求物质的合理循环,将人们生产和生活过程中产生的废物转化为有用的物质产品

### 概念厂内涵

传统厂的升级，产品注重循环，追求资源效率，实现碳中和，构造城乡共享新空间





# 碳中和污水厂案例

中国城市污水资源概念厂



宜兴概念厂鸟瞰图 ▲





# 碳中和污水厂案例

## 中国城市污水资源概念厂

宜兴概念厂采用“三位一体”建设

◆水质净化中心：2万m<sup>3</sup>/d

极限脱氮除磷 (TN < 3 mg/L TP < 0.1 mg/L)

◆有机质协同处理中心：100t/d

处理污泥、蓝藻、餐厨垃圾和秸秆

生产**能源、肥料**

◆生产型研发中心

2条千吨线+3条百吨线



生物有机质中心

水质净化中心



生产研发中心

宜兴概念厂鸟瞰图 ▲

23 吨营养土/日

18000 度电/日

8000 立方米提纯沼气/日

沼渣资源化

2万吨/日市政污水  
3万吨/日工业园区污水



- 1、尾水氮磷超限排放示范
- 2、中水回用示范

水源工厂

自产污泥 100吨/日协同有机质  
厌氧发酵 干式厌氧发酵

沼气  
电能

锅炉  
热能



能源工厂  
沼渣 (外运焚烧)

沼渣  
好氧堆肥

营养土



还田

沼液

磷回收



资源工厂

污水厂是资源工厂 85% 能源自给



# 碳中和污水厂案例

## 中国城市污水资源概念厂



### 预处理

#### 高效平流沉砂

- 针对高浓度无机悬浮固体
- 75微米以上细砂去除率：**70-90%**
- 占地面积小
- 可去除集成漂浮物
- 对砂含量的变化适应性好



### 初沉发酵

#### 初沉污泥发酵

- 设水解池**水解发酵**污泥，回收碳源



### 生化单元

#### 多模式

- 改良**四段多级A/O**、**五段巴顿甫**灵活切换
- 第一**好氧池加固定填料**构造好氧和缺氧共存环境，为**同步/短程硝化反硝化**创造条件
- 第一**缺氧区加固定填料**沉砂池出水先进生物池前端，再进初沉池，构建AB法A段



### 深度处理

#### 硫自养脱氮

- 一体化多效澄清+**硫自养系统深度脱氮**除磷
- 出水TN<3mg/L  
TP<0.1mg/L
- 运行费低**30-50%**
- UV/H2O2/O3耦合去痕量新污染物



### 有机质处理

#### 城乡物质循环

- 厌氧发酵含固率可达**15%**以上
- 有机物**50-70%**被分解为电和热能
- 沼气提纯为生物天然气并网输出
- 沼渣好氧发酵作肥料或营养土
- 沼液用于种植施肥或回收磷资源

**永续瓶装饮用水：**砂滤+炭滤+纳滤+反渗透+紫外杀菌+矿化一级净化



IN CHANGSHA, CHINA  
中国·长沙

# SIX

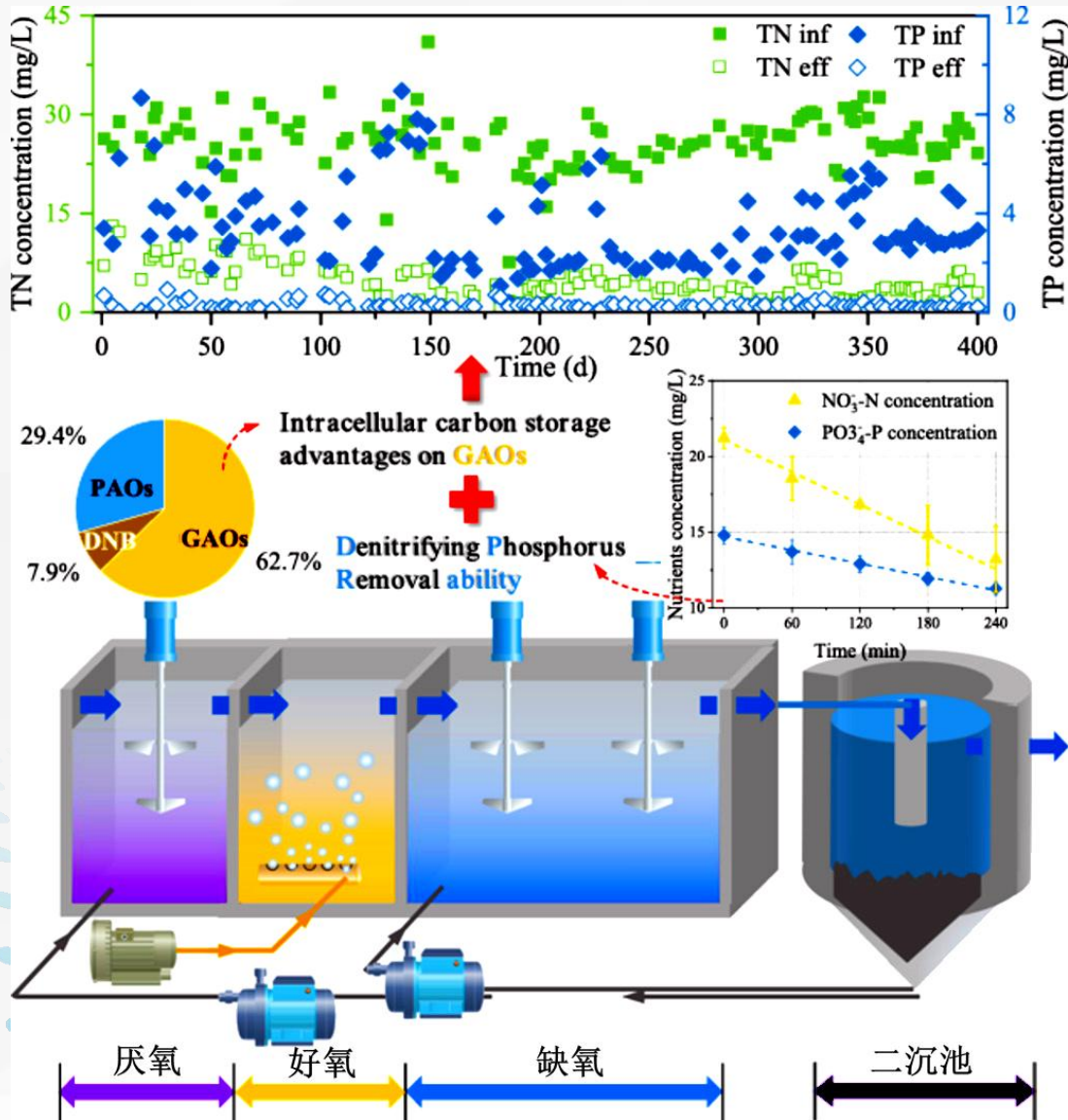
## 06 低碳创新技术





# 低碳创新技术

## 污泥双回流AOA工艺



前置反硝化工艺: **AAO、AO、UCT**工艺等

脱氮效率受限因素: ①进水**碳源**种类与含量、②**硝化液回流比**

后置反硝化工艺 (顺序硝化反硝化): **OA、AOA**工艺等

脱氮效率受限因素: 进水**碳源**种类与含量 (不受硝化液内回流影响, 理论上在碳源充足的情况下, 能够实现完全的氮去除)

工艺流程缺陷: 系统在经历了好氧后, 后置缺氧区**缺乏外碳源**

### 污泥双回流AOA工艺

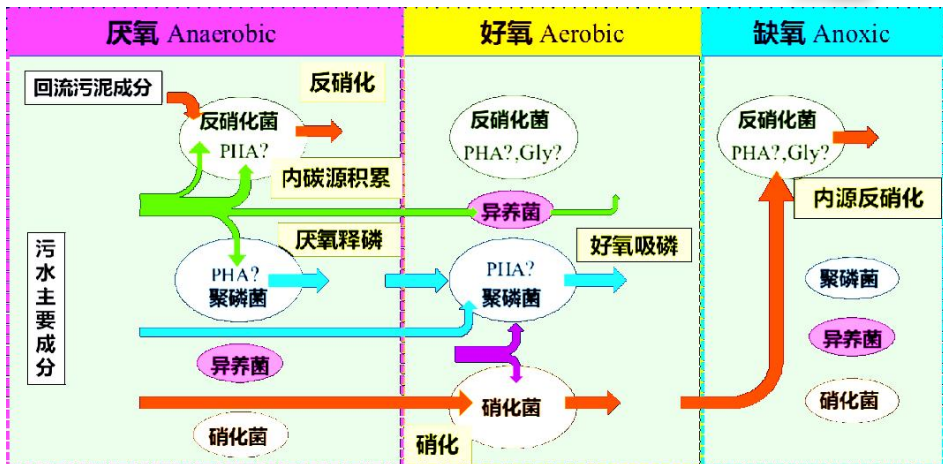
改进思路: 利用聚磷菌、聚糖菌在厌氧区将有机物包封为**内碳源 (PHA、糖原)**, 度过好氧区后, 在缺氧区利用包封的内部碳源, 进行**内源反硝化**, 实现低C/N污水的深度脱氮

改进措施:

- ◆ 在**前置厌氧**阶段实现**碳源的细胞内部包封**;
- ◆ 增加回流至后置**缺氧区**前端的**第二污泥**循环, 通过**提高**缺氧区的**MLSS**, 提高**内源反硝化速率**。



### AOA工艺各区功能

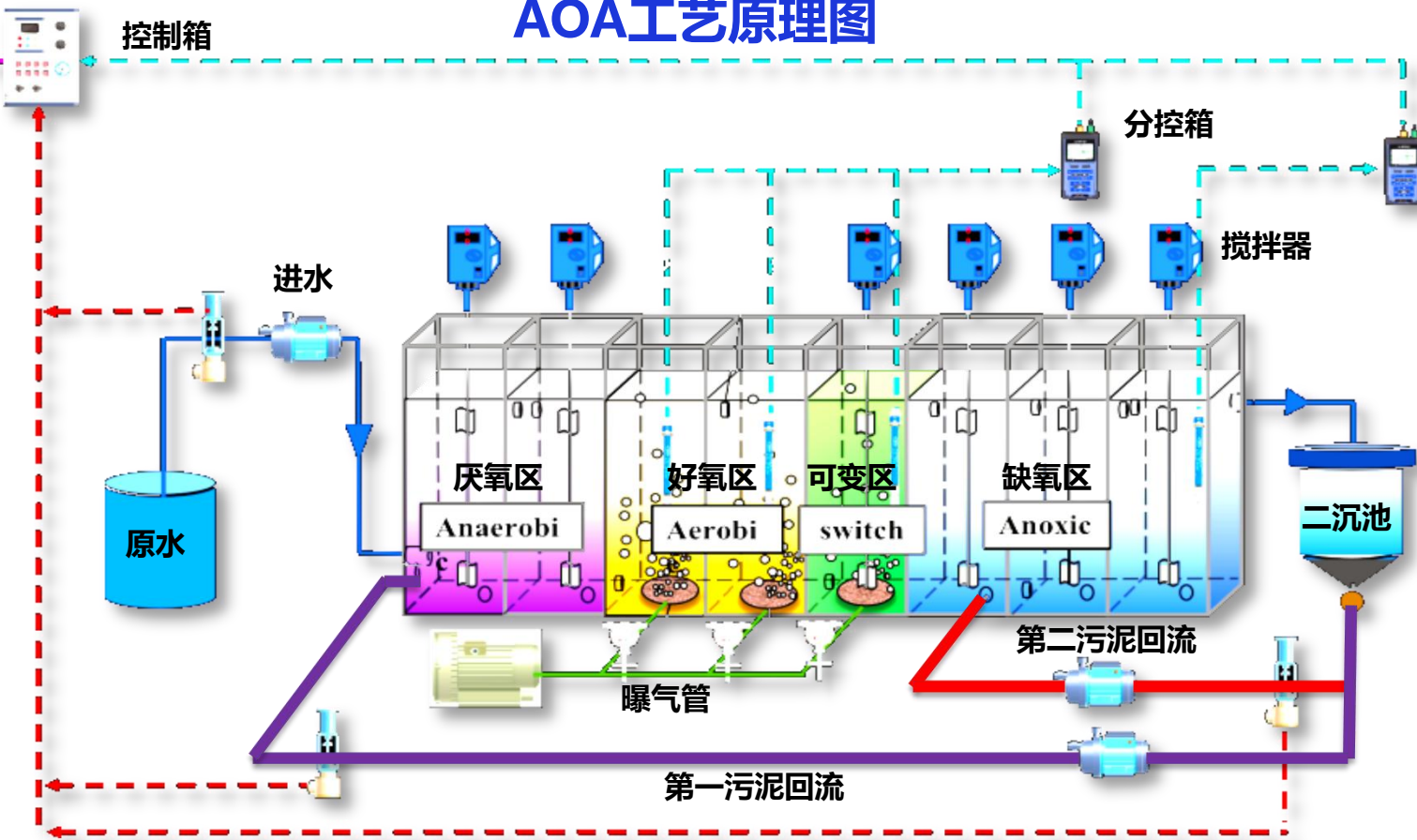


**厌氧区：**有机物COD包封为**内碳源** + **厌氧释磷**。COD去除率 > **80%**

**好氧区：**氨氧化 + **同步硝化反硝化** + **吸磷**

**缺氧区：**利用厌氧区封存的**内碳源**，对好氧区产生的**硝酸盐**进行**反硝化**

### AOA工艺原理图



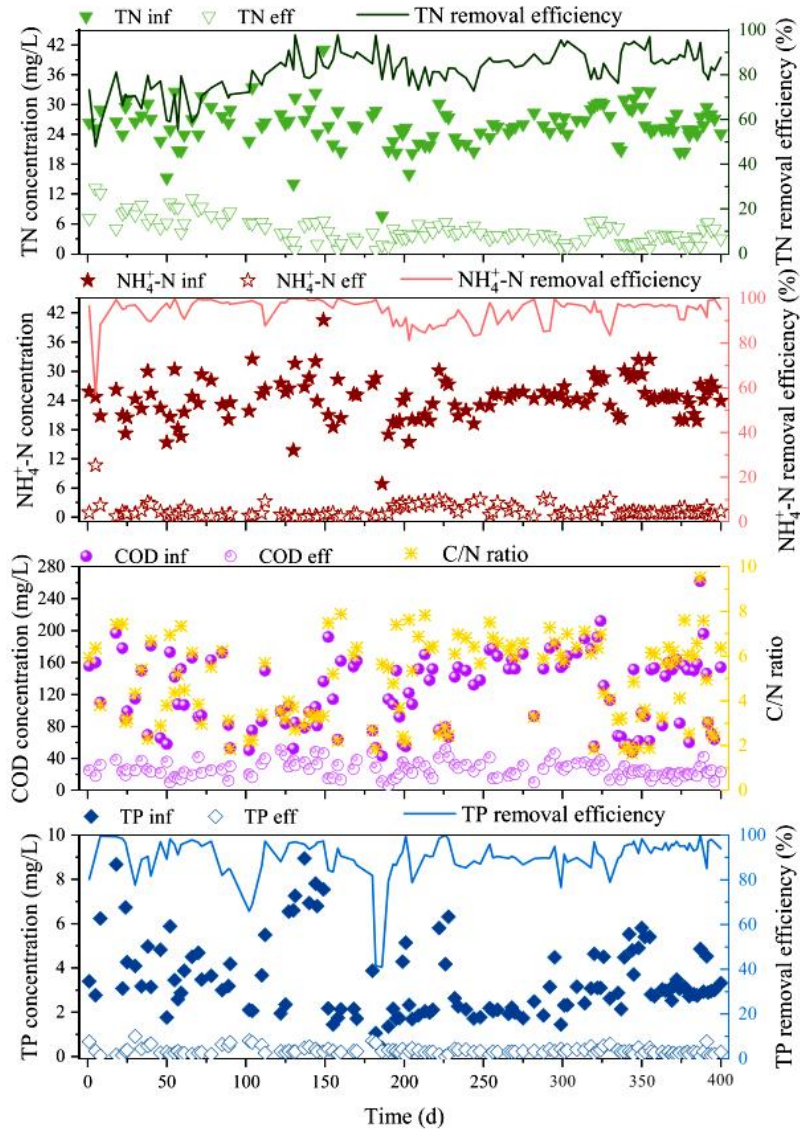
**双污泥回流AOA系统**共有两个污泥回流：

- ◆ 污泥回流到厌氧区回流比 **R1 = 100%**
- ◆ 污泥回流到缺氧区前端，回流比R2根据原水C/N进行调整：① C/N ≥ 3时 **R2 = 100%**；② 当C/N < 3时，**R2 = 150-200%**



# 低碳创新技术

## 污泥双回流AOA工艺



◆ **可实现极限脱氮除磷。** 碳源受限条件下，去除率**TN: 86%、TP: 90%**，DPR（反硝化生物除磷）生化池出水 $\leq 0.24 \text{ mg/L}$

(释磷量低，**聚糖菌**大量储存**碳源**增强了脱氮，且避免了二次释磷)

◆ **可充分利用原水中碳源，无需外加碳源。** 大部分**COD (80%)** 被贮存为内碳源，仅少部分 (约**13.3%**) COD进入好氧区。  
污泥回流带来少量硝态氮反硝化消耗约7.94%的COD， $86.7\% - 7.94\% = 78.76\%$

◆ **节地节能效果明显。** 好氧池占生化池总容积的百分比，由传统AAO的**50%**左右，降低到**25%**左右，减少约**50%**曝气能耗  
V厌氧: V好氧: V缺氧 = **1:1:2**

◆ **剩余污泥少。** 大部分碳源贮存为内碳源用于反硝化，仅小部分在好氧区被异养菌利用，剩余污泥产量小，污泥处理费用低。

◆ **启动快、高效节能。** AOA工艺适用于新建、改建污水厂





# 低碳创新技术

## 污泥双回流AOA工艺



▲ 岑溪市第二污水处理厂处理规模3万m<sup>3</sup>/d，排放标准一级A。采用污泥双回流AOA技术，该技术全球首创，国际领先，在国内首次应用于此项目。2021年2月开工，2021年9月环保验收。

▼ 深圳福田水质净化厂二期扩建规模30万m<sup>3</sup>/d，提标后规模70万m<sup>3</sup>/d，再生水转输工程设计规模为7万m<sup>3</sup>/d，2023年3月开工。项目采用AOA工艺，相对比传统工艺电耗及碳源投加量减少约20%，出水标准高，TN≤8mg/L，污泥含水率≤40%。







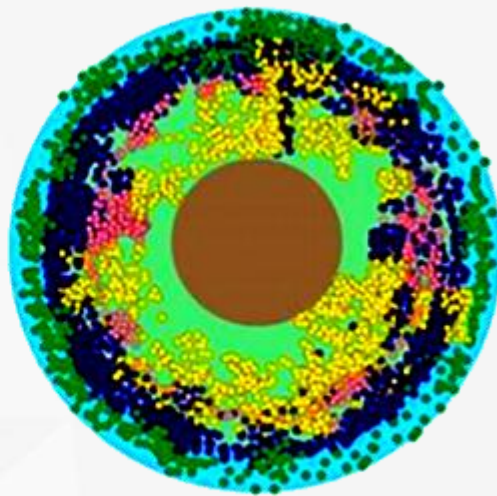
# 低碳创新技术

## 好氧颗粒污泥



- 硝化菌
- 反硝化菌

传统活性污泥



- 聚磷菌
- 聚糖菌

好氧颗粒污泥

厌氧  
缺氧  
好氧

生物浓度高，处理高效，**占地小**，反应器**结构简单投资省**，能耗物耗大幅降低，**电耗药耗低**，团聚成球**不易老化膨胀**。结构密实**耐毒**，可削弱有毒物质影响。

1

### 污泥浓度高，占地小，处理效率高

传统活性污泥法污泥浓度一般在3000-5000mg/L  
MBR膜8000-10000mg/L  
好氧颗粒污泥一般大于**10000-15000mg/L**

扩散 →  
转化 →

2

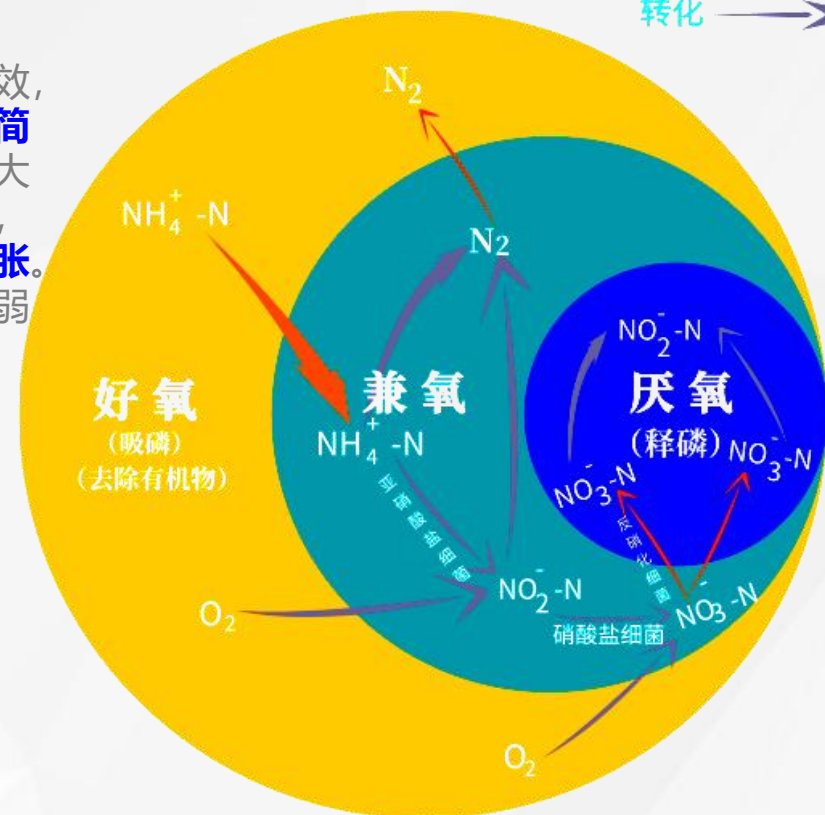
### 一颗粒一反应器

优秀的沉降性能使好氧颗粒污泥能高效沉淀，无需设置二沉池，占地面积可以大幅度缩小

一个颗粒就是一个同步脱氮除磷和降解有机物的反应器，同一颗粒，就可以起到**脱氮除磷**和**降解有机物**的作用

3

### 沉降性能优异无需二沉池

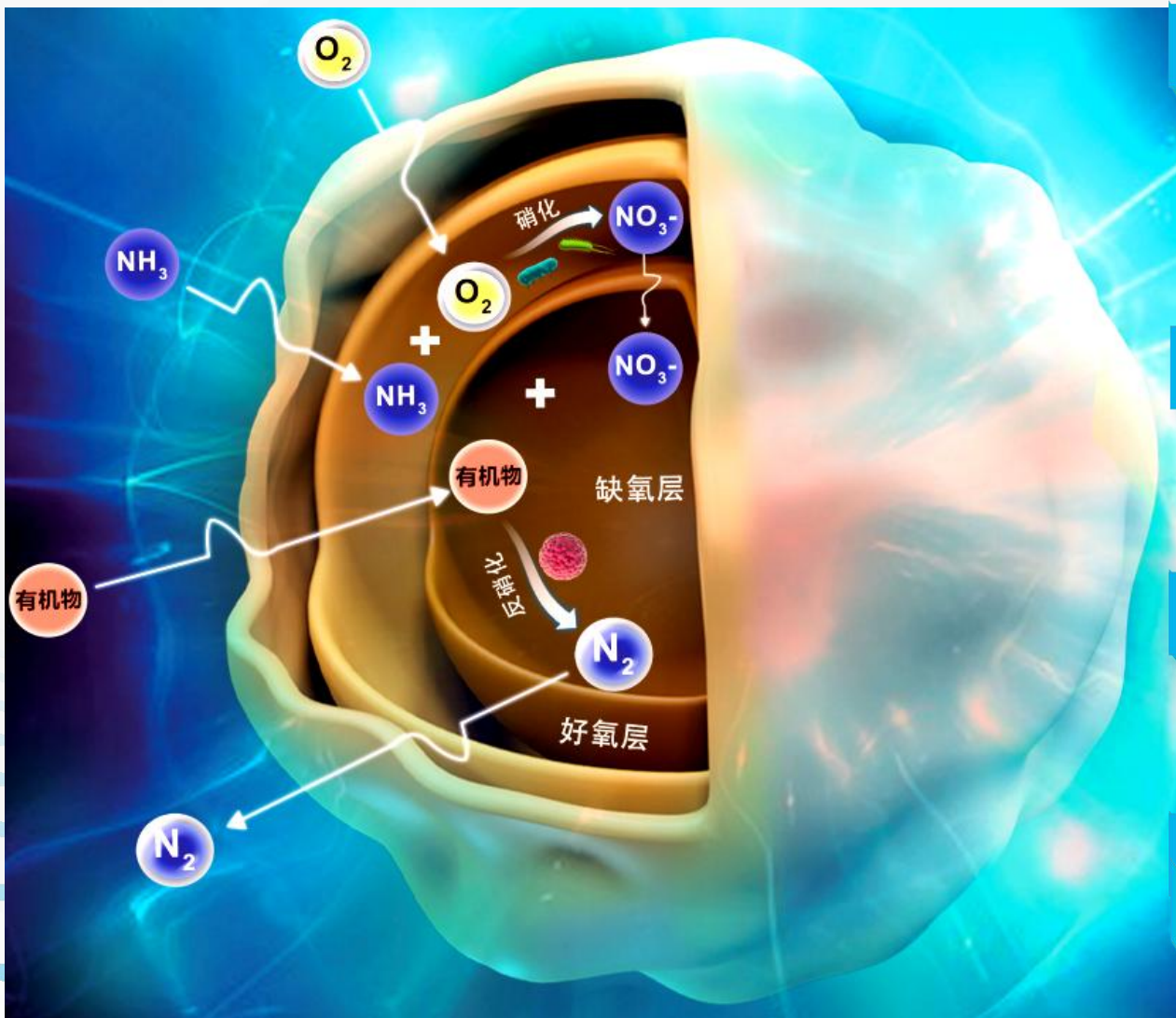






# 低碳创新技术

## 好氧颗粒污泥实例-北京吴家村再生水厂



### 国内首例万吨级城市污水项目

北京吴家村再生水厂是目前**国内最大**的好氧颗粒污泥技术工程应用项目，日设计处理水量为**8万 $m^3/d$** 。污泥颗粒粒径**350微米**以上，显著超过国际水协**220微米**的标准

### 节省占地 >20%

沉淀速度提升5倍，不需设沉淀池，增加构筑物利用率，节省占地30%-70%

### 节省电耗 >15%

无沉淀池等动力设备，运行能耗比传统工艺低15%以上。工艺调控优化后，可节能30%以上

### 节省碳源药剂费 >50%

生物量高达5-12g/L,生物脱氮除磷高效，节省除磷药剂和碳源分别达到80%和40%以上





# 低碳创新技术

## 好氧颗粒污泥国内实例-龙游县城南工业污水厂



### 亚洲第一座好氧颗粒污泥污水处理厂

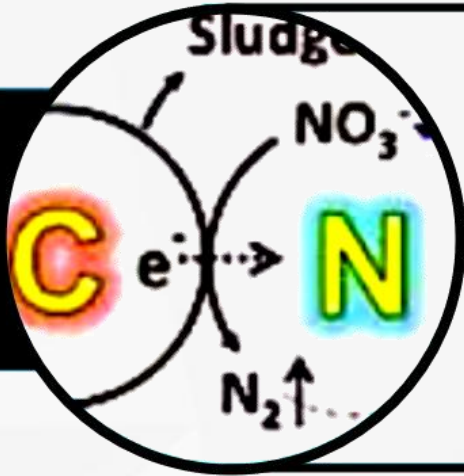
浙江龙游县城南工业污水厂占地0.77公顷，一二期处理规模为4万m<sup>3</sup>/d。三期为本工程，规模2万m<sup>3</sup>/d，在无新增征地的情况下，采用国内首次落地投产的AGS好氧颗粒污泥处理技术，于2020年投运。工艺为：进水泵房+细格栅、曝气沉砂池+调节池+好氧颗粒污泥（AGS）生物池+高效澄清池+反硝化深床滤池+消毒接触池+退水泵房。是亚洲第一座Nereda好氧颗粒污泥污水处理厂，与传统污水处理工艺相比，占地减少**50%**，运营费用降低**60%以上**。

# 非连续流



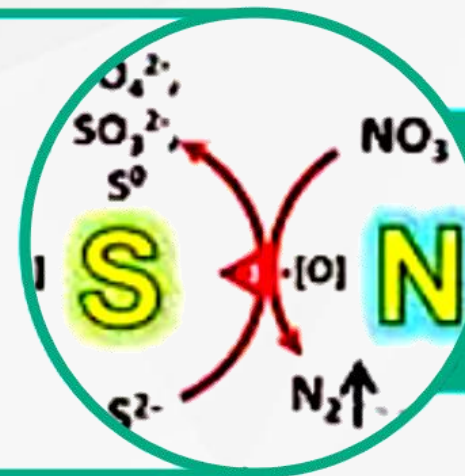


### 异养反硝化



反硝化菌以**有机物**作为**电子供体**、**碳源**，在**无氧或缺氧**环境下将硝酸盐还原为 $N_2$ 的反硝化生物技术。

用 $H_2$ 、**Fe单质**、**S单质**、**硫化物**等**无机物**作电子供体，以  $CO_3^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $CO_2$ 作为**无机碳源**，在缺氧环境下将 $NO_3-N$ 还原为 $N_2$ 。可分为**氢**、**硫**、**铁**、**氨氮**型自养反硝化技术。



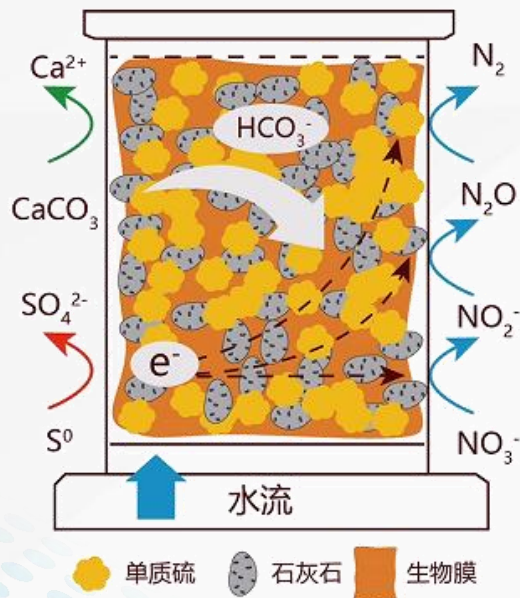
### 自养反硝化



# 低碳创新技术

## 自养反硝化——三大成熟技术

### 自养反硝化



01



#### 厌氧氨氧化

节约：**60%**的曝气量 **100%**有机碳源 显著降低剩余污泥 **PN+A** 和 **PDN+A**

02



#### SANI工艺

COD和总氮去除率**80%**，去高盐（硫酸盐），适用沿海城市生活污水、制药、食品加工业、造纸、石油化工、采矿废水

03



#### 菱铁矿复合材料滤池

总氮去除率**>98%**，可稳定 $<1.5$  mg/L  
SS同步去除效果良好，TP部分去除







# 低碳创新技术

## 自养反硝化：北京排水集团——消化液侧流厌氧氨氧化



### 消化液侧流

消化液脱氮方式  
厌氧氨氧化

总处理规模  
m<sup>3</sup>/d

# 15900



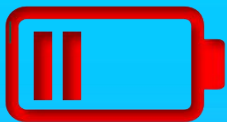
# 10515

每年减少碳排  
吨

# 5

### 污泥处置中心

北京排水集团五个污泥处理中心建成世界最大规模厌氧氨氧化污泥消化液脱氮工程（侧流厌氧氨氧化），总处理规模15900立方米/日，每年可减少碳排放10515吨。为解决污泥消化液处理这一世界性难题提供了一条全新、高效、可靠的技术途径。



# >20%

节省投资 占地



# >60%

节省电耗



# >90%

节省药剂



# >50%

减少碳排



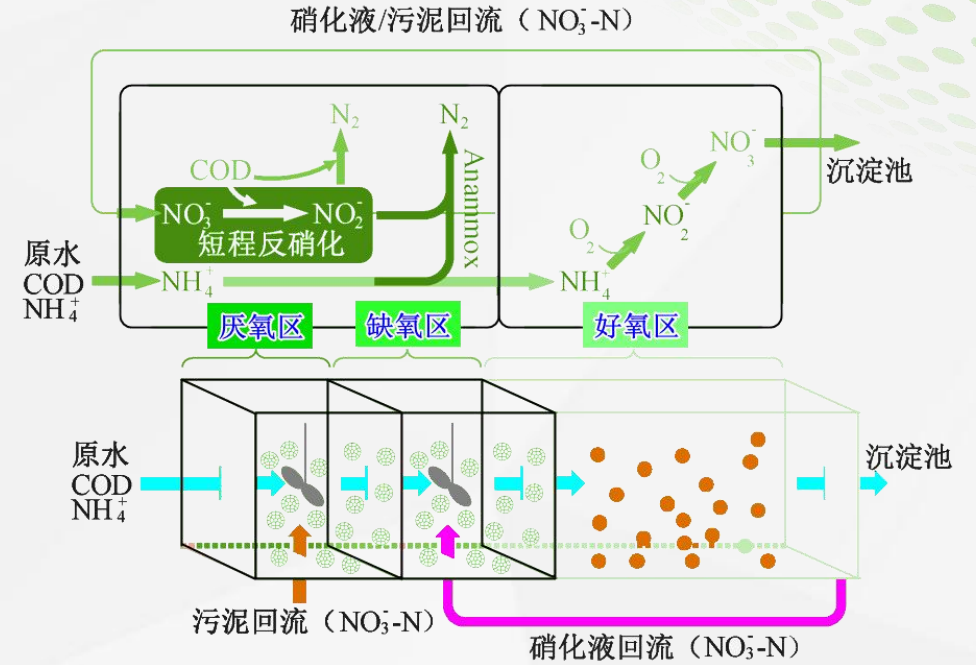
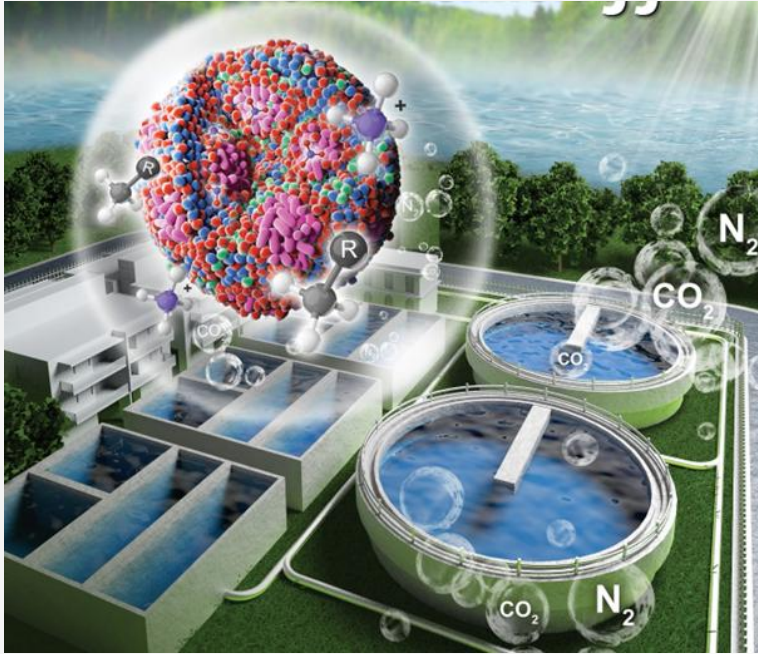
项目名称	红菌消化液处理规模 m <sup>3</sup> /d	节约电耗 万度/年	CO <sub>2</sub> 减排当量 (吨/年)
小红门	2400	263	1587
高碑店	3500	383	2314
槐房	3200	350	2116
高安屯	4600	504	3043
清河二	2200	241	1455
合计	15900	1741	10515





# 低碳创新技术

## 自养反硝化：彭永臻院士团队-短程反硝化+厌氧氨氧化



### 短程反硝化+部分厌氧氨氧化实现途径

- ◆ 在厌氧、缺氧池投加有机填料

### 技术机理

- ◆ 缺氧池中，不存在好氧及短程硝化条件产生NO<sub>2</sub><sup>-</sup>，只能以有机物作电子供体，通过短程反硝化将回流污泥和内回流硝化液中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>还原为NO<sub>2</sub><sup>-</sup>，同时利用来源于污水并过量存在于厌氧和缺氧池的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>，形成与促进部分Anammox反应过程。

### 节能降耗效果明显

- ◆ 缺氧厌氧条件下去除**1**毫升的**氨氮**，将伴随去除1.32毫升的亚硝，亚硝把回流液中的硝酸氮还原为亚硝酸氮，总计能去除近**8**毫升的**总氮**。

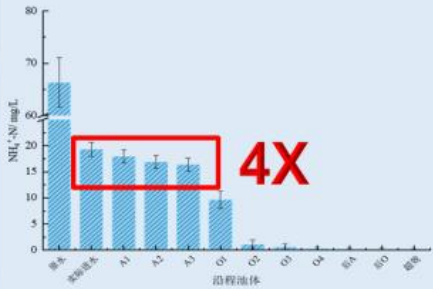




# 低碳创新技术

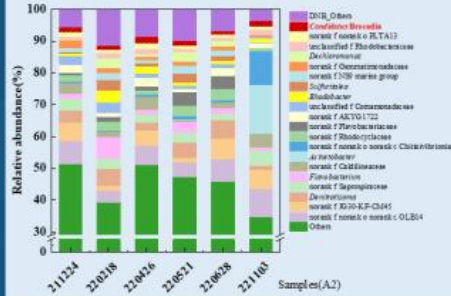
## 自养反硝化：烟台辛安河污水厂实例 短程反硝化+厌氧氨氧化

### 发现现象



**BFM前缺氧区出现氨氮去除，缺氧区氨氮去除贡献率达到15.19%**

### 微观验证



**AnAOB优势菌属**  
**Candidatus Brocadia**

辛安河项目

西安四污

相对丰度  
1.53% 20.35%

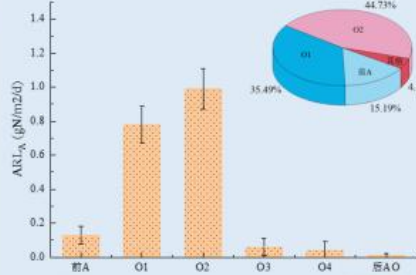
填充率55%

相对丰度 0.1%

填充率5%

**100X**

### 试验验证



**厌氧氨氧化TN负荷0.4gN/(m<sup>2</sup>·d)**  
**TN贡献率25%**

### BFM工艺新建



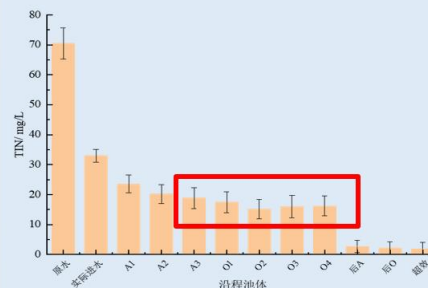
◆集约:30%占地 ◆低碳:70%运行成本 ◆智慧:100%无人值守

▲ 缺氧区：高效主流厌氧氨氧化 PDN+AMX

好氧区：高效同步硝化反硝化 SND

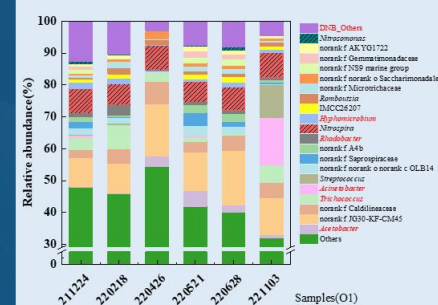
- ◆ 厌氧氨氧化脱氮贡献率 **25%**
- ◆ 缺氧池厌氧氨氧化菌丰度 **1.5%**
- ◆ 填充率 **55%** 西安四污 **5%**
- ◆ 好氧区反硝化菌丰度 **12-25%**
- ◆ 好氧区反硝化菌厚度 **400-500μm**
- ◆ 好氧区脱氮贡献率约为 **13%**
- ◆ 自养脱氮总贡献率 **AMX+SND=25%+13%= 38%**
- ◆ 稳定极限脱氮，出水总氮 ≤ **2mg/L** 节省碳源药剂费 **0.34元/m<sup>3</sup>**

### 发现现象



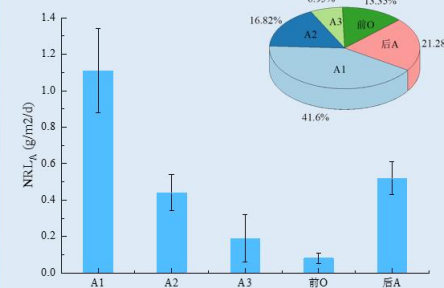
**BFM好氧区出现TIN去除现象，好氧区TIN去除贡献率达到13.35%**

### 微观验证



**BFM好氧区悬浮载体生物膜中反硝化菌相对丰度达到18.45±6.45%**

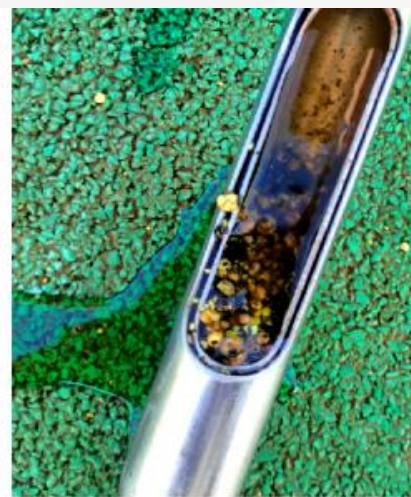
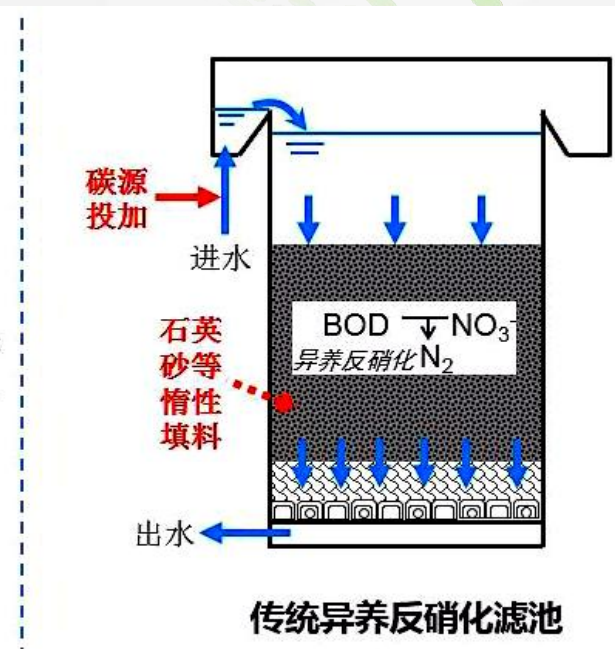
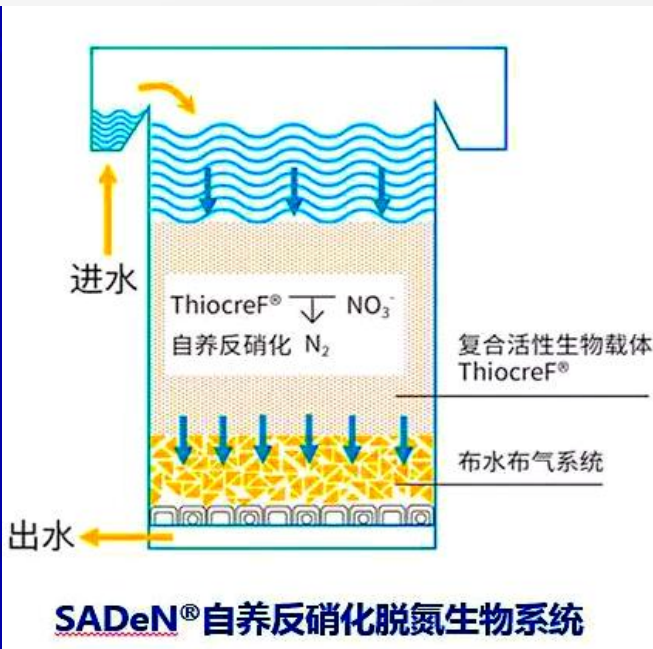
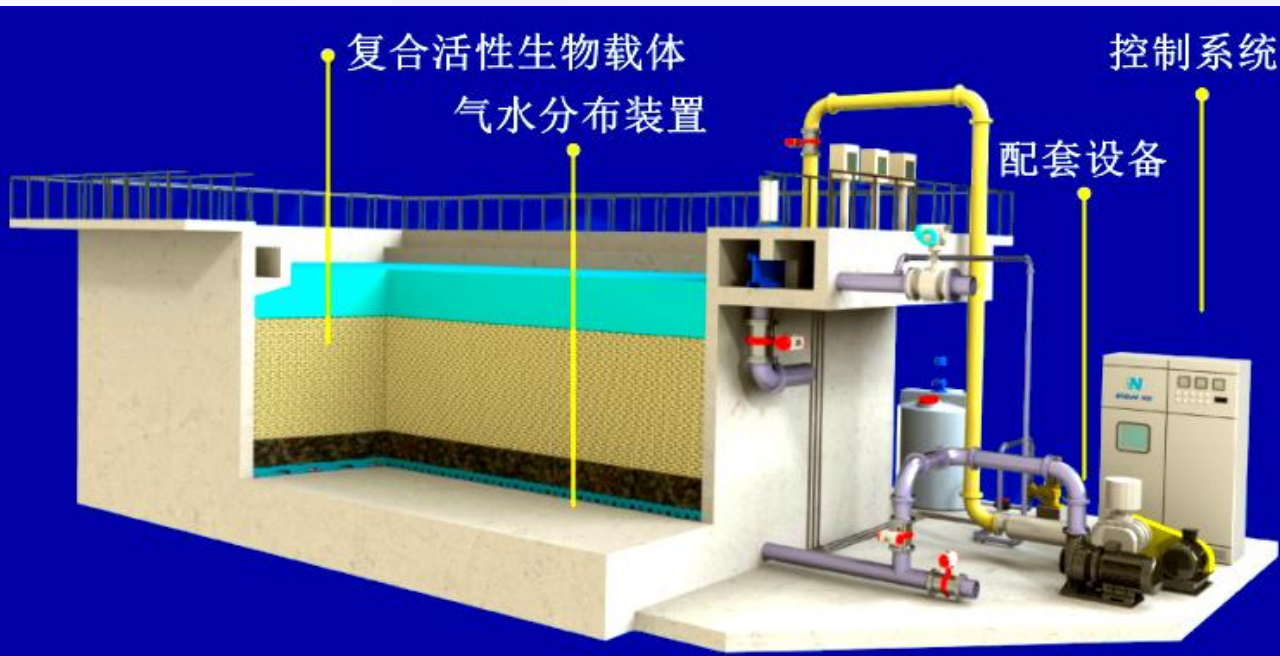
### 试验验证



**好氧载体反硝化脱氮负荷0.4gN/(m<sup>2</sup>·d)**







a 自养滤料（投用前）

b 中层滤料（投用后）

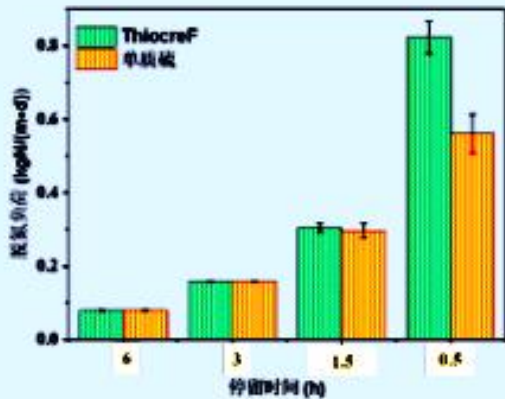
c 下层滤料（投用后）

d 套管式采料装置

- ◆ 用**单质硫**或**黄铁矿**构建的污水脱氮系统具有一定的脱氮效果，但**脱氮速率较低**，无法达到与传统异养反硝化技术相当的水平。
- ◆ **单质硫-菱铁矿**复合材料构建的污水深度脱氮滤池系统，在维持**生物活性**、**脱氮效率**、**协同除磷**、**经济成本**等方面具有**显著优势**。

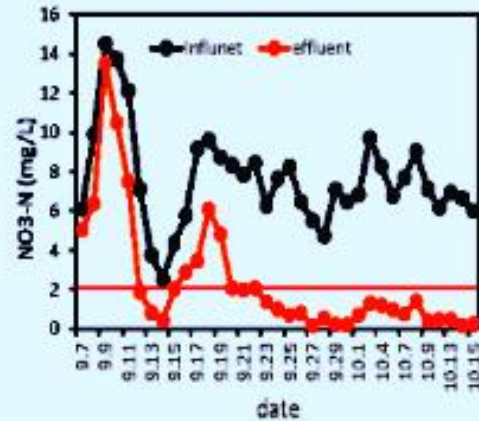


### 高负荷脱氮



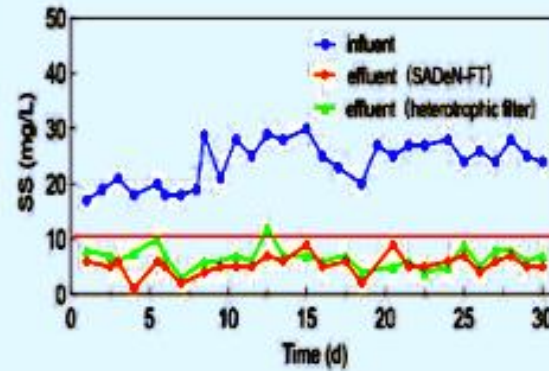
达到单质硫的1.5倍  
最高可达0.8kgN/ (m³·d)

### 极限脱氮功能



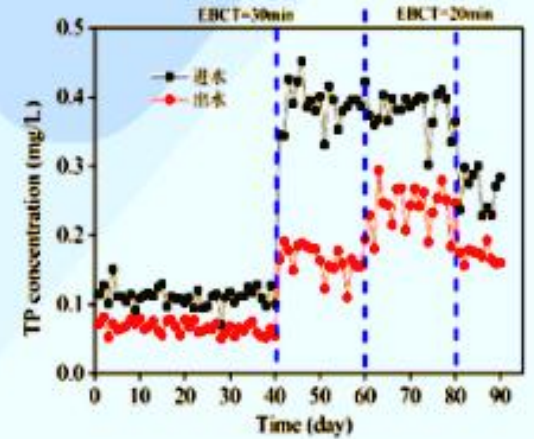
宜兴项目出水硝态氮  
稳定达到2mg/L以下

### 高效过滤功能



进水SS<30mg/L的情况下  
出水SS<10mg/L

### 部分除磷功能



复配的Fe<sup>2+</sup>离子通过吸附、络合等反应实现高效除磷

- 单质硫 - 菱铁矿复合材料滤池：**
- ◆ 属于较为**成熟**的技术产品
  - ◆ 可实现**碳源零添加脱氮**
  - ◆ 具备极限脱氮能力，总氮去除率高达**98%**以上
  - ◆ 对**SS**有很好的同步去除效果，可对**TP**部分去除。





# 低碳创新技术

## 自养反硝化技术：单质硫 - 菱铁矿复合材料滤池



市政污水处理厂  
改造/新建



宜兴城市污水概念厂  
2万m<sup>3</sup>/d

总氮稳定 **<3mg/L**  
脱氮成本较传统降低 **>50%**  
碳排放降低 **80%以上**



工业园区污水处理厂  
改造/新建

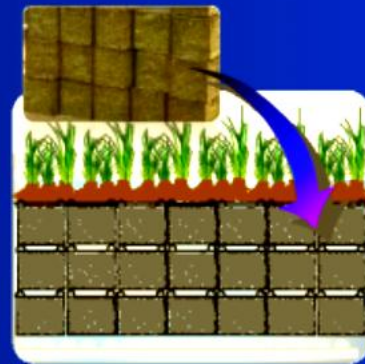


宁晋经济开发污水厂  
4万m<sup>3</sup>/d

脱氮负荷接近传统约 **0.5 kg**  
显著降低了 **反冲洗能耗**  
污泥量少 **污泥处置压力小**



人工湿地  
预处理段



深圳石岗水库人工湿地  
1.6万m<sup>3</sup>/d

总氮稳定到 **I类水 <1.0 mg/L**  
对上游总氮可实现有效拦截



农村污水  
(一体化设备)



白洋淀淀中村  
200m<sup>3</sup>/d

全年最低水温 **8°C**  
总氮稳定到 **IV类水 <1.5 mg/L**  
尾水可直排白洋淀



# 低碳创新技术

## 自养反硝化技术：单质硫 - 菱铁矿复合材料滤池

应用场景	名称	地理位置	水厂规模 ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	设计进水 ( $mg \cdot L^{-1}$ )	设计出水 ( $mg \cdot L^{-1}$ )
市政污水 深度脱氮处理	东阳中持污水处理厂	浙江省金华市	139000	15	10
	宜兴城市污水资源概念厂	江苏省无锡市	20000	12	3
	潍坊高新区污水处理厂	山东省潍坊市	6250	18	10
	临西县洁达污水处理厂	河北省邢台市	20000	20	13
	安徽六安凤凰桥污水处理厂	安徽省六安市	12000	12	5
工业园区污水 深度脱氮处理	义马第一污水处理厂	河南省三门峡市	50000	15	10
	宁晋经济开发区污水处理厂	河北省邢台市	40000	15	10
	故城县营东新区污水处理厂	河北省衡水市	5000	15	10
	天津胜科活性自持深度脱氮滤池	天津市滨海新区	5000	20	5
人工湿地 总氮削减	晋城市金匠污水处理厂	山西省晋城市	5000	17	12
	廊坊人工湿地	河北省廊坊市	5000	12	3
	深圳铁岗-石岩水库一期生态湿地	广东省深圳市	30000	3	1
分散点源污水	白洋淀淀中村农村污水项目	河北省雄安新区	200	15	4







# 低碳创新技术

《国家绿色低碳先进技术成果目录》 2023.05

- 创新技术1: 城市污水**短程反硝化耦合部分厌氧氨氧化**深度脱氮技术
- 创新技术2: 膜生物反应器-超低压纳滤双膜法污水资源化技术
- 创新技术3: 高效节地型生物膜污水净化技术装备
- 创新技术4: 高效节能模块装配式污水处理集成系统
- 创新技术5: 全流程节能降耗精准运行控制技术
- 创新技术6: 膜生物反应器系统**高效节能膜擦洗技术**与装备（**振动膜技术**）
- 创新技术7: 耐污染**平板膜**生物反应器
- 创新技术8: **纳米平板陶瓷膜**污水处理技术及一体化装备
- 创新技术9: 污水深度处理臭氧催化氧化技术
- 创新技术10 基于污染源源解析及点面源治理的小流域综合整治集成技术
- 创新技术11 雨污合流及地表径流水污染处理系统

共18种，7种工业废水处理技术

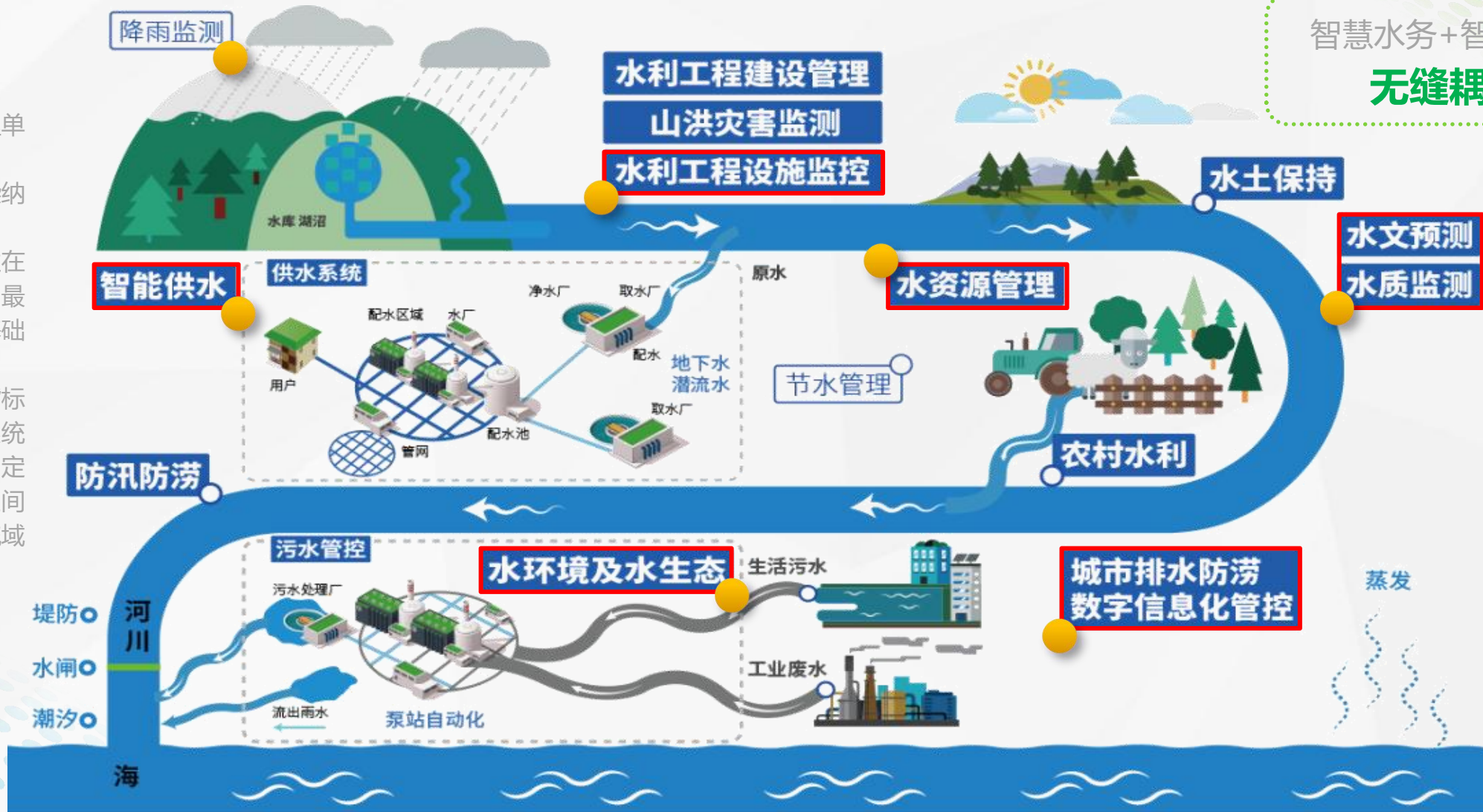


# 低碳创新技术

## 智慧水务-功能目标与层次

智慧水务+智慧水利  
**无缝耦合**

- ◆ 以流域为管理单元
- ◆ 将非点源污染纳入总体管理中
- ◆ 负荷分配建立在水环境容量和最大污染负荷基础上
- ◆ 将多个水质指标纳入同一个系统
- ◆ 建立基于不确定性分析安全区间
- ◆ 充分考虑各流域差异



水务管理的功能目标与层次：**水安全** **水资源** **水环境** **水生态**





# 低碳创新技术

## 智慧水务-供排水源网厂口河整体解决方案

排水系统已进入“源·网·厂·口·河”一体化时代，排水系统必须整体统筹集中管控



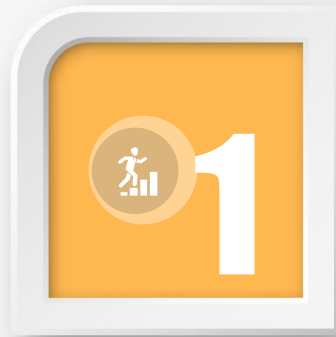


# 低碳创新技术

## 智慧水务-水力水质模型基本功能

### 混合模型搭建功能

可针对不同设施或系统灵活选择机理或化模型模式，模拟效率高。



### 源-网-厂-河耦合模拟功能

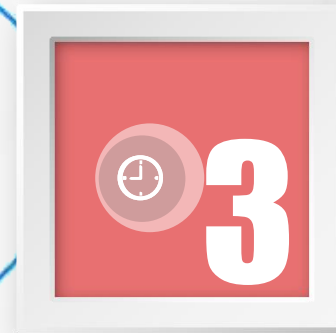
可实现排水系统“源头-过程-末端”全流程模拟，模型耦合度高。

### 优化控制功能

可动态地高速实现优化运行模拟，制定实时优化方案及控制规则。

### 辅助优化设计

操作简便，易于学习，可作为排水系统项目规划、咨询、设计阶段的辅助模拟评估工具







# 低碳创新技术

智慧水务-核心技术

厂站网一体化

Text can be replaced

全工艺过程模型仿真

Text can be replaced

核心技术  
Core Technology

数字孪生

Text can be replaced

智能巡检技术

Text can be replaced

设备资产及运营全生命周期管理

Text can be replaced

标题可以替换  
The title can be replaced

文字可以替换  
Text can be replaced

文字可以替换  
Text can be replaced



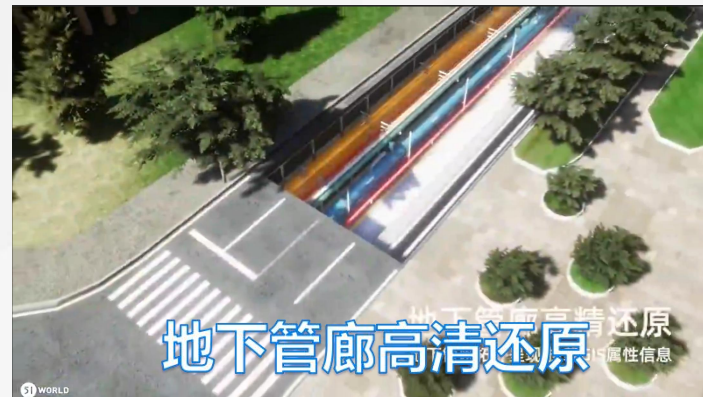
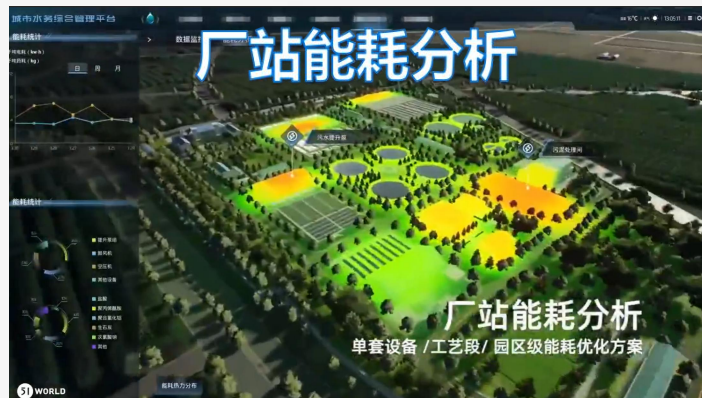






# 低碳创新技术

# 智慧水务-案例

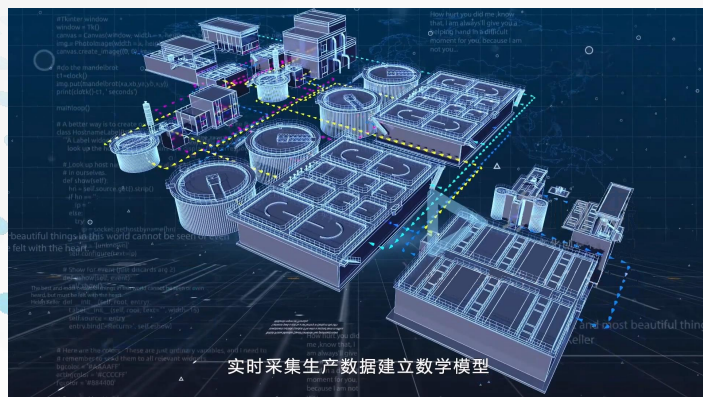
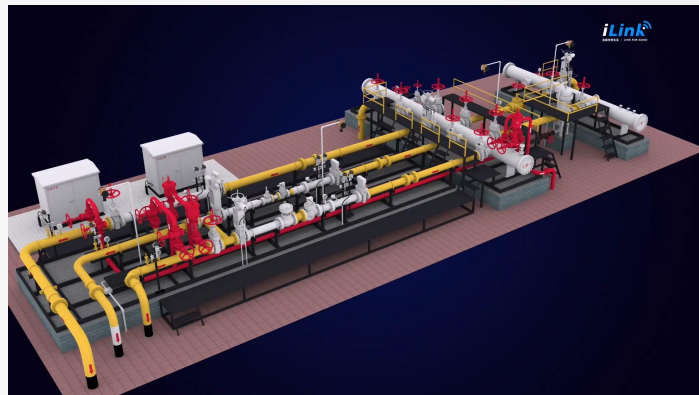
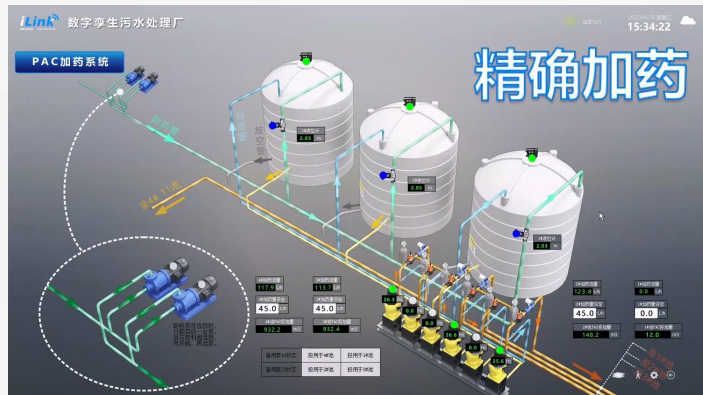
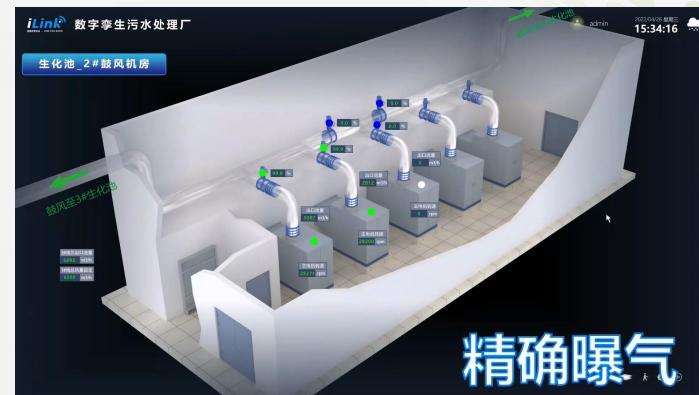
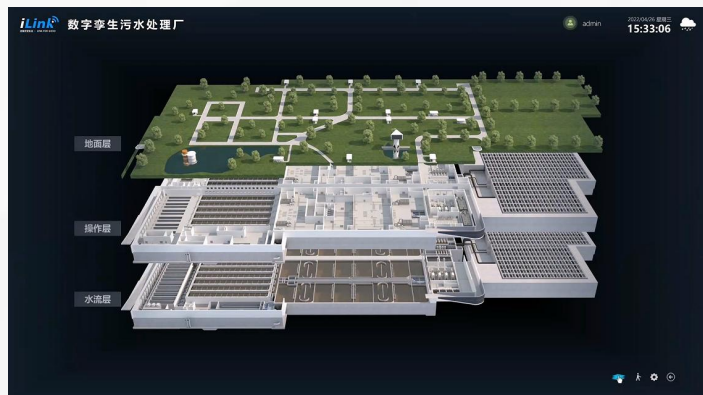






# 低碳创新技术

# 智慧水务-数字孪生+智慧控制



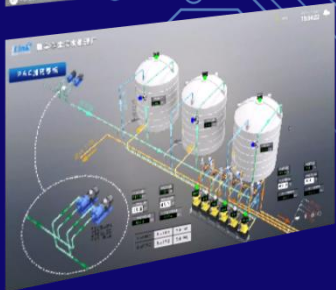
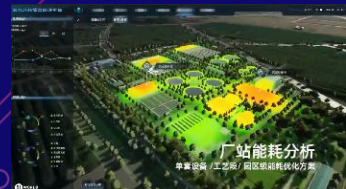




# 低碳创新技术

## 智慧水务-案例

### 控制智能化、数据资源化、管理精确化、决策智慧化







IN CHANGSHA, CHINA  
中国·长沙

# 感谢您的观赏

## 双碳背景下城市污水处理厂的设计运营控制策略

Design and Operation Strategies of Municipal Wastewater Treatment Plants in a Dual  
Carbon Context

汇报人：刘 影

湖南省建筑设计院集团股份有限公司