



绿色制造 技术前沿与发展趋势

报告时间

2026-04-23

报告人

黄卫清教授
省重大科技人才入选者

报告地点

松山湖
东莞理工学院





01

绿色制造发展前景及意义

02

绿色制造/清洁生产实施路径与工具

03

工业应用与科技前沿

04

应用价值及示范

01. 为什么需要绿色制造?



制造业带来的环境挑战：传统制造业在创造巨大物质财富的同时，也带来了严峻的环境挑战

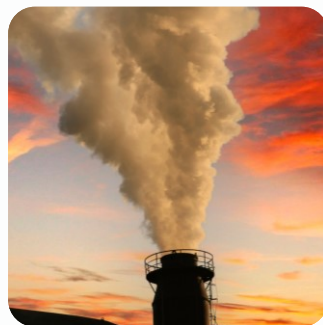


Resource depletion

资源过度消耗



工业废水排放



废气污染空气

■ **资源枯竭**：不可再生资源被大量消耗，面临枯竭危机。

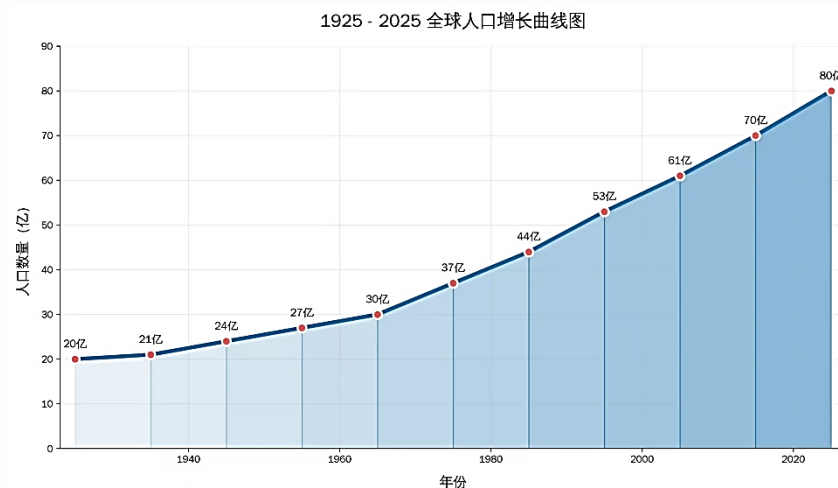
✕ **环境污染**：工业“三废”排放严重污染空气、水源和土壤。

🔥 **气候变暖**：温室气体大量排放，加剧全球气候变化。

绿色制造转型势在必行

从“高消耗、高污染”向“高效、低碳、循环”转变

人口激增：



01. 为什么需要绿色制造?



近期国家政策推动：绿色制造与清洁生产势在必行

- 1、《“十四五”全国清洁生产推行方案》（2021，发改环资〔2021〕1524号）：提出把清洁生产作为绿色制造的核心手段，贯穿绿色工厂、绿色园区、绿色供应链建设；要求工业领域全面推行清洁生产，与绿色化改造、减污降碳协同推进；清洁生产审核结果作为绿色制造评价、差异化政策的重要依据。
- 2、工信部、发改委、生态环境部，《工业领域碳达峰实施方案》，2022年：提出全面提升重点行业清洁生产水平；“十五五”期间，基本建立以高效、绿色、循环、低碳为重要特征的现代工业体系。
- 3、工信部等七部门，《关于加快推动制造业绿色化发展的指导意见》，2024.2（工信部联节〔2024〕26号）：聚焦制约新兴产业绿色发展的瓶颈环节；部署绿色制造技术创新与清洁生产工艺改造一体化推进；强化绿色制造标准与清洁生产审核的联动实施；以绿色制造体系为框架、清洁生产为基础手段。
- 4、《制造业绿色低碳发展行动方案（2025—2027年）》国务院部署，2025年重点推进。
2025年目标：重点行业能效与污染控制达国际先进水平，绿色工厂产值占比提升至25%以上；
2027年目标：制造业绿色低碳技术广泛应用，资源循环利用水平显著提升，绿色制造体系基本建成。



01. 为什么需要绿色制造?



什么是绿色制造?



定义

将环境影响和资源效率纳入现代制造模式，在产品的设计、生产过程、材料选择、能源利用和废弃物处理等各个环节中，最大限度地减少对环境的负面影响，降低资源消耗和污染排放，实现资源的高效利用和制造业的可持续发展。

什么是清洁生产?



定义

2012年《清洁生产促进法》：指不断采取改进设计、使用清洁能源和原料、采用先进工艺技术与设备、改善管理、综合利用等措施，从源头削减污染，提高资源利用效率，减少或避免生产、服务和产品使用过程中污染物的产生与排放，以减轻或消除对人类健康和环境的危害。



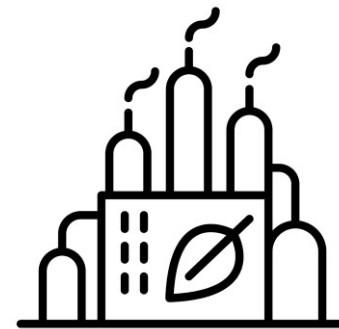
核心目标和意义

实现可持续发展，走绿色低碳之路；解决资源环境瓶颈、应对全球竞争、实现制造业转型升级。



绿色制造的主要内容

1. 节能减排：采用先进工艺和设备减少能源消耗和有害气体排放；
2. 清洁生产：优化生产流程，减少废水、废气和固体废弃物的产生；
3. 资源循环利用：推动材料回收和再利用，减少原材料的消耗；
4. 环保设计：产品设计阶段考虑环保因素，延长产品寿命，便于拆解和回收；
5. 绿色供应链管理：从采购、生产到销售全过程考虑环境影响，实现全链条绿色管理。



清洁生产

清洁的能源

- 节约能源，降低能耗，提高能源使用效率
- 清洁利用矿物燃料，发展高效、清洁的燃煤节煤技术和先进的除尘脱硫、脱硝技术等。
- 大力开发可再生能源，如水能、风能、海洋能、生物质能等。

清洁的产品

- 产品设计应考虑节约原材料和能源，少用昂贵和稀缺的原料。
- 产品在使用过程中及使用后不会危害人体健康和破坏生态环境。
- 产品的包装合理，产品使用后易于回收、重复使用和再生，使用寿命和使用功能合理。

清洁的生产过程

- 采用无毒、无害或者优质的原辅材料
- 采用无废、少废、先进、安全的生产工艺以及布局，合理并实行科学管理的高效生产设备。
- 合理利用能源资源，降低消耗和毒性，搞好末端治理，综合利用。



对比维度	清洁生产	绿色制造
覆盖范围	窄：主要聚焦生产过程内部	宽：覆盖产品全生命周期 设计→原料→生产→物流→使用→回收
核心目标	节能、降耗、减污、增效，环境优先	环境+经济+社会协同，兼顾降碳、循环、高质量发展
实施视角	企业内部、生产端	全产业链、供应链、园区、区域系统
主要内容	工艺改进、原料替代、节能节水、末端减量	绿色设计+绿色工厂+绿色供应链+绿色产品+再制造+低碳数字化
定位属性	环保技术手段、基础管理措施	国家战略、产业体系、新型工业化方向

• 清洁生产是绿色制造的基础与核心手段

• 绿色制造是清洁生产的拓展、升级与系统化



02. 绿色制造与清洁生产实施的主要工具



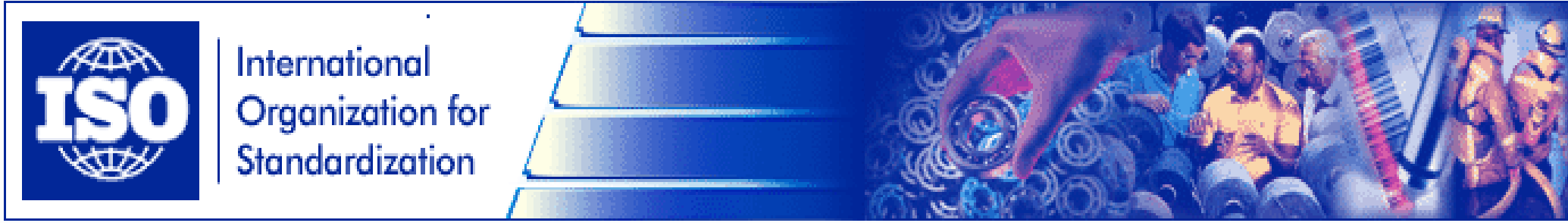
生态效益 (Eco-efficiency)：是由世界企业可持续发展委员会 (WBCSD) 提出的一种经营管理哲学，由联合国环境规划署的清洁生产计划在全球推广，目的是鼓励企业更具有竞争性，同时也更能够顾及保护环境的需要。生态效益的7点要素为：



- 减少商品和服务的原料集中度(material intensity)
- 减少商品和服务的能源集中度(energy intensity)
- 减少有毒物的扩散
- 提高原料的可回收性
- 使可更新的资源达到最大限度的永续经营
- 延长产品的的耐久性
- 增加商品和服务的服务强度(service intensity)



02. 绿色制造与清洁生产实施的主要工具



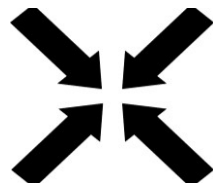
ISO 14000 环境管理系统 (ISO 14000 EMS)：为帮助企业改善环境行为，消除贸易壁垒，促进贸易发展，1992年12月，在国际标准化组织 (ISO) “环境问题特别咨询组” 的建议下，ISO技术委员会决定制定一个与质量管理体系方法相类似的环境管理体系方法。为此，ISO借鉴其成功推行ISO9000的经验，总结了各国环境管理标准化的成果，尤其是参考了英国环境管理体系标准BS7750 (BS7750是“一种环境管理体系的规范，旨在保证企业的环境行为符合其所确定的环境方针与环境目标”)，于1996年底正式颁布了ISO14000环境管理系列标准。ISO14000系列标准颁布以后，立即被世界各国广泛采用，作为本国标准推广实施。





绿色设计 (Green Design) 是20世纪80年代出现的一股国际设计潮流，绿色设计 (Green design) 也称为生态设计 (Ecological design)，环境设计 (Design for environment) 等，其基本思想是：在设计阶段就将环境因素和预防污染的措施纳入产品设计之中，将环境性能作为产品的设计目标和出发点，力求使产品对环境的影响为最小。

绿色设计的核心原则：3R原则



减量化 (Reduce)

从源头减少资源的使用和废弃物的产生。例如，通过优化设计，减少产品的重量和体积，提高材料利用率。



再使用 (Reuse)

设计的产品或其零部件能够被多次使用，而不是一次性丢弃。例如，采用模块化设计，便于零部件的更换和升级。



再循环 (Recycle)

产品在使用寿命结束后，其材料能够被回收并重新加工利用，形成资源的循环闭环。



02. 绿色制造与清洁生产实施的主要工具



德国的“蓝天使”



加拿大“环境选择”



北欧白天鹅



欧洲之花



美国能源之星



香港环保标签



I型



II型



III型

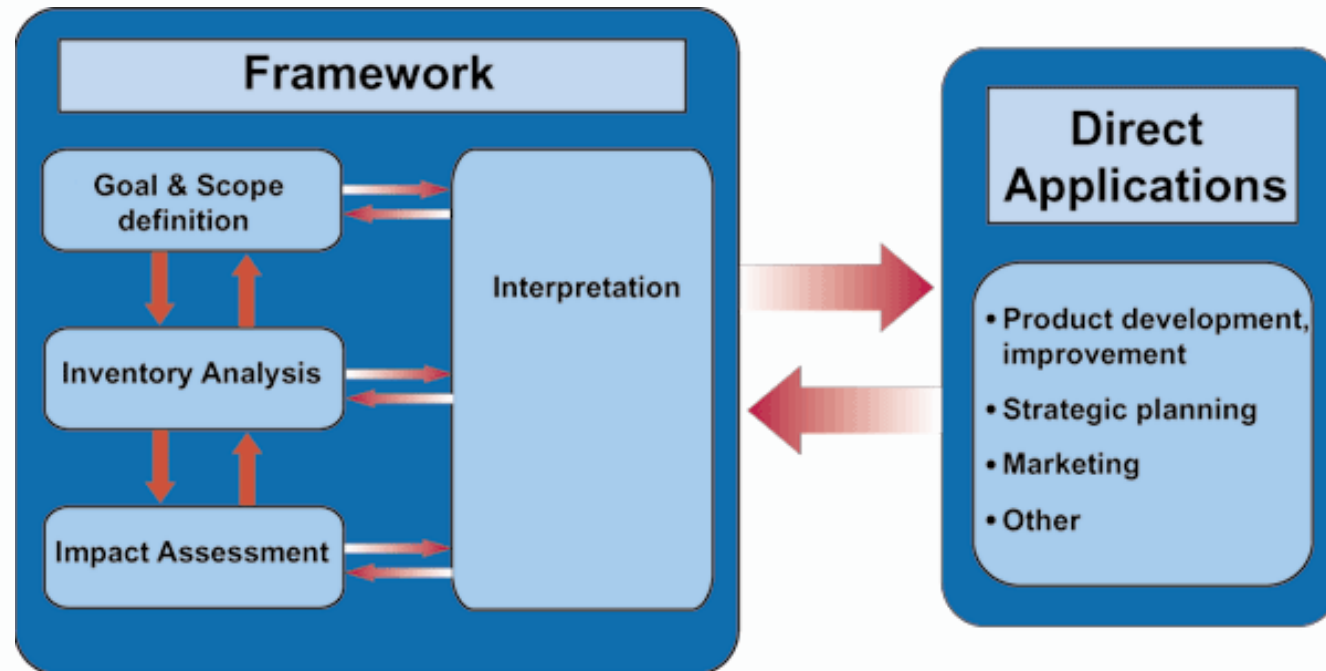
- 1994年5月中国启动环境标志产品认证



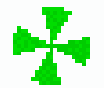
02. 绿色制造与清洁生产实施的主要工具



生命周期评价 (LCA) 方法可追溯到70年代的二次能源危机，当时，许多制造业认识到提高能源利用效率的重要性，于是开发出一些方法来评估产品生命周期的能耗问题，以求提高总能源利用效率。八十年代，生命周期评价方法日臻成熟，到了九十年代，在美国“环境毒理学和化学学会” (SETAC) 和欧洲“生命周期评价开发促进会” (SPOLD) 的大力推动下，生命周期评价方法在全球范围内得到较大规模的应用。



 **清洁生产审核**是企业实现清洁生产的最重要的工具，也是企业实施清洁生产的核心。

 是一种对污染来源、废物产生原因及其整体解决方案的系统化的分析和实施过程，其目的旨在通过实行预防污染分析和评估，寻找尽可能高效率利用资源（如：原辅材料、能源、水等），减少或消除废物的产生和排放的方法。



企业为什么要实施清洁生产？



实施强制性清洁生产审核的企业范围 ——法律的要求



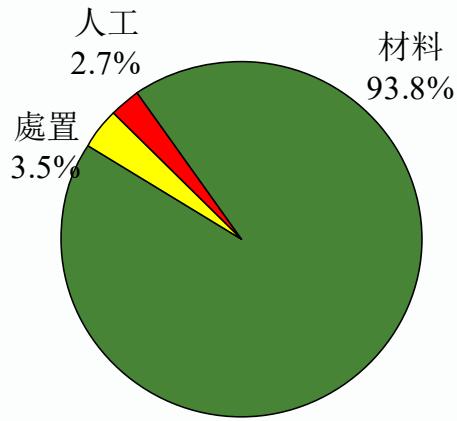
污染物排放超过国家和地方规定的
排放标准的企业

污染物排放超过有关地方人民政府
核定的污染物总量控制指标的企业

使用有毒、有害原料进行生产或在
生产中排放有毒、有害物质的企业



避免企业面临的环境压力和风险



某塑料零件厂

- ✓ 减少污染末端治理的成本 (3.5%?)
- ✓ 环境问题的“法律化”正在对企业施加越来越大的影响
- ✓ 日益严重的资源短缺和环境恶化，使得以耗取大量资源、能源为基本条件的传统产业发展越来越困难 ■
- ✓ 顾客更青睐有利于环保的产品，无论是个人、企业还是政府，都越来越关注环保问题，员工(特别是出色的员工)更愿意为对环境负责的公司工作
- ✓ 银行更愿意向对环境负责的企业贷款，保险公司更愿意向对环境负责的企业担保
- ✓ 各种税收及贸易条例越来越多地涉及企业的环境行为。

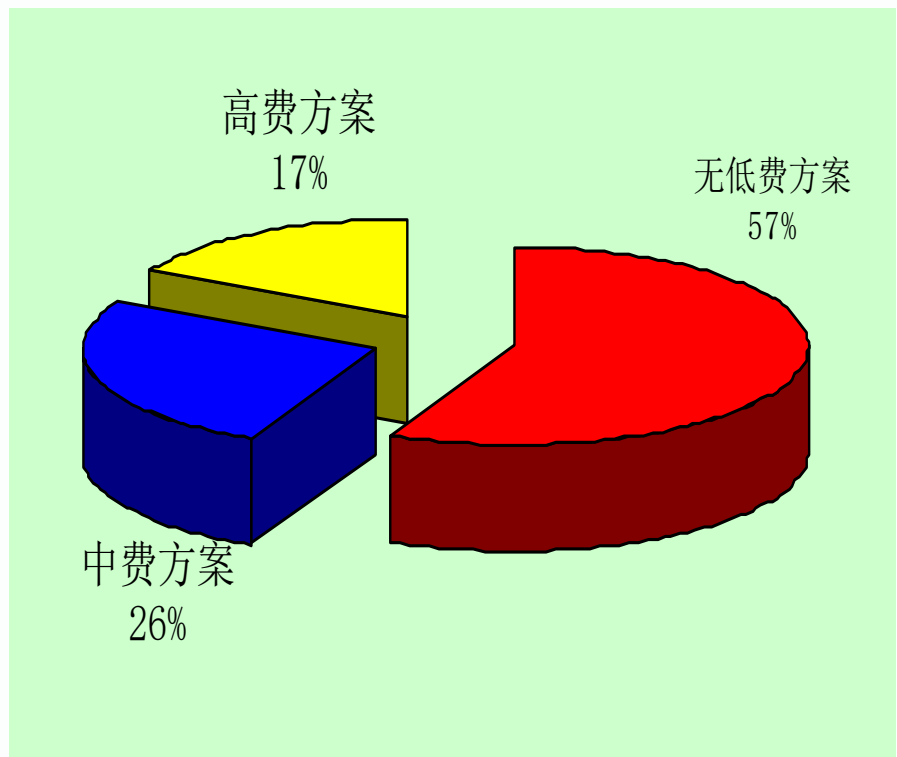
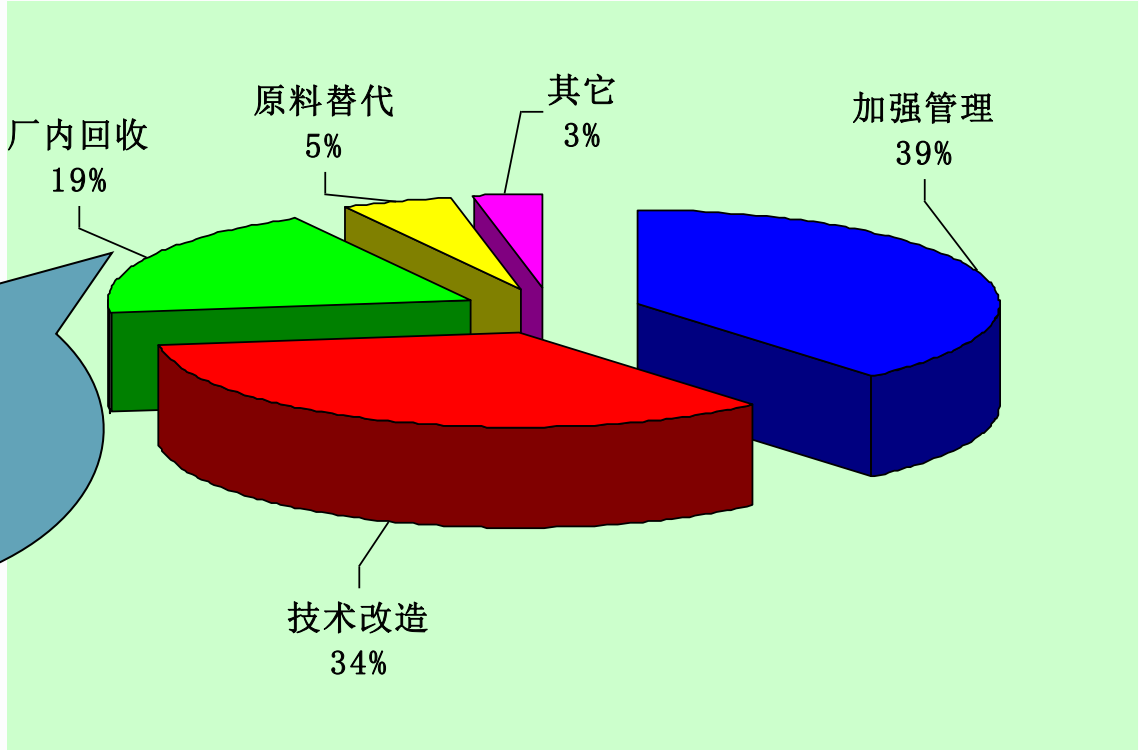
清洁生产是企业走向实现可持续发展的最佳途径



企业清洁生产潜力分析

各种方案类型所占的比例

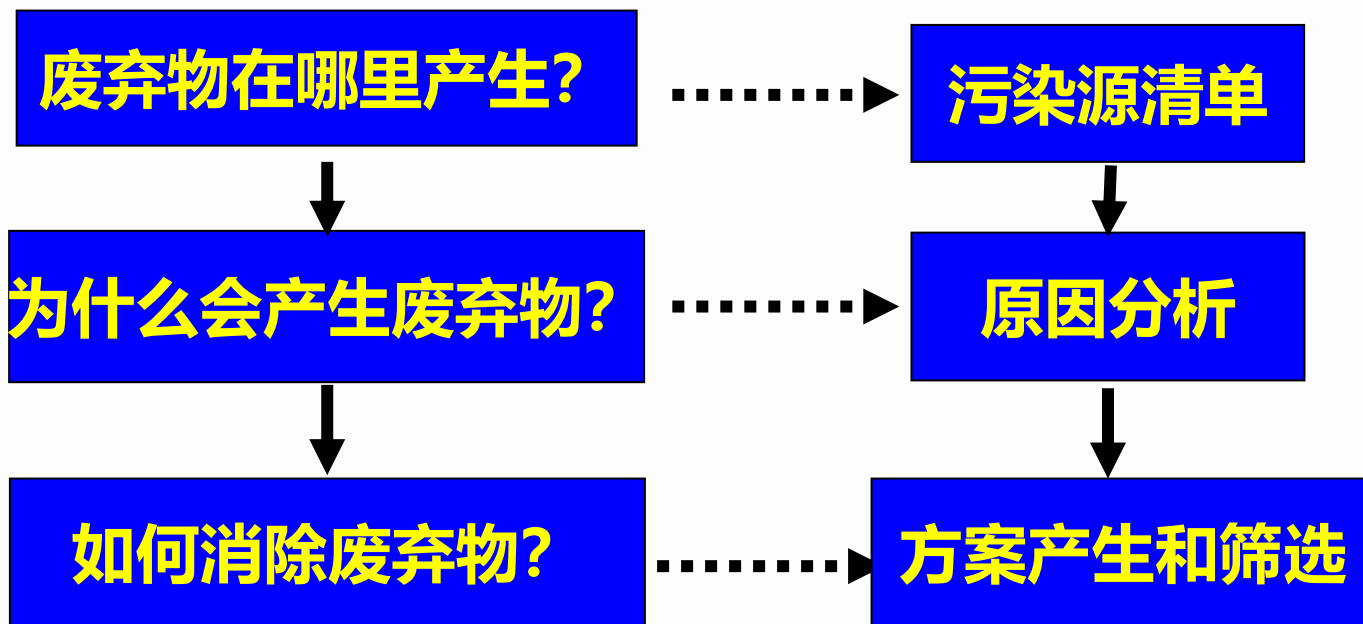
试点企业审核结果表明目前中国企业存在大量的清洁生产机会



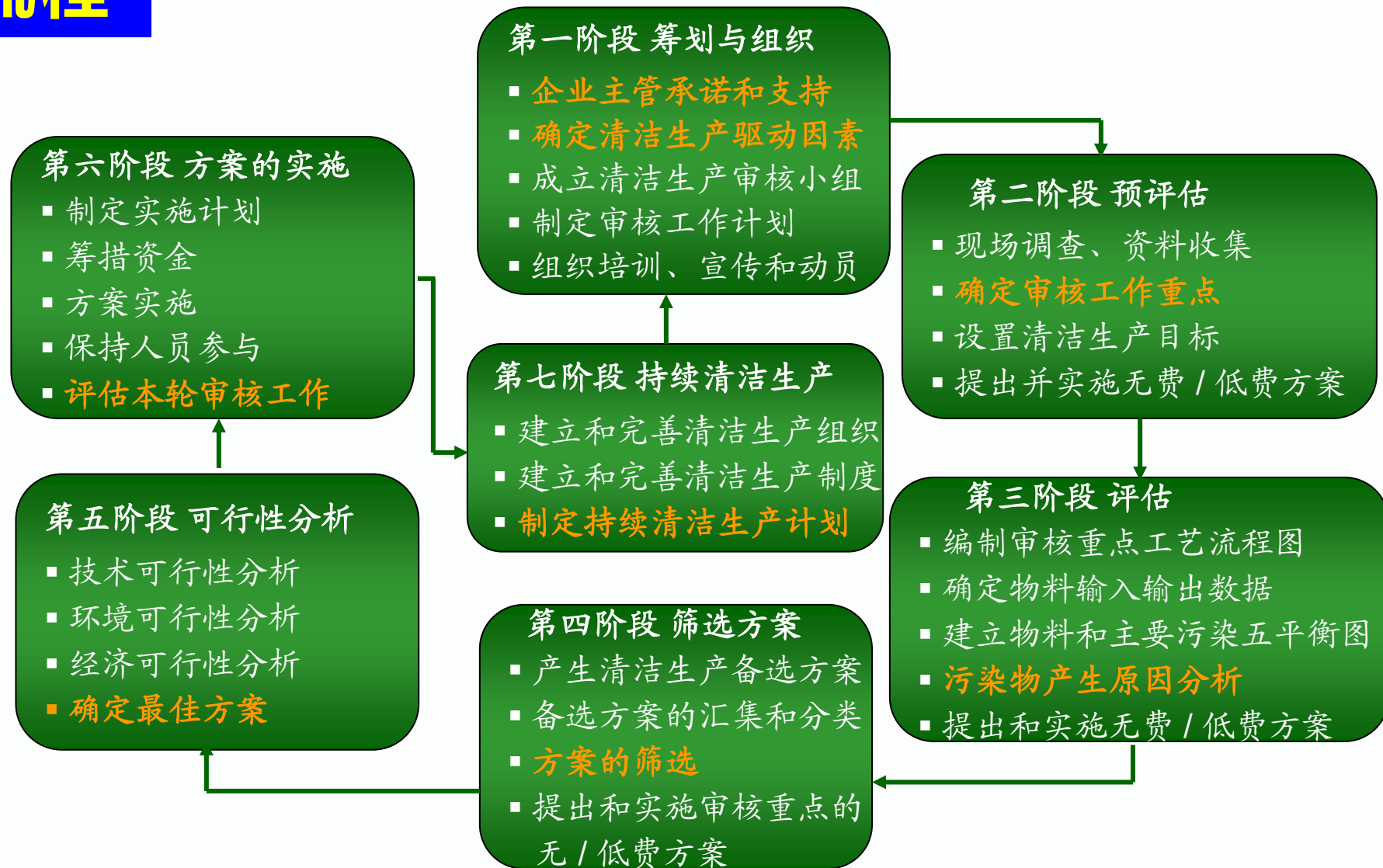
清洁生产审核的定义

清洁生产审核，一般指对企业单位，主要是**工业企业**，运用以文件支持的一套系统化的程序方法，进行**生产全过程评价**、**污染预防机会识别**、**清洁生产方案筛选**的综合分析活动过程。它是支持和帮助企业有效开展预防性清洁生产活动的工具和手段，也是企业实施清洁生产的基础。

清洁生产审核的基本思路



清洁生产审核流程



评估阶段的主要工作内容

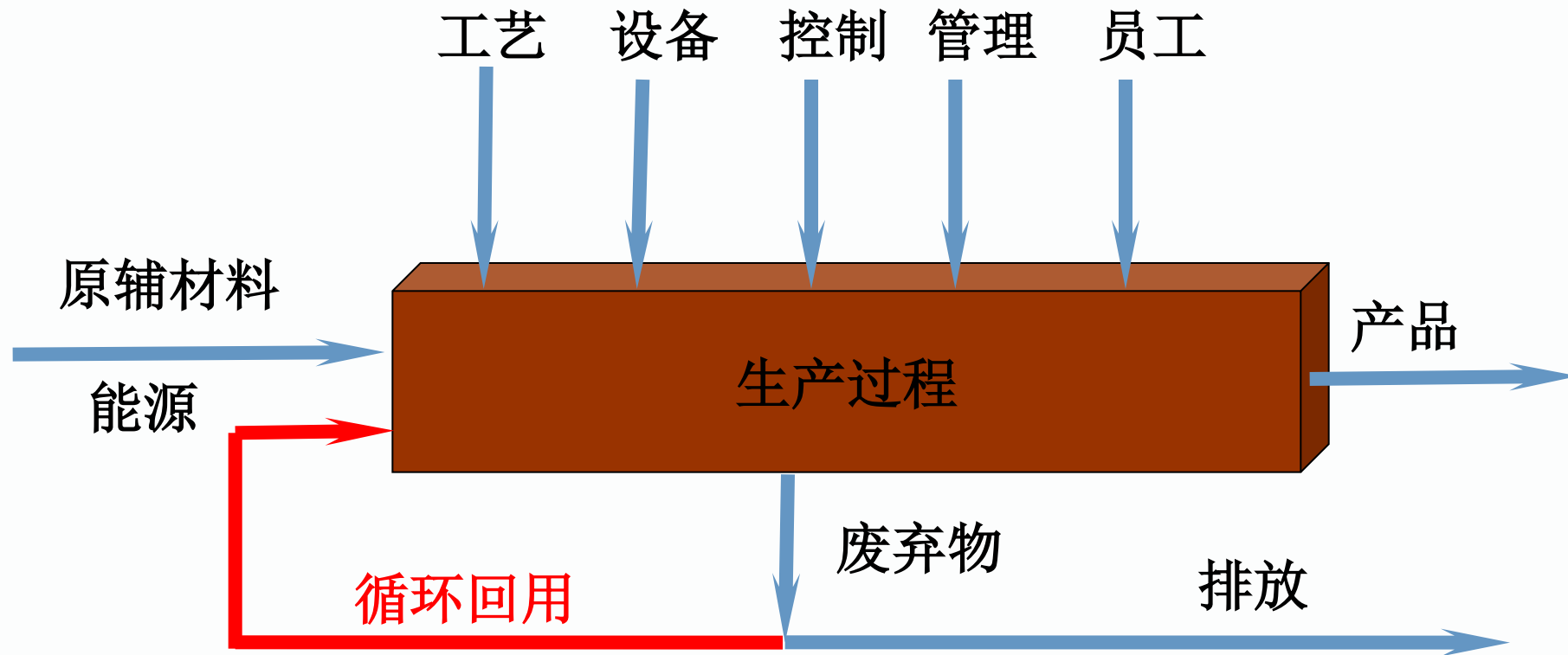
- ◆ 收集审核重点的相关资料（工艺流程框图、设备流程图，原辅材料消耗）
- ◆ 确定所有操作单元的输入输出物料
- ◆ 实测输入、输出物料数量（包括原辅材料和废弃物）
- ◆ 建立物料平衡（水、能平衡）
- ◆ 废弃物产生原因分析
- ◆ 继续提出和实施无低费清洁生产方案



02. 绿色制造与清洁生产实施的主要工具

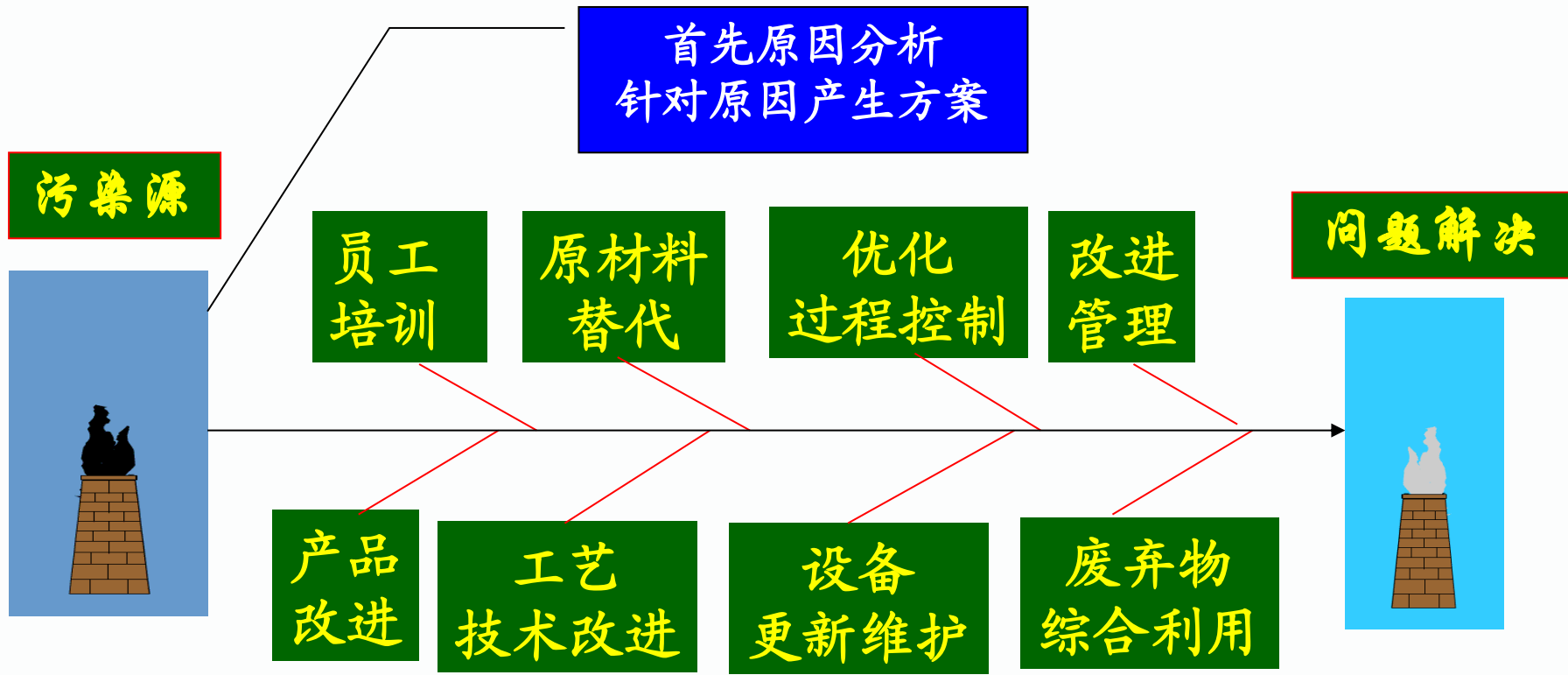


废弃物产生原因分析和清洁生产实施方案：八大路径



02. 绿色制造与清洁生产实施的主要工具

产生清洁生产方案—系统的方法



03. 工业应用与科技前沿案例



案例分析：LED照明的绿色革命



传统白炽灯痛点：能耗高（效率仅10%-20%）、寿命短、含汞污染环境。



LED 核心优势：

- 高效节能：发光效率80%-90%，节能超80%
- 超长寿命：5万小时+，安全无汞，响应速度快

从白炽灯到LED：照明技术的进化

LED灯的普及不仅降低了能耗成本，更通过无汞化和长寿命实现了真正的绿色环保。

大力开发绿色新产品、新工艺



节能照明 (LED)



绿色交通 (新能源车)



清洁能源 (太阳能)

ACS Sustainable Chemistry & Engineering

Process Design and Techno-Economic-Environmental Assessment of the Solar High-Temperature Pyrolysis for Producing Ethylene Glycol from H₂O and CO₂

Weiqing Huang,* Xin Zhang, Sheng Yang,* and Yu Qian

Cite This: <https://doi.org/10.1021/acscchemeng.5c07432> | Read Online

ABSTRACT: The supply contraction of ethylene glycol (EG) in China is rising, and new technology should be explored to reduce CO₂ emissions, energy consumption, and production costs in EG production to meet China's carbon peak and carbon neutrality policy. This study proposes three solar high temperature pyrolysis of H₂O/CO₂ to EG technologies, including CO₂ to EG technology (S₁-tEG), H₂O to EG technology (S₂-tEG), and CO₂-H₂O to EG technology (S₃-tEG). Through industrial data and literature data and Aspen simulation, the validity of the technology model was established, the relevant parameters were studied and optimized, and their techno-economic-environmental performances were compared with those of coal to EG technology (CtEG). The process simulation results in Aspen software showed that the energy efficiency of S₁-tEG and S₂-tEG increased from 30.68% to 47.21% and 40.43% and that of S₃-tEG was close to that of the CtEG process, at 25.68%. The new technologies can effectively reduce the total production cost by 34.07%, 29.47%, and 32.9%, respectively, and improve the internal rate of return by 10.09%, 1.42%, and 8.82%. The new technologies can achieve zero carbon emissions and use CO₂ as crude material to produce EG, reducing the total greenhouse gas emissions to -6.01 t/t, -5.62 t/t and -6.02 t/t. This study may provide a theoretical basis and a feasible and sustainable pathway for the EG industry with high carbon emissions.

KEYWORDS: solar energy, CO₂ emission, high temperature pyrolysis, ethylene glycol

案例分析：水泥行业的绿色技术革命



现代化水泥生产线实景

Journal of Cleaner Production 349 (2022) 131490

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro



✕ 传统工艺痛点

能耗高、污染大、效率低、规模小，难以满足现代环保与产能需求。

🌱 新型干法工艺优势

悬浮态换热与反应核心技术，实现节能、清洁、规模化生产。

技术革新核心数据成果

🔥 单位能耗

↓ 50%

📊 单线规模

几十倍

💰 吨水泥投资

↓ 60%

里程碑意义：新型干法生产工艺彻底改变了传统水泥工业的面貌，实现了从“高能耗、高污染”向“绿色、智能、高效”的历史性跨越。

Review of recent progress of emission trading policy in China

Weiqing Huang^{a,*}, Qiufang Wang^a, Han Li^a, Hongbo Fan^a, Yu Qian^b, Jiří Jaromír Klemes^c

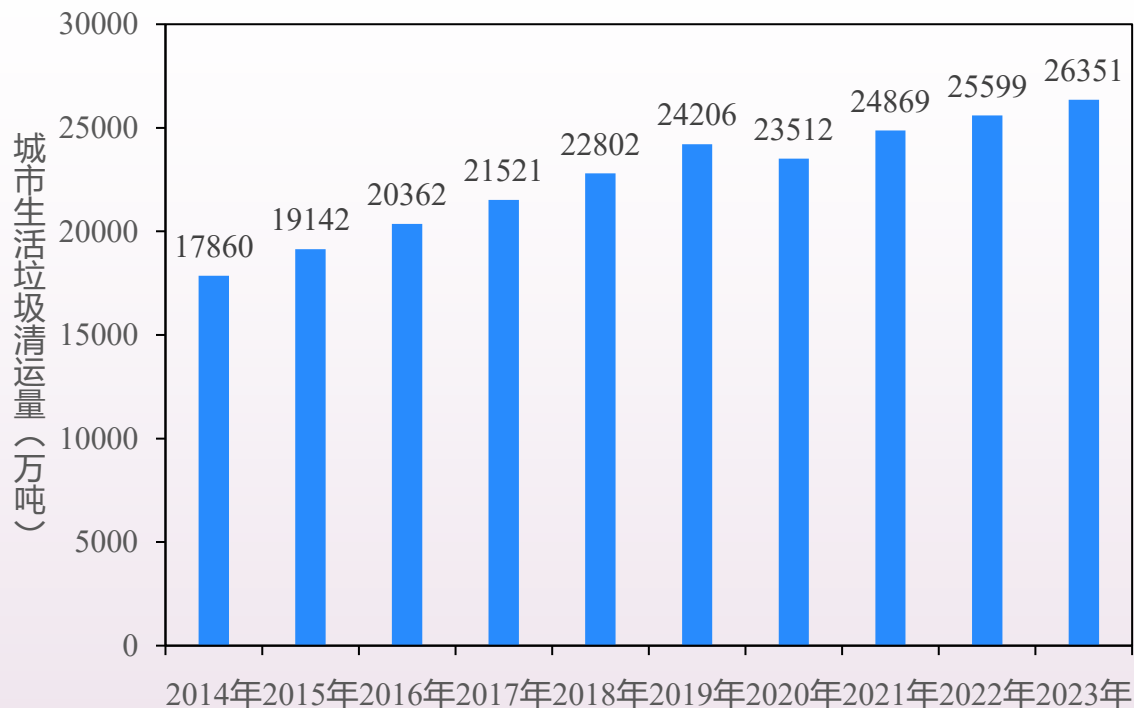
^a School of Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong, 523003, China

^b School of Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510640, China

^c Sustainable Process Integration Laboratory – SPIL, NETME Centre, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology – VUT Brno, Technická 2896/2, 602 00, Brno, Czech Republic

03. 工业应用与科技前沿案例：火电行业清洁生产科研案例

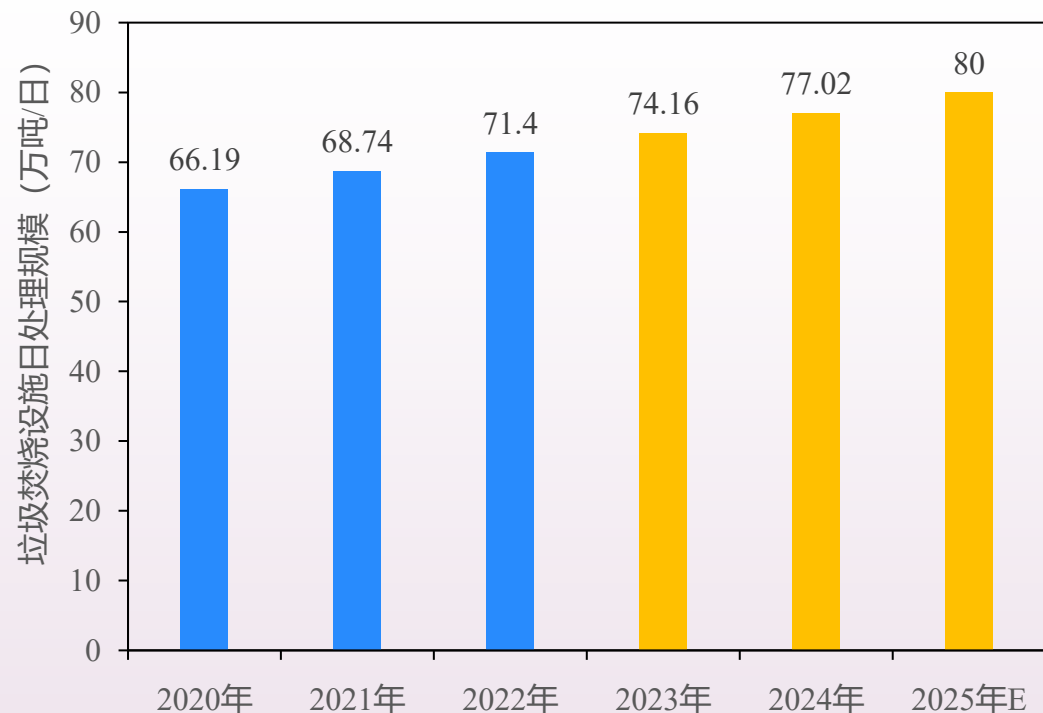
2014-2023年我国城市生活垃圾清运量（万吨）



近十年来，生活垃圾清运量从**1.79亿吨**增加至**2.64亿吨**，年均增长率达到**4.2%**。

数据来源：中国统计年鉴

十四五期间全国垃圾焚烧日处理规模/预测（万吨/日）

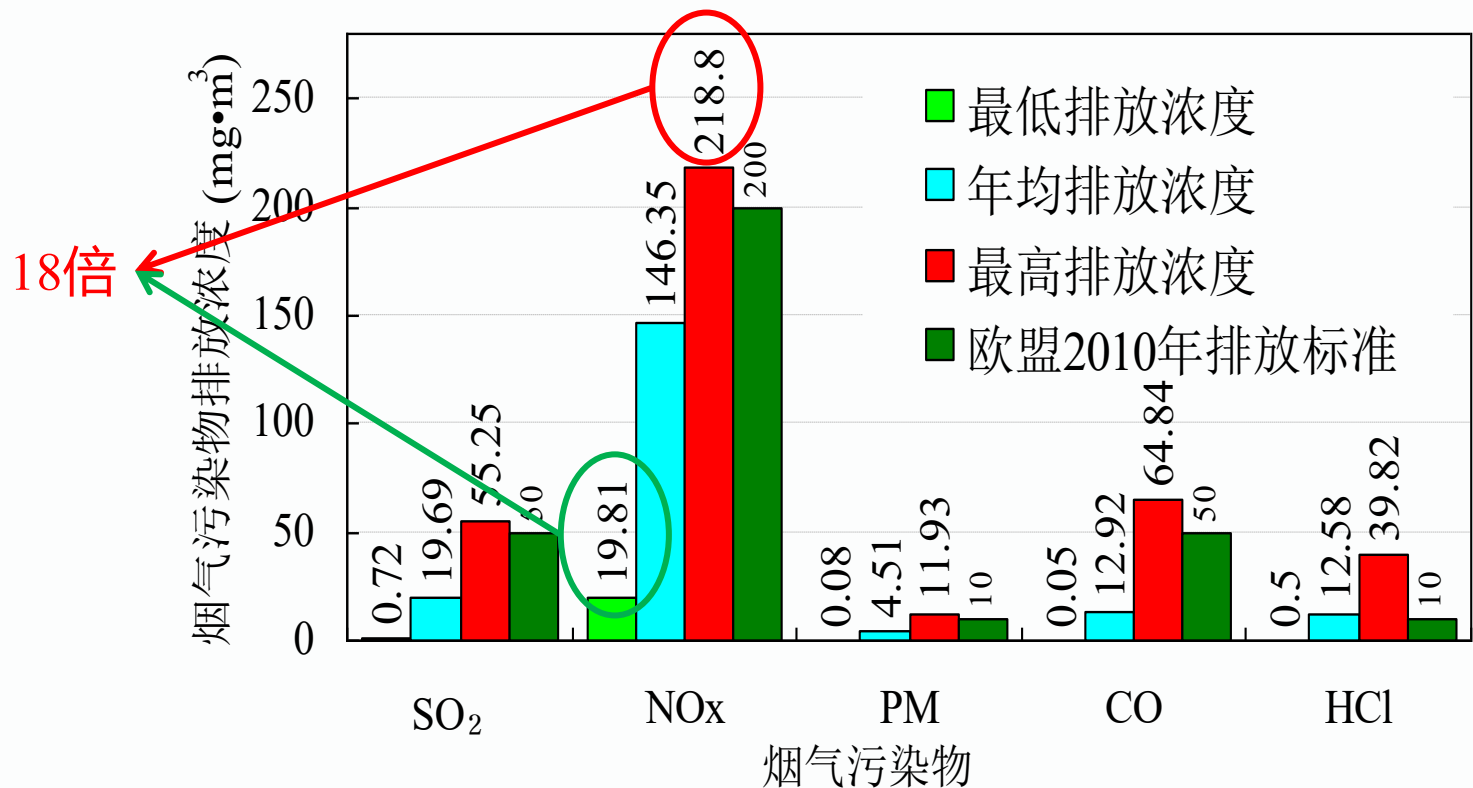


- 垃圾焚烧污染物已经没有环境容量
- 烟气污染物排放地方标准趋紧，开展减排工作是必然趋势

数据来源：中国生态环境统计年报

研究内容及研究方法

研究内容：“垃圾焚烧发电烟气污染物过量排放”成因分析



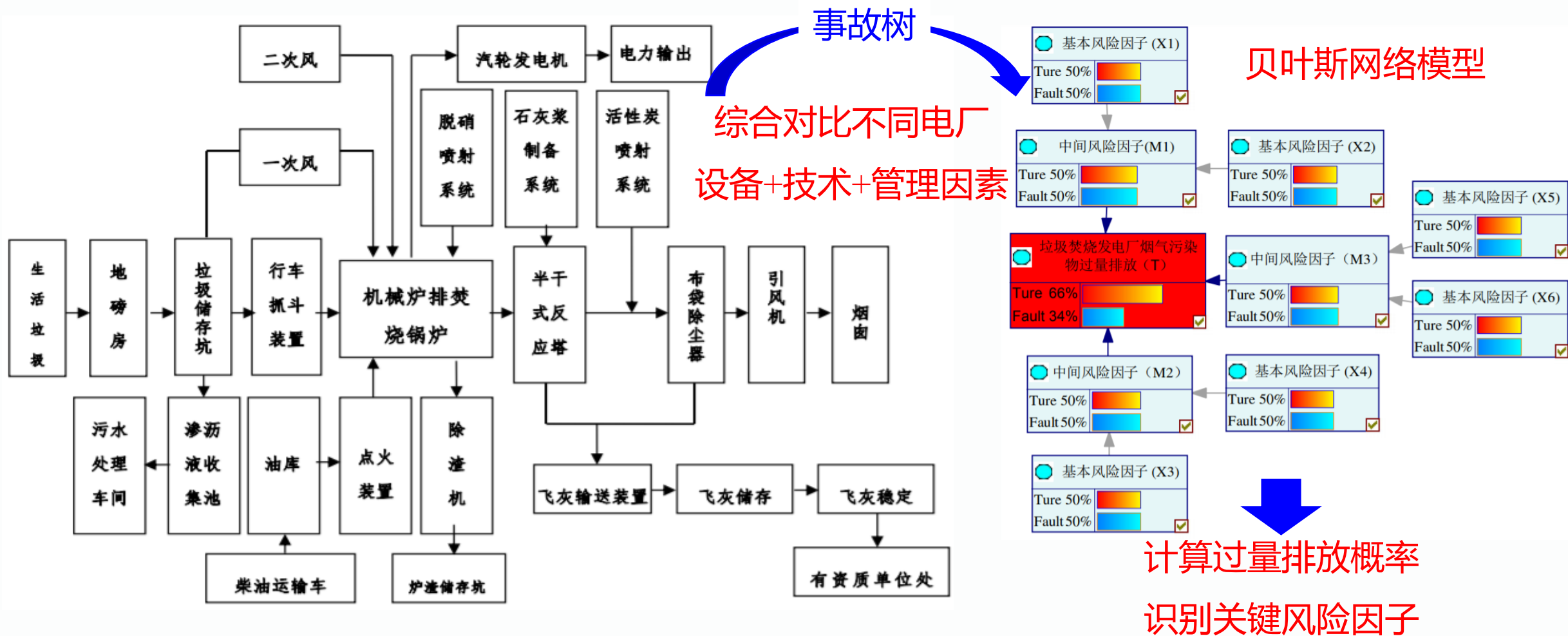
不同电厂污染物
排放差异显著

图4. 2020年我国垃圾焚烧发电厂烟气污染物24h排放浓度与欧盟2010年排放标准对比

——数据来源：生态环境部垃圾焚烧环境绩效平台

研究内容及研究方法

研究内容：“垃圾焚烧发电烟气污染物过量排放”致因机理分析



研究内容及研究方法

□ 所选电厂背景情况——烟气污染物排放浓度

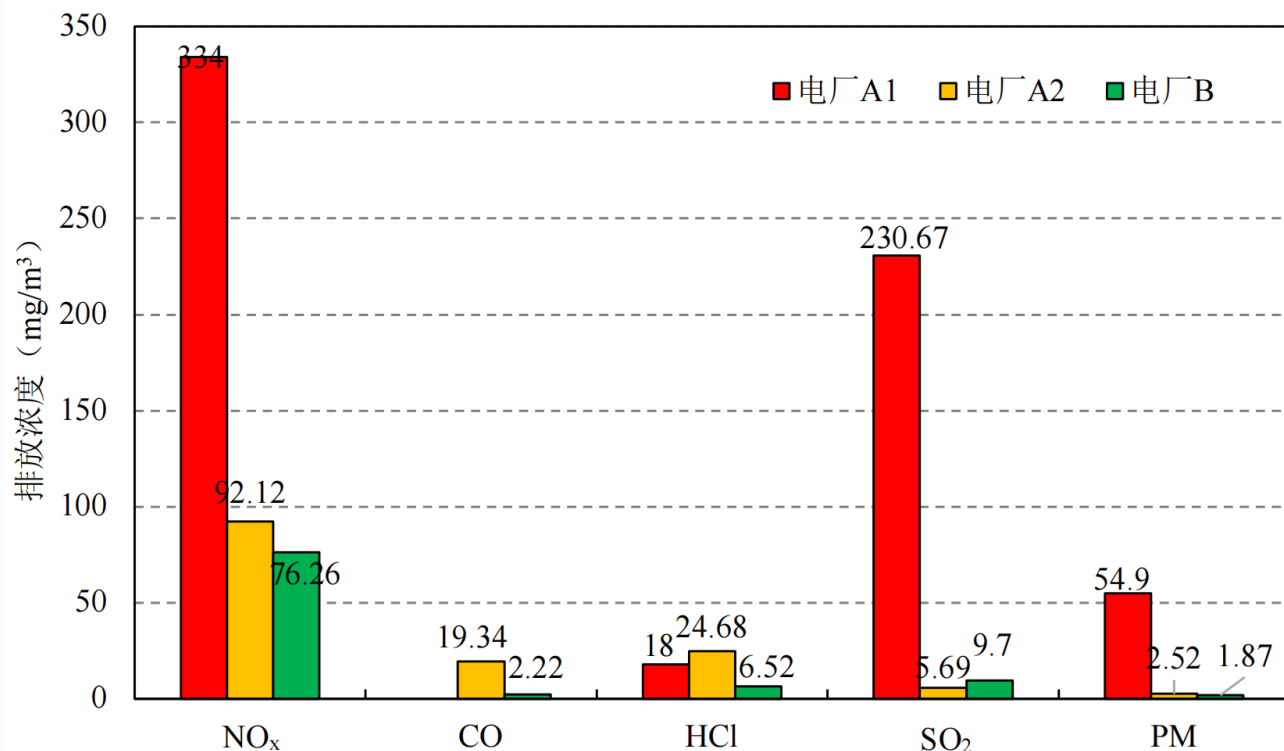


图5. 所选垃圾焚烧发电厂烟气污染物年均排放浓度
——数据来源：青悦开放环境数据中心

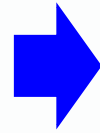
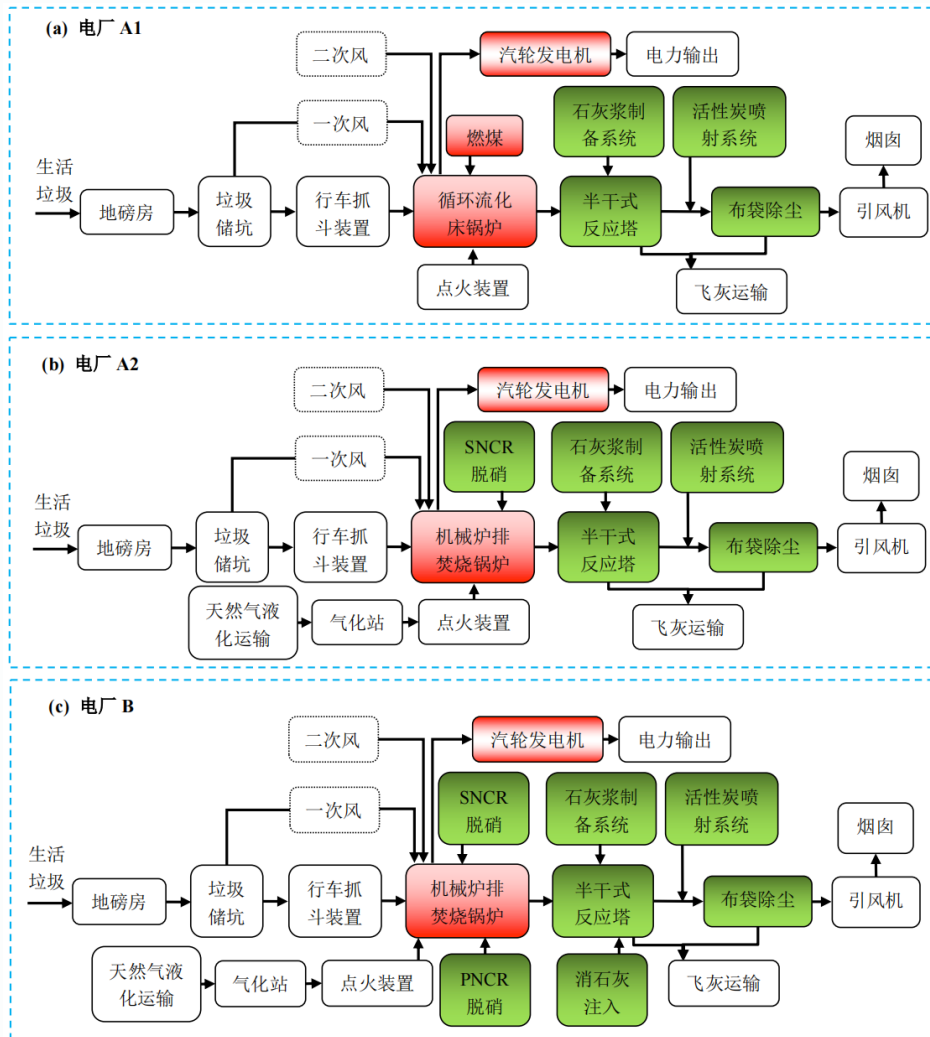
垃圾焚烧发电厂B的烟气污染物排放水平远低于垃圾焚烧发电厂A1和电厂A2，电厂A1和电厂A2相对于电厂B存在较为突出的烟气污染物过量排放风险。



以电厂B为基准电厂，电厂A1和A2为目标电厂，探讨电厂A1和A2的烟气污染物过量排放的成因。

研究内容及研究方法

所选电厂背景情况——工艺流程图



电厂A1：垃圾焚烧装置为**循环流化床**；烟气处理工艺为“**半干法反应器+活性炭+布袋除尘器**”



电厂A2：垃圾焚烧装置为**逆推式机械式炉排焚烧炉**；烟气处理工艺为“**SNCR+半干法反应器+活性炭+布袋除尘器**”

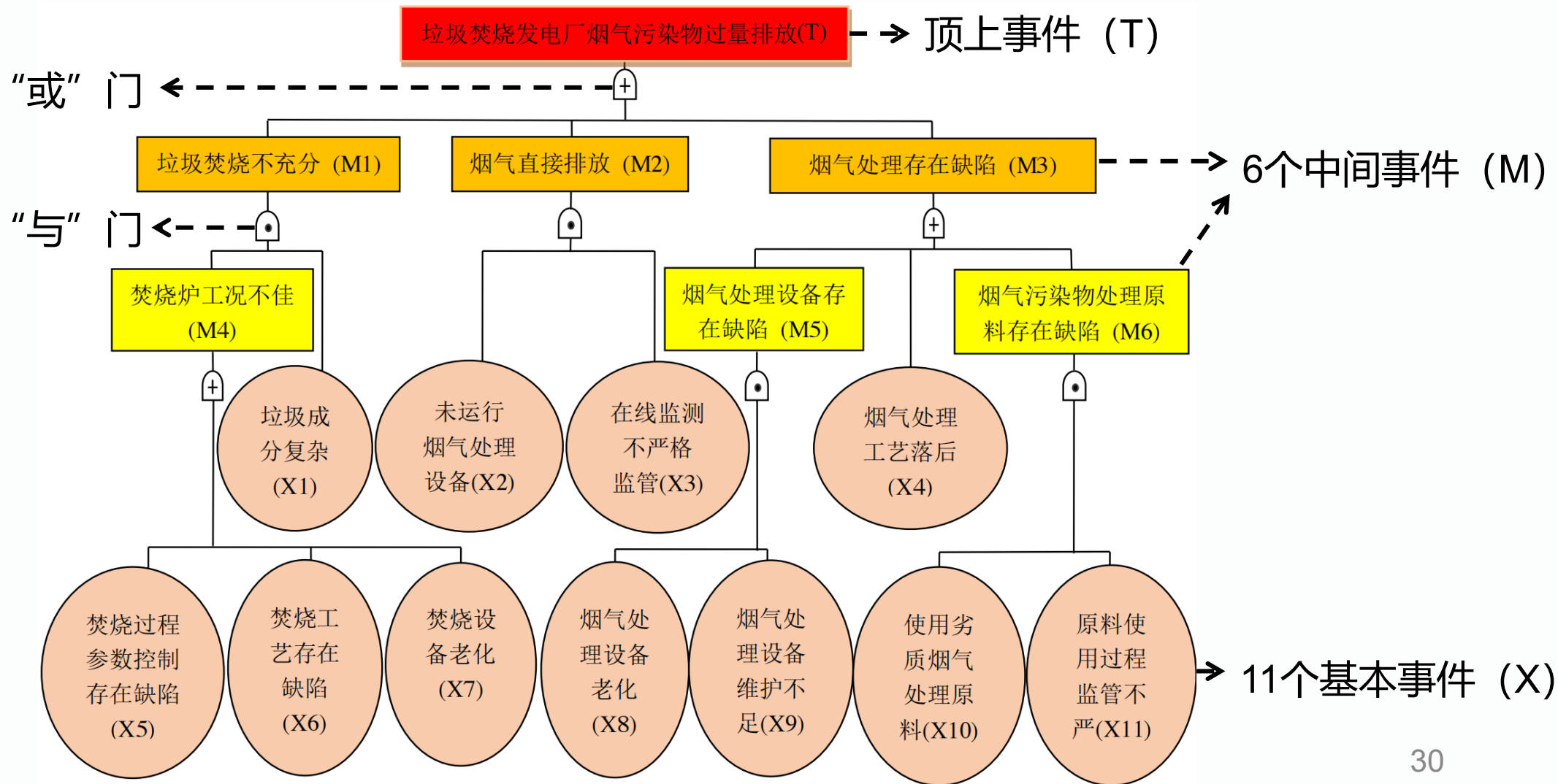


电厂B：垃圾焚烧装置为**多级往复式顺推+翻动式机械式炉排焚烧炉**；烟气处理工艺为“**SNCR+高分子非催化还原脱硝(PNCR)+半干法反应器+干法烟道脱酸+活性炭+布袋除尘器**”

研究结果——事故树的定性分析

构建垃圾焚烧发电烟气污染物过量排放事故树

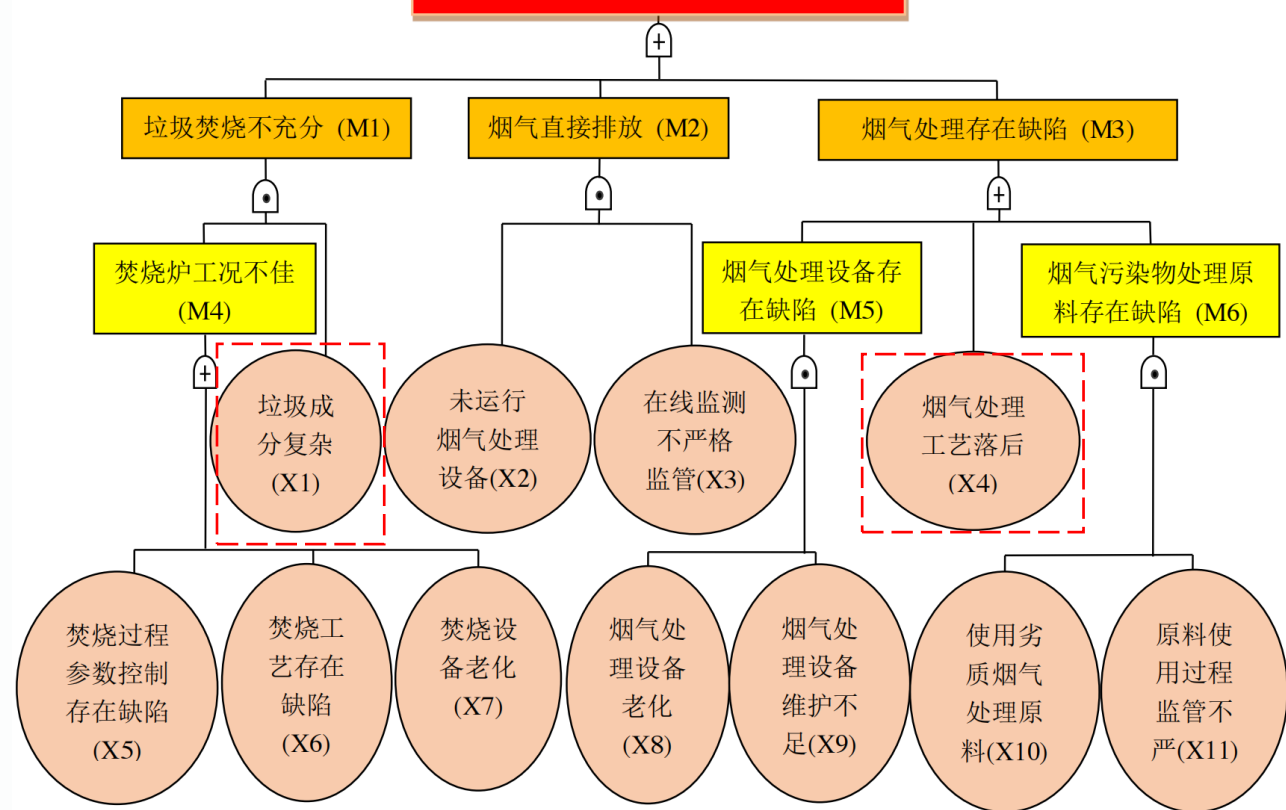
综合设备、技术、管理角度



研究结果——事故树的定性分析

基于事故树的定性分析

垃圾焚烧发电厂烟气污染物过量排放(T)



利用布尔代数化简获得7个最小割集:

$K1 = \{X1, X5\}$; $K2 = \{X1, X6\}$; $K3 = \{X1, X7\}$;
 $K4 = \{X2, X3\}$; $K5 = \{X8, X9\}$; $K6 = \{X4\}$; $K7 = \{X10, X11\}$

能够导致烟气污染物过量排放的途径较多，
该系统的风险性较高，控制难度较大。

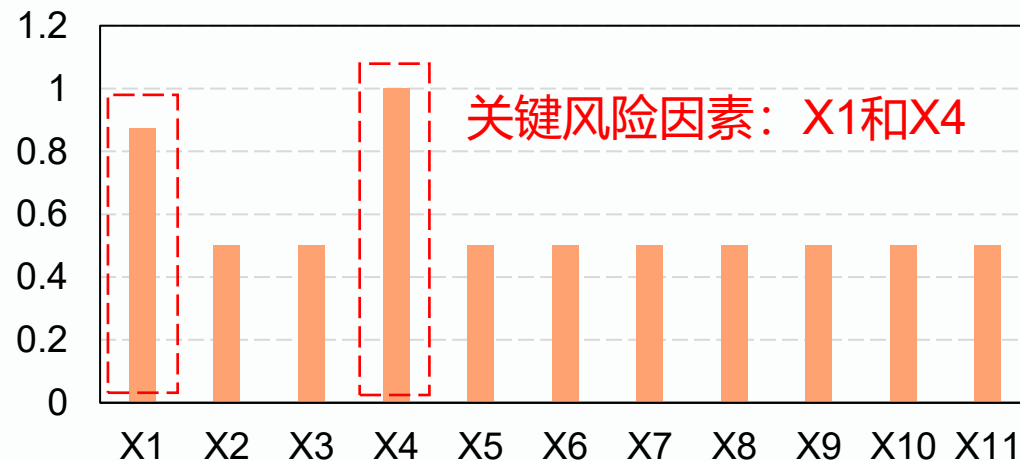


图6. 基本事件结构重要度排序

研究结果——贝叶斯网络的定量分析

构建烟气污染物过量排放贝叶斯网络——获取贝叶斯网络结构

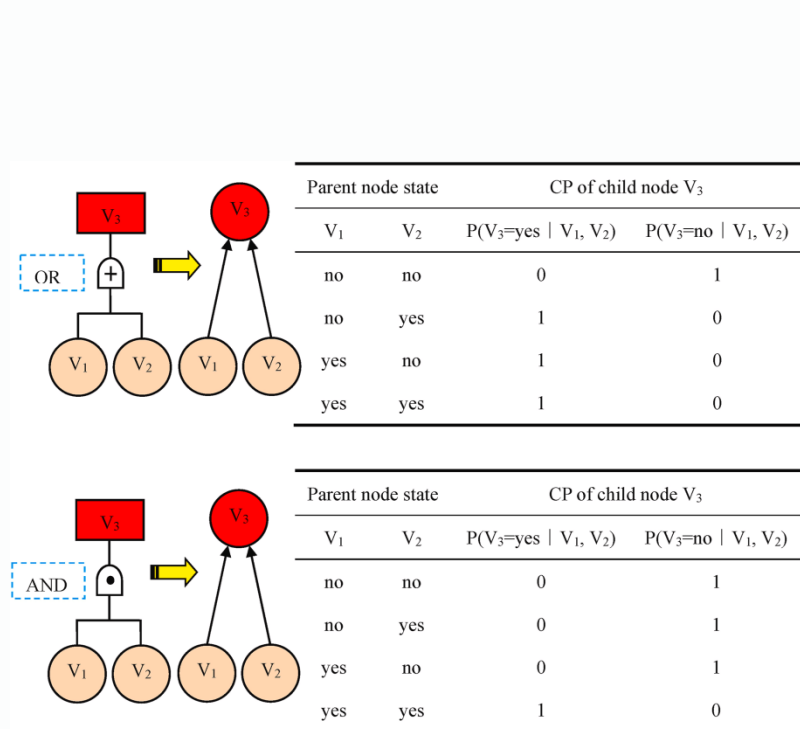
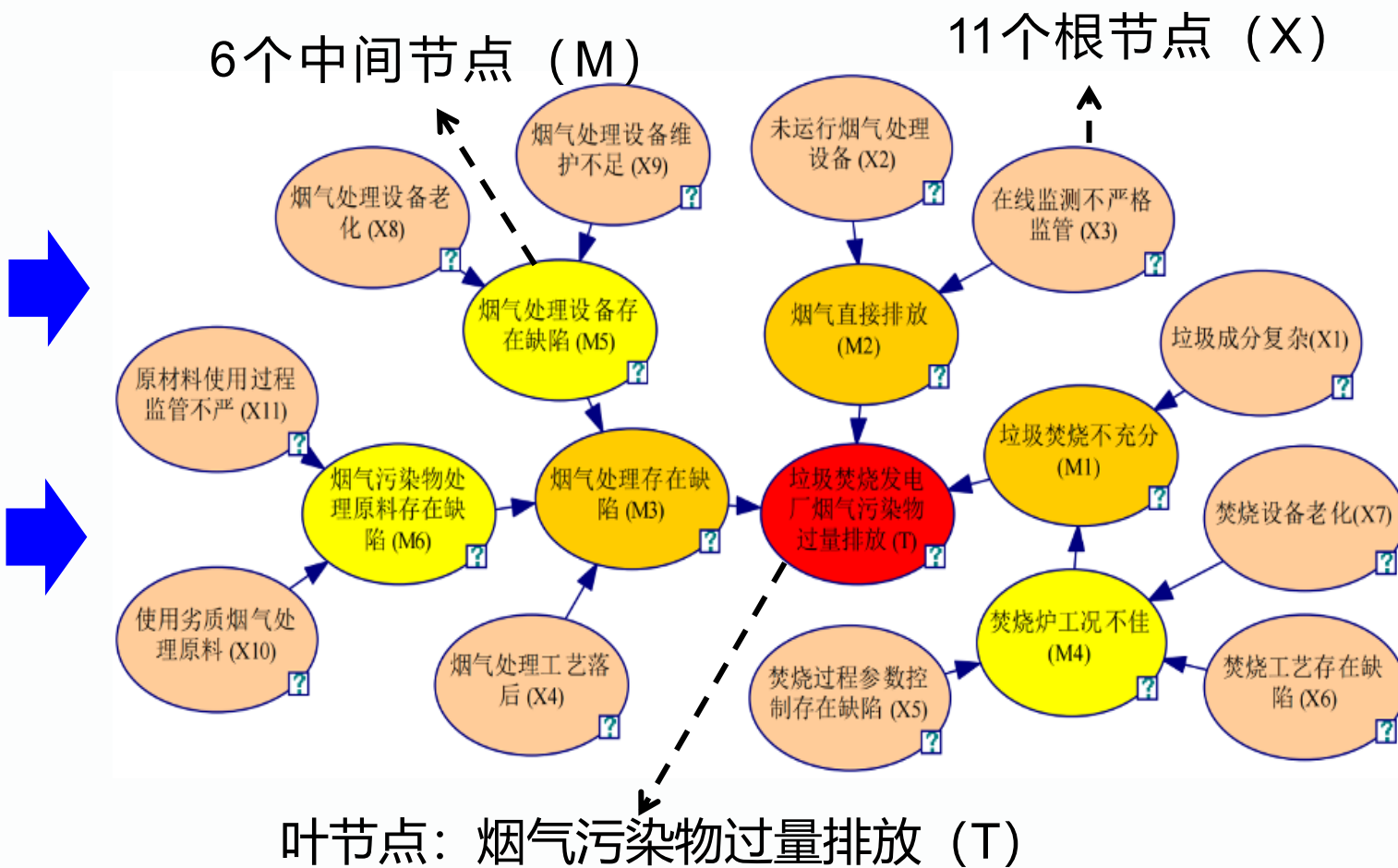
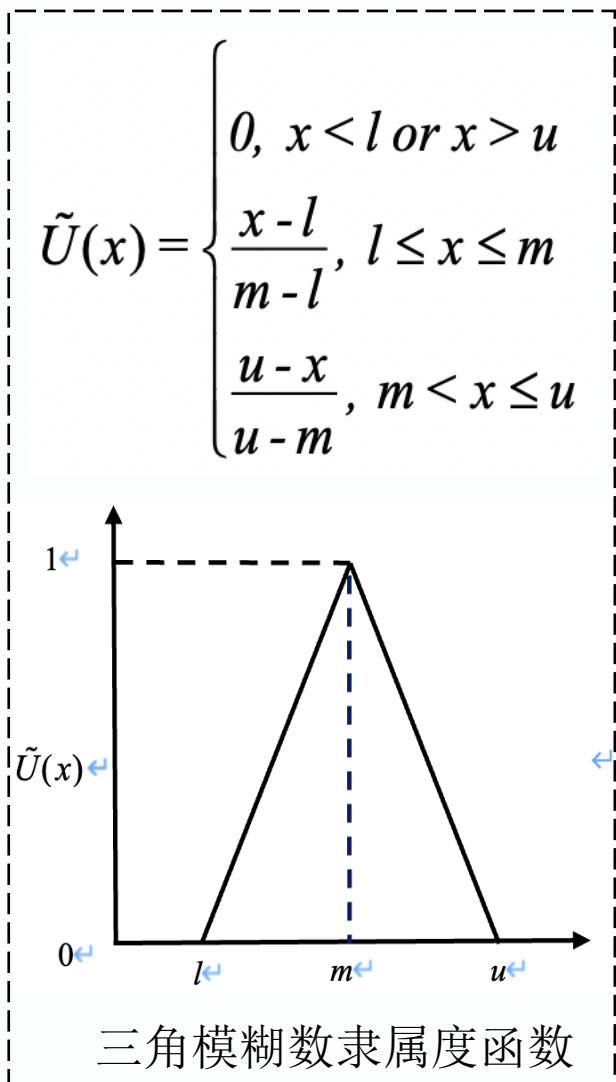


图7. 事故树转化为贝叶斯网络的规则



研究结果——贝叶斯网络的定量分析

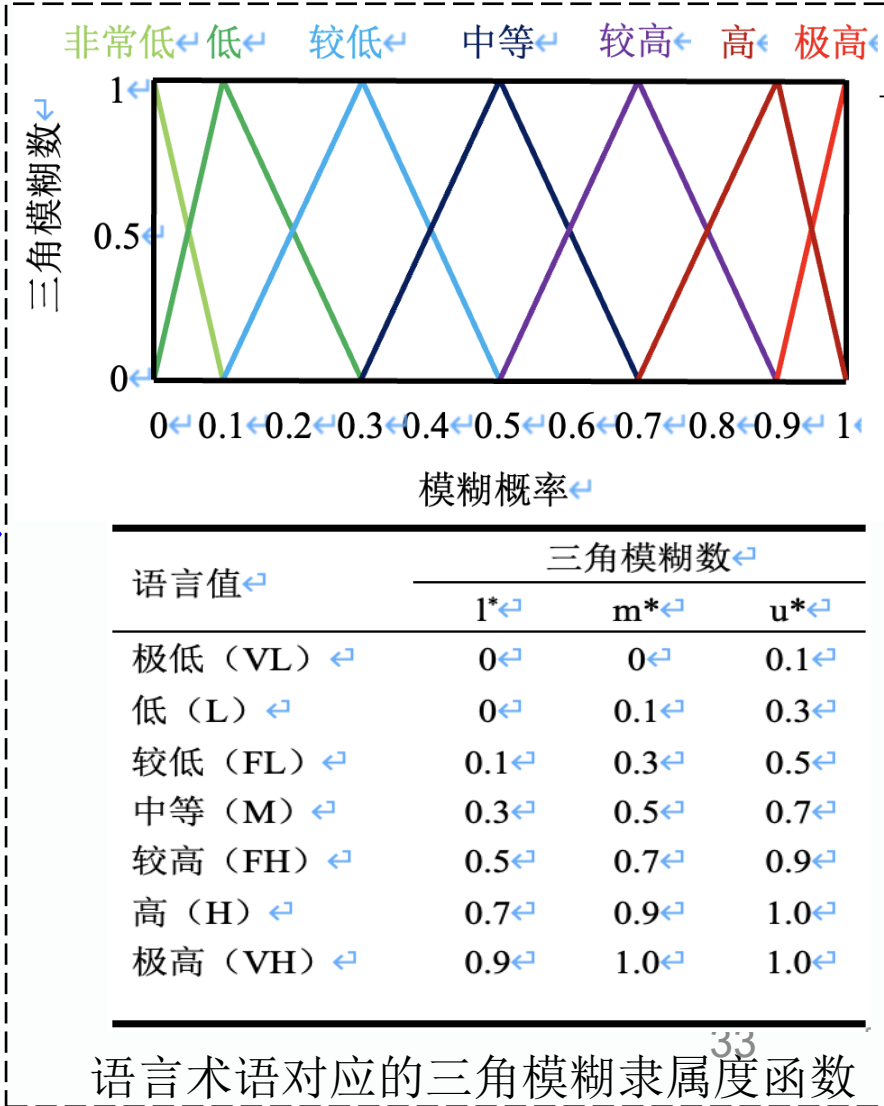
构建烟气污染物过量排放贝叶斯网络——获取贝叶斯网络参数



$$\begin{aligned} \tilde{U}_1 + \tilde{U}_2 &= (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \\ \tilde{U}_1 - \tilde{U}_2 &= (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2) \\ \tilde{U}_1 \times \tilde{U}_2 &= (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \\ \tilde{U}_1 \div \tilde{U}_2 &= (l_1 \div l_2, m_1 \div m_2, u_1 \div u_2) \end{aligned}$$

三角模糊数运算法则

三角模糊集合理论+专家经验+数据资料
确定根节点的发生概率/先验概率



研究结果——贝叶斯网络的定量分析

构建烟气污染物过量排放贝叶斯网络——获取贝叶斯网络参数

$$\tilde{Z}(X_i) = \frac{\tilde{q}_{X_i1} \oplus \tilde{q}_{X_i2} \oplus \dots \oplus \tilde{q}_{X_in}}{n} = (l'_{X_i}, m'_{X_i}, u'_{X_i}) \quad P(X_i) = \frac{l'_{X_i} + 2m'_{X_i} + u'_{X_i}}{4}$$

咨询4位垃圾焚烧发电领域专家

整合专家意见

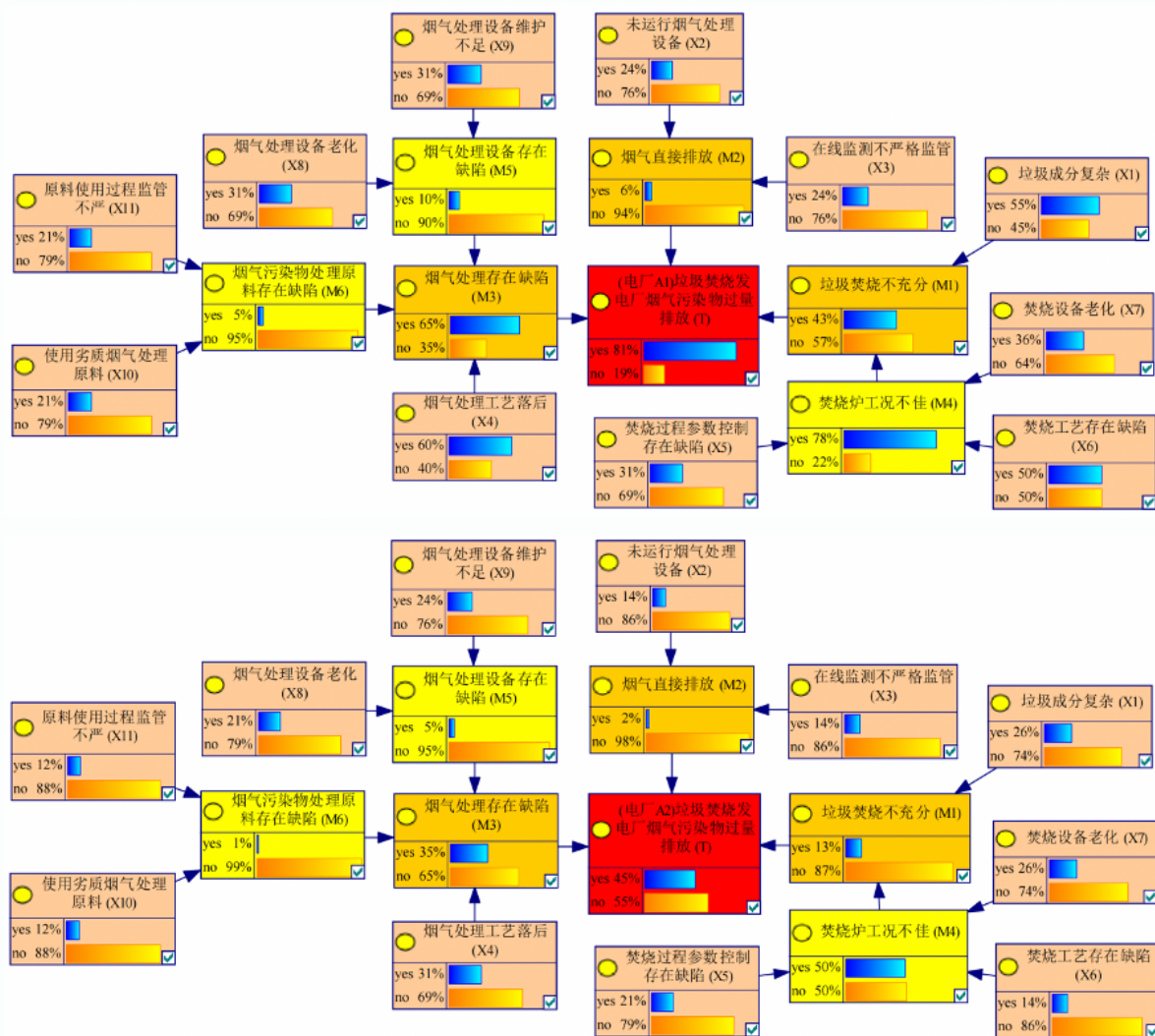
解模糊

基本事件	专家判断 (E ₁ -E ₄)				聚合模糊数	解模糊(%)
	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄		
垃圾成分复杂 (X1)	L	FL	L	M	(0.1, 0.25, 0.45)	26.25
未运行烟气处理设备 (X2)	L	VL	FL	L	(0.025, 0.125, 0.3)	14.38
在线监测不严格监管 (X3)	L	VL	FL	L	(0.025, 0.125, 0.3)	14.38
烟气处理工艺落后 (X4)	FL	L	M	FL	(0.125, 0.3, 0.5)	30.63
焚烧过程参数控制存在缺陷 (X5)	L	FL	L	FL	(0.05, 0.2, 0.4)	21.25
焚烧工艺存在缺陷 (X6)	L	VL	FL	L	(0.025, 0.125, 0.3)	14.38
焚烧设备老化 (X7)	FL	FL	FL	L	(0.075, 0.25, 0.45)	25.63
烟气处理设备老化 (X8)	L	L	FL	FL	(0.05, 0.2, 0.4)	21.25
烟气处理设备维护不足 (X9)	VL	FL	L	M	(0.1, 0.225, 0.4)	23.75
使用劣质烟气处理原料 (X10)	L	VL	FL	VL	(0.025, 0.1, 0.25)	11.88
原料使用过程监管不严 (X11)	L	VL	FL	VL	(0.025, 0.1, 0.25)	11.88

根节点	专家判断 (E ₁ -E ₄)				聚合模糊数	解模糊(%)
	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄		
垃圾成分复杂 (X1)	M	M	FH	M	(0.35, 0.55, 0.75)	55
未运行烟气处理设备 (X2)	VL	FL	M	L	(0.1, 0.225, 0.4)	23.75
在线监测不严格监管 (X3)	VL	FL	L	M	(0.1, 0.225, 0.4)	23.75
烟气处理工艺落后 (X4)	M	FH	M	FH	(0.4, 0.6, 0.8)	60
焚烧过程参数控制存在缺陷 (X5)	FL	L	FL	M	(0.125, 0.3, 0.5)	30.63
焚烧工艺存在缺陷 (X6)	FL	M	FH	M	(0.3, 0.5, 0.7)	50
焚烧设备老化 (X7)	M	FL	M	L	(0.175, 0.35, 0.55)	35.63
烟气处理设备老化 (X8)	FL	L	FL	M	(0.125, 0.3, 0.5)	30.63
烟气处理设备维护不足 (X9)	M	L	M	L	(0.15, 0.3, 0.5)	31.25
使用劣质烟气处理原料 (X10)	L	FL	FL	L	(0.05, 0.2, 0.4)	21.25
原料使用过程监管不严 (X11)	L	FL	FL	L	(0.05, 0.2, 0.4)	21.25

研究结果——贝叶斯网络的定量分析

正向推理——计算电厂A1和电厂A2的烟气污染物过量排放概率



电厂A1各节点发生概率:

烟气污染物过量排放 (T) : 81.33%;

垃圾焚烧不充分 (M1) : 42.72%;

烟气处理存在缺陷 (M3) : 65.46%;

电厂A1烟气污染物过量排放环境风险较高。

电厂A2各节点发生概率:

烟气污染物过量排放 (T) : 44.72%;

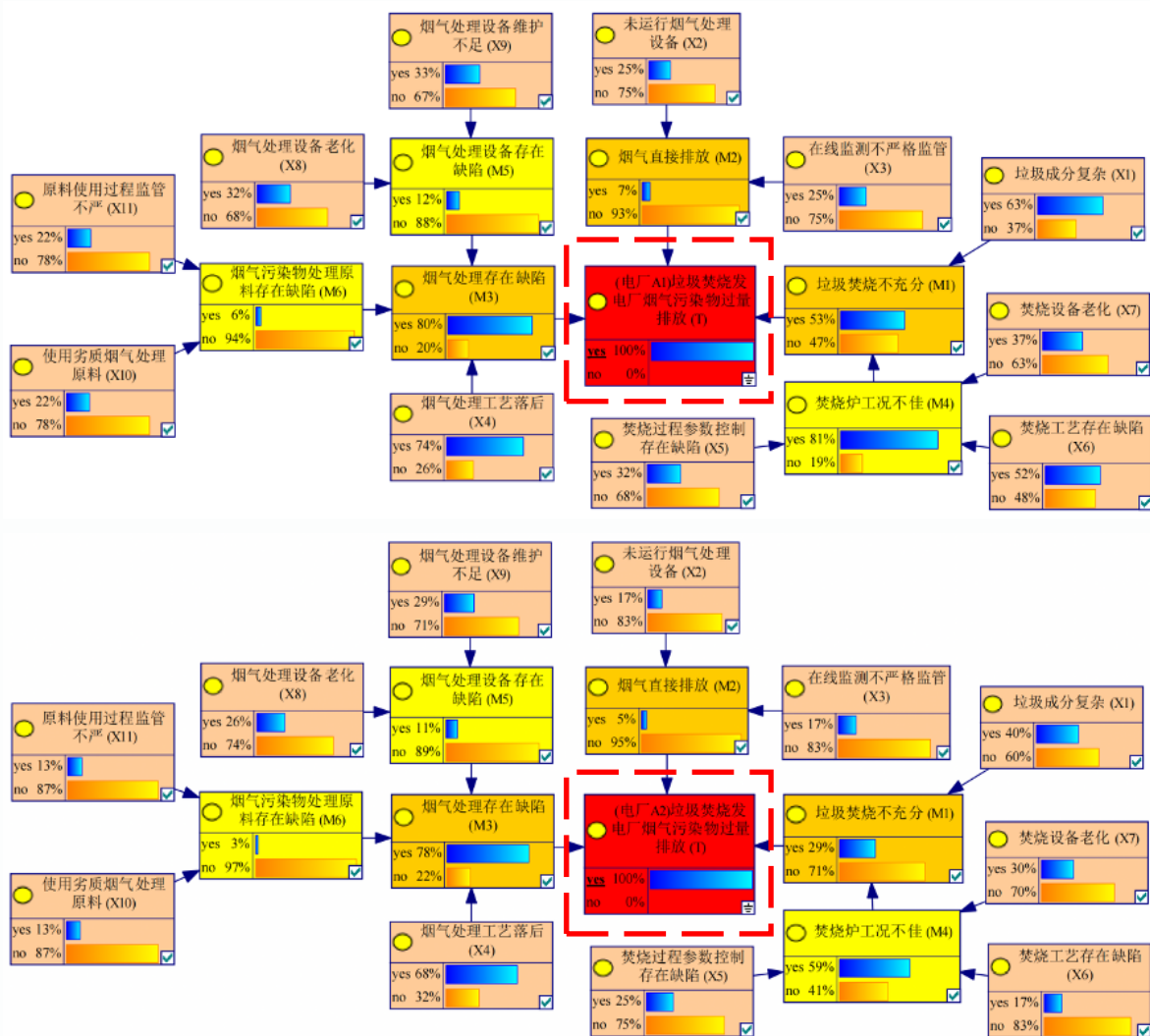
垃圾焚烧不充分 (M1) : 13.09%;

烟气处理存在缺陷 (M3) : 35.06%;

电厂A2也存在一定烟气污染物过量排放环境风险问题。

研究结果——贝叶斯网络的定量分析

□ 诊断推理——假设烟气污染物过量排放 (T) 已发生的情景下识别关键风险因素

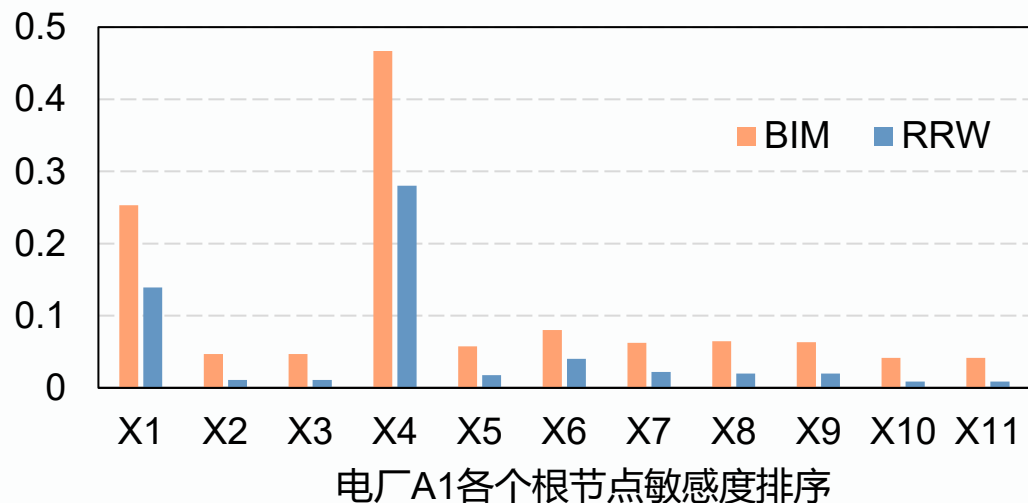


根节点	电厂 A1		电厂 A2	
	先验 (%)	后验 (%)	先验 (%)	后验 (%)
垃圾成分复杂 (X1)	55	62.70	26.25	39.98
未运行烟气处理设备 (X2)	23.75	24.80	14.38	16.61
在线监测不严格监管 (X3)	23.75	24.80	14.38	16.61
烟气处理工艺落后 (X4)	60	73.77	30.63	68.48
焚烧过程参数控制存在缺陷 (X5)	30.63	32.13	21.25	25.23
焚烧工艺存在缺陷 (X6)	50	52.46	14.38	17.07
焚烧设备老化 (X7)	35.63	37.38	25.63	30.42
烟气处理设备老化 (X8)	30.63	32.31	21.25	26.42
烟气处理设备维护不足 (X9)	31.25	32.92	23.75	28.76
使用劣质烟气处理原料 (X10)	21.25	22.10	11.88	13.43
原料使用过程监管不严 (X11)	21.25	22.10	11.88	13.43

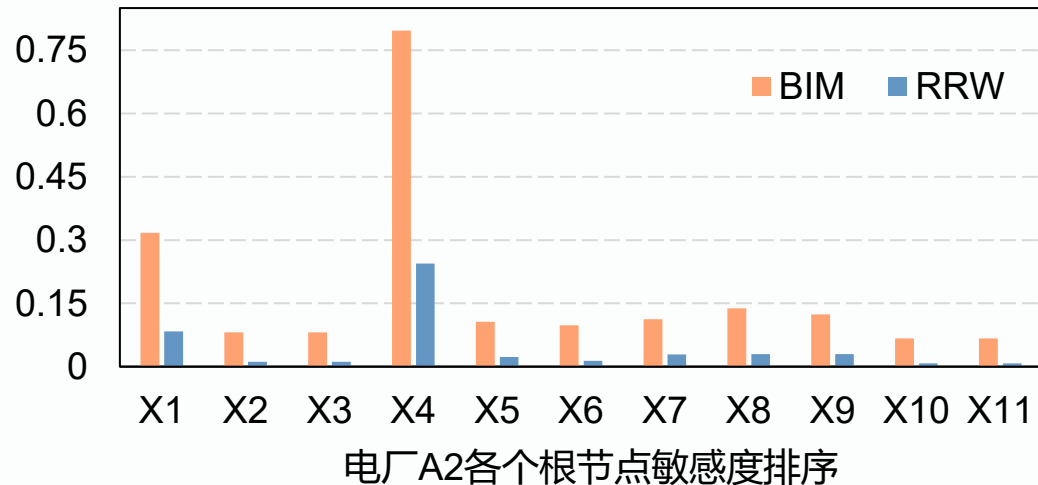
烟气处理工艺落后 (X4) 和垃圾成分复杂 (X1) 的后验概率相对于先验概率的变化幅度最大。因此，应优先改进烟气处理工艺，控制电厂入炉垃圾成分。

研究结果——贝叶斯网络的定量分析

□ 敏感度分析——利用两个重要度系数识别关键风险因素



BIM排序: $X4 > X1 > X6 > X8 > X9 > X7 > X5 > X2 = X3 > X10 = X11$
RRW排序: $X4 > X1 > X6 > X7 > X8 = X9 > X5 > X2 = X3 > X10 = X11$
关键风险因素: X4、X1、X6、X8、X9、X7



BIM排序: $X4 > X1 > X8 > X9 > X7 > X5 > X6 > X2 = X3 > X10 = X11$
RRW排序: $X4 > X1 > X8 = X9 > X7 > X5 > X6 > X2 = X3 > X10 = X11$
关键风险因素: X4、X1、X8、X9、X7、X5

研究结果——综合评价分析

□ 烟气污染物过量排放预防和清洁生产策略

风险因素	预防/清洁生产策略
烟气处理工艺落后 (X4)	持续开展清洁生产审核，在经济效益允许条件下引进或开发处理效率更高的先进工艺，如PNCR、SCR (Selective Catalytic Reduction)；优化垃圾焚烧过程控制，如烟气的循环燃烧
垃圾成分复杂 (X1)	完善垃圾分类制度，防止有害成分进入焚烧炉。减少餐厨垃圾进入焚烧炉，提高炉内垃圾的焚烧热值；
焚烧工艺存在缺陷 (X6)	建议逐步用机械炉排焚烧炉取代流化床焚烧炉；
烟气处理设备老化 (X8)， 烟气处理设备维护不足 (X9)， 焚烧设备老化 (X7)	加强烟气处理设备和焚烧炉设备的维护保养。定期清洗和更换零件，注意腐蚀、结垢和损坏；适时更新装备；提高工厂技术人员规范经营管理的职业技能。

小结

□ 研究亮点

- 从设备、技术、管理等宏观角度研究了烟气污染物过量排放致因机理，计算了目标电厂烟气污染物过量排放的概率，通过定性和定量分析识别了关键风险因素，并提出防控方案。
- 首次建立了一套垃圾焚烧发电烟气过量排放致因机理BN-FAT评估系统/模型。

□ 研究特色

- 首次利用贝叶斯网络理论 (BN) 耦合事故树分析法 (FTA)应用于垃圾焚烧发电烟气污染物过量排放，实现了学科交叉融合，便于电厂从业人员和政府工作人员理解和应用。



谢谢！
敬请批评指正！

