



清华大学环境学院
SCHOOL OF ENVIRONMENT, TSINGHUA UNIVERSITY



“无废城市” 高端研讨会

“无废城市” 建设次第推进的若干思考

清华大学环境学院循环经济产业研究中心

温宗国 主任/教授

一、“无废城市” 固废管理绩效评价

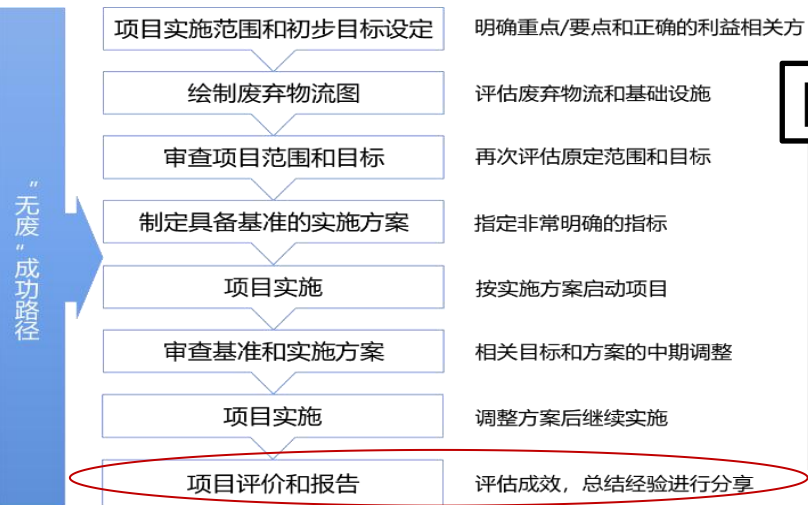
二、“无废城市” 区域协同共建机制

“无废城市”建设绩效评价的重要性



构建“无废城市”量化评价方法或体系是“无废城市”试点建设的主要任务之一

- ✓ 开发绩效评价方法和工具来识别城市固废管理的核心问题和薄弱环节，以支撑“无废城市”建设的“后续步骤”决策。



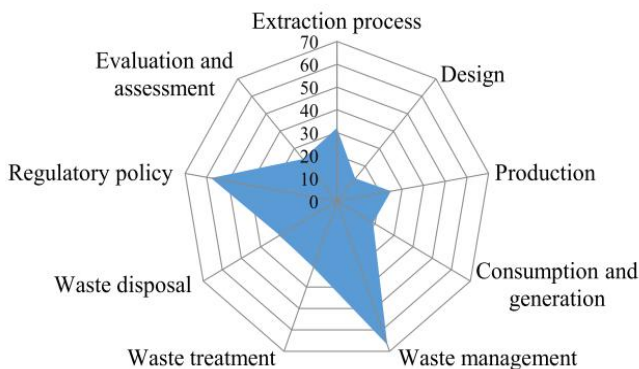
国际研究指出了“无废城市”成效评估的必要性

- Zaman (2015)、Song等人 (2015, 指出, 对进展和绩效的评价是“无废”实施不可或缺的一环;
- Pietzsch等人 (2017) 指出使用环境绩效评估工具进行过程监控是“无废”的关键成功因素之一。

“无废”的系统性实现路径 (Song et al. 2015)

国内外“无废城市”绩效评价研究较少

The scope of zero waste studies in different phases



但“无废”相关主题研究中, 涉及到评价方法和工具的较为少见, 对“无废城市”绩效评价更少了。

- Zaman and Lehmann 2013; Zaman 2014a: “无废指数” Zero Waste Index
- Zaman 2014b: “无废”管理系统绩效的关键评估指标
- 温湖炜等人 (2019): 中国省域“无废城市”发展水平评估
- 邹权 (2020): 以“无废城市”建设指标体系为基础开发了“无废指数”。

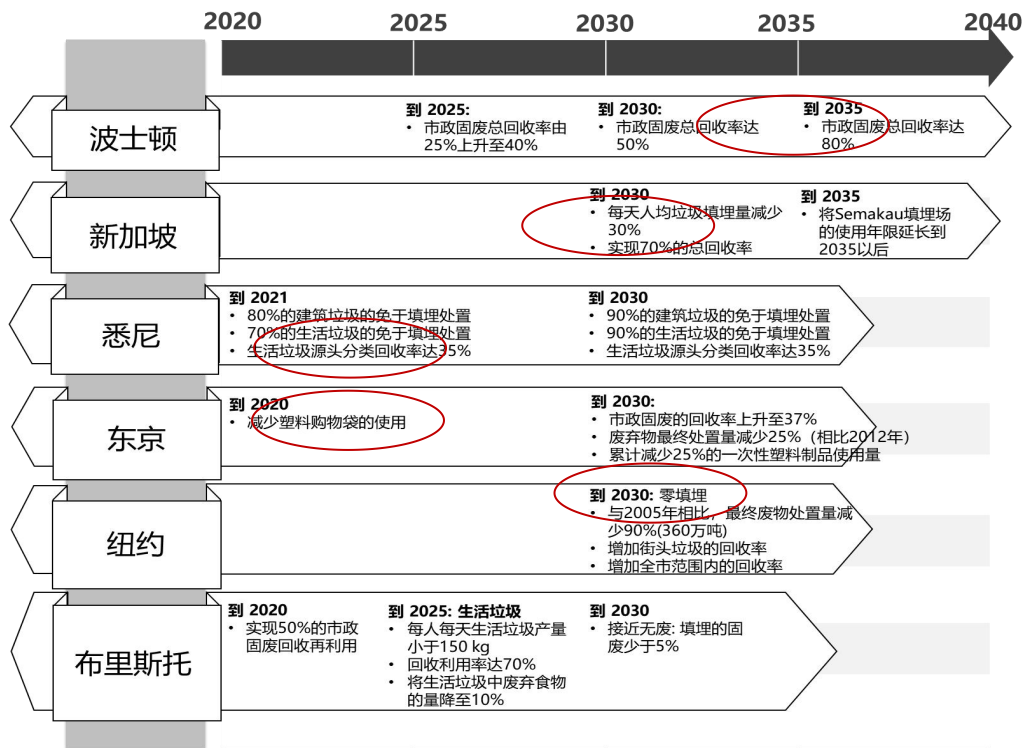
应用综述：“无废”评价方法和工具

人均废弃物产生量、废弃物回收利用率、废弃物最终处置量、垃圾从填埋或焚烧中分离出来的比率（waste diversion rate from landfill or incineration）等指标都是各个城市常用来设置“无废”目标，或评估其“无废城市”实施进展的指标，基于城市代谢评估

基于城市代谢的单项指标

量化指数评估工具

定性与定量结合的指标体系



应用综述：“无废”评价方法和工具

- “无废”实践中，逐渐形成了一些指标、工具来衡量固废管理系统的绩效

应用于城市层面的“无废”评价方法及工具

基于城市代谢的单项指标

□ Zaman和Lehmann (2013) **无废指数 (Zero Waste Index)**

计算思路

对城市**固废管理**子系统中**替代原始资源 (包括原材料、能源、水) 投入的再生资源利用量**的进行核算，以城市中**再生资源替代原生资源的潜力**来衡量“无废城市”的绩效表现。

$$ZWI = \frac{\sum_1^N WMSi \times SFi}{\sum_1^N GWS}$$

- i , 城市各废弃物流管理子系统。
- $WMSi$, 各子系统废弃物得到管理处置的量；
- SFi , 替代因数，各子系统中再生资源替代原生资源的比例；
- GWS , 废弃物总产生量；

量化指数评估工具

□ Deus和Daniel Mele (2020) **固废管理综合指标 (WMAI)**

计算思路

计算**人均固废产生量、人均温室气体排放量、人均能源消耗量、废物质量指数**的几何平均值，评价城市固废管理系统**综合环境影响**

$$WMAI = \sqrt[4]{WG_I \times GHG_I \times EC_I \times WQI_I}$$

- WG_I , 人均固废产生量；
- GHG_I , 城市固废管理系统的人均温室气体排放；
- EC_I , 城市固废管理系统的人均能源消耗；
- WQI_I , 废物质量指数，表征城市固废最终处置方法和设施的环境质量水平；

定性与定量结合的指标体系

这些指数都是基于**城市代谢的思路**来选择计算指标进行计算，但目前仅应用于评估市政固废（生活垃圾）的管理系统。

应用综述：“无废”评价方法和工具

- “无废”实践中，逐渐形成了一些指标、工具来衡量固废管理系统的绩效

应用于城市层面的“无废”评价方法及工具

基于城市代谢的单项指标

定性和定量结合的综合指标体系可以从**环境因素、经济因素、社会因素、管理政策**等多方面对城市“无废”管理系统的表现进行**综合全面的评估**。

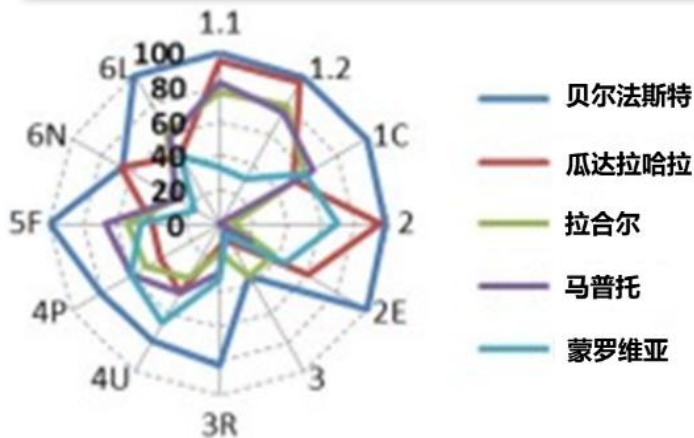
□ Zaman (2014) 识别出**56项“无废”管理系统的**关键评估指标****

- ✓ STEP 1: **文献综述**列出候选指标;
- ✓ STEP 2: **领域专家评分**筛选出“无废”管理的关键指标
- ✓ 分为7大类, 19个小类, 共56项指标

量化指数评估工具

□ Wasteaware 可持续废物管理基准指标系统

定性与定量结合的指标体系



城市案例评估结果比较

- 在联合国人居署制定的**综合可持续废物管理**基准指标的基础上加以改进
- 指标集包括定性指标和定量指标
- 适用于对收入水平和固体废物管理实践差异很大的城市进行绩效评估和比较

应用综述：“无废”评价方法和工具

- 生态环境部于2019年5月发布的《“无废城市”建设指标体系（试行）》是我国“无废”领域目前唯一投入应用的评估指标体系。

生态环境部《“无废城市”建设指标体系（试行）》

以减量化和资源化利用为核心，从**固体废物源头减量**、**固体废物资源化利用**、**固体废物最终处置**、**保障能力**、**群众获得感**等5个方面设计的指标体系。

共59项指标

- 必选指标22项：所有试点均须考核的指标。
- 可选指标共37项：试点城市结合任务安排从可选指标中选择对应指标。
- 自选指标：不限。

试点城市最终形成**各有特色**的“无废城市”目标指标体系。

序号	一级指标	二级指标	三级指标	数据来源*	
固废源头减量					
	固废资源化利用	工业固体废物综合利用率*	工业固体废物产生强度*	市生态环境局、市统计局	
		工业危险废物综合利用率	实施清洁生产工业企业占比*	市生态环境局、市发展改革委	
		农业废弃物收储运体系覆盖率达*	开展绿色工厂建设的企业数量	市工信局	
	最终处置	秸秆综合利用率	保障能力和公众获得感	生态环境局、市农业农村局	
		畜禽粪污综合利用率		市农业农村局	
27	危险废物安全处置	工业危险废物安全处置量*	技术体系建设	危险废物全链条安全监管技术示范*	
28		医疗废物收集处置体系覆盖率达*		固体废物回收利用处置关键技术工艺、设备研发及应用示范	市科技局
29		社会源危险废物收集处置体系覆盖率达*		保障能力	固体废物监管能力建设
30	一般工业固体废物贮存场所规范化建设达标率*	危险废物规范化监管地查			

- 设计目的：引导“无废城市”建设方向
- 指标设置：考虑了现行统计技术在城市层面收集数据的可行性
- 适用情景：
 - √：对“无废城市”试点建设任务进行评估考核
 - ×：衡量城市固废管理整体水平
 - ×：城市横向比较

现有评价方法及指标体系的适用性分析



物质流&城市代谢指标

- 我国循环经济发展评价指标：
资源产出率指标
- 日本“循环型社会”物质流指标
- Zaman和Lehmann (2013) **无废指数 (Zero Waste Index, ZWI)**
- Deus和Daniel Mele (2020) **固废管理综合指标**

适用情景与不足

- √：更**适合用于评估宏观层面**（如国家、区域、省域）资源与固废管理的绩效表现；
- ×：对**数据要求较高**，在固废管理系统和信息收集系统尚待完善的发展中国家，可能不易获得计算指标的可靠数据；
- ×：**专业性强**，计算过程需要专家参与，应用受到限制
- ×：我国现有统计技术体系中，**城市一级没有资源消耗流通量的统计渠道**，计算指标存在困难。

定量和定性相结合综合性指标体系

- Wasteaware 综合可持续废物管理指标体系
- Zaman (2014) 识别出56项“无废”管理系统的**关键评估指标**

适用情景与不足

- ×：对定性指标的评估，则存在着如何**获取数据和准确衡量评价的难题**；
- ×：要确定各项指标的权重，因此需要特定的经验和知识，**高度依赖领域专家或第三方机构的参与**；
- ×：评估样本数目较大时，因为**主观性的存在影响评价标准的一致性**。

“无废城市”建设指标体系

- 允许试点城市自选指标
- 11+5试点最终形成其独特的“无废城市”建设目标指标体系。

适用情景与不足

- √：考虑到了现行统计技术在城市层面收集到**数据的可行性**
- √：对“无废城市”任务进展进行评估考核；
- ×：衡量城市固废管理整体水平，进行城市横向比较；
- ×：指标设计中存在**规避固废管理短板**的可能性。

我国“无废城市”管理绩效评价工具



- 探索更契合我国城市的“无废城市”绩效评价工具，**便于城市自我评估与监测**

我国“无废城市”绩效评价工作面临三大挑战

- ❑ 城市层面的固废监管统计系统不完善，缺乏数据
- ❑ 城市发展水平及产业结构差异导致的评价标准难统一
- ❑ 城市固废管理领域长期缺少评价标准和评价方法

现阶段

- ✓ 在我国“无废城市”建设推进的现阶段，固废管理绩效评估很有意义
- ✓ 现阶段评价方法应考虑：城市固废基础设施水平和现有统计数据可得性

基于TOPSIS-熵权法的城市固体废物综合管理绩效评价指数

- 基于当前城市层面可获取的数据
- 评价指标和评价结果容易解读
- 评价方法实施成本低，简单易行
- 评价指标可以进一步扩充和完善
- 可以进行横向比较
- 可以识别薄弱环节

中远期

- ✓ 我国“无废城市”的建设，**在远期需要实现固废精细化的目标。**
- ✓ 中远期评价基础：城市固废设施完善，统计数据覆盖全面，**精确掌握各类代谢数据**
- ✓ 评价方法应做到：结合大数据技术，有效支撑**固废精细化管理**。

基于城市物质代谢分析的“无废城市”管理绩效评价系统

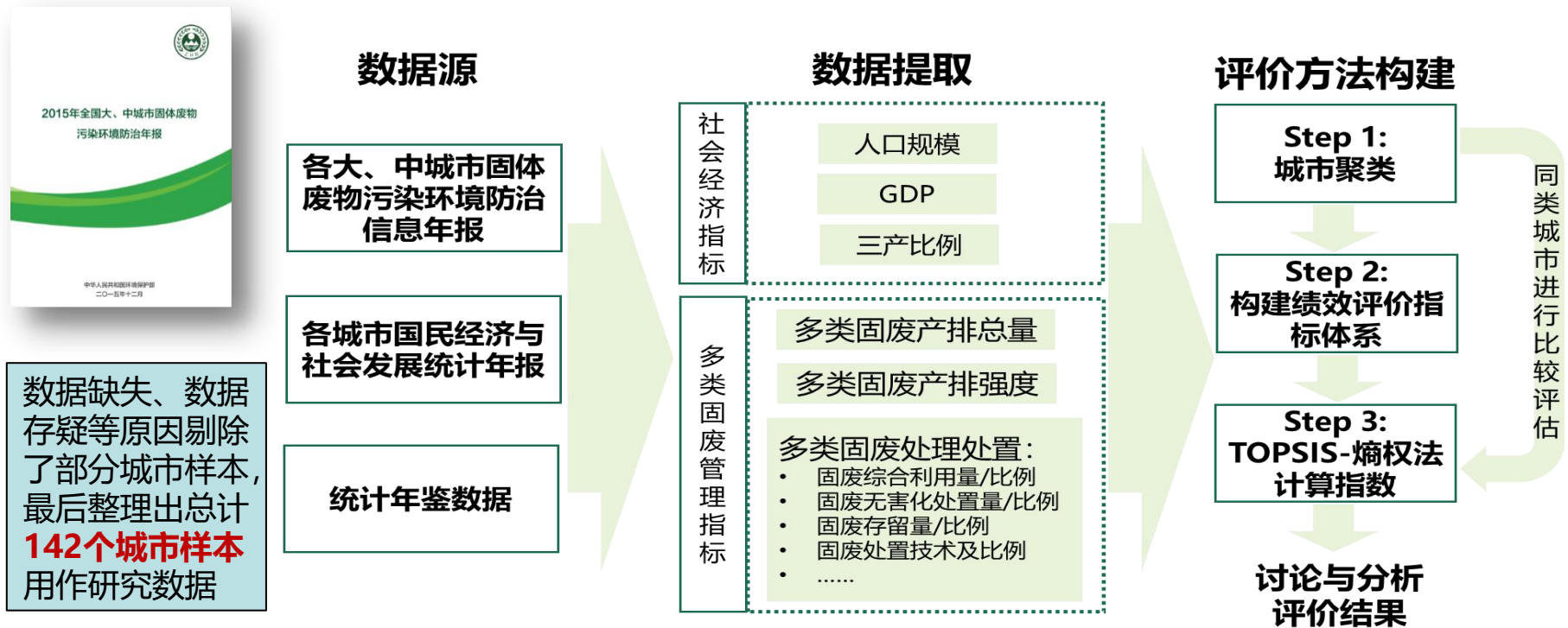
- 基于**多类固废代谢过程分析**的“无废城市”管理绩效评价系统，反映固废源头减量、资源化利用水平和环境影响的“无废城市”绩效评估指标体系
- 基于**关键元素代谢分析**的“无废城市”管理绩效评价系统

方法一：基于TOPSIS-熵权法的城市固废管理绩效评价



TOPSIS: 通过评估样本与理想解之间的欧几里得距离来进行多目标决策或综合评估

熵权法: 根据样本数值的差异化程度来计算指标权重，避免了主观偏见



数据缺失、数据存疑等原因剔除了部分城市样本，最后整理出总计**142个城市样本**用作研究数据

评价方法构建关键：城市聚类

要解决的两个关键问题点：

Q1：剔除城市差异

对城市固废管理水平的判断要考虑到我国城市所处发展阶段及形成的产业结构各不相同。

解决思路：K-means聚类

根据10个**城市社会经济和固废产排特征**进行聚类

- 常住人口、GDP总量、人均GDP
- 二、三产比例
- 一般工业固废、工业危废、生活垃圾总量
- 工业固废、生活垃圾产生强度

聚类后，分析并
各类城市特点，
分组进行评估。

用SPSS进行聚类运算，最终识别出六个城市聚类，用C1到C6指代

编号	个案数	包含城市样本
C1	10	重庆, 宁波, 杭州, 成都, 上海, 西安, 武汉, 深圳, 广州, 北京
C2	6	溧阳, 海门, 湘潭, 湛江, 惠州, 福州
C3	8	攀枝花, 渭南, 乌海, 呼伦贝尔, 鄂尔多斯, 赤峰, 巴彦淖尔, 百色
C4	9	州, 昆明, 宜宾, 泸州, 巴中, 咸阳, 宝鸡, 潍坊, 咸宁
C5	38	乌鲁木齐, 库尔勒, 天津, 自贡, 资阳, 遂宁, 青岛, 临沂, 聊城, 济南, 即墨, 包头, 大连, 南昌, 连云港, 张家港, 宜兴, 盐城, 宿迁, 南京, 常州, 株洲, 长沙, 张家界, 郑州, 石家庄, 秦皇岛, 廊坊, 三亚, 遵义, 贵阳, 梧州, 柳州, 中山, 肇庆, 庆阳, 平凉, 兰州
C6	71	义乌, 温州, 绍兴, 克拉玛依, 内江, 南充, 绵阳, 眉山, 乐山, 广元, 广安, 德阳, 达州, 铜川, 汉中, 安康, 太原, 烟台, 威海, 乳山, 日照, 平度, 胶州, 东营, 西宁, 银川, 乌兰察布, 通辽, 呼和浩特, 镇江, 扬州, 徐州, 吴江, 无锡, 泰州, 太仓, 苏州, 南通, 昆山, 金坛, 淮安, 常熟, 岳阳, 永州, 益阳, 怀化, 衡阳, 郴州, 宜昌, 襄阳, 十堰, 荆州, 荆门, 海口, 玉林, 南宁, 桂林, 贵港, 防城港, 北海, 珠海, 汕头, 江门, 天水, 定西, 厦门, 泉州, 合肥, 马鞍山

评价方法构建关键：TOPSIS-熵权法

要解决的两个关键问题点：

Q2：指数表征与计算

选择合适的指标，该指数在一定程度上可以表征城市固废污染防治水平。

TOPSIS-熵权法思路

- 结果导向型思路：不考虑具体管理措施、机制与实施路径，只看污染物产排及处理处置数据。**指数表征城市固废是否得到有效的综合管理。**
- 从“固废源头产生强度”、“固废资源化利用”、“固废末端处置”三个维度构建评价指标，确定指标权重

固废综合管理绩效评价指标体系：

- ✓ 15个指标
- ✓ **涵盖三类固废（一般工业固废、危废、生活垃圾）由源头到资源化利用再到末端处置的全过程。**
- ✓ **定量指标：可以直接由现有固废统计体系可获得的数据计算得出**

一级指标	编号	二级指标	属性
固废源头产生强度	I1	一般工业固废产生强度 (kg/万元)	负
	I2	危险废物产生强度 (kg/万元)	负
	I3	人均生活垃圾产生量 (t/人/年)	负
固废资源化利用	I4	一般工业固废综合利用率	正
	I5	工业危废综合利用率	正
	I6	生活源垃圾综合利用率	正
固废末端处置	I7	生活垃圾回收率	正
	I8	一般工业固废利用处置率	正
	I9	一般工业固废贮存率	负
	I10	一般工业固废排放率	负
	I11	工业危废利用处置率	正
	I12	工业危废贮存率	负
	I13	工业危废排放率	负
	I14	生活垃圾无害化处置率	正
	I15	生活垃圾填埋处置率	负
总计	15个评价指标		

评价方法构建：TOPSIS-熵权法计算固废综合管理绩效指数

TOPSIS: 通过评估样本与理想解之间的欧几里得距离来进行多目标决策或综合评估
熵权法: 根据样本数值的差异化程度来计算指标权重，避免了主观偏见

第一步

对指标矩阵进行标准化，避免指标取值范围的差异对结果造成影响。

原指标矩阵

$$EI_{Cl} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{pmatrix} \quad (Cl = C1, C2, \dots, C6)$$

标准化，若某指标的样本值完全一致，则无比较必要，去掉该指标

$$p'_{ij} = \begin{cases} \frac{p_{ij} - \min(p_{ij})}{\max(p_{ij}) - \min(p_{ij})} & p_{ij} \text{为正向指标, 且 } \max(p_{ij}) \neq \min(p_{ij}) \\ \frac{\max(p_{ij}) - p_{ij}}{\max(p_{ij}) - \min(p_{ij})} & p_{ij} \text{为负向指标, 且 } \max(p_{ij}) \neq \min(p_{ij}) \end{cases}$$

标准化并修订后的指标矩阵

$$SEI_{Cl} = \begin{pmatrix} p'_{11} & \cdots & p'_{1n'} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p'_{m1} & \cdots & p'_{mn'} \end{pmatrix}$$

第二步

计算信息熵，确定指标权重。对标准化后的指标进行归一化处理，再计算指标信息熵

归一化

$$p''_{ij} = p'_{ij} / \sum_{i=1}^m p'_{ij}$$

计算每个指标的信息熵

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \times \sum_{i=1}^m (p''_{ij} \times \ln(p''_{ij}))$$

计算指标权重

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n' - \sum_{j=1}^{n'} E_j}$$

评价方法构建：TOPSIS-熵权法计算固废综合管理绩效指数

TOPSIS: 通过评估样本与理想解之间的欧几里得距离来进行多目标决策或综合评估
熵权法: 根据样本数值的差异化程度来计算指标权重，避免了主观偏见

第三步

计算各个指标的正负理想解。

代入熵权得到替代绩效矩阵

$$AP = (AP_{ij}), AP_{ij} = w_j \times p'_{ij}$$

确定各指标的正理想解和负理想解

$$IS^+ = \max_{i \in m} (AP_{i1}, AP_{i2}, \dots, AP_{in'})$$

$$IS^- = \min_{i \in m} (AP_{i1}, AP_{i2}, \dots, AP_{in'})$$

第四步

计算各个样本与正理想解的相对接近度，本研究中即为该样本的固废综合管理绩效指数得分。

确定各样本离正、负理想解的距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n'} (AP_{ij} - IS^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n'} (AP_{ij} - IS^-)^2}$$

计算样本与正理想解的相对接近度，即固废综合管理绩效指数得分

$$RC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

评价结果的分析与讨论：142个城市绩效得分

TOPSIS-熵权法计算结果（权重分配、正负理想解）： 取决于待评估样本的真实数据

- ✓ 可以识别出不同城市聚类中，**相对最优的固废管理实践样本城市**；
- ✓ 可以识别各城市固废管理系统中相对于同类型城市的**薄弱环节**。

附表 3.3 城市聚类 C1 的各环环节评价指标得分

城市	各环节评价指标得分									
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I8, I9, I10	I11, I12	I14, I15	
重庆	0.000	0.674	1.000	0.000	0.491	0.339	0.000	0.454	0.724	
宁波	0.245	0.000	0.217	1.000	0.557	0.000	0.935	0.672	1.000	
杭州	0.637	0.428	0.305	0.676	0.000	0.000	0.935	0.438	0.778	
成都	0.873	0.852	0.471	0.401	0.754	0.473	0.982	0.745	0.668	
上海	0.425	0.374	0.385	0.807	1.000	1.000	0.934	0.889	0.664	
西安	0.775	1.000	0.348	0.443	0.684	0.000	0.677	0.564	0.000	
武汉	0.284	0.817	0.523	0.845	0.697	0.260	0.756	0.729	0.861	
深圳	1.000	0.814	0.000	0.324	0.374	0.786	0.946	0.566	0.653	
广州	0.704	0.564	0.055	0.496	0.628	0.202	0.901	0.704	0.660	
北京	0.669	0.997	0.296	0.130	0.886	0.886	0.935	0.797	0.585	

附表 3.7 城市聚类 C4 的城市固废管理综合绩效评价指数计算结果

城市	综合绩效	不同管理环节的绩效评分					
		固废源头	固废资源化	固废末端处置	一般工业固废	工业危废	生活源垃圾
浙江湖州	0.849	0.390	0.979	0.766	0.984	0.869	0.842
云南昆明	0.219	0.236	0.040	0.989	0.371	0.620	0.160
四川宜宾	0.265	0.451	0.214	0.600	0.954	0.447	0.126
四川泸州	0.305	0.948	0.220	0.873	0.955	0.814	0.202
四川巴中	0.282	0.903	0.175	0.911	0.728	0.979	0.185
陕西咸阳	0.178	0.758	0.033	0.434	0.257	0.638	0.118
陕西宝鸡	0.178	0.911	0.007	0.315	0.180	0.465	0.155
山东潍坊	0.821	0.421	0.875	0.698	0.620	0.368	0.913
湖北咸宁	0.300	0.898	0.210	0.831	0.909	0.725	0.204

附表 3.9 城市聚类 C6 的城市固废管理综合绩效评价指数计算结果

城市	综合绩效	城市	综合绩效	城市	综合绩效
新疆克拉玛依	0.096	江苏昆山	0.246	浙江义乌	0.190
西藏拉萨	0.154	江苏淮安	0.189	浙江温州	0.259
青海西宁	0.087	江苏常熟	0.255	浙江绍兴	0.296
宁夏银川	0.918	江苏金坛	0.202	湖南岳阳	0.066
内蒙古乌兰察布	0.058	江苏南通	0.241	湖南永州	0.118
内蒙古通辽	0.065	江苏镇江	0.708	湖南益阳	0.252
内蒙古呼和浩特	0.210	江苏扬州	0.184	湖南怀化	0.139
四川内江	0.110	江苏徐州	0.490	湖南衡阳	0.492
四川南充	0.484	江苏吴江	0.255	湖南郴州	0.103
四川绵阳	0.227	江苏无锡	0.210	湖北宜昌	0.241
四川眉山	0.177	江苏泰州	0.250	湖北襄阳	0.375
四川乐山	0.090	江苏太仓	0.259	湖北十堰	0.131
四川广元	0.107	江苏苏州	0.344	湖北荆州	0.143
四川广安	0.455	山东日照	0.352	湖北荆门	0.093
四川德阳	0.067	山东烟台	0.222	广西玉林	0.127
四川达州	0.388	山东威海	0.210	广西南宁	0.439
陕西榆林	0.069	山东乳山	0.244	广西桂林	0.072
陕西铜川	0.452	山东平度	0.215	广西贵港	0.170
陕西汉中	0.054	山东胶州	0.067	广西防城港	0.167
陕西安康	0.054	山东东营	0.206	广西北海	0.124
山西太原	0.241	安徽马鞍山	0.259	广东珠海	0.191
甘肃天水	0.118	安徽合肥	0.192	广东汕头	0.154
甘肃定西	0.074	福建厦门	0.445	广东江门	0.077
海南海口	0.284	福建泉州	0.228		

附表 3.8 城市聚类 C5 的城市固废管理综合绩效评价指数计算结果

城市	综合绩效	城市	综合绩效
新疆乌鲁木齐	0.035	天津天津	0.063
新疆库尔勒	0.057	湖南株洲	0.141
四川自贡	0.118	湖南长沙	0.280
四川资阳	0.326	湖南张家界	0.034
四川遂宁	0.130	河南郑州	0.049
山东青岛	0.178	河北石家庄	0.100
山东临沂	0.132	河北秦皇岛	0.244
山东聊城	0.461	河北廊坊	0.115
山东济南	0.173	海南三亚	0.222
山东即墨	0.112	贵州遵义	0.061
内蒙古包头	0.059	贵州贵阳	0.135
辽宁大连	0.122	广西梧州	0.031
江西南昌	0.092	广西柳州	0.080
江苏张家港	0.654	广东中山	0.109
江苏宜兴	0.119	甘肃庆阳	0.041
江苏盐城	0.117	甘肃平凉	0.776
江苏宿迁	0.367	甘肃兰州	0.392
江苏南京	0.128	江苏连云港	0.188
江苏常州	0.285	广东肇庆	0.028

评价结果的分析与讨论：142个城市绩效得分

TOPSIS-熵权法计算结果（权重分配、正负理想解）： 取决于待评估样本的真实数据

- ✓ 可以识别出不同城市聚类中，**相对最优的固废管理实践样本城市**；
- ✓ 可以识别各城市固废管理系统中相对于同类型城市的**薄弱环节**。

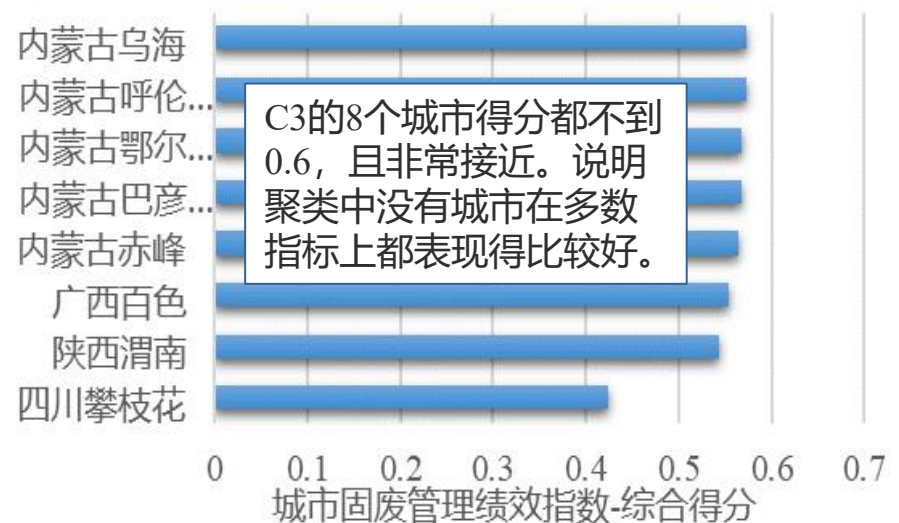
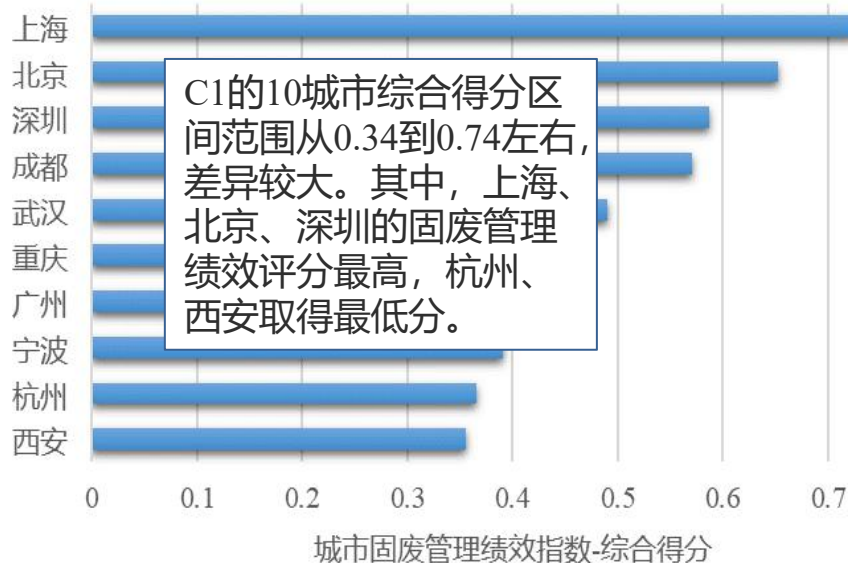
选取比较有**代表性的城市聚类C1、C3**的评价结果进行分析讨论

C1城市代表性

- ◆我国的排名靠前的超一线或一线城市，人口最多、经济体量最大。
- ◆第三产业占比及发展水平较高，基础设施建设较完善，生活垃圾的产排强度大。

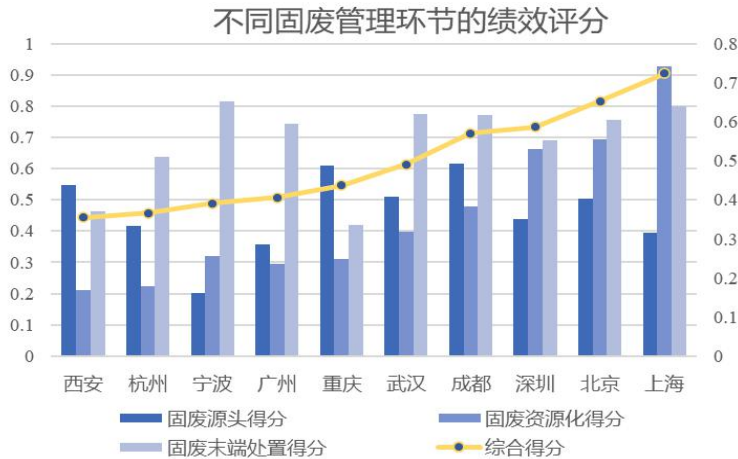
C3城市代表性

- ◆位于西部地区的资源型城市
- ◆经济体量较小，城市建设相对滞后，有着丰富的矿产资源贮备
- ◆一般工业固废和工业危废产排总量大，产排强度全国最高



评价结果的分析与讨论：C1聚类城市的评分分析

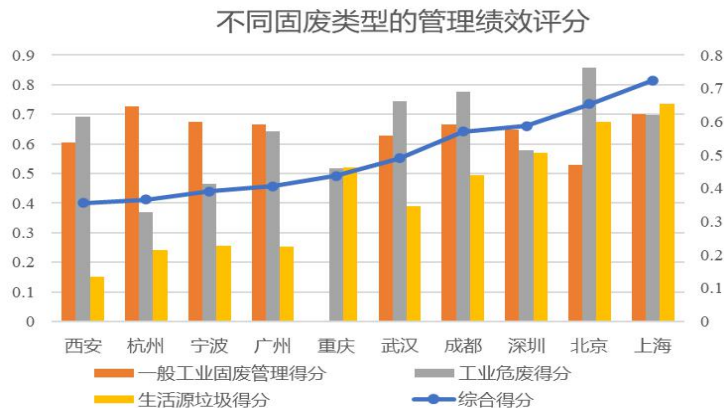
计算C1各个城市在不同固废类别和固废管理环节的绩效得分



结论：在经济体量大，发展水平高的大型超大型以及大型城市

固废的**资源化利用绩效**和**生活垃圾管理绩效**是提高综合绩效评分的**关键环节**

结论：**生活垃圾的处置**管理绩效则很大程度上决定了综合绩效的评分的走势



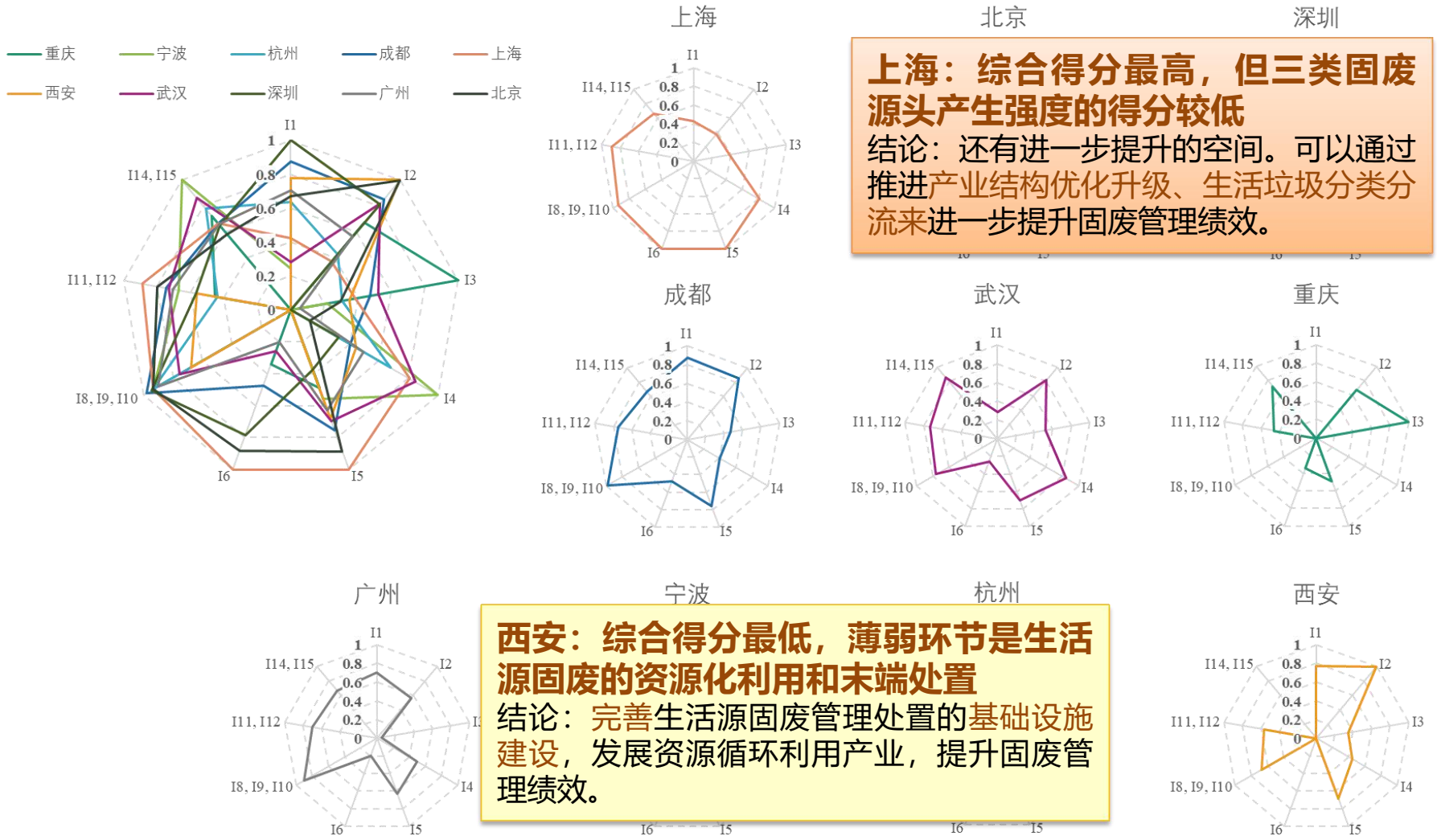
建议1：依托大型城市的规模优势和产业优势进一步推进资源循环利用产业的发展，提高大宗固废的回收利用率，扩展延伸再生产品价值链。

建议2：推进环卫精细化管理和生活垃圾分类，提升餐厨垃圾、可回收物、园林绿化垃圾、电子废弃物等多类可资源化利用的垃圾分类分流处理比率

结论：综合绩效评分的更多地被**废物资源化环节**的表现所影响

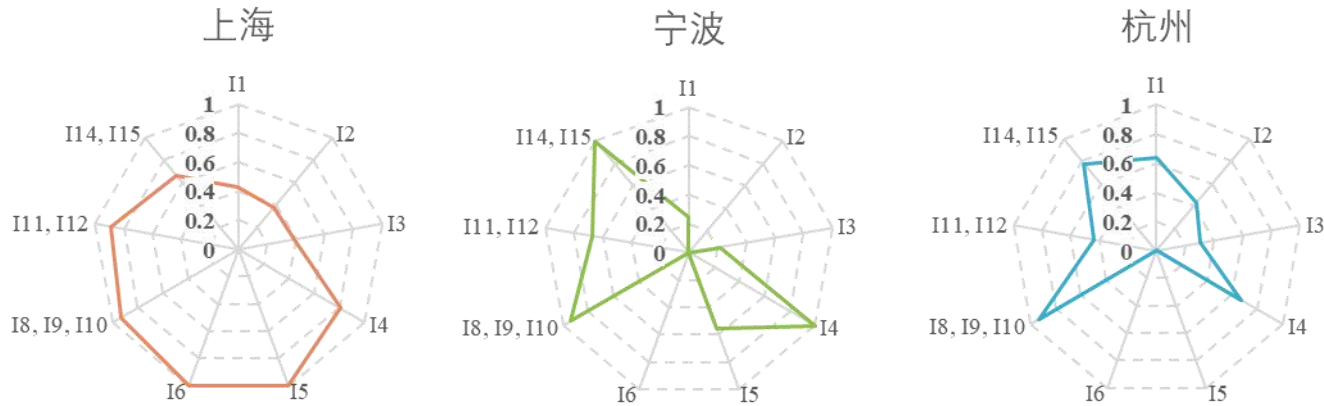
评价结果：C1聚类城市的绩效评分雷达图

进一步计算各个城市3*3（3个涉及的固废类型，3个固废管理环节）管理环节共9类指标，各项评分如雷达图——有助于识别需要改进的薄弱环节。



评价结果：C1聚类各城市绩效评分雷达图

长三角城市群的核心城市：沪宁杭



共同的薄弱环节：工业固废、危废、生活垃圾源头指标得分低，说明这三类固废**产生强度高，处置压力大。**

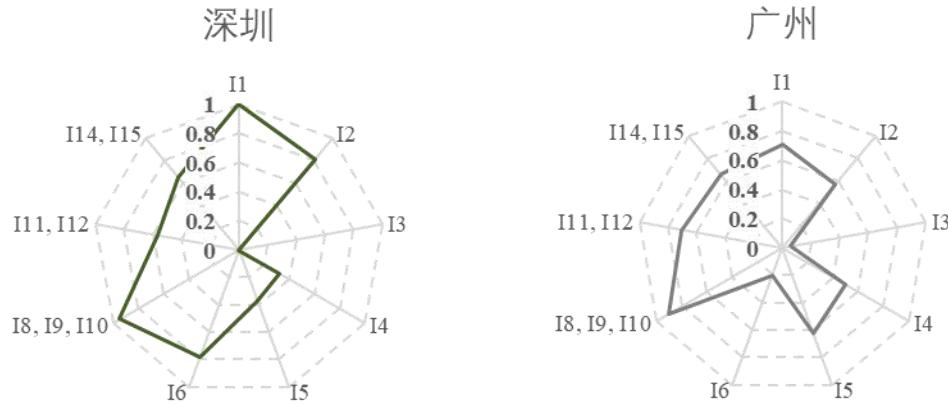
上海：综合得分最高，固废源头产生强度的得分较低，生活垃圾末端处置还有优化潜力
结论：还有进一步提升的空间。可以通过推进产业结构优化升级、生活垃圾分类分流、和生活垃圾末端处置能力建设来进一步提升固废管理绩效。

宁波和杭州：综合得分在10个城市中倒数。危废和生活垃圾的资源化综合利用不充分，危废末端处置能力还需要完善。

结论：需要优化产业结构从源头解决工业固废和危废的产生强度大的问题；完善资源循环利用产业，特别是要提升对于危废和生活源固废的综合利用率；强化危废的安全处置能力。

评价结果：C1聚类各城市绩效评分雷达图

大湾区城市群的核心城市：深圳、广州



共同的薄弱环节： 相较于长三角城市，工业固废和工业危废的产生强度和处置压力较低；
生活源固废的产生强度和处置压力较大

深圳： 人均固废产生强度得分最低，一般工业固废和工业危废资源化指标得分较低，工业危废和生活垃圾的末端处置还有提升的潜力。

这与深圳土地资源有限，导致多类固废处置利用设施选址困难，处置能力紧张有关。深圳的工业危废大多送往外地处置，同时贮存比例较高；另外生活垃圾仍以填埋处置为主，距离“原生垃圾零填埋”的目标实现仍有一段距离。

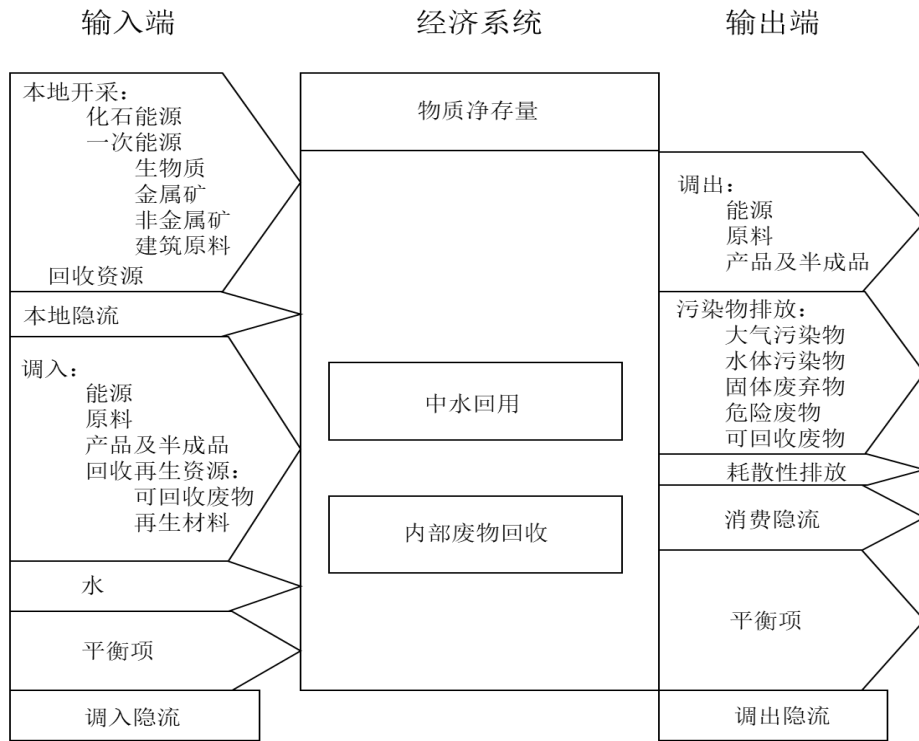
广州： 生活垃圾的资源化综合利用不充分，危废和生活垃圾的末端处置能力还需要完善。

结论：相较于深圳，广州市还需要进一步完善生活垃圾“大分流、细分类”的资源化和无害化处置能力建设。

方法二：基于城市物质代谢分析的“无废城市”绩效评估

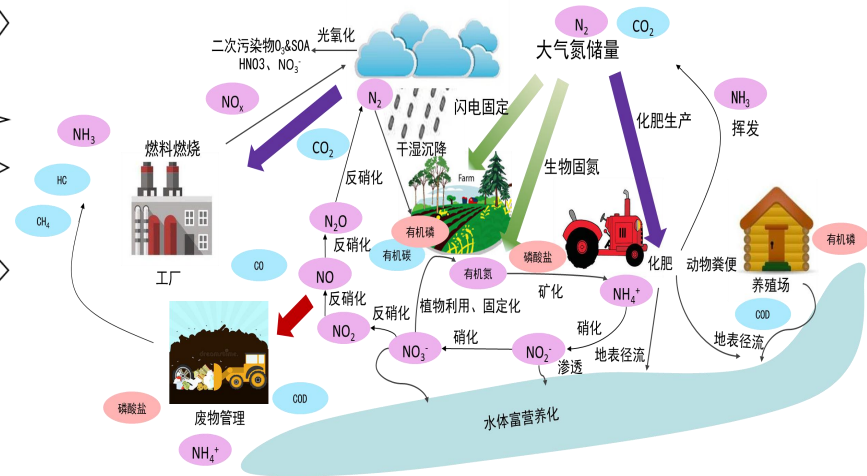


□ **城市物质代谢**：城市各种资源输入、加工制造、产品消费、循环回用、废物处置等物质转化的全过程；城市物质代谢过程决定了各种类型废弃物的排放及其资源环境影响。



城市物质代谢过程

- 当精确掌握城市层面的多种类固废代谢乃至关键元素代谢数据时，可以实现基于多种类固废代谢过程乃至关键元素代谢的“无废城市”绩效评估指标体系。



方法二：基于城市物质代谢分析的“无废城市”绩效评估

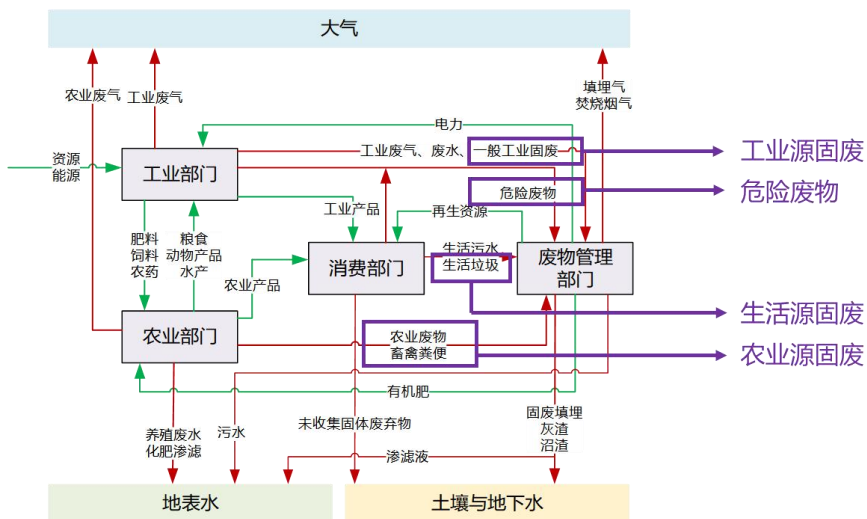


- 数据基础好的城市可探索基于多种类固废代谢过程的“无废城市”绩效评估
 - 形成反映固废源头减量、资源化利用水平和环境影响的“无废城市”绩效评估指标体系。

Step 1

构建多源固废代谢基础数据库。

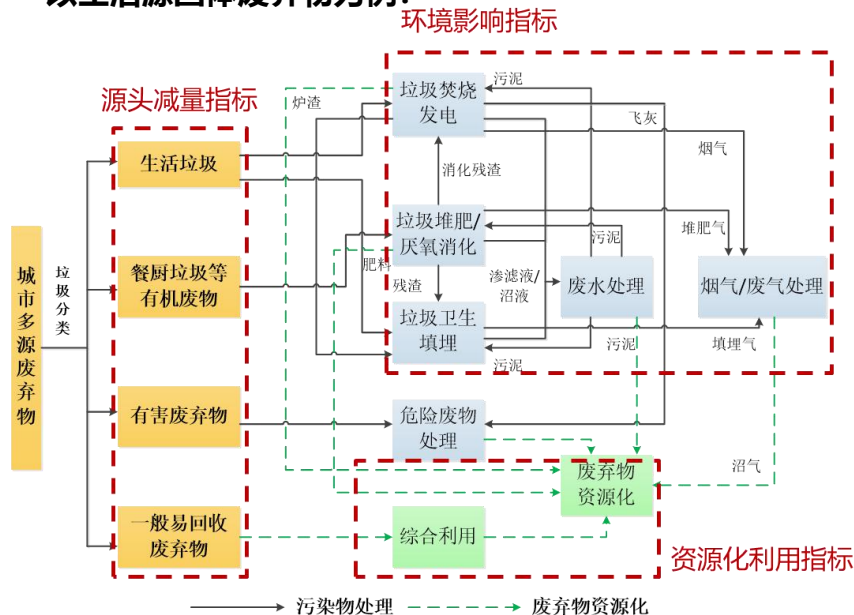
- 搭建城市层面涵盖多个社会经济部门的物质代谢分析模型，分析大宗工业固体废物、主要农业废弃物、生活垃圾和建筑垃圾、危险废物的产生、收集、转移、处理处置及资源化利用情况。



Step 2

形成反映固废源头减量、资源化利用水平和环境影响的“无废城市”绩效指标

以生活源固体废弃物为例：



方法二：基于城市物质代谢分析的“无废城市”绩效评估



Step 3

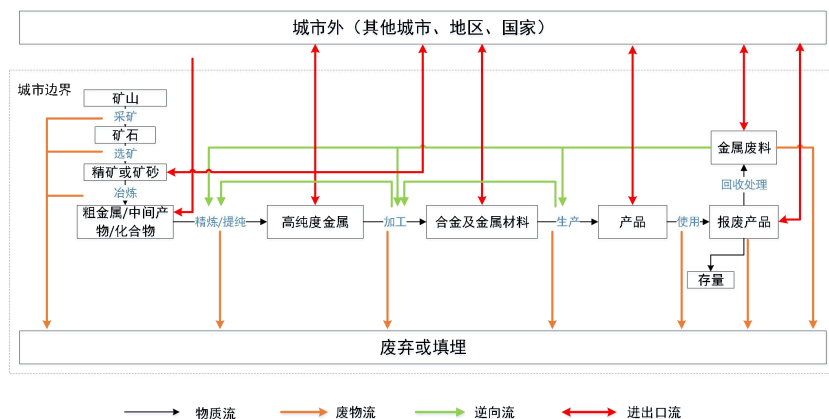
可实现基于关键元素代谢分析的“无废城市”绩效评估和精细化管理策略

- 绝大多数资源环境问题都与关键元素的代谢流动、迁移和归宿相关；
- 关键元素的不合理代谢是造成相关资源环境问题的根源。

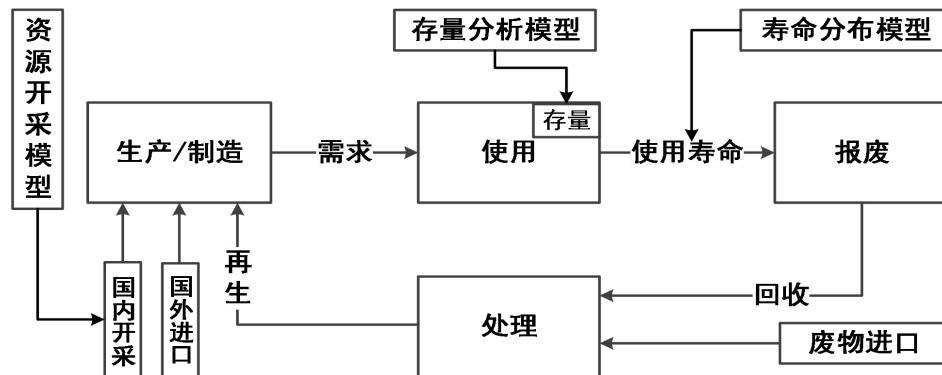
基于**金属元素（铜、铝、锂、稀土等）**决定了多类再生资源、大宗工业固废的资源化利用水平

◆ 金属元素代谢核算框架

核算大宗金属元素及战略性金属元素在社会经济系统中的流动情况，为金属资源战略布局、固废管理提供了基础



◆ 金属元素代谢模型结构图



方法二：基于城市物质代谢分析的“无废城市”绩效评估



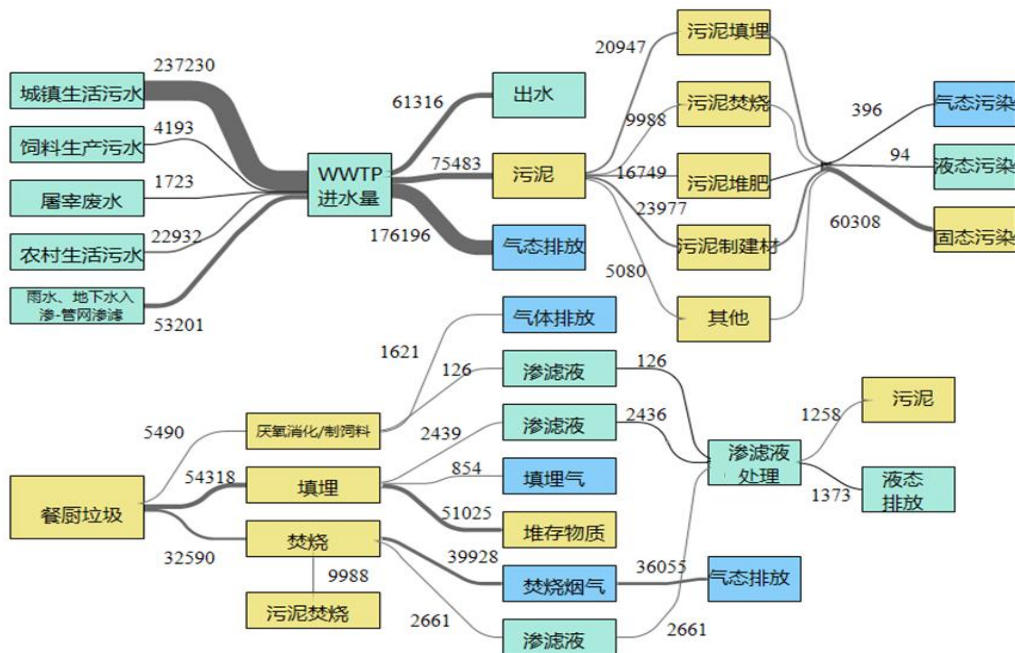
Step 3

可实现基于关键元素代谢分析的“无废城市”绩效评估和精细化管理策略

- 绝大多数资源环境问题都与关键元素的代谢流动、迁移和归宿相关；
- 关键元素的不合理代谢是造成相关资源环境问题的根源。

基于营养元素（如碳、氮、磷等） 与大气、水体污染、土壤酸化、气候变化等问题密切相关。

◆ **废物管理系统**决定了城市碳、氮、磷元素代谢的最终形态和向多环境介质的排放形式，因而碳、氮、磷元素的代谢过程能够反映城市废物管理系统的污染控制水平。



珠三角城市群废物管理系统氮元素代谢分析

➤ 珠三角餐厨垃圾氮污染去除率约62.3%，回收利用率仅9%，最终排入环境的氮污染分别为：

**气态：38.5 Gg；液态：62.7 Gg；
固态：119.5 Gg。**

➤ 可基于氮污染排放的种类及通量核算餐厨垃圾环境影响。

来源：Chen, C et al. 2019. Nitrogen flow patterns in the food system among cities within urban agglomeration: A case study of the Pearl River Delta region. Science of the total environment.

方法二：基于城市物质代谢分析的“无废城市”绩效评估



Step 3

可实现基于关键元素代谢分析的“无废城市”绩效评估和精细化管理策略

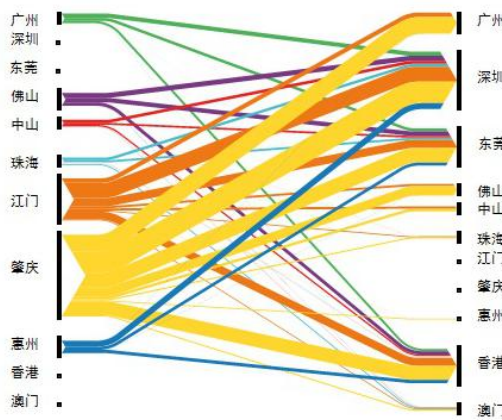
- 绝大多数资源环境问题都与关键元素的代谢流动、迁移和归宿相关；
- 关键元素的不合理代谢是造成相关资源环境问题的根源。

基于营养元素（如碳、氮、磷等） 与大气、水体污染、土壤酸化、气候变化等问题密切相关。

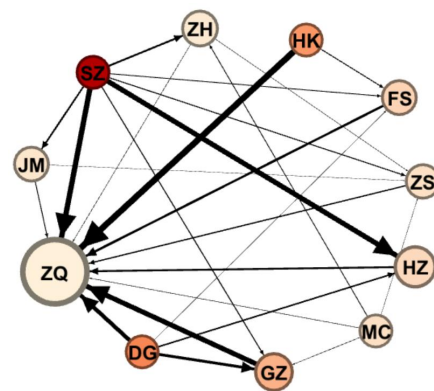
- ◆ 研究发现：城市群各城市间经济联系紧密，形成了跨城市的资源代谢网络，导致污染在城市间的潜在转移，开展污染协同控制必要性凸显。
- ◆ **城市群各城市间可建立相应的废弃物协同处理设施及污染补偿机制，探索区域性资源回用解决方案，促进绿色协同发展。**

以粤港澳大湾区城市间氮资源代谢与氮污染转移为例说明

来源：Chen, C et al. 2020, working paper.



城市间氮资源代谢网络



城市间氮污染转移网络

一、“无废城市” 固废管理绩效评价

二、“无废城市” 区域协同共建机制

城市固废综合管理需因地制宜对重点品类区域统筹



- 固废管理面临困境：发展差距较大且不平衡不充分、管理重视程度不够、区域协作监管与执法机制不畅；
- 固废跨市/跨省转移处置较为频繁，主要集中在**建筑垃圾、危险废物、废弃电器电子产品、废弃铅酸蓄电池、工业固废、再生资源**等六类；

全国固体废物跨市/跨省转移情况
(据2019年各城市公开数据**不完全统计**)

类型	单位	数值
建筑垃圾	万吨	10656
危险废物	万吨	281.53
生活垃圾	万吨	12.91
废电器电子产品	万吨	2.1
废铅酸蓄电池	吨	12735.05
医疗废物	吨	7856.74
废矿物油	吨	3929

城市固废的安全处置和资源化利用：

- 仅靠城市自身无法完全解决；
- **因地制宜识别需区域统筹协调的固废品类**，而非对所有品类实施区域流通；
- **构筑“无废城市”区域协同共建机制**；

• 数据来源：各大中城市《2019年固体废物污染环境防治公报》
• 其中**71**个城市公开信息包含固废跨市/跨省的转入/转出信息

(1) 京津冀区域3个重点品类-工业固废+再生资源

- 京津冀协同利用成效显著：2015-2017三年累计利用工业固体废物约**22亿吨**，再生资源回收利用量达**3.3亿吨**



- 到2022年，区域年综合利用工业固废量**82亿吨**，主要再生资源回收利用量达到**1.5亿吨**，区域协同机制较为完善

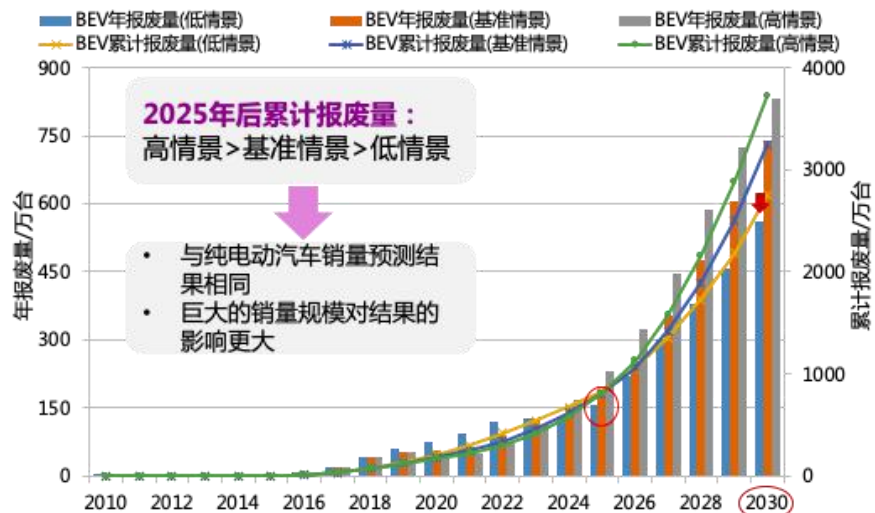
《京津冀及周边地区工业资源综合利用产业协同发展行动计划（2015-2017年）》

《京津冀及周边地区工业资源综合利用产业协同转型提升计划（2020-2022年）》



京冀企业联合开发选铁协同生产混凝土骨料技术，产品应用于重大工程

(1) 京津冀区域重点品类识别-新能源汽车退役动力电池



- 京津冀为新能源汽车推广的重点区域；
- 截至2017年底，新能源汽车保有量达32.6万辆，约占全国的21.3%；
- 动力电池即将迎来大规模退役；

《京津冀地区新能源汽车动力蓄电池回收利用试点实施方案》



1) 构建涵盖京津冀地区的动力蓄电池回收网络体系

- 格力、桑德：报废汽车、废旧家电网络布局电池回收
- 邦普：建立5个回收移动服务站，17年回收超1100吨

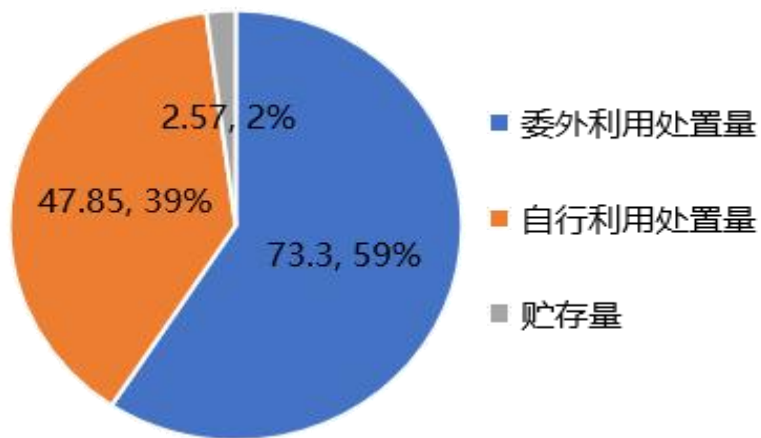
2) 津冀地区梯次利用探索和示范项目建设

- 北京匠芯电池：建梯次电池监控和新能源车辆评估平台，发布“擎天柱计划”
- 中国铁塔集团：建立梯次利用测试站点示范，电池运行稳定
- 中聚新能源：完成1MWh储能领域梯次利用试验，应用于峰谷调平

(2) 长三角区域重点品类识别-危险废物



- 长三角制造业发达，危废产生量大，处置能力类别和地域分布严重不均衡，上海市**59%**危废需**委托外市处理**；



2018年上海市工业危废处置情况
(万吨)

危废	江苏省	浙江省
跨省转出及占比	77万吨, 15%	175万吨, 49%
接收省份	浙江、安徽和江西 三省合计接收江苏危废49.3万吨, 占江苏转出危废量的64%	安徽、江西 两省合计接收浙江危废115.6万吨, 占浙江转出危废量的66%;
转出种类	含铜废物、表面处理污泥、其他废物, 三者合计约占转出量的50.8%, 对省外处理资质依赖度高	废铅酸蓄电池 86万吨、 电镀污泥 56.5万吨), 两者合计约占转出量81%

(2) 长三角区域重点品类识别-危险废物



《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》

- 明确**加强固废危废污染联防联控**与推动生态环境协同监管；

国家层面不同政策规定有所不同

- 《危险废物转移环境管理办法（修订草案）》（征求意见稿）（2020）提出，**原则上不鼓励跨省转移处置危险废物**；
- 新固废法明确**危险废物在内的固体废物跨区域协同处置**。

地方政府：结合自身利益，对跨省转移态度不一

- **上海**：加强长三角区域协同合作，研究推进长三角区域危险废物处置设施**共建共享**，探索以“**白名单**”方式简化危险废物跨省转移审批。 ✓
- **浙江**：鼓励危险废物依法跨区域转移、利用和处置。 ✓
- **江苏**：不得对申请危险废物跨省转移设置障碍。 ✓
- **安徽**：严格落实**利用类危废外省转入限额**，禁止外省危废转入安徽焚烧、干化、物化、填埋。 ✗

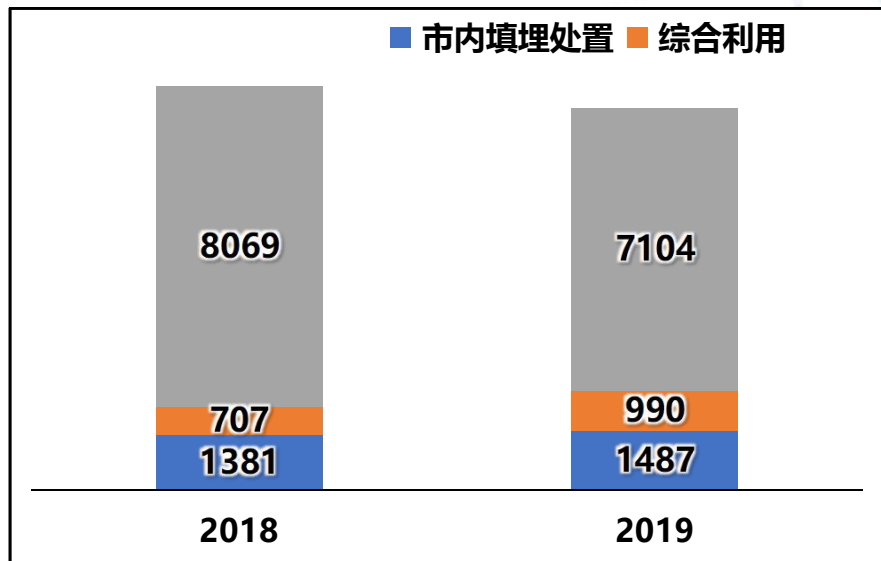
- 危险废物的环境危害性最为严重，其跨市/跨省转移**最为敏感**，受到广泛关注；
- 国家与地方、不同省份之间的相关政策并非完全一致，跨省危废协同处置协调机制尚未有效建立，各省市各自为战，跨省违规转移危废的案件仍有发生；

(3) 粤港澳大湾区重点品类识别-建筑垃圾、危险废物



- 仅深圳市公开跨市转移信息，且数量巨大；深圳约**80%**建筑垃圾需外运至周边城市处置利用；

跨市跨省自发开展跨区域土方平衡处置



深圳市2018-2019年建筑垃圾处置方式
(单位：万吨)



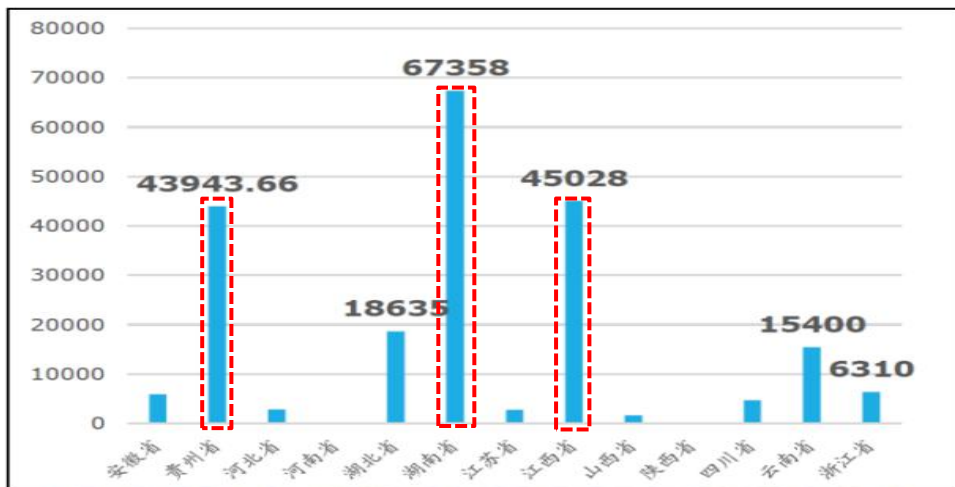
2018年深圳市建筑垃圾处置去向

• 数据来源：《2019年固体废物污染环境防治公报》
无废城市试点建设方案

(3) 粤港澳大湾区重点品类识别-建筑垃圾、危险废物



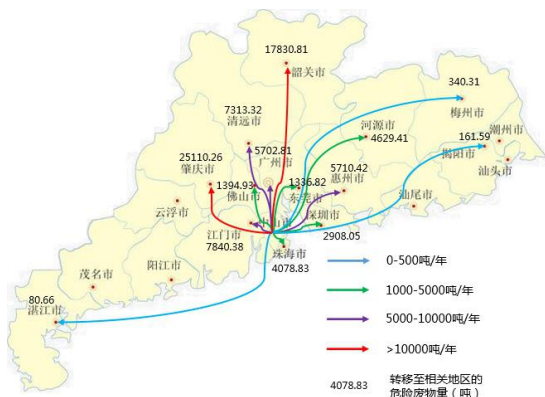
□ 对于跨市/跨省转移，**危险废物最为频繁**，全国转移量达到281.53万吨；



数据来源：广东省生态环境厅

2018年广东省危废转运至各接收省份的转运量情况(吨)

- 广东省2017-2018年共批复350起工业危废跨省转运，转运总量为32.67万吨；
- 跨省外运中，运至湖南省**34%**、贵州省**22%**、江西省**23%**；



中山市2019年危废跨市转移情况



中山市2019年危废跨省转移情况

- 中山市2019年危废产生量16.63万吨，约**65%**跨市或跨省处理；
- 跨市处理量8.5万吨 (**51%**)，**涉及14个城市**；
- 跨省处理量2.34万吨 (**14%**)，**涉及10个省份**；

(3) 粤港澳大湾区重点品类识别-建筑垃圾、危险废物



□ 广东省首个较大规模并具有示范性质的重要环保项目

- 服务范围：为**东莞**、**惠州**等**13个珠三角地区**和**粤东地区**城市提供危险废物（含惠州的医疗废物）的收集和处置服务
- 经营范围：可处理新《国家危险废物名录》列明的46大类之中的42大类废物（HW10多氯（溴）联苯类废物、HW15爆炸性废物、HW29含汞废物等除外）



惠州东江威立雅环境服务有限公司

(3) 粤港澳大湾区重点品类识别-建筑垃圾&危险废物



□ 建筑垃圾、危险废物等区域处理：在政府指导下的市场自主交易行为

《粤港澳大湾区发展规划纲要》

- 加强环境保护和治理，加强**危险废物区域协同处理处置能力建设，强化跨境转移监管**，提升固体废物无害化、减量化、资源化水平

自下而上催生相关宏观管理政策与机制

- 2019年12月，广东省住建厅印发《关于建筑废弃物跨区域平衡处置协作监管暂行办法（试行）》（粤建规范[2019]6号）
- 建立深莞惠经济圈（3+2）生态环保合作平台与合作机制
- 深圳、佛山、肇庆、河源、清源、韶关等地签订固体废物协同处置战略合作协议



01

明确报批程序 规范跨区域排放管理

为规范土方跨区域平衡处置工作，《暂行办法》要求，在建筑废弃物跨区域平衡处置前，排放单位须填写《登记表》，经消纳场所（包括消纳场、综合利用设施、土地平整工程、生态修复工程、围填海工程、回填项目等）经营单位同意并加盖公章后，向地级以上市接收地和排放地主管部门进行跨区域排放建筑废弃物登记

03

建立联络机制 实现信息共享

建立政务信息互联互通、资源共享平台。为打破信息壁垒，充分发挥政府部门联合监管的合力，《暂行办法》规定省主管部门应当牵头建立建筑废弃物跨区域平衡处置协调机制，协调解决工作中遇到的问题。两地主管部门要实现工作对接和信息共享，实现管理信息互联互通、即时共享。

02

坚持属地管理 部门协作监管

各市政府应明确负责本行政区域内建筑废弃物跨区域平衡处置工作的行政主管部门。各地级以上市主管部门应按照属地管理原则，具体负责统筹、协调、指导本市行政区域内建筑废弃物跨区域平衡处置相关工作，及时与相关城市主管部门进行对接和信息共享。各地级以上市其他相关部门按照各自职责，对建筑废弃物跨区域平衡处置工作实施监督管理

04

建立公众投诉机制 发挥社会监督作用

为促进排放单位、运输单位和建筑废弃物消纳场所管理单位等加强管理，规范运作，《暂行办法》建立了公众投诉机制，充分发挥社会的监督作用。

(4) 成渝经济圈重点品类识别-危险废物

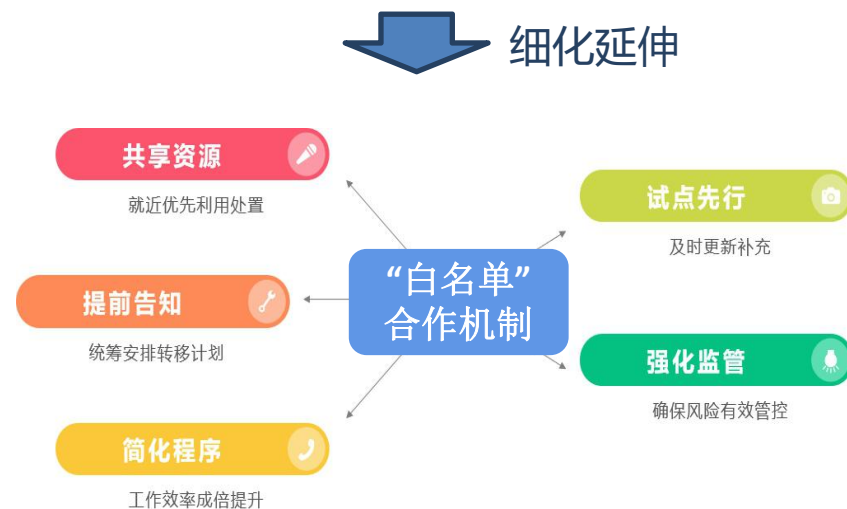


四川省

- 建立省际危废转移互通互联、信息共享、联合执法等协同机制，建设省级危废转移实时监控平台

区域

- 2018年四川省与重庆市签订《**危险废物跨省市转移合作协议**》；
- 2020年四川省与重庆市共同建立**危险废物跨省市转移的“白名单”合作机制**（先期以废铅蓄电池、废荧光灯管、废线路板等3类为重点）；
- 2020年渝川黔滇四省市《**关于建立长江经济带上游省市危险废物联防联控机制**》（以废酸、废矿物油、废铅蓄电池、电镀污泥等重点联合执法）；



“无废城市” 区域协同共建的工作基础



实践基础

- 重点城市群固废处理处置短板不同，需区域统筹的固废品类也不同，已对区域内特定品类自发开展了**区域内统筹优化和资源配置**；
- 企业实践活动自下而上催生相关宏观管理政策与机制

《循环发展引领行动》(14部委)

- 提出构建**区域资源循环利用体系**
 - 以**京津冀、长三角、珠三角、成渝**、哈长经济区等城市群为重点，统筹规划和建设区域内工业固废、再生资源、生活垃圾资源化和无害化处置设施，建设**跨行政区域的资源循环利用产业基地**。建立**跨行政区域的废弃物协同处置信息平台**，促进废弃物协同利用和处置。促进报废汽车拆解、危废处理等跨行政区域流动，实现资质互认、政策协同、体系协同。

国家顶层政策供给

《新固废法》(2020年修订)

- 新增固废污染防治区域统筹管理规定

总体原则

- 省、自治区、直辖市之间可以协商建立跨行政区域固体废物污染环境的联防联控机制，统筹规划制定、设施建设、固体废物转移等工作

转移监管

- 强化移出地责任。移出地、接受地生态环境主管部门均要备案。
- 强化固废跨区域转移的信用管理，建立信用记录制度

危险废物

- 相邻省、自治区、直辖市之间开展区域合作，统筹建设**区域性危险废物集中**处置设施、场所

生活垃圾

- 鼓励相邻地区统筹生活垃圾处理设施建设，促进设

区域统筹并非对所有品类实施转移流通，应因地制宜、识别区域内需协同的固废品类，是城市自身固废管理的有效补充；

“无废城市”区域协同共建存在问题

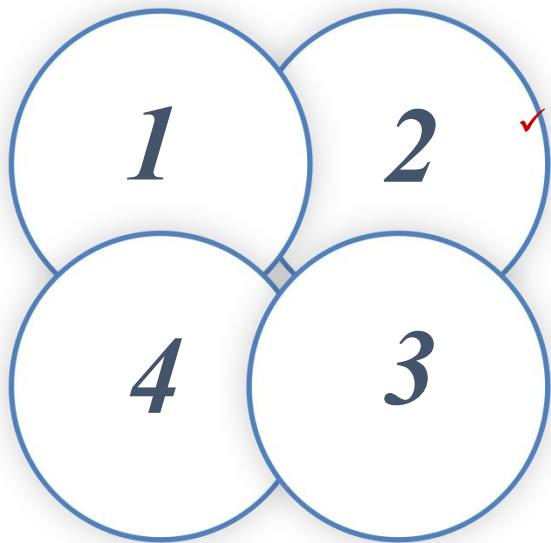


体制割据，缺乏区域顶层设计和系统规划

- ✓ 发达城市固废产排量大，但用地紧缺、处置设施超负荷运转、末端处置能力不足；
- ✓ 周边欠发达城市的土地资源相对充足，但在承接外来固废转运处置上存在“邻避”心态，最终导致其土地空间优势被浪费，无法建立固废治理的良性合作

制度滞后，区域生态补偿制度未有效形成

- ✓ 须建立跨省市的生态补偿、处置付费、成本分摊、费用优惠等经济补偿机制
- ✓ 确保固废转入地、消纳地的政府、企业、民众受益，才可破解“邻避效应”，实现“设施共建”“成本共担”和“利益共享”



机制割裂，区域协同共治管理机制碎片化

- ✓ “九龙治水”的管理模式：当前固体废物管理体制涉及职能部门众多；不同品类固废、同种固废的不同处理环节，其主管部门也有不同
- ✓ 职能部门“共建共享、协同共治”工作基础有待提高，有信息壁垒

法制匮乏，区域监管与执法机制不完善

- ✓ 由于缺乏长效的固废区域协同联动监管和执法机制，跨行政区域环境污染事故和污染纠纷频频发生
- ✓ 现行环境监管和执法标准不一也产生了相邻行政区间存在治污不同步、力度不一致、宽严不统一等弊端

纽约、旧金山、东京三大世界级湾区：区域协同共建模式

核心城市

纽约、旧金山、东京：
国际一流大都市

优势、问题及需求：

- 人口、产业、资本高度集中
- 产废量大，处置需求高
- 缺少建设处置设施的土地资源

对策：

- 为周边城市提供“**环境补偿资金**”，为潜在的环境风险承担责任
- 区域内统筹规划，周边城市承接处置产业，减轻核心城市用地负荷

核心城市与周边城市 建立密切合作联动机制，**共担共享共治**

实现特殊固废的区域一体化监控管理处置，以及区域内流通和资源化利用



周边城市

优势、问题及需求：

- 有土地资源可承接处置设施建设
- 缺少经济发展的产业资源和资本

对策：

- 承接核心城市的固废处置产业进行资源化利用，创造就业岗位，实现经济发展
- 有“**环境补偿资金**”为环境风险兜底
- 实现了固废协同共治、环境风险共担、经济和环境利益共享

“无废城市”区域协同共建机制的发展路径



信息共享机制

固废智能监控溯源系统作为区域固废
污染联防联控的技术支撑



执法监管合作机制

完善处罚机制，作为区域固
废污染联防联控的拳头



污染事件联合应对机制

作为区域固废污染联防
联控的屏障



“无废城市” 区域协同共建

跨区域协商机制

作为区域固废污染联防联控的基础



区域补偿机制

作为区域固废污染联防
联控的推动力

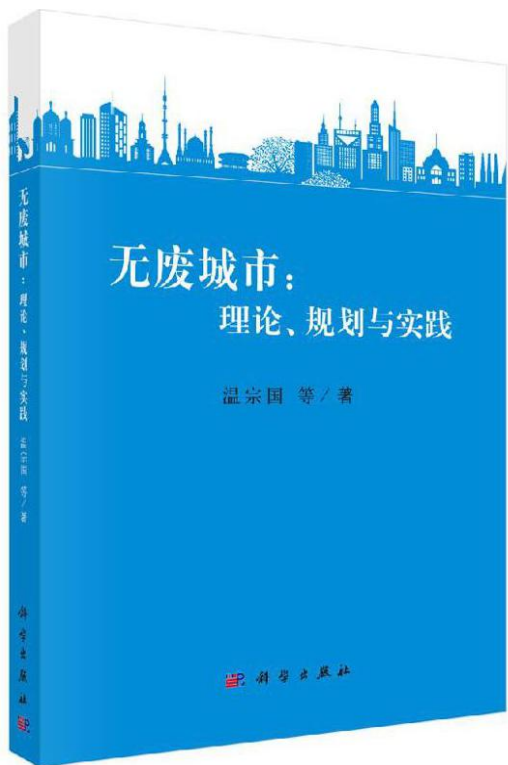


设施优化共享机制

作为区域固废污染联
防联控的核心



“无废城市”建设共性问题及解决对策



- 1、 “无废城市” 规划建设的系统性
- 2、 固体废物综合性管理的能力建设
- 3、 “邻避效应” 等深层次社会因素
- 4、 固体废物处理处置技术及其适应性
- 5、 固体废物管控政策和长效机制



“无废城市”建设管理的未来展望

- 1、系统性构建高效的**城市资源循环利用体系**
- 2、建立健全分类施策的**法律法规及管理机制**
- 3、推广城市多源固体废物**协同处置技术管理体系**
- 4、提升城市固体废物的**现代化治理能力**
- 5、构建“无废城市”**建设绩效评价体系**
- 6、引导形成全社会**共同参与的无废文化**

敬请批评指正！



清华大学环境学院 循环经济产业研究中心

循环经济产业研究中心

