



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202211093 中图分类号 X70 文献标识码 A

高洁, 呼和涛力, 袁汝玲, 等. “无废城市”试点建设与碳减排效益分析: 以徐州市为例[J]. 环境工程学报, 2023, 17(3): 979-989. [GAO Jie, HUHE Taoli, YUAN Ruling, et al. Benefit analysis of carbon emission reduction in the pilot construction of “zero-waste city”: a case study in Xuzhou, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(3): 979-989.]

## “无废城市”试点建设与碳减排效益分析: 以徐州市为例

高洁<sup>1,2,3</sup>, 呼和涛力<sup>1,2,3,✉</sup>, 袁汝玲<sup>4</sup>, 吴丹<sup>1,2,3</sup>, 雷廷宙<sup>1,2,3</sup>, 陈勇<sup>2,3,5</sup>

1. 常州大学环境科学与工程学院, 常州 213164; 2. 常州大学城乡矿山研究院, 常州 213164; 3. 常州市生物质绿色安全高值利用技术重点实验室, 常州 213164; 4. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 5. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510651

**摘要** “无废城市”建设是深化固体废物综合管理改革, 实施减污降碳协同增效, 助力实现碳达峰、碳中和战略的重要抓手。针对徐州市“无废城市”试点建设期间城乡生活、农业及工业等领域各类固体废物, 参考 WARM 模型并采用排放因子法从源头减量至中端和末端处置环节的碳排放情况进行了全面核算, 系统评估了徐州市“无废城市”试点建设与碳排放效益。结果表明, 试点建设期间通过源头减量各类固体废物产生量, 实现碳减排量  $1.5313 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ , 其中工业领域固体废物源头减量贡献最大。各领域固体废物处置环节中, 通过提高资源再生利用率、控制城市固体废物的填埋量、减少畜禽粪便的堆肥以及提升工业固体废物的资源回收利用是徐州市碳减排的重要措施。全市在试点建设期间实现碳减排效益  $1.6066 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ , 总体上获得了较好的减污降碳协同效益。本研究结果可为推进“无废城市”建设与减污降碳协同增效提供参考。

**关键词** 无废城市; 碳减排; 固体废物处置; 协同效益

当前, 我国生态文明建设正面临“生态环境根本好转”和“碳达峰、碳中和”两大战略任务。基于环境污染和碳排放高度同根同源的特征, “协同推进减污降碳”已成为新发展阶段经济社会发展全面绿色转型的必然选择。2022 年 6 月, 生态环境部等 7 部门联合印发的《减污降碳协同增效实施方案》<sup>[1]</sup>, 强化资源回收和综合利用, 加强“无废城市”建设, 突出工业、农业、城乡建设等重点领域固体废物减污降碳协同增效, 推进固体废物污染防治协同控制。《2030 年前碳达峰行动方案》<sup>[2]</sup>中指出, 大力发展循环经济, 全面提高资源利用效率, 充分发挥减少资源消耗和降碳的协同作用。国内外关于减污降碳效益的研究表明, 通过发展循环经济, 加强废弃物管理措施, 如减少各类废弃物的产生、加强其处置与资源化利用等可使全球碳减排 10%~20%<sup>[3]</sup>。根据中国循环经济协会的测算, “十三五”期间, 发展循环经济对我国碳减排的综合贡献率达到 25%; 同时, 展望“十四五”以及到 2030 年碳达峰时, 其综合贡献率预计分别将达到 30% 和 35%<sup>[4]</sup>。

“无废城市”建设是以新发展理念为引领, 通过推动形成绿色发展方式和生活方式, 持续推进固体废物源头减量和资源化利用, 将固体废物对环境的影响降至最低的城市发展模式。开展“无废城

收稿日期: 2022-11-17; 录用日期: 2023-02-27

基金项目: 中国工程院高端智库专项研究资助项目 (2021-GDZK-16); 天津市科技计划资助项目 (22ZLGCX00030)

第一作者: 高洁 (1995—), 女, 硕士研究生, [2354622184@qq.com](mailto:2354622184@qq.com); ✉通信作者: 呼和涛力 (1977—), 男, 博士, 研究员, [hhtaoli@cczu.edu.cn](mailto:hhtaoli@cczu.edu.cn)

市”建设试点是从城市整体层面深化固体废物综合管理改革和全面推动“无废城市”建设的有力抓手<sup>[5-7]</sup>。截至2020年底,首批开展试点的“11+5”城市和地区在模式和体系建设方面已取得初步成效<sup>[8]</sup>。徐州市作为传统工业城市的典型代表被纳入了国家首批“无废城市”建设试点城市,围绕固体废物减量化、资源化、无害化方面开展了积极探索,在生产和生活等领域形成了多项改革举措和经验做法。根据《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》<sup>[9]</sup>,到2025年我国将继续推动100个左右地级及以上城市开展“无废城市”建设,以实现减污减碳协调为总抓手协调推进工业、农业、生活领域绿色低碳发展,进一步强化对固体废物产生强度、综合利用水平以及无害化处置能力等关键指标的考核要求。同时,也需要结合碳达峰碳中和等国家重大战略,开展“无废城市”建设与碳减排潜力的评估工作,充分发挥减污降碳协同增效作用。

关于“无废城市”建设和固体废物领域碳排放量核算方法,国内外已开展了一系列相关研究。滕婧杰等<sup>[10]</sup>基于我国“无废城市”建设指标体系,分析国内外综合型指数构建方法并提出了我国“无废指数”的构建思路。张冰洁等<sup>[11]</sup>分析了我国一般工业固体废物产生及处置情况,提出了“碳中和”及“无废城市”背景下,一般工业固体废物环境管理的新策略。MOGHADAM等<sup>[12]</sup>通过Land-GEM和IPCC模型相结合研究了伊朗不同地区城市固体废物处理中心的温室气体排放情况。YAMAN等<sup>[13]</sup>使用Land GEM和废物减量模型(Waste reduction model, WARM)分析了达曼城市生活垃圾的温室气体减排和能源回收潜力。WUNSCH和TSYBINA<sup>[14]</sup>基于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指南和垃圾填埋场日常运营中与城市固体废物(municipal solid waste, MSW)厌氧分解相关的温室气体排放协议的量化碳足迹的方法评估罗安达与MSW相关的碳足迹。结果表明,直接垃圾填埋场排放是温室气体核算的主要贡献。黄金碧和黄贤金<sup>[15]</sup>运用灰色预测方法预测江苏省城市碳排放强度,分析江苏省城市碳减排潜力并提出江苏省城市低碳发展的对策措施。袁长伟等<sup>[16]</sup>采用IPCC碳排放核算方法和EIO-LCA模型测算陕西省碳排放并构建碳减排效应模型并且分析碳减排变化。孙建卫等<sup>[17]</sup>采用IPCC温室气体清单方法构建了碳排放核算的项目框架并且核算了中国历年的碳排放量。国内关于固体废物领域的碳减排研究,主要侧重固体废物填埋处理、固体废物生物处理和垃圾焚烧处理的直接碳排放,缺失源头减量和回收利用环节的间接温室气体减排效益,没有对源头减量、中端资源循环利用以及末端处置全链条碳减排效益的评价研究,相关的评价模型也较为缺少。因此,本研究将针对徐州市各领域固体废物从源头减量、中端和末端处置环节全过程,参考WARM模型采用排放因子法对其碳排放与减排量进行核算,全面评估“无废城市”试点建设期间碳减排综合效益,为推进“无废城市”建设与减污降碳协同增效提供参考。

## 1 研究范围及评价方法

### 1.1 研究范围

本研究旨在核算徐州市“无废城市”试点建设期间的碳减排效益,研究范围从时间、过程以及领域等3个方面进行界定,详见图1。时间范围以2018年基准年至2020年目标年作为试点建设期间;固体废物处置过程考虑了源头减量、中端回收以及末端处置等全部环节。本研究中源头减量是指生产和消费过程中减少废物产生量的措施;中端回收利用是指厌氧消化、堆肥、还田以及资源回收等过程;末端处置是指填埋、焚烧以及简易处置等过程。固体废物产生源考虑了全市城乡生活、农业以及工业等各个领域的各类废弃物。其中,城乡生活领域包含生活垃圾、再生资源、建筑垃圾和市政污泥;农业领域包含秸秆、畜禽粪便、废农膜;工业领域包含了粉煤灰、炉渣、煤矸石等一般工业固体废物以及危险废物。

### 1.2 清单分析

根据徐州市“无废城市”建设试点方案以及成效总结等相关资料<sup>[18-20]</sup>,参考我国固体废物分类体

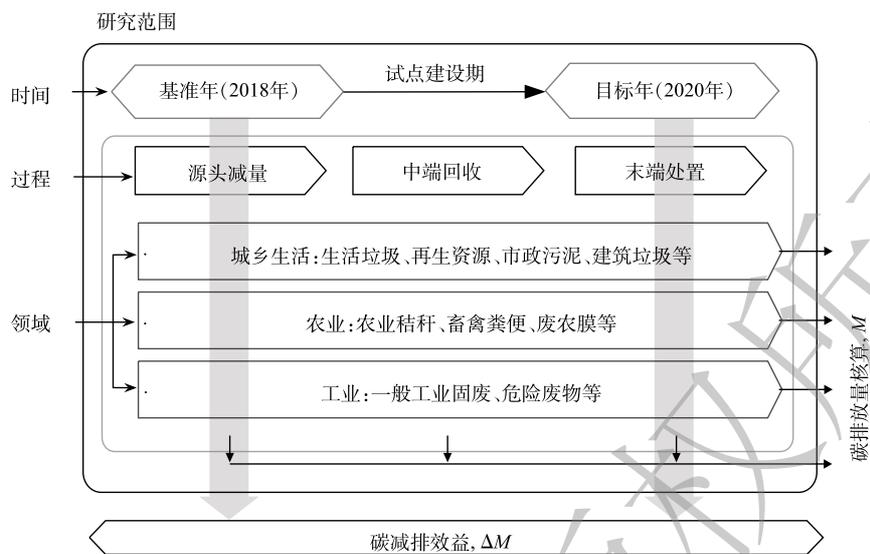


图 1 研究范围

Fig. 1 Research scope

系<sup>[21]</sup>，整理出 2018 年和 2020 年全市各类固体废物产生量与处置量清单，以此作为碳排放量核算的基础数据，如表 1 所示。为了清晰、直观地表示表 1 中内容，图 2 以物质流图形展示了徐州市“无废城市”试点建设期间各领域固体废物产生及处置量的变化情况。

表 1 徐州市各类固体废物产生和处置利用清单分析表

Table 1 Production of various solid wastes in Xuzhou city

产生源	固体废物类别	产生与处置方式	产生与处置量/( $\times 10^4$ t)		增减量/( $\times 10^4$ t)
			2018年	2020年	
城乡生活	生活垃圾	产生	228.80	240.00	11.20
		填埋	104.80	73.68	-31.12
		焚烧	124.00	166.50	42.50
	餐厨垃圾	产生	20.80	20.10	-0.70
		厌氧消化	14.45	20.10	5.65
		焚烧	6.35	0	-6.35
	园林垃圾	产生	1.00	0.50	-0.50
		堆肥	0.48	0.50	0.02
		填埋	0.52	0	-0.52
	农贸垃圾	产生	7.80	3.17	-4.63
		厌氧消化	0.12	3.17	3.05
		焚烧	7.68	0	-7.68
废纸(再生资源)	产生	40.50	14.65	-25.85	
	回收	40.50	14.65	-25.85	
废塑料(再生资源)	产生	25.50	9.22	-16.28	
	回收	25.50	9.22	-16.28	
电子废物(再生资源)	产生	85.00	30.74	-54.26	
	回收	85.00	30.74	-54.26	

续表 1

产生源	固体废物类别	产生与 处置方式	产生与处置量/( $\times 10^4$ t)		增减量/ ( $\times 10^4$ t)
			2018年	2020年	
	废钢铁(再生资源)	产生	160.50	58.04	-102.46
		回收	160.50	58.04	-102.46
城乡生活	市政污泥	产生	22.20	18.60	-3.60
		回收	9.07	0	-9.07
		填埋	1.63	0	-1.63
		焚烧	9.33	11.19	1.86
		堆肥	0.07	7.41	7.34
		简易处置	2.10	0	-2.10
		建筑垃圾	产生	2 366.00	2 040.79
回收	120.60		155.10	34.50	
填埋	1 907.00		1 885.69	-21.31	
简易处置	338.40		0	-338.40	
	秸秆	产生	490.30	516.00	25.70
		回收	112.70	83.08	-23.62
		还田	357.30	412.80	55.50
		简易处置	20.30	20.12	-0.18
农业	畜禽粪便	产生	723.40	729.00	5.60
		厌氧消化	275.42	139.40	-136.02
		堆肥	312.70	557.60	244.90
		简易处置	135.30	32.00	-103.30
	废农膜	产生	3.90	2.50	-1.40
		回收	1.72	2.36	0.64
		填埋	1.78	0	-1.78
		简易处置	0.04	0.14	0.10
	粉煤灰(一般工业固体废物)	产生	369.50	335.40	-34.10
		回收	369.50	335.40	-34.10
	炉渣(一般工业固体废物)	产生	292.60	208.90	-83.70
		回收	292.60	208.90	-83.70
	煤矸石(一般工业固体废物)	产生	287.20	207.10	-80.10
		回收	284.60	207.10	-77.50
		简易处置	2.60	0	-2.60
工业	脱硫石膏(一般工业固体废物)	产生	90.50	108.20	17.70
		回收	90.38	108.20	17.82
		简易处置	0.10	0	-0.10
	尾矿(一般工业固体废物)	产生	52.30	0	-52.30
		回收	52.30	0	-52.30
	冶炼废渣(一般工业固体废物)	产生	67.80	157.50	89.70
		回收	67.80	157.50	89.70
	危险废物	产生	12.17	14.59	2.42
		回收	7.09	7.23	0.14
		焚烧	5.08	5.20	0.12

注: 简易处置指城乡生活领域中的市政污泥和建筑垃圾贮存处置; 农业领域中的秸秆和畜禽粪便为农户自用; 工业领域的煤矸石、脱硫石膏贮存处置等。

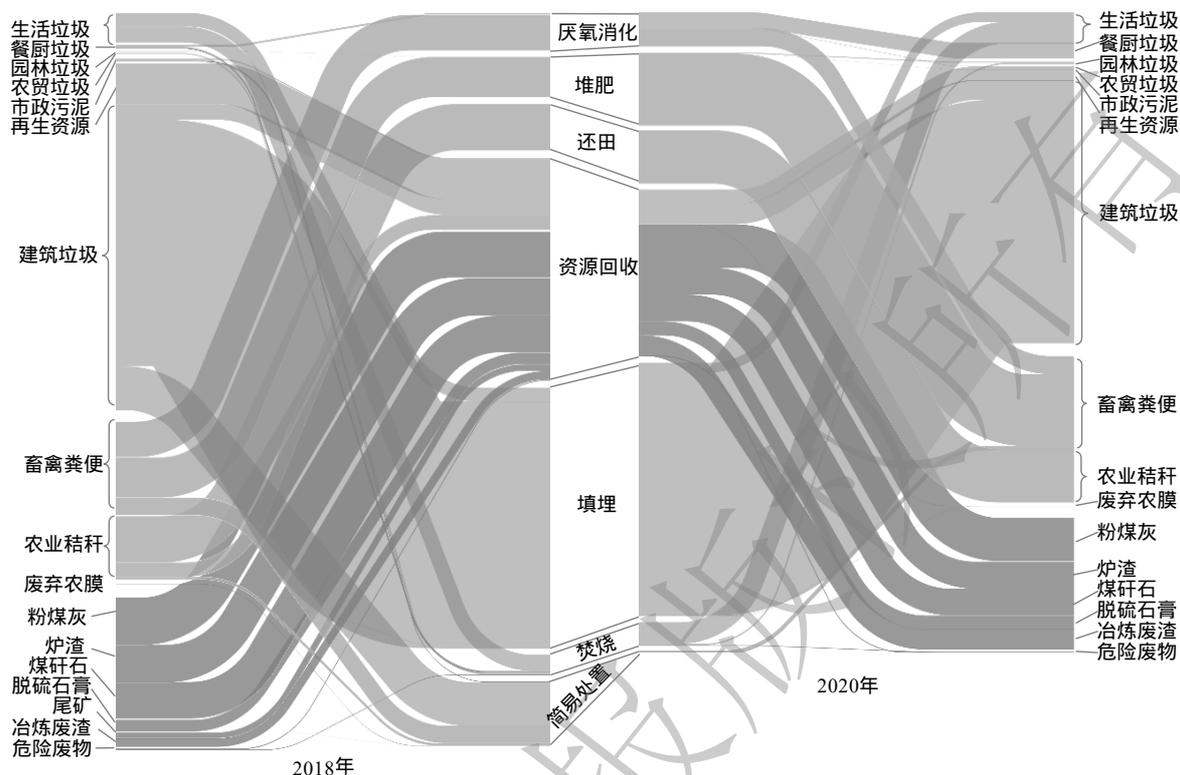


图 2 2018 年和 2020 年固体废物产生及处置量对比

Fig. 2 Comparison of solid waste discharge and disposal amounts in 2018 and 2020

### 1.3 分析方法

1) 固体废物领域碳减排模型。有关固体废物管理碳减排核算方法及模型，目前较为常用的有 IPCC 制定的针对国家层面固体废物处理处置设施直接现象的清单指南，但主要核算范围包括城市及工业领域固体废物末端处置环节的碳排放，并未考虑源头减量、资源循环利用和回收再生的间接温室气体减排效益。因此，IPCC 指南废弃物部门所给的计算边界难以全面反映固体废物管理的温室气体减排贡献和潜力。美国环境保护署研发的 WARM 模型，其特点主要在于不仅适用国家或地区、城市层面，而且处置环节考虑的较为全面，可为 61 种废弃物提供了源头减量、回收、堆肥、燃烧、填埋等环节的直接和间接温室气体排放量，同时也具有可根据本国废物类型和处置方式改进后进行本土化应用等特征。基于上述考虑，采用 WARM 模型可为徐州市“无废城市”试点建设减污降碳效益提供核算依据。

2) 碳排放及减排核算。本研究参考 WARM 模型框架，依据我国固体废物产生来源和管理的特点，对测算模型进行了拓展，并从相关文献资料<sup>[22-42]</sup>中获取排放因子进行数据补充。碳排放量核算基本方程是固体废物源头减少(增加)量或固体废物处置量乘以排放因子，也称排放因子法，具体的碳排放总量  $M$  计算公式如式 (1) 所示。

$$M = \sum_{n=1}^8 f_n \cdot m_n \quad (1)$$

式中： $f_n$  为全生命周期中各环节的碳排放系数， $t \text{ CO}_2\text{eq} \cdot t^{-1}$ ； $m_n$  为源头减(增)量/各环节处置量， $t$ 。

本研究中， $f_1$  为源头减量碳排放系数，即单位固体废物产生时，包括加工及运输等环节的碳排放量，即与基准年相比，目标年固体废物在源头产生量的减少相应的碳排放系数。 $f_n$  ( $n=2,3,\dots,8$ ) 为处置环节的碳排放系数，包括固体废物运输、处置过程中的碳排放量，抵消所产生

的能源、肥料、材料等避免的碳排放量。其中,  $f_2$  为厌氧消化环节碳排放系数,  $f_3$  为堆肥环节碳排放系数,  $f_4$  为还田环节碳排放系数,  $f_5$  为回收利用环节碳排放系数,  $f_6$  为填埋处置环节碳排放系数,  $f_7$  为焚烧处置环节碳排放系数,  $f_8$  为简易处置环节碳排放系数。

不同种类固体废物在上述环节中的碳排放系数选取参照 WARM 模型以及文献调研, 具体取值见表 2。

表 2 各类固体废物处置利用过程碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficient of various solid wastes t CO<sub>2</sub>eq·t<sup>-1</sup>

类别	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	文献
生活垃圾	3.688	—	—	—	—	0.192	-0.124	—	[22-23]
餐厨垃圾	4.034	-0.104	0.165	—	—	—	—	—	[24]
园林垃圾	—	—	-0.099	—	—	0.198	—	—	[24]
农贸垃圾	4.034	-0.104	—	—	—	—	0.002	—	[24-25]
废纸	6.695	—	—	—	-3.908	—	—	—	[24]
废塑料	2.065	—	—	—	-1.020	—	—	—	[24]
电子废物	5.280	—	—	—	-0.866	—	—	—	[24]
废钢铁	1.839	—	—	—	-2.126	—	—	—	[24]
市政污泥	—	—	0.050	—	0.191	0.578	0.144	0.500	[26]
建筑垃圾	0.157	—	—	—	-0.150	0.020	—	—	[24, 27-28]
秸秆	0.756	—	—	-0.131	-0.508	—	—	—	[29-32]
畜禽粪便	0.433	0.020	0.172	—	—	—	—	0.060	[33-35]
废农膜	2.122	—	—	—	-1.020	0.022	—	—	[24]
粉煤灰	5.430	—	—	—	-0.954	—	—	—	[24, 36]
炉渣	3.747	—	—	—	-0.954	—	—	—	[24, 36]
煤矸石	0.786	—	—	—	-0.210	—	—	—	[37-38]
脱硫石膏	0.237	—	—	—	0.029	—	—	—	[24]
尾矿	5.350	—	—	—	-0.178	—	—	—	[39-41]
冶炼废渣	—	—	—	—	-4.839	—	—	—	[24]
危险废物	—	—	—	—	—	—	2.272	—	[42]

注: 园林垃圾、市政污泥、冶炼废渣、危险废物成分复杂暂未考虑源头减量环节; 建筑垃圾、秸秆、废农膜暂未考虑简易处置环节。

3) “无废城市”建设与碳减排效益。本研究中碳减排效益是以 2018 年作为基准年计算出 2020 年目标年的碳减排效益。计算内容包括, “无废城市”试点建设期间固体废物源头减量产生的碳减排效益以及通过中端利用和末端处理处置过程的碳减排效益。具体公式如式 (2) 所示。

$$\Delta M = \Delta M_1 + \Delta E \times m_{\text{目标年}} \quad (2)$$

式中:  $\Delta M_1$  为 2018 年至 2020 年期间各类固体废物源头减量环节的碳减排量, t CO<sub>2</sub>eq;  $\Delta E$  为基准年和目标年固体废物吨处理处置碳减排量的差值, t CO<sub>2</sub>eq;  $m_{\text{目标年}}$  为 2020 年固体废物处置总量, t CO<sub>2</sub>eq。

## 2 结果与讨论

### 2.1 徐州市各类固体废物产生与处置利用总体情况

1) 源头减量情况。2018 年和 2020 年各领域固体废物的产生量分别为  $5\,347.8 \times 10^4$  和  $4\,715.0 \times 10^4$  t,

“无废城市”试点建设期间源头减量率达到 11.83%。城乡生活领域固体废物产生量共减少了  $522.3 \times 10^4$  t。其中，建筑垃圾源头减量的贡献最大，占 62.27%。主要是建筑领域推广了集 BIM 技术、装配式建筑以及超低能耗被动房为一体的示范项目等，促进了建筑垃圾产生量的降低；农业领域固体废物共增加了  $29.9 \times 10^4$  t，其中以农业秸秆的增加为主；工业固体废物产生量共减少了  $140.4 \times 10^4$  t，源头减量率达到 11.98%。徐州市在“无废城市”试点建设期间，工业领域主要采取对传统固体废物产生密集型产业转型升级，降低了工业固体废物产生强度，从而减少了工业固体废物的产生量。

2) 资源化利用与末端处置情况。在城乡生活领域，2018 年与 2020 年厌氧消化、堆肥以及资源回收等中端资源化利用量占比分别为 15.64% 和 12.27%，降低了 3.37%。末端处置量的占比从 84.36% 提高至 87.73%，说明城乡生活领域的中端资源化回收利用率还有较大提升空间，需要进一步提高；在农业领域，2018 年中端资源化回收利用率占比为 87.04%，末端处置量占比为 12.96%，到 2020 年这 2 个值分别达到 95.81% 和 4.19%，表明中端回收利用效果明显，主要归功于 2 点：首先，规模化养殖提高了其畜禽粪便综合利用率，秸秆收储场所用地政策的制定以及一般农用地收储转运中心建设促进了秸秆的综合利用；其次，在工业领域，2018 年和 2020 年中端回收利用率占比分别为 99.34% 和 99.49%，末端处置量占比则分别为 0.66% 和 0.51%，这说明徐州市工业领域固体废物处置与资源化利用体系未形成大的变化。

## 2.2 源头减量环节碳排放分析

根据徐州市 2018 年和 2020 年各领域固体废物产生量变化及相应固体废物源头产生碳排放系数，利用式 (1) 计算获得各类固体废物源头减量的碳排放情况，如图 3 所示。徐州市在“无废城市”试点建设期间，通过固体废物的源头减量，各领域固体废物累计实现碳减排  $1\,531.3 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq。其中，碳减排量最大的是工业领域，为  $837.3 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq，其次是城乡生活领域的  $712.8 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq。工业领域取得的碳减排效果得益于“无废城市”试点建设期间对传统工业固体废物产生企业进行了绿色转型升级，减少了炉渣、尾矿、粉煤灰等一般工业固体废物产生量。城乡生活领域碳减排量则由除生活垃圾以外的固体废物贡献，其中碳减排量较大的是电子废物、废钢铁以及废纸等再生资源。可以看出，再生资源产业化规模化发展及综合利用率的提升，减少了相关固体废物产生的同时也是源头上减少碳排放。由于生活垃圾产生量有所增加，期间即便增加了焚烧比例，碳排放量仍有  $41.3 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq，还有较大的碳减排空间。农业领域则由于农作物种植与畜禽养殖规模的扩大致使秸秆和畜禽粪便碳产生量增大，对应增加了  $19.4 \times 10^4$  和  $2.4 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq 的碳排放量，仅有废农膜则减少碳排放  $3.0 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq。

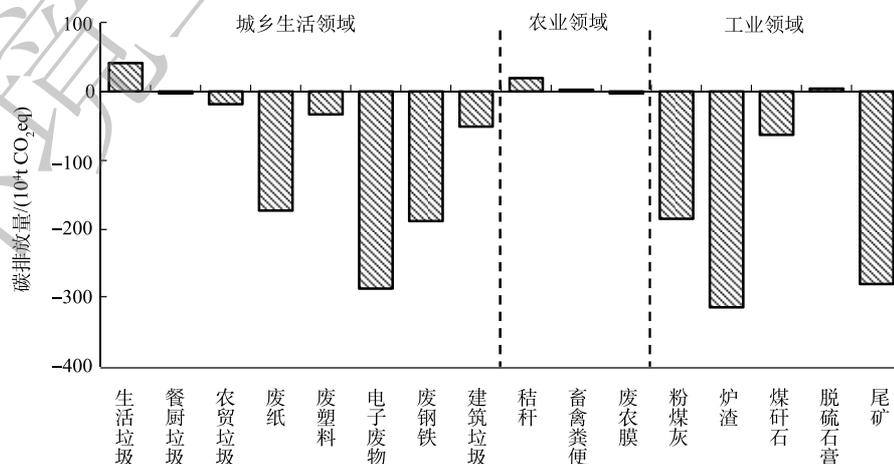


图3 源头减量环节的碳排放情况

Fig. 3 Carbon emission of source reduction

### 2.3 城乡生活领域固体废物利用处置环节碳排放分析

根据徐州市2018年和2020年城乡生活领域各类固体废物处置量与表2中碳排放系数,利用式(1)计算获得城乡生活领域固体废物处置环节的碳排放情况,结果如图4所示。城乡生活领域固体废物处置中端环节包括厌氧消化、堆肥及资源回收,末端环节包括填埋、焚烧和简易处置等方式。从分析结果中能明显看出,城乡生活领域的碳排放主要来自固体废物的填埋,通过填埋处置的固体废物主要为生活垃圾和建筑垃圾,并且2020年生活垃圾填埋量的减少是促进碳排放量的下降的主要因素。综合而言,2018年和2020年城乡生活领域固体废物处理处置环节全年碳减排总量分别达到 $570.8 \times 10^4$ 和 $209.3 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq,碳减排量的降低主要来自于废钢、废纸、废电池和建筑垃圾等主要中端环节资源回收量的减少。此外,2020年生活垃圾焚烧量的增加也促进了碳减排 $5.3 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq。由此可知,末端处置中填埋是城乡生活领域固体废物产生碳排放的主要源头。因此,通过提高中端资源回收率来促进碳减排,这也是城乡生活领域减污降碳的重要措施。

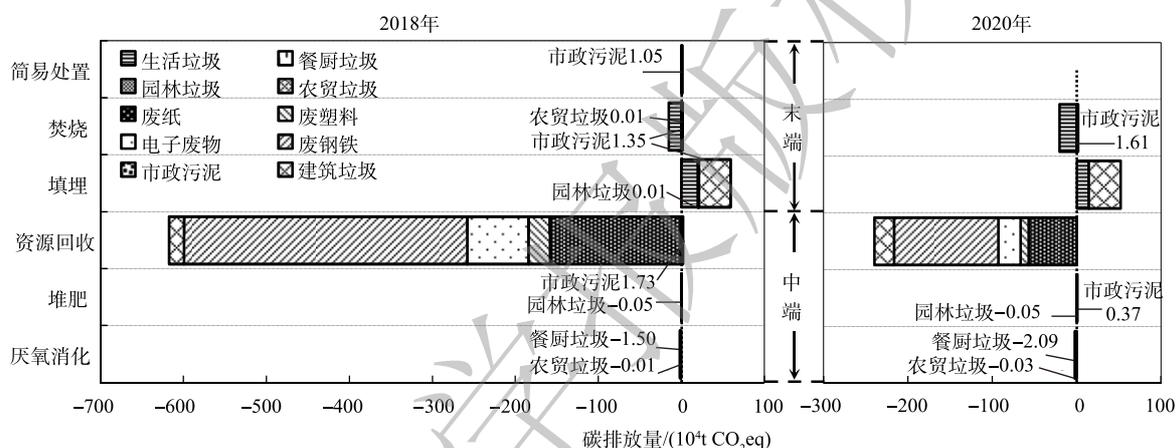


图4 城乡生活领域固体废物中端与末端处置环节碳排放

Fig. 4 Carbon emission during the disposal and resource utilization of the solids from the urban and rural life

### 2.4 农业领域固体废物利用处置环节碳排放分析

根据徐州市2018年和2020年农业领域固体废物处置量与表2中碳排放系数,利用式(1)计算获得农业领域固体废物处置环节的碳排放情况,结果如图5所示。农业领域固体废物处置中端环节包括,厌氧消化、堆肥、还田以及再生资源化利用,末端处置包括填埋及简易处置等方式。结

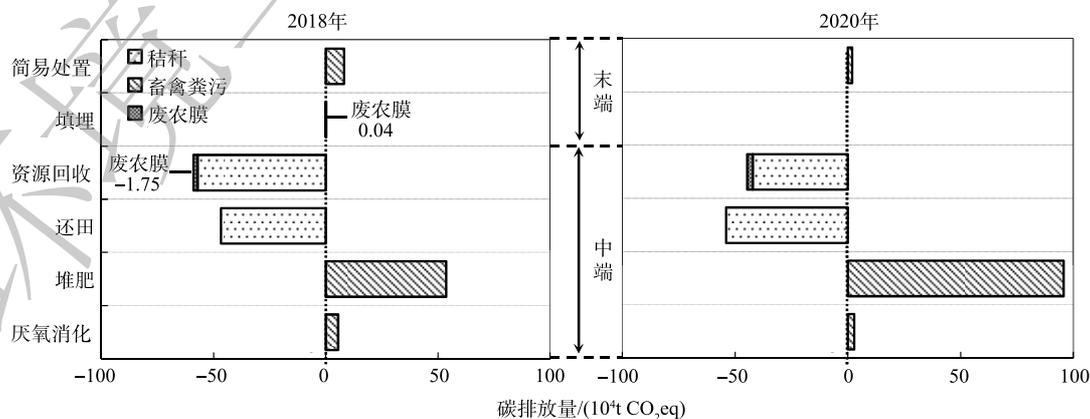


图5 农业领域固体废物中端与末端处置环节碳排放

Fig. 5 Carbon emission of disposal and resource utilization in the agricultural waste

果显示，碳排放量主要来自中端环节畜禽粪便堆肥、少量厌氧消化以及末端环节的简易处置，2020 年畜禽粪便堆肥量的增加导致碳排放比 2018 年增加了  $42.0 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，而简易处置量的减少获得相应的碳排放量的降低。碳减排量主要来自中端秸秆还田及再生资源化利用环节，试点建设期间还田量有所增加，而资源化利用量有所减少。此外，2018 年农业固体废物综合利用与处置环节全年减排量达到  $38.3 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，而到 2020 年非减反增，碳排放量增加了  $1.8 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ 。综上所述，堆肥是农业领域碳排放的主要源头，同时秸秆还田以及再生资源化利用会带来碳的减排量，因此可作为农业领域减排降碳的主要措施。

### 2.5 工业领域固体废物利用处置环节碳排放分析

根据徐州市 2018 年和 2020 年工业领域各类固体废物处置量与表 2 中碳排放系数，利用式 (1) 计算获得工业领域固体废物处置环节的碳排放情况，结果如图 6 所示。徐州市工业领域固体废物处置包括中端环节再生资源化利用，末端环节焚烧这 2 种方式，碳排放主要来自于危险废物焚烧过程。综合来看，2018 年和 2020 年徐州市通过工业领域处理处置环节碳减排量分别达到  $1\ 014.6 \times 10^4$  和  $1\ 309.9 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ 。冶炼废渣、粉煤灰、炉渣和煤矸石等均有较好的资源回收属性。其中，冶炼废渣的碳减排量最大，约占 2020 年减排量的 60%。因此，加快推进传统工业的绿色低碳转型发展，提升工业固体废物资源化利用水平将带来较大程度的碳减排量。

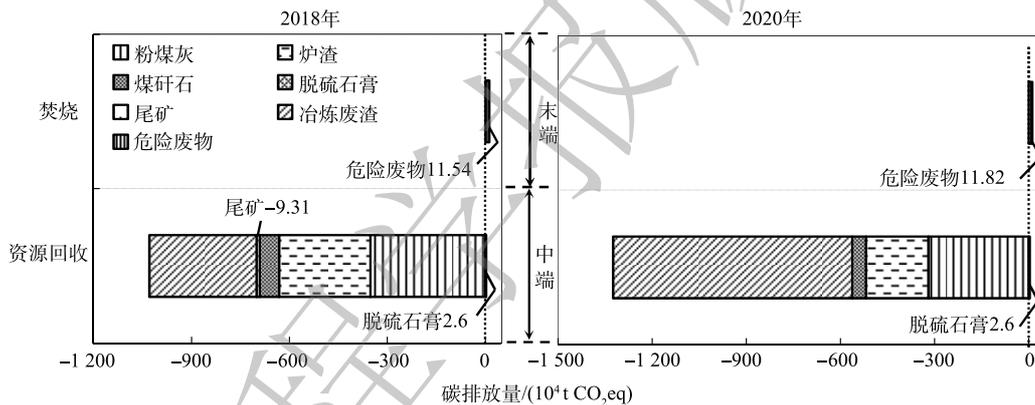


图 6 工业领域中端与末端处理处置环节碳排放

Fig. 6 Carbon emission of disposal and resource utilization in the industrial solid waste

### 2.6 “无废城市”试点建设碳减排综合效益分析

根据式 (2)，徐州市“无废城市”试点建设期间的碳减排效益，包含源头减量碳减排效益以及通过固体废物处置过程效率的提升碳减排效益 2 个部分。2.1 节结果显示，徐州市在 2020 年通过源头减量各领域固体废物产生量实现碳减排效益  $1\ 531.3 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ 。通过比较各领域固体废物中端和末端处理处置过程碳减排综合效率可知，吨处理固体废物碳减排量从 2018 年的  $0.29 \text{ t CO}_2\text{eq}$  提高到 2020 年的  $0.31 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，其中主要贡献来自于工业领域 (图 7)。综合来看，徐州市在 2018-2020 年通过“无废城市”试点建设，从源头减量、中端资源化以及末端处置全过程实现碳减排效益  $1\ 606.6 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ 。总体而言，徐州市“无废城市”试点建

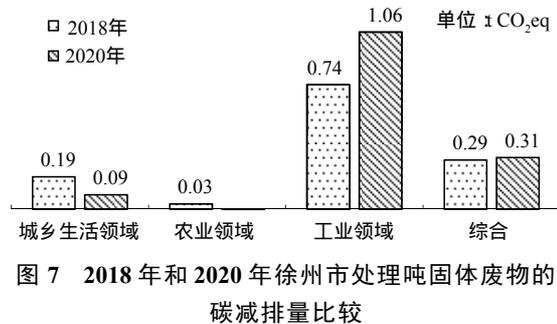


图 7 2018 年和 2020 年徐州市处理吨固体废物的碳减排量比较

Fig. 7 Comparison of carbon reduction per ton of solid waste treatment in Xuzhou City in 2018 and 2020

设产生了较好的减污降碳协同效益；同时发现，当前源头减量环节对碳减排效益的贡献最大，而中端资源化利用和末端处置带来的效益有待进一步提高，这有利于全面发挥减污降碳协同增效作用。

### 3 结论

1) 徐州市在“无废城市”试点建设期间，通过源头减量各类固体废物产生量实现碳减排量  $1\ 531.3 \times 10^4\ \text{t CO}_2\text{eq}$ ，其中工业领域固体废物源头减量最大，其次是城乡生活领域。这说明，徐州市对工业领域传统工业固体废物产生企业绿色转型升级以及对城乡生活领域再生资源产业规模化发展获得了较好的源头降碳效益。

2) 各领域固体废物中端与末端处置环节碳排放分析结果显示，城乡生活领域通过提高资源再生行业回收利用率以及控制生活垃圾和建筑垃圾填埋量，农业领域通过减少畜禽粪便的堆肥，转而发展其它资源化利用方式，工业领域通过进一步提升各类工业固体废物的资源回收利用率，可作为徐州市碳减排的重要措施。

3) 徐州市在“无废城市”试点建设期间，通过源头减量以及固体废物中端与末端处置过程效率的提升，实现碳减排效益  $1\ 606.6 \times 10^4\ \text{t CO}_2\text{eq}$ 。其主要贡献来自源头减量带来的效益，而中端与末端处置环节的碳减排效益还存在提升空间。

### 参考文献

- [1] 生态环境部. 减污降碳协同增效实施方案 [EB/OL]. [2022-09-12]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202206/t20220617\\_985879.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html)
- [2] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案 [EB/OL]. [2022-09-12]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm)
- [3] WILSON D C, RODIC L, MODAK P, et al. Global waste management outlook [EB/OL]. [2022-09-12]. <https://eprints.whiterose.ac.uk/99773/>
- [4] 中国循环经济协会. 循环经济助力碳达峰研究报告1.0版[R]. 2021-9.
- [5] 杜祥琬, 刘晓龙, 葛琴, 等. 通过“无废城市”试点推动固体废物资源化利用, 建设“无废社会”战略初探[J]. 中国工程科学, 2017, 19(4): 119-123.
- [6] 国务院办公厅. “无废城市”建设试点工作方案[EB/OL]. [2022-09-12]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2019-01/21/content\\_5359620.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2019-01/21/content_5359620.htm)
- [7] 刘晓龙, 姜玲玲, 葛琴, 等. “无废社会”构建研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 144-150.
- [8] 生态环境部. “无废城市”建设[EB/OL]. [2022-09-12]. <https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/2020/wfcsjssdgz.html>
- [9] 生态环境部. 关于印发《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》的通知 [EB/OL]. [2022-09-12]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk03/202112/t20211215\\_964275.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk03/202112/t20211215_964275.html)
- [10] 滕婧杰, 祁诗月, 马嘉乐, 等. “无废指数”构建方法探究——以“浙江省无废指数”构建为例[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 723-731.
- [11] 张冰洁, 宋鑫, 王恒广, 等. 基于“无废城市”建设的工业固体废物管理新策略[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 732-737.
- [12] MOGHADAM M A, FEIZI R, FARD M P, et al. Estimating Greenhouse emissions from sanitary landfills using Land-GEM and IPCC Model based on realistic scenarios of different urban areas: a case study of Iran[J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2021, 19(1): 819-830.
- [13] YAMAN C, ANIL I, ALAGHA O. Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121432.
- [14] WUNSCH C, TSYBINA A. Municipal solid waste management in Russia: potentials of climate change mitigation[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2021, 19: 27-42.
- [15] 黄金碧, 黄贤金. 江苏省城市碳排放核算及减排潜力分析[J]. 生态经济, 2012(1): 49-53.
- [16] 袁长伟, 白娟, 芮晓丽, 等. 基于EIO-LCA模型的陕西省产业碳减排效应[J]. 长安大学学报(社会科学版), 2016, 18(4): 48-55.
- [17] 孙建卫, 赵荣钦, 黄贤金, 等. 1995-2005年中国碳排放核算及其因素分解研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1284-1295.
- [18] 徐州市生态环境部. 2018年徐州市固体废物污染环境防治信息公告 [EB/OL]. [2023-01-31]. <http://sthj.xz.gov.cn/govxxgk/01405165st/2019-06-05/f0f59186-3ad7-46bc-bdea-a38bb7ea947b.html>
- [19] 徐州市生态环境部. 2020年徐州市固体废物污染环境防治信息公告 [EB/OL]. [2023-01-31]. <http://sthj.xz.gov.cn/govxxgk/01405165st/2021-08-16/df5ec584-ea50-4eee-93dc-c777f5594cb4.html>
- [20] 徐州市人民政府. 徐州市“无废城市”建设试点实施方案[EB/OL]. [2023-01-31]. <https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/2020/wfcsjssdgz/sdjz/ssf/202003/P020200311777953387721.pdf>
- [21] 罗庆明, 张宏伟, 王雪雪, 等. 我国固体废物分类体系构建的原则、方法与框架[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 738-745.
- [22] 刘晓娜, 韩华, 周宏磊, 等. 北京市简易生活垃圾堆填场垃圾成分特性研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(9): 50-52.
- [23] LIU Y L, XING P X, LIU J G. Environmental performance evaluation of different municipal solid waste management scenarios in China[J]. Resources Conservation & Recycling, 2017, 125: 98-106.
- [24] EPA. 2016. Individual Waste Reduction Model Tool[EB/OL]. [2022-09-12]. <https://www.epa.gov/models/moves/420b09026.pdf>, 2009
- [25] 李欢, 周颖君, 刘建国, 等. 我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2398-2408.
- [26] 王琳, 李德彬, 刘子为, 等. 污泥处理处置路径碳排放分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2404-2412.

- [27] 韩晓桐. 基于环境价值评估的建筑垃圾资源化费用效益分析[D]. 内蒙古科技大学, 2021.
- [28] 邱巨龙, 丁杉. 建筑垃圾资源化利用的碳减排潜力分析[J]. 新型工业化, 2022, 12(3): 95-98+105.
- [29] YAN M, CHENG K, LUO T, et al. Carbon footprint of grain crop production in China-based on farm survey data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 130-138.
- [30] POORE J, NEMECEK T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers[J]. *Science*, 2018, 360(6392): 987-992.
- [31] LIU W W, ZHANG G, WANG X K, et al. Carbon footprint of main crop production in China: magnitude, spatial-temporal pattern and attribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1296-1308.
- [32] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 349-359.
- [33] 周元清. 中国规模化生猪养殖碳足迹评估方法与案例研究[D]. 中国农业科学院, 2018.
- [34] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [R]. 2006.
- [35] SU J J, LIU B Y, CHANG Y C. Emission of greenhouse gas from livestock waste and wastewater treatment in Taiwan[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2003, 95(1): 253-263.
- [36] 生态环境部. 2019-2020年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)[ER/OL]. [2020-12-30]. [http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201230\\_815546.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201230_815546.html)
- [37] 夏德建, 任玉珑, 史乐峰, 等. 中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J]. *统计研究*, 2010, 27(8): 82-89.
- [38] 贾铨修. 基于生命周期评价的3D打印建筑结构碳排放量化分析[D]. 浙江大学, 2021.
- [39] 顾芴. 铁尾矿对环境的影响及综合利用研究[J]. *现代矿业*, 2022, 38(5): 237-240.
- [40] 冯超, 朱海玲, 徐志强, 等. 基于EIO LCA的铁矿石采选温室气体排放强度分析[J]. *中国矿业*, 2017, 26(3): 103-106.
- [41] 林锦, 陈云嫩, 陆柳鲜, 等. 基于生命周期评价法的铜尾矿资源化利用的环境效益分析[J]. *有色金属科学与工程*, 2021, 12(3): 106-112.
- [42] 高东升. 远北医疗废物处置厂污染防治方案选取和环境影响分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2017.

(责任编辑: 金曙光)

## Benefit analysis of carbon emission reduction in the pilot construction of “zero-waste city”: a case study in Xuzhou, China

GAO Jie<sup>1,2,3</sup>, HUHE Taoli<sup>1,2,3,\*</sup>, YUAN Ruling<sup>4</sup>, WU Dan<sup>1,2,3</sup>, LEI Tingzhou<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yong<sup>2,3,5</sup>

1. School of Environmental Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Institute of Urban & Rural Mining Research, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 3. Changzhou Key Laboratory of Biomass Green, Safe & High Value Utilization, Changzhou 213164, China; 4. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 5. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510651, China

\*Corresponding author, E-mail: hhtaoli@cczu.edu.cn

**Abstract** The construction of “zero-waste city” is an important policy to deepen the solid waste management reform, implement the synergetic control of environmental pollution and carbon emissions, and help achieve the carbon neutrality and emission peak. In this paper, the carbon emissions of solid wastes, focusing on urban and rural life, agricultural waste and industrial waste, were comprehensively accounted by the WARM model as well as the emission factor method from source reduction to mid-end utilization and terminal disposal. The benefits of carbon emission reduction were also systematically evaluated during the construction period of “zero-waste city” in Xuzhou city. The results indicated that the carbon emission reduction reached 15.31 million tons CO<sub>2</sub>eq through the source reduction of solid waste, of which the source reduction of the industrial solid waste contributed the most. It was an important measure to reduce carbon emissions by improving the recycling rate of resources, controlling the landfill volume of municipal solid waste, and decreasing the composting of manure during the disposal and utilization of solid waste. Xuzhou city achieved a carbon emission reduction benefit of 16.07 million tons CO<sub>2</sub>eq, and generally obtained a better synergetic control of environmental pollution and carbon emissions. The results in this research might provide some reference for promoting the construction of “zero-waste city” and synergizing the reduction of pollution and carbon emissions.

**Keywords** zero-waste city; carbon emission reduction; solid waste disposal; synergies