



## Views &amp; Comments

## 建设可持续型垃圾填埋场——我国城市生活垃圾全过程处理新观点

檀文炳<sup>a,b</sup>, 席北斗<sup>a,b</sup>, 赵昕宇<sup>a,b</sup>, 党秋玲<sup>a,c</sup><sup>a</sup> State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China<sup>b</sup> State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China<sup>c</sup> College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

### 1. 引言

由于生活水平的不断提高和城镇化的高速推进,我国城市生活垃圾年产生量已超过 $2 \times 10^8$  t,而且呈现逐年增加的趋势。填埋技术作为我国目前生活垃圾的传统处理处置方法,其垃圾处理量占处理总量的60%以上。但是,我国目前所掌握的填埋技术存在着诸多问题[图1(a)]。首先,绝大多数生活垃圾中的可回收资源无法得到循环与利用,这不仅导致资源浪费,还使其脱离可持续循环圈。其次,由于通过填埋技术每年分解和处理的生活垃圾量远小于每年进入填埋场的生活垃圾量,导致垃圾填埋场无法实现可持续利用,而需要开发大面积宝贵的土地资源来建设新填埋场。据初步调查,我国当前超过400座城市出现了“垃圾围城”局面,全国垃圾存量占地累计达 $5 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>。再次,生活垃圾在填埋场中产生的大量渗滤液,会通过污染空气、土壤和地下水使得城乡区域生态环境恶化和居民生活质量下降[1]。由此可见,我国现有的生活垃圾填埋技术不仅带来了严重的社会经济问题,而且制约着人类与自然环境的可持续发展。

如何解决生活垃圾资源化循环不平衡、污染防治失控等关键问题,已成为社会、经济、环境保护和科技关注的焦点。近年来,我国政府高度重视改善环境问题,并加大了对生活垃圾处理的投资,这对于我国进一步推行绿色发展模式具有重要意义。在本文中,笔者强调城

市生活垃圾全过程处理的重要性[图1(b)],并分别对生活垃圾处理前端的分类、减量化与资源化技术,以及末端的污染物快速消化、防泄漏与修复技术提出新思路和新建议。

### 2. 垃圾源头分类

在城市生活垃圾全过程处理中,有意识地对生活垃圾进行源头分类是首要推行的政策。然而,生活垃圾分类管理在我国的推广和实施还相对落后。究其原因主要有:垃圾分类的顶层设计和指导思想相对缺乏;垃圾分类系统与资源回收系统之间缺乏连通性;城镇居民缺乏生活垃圾源头分类的理念;居民住宅建筑环境条件的限制;缺乏相关法律、法规和政策。针对上述问题,潜在的对策包括建立健全的法律法规、监管体系和城镇生活垃圾分类标准;开展环境保护和生活垃圾分类的基层教育宣传,从便利的角度设计和配置垃圾收集设施;使用经济手段促进垃圾源头分类的开展,推行企业责任制度。

### 3. 垃圾快速脱水预处理

在现阶段,发展从混合垃圾中分离出可资源化垃圾进入循环利用的新模式是十分必要的,这不仅是因为我国超过70%的垃圾存量为混合垃圾,同时也是因为该模式是降低填埋场生活垃圾年增量的有效手段。但是,现

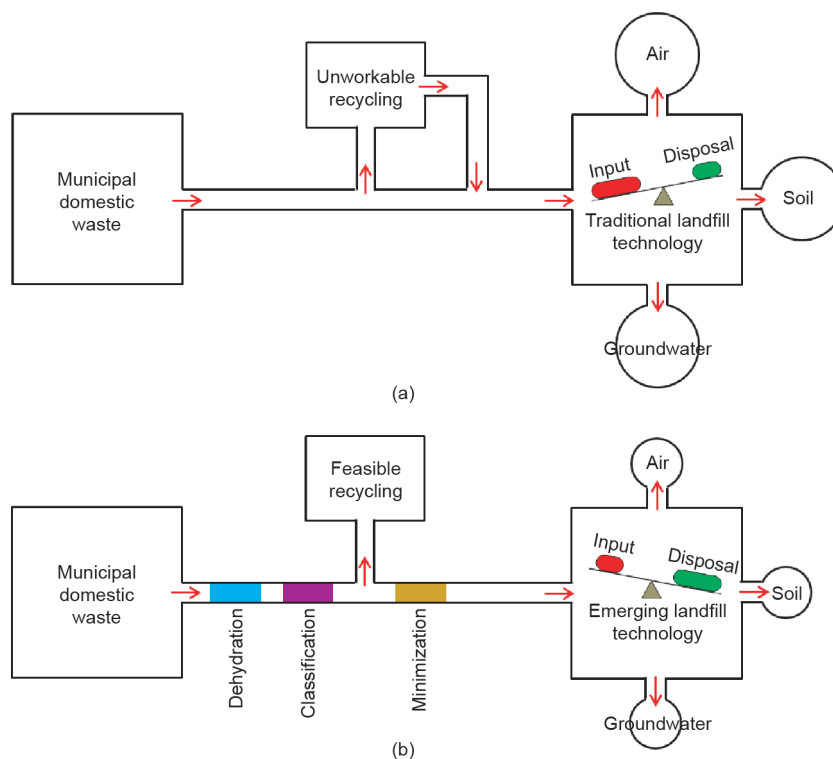


图1. 城市生活垃圾全过程处理的传统模式 (a) 和新兴模式 (b)。

有的混合垃圾分类技术对不可资源化垃圾成分的分离具有很大的局限性，主要是由于混合垃圾含有过高的结晶水，导致垃圾黏稠及不同垃圾成分之间相互缠绕。混合垃圾中各种有机组分都含有一定的结晶水，因此需要同时降解这些有机组分才能较彻底脱出结晶水[2]。但是，降解含有结晶水的不同有机组分通常是由不同的功能微生物来执行，从而容易产生微生物拮抗作用，不利于混合垃圾的脱水。因此，今后在发展混合垃圾的分质分类技术过程中，需注重基于元蛋白质组学定向末端靶向选育方法制备出在生活垃圾降解过程中可以高效脱水和产热的菌剂。此外，在通过控制阶段性升温、保温、降温的进程来抑制土著微生物活性的同时，创造适合接种微生物生存的独特环境也显得尤为重要。

#### 4. 垃圾资源再循环

通过分质分类技术分离出的金属和非金属固相部分可以被分别纳入钢铁与有色金属行业和建材行业。分离出的具有高热值的有机固体废物，包括布、纸和塑料废物，可以被制成用于供热和发电的垃圾衍生燃料(refuse-derived fuel, RDF)。为制备RDF，可以在生活垃圾源头分类中筛选出高热值组分。此外，可以通过模拟实验研究最终热解温度、物料比、赋形剂类型和升温速

率对RDF热解的影响，从而获得足够的数据来完全阐述RDF热处理的反应过程和机理。上述理论研究成果必须与市场经济竞争力和生态经济效益评估相结合，才能促进RDF后续的能源化与产业化。

目前，分离出的热值较低的有机固体成分主要是通过堆肥技术形成施用于农田的肥料产品。但是，现有的堆肥技术所形成的大部分的肥料产品很难被农户接受，造成肥料产品大量残存并再次成为垃圾废物[图1 (a)]。这主要是由于这些肥料产品缺乏提升土壤生产力和抗污能力的富含醌基的有机质。堆肥过程中产生的醌基和小分子酰胺类基团的定向偶联聚合是提高醌基抗降解能力而使其得以保存的最有效手段。但是这两种分子化合物之间的定向偶联聚合通常很难发生，主要是由于这两种分子化合物是在不同的堆肥阶段产生，而且容易分解。鉴于混合垃圾中木质素和蛋白质分别是形成醌基和酰胺类基团的主要前体物质[3]，因此同时接种相对应的微生物来强化木质素和蛋白质的降解以及发展动态返混的堆肥技术，可以实现混合垃圾中有机固体成分的资源化[图1 (b)]。

#### 5. 不可回收垃圾处置

经过分质分类处理后，不可避免地会残留不可资源

化的生活垃圾成分。开发快速消解填埋场中老龄垃圾的技术以腾出更多的空间来接纳新的不可资源化的垃圾是十分必要的，因为这样可以保证填埋场循环利用，而不需要开发新的填埋场。腐殖质由于具有丰富的氧化还原活性官能团，因此其不仅可以作为胞外电子穿梭体介导污染物的降解转化，还可以作为电子受体抑制甲烷的排放[4]。因此，我们建议将不可资源化的生活垃圾与人工腐殖质进行依次分层填埋，这样不仅可以快速消解垃圾和实现填埋场中垃圾的年处理量大于年进入量[图1(b)]，而且可以降低填埋场温室气体排放对全球变暖的影响。

## 6. 垃圾填埋场渗滤液污染防治

在垃圾填埋处理过程中，渗滤液的产生是不可避免的。防渗系统不仅是防止渗滤液进入地下水和周围土壤的最后屏障，而且还承担着对渗滤液进行导排的任务[5]。因此在填埋场的设计中，防渗系统的设计是至关重要的一环。我们建议对填埋场防渗系统中的渗滤液排水层同时设计主排水层和辅助排水层，从而实现了对渗滤液的收集与监测，且可以有效地降低渗滤液下渗到地下水的概率。主排水层可以由透水材料组成，其作用是降低上部源头渗滤液量，并将渗滤液向底部收集器输送。主排水层的上部是反滤层，在进行反滤层材料选择时，应确保材料能够长期具备良好的透水性，以避免细粒土的堵塞。主排水层的下部可以由人工防渗膜构成。辅助排水层主要负责对主排水层进行检测，并对透过主排水层的渗滤液进行收集，实现对渗滤液污染的有效控制。当渗滤液监测井中所测得的渗滤液量小于相应的设计量时，则表明主排水层系统是可靠的，如果大于临界量，但在下游地下水中没有发现污染物质，则说明辅助排水层系统完好。

防渗系统的设计可以精准拦截目标污染物，但是，一旦部分污染物最终不可避免地进入垃圾填埋场下方的地质层，则会对地下水和人体健康安全构成严重威胁。由于地质层中多孔介质的非均质性，被吸附的污染物在去除过程中会反复释放，导致去除效率低，污染容易反弹[6]。因此，

我们建议针对已被污染的垃圾填埋场地下水建立有针对性的修复技术体系。该体系的主要修复原则是添加绿色低碳和缓释的复合材料，以迫使污染物进入活化还原—自催化氧化—循环反洗的三级净化过程。

## 7. 结论

总之，未来城市生活垃圾的填埋处理方式必然是一个系统工程，需要前端的分类、减量与资源化技术以及末端的污染物快速消解与防渗漏技术的协同发展。我们的理念能够推动城市生活垃圾从以往的被动处理向“资源再生和污染防控”处理升级，通过填埋场循环利用实现土地资源节约，并基于生活垃圾资源化利用推动生态环境的可持续发展。

## 致谢

感谢三位匿名审稿人提出的建设性意见。本研究由国家重点研发计划项目(2018YFC1900102)和国家自然科学基金(51325804、51808519)资助。

## Compliance with ethics guidelines

Wenbing Tan, Beidou Xi, Xinyu Zhao, and Qiuling Dang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Cai B, Lou Z, Wang J, Geng Y, Sarkis J, Liu J, et al. CH<sub>4</sub> mitigation potentials from China landfills and related environmental co-benefits. *Sci Adv* 2018;4(7): eaar8400.
- [2] Xi B, He X, Dang Q, Yang T, Li M, Wang X, et al. Effect of multi-stage inoculation on the bacterial and fungal community structure during organic municipal solid wastes composting. *Bioresour Technol* 2015;196:399–405.
- [3] Zhao X, Tan W, Dang Q, Li R, Xi B. Enhanced biotic contributions to the dechlorination of pentachlorophenol by humus respiration from different compostable environments. *Chem Eng J* 2019;361:1565–75.
- [4] Tan W, Jia Y, Huang C, Zhang H, Li D, Zhao X, et al. Increased suppression of methane production by humic substances in response to warming in anoxic environments. *J Environ Manage* 2018;206:602–6.
- [5] Vallero DA, Blight G. The municipal landfill. In: *Waste: a handbook for management*. Salt Lake City: Academic Press; 2019. p. 235–58.
- [6] Kueper BH, Stroo HF, Vogel CM, Ward CH. Chlorinated solvent source zone remediation. New York: Springer; 2014.