



建筑废弃物水陆联运模式 对上海 PM2.5 减排及控制研究

朱昊辰 林椿 李光明

随着经济的发展和社会进步，世界人口极度膨胀，自然资源将出现越来越枯竭的现象，而工业生产及生活过程中产生的垃圾存在与日俱增的情况。特别是目前我国的建筑行业发展十分迅猛，其作业过程产生的建筑废弃物也随之增加。就全国而言，有 200 多座城市出现了建筑固态废弃物围城的现象，建筑固态废弃物堆存侵占的土地面积多达 5 亿多 m²，直接影响了市民们的生活和市容市貌。消纳过程是废弃物运输的一个重要环节，在此过程中会产生灰粉、扬尘等一些不利于人体健康或日常生活的物质，其中 PM2.5 的影响最为显著，也最为大众所关注。近年来，上海市的雾霾天

气逐渐增多，PM2.5 已成为大众最为关心的热点之一。因此，如何在建筑废弃物运输这一环节减少 PM2.5 的产生，也成为社会各界关注的热点。

一、上海建筑废弃物的产生及趋势分析

上海的建筑固体废弃物包括废混凝土块、沥青混凝土块、施工过程中散落的砂浆和混凝土、碎砖渣、金属、竹木材、装饰装修产生的废料、各种包装材料和其他废弃物等，其主要来源于以下几个方面：(1)拆除老化的旧建筑物而产生的建筑垃圾；(2)市政工程的动迁以及重大基础设施的改造产生的建筑垃圾；(3)因意外原因(如地震、台风、洪水、战

争、豆腐渣工程等)造成建筑物倒塌而产生的建筑垃圾；(4)商品混凝土工厂和新建筑物施工(土地开挖、建筑装潢)产生的建筑垃圾，由此产生的建筑垃圾约占建筑垃圾总量的 20%。其中由一、二项所产生的建筑垃圾，约占建筑垃圾总量的 75% 以上。

随着本市城市建设规模的逐步发展，本市建筑渣土产生量逐年增长，从 1992 年近 1000 万吨提升至 2012 年的近 11000 万吨，给本市建筑渣土规范化管理、规范化处置带来了较大的压力。2013 年 1~9 月份，渣土产生量已达到 9400 万吨，预计渣土年产生量会超过 12000 万吨。上海市建筑渣土历年产生情况

统计如下图 1 所示：



图 1 上海市建筑渣土历年产生情况统计表(摘自：《滩涂造地》)

二、上海建筑废弃物运输模式情况

(1) 陆路运输

上海市建筑渣土运输车辆共有 3 个种类，分别为泥浆车、装修垃圾车和渣土车。拥有渣土车的运输单位有 135 家，约占全市建筑渣土运输单位的 54.7%，渣土车共计 4247 辆，约占全市建筑渣土运输车辆的 76.7%。其中中标单位共计 67 家，共有 2366 辆渣土车。这些运输单位分布于闵行、浦东新区和奉贤等 17 个区县。浦东新区距离南汇东滩较近，共有 18 家运输单位，其中 10 家是中标单位，拥有 639 辆渣土运输车。具体分布情况统计如图 2 和图 3 所示。

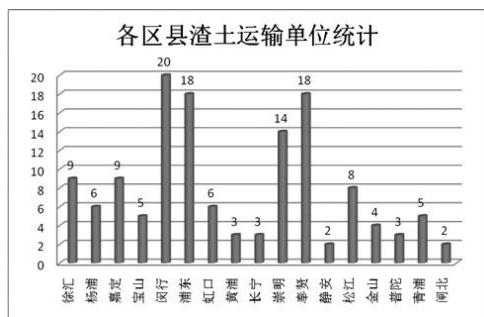


图 2 上海市各区县渣土运输单位统计图 (2013 年 10 月)

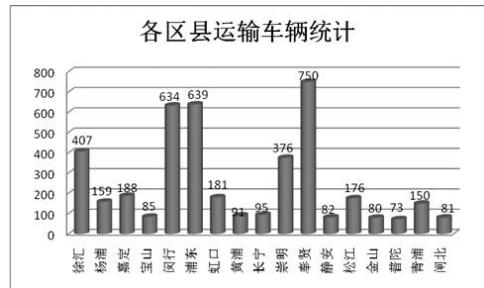


图 3 上海市各区县渣土运输车辆统计图 (2013 年 10 月)

(2) 水路运输

在上海区域内，其中徐汇、黄浦、杨浦、虹口、浦东新区和宝山的建筑废弃物，其消纳点为上海南汇东滩。这些区域均建有码头，利用水上运输建筑渣土，交通便捷，通过内河和海上线路能够方便达到南汇东滩滩涂造地区域。

在内河运输方面，由黄浦江经大治河即可到达南汇东滩造地区域，建议徐汇、虹口、黄浦和浦东新区等区域利用内河通道运输建筑渣土。浦东新区的黄浦江林昌码头是离南汇东滩最近的中转码头，距离大约是 57km，而新华渣土中转码头是距离南汇东滩最远的中转码头，距离大约是 77km。在距离东海较近而且便捷的区域，可以选择海运，比如宝山区和杨浦区。杨浦区的海洋渔业码头是距离南汇东滩最远的，运输距离大约是 75km，宝山区的申鸥泥浆中转码头是距离南汇东滩最近的，距离大约是 68km。

三、建筑废弃物陆运模式对 PM2.5 的影响

据相关资料显示，50% 的铅排放物与运输有关；50% 的氧化氮排放物是由运输产生的；运输产生的 CO₂ 几乎占了 CO₂ 总排放量的 40%，这其中 98% 是公路运输造成的；CO 排放总量的 90% 是由运输工具产生的，其中 80% 是由货车运输引起的。上海市机动车排放污染占空气中 CO 的 72.8%，HC 的 86.7%，NO_x 的 40.9%。由此可见，建筑废弃物在整个运输环节中，汽车尾气的排放，燃料的燃烧将极大地影响到大气中 PM2.5 含量。

为了能够有效地估算承载建筑废弃物的渣土车对城市 PM2.5 排放的贡献，我们采用了基于交通规划的中观汽车尾气排放估算模型，以 HC、CO、NO_x 为主要 PM2.5 污染源，来分析比较不同运载情况下废弃物运输对城市污染的影响程度。

我们选取某机械施工公司为研究对象，分别计算空车情况下及运载废弃物情况下，车辆对于城市 PM2.5 的贡献。其中车辆的空车运载距离为空车放置点到建筑废弃物装载点的距离与废弃物卸载点到空车放置点的距离之和，车辆的装载运输距离为建筑物装载点到建筑物卸载点的距离。在估算过程中，取重型柴油车每小时平均交通量为 15km，以每吨建筑废弃物在路段上污染物的平均排放水平(g/t)为计算结果。其中空车载

重 12.5t, 装车载重 25t, 即每次装载建筑废弃物 12.5t。

该公司共有十个建筑工地, 地址如下表 1 所示:

| 表 1 某机械施工公司的主要建筑工地 | | | |
|--------------------|-------------------------|----------------|------|
| 序号 | 工程名称 | 工程地址 | 工程内容 |
| 1 | 310 号房屋拆除工程 | 内江路 300 | 建筑垃圾 |
| 2 | 杨浦区 152 街坊动迁 | 杨浦区 152 街坊 | 建筑垃圾 |
| 3 | 控江路 665 号厂房拆除工程 | 控江路 665 号 | 建筑垃圾 |
| 4 | 长阳路 2555 号房屋拆除工程 | 长阳路 2555 号 | 建筑垃圾 |
| 5 | 杨浦区 123、124 街坊动迁 | 杨浦区 123、124 街坊 | 建筑垃圾 |
| 6 | 轨道交通十二号线 23 标渣土运输工程 | 隆昌路站至内江路站 | 渣土 |
| 7 | 复旦软件园基坑土方承运工程 | 长阳路 2455 号 | 渣土 |
| 8 | 杨浦区 154 街坊就近安置动迁配套商品房项目 | 军工路 223 号 | 渣土 |
| 9 | 安图医院公共卫生中心迁建工程 | 小洋浜 18、23 号 | 渣土 |
| 10 | 上海时尚滨江大厦 | 杨树浦路 2893 号 | 渣土 |

废弃物的装卸点主要有: 宝山: 美兰湖, 嘉定: 浏河; 浦东: 浦东国际机场。以杨浦区共青路 486 号为空车放置地点, 建筑工地为建筑废弃物装载点, 浦东国际机场为建筑废弃物卸载点。

根据模型估算, 对于废弃物不同的卸载地点, 以杨浦区共青路 486 号作为空车停车处, 1 号工地到 10 号工地作为建筑废弃物装载点的运输过程中产生的 HC, CO, NOx 列于下表 2 至表 4 中:

表 2 以浦东国际机场为装卸点所产生的 PM2.5 量(g/t)

| 序号 | 空载 PM2.5 | 装载 PM2.5 | 总 PM2.5 量 |
|----|----------|----------|-----------|
| 1 | 101.08 | 92.22 | 193.31 |
| 2 | 115.16 | 102.52 | 217.68 |
| 3 | 102.04 | 90.41 | 192.46 |
| 4 | 113.35 | 95.90 | 209.26 |
| 5 | 131.71 | 98.71 | 230.42 |
| 6 | 111.84 | 96.83 | 208.68 |
| 7 | 113.86 | 97.28 | 211.14 |
| 8 | 98.24 | 88.66 | 186.90 |
| 9 | 89.96 | 84.65 | 174.61 |
| 10 | 109.35 | 95.44 | 204.79 |

表 3 以美兰湖为装卸点所产生的 PM2.5 量(g/t)

| 序号 | 空载 PM2.5 | 满载 PM2.5 | PM2.5 总量 |
|----|----------|----------|----------|
| 1 | 63.86 | 70.06 | 133.92 |
| 2 | 57.94 | 81.19 | 139.13 |
| 3 | 63.48 | 71.26 | 134.74 |
| 4 | 55.44 | 75.73 | 131.17 |
| 5 | 41.29 | 88.18 | 129.47 |
| 6 | 67.31 | 73.68 | 141.00 |
| 7 | 54.74 | 74.91 | 129.64 |
| 8 | 63.48 | 69.67 | 133.15 |
| 9 | 57.94 | 66.15 | 124.09 |
| 10 | 66.54 | 72.87 | 139.41 |

表 4 以浏河为装卸点所产生的 PM2.5 量(g/t)

| 序号 | 空载 PM2.5 | 装载 PM2.5 | PM2.5 总量 |
|----|----------|----------|----------|
| 1 | 149.71 | 158.54 | 308.25 |
| 2 | 140.01 | 175.08 | 315.08 |
| 3 | 147.40 | 160.34 | 307.74 |
| 4 | 136.66 | 167.01 | 303.66 |
| 5 | 130.09 | 185.26 | 315.35 |
| 6 | 154.98 | 163.96 | 318.94 |
| 7 | 135.56 | 165.79 | 301.34 |
| 8 | 149.13 | 157.95 | 307.08 |
| 9 | 140.01 | 152.63 | 292.64 |
| 10 | 153.80 | 160.34 | 314.14 |

由此可见, 采用陆运运输, 将产生大量汽车尾气以及扬尘, 对大气环境造成极大地破坏, 加重了上海市的 PM2.5 污染。

因此, 如能够缩短建筑废弃物陆路运输时间, 同时也能够使每一次的装载量足够的大, 这将对扬尘和汽车尾气的减排起到积极作用。因此我们考虑以车加船运的联合中转运输方式, 通过相关数学模型的计算来论证何种方式更能有助于减少建筑废弃物的运输过程中的扬尘和汽车尾气的产生量, 从而减少排放到大气中的 PM2.5 的量。

四、建筑废弃物中转运输模式对控制 PM2.5 的影响分析

建筑废弃物中转模式即指陆路运输与水上船运相结合的运输模式, 建筑废弃物首先通过陆路运输送至中转码头, 然后由船舶运至相应的码头或港口(位于上海市外的其他省市), 最后再由车辆运至目的地。主要流程如图 4:

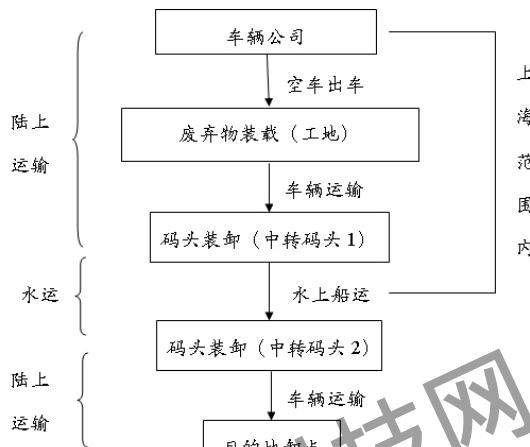


图 4 中转运输流程图

针对上图中的流程所示, 研究废弃物中转模式给

上海市带来的 PM2.5，主要考虑包括在上海市范围内的运输过程中所产生的量，具体来自空车运输尾气排放，建筑废弃物车辆运输过程尾气排放及其引起的扬尘，码头装卸过程，水上船运尾气排放等。其中建筑废弃物水上船运产生的 PM2.5 主要来自船舶柴油机的排放物。舶柴油机排气中包括各种成分，其基本成分是 CO、CO₂、HC、过剩的 O₂，以及存留下来的 N₂。

因此对于废弃物水上运输所产生的 PM2.5，我们将采用 MARPOL 公约附则 VI 排放计算方法来综合计算 CO、CO₂、HC 对于 PM2.5 的贡献。

为了能与陆上的计算结果进行比较，我们的研究对象还是为某机械施工公司，通过建筑废弃物中转运输模式，将废弃物运至目的卸点，从中转码头利用水上船运将废弃物运至另一港口或码头，平均运距为 80km，装船载重为 1000t，百公里油耗 200L，运用 MARPOL 公约附则 VI 排放法来计算船运过程中的每吨的废弃排放量(g/t)。

综合路上车运与水上船运的排放情况，从 10 个工程地(见表 1)将建筑废弃物运输至目的地卸点过程中，每吨建筑废弃物产生的 PM2.5 总量如表 5 所示：

表 3-5 中转模式中每吨建筑废弃物产 PM2.5 总量值表

| 序号 | 工程名 | PM2.5 (g/t) |
|----|-------------------------|-------------|
| 1 | 310 号房屋拆除工程 | 146.28 |
| 2 | 杨浦区 152 街坊动迁 | 153.02 |
| 3 | 控江路 665 号厂房拆除工程 | 146.83 |
| 4 | 长阳路 2555 号房屋拆除工程 | 147.95 |
| 5 | 杨浦区 123、124 街坊动迁 | 151.28 |
| 6 | 轨道交通十二号线 23 标渣土运输工程 | 147.36 |
| 7 | 复旦软件园基坑土方承运工程 | 147.80 |
| 8 | 杨浦区 154 街坊就近安置动迁配套商品房项目 | 146.19 |
| 9 | 安图医院公共卫生中心迁建工程 | 145.52 |
| 10 | 上海时尚滨江大厦 | 147.09 |

五、分析比较传统模式与中转模式带来的 PM2.5 影响

通过对两种模式下 PM2.5 的计算，将建筑废弃物运输的传统模式与中转模式带来的 PM2.5 结果进行比较，由于以美兰湖为卸点的运距相对近，可比性较小，因此，将以浦东机场以及嘉定浏河为卸点的传统模式排放的量与中转模式产生的量作比较（见表 3-6 及表

3-7）。

表 3-6 以浦东机场为卸点传统模式与中转模式带来的 PM2.5 比较结果表 (g/t)

| 序号 | 传统模式 | 中转模式 | 两者差值的绝对值 | 减小百分比 |
|----|--------|--------|----------|--------|
| 1 | 193.31 | 146.28 | 47.03 | 24.33% |
| 2 | 217.68 | 153.02 | 64.65 | 29.70% |
| 3 | 192.46 | 146.83 | 45.62 | 23.71% |
| 4 | 209.26 | 147.95 | 61.30 | 29.30% |
| 5 | 230.42 | 151.28 | 79.14 | 34.35% |
| 6 | 208.68 | 147.36 | 61.32 | 29.39% |
| 7 | 211.14 | 147.80 | 63.34 | 30.00% |
| 8 | 186.90 | 146.19 | 40.71 | 21.78% |
| 9 | 174.61 | 145.52 | 29.09 | 16.66% |
| 10 | 204.79 | 147.09 | 57.70 | 28.18% |

表 3-7 以嘉定浏河为卸点传统模式与中转模式带来的 PM2.5 比较结果表 (g/t)

| 序号 | 传统模式 | 中转模式 | 两者差值的绝对值 | 减小百分比 |
|----|--------|--------|----------|--------|
| 1 | 308.25 | 146.28 | 161.96 | 52.54% |
| 2 | 315.08 | 153.02 | 162.05 | 51.43% |
| 3 | 307.74 | 146.83 | 160.90 | 52.28% |
| 4 | 303.66 | 147.95 | 155.70 | 51.28% |
| 5 | 315.35 | 151.28 | 164.06 | 52.03% |
| 6 | 318.94 | 147.36 | 171.57 | 53.80% |
| 7 | 301.34 | 147.80 | 153.54 | 50.95% |
| 8 | 307.08 | 146.19 | 160.88 | 52.39% |
| 9 | 292.64 | 145.52 | 147.11 | 50.27% |
| 10 | 314.14 | 147.09 | 167.04 | 53.18% |

由表 3-6 可知，以浦东机场为卸点，运用传统模式从各个工程地址将建筑废弃物运至目的地，运输过程中每吨废弃物产生的 PM2.5 的量介于 174.61g~230.42g 之间，而运用水陆结合的中转模式对建筑废弃物进行运输的过程中，每吨废弃物产生的 PM2.5 的量介于 145.52g~153.02g 之间，即相对于传统运输而言，利用中转运输，每吨建筑废弃物减排量介于 40.71g~79.14g 之间，减排百分比都在 20%以上。而当以嘉定浏河为卸点时，相对于传统运输而言，利用中转运输，每吨建筑废弃物减排量介于 147.11g~171.57g 之间，减排百分比都在 50%以上，最高达 53.80%。

综上，利用传统模式对建筑废弃物进行运输，运输过程中产生的 PM2.5 的量普遍较大，而利用陆上车运与水上船运相结合的中转运输，运输过程中产生的 PM2.5 的量较小，相对于传统模式来说，每吨建筑废弃物减排量都在 20%以上，尤其当陆运距离比较长时，中转运输的优势更为突出，每吨建筑废弃物产生的 PM2.5 的量相对于传统模式而言，普遍减排 50%以上，最高可达 53.80%。（作者单位：朱昊辰、李光明，同济大学环境科学与工程学院、污染控制与资源化研究国家重点实验室；林椿，上海万吉机械施工工程有限公司）