



# 中国城镇污泥管理 的主要问题与国内外实践启示

THE MAIN PROBLEMS OF SLUDGE TREATMENT IN CHINA AND THE FOREIGN EXPERIENCE

卢红雁 颜炯 袁敏 著

## 执行摘要

随着我国污水收集率和处理率不断提高，市政污泥的产量也快速增加。污泥处理处置是市政污水处理系统的一个重要部分，也是一个难点。长期以来我国的污泥处理处置严重滞后于污水处理，污泥处理处置已经成为市政管理中一个亟待改善的问题。针对这种状况，本报告通过对国内现状的分析和国际经验的梳理，探讨推动我国污泥处理处置的策略和建议。

分析我国污泥的特性会发现，我国大多数城市的污泥性质和国外发达国家相比存在差异，主要表现在**有机质含量低、含砂量高、热值低、部分污泥重金属含量高**。这些特性不但对污泥处理处置过程提出了新的挑战，同时也增加了处理成本。我国目前污泥处理处置现状可以概括为：**污泥处理处置设施建设严重滞后，安全处置率低**。全国很大一部分污泥只经过了简单的脱水后就直接填埋，没有得到稳定化、无害化处理，这不仅需要庞大的污泥运输和处置费，还会对环境造成严重的二次污染，如地下水污染、重金属污染、病原体污染、高盐分污染和臭气污染。

然而，目前我国污泥处理处置仍然面临着诸多挑战。**首先是资金难题**，虽然国家已经出台了一系列政策，但是由于多数城市征收的污水处理费标准较低，且我国大部分地区污水处理费均未包含污泥处理处置相关费用。所以，以污泥资源化创造收入虽然可以解决一小部分成本，但是很难覆盖污泥处理处置系统的所有成本。**其次是技术路线选择问题**，地方政府不能根据当地具体情况选择合适的污泥处理处置技术路线，使得成本过高，处理效率过低。**第三是过程衔接问题**，住房与城乡建设部、环境保护部、农业部和林业部等相关部门在污泥土地利用问题上缺乏良好的协调机制。有关污泥土地利用标准及法规的协调和执行处于缺位状态。地方环保部门在解决污泥问题时，面临经费、监管职责和社会舆论等多重压力，时常处于“不好管，不方便说，怕出事”的地位。**最后是监管制度和信息缺失问题**，污泥土地利用的施用过程监管及跟踪研究体系，以及公众教育和信息公开体系还有待建立。

## 目录

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 执行摘要 .....                              | 1  |
| Executive Summary .....                 | 3  |
| 中国城镇污泥的处理处置现状 .....                     | 4  |
| 城镇污泥处理处置技术路线比较 .....                    | 7  |
| 国内城镇污泥管理的挑战 .....                       | 10 |
| 国内外污泥管理的实践和启示 .....                     | 11 |
| 中国城镇污泥管理的建议 .....                       | 22 |
| 附录1：中德污泥处置成本折算成污水处理费 .....              | 25 |
| 附录2：汉堡市污泥处置流程、输入和输出 .....               | 26 |
| 附录3：汉堡市污泥处置过程的物质流系统<br>(数量、来源、去向) ..... | 27 |
| 参考文献 .....                              | 28 |
| 注释 .....                                | 32 |
| 致谢 .....                                | 34 |

“工作论文”包括初步的研究、分析、结果和意见。“工作论文”用于促进讨论，征求反馈，对新事物的争论施加影响。工作论文最终可能以其他形式进行发表，内容可能会修改。

**引用建议：**卢红雁、颜炯、袁敏 著. 中国城镇污泥管理的主要问题与国内外实践启示. 2016. 工作报告，北京：世界资源研究所. <http://www.wri.org.cn/publications>.

合作机构



四川大学  
SICHUAN UNIVERSITY



欧洲国家和美国在污泥管理上有较为成熟的经验。欧洲污泥管理的主要特点是管理系统、可操作性强、监管严格和信息公开。

**首先，欧洲有完善的污泥管理组织机构。**欧盟污泥标准工作主要由欧洲标准化委员会的污泥特性技术委员会负责，主要工作是制定污泥参数的标准规范、制定污泥处理处置方法的指导准则和研究污泥管理的未来需求。**其次，欧盟制定了一系列系统性的法规，**旨在减少污泥处理处置产生的二次污染，尽可能资源化利用污泥中的养分及其能源潜力。除了欧盟层面污泥农用标准，各国还通过国家法律条例进行细化管理。另外，欧洲法规明确具体，可操作性强，并且其内容和范围也随着实践和认知提升而不断更新。

过去一段时间，美国污泥处理的主要方式是土地利用。污泥土地利用的可持续性、气味控制、社区接受度、能源效率、资源回收和对土地生产力的影响等因素是污泥土地管理的重点内容。然而，随着美国污泥土地利用的管理成本增加和审批流程更趋严格，有些地区的污泥土地利用<sup>1</sup>量近年来有所减少。因此，美国开始探索新的污泥管理模式，例如，污泥与其它类型的有机垃圾（绿化垃圾等）联合处理。

根据前文对我国污泥处理处置现状、挑战和欧美国家经验的梳理分析，本报告总结以下具体建议，供有关部门参考。

■ **加强部门协作，完善配套政策和标准：**建议住房与城乡建设部、农业部、国家林业局和环境保护部等加强合作，完善和统一国内多个污泥农用标准，明确污泥土地利用的资质审批和监管流程，落实监管措施，规范推进污泥土地利用的发展。环保部门要加强执法监督力度，限制不达标的工业污水进入城镇污水处理厂，从而降低污泥重金属超标率，增加污泥土地利用的可能性。

■ **选择合适的技术路线：**建议在地方污水处理厂进行试点工作，支持污泥处理处置技术的研发和试验，并监管处理处置效率。对试点项目及时评估和总结，根据污泥性质的不同，推荐合适的技术路线。在技术选择时，既要考虑污泥处理环节和处置环节的技术衔接，又要考虑污泥产品利用及能源/资源回收利用的跨部门或跨行业的衔接。

■ **建立可持续的资金保障机制：**目前国内中小型污水处理厂主要受到前期投入太大、运行费用高的制约，必须开辟污泥处理处置产业发展的资金渠道。建议地方政府对各类污泥处理处置技术的投资和运行层面进行深度成本核算，本着“污染者付费”的原则，在水价中合理体现污泥处理处置成本，并确保足额征收，专款专用。同时，各地应当探索多渠道的融资模式，吸引更多社会资本通过特许经营、政府购买服务、股权合作等方式，积极参与污水/污泥处理设施的投资建设和运营服务。

■ **加强监管，建立信息公开制度：**建议统计部门核实年鉴中各城市污泥产生量的统计口径，组织并选择东、中、

西部的典型城市展开调研和跟踪研究。确实弄清楚污泥的产量、特性、去向及其环境、经济和社会影响。有必要在若干点建立污泥长期跟踪和汇报机制。环保部门应在我国城镇污泥的产生、处理处置及其影响的信息收集和公开方面发挥更重要的作用。

## EXECUTIVE SUMMARY

With the increasing rate of waste water treatment, sludge yield is growing rapidly. Over the long term, China lacks of clear strategy on sludge management which is significantly behind sewage treatment. Sludge treatment has been an urgent issue in city management. Based on this context, this report analyzed current situation at home, looked into experiences of European countries and the US, and provided suggestions on policy improvement and technology selection to promote sludge treatment and disposal in China.

Sludge composition in China is different with that in developed countries, mainly with low concentration of organic substances, high concentration in grit, low calorific value and high concentration in heavy metals. These properties not only pose new challenges in sludge treatment and disposal but also increase treatment cost. Present situation of sludge treatment in China is severe; construction of sludge treatment and disposal facilities is far behind, and low safety of disposal is concerned. Most sludge across the country has not been stabilized or properly treated; it is directly disposed off to landfill sites after simple dewatering, which not only requires great cost in transportation and disposal, but also triggers serious secondary environmental concerns, such as groundwater pollution, heavy metal contamination, pathogen and high salinity pollution, and odor emission.

China is facing many challenges on sludge treatment. Firstly, there is a lack of sufficient financial support. In most of the cities in China, the sewage treatment tariff imposed is inadequate to cover the cost of the operation. And the sewage treatment tariff does not cover the sludge treatment tariff. Though recycling sludge can recover a small amount of capital, it is impossible to achieve cost recovery. Secondly, it is hard for the local governments to select appropriate technologies according to specific sludge compositions, leading to high cost and low performance efficiency. Thirdly, there is a lack of cross sectoral coordination on sludge land use. The standards and regulations related to sludge land use sometimes conflict with each other. The last but not the least, a performance benchmarking and information disclosure system is missing.

The European Union and the US are more experienced in urban sludge treatment and disposal. First of all, the EU has good sludge management frameworks. Technical Committee of Sludge Properties from The European

Committee of Standardization is responsible for setting European standards on sludge, including standards for sludge parameters, guidance for sludge treatment and disposal, and future requirements for sludge management. Secondly, EU has set a series of regulations on reducing secondary pollution caused by sludge disposal, and recycling nutrients and energy in sludge. In addition to the standards on agricultural use of sludge at the EU level, member countries also set further regulations and policies domestically. EU regulations are clear, tailored and practical, and with learning and practicing its contents and scope have been updated continuously.

Land use is the main way of sludge disposal in US in past decades. Sustainability, odor control, community acceptance, energy efficiency, resource recycling and impacts on land productivity of sludge land use are the key concerns. However, with the increasing management cost and stricter approval process, the land used sludge is declining. US is exploring new methods for sludge management. For example, co-digestion with other organic wastes to produce biogas.

According to the discussion on the situation and challenge of sludge treatment in China and the analysis of the experience of the EU and the US, this report summarizes the following suggestion to support the decision making:

- **Strengthen the coordination between departments:** The Ministry of Housing and Urban-rural Development, the Ministry of Agriculture, the Ministry of Environmental Protection, the Ministry of Forestry and the Landscaping department should work together and reach agreement on standards of sludge land use and regulatory process. The Ministry of Environmental Protection should strengthen the law enforcement and supervision, prevent substandard industrial waste water discharging into urban sewage treatment plants, thus reducing heavy metals in sludge and increasing the possibility of sludge land use.
- **Select the appropriate technologies:** Conduct experiments and pilots in the local sewage treatment plants. The governments should pay more attention to the R&D of sludge disposal technologies and track their performance. Based on that, technology hub for different composition of sludge is expected to be produced. It should consider not only connecting the sludge treatment and disposal technologies, but also

the cohesion of the use of sludge product and energy/ resource recovery across departments or industries.

- **Establish a sustainable financing:** sewage treatment plants are constrained by huge capital investment and high operation cost, new financing channel on sludge treatment need to be developed. Local government should conduct the “Polluter Pay Principle” and include sufficient sludge disposal cost in the sewage treatment tariff. Local government should also verify the cost in investment and operation of sludge treatment and disposal technologies. Meanwhile, local governments should explore multi-channel financing mode, and attract more social capital through franchising, government purchase services, equity cooperation, so that they can actively participate in sewage sludge treatment facilities construction and operation.
- **Enhance supervision and establish the information disclosure system:** Verify the sludge production data of different sources. Investigate typical cities from Eastern, Central and Western China, and conduct research on sludge production, properties, treatment technologies, and the environmental, economic and social impacts. It is necessary to set up a long-term tracking and reporting mechanism at several points. The Ministry of Environmental Protection should play a critical role in information collection and disclosure on urban sludge production, treatment, and disposal, as well as 3E impacts.

## 中国城镇污泥的处理处置现状

### 1.1 中国城镇污泥的产生量

近年来我国城镇发展迅速，城镇化水平在2015年已达56.1%。随着越来越多的人口集中到城镇，污水收集率逐步提高，城镇污水处理量也越来越大，2013年达到445亿立方米，接近2009年城镇污水处理量的两倍。截至2015年9月，我国已建成3830座城镇污水处理厂，污水处理能力达到1.62亿吨/日，年处理总量为494.3亿立方米<sup>2</sup>。

随着城镇生活污水集中处理能力和处理效率的不断提高，我国城镇污水处理厂的污泥产生量大幅增加。从2009年起，我国污泥总产量以每年6%的速度增加，如图1所示。2015年全国城镇（包括城市、县城，不包含建制镇）干污泥产生量为861万吨，处置量为826万吨，处置率为95.9%，与2014年同期相比，处置率增幅为0.8个百分点。但值得注意的是，干污泥处置量并不等于干污泥无害化处置量，据E2O研究院统计，2015年全国城镇污泥无害化处置率仅为31%~36%<sup>3</sup>。

不仅存量污泥的无害化处置率低，未来一定时间内，由于人口向城镇集中的趋势还在持续，城镇污水处理量的增加必将导致污泥产生量的增长。这意味着，我国污泥管理的压力非常大，它直接关系到中国城镇污水处理厂的环保绩效，也影响着我国实现绿色发展和全面小康的宏伟目标的实现。

### 1.2 中国城镇污泥的特性

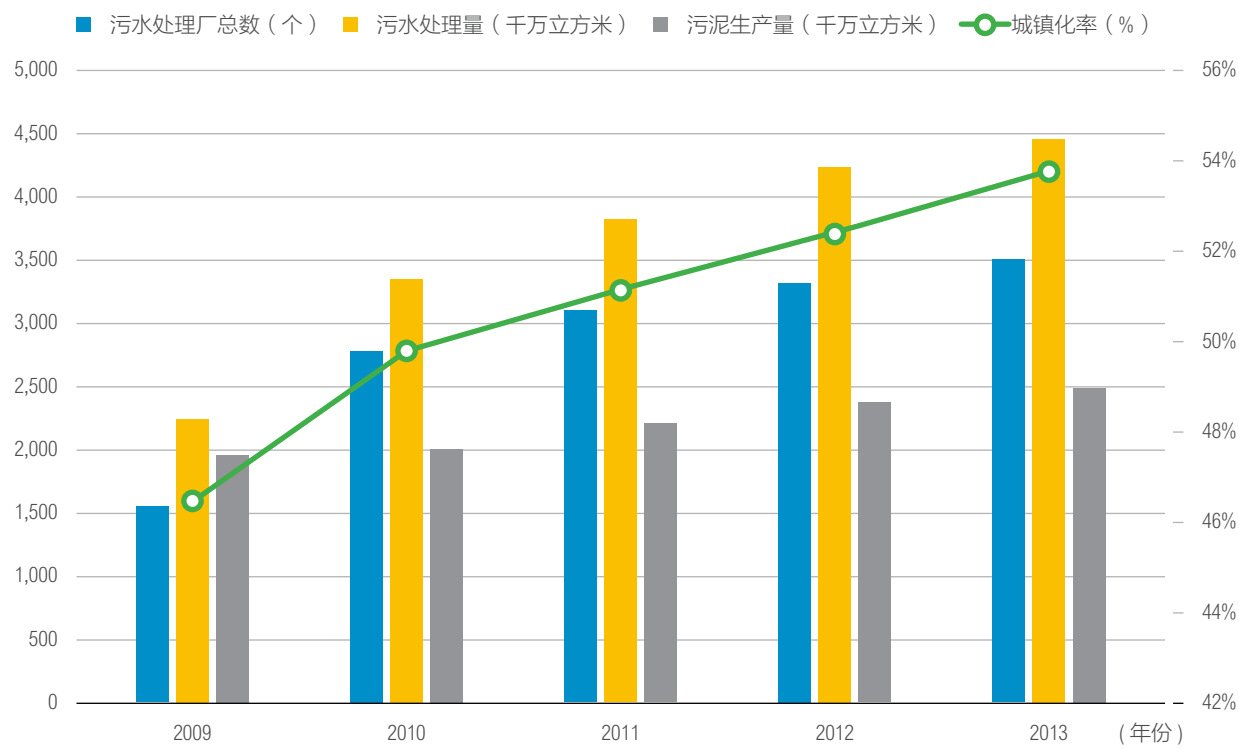
了解我国城镇污水处理厂产生的污泥具有哪些特性，是科学推进我国城镇污泥管理的重要一环。城镇污泥一方面承载和聚集了污水中的病原体、重金属、有机污染物等可能对人体与环境的造成危害的物质。但是，另一方面，污泥经过适当的处理处置后，其中的氮、磷和有机质等养分可以再利用。因此，污泥管理一方面要尽可能让污泥中的养分在土地利用中发挥价值；另一方面，又要避免污泥中积累的污染物对土壤和水体造成二次污染。可以说，当前我国城镇污泥的特性决定了我国目前城镇污泥处理处置现状。因此，了解我国城镇污泥的具体特性，是为污泥选择合适的技术路线及处置处理方案的重要基础。

#### 1.2.1 挥发分、热值

污泥的挥发分越高则表示污泥物质中的有机质含量越高，污泥的热值也越高。因此，高挥发分污泥如果在重金属等污染物指标合格时，则非常适合于土地利用，如果污染物含量超标，则适合于焚烧处置。中国城镇污泥与国外发达国家的污泥特性相比，一个明显特点是污泥的挥发分含量低，热值低，含砂量偏高。我国的城镇污泥挥发份仅为欧盟平均值的55%~72%，干污泥热值为欧盟干污泥热值的46%~58%<sup>4</sup>。

污泥挥发分含量低和热值低的这个特征相应地也对污泥处理

图 1 | 中国城镇发展与污水处理和湿污泥产生量（2009—2013年）



处置提出了挑战。在设计污泥焚烧或厌氧消化项目时，需要特别关注由此产生的技术挑战和成本增加问题。焚烧低热值污泥，不仅辅助燃料消耗量较大，而且生成的烟气量较大，会增加风机电耗，增加锅炉损失，降低系统效率，并会引发锅炉尾部受热面的腐蚀和污染物转移问题<sup>5</sup>。

1.2.2 养分

污泥中挥发分和氮（N）、磷（P）、钾（K）等养分含量丰富，将这些污泥经过无害化处理后施用于农田，对调节土壤水、肥、气、热状况和保肥、保水能力都有促进作用，特别是对结构性差的土壤，是不可多得的改良剂。我国城镇污泥的养分含量（总氮、总磷和总钾）呈现增加趋势，污泥中养分是重要资源。污泥养分含量高，对污泥的土地利用提供了较好的应用空间。

我国干污泥的总氮、总磷含量比纯猪粪分别高出1/3~2/3，但总钾比纯猪粪低1/3<sup>6</sup>。我国每公斤干污泥中含有30克总氮、15.7克总磷和6.9克总钾<sup>7</sup>。2014年我国城镇污泥所含的养分（总氮、总磷和总钾）折纯后约为29万吨，其中包括16万吨氮肥、9万吨磷肥和4万吨钾肥（见表1）。国家统计局数据显示，2014年我国农业化肥施用折纯量5996万吨，污泥中所包含的养分相当于我国农业化肥施用总量的0.48%。

表 1 | 我国城镇污泥所含养分估算清单

|                    | 2014 年 | 2013 年 | 干污泥养分 |      |
|--------------------|--------|--------|-------|------|
| 中国城镇湿污泥产生量<br>(万吨) | 2714   | 2523   |       |      |
| 折算为城镇干污泥<br>(万吨)   | 543    | 505    |       |      |
| 污泥所含养分：总氮<br>(万吨)  | 16     | 15     | 30    | g/kg |
| 污泥所含养分：总磷<br>(万吨)  | 9      | 8      | 15.7  | g/kg |
| 污泥所含养分：总钾<br>(万吨)  | 4      | 3      | 6.9   | g/kg |

此外，研究发现，中国城镇污泥的钾含量普遍比美国 and 德国数据高1.75~2倍<sup>5、6、8、9</sup>。我国农用化肥施用量中钾肥增速远远高于氮肥和磷肥，而我国污泥中的钾含量偏高，正好能满足这样的需求。

### 1.2.3 重金属

我国污泥中重金属含量从高到低依次为：锌>铜>铬>铅>镍>砷>镉>汞。2008年<sup>6</sup>与2003<sup>10</sup>年相比，污泥中锌和铅的含量均值都下降了10%以上，镉的含量增加了140%，汞、铬、铜、砷、镍的含量分别增加了33%、20%、9.6%、5.2%和2.1%。对照城镇污水处理厂排放标准可以看出，2008年污泥中镉、铜、镍、汞、锌这五种重金属的超标率仍在8%~10%，铬的超标率为1.2%，砷和铅不超标。从趋势上看，2008年与2003年相比，镉和汞的超标率增幅较大，锌和铬的超标率小幅增加，铜和镍的超标率有所降低。

值得注意的是，我国污泥重金属超标率存在较大的地区差异，采样点及采样时间的不同将产生不同的研究结果。部分地区重金属超标率较高，可能与城市污水厂中工业废水比例增加有关。

污泥中的重金属如不得到妥善处置，当土壤连续施用污泥达10年以上时，土壤中镉、锌、铜含量显著升高，种植的作物受到严重的污染，污泥施用越多，污染情况越严重。此外，污泥的随意堆放导致污泥渗滤液污染地表水，产生二次污染，污泥污染环境问題逐渐显现<sup>11</sup>。

### 1.2.4 有机污染物

污泥中含有多种有机污染物，包括多环芳烃（PAHs）、壬基

苯酚（NP/NPE）、多氯联苯（PCBs）等。

2010年长江三角洲41家城市污水处理厂的污水污泥中多环芳烃含量超标，其浓度为8.543~55.807mg/kg，超出了住房与城乡建设部制定的行业标准《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》（CJ/T309—2009）中对多环芳烃的最大允许浓度（A级污泥小于5mg/kg，B级污泥小于6 mg/kg）<sup>12</sup>。壬基苯酚（NP/NPE）在我国污水处理厂污泥样品中均有检出，浓度在1~128 mg/kg。但目前我国对于污泥土地利用的NP含量没有限制，欧盟则是低于50mg/kg。多氯联苯则在逐年下降，2006年长江三角洲地区46个城市污水处理厂污泥中所含多氯联苯（PCBs）含量大部分低于0.1mg/kg<sup>13</sup>。

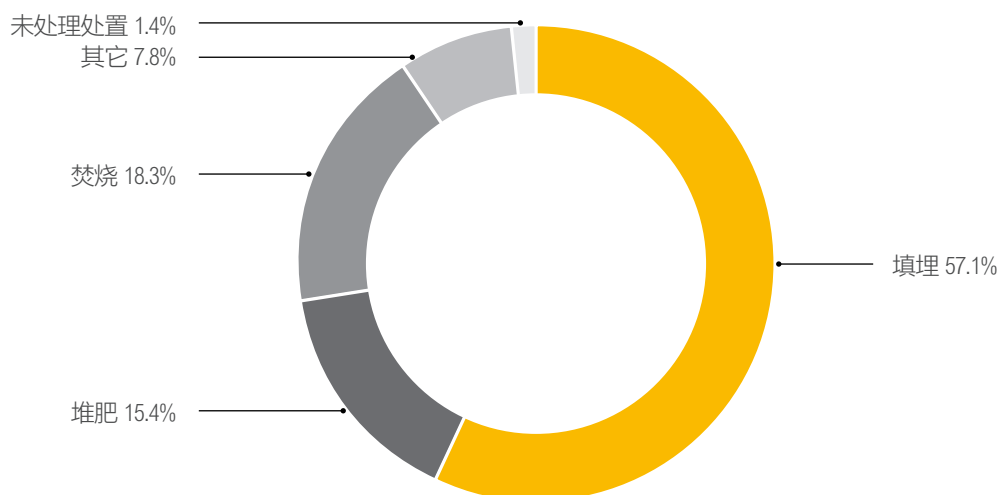
污泥农用时，无论是在酸性土壤还是碱性土壤中，每千克干污泥中含有的多氯代二苯并二噁英/多氯代二苯并呋喃要小于100ng毒性单位<sup>14</sup>。但我国目前对污泥涉及的二噁英和类二噁英物质的实证研究才起步，缺乏实际数据。

## 1.3 中国城镇污泥处理处置现状

2013年我国的污泥处理处置方法中：填埋为主，接近60%，其次是焚烧和堆肥，分别约为18%和15%，其它方法占比7.8%，未处理处置的达到1.4%，具体数据见图2。

上述统计数据的背后，存在着严峻挑战。污泥填埋、焚烧和堆肥的安全处理率低，还有一定数量的污水处理厂产生的污泥去向不明<sup>15</sup>。在全国现有污水处理设施中有污泥稳定处理设施的还不到1/2，处理工艺和配套设备较为完善的不到1/10，能够正常运行的为数更少，并且主要集中在日处理量超过15万立方米的大型污

图 2 | 2013年我国各污泥处理处置方式比例



数据来源：住房和城乡建设部相关文件。

水处理厂。中国黄河以南，包括华北、华东、中南、西南、华南等地区7个省46座污水处理厂的污泥去向比较明确，但是没有相关数据说明处置过程是否有二次污染<sup>16</sup>。城镇污水处理厂产生的污泥如果处理不当将会对环境产生不利影响，具体包含以下几点：

- 污泥脱水处理不到位，含水率高，不但增加了运输量、运输成本、运输路径上的环境影响，还会给后续的污泥处置带来极大的不便。
- 剩余污泥若不进行及时处理，长时间堆放后，污泥易产生消化，产生沼气，从而产生极大的异味，影响周边环境及附近居民生活。
- 剩余污泥含有大量病原菌、寄生虫（卵）、盐类，以及多种有毒有害物。其中危害较大的是寄生虫（卵），它会造成一些潜在疾病的流行。
- 干化后的污泥易随风飞扬，产生粉尘污染。
- 有些污泥本身含有易挥发的有毒有机物质，会对大气产生污染。
- 堆放污泥经雨水浸淋，一部分氮、磷，以及一些重金属和有害化学物质会随着雨水浸出，易对当地的土壤和水体造成污染。

另一方面，污泥处理不到位会使前端污水处理的效果大打折扣，使得投入到城镇污水处理的资金和资源得不到最大的收益。

鉴于这样的状况，各地政府不得不开始积极筹划城镇污泥管理的改进。住房和城乡建设部颁布的《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南（试行）》（建科[2011]34号，以下简称“技术指南”）指出：我国污泥处理处置应符合“安全环保、循环利用、节能降耗、因地制宜、稳妥可靠”的原则。

1.4 本章小结

本章从中国城镇污泥的产生量和特性出发，介绍了污泥的养分、有机物及重金属含量的变化趋势和现状，列举了当前污泥处理处置中存在的问题，说明了中国城镇污泥处理处置管理还需进行完善，污泥处理技术仍需提高。

城镇污泥处理处置技术路线比较

城镇污泥的处理处置包括处理和处置两个部分，基本原则是在避免对环境和人体健康造成损害的前提下尽可能地对污泥进行资源化利用。

污泥处理的目的是污泥脱水和污泥稳定化处理，提高污泥的可储存性和可运输性。污泥处理技术包括污泥脱水技术（自然干

化法、污泥热干化技术、造粒脱水法和机械脱水法）、高温好氧发酵（堆肥）技术、厌氧消化技术、石灰稳定技术、污泥热解技术等。污泥处置主要是为了污泥的最终去向而进行的处理，包括焚烧（单独焚烧（含干化）、热电厂协同处置、污泥与生活垃圾混烧）、土地利用、建材利用和填埋等，最终达到污泥减量、污泥无害化（稳定化）且实现污泥资源化利用的处理目标。

2.1 技术特点和局限

**堆肥：**污泥堆肥操作简单，可适应小型污水处理厂需求，可分散安排。堆肥产品进行土地利用或作为肥料原料基质来提高土壤养分和帮助土壤改良，减少化肥用量。堆肥工艺的技术挑战有两点。第一，堆肥前需要进一步降低湿污泥的含水率，或者能够找到通过低成本方式获得的秸秆或绿化剪草等干物质，作为污泥堆肥的原料之一。第二，堆肥过程的异味控制。过去的经验显示，堆肥料堆的水分、空气和养分比控制不当时，容易出现臭气污染，从而导致投诉或停产。此外，推广实施污泥堆肥需要面对的一项十分重要的挑战是其后端产品的出路问题。第一，由于人们担忧污泥中重金属含量过高，以及在污泥施用时带来的其它问题，包括病原体、有机污染物、烧苗、恶臭、盐害等，污泥产品还未能完全地被人们所接受。第二，污泥堆肥中的氮、磷、钾元素含量较化肥低，且污泥堆肥的物理性状不够理想，运输和使用均不太方便，因此其推广使用的难度较大。

**厌氧消化：**当污泥自身的挥发分含量高，或者有条件获得厨余垃圾等高挥发分的有机废弃物作为混合物时，有利于提高污泥厌氧处理工艺的能效，即单位体积的厌氧发酵装置可以产生更多的沼气，沼气可热电联产或者经过提纯处理，制成压缩天然气，为城市公共汽车或出租车提供燃料。但污泥厌氧消化装置的运行管理较复杂，厌氧消化过程容易受到温度、进料变化等因素扰动，一旦出现酸化或其它问题，重新恢复厌氧过程需要较长时间，所以需要由经过培训的专业操作人员进行操作。

需要注意的是，厌氧消化只是污泥处理的一个环节，厌氧消化之后对反应物进行固液分离，产生的污泥渣还需要有后续处置方案进行配套规划，如作为基质，或直接土地利用、焚烧或填埋。

**填埋：**污泥填埋处置在很多国家正在被逐渐限制或已经禁止了。对于那些污染物含量低而且挥发分含量高的污泥，进行填埋处置也损失了污泥中包含的养分和有机质价值。鉴于我国城镇化的发展阶段，我们选择污泥填埋处置只是一个阶段性策略。

由于土地资源日益稀缺和居民“邻避运动”使得新建填埋场选址困难，其经济和社会成本不断增加。而且污泥填埋也会缩短现有填埋场的使用时间和增加现有填埋场的安全隐患。我国国家标准《生活垃圾填埋场污染控制标准》（GB 16889—2008）规定，入场污泥含水率应小于60%。污水处理厂的脱水

表 2 | 不同污泥处置技术的局限及环境风险

| 污泥处置技术 | 局限及环境风险                                                                                                                                                   |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 堆肥     | 占地较大，需要添加堆肥调理剂（如秸秆、木屑等），增加火灾风险。如果管理不当，有恶臭风险。堆肥产品的去向需要跨部门协同和规划，以及配套监管                                                                                      |
| 厌氧消化   | 工艺过程复杂，需要仔细管理和控制异味溢出，厌氧消化后的沼气和污泥渣利用需要跨部门协同、配套规划和监管                                                                                                        |
| 填埋     | 污泥的含水率高，加剧了垃圾填埋场渗沥液的产量，污泥中含有的各种有毒有害物质易污染地下水<br>高含水率污泥易引起填埋堆体的整体层移动滑坡，影响填埋场安全由于污泥含水量高，颗粒细，透水性差，极易造成渗滤液和填埋场气体收集系统的严重堵塞，使渗滤液无法排出，沉积大量甲烷气体，增加温室气体排放量，加剧气候变化风险 |
| 土地利用   | 需要仔细管理和控制存放、运输和施用过程的异味问题，存在二次污染风险，需要配套规定和措施完成污泥污染水平监测到污泥施用过程的监管                                                                                           |
| 焚烧     | 有二次污染风险，需要配套规定和措施对污泥焚烧的飞灰、炉渣和尾气排放等进行监督，也需要仔细管理和控制存放、运输过程的异味溢出风险                                                                                           |

污泥含水率一般在80%左右。所以，必须经过深度脱水的污泥才能被填埋处理。

**土地利用：**土地利用是污泥经过处理或处置后的一个最终去向。污泥经卫生化和稳定化处理后，在重金属等指标符合要求的情况下，作为基质或肥料在农田、林地、草坪绿化等领域进行土地利用，不但有利于污泥中养分循环，同时也具有较大的碳足迹减排空间，减排主要源于污泥可替代化肥施用。但是，实现这个效果的前提是污泥的污染物含量不超标，并且有严格的污泥施用监管体系和信息公开的配套措施，例如：污泥施用量及施用后追踪土地质量变化。如果没有配套措施，污泥土地利用的二次污染风险非常大，也容易成为社会焦点问题。

**焚烧：**对于重金属和有机物污染物超标率高的污泥，焚烧处置是首选。而且，污泥焚烧占地少，污泥体积减少95%以上。不过，一定要有配套的合同及监管措施对污泥焚烧飞灰、炉渣和尾气排放等进行监测和对外公示。否则，污泥焚烧的二次污染风险也非常大，容易成为社会焦点问题。

不同污泥处置技术的局限及环境风险见表2。

2.2 成本

本报告收集了分别来自政府、企业、学者和德国的4方面数

据<sup>17</sup>来比较污泥处理处置的成本（见附录1）。为了便于地方政府了解和比较城镇污泥处理处置的成本情况，本报告测算了处理处置每吨城镇湿污泥的平均成本（含折旧），详见表3。数据分析显示：一些公开数据显示的我国污泥处理处置的吨成本均高于德国。这说明我国的污泥处理处置行业还在起步阶段，没有形成规模效应，随着市场增大和技术及管理优化，我国污泥处理处置行业的成本有着进一步降低的空间。

第一，我国不同污泥处理处置技术的吨成本均高于德国近2倍或更高，德国污泥单一或协同焚烧全成本在765~850元/吨，“技术指南”中的参考全成本为1434~1676元/吨。当然，目前在实际运行中，我国亦拥有并在应用着一些先进的技术。例如，成都某公司的污泥单独焚烧处理成本仅略低于德国的处理成本，但是仅为“技术指南”的40%左右。这表明降低我国污泥处理处置行业成本的目标是无需依赖外来技术即可实现的。

第二，“技术指南”中提供的污泥（含水率80%）高温好氧堆肥的全成本超过1400元/吨，德国堆肥处理的全成本是248~694元/吨，而污泥土地利用的全成本（含污泥预处理和运费等）为每吨湿污泥85~315元。

2.3 温室气体排放

中国作为世界第一大温室气体排放国，减排压力巨大，备

表 3 | 湿污泥处理处置吨成本（含折旧）平均值比较

| 数据来源          | 住房和城乡建设部 <sup>a</sup> ，2011 | 德国 <sup>b</sup> （B. Wiechmann,2012） |              | 余晓东 <sup>a</sup> ，2008 | 成都某公司，2014         |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------|------------------------|--------------------|
| 处置方法          | 元 / 吨<br>污泥含水率 80%          | 元 / 吨<br>污泥含水 55% ~ 80%             | 元 / 吨<br>干污泥 | 元 / 吨<br>污泥含水率 75%     | 元 / 吨<br>污泥含水率 80% |
| 单独焚烧<br>（含干化） | 1676                        | 850                                 | 2261（333 欧元） | 2282                   | 697                |
| 热电厂协同处置       | 1434                        | 723                                 | 1453(214 欧元) | /                      | /                  |
| 污泥与生活垃圾<br>混烧 | 1434                        | 765                                 | /            | /                      | /                  |
| 厌氧消化          | 944                         | /                                   | /            | /                      | /                  |
| 填埋            | 776                         | /                                   | /            | 456                    | /                  |

备注：<sup>a</sup>根据“技术指南”，对日处理 200 吨污泥的项目进行投资和运行费用的测算。基本假设：投资折旧 20 年，资本利息 6%。测算方法：湿污泥处理处置吨成本=吨投资成本+吨运行成本；其中，吨投资成本=日处理 200 吨污泥的平均总投资 /20 年折旧 / 年处理量+吨利息成本。根据“技术指南”中的数据，投资费用和运行成本分别有高、低两组数据，测算出的湿污泥处理处置吨成本有四组数据，取其平均值。测算结果与项目规模有关。  
<sup>b</sup>汇率按 100 欧元 =679.07 元人民币计算。

表 4 | 不同污泥处理处置方法的温室气体净排放比较

| 温室气体排放                        | 堆肥          | 堆肥 +<br>土地利用    | 填埋          | 热干化单独焚烧       | 水泥厂协同焚烧    | 炭化          | 数据来源              |
|-------------------------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| kgCO2eq/t<br>湿污泥              | /           | -643.6<br>（秦皇岛） |             | 372.9<br>（上海） | /          | /           | 刘洪涛等，2010         |
| kgCO2eq/t<br>湿污泥              | 193<br>（北京） | /               | 286<br>（北京） | /             | 24<br>（北京） | 206<br>（北京） | X.Li etc. 2013    |
| kgCO2eq/t<br>湿污泥 <sup>*</sup> | 512<br>（中国） | /               | 696<br>（中国） | 4443<br>（中国）  | /          | /           | 彭洁等，2013          |
| kgCO2eq/t<br>湿污泥              | 141<br>（日本） | /               | 216<br>（日本） | 155<br>（日本）   | /          | /           | J. Hong,etc. 2009 |

备注：<sup>\*</sup>彭洁等计算结果采用了 IPCC 方法及缺省值，研究中国污泥处置的温室气体排放情况。  
<sup>b</sup>湿污泥含水率为 80%。  
<sup>c</sup>本报告将日本 Hong 等研究结果折算成每吨湿污泥的平均排放量。  
<sup>d</sup>数据下面的括号里区域为数据来源的研究区域或案例所在地。

受世界舆论关注，污水处理厂的污泥也是重要的温室气体排放来源，由此，污泥处理处置行业的减排压力也将日益显著。

尽管不同来源的碳排放数据差别较大，但仍存在一些基本趋势：焚烧、填埋处置的碳排放量高；污泥土地利用具有较大的碳减排空间；污泥焚烧、热干化及填埋处置的温室气体排放量高于污泥生物干化、堆肥再进行土地利用的温室气体排放量。例如：刘洪涛等（2010）研究显示，堆肥与土地利用相结合的方式处理每吨湿污泥（含水率80%）的温室气体排放是-643.6千克二氧化碳当量<sup>18</sup>。从彭洁等（2013）的研究来看，处理每吨湿污泥的热干化单独焚烧产生的温室气体排放约4.4吨二氧化碳当量。不同污泥处理处置方法的温室气体净排放比较见表4。

## 2.4 本章小结

本章将城镇污泥的处理与处置进行详细的划分，叙述并比较了包括堆肥、厌氧消化、填埋、土地利用、焚烧在内的污泥处理技术的特点和局限性，调查、分析、比较了多项污泥处理技术及污泥处置方式的成本，并对不同污泥处理处置方法的温室气体净排放进行了比较，为污泥处理处置管理做出铺垫。

# 国内城镇污泥管理的挑战

## 3.1 标准不一致

住房和城乡建设部联合国家发改委于2011年3月出台了“技术指南”。指出我国坚持污泥土地利用为主，协同焚烧（水泥窑、热电厂、垃圾）或建材利用、污泥填埋等处置方式为辅的污泥处理处置路线。其中土地利用和协同焚烧部分缺乏配套政策和统一标准的支持。特别是在农业、林业等部门中，时有出现企业投入了资金，但是“污泥农用”拿不到许可证的问题。

在执行污泥土地利用的技术路线时，有时会遇到相关标准出自多家，而且有些要求不一致的情况，这就直接影响了污泥土地利用的实施和监管。原国家环保局出台了国家标准《农用污泥中污染物控制标准》（GB4284—1984）。原国家环保总局和国家技术监督检验检疫总局出台了国家标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918—2002）。住房和城乡建设部出台了行业标准《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》（CJ/T 309—2009）。其中，环保部门和住建部门的行业标准中对污泥重金属含量和有机污染物含量的最高允许浓度的要求不一样，对污泥农田施用量的要求也不同。住建部门的行业标准希望推动污泥土地利用的合理空间，而环保部门和农业部门等部门从肥效和食品安全角度，更关心有效利用养分和防止土壤重金属和有机污染物积累进入食物链等问题。

其次，对于“协同焚烧（水泥窑、热电厂、垃圾）为辅的污

泥处置路线也缺乏相应的配套政策和标准。我国污泥协同焚烧，需要水泥、热电和垃圾焚烧等行业和管理部门的协作，没有相关的政策和监管标准，这样的技术路线很难得到推广，也很难控制污染转移风险。例如，湿污泥在水泥厂协同焚烧时，由于缺乏对污水处理厂的出厂湿污泥含水率的监管，导致含水率过高，这就增加了水泥厂对湿污泥进行处理处置的难度，也增加了处置成本，由此甚至导致项目失败。对于湿污泥在火电厂的协同焚烧，还应当严格执行火电厂大气污染物排放标准。

## 3.2 技术路线选择困难

目前已有的污泥处理处置技术路线众多，但如何根据当地实际情况选择合适的技术路线成为地方政府面临的严峻挑战。总体上来看，由于缺乏污泥特性的长期监测，污泥管理部门未能从整条产业链上结合本地污泥特性来综合考虑污泥的处理技术及污泥产品出路，且各个企业只按各自熟悉的技术选择处理路线，是污泥处理技术路线选择困难的最大原因。从其它因素上来看，还有由于中国污水管网雨污合流、市政工业污水合流等管网建设滞后带来的不同污泥属性，全国各地经济、地理、人口、气候等条件复杂性，市政部门对污泥所涉及的各种跨领域学科不熟悉，地方政府简单引进的国外技术路线在技术、造价、管理等各方面表现出与中国国情不相适应的明显问题，以及污泥处置自身的特殊性等原因。

地方政府在选择污泥处理处置的技术路线时容易陷入仅就技术或成本进行论证的误区。通过市场换技术的方式在污泥治理方面虽已经过近10年的探索，却始终不能取得较好的成果，比如重庆市唐家沱消化干化、上海市石洞口干化焚烧等项目就在技术路线的选择上出现了问题，导致运行成本过高，最终使得项目运行出现问题<sup>19</sup>。其原因在于，评价一个污泥处理路线的发展机会和市场路径，需要对包括政府行为偏好在内的多重因素进行综合分析，而不能仅就技术或成本进行论证。

## 3.3 资金不足

我国污泥处理处置长期依赖于政府少量补贴，缺少一种长期有效的资金来源，政府在污泥处理处置上的年均投入远远少于污水处理处置。数据显示，2013年，用于污泥处理处置和污水处理处置的固定资产投资分别为17亿元和238亿元<sup>20</sup>，污泥处理处置的投资仅占合计投资的6.7%。地方政府承担了污泥管理的主体责任，但是地方政府没有一个稳定、持续的污泥处理处置及监督管理的专项经费来源<sup>21</sup>。因此，污泥处理处置应符合“安全环保、循环利用、节能降耗、因地制宜、稳妥可靠”的原则就很难被真正落实。由于缺乏处置资金和监管资金，地方政府和污水处理公司通过合同要求污泥处理处置公司在不合理的低价下安全处理处置污泥，回避了自身应承担的实际主要责任，导致污泥处理公司偷排污泥的现象时有发生。

目前,我国多数城市征收的污水处理费,由于征收标准较低,维持污水处理厂的正常运行都有困难。统计数据显示,目前中国32个大中城市中,居民污水处理费均价为0.81元/吨,只有北京、上海、南京、重庆、昆明等少数城市高于《关于制定和调整污水处理收费标准等有关问题的通知》(以下简称“通知”)提出的0.95元/吨的标准;同时,除北京、上海、南京外,大部分大中城市非居民污水处理费未达到“通知”中1.4元/吨的最低标准<sup>22</sup>。

而且,我国大部分地区污水处理费均未包含污泥处理处置相关费用,特别是以BOT形式建设的污水处理厂,其特许经营合同中大多未包含污泥处理处置相关内容。在征收污泥处理处置费用的城市中,其污水费中只包括了污泥脱水的费用,并未涵盖脱水后污泥的处理处置费用。故污泥处理处置一直存在资金严重不足的问题。政府作为污水及污泥处理处置的责任主体,在未开征污泥处理费时,资金压力较大。这使得部分污水处理厂在有意无意之间,亦只能将污泥处理处置的责任旁置。

### 3.4 监管制度和信息公开制度缺失

我国于2014年1月1日起施行《城镇排水与污水处理条例》。《城镇排水与污水处理条例》第53条规定,城镇污水处理设施维护运营单位或者污泥处理处置单位对产生的污泥以及处理处置后污泥的去向、用途、用量等未进行跟踪、记录的,或者处理处置后的污泥不符合国家有关标准的,由城镇排水主管部门责令限期采取治理措施,给予警告;造成损失的,依法承担赔偿责任。而我国城镇污水处理厂要么是城镇排水主管部门下面的一个“事业单位”,要么是特许经营等方式的政府授权企业,而这些企业在与政府签订污水处理厂的经营合同时,往往未能担负起其应当承担的责任。

然而,地方政府缺乏相关意识,不够重视污泥的处理处置问题,是污泥处理处置问题的根源。地方政府缺少专项资金来履行污泥管理的主体责任,而环保部门则出现了不好管和管不了的情况。环保部门应该对本地城镇污泥的产生量、污泥特性、污泥处置去向和是否达标等负有监督和信息公开的责任,但是这一职责在我国各地的环保部门都很难履行,相关信息也无从获得。可以说,我国城镇污泥处理处置的相关法规与环境监管严重缺失,亟待完善。

一方面,我国城镇污泥管理缺乏权威部门的信息公开,另一方面,又时有媒体曝光的“污泥事件”。这就导致了公众对我国污泥处理处置现状的担忧和排斥心理。居民本该支付污泥的处置成本,但是由于信息不公开和缺乏信任,增加了征收相关费用的难度,加大了污泥管理专项资金的缺口。

### 3.5 本章小结

本章提出了中国城镇污泥管理的几项挑战:我国各地政府、

相关部门颁布或实施的相关污泥管理标准不统一,且这些政策多集中在“技术指南”等细节性政策上,主管部门、责任划分等仍不明晰,决定行业整体发展方式的核心政策至今仍是空白;各地的污泥属性不同,污泥处理处置的产业链不完善,导致污泥处理处置技术选择困难;中国污泥处理处置因长期依赖于政府少量补贴,缺少长期有效的资金来源;相关监管制度和信息公开制度缺失,且已有的制度多无强制性等。这些都是中国城镇污泥管理面临的极大挑战。

## 国内外污泥管理的实践和启示

针对上述挑战,本研究调研了欧美等国家污泥管理的经验,并结合实际案例进行了深入分析,以期为解决上述问题提供参考。

### 4.1 协同发力的法律、法规和标准体系

欧美国家的污泥处理处置法律法规经过多次完善修改,目前已经对包括土地利用在内的多种污泥处理处置方式制定了详细、规范的条例,便于污泥处理处置的落实和监管工作的开展。在设立了相关条例后,应对污泥处理处置各环节涉及的物质输入和输出的数量特性等进行监控、记录或追踪,比如污泥土地利用的施用量、施用时间、施用频率和施用方法,以及施用后的土地状况等,以期更好地对污泥进行管理。

由此可见,明确、完善的法律法规是污泥管理的基础条件。我国应当学习这些国家先进的管理理念,建立协同发力的法律、法规和标准体系,严格落实“细节可追溯”和“适时更新”,有目的、有方向地对污泥进行管理和控制。

#### 4.1.1 美国

1993年2月,美国污泥管理联邦法的503条款,即由美国环保局颁布执行的《污泥处置与利用标准》生效,成为美国污泥管理的基本法规。该条款采用风险分析的方法,较为全面地制定了污泥土地利用标准、污泥地表处置标准和污泥焚烧标准等三个子标准。各子标准包括总体要求、污染物限制、管理条例、监测频率、记录和报告制度等内容。在不利天气或农田条件不允许污泥土地利用时,每个项目都预备了污泥储存或其它处置的备选方案,因此,污泥土地利用成为一个相对可靠的污泥管理方式。

为了确保土地利用真正发挥有益作用,按规定进行,避免不当利用对水体、土壤和空气等对环境产生负面影响,美国农业部、美国食品药品监督管理局和美国环保局制定了一个联合政策,要求“利用高质量的污泥(经稳定化、卫生化处理的污泥)必须遵循正确的管理流程,确保消费者避免食用受污染的作物和最小化任何潜在的环境影响”<sup>23</sup>。

#### 4.1.2 欧洲

##### ■ 政策体系

欧洲污泥管理的重要特点是其政策和管理的**系统性、可操作性，以及严格监管和信息公开**。下面进行分别说明。

**法规的系统性：**欧盟的污泥处置，无论是土地利用、焚烧还是填埋都有一系列的法规约束，从而减少污泥处置产生二次污染的风险，并尽可能资源化利用污泥中的养分及其能源潜力，例如《欧盟污泥农用指令》（86/278/EEC，以下简称“污泥指令”）和《欧盟城镇污水处理指令》（91/271/EEC）。

1986年欧盟<sup>24</sup>出台的“污泥指令”一方面鼓励污泥农用，但同时也提出明确规定和措施，防止污泥农用对土壤、植被、动物和人造成潜在的有害影响，“污泥指令”特别规定了污泥农用的施用量、施用时间，以及污泥重金属浓度的最大允许值，同时也禁止施用未经处理的污泥<sup>25</sup>。除非经过授权，否则不能将未经处理的污泥通过注射或与土壤混合的方式施用。“污泥指令”也特别规定了下列禁止施用污泥的情况：

- 在草地或饲料作物收割前的一段时间（欧盟成员国可具体规定该时间段，但不得少于三周）。
- 在水果和蔬菜作物在生长季节，除了果树。
- 与地面直接接触的水果和蔬菜作物（通常生吃），在采摘前10个月内和采摘期内。

该指令要求欧盟成员国必须对污泥和施用污泥的土壤进行取样和分析。欧盟成员国必须登记和记录下列内容：

- 产生的污泥量和用于农业的数量。
- 污泥的成分和性质。
- 污泥处理的方式。
- 污泥接收方的姓名和地址，以及使用污泥的具体地点。

除了污泥农用的相关法规，污泥属于固体废弃物类，因此污泥焚烧要执行《欧盟固体废弃物焚烧指令》（2000/76/EC）。这个指令要求污泥焚烧的运营方必须在尾气排放、污水排放和工厂设计方面执行相关的标准和技术要求。

而污泥填埋依据《欧盟废弃物填埋指令》（1999/31/EC）及其修订版2003/33/EG要求成员国逐步减少可降解垃圾的填埋量。该指令要求2016年可降解垃圾的填埋量减少到1995年水平的35%。这意味着填埋不再是可持续的污泥管理方法。

**污泥标准管理的系统性：**欧盟污泥标准工作主要由欧洲标准化委员会的污泥特性技术委员会负责（CEN/TC 308），分3个工作组来完成。第1组制定污泥参数的标准规范，包括物理参数、化

学参数、生物参数3个部分。第2组制定污泥处理处置方法的指导准则，主要内容为：污泥处理处置术语、污泥土地利用、污泥稳定、污泥焚烧、填埋等。第3组研究污泥管理的未来需求，如预测未来污泥量和提出污泥处理处置新路线。

除了欧盟层面污泥农用标准，各国还有国家法律条例进行细化管理。如德国的肥料法、肥料标准和施肥条例中也对污泥作为肥料的标准和管理有详细要求。这些内容为保证污泥的土地利用提供了政策依据和实施条件。

##### ■ 污泥土地利用的影响评估

“污泥指令”鼓励污泥的农业利用，与此同时也建立了一套规范和标准来预防污泥土地利用对土壤、植被、动物和人类造成危害。有明显证据显示，自20世纪80年代中期以来，欧盟15国的污泥重金属含量明显下降。这得益于严格的上游管控，例如危险物质使用和排放的管控、自愿协议和工业生产过程的改进等。这些措施使得停止或减少了重金属向环境中的排放、挥发或流失。尽管如此，“污泥指令”还是对土壤和污泥的七种金属（镉、铜、镍、铅、锌、汞和铬）分别都设定了标准。“污泥指令”也对减少病原菌和预防持久性污染物在土壤中积累有所涉及，但是没有对有机污染物设定明确的标准。为了减少残留病原菌的健康风险，“欧盟指令”对污泥的土地利用、收割和放牧等活动有具体的限制规定。该指令要求所有污泥经过处理后才能进行农用，但是允许在特定条件下将未经处理的污泥注入土壤。虽然要求使用处理后的污泥，但“污泥指令”并没有指定污泥的处理方法。实际上很多欧洲国家在污泥农用方面执行了比“污泥指令”要求更为严格的标准和管理措施。有些国家如丹麦、法国、芬兰、意大利等对污泥的病原菌提出了标准要求；而奥地利、捷克、德国、瑞典、法国等对有机污染物等参数提出了标准要求。

“污泥指令”执行20多年后，欧盟委员会于2008年委托Milieu公司等机构对欧盟国家污泥土地利用的处置方式进行环境、经济和社会影响的评估<sup>26</sup>。此项评估持续了60个月。评估报告显示：2006年，欧盟27国<sup>27</sup>产生干污泥1010万吨，其中，污泥农用占比约40%；而欧盟15国的干污泥产生量合计887万吨，农业农用占45%，其中污泥农用比例前三位的国家是英国、西班牙和爱尔兰，分别占比68%、65%和63%。在欧盟国家，污泥除了农用，还有其它形式的土地利用，包括林业和已关闭的矿场和填埋场的土地修复。

下面是该评估报告的主要结论。

##### (1) 积极影响

有充分的科学证据显示污泥农用产生了以下积极影响：

- 污泥农用带来的养分（氮和磷）循环利用可以有效减少化肥使用量。
- 污泥农用的一个突出贡献是实现了磷元素在食物链与土

壤间的循环利用，这不仅减少了磷矿资源的开采，同时也减少了磷矿中的金属镉随着化肥施用而进入土壤。

- 污泥农用也有利于提供植物生长需要的其它微量元素，如钾、硫、铜和锌。
- 污泥农用在提高土壤有机质含量、调节土壤结构和增加土壤保湿能力等方面都有积极贡献。

## (2) 环境和人类健康的风险

- 自“污泥指令”颁布以来，科学文献的记录中，没有显示欧盟国家的重大环境或健康风险问题与污泥农用有关。
- 从温室气体排放看，污泥土地利用的排放低于其它污泥处置方式。

## (3) 社会影响

- 异味是公众可能反对污泥土地利用的一个重要因素。公众认知也是影响污泥土地利用的一个因素，公众倾向于认为污泥可能对健康有负面影响。
- 尽管开展了许多关于污泥土地利用地周边居民的健康风险研究，但是没有研究结果能说明符合规划的污泥施用过程对周边居民健康造成了负面影响。

### 4.1.3 德国

**严格防止污泥农用产生的二次污染：**德国《污泥管理条例》分类详细，不但对污泥土地利用时的允许条件、约束条件、污泥量的要求、土地利用日程安排等做了详细的阐述，而且还给出了污泥和土壤样品的采集、预处理和分析测定的具体方法。

**严格规范污泥农用的适用范围：**德国规定污泥不能用于蔬菜、果树、永久草地、生吃的食物和饲料施肥。此外，禁止在饮用水保护地区，以及十米宽以下的河堤使用污泥。

**严格防止污泥焚烧产生的二次污染：**德国要求污泥单独焚烧的温度为850~950℃，具体温度取决于污泥的量和燃烧空气量。燃烧后要在燃烧室里停留至少2秒。单一污泥燃烧厂全部安装相应的废气净化系统。所有的装置都装有过滤除尘器，用于减少焚烧过程中的灰尘。净化后的废气中粉尘平均含量为0.2~2.5mg/m<sup>3</sup>，相关规定是不能超过10mg/m<sup>3</sup>。单一污泥燃烧中氮氧化物的排放平均值是80mg/m<sup>3</sup>，也有达到180 mg/m<sup>3</sup>的，但最大不超过200 mg/m<sup>3</sup>。

### 4.1.4 德国汉堡

汉堡污水处理厂及其污泥的厌氧焚烧处置链条的建设、运营和管理都在依法进行。法规体系包括三个层次，即欧盟、德国联邦政府和联邦州及其直辖市层面。汉堡市政府有责任制订更细

致和更严格的条例来执行欧盟和德国联邦政府层面的各类法规要求，包括水资源、供水和污水处理领域的法规。

下面分析汉堡污水处理厂的污泥处置在物质流系统（输入和输出及排放控制）、行动（建设和运营）系统和资金流系统（收费和管理）三个方面都有哪些主要法律法规的支持。

## (1) 物质流系统（输入和输出及排放控制）相关的法律法规

汉堡市政府制定了详细的条例和法令来确保污水处理和污泥处置过程产生的废气、废水或固体废弃物的排放符合欧盟及德国联邦政府的标准和要求，避免污染转移。例如：

- 污水处理和污泥处置的残余物处置都必须保留转运证据。
- 市政垃圾处置单位的固废排放条例。
- 垃圾焚烧的污水排放条例。
- 污泥焚烧厂烟气排放的污染物控制受到《德国大气污染控制法》的严格约束。

## (2) 行动（建设和运营）系统相关的法律法规

《欧盟城镇污水处理指令》要求欧盟成员国设置城市污水处理的统一要求。该法律要求成员国设定城市污水处理设施的污水排放要求、监管流程，以及建设污水处理设施的时限。该法律从欧盟层面明确了政府在污水处置和管理方面的主体责任。由此，汉堡市政府制定了《汉堡市污水法》、《污水处理主管部门条例》和《汉堡市垃圾管理主管部门条例》来明确责任，并成立了市政府100%控股的水务集团来完成城市污水处理和污泥处置的各项要求。

其中，汉堡市也有专门的条例要求污水（污泥）处理设施的设计、运营必须由经过认证的专业化运行公司完成，专门规定了污泥处置的相关要求。

## (3) 资金流系统（收费和管理）相关的法律法规

污染者付费原则是汉堡市污水处理和污泥处置的主要资金来源，其实施保障主要靠下面的两个条例：

《汉堡市污水费征收条例》明确了在（私人或商业）用户的水费中征收污水处理费的方法及具体金额。

《汉堡市污水管网使用费条例》明确了（私人或商业）用户的污水排放接入市政污水管网的收费方法及具体金额。

关于梳理监测或检测各类污染物排放浓度的费用问题，汉堡市也出台了《汉堡市环境监测费条例》。

汉堡市污泥处置产生的沼气热电联产、沼气提纯并网，以及污泥焚烧发电工艺产生的电能、热能和生物天然气的并网和售价

都得到《德国可再生能源法》的保障和管控。

#### 4.1.5 英国

英国主要有三个污泥标准：污泥农用法规、废物收集与处置法规和控制废物法规。废物收集与处置法规和控制废物法规主要用于规范污泥收集、控制和处置过程。污泥农用法规给出了污泥用于农业土地利用时的总体要求及污染物的控制要求，详细地规定了污泥施用后的相关注意事项、污泥施用地点的要求和相关信息的记录及保存要求等，并规定了污泥用于农业时各类污染物的控制限值。

### 4.2 合理选择技术路线

污泥的处理处置包括污泥填埋、源头减量、污泥的厌氧消化、污泥焚烧和其它生物处理方式。

多数国家最初都是将污泥送往垃圾填埋场进行填埋。根据欧盟要逐步减少有机垃圾填埋比例的限制来看，预计到2020年，不会再有大量的污泥以填埋为主要处理方式。因此，这种处理处置方式将会逐渐被淘汰。

污泥的厌氧消化和其它生物处理方式，如堆肥，是污泥土地利用之前的一种重要的处理处置方式，这种方式也是欧美国家目前使用最多的污泥处理处置方式。

当污泥土地利用的处理处置方式不具备条件时，通过污泥焚烧回收能源和磷，是对污泥进行处理处置的主要备选方案。特别是当污泥重金属超标、人口密度高或公众反对，如认为污泥处理处置会带来气味问题时，将污泥进行焚烧是更为妥当的选择。

此外，令污泥源头减量的处理处置方式能够不断提高工业污水的预处理程度，预防、减少或消除工业及其它活动排放的有毒物质，是改善环境质量和避免污泥处理处置过程产生二次污染的重要措施。但此项方式需要与污水处理厂的技术相结合，技术含量较高，因此目前使用的国家相对较少。

总之，技术路线的选择因地制宜，但是无论选择哪种技术路线，都有严格的法律法规体系和标准来监督和约束污泥的处理处置过程。

#### 4.2.1 美国

2004年，美国16000座污水处理厂产生了718万吨污泥（干重）<sup>28</sup>，其中用于土地利用的占55%，在生活垃圾填埋场填埋的占28.4%，焚烧的占14.8%。

由于污泥填埋处置场所的减少、填埋成本的上升和污泥处理处置科研成果应用的进一步完善，从20世纪80年代开始，美国污泥土地利用比例不断上升，2004年已超过50%。其中，农业利用

和绿化园艺为主要的土地利用类型。近年来，美国污泥土地利用的审批流程和过程管理更趋严格。污泥土地利用的可持续性、气味控制、社区接受度、能源效率、资源回收和对土地生产力的影响等因素是污泥土地管理的重点内容<sup>29</sup>。这在一定程度上使得污泥土地利用量有所减少。

得克萨斯州最近几年开始要求对B类污泥<sup>30</sup>土地利用的施用及养分管理计划进行公众听证并获得许可证。自从这个规定实施以来，得克萨斯州的污泥土地利用的承接方下降了75%，污泥土地利用的总量减少了25%。可见，该规定带来的复杂审批流程、申请成本和不确定性减少了该州污泥土地利用的数量。

佛罗里达州的奥基乔比地区<sup>31</sup>，2008年就开始禁止A类和B类污泥的土地利用。2013年开始奥兰多附近的土地也禁用B类污泥。规定也要求对于可以进行污泥土地利用的地区，A类和B类污泥都需要提交污泥施用的养分管理计划，包括防止过量施用磷肥的管理计划。由于佛罗里达州超过三分之二的污泥都通过土地利用进行处置，这项规定也因此对该州的污泥管理产生明显影响。土地利用除了在州这个层次遇到挑战以外，亚特兰大中部、加利福尼亚州和佐治亚州的一些县也已经开始禁止污泥土地利用或者实施更严格的管理规定。

美国的污泥养分管理计划也面临更复杂的要求，开始重视基于作物磷肥需求的养分施用计划。例如，污泥的氮磷比是2:1到4:1，而作物对氮、磷养分的需求比是8:1，过去是基于氮肥来确定土地的养分施用量，这样的措施可能让土壤中的磷元素富集，并随雨水进入水体，增加水体富营养化的风险。

基于上述原因，美国开始探索新的污泥管理模式。例如污水处理厂开始主动寻求其它类型的有机垃圾（例如绿化垃圾等）与污泥联合处理，一方面增加收入来源，另一方面增加厌氧消化的沼气产量，使得污水处理厂有了新的产品。建立公私联合的经营模式来运行这类项目，使固体废弃物资源化的同时也改进了固体废弃物管理的经济性。

#### 4.2.2 欧洲

从2010年欧盟27国污泥处置比例的总体平均值来看，污泥农用、污泥焚烧、污泥填埋和其它处置方法（如土地修复等）所处置的污泥量占比相差不大，分别是37.3%、23.8%、28.7%和31.3%<sup>32</sup>。

但是，分析欧盟污泥产生量排名前六位的国家（依次是德国、英国、意大利、法国、西班牙和波兰），各种处置方式则有明显差别，与欧盟27国的平均水平不同，具体如图3所示。2010年，有三个国家的污泥农用占比都超过了65%，其中英国最高，达到了70%。德国污泥焚烧比例最高，达50%，波兰的污泥农用和污泥填埋量占比分别是40%和45%。而德国、英国和法国的污泥填埋比例都很低，分别是0%、1%和5%。

图 3 | 欧洲污泥产生量最多的前六个国家的污泥处置方法

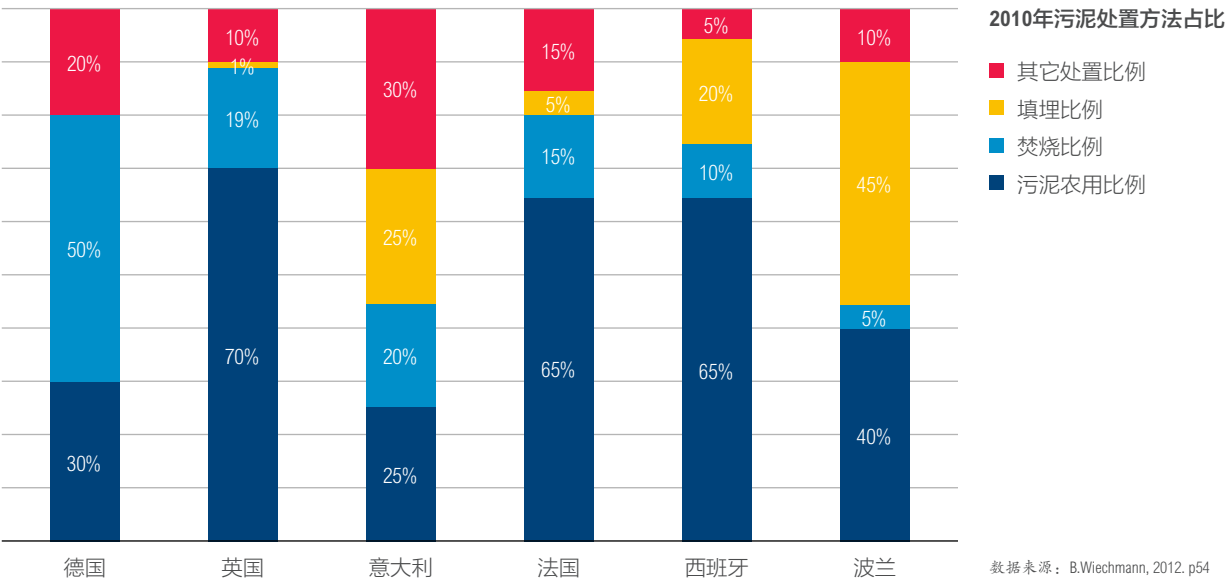


图 4 | 德国城镇污泥产量及变化（2004—2011年）

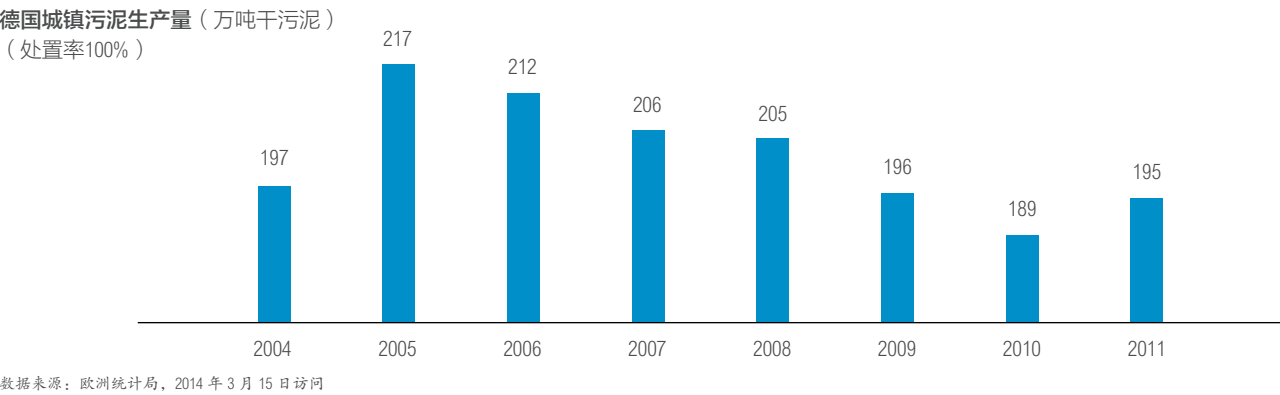


图 5 | 德国人均干污泥产生量（2004—2011年）

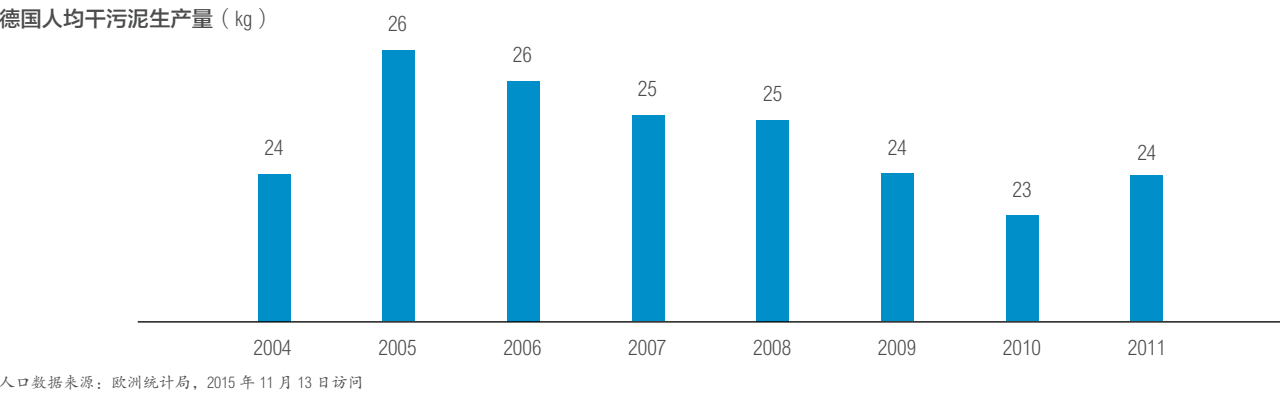


图 6 | 德国污泥处置方式的变化（2004—2011年）

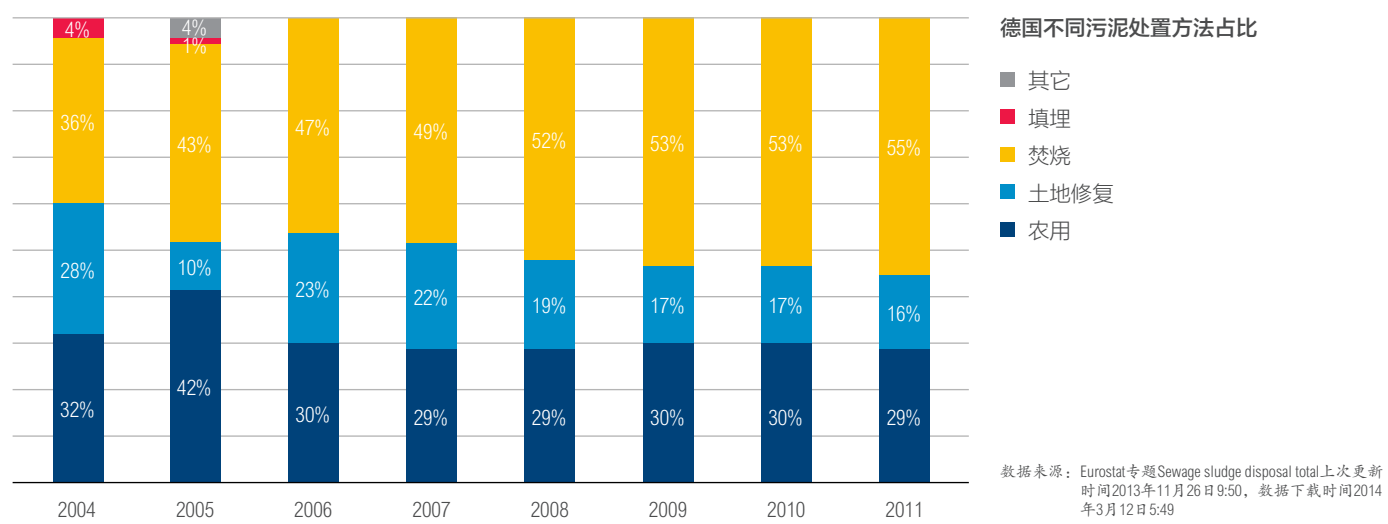


图 7 | 德国污泥单独焚烧和协同焚烧的发展历程（1975—2008年）

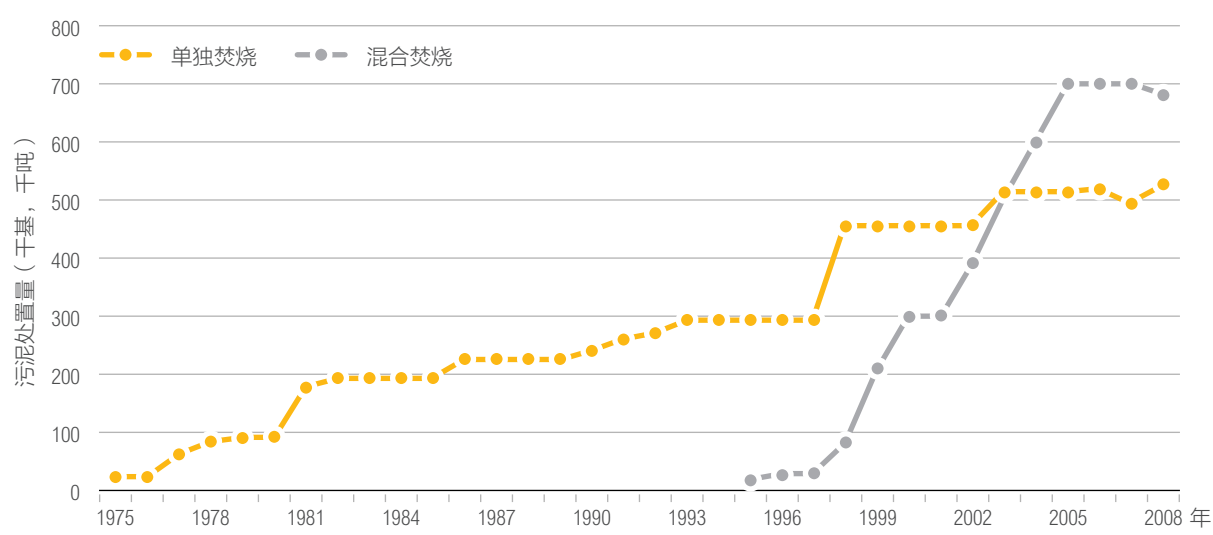
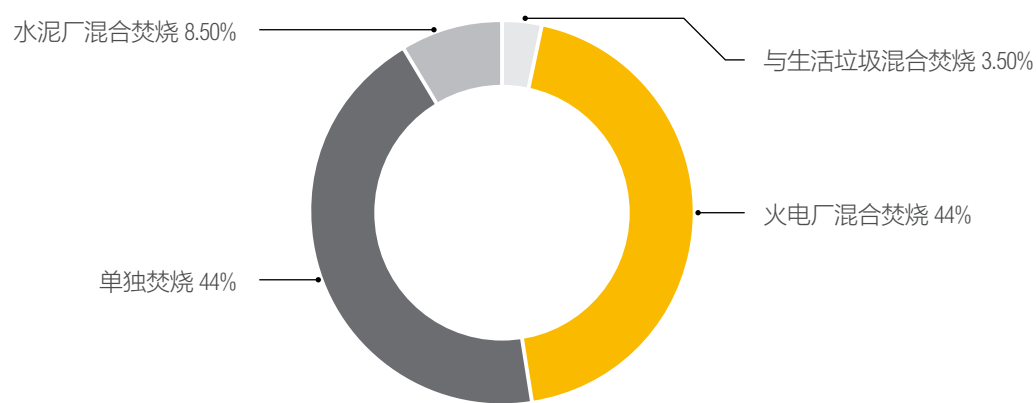


图 8 | 德国污泥焚烧的类型（2010年）



数据来源：Lehrmann, F. 2010

4.2.3 德国

德国城镇污泥的产生量在2004年到2011年间基本持平，并略有减少，平均每年产生202万吨干污泥，如图4所示。人均干污泥产生量的趋势也类似，其年平均值是24.6kg，如图5所示。

■ 处置方式变化趋势

从2004年到2011年期间，尽管德国的污泥产生量变化不大，但是其处置方法变化很明显，如图6所示。污泥与有机质共同焚烧在德国很普遍；由于从焚烧灰中回收磷的需求上升，污泥单独焚烧的案例在德国增加。因此，2004-2011年，德国污泥处置方法的发展趋势是焚烧占比逐年增加，从36.2%增加到54.7%；污泥农用占比略有下降，从31.9%降至29.1%；土地修复占比下降明显，从27.9%降至16.2%；填埋占比则从4.0%减少到0。目前，德国正在修改相关法令，污泥的土地利用将越来越受限制。

1975年到1995年的20年里，德国污泥焚烧都采用单独焚烧方式，如图7所示。不过，污泥协同焚烧从1995年开始应用，逐渐在污泥处置中占据重要位置，从2004年开始，污泥协同焚烧的量已经超过污泥单独焚烧的量。目前德国共有26个污泥协同焚烧项目，每年大约可处理716000吨污泥（干重计）<sup>33</sup>。

截至2010年，德国污泥单独焚烧的比例是44%，而协同焚烧的比例是56%，如图8所示。德国污泥协同焚烧的主要方式是污泥在火电厂的协同焚烧，占总焚烧量的44%。

污泥焚烧的烟气含有重金属等有害物质，因此污泥在火电厂燃料中的添加量有限，如果污泥加入过多，火电厂就需要增加烟

气处理装置。德国大多数火电厂使用的燃烧物中最多掺烧5%的污泥，以保证燃烧温度和烟气排放质量，全德国的火电厂都有污泥协同焚烧的计划。

德国的污泥和生活垃圾协同焚烧在过去几年不断被边缘化，因为燃烧污泥和燃烧垃圾的方法不同，目前只有少数垃圾焚烧厂还在继续混烧污泥（B.Wiechmann等，2012）。水泥生产是高耗能的行业，采用污泥协同焚烧已有数十年。干燥处理后的污泥可替代化石燃料，其中的矿物质也可替代燃烧使用的砂石和铁矿。水泥厂协同燃烧污泥对环境和原材料有好处，节省燃料，节约成本，减少CO<sub>2</sub>排放量。德国从2003年到2010年，水泥厂协同焚烧污泥的量从每年4000吨增加到每年27.6万吨（干物质计），参与水泥厂协同焚烧的污泥的平均热值是4MJ/kg。

值得注意的是，污泥协同焚烧不利于从污泥中回收磷资源，污泥中的磷在炉内燃烧后，产生的磷酸盐灰烬进入焚烧灰渣中。协同焚烧导致磷酸盐灰烬的回收成本过高。污泥单独焚烧则可从飞灰中回收磷资源。因此，由于此前德国的磷全靠进口，德国开始日益重视通过污泥单独焚烧来回收磷资源。在2007—2008财年，德国拥有138000吨磷以矿物磷肥的形式被使用。因此，德国政府和企业都在积极开发新的污泥单独焚烧后的污泥灰渣磷回收技术，目前已有3家污泥焚烧的磷回收示范工程，磷产出能力16500吨/年<sup>34</sup>。

■ 方法比较

德国污泥处置主要有三种方法，包括土地利用、单独焚烧和协同焚烧。这三种污泥处置方法的优缺点比较内容见表5。

表 5 | 德国三种污泥处置方法比较<sup>35</sup>

| 污泥处置方法                  | 优点                                                                                                                                                              | 不足                                                                                                                  |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 土地利用（农用及生态修复等，占比 47.4%） | <ul style="list-style-type: none"><li>• 养分及磷资源的循环利用</li><li>• 成本最低</li></ul>                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"><li>• 对人与环境可能产生卫生及有害物累积的风险</li><li>• 有害物没有从物质循环中去除，而是被富集</li></ul>                |
| 单独焚烧（占比 23.1%）          | <ul style="list-style-type: none"><li>• 污泥运营方可作长期规划</li><li>• 可消除污泥中的有机污染物</li><li>• 获取能源（污泥深度脱水）</li><li>• 可从飞灰中回收磷资源</li><li>• 结合磷回收工艺，保护资源和打开一个新市场</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• 从飞灰中回收磷的技术目前较昂贵</li><li>• 远程运输可能造成对人与环境的额外负担</li><li>• 该方法的处置成本最高</li></ul> |
| 协同焚烧（占比 29.5%）          | <ul style="list-style-type: none"><li>• 可消除污泥中的有机污染物和病原体</li><li>• 获取能源（污泥深度脱水）</li><li>• 成本低于单独焚烧</li><li>• 通过节约燃料和作为辅助原料实现资源保护</li></ul>                      | <ul style="list-style-type: none"><li>• 无法利用污泥中的养分资源</li><li>• 无法从灰分中回收磷资源</li><li>• 远程运输可能造成对人与环境的额外负担</li></ul>   |

图 9 | 汉堡市污泥厌氧发酵及沼气热电联产和沼气提纯



图 10 | 汉堡市水务集团的“沼气”车队



图 11 | 汉堡市污泥焚烧发电厂（VERA）



#### 4.2.4 德国汉堡市

汉堡市人口约230万，汉堡市排水公司负责全市的生活污水处理和污泥处理处置工作。2013年处理污水量1416亿立方米，产生干污泥4.7万吨<sup>36</sup>，折合日处理污水45万立方米，产生干污泥129吨，相当于每天处理645吨湿污泥（含水率80%），折合处理1万立方米污水产生湿污泥14吨，相当于产污比系数为14。折算后，汉堡市人均年产生20kg干污泥，而整个德国为人均年产生24kg干污泥。

汉堡市污泥处置园区是一套技术路线的组合，即“厌氧+沼气提纯+沼气热电联产+焚烧”。污泥及厨余垃圾等有机垃圾联合厌氧消化后产生沼气用于发电和沼气提纯，提纯后的生物天然气作为车用燃料，厌氧消化后的污泥渣用于焚烧发电。上述技术组合不但实现了污泥的安全处置，同时还实现了变废为宝。因此，汉堡市污泥处置园区也成为汉堡市的“环境教育基地”。

污泥厌氧消化产生的沼气，部分用于热电联产，产出电力维持工厂运转，热能用于污泥干化，部分沼气被提纯为甲烷，组建了汉堡水务集团的“沼气”车队，如图9和图10所示。厌氧消化污泥经过脱水和干化处理，进入污泥焚烧发电厂，如图11所示。汉堡市水务集团还在厂区范围投资了风力发电和太阳能发电设备，由此使得汉堡市污水处理厂不但实现了污水和污泥的环保处置，同时还实现了能源的自给自足。污泥处置产生的能源满足了污水处理和污泥处理所需总用电量的94%，以及全部的热量需要。汉堡市污泥处置园区在2013年的物质流关系图见附录2。

汉堡市污水处理厂和污泥焚烧发电厂之间探索出了一套高效率且环保的运行模式，它包括污水处理系统、污泥处置系统和残渣废气处理系统。这三大系统的物质流关系见附录3。

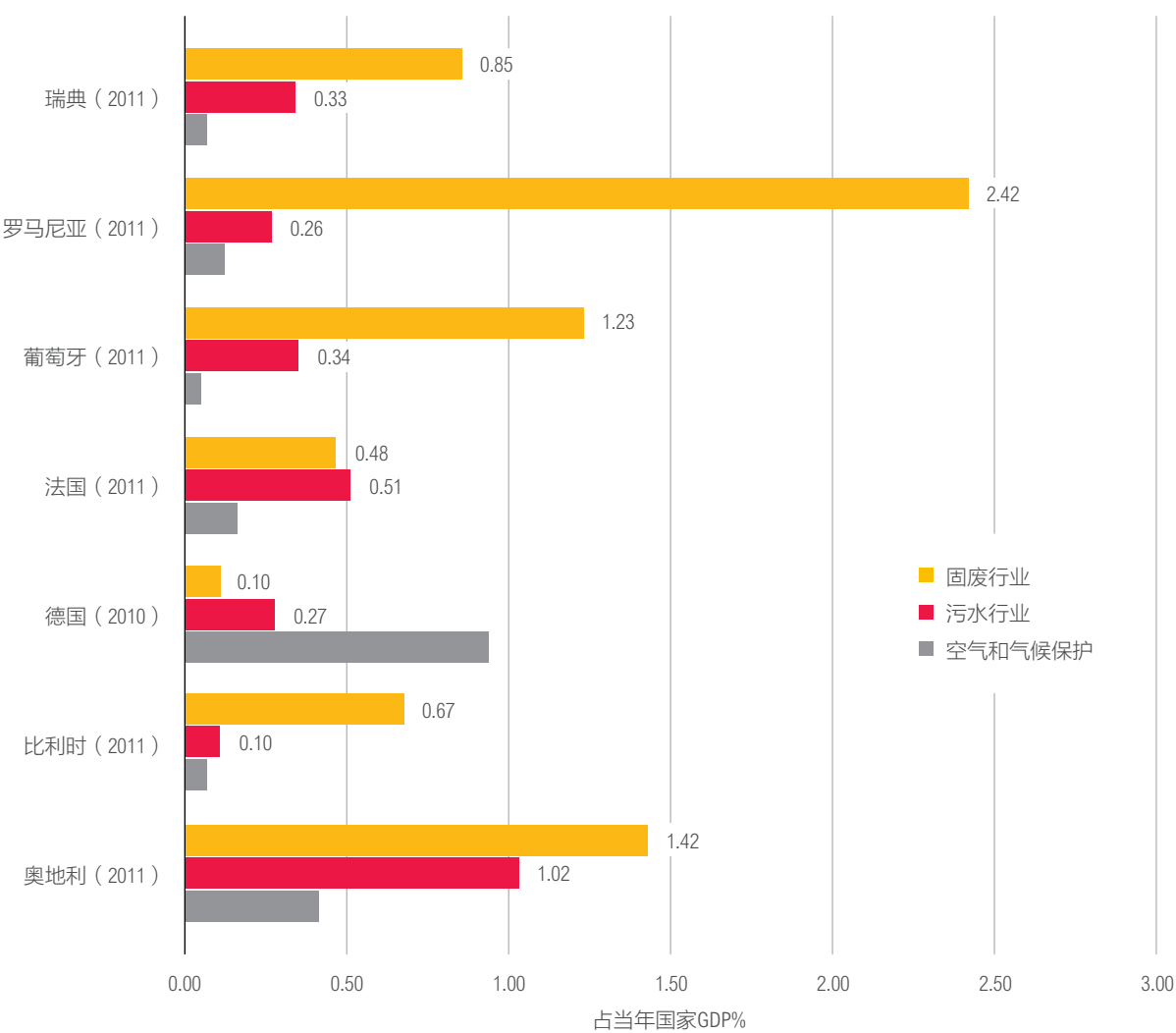
污泥焚烧后的烟气净化和焚烧炉渣及飞灰等固体残余物的利用和处置是整个处置系统能否环保达标的关键。汉堡市污水处理厂的污泥焚烧发电厂（VERA）产生的烟气污染物排放浓度远低于德国大气污染物排放控制法令（BlmSchV 17）的最大允许浓度。污泥焚烧后每年产生约2万吨炉渣，这些炉渣运往汉堡市一家冶炼厂，高温熔融提取铜，同时也制成河岸护堤等建筑材料。焚烧炉的尾气净化每年还产生约3323吨石膏，用于工业生产。此外，烟气净化过程中，每年产生313吨重金属污泥作为危险废物，运往填埋场进行处置<sup>37</sup>。

### 4.3 多渠道的资金来源

#### 4.3.1 严格落实“污染者付费原则”

欧美国家长期坚持“污染者付费原则”，这项原则确立了环境资源“有价”的思想，通过被提高的处置成本影响污染者的行为，促使其在进行决策时考虑减少排污的技术方式并提高效率，最终使总经济体达到环境资源的有效配置，也从根本上保障了污泥处理处置的资金来源。该原则促进了环保产业的可持续发展，提供了就业机会，对于国内生产总值也有一定的贡献。例如：德

图 12 | 欧洲7国三大环保产业的市场产值占当年国内生产总值的比例



数据来源：Eurostat(env\_ac\_egss2) 欧洲统计局数据更新时间 2014.3.6 下载时间 2014.4.10。

国的水价中包含污水费，而污泥处置费一般占污水费的3%左右，即每吨污水费中大约0.06欧元用于污泥处理处置。

“污染者付费原则”也成为绿色经济的发动机，带来可观的就业和国内生产总值增长。

目前，中国的管理者们根据这项原则，相继开展了水权交易、排污收费政策、生态补偿等环境经济政策手段的实践，取得了一些成效和进展。

- (1) 欧洲
- 欧洲的空气和气候保护、污水和固体废弃物三大环保行业的

资金主要来源基于“污染者付费原则”。该原则的执行，不但解决了三大环保行业的经费来源问题，而且对地区经济的可持续发展和增加就业都有重要贡献。

2011年德国固体废弃物行业和污水行业的产值占国内生产总值的0.38%，占比最高的是罗马尼亚，为2.68%，其次是奥地利，这两个行业的产值占其国内生产总值的2.42%，见图12。

(2) 德国汉堡市

德国汉堡市政府对汉堡水务集团完全控股。汉堡水务集团又成立了汉堡市供水公司和汉堡市排水公司，水务集团对这两家公司分别控股100%。汉堡水务集团负责汉堡市的供水、排水，以及

表 6 | 汉堡市用水的收费标准

|                    |          |          |
|--------------------|----------|----------|
| 水费                 | 1.8      | 欧元 / 立方米 |
| 污水管网使用费和污水处理费      | 2.09     | 欧元 / 立方米 |
| 雨水设施费              | 0.73     | 欧元 / 平方米 |
| 月基础费               |          |          |
| 流量（依据流量计大小区分）      | 税前价格（欧元） | 税后价格（欧元） |
| 1.5 m³/h           | 2.23     | 2.39     |
| 1.5 m³/h（每新增一个流量计） | 0.64     | 0.69     |
| 2.5 m³/h           | 5.15     | 5.51     |
| 6.0 m³/h           | 12.70    | 13.59    |
| 10.0 m³/h          | 38.00    | 40.66    |
| 15.0 m³/h          | 74.40    | 79.61    |
| 40.00 m³/h         | 88.20    | 94.37    |
| 60.00 m³/h         | 122.20   | 130.75   |
| 150.0 m³/h         | 175.90   | 188.21   |
| 没有水表计量             | 76.60    | 81.96    |

数据来源：<http://www.hamburgwasser.de/trinkwasser.html>，访问时间 2015.5.5

地下水、雨水、河道和流域管理。

截至2013年底，汉堡市污水管网、污水处理和污泥处置等排水领域合计拥有固定资产31.9亿欧元<sup>38</sup>，包括5899千米的污水管网、4个污水处理厂和污泥焚烧厂（VERA），2013年提供就业岗位1038个，服务人群230万人。

汉堡市政府通过汉堡市排水公司对汉堡市的生活污水收集管网、污水处理和污泥处置所需项目进行投资。2002年到2012年合计支出12.51亿欧元。固定资产的积累和排水设施的运行费用主要依据“污染者付费原则”，由用户支付。

汉堡市饮用水和污水费合计为3.89欧元/立方米，人均日用水量110升。由此得出，汉堡人平均支付水费13欧元/月<sup>39</sup>，包括每月支付7欧元的污水费，含污泥处理处置费用，约占污水费的3%。

德国水价中污水费单价一般都比饮用水单价高。德国目前全国平均污水处理费是2欧元/立方米。最主要的成本是污水处理厂和污水管网的建设成本，其次是资本成本（利息）和人员工资

等。而污泥处置成本占比非常小，仅占德国用户平均支付的2欧元/立方米污水费的3%。即，德国每吨污水费中有0.06欧元用于污泥处理处置，相当于约0.51元人民币/立方米（B. Wiechmann等,2012，P58）。这个数值与附录3中德国污泥处置成本折合成水费的计算数据很吻合。附录3显示，德国吨污泥处理处置费折算成污水处理费为0.16~0.6元/吨。

汉堡市的用户需要支付水费、污水费、雨水费和用水基础费。收费标准的明细见表6，该价格于2015年1月1日起执行。

4.3.2 污泥产品资源化利用

(1) 美国

自2004年起，美国开始探索新的污泥管理模式，其污水处理厂开始主动寻求其它类型的有机垃圾（如绿化垃圾等）与污泥联合处理，既可增加收入来源，又可增加厌氧消化的沼气产量，使得污水处理厂拥有新的产品。美国建立公私联合的经营模式来运行这类项目，在使固体废弃物资源化的同时也改进了固体废弃物管理的经济性。

## (2) 德国

从前，德国的磷全靠从国外进口。由于发现污泥单独焚烧后可从飞灰中回收磷资源，德国开始日益重视通过污泥单独焚烧来回收磷资源。在2007—2008财年，德国138000吨磷以矿物磷肥的形式被使用。因此，德国政府和企业都在积极开发新的污泥单独焚烧后的污泥灰渣磷回收技术，目前已有3家污泥焚烧的磷回收示范工程，磷产出能力为16500吨/年<sup>40</sup>。

## (3) 中国襄阳市（污泥厌氧消化）

襄阳市鱼梁洲项目<sup>41</sup>对污泥和餐厨垃圾进行集中收运后，采用“高温水解+厌氧消化+重金属硫化+甲烷捕获利用+生物炭土”工艺进行处理。污泥产品包括车用CNG（6000立方米/日）和生物炭土（55~60吨/日，含水率40%）。污泥产品的销售能够为项目带来可观的经济收益。

■ 车用CNG的销售收入：湖北省现行车用压缩天然气价格为4.5元/立方米，目前项目日产气6000立方米，可以满足300台次车辆加气需求，年销售收入约972万元。

■ 生物炭土目前尚未出售，但是根据市场上同类产品的售价（80~100元/吨），按照日产60吨计算，生物炭土年销售收入预计为173~216万元。

■ 鱼梁洲项目目前尚未进行苗木销售，然而未来苗木销售将成为鱼梁洲项目的主要收入来源之一。按照日产60吨炭土、树木2年生长期计算，需要荒地1200亩来消纳所有的炭土。假设每棵树净收益200元，则2年生长期之后每天可收益12万元，每年收益约4320万元，相当于每吨湿污泥收益400元。

### 4.3.3 政府补贴

#### (1) 英国

英国污水处理厂污泥的厌氧消化由英国环境食品与乡村事务部（Defra）进行管理，有机废物的厌氧消化则主要由英国能源与气候变化部（DECC）管理，其对厌氧消化设施所提供的补贴主要包括以下几种形式：

■ “上网电价计划”（Feed-in-Tariff Scheme, FiTs）

FiTs于2010年开始实施，其目的在于通过提供补贴，帮助推动小型低碳产能设施的发展。其中，装机容量小于5MW的厌氧消化设施符合FiTs的补贴要求，可以享受FiTs提供的补贴。截至2016年1月，共有247个厌氧消化设施获得了FiTs的补贴，总装机容量可达169MW。

■ 可再生供热激励计划（Renewable Heat Incentive, RHI）

英国的碳排放一半来源于各种产热，比发电排放的还要多，

其中95%是通过燃烧化石燃料获得。所以英国政府希望通过这一计划，通过财政资助可再生技术以及设备，对生物质燃烧器、太阳能热水器及地源热泵等项目进行支持，以期实现对工商业供热以及家庭供暖的变革。目前英国有42个沼气项目享受RHI的补贴，装机容量达到24MW。

■ 可再生能源义务法案（Renewable Obligation, RO）

为保障项目能够合理地享受补贴，英国政府通过了可再生能源义务法案，该法案将于2017年3月开始实施。此项法案是英国政府支持大型可再生能源项目的主要政策。目前，可使有装机容量为90MW的厌氧消化设施享受该法案提供的补贴。此外，英国天然气与电力办公室根据符合规定的可再生能源电力产出，向可再生能源发电商颁发了可再生能源义务凭证（Renewable Obligation Certificates），发电商可向电力供应商或交易机构出售可再生能源义务凭证，从而获得电力批发价格之外的补贴。

此外，目前DECC在给予废弃物补贴的机制上，采取了分级管理的制度。填埋的处置方式位于补贴机制的底层，而从废弃物中提取、回收能源则位于补贴的最高级别。

#### (2) 中国襄阳市

襄阳市鱼梁洲项目总投资1.34亿元，其中8930万元用于污泥处理设施投资，4470万元用于建设处理餐厨的前端设备（如分拣、制浆、干燥等设备）、建设加气站和购买餐厨收运车辆。融资资金包括：企业资金4000万元，占总投资的30%；银行贷款8000万元，为中国进出口银行转贷的德国低息贷款，包括750万元德国贷款以及7250万元的配套贷款，占总投资的60%；政府污泥投资补贴1400万元，占总投资的10%。鱼梁洲项目的运营模式为BOO（Build-Own-Operate），实际运营商为湖北国新天汇能源有限公司。

襄阳市政府对于污泥和餐厨垃圾处理均提供相应补贴，具体的补贴标准根据项目运营成本和收益核算确定。对于鱼梁洲项目，污泥处理补贴为254元/吨，餐厨垃圾处理补贴为72元/吨。补贴标准根据居民消费价格指数（CPI）变化，每两年调整一次，调整幅度约为3~5元/吨。

## 4.4 监管和信息公开制度

环保部门对所辖地区的污染物排放、污水排放和污泥处理处置过程进行严格监管，不但能促进企业的绿色创新，同时也有利于减少或避免污泥处置的二次污染。根据法规要求，认真落实信息公开是欧美国家污泥管理的重要举措，它既是污泥处置费的征收依据，也是公众、研究机构和企业参与和支持污泥管理的保障。

此外，实行“污染者付费原则”的基础就是面向社会严格执

行信息公开制度，此项制度可以获得群众的认可，增加人们对污泥管理的信心，以获得足够的资金来维持整个处理系统的运营及维护工作。

因此，严格执行全过程监督和信息公开职责是实施污泥管理未来发展的必经之路。

#### 4.4.1 欧洲

“污泥指令”规定该指令启动后的第五年，以及之后每隔四年，成员国必须提交一个污泥农用的综合报告，说明污泥农用量、执行情况和遇到的任何困难。该报告必须转发给欧盟委员会来发布，并考虑是否需要调整“污泥指令”的某些内容。但是，一些成员国未能采取有效措施来执行“污泥指令”。例如，1994年比利时被法院判定未能执行“污泥指令”（判决日期1994年5月3日，案件C-260/93）。《欧盟城镇污水处理指令》（91/271/EEC）也要求成员国必须发布所在地区的城镇污水和污泥处理情况报告。

#### 4.4.2 德国汉堡市

汉堡市政府认为，严格执行信息公开制度是执行“污染者付费原则”的群众基础。因此，汉堡市水务集团落实了三个网站平台的建设和适时更新，确保信息公开的渠道通畅。这三个平台分别是汉堡市门户网站、汉堡市水务集团网站和汉堡市污泥焚烧发电厂（VERA）网站。

除此之外，汉堡污水处理厂的污泥处置在信息流系统（数据收集与公开）还设立了相关的法律法规：

《欧盟城市污水处理法》（91/271/EEC）第16条要求地方政府每隔两年完成一份当地污水处理现状的报告，并进行信息公开。《汉堡市污水法》第19条要求建立污水处理的信息系统并进行公开。因此，汉堡市在其门户网站建立了污水专栏，并定期公开汉堡市污水处理厂的运行报告。

汉堡市专门制定了《关于成立城市排水环境教育机构的法令》，推动公众教育和信息公开。

汉堡市也制定了《水和废水检验检测机构的要求及审批指令》，该法令确保了数据分析和收集工作的基础。

### 4.5 本章小结

本章介绍了包括英国、德国、德国汉堡市、欧洲、美国和中国襄阳市的污泥处理处置管理经验，结合这些国家、地区或城市严格地落实监管和信息公开制度，因地制宜地选择合理的技术路线，并以落实“污染者付费原则”、实现污泥产品的资源化利用、合理利用政府的补贴的方式获得足够的资金的实际管理模式，结合各地的实际案例进行了深入的分析，为解决上述问题提供参考。

## 中国城镇污泥管理的建议

### 5.1 加强部门协作，完善配套政策和标准

我国污泥处理处置需多个部门协同合作，提高污泥处置效率和污泥资源化利用效率。有关政策可在以下方面实施。

- 落实我国污泥土地利用的处置路线，建议住房和城乡建设部、农业部、国家林业局，以及环保部门等加强合作，完善和统一国内多个污泥农用标准，明确污泥土地利用的资质审批和监管流程，落实监管措施，规范推进污泥土地利用的发展。
- 建议农业部门和林业部门协调合作，统一污泥堆肥产品进入市场的门槛，对污泥中的养分和有机质进行资源化利用，帮助解决我国耕地土壤肥力下降的问题。

### 5.2 合理选择技术路线

在选择技术路线时，地方政府首先要结合本地区现有和将要建设的城镇污水处理厂产生污泥的规模、空间分布和污泥特性等因素，考虑技术路线的大方向，如图13所示。然后在选定的大方向下进行具体处理处置技术的招标或比选等。重点是在确保技术路线能被有效执行和监管的同时，尽量做到优化成本。其中的比选参数可以包括链条完整性（处理、处置、运输，以及过程中残余物的处置等）、占地面积、臭气风险、处理处置能耗、吨成本和吨碳排放量等。由于污泥特性不同或者污泥产生量很大，一个地区的城镇污泥处理处置可能会选择多个技术路线的组合。

污泥处理环节和处置环节的协同考虑非常重要。既要考虑技术衔接性，又要考虑跨部门或跨行业的衔接。首先，城镇污泥的处理处置与城镇雨污管网、污水处理和排放物监管是一个相互关联的大系统，不能割裂其中的关系而仅仅看一个方面。其次，不同的处置方式需要配合不同的脱水或干化工艺。从污泥处置的跨部门衔接来看，当污泥处置单位选择了污泥处置后的出路是土地利用时，项目规划时就必须要和相关的农业或林业部门进行衔接，避免污泥处置设施（如堆肥厂）建好了却不能获得污泥堆肥产品土地利用许可的情况发生。

总体来看，首先，污泥的处置决定其处理方式，故应先综合考虑污泥泥质特征、地理位置、环境条件和经济社会发展水平等因素，因地制宜地确定污泥处置方式，然后再决定处理方式，即处置方式决定处理方式。

其次，选择技术路线时：

- 泥质符合农业或园林绿化等标准的污泥，鼓励采用厌氧消化和好氧发酵稳定化处理后进行土地利用。对于大型污水处理厂产生的污泥或可集中或协同处理的污泥，建

图 13 | 地方政府选择城镇污泥处理处置技术路线大方向的分析流程

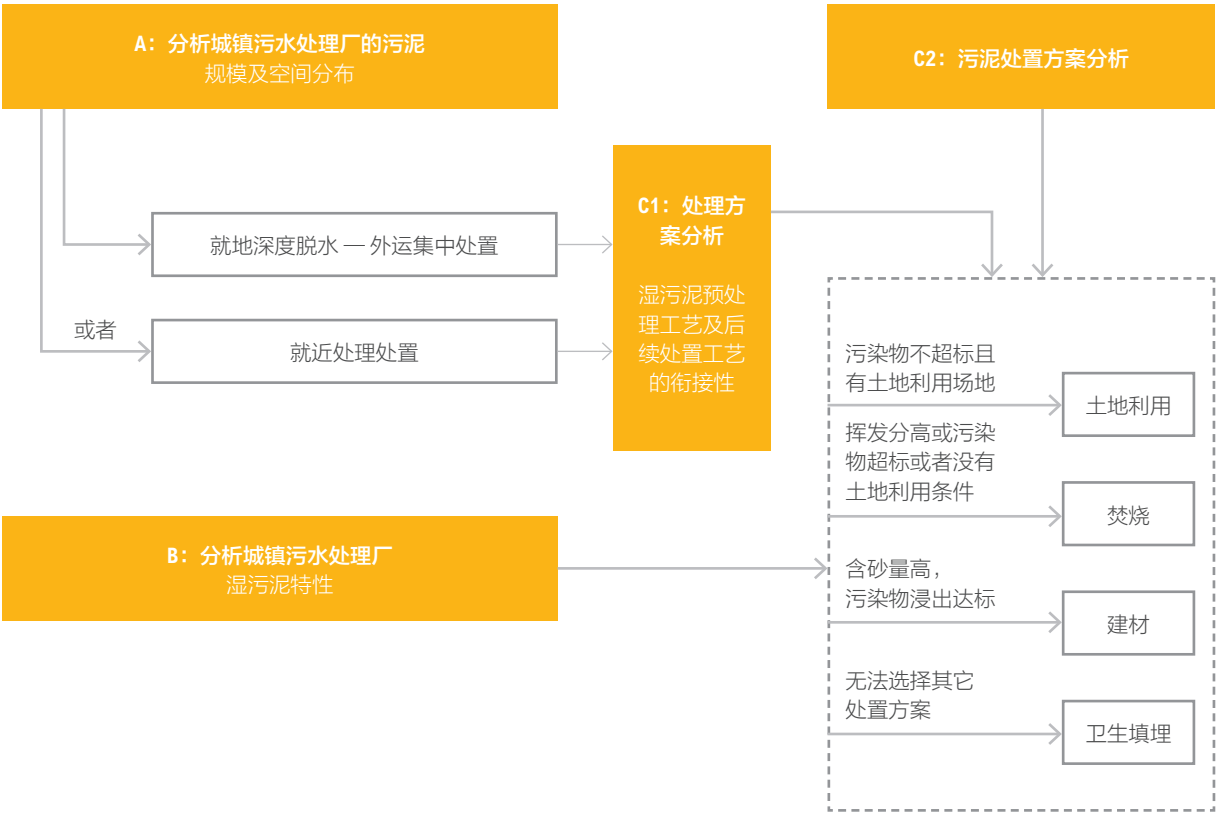


图 14 | 城市或县城有机垃圾联合处置与再利用中心示意图



议采用厌氧消化处理技术；对于中小型污水处理厂产生的污泥，可采用好氧发酵方式进行处理，或可选择就地深度脱水后，再外运到城市污泥或其它有机废弃物的集中处置点；如果污泥干物质中有机质含量低于50%，可考虑联合厌氧消化处理工艺，即混合其它来源的有机废弃物与污泥进行联合厌氧消化。

- 对于经济发达且土地紧张的地区，或者污泥重金属等污染物超标，或者虽然不超标，但辖区范围内没有土地利用条件时，则建议利用现有工业窑炉对污泥进行焚烧处理或者将湿污泥（含水率80%）在污水处理厂进行深度脱水后（含水率约60%~70%）外运，进行焚烧处置。有条件时可首选污泥协同焚烧，特别是在火电厂、水泥厂的协同焚烧。
- 如果污泥重金属等污染物不超标，可选择将污泥稳定化和卫生化处理后进行土地利用，并将污泥土地利用的施用要求和监管措施也纳入规划内容。
- 有条件的地区，应积极推广污泥建筑材料综合利用。污泥建筑材料综合利用是指将污泥进行无机化处理后，用于制作水泥添加剂、砖、轻质骨料和路基材料等。
- 不具备土地利用和建筑材料综合利用条件的污泥，可采用填埋处置。

同时，根据所选择的技术路线，各地区需要考虑建设多个这样的联合处置中心，以便于回收利用污泥中的有机肥料和能源，如图14所示。

## 5.3 建立可持续的资金保障机制

2014年年底，财政部印发《污水处理费征收使用管理办法》，首次将污泥处理处置成本纳入污水处理费的征收范围。随后，国家发改委出台了《关于制定和调整污水处理收费标准等有关问题的通知》（发改价格〔2015〕119号），提高了城市污水处理收费标准，其中：设市城市污水处理收费标准原则上每吨应调整至居民不低于0.95元，非居民不低于1.4元；县城、重点建制镇原则上每吨应调整至居民不低于0.85元，非居民不低于1.2元。但是，即使实施新的收费标准，也很难在所有地区覆盖污水处理和污泥处理处置的全部成本，比如污泥仅考虑以安全处置为要求的填埋处置，资源化或减量化处置则需要额外的资金来源。

为此，建议地方政府对各类污泥处理处置技术的投资和运行层面进行深度成本核算，对于已经达到最低收费标准但尚未补偿成本并合理盈利的，应当进一步提高污水处理收费标准。并确保足额征收，专款专用。同时，各地应当探索多渠道的融资模式，吸引更多社会资本通过特许经营、政府购买服务、股权合作等方

式，积极参与污水/污泥处理设施的投资建设和运营服务。

## 5.4 加强监管，建立信息公开制度

监管是资金合理、有效使用的前提。2015年党的十八届五中全会公报提出：“实行最严格的环境保护制度，深入实施大气、水、土壤污染防治行动计划，实行省以下环保机构监测监察执法垂直管理制度。”垂直管理制度将促进地方政府积极主动地避免污泥处理处置过程的环境问题。

环保部门应该落实城镇污泥处理处置的污染监管职责，定期检查和公示城镇污水处理厂污泥转移“三联单”信息。落实城镇污泥处理处置污染监管的信息公开职责，定期公布所辖地区的城镇污水和污泥处理情况报告，在环保部门官方网站上开设专栏，提供地区污水和污泥处置的信息，并适时更新。

此外，环保部门要加强执法监督力度，限制不达标的工业污水进入城镇污水处理厂，从而降低污泥重金属超标率，增加污泥土地利用的可能性。

住建部门及地方相关部门应该完善我国城镇污水处理厂的污泥基础信息库。汇总和定期公开我国城镇污泥产量、污泥特性、污泥处理处置信息。核实年鉴中各城市污泥产生量的统计口径，做到各城市统计口径完整、一致，确保不漏算、不多算。

## 5.5 本章小结

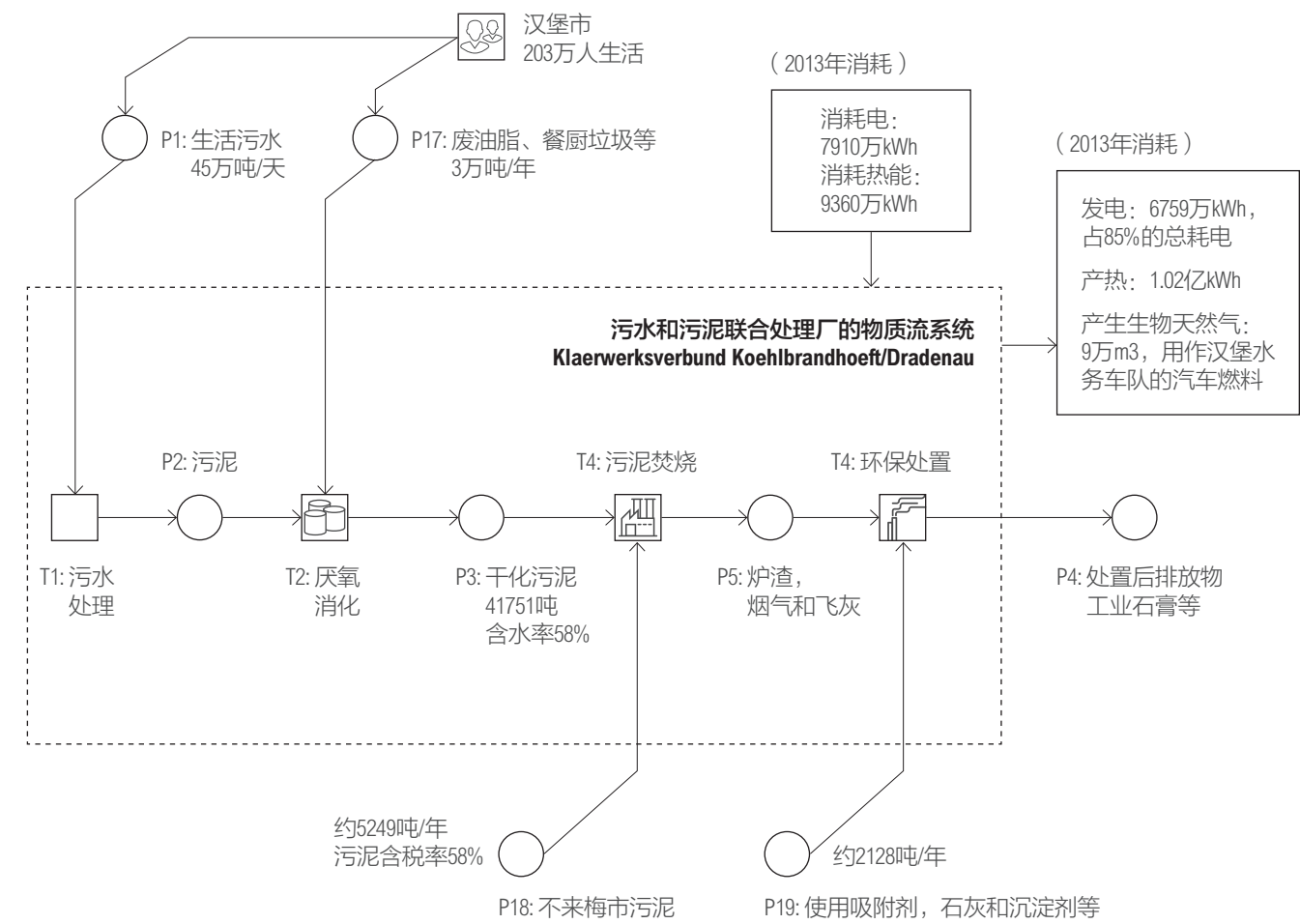
本章为中国城镇污泥管理的各项挑战提出相应的建议。研究认为，首先政府的责任必须到位；其次应该是加强监管，建立严格的污泥台账，做到污泥的去处有迹可查；再次是各部门应协同合作，完善政策和标准，合理选择技术路线，建立可持续的资金保障制度，可以尝试产业化市场发展，政府采购公共服务，以此解决资金问题和专业化问题。

附录1：中德污泥处置成本折算成污水处理费

| 污泥处置费用折算成污水处理费(元/立方米)<br>(污泥含水率 80%) | 平均值<br>(住房和城乡建设部，2011)                    | 德国平均值<br>(B.Wiechmann,2012) | 平均值(余晓东，2008) | 平均值(企业数据，2014) |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| 单独焚烧(含干化)                            | 1.17                                      | 0.60                        | 1.60          | 0.49           |
| 热电厂协同处置                              | 1.00                                      | 0.51                        | /             | 0.89           |
| 污泥与生活垃圾混烧                            | 1.00                                      | 0.54                        | /             | /              |
| 高温好氧发酵                               | 1.02                                      | /                           | 1.58          | /              |
| 厌氧消化                                 | 0.66                                      | /                           | /             | /              |
| 石灰稳定技术                               | 0.53                                      | /                           | /             | /              |
| 填埋                                   | 0.54                                      | /                           | 0.32          | /              |
| 污泥制砖或者养蚯蚓                            | /                                         | /                           | /             | 0.14           |
| 水泥厂混燃(含水率小于 15%)                     | /                                         | 0.57                        | /             | 0.25           |
| 土地(生态)修复(含水率 55% ~ 80%)              | /                                         | 0.22                        | /             | /              |
| 农用，跨地区(含水率 55% ~ 80%)                | /                                         | 0.23                        | /             | /              |
| 农用，本地区(含水率 55% ~ 80%)                | /                                         | 0.16                        | /             | /              |
| 数据来源说明                               | 住建部(住房和城乡建设部) 2011《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》 | 德国官方报告                      | 文献            | 企业数据           |

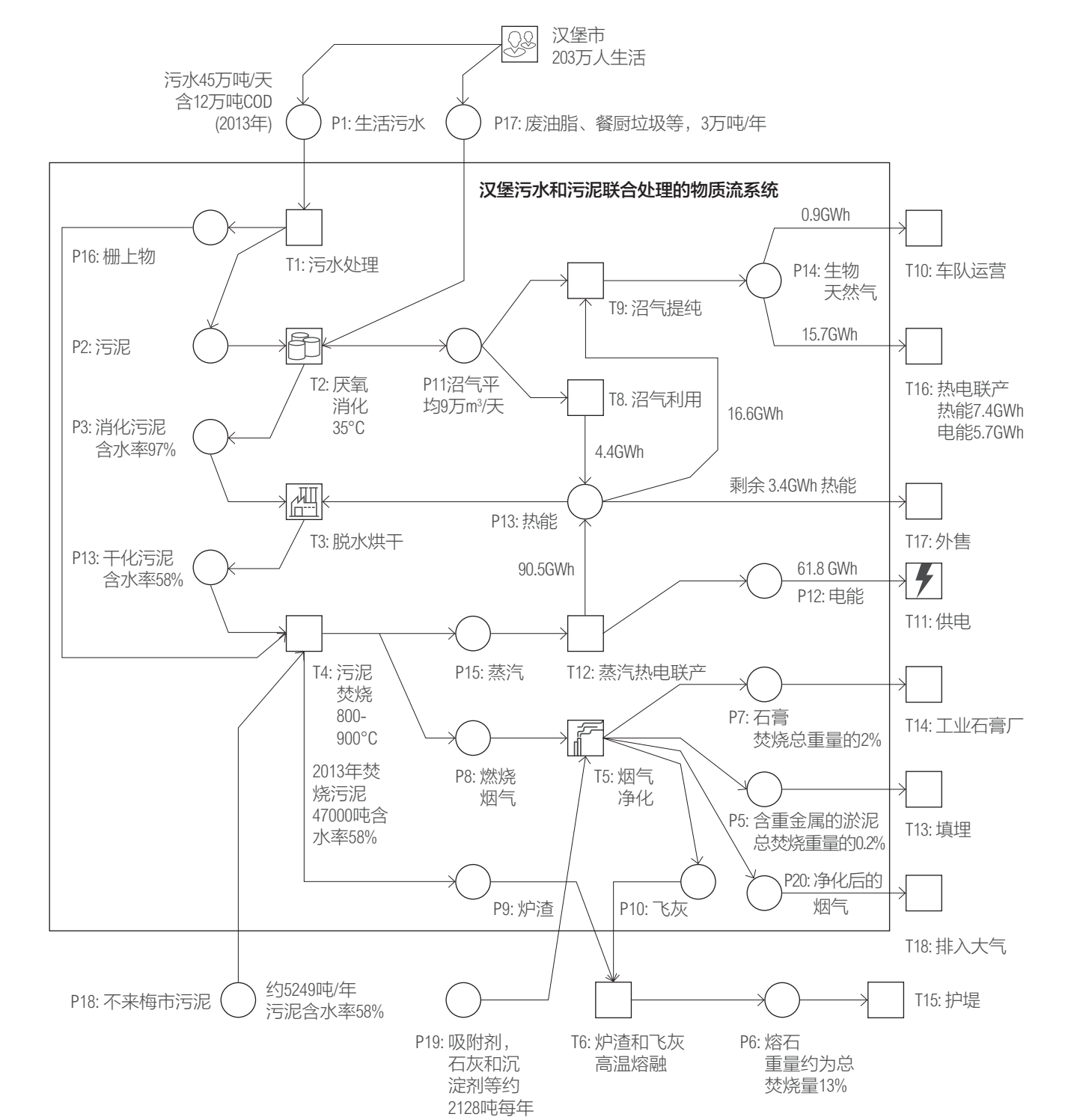
\* 包括折旧和资本利息及运行费，不含征地费。假设每处理万吨污水，产生7吨污泥

附录2：汉堡市污泥处置流程、输入和输出



备注：T表示处理设施 P表示接收、产生或排放的物质及能源  
数据来源：汉堡水务 2013 环境年报 - “Umwelterklärung 2013, Konsolidierte Fassung mit Daten von 2013, HAMBURG WASSER”

附录3：汉堡市污泥处置过程的物质流系统（数量、来源、去向）



备注：T (transition) 表示处理设施带来的转换过程，P (place) 表示接收、产生或排放的物质及能源的来源或去向

## 参考文献

1. 安琳, 蒋海, 邓茜, 欧芳.北京市污泥消纳无害化处置技术探讨[J].市政技术, 2012, 30(1): 98-102.
2. [2]蔡璐等, 2010: 蔡璐, 陈同斌, 高定, 杨军, 陈俊, 郑国砥, 杜伟, 中国大中型城市的城市污泥热值分析, [J]中国给水排水, 2010,26(15): 106-108
3. [3]蔡伟梅, 2013: 蔡伟梅, 城市污水厂污泥特性及综合利用分析——以深圳、佛山、广州三市为例, [J]资源节约与环保, 2013年第6期
4. [4]陈树沛等,2011: 陈树沛, 俞锦豪, 高均贤.我国城镇污水处理厂污泥标准政策体系的沿革与现状探讨, [J]北方环境,2011年4月第23卷第4期
5. [5]陈同斌等, 2003: 陈同斌, 黄启飞, 高定等, 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]环境科学学报, 2003, 23(5): 561—569
6. [6]陈同斌等,2009: 陈同斌, 郑国砥, 高定,城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题[J] 中国给水排水, 2009, 25(9): 104- 1081
7. [7]戴晓虎, 2012: 戴晓虎, 我国城镇污泥处理处置现状及思考, 给水排水, 2012,38(2): 1-5
8. [8]邓舟等, 2012: 邓舟, 王伟, 夏洲, 张超, 张丽颖, 荀锐, 城镇污泥水热干化系统的开发及工程化应用, 中国给水排水, 2012,28(19): 4-8
9. [9]董峙标等, 2012: 董峙标, 乔波, 徐飞, 我国污水处理厂污泥处理现状分析——以大连夏家河污泥处理厂为例, [J]节能, 2012,31(4): 4-8
10. [10]傅涛等, 2012: 傅涛,肖琼,成杨,污泥处理处置市场的困惑与徘徊, 中国水网, 2012, [http://news.h2o-china.com/html/2012/11/110710\\_1.shtml](http://news.h2o-china.com/html/2012/11/110710_1.shtml), 2014.3.18访问
11. [11]黄勤雨, 2013: 黄勤雨,城市污水厂污泥处置技术分析 & 福州市污泥处置的思考, [J]福建建筑,2013 年第05 期。
12. [12]侯风云, 2011: 侯风云, 城市水业市场化演进中的水价改革路径分析六, 《福建论坛·人文社会科学版》2011年第2期
13. [13]郭迎庆等2005.: 郭迎庆,李定龙,王利平. 常州市污水处理厂污泥处置途径探讨[J].江苏工业学院学报,2005,(1).
14. [13]季民,2008: 季民,修正技术政策导向, 发展可持续的污泥处理技术, [J]水工业市场 2008 年第10 期,P6-9
15. [14]仇沛宇, 2010: 仇沛宇, 我国城镇污泥处理处置行业政策及技术分析, [J]水工业市场, 2010年第2期 P11-16 )
16. [15]孔祥娟等, 2012: 孔祥娟, 魏亮亮, 薛重华, 等. 城镇污泥水泥窑协同处置现状与政策需求分析, [J]给水排水, 2012, V01. 38 No. 6
17. [16]李艳霞等, 2003: 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 黄启飞, 吴吉夫, 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用, 生态学报, 2003 Vol.11 NO.23
18. [17]李素花2012: 李素花,王俊岭,. 濮阳市城镇污水处理厂污泥处理处置现状及对策[J]. 河北工业科技,2012,(4).
19. [18]李穗中,2010: 城镇污水厂污泥处理处置技术政策探讨, [J]广州环境科学,2010,第25卷第1期,P25-28.
20. [19]李家祥等, 2013: 李家祥, 贺阳, 范跃华, 4 种污泥干化技术及设备的比较与展望, [J]中国市政工程, 2013 年2 月, 第1 期 ( 总第164 期 )
21. [20]李季等, 2003: 李季, 吴为中. 国内外污水处理厂污泥产生、处理及处置分析[J]污泥处理处置技术与装备国际研讨会论文集. 深圳, 2003: 75—78.
22. [21]林好斌等2010: 林好斌,刘振元,. 宁波市污水处理厂污泥处置现状及发展分析[J]城市道桥与防洪,2010,(5).
23. [22]刘恒明等, 2007: 刘恒明,魏海峰,刘靖,伍怡芳,. 大连市污水处理厂污泥处置现状与展望[J]市政技术,2007,(4).
24. [23]刘洪涛等,2010:刘洪涛, 陈同斌, 杭世霄, 王洪臣, 王伟, 李国学, 孔彦鸿, 不同污泥处理与处置工艺的碳排放分析, [J]中国给水排水, 2010,26(17): 106-108
25. [24]刘顺会等, 2012: 刘顺会, 陈大志, 林秋奇, 吴艳, 利用餐厨和绿化垃圾提高蚯蚓堆肥效率处理剩余污泥的研究, [J]生态环境学报, 2012,21(1): 140-145。
26. [25]路庆斌等, 2010: 路庆斌, 张卫华, 我国城镇污水厂污泥处理处置及政策发展过程分析, [J]水工业市场 2010年第7 期, P34-37
27. [26]马学文等, 2011: 马学文, 翁焕新, 章金骏,中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化, 中国环境科学2011, 31(8): 1306 ~ 1313
28. [27]牟宁, 2013: 污泥中磷回收技术比较分析[J]环境保护与循环经济, P61-63
29. [28]彭洁等, 2013: 彭洁袁兴中\* 江洪伟黄华军毕温凯, 城市污水污泥处置方式的温室气体排放比较分析, 环境工程学报 Vol . 7, No. 6, 2013
30. [29]乔玮等, 2008: 乔玮, 王伟, 尹可清, 城市污泥特性及真空抽滤浓缩实验研究, [J]环境科学, 2008, Vol. 29. No. 4

31. [30]秦翠娟等, 2011: 秦翠娟, 李红军, 钟学进, 我国污泥焚烧技术的比较与分析, [J]能源工程, 2011(1)
32. [31]屈年凯等, 2009: 屈年凯, 园田健一, 熊诚, 汪兆康, 日本污泥干化焚烧40年的处置经验引发对中国污泥市场的思考, [J]第四届中国城镇水务发展国际研讨会暨中国城镇供水排水协会2009年年会论文集。
33. [32]杨其文等, 2103: 杨其文, 雷燕, 三峡库区城市污水厂污泥的处理现状及展望, 重庆三峡学院学报, 2013年第3期, 第29卷(145期),
34. [33]杨向平, 2013: 杨向平, 我国污泥处置的现状与对策, 建设科技, 2007(23)
35. [34]申荣艳等, 2006: 申荣艳, 骆永明, 腾应, 李振高, 城市污泥的污染现状及其土地利用评价, 土壤, 2006, 38(5): 517-524
36. [35]史骏, 2009a: 史骏, 城市污水污泥处理处置系统的技术经济分析与评价(上), [J]给水排水, 2009, Vol. 35 No. 8, P31-35
37. [36]史骏, 2009b: , 城市污水污泥处理处置系统的技术经济分析与评价(下) [J], 给水排水, 2009, Vol. 35 No. 9, P51-57
38. [37]孙晨, 2013: 孙晨, 污泥的中国式处理任重道远, [J]青海科技, 2013(6): 13-14
39. [38]谭启玲等, 2002: 谭启玲, 胡承孝, 赵斌, 陈黎, 吴礼树, 城市污泥的特性及其农业利用现状, [J]华中农业大学学报, 2002, Vol 21 NO.6, P587-592
40. [39]唐传江, 2003: 唐传江, 污泥处置在热电联产机组的处置应用, [J]区域供热, 2013(3): 118-120
41. [40]唐建国等, 2011: 唐建国, 林洁梅, 对城镇污水处理厂污泥处理处置技术路线选择的思考, [J]给水排水, 2011, 37(9): 53-57
42. [41]王彬全等, 2010: 王彬全, 麻红磊, 金余其, 池涌, 严建华, 岑可法, 污泥干化焚烧过程中的能量平衡及经济性分析, [J]热力发电, 2010, 39(7): 14-17
43. [42]王岚, 2010: 王岚, 我国污泥处理处置发展概述, [J]给水排水动态, 2010/8 (中国城镇供水排水协会, 北京100038)
44. [43]王海燕等, 2010: 王海燕, 姚金玲, 武雪芳, 于云江, 王凯军, 王琪, 王宗爽, 国内外城市污水处理厂污泥标准对比研究与建议, [J]给水排水, 2010, 36(10): 27-33
45. [44]王淦等, 2013: 王淦, 彭永臻, 侯红勋, 谢荣焕, 曾薇, 中国南方城市污水厂污泥特性研究及处置对策, 工业用水与废水, 2013, 44(2): 1-7
46. [45]王洪臣, 2010: 王洪臣, 中国污泥处理处置技术路线的初步分析, [J]水工业市场 2010年第7期, p12-15
47. [46]王福浩等, 2012: 王福浩, 李慧博, 陈晓华, 青岛麦岛污水处理厂的污泥中温消化和热电联产, [J]中国给水排水, 2012, 28(2): 49-52
48. [47]王建伟等, 2013: 王建伟, 廖足良, 毕学军, 刘长青, 典型城市污水处理厂污泥无机质含量及含砂率分析, [J]环境工程, 2013年第31卷增刊
49. [48]王凯军, 2009: 王凯军, 为污泥处置提供技术政策导向——《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策(试行)》解读, [J]建设科技, 2009(7) P52-53
50. [49]王楠等, 2010: 王楠, 李悦, 青岛市剩余污泥处置现状分析及资源化利用[J]. 环境科学与管理, 2010, (2)
51. [50]王坤红等, 2012: 王坤红, 孟玉, 邹建勇, 李光, 城市污水厂污泥处理处置技术现状及对策, 中国资源综合利用, 2012年6月, Vol. 30. NO. 6, 44-47
52. [51]汪常青等, 2006: 汪常青, 鲁明星, 梁浩, 余勇, 巩细民, 汪平, 袁浩. 武汉市排水污泥特性及其农用可行性分析, [J]湖北农业科学, 2006年7月, 第45卷第4期
53. [52]魏鹏冉等, 2010: 魏鹏冉, 翟红兵, 张小林. 石家庄市污水处理厂污泥处置现状与对策[J/OL] 河北工业科技, 2010
54. [53]许晓萍, 2010: 许晓萍, 我国城镇污泥处理现状与发展探析, [J]江西化工2010年第3期, P24-32)
55. [54]薛涛等, 2013: 薛涛, 周晨, 我国污泥处理处置技术选择和产业成长之思考, 青海科技, 2013(6): 14-21
56. [55]杨敬辉等, 2011: 杨敬辉, 张松林, 蚯蚓堆肥污泥研究述评, [J]湖北农业科学, 2011, 50(9): 1729-1730
57. [56]杨虎元, 2010: 杨虎元, 我国城市污水污泥处理现状, [J]北方环境第22卷第1期 2010年2月, P79-80
58. [57]杨向平, 2011: 杨向平, 面向十二五的中国污泥处理处置技术方向的思考, 2011(第三届)上海水业热点论坛, 中国水协排水委员会主任发言
59. [58]余杰等, 2007: 余杰, 田宁, 王凯军, 任远, 中国城市污水处理厂污泥处理、处置问题探讨分析, [J]环境工程学报 2007 vol. No. (1) 82-86
60. [59]余杰等, 2009: 余杰, 田宁宁, 我国污泥处理处置有关政策探讨分析, [J]水工业市场 2009年第3期, P7-9

61. [60]余杰, 陈同斌, 高定, 郑国砥, 中国城市污泥土地利用关注的典型有机污染物, [J]生态学杂志, 2011, 30( 10): 2365 – 2369
62. [61]余杰等, 2012: 余杰, 郑国砥, 高定, 刘洪涛, 陈同斌, 城市污泥土地利用的国际发展趋势与展望, [J]中国给水排水, 2012,28(20): 28-30
63. [62]严媛媛等, 2013: 严媛媛, 陈汉龙, 合肥市污水处理厂污泥泥质调查与处理处置技术对策, [J]给水排水, 2013,39(4): 50-55
64. [63]于晓东, 2008: 我国城镇污水处理产生污泥处理、处置研究与政策建议, [J]中国科技成果, 2008年, 第06期
65. [64]张辰, 2010: 张辰, 污水处理厂污泥处理处置技术政策解读与污泥产业十二五展望, [J]水工业市场, 2010年第4期, P23-27 )
66. [65]张贺飞等, 2010: 张贺飞徐燕曾正中郭浩磊潘玉, 国外城市污泥处理处置方式研究及对我国的启示, [J]环境工程, 2010年第28 卷增刊 P34-439
67. [66]张丽霞等, 2012: 张丽霞, 鞍山市污水处理厂污泥处置现状及利用途径分析[J]. 北方环境,2012,(1).
68. [67]张翔等, 2006: 张翔, 宋丽华, 邢莉玲, 等. 城市污水处理厂污泥焚烧处理的探讨. [J]安徽化工, 2006, (5): 50 ~ 51
69. [68]张义安等, 2006: 张义安, 高定, 陈同斌, 郑国砥, 李艳霞, 城市污泥不同处理处置方式的成本和效益分析--以北京市为例, [J]生态环境 2006, 15(2): 234-238 )
70. [69]张永华2012: 张永华, 上海市污水厂污泥处理处置现状及发展趋势[J] 城市道桥与防洪,2012,(9).
71. [70]张韵, 2009: 张韵, 我国城镇污水处理厂污泥处置政策法规现状分析与思考, 给[J]水排水动态-技术交流, 2009/10, P11 )
72. [71]张韵, 2010: 我国污泥处理处置的规划研究, [J]给水排水动态, 2010/8
73. [72]赵晓莉等, 2010: 赵晓莉, 朱伟, 长三角部分城市污泥PAHs质量分数及特征分析, 环境科学研究, 2010 Vol. 23 No.9 P1174-1179
74. [73]周玉文等, 2005: 周玉文, 胡伟, Hohnacker H G, Kuehner R, 田启铭4, 德国污泥处置发展情况和相关政策法规简介, [J]给水排水, 2005.11 V01. 34 No. P17-20.
75. [74]郑伟等, 2012: 郑伟, 李小明, 熊伟等. 污泥热水解处理技术研究进展[J]广州化工,2012(7).
76. [75]住建部等, 2011: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》, 2011.3
77. [76]B.Wiechmann, 2012: B.Wiechmann, C.Dienemann, etc. Klärschlamm-sorgung in Der Bundesrepublik Deutschland, Umwelt Bundes Amt für Mensch und Umwelt,2012
78. [77]BUWAL 2001: BUWAL ( 2001 ) Sonderabfallstatistik 1999, Stand 10.01.2001,BUWAL Industrie- und Gewerbeabfälle. BUWAL, BERNE, Switzerland, Retrieved March 5, 2002 from [http://www.buwal.ch/abfall/docu/pdf/d\\_sonderabfaelle\\_99.pdf](http://www.buwal.ch/abfall/docu/pdf/d_sonderabfaelle_99.pdf)
79. [78]Camp Dresser & McKee Inc. 2011: Charting the Future of Biosolids Management: Final Report, May 2011
80. [79]CCME, 2009: Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME),The Biosolids Emissions Assessment Model(BEAM)-Final Report, July 2009
81. [80]CORDELL ET. AL. 2009: Cordell, Dana; Neset, Tina; White, Stuart; Drangert, Jan – Olof; Mavinic, D., Ashley, K.; Koch, F.: Preferred future phosphorus scenarios: A framework for meeting long-term phosphorus needs for global food demand, International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams, Vancouver May 10th -13th , 2009, IWA Publishing, London, New York (ISBN 1843392321)
82. [81]Davis RD, 1996: The impact of EU and UK environmental pressures on the future of sludge treatment and disposal. [J] CIWEM 1996;10:65–9.
83. [82]EEA, 2002: European Environment Agency ( EEA ), Review of selected waste streams:Sewage sludge, construction and demolition waste,waste oils, waste from coal-fired power plants and biodegradable municipal waste, Technical report 69, 2002 )
84. [83]G. Doka,2006: Gabor Doka, Incineration of Biowaste and Sewage Sludge, ecoinvent2.0 bioenergy 2006
85. [84]Lu,2008:Lu, Hongyan, 《A Cybernetic Model of Material Flow Management:Diagnosing Transitions towards Circular Economy in China》, Sierke Verlag, Goettingen, 2009 ISBN 978-3-86844-115-4
86. [85]Jorge & Dinis, 2013: Jorge & Dinis, Sewage sludge disposal with energy recovery: a review, [J]Waste and Resource Management, 2013 , Volume 166 Issue WR1: 14–28

87. [86]VACCARI, 2009: Vaccari, David A.: Phosphorus: A Looming Crisis, Scientific American, 2009 Nr. 6, S. 54-59 Droht ein Mangel an Phosphor? Spektrum der Wissenschaft, 2009 Nr. 11, S. 78-83
88. [87]Lehrmann, F. (2010): Stand und Perspektiven der thermischen Klärschlamm-sorgungsorgung. Klärschlammbehandlung: Technologien – Wertstoffrückgewinnung – Entwicklungen. VDI Fachkonferenz am 27. und 28. Oktober 2010 in Offenbach
89. [88]M. Takaoka, etc. 2012: Masaki Takaoka, Shingo Domoto, Kazuyuki Oshita, Nobuo Takeda, Shinsuke Morisawa, Mercury emission from sewage sludge incineration in Japan, J Mater Cycles Waste Manag (2012) 14:113–119
90. [89]NEBRA, 2007: North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA), A National Biosolids Regulation, Quality, End Use, and Disposal Survey – Final Report, July 20, 2007
91. [90]J. Hong, etc. 2009: Jinglan Hong, Jingmin Hong b, Masahiro Otaki c, Olivier Jolliet, Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan, Waste Management 29 (2009) 696–703
92. [91]O’ Dette, 1996.: O’ Dette, R.G., 1996. Determining The Most Cost Effective Option for Biosolids and Residuals Management. In Proceedings of the 10th Annual Residuals and Biosolids Management Conference: 10 Years of Progress and a Look Toward the Future. Alexandria: Water Environment Federation.
93. [92]R. Tachibana, etc. 2011: Ryuichi Tachibana, Yuhi Ozaki, Koichi Fujib, material and energz flow analysis in sewage sludge incineration and composting treatment processes, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.44, No. 10. pp 798-802, 2011
94. [93]US EPA, 2009: US EPA, Targeted National Sewage Sludge Survey Overview Report, EPA-822-R-08-014, January 2009
95. [94]X.Li etc. 2013: Xinyi Li, Masaki Takaoka, Fenfen Zhu, Jiawei Wang, Kazuyuki Oshita and Tadao Mizuno, Environmental and economic assessment of municipal sewage sludge management - a case study in Beijing, China, water Science & Technology 2013, 67 ( 7 ) : 1465-1473

## 注释

1. 污泥土地利用是将经过妥善处理至符合一定标准的污泥或其产品作为肥料或土壤改良材料,用于农田利用、园林绿化利用或土地改良等场合。。
2. 数据来源:住房和城乡建设部相关文件。
3. E20研究院发布的《中国污泥处理处置市场分析报告(2016版)》。
4. 王淦,等.中国南方城市污水厂污泥特性研究及处置对策[J].工业用水与废水.2013,44(2):1-7。
5. 王彬全等,污泥干化焚烧过程中的能量平衡及经济性分析,[J]热力发电,2010,39(7):14-17
6. 李艳霞等,中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用,生态学报,2003 Vol.11 NO.23
7. 马学文等,中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化,中国环境科学2011,31(8):1306~1313
8. 谭启玲等,城市污泥的特性及其农业利用现状,华中农业大学学报,2002,Vol 21 NO.6,P587-592
9. B.Wiechmann,etc. Klärschlamm Entsorgung in Der Bundesrepublik Deutschland, Umwelt Bundes Amt für Mensch und Umwelt,2012
10. 陈同斌等,中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势,环境科学学报,2003
11. 路庆斌等,我国城镇污水厂污泥处理处置及政策发展过程分析,[J]水工业市场 2010年第7期,P34-37
12. 赵晓莉等,长三角部分城市污泥PAHs质量分数及特征分析,环境科学研究,2010 Vol. 23 No.9 P1174-1179
13. 申荣艳等,城市污泥的污染现状及其土地利用评价,土壤,2006,38(5):517-524
14. 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)规定
15. 孙晨,污泥的中国式处理任重道远,[J]青海科技,2013(6):13-14
16. 王淦等,中国南方城市污水厂污泥特性研究及处置对策,工业用水与废水,2013,44(2):1-7。
17. 分别来是中国政府(住建部,2011)、企业(成都某公司)、学者(余晓东,2008)和德国政府报告(B.Wiechmann,2012)的污泥处理处置技术的全成本(包含投资、运行)(详见附录1)
18. 负数表示不但没有新增温室气体,还有减排贡献。这里的减排贡献是643.6千克二氧化碳当量。
19. 薛涛,《中国环境报》,2014年10月9日
20. 来源:城市建设统计年鉴
21. 杨向平,我国污泥处置的现状与对策,建设科技,2007(23)
22. 来源:大智慧财经(上海)
23. US EPA. Targeted National Sewage Sludge Survey Overview Report, EPA-822-R-08-014, January 2009
24. 1993年之前,称为欧共体
25. 污泥处理指污泥经历了生物、化学或热处理,长期储存或任何其他适当的过程,从而显著降低其发酵性能和使用它所带来的健康危害(欧洲污泥农用指令中Art2(b))。
26. The European Commission (DG Environment) awarded a contract to Milieu Ltd, together with its partners WRC and Risk & Policy Analysts Ltd (RPA), to prepare a Study on the environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land (DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r).
27. 欧盟27国2010年人口合计4.99亿,根据欧盟统计局预测2020年人口将达到约5.14亿。
28. 在美国的官方文件中通常将污泥称为生物固体物质,即 biosolid。
29. Camp Dresser. Charting the Future of Biosolids Management: Final Report, May 2011
30. A类污泥要求其病原体数量要在检测线以下,对公众接触不造成健康威胁,B类污泥比A类污泥的相关要求稍宽松些,因此B类污泥的土地利用有些限制。
31. 该地区的奥基乔比湖是北美第三大淡水湖。
32. B.Wiechmann, C.Dienemann, etc. Klärschlamm Entsorgung in Der Bundesrepublik Deutschland. 2012
33. B.Wiechmann, C.Dienemann, etc. Klärschlamm Entsorgung in Der Bundesrepublik Deutschland. 2012
34. B.Wiechmann, C.Dienemann, etc. Klärschlamm Entsorgung in Der Bundesrepublik Deutschland. 2012
35. 《德国污泥处置》报告(Wiechmann, 2012)
36. 数据来源<http://www.hamburgwasser.de/abwasserentsorgung-in-zahlen.html>

- 37. 数据来源: Flue gas cleaning at VERA <http://www.faulgas.de/rgweg.htm>
- 38. 数据来源: <http://www.hamburgwasser.de/abwasserentsorgung-in-zahlen.html>
- 39. 德国的自来水达到直饮水的水质标准。
- 40. B.Wiechmann, C.Dienemann, etc. Klärschlamm entsorgung in Der Bundesrepublik Deutschland. 2012
- 41. 数据来源: <http://ctdsb.cnhubei.com/html/ctdsb/20110316/ctdsb1327263.html>

---

## 致谢

在在此向为本工作论文撰写提供了宝贵专业建议和意见的专家们表示衷心的感谢（排名不分先后）：

李 涛 国际水协会

彭光霞 北京中持绿色能源环境技术有限公司

肖 琼 E20环境平台

岳东北 清华大学

付晓天 世界资源研究所

温 华 世界资源研究所

蒋小谦 世界资源研究所

宋 苏 世界资源研究所

同时，我们特别感谢中国社会科学院庄贵阳博士、世界资源研究所李来来博士对本论文提供的中肯意见和指导。感谢蒋乐嘉和吴佳文对论文的出版做出的努力。感谢谢亮对本论文的文字的编辑以及张烨的设计。

## 关于作者

**卢红雁**博士毕业于德国萨尔州立大学物质流管理方向，现为四川大学建筑与环境学院讲师。

电子邮件：[redbird66@qq.com](mailto:redbird66@qq.com), 电话：028-85996013 (o)

**颜炯**博士毕业于德国哥廷根大学环境与资源经济学方向，现为四川大学建筑与环境学院讲师。

电子邮件：[yan\\_jiong@qq.com](mailto:yan_jiong@qq.com), 电话：028-85996013 (o)

**袁敏**是世界资源研究所中国办公室能源项目研究员，从事清洁能源发展和城市低碳发展研究。

电子邮件：[min.yuan@wri.org](mailto:min.yuan@wri.org), 电话：010-6416 5697 分机.63

---

## 关于世界资源研究所

世界资源研究所中国办公室是一家独立的研究机构，其研究工作致力于寻求保护环境、发展经济和改善民生的实际解决方案。

### 我们的挑战

自然资源构成了经济机遇和人类福祉的基础。但如今，人类正以不可持续的速度消耗着地球的资源，对经济和人类生活构成了威胁。人类的生存离不开清洁的水、丰饶的土地、健康的森林和安全的气候。宜居的城市和清洁的能源对于建设一个可持续的地球至关重要。我们必须在未来十年中应对这些紧迫的全球挑战。

### 我们的愿景

我们的愿景是通过对自然资源的良好管理以建设公平和繁荣的地球。我们希望推动政府、企业和民众联合开展行动，消除贫困并为全人类维护自然环境。

### 我们的工作方法

#### 量化

我们从数据入手，进行独立研究，并利用最新技术提出新的观点和建议。我们通过严谨的分析，识别风险，发现机遇，促进明智决策。我们重点研究影响力较强的经济体和新兴经济体，因为它们对可持续发展的未来具有决定意义。

#### 变革

我们利用研究成果影响政府决策、企业战略和民间社会行动。我们在社区、企业和政府部门进行项目测试，以建立有力的证据基础。我们与合作伙伴努力促成改变，减少贫困，加强社会建设，并尽力争取卓越而长久的成果。

#### 推广

我们志向远大。一旦方法经过测试，我们就与合作伙伴共同采纳，并在区域或全球范围进行推广。我们通过与决策者交流，实施想法并提升影响力。我们衡量成功的标准是，政府和企业的行动能否改善人们的生活，维护健康的环境。

---

支持机构



Copyright 2016 World Resources Institute. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.  
To view a copy of the license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>