

# 渗沥液防渗导排系统特性分析

邓志光, 蒋卫列, 吴宗义

(中国市政工程中南设计研究院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 简述了渗沥液导排系统的基本构造, 分析了渗沥液防渗导排系统的运行特性和各种堵塞情况, 介绍了国内外现场和实验室试验研究结果: 堵塞情况与渗沥液的浓度和流量、导排系统过滤的材料粒径、级配及初始孔隙率相关。提出了导排系统设计的主要原则及导流层的设计要求。

**关键词:** 生活垃圾填埋场; 垃圾层; 渗沥液导排系统

**中图分类号:** X33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8206 (2009) 04-0004-05

## Characteristics Analysis of Leachate Drainage System

Deng Zhiguang, Jiang Weilie, Wu Zongyi

(Middle-South China Municipal Engineering Design and Research Institute, Wuhan Hubei 430010)

**Abstract:** Basic structure of leachate drainage system was sketched. Operating characteristics and plugging cases of leachate drainage system were analyzed. Experiment research results in the field and the laboratory at home and abroad were introduced. The results showed that plugging situation was related to concentration and flow of leachate, grain size of filter material, gradation and initial porosity of filtration in drainage system. The main principles and design requirement of drainage system were put forward.

**Key words:** domestic waste landfill site; waste layer; leachate drainage system

## 1 导排系统的基本构造

过滤和导排是渗沥液收集系统的主要功能。其设计的基本原则: 使得渗沥液顺利排除、限制固体颗粒的迁移, 防止堵塞。其中化学和生物作用对整个系统的运行效率和寿命的影响至关重要。

填埋场渗沥液收集导排系统由位于填埋场底部较低位置的砾石盲沟和埋设其中的穿孔管组成。对于平坦的填埋场, 其底部可以设置多条盲沟。间距为 50~200 m。早期的渗沥液盲沟系统为了防止堵塞, 采用了 3 种构造, 见图 1: ①整个盲沟系统各组成部分无任何分隔过滤; ②在盲沟内的穿孔管包裹土工布作为过滤层防止固体颗粒进入; ③在盲沟系统与填埋垃圾之间敷设土工布分隔层, 防止固体颗粒进入盲沟。

上述 3 种方式均存在渗沥液导排不畅而积累升高的情况, 实验室试验和填埋场现场调查研究发现, 随着渗沥液的汇流通过导排盲沟系统, 有机物负荷、无机物负荷和悬浮物负荷增加, 并最终导致堵塞。

早期的导排系统主要由砂组成, 极易导致堵塞。而现代的渗沥液导排系统由不同粒径 ( $d > 25$  mm) 的砾石敷设于整个库底, 并采用土工布将导排系统与垃圾层隔离, 见图 2。

在美国, 有些填埋场采用土工格栅替代砾石

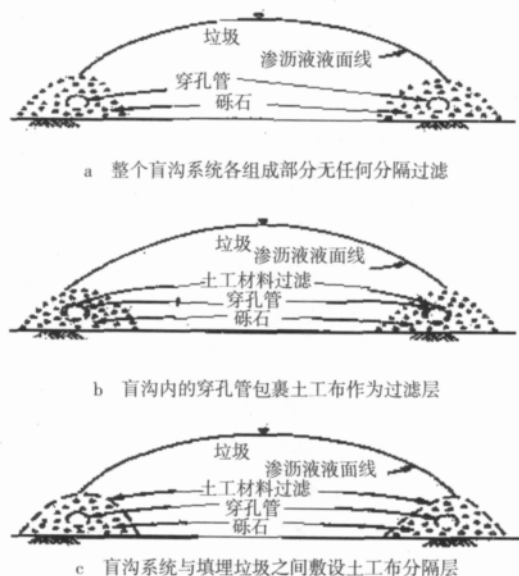


图 1 早期的渗沥液盲沟系统

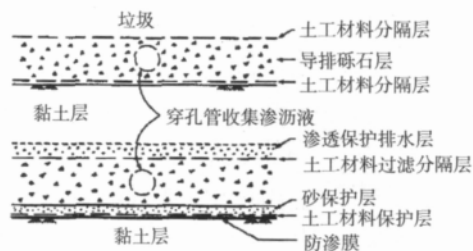


图 2 现代填埋场导排系统

导排层, 以节省部分填埋空间。此系统需要上层土工布分隔层, 并可能有蠕变和杂物突入影响正

常运行的情况发生。这种导渗层长期使用可能存在受压变形和堵塞, 因此不宜将土工格栅作为主要的渗沥液导排系统。

2 填埋场渗沥液导排系统堵塞情况分析

2.1 近 20 a 填埋场现场调查结果

国外对大量填埋场渗沥液导排系统的现场调查发现, 由于微生物活动和进入颗粒的共同作用, 导渗层的结垢堵塞严重, 系统向集液穿孔管输送渗沥液的能力下降。现场分析发现导渗层中渗沥液厌氧菌浓度达到  $10^5 \sim 10^7$  个/mL, 厌氧条件使矿物质产生沉淀, 导致导渗层堵塞。沉淀物的主要成分是钙铁的碳酸盐和硫酸盐。通过试验发现, 导渗层的结垢堵塞情况与渗沥液的浓度密切相关, 如 COD 50~80 g/L,  $\text{Ca}^{2+}$  3 500 mg/L 的渗沥液大流量通过导渗层, 很快在导渗层和穿孔管发现结垢现象, 而相应浓度为 COD 1 g/L,  $\text{Ca}^{2+}$  130 mg/L 的渗沥液的低流量通过导渗层未发现结垢现象。研究表明: 高浓度的有机物和无机物是导渗层堵塞的主要原因; 堵塞物的主要成分是碳酸钙 (含量>55%), 一定量的 Si、Fe 和少量的 Mg, 见表 1。

| 表 1 导渗层中渗沥液结垢物质成分 |       |      |     |     |        | %                     |
|-------------------|-------|------|-----|-----|--------|-----------------------|
| Ca                | 碳酸盐   | Si   | Mg  | Fe  | m (Ca) | /m (CO <sub>2</sub> ) |
| 20~37             | 30~57 | 2~16 | 1~5 | 1~8 |        | 47~71                 |

荷兰一个使用了 4 a 的填埋场挖掘调查发现: 渗沥液 COD 和 BOD 的浓度分别为 14. 8 g/L 和 10 g/L, pH 6. 3。导渗层为粒径 50 mm 的均匀白云石材料, HDPE 穿孔管埋设其中。大量的黑色柔软淤泥覆盖在导渗层砾石表面, 砾石间的空隙也主要被其占据, 导渗层底部饱和区域空隙被占据 50%~100%, 上部未饱和区域 30%~60%。现场测定的导渗层水力渗透系数较初始状态下的导渗层水力渗透系数下降 2~3 个数量级。穿孔管的全部下部孔眼和部分上部孔眼 (孔径 8 mm) 被堵。堵塞物成分的 50% 以上是  $\text{CaCO}_3$ 。对比有无土工布分隔层的作用发现, 具有土工布分隔层 (180 g/m<sup>2</sup>) 的导渗层的砾石空隙的堵塞率为 0~20%, 大大低于无土工布分隔层的情况。分隔层减少了颗粒进入导渗层, 发生在导渗层的堵塞是真正意义的化学沉淀堵塞。穿孔管内有胶接状的沉淀物积累, 多数沉淀物的尺寸大于孔眼直径, 因此推断这些沉淀物是在管内形成的。学者认为渗沥液导排系统的环境条件类似于厌氧生物滤池。

3 加拿大某填埋场经过 20 a 运行的导渗系

统 (由砂和穿孔管构成), 导渗层上的渗沥液深度达到 10 m 以上, 可见其堵塞的严重程度。

近年来国内少数填埋场由于采用了不符合规范要求的导渗系统, 特别是采用土工布包裹导渗管, 投产半年即告完全堵塞。

2.2 实验室研究结果

2.2.1 对导渗层堵塞的研究结果

- 1) 采用粗粒径的导渗材料可降低堵塞程度。
- 2) 细小粒径、级配良好的导渗层容易堵塞。
- 3) 在垃圾与导渗层间的分隔层可能发生堵塞。
- 4) 堵塞物是黑色沥青状的物质, 主要成分是有机物、碳酸钙, 部分铁硫化物。

2.2.2 不同分隔材料的研究

通过研究导渗层在近 4 a 使用时间条件下孔隙率的变化, 判断分隔处理性能。

研究了以下几种材料: 轻型无纺聚丙烯针刺土工布 (235 g/m<sup>2</sup>); 重型无纺聚丙烯针刺土工布 (475 g/m<sup>2</sup>); 有纺缝合土工布 (140 g/m<sup>2</sup>); 级配砾石和级配砂过滤层。

研究表明, 由砾石过滤层保护的导渗层堵塞率大大低于没有过滤层的情况; 级配砾石过滤层的堵塞十分严重, 而级配砂过滤层完全胶接, 导渗层功能基本丧失。在设计中应尽可能避免采用。

在导渗层与垃圾层之间设置过滤层有利于减少渗沥液携带进入导渗层的颗粒, 减少导渗层的有机物和无机物的负荷。

2.3 在垃圾层与导渗层之间设置分隔层的堵塞情况

土工布广泛应用于作为垃圾层与导渗层的分隔。它具有的过滤和分隔作用可以减少颗粒进入导渗层而占据导渗层材料的孔隙率。设计中根据需要分隔的材料粒径以及分隔材料自身的孔隙率进行选择。

研究表明, 在较短时间内微生物不可能分解利用土工布纤维以获得碳和其他营养元素。在实际工程应用中尽量采用大孔隙率的土工布 (轻型针刺无纺土工布), 可缓解垃圾中细小颗粒的堵塞。土工布分隔层的敷设位置十分重要。国外研究人员将土工布的堵塞情况量化, 假设整个导渗层满铺土工布对导排系统效率堵塞影响系数 DCF 为 1, 而将盲沟用土工布包裹的 DCF 为 500~1 000, 而用土工布包裹穿孔管的 DCF 高达 24 000, 可见, 前述的填埋场导渗系统使用半年即完全堵塞就不足为奇了。据调查, 国内填埋场导渗系统故

障多数与此分隔层的设置不当有关。因此工程中不应用土工布包裹导渗层或渗沥液导排管，这 2 种方式都严重影响导渗层发挥正常作用。

上述研究仅限于颗粒的扩散、截留、沉淀和范德华力作用的物理堵塞，未考虑生物和化学作用。实际上，导渗层的堵塞包括物理、化学和生物共同作用结果，见图 3，如果设计只考虑颗粒直径和土工布孔隙率的物理分隔作用显然不够全面。研究表明，由于土工布的巨大表面积，易于微生物的生长，生物膜会在土工布的表面积聚，形成泥饼，使得渗沥液难以进入导渗层。

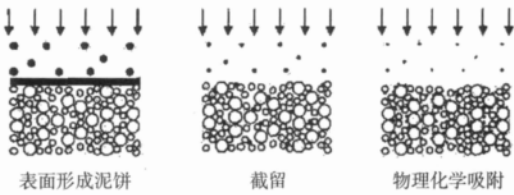


图 3 悬浮颗粒过滤截留机制

生物膜在土工布纤维表面和整个土工布表面形成示意图 4。

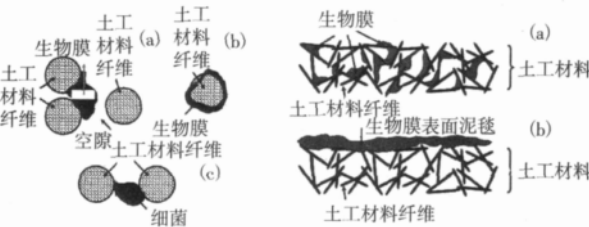


图 4 生物膜在土工布纤维表面和整个土工布表面形成

垃圾中有机物在降解过程中，会产生大量的挥发性脂肪酸 VFAs，微生物在厌氧条件下分解 VFAs，使丙酸和丁酸分解为乙酸，导致导渗层中的环境发生变化：①微生物自身繁殖积聚，导致在导渗层材料表面生成生物膜，形成生物堵塞；②生物降解的过程使得渗沥液的 pH 发生变化，特别是碳酸平衡变化，产生碳酸钙和硫化物的沉淀物，形成化学堵塞。

导渗层堵塞的影响包括：堵塞导致导渗层空隙率减少，渗透率下降，渗沥液积聚导致水位升高，向防渗系统外部渗透作用水头的增加，增加了外渗的可能性；渗沥液积聚使得导渗层的温度上升，一般可达 50~60℃，使得渗沥液的扩散系数增大 2~3 倍，也增加了渗沥液外渗的可能性；环境温度的上升使得防渗材料的使用寿命减少（15℃条件下，HDPE 膜的使用寿命为 200 a；在 33℃时，其使用寿命下降到 70 a）。因此国内外的防渗系统的导排系统设计要求按照渗沥液的深

度不超过 0.3 m。

图 5~6 表示了导渗层滤料周边和颗粒空隙中生物膜的生长过程。滤料颗粒周边的生物膜最终会彼此联系进而导致导渗层的空隙率下降到无法顺利排除渗沥液。渗沥液在填埋场库底大量聚集，一方面增加透过防渗层外漏的可能性，改变填埋场库底即垃圾坝的初始设计条件；另一方面可能导致库底超设计的沉降、垃圾坝的稳定性和安全性也受到威胁。

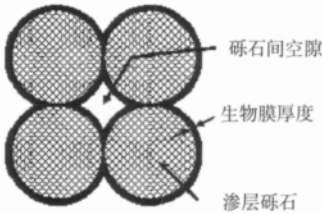


图 5 初期的生物膜形成情况

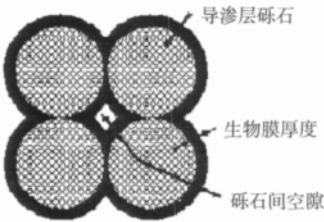


图 6 后期的生物膜形成情况

国外学者在 2004 年进行了大量试验，将渗沥液通过模拟的导渗层，研究导渗层堵塞的过程中主要物理参数和化学成分的变化规律。

① 导渗层滤料颗粒的空隙率变化：在开始试验的前 50 d，导渗层的空隙率变化很小。随着试验持续时间的延长，导渗层开始发生堵塞，8 个月后，表层空隙率由初始的 0.35~0.40 下降到 0.02，下降了 90% 以上，底层的空隙率下降了 37%，见表 2。

表 2 导渗层滤料颗粒的空隙率变化

| 试验持续时间/d | 导渗层表层滤料空隙率/% | 导渗层底层滤料空隙率/% |
|----------|--------------|--------------|
| 0~50     | 33           | 35           |
| 100      | 25           | 29           |
| 150      | 12           | 22           |
| 200      | 3            | 17           |
| 250      | 2            | 13           |

② 无机沉淀物在滤料表面厚度变化：由于无机沉淀物在滤料表面的聚集，导渗层滤料的空隙率减少。导渗层表层滤料无机物厚度增长 39 倍，说明固体颗粒的机械堵塞是导渗层堵塞的主要原因之一。导渗层底层滤料无机物厚度增长 29 倍。



从表层与底层的沉淀物厚度的比较分析, 无机物堵塞主要发生在滤料表面, 见表 3。

| 表 3 无机沉淀物在滤料表面厚度变化 |                   |                   |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| 试验持续时间/d           | 导渗层表层滤料无机沉淀物厚度/cm | 导渗层底层滤料无机沉淀物厚度/cm |
| 0~50               | 0. 002            | 0. 001            |
| 100                | 0. 009            | 0. 004            |
| 150                | 0. 030            | 0. 008            |
| 200                | 0. 065            | 0. 022            |
| 250                | 0. 080            | 0. 030            |

3 挥发性物质 (生物膜) 在滤料表面集聚的厚度变化: 由于挥发性物质在滤料表面的聚集, 导渗层滤料的空隙率减少。运行 150 d 后, 底层的生物膜厚度大于无机沉淀物的厚度; 在滤料层中部, 250 d 以上的生物膜厚度小于 200 d 的, 这是由于随着生物膜的增长, 使得渗沥液的通道断面减少, 局部流速增大产生冲刷, 导致部分生物膜脱落。而无机沉淀物不会被冲刷脱落, 因此厚度没有减少, 见表 4。

| 表 4 挥发性物质在滤料表面集聚的厚度变化 |                   |                   |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| 试验持续时间/d              | 导渗层表层滤料挥发性物质厚度/cm | 导渗层底层滤料挥发性物质厚度/cm |
| 0~50                  | 0. 008            | 0. 007            |
| 100                   | 0. 018            | 0. 016            |
| 150                   | 0. 032            | 0. 021            |
| 200                   | 0. 038            | 0. 025            |
| 250                   | 0. 022            | 0. 033            |

4 乙酸、丁酸、钙浓度的变化: 在试验的前一段时间 (50 d), 乙酸降解较少, 而丁酸降解较快, 而丁酸的降解产物是乙酸。在 100 d, 乙酸和丁酸的降解均较快, 使得环境的 pH 发生变化, 产生碳酸钙沉淀, 渗沥液中的钙的浓度降低较多, 见表 5~7。

挥发性悬浮物包括活性和非活性降解物, 是滤料表面挥发性生物膜的主要来源。末期浓度增

| 表 5 渗沥液中乙酸浓度的变化 |                  |                  |
|-----------------|------------------|------------------|
| 试验持续时间/d        | 导渗层表层乙酸浓度/(mg/l) | 导渗层底层乙酸浓度/(mg/l) |
| 0~50            | 6 000            | 5 700            |
| 100             | 6 000            | 4 200            |
| 150             | 6 000            | 2 300            |
| 200             | 6 000            | 2 200            |
| 250             | 6 000            | 3 100            |

| 表 6 渗沥液中丁酸浓度的变化 |                  |                  |
|-----------------|------------------|------------------|
| 试验持续时间/d        | 导渗层表层丁酸浓度/(mg/l) | 导渗层底层丁酸浓度/(mg/l) |
| 0~50            | 1 500            | 900              |
| 100             | 1 500            | 420              |
| 150             | 1 500            | 390              |
| 200             | 1 500            | 400              |
| 250             | 1 500            | 530              |

| 表 7 渗沥液中钙浓度变化 |                 |                 |
|---------------|-----------------|-----------------|
| 试验持续时间/d      | 导渗层表层钙浓度/(mg/l) | 导渗层底层钙浓度/(mg/l) |
| 0~50          | 750             | 700             |
| 100           | 750             | 500             |
| 150           | 750             | 210             |
| 200           | 750             | 200             |
| 250           | 750             | 380             |

加主要是生物膜脱落所致。其浓度变化见表 8。

| 表 8 渗沥液中挥发性悬浮物浓度变化 |                      |                      |
|--------------------|----------------------|----------------------|
| 试验持续时间/d           | 导渗层表层挥发性悬浮物浓度/(mg/l) | 导渗层底层挥发性悬浮物浓度/(mg/l) |
| 0~50               | 300                  | 260                  |
| 100                | 300                  | 250                  |
| 150                | 300                  | 240                  |
| 200                | 300                  | 265                  |
| 250                | 300                  | 320                  |

无机悬浮物包含惰性生物、矿物质沉淀物、土壤颗粒, 是滤料表面无机沉淀物的主要来源。运行数据表明, 表层和底层浓度变化主要是滤料的机械过滤作用所致。其浓度变化见表 9。

| 表 9 渗沥液中无机悬浮物浓度变化 |                     |                     |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| 试验持续时间/d          | 导渗层表层无机悬浮物浓度/(mg/l) | 导渗层底层无机悬浮物浓度/(mg/l) |
| 0~50              | 300                 | 110                 |
| 100               | 300                 | 80                  |
| 150               | 300                 | 30                  |
| 200               | 300                 | 20                  |
| 250               | 300                 | 20                  |

2. 4 主要结论

1) 导渗层的滤料尽可能采用大粒径的砾石, 使得滤料的空隙率可以容纳更多的渗沥液携带的颗粒, 推迟导渗层的堵塞和渗沥液水位的抬升。

2) 减少导渗层材料的表面积, 减少微生物的附着生长, 从而减少有机物的分解和无机物的化学沉淀。

3) 为导渗层系统提供较大的坡度, 对于多排渗沥液导排穿孔管, 减少穿孔管的间距, 以利渗沥液尽快通过导渗层, 减少渗沥液的停留时间。

4) 在垃圾层与导渗层之间设置土工布分隔层有利于减少垃圾中的固体颗粒进入导渗层而产生的堵塞, 土工布宜采用长丝无纺轻型, 减少土工布表面的堵塞。

3 导渗系统设计参数

我国目前关于导渗层的设计缺乏基本方法的摸索和相关参数的研究, 设计往往采用经验值。国外在此方面进行了大量的研究, 在总结近百年填埋场使用经验基础上, 提出了一套较完整的设计理论和方法。

### 3.1 主要设计原则

- 1) 导渗层底坡至少 2%。
- 2) 导渗层厚度 0.3 m, 渗透系数大于  $1 \times 10^{-2}$  cm/s; 渗沥液的深度在任何时候不宜超过 0.3 m。
- 3) 应具有防淤堵能力。
- 4) 导渗层应位于季节性地下水高水位之上。
- 5) 导渗层材料应能够抵御渗沥液的化学腐蚀。
- 6) 必须能及时、有效地导排汇于填埋场边坡和场底垃圾渗沥液; 导渗层中穿孔管的管径应满足 25 a 重现期的 24 h 降雨量能够在 3 d 内排出; 其机械强度和变形模量应能承受作业设备作业和设计填埋高度垃圾负荷。

7) 砾石导渗层的要求: 去除小于 2 mm 的颗粒, 最大粒径 5 cm,  $D_{10}$  为 4.5~5.0 mm, 并考虑穿孔管的孔径尺寸。

8) 在垃圾层与导渗层间应设置土工布分隔层。

### 3.2 渗沥液导流层设计要求

1) 为防止淤堵, 宜在导流材料上铺设过滤材料。过滤材料通常使用土工织物, 如长丝针刺土工织物。

2) 导流层应设置导流盲沟, 以利于渗沥液的

顺利排出, 同时应设置次盲沟, 以增加渗沥液导排能力。

3) 在盲沟内铺设穿孔管, 管材宜选用 HDPE 材料, 管径应根据渗沥液产生量及其他有关因素确定。应对管材的壁厚和承压强度进行复核。

4) 盲沟碎石的粒径宜在 60 mm 左右; 尽可能选择卵石或棱角光滑的砾石 ( $\text{CaCO}_3$  含量不得大于 10%)。

### 参考文献

- [1] Rowe R K, VanGulck J F. Filtering and Drainage of Contaminated Water [C]. 4<sup>th</sup> International Conference on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, Stellenbosch, South Africa, 2004: 3-5, 30-32.
- [2] Giroud J P. Granular Filters and Geotextiles Filters [C]. Proceedings of Geofilters, Montreal, Quebec, Canada, 1996: 565-680.
- [3] Giroud J P. Filter criteria For Geotextiles [C]. Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1982: 103-108.
- [4] 李颖. 城市生活垃圾卫生填埋场设计指南 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [5] CJJ 17—2004 生活垃圾卫生填埋技术规范 [S].
- [6] 邓志光, 李永海. 生活垃圾管理与处理技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

作者简介: 邓志光 (1958—), 教授级高级工程师, 主要从事水处理和垃圾处理。

·信息·

## 欢迎订阅 2010 年《环境卫生工程》

《环境卫生工程》以从事市容环境卫生、市政、环保等行业的管理、科研、教学、生产、信息、环境监测人员和一些大专院校、图书馆及其他环境科技工作者为服务对象, 主要刊登国内外有关环境卫生的发展状况, 城市生活处理及相关的研究成果、设计方案、管理方法和实践经验, 政策法规, 行业标准等。承接国内外设备、设施、车辆、专利、清洁制剂、市容设备设施、灯光设备、信息、技术等广告, 是环卫生产厂家宣传、推广产品的良好媒体。

本刊具有较高的工程实践性、导向性和学术性, 是中国市容环境卫生行业最具权威性和影响力的刊物, 在国内享有很高的声誉, 现已成为中国科技论文统计源期刊 (中国科技核心期刊)、中国期刊网全文收录期刊、中国学术期刊 (光盘版) 全文收录期刊、中文科技期刊数据库全文收录期

刊, “万方数据——数字化期刊群”全文上网期刊, 并通过中国国际图书贸易总公司在海外发行。

本刊为双月刊, 逢双月末出刊, 全年定价 80 元 (含邮费)。本刊邮发代号: 6-191, 全国各地邮局均可订阅。

编辑部地址: 天津市河西区围堤道 107 号

邮编: 300201

联系电话: 022-28365069

传真: 022-28365069

http://www.srhj.org.cn

e-mail: srhj@public.tpt.tj.cn

收款单位: 《环境卫生工程》编辑部

开户银行: 天津银行绍兴道支行

银行帐号: 214001201090136764