

## 中国环境岩土工程的进展

陈云敏<sup>1</sup> 施建勇<sup>2</sup> 朱伟<sup>3</sup> 詹良通<sup>1</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 地下水土环境污染评估、控制及修复已成为我国环保领域的重大需求。利用岩土工程的手段来解决水土环境污染问题是最为经济、最符合国情的途径之一, 也是环境岩土工程工作者的优势所在。本文结合我国水土环境污染控制方面重大需求及现阶段我国急需解决的环境岩土工程问题来阐述环境岩土工程研究及工程实践进展, 主要包括城市固体废物可持续填埋处置, 废弃泥的工程特性、工程处置及资源化利用, 土体和地下水污染评价与防治和土工合成材料在环境岩土工程中应用。

**关键词:** 固体废物; 填埋处置; 废弃泥; 土体污染; 地下水污染; 土工合成材料; 可持续防控; 资源化利用

**中图分类号:** TU375.4 **文献标识码:** A

**文章编号:** ( )

### Advances in geoenvironmental engineering in China

Chen Yunmin<sup>1</sup> Shi Jianyong<sup>2</sup> Zhu Wei<sup>3</sup> Zhan Liangtong<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310058; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098; 3. College of Environmental Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098)

**Abstract :** Evaluation, control and remediation of soil and groundwater contamination has become a great demand in the area of environmental protection in China. The utilization of geotechnical engineering technique in solving the underground contamination problem is one of the most economical and feasible approach in China, and what the geoenvironmental engineers are good at. Recent advances in the research and engineering practice of geoenvironmental engineering are presented in this paper. The main contents include sustainable landfilling of municipal solid wastes, engineering property, disposal and reuse of abandoned soils, assessment and control of soil and groundwater contamination, and application of geosynthetics in geoenvironmental engineering.

**Keywords :** Solid wastes; landfill disposal; abandoned soils; soil contamination; groundwater pollution; geosynthetics; sustainability; recovery and reuse

**E-mail:** chenyunmin@zju.edu.cn

### 引 言

密集型人类生活和生产方式必然产生大量的废弃物, 而地球岩土圈是废弃物的主要及最终处置场所。我国固体废物产量巨大, 目前年产城市生活垃圾 2.4 亿吨、污泥 2 千多万吨、工业固体废物 12 亿吨、尾矿 6 亿吨和核废料 1000 吨, 这些固体废物以填埋处置为主, 全国城镇废弃物集中式处理设施达 4790 个。我国的江河湖海沉积着数百亿立方米受污染的底泥, 成为水体的内污染源。我国有成千上万座废弃的

化工厂址, 数以万计的化工品储库、油库、干洗店等, 正威胁周边地下环境安全。我国二氧化碳排放量达 67 亿吨, 地下埋存被认为是实现碳减排及缓解全球气候变暖的有效措施之一。这些废弃物处置场所都是地下环境集中污染源, 是潜在的地下炸弹。

近年来我国水土环境污染事故频发, 引发一系列

本文为第十一届土力学及岩土工程学术会议主题报告。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51009121; 50878194; 51010008)、中央高校基本科研业务费专项资金(2010XZZX001; 2010KYJD006)、苏州市科技支撑计划项目(编号: 520324)

**作者简介:** 陈云敏, 男, 1962 年生, 博士, 主要从事环境土工、基础工程和土动力学研究。

**收稿日期:**

# 样式

社会与环境危机，并造成重大经济损失。2001~2008年，我国固体废弃物堆填场污染引发的突发环境事件年均55次，造成的直接经济损失高达10亿元。2008年山西省襄汾尾矿坝溃坝事故，流失尾矿 $26.8 \text{万 m}^3$ ，流经长度达2公里，过泥面积达30.2公顷，造成278人死亡和严重的环境污染。2009年广东某城市固体废弃物堆填场发生污泥坑管涌，流失污泥6万多 $\text{m}^3$ ，流经长度十多公里，直达香港后海湾。2010年福建上杭县紫金矿业发生强酸性渗滤液泄漏事件， $9100\text{m}^3$ 的渗滤液顺着排洪涵洞流入汀江，导致汀江部分河段污染及大量鱼类死亡。2011年浙江省德清县浙江海久电池股份有限公司铅污染造成了附近部分儿童血铅检测超标，这起事件也引起了浙江蓄电池行业内的“大地震”，213家蓄电池企业停产整治。

近年来国家相关部门对水土环境污染问题高度重视。《国家中长期科学和技术发展规划纲要 2006~2020》：把“污染物控制与废弃物资源化利用技术”、“长江、黄河等重大江河综合治理”等列为优先主题，设立“水体污染控制与治理”重大专项。《重金属污染综合防治“十二五”规划》成为第一个得到国务院批复“十二五”国家规划。第一次全国污染源普查工作已于2009年结束。国家环保部正在组织制订《污染场地风险评估技术导则》、《场地环境监测技术导则》、《污染场地土壤修复技术导则》等。

可见，水土环境污染评估、控制及修复已成为我国环保领域的重大需求。鉴于我国目前国情和经济发展水平，利用岩土工程的手段来解决水土环境污染问题是最为经济、最符合国情的途径之一，也是环境岩土工程工作者的优势所在。因此，环境岩土工程工作者正面临着前所未有的机遇和挑战。本文结合我国水土环境污染控制方面重大需求及现阶段我国急需解决的环境岩土工程问题来阐述我国的研究进展，主要包括城市固体废弃物可持续填埋处置，废弃泥的工程特性、工程处置及资源化利用，土体和地下水污染评价与防治和土工合成材料在环境岩土工程中应用。

## 1 城市固体废弃物可持续填埋技术

城市固体废弃物工程特性复杂，填埋场服役环境极端，容易引发在役填埋场城市环境灾害，主要包括填埋场失稳流滑，引发灾难；填埋场渗滤液渗漏，污

染城市地下水土环境；填埋气无序扩散污染城市空气，引发火灾和爆炸、加剧温室效应等。以美国为代表的西方发达国家正发展可持续填埋技术。“可持续”填埋的内涵主要包括有效防控填埋场城市环境灾害，实现固废处理的无害化；大幅增加单位土地面积填埋量、减少渗沥液产量和填埋气排放量，实现固废处理的减量化；高效收集和利用填埋气，实现固废处理的资源化。

我国城市固体废弃物产量超过2亿 $\text{t}/\text{年}$ ，且仍以每年8~15%高速增长，全国城市固废积存量超过50亿 $\text{t}$ 。我国现有上万座城市固体废弃物堆填场需进行无害化评估及治理，未来二十年还需新建1400多座城市固体废弃物堆填场。我国亟需开展填埋场孕育城市环境灾害机理、评估方法与可持续防控的科学基础理论研究，发展可持续填埋技术，以满足填埋场城市环境灾害防控、渗滤液减量、填埋气资源化的重大需求。

### 1.1 固废含水、持水特性及渗滤液减量

我国城市固体废弃物堆填场的渗滤液产量较大，在南方地区通常达填埋量的30%，导致渗滤液处理厂负担较大和运行费用很高，且易引发填埋场渗滤液导排系统淤堵及渗滤液水位雍高等工程问题。因此，有必要对我国固废堆填场的渗滤液产量进行分析与预测，并采取有效措施实施渗滤液的减量化。

填埋场渗滤液的来源主要包括固废自身所含有的水分、进入填埋场的雨雪水及其它外来水分。当固废堆体含水率超过其田间持水率（固废在重力作用下自由排水所能达到的最低含水率），超出的那部分水分将随着固废的降解而析出成为渗滤液。我国城市固体废弃物以厨余垃圾为主，初始含水率较高，平均约为60%（ $\text{m}/\text{m}$ ，%，湿基），而国外发达国家的一般小于30%<sup>[1]</sup>，这主要由城市固体废弃物的组分所决定。如表1所示，我国城市固体废弃物的有机物（以厨余为主）含量较高，其中含有大量胞内水，这是造成我国城市固体废弃物初始含水率较高的主要原因。研究表明国内外城市固体废弃物降解后的田间持水率差别不大，约为37%（ $\text{m}/\text{m}$ ，%，湿基）<sup>[2]</sup>。因此，我国城市固体废弃物初始含水率显著大于田间持水率，而国外发达国家的初始含水率要小于田间持水率。这是造成我国填埋场渗滤液产量明显大于欧美国家的主要原因之一。

# 样式

表 1 城市固体废物组分及含水率<sup>[2]</sup>

国家	组分(%)					初始含水率 (%)
	厨余有机物	纸类	木头塑料等	金属玻璃等	渣土	
中国	43.6	6.7	16.7	3.4	29.6	60
英国	20	34	21	15	10	32
美国	15.3	29.8	29.4	12.7	12.8	24

我国现行规范规定的填埋场渗滤液产量计算公式主要考虑填埋场不同覆盖区域降雨入渗产生的渗滤液，而忽略了高初始含水率固废自身降解析出那部分水量，以致渗滤液产量计算结果显著小于实测结果(如图 1 所示)。针对我国城市固废的含水及持水特性，对现行规范规定的填埋场渗滤液产量计算公式进行修正，修正后公式如下：

$$Q=I \times (C_1 A_1 + C_2 A_2 + C_3 A_3) + (W_C \times V_1 - F_C \times V_2) \quad (1)$$

式中：I 代表降雨量(mm)； $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  分别为填埋作业区域、中间覆盖区域和终场覆盖区域的汇水面积( $m^2$ )； $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  分别为填埋作业区域、中间覆盖区域和终场覆盖区域的渗出系数，分别宜取 0.5~0.8、(0.4~0.6) $C_1$  和 0.1~0.2； $W_C$  和  $F_C$  分别为堆体初始含水率和田间持水率； $V_1$  和  $V_2$  分别为堆体沉降前和沉降后的体积( $m^3$ )。

公式(1)的第一部分为现行规范所推荐的渗滤液产量计算公式<sup>[3]</sup>，适合欧美发达国家低初始含水率的固废填埋场。采用修正公式的计算结果与实测结果比较接近(如图 1 所示)。

雨污分流是减少填埋场渗滤液产量的最重要手段。应根据场地条件，建设行之有效的地表水管理设施(截洪沟或场区周边地表水导排设施)，通过分区填埋减小填埋单元，减少场区地表水通过地表径流、地下渗流等途径进入填埋库区。此外，渗滤液回灌型生物反应器填埋场正得到越来越多的应用。回灌过程中通过固体废物堆体的截留和蒸发作用可以减少渗滤液的总量，通过进一步的生物化学反应可以减少渗滤液污染负荷。由于我国填埋场渗滤液产量大，导排系统设计不当或运营管理不善，易发生淤堵失效，以致渗滤液水位持续雍高，这使得渗滤液回灌在国内填埋场中的应用还未有成功实例，今后必须在此方面加强研究。

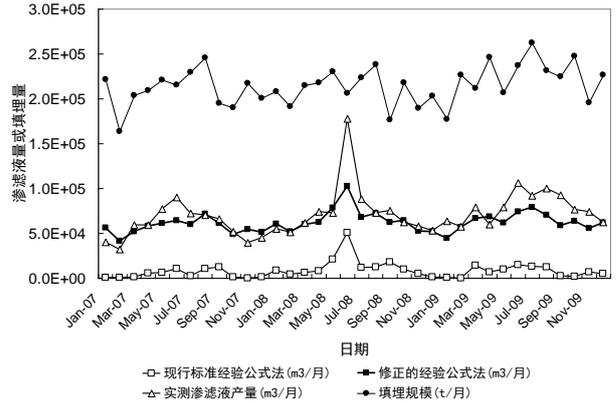


图 1 渗滤液产量计算结果与实测值对比

## 1.2 固废导水特性及填埋场水位雍高与堆体稳定控制

我国城市固体废物填埋场大多存在渗滤液水位过高的问题，尤其是在南方多雨地区，“填埋体多高，水位就有多高”的现象较普遍。渗滤液水位雍高直接影响了固废堆体的稳定性，阻碍了填埋气有效收集，并加剧了渗滤液污染物的扩散。因此，有必要深入认识填埋场渗滤液水位存在形式及雍高机理，以实现填埋场水位的有效控制。

室内外测试结果表明我国填埋场城市固体废弃物的导水系数随填埋深度增加而显著降低(如图 2 所示)，造成浅部渗滤液容易下渗，但到深层难以透过，加之我国填埋场渗滤液产量较大以及渗滤液导排系统易淤堵，往往导致水位逐渐雍高，形成较高的渗滤液主水位(如图 3 所示)。

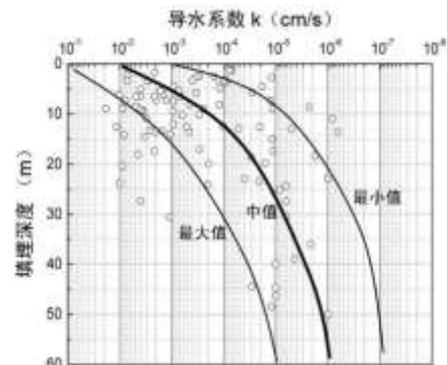


图 2 某填埋场固体废物导水系数与埋深的关系

除了渗滤液主水位外，填埋场还会存在局部滞水(如图 3 所示)。局部滞水是由中间覆土等弱透水层对渗滤液的向下运移产生了阻滞而形成。当填埋场深部固废的导水系数显著小于下卧导排层的渗透系数，则会出现渗滤液主水位与导排层内水头相脱离的现象(如图 3 所示)。

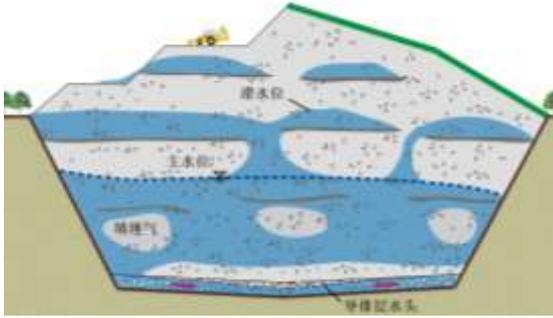


图3 填埋场渗滤液水位存在形式

高渗滤液水位会导致填埋气导排不畅，造成填埋体内的填埋气不断累积，进而引起堆体气压的上升，从而使得渗滤液水位以下堆体处于高水气压力状态，在外界因素（如强降雨、渗沥液回灌、地震等）进一步作用下，极易引起水气压力的进一步上升，并诱发填埋体发生滑坡。

对于我国高渗滤液水位填埋场而言，建设渗滤液立体导排系统控制水位是确保填埋场堆体稳定的最有效手段。以深圳某填埋场为例，因持续暴雨，使本来就比较高的渗滤液水位进一步提高，边坡出现了明显的滑移（如图4所示）。采取了小口径抽排竖井实施水位迫降等应急措施，防止了大规模滑坡的发生。后期通过重建中间渗滤液导排系统、顺坡向导排盲沟以及深层抽排竖井实现了渗滤液水位的长期控制，显著提高了填埋体边坡的稳定安全系数<sup>[4]</sup>。



图4 深圳某填埋场堆体失稳滑移

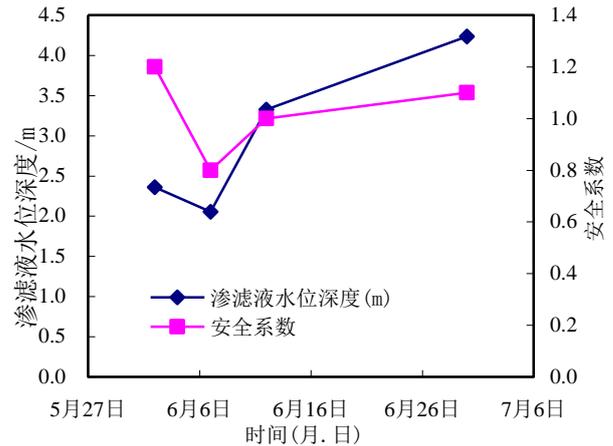


图5 深圳某填埋场安全系数与渗滤液水位深度的关系

### 1.3 填埋气产生、运移及高效收集

城市固体废弃物中有机质降解会产生大量气体（主要是甲烷和二氧化碳）。如果填埋气无控制、无组织地排放，不但会引起火灾甚至爆炸，而且会加剧温室效应，并造成资源的浪费（其热值约为  $20\text{MJ}/\text{m}^3$ ，与煤气热值接近）。我国城市固体废弃物填埋场年产  $132\text{亿 m}^3$  填埋气体，作为能源回收利用后将减少碳排放量  $3200\text{万 t}/\text{年}$ ，相当于  $32\text{个百万 kW}$  发电厂每年的碳排放量。然而，目前我国填埋场填埋气的收集率仅为  $25\sim 40\%$ ，远低于西方发达国家  $60\sim 80\%$  的水平。

我国城市固体废弃物有机物含量较高，这使得我国填埋场单位质量垃圾的填埋气产量要高于欧美发达国家的，单位质量垃圾理论产气量可达  $300\text{m}^3/\text{ton}$ （干基）。国内外研究表明，城市固体废弃物的含水率是影响填埋气产生的最重要因素，在一定范围之内，含水率越高，越有利于填埋气的产生<sup>[5-8]</sup>；但是饱和度过高也可能抑制城市固废的降解产气。

固体废弃物的导气性是影响填埋场填埋气运移及收集的最重要参数。室内外测试结果表明，固体废弃物堆体的气相渗透系数随着液相饱和度的增加及堆体压实程度的增加而逐渐减小，尤其是接近饱和时，固废的导气系数显著下降（如图6所示）。当液相饱和度增加至气相无法形成连续的运移通道时，填埋气的运移受到阻滞，可能在填埋体内形成承压气包，如图3所示。

填埋气运移受到阻滞一方面会影响填埋场堆体的稳定，另一方面直接影响填埋气的有效收集利用。如图7所示，在某填埋场竖井施工过程中，当钻至一定

# 样式

深度后，气水混合物喷涌而出，最大喷出高度达到4~5m，有些井在成井几个月之后仍然在间隙喷涌。如图8所示随着导气系数的减小，填埋气收集井的影响半径逐渐减小，填埋气收集效率也明显降低，这是我国高渗滤液水位填埋场气体收集率低的主要原因<sup>[2]</sup>。

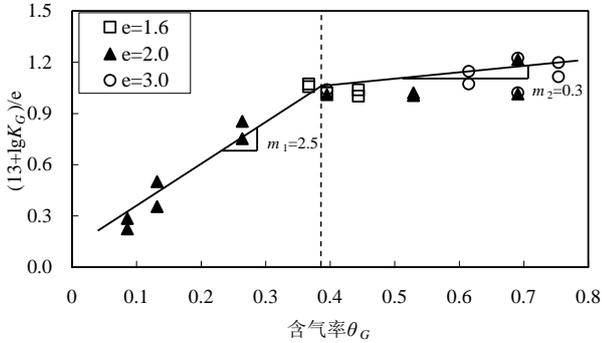


图6 固体废弃物导气系数  $K_G$  与体积含气率  $\theta_G$  的关系



图7 填埋场钻孔作业过程中的水气喷涌

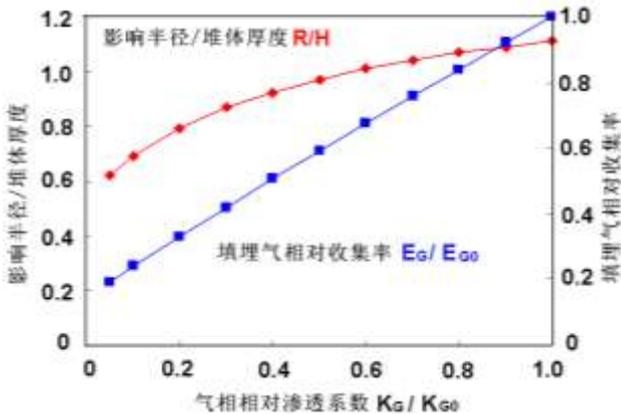


图8 填埋气收集率与气相渗透系数的关系

对于我国高渗滤液水位填埋场而言，可通过立体导排措施（包括水平导排盲沟、深层抽排竖井等）降低渗滤液水位，提高填埋体的导气性和抽气井影响范围，实现填埋气的高效收集。以深圳下坪填埋场为例，渗滤液水位迫降和长期控制工程实施后，填埋气的收集率显著提高，气体收集量从水位降低前的  $2000\text{m}^3/\text{h}$  增加到  $7200\text{m}^3/\text{h}$ 。

## 1.4 固废压缩特性及填埋场增容

城市固体废弃物堆体的压缩变形直接影响填埋场容量的预测与设计，堆体的显著沉降可能导致水气收集管道及封顶系统中防渗层破裂失效，并影响封场后的土地的重新利用。目前我国填埋场扩建工程正在兴起，老堆体显著的沉降和不均匀沉降必然会影响扩建堆体各系统的工作性能。

城市固体废弃物堆体的沉降变形主要包括应力作用引起的压缩以及有机质降解引起的压缩。研究表明，传统卫生填埋场的沉降可持续20~30年，总沉降量（包括应力引起的沉降和有机质降解引起的沉降）可达25~50%；有机质降解引起的沉降量可达18~24%<sup>[9-10]</sup>。由于我国固废的有机物含量较高，使得主压缩量和次压缩量都较国外要大；特别是对于降解引起的次压缩，通过加速降解促进次压缩沉降的发展和填埋场容量的增加具有较大的应用潜力。

目前常用的填埋场沉降计算方法大都沿用土力学压缩模型表征垃圾的压缩特性。对于主压缩特性，通过现场钻孔获得不同填埋深度的固体废弃物原状样，试验测试表明修正主压缩指数随着龄期的增加而逐渐减小（ $C_c'=0.1\sim 0.3$ ）；基于用于生化降解模拟的一阶动力学方程，一些学者提出了降解次压缩模型<sup>[11-15]</sup>，但这些模型并不能反映应力和降解对次压缩特性的耦合影响。如图9所示，浙江大学岩土工程研究所环境岩土课题组建立了应力-龄期耦合压缩模型，并提出了分层填埋堆体沉降计算方法<sup>[16]</sup>。此外，在考虑降解-渗流-压缩等耦合作用的基础上，一些学者在组分、含水率、饱和度、孔压等因素对堆体沉降的影响规律方面开展了有意义研究<sup>[17-24]</sup>。

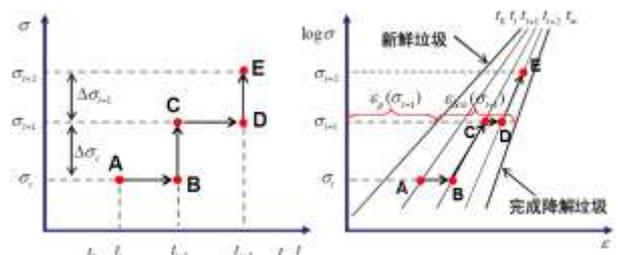


图9 应力-龄期耦合压缩模型及填埋场沉降计算方法

与发达国家填埋场单位土地面积填埋量（美国  $50\sim 80\text{m}^3$ ）相比，目前我国填埋场单位土地面积填埋量（ $22\sim 52\text{m}^3$ ）普遍偏低。研究表明，通过渗滤液回灌等营造适宜降解环境加速垃圾降解、高能机械压入库垃圾、填埋分区优化、降低渗滤液水位、提高堆

# 样式

体坡度等可以有效增加填埋场的库容（如表 2 所示）。以苏州七子山填埋场为例，其水平向扩建 400 米，竖向扩建 40 米，采用以上增容技术，使一期堆体容量从 420 万吨增至 550 万吨，服务年限延长了 2 年；通过扩建堆体体型优化，二期扩建堆体设计容量从 720 万吨增至 940 万吨，服务年限延长了 3.5 年，新老堆体工程累计节约土地 8 万  $m^2$ 。

**表 2 各种增容措施的增容潜力(苏州七子山填埋场为例)**

加速降解	降低渗滤液水位	合理分区及填埋坡度控制	提高初始压实度	综合增容能力
5~8%	3~8%	3~5%	10~15%	20~40%

## 1.5 防污屏障寿命评价及控制

渗滤液及其携带的宏量和痕量污染物在高水头作用下极易击穿填埋场防污屏障，造成地下水土环境污染，其持续时间长达几十年甚至几百年且修复难度极大。因此，合理评价填埋场屏障的防污性能对于地下污染防控至关重要。

欧美国家填埋场场底渗滤液水头较低，污染物穿过防污屏障的迁移以扩散为主。针对该迁移模式，欧美国家填埋场技术标准规定了防污屏障结构型式及防渗性能要求。我国《生活垃圾卫生填埋技术规范》中有关场底防污屏障的规定基本上是套用欧美的标准，没有针对我国填埋场渗滤液水头高的特点提出相应的改进。浙江大学岩土工程研究所提出了基于污染物击穿时间的屏障服役寿命评价标准：如图 10 所示，屏障的服役寿命需大于渗滤液主要污染物的稳定化时间（20~30 年）和填埋场运行时间（10~20 年）之和，通常应大于 50 年；屏障的服役寿命与污染物浓度、渗滤液水位高度及衬垫系统的污染物击穿时间相关。



**图 10 基于击穿时间的衬垫系统寿命评价**

我国垃圾填埋场工程常用的防渗系统包括两种类型：一是垂直防渗帷幕，常用于老一代山谷型填埋场；

二是水平防渗系统（又称衬垫系统），包括天然粘土类衬垫、改性粘土类衬垫及人工合成衬垫。我国最近几年新建和扩建的填埋场大多数采用后一种防渗系统中人工合成衬垫，该衬垫系统主要由压实粘土层（GCL）、HDPE 土工膜(GM)、土工聚合膨润土垫(GCL)等组成，根据它们的不同组合型式分成复合衬垫、单层衬垫和双层衬垫三种结构类型。

为了计算高水头作用下污染物击穿衬垫系统的时间，浙江大学岩土工程研究所建立了重金属和有机污染物通过衬垫的渗漏-扩散模型并获得了解析解，包括有机污染物在复合衬垫中的一维扩散解、污染物在有缺陷膜复合衬垫的一维运移解和污染物通过GCL/AL中的一维对流-弥散解<sup>[25-31]</sup>。基于以上解析解，并对我国填埋场常采用的四类衬垫的服役寿命进行了评价，包括（1）1.5 mm GM+75 cm CCL；（2）1.5 mm GM+75 cm AL；（3）1.5 mm GM+13.8 mm GCL和（4）2 m CCL。研究表明（如表3所示）：GM+GCL对重金属离子具有较好的防污性能，尤其是对于高水头工况；厚度较大的2 m CCL对有机污染物的防污性能较好，其击穿时间要比GM+GCL大2-3个数量级；随着水头的增大，GM+CCL的防污性能优于2 m粘土；而GM+AL(压实粘土保护层)的防污性能较差，不适合作为填埋场的衬垫系统。渗滤液水头对衬垫系统防污性能的影响很大，高水头作用下四类衬垫有机污染物的击穿时间均未能达到服役寿命大于50年的要求。此外，根据离心模型试验（如图11所示）和现场实测数据反分析获得的粘土扩散系数和机械弥散的参数取值，采用击穿屏障时间的解析解，预测了在高水头（10m）作用下Cl<sup>-</sup>的击穿2m厚CCL衬垫时间在5.5年~13.3年之间，验证了所提出的屏障击穿时间的解析解。

**表3 四种衬垫被Cd<sup>2+</sup>和苯击穿时间的比较**

衬垫类型	击穿时间(year)			
	重金属, Cd <sup>2+</sup>		有机污染物, 苯	
	$h_w=0.3m$	$h_w=10.0m$	$h_w=0.3m$	$h_w=10.0m$
GM+CCL	57.4	19.8	35.0	25.5
GM+AL	10.7	3.5	8.7	6.7
GM+GCL	77.1	72.6	0.37	0.37
CCL	31.1	13.6	52.0	17.5

对于我国填埋场而言，在设计衬垫结构时必须同

# 样式

时采用“排、堵”结合的设计方法以降低作用在衬垫上方渗滤液水头，使其能控制在一个较低的水平（如小于 1m）。对于新建填埋场，可以采用 GM/GCL/AL 等新型复合衬垫结构以满足防污屏障服役寿命标准。



图 11 浙江大学 ZJU400 离心机用于污染物击穿粘土衬垫模型试验

## 2 废弃泥的工程特性、工程处置及资源化利用

废弃泥的处置问题越来越受到人们的重视。在水利工程中，每年清淤产生的淤泥总量超过 1 亿 m<sup>3</sup> 以上。随着我国污水收集率的快速提高，产生的污水厂污泥的也逐年增加，2010 年我国产生的污水厂污泥约为 2.17×10<sup>7</sup> 吨(湿基含水率 80%)，是一个巨大的数量。在地铁和城市交通建设中盾构隧道技术被广泛使用，由此而产生的渣泥也非常可观，还有石油钻井、桩基等工程产生的废弃泥浆也已经成为必须处理的废弃物。在我国社会经济发展到目前这一阶段后，废弃泥的问题逐渐凸现出来。

废弃泥的产生原因和产生过程非常多样，成分也非常复杂。与土相比泥的分类还不成熟，工程界或实际应用时往往出现口语化，表述上易于引起误解。这里认为泥总体可以分为 2 大类，无机泥和有机泥。如河湖清淤产生的淤泥，一般都是以无机粘土矿物，应该属于无机泥。而污水厂污泥的固体物质中有一半以上都是有机物（水处理过程中产生的微生物残体）。这两大类之间在物理性质、化学性质上有非常大的差异，所以应该区别对待。废弃泥还可以根据所含污染物种类及含量进一步分类。比如污水厂污泥的中除有机物以外，还有营养盐、重金属、有毒有害有机物，这些污染物是否超标对其后续处理或利用有着非常重要的影响。而河湖清淤淤泥，则与河流的污染程度有很大的关系，这时候主要关注的是重金属类污染物，其含量多少和生物毒性对处理方法有着重要的影响。因此，

在解决泥的问题时，应该首先对泥进行有机与无机、污染和未污染的分类，然后根据其类别进行后续的处理、处置与利用。废弃泥的处置不仅要解决处置场地安全问题，而且要解决处置过程中二次污染问题。

### 2.1 城市污水污泥

城市污水污泥是城市生活污水处理的副产品，是一种含有大量水分(含水率高达96~99%)、大量有机质(50-70%)，并含有一定量的有毒有害污染物(如重金属、细菌、寄生虫卵、病原微生物等)的固体废弃物<sup>[32]</sup>。我国城市化快速发展产生的大量污泥无害化处理处置已成为环境保护领域的一大难题。

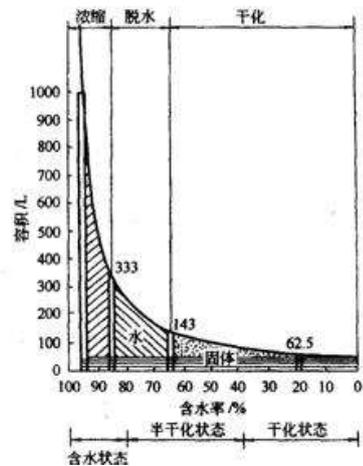


图 12 污泥体积与含水率关系

欧美发达国家对污泥的处理和处置长期奉行“减量化、稳定化、无害化、资源化”原则。我国环保总局于2002年12月24日发布了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)，并于2003年7月1日开始实施。该国家标准中明确规定在污泥处置之前必须先进行稳定化和脱水减量化处理，对于农用的污泥还必须进行无害化处理，以符合相关的污染物控制标准。污泥脱水减量化处理是降低污泥处理处置费用的关键环节，我国城市污水污泥的含水率一般为95~97%，如图12所示，若能将其降低到65%，则污泥体积将减少约86%，这将显著降低污泥后期处理处置的费用<sup>[33]</sup>。我国目前现行的污泥脱水处理方法主要是机械脱水，由于污泥颗粒细小，水力渗透性能很差，现行的机械脱水技术存在效率比较低，处理费用比较高等问题。目前欧美发达国家正在积极研发高效污泥脱水技术，包括电渗脱水技术、冻融处理技术、超声波处理技术、膜分离技术等，其中电渗脱水技术被认为是一项很有前景的减量处理技术。

# 样式

国际上对污泥的处置方法主要包括焚烧、填埋和堆肥后土地利用。根据我国国情，污泥的卫生学指标、重金属指标难以满足农用标准，且目前不可能投入大量的资金用于污泥焚烧，因此污泥填埋是一种比较符合我国国情的处置途径。污泥填埋处置具有投资少，容量大等优点，也能达到防止二次污染的要求，可预测在未来一个时期内，填埋仍然是我国污泥主要处置方式。污泥填埋方式包括单独填埋和混合填埋两种。在美国，多数采用单独填埋，在一些土地资源紧缺的国家和地区(如欧洲、香港等)较多将污泥与城市固体废物混合填埋，也有一些国家(如日本、德国等)将污泥作为垃圾填埋厂的覆盖材料使用。考虑到污泥处理水平和土地利用效率，混合填埋更适用于我国，建设部于2007年1月29日发布了《城镇污水处理厂污泥处置—混合填埋泥质》标准(CJ/T249-2007)，并于2007年10月1日起实施，其中规定了用于混合填埋的污泥含水率应低于60%，不排水抗剪强度需大于25kPa。含水率高、强度极低的污泥必须经过预处理才能达到适于填埋的泥质标准，固化技术是预处理的主要方法。固化指对含水率80%左右的污泥添加特定的固化材料，经过水化反应后够提高其强度，满足填埋的要求。由于污泥中无机颗粒比较少，在固化时难以形成坚固的骨架，朱伟等发现在污泥固化时添加一定量的废弃淤泥或膨润土，可显著提高污泥的固化效果<sup>[34]</sup>。国内采用污泥处理后混合填埋工程的有深圳下坪垃圾填埋场(900t/d)，上海老港垃圾填埋场(300t/d)。污泥混合填埋具有节省库容、加速垃圾降解稳定化等优点，是一项很有前景的城市固体废物综合处置技术，当然也存在一些待研究的环境土工问题，如污泥与生活垃圾混合物的工程特性、混合填埋体中水、气运移规律、混合填埋体稳定性等。



图 13 污泥固化处理后在垃圾填埋场填埋

## 2.2 疏浚淤泥

为了改善湖泊的水质问题、保证河道正常的泄洪能力和航道的畅通，我国开始有计划地对一些湖泊、河道、港口、航道等开展大规模的疏浚和清淤工程。例如，太湖底泥总蓄积量为19.12亿 $m^3$ ，计划清淤2500万 $m^3$ 以上；杭州西湖近期清理底泥260万 $m^3$ ，这些淤泥被输送到3km外堆泥场存放，占地1500亩，耗资3.0亿元；珠江三角洲地带每年产生的疏浚泥就可达到8000万 $m^3$ 左右。由于土地的日益紧张和环境保护标准的提高，如此大量疏浚淤泥的处理处置成为环境保护领域的一大难题。

河湖清淤多采用水利疏挖的方式，将底泥破碎与水混合成泥浆泵送到岸上的堆场，经过3~6个月的沉淀后成为含水量120~150%左右的淤泥，其具有含水量高、强度低、水分长期无法排出的特点。淤泥处理主要包括原位处理，脱水处理和固化处理三类<sup>[35]</sup>。淤泥堆场内原位处理类似于软弱地基处理，可在堆场内布设排水板后，进行真空预压或堆载预压排水固结。原位处理法适合于大面积吹填淤泥场地的处理，往往结合填海造地工程使用，具有重大的经济效益和环境效益，例如深圳南油“314”吹填淤泥造地工程<sup>[36]</sup>。脱水处理指清淤产生的泥浆直接导入脱水设施进行脱水使其干化的方法。脱水设施一般由筛分、旋流分离、离心分离、压滤脱水等工艺单元构成。除压滤脱水可以达到较好的脱水效果(含水量80%以下)以外，对于粘土颗粒含量很高的淤泥，旋流与离心都很难将淤泥的含水量降低到100%以下。脱水处理的主要问题是设备的匹配，疏浚设备输出的泥浆量通常可达1000~3000 $m^3/h$ ，要同时完成相应泥浆量的脱水，须配备规模极大的处理设施，故目前脱水处理法只适用于小批量的淤泥处理。固化处理指在淤泥中掺入水泥、石灰等固化材料，通过固化材料的水化、水和反应将淤泥中大量的自由水转化为结晶水、结合水(如图14所示)，在淤泥颗粒表面产生胶凝物质(水化硅酸钙、水化铝酸钙等)，形成不可逆转的凝结硬化壳，以提高淤泥的强度。固化法具有强度可控、施工简便迅速、处理量大等优点，并可降低淤泥中污染物质的活性。用固化技术处理废弃淤泥使其变为再生资源在国外已得到广泛的应用，比如日本、荷兰、新

# 样式

加坡等。最近几年，我国岩土工程界也开始化学固化处理方面开展积极的研究和实践<sup>[37-39]</sup>。通过固化处理后淤泥可以作为填土进行利用，目前这一方法已经在太湖清淤工程中有 800 万 m<sup>3</sup> 的应用业绩，在广州河涌清淤工程和东莞水库清淤工程中也有应用。

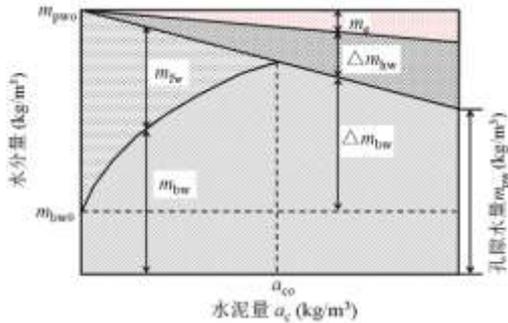


图 14 淤泥固化过程中水分转化模式图（图中：mfw:自由水；mbw:结合水；mhw:结晶水合水）<sup>[40]</sup>

## 2.3 尾矿泥

尾矿泥是尾矿中的一种，是湿法选矿产生的以细颗粒为主组成的废弃物，如赤泥(铝土矿废渣)、锡尾矿泥等。目前，我国大中小型以上矿山 8000 余座，尾矿年产量 6 亿吨，并以每年 2% 的速度增长，尾矿泥的处理处置已成为矿山环境岩土工程中的重要问题之一。

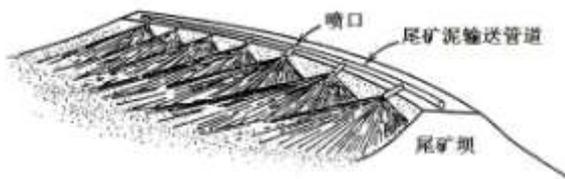


图 15 尾矿泥的常规贮存方法

尾矿泥的常规贮存方法如图15所示，即构筑尾矿坝、由管道将尾矿泥输送至坝内堆存，形成尾矿库。尾矿泥如赤泥、磷酸盐矿泥等，大部分颗粒粒径小于 75 μm，粒组中粗颗粒的缺失使其无法作为筑坝材料，需在尾矿泥中添加粗颗粒组分或利用其他材料进行筑坝。由于尾矿泥呈浆状、含水量高、几乎无力学强度，常规贮存方法下的尾矿库还需面临尾矿库失稳的风险：2008年9月8日山西省临汾市襄汾县重大尾矿库溃坝事故即致277人死亡。对尾矿泥进行先期浓缩脱水处理是避免高含水量尾矿泥造成失稳和渗漏等问题的有效方法，产生的尾矿泥可经沉淀浓缩后初步降低含水量，以便于进一步的处理处置。国外较新的处置出路为斜坡铺晒法，如图16所示，将浓缩后的尾矿泥沿自然或人造斜坡排放，尾矿泥在重力作用下铺摊于斜坡

表面，经晾晒干化后可层层叠加以实现尾矿泥的贮存，此方法适合于气候比较干燥的地区。此外，可针对不同尾矿泥的理化特性，对浓缩后的泥样进行固化处理以提高力学性能。有研究表明在赤泥中掺入适量石膏、粉煤灰等固化剂可有效提高其力学强度<sup>[41]</sup>，尾矿泥经过固化改性后可用于坝体的砌筑、同时可解决自身的安全堆存问题。

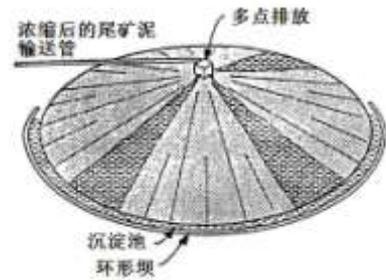


图 16 尾矿泥斜坡铺晒示意图<sup>[42]</sup>

## 3 土体与地下水污染评价与防治

土体污染是指进入土体中污染物超过土体自净能力，而且对土体、植物或环境造成损害。地下水污染与土体污染既有联系，又有区别，目前对它们之间关联性研究还不够深入。土体和地下水污染被称为“看不见的污染”，具有隐蔽性、滞后性、累积性和不可逆性，治理难度大、成本高、周期长，对人类健康和经济社会发展的影响具有长期性。土体和地下水污染物主要来源包括：（1）工业污染源，如废气沉降、废水沉淀、废渣淋滤、化工产品渗漏与扩散等；（2）农业污染源，如农药、化肥、养殖场废弃物等；（3）生活污染源，如城市生活污水、污泥、垃圾、医疗废物等。土体和地下水污染物种类包括各种重金属（汞、镉、铅、砷、铬、镍、铜、锌等）、有机污染物（有机农药、苯类、酚类、氰化物、石油、合成洗涤剂）、放射性污染物、病原微生物等。这些污染物在地下水环境中迁移和扩散非常复杂，如图 17 所示。

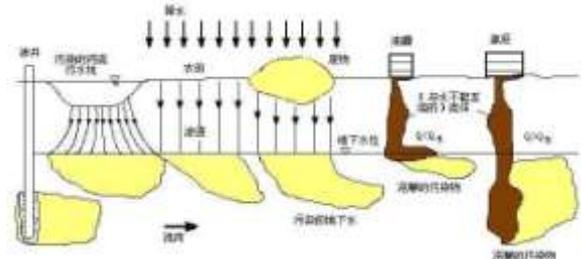


图 17 污染物在地下水环境中迁移途径示意图

城市是工业生产和生活密集区，从上世纪 80 年代

# 样式

以来,我国城市化进程非常迅速,市政环保基础设施建设及运营管理水平明显滞后,以致我国城市土地和地下水污染日益严重。全国城镇现有集中式废弃物处理、处置设施 4790 个,其中污水处理厂 2094 座,垃圾处理厂 2353 座,危险废物处理厂 159 座,医疗废物处置厂 184 座。另外,我国城镇分布有成千上万座的化工厂址,数以万计的化工品储库、油库、干洗店等。这些设施如设计不当或运营管理不善,将会形成城市地下水土环境的集中污染源,威胁着城市地下环境安全。2001~2008 年,我国固体废弃物堆填场污染引发的突发环境事件年均 55 次,造成的直接经济损失高达 10 亿元。另一方面,由于城市土地紧缺,我国开始利用废弃或搬迁后工矿企业场地进行开发利用,如上海世博会场就是在原造船厂、试剂厂、印染厂等所在地建设。这些老工业场地受到不同程度的污染,如未开展有效的评估和治理措施,可能会对场地使用者造成严重的影响。2008 年武汉长江明珠小区未经深入环评就在某化工厂旧址上进行开发建设,造成 2400 余户居民面临重金属和有机污染物的潜在威胁。以下对典型工业污染场地和废弃物集中处理设施周边场地水士环境污染评估及防治方法进行分别阐述。

## 3.1 典型工业污染场地

随着我国城市化快速发展及各城镇产业布局的调整,大多数城市中心及郊区的生产企业,特别是化工、电镀、药物生产等排污严重的企业都实现了关停或搬迁工作。北京从 1999~2004 年迁出四环以内的工业企业 738 家,到 2009 年底,南京已关闭市区 162 家化工生产企业,这些留下的厂区原址一般都存在不同程度的工业污染<sup>[43]</sup>,其中涉及到重金属及各类有机污染物,这类污染场地一般呈现污染物种类多、浓度高、污染深度大等特点,对这些土地的再开发利用带来极大的风险和隐患。

### 3.1.1 典型工业场地污染评价方法

典型工业污染场地具有污染物种类多、迁移深度大等特点,我国上个世纪 90 年代制订的《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)和《地下水质量标准》(GB/T 14848-93)难以满足工业污染场地评价要求。比如《土壤环境质量标准》中仅对 8 种重金属和 2 种有机物的指标作了规定,这 2 种有机物主要农业污染源,而来

自工业污染源的有机污染物种类要多得多。2007 年,为了满足上海世博会场地建设的需求,我国环保局颁布了《展览会用地土壤环境质量评价标准》(暂行)(HJ350-2007)。该暂行标准按照不同的土地利用类型,规定了展览会用地土壤环境质量评价的项目、限值及监测方法,包括了 14 种无机污染物和 78 种有机污染物。最近环保部开始着手制订《污染场地风险评估技术导则》、《场地环境监测技术导则》和《场地环境调查技术导则》。这些标准和技术导则为我国工业污染场地评价提供了重要依据。然而,由于工业污染场地复杂性和我国各地区土壤背景值的差异性,工业污染场地评价标准和方法仍有待于进一步研究和实践检验。

表 4 富阳某工业污染场地主要污染物类型及分布深度

污染物名称	钻孔编号	污染物浓度范围 (mg/kg)	分布深度 (m)	展览会用地土壤质量评价标准	
				A 级	B 级
甲苯	11	1.8-11.4	4	26	520
二甲苯	11	13.1-54.9	4	5	160
三甲苯	11	154.7-516.7	4	19	180
乙基苯胺	3	6.2-23	3.4	5.8	56
	4	0.2-41.2	5.4		
硝基苯	2	1.5-4.5	7.4	3.9	100
	7	22.3-30.4	5		
萘	9	2.1-3.4	6.5	54	530
	11	159.9-417.2	4		
蒽	11	1.5-4.5	4	2300	10000
	1	48.1-1027.5	6		
	7	296.9-484.3	7		
锌	9	52.0-257.4	2.45	200	1500
	10	51.6-380.3	6		
	13	57.5-263.5	4.8		
	18	8.7-293.0	4.2		

注: (1) A 级标准: 符合 A 级标准的土壤可适用于各类土地利用类型  
(2) B 级标准: 超过 B 级标准, 该场地必须实施土壤修复工程  
(3) A~B 级标准之间: 该场地不能用于直接暴露于人体的利用类型, 可用作场馆、绿化、商业及公共市政用地

近些年,我国环境岩土工程工作者尝试利用钻孔取样和分析测试相结合的方法开展工业污染场地的评价工作。例如,在富阳某化工污染场地勘查取样及测试分析后发现:该场地土体中污染物包括甲苯、二甲苯、三甲苯、乙基苯胺、硝基苯、萘、蒽及重金属,



# 样式

渗滤液中 COD、BOD、氨氮、有机酸、苯系物、芳香族化合物等污染物浓度很高，而尾矿库经雨水淋滤出的污染液中含有高浓度重金属化合物。每一座固体废弃物填埋场都是一个潜在的集中污染源，可能对周边土体和地下水造成严重的污染，其污染监测、评价及控制问题迫需解决<sup>[47-49]</sup>。

### 3.2.1 固体废弃物填埋场地下污染监测与评价

对固体废弃物填埋场这样的潜在集中污染源，地下水环境污染防治监测是非常重要的。我国《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889-2008)和《生活垃圾填埋场环境监测技术要求》(GB/T 18772-2002)中明确规定了在填埋场上下游设置一定数量的地下水观测井，通过与本底井的比较，监测地下环境污染情况，一旦发现污染及时采取污染控制措施。该监测方法对于新建卫生填埋场是非常有效的，但对于老的简易填埋场的适用性有待于进一步研究。对于既有老填埋场地下污染评价目前还没有相关的标准和技术导则。我国环境岩土工程工作者尝试通过填埋场内部及上下游钻孔取样测试分析，掌握各土层的物理化学性质及各类污染物在土层中的分布规律(如 21 所示)<sup>[50]</sup>，选用特定的污染因子模拟预测渗滤液在填埋场服务年限内迁移扩散的深度及范围，以此来决定是否需要采取工程措施进行土体污染控制以及采用何种方式进行控制处理。

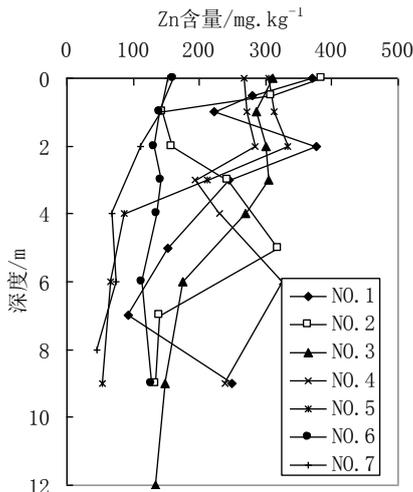


图 21 安徽某填埋场地下土壤中 Zn 含量随深度分布(其中钻孔 1 和 2 位于填埋场内, 3、4、5 和 6 号位于填埋场下游, 7 号位于填埋场上游)

### 3.2.2 固体废弃物填埋场地下污染控制方法

国内外固体废弃物填埋场大多是通过建设防污屏障来实现污染控制，包括垂直防渗帷幕和水平衬垫系

统。我国的固废填埋场渗滤液水位普遍较高，防污屏障上水头很高，显著加快了污染通过渗流方式的迁移，因此采取工程措施控制防污屏障的水头是延长防污屏障服役寿命的有效方法之一。我国《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889-2008)明确规定填埋场水平衬垫层上渗滤液水头高度应控制在 30cm 以内，但是目前绝大多数填埋场难以达到这个要求。防污屏障材料性能及施工质量控制也是实现污染控制重要方面，水平衬垫系统中常用的土工膜易在施工过程中遭到破坏，压实粘土衬垫施工后如不采取保护措施，可能会发生开裂，这些都会导致防污屏障留下渗漏通道。2010 年福建上杭县紫金矿业发生了铜矿湿法厂污水池废水泄露重大环境污染事件，正是由于污水池底防渗土工膜破裂而发生泄露引发的。对于已经发生渗漏的填埋



图 22 紫金山铜矿湿法厂污水池中的含铜酸水



图 23 HDPE 膜-膨润土复合防渗墙的施工照片

场地，采用垂直防渗帷幕围封是阻止污染物进一步迁移的最有效方法。福建上杭县紫金矿业污水泄露场地采用了 HDPE 膜-膨润土复合防渗墙进行治理，其施工方法如图 23 所示。

## 4 土工合成材料在环境土工中应用

土工合成材料是以人工合成的聚合物(如塑料、化纤、合成橡胶等)为原料而制成的各种类型的产品，主要类型包括土工膜、土工织物、土工排水网、GCL、土工格栅等。因其具有较好的整体性、密闭性、抗腐

# 样式

蚀性、渗透性和强度高、对环境污染小以及施工方便等特点，在城市废弃物填埋场中得到了广泛的应用，尤其是由 GCL、土工膜、土工织物、土工排水网等组成的衬垫系统中。但土工合成材料在填埋场中的应用也会带来以下三个主要环境岩土工程问题：①因填埋体变形导致土工合成材料拉伸破坏；②复合衬垫系统界面强度低易引发填埋场沿衬垫系统界面的失稳滑

坡；③渗滤液及污染物击穿衬垫系统污染地下水土环境（图 24）。因此，本节主要针对以上三大问题探讨了土工合成材料工作性能及设计方法，包括基于复合衬垫界面强度特性的堆体稳定控制、基于抗拉性能的抗不均匀沉降设计方法及基于击穿时间的衬垫系统结构型式设计方法。

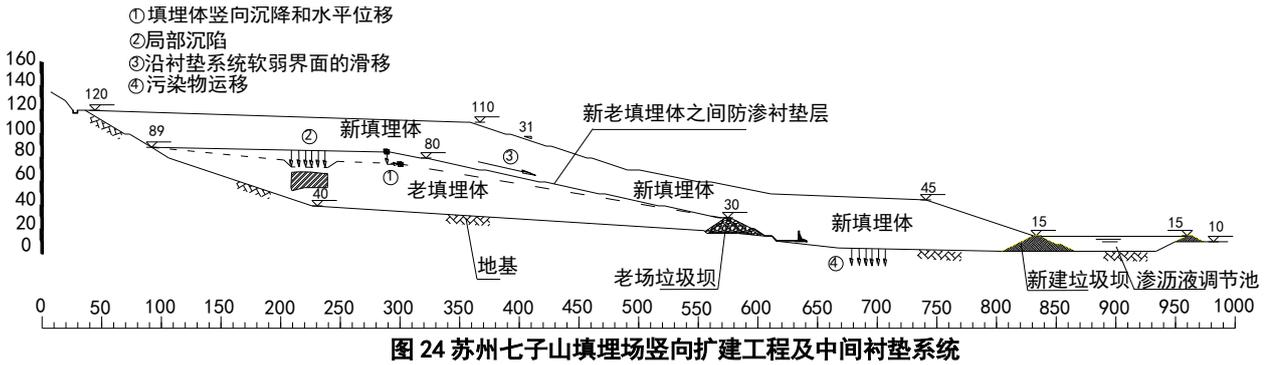


图 24 苏州七子山填埋场竖向扩建工程及中间衬垫系统

## 4.1 土工合成材料界面强度特性及渐进破坏控制

针对复合衬垫系统内部土工合成材料之间的界面强度较低易造成填埋场沿界面失稳的问题，我国已通过引进的大尺寸界面直剪试验机及自主开发的叠环式单剪仪，开始对国内填埋场常用的衬垫系统材料界面特性进行测试研究。

在单一界面方面，主要研究了土工膜/土工织物界面、土工膜/土工复合排水网、土工膜/GCL，土工复合排水网/土工织物等界面的剪切特性，特别是对土工膜/GCL 界面膨润土挤出机理及其对界面强度的影响进行了较为深入的研究<sup>[51-53]</sup>。图 25、图 26 为部分试验研究结果，图 25 揭示了土工合成材料界面抗剪强度呈应变软化的特性，这与垃圾土的应变硬化特性<sup>[54-55]</sup>是正好相反，图 26 揭示了膨润土挤出对土工膜/GCL 面强度影响的规律，水化不仅造成峰值摩擦角降低了 3.5°，更造成残余摩擦角降低了 7.5°<sup>[56]</sup>。

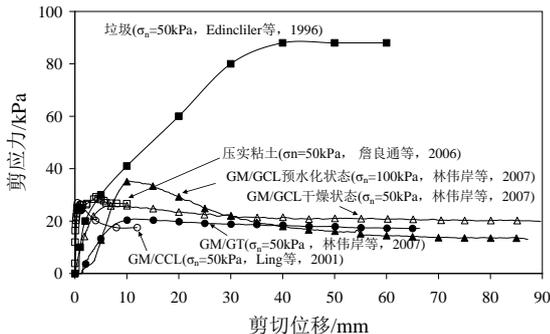


图 25 垃圾、粘土及土工合成材料界面的应力-位移曲线

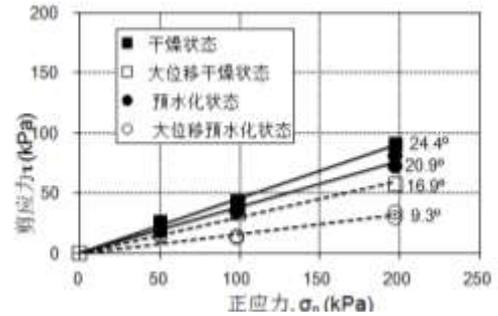


图 26 膨润土挤出对土工膜界面强度的影响

在多层界面方面，采用叠环式单剪仪对砂土/无纺土工织物/土工网/土工膜/压实黏土及土工织物/土工膜/GCL/压实黏土等多层界面的强度特性进行了研究。通过试验发现：在不同的法向应力下，破坏面由土工网与土工膜界面转移到土工膜与压实黏土界面，揭示了多层土工合成材料界面的剪切强度不能简单地用单一界面强度包线表达的规律。

垃圾沉降及重力作用会造成上部荷载传递至斜坡上衬垫系统，将引起剪力在衬垫系统内部的传递，由于多层界面的强度以及各种土工合成材料拉伸模量的差异，导致剪力传递复杂，从而难以掌握衬垫系统的变形及破坏过程。为研究斜坡上多层衬垫系统渐进破坏过程及机理，分别进行了土工织物/土工膜单界面试验及土工织物/土工膜/GCL 多界面大型斜坡试验<sup>[51]</sup>（图 27），得到了衬垫系统内部剪力传递机理，如图 28 所

# 样式



图 27 复合衬垫大型斜坡模型试验

示发现了当薄弱界面峰值强度大于外部剪力时，界面不会发挥出残余强度，薄弱界面上覆材料在锚固端拉力非常小；而当第一层界面峰值强度小于外部剪力时，薄弱界面易发展到残余强度，导致薄弱界面上覆材料在锚固端拉力显著增加，有可能被拉断。实验还揭示了多层界面衬垫易沿峰值强度最小界面产生滑移而未沿残余强度最小界面产生滑移的规律。基于以上试验结果，提出了复合衬垫系统强度参数的选择方法为边坡区采用峰值强度最小界面的残余强度参数而水平区采用峰值强度最小界面的峰值强度参数，为填埋场沿衬垫系统界面的稳定设计方法提供科学依据，同时也提出了在土工织物保护层之上铺设土工格栅加筋层起助抗拉作用，以避免膜上土工织物保护层受拉破坏。

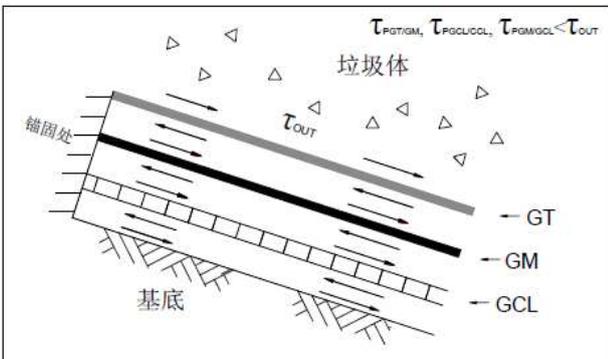


图 28 复合衬垫系统内部的剪力传递

## 4.2 土工合成材料抗拉性能及不均匀沉降控制

垃圾填埋场扩建过程中，由于老填埋场竖向及水平位移和局部沉陷将导致衬垫系统产生拉伸应变，易引起土工合成材料产生拉伸破坏而失效（图 29）。为了

保证土工合成材料最大拉伸应变应小于其容许应变，因此需对土工合成材料的拉伸性能以及填埋场中衬垫系统的拉伸应变进行研究，从而指导衬垫系统抗拉设计。



图 29 陡坡上土工织物和土工膜的拉伸破坏

国内主要采用宽条试验进行各种典型的土工合成材料的拉伸试验，如图 30 所示，可见各种不同材料之间拉伸模量相差甚远。

竖向扩建工程中间衬垫系统存在变形失效问题，为了模拟其在上覆扩建堆体荷载作用下的变形规律，基于垃圾试样的大尺寸三轴试验结果，采用垃圾复合指数应力应变模型，并嵌入 FLAC 软件中，开展了竖向扩建过程中中间衬垫系统变形模拟分析，获得了中间衬垫系统的应变分布规律（图 31）。可以发现，中间衬垫系统的最大拉应变发生在老填埋场背坡锚固沟

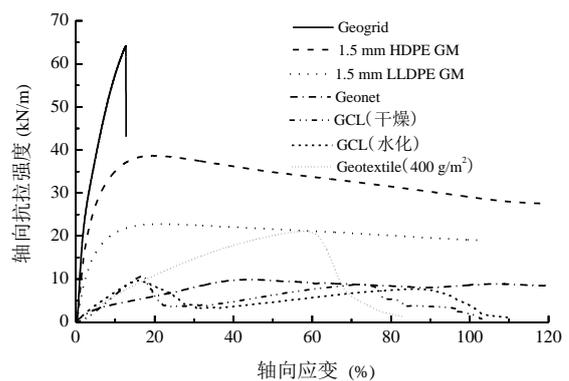


图 30 土工合成材料拉伸试验曲线

处，而由于侧向变形老填埋场前坡及背坡附近处的中间衬垫系统出现了压缩应变<sup>[57-58]</sup>。为减少背坡锚固端处的拉力，该锚固沟可远离平坡边缘一定距离，同时宜选用柔性锚固沟或采用多个锚固沟共同分担中间衬垫系统的张拉应力。

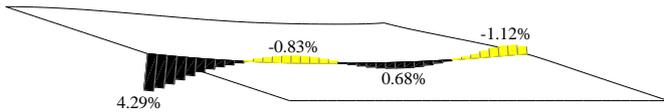


图 31 中间衬垫系统的应变分布

由于大件物品及易腐蚀垃圾的降解，老填埋场中可能形成局部沉陷或空洞，并导致中间衬垫系统中的防渗材料产生过大拉伸应变而破坏。考虑到长条形沉陷是实际工程中可能遇到的最不利情况，开展了长条形局部沉陷模型试验（图 32），研究了上覆堆体高度、加筋体刚度、压实粘土缓冲层、应变硬化特性的草炭压实层对衬垫系统变形的影响，发现了粘土缓冲层结合土工格栅加筋以及应变硬化材料缓冲层均可有效控制中间衬垫系统中防渗材料的变形。基于以上试验结果提出了局部沉陷拉力的修正计算方法，与 Giroud 的方法比较如图 33 所示，发现 Giroud 方法在填埋高度较大时偏于危险。并提出了中间衬垫系统抗局部沉陷的优化结构型式（如图 34），应用于苏州七子山填埋场扩建工程中<sup>[58]</sup>。

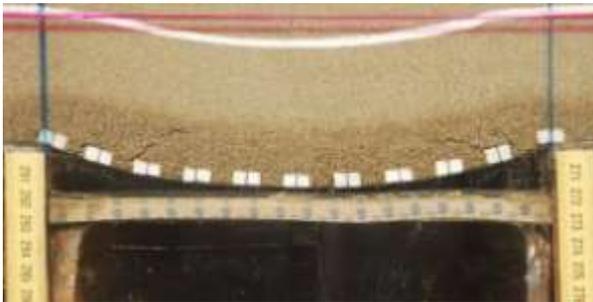


图 32 局部沉陷模型试验

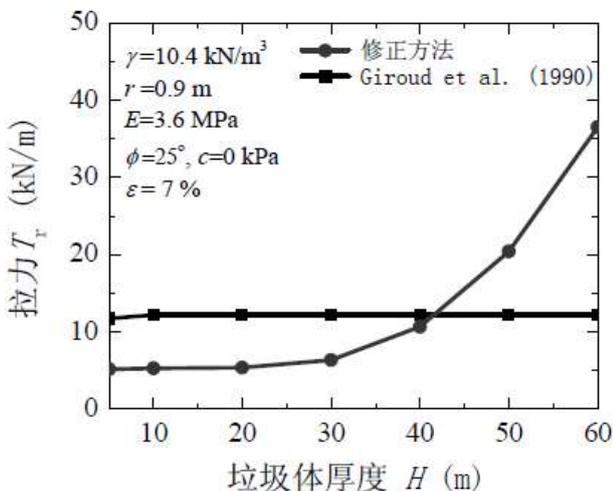


图 33 局部沉陷对土工膜拉力的影响

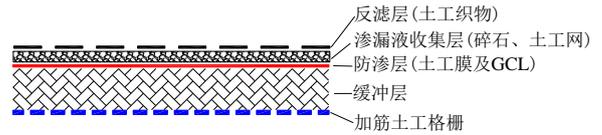


图 34 含缓冲层和加筋层的中间衬垫系统

### 4.3 土工合成材料防污性能及污染控制

衬垫系统是垃圾填埋场实现环保功能所必需的最重要组成部分。渗滤液通过衬垫系统的渗漏与扩散机理研究是衬垫系统合理设计和施工的基础。

衬垫系统服役寿命的设计要求其击穿时间不能小于填埋场主要污染物稳定化周期。我国环境岩土工作者针对我国垃圾填埋场常用的四种衬垫系统结构型式，获得了考虑非线性吸附时污染物在粘土中的一维扩散解、污染物通过有缺陷膜复合衬垫中的一维运移解析解等一系列解析解，开展了高水头作用下污染物击穿有缺陷膜复合衬垫的时间分析，发现了土工膜（GM）漏洞频率增大会显著减少重金属离子通过复合衬垫的击穿时间；渗滤液水头和压实粘土衬垫（CCL）施工质量对  $Cd^{2+}$  在 CCL 中运移的影响非常显著，四种不同衬垫的击穿时间如表 5 所示<sup>[30]</sup>。由此，可以基于衬垫系统的击穿时间指导填埋场中衬垫系统设计和施工，如控制衬垫系统上水头在 30cm 内可大大降低污染物渗漏的风险。

### 5 结语

近年来我国地下水土环境污染事故频发，引起了国家相关部门高度重视，国家在此方面的投入也逐渐加大，环境岩土工程工作者正面临着前所未有的机遇和挑战。经过多年不懈的努力和发展，岩土工程学科在环境保护领域的作用和优势逐步显现出来，并在一定程度上得到了环境工程界的认可。在此呼吁环境岩土工程者共同着眼于未来发展趋势，着手于国家近期的重大需求和关键科学问题，着力于与环境工程等相关学科交叉与合作，实现该学科方向跨越式发展。

由于水平和篇幅有限，尚有一些环境岩土工程问题及有价值的研究成果未在本文中得到反映，希望各位同行见谅，并给予批评指正。

#### 参考文献

- [1] Qian X D, Koerner R M, Gray D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction. New Jersey: Prentice-Hall Inc. 2002.
- [2] Chen Y M, Zhan T L T, Li Y C. Development of Leachate Mounds and Control of Leachate-Related Failures at MSW

- Landfills in Humid Regions. Invited Lecture. The Sixth International Congress on Environmental Geotechnics. New Delhi, India. 8-12 Nov, 2010.
- [3] 《中华人民共和国国家环境保护标准(HJ564-2010):生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范(试行)》.
- [4] 詹良通, 管仁秋, 陈云敏, 刘钊. 某填埋场垃圾堆体边坡失稳过程监测及反分析. 岩石力学与工程学报, 29(8): 1697-1705.
- [5] Rees J F. The fate of carbon-compounds in the landfill disposal of organic-matter. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1980, 30(4): 161-175.
- [6] Kasali G B. Optimization and control of methanogenesis in refuse fractions, Ph.D. Dissertation, University of Strathclyde, Glasgow, U.K. 1986.
- [7] Meima J A, Naranjo N M, Haarstrick A. Sensitivity analysis and literature review of parameters controlling local biodegradation processes in municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 2008, 28(5): 904-918.
- [8] 瞿贤, 何晶晶, 邵立明, Bouchez Th ódore. 含水率对生活垃圾甲烷化过程的影响. *环境科学*, 2009, 30(3): 918-923.
- [9] Coduto D P, Huitric R. Monitoring landfill movements using precise instruments. *Geotechnics of waste fill-Theory and practice*, ASTM STP 1070, Philadelphia, 1990: 358-370.
- [10] Stearns R P. Settlement and gas control: Two key post-closure concerns. *Waste Age*, 1987, 18(3): 55-60.
- [11] Park H I, Lee S R. Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 1997, 24(4): 159-165.
- [12] Park H I, Lee S R. Long-term settlement behaviour of MSW landfills with various fill age. *Waste Mangement and Research*, 2002, 20(3):259-268.
- [13] Park H I, Park B, Lee S R, Hwang D J. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, 133(1), 64-72
- [14] Marques A C M, Filz G M, Vilar O M. Composite compressibility model for municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(4): 372-378.
- [15] Elagroudy S A, Abdel-Razik M H, Warith M A, Ghobrial F H. Waste settlement in bioreactor landfill models. *Waste Management*, 2008, 28(11): 2366-2374.
- [16] Chen Y M, Ke H, Fredlund D G, Zhan T L T, Xie Y. Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of MSW landfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(5), 706-717
- [17] 陈云敏, 谢焰, 詹良通. 城市生活垃圾填埋场固液气耦合一维固结模型. *岩土工程学报*, 2006, 28(2):184-190.
- [18] 谢焰,陈云敏,唐晓武,凌道盛,柯翰.考虑气固耦合填埋场沉降数学模型. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 601-608.
- [19] Durmusoglu E, Corapcioglu M, Tuncay K. Modelling of settlement in saturated andunsaturated municipal landfills. *International Journal of Geomechanics*, 2006, 6(4):269-278.
- [20] McDougall J. A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour inlandfilled waste. *Computers and Geotechnics*, 2007, 34(4): 229-246.
- [21] Hettiarachchi C H, Meegoda J N, Tavantzis J, Hettiaratchi P. Numerical model to predict settlements coupled with landfill gas pressure in bioreactor landfills. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(3): 514-522.
- [22] Hettiarachchi H, Meegoda J, Hettiaratchi P. Effects of gas and moisture on modeling ofbioreactor landfill settlement. *Waste Management*, 2009, 29(3): 1018-1025.
- [23] 刘晓东, 施建勇, 胡亚东. 考虑城市固体废弃物 (MSW) 生化降解的力-气耦合一维沉降模型及计算. *岩土工程学报*. 2011(in Press).
- [24] Chen Y M, Xu X B, Zhan L T. Analysis of solid-liquid-gas interactions in landfilled municipal solid waste by a bio-hydro-mechanical coupled model. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*. 2011 (in Press).
- [25] 谢海建, 柯瀚, 陈云敏. 浓度变化时复合衬层中有机污染物的一维扩散分析. *环境科学学报*, 2006, 28(6):930-936.
- [26] 陈云敏, 谢海建, 柯瀚, 唐晓武. 挥发性有机化合物在复合衬层中的一维扩散解. *岩土工程学报*, 2006, 28(9):1076-1080.
- [27] 张文杰, 陈云敏, 詹良通. 垃圾填埋场渗滤液穿过垂直防渗帷幕的渗漏分析. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 925-929.
- [28] Chen Y M, Xie H J, Ke H, Chen R P. An analytical solution of contaminant diffusion through multi-layered media and its applications. *Environmental Geology*. 2009, 58(9): 1083-1094.
- [29] Xie H J, Chen Y M, Ke H, Tang X W, Chen R P. Analysis of diffusion-adsorption equivalency of landfill liner systems for organic contaminants. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(4): 552-560.
- [30] Xie H J, Chen Y M, Lou Z H. An analytical solution to contaminant transport through composite liners with geomembrane defects. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(5): 1424-1433.
- [31] Xie H J, Lou Z H, Chen Y M, Jin A M, Chen P X. An analytical solution to contaminant advection and dispersion

# 样式

- through a GCL/AL liner system. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(8): 811-818.
- [32] 何晶晶,顾国维,李笃中. 城市污泥处理与利用[M]. 科学出版社, 2003.
- [33] 张光明. 城市污泥资源化技术进展[M]. 化学工业出版社, 2006.
- [34] 李磊, 朱伟, 吉顺健等. 微生物对固化/稳定化污泥长期强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1778-1782.
- [35] 陈萍,张振营,李小山,崔旸. 废弃淤泥作为再生资源的固化技术与工程应用[J]. 浙江水利科技, 2007.
- [36] 杨顺安,刘志欣,韦宏鹤等. 深圳南油“314”造地吹填淤泥加固改良浅析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(4):8-12.
- [37] 李玉华,吕炳南,张景成等. 河底淤泥固化处理及相关试验[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999.12, Vol.32, No.6, 66~69.
- [38] 姬凤玲,朱伟,张春雷. 疏浚淤泥的土工材料处理技术的试验与探讨[J]. 岩土力学, 2004, Vol.25, No.12, 1999—2001.
- [39] 张春雷,朱伟,范公俊. 水泥固化高含水率淤泥的收缩性质[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011.1.
- [40] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D]. 河海大学, 2007.
- [41] 刘时光,付毅等. 拜耳法赤泥固化性能研究[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2001 年第 3 期, 29-31.
- [42] Wood KR, Mcdonald GW. Design and Operation of Thickened Tailings Disposal System at Les Mines Selbaie. Cim Bulletin, 1986, 79(895): 47-51.
- [43] 杜延军,金飞,刘松玉等. 重金属工业污染场地固化/稳定化处理研究进展[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 116-124.
- [44] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 一种检测污染土的新方法——电阻率法. 岩土工程学报, 2006, 28 (8): 1028-1032.
- [45] 蔡国军, 刘松玉. 电阻率 CPTU 的环境污染场地评价研究现状. 环境监测管理与技术. 2010, 22(5): 48-52.
- [46] 王澎,王峰,陈素云. SVE 法修复污染场地所需工艺参数的确定[J]. 环境工程, 2010, 28(6): 108-112.
- [47] 潘建民. 湖州市杨家埠垃圾填埋场环境污染调查及评价. 环境污染与防治[J], 1996, 18(2): 34-37.
- [48] 刘长礼, 张云, 张凤娥等. 北京某垃圾处置场对地下水的污染[J], 地质通报, 2003, 22(7): 531-535.
- [49] Xie H J., Chen Y M., Zhan L.T. Investigation of migration of pollutant at the base of Suzhou Qizishan landfill without a liner system[J]. Journal of Zhejiang University Science A 2009, 10(3):439-449.
- [50] 詹良通, 陈如海, 陈云敏, 谢焰. 重金属在某简易垃圾填埋场底部及周边土层扩散 勘查与分析, 岩土工程学报, 2011, 第 6 期。
- [51] 林伟岸, 复合衬垫系统剪力传递、强度特性及安全控制 [D], 杭州: 浙江大学, 博士学位论文, 2009.
- [52] 吴景海, 陈环等, 土工合成材料与土界面作用特性的研究 [J], 岩土工程学报, 2001, 23 (1): 89-93
- [53] 徐超, 廖星樾等, HDPE 膜界面摩擦特性的斜板仪试验研究 [J], 岩土工程学报, 2006, 28 (8): 989-993.
- [54] 朱俊高, 施建勇, 严蕴. 垃圾填埋场固体废弃物的强度特性试验研究. 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版设, 2002, 192-196
- [55] 冯世进. 城市固体废弃物静动力特性及填埋场的稳定性分析. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学. 2005.
- [56] CHEN Y.M., LIN W.A. and ZHAN L.T., Investigation of mechanisms of bentonite extrusion from GCL and related effects on the shear strength of GCL/GM interfaces. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(1): 63-71.
- [57] CHEN Y.M., GAO D., ZHU B., Controlling strain in geosynthetic liner systems used in vertically expanded landfills. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 1 (1): 48-55.
- [58] 高登, 扩建垃圾填埋场中间衬垫变形与稳定性状及其工程控制措施 [D], 杭州, 浙江大学, 博士学位论文, 2009