

垃圾卫生填埋场 设计参考资料

中国建筑技术发展中心市政技术情报部

一九八七年十一月

前 言

随着物质生产的发展和人们消费水平的提高,城市生活垃圾和废弃物的数量也日趋增多,城市管理机构 and 卫生监督部门迫在眉睫的问题是如何妥善处理这些垃圾和废弃物。

现在,对城市生活垃圾和废弃物的处置方法主要有三种:填埋、焚烧和堆肥。卫生填埋始于六十年代,它是在传统的堆放基础上从保护环境免受二次污染的角度出发而发展起来的一种较好的垃圾处理手段。由于卫生填埋法具有投资少、容量大、见效快、治理彻底等优点,近年来,在世界各国得到推广和应用。

国外在卫生填埋场的设计、施工、管理方面已经取得了大量的分析测定数据,并积累了丰富的经验。为使我国环境卫生、市政工程等部门从事科研、设计、教学和管理的工程技术人员,对卫生填埋场的选址和设计有更多的了解,我们汇编了这本专题资料。该资料共汇编了22篇译文,内容包括卫生填埋场场址的选择、设计计算、防渗和导气处理以及法规等,并附少量实例作参考。

本专题资料在组稿、翻译过程中得到了武汉城建学院环境工程系环卫教研室、天津市环境卫生管理局科技处的协助,在出版和发行期间还得到了有关单位的大力支持,在此表示感谢。

由于我们的水平有限,资料中难免存在疏漏或错误,欢迎读者提出批评意见。

中国建筑技术发展中心市政技术情报部

一九八六年十二月

目 录

(一)

1、垃圾卫生填埋场的规划和设计	(1)
2、未来的填埋场	(7)
3、垃圾卫生填埋场预测模式	(9)
4、苏联垃圾填埋场	(15)
5、联邦德国垃圾处理法	(36)
6、废弃物最终处理场的场址选择方法	(48)
7、防渗填埋场渗滤液收集系统的设计	(57)
8、填埋场底部渗滤液收集系统的设计考虑	(66)
9、填埋场底衬的设计模式	(73)
10、对一种新型填埋场衬层的设计考虑	(83)
11、填埋场和表面蓄水衬层的设计方法	(91)
12、密封填埋场渗滤液收集系统的设计	(96)
13、垃圾填埋场滤液量的测定	(100)
14、垃圾填埋场地基双层密封系统	(104)
15、垃圾填埋场的塑料排水系统	(106)
16、罗林斯 (Rollins) ——垃圾填埋场的新方案	(109)
17、自然衰减式填埋场的设计	(113)
18、填埋场内气体的移动以及排气孔的设计	(119)
19、填埋场甲烷气体移动控制的计算机设计	(130)
20、对城市垃圾填埋场排气通风系统的评价	(141)
21、苏联初期阶段的垃圾填埋场	(153)
22、发展中国家土地填埋处理	(156)

(二)

1、民主德国具有国际水平的申贝格垃圾填埋场	(163)
2、复合衬层的设计	(167)
3、日本垃圾最终处理场实例 (一)	(168)
4、日本垃圾最终处理场实例 (二)	(171)
5、日本日出町谷户泽废弃物广域处理场挡水层设施概要	(173)
6、兴建中的台中市标准垃圾卫生掩埋场之简介	(177)
7、台北福德坑垃圾卫生掩埋场辟建计划	(180)

垃圾卫生填埋场的规划和设计

William A. Cummins等

建设一个垃圾卫生填埋场与盖楼建房一样，都要进行工程设计。设计的目的是为了经过周密地组织、详细地规划以及合理地施工，在不危害健康或不产生公害的条件下达到对固体废物进行填埋处理。垃圾卫生填埋场不是一个露天堆积场！一个经过设计的卫生填埋场，在使用中不会产生露天堆积场内所出现的诸如烟雾、火灾、爆炸、臭味、难看的外观，以及昆虫和啮齿动物等等令人生厌的现象。

从事垃圾卫生填埋场工程承包的私人或代理商必须具备工程知识以及有关垃圾卫生填埋场选址、设计和施工的经验。如果缺乏有关的经验和能力，就应设法得到有名望的工程顾问的帮助。虽然填埋被认为是各种已被承认的固体废物处理方法中最经济的一种方法，但是以为选定一个合适的填埋场地不需要丰富的专门技术或设计施工知识，这本身就是一个错误。一个工程师或顾问对填埋场地的选择是一块可被有效利用的贫瘠地。

遗憾的是许多人把露天燃烧堆放与卫生填埋等同看待。通常，设计新的卫生填埋场总受到一些人的反对，除非经营代理商声明在别处进行填埋作业。

在初步设计阶段就应拟定一项有效的进度计划，向人们说明卫生填埋作业如何才能顺利进行以及预期的效益。通常，人们对一个卫生填埋场的认可是否决定它是否存在的最重要因素。当某个卫生填埋场地经过详尽规划以后，例如作为一个公园、娱乐场、高尔夫竞技场或其他规划用途，这本身就是一件令人满意的公用事业。如果反对派强烈反对在选定的场地进行填埋，那么就有可能把它当作一个临时填埋场来使用，这时就要设法得到新闻界和电视台的支持，甚至可能还要争取得到为此项设计服务而聘用的专业人员的支持。但是有一点要记住，人们很快就会发觉，进度计划与计划实施之间是不一致的。填埋作业必须是能够得到公众支持的示范典型。

场地的选择

合理的选择场地可以消除由于日后填埋作业带来的各种问题。在选择一个卫生填埋场时需要用专门的技术、设备知识和经验对各种因素进行评价。有限工程公司或代理机构应对填埋场地的选择负责。

对场地的要求：填埋场所需的场地范围和空间容量主要依据固体废物的性质和数量、对废物的压实程度、填埋深度以及填埋场使用期长短而定。

用适合每一个设计方案的具体数据和资料来确定一个卫生填埋场的容量要求。如果已知每人每天垃圾的排出量和垃圾压实的密度，那么图1和图2就可帮助你确定所产生的垃圾总量以及所需的卫生填埋场的容量。

从设计角度来看，一个填埋场的容量可以每年每一万人口15英亩-英尺*(24200立方码)为依据。在确定所需整个场地范围时，还必须留有机动区，要求的边坡余量，表土层堆存空间，办公室、磅秤房、道路用地以及永久性或临时性设施所占地。

各项费用的考虑：下列诸因素将决定填埋工程的费用。

- 土地的费用：全部征购或租借。
- 作业区的大小：作业区越大，每吨垃圾的费用越低。
- 开拓区的费用：表面径流的导出，场内的清洁卫生，路基平整，电和水的配备，电话，污水管，进出道路，围墙，磅秤房，办公室和其他建筑物。
- 运输距离：由于有了高速公路和高速干道等有利条件，可在较短的运输时间内往返拉运更多的垃圾。运输距离越远，则垃圾的运输费用基本接近。

土壤的深度和特性以及它作为覆盖材料的性能。

对渗滤液进行监测、导流和处理的必要程度以及所要求的范围，这主要取决于垃圾本身的特点、沉淀作用、温度以及填埋场的水文地质条件。

整个场地使用规划：有了整个填埋场的土地利用总体规划，就可防止 现有场 地挪 作它用。对填埋完成以后场地的最终用途，在选址的最初阶段就应考虑，场地的用途与这一地区的自然特点以及总平面图的设置有关。现有场地的管理以及未来 场地变化 的可能 也要加以考虑，对现在和未来场地内以及拟定的场地周围地区的使用也必须加以考虑。

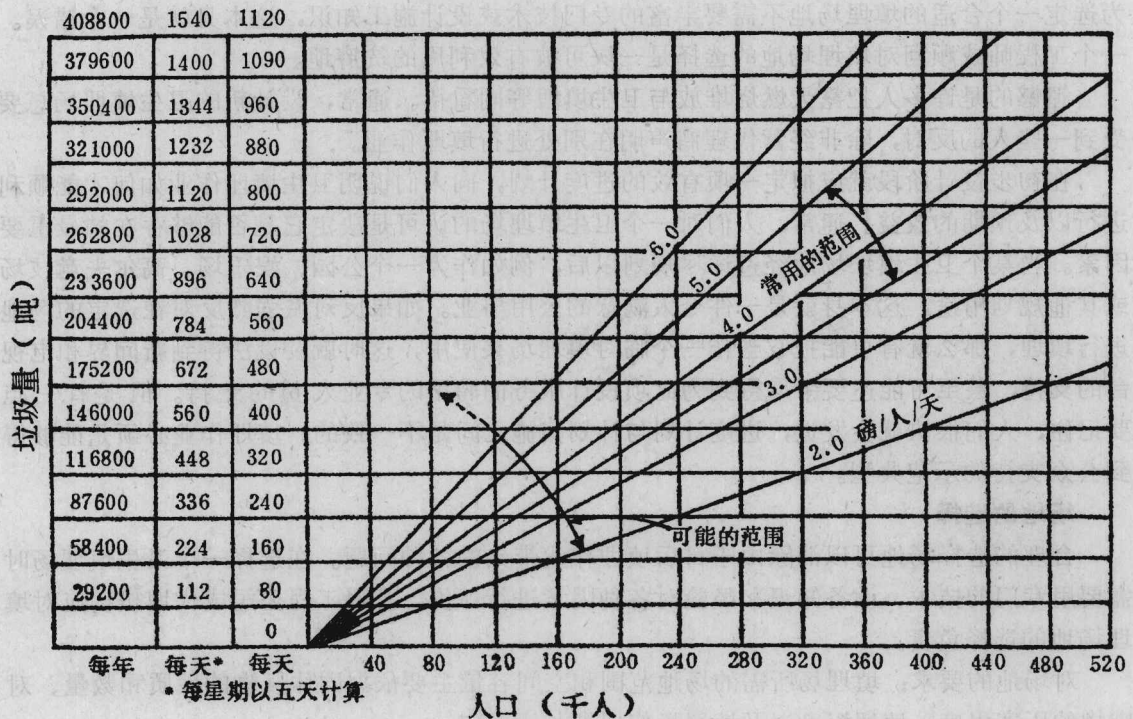


图1 人均垃圾量的变化

* 换算关系：英亩-英尺×1233=米³ 米³×1.31=码³

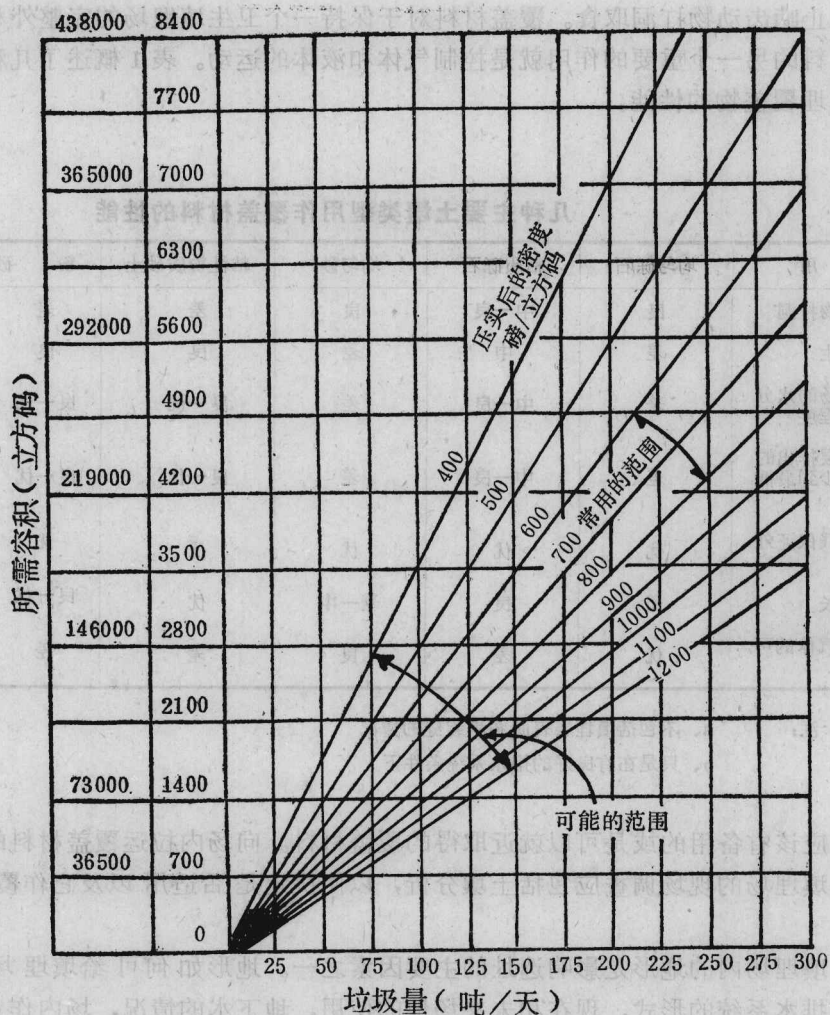


图2 卫生填埋场的容积需要量

公众的认可：填埋场应尽可能地避开临近居民区，一个完整的有条理的公用事业规划方案能够大大地提高公众对它的认可。随着基建和操作费用的必然增加，公开反对派也需要选择一处较为理想的场地。

交通条件：选择一处运输卡车经公路和城市干道就可以直接到达的填埋场地是很重要的。开往填埋场的运输卡车应避免穿过居民区。通往填埋场的道路宽度和道路的修建都要适应不同气候条件下各种规格的满载车辆的要求。要避免出现狭窄的桥梁、地下过道（下穿交叉道），以及进场途中的引路陡坡。同时有几条道路通往填埋场，这也是合乎建场要求的，当某一段道路暂时不能使用时，填埋场不致受到影响。

覆盖材料：露天堆积场和卫生填埋场之间引人注目的直观差别就在于卫生填埋场使用了覆盖材料。使用覆盖材料可以控制苍蝇的出入，阻止啮齿动物进入场内寻找食物，防止“清洁鸟”在废物表面吃食。每天一次或一天内几次加盖覆土可以大大减少废物对鸟类的吸

引，也可阻止啮齿动物打洞取食。覆盖材料对于保持一个卫生填埋场的完整外观是必不可少的。覆盖材料的另一个重要的作用就是控制气体和液体的运动。表1概述了几种主要类型的土壤用作填埋覆盖物的性能。

表1 几种主要土壤类型用作覆盖材料的性能

作 用	均匀砾石	粘质砾石	均匀砂	粘性粉质砂土	粉 砂	粘 土
防止啮齿动物打洞	良	中—良	良	差	差	差
抑制蚊蝇孳生	差	中	差	良	良	优 ^a
使渗入填埋场的水分减少到最低程度	差	中—良	差	良—优	良—优	优
使穿过覆盖层排出的填埋气体减少到最低程度	差	中—良	差	良—优	良—优	优
控制废纸乱飞保证外观整洁	优	优	优	优	优	优
保证植物生长	差	良	差—中	优	良—优	中—良
为排出分解气体的可渗透性 ^b	优	差	良	差	差	差

注： a、不包括填埋层表面布满裂缝的情况
b、只是在有良好的排水系统条件下

填埋场应该有备用的或是可以就近取得的覆盖材料。向场内拉运覆盖材料的费用是很贵的。对未来填埋场的现场调查应包括土壤分析，以便决定是否适用以及它作覆盖材料的数量。

地形：填埋场内的地形是影响选址的主要因素之一。地形如何可给填埋场带来许多问题。例如：排水系统的形式，现在和未来场地的使用，地下水的情况，场内作业方式以及进场道路。只要有可能就应避免填埋场建在泄洪平原上。开拓区的费用还应将各种防护措施包括在内，例如防洪堤或不透水膜。在向矿井、采石场、沟壑、沼泽地进行填埋、或是填筑岸坡之前，要对各种可能的污染以及防止污染所必需的工程测量进行彻底地调查和勘测。

没有受到洪水淹没的平地或缓和丘陵地区是最好的。但是这种类型的土地用作农场和工业材料库是非常理想的，因此场地费用也较昂贵。从土地利用的角度来看，凹地例如深谷和沟壑比平地更有效，这是由于此类凹地每公亩可以容纳更多的固体废物，无论如何都必须从周围地区运输覆盖材料。此外还要有具体的措施防止地表水在填埋场内泛滥。如果填埋场位于经济合理的运输距离以内，那么已经废弃的露天开采矿自然也适合作垃圾填埋场用。

水文地质：对未来填埋场地的土壤、水文以及地质条件的研究是了解填埋场的构造如何对环境起作用的必不可少的条件。以现存的地质图和地质记录以及附属场地调查就可决定底层地质基础的地层和构造，以及它的物理和化学性质。

象石灰石、砂石以及砾岩一样的砂、砾石和沉积岩是非常容易渗透的。因此也就意味着它们对地下水的流动有极大的潜力。沉积基础的裂痕和接缝是常见的，也增加了它的渗透作用。泥砂岩和油页岩，虽然它们的渗透作用很弱，但也可能存在大范围的接缝和开口裂痕，火

成岩和变质岩，例如花岗岩、大理石、黑曜岩、石英岩、片麻岩和页岩（板岩）一般渗透性较低，然而渗滤液穿透这些岩层的可能性也不容忽视。

利用水文地质调查来确定饱和区的位置、地下水穿过蓄水层的特性、流速以及流向，这些都取决于岩层的渗透性和液压梯度。还要确定在一个不变或是一个可变范围内蓄水层的位置，这样的资料在考虑渗滤液对地下水造成污染危险时是非常有用的。

公用设施：填埋场内的供电、供水、排水、电话等公用设施或邻近管线延伸部分都会影响填埋场的基建和作业费用。

气候：对未来场地盛行风的认真考虑可帮助你对可能出现的诸如臭味、灰尘以及飞屑等难题有所了解。填埋场应尽可能地依靠自然地形避风。

通过对填埋场地有关沉降作用的研究，确定表面水径流的数量和频率，场内保持全天作业的实际可能性，设备在场内的活动以及场地的进出口。防备处在多雨气候条件下的场地对某些地段也许是有益的。

温度的变化也必须弄清，还要了解填埋场内敷设地下公用设施所在地正常的和极端的冰冻深度。在某些地段，冰冻条件会明显地影响填埋作业，特别是对设备、备用物资和覆盖材料的堆放有影响。防止冰冻的措施：例如，保温层还是可行的，但会增加填埋费用。

场地的比较：在对几种可能的填埋场地进行了比较之后，常采用一种划线的方法。这种方法用适当的加权量表示各种因素中比较重要的部分。这种方法在主观的、非工程判断的地方特别有用。在这方面，最理想的是一些具有必要的专长和能力的人随意记下各种可能性，避免人为偏差所得结果的平均值，于是就象在主观判断中人为偏差的可能那样不受约束。

环境因素：

渗滤液：渗滤液的来源包括垃圾分解作用产生的水份以及从地下水或地表水，例如雨水形成的内流水。如果卫生填埋场不直接与填埋场所在的地下水或地表水系统相连，那么渗滤液的最初来源就是由于雨水的渗透。

将卫生填埋场良好的工程设计和施工相结合而进行的合理规划及选址，通常可以消除由于渗滤液的流动对地表水或地下水造成污染的可能。常用的一些防护措施有：

场地选在远离河流、湖泊、水井和其他水源的安全距离内；

设置合适的排水导流槽，将地表水从场内引出；

避免填埋场选在地下分层地段（例如已经出现裂痕的石灰岩地质上），这样的地质条件会使填埋场的渗滤液流向地下水源。

使用土壤覆盖层或合成材料内衬，这种衬层几乎是不透水的。

气体：卫生填埋场在其有效使用期内产生多种气体，包括二氧化碳、甲烷、氮气、微量硫醇，有时还含有硫化氢。在早期阶段，填埋场内的垃圾进行好氧分解，所产生的气体主要是二氧化碳。一旦所有的游离氧被耗尽，垃圾的分解作用就变为厌氧，主要生成二氧化碳和甲烷气体。表2列出了填埋完成以后一段时间内填埋气体的成分。

二氧化碳的产生会使问题更加复杂，因为它是水溶性的，可被渗滤液吸收，因此渗滤液的pH值下降而腐蚀性增加。另一方面，甲烷气体本身是疏水的，但是也可通过扩散和对流穿过垃圾层进入大气层或作水平运动进入周围地区。大气层内甲烷气体的浓度为5~15%时就会引起爆炸。控制气体的移动可用不透水衬层，和修建砾石沟拦截以及向外导出移动的气体，还可设置一整套收集管、鼓风机和排气系统。人们开始对填埋气体的收集产生兴趣，并把它作

表2 埋 气 体 的 成 分

从填埋完成时开始计算的时间间隔 (月)	平 均 百 分 体 积		
	N ₂	CO ₂	CH ₄
0—3	5.2	88	5
3—6	3.8	76	21
6—12	0.4	65	29
12—18	1.1	52	40
18—24	0.4	53	47
24—30	0.2	52	48
30—36	1.3	46	51
36—42	0.9	50	47
42—48	0.4	51	48

为一种能源资源加以利用，有不少国家正在计划从填埋场内回收这种有价值的资源。

臭味：臭味气体通常是由厌氧分解和腐败物质产生的，对臭味最好的控制方法就是在当天进场的固体废物表面迅速形成连续覆盖层，封闭填埋场内已填满部分的表面裂缝以阻止高浓度臭味气体的散发。

浓烈的臭味也许来自填埋场接收的某些特殊的废物，例如粪便、经过发酵的谷物以及食品加工废物，另外一个可能的来源就是从底层渗漏液或收集系统内到达表面的渗滤液造成的。可以使用化学药品来抑制这些臭味。

噪音：填埋场内设备的运转及垃圾车卸车是填埋场噪音的主要来源。使用地上护道和种植树木对于控制噪音的传播特别有效。通过划定卡车运输路线，尽可能减少车辆穿过居民区，噪音的影响作用也就会降至最低限度。

环境美化：设计师们应尽量使填埋场与其周围地区保持协调一致。注意场地入口处的建筑效果、沿场地四周种植树木、建起围墙控制飞屑以及制止随意地将垃圾倒在场外，这样做将有助于使填埋场达到环境美化的要求。

空气污染、火灾和灰尘：严格控制各种车辆设备排出气体可使空气污染降至最低，填埋场内不允许出现火灾，一旦发生火灾，就应立即进行灭火。在填埋场选址时，首先就要考虑控制灰尘和了解填埋场内盛行风的情况。填埋操作过程中的扬尘可由林带，地上护道，围墙以及采用化学药剂、种草和类似泡沫或覆盖型材料的填埋覆盖物加以控制。

带菌体：带菌体包括老鼠、苍蝇和蚊子。对垃圾进行最大限度的压实以及每天用覆土均匀压实可控制老鼠和苍蝇。控制蚊子的最好办法是防止场内滞流水体的扩大，最主要的是把低处填满形成连续坡度。

鸟类：填埋作业似乎吸引了某些鸟类，应尽可能快的用土将废物覆盖住，以减少鸟类的食物来源，这样，飞临填埋场的鸟类的数目也就会减少到最低限度。

«Public Works» 1982年 Vol 113 No.12

(祁国平译)

未 来 的 填 埋 场

K.W.Brown

当大量化学合成产品在社会上销售的时候,城市废物产生的渗滤液也就变得更加复杂,填埋场内处理设施的处理量也有所增加。现在所说的废物包括塑料、农药、药品、溶剂和其他化学物质。当这些物质暴露于填埋场的酸碱环境,就会发生缓慢释放或分解作用。有时还会产生毒性更强的化学物质。尽管人们已经做出最大努力,使用了压实的粘土衬或合成纤维衬来保护地下水,但是渗滤液总是不断产生,穿过粘土衬,流经邻近的土壤层最终污染地下水。填埋渗漏加重地下水污染这种现象最终必将促进研究新的处理技术。

填埋场内不堆置垃圾便可避免出现污染地下水源,这需要加强再循环、焚烧和地面处置等安全可靠的处理方法。然而那种认为所有的城市固体废物在可预见的未来一段时间内经过各种可代替的技术方法就可妥善处理的想法也是不现实的。因此,在长时间内还要堆积大量的废物和垃圾。

未来城市废物的地面处理与目前的处理技术有许多共同的特点,也可能出现一些显著的变化,包括处理设施建在地上而不是地下,以及使用这种设施的数量增多。建这样的设施更实用,还可节省土方挖掘费用。未来的设施也许还包括在排水系统之上有一倾斜的、经过压实的粘土衬基础,排水系统设计成允许渗滤液受地心引力作用流动。排水系统之上,多层吸附材料将用来去除废物中渗出的多种金属离子和有害成分,这样的设施通常建在相邻的单元之间,如图1所示。其中包括相邻的倾斜排水面以及用一种常见倾斜罩加以最后覆盖。

先将渗滤液积存在一个贮液槽内,然后再流到位于填埋单元之内的透性土壤层。利用循环过程加速吸收,促进有机化合物的分离和迅速沥出可变部分。当一部分经过循环的渗滤组分流经表面土壤层时,其自身保持不变或发生降解。因此,循环过程使渗滤液的质量发生迅速的改变,不再向其周围环境释放有害化合物。一旦渗滤液的质量有所改善,就要设置一种起决定性作用的粘土罩,这种粘土罩的设计应使渗滤液降至最少。加盖粘土罩以后释出的渗滤液应迅速减少。如果粘土罩设计得合适,渗滤液也就会减少到忽略不计的程度,这样密封在稳定环境内的废物也就不会接触到地下水。

很显然,城市废物的地面处理具有许多好处,对地下水也可起到短期和长期的保护作用。如果在整个设施封闭之后粘土罩不再起作用,并再次产生渗滤液,这种现象即刻就很明显,紧接着便开始了补救作用。渗滤液收集系统不需要用泵,这是由于地心引力会使渗滤液形成连续流动。如果不加以收集,渗滤液将会蔓延和穿过土壤表面,这种情况很快就会被察觉。由于一整套地上设施可作为一个消化池,容易降解的和流动的部分被滤出或在封闭之前进行处理,这样形成的渗滤液比普通填埋场产生的渗滤液的质量要好得多。还可减少对环境的长期影响和不利作用。流到表面的渗滤液比进入地下水的渗滤液要容易处理。此外,由于

生成的任何气体都只在地表之上，气体向邻近地区的地下移动的可能性实际上已被消除。图2明说了一整套地面设施，其中部分设施是封闭的，同时渗滤液被收集起来。

这套设施在景观美化和对腐蚀风化的控制方面存在不足，但是这两个难题容易解决。在设施四周以及道路两旁种植树木和花草加以美化，通过合理设计可以避免陡坡的产生以及利用邻近的填埋单元使陡坡的范围减至最小。采用经过仔细筛选的表层土以及特有的永久性植被，使腐蚀风化作用降到最低限度。

地面处理设施也许还包括许多技术改进措施，以减少对环境的不利影响。一套城市废物地面处理系统，例如本文所提到的，将大大降低处理操作对地下水污染的影响。地面处理设施中渗滤液分离系统依靠地心引力作用连续运行，所以在衬层之上没有渗滤液积存，减少了衬层失效而造成对地下水的渗漏污染。

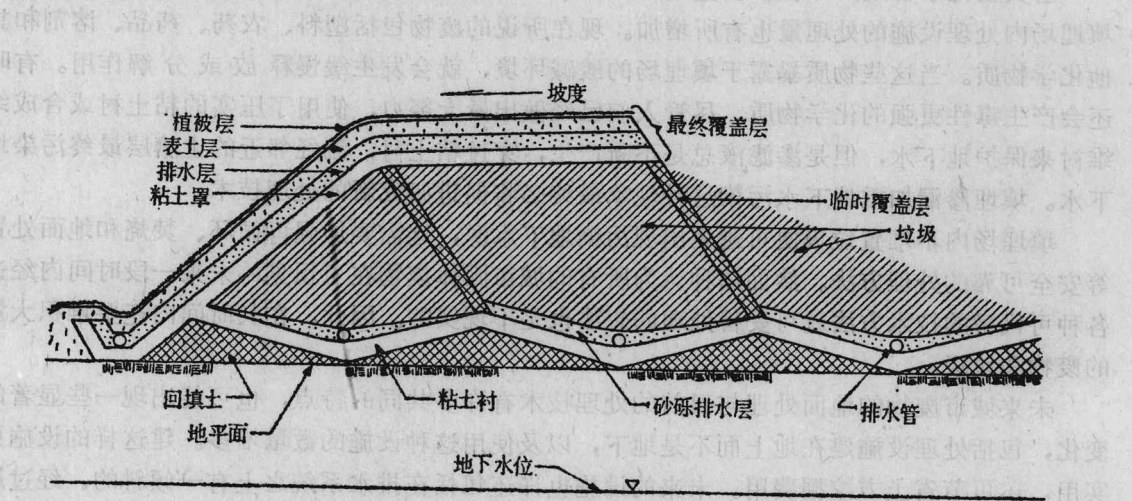


图1 地面以上处理设施相邻单元之间剖面图

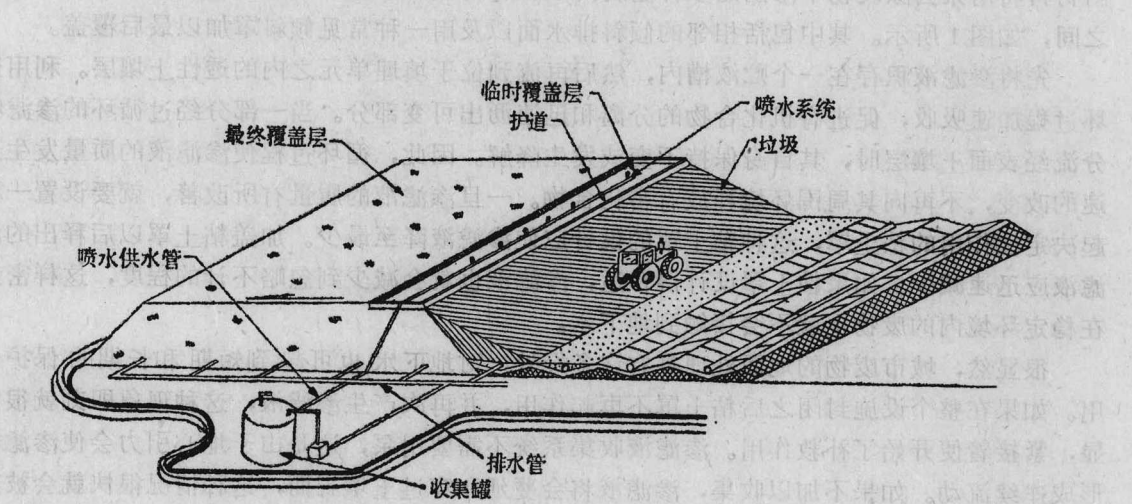


图2 地面以上处理设施密封和常用部分说明

垃圾卫生填埋场预测模式

Haydar Erdogan

前 言

向垃圾填埋场内填筑废物是目前最常用的固体废物处理方法。人们普遍认为,在多数情况下垃圾填埋场产生的渗滤液是地表水和地下水的主要污染物,渗滤液穿过底层土壤最终影响地下和地表供水。有毒物质造成对供水的污染仍然是一个很严重的问题,是对公共卫生和安全的极大威胁,必须迅速加以改善。

一些研究人员已对地下水流系统内各种污染物的运动作了模拟试验。弗里兹(Freeze)提出一种有限差分模式,用来预测地下水流系统横截面内各种污染物的对流传移,这种预测忽略了扩散和延缓过程。科尼库(Konikow)、布利德霍菲(Breedehoef)和罗布森(Robson)把这种对流和扩散的有限差分表面数量转移模式应用于砾石沉积层中的污染。

费尔普斯(Phelps)根据流体穿过垃圾颗粒上的一层水膜,用数量转移方程式提出一种垃圾填埋渗滤模式。厄尔多根(Erdogan)也就煤转变成固体废物提出一种数学模式。该模式是根据把内外膜扩散阻力作为一种速度控制机理以及固液两相浓度之间的线性平衡关系提出来的。

数学模式的提出

模拟未饱和及已饱和填埋场内污染物的消失,在确定废物处理场对地下和地表水质的影响方面是一重要的步骤,该项研究的目的是要提出一个数学模式和有关填埋的计算机程序,并以此预测垃圾填埋场渗滤液的产生、移动和消失。在这些数学模式的公式内提出以下的假设:1、介质是未饱和的,2、水流是单方向的并且垂直向下穿过填埋场,3、无机和有机污染物通过一阶类型反应在固相阶段产生,4、有机物被微生物利用作为自身的食物和能量来源,5、通过常规动能公式模拟好氧和厌氧微生物的作用,6、无机和有机物通过第一阶反应降解。

穿过填埋场的水流运动

一般情况下穿过一个填埋场的不饱和流体,其水平衡可用下式表示为:

$$\frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta)] \frac{\partial \theta}{\partial z} + Q_s = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$q = K(\theta) - \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中 θ ——含水量 (厘米³/厘米³)

$K(\theta)$ ——液体传导系数 (厘米/天)

z ——距离(厘米)

$D(\theta)$ ——扩散系数(厘米²/天)

Q_s ——下降/源端(厘米³/厘米³×天)

t ——时间(天)

q ——Darcy'(达西)速度(厘米/天)

a) 连续搅拌槽反应器

既然是这样,用一组化学组成单一的单元模拟填埋,假设这些单元的作用就象连续搅拌槽反应器(CSTR)一样,每个反应器的容积由固液两相组成。根据以上假设,无机、有机和生物量性能方程式就可以写成:

$$Q_{i-1}C_{i-1} - Q_i C_i + V\theta_i R'_i = V\theta_i \frac{\partial C_i}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_{i-1}C_{i-1} - Q_i C_i + V\theta_i R''_i = V\theta_i \frac{\partial C_i}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_{i-1}X_{i-1} - X_i Q_i + V\theta_i R'''_i = V\theta_i \frac{\partial X_i}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

其中 $i = 1, 2, 3 \dots\dots, n$

n ——串联在一起的CSTR的数目

Q ——流速(厘米³/天)

C ——液相浓度(毫克/厘米³)

V ——反应器的容积(厘米³)

R' ——无机物质的降解速度(毫克/厘米³×天)

R'' ——有机物质的降解速度(毫克/厘米³×天)

R''' ——生物量增长速度(毫克/厘米³×天)

X ——生物量浓度(毫克/厘米³)

变量 t 和 θ 的定义如前所述, R' 和 R'' 的速度方程式定义为:

$$R' = kC \quad \text{对无机物} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R'' = k'C - \frac{\mu_m XC}{Y(K_m + C)} \quad \text{对有机物} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$R''' = \frac{\mu_m XC}{K_m + C} - k_d X \quad \text{对生物量} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中 k ——无机物质的速度常数(升/天)

k' ——有机物的速度常数(升/天)

μ_m ——特定微生物增长速度

Y ——微生物增长系数 单位数量已利用的基质所产生的单元数

K_m ——当基质利用率与1/2最大值相等时的基质浓度(毫克/厘米³)

起始条件为:

$$C = C_0 \quad t \leq 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$X = X_0 \quad t \leq 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

b) 对流——扩散模式

人们习惯于用数量转移对流——扩散方程式表示蓄水层和未饱和土壤层中污染物的移动。然而将这种方法应用于污染物穿过填埋垃圾的转移还非常有限，只是在最近，斯特劳布（Straub）和林奇（Lynch）才报道了有关它的应用。

在数量转移方程式的推导过程中应用这种方法把填埋场看作一种多孔介质，考察的主要过程是：1、分散——扩散；2、对流；3、生物降解；4、生成；5、经化学反应衰减或消失。描述无机和有机物以及生物量在饱和介质中的生成和移动的数学模式可以写成：

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\theta E \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qC)}{\partial z} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} - \theta R' = \frac{\partial (\theta C)}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\theta E \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qC)}{\partial z} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} + \theta R'' = \frac{\partial (\theta C)}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial (qX)}{\partial z} + \rho \frac{\partial X_s}{\partial t} + R'''\theta = \frac{\partial (\theta X)}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：E——溶质分散系数（厘米²/天）

ρ——固体的密度（克/厘米³）

S——固相浓度（毫克/克固体）

X_s——固相内生物量浓度（毫克/厘米³）

其他变量θ, C, z, q, t, X, R', R'', R'''都已在前面定义过。

方程式（11）（12）中的∂S/∂t和方程式（13）中的∂X/∂t分别为溶质和生物量从固相转为液相的速度。为了解出以上各个方程式，相应地必须用液相溶质浓度C，生物量浓度X来表示∂S/∂t项和∂X_s/∂t项，同时提出液相浓度C和固相浓度S之间的某些关系。该项研究S与C之间的关系以及X与X_s之间的关系定义为：

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K_L (C^* - C) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} = K_x (X^* - X) \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中：K_c——表观数量转移系数（厘米³/克固体）

K_x——生物量表观数量转移系数（厘米³/克固体）

C*——液相饱和浓度（毫克/厘米³）

X*——液相生物量饱和浓度（毫克/厘米³）

分散系数定义为：

$$E = \gamma v$$

其中：v = q/θ平均孔隙水速度（厘米/天）

γ = 长度系数（厘米）在0~1之间

起始和边界条件为：

$$C = 0 \quad 0 \leq z \leq L \quad t = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$X = 0 \quad 0 \leq z \leq L \quad t = 0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$C = 0 \quad z = 0 \quad t > 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad z = L \quad t > 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

各模式的解

用分析法求解该项研究中推导出的模式既不可能又非常复杂。因此只有使用数值方法才能得到模式的解。

出于这个打算，迪米特科普勒斯 (Demetracopoulos) 和科菲阿迪斯 (Korfiatis) 已经提出水分转移方程式 (1) 和 (2) 的数值解。用这种全内含有有限方法就可以得到数量转移模式的水分分布。

方程式 (3) (4) (5) 是一阶常微分方程式，有机物和生物量的数量转移方程是耦合非线性常微分方程。把填埋场作为 n 个 SCTR 的一种连续排列，就可以写出填埋场 n 个一阶微分方程组。可以用四阶朗格—凯特 (Runger—Katta) 算法同时解 n 个一阶微分方程组。

方程 (11) (12) (13) 是二阶非线性偏微分方程，方程式 (12) (13) 还是耦合的。要想解这些方程式也许不大可能，因此适宜用数值解方法寻找这些方程式的解。本文所使用的就是莱因斯 (lines) 方法。采用此法，第一步是用有限差分近似解使偏微分方程简化为一组常微分方程。第二步是用其中一种积分法去解一组联立一阶常微分方程。这些步骤详细表达如下：

$$\text{用连续方程: } \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0$$

将方程式 (13) 和 (14) 简化成下面的形式：

$$E \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \left[\frac{E}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{q}{\theta} \right] \frac{\partial C}{\partial z} + \rho \frac{K_L}{\theta} (C^* - C) - kC = \frac{\partial C}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$E \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \left[\frac{E}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{q}{\theta} \right] \frac{\partial C}{\partial z} + \rho \frac{K_L}{\theta} (C^* - C) - k'C - \frac{\mu_m CX}{Y(K_m + C)} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad \dots\dots (22)$$

$$-\frac{q}{\theta} \frac{\partial X}{\partial z} + \rho \frac{K_x}{\theta} (X^* - X) + \frac{\mu_m X C}{K_m + C} - k_d X = \frac{\partial X}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (23)$$

对于使用中间差分法的第 j 层衬层，立体导数的有限差分近似值可以写成：

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial z} &= \frac{C_{j+1} - C_{j-1}}{2(\Delta z)}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta_{j+1} - \theta_{j-1}}{2(\Delta z)} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} &= \frac{C_{j+1} - 2C_j + C_{j-1}}{(\Delta z)^2}, \quad \frac{\partial X}{\partial z} = \frac{X_{j+1} - X_{j-1}}{2(\Delta z)} \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

把方程式 (24) 代入方程式 (21) (22) (23) 得出下面的方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_j}{\partial t} &= E_j \left[\frac{C_{j+1} - 2C_j + C_{j-1}}{(\Delta z)^2} \right] + \left[\frac{E_j}{\theta_j} \left(\frac{\theta_{j+1} - \theta_{j-1}}{2(\Delta z)} \right) - \frac{q_j}{\theta_j} \right] \left(\frac{C_{j+1} - C_{j-1}}{2(\Delta z)} \right) \\ &+ \rho \frac{K}{\theta_j} (C^* - C_j) - kC_j \quad \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_j}{\partial t} &= E_j \left[\frac{C_{j+1} - 2C_j + C_{j-1}}{(\Delta z)^2} \right] + \left[\frac{E_j}{\theta_j} \left(\frac{\theta_{j+1} - \theta_{j-1}}{2(\Delta z)} \right) - \frac{q_j}{\theta_j} \right] \left(\frac{C_{j+1} - C_{j-1}}{2(\Delta z)} \right) \\ &+ \rho \frac{K}{\theta_j} (C^* - C_j) - k'C_j - \frac{\mu_m X_j C_j}{Y(K_m + C_j)} \quad \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial X_j}{\partial t} = \frac{q_j}{\theta_j} \left(\frac{X_{j+1} - X_{j-1}}{2(\Delta z)} \right) + \rho \frac{K_s}{\theta_j} (X^* - X_j) + \frac{\mu_m X_j C_j}{K_m + C_j} - k_d X_j \quad \dots\dots\dots (27)$$

起始和边界条件为:

起始条件 $C_j(t) = 0$ 当 $t = 0$ 时 $j = 1, 2, \dots\dots\dots n$

边界条件 1 $C_j(t) = 0$ 当 $z = 0$ 时

边界条件 2 $\frac{\partial C_n(t)}{\partial z} = 0$ 当 $z = L$ 时

边界条件 3 $\frac{\partial X_n}{\partial z} = 0$ 当 $z = L$ 时

偏微分方程 (21—23) 现在已经简化为一阶微分方程 (25—27), 方程式 (25) (26) (27) 分别描述有机和无机物以及生物量在未饱和介质 (垃圾填埋场) 内的产生和转移。由于 $j = 1, 2, \dots\dots, n$, 这里 n 就等于衬层的数目, 因此对无机和有机污染物以及生物量来说就形成一组 n 个一阶偏微分方程。方程式 (26) 和 (27) 都是耦合的和非线性的, 这些方程都可解出。该项研究中用哈明 (Hamming) 提出的预测—补偿法解出一组联立一阶微分方程式。

结 论

用该项研究提出的模式模拟一个垃圾填埋场渗滤液 COD 的浓度。

图 1 是采用这个模式的一种复合反应器形式进行模拟试验的各项结果。

每个 CSTR 的表面积为 10米^2 , 深 30.5 厘米, 各反应器内起始 COD 和生物

量浓度分别为 4200 毫克/升和 2 毫克/升, 其他数值采用 $\mu_m = 0.0375/\text{天}$, $Y = 0.04$, $K_m = 5000$ 毫克/升, $K_d = 0.01/\text{天}$, $C^* =$

45000 毫克/升, $\rho = 469$ 克/升, 除此以外, 图 1 的模拟试验还用到 $K(\theta) = 1.829$ 厘米/天, $Q_{in} = 0.40$ 厘米³/厘米³, $k' = 0.45 \times 10^{-5}$ 升/天。

对流——扩散模式还可以用来预测一个填埋场的渗滤液 COD 和生物量浓度 (图 2)。除了以上数据以外, 图 2 的计算机模拟试验还用到 $K_L = 0.7565 \times 10^{-6}$ 克固体/升 $\times$ 天, $K_s = 0.256 \times 10^{-5}$ 克固体/升 $\times$ 天, $X_s = 200$ 毫克/升, 还假设填埋场深 47.5 米, 包括有 50 层, 每层厚度为 91.5 厘米。

总结该项研究, 需要强调以下几个重要之处:

可将填埋场内地下水污染的数学模式和计算机模拟试验作为预测穿过蓄水层污染物水平的一种有益方法。数学模式对于预测从一个许可填埋场流出之前可能的地下水污染有很大帮助。该项研究提出的各个模式都可以说明数量转移过程和生物学过程。这些模式还可以作为一种方法, 在水质研究、处理场选址和设计、环境影响评价、地下水污染物回收以及与地下水资源相关的规划时发挥作用。

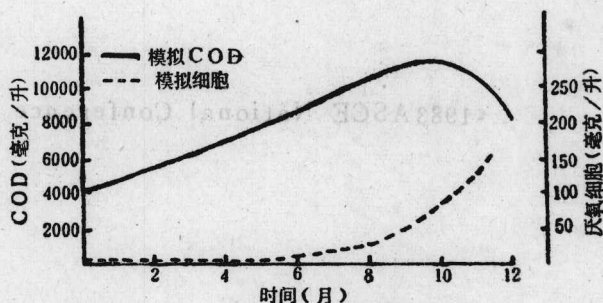


图 1 CSTR 模式: 模拟有机物 COD 和细胞浓度

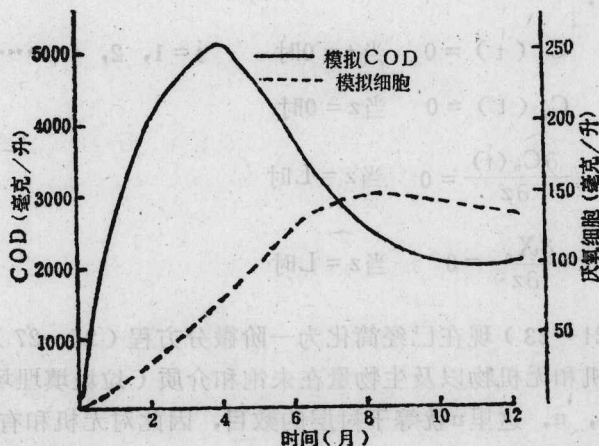
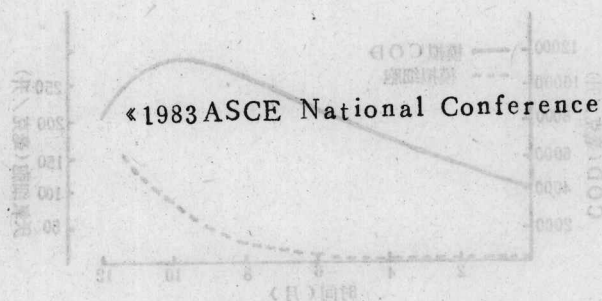


图2 对流扩散模式：模拟有机物COD和细胞浓度



«1983 ASCE National Conference on Environmental Engineering»

(祁国平译)