

郭雪,李振山,焦安英. 2013. 北京市 2009—2011 年垃圾渗滤液处理电能消耗特征与节能减排潜力研究[J]. 环境科学学报,33(2):473-478
Guo X, Li Z S, Jiao A Y. 2013. Energy consumption and pollutant emission in leachate treatment process in Beijing from 2009 to 2011 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,33(2):473-478

北京市 2009—2011 年垃圾渗滤液处理电能消耗特征与节能减排潜力研究

郭雪^{1,2}, 李振山^{1,2,*}, 焦安英²

1. 北京大学深圳研究生院城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055

2. 北京大学环境工程系, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871

收稿日期:2012-04-22 修回日期:2012-09-06 录用日期:2012-09-11

摘要:对北京市 2009—2011 年垃圾渗滤液处理中电能消耗进行研究,通过对现行几种渗滤液处理技术的对比和现场调查,采用逐层分析法,将电能消耗从处理设施上分为三大层次:单元—工艺—场站。结果表明,2009—2011 年北京市各垃圾处理场处理渗滤液的耗电量基本不变。对于同一场站来说,生化处理单元的电能消耗一般高于其他 3 个单元,反渗透单元的电能消耗高于纳滤单元。填埋场和粪便消纳站中垃圾总量与渗滤液产量有很好的线性关系,且单位垃圾产生的渗滤液量为:消纳站 > 填埋场;填埋场和粪便消纳站中渗滤液产量与电能消耗也有很好的线性关系,且单位渗滤液耗电量为:填埋场 > 消纳站。北京市垃圾渗滤液处理全过程中节水潜力约为 165.94 万 t·a⁻¹ (近 3 年北京垃圾年度中水回用量均值为 31.22 万 t·a⁻¹),粪便消纳站存在最大节水潜力,填埋场次之,分别占总节水潜力的 89.58%、6.69%。粪便消纳站单位垃圾的节水量最高,平均值为 0.02575 t·t⁻¹。

关键词:垃圾渗滤液;电能消耗;最优值;节能潜力

文章编号:0253-2468(2013)02-473-06 中图分类号:X705 文献标识码:A

Energy consumption and pollutant emission in leachate treatment process in Beijing from 2009 to 2011

GUO Xue^{1,2}, LI Zhenshan^{1,2,*}, JIAO Anying²

1. Key Laboratory of Environmental Science and Technology of Urban Human Settlements, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055

2. Department of Environmental Engineering, Peking University, the Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100871

Received 22 April 2012; received in revised form 6 September 2012; accepted 11 September 2012

Abstract: To investigate the power consumption characteristics in the municipal landfill leachate treatment in Beijing, we analyzed the present leachate treatment technologies and conducted on-site investigation. Elements of the treatment facilities in energy conservation and emission reduction can be divided into three levels, unit, process and station. The results showed that the numbers of MSW in each station were almost stable. In the same station, the power consumption of biochemistry unit was generally higher than the other 3 units. There was a good liner relationship between waste amount and leachate production in the landfill and fence digest station, and the leachate production of per ton waste in the fence digest station was higher than that in the landfill site. There also existed a good liner relationship between leachate production and power consumption in landfill and fence digest station, and the power consumption of per ton leachate is the landfill site was higher than that in the fence digest station. The potential of conservation in the municipal landfill leachate treatment process in Beijing was about 1.6594 million t·a⁻¹ (The mean water dosage was 312200 t·a⁻¹ in recent 3 years in Beijing municipal treatment). Fence station accounted for 89.58% potential of water saving, while landfilling accounted for 6.69%. Fence stations had the highest amount of water saving of per MSW, with the average of 0.02575 t·t⁻¹.

Keywords: leachate; power consumption; energy conservation; optimum value; emission reduction

1 引言(Introduction)

渗滤液是垃圾在堆放和填埋过程中由于压实、

发酵等生物化学降解作用产生的液体(赵由才等, 2004;李颖,2008)。由于其组分复杂且含有多种有毒有害物质,对地表水、地下水、土壤和生态环境具

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2011BAJ07B04)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2011BAJ07B04)

作者简介:郭雪(1989—),女,E-mail:775703505@qq.com; *通讯作者(责任作者),E-mail:lzhenshan@iee.pku.edu.cn

Biography: GUO Xue(1989—), female, E-mail:775703505@qq.com; * Corresponding author, E-mail:lzhenshan@iee.pku.edu.cn

有潜在威胁,因此,必须对渗滤液进行有效处理(聂永丰等,1998;Hermann *et al.*,2011).目前,国内外常采用的处理工艺以生物法为主,根据实际处理情况和排放标准,增加前处理工艺或后处理工艺使渗滤液出水水质达到排放标准(李威等,2005;Renou *et al.*,2007;Christopher,2011;Zhao *et al.*,2011).

每一种渗滤液的处理方法都存在电能消耗和污染物排放的问题,且电能消耗量和污染物排放量之间有一定关系(沈承明,2010).对每一种处理方法而言,电能消耗越大,处理越彻底,污染物排放量越少,即在渗滤液处理过程中,针对一种处理方法,污染排放量与电能消耗呈负相关(IEA,2005).例如,渗滤液处理设施技术落后,处理方案陈旧,则渗滤液的处理只是达到一个浅层次处理,相对于已有的先进技术呈现增能增排;如果采用先进的技术与节能措施相结合,不但能够达到渗滤液的深度处理,实现污电能消耗的减少,同时还能回用渗滤液深度处理后产生的中水,实现渗滤液处理的节能减排(De Feo,2009;孙跃强,2011).

目前,国内关于渗滤液电能消耗和节能潜力的研究甚少,更没有相关统计数据(赵由才,2007).因此,本文根据已有的节能减排指标体系(冯霄,2009;朱启贵,2010;王洪涛,2011)研究渗滤液处理中电能消耗的特征与规律,将处理设施划分为单元—工艺—场站3个层次,分析渗滤液处理过程及实际运行中存在的问题,寻找最优电能消耗和浓缩液排放指标,估算节能减排潜力.最后,采用2009—2011年3年的数据计算北京市垃圾渗滤液产生量、除去单位渗滤液耗电量及浓缩液排放最优指标,以期为北京市渗滤液的处理、控制和节能减排提供参考依据.

2 研究方法(Research methods)

仅从渗滤液处理设施整体出发进行电能消耗分析,很难了解到设施内部的电能消耗与物质排放的情况,因而本文将渗滤液处理设施分为单元—工艺—场站3个层次,研究各个单元及不同场站电能消耗特征及其节能减排的潜力.

2.1 估算方法

结合渗滤液处理设施的实际情况,本文主要考虑渗滤液产量和单位渗滤液处理耗电量.对于现场调查的数据直接使用,不全的数据进行估算,具体如下.

小武基、五路居转运站采用公式(1)计算渗滤液产量,采用公式(2)计算单位垃圾耗电量,其中,小武基转运站工艺与马家楼转运站工艺类似,因此,根据马家楼渗滤液处理的单位能耗和物质排放情况推算小武基垃圾转运站渗滤液处理能耗和渗滤液产量.五路居转运站采用的是压缩工艺,与梨园转运站一致,因此,根据垃圾总量和两个转运站的工艺实际运行状况,估算五路居转运站渗滤液处理工艺的数据.

$$\frac{L}{W} = C_w B + C_0 \quad (1)$$

$$\frac{I_{e-bc}}{L_w} = r_{w-bc} \times I'_{w-bc} \quad (2)$$

式中, L 为各单元的渗滤液产生量(t), W 表示各单元的垃圾处理量(t), L/W 表示各单元的单位垃圾渗滤液产量($t \cdot t^{-1}$), C_w 为垃圾含水率, B 表示单位垃圾渗滤液产生率, C_0 为单位垃圾外加水量($t \cdot t^{-1}$), I_{e-bc} 处理渗滤液需要消耗的电量($kW \cdot h$), L_w 为垃圾产生的渗滤液总量(t), I_{e-bc}/L_w 表示处理单位垃圾产生的渗滤液耗电量($kW \cdot h \cdot t^{-1}$), r_{w-bc} 表示渗滤液处理程度, I'_{w-bc} 表示处理单位渗滤液达到排放标准的耗电量($kW \cdot h \cdot t^{-1}$).需要明确的数据包括:渗滤液产量、渗滤液处理程度、单位渗滤液达到排放标准的耗电量.

处理单元单位垃圾产生的渗滤液进水量($Q_{U进水}$)和出水量($Q_{U出水}$)计算公式为:

$$Q_{U进水} = \frac{Q_{进水}}{W_{垃圾}} \quad (3)$$

$$Q_{U出水} = \frac{Q_{出水}}{W_{垃圾}} \quad (4)$$

式中, $Q_{进水}$ 、 $Q_{出水}$ 分别为处理单元每天进水量、出水量(t), $W_{垃圾}$ 为每天处理垃圾总量(t).

2.2 研究内容及方法

单元层次主要是对生化单元、MBR单元、纳滤单元、反渗透单元电能消耗进行对比,寻找各单元电能消耗特征及规律变化,其中,渗滤液纳滤和反渗透单元还涉及电能消耗与浓缩液的排放关系.工艺层次主要探索垃圾总量与渗滤液产量、渗滤液产量与电能消耗的规律.场站层次是从渗滤液产生的中水回用角度,分析各场站的节水潜力.其中,潜力 = |现状值 - 最优值|,“现状值”为某一技术水平下的物质输入输出和能耗值,“最优值”为某一参照背景下通过技术改造实现物质输入输出和能量消耗最低值,二者差值代表技术改造可能带来的节能

减排潜力. 因此, 要求取单元层次的潜力值需要在现状值基础上通过适当的方法获取最优值. 本文在北京市范围内计算渗滤液的节能减排潜力时, 以平均到每吨垃圾的电能消耗和渗滤液排放量的最小值与各场站、各工艺和各单元之间的差值为各层次的节能减排潜力.

2.3 数据来源

数据主要来源于 2009—2011 年北京市垃圾渣土管理处及各类生活垃圾场站的现场调查. 需要说明的是, 在现场调查的过程中, 由于划分的单元层次较细, 部分场站无法给出某些特定单元的物质排放和能耗数据, 只能通过与有数据的场站类比, 再

结合实际调查中的工艺运行条件进行估算.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 单元层次电能消耗特征

各单元单位垃圾电能消耗如表 1 所示, 其中, 渗滤液进水、出水指标经公式(3)和(4)计算. 同一单元单位垃圾耗电量指标范围变化较大, 原因是每个场站设置的处理单元组成不同, 例如, 填埋场的渗滤液一般需要经过生化处理单元、MBR 单元、纳滤(NF)单元、反渗透(RO)单元, 而粪便消纳站一般只设置生化处理单元, 没有其他单元, 因此, 粪便消纳站生化单元单位垃圾耗电量高于其他场站.

表 1 处理单元能耗与污染物排放指标

Table 1 Energy consumption and pollutant emission of every unit

处理单元	单位垃圾消耗电能 /(kW·h·t ⁻¹)	$Q_{U\text{进水}}$ /(t·t ⁻¹)	$Q_{U\text{出水}}$ /(t·t ⁻¹)	浓缩液排放量 /(t·t ⁻¹)
生化处理单元	0.0771 ~ 9.5000	0.0185 ~ 1.5012	0.0185 ~ 1.1563	—
MBR 单元	0.0204 ~ 6.5275	0.0185 ~ 0.7033	0.0185 ~ 0.7033	—
纳滤单元	0.0801 ~ 3.0857	0.0208 ~ 0.7033	0.0170 ~ 0.6154	0.0038 ~ 0.1155
反渗透单元	0.1438 ~ 7.2813	0.0170 ~ 0.6154	0.0108 ~ 0.3282	0.0062 ~ 0.2989

图 1 为北京市各垃圾处理场渗滤液处理设施的单位垃圾耗电量, 其中, 图中横坐标数字代表不同场站: 1. 五路居转运站, 2. 西田阳填埋场, 3. 梨园转运站, 4. 六里屯填埋场, 5. 高安屯焚烧厂, 6. 南宫堆肥厂, 7. 沃绿洁垃圾综合厂, 8. 马家楼转运站, 9. 滨

阳填埋场, 10. 小武基转运站, 11. 四季青消纳站, 12. 黄土岗粪便消纳站, 13. 草桥粪便消纳站, 14. 西道口粪便消纳站, 15. 安定卫生填埋场, 16. 阿苏卫填埋场, 17. 焦家坡填埋场, 18. 三星庄消纳站, 19. 房山消纳站, 20. 门头沟消纳站, 21. 绿环污物消纳站, 22. 密

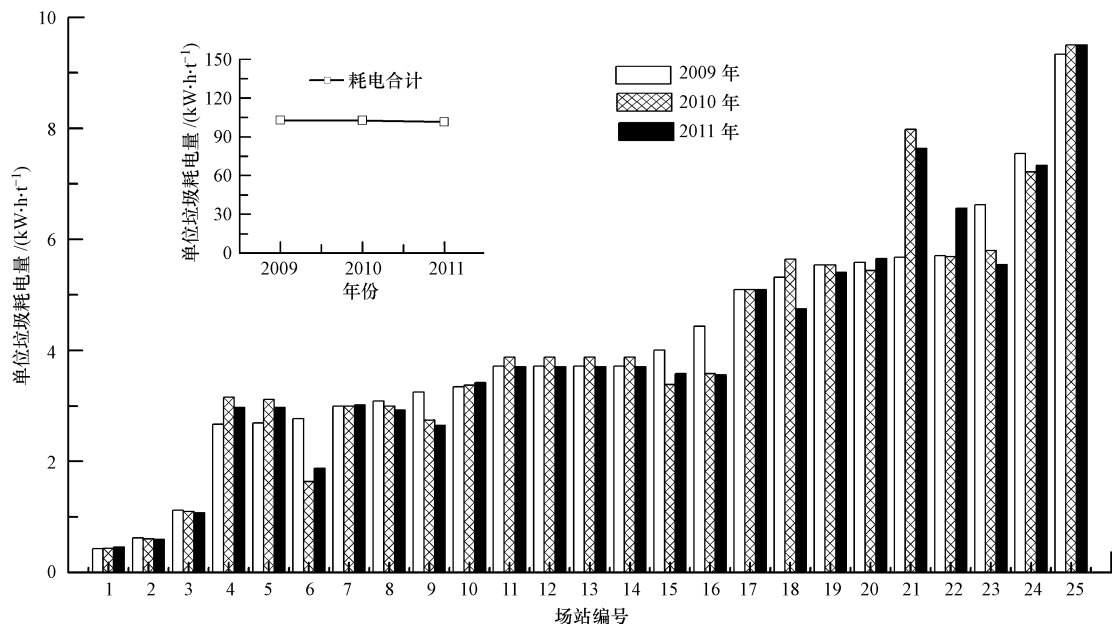


图 1 各场站单位垃圾耗电量

Fig. 1 Power consumption at the stations

云粪便消纳站,23. 小张家口消纳站,24. 顺义综合厂,25. 平谷区消纳站. 从图1可以看出,2009—2011年25个处理场处理单位垃圾耗电量基本不变. 将所有场站的电耗按年度进行加和(图中左上方小图所示),发现2009、2010、2011年3年的数值保持稳定,分别为102.70、102.55和101.41 kW·h·t⁻¹.

图2是具备4个处理单元的各个场站每个单元的耗电量. 图2a显示,渗滤液处理耗电量可以分为低、中、高3个区域,纳滤单元耗电量处于低区,生化处理单元耗电量处于高区,MBR单元和反渗透单元耗电量处于中区,不过在垃圾量较低时,分区特征不明显. 图2b(图中不同柱形图例代表不同场站,从左至右依次为小武基转运站、马家楼转运站、六里屯填埋场、阿苏卫填埋场、安定卫生填埋场、宾阳填埋场、高安屯焚烧厂)结果表明,对于同一场站来说,

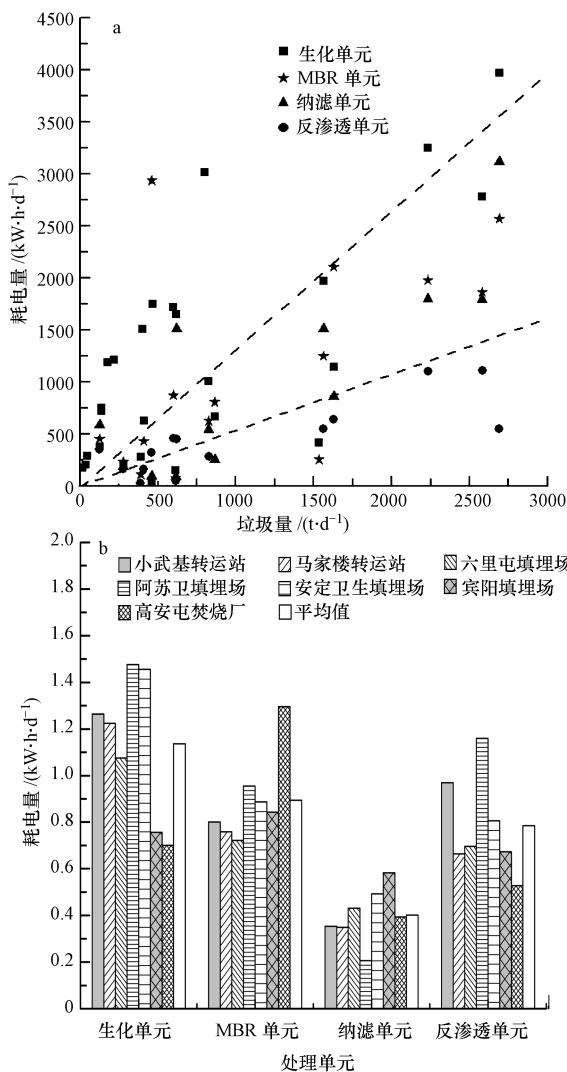


图2 各单元耗电量

Fig. 2 Power consumption of each unit

生化处理单元的电耗一般高于其他3个单元,这是因为生化处理单元作为渗滤液处理的第一个单元要保证COD、氨氮的去除率,其平均耗电量达到1.136 kW·h·d⁻¹,MBR单元平均耗电量为0.984 kW·h·d⁻¹,纳滤单元平均耗电量为0.401 kW·h·d⁻¹,反渗透单元平均耗电量为0.785 kW·h·d⁻¹. 反渗透单元的耗电量高于纳滤单元,是因为经过纳滤单元处理后,渗滤液的水质仍未达到排放标准,进一步去除其中的污染物难度大,耗电量较高. 在纳滤和反渗透单元中,随着产生浓缩液增多,耗电量越大;但产生相同的浓缩液,反渗透单元消耗的电量大于纳滤单元(图3). 这是因为经过纳滤单元处理的出水仍达不到排放标准,进一步去除污染物有难度,反渗透单元作为后端处理单元,需要消耗较多的电能才能使出水达到排放标准. 其中,纳滤单元浓缩液产量与耗电量关系为 $y = 15.228x$,反渗透单元浓缩液产量与耗电量关系为 $y = 35.342x$.

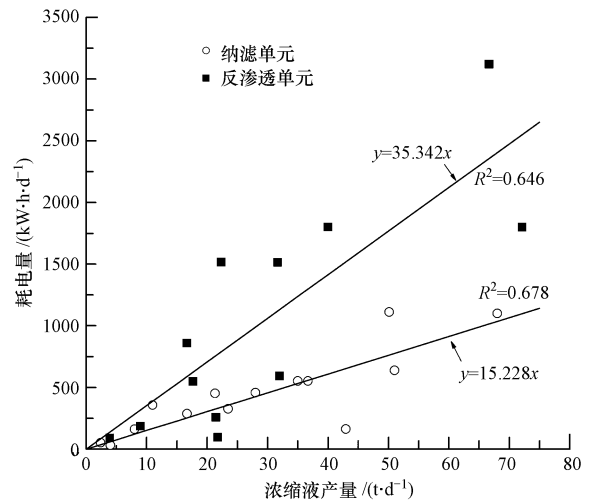


图3 浓缩液耗电量

Fig. 3 Power consumption of concentrated solution

3.2 工艺层次电能消耗特征

通过对垃圾总量和产生的渗滤液量进行分析,发现填埋场和粪便消纳站中垃圾总量与渗滤液产量有很好的线性关系,消纳站垃圾量与渗滤液产量关系为 $y = 1.0938x$,填埋场垃圾总量与渗滤液产量关系为 $y = 0.1838x$,并且单位垃圾产生的渗滤液量为:消纳站 > 填埋场(图4a). 渗滤液的产量与垃圾含水率、有机物含量、降水和蒸发等因素相关(Kang et al., 2002),由于粪便的含水率高于城市生活垃圾,因此,消纳站单位垃圾产生的渗滤液量大于填埋场.

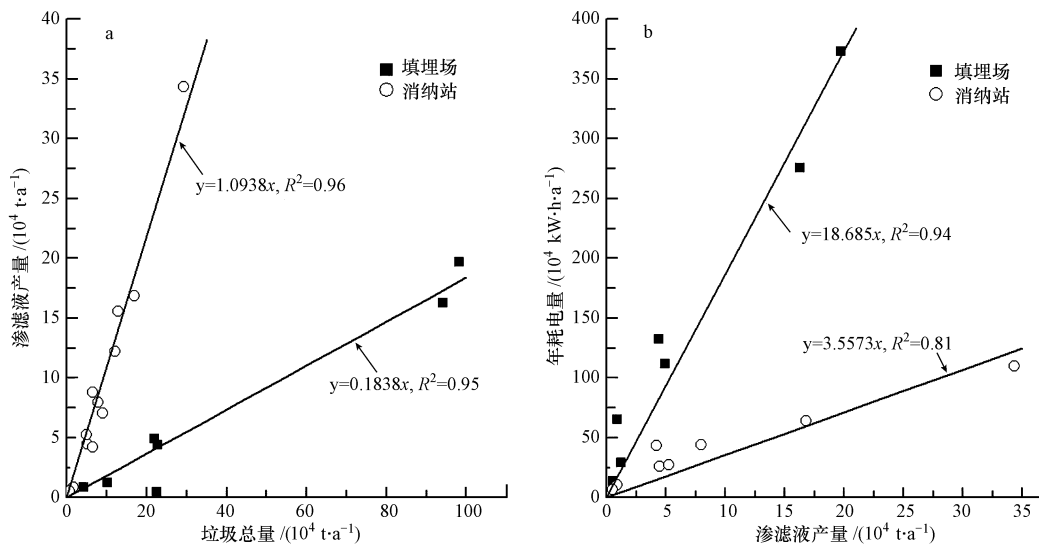


图 4 垃圾量与渗滤液产量及渗滤液与耗电量的关系

Fig. 4 The relations of MSW and Leachate production & Leachate production and power consumption

图 4b 表明, 填埋场和粪便消纳站中渗滤液产量与耗电量存在线性关系, 消纳站渗滤液产量与耗电量的关系为 $y = 3.5573x$, 填埋场渗滤液产量与耗电量关系为 $y = 18.685x$, 处理单位渗滤液年耗电量为: 填埋场 > 消纳站。这是因为生活垃圾渗滤液中 COD、氨氮浓度高、组分复杂, 处理单位渗滤液需要消耗更多电能, 而且粪便消纳站一般只设置了生化处理单元, 经过生化处理单元后渗滤液的水质可以达到排放标准, 单位渗滤液耗电量比填埋场低。

3.3 场站层次节水潜力

渗滤液处理后中水利用可减少水的消耗量。转运站以单位渗滤液处理中水产率为 0.9846 t 进行计算, 堆肥厂、填埋场、焚烧厂、粪便消纳站、综合厂均参照填埋场单位渗滤液处理中水产率 0.962163 t 进行计算, 产生的中水可回用于炉内回喷(焚烧厂)、发酵工艺(堆肥厂)、恶臭控制工艺、绿化, 取代部分甚至全部耗水, 从而节约水资源。经计算, 近 3 年北京市垃圾处理年度中水回用量均值为 $312242.4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 渗滤液处理设施节水潜力总计为 $1659431.9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 存在巨大节水潜力(图 5, 图中不同柱形图例代表不同场站, 从左至右依次为: 城关转运站、梨园转运站、五路居转运站、小武基转运站、马家楼转运站、大屯转运站、垃圾转运中心、衙门口转运站、葡萄嘴转运站; 北神树填埋场、六里屯填埋场、阿苏卫填埋场、西田阳填埋场、焦家坡填埋场、永宁填埋场、小张家口填埋场、密云填埋场; 南宫堆肥厂; 高安屯焚烧厂; 三星庄消纳站、绿环污物消纳站、小张家口消

纳站、北小河消纳站、四季青消纳站、门头沟消纳站、房山区消纳站、平谷区消纳站、昌平区消纳站、衙门口消纳站、酒仙桥消纳站、西道口粪便消纳站)。

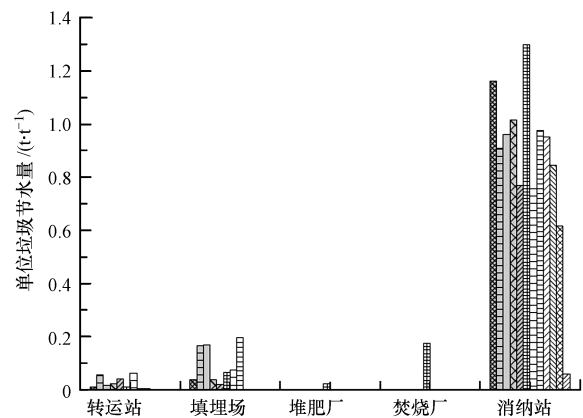


图 5 不同场站节水单位垃圾节水量

Fig. 5 Quality of water saving in per MSW of different stations

从整个场站层次来看, 粪便消纳站存在最大节水潜力, 占总节水潜力的 89.58%。这是因为粪便消纳站单位垃圾产生的渗滤液较高(图 4), 且粪便消纳站一般只设置生化处理单元, 不产生浓缩液, 因此, 其中水产量远高于其他场站, 故节水潜力所占比例最高。填埋场节水潜力占总节水潜力的 6.69%, 一方面是垃圾自身的含水及垃圾在降解过程中产生水, 另一方面是降水形成渗滤液, 所以填埋场产生的中水量较多, 节水潜力所占比例仅次于粪便消纳站。单位垃圾的节水量, 粪便消纳站最高

平均值为 $0.02575 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$,转运站为 $0.02575 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$,填埋场为 $0.09635 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$,南宫堆肥厂为 $0.02362 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$,高安屯焚烧厂为 $0.17499 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$.对垃圾渗滤液深度处理后回用,既解决了排水问题,又节约了水资源的消耗,同时削减了污染物的排放量.

4 结论(Conclusions)

1)将渗滤液处理设施分为单元—工艺—场站3个层次,对不同层次电能消耗分析发现,2009—2011年北京市各垃圾处理场处理单位渗滤液的耗电量约为 $102 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$,基本保持不变.

2)对于同一场站来说,生化处理单元的耗电(平均耗电量为 $1.136 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$)一般高于其他3个单元,反渗透单元的耗电量高于纳滤单元,纳滤单元浓缩液产量与耗电量关系为 $y = 15.228x$,反渗透单元浓缩液产量与耗电量关系为 $y = 35.342x$ (x 单位 $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$, y 单位 $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$).

3)在渗滤液处理工艺中,填埋场和粪便消纳站中垃圾总量与渗滤液产量有很好的线性关系,单位垃圾产生的渗滤液量为:消纳站>填埋场,消纳站垃圾总量与渗滤液产量关系为 $y = 1.0938x$,填埋场垃圾总量与渗滤液产量关系为 $y = 0.1838x$ (x 单位 $10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, y 单位 $10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$);填埋场和粪便消纳站中渗滤液产量与电能消耗存在线性关系,单位渗滤液耗电量为:填埋场>消纳站,消纳站渗滤液与耗电量的关系为 $y = 3.5573x$,填埋场渗滤液与耗电量关系为 $y = 18.685x$ (x 单位 $10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, y 单位 $10^4 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$).

4)近3年北京市垃圾处理年度中水回用量均值为 $312242.4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,渗滤液处理设施节水潜力总计为 $1659431.9 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$.粪便消纳站存在最大节水潜力,填埋场次之,分别占总节水潜力的89.58%、6.69%.粪便消纳站单位垃圾的节水量最高,平均值为 $0.02575 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$.

致谢(Acknowledgement):调研期间,北京市渣土管理处和各垃圾处理厂站相关负责同志对本研究的工作给予了巨大的支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢.

责任作者简介:李振山,男,教授,主要从事风沙环境、垃圾处理和污水处理等领域的教学与科研工作. E-mail:lizhenshan@iee.pku.edu.cn.

参考文献(References):

- 陈莉薇,钱家忠,肖昌苗. 2006. 城市生活垃圾处理场渗滤液可生化性研究[J]. 安徽化工, (6): 36-37
- De Feo G, Malvano C. 2009. The use of LCA in selecting the best MSW management system[J]. Waste Management, 29(6): 1901-1915
- 代晋国,宋乾武,王红雨,等. 2011. 我国垃圾渗滤液处理存在问题及对策分析[J]. 环境工程, 29(S1): 185-188
- Farah N A, Lan C Q. 2011. Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review [J]. Desalination, 287 (15): 41-54
- 冯霄. 2009. 化工节能原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社. 4-12
- Hermann B G, Debeer L, De Wilde B, et al. 2011. To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment[J]. Polymer Degradation and Stability, 96(6): 1159-1171
- IAEA. 2005. Energy Indicators for Sustainable development: Guidelines and Methodologies[M]. Austria: IAEA. 11-24
- Kang K H, Sang S H, Park H. 2002. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications[J]. Water Research, 36(16): 4023-4032
- 李威,王智华. 2005. 国内几家垃圾填埋场渗滤液处理工艺简介及比较[J]. 西南给排水, 27(1): 25-27
- 李颖. 2008. 垃圾渗滤液处理技术及工程实例[M]. 北京:中国环境科学出版社. 1-2;4-5
- 龙腾锐,易洁,林于廉. 2009. 垃圾渗滤液处理难点及其对策研究[J]. 土木建筑与环境工程, 31(1): 114-119
- 楼紫阳. 2007. 渗滤液处理处置技术及工程实例[M]. 北京:化学工业出版社. 1-2
- 聂永丰,王伟. 1998. 我国填埋场渗滤液控制现状问题与解决途径[J]. 环境科学研究, 11(3): 25-27
- 齐玉梅. 2009. 浅析上海市生活垃圾处理与节能减排[J]. 环境卫生工程, 17(S1): 87-89
- Renou S, Givaudan J G, Poulain S, et al. 2007. Landfill leachate treatment: Review and opportunity [J]. Journal of Hazardous Materials, 150(3): 468-493
- 沈承明. 2010. 推行节能减排,走可持续发展之路[J]. 石油和化工节能, (2): 35-37
- 孙跃强. 2011. 北京城市生活垃圾管理体系研究[J]. 中国资源综合利用, 29(11): 59-62
- Wang F, Smith D W, El-Din M G. 2003. Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment[J]. J Environ Eng Sci, 2: 413-427
- Zhao Y, Christensen T H, Lu W, et al. 2011. Environmental impact assessment of solid waste management in Beijing City, China[J]. Waste Management, 31(4): 793-799
- 朱启贵. 2010. 能源流核算与节能减排统计指标体系[J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 10(6): 28-34
- 赵由才. 2007. 生活垃圾渗滤液处理技术发展现状[J]. 中国城市环境卫生, (6): 19-24
- 赵由才,龙燕,张华. 2004. 生活垃圾卫生填埋技术[M]. 北京:化学工业出版社. 2-10