

我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析定量识别

杨凌波¹ 曾思育¹ 鞠宇平² 何苗³ 陈吉宁¹

(1 清华大学环境科学与工程系系统分析研究所,北京 100084; 2 国家城市给水排水工程技术研究中心,天津 300074; 3 清华大学环境科学与工程系水环境保护研究所,北京 100084)

摘要 采用描述统计、聚类分析、非参数检验、相关分析、非线性回归分析等方法,对我国 559 座城镇污水处理厂 2006 年的能耗状况及其影响因素进行了统计分析和定量规律识别。目前我国城镇污水处理厂平均电耗为 $0.290 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, 82% 以上的污水处理厂电耗不超过 $0.440 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, 相当于发达国家 20 世纪初或更早期的水平, 仍存在一定节能潜力。对能耗有显著影响的因素包括: 污水处理厂所处地区的自然环境条件和社会经济总体能耗水平、污水处理工艺类型、污水处理量、污染物去除量、所接纳的工业废水比例等。研究结果得出我国 9 种主要污水处理工艺的能耗排序, 污水处理量、6 类污染物去除量与电耗之间的定量关系, 以及进水中工业废水比例对能耗的影响程度。

关键词 污水处理厂 能耗 统计分析 影响因素

0 前言

污水处理属能耗密集型行业, 其消耗的能源主要包括电能、燃料及药剂等潜在能源, 其中电能消耗为 $0.2 \sim 0.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。由于我国城市污水产生量巨大, 处理量也在不断增加, 污水处理的能耗不容忽视^[1]。迄今为止, 我国对污水处理厂节能方面的研究较薄弱, 国外虽然有一些相关研究, 但是受地域条件、工艺规模、自动化操作程度等因素的影响, 不能直接借用国外的研究结果^[2]。进行污水处理厂能耗规律的识别及其影响因素的分析是实现污水处理厂节能降耗的重要基础。

本研究以全国污水处理厂调研数据为依据, 以 SPSS 11.0 为软件工具, 运用统计分析中的描述性统计、聚类分析、非参数检验、相关分析、回归分析等方法, 研究各地区、各种污水处理工艺的能耗情况, 分析各种可能影响能耗的潜在因素, 并对其定量规律进行识别。受数据限制, 能耗以电耗形式表征。

分析数据主要来自建设部要求各地污水处理厂自行上报的信息, 部分数据来自《中国城镇污水处理厂汇编》^[3]。在分析前所有数据都经过数据预处理和筛查, 数据可信度较高。数据覆盖了 2006 年正在运行的城镇污水处理厂 746 座, 其中 559 座污水处

理厂有能耗信息, 包括 9 座一级处理厂和 529 座二级处理厂, 其余 21 座工艺不明。由于这些数据属于非抽样的普查数据, 因此数据本身可以代表现阶段我国城镇污水处理厂在工艺、进出水状况、处理量、能耗等方面的总体情况。

1 我国城镇污水处理发展概况

1927 年我国第一座污水处理厂建成, 之后我国污水处理事业逐步发展, 以 1973 年、1983 年两届全国环境保护会议的召开以及 1996 年“九五”计划的开始为界, 可大致分为四个阶段。

1.1 污水处理工艺

由图 1、图 2 可以看到传统活性污泥法 (AS)、氧化沟、 A^2/O 、 A/O 是我国最早采用的处理工艺, “九五”计划以来 SBR、人工湿地、AB、延时曝气等工艺陆续被采用。从数量上看, 现今我国氧化沟、SBR、

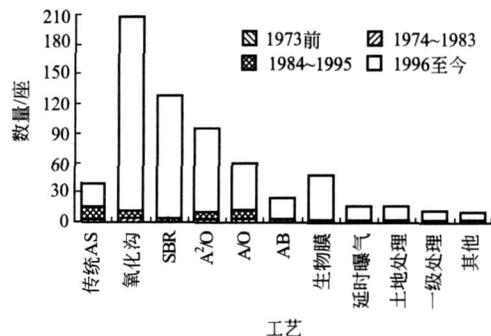


图 1 2006 年各工艺污水处理厂数量

“十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAC19B06)。

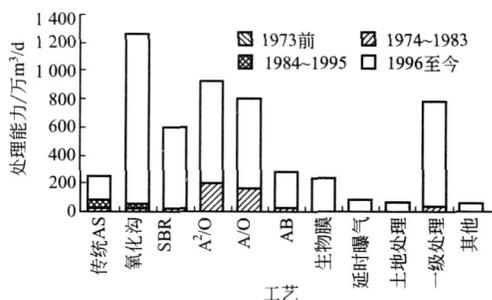


图 2 2006年各工艺污水处理厂设计处理能力

A²/O工艺分别占二级污水处理厂的 32.1%、20.2%和 14.7%；从处理能力上看,氧化沟、A²/O和 A/O工艺分别占二级处理的 26.2%、19.1%和 17.1%。显然,氧化沟工艺和 A²/O工艺已经成为我国污水处理的主导工艺。

1.2 污水处理能力的地域分布

“九五”计划以来,全国各省市的污水处理事业发展加快。目前城镇污水处理能力超过 200万 m³/d 的主要有广东、山东、上海、北京等 11个省市。

1.3 污水处理规模

647座二级处理污水处理厂的设计规模从 0.03万 m³/d到 100万 m³/d不等,其平均设计规模为 7万 m³/d,因此二级污水处理厂以中小型为主。12座一级污水处理厂的平均设计规模为 65.77万 m³/d,以大型污水处理厂为主。

2 我国城镇污水处理厂的能耗现状

对 559座污水处理厂的能耗数据进行分析,可获得我国现阶段污水处理厂的能耗特征值,见表 1。本文中能耗均值特指基于实际处理量的平均值。

表 1 2006年我国城镇污水处理厂电耗特征值

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	中位数	1/4分位数	3/4分位数
电耗 /kW · h/m ³	0.0003	2.000	0.290	0.221	0.300	0.230	0.380

总体上看,我国现阶段污水处理厂电耗主要分布在 0.1~0.4 kW · h/m³。采用单样本 K-S检验对能耗数据进行处理,分析其正态性,结果表明我国目前的污水处理厂电耗分布与正态分布存在显著差异。

进一步采用 KMeans快速聚类法研究 529座二级污水处理厂的电耗分布情况。在 k=3的情况下,聚类结果为:82%的污水处理厂(436座)能耗不高

于 0.440 kW · h/m³,83座污水处理厂能耗为 0.441~1.020 kW · h/m³,其余 10座污水处理厂能耗处于 1.021~2.000 kW · h/m³范围内。该结果表明我国污水处理厂能耗水平比较均匀。而 0.440 kW · h/m³的能耗则可以作为将来政府监管污水处理厂运行绩效时的警戒上限值。

据文献报道,1999年美国污水处理厂的平均电耗为 0.20 kW · h/m³,日本为 0.26 kW · h/m³[4];2000年德国污水处理厂平均电耗 0.32 kW · h/m³[5]。但这些能耗值当中均包含了污水消毒、污泥消化与焚烧等我国污水处理厂目前尚未普及的耗能环节。由此可见,2006年我国污水处理厂平均电耗 0.290 kW · h/m³,与发达国家相比,相当于 20世纪初甚至更早期的能耗水平,仍然具有较大的节能潜力。

3 污水处理厂能耗的影响因素识别与定量规律

根据文献调研和专家咨询,初步筛选出可能影响污水处理厂能耗的因素,主要包括:污水处理厂所处地区的自然环境和社会环境特征、污水处理厂所采用的工艺、污水处理厂的单位性质、处理量、污染物去除量、所接纳的工业废水比例等。由于在详细分类时,较小的样本数会影响结论的可靠性,特别是在采用实际处理能力进行平均能耗的计算时,个别数值可能对计算结果产生较大影响。因此在对 2006年的污水处理厂进行不同分类后,对样本数小于 50的项目再次进行数据筛查,然后主要采用非参数检验中的 Kruskal-WallisH方法(K-W检验)确定真正的影响因素,并在数据支持的情况下,建立定量的数学表达式用以描述能耗规律。

3.1 地区自然环境和社会经济因素的影响

按照我国 7个行政地理分区来考察城镇污水处理的能耗水平。K-W检验结果表明,不同地区污水处理平均能耗存在显著差异。各地区能耗由高到低依次为(括号中为样本数,下同):西北(32)、东北(35)、华北(74)、西南(70)、华中(51)、华东(235)、华南(61),能耗均值分别为 0.369 kW · h/m³、0.315 kW · h/m³、0.285 kW · h/m³、0.275 kW · h/m³、0.239 kW · h/m³、0.220 kW · h/m³、0.194 kW · h/m³。进一步分析可将华中、华东、华南划为较低能耗地区,均值为 0.214 kW · h/m³;其他地区划为较高能耗地区,均值为 0.308 kW · h/m³。

进一步寻找地区能耗差异的产生原因。通过相关分析^[6-9],得到该地区年均气温、降水量、单位 GDP 能耗、单位 GDP 电耗等变量与污水处理电耗的线性相关性好,相关系数分别为: - 0.899、- 0.881、0.924、0.788。即气温低、降水量少的地区污水处理能耗高,而总体能耗、电耗水平低的地区其污水处理的能耗也较低。因此认为各地区的自然环境条件与地区总能耗水平对污水处理的能耗存在显著影响。

3.2 处理级别和工艺类型的影响

K-W 检验结果表明污水一级处理与二级处理的电耗存在显著差异。而各种二级处理工艺之间的能耗差异也很大。二级处理工艺能耗由高到低依次为:延时曝气(13)、SBR(103)、生物膜(36)、氧化沟(170)、A/O(48)、传统活性污泥法(36)、A²/O(87)、土地处理和人工湿地(10)、AB(17),能耗均值分别为 0.340 kW·h/m³、0.336 kW·h/m³、0.330 kW·h/m³、0.302 kW·h/m³、0.283 kW·h/m³、0.269 kW·h/m³、0.267 kW·h/m³、0.253 kW·h/m³、0.219 kW·h/m³。剔除土地处理工艺下 0.83 kW·h/m³这一离群值,土地处理和人工湿地能耗均值为 0.253 kW·h/m³,仅略高于 AB 法,为低能耗处理工艺,较符合实际情况。

从上述结果可看出,目前我国污水处理主导工艺之一——氧化沟在能耗上并不具备优势。

3.3 单位性质的影响

根据单位性质可将污水处理厂分为 6 类:国有企业(249)、外资企业(28)、合资企业(25)、民营企业(58)、事业单位(54)和其他组织(包括分类不明,164)。考察前 5 类不同管理、运行模式下污水处理厂运行能耗的差异。由 K-W 检验得到,不同单位性质的污水处理厂能耗分析对应的显著程度 $P = 0.884$,大大超过置信范围,因此认为污水处理厂的单位性质所属对污水处理厂的电耗没有影响。

3.4 污水实际处理量与电耗之间的定量关系

国内外很多文献对污水处理的规模效应已有报道。针对 2006 年 560 座污水处理厂数据,采用回归分析来量化实际污水处理量和电耗之间的关系,得到幂函数形式的回归方程如下:

$$Y = 0.34X_A^{-0.168} \quad (1)$$

式中 Y ——单位污水处理量的电耗, kW·h/m³;

X_A ——污水实际处理量,万 m³/d。

方程及参数各项检验 $P < 0.001$,均能通过检验。此方程说明,实际处理量对污水处理的能耗存在影响,且随着实际处理量的增高,单位电耗随之降低。如果污水处理量翻倍,单位电耗将降低 11%。

污水处理厂设计规模是重要的设计参数,反映污水处理能力。同样对 560 座污水处理厂的数据进行回归分析,也得到了类似的幂函数关系:

$$Y = 0.383X_D^{-0.182} \quad (2)$$

式中 Y ——单位污水处理能力的电耗, kW·h/m³;

X_D ——设计规模,万 m³/d。

观察方程参数可看出,同时增大设计规模和实际处理量时,设计规模相应的电耗降低速度更快,这是由于实际处理量一般低于设计规模,因此使实际处理量尽量接近设计规模,是降低能耗的途径之一。

3.5 进水中工业废水比例因素影响

工业废水如果进入污水处理厂,对于城镇污水处理厂的正常运行会产生一定的冲击,这种影响在这里用工业废水比例进行衡量。通过对 338 座污水处理厂数据进行线性回归分析得到方程:

$$Y = 0.297 + 0.001X \quad (3)$$

式中 Y ——电耗, kW·h/m³;

X ——工业废水比例, %。

此方程说明,工业废水对于污水处理的能耗存在影响,随着工业废水比例的增高,单位电耗也会随之增加。原因可能是由于一般情况下进厂的工业废水浓度都远高于居民生活污水浓度。

3.6 污染物实际去除量与电耗之间的定量关系

通过计算将实际进出水污染物浓度差和污水量转化为实际污染物去除量,包括 COD_{Cr}、BOD₅、SS、NH₃-N、TN、TP 去除量共 6 个变量。在此基础上考察污染物实际去除量与电耗之间的定量关系。分别对不同污染物的去除量与电耗进行多种函数形式的曲线回归,均以幂函数形式结果为最优,如表 2 所示。由于各种污染物去除量数据完备的污水处理厂样本仅有 174 个,所以对本节分析结果的理解要考虑样本数量的变化。

回归方程中, Y 为电耗 (kW·h/m³), Y_i 为单位污染物去除的电耗 (kW·h/kg), X_i 为污染物去除量 (kg/d), $i = 1, \dots, 6$ 分别代表 6 种污染物。第 1 组

表 2 污染物实际去除量与单位电耗的回归方程

污染物类型	第 1 组回归方程	第 2 组回归方程	样本数
COD _{Cr}	$Y = 0.650X_1^{-0.090}$	$Y_1 = 37.374X_1^{-0.377}$	464
BOD ₅	$Y = 0.638X_2^{-0.096}$	$Y_2 = 71.680X_2^{-0.398}$	446
SS	$Y = 0.722X_3^{-0.108}$	$Y_3 = 78.050X_3^{-0.432}$	451
NH ₃ -N	$Y = 0.370X_4^{-0.041}$	$Y_4 = 139.195X_4^{-0.328}$	392
TN	$Y = 0.382X_5^{-0.042}$	$Y_5 = 181.305X_5^{-0.365}$	193
TP	$Y = 0.407X_6^{-0.073}$	$Y_6 = 1019.828X_6^{-0.480}$	366

方程描述电耗与污染物总去除量的关系,而第 2 组方程则描述单位污染物去除量电耗与污染物总去除量的关系。除第 1 组回归方程中 NH₃-N、TN 回归方程的 P 分别为 0.085 和 0.068 外,其余方程都能保证在 $P < 0.05$ 的条件下通过 F 检验和 t 检验。观察可见所有幂指数均为负数,这说明所有污染物去除均存在“规模效应”,即去除量越大,单位电耗越小。以 COD_{Cr} 为例, COD_{Cr} 去除量翻倍的话,电耗降低幅度为 8%,每去除 1 kgCOD_{Cr} 的电耗下降 23%。

4 结论

(1) 氧化沟工艺在二级污水处理中占污水处理厂数量的 32.1%,占设计处理能力的 26.2%,是我国目前最主要的污水处理工艺之一。

(2) 我国城镇污水处理厂目前的电耗平均水平为 0.290 kW·h/m³。82% 以上的污水处理厂能耗低于 0.440 kW·h/m³。与发达国家比,仍有较大差距。

(3) 根据 2006 年统计数据,污水处理厂所处地区、所采用的工艺类型、污水处理量、污染物去除量、所接纳的工业废水比例对我国城镇污水处理的能耗有显著影响。

(4) 二级处理工艺电耗由高到低依次为:延时曝气、SBR、生物膜、氧化沟、A/O、传统活性污泥法、A²/O、土地处理和人工湿地、AB,我国污水处理厂最常见的氧化沟工艺在能耗方面不占优势。受自然条件和社会经济发展水平的影响,西北地区污水处理的电耗最高,华南地区最低。工业废水进入污水处理厂的比例大小影响其电耗,比例每增加一个百分点,单位电耗增加约 0.001 kW·h。得到了污水处理量与单位电耗的定量关系,此外,还获得了以 COD_{Cr}、BOD₅、SS、NH₃-N、TN、TP 等指标表达的污染物去除量与单位电耗之间的幂函数关系式,同样

存在规模效应。

参考文献

- 1 马世豪,何星海.《城镇污水处理厂污染物排放标准》浅释.给水排水,2003,29(9):89~94
- 2 高旭,龙腾锐.城市污水处理能耗能效研究进展.重庆大学学报(自然科学版),2002,25(6):143~148
- 3 杨向平主编.中国城镇污水处理厂汇编.2006
- 4 孟德良,刘建广.污水处理厂的能耗与能量的回收利用.给水排水,2002,28(4):18~20
- 5 林荣忱,李金河,林文波.污水处理厂泵站与曝气系统的节能途径.中国给水排水,1999,15(1):21
- 6 国家统计局.中国统计年鉴 2005.北京:中国统计出版社,2005.13~15
- 7 中国农业年鉴编辑委员会.中国农业年鉴 2006.北京:农业出版社,2006.267~270
- 8 中国电力年鉴编辑委员会.中国电力年鉴 2006.北京:中国统计出版社,2006
- 9 河南省统计局.河南统计年鉴 2006.北京:中国统计出版社,2006

&通讯处:100084 清华大学环境科学与工程系

电话:(010)62796959

E-mail:szeng@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2008-03-14

修回日期:2008-07-19

山东烟台查处违法排污企业

烟台市环保局芝罘区分局对夹河流域及饮用水源地内的排污企业进行了摸底排查,共查处 6 家违法排污企业,其中 3 家分别从事印花、食品、豆制品生产的企业已被关停。检查的同时,落实前期查处的超标排放生产性废水企业的关停整改情况,并对周边村庄的生活污水排放情况进行了详细调查。

烟台市区位于夹河流域及饮用水源地区的主要是黄务办事处和只楚办事处,辖区内废水排放量大约为 3.4 万 m³/d。大多数污水是通过套子湾污水处理厂处理后入海的,但由于套子湾污水处理厂最初设计的局限性和实际运营中出现的污水泄漏等问题,对周边海域生态环境造成了一定程度的破坏。为此,烟台已于近期对该处理厂进行升级改造,污染物的排放浓度有较大幅度的下降。