

引用格式:李鑫,孙小霞,苏时鹏.基于DEA-Tobit模型的中国县域污水处理服务减排效率测评[J].资源科学,2017,39(3):451-460. [Li X, Sun X X, Su S P. Emissions reduction efficiency of sewage treatment services in county areas in China based on DEA-Tobit Modeling[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 451-460]. DOI: 10.18402/resci.2017.03.07

# 基于DEA-Tobit模型的中国县域污水处理服务减排效率测评

李鑫,孙小霞,苏时鹏

(福建农林大学可持续发展研究所,福州 350002)

**摘要:**县域污水处理服务快速增长,已成为重要的减排力量,但减排效率差异很大。为了提高县域污水处理服务的减排效率,本文应用数据包络分析法,以年处理能力、年运营费用、年耗电量、雇员人数为投入变量,以污水实际处理量、COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮消减量产出变量,构建县域污水处理服务减排效率评价模型,以2014年中国413个县域污水处理设施进行实证分析,并应用Tobit模型分析找出关键影响因素。结果表明:①全国县域污水处理服务减排综合效率平均值为0.637,具有较大的效率提升空间;技术效率为0.756,要素配比急需改善;规模效率为0.835,且73.85%的县域处于规模报酬递增阶段,有必要扩大处理规模;②污水处理服务减排效率的区域差异明显,特征各异;③处理规模、水量负荷率、运营年限、人口密度、经济发展水平对减排效率产生正向影响;④生物膜类工艺减排效率相对较高。因此,根据区域特征分类指导,加强县域污水处理服务运营管理交流,适当扩大处理规模,因地制宜选择污水处理工艺,加强配套管网建设,促进雨污分流,有利于提高污水处理服务的减排效率。

**关键词:**县域;污水处理服务;减排效率;DEA-Tobit两步法;影响因素

DOI: 10.18402/resci.2017.03.07

## 1 引言

县域污水处理服务的减排效率是值得关注的科学问题和实践难题。一方面,县域污水处理服务是落实新增COD和氨氮减排任务的重点区域。污水处理是水体污染物减排的重要途径<sup>[1]</sup>,原有的大中城市的污水处理设施和服务相对完善,而新增的减排任务主要由县域承担,新建设施逐步向县镇延伸。“十二五”期间分布在县城和建制镇的新建城镇污水处理设施规模占全国新建总规模的43%，“十三五”期间,这一比重将大幅上升。另一方面,县域污水处理服务水平不高,污水处理设施“吃不饱”现象时有发生。提升县域污水处理服务的减排效率,高效地实现减排目标至关重要。中国县域污水处理服务的减排效率到底如何?受哪些关键因素影

响?未建污水处理设施的县域迫切需要在建设之前了解这些信息,科学决策,从源头为高效减排奠定基础。已建污水处理设施的县域提高减排效率也需要理论指导。因此,分析县域污水处理服务减排效率问题十分必要。

污水处理服务减排效率及相关问题近年来颇受关注,诸多学者分别应用绩效指标评价法<sup>[2,3]</sup>、数据包络分析法<sup>[1,4,5]</sup>、随机前沿函数分析法<sup>[6]</sup>、灰色关联分析法<sup>[7]</sup>评价了污水处理设施的运营效率,研究结论表明污水处理设施具有明显的规模效应<sup>[5,8]</sup>,而中国污水处理设施运营效率偏低<sup>[1]</sup>,能耗水平偏高<sup>[9]</sup>,多数处于规模收益递增阶段<sup>[5]</sup>。在减排效率影响因素及相关研究方面,国内外学者从成本收益<sup>[10,11]</sup>、能耗水平<sup>[9]</sup>、有机物质去除率<sup>[13]</sup>、处理工艺与技术<sup>[4,12]</sup>等

收稿日期:2016-10-10;修订日期:2017-01-13

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2012ZX0760003);教育部人文社科研究项目(15YJCZH538)。

作者简介:李鑫,男,安徽马鞍山人,硕士生,研究方向为资源与环境管理。E-mail: 243577192@qq.com

通讯作者:苏时鹏, E-mail: sushipeng@tsinghua.org.cn

角度展开研究,结果表明不同工艺存在显著的效率差距<sup>[4]</sup>。规模、有机物质去除率和曝气类型是影响污水处理设施能源利用效率的关键因素<sup>[14]</sup>。动力费、负荷率是影响污水处理设施减排效率的关键因素<sup>[10]</sup>。排放标准、进水水质、投入要素配比率均通过运营成本影响减排效率。相关研究多数是以运营效率以及效率评价为主,以单个污水处理设施为决策单元,较少以区域为决策单元,对效率差异形成的原因多集中于内部因素分析。县域是国民经济中相对独立的基本单元,也是“十三五”期间节能减排的关键单元。为此,本文选择全国范围内有且仅有一座污水处理设施的县域进行分析,测算其减排效率,找出影响减排效率的关键因素,为提高县域污水处理设施的减排效率提供决策参考,也可以为相关县域新建污水处理设施提供借鉴。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 效率测算方法选择与变量说明

数据包络分析法(DEA)无需构造生产函数,通过比较决策单元偏离前沿面的程度来评价其相对有效性<sup>[15]</sup>,可以忽略不同指标的单位差异,在多投入、多产出分析方面具有优越性,通过投影理论可计算DEA无效决策单元的投入冗余量,为形成改进方案提供参考,适合县域污水处理服务减排效率测算<sup>[1,8]</sup>。DEA模型假设在某一个时期 $t$ 内,有 $n$ 个决策单元,每个决策单元都通过 $m$ 种投入要素 $X$ 和 $s$ 种产出 $Y$ ,由此构成生产可能集。投入集向量和产

出集向量分别为:

$$X = (x_{1m}^t, x_{2m}^t, \dots, x_{nm}^t)^T, \quad (1)$$

$$Y = (y_{1s}^t, y_{2s}^t, \dots, y_{ns}^t)^T$$

污水处理服务的规模效益是可变的<sup>[5,8]</sup>,因此本文选择投入导向规模报酬可变的DEA-BCC模型:

$$h = \min \varphi$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \delta_j x_{ij} + s^- = \varphi x_0, & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \delta_j y_{rj} - s^+ = y_0, & r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \delta_j = 1 \\ \delta_j \geq 0, & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\varphi$ 为模型最优解; $\delta_j$ 为对偶变换系数; $s^-$ 和 $s^+$ 为各项投入/产出的松弛变量; $x_0$ 和 $y_0$ 为决策单元初始投入和产出。以县域污水处理服务为决策单元,其中投入和产出变量的对应关系如图1所示。

投入变量4个:年处理能力、年运营费用、年耗电量、雇员人数。处理能力主要反映污水处理服务的固定资产投资情况。污水处理设施中占地费用、厂房和管网建设投资三个最主要的固定资产投资都与设计处理能力高度相关,选择设计处理能力反映固定资产投资比较合理。运行费用包括外购原材料费、维护费、污泥处理处置费和管理费,不含人员工资和电费。劳动力指全时工作人员数。电耗为处理过程中的电能消耗。

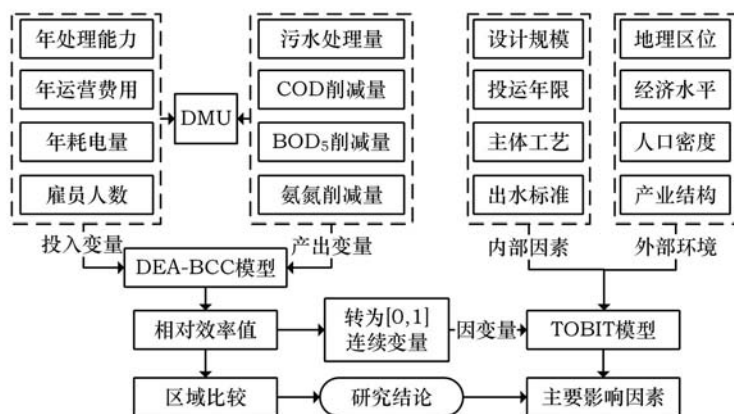


图1 县域污水处理服务减排效率及其影响因素分析基本框架和方法

Figure 1 The basic framework and methods of the emissions reduction efficiency of sewage treatment services and the influencing factors in county areas

2017年3月

产出变量4个:污水年处理量、COD、BOD<sub>5</sub>和氨氮削减量。

### 2.1.2 影响因素分析方法选择与变量说明

综合效率位于[0, 1]之间,属于受限变量,选择Tobit模型分析其影响因素较为合适。本文将污水处理服务减排综合效率作为因变量,以可能影响减排效率的因素作为自变量,具体如表1所示。

主体处理工艺、设计处理规模、出水标准、负荷率、投运年限等内部因素可能会影响减排效率。

(1)不同主体处理工艺的曝气时间、电耗和药耗均有差别,进而影响减排效率。本文将几种常见的处理工艺设置成逻辑变量,进行分析比较。

(2)污水处理设施具有较强的规模效应,设计处理能力应该对减排效率具有正向影响。

(3)出水标准直接影响污染物的去除率和处理成本,出水标准越高,单位处理水量的成本会越高<sup>[9]</sup>,但单位处理水量的污染物削减量越大,因此出水标准对减排效率的影响方向未知。

(4)负荷率是污水处理设施实际处理水量与设计处理能力的比率。负荷率越高,设施利用率越高,减排效率应该越高。

(5)投运年限越长,配套管网与管理机制等不

断完善,有利于提升减排效率,因而可能产生正向影响。

地理区位、经济水平、人口密度、产业结构等外部因素也可能会影响减排效率(图1)。

(1)中国地域广阔,各地水生态与社会经济差异较大,排污系数也不同。参考《第一次全国污染源普查——城镇生活源产排污系数手册》,同时考虑区域完整性,将全国(未含港澳台)按照排污系数依次由大到小划分赋值[1~5]五个区域作为类型变量。具体如下,Ⅰ区排污系数153~185,主要包括上海、江苏、浙江、福建、广东、广西;Ⅱ区排污系数140~180,主要包括安徽、江西、河南、湖北、湖南;Ⅲ区排污系数105~145,主要是北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东;Ⅳ区排污系数120~140,分别是重庆、四川、贵州、云南;Ⅴ区排污系数最低,介于95~125,陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆。一般来说,排污系数越高,污水排放量较大且相对稳定,季节性波动小,有利于减排效率的提升。一般来说,排污系数越高,污水排放量较大且相对稳定,季节性波动小,有利于减排效率的提升。

(2)地区人口密度越大,有利于降低单位污水收集成本<sup>[16]</sup>,且水量越趋于稳定,减排效率越能得到

表1 县域污水处理投入产出要素及可能影响因素说明

Table 1 Input and output factors and possible influencing factors of county sewage treatment

变量	变量解释及单位	最大值	最小值	均值	标准差	预测方向
内部因素	主体处理工艺	活性污泥类;SBR类;氧化沟类等	-	-	-	-
	设计处理能力	日处理能力/(万 t/d)	14.00	0.25	2.22	1.62
	出水标准	1=二级;2=一级B;3=一级A	3.00	1.00	2.38	0.55
	负荷率	实际污水处理量/设计处理量	2.00	0.30	0.76	0.24
	运营年限	污水处理设施投运年限/a	16.00	1.00	5.69	2.15
外部环境	地理区位	1~5:排污系数由高至低	5.00	1.00	2.69	0.99
	人口密度*	县域内人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	7.26	1.13	5.43	0.99
	人均GDP*	人均国民生产总值/元	12.04	8.53	10.15	0.51
	第二产业	第二产业占GDP总比重/%	81.46	6.28	46.10	13.93
	第三产业	第三产业占GDP总比重/%	64.01	10.87	33.58	8.67
投入项	资本投入	年处理能力/万 t	5 110.00	91.25	810.57	591.13
		年运营费用/万元	11 402.00	50.00	618.65	891.74
	劳动投入	雇员数/人	150.00	8.00	33.31	20.32
	能源投入	年耗电量/(万 kW·h)	3 443.34	1.17	179.19	277.75
产出项	污染物削减量	污水处理量/万 t	5 518.80	1.31	622.06	520.65
		COD削减量/t	22 042.09	2.27	1 416.38	1 832.16
		BOD <sub>5</sub> 削减量/t	10 179.43	1.15	619.57	803.55
		氨氮削减量/t	1 041.79	0.17	139.86	132.22

注:为降低数据波动性并消除异方差,\*表示已对数据进行自然对数化处理。



保证。

(3)人均GDP越高,经济发展水平越高,污水排放量也越大,对环境服务越重视,具有更强的经济实力,有利于提高减排效率。

(4)不同产业排污系数差别较大,产业结构是影响减排效率的可能因素之一。第二产业污水处理的难度远高于生活污水,因此,第二产业增加值占地区生产总值的比重越高,越不利于减排效率的提升。第三产业占比越高,人口的流动性越高,越不利于减排效率的提升。

### 2.1.3 分析框架

先测算413个县域污水处理设施的减排效率,再以DEA效率值 $[0, 1]$ 为因变量,以内外部影响因素作为自变量,运用Tobit模型找出显著影响效率的因素,分析框架如图1所示。

## 2.2 数据来源

为增强数据的客观性、可比性,选择国家统计局部门和监测部门正式公布的相关数据。污水处理设施投入产出指标等数据来源于2015年《城镇排水统计年鉴》<sup>[17]</sup>,县域人口、经济发展水平等数据来自2015年《中国县域统计年鉴·县市卷》<sup>[18]</sup>。考虑数据的完整性与异常值筛选,最终获得413个有且仅有一座污水处理设施的县域污水处理服务情况,表1是投入产出指标变量的描述性统计和影响因素假设。利用Pearson相关系数检验对投入产出指标进行相关分析,符合同向性假设。

## 3 结果与分析

### 3.1 县域污水处理服务减排效率测算结果与分析

运用DEAP对2014年413个县域污水处理设施的投入产出数据进行计算,减排效率结果如表2所示。分析可知:

(1)全国综合效率平均值为0.637,效率较低。变异系数为0.343,各县域之间差异较大。只有37个县的减排效率DEA最优,占总数的8.96%。91.04%的县域为DEA效率无效,绝大部分县有待提升且空间较大。

(2)全国技术效率和规模效率的平均值分别为0.756、0.835。技术效率明显低于规模效率,且个体差异较大,是制约减排效率的主要因素。因而,加强县域之间的交流,优化投入要素配比,有利于提高技术效率和减排效率。

(3)73.85%的县处于规模报酬递增阶段,提高污水收集率,扩大处理规模既能提升减排量,也有利于减排效率提升。

(4)效率值分布区间如图2所示,综合效率有效( $e=1$ )的占8.96%,较优( $0.8 \leq e < 1$ )的占16.22%,中等的( $0.6 \leq e < 0.8$ )占27.6%;技术效率有效的占17.19%,较优的占24.7%,中等的占36.8%;规模效率有效的占10.17%,较优的占56.9%。综合分析可知,技术效率有效的县只有一半是规模效率有效的,而且技术效率有效、规模效率无效的县全部处于规模报酬递增阶段,这部分地区不存在投入冗余

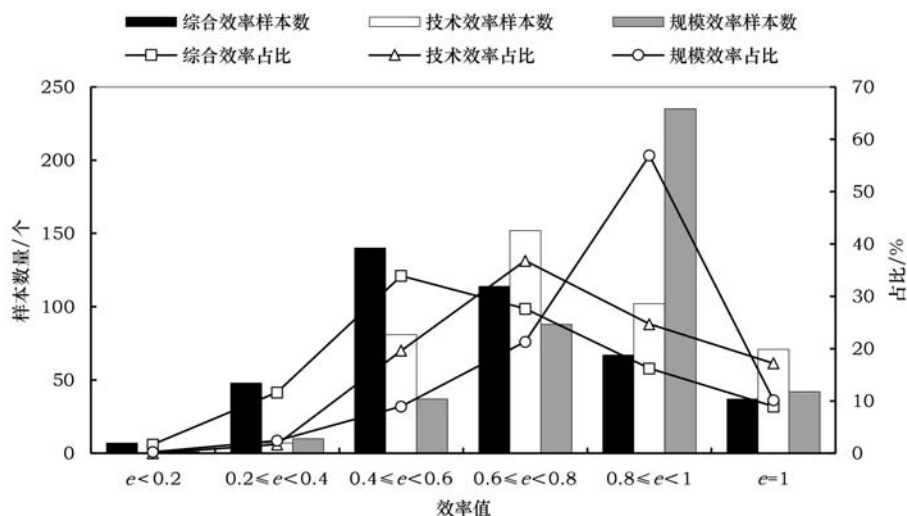


图2 效率测算结果及其区间分布情况

Figure 2 Efficiency measurement results and the interval distribution

2017年3月

表2 各地区DEA评价结果及各投入要素情况

Table 2 DEA evaluation results and input factors in different regions

区域		I 区	II 区	III 区	IV 区	V 区	全国
效率单元	决策单元/个	61	86	197	55	14	413
	占比/%	14.76	20.82	47.69	13.31	3.39	100
综合效率	平均值	0.60	0.58	0.69	0.54	0.76	0.64
	有效单元/个	5	5	21	2	4	37
	有效单元占比/%	8.20	5.81	10.66	3.64	28.57	8.96
技术效率	平均值	0.76	0.69	0.76	0.81	0.85	0.76
	有效单元/个	11	9	30	12	9	71
	有效单元占比/%	18.03	10.47	15.23	21.82	64.29	17.19
规模效率	平均值	0.78	0.84	0.89	0.66	0.89	0.83
	有效单元/个	6	5	25	2	4	42
	有效单元占比/%	9.84	5.81	12.69	3.64	28.57	10.17
规模报酬	报酬递增	49	70	125	53	8	305
	占比/%	80.33	81.40	63.45	96.36	57.14	73.85
	报酬递减	6	10	46	0	2	64
	占比/%	9.84	11.63	23.35	-	14.29	15.50
	报酬不变	6	6	26	2	4	44
	占比/%	9.84	6.98	13.20	3.64	28.57	10.65
投入产出及运营情况	处理能力/(万 t/a)	648.02	694.14	977.99	513.32	1 045.98	810.57
	实际处理量/(万 t/a)	549.96	581.86	744.00	329.81	615.49	622.06
	年耗电量/(万 kW·h)	105.85	123.29	255.03	76.53	178.32	179.19
	年运营费用/万元	454.60	554.84	749.44	437.92	594.99	618.65
	雇员数/人	24.82	29.09	41.31	19.82	36.57	33.31
	BOD <sub>5</sub> 进水浓度/(mg/l)	59.20	65.88	129.03	94.21	209.55	103.66
	COD 进水浓度/(mg/l)	152.78	151.43	291.41	221.42	429.00	237.13
	氨氮进水浓度/(mg/l)	18.74	17.85	29.68	26.85	59.45	26.23
	运营年限/a	5.46	5.76	6.06	4.47	6.14	5.70
	负荷率	0.87	0.85	0.74	0.64	0.61	0.76

注:投入产出情况为各地区要素平均值。

和产出不足的情况,其综合效率没有达到有效,是因其规模和投入、产出不相匹配,重点应通过扩大规模来提升减排效率。规模效率较高而技术效率偏低的县,其投入和产出上存在一定的冗余和不足,应向减排效率较高的县学习,优化要素配比。规模效率与技术效率均处于较优的县,应从调整处理规模和优化要素配比两个方面提高减排效率。规模效率和技术效率均处于中等以下的县,应分析找出具体原因,有针对性提出改进措施。

### 3.2 县域污水处理服务减排效率的空间格局差异分析

中国各地区之间经济发展和自然环境差异较大,进行分类指导更为合理。五大区域污水处理服

务减排效率地区差异明显,如图3、图4所示:综合效率与规模效率总体趋势上“由南向北递增”,技术效率呈现“中间低,四周高”的空间分布特征。各地区的减排效率特征分别为:

(1) I 区效率平均值分别为:综合效率0.6,技术效率0.76,规模效率0.78,属于中效减排区。该地区的技术效率和规模效率均属于中等水平,既要优化要素配比水平,又要改进适度规模水平。另外,该地区的进水浓度较低,且80.33%的县处于规模报酬递增阶段。因而,应在促进雨污分流的基础上,适度扩大污水处理规模。

(2) II 区效率平均值分别为:综合效率0.58,技术效率0.69,规模效率0.84,属于技术效率约束型的

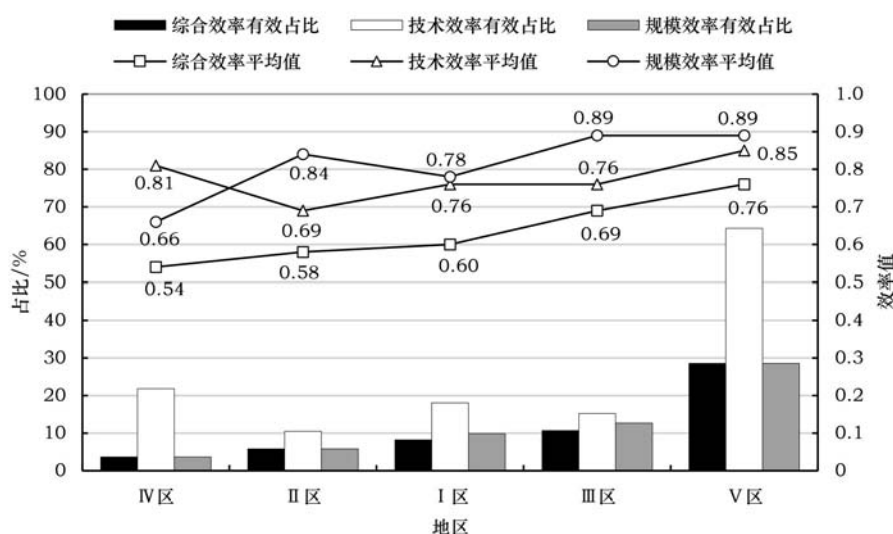


图3 各地区效率值分布情况

Figure 3 Efficiency value distribution in each region

低效减排区。该地区的技术效率全国最低,说明要素配比合理性水平低。进一步分析可知,该地区的进水污染物浓度偏低,但适度规模水平较高,且81.4%的县处于规模报酬递增阶段,使得污水处理设施及人员处于“大马拉小车”的状况。因此,该地区应通过管网建设,促进雨污分流等措施来减少做“无用功”,进而提升减排效率。

(3) III区效率平均值分别为:综合效率0.69,技术效率0.76,规模效率0.89,属于技术效率约束型的中效减排区。该地区耗电量、从业人员数明显高于其他地区的比例,且有23.35%的县处于规模报酬递减阶段,说明存在投入冗余情况,应加强地区间的学习交流,优化工艺控制能耗,提高自动化水平,精简人员数量,适当控制处理规模,进而提高减排效率。

(4) IV区效率平均情况是:综合效率0.54,技术效率0.81,规模效率0.66,属于规模效率约束型的低效减排区。该地区各要素投入配比的合理化程度、经营管理水平较高,但96.36%的县污水处理服务处于规模报酬递增阶段,且负荷率很低,说明该地区的污水处理规模偏小。因此,重点增加污水的收集率,提高负荷率,适当扩大污水处理规模。

(5) V区排污系数最低,地区效率平均值如下:综合效率0.76、技术效率0.85、规模效率0.89,属于高效减排区。该地区污水处理服务经营管理水平

较高,平均运营年限最长,处理规模比较符合当地实际,进水浓度远高于其他地区。另外,该地区入选的样本只有14个,远少于其他地区,说明该地区污水处理设施普及率较低,只有条件较好的县建设了污水处理设施。因此,该地区重点要扩大县级污水处理服务的覆盖面。

### 3.3 县域污水处理服务减排效率影响因素分析

运用软件Stata 12.0对413个县域污水处理设施减排综合效率进行Tobit回归,结果如表3(见第458页)。

由表3分析可知:除出水标准和第三产业占比两个因素外,其他因素均对减排效率产生影响,影响程度由高到低分别为负荷率>是否为生物膜工艺>地理区位>人均GDP>是否为氧化沟类工艺>是否为SBR类工艺>设计处理能力>人口密度>运营年限>第二产业占比。其中:

(1) 负荷率的影响系数最大,为0.646,说明负荷率是影响减排效率最为关键的积极因素,与原假设一致。负荷率与污水处理设施的配套管网建设密切相关,因此,做好县级污水处理设施的规划,加强配套管网建设至关重要。

(2) 不同工艺对减排效率的影响较大,以活性污泥类工艺为参照系,生物膜工艺效率较高,而氧化沟和SBR工艺具有较小的负向作用。由于生物膜工艺初期建设成本较大,规模相对较小,占地相



2017年3月

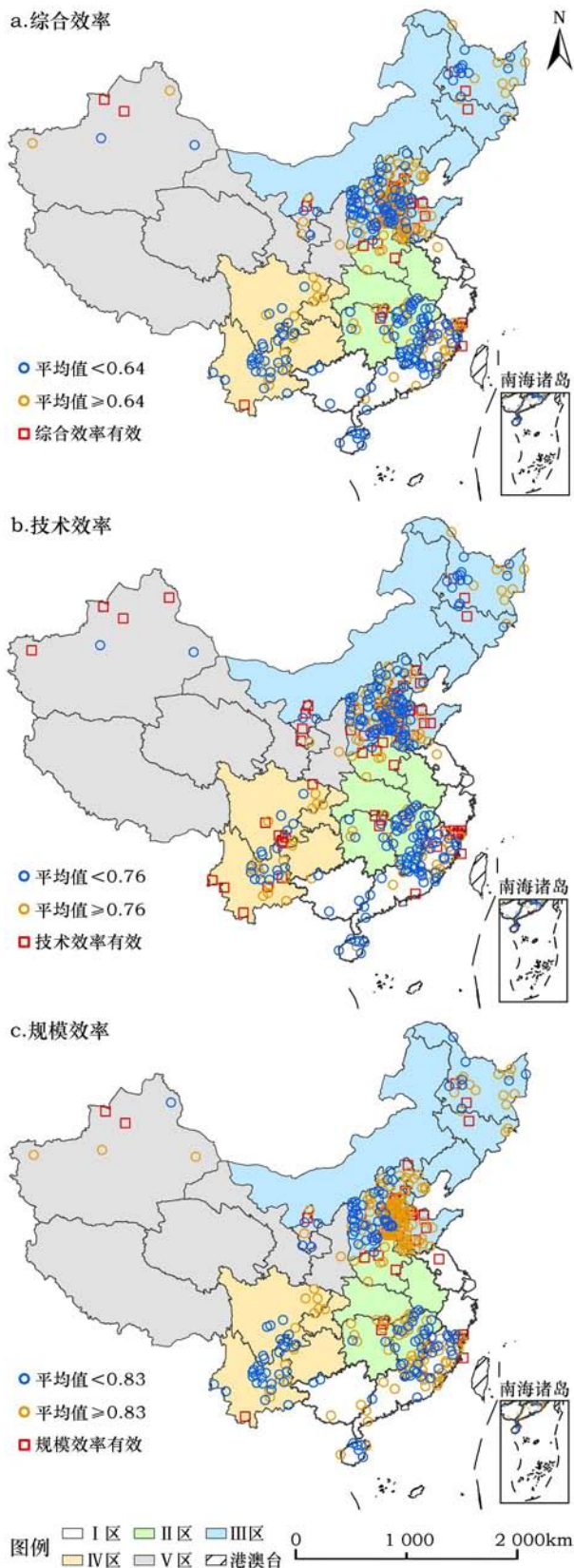


图4 效率值空间分布情况

Figure 4 The spatial distribution situation of efficiency value

对较少,后期的减排效果好,效率高。经济实力较好的县域从长远角度来看,选择此类工艺较为合理。

(3)地理区位来看,排污系数较高地区的平均效率略低于排污系数较低地区,与原假设不一致。其主要原因是中国多数县城采用混流制排水体制,雨污分流较少,I区、II区、IV区三类地区气候温暖湿润,降雨量大,河流水系复杂,自然水体混入污水管道现象较为普遍,进而使得进水污染物浓度较低,水质负荷率不高,单位污水处理量的污染物削减强度较低。因此,有必要加强管网改造,促进雨水分流,使污水处理设施少做“无用功”。

(4)人均GDP和人口密度均对减排效率产生显著的正向影响,与原假设一致,但影响的系数较小。经济发展水平越高,污水处理设施与管网建设实力越强,而人口密度越大,污水收集排放的平均成本越低<sup>[6]</sup>。因此,大力发展当地经济,加强新型城镇化建设,促进人口的就地转移,有利于减排效率的提升。

(5)设计处理能力对减排效率产生了显著的正向作用,与原假设一致。这说明污水处理具有较强的规模效应,而目前大多数县处于规模收益递增阶段,这与其他研究者结论一致<sup>[1,4,8]</sup>。因此,扩大县域污水处理规模,提高污水处理率十分必要,有利于减排效率的提升。

(6)运营年限对减排效率具有显著的正向作用,但影响较小,与原假设一致。中国县域污水处理设施投运年限较短且差距较小,平均只有5.69年,目前设备老化等的影响并不大,配套管网建设随运营时间逐步完善,经营管理的经验也越丰富。加强县域之间的交流,利用市场化机制引进高水平的专业化运营公司有利于提升减排效率。

(7)第二产业占比对减排效率产生显著的负向影响,与原假设一致,而第三产业占比的影响并不显著。其主要原因是工业废水成分复杂、处理难度高,单位削减量的成本较高,而县城的第三产业主要是餐饮、旅游业等,这些行业产生的污水与生活污水差异不大。

(8)出水标准对减排效率并未产生显著影响。当前扩大处理规模有利于减排效率提升,提高出水

表3 县域污水处理服务减排效率的Tobit模型回归结果

Table 3 County areas' sewage treatment service emission reduction efficiency using Tobit model (regression results)

	变量	系数	标准差	T检验值	P值	预测方向	验证结果
内部因素	SBR类	-0.036*	0.022	-1.70	0.089	-	-
	氧化沟类	-0.037*	0.020	-1.84	0.067	-	-
	生物膜法类	0.115***	0.031	3.75	0	-	正向
	其他类	0.035	0.042	0.86	0.391	-	-
	设计处理能力	0.029***	0.006	4.91	0	正向	正向
	出水标准	0.007	0.016	0.45	0.653	正向/负向	无显著影响
	负荷率	0.646***	0.034	18.85	0	正向	正向
	运营年限	0.011***	0.004	2.63	0.009	正向	正向
外部环境	地理区位	0.071***	0.009	8.03	0	负向	正向
	人口密度	0.026**	0.010	2.71	0.007	正向	正向
	人均GDP	0.055***	0.019	2.92	0.004	正向	正向
	第二产业占比	-0.003***	0.001	-3.01	0.003	负向	负向
	第三产业占比	-0.002	0.001	-1.29	0.198	负向	无显著影响
	cons	-0.706***	0.201 372	-3.51	0.001	-	-
	Log likelihood	143.457					
	LR chi2	363.69					

注:\*,\*\*,\*\*\*分别表示在10%、5%、1%置信区间上显著。

标准并不一定有利于减排效率提升,所以,对县域污水处理服务来说,目前最为迫切的是提高污水收集率,扩大污水处理服务的有效覆盖面,而不是追求“高大上”出水标准。

4 结论与讨论

综合上述分析,可以得出以下结论:

(1)县域污水处理服务减排平均效率较低,县域之间差异大,效率提升空间较大。技术效率偏低是造成减排效率较低的主要原因,污水处理设施的负荷率、经营管理水平不高,进而使得各要素之间配比不尽合理,“大马拉小车”现象仍然时有发生。因此,有必要制定减排效率绩效考核机制,加强县域之间的交流和学习,不断提高要素配比的合理性水平。此外,县域污水处理设施仍处于建设发展期,大多数县的污水处理服务处于规模报酬递增状态,具有较强的增加投入提高报酬的潜力,适当扩大规模也是推动县域污水处理服务减排效率提升的重要路径。

(2)县域污水处理服务减排效率的区域差异明显,特征各异,应根据地区特点有针对性地采取措施来提高减排效率。Ⅳ区应重点扩大污水处理规模与收集面,提升负荷率;排污系数较高地区即Ⅰ区、Ⅱ区应在扩大处理规模的同时,重点推进雨污

分流工作,提高进水污染物浓度;Ⅴ区应控制处理规模和要素投入,重点优化处理工艺,提升自动化水平,加强相互之间的交流和学习;排污系数较低地区应重点提升污水处理服务覆盖率,已有污水处理服务的县域要逐步扩大污水处理服务的覆盖面,适度扩大处理规模。

(3)负荷率和处理工艺等内部因素是影响县域污水处理服务减排效率最为关键的因素,区位和社会经济水平等外部也具有一定的影响,出水标准与效率之间无显著关系。地理区位、经济发展水平、人口密度、第二产业占比等外部环境因素对污水处理服务减排效率产生了显著影响,但这些外部因素难以调控。提高县域污水处理服务减排效率需内外兼修,以外定内,强化内部管理。既要“重建设”,根据区位和社会经济发展水平选择适当的工艺;更要“重管理”,重点关注污水处理的“面”和“量”,而不是“出水标准”和“提标改造”,重中之重是配套管网建设和管理,确保水量负荷率。当然,水质负荷率也极有可能是影响减排效率的关键因素,因数据限制,本文只是在地区差异分析中,分析了进水污染物浓度产生的影响,并未对水质负荷率的影响进行分析,将在以后进一步探究和讨论。

评价分析县域污水处理服务减排效率,对县级



2017年3月

政府实现高效减排目标具有一定的参考价值。由于受限于统计数据的不完整和异常数据较为突出,经筛选后获得413个有且仅有一座污水处理设施的样本进行减排效率测评,拥有一座以上污水处理设施的县域未纳入本研究,其服务减排效率情况可能有所差异。其次,本研究样本,只选择了2014年截面数据,虽然涵盖了大部分省份,但样本量有待于进一步扩大,数据有待于拓展到长时间跨度的面板数据。另外,随着社会经济的发展 and 研究的深入,污水处理服务的内涵不断变化,投入和产出变量也在不断变化,可以根据需要将配套管网长度、再生水产量、污泥无害化处理量等纳入投入和产出变量,课题组将按照此方向进一步拓展研究。

## 参考文献(References):

- [1] 买亚宗,肖婉婷,石磊,等.中国城镇污水处理厂运行效率评价[J]. 环境科学研究, 2015, 28(11): 1789-1796. [Mai Y Z, Xiao W T, Shi L, et al. Evaluation of operating efficiencies of municipal wastewater treatment plants in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(11): 1789-1796.]
- [2] 宋国君,韩冬梅. 中国城市生活污水管理绩效评估研究[J]. 中国软科学, 2012, (8): 75-83. [Song G J, Han D M. Research on the performance evaluation of urban domestic sewage management in China[J]. *China Soft Science*, 2012, (8): 75-83.]
- [3] Molinos-Senante M, Hernández-Sancho F, Mochol-Arce M, et al. Economic and environmental performance of wastewater treatment plants: Potential reductions in greenhouse gases emissions[J]. *Resource and Energy Economics*, 2014, 38: 125-140.
- [4] Sala-Garrido R, Molinos-Senante M, Hernandez-Sancho F. Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies through a DEA metafrontier model[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 173(3): 766-772.
- [5] 买亚宗,卢佳馨,马中,等. 城镇污水处理设施运行效率及其规模效应研究[J]. 中央财经大学学报, 2016, (4): 122-128. [Mai Y Z, Lu J X, Ma Z, et al. Assessing the efficiency and scale effect of municipal sewage treatment facilities in China[J]. *Journal of Central University of Finance & Economics*, 2016, (4): 122-128.]
- [6] Corton M L, Berg S V. Benchmarking Central American water utilities[J]. *Utilities Policy*, 2009, 17(3-4): 267-275.
- [7] 王峰青,周智强,苏素,等. 西部地区山地城市污水处理厂运行效率评价与分析-基于灰色关联分析[J]. 科技和产业, 2012, 12(10): 59-63. [Wang F Q, Zhou Z Q, Su S, et al. Evaluation and analysis of the western mountainous city sewage disposal factories operating efficiency based on gray correlation analysis[J]. *Science Technology and Industry*, 2012, 12(10): 59-63.]
- [8] Francesc H S, Ramon S G. Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: A DEA approach[J]. *Desalination*, 2009, 249(1): 230-234.
- [9] 任福民,毛联华,卓薇,等. 中国城镇污水处理厂运行能耗影响因素研究[J]. 给水排水, 2015, (1): 42-47. [Ren F M, Mao L H, Fu W, et al. Study of influent factors on energy consumption of municipal wastewater treatment plant operation in China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, (1): 42-47.]
- [10] 马乃毅. 基于New-Cost-DEA模型的污水处理企业成本效率研究[J]. 企业经济, 2012, (3): 72-75. [Ma N Y. Study on the cost efficiency of wastewater treatment enterprises based on New-Cost-DEA model[J]. *Enterprise Economy*, 2012, (3): 72-75.]
- [11] 王佳伟,张天柱,陈吉宁. 污水处理厂COD和氨氮总量削减的成本模型[J]. 中国环境科学, 2009, 29(4): 443-448. [Wang J W, Zhang T Z, Chen J N. Cost model for reducing total COD and ammonia nitrogen loads in wastewater treatment plants[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(4): 443-448.]
- [12] Rehman F, Medley G J D, Bandulasena H, et al. Fluidic oscillator-mediated micro bubble generation to provide cost effective mass transfer and mixing efficiency to the wastewater treatment plants[J]. *Environmental Research*, 2015, 137: 32-39.
- [13] Silva C, Quadros S, Ramalho P, et al. Translating removal efficiencies into operational performance indices of wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2014, 57(12): 202-214.
- [14] Hernández-Sancho F, Molinos-Senante M, Sala-Garrido R. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants a non-radial DEA approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(14): 2693-2699.
- [15] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [Wei Q L. Data Envelopment Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [16] 李崇梅,傅崇辉. 人口规模与废污水排放量关系的动态稳定性研究[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1169-1178. [Li C M, Fu C H. The dynamic stability of relationships between population size and waste water emissions[J]. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1169-1178.]
- [17] 中国城镇供水排水协会. 城镇排水统计年鉴: 2015[M]. 北京: 中国城镇供水排水协会, 2015. [China Urban Water Association. Statistical Yearbook on Urban Drainage[M]. Beijing: China Urban Water Association, 2015.]
- [18] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴·县市卷(2015) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011. [The National Bureau of Statistics, the Rural Social and Economic Investigation Department of National Bureau of Statistics. China County Statistical Yearbook county-level (2015) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.]

## Emissions reduction efficiency of sewage treatment services in county areas in China based on DEA-Tobit Modeling

LI Xin, SUN Xiaoxia, SU Shipeng

*(Institute of Sustainable Development, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)*

**Abstract:** County sewage treatment services have become an important emissions reduction tool; there is however, a wide disparity in emissions reduction efficiency across county areas. In an effort to examine emissions reduction efficiency across county areas, we used data envelopment analysis to calculate efficiency levels in 413 counties using data from the year 2014. Capital, operating costs, labor and energy consumption were chosen as input indices. The actual treatment of sewage, ammonia, COD and BOD<sub>5</sub> reduction were utilized as output indices. An evaluation model of the efficiency of county-level sewage treatment services was established to analyze sewage treatment services and the Tobit model was used to identify key influencing factors. The results show that the combined efficiency of all county areas sewage treatment service is 0.637. The technical efficiency is 0.756 and the scale efficiency is 0.835. We found that 73.85% of counties are increasing their returns to scale. Emission reduction efficiency of sewage treatment service varies among regions. Scale, water load rate, location, population density and economic development levels all have a positive impact on emissions reduction efficiency; biological membrane technology is relatively superior. Many factors are useful in order for some of these sewage treatment facilities to improve their efficiency. Giving guidance according to regional characteristics, facilitating a culture of communication among sewage facilities in county areas, expanding or constructing sewage treatment facilities to appropriate size, utilizing local conditions to choose sewage treatment processes, strengthening the supporting pipe network construction and promoting rain and sewage diversion are all necessary to improve the efficiency of sewage treatment services in China.

**Key words:** county areas; sewage treatment service; emission reduction efficiency; DEA-Tobit two-step method; influencing factors