

文章编号:2095-0365(2020)01-0001-11

污水处理的碳排放空间差异及影响因素分析

翟光红¹, 左孝凡²

(1. 合肥师范学院 经济与管理学院,安徽 合肥 230009;
2. 福建农林大学 公共管理学院,福建 福州 350002)

摘要:碳排放是评价温室气体排放的重要指标,如何应对全球变暖、促进节能减排越来越受到国际社会的重视,但污水处理过程中的碳排放问题往往被人忽视。文章基于全国污水处理厂污水处理数据对污水处理过程中的碳排放进行测算、空间差异比较和影响因素分析。研究结果表明:(1)污水处理厂污水处理碳排放结构具有较大差异,直接碳排放与间接碳排放、直接碳排放内部结构均存在一定差异,污水处理厂污水处理碳排放主要来源于间接碳排放,CH₄与N₂O碳排放量相当;(2)污水处理厂污水处理碳排放空间分布差异明显。碳排放主要来源于经济发展较好、工业产业较为发达的省份。从空间分布来看,我国由西向东污水处理碳排放逐渐加重。(3)污水处理厂污水处理碳排放的影响因素包括内部因素和外部因素两个方面,内部因素中污水处理厂规模、运营年限以及处理工艺和外部因素中经济发展水平、人口密度对碳排放具有显著影响。

关键词:碳排放;城镇污水处理;测算;空间差异;影响因素

中图分类号:X196 **文献标识码:**A **DOI:**10.13319/j.cnki.sjztdxbskb.2020.01.01

一、引言

全球变暖问题已经变成一个不容忽视的环境问题,涉及人类的生存与可持续发展^[1]。就目前而言,减少碳排放是缓解全球变暖的重要手段已经得到充分的认识。但是在应对诸如污水处理、垃圾处理等环境问题时,往往处理手段也会带来较多温室气体排放,如何测量这些由于应对环境问题产生的二次碳排放所带来的效应,以及研究其碳排放的影响因素具有一定的现实意义。

对碳排放的研究涉及领域较为广泛。第一类是对能源行业的研究,这一类研究也是对碳排放研究较为成熟的领域。能源消费具有直接的碳排放^[2],所以对能源消费带来的碳排放与经济增长

之间的关系^[3],以及碳排放的影响因素^[4]和空间差异^[5]成为关注的热点。第二类是对农业碳排放的研究,农业生产是温室气体产生的另一个重要源头,对农业碳排放研究很有必要^[6],农业生产碳排放具有较大的时空差异^[7]和空间差异^[8],分析其区域差异、动态变化和影响因素对研究农业生产与经济可持续发展有一定的参考作用^[9]。碳排放的研究还涉及旅游^[10]、区域经济^[11]以及产业结构^[12]等领域。污水处理厂属于能源消费的主体,并承载水污染处理的公共服务职责。对污水处理厂的研究主要集中在以下几个层面。第一,将污水处理厂视为一个企业,从投入产出的角度去研究如何使污水处理厂保持高效运转^[13],并从污水处理费制度的角度对污水处理厂运营成本估

收稿日期:2019-05-13

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项课题“水环境产业发展战略与政策及其示范研究”(2012ZX0760003);福建省软科学研究计划(重大)项目“以政府购买服务方式拓宽农村环境综合治理路径”(2018R0010)

作者简介:翟光红(1975—),男,副教授,研究方向:资源与环境、农林经济管理。

本文信息:翟光红,左孝凡.污水处理的碳排放空间差异及影响因素分析[J].石家庄铁道大学学报:社会科学版,2020,14(1):1-10,24.

算^[14];第二,从污水处理厂职责的角度,将污水处理厂视为公共服务提供者,污水处理实际是一个减少排污的过程^[15];第三,从化学以及污水处理方法的角度,包括对污泥成分^[16]、污水处理工艺^[17]以及处理技术^[18];第四,将污水处理厂视为一个污染主体,关注到了污水处理厂的温室气体排放^[19],将污水处理运行阶段产生的温室气体进行核算,并对碳排放进行分析提出减排对策^[20],以及结合化学化工领域研究污泥处置工艺和碳排放的关系^[21]。从现有文献来看,多数学者虽然关注到碳排放带来的环境问题,以及对碳排放进行一系列深入的研究,但是却忽视了一些本身在处理环境污染问题过程中可能出现的碳排放问题,如垃圾处理厂、污水处理厂在处理垃圾、污水污染时产生的碳排放问题。单独对污水处理碳排放研究的文献观察,多数学者关注的是某一个体或某一个区域的案例研究、定性研究,另一部分文献虽然采用定量分析手段但是选取范围较小,同时没有对区域之间差异进行分析,显然具有一定的局限性。

本文在既有文献的基础上进一步研究,区别于既有文献本文的贡献是:第一,关注到了污水处理在进行水污染处理的同时会产生二次污染问题,将视角扩展到全国范围,较个别案例研究具有较高的参考价值,第二,对污水处理厂产生的直接碳排放和间接碳排放分别予以测算并进行空间分布分析,并通过选取样本数据进一步估算扩展到省域层面;第三,通过建立县域污水处理碳排放模型,解决模型所需基本样本量的要求,从县域角度验证省域差异性分析中的结论。

二、材料与研究方法

(一)研究方法

1. 碳排放计算方法

本研究对污水处理厂运行过程中的碳排放区分为直接碳排放和间接碳排放。直接碳排放包括污水处理厂运行过程中释放的 CH_4 和 N_2O , CH_4 主要来源于对 BOD 污染物和 COD 污染物的处理过程中, N_2O 主要是对氨氮污染物处理过程中产生的污染气体。间接排放主要是污水处理厂运行过程中所耗用的能源,本文将以污水处理设备的耗电量来表示。

对于污水处理厂的直接碳排放, CH_4 和 N_2O

的计算主要是通过污水进出前的 BOD、COD 和氨氮污染物消减量与相应的排放因子乘积实现的,具体如公式(1)和公式(2)所示。

CH_4 排放计算公式如公式(1)所示。

$$Q_{\text{CH}_4} = q(\text{BOD}_{\text{ex}} - \text{BOD}) E_{\text{CH}_4 \cdot \text{BOD}} + q(\text{COD}_{\text{ex}} - \text{COD}) E_{\text{CH}_4 \cdot \text{COD}} \quad (1)$$

式中, Q_{CH_4} 表示 CH_4 的排放量,单位为 kg ; q 表示污水处理厂污水年进水量,单位为 m^3 ; BOD_{ex} 和 BOD 分别表示进水 BOD 浓度和出水 BOD 浓度; COD_{ex} 和 COD 分别表示进水 BOD 浓度和出水 COD 浓度单位为 kg/m^3 ; $E_{\text{CH}_4 \cdot \text{COD}}$ 为 BOD 污染排放物处理的 CH_4 排放因子; $E_{\text{CH}_4 \cdot \text{BOD}}$ 为 BOD 污染排放物处理的 CH_4 排放因子,单位为 $\text{kg}(\text{CH}_4) / \text{kg}(\text{BOD})$ 和 $\text{kg}(\text{CH}_4) / \text{kg}(\text{COD})$ 。

N_2O 排放计算公式如公式(2)所示。

$$Q_{\text{N}_2\text{O}} = q(\text{TN}_{\text{ex}} - \text{TN}) E_{\text{N}_2\text{O}} \quad (2)$$

式中, $Q_{\text{N}_2\text{O}}$ 表示 N_2O 的排放量,单位为 kg ; q 表示污水处理厂污水年进水量,单位为 m^3 ; TN_{ex} 和 TN 分别表示进水氨氮浓度和出水氨氮浓度,单位为 kg/m^3 ; $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 排放因子,单位为 $\text{kg}(\text{N}_2\text{O}) / \text{kg}(\text{氨氮})$ 。

污水处理厂的碳间接排放,即 CO_2 的排放计算公式如公式(3)所示。

$$Q_{\text{CO}_2} = M \cdot E_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

式中, Q_{CO_2} 表示 CO_2 的排放量,单位为 kg ; M 表示污水处理厂的电能消耗,单位 $\text{kW} \cdot \text{h}$; E_{CO_2} 表示 CO_2 排放因子,单位 $\text{kg}(\text{CO}_2) / \text{kW} \cdot \text{h}$ (电能)。同时根据 IPCC 指南中对于污水生物处理过程中排放 CO_2 未纳入清单当中,故本研究不考虑该过程的 CO_2 排放。

上述公式中的影响因子具体数值如表 1 和表 2 所示。

考虑到准确的计算全国各省域的碳排放情况,本文在选取影响因子取值时,考虑到了地域之间的差异。 CH_4 和 N_2O 的排放因子均参考联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)于 2010 年发布的《2006 年国家温室气体清单指南》中的建议取值范围来划定的, BOD 的 CH_4 影响因子取值范围在 0.075 2~0.096 9 之间,本文取其均值 0.086, N_2O 的取值范围在 0.006~0.253 之间,本文取均值 0.035。确定 COD 的 CH_4 排放因子时,参考了 IPCC(2006)和蔡博峰等(2015)对排放因子的估算,按照省域进行划分确定符合实际情况的排放因子数值(如表 2 所示)。其中上海市排

放因子高于其他省份为 0.013 7, 云南省排放因子低于其他省份为 0.003 9, 与传统经济发展程度划分区域不同, 按照 2015 年《中国区域电网基准线排放因子》中的区域划分。华北区域包括北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古等 6 个省市自治区; 东北区域包括辽宁、吉林和黑龙江等 3 省; 华东包括上海、江苏、浙江、安徽和福建等 5 个省份; 华中区域包括河南、湖北、湖南、江西、四川和重庆等 6 个省市; 西北区域包括陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆等 5 个省市自治区; 南方区域包括广东、广西、云南、贵州和海南等 5 个省份。其中东北区域的排

放因子最高, 达到 1.129 1, 南方区域的排放因子最低, 为 0.811 2。

标准碳排放换算如公式(4)所示。

$$Q_{100a} = \beta_{CH_4} Q_{CH_4} + \beta_{N_2O} Q_{N_2O} + \beta_{CO_2} Q_{CO_2} \quad (4)$$

式中, Q_{100a} 为换算后的标准碳排放, 按照《2006 年国家温室气体清单指南》中标准碳排放转换系数; β_{CH_4} 为 CH_4 排放的转化数值, 取值为 25; β_{N_2O} 为 N_2O 的转化数值, 取值为 298; β_{CO_2} 为 CO_2 排放的转化数值, 取值为 1。公式(4)中其他为介绍变量表示含义与公式(1)、公式(2)和公式(3)中含义一致, 在此不再赘述。

表 1 影响因子取值范围及单位

影响因子	区域	单位	取值范围	本文取值	参考出处
$E_{CH_4} \cdot BOD$	全国	kg(CH_4) / kg(BOD)	0.075 2~0.096 9	0.086	IPCC《2006 年国家温室气体清单指南》
$E_{CH_4} \cdot COD$	全国	kg(CH_4) / kg(COD)	见表 2	见表 2	IPCC(2006)、蔡博峰等(2015)
E_{N_2O}	全国	kg(N_2O) / kg(氨氮)	0.006~0.253	0.035	IPCC《2006 年国家温室气体清单指南》
E_{CO_2}	华北	kg(CO_2) / kW·h	1.041 6	1.041 6	2015 年《中国区域电网基准线排放因子》
	东北		1.129 1	1.129 1	
	华东		0.811 2	0.811 2	
	华中		0.951 5	0.951 5	
	西北		0.945 7	0.945 7	
	南方		0.895 9	0.895 9	

表 2 各区域 COD 排放因子

区域	省份	COD 排放因子
华北	北京市	0.005 5
	天津市	0.011 0
	河北省	0.008 4
	山西省	0.009 3
	山东省	0.006 6
东北	辽宁省	0.008 1
	吉林省	0.004 7
华中	江西省	0.006 5
	河南省	0.010 0
	湖南省	0.008 5
	重庆市	0.006 5
	四川省	0.005 9
南方	广东省	0.007 5
	广西	0.004 4
	海南省	0.006 1
	贵州省	0.004 3
	云南省	0.003 9
西北	陕西省	0.007 7
	宁夏	0.008 7
	新疆	0.019 0
华东	上海市	0.013 7
	江苏省	0.005 2
	安徽省	0.005 4
	福建省	0.004 5

注:城镇污水处理污染源主要来自生活污水,故本文选取 COD 排放因子按照生活污水排放因子计算。

2. 计量模型

根据被解释变量的数据分布特征,碳排放为连续性变量,故适用通过最小二乘法构建多元线性回归模型进行检验。本文建立方程如公式(5)所示:

$$Y_r = \beta_0 + \sum \beta_{ir} Var_{ir} + \epsilon_r \quad (5)$$

式中, Y_r 表示第 r 个污水处理厂的碳排放; β_0 表示常数项; β_{ir} 表示第 r 个污水处理厂的第 i 个待估计参数; Var_{ir} 表示第 r 个污水处理厂的第 i 个影响因素; ϵ_r 表示随机误差项。

3. 研究框架及假设

图 1 报告了本文的研究框架,通过对全国范围内样本污水处理厂运行过程中的直接碳排放和间接碳排放依据不同的标准进行测算,将碳排放单位换算为标准 CO_2 排放单位。通过不同区域之间的分析和影响因素分析,探讨分析出提高污水处理厂碳排放效率的可能路径。

按照上述框架设计及数据基础,本文提出以下假设:

假设 H1: 经济发展越好、工业越发达的区域,污水处理压力越大,污水碳排放越高。

经济发展指标是通过社会 GDP 和各产业增

加值来体现的,经济发展越好,带来的污水处理压力则越大,随着污水处理量的增加污水处理过程中的碳排放也随之增加。

假设 H2:污水处理碳排放结构具有区域差异,不同处理法对污水处理碳排放具有影响。

污水处理厂污水处理碳排放结构具有差异,就省域层面来看,每个地区的产业结构、经济发展水平不同、排放标准要求不同以及污水处理工艺的差异性,由此带来污水处理碳排放内部结构之间具有一定差异,如直接碳排放中的结构差异、直

接碳排放与间接碳排放结构的差异。

假设 H3:污水处理厂污水处理碳排放影响因素包括污水处理厂自身和所在地区宏观经济环境有关。

污水处理厂污水处理碳排放与污水处理厂的设备老化程度、规模化程度、处理工艺等存在关系,同时宏观经济对污水处理厂污水处理过程中的碳排放也存在影响,经济越发达、人口密集度越高的区域污水处理量越大,其污水处理过程中产生的碳排放可能就越多。

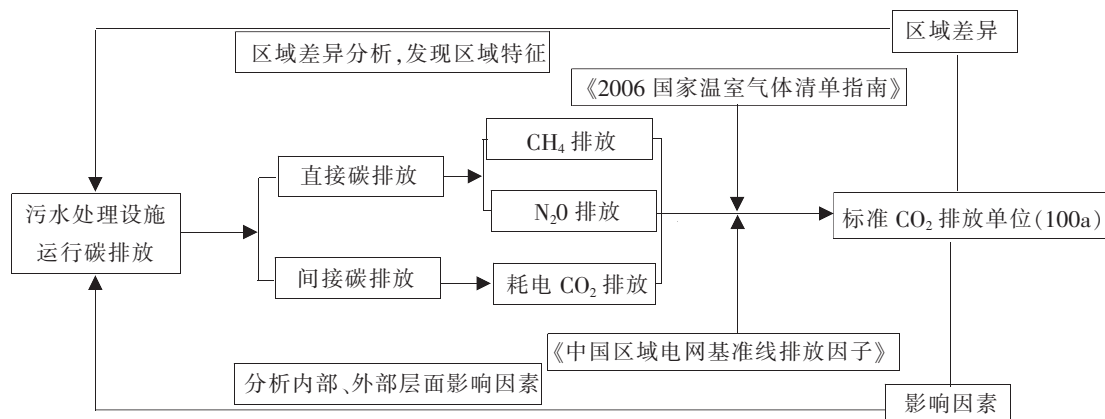


图 1 研究框架及路线

(二)数据材料

1. 数据来源

本文所使用数据以及公式计算方法分别来自《城镇排水统计年鉴(2015 年)》、《中国县域统计年鉴·县市卷》、2015 年《中国区域电网基准线排放因子》、《2006 国家温室气体清单指南》以及各省市统计年鉴。为保证数据具有较强的信度,对《城镇排水统计年鉴(2015 年)》中包含缺失值样本以及离群值进行筛选,故本文从 2 619 个城镇查中选取 1 908 个样本作为研究对象,样本涵盖北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古等 24 个省市自治区,覆盖华北、东北、华东、华中、西北、南方 6 个区域。样本选取的数量和分布情况符合研究所需的基本要求。

2. 数据描述统计

表 3 报告了本文测算碳排放所需数据的描述统计情况。本节数据并非直接引用统计数据而

来,而是通过对 1 908 个样本进行测算,按照样本所属省域测算污染物消减量的单位值(污染物消减量/污水处理量)与省域污水年处理总量乘积估算得来,省耗电总量是通过测算耗电量单位值(总耗电量/污水处理量)与省域污水年处理总量乘积估算得来。相比仅使用样本数据,使用省域估测数据更符合真实情况,使统计绝对数值具有一定意义。从描述统计结果来看,省域之间、区域之间具有明显差异性。COD 消减量方面最高省份为广东省的 9 548.41 万 t,最低省份为宁夏的 5.06 万 t,极差为 9 543.35 万 t。BOD 消减量最高省份为山东省 22 313.94 万 t,最低省份宁夏 8.73 万 t。氨氮消减量和电能消耗最高均为广东省 2 156.56 万 t 和 241 630 684.25 万 MW·h,最低仍然是宁夏 1.06 万 t 和 93 983.89 万 MW·h。从各项指标来看,各省污水处理厂污水处理数量、处理的主要污染物以及用电量均具有差异。

表 3 碳排放测算所需指标描述统计情况

区域	省份	COD 消除量/万 t	BOD 消除量/万 t	氨氮消除量/万 t	耗电量/(万 MW·h)
华北	北京市	1 503.62	2 929.08	321.08	27 766 825.83
	天津市	399.79	929.05	90.79	7 215 850.41
	河北省	3 316.35	7 219.42	694.04	82 109 555.83
	山西省	815.39	1 778.18	216.83	22 587 461.83
	山东省	8 955.05	22 313.94	2 015.65	191 557 758.21
东北	辽宁省	1461.22	3 705.75	273.60	39 746 808.77
	吉林省	277.93	532.68	282.85	4 052 484.19
华东	上海市	1 193.80	2 448.40	181.14	19 336 141.03
	江苏省	3 079.47	6 933.17	582.86	80 471 561.00
	安徽省	1 414.30	3 262.87	367.93	3 399 276.96
	福建省	823.57	1 813.63	189.93	22 775 716.46
华中	江西省	553.85	1 221.21	136.37	37 717 552.64
	河南省	1 220.26	2 445.94	220.91	21 668 480.76
	湖南省	258.11	640.98	55.19	6 351 568.24
	重庆市	74.55	154.38	13.21	1 349 908.11
	四川省	112.16	245.44	27.74	1 985 008.03
	广东省	9548.41	21 524.07	2 156.56	241 630 684.25
南方	广西	58.89	139.08	20.60	2 486 033.14
	海南省	25.79	65.99	4.32	646 625.66
	贵州省	164.59	400.14	45.45	4 104 662.69
	云南省	3 170.10	6 257.74	492.35	53 425 297.78
	陕西省	15.76	32.07	2.42	243 915.98
西北	宁夏	5.06	8.73	1.06	93 983.89
	新疆	28.09	62.16	5.15	476 193.77

注:本表报告数据,均通过样本数据单位量估测计算后呈现。

三、结果分析

(一)碳排放计算结果及分布

本节将介绍碳排放数值经过标准化后的计算结果及空间分布。具体而言,从数量角度来看,表 4 报告了中国省域样本污水处理厂污水处理碳排放的情况。省域之间差别较大,污水处理厂污水处理碳排放最高为广东省 216 524.04 万 t,最低为宁夏回族自治区为 89 万 t。从全国平均值的角度观察,选取样本省份的污水处理碳排放均值为 34 763 万 t,其中低于平均值的省份有 17 个,分别为北京市、天津市、山西省、吉林省、上海市、安徽省、福建省、河南省、湖南省、广西、海南省、重庆市、四川省、贵州省、陕西省、宁夏、新疆,高于全国平均水平的省份有 7 个,分别为河北省、辽宁省、江苏省、江西省、山东省、广东省和云南省。从结构方面看,碳排放主要是由间接排放贡献,占总排放的 99% 以上,可见污水处理过程中的直接碳排

放仅占较小的一部分。本文采用人均碳排放数值来表示碳排放强度。从碳排放强度中可以看出,山东、广东碳排放强度分别为 20.39 和 20.19 高于其他省份,而陕西省碳排放强度仅有 0.06,低于所有样本省份。

虽然从各个省域来看,直接碳排放和间接碳排放结构相似,但各省域直接碳排放内部结构具有一定差异。图 2 报告了直接碳排放内部结构变动结构情况。从整体结构上观察,氨氮污染物和 COD 污染物处理过程中产生的碳排放占直接碳排放的比重较高,COD 污染物处理碳排放所占比重较小。从每个直接碳排放结构组成部分来看,全国省份氨氮碳排放占直接碳排放平均占比为 48%,但是上海明显低于平均值,仅占总排放 36%。而吉林省和广西要明显高于其他省份,分别占直接排放总量的 82% 和 60%。BOD 污染物排放方面,各个省份占平均值占比水平为 44%,吉林省和广西明显低于平均值,分别占比 17% 和 35%。COD 污染物碳排放方面,各省份占比平均水平为 8%,其中上海、新疆向上偏离平

均值,分别为 16%和 21%,但是吉林省向下偏离平均值,仅占比 2%。对比每个结构成分发现,氨氮碳排放与 COD 碳排放和 BOD 碳排放之间存在“此消彼长”的负向关系。直接碳排放内部结构差异的原因主要是:第一,污水处理厂所在区域污水处理物质有所差异,BOD 污染物、COD 污染物和氨氮污染物有所差别导致污水处理碳排放具有差异,城镇污水处理厂主要处理的是生活污水,故而每个地区的人口密集度会影响到生活污水的排放;第二,污水处理内部的处理工艺有所区别,使用污水处理工艺不同,产生的碳排放也会有所区

别,使用的污水处理工艺包括 SBR 类、氧化沟类、生物膜法以及其他类,在化学处理工艺中产生的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 气体排放种类和数量会存在差异;第三,污水处理厂规模、内部管理、污水处理厂运营年限等因素都会影响污水处理效率,从而会增加碳排放,污水处理规模大小直接影响污水处理数量,高效的内部管理会有效降低不必要的碳排放和电能的消耗,同时随着污水处理厂运营年限的增长,污水处理设备老化导致污水处理效率低下,从而会增加污水处理过程中产生不必要的碳排放量。

表 4 中国省域样本污水处理设施碳排放情况

万 t

省域	直接碳排放			间接碳排放	总碳排放
	CH ₄ 排放		N ₂ O 排放	CO ₂ 排放	
	COD	BOD	氨氮	电能消耗	
北京市	0.40	3.23	3.35	28 922	28 928.91
天津市	0.26	0.86	0.95	7 516	7 518.09
河北省	1.52	7.13	7.24	85 525	85 541.20
山西省	0.41	1.75	2.26	23 527	23 531.53
辽宁省	0.75	3.14	2.85	44 878	44 884.88
吉林省	0.06	0.60	2.95	4 576	4 579.27
上海市	0.84	2.57	1.89	15 685	15 690.77
江苏省	0.90	6.62	6.08	65 279	65 292.16
安徽省	0.44	3.04	3.84	2 757	2 764.81
福建省	0.20	1.77	1.98	18 476	18 479.60
江西省	0.20	1.19	1.42	35 888	35 891.06
山东省	3.68	19.25	21.02	199 527	199 570.49
河南省	0.61	2.62	2.30	20 618	20 623.10
湖南省	0.14	0.55	0.58	6 044	6 044.78
广东省	4.04	20.53	22.49	216 477	216 524.04
广西	0.02	0.13	0.21	2 227	2 227.59
海南省	0.01	0.06	0.05	579	579.42
重庆市	0.03	0.16	0.14	1 284	1 284.76
四川省	0.04	0.24	0.29	1 889	1 889.30
贵州省	0.04	0.35	0.47	3 906	3 906.46
云南省	0.61	6.82	5.14	47 864	47 876.29
陕西省	0.01	0.03	0.03	219	218.59
宁夏	0.00	0.01	0.01	89	88.90
新疆	0.03	0.06	0.05	450	450.48

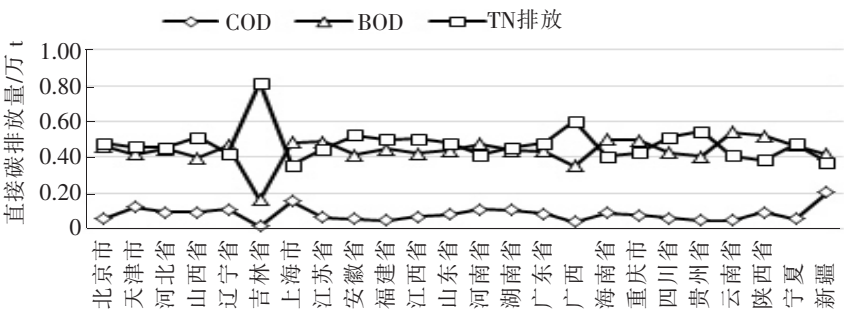


图 2 污水处理直接碳排放内部结构及省域结构情况

从空间分布来看,污水处理厂排放较高的区域集中在华北区域和经济发展较为发达的沿海省

份。从整体特征而言,这些区域的人口、经济和产业结构都具有相似的特征,这些区域的人口密集程度较高,经济发展较好且产业结构以第二产业为主。而经济发展较弱的地区,污水处理厂的碳排放较少。具体来看,山东、广东碳排放较样本省份而言处于较高的位置,河北、辽宁、江苏碳排放量也较多。但是可以发现,诸如新疆、宁夏、四川、山西、重庆等地区,经济发展相对较弱的地区,碳排放量较少。可见,污水处理厂的碳排放与经济发展具有高度密切的联系。

(二)碳排放影响因素分析

通过上节对我国污水处理厂碳排放的数量和区域分布的分析,发现碳排放与经济发展具有较强的相关性,本节将通过建立计量模型分析碳排

放的内外部影响因素。为了较为具体地研究影响污水处理厂碳排放的因素,保证数据的匹配程度更加准确,本文在 2 619 个全国样本中选取了一个县级行政区域(包括县、区、县级市)仅有一座污水处理单位的 406 座污水处理厂,从较为微观的县域层面去探索影响碳排放的因素。图 3 报告了 406 座污水处理厂的分布情况,根据不同省份的统计情况及县域污水处设施的选择,从 24 个样本省份中选取了 17 个省份,分布涵盖了 6 大区域能够较为全面了反映碳排放影响的影响因素,河北省样本量最高,占比 22.1%,广东和江苏仅筛选出一个样本。

表 5 报告了污水处理厂影响模型选取变量的描述统计情况。

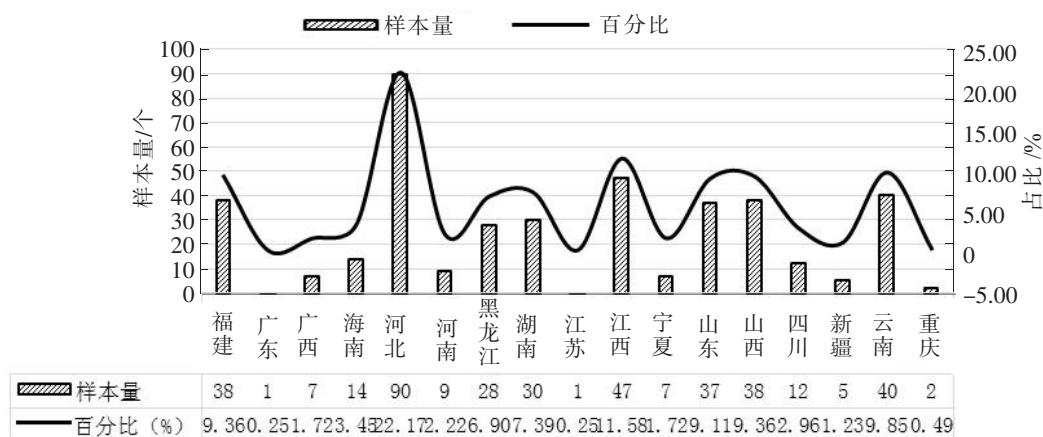


图 3 县域污水处理厂碳排放样本选择数量及区域分布

表 5 县域污水处理厂碳排放影响模型变量描述统计

变量类型	变量	观测值	平均值	标准误
被解释变量	碳排放 *	406	15.590	0.914 105
解释变量	内部因素			
	运营年限	406	4.697	2.121
	设计处理能力 *	406	2.215	1.581
	从业人数	406	33.241	20.355
	年运行总费用 *	406	536.435	690.749
	年更新改造费用 *	406	85.399	444.168
	是否是 SBR 类(0=是,1=否)	406	0.753	0.431
	是否是氧化沟类(0=是,1=否)	406	0.660	0.474
	是否是生物膜法类(0=是,1=否)	406	0.919	0.274
	是否是其他类(0=是,1=否)	406	0.966	0.183
	外部因素			
	GDP *	406	13.774	0.764
	第三产业增加值 *	406	3.479	0.267
	第二产业增加值 *	406	3.776	0.364
	第一产业增加值	406	2.851	0.604
	人口密度	406	0.034	0.028

注:表中变量标注*,表示该变量经对数化处理。

表 6 报告了污水处理厂碳排放影响基准回归及稳健性检验。从模型参数来看,一般认为 VIF 小于 10,模型不存在多重共线性问题,经过多重共线检验发现模型 1~模型 4 平均 VIF 均小于

10,且每个变量之间的最大 VIF 小于 10,故可以认为模型不存在多重共线性问题。再从调整 R^2 角度可以发现,各个模型拟合度较好,就有较强的解释力。

表 6 污水处理厂碳排放影响基准回归及稳健性检验

解释变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
	内部因素模型	外部因素模型	内外部因素模型	稳健性检验
内部因素				
运营年限	0.06*** (0.000)	(0.131)	0.02 (0.193)	0.02
设计处理能力	0.36*** (0.000)		0.26*** (0.000)	0.26*** (0.000)
从业人数	0.01*** (0.000)		0.01*** (0.000)	0.01*** (0.000)
年运行总费用	-0.00 (0.203)		0.00 (0.991)	-0.00 (0.901)
年更新改造费用	0.00 (0.225)		0.00 (0.380)	0.00 (0.366)
SBR 类	0.18** (0.026)		0.16** (0.041)	0.10 (0.242)
氧化沟类	0.13* (0.077)		0.19*** (0.008)	0.16** (0.046)
生物膜法类	-0.19 (0.105)		-0.24** (0.026)	-0.32** (0.011)
其他类	0.18 (0.283)		0.12 (0.422)	0.11 (0.540)
外部因素				
GDP		0.54*** (0.000)	0.24*** (0.000)	0.23*** (0.000)
第三产业增加值		0.80*** (0.000)	0.59*** (0.000)	0.67*** (0.000)
第二产业增加值		0.49*** (0.006)	0.52*** (0.000)	0.56*** (0.000)
第一产业增加值		0.09 (0.332)	0.16** (0.023)	0.17** (0.034)
人口密度		7.93*** (0.000)	2.62** (0.024)	2.77** (0.031)
模型参数				
χ^2_{cons}	14.06*** (0.000)	2.98** (0.035)	6.65*** (0.000)	6.55*** (0.000)
N	406	406	406	345
R^2_{adj}	0.60	0.43	0.64	0.64
F	68.22	62.95	53.22	44.33

注: * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$, 括号内报告的是标准误。

模型1仅纳入了污水处理厂的内部因素,从模型运行结果来看,运营年限、设计处理能力、从业人数均在1%的显著性水平下通过检验,说明随着运营年限的增加,污水处理厂碳排放数量越多,污水处理厂随着运营年限的增加会出现设备老化、投放工艺精准度降低等问题,本文研究样本的平均运营年限为4.697年,出现这样的问题可能与污水处理厂管理水平不善、员工操作技能较低等原因有关。设计处理能力与从业人数都说明了其规模大小,即随着污水处理厂规模的增加其污水处理碳排放的数量就越多,污水处理规模越大,污水处理量随之提高,故而碳排放水平提高。污水处理厂选用不同的污水处理工艺也会影响到污水处理厂碳排放的多少,从模型结果中可以看出,使用SBR类工艺和氧化沟类工艺对污水处理厂具有显著正向影响。从各个影响因素的系数值来看,设计处理能力对污水处理设备碳排放影响程度最高。

模型2仅纳入了外部因素,其中GDP、第三产业增加值、第二产业增加值和人口密度对污水处理厂碳排放具有显著影响。GDP、第一产业、第二产业和第三产业增加值都是衡量地区经济发展水平的重要指标,采用宏观经济指标研究其对污水处理厂碳排放的影响,用于验证省域差异性分析过程中发现碳排放较重的省份分布在经济较为发达、工业水平较高的省份。从模型结果来看,GDP、第二产业、第三产业增加值对污水处理碳排放具有重要影响,其主要原因可能是经济发展带来污水处理数量增加,进而增加了污水处理碳排放。城镇污水处理厂主要的污染来源是城镇生活污水,这与城镇居住人口具有重要关系。通过模型结果可以看出,随着人口密度越高,污水处理厂污水处理碳排放数量也会随着提高;从系数值可以看出,人口密度对城镇污水处理碳排放具有重要影响。

模型3是在模型1和模型2的基础上,将内外部因素同时纳入到模型当中,从模型的调整 R 方数值可以发现,同时纳入内外部因素后,调整 R 方数值达到0.64,其数值高于单独纳入内部因素是的0.60和外部因素时的0.43,说明模型3的拟合程度较高,解释力相比较模型1和模型2而言有所增强。模型3中内部因素运营年限不在对污水处理碳排放具有显著影响,说明运营年限对污水处理碳排放的影响并不稳健,而

在污水处理工艺中,发现使用生物膜法可以有效减少污水处理过程中的碳排放,说明生物膜法工艺在减少污水处理过程中碳排放具有一定的有益作用。从模型估计的系数值来看,人口密度依然是影响污水处理碳排放的重要因素,采用生物膜法工艺对污水处理碳排放的缓解作用,比SBR类和氧化沟类工艺对污水处理碳排放的促进作用程度要高。

模型4是在模型3的基础上随机抽取85%的样本再次运行模型,结果发现模型3的结果较为稳健。

五、结论与讨论

(一)结论

通过上述对污水处理厂碳排放的测算、空间差异和影响因素分析,得出以下结论:

第一,污水处理厂碳排放结构具有较大差异,直接碳排放与间接碳排放、直接碳排放内部结构均存在一定差异。污水处理厂污水处理碳排放主要来源于间接碳排放,间接碳排放占总排放的99%以上,直接碳排放所占比例较小。但是污水处理直接碳排放中结构具有一定差异,BOD、COD和氨氮处理过程中产生的碳排放有所不同,但是从各省污水处理厂污水处理过程中的 CH_4 和 N_2O 产生碳排放处于比例为1:1的水平波动。

第二,污水处理厂碳排放空间分布差异明显。碳排放主要来源于经济发展较好、工业产业较为发达的省份。从空间分布来看,我国由西向东污水处理碳排放逐渐加重。其中广东省和山东省污水处理碳排放总量为216 477万t和199 570.49万t,分别占全国污水处理厂碳排放的25.95%和23.92%。而宁夏、陕西、新疆等经济发展较为薄弱的区域碳排放量较少。

第三,污水处理厂碳排放的影响因素包括内部因素和外部因素两个方面。内部因素中污水处理厂规模、运营年限以及处理工艺和外部因素中经济发展水平、人口密度对碳排放具有显著影响。通过县域影响因素分析验证了省域差异性分析过程中的结论,从而可以为控制污水处理厂碳排放,实现提高污水处理厂碳排放效率,从污水处理厂自身和外界宏观经济环境提供一定的参考路径。

(二) 讨论

本文关注到了在生态环境治理过程中的环境问题和生态问题,从宏观和较为微观的层面对污水处理设施在进行污水处理过程中产生的碳排放情况进行了分析。本文在筛选研究污水处理碳排

放的影响因素样本过程可能存在一定不足,以及仅考虑空间差异并未考虑到时空效应的影响,好在省域和县域的结果可以相互验证。下一步本研究将形成面板数据对污水处理碳排放进行时空差异上的研究,并增加本文归结为区域差异特征中的其他解释变量,使模型更加完善。

参考文献:

- [1] Anderson T R, Hawkins E, Jones P D. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models [J]. Endeavour, 2016, 40 (3):178.
- [2] 孙叶飞,周敏. 中国能源消费碳排放与经济增长脱钩关系及驱动因素研究[J]. 经济与管理评论, 2017, 33 (06):21-30.
- [3] Yu Y, Kong Q. Analysis on the influencing factors of carbon emissions from energy consumption in China based on LMDI method[J]. Natural Hazards, 2017, 88(3):1-17.
- [4] Zhang Y, Qin Y C, Yan W Y, et al. Urban types and impact factors on carbon emissions from direct energy consumption of residents in China[J]. Geographical Research, 2012, 31(3):409-417.
- [5] 程叶青,王哲野,张守志,等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68 (10):1418-1431.
- [6] 文清,田云,王雅鹏. 中国农业碳排放省域差异与驱动机理研究——基于 30 个省(市、区)1993—2012 年的面板数据分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 1-6.
- [7] 田云,张俊飏,李波. 中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34 (11): 2097-2105.
- [8] 高鸣,宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异——基于 Malmquist-luenberger 指数与空间计量的实证分析[J]. 经济地理, 2015, 35(04):142-148,185.
- [9] 刘华军,鲍振,杨骞. 中国农业碳排放的地区差距及其分布动态演进——基于 Dagum 基尼系数分解与非参数估计方法的实证研究[J]. 农业技术经济, 2013(03): 72-81.
- [10] Meng W Q, Xu L Y, Hu B B, et al. Quantifying direct and indirect carbon dioxide emissions of the Chinese tourism industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126:586-594.
- [11] 肖雁飞,万子捷,刘红光. 我国区域产业转移中“碳排放转移”及“碳泄漏”实证研究——基于 2002 年、2007 年区域间投入产出模型的分析[J]. 财经研究, 2014, 40(02):75-84.
- [12] 原源,席强敏,孙铁山,等. 产业结构对区域碳排放的影响——基于多国数据的实证分析[J]. 地理研究, 2016, 35(01):82-94.
- [13] 买亚宗,肖婉婷,石磊,等. 我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.
- [14] 谭雪,石磊,马中,等. 基于污水处理厂运营成本的污水处理费制度分析——基于全国 227 个污水处理厂样本估算[J]. 中国环境科学, 2015, 35 (12): 3833-3840.
- [15] 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(03):451-460.
- [16] 孙少静,李博,李洪伟,等. 污水处理厂污水和污泥中 PAHs 的残留及风险研究进展[J]. 中国环境监测, 2017, 33(01):106-114.
- [17] ülo Mander, Dotro G, Ebie Y, et al. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review [J]. Ecological Engineering, 2014, 66(3):19-35.
- [18] 张曼雪,邓玉,倪福全. 农村生活污水处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(06):5-10.
- [19] Campos J L, Valenzuela-Heredia D, Pedrouso A, et al. Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention[J]. Journal of Chemistry, 2016(9):1-12.
- [20] 宋宝木,秦华鹏,马共强. 污水处理厂运行阶段碳排放动态变化分析:以深圳某污水处理厂为例[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(10):204-209.
- [21] 李欢,金宜英,李洋洋. 污水污泥处理的碳排放及其低碳化策略[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(02): 117-121,131.

(下转第 24 页)

2. School of Marxism, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Regional coordinated development is an important part of public governance. Realizing spatial transformation of rural residents' income is the key to the solutions of unbalanced and inadequate problems. Based on 2012—2015 years' survey data of rural fixed observation points in Fujian Province, this study adopts relative deviation contribution rate, coefficient of variation, and Theil index to analyze the reasons for widening of the income gap in different villages based on measurement the per capita income disparity and regional characteristics of different villages, and analysis of the spatial characteristics of income differences, differences in income sources, and reasons for income differences. The results show that the average per capita net income of villagers has increased significantly, but the income difference of rural residents among villages is significant. The regional differences in natural environment, economic social environment, and income structure have widened the income difference among rural residents. In the context of the current regional coordinated development strategy, it is necessary to promote regional cooperation, talent support, industrial support, and perfect investment and financing system based on the spatial transformation logic of rural residents' income.

Key words: spatial difference order; rural residents; income difference; public policy

(上接第 10 页)

Spatial Differences and Influencing Factors of Carbon Emissions from Urban Wastewater Treatment in China

Zhai Guanghong¹, Zuo Xiaofan²

(1. School of Economics and Management, Hefei Normal University, Hefei 230009, China;

2. School of Public Administration, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Tackling global warming has become the consensus of the international community, and carbon emission is an important index to evaluate greenhouse gas emissions. Sewage treatment facilities also produce carbon emissions while addressing pollution. Based on the data of national sewage treatment facilities, the paper calculates the carbon emission of urban sewage treatment facilities in China, compares the spatial differences and analyzes the influencing factors. The results show that: (1) that carbon emission structure of sewage treatment facility has a great difference. Carbon emissions mainly come from direct carbon emissions from sewage treatment facilities. Direct carbon emissions account for 88.68% of total carbon emissions, and indirect emissions are only 11.32%. (2) the spatial distribution of carbon emission in sewage treatment facilities is obviously different. The carbon emission mainly comes from the provinces with good economic development and more developed industries. From the point of spatial distribution, sewage treatment carbon emissions increase gradually from west to east in China, the carbon of Hebei emissions is highest, accounts for 14.49%, the lowest in Xinjiang, accounts for only 0.361%. (3) internal factors of the design capacity, sewage treatment method and the external factors of the added value of the second and the third industry, the household register population has a significant influence on carbon emissions in the influence factors of carbon emissions of sewage treatment facilities, the influence factors of carbon emissions. Based on analysis of factors affecting the results from the sewage treatment facilities and external macroeconomic environment to provide certain reference path.

Key words: carbon emission; urban sewage treatment; measure; spatial differences; factors affecting