资源科学
第43卷 第3期 2021年3月 2021,43(3):477-488
Resources Science
Vol.43, No.3 Mar., 2021

引用格式:柯文岚, 闫晶晶, 吴容容, 等. 基于动态最优化模型预测福建省污水污泥再利用和城市可持续发展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 477-488. [Ke W L, Yan J J, Wu R R, et al. Reuse potential of wastewater and sludge in Fujian Province based on a dynamic optimization model and sustainable urban development[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 477-488.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.05

基于动态最优化模型预测福建省污水污泥再利用和城市可持续发展

柯文岚[1],闫晶晶[2],吴容容[3],张国丰[4],沙景华[2]

(1. 福建江夏学院经济贸易学院,福州 350108; 2. 中国地质大学(北京)经济管理学院,北京 100083; 3. 阳光学院,福州 350001; 4. 河北地质大学经济学院,石家庄 050031)

摘 要:目前中国从高速发展转向高质量发展阶段,城市规模迅速扩大,城市污水、污泥大量排放,污水污泥合理处置和资源化利用等问题成为了水污染治理与能源化利用的关键。本文基于投入产出方法构建区域水环境-经济-能源系统动态最优化模型,模拟分析2012—2025年福建省9市污水污泥再利用、环境保护与城市经济增长间均衡发展路径。研究发现:①引入先进技术的环境综合政策系统对经济增长有显著的促进作用,在COD年均减排3%,能源消耗为14500万t标准煤的约束下,通过技术引入和政策调控,到2025年,福建省新增污水处理能力3.7亿m^3,新增污泥处理量37.6万t,GDP年均增速达到8.6%。随着环境约束增加、技术投入加大,经济增长具有边际递增效应;②环境政策手段对区域经济影响具有滞后性,地方政府应制定系统的中长期财政计划,以确保环境治理效果的稳定性和持续性;③引入污水污泥处理技术的政策系统为环境治理与经济增长实现"双赢"的发展模式提供了有力支持。运用创新的技术实现节能减排约束下的经济发展目标,有效地促进经济社会发展全面绿色转型。

关键词:污水污泥处理;再利用潜力;动态最优化模型;投入产出;福建省

DOI:10.18402/resci.2021.03.05

1 引言

中国已从经济高速发展阶段转入全面高质量发展阶段,城市人口急剧增加,城市规模迅速扩大,工业废水和城市生活污水大量排放,污水处理厂污泥产生量也急剧增加,而中国城市污泥处置技术还不够成熟,处置设施建设相对滞后,"十三五"规划"水十条"等系列政策、标准和法律法规的出台,让中国污水污泥产业面临前所未有的挑战[1]。以福建省为例,据福建省生态环境厅统计数据,2018年全省废水排放总量32.6亿t,其中工业废水排放量14.7亿t,仅有1.8亿t工业废水排入污水处理厂。污水处理能力地区分布不均,污水再生利用规模很小,仅为4661万t,水资源循环利用程度很低。污泥处理方面,2018年福建省以土地利用(27.5%)和建筑材料利用(29.7%)为主,污泥填埋(11.8%)、污泥焚烧(3.2%)等其他处置方式为辅,尚无法完全满足污泥安全处置的要求。随着社会发展和技术进步,污泥填埋或土地利用方式将逐渐面临淘汰,污泥资源化利用将成为污泥处置的趋势[2],潜力巨大。为了应对不断增多的污水污泥排放和支持快速城市化和持续改善环境,国家发展改革委会同住房城乡建设部制定《"十三五"全国城镇污水处理及再生利用设

收稿日期:2020-09-04;修订日期:2021-01-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41971258);福建省社会科学规划项目(FJ2019B144);河北省高等学校人文社会科学研究项目(SD201060)。

作者简介:柯文岚,女,福建泉州人,讲师,研究方向为资源环境经济管理、产业经济学、区域经济学。E-mail: kewenlan1988@hotmail.com

通讯作者:闫晶晶,女,山西太原人,教授,研究方向为资源环境经济、区域经济。E-mail: yanjingjing312@hotmail.com

施建设规划》，指明到2020年福建省要升级改造污水处理规模181万m^3/日，污泥处理处置规模要达到79.1万t/年，污水再生利用规模要达到66万m^3/日。如何在节能减排目标约束下，既提高污水污泥再利用水平，又保持经济稳步增长，不仅是福建省，也是中国城市实现高质量不容忽视的问题。

技术和政策干预能够有效提高污水污泥再利用水平[3,4]。首先，从技术方面来看，目前在全球范围内，污水处理膜生物反应器因其占地面积小、产水水质高和剩余污泥少等优点，被广泛应用于污水处理和水资源再利用领域，尤其在生活污水和工业废水处理领域[5]。而污泥发电是城市污泥再利用的技术措施之一，是污泥实行减量化、稳定化、无害化、资源化的有效方式。国内外利用污泥发电主要采用污泥厌氧-甲烷发电技术和污泥干化燃烧发电技术[6,7]。其中，污泥厌氧-甲烷发电技术因其能耗低、含碳量少、污泥总体面积小，产甲烷量高等优点被得到广泛应用[8]；而污泥干化燃烧发电技术能减小污泥体积，降低毒性，且焚烧产生的高温烟气热能可用来供热及发电，但基建投资费用高、能耗较大，设备维护费用高[7]。总之需要兼顾经济、环境效益来选择合适的污水污泥处理方式和再利用技术方案。其次，从政策方面来看，产业结构调整能够有效调节用水总量[9]、能源利用效率[10]和污染物排放程度[11]，以此来缓解水资源压力、控制能源利用强度和释放环境压力。另外，通过政府财政政策能够有效调节市场机制难以解决的污染物控制和资源再生节约问题。

要实现区域污水污泥再利用与社会经济高质量发展，不仅要对技术进行优选，还要综合考虑社会经济发展、人口增长、环境约束，以及技术引入和政策干预的综合影响，因此本文采用动态投入产出模型与线性规划相结合的方法，将“自顶向下”的宏观环境经济评价模型与“自底向上”的技术评价模型有机结合[12]。其中，投入产出模型可以描述一个地区最终消费者与生产部门之间的经济交易[13]，通过使用与生产水平相关的“污染或消耗强度”向量来评估环境影响[14]。动态投入产出模型结合资源环境约束能够从动态经济的视角来研究资本形成、产业生产活动和部门间物质流动关系[15,16]。动态投入产出模型结合线性规划方法可以帮助确定有效的经济和环境策略，以此来控制不同策略产生的宏观经济影响和环境效应[17-19]。该方法已经被用来研究包涵技术和政策方案引入的城市污水治理问题，如区域水资源分配[20]，水污染物质减排[21]，水源涵养[22]等，以此提出社会经济增长、资源约束、环境改善等多目标均衡发展的最优方案组合[23,24]。

因此，本文基于动态投入产出模型，运用线性最优化规划方法，探索实现经济增长、节能减排和污水污泥再利用间的协调发展路径。在综合模型中模拟社会经济、水资源供需、能源供需、水质控制和污泥处理以及一个目标函数和产业政策，并引入4种污水处理技术和2种污泥处理技术路线，预测福建省污水污泥再利用潜力和城市可持续发展趋势。

2 动态最优化概念模型构建

社会总产品在各部门之间流动遵循价值平衡理论[25]，投入产出表的商品流量可以用来描述经济活动，其中包含生产、消费、投资、资本存量和增加值的宏观经济指标。经济活动所消耗的资源与污染排放之间的关系遵守物质平衡理论，这意味着返回自然环境的残渣质量必须等于进入加工和生产过程的基本燃料、矿物和其他原材料的质量[26]。同样，一定时空范围内能源与社会经济及生态环境之间也存在内在联系机制，能源流动也遵守能量守恒定律。

根据以上理论基础，本文构建了污水污泥再利用和可持续发展的概念模型，包括区域生产总值(GRP)最大化目标函数，以及社会经济、水资源供需、能源供需、水质控制、污泥处理和技术引入6个子模型(图1)：①社会经济子模型描述各产业资本投入和社会产出之间的市场平衡关系，通过投入产出系数和引入污水污泥技术的影响因子内生模拟出各目标年的GRP；②水资源供需子模型描述经济活动和居民生活的水资源消耗与约束，结合各产业及居民的需水系数内生出各目标年的水资源需求量，对规划年的用水强度设限，以约束社会经济活动；③能源供需子模型描述经济活动和居民生活的能源消耗与约束，结合各产业及居民的能源消耗系数内生出各目标年的能源消耗量，并对规划年的能源消耗强度设限，以约束社会经济活动；④水质控制子模型描述社会经济活动的水污染物排放情况，通过各产业产值及其水污染物质排放系数内生出

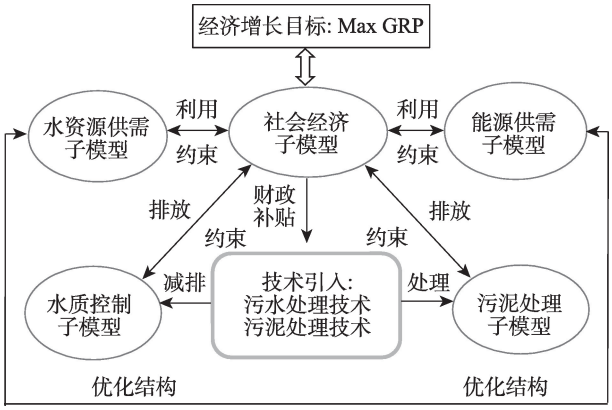

图1 福建省污水污泥再利用和可持续发展概念模型

Figure 1 Conceptual model of regional wastewater and sludge reuse and sustainability in Fujian Province

各目标年的排放量,并对水污染物质排放设置减排约束;⑤污泥处理子模型描述社会生产活动的污泥排放及处置情况,通过处理污水的污泥排放系数内生模拟出各目标年的污泥排放量;⑥技术引入子模型描述污水、污泥处理技术在各区的选择和分配情况,结合各区社会生产总值、污水处理需求、污泥处理目标和各技术的参数指标,内生模拟出污水污泥处理技术的选择和区域分配方案。上述6个子模型反映了社会经济活动和水资源利用、能源消耗和水污染排放之间的动态耦合协调关系[27],即社会经济活动要消耗水资源、能源等生产资料,同时向环境中排放污水污泥等污染物。而生产活动要在水资源总量、能源消耗强度和污水污泥等污染物排放的多重约束下进行优化调整。通过政府财政补贴引入的污水污泥处理新技术,能够有效改善水环境污染,增加再生水资源和污泥制能源的供给。

3 数学模型

根据数据可获得情况及模型特征,将模拟期设置为2012—2025年。模型包含80多个数学函数公式和8828个变量,由于篇幅有限,本文中仅列出重要公式,并运用LINGO软件将带有外生变量的数学公式转换为编程语言,通过模拟与试算,内生出全局最优解。

3.1 目标函数

福建省目前仍处于工业化加速发展阶段,叠加良好的生态环境及新兴战略性产业的转型升级,因此将考虑了社会折旧的区域经济生产总值(Gross Regional Product, GRP)最大化设定为目标函数。

$$\text{MAX} \sum_t \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} GRP(t) \tag{1}$$

$$GRP(t) = \sum_m \delta_m X^m(t) \tag{2}$$

式中:t 为目标期;ρ 为社会折旧率;$GRP(t)$ 为第 t 期福建省地区生产总值;m 为产业部门;每一期的 GRP 值由每个产业部门当期产值 X^m 与附加价值率 δ_m 决定。

3.2 社会经济子模型

为了有针对性地设计区域性政策,将福建省研究区域划分为9个市(区),即福州市、厦门市、莆田市、三明市、泉州市、漳州市、南平市、龙岩市和宁德市(平潭综合实验区的统计数据合并在福州市范围内)。社会经济子模型包括社会人口增长、市场均衡两方面。根据福建省投入产出表将产业合并为9部门,即农林牧渔业,采矿业,食品、烟草、纺织、木材及其他制造业,石油化工及金属、非金属制品业,装备制造业,电力、热力、燃气、水的生产和供应业,建筑业,商贸、交通、仓储及餐饮业,信息技术、金融、房产及其他服务业。构建基于里昂惕夫矩阵的市场均衡模型,各产业部门的总产值要大于或等于中间投入和最终需求之和。

$$\begin{aligned} X^m(t) \geqslant & \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{X}(t) + \\ & \boldsymbol{C}(t) + \boldsymbol{I}^m(t) + \beta_1 \boldsymbol{I}^{sp}(t) + \beta_2 I^{st}(t) + \boldsymbol{NE}(t) \end{aligned} \tag{3}$$

式中:$X^m(t)$ 为第 t 期第 m 产业生产总值;$\boldsymbol{A}$ 为投入产出系数矩阵;$\boldsymbol{X}(t)$ 为第 t 期产业生产总值矩阵;$\boldsymbol{C}(t)$ 为第 t 期产业消费矩阵;$\boldsymbol{I}(t)$ 为第 t 期产业投资矩阵;β_1 为新污水处理技术引入后,对产业发展的影响系数;$I^{sp}(t)$ 为第 t 期新污水处理技术的总投资;β_2 为新污泥处理技术引入后,对产业发展的影响系数;$I^{st}(t)$ 为第 t 期新污泥处理技术的总投资;$\boldsymbol{NE}(t)$ 为第 t 期产业净出口矩阵。

利用哈罗德-多马模型描述产业补贴后的资本产出关系。产业规模受资本量、用于缩减产业的补贴额和各产业资本产出率影响[28]。下一期的资本量由当期资本量加上下一期投资,再扣除当期社会折旧所得。

$$X^m(t) \leqslant \alpha^m (K^m(t) - S^m(t)) \tag{4}$$

$$K^m(t+1) = K^m(t) + I^m(t+1) - d^m K^m(t) \tag{5}$$

式中：α^m 为产业 m 的资本产出率；$K^m(t)$ 为第 t 期产业 m 的资本量；$S^m(t)$ 为第 t 期用于缩减产业 m 的补贴额；$I^m(t)$ 为第 t 期产业 m 的投资额；d^m 为产业 m 的社会折旧率。

3.3 水资源供需子模型

福建省水资源供给来源于地表水、地下水及其他水源。在本文中，假设水资源开发工程在短期内不改变地下水、地表水和其他水资源量，仅通过引入污水处理技术产生再生水和调整用水结构来增加水资源供给，提高水资源利用效率。水资源总供给应大于等于水资源总需求。

$$TWS(t)=GW(t)+SW(t)+RW(t)+OW(t) \quad (6)$$

式中：$TWS(t)$ 为第 t 期水资源总供给量；$GW(t)$ 为第 t 期地下水资源量；$SW(t)$ 为第 t 期地表水资源量；$RW(t)$ 为第 t 期再生水资源量；$OW(t)$ 为第 t 期其他水源。

福建省用水主体为居民生活、产业生产和城市环境用水。其中，居民生活用水由人口及其用水系数决定；产业生产用水由每个产业产值及其需水系数决定；城市环境用水假设在模拟期内保持不变。

$$TWD(t)=HWD(t)+IWD(t)+EWD(t) \quad (7)$$

式中：$TWD(t)$ 为第 t 期水资源需求总量；$HWD(t)$ 为第 t 期居民用水需求量；$IWD(t)$ 为第 t 期产业用水需求量；$EWD(t)$ 为第 t 期城市环境用水需求量。

污水排放源于居民生活、产业生产及城市环境用水。其中，居民污水排放由城镇人口、乡村人口及其污水排放系数决定；产业污水排放由各产业产值和污水排放系数决定；假设城市环境用水不经过污水处理，使用量即为污水排放量。

$$SWG(t)=HSW(t)+ISW(t)+EWD(t) \quad (8)$$

式中：$SWG(t)$ 为第 t 期污水产生总量；$HSW(t)$ 为第 t 期居民生活污水产生量；$ISW(t)$ 为第 t 期产业生产活动污水产生量。目前福建省投运城镇污水处理设施共88处，处理技术主要有氧化沟、A²/O、SBR、CAST、BIOLAK等，均为活性污泥传统处理工艺，污水处理量大，中水产出率、污染物去除率和投资效率均较低，部分地区污水处理厂出现产能过剩，而局部地区污水处理能力低下，出水水质较差，能够用于对水质要求不高的农业灌溉和城市绿化。因此，在有限的财政投入下，为了实现不同地区不同标准的污水处理需求，在沿用现有处理方法外，设计引入国内外先进的4种膜处理技术，即膜生物处理技术MBR[29]、双膜生物处理技术DMBR[30]、陶瓷膜生物处理技术CMBR[31]、萃取膜生物处理技术EMBR[32]，公式中分别标识为技术A、B、C、D。4种技术各有侧重，其中，MBR技术运行成本较低，投资效率高，适合规模较大的工业污水处理厂；DMBR技术环境效率和投资效率适中，出水水质能够满足工业用水和农业灌溉用水需求；CMBR技术环境效率较高，但投资效率偏低，出水水质能够同时满足生态用水、工业用水和灌溉用水需求；EMBR技术环境效率和投资效率高，适合建设规模较小的污水处理厂（表1）。将各项污水处理技术参数嵌入模型，结合福建省各市（区）的社会生产总值、财政补贴预算、污水产生量、污水排放量、污水处理率和再生水回用率目标，在地区生产总值GRP最大化的目标约束下模拟内生得出技术选择建议。

污水处理量由各市（区）现有污水处理能力与引进新技术后新增的污水处理能力决定。同样的，再生水生产量由现有的各区域再生水生产能力和引进新技术后新增的污水处理能力及其再生水生产系数决定。

$$SWT(t)=\sum_j ESWT_j(t)+\sum_j(NSWT_j^{A}(t)+NSWT_j^{B}(t)+NSWT_j^{C}(t)+NSWT_j^{D}(t)) \quad (9)$$

$$RW(t)=ERWP(t)+\sum_j(\rho NSWT_j^{A}(t)+\varphi NSWT_j^{B}(t)+\omega NSWT_j^{C}(t)+\tau NSWT_j^{D}(t)) \quad (10)$$

式中：$SWT(t)$ 为第 t 期污水处理总量；$ESWT_j(t)$ 为第 t 期区域 j 现有污水处理量；$NSWT_j^{A/B/C/D}(t)$ 为第 t 期区域 j 引入技术A/B/C/D后新增的污水处理量；

表1 污水处理技术参数

Table 1 Technical parameters of wastewater treatment

	MBR	DMBR	CMBR	EMBR
建设费用/百万元	50	165	70	5
污水处理量/（百万t/年）	18.00	36.50	10.95	1.50
再生水生产量/百万t	13.09	29.20	9.30	1.43
中水产出率/%	0.77	0.80	0.85	0.95
环境效率/(kg/万t)	3300	3450	3540	5600
投资效率/（万t/万元）	0.36	0.22	0.16	0.30
运行成本/（元/t）	1.5	3.0	3.6	1.8

$ERWP(t)$ 为第 t 期现有再生水生产量；$\rho/\varphi/\omega/\tau$ 为污水处理技术A/B/C/D的再生水产出率。

3.4 水质控制子模块

根据数据的可获得情况，选取化学需氧量COD来描述福建省水污染物质排放情况。福建省COD排放量等于居民排放量、产业排放量加总减去已去除的污染物质排放量得到，其中，居民源水污染物质排放量由城镇、乡村人口及其COD排放系数决定，产业排放量由各产业产值和各产业COD排放系数决定。

$$TP_\mathrm{cod}(t)=HWP_\mathrm{cod}(t)+IWP_\mathrm{cod}(t)-SP_\mathrm{cod}(t) \tag{11}$$

式中: $TP_\mathrm{cod}(t)$ 为第 t 期COD排放总量；$HWP_\mathrm{cod}(t)$ 为第 t 期居民源COD排放量；$IWP_\mathrm{cod}(t)$ 为第 t 期产业源COD排放量；$SP_\mathrm{cod}(t)$ 为第 t 期，新增污水处理设施去除的COD排放量。COD去除总量由现有污水处理设备的COD去除量与新增污水处理技术的COD去除量决定。其中现有污染物质去除量由现有污水处理量与COD去除系数决定，新增污染物质去除量分别等于各技术的污水处理量乘以各技术污染物质去除率而得。

$$SP_\mathrm{cod}(t)=\sum_j ep^{ex}ESWT_j(t)+\sum_j(\alpha NSWT_j^{\mathrm{A}}(t)+\beta NSWT_j^{\mathrm{B}}(t)+\gamma NSWT_j^{\mathrm{C}}(t)+\varepsilon NSWT_j^{\mathrm{D}}(t)) \tag{12}$$

式中: $ESWT_j(t)$ 为第 t 期现有污水处理量；ep^{ex} 为COD去除系数；α、β、γ 和 ε 分别为各技术污染物质去除率。

3.5 污泥处置处理模块

污泥处理技术以德国的厌氧发酵-流化床干燥技术和日本的流化床干化燃烧技术为例。这两种技术路线已经在嘉兴、大连、青岛、上海等地的示范性污泥处理厂中应用，本文分别对每种技术路线选取两个污泥处理厂的参数进行计算。技术路线名称为：厌氧发酵-流化床干燥技术(A-D-F)和流化床干化燃烧技术(F-C)，分别标注为a、b。其中，污泥厌氧发酵技术不仅可以去除水污染物质，还可以产生沼气发电，污泥厌氧消化效率最大时所产生的沼气可代替污水处理厂70%~80%的能耗[33]。而污泥干化燃烧技术利用焚烧炉将脱水污泥加温干燥、燃烧，并利用燃烧产生的热量发电[34]，通过换算，两种污泥处理技术产生的发电量分别为207 kW·h/t、277 kW·h/t。两种技术路线的投入产出情况如表2所示，其中投资费用包含土地成本、建设成本和技术设备费用。两者对比，A-D-F技术路线具有较高的投资成本和较低的运行成本。

污泥处理量等于现有污泥处理能力加上新增的污泥处理量。

$$ST(t)=EST(t)+\sum_j(NST_j^{a}(t)+NST_j^{b}(t)) \tag{13}$$

式中：$ST(t)$ 为第 t 期污泥处理量；$EST(t)$ 为第 t 期现有污泥处理能力；$NST_j^{a/b}(t)$ 为第 t 期第 j 区域引入新污泥处理技术a、b后新增的污泥处理量。

模型根据福建省各市(区)的社会生产总值、财政补贴预算、污泥产生量、污泥处理处置规模、能源需求量，结合两个技术路线的技术参数，在地区生产总值GRP最大化和能源消耗约束下模拟内生得出技术选择的方案。污泥处理技术的引进通过对该技术的投资及其影响系数对产业产值产生影响，再结合各产业部门的能源消耗系数和水污染物质排放系数来计算技术引入后社会经济发展的能源消耗和水污染物质排放的整体情况。

3.6 能源供需子模块

引入了新的污泥处理技术，将会产生新的能源供给。假设在目标期内，福建省现有能源供给保持不变，通过产业结构调整及新污泥处理技术及其能源产生系数来计算增加的能源供给量。

$$TES(t)=\sum_j ETES_j(t)+\sum_j(\varphi\times NST_j^{\mathrm{a}}(t)+\theta\times NST_j^{\mathrm{b}}(t)) \tag{14}$$

式中：$TES(t)$ 为第 t 期能源总供给；$ETES_j(t)$ 为第 t 期第 j 区域现有能源供给量；$NST_j^{\mathrm{a/b}}(t)$ 为为第 t 期第 j 区域污泥处理技术a、b新增数；φ、θ 为技术a、b的能源产生系数。

能源需求来源于产业生产活动和居民最终消

表2 不同污泥处理技术投入产出分析

Table 2 Input-output analysis of different sludge treatment technologies

	技术路线	投资/(元/t)	运行成本/(元/t)	污泥处理能力/千t	发电量/(kW·h/t)
a	A-D-F	526	714	50	207
b	F-C	500	1250	50	277

费。此外，用能源消耗强度指标对目标期内福建省的能源消耗进行约束。根据《福建省“十三五”能源发展专项规划》，到2020年，一次能源消费总量控制在14200万~16150万t标准煤，单位GDP能耗年均下降3%。

$$TED(t)=IED(t)+CED(t) \tag{15}$$

$$EC_gdp(t)=TED(t)/GRP(t) \tag{16}$$

式中：$TED(t)$ 为第 t 期能源总需求；$IED(t)$ 为第 t 期生产活动能源需求；$CED(t)$ 为第 t 期居民最终消费能源需求；$EC_gdp(t)$ 为能源消耗强度指标。

3.7 技术引入子模块

通过市场配置不能产生有效的污染物控制和资源再生节约，试图单方面控制污染和资源循环利用的企业处于竞争劣势，这部分额外的支出使得他们的生产成本比那些不负责任的竞争者高[35]。财政补贴，最常见的是新设施建设补贴和过渡性运营补贴，是国际上的普遍做法。因此本文假设用来控制污染物排放和资源再生利用的投资均来自于政府财政。技术选择取决于其污染去除率、投资效率、投产和运行成本。

$$\sum_j S_SP_j^{a/b/c/d}(t)=\sum_j I_j^{a/b/c/d}(t)+\sum_j MC_j^{a/b/c/d}(t) \tag{17}$$

式中：$S_SP_j^{a/b/c/d}(t)$ 为第 t 期第 j 区域水资源循环利用财政补贴；$I_j^{a/b/c/d}(t)$ 为第 t 期第 j 区域引入新污水处理技术的建设成本；$MC_j^{a/b/c/d}(t)$ 为第 t 期第 j 区域引入新污水处理技术的维持成本。

用于污水污泥处置处理技术的补贴和用于产业结构调整的补贴共同构成福建省当期的财政补贴总额。财政补贴总额不得超过财政补贴预算的最高值，以保证经济的可持续发展。

$$FB(t)\geqslant\sum_j S_SP_j^{a/b/c/d}(t)+\sum_j S_SC_j^{a/b}(t)+S^m(t) \tag{18}$$

式中：FB 为财政补贴预算；$S_SC_j^{a/b}(t)$ 为污泥处置处理技术补贴；$S^m(t)$ 为用于产业结构调整的补贴。

4 结果与分析

本文将收集的数据作为外生变量嵌入模型中，模拟出内生最优解。经过检验，模型基本通过一致性检验、有效性测试及灵敏度测试，在很大程度上可以反映福建省社会经济发展、污水污泥再利用、环境影响的发展趋势，可以通过对政策变量进行调控来模拟和预测福建省污水污泥再利用潜力、环境影响与城市社会经济发展趋势。

4.1 福建省污水污泥再利用潜力预测

4.1.1 福建省污水处理潜力

引入了新的污水处理技术并新建污水处理厂后，福建省污水处理能力逐渐增加。在目标期，2012—2025年间，污水处理增加量由2957万m³逐渐上升到37683万m³，到2025年福建省总污水处理潜力达到153021万m³，污水处理率显著提高。再生水生产量也由2012年的6123万m³增加到2025年的35223万m³。再生水回用率由5.3%上升到23.2%（图2）。

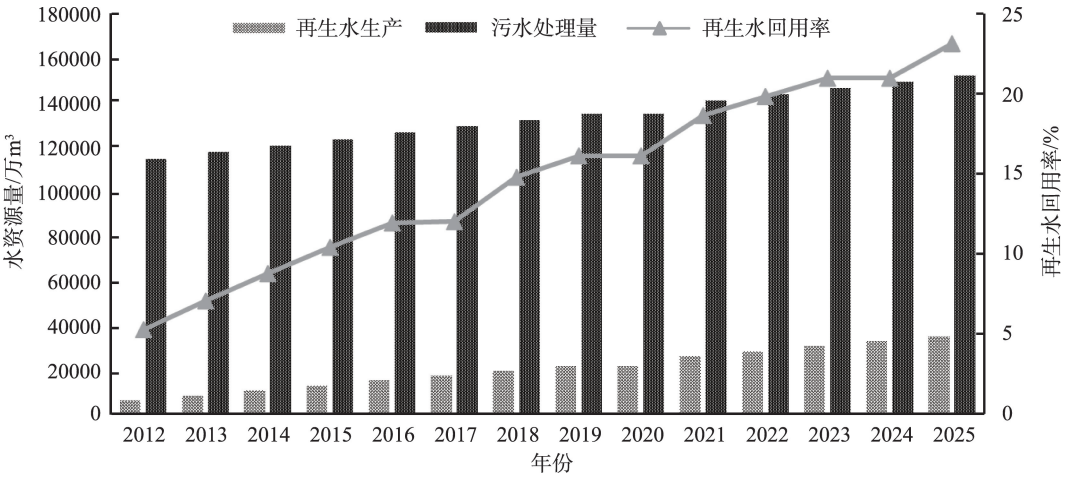

图2 2012—2025年福建省再生水回用潜力

Figure 2 Reuse potential of reclaimed water in Fujian Province, 2012-2025

各市(区)在污水治理方面差距很大,目标期内,福州、厦门、泉州污水处理率分别从52.0%、72.3%、39.1%上升到87.6%、90.4%和63.0%。莆田、漳州、南平、龙岩和宁德也相应地对污水治理进行了财政投入,污水处理率分别从36.4%、28.8%、34.8%、48.8%、45.4%上升到58.6%、40.0%、40.0%、62.5%和69.4%,污水处理水平仍有待提高。在目标期内,三明市污水处理需求低于新污水处理技术产能,因此未引入新的污水处理技术,仅因为产业结构的优化调整减少了污水排放,从而使污水处理率由35.7%上升到44.7%(表3)。虽然各市(区)污水处理率有显著提升,但仅厦门市实现规划目标,其余城市在污水治理方面还存在较大提升空间。从长期来看,福建省应针对各市(区)治理需求进一步制定政策措施。

4.1.2 福建省污泥处理潜力

本文通过设计引入污泥发电技术,来提高福建省污泥资源化利用程度。随着污泥产生量的逐步增加,模型分别在2013年、2014年、2021年和2025年阶段性地引入污泥发电技术,2014—2020年污泥处理增加量保持在23.11万t;2021年以后,污泥处理增加量达到34.68万t,到2025年,福建省污泥处理增加量达到37.57万t,总污泥处理能力达到93.48万t(图3),实现了《"十三五"福建省城镇污水处理及再生利用设施建设规划》中对污泥处理的规划目标。从各市(区)的污泥处理情况来看,新增的污泥处理技术主要集中在福州和厦门,其他区市尚未引入污泥处理技术。2012—2025年,福州市的污泥处理能力由10.6万t上升到13.49万t,厦门市的污泥处理能力由12.35万t上升到47.03万t,污泥资源化利用水平大幅提高。而莆田、三明、泉州、漳州、南平、龙岩和宁德的污泥资源化利用空间仍有待进一步开发。

表3 2012—2025年福建省各市(区)污水处理率变化情况

Table 3 Changes in sewage treatment rate in the cities of Fujian Province, 2012-2025 (%)

	福州	厦门	莆田	三明	泉州	漳州	南平	龙岩	宁德
2012	52.0	72.3	36.4	35.7	39.1	28.8	34.8	48.8	45.4
2025	87.6	90.4	58.6	44.7	63.0	40.0	40.0	62.5	69.4

4.2 福建省污水污泥再利用的环境影响

4.2.1 福建省能源消耗趋势

福建省的能源消耗量在目标期初期呈现上升态势,从2012年的11183万t标准煤上升到2016年的15961万t标准煤,随后由于对能源消耗总量进行了约束,能源消耗量有所下降,到2020年为14500万t标准煤。自2021年开始,由于产业发展的需要,以及引入新的污泥处理技术,因此能源消耗量出现反弹,到2025年为26776万t标准煤。能源消耗强度在2020年达到最低点,为0.417万t标准煤/亿元,随后缓慢上升到0.477万t标准煤/亿元(图4)。由于污泥处理发电产能十分有限,主要依靠缩减高耗能产业规模来释放能源供给空间,使得能源消耗满足《福建省"十三五"能源发展规划》的目标。

4.2.2 福建省污染物质排放趋势

严格依照福建省水污染防治行动计划工作方案,强化污染排放标准约束和源头防控。通过新技术的设计引入,推进城乡生活、生产水污染减排和

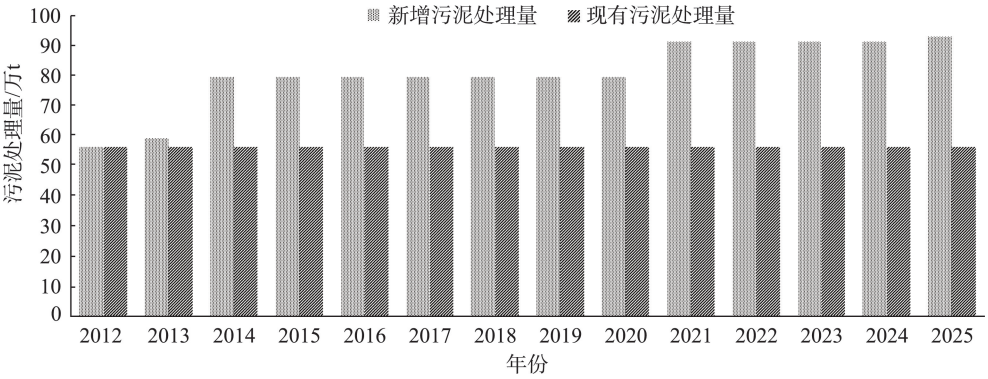

图3 2012—2025年福建省污泥处理情况

Figure 3 Sludge treatment in Fujian Province, 2012-2025

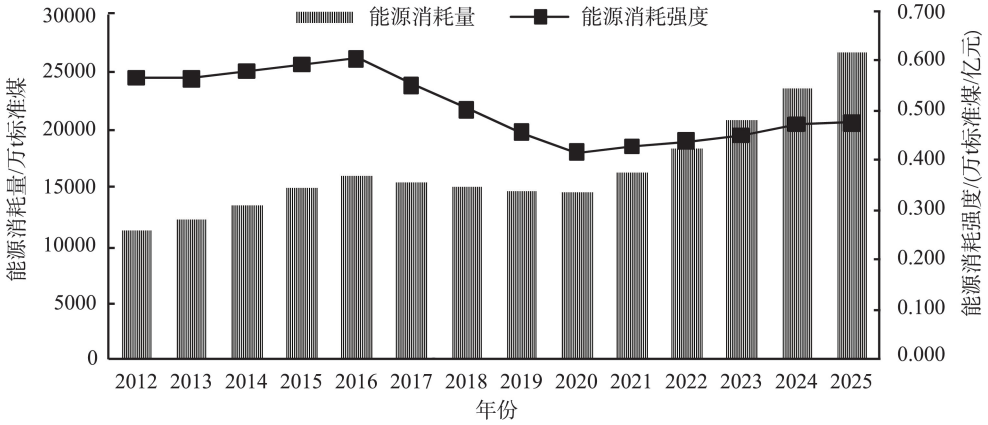

图4 2012—2025年福建省能源消耗趋势

Figure 4 Energy consumption trend of Fujian Province, 2012-2025

治理。从福建省水污染物质COD排放情况来看，2012—2025年污染物排放量总体呈现下降趋势。从图5可以看出，水污染物质COD排放量由2012年的66万t，下降到2025年的44.4万t，年均减排3%，污染物排放量控制在国家下达的指标内。COD排放强度由33.5万t/亿元GRP逐渐下降为7.9万t/亿元GRP，为经济发展释放了环境容量。

4.3 福建省社会经济发展趋势模拟

4.3.1 福建省经济总量变动趋势

在目标期内，福建省GRP不断上升，由2012年的19699亿元，上升到2025年的56142亿元。由于节能减排约束对高耗水、高耗能、高污染的产业产能进行了缩减，同时增加了新污水污泥处理技术的财政补贴，GRP在2012年—2016年增长缓慢，因为用于污水污泥处理技术投资和产业结构调整的财政补贴存在3~4年的滞后期，2017年后才逐渐显现出对经济增长的拉动作用，GRP稳步提高。目标期内年均增长率达到8.6%，超额实现了8.5%的规划目标。

4.3.2 福建省各市(区)经济发展趋势

从福建省各市(区)GRP变动趋势来看，在引入了新的污水污泥处理技术和产业结构调整政策组合后，经济发展是有效率的(图6)。福州市分别在2014、2022年追加污水污泥处理投资，经济增速在2015、2024年前后相应地下降，但目标期内年均增速仍达到9.1%；厦门市在污水污泥处理方面投入最多，但GRP年均增速为全省首位，达到11.7%；泉州市污水污泥处理投入位居第二，由于产业规模受到节能减排的约束，因此在2015年以后GRP增速有所放缓；漳州市实现GRP年均增速为8%主要得益于产业结构的优化调整。值得关注的是，经济发展相对落后的南平、莆田、三明、龙岩和宁德在引入污水

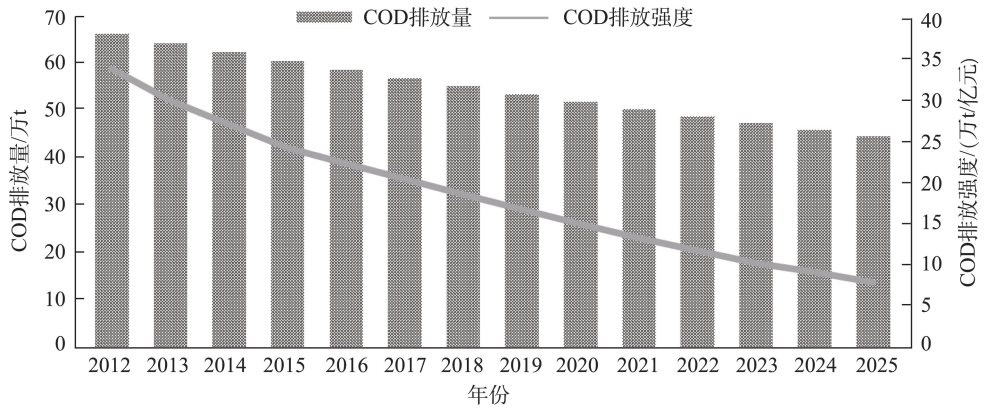

图5 2012—2025年福建省污染物质排放趋势

Figure 5 Pollution emission trend of Fujian Province, 2012-2025

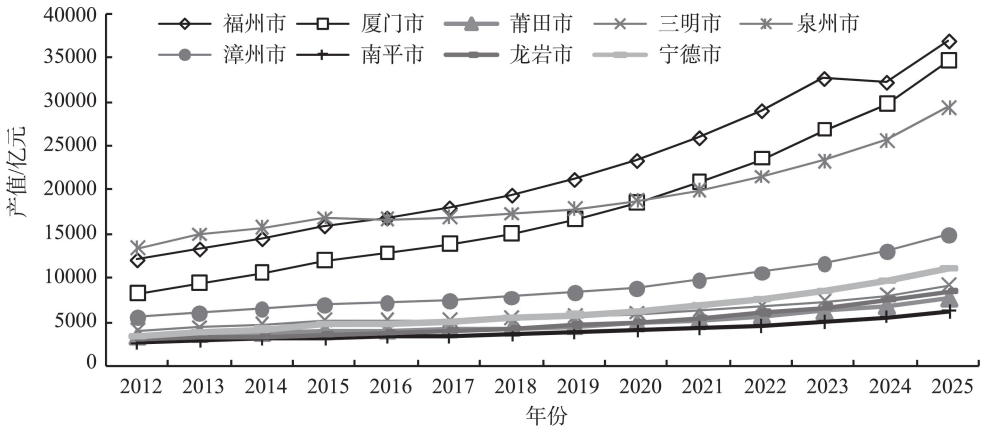

图6 2012—2025年福建省各市(区)产值变动趋势

Figure 6 Trend of output value of each city in Fujian Province, 2012-2025

污泥处理技术、加强节能减排约束和产业结构调整后,经济增长有了显著提高,目标期内GRP年均增速分别达到6.9%、6.6%、7.0%、8.2%和9.8%,说明综合政策的实施具有明显的经济效率。

5 结论和政策建议

5.1 结论

通过设计引入最优污水污泥处理与可持续发展综合政策,福建省实现了污水污泥资源有效利用、环境改善与区域经济高质量增长的均衡发展,得出以下结论:

(1)从环境技术的引入对经济增长速度的影响来看,引入先进技术的环境规制对经济增长有显著的促进作用,随着环境约束增强、技术投入的加大,经济增长的水平逐步提升,具有边际递增效应,且对经济发展较为落后的地区更为显著。在模拟期中,相对落后的南平、莆田、三明、龙岩和宁德由于引入了污水污泥处理技术等有效的环境约束政策,更多的环境配额转向低污染高附加值的产业,从而更快地推动了地方经济发展,环境经济效率逐步体现。

(2)从环境政策对经济影响时效来看,包括技术在内的综合环境政策手段对区域经济影响具有明显的滞后性。在环境技术投入主要依赖于地方政府预算的情况下,地方政府需要根据实际情况制定系统的中长期财政计划,以确保环境治理效果的稳定性和持续性。

(3)从以环境主导的城市可持续发展路径来看,应根据地方特点与实际需求,制定包含环境技术与政策的综合环境规制系统;针对内部区域的规模和需求特点,引入先进的污水污泥处理技术,实现污水污泥资源化利用与水环境治理的有效改善;运用创新的技术实现节能减排约束下的经济发展目标,促进经济社会发展全面绿色转型。

5.2 政策建议

为了实现上述发展目标,根据内生模拟结果,本文从绿色产业发展规划、先进污水污泥技术选择与布局、政府财政补贴三方面提出具体的政策建议方案。

(1)绿色产业发展规划。模型将水资源节约、节能减排等目标作为产业发展的约束条件嵌入,由此模拟得出福建省产业结构调整方案。建议将高耗水、高污染和高耗能的产业进行缩减,如第一产业,采矿业,食品、烟草、纺织、木材及其他制造业,石油化工及金属、非金属制品业,电力、热力、燃气、水的生产和供应业,产值比重分别由2012年的5.46%,1.38%,23.37%,17.99%,3.45%缩减到2025年的2.30%,0.14%,8.34%,4.75%,0.66%。重点发展产品附加价值率高,水资源利用效率高,能源消耗强度低和污染排放强度低的产业,如装备制造业,建筑业,商贸、交通、仓储及餐饮业,信息技术、金融、房产及其他服务业,将产值比重分别由2012年的13.74%,9.92%,10.79%,13.91%提高到2025年的44.5%,11.27%,12.25%,15.79%。

(2)先进的污水污泥技术选择与布局。通过各

市(区)污水、污泥处理需求,污水、污泥处理技术产能,当地产业生产总值、规划目标等因素,模型内生得出福建省各市(区)的技术分配方案,据此提出如下建议。污水处理方面,建议福建省选择MBR和DMBR技术,其区域分配计划为,福州市、厦门市、莆田市、泉州市、漳州市、南平市、龙岩市和宁德市各新建6处、6处、1处、5处、1处、1处、1处、2处污水处理厂,共计23处。污泥处理方面,建议选择A-D-F技术路线,由经济相对发达的福州市和厦门市先进行试点,分别引入1处和8处,共计9处。

(3)政府财政补贴。根据模型得出的上述污水污泥技术选择和区域分配方案,基于技术数量及其所需建设成本和运营费用计算得出政府财政补贴额度。因此,2012—2025年共需要政府财政给予91.42亿元用于引入新污水污泥技术处理厂,其中50.70亿元用于新建污水处理厂及后期维护,40.71亿元用于新建污泥处理厂及运行。具体区域分配情况为:福州市16.69亿元,厦门市52.28亿元,莆田市4.804亿元,泉州市13.25亿元,漳州市1.59亿元,南平市0.465亿元,龙岩市0.55亿元,宁德市1.76亿元。

参考文献(References):

[1] Wei L L, Zhu F Y, Li Q Y, et al. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO_2-equivaient emissions analysis[J]. Environment International, 2020, DOI: 10. 1016/j. envint. 2020. 106093.

[2] Diaz-Elsayed N, Rezaei N, Guo T, et al. Wasterwater-based resource recovery technologies across scale: A review[J]. Resources Conservation and Recycling, 2019, 145: 94-112.

[3] Nyam Y S, Kotir J H, Jordaan A J, et al. Developing a conceptual model for sustainable water resource management and agricultural development: The case of the Breede river catchment area, South Africa[J]. Environmental Management, 2021, DOI: 10. 1007/s00267-020-01399-x.

[4] 修红玲, 朱文彬, 韦家兴, 等. 中国水资源承载能力调控关键技术与政策研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 467-473. [Xiu H L, Zhu W B, Wei J X, et al. Key technologies and policies to adjust water resource- carrying capacity[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(3): 467-473.]

[5] 任鹏飞, 杨永强, 张新妙. 膜生物反应器(MBR)节能减耗的研究进展[J]. 现代化工, 2017, 37(12): 43-45. [Ren P F, Yang Y Q, Zhang X M. Research progress in energy conversation for membrane bioreactor[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(12): 43-45.]

[6] 谢昆, 尹静, 陈星. 中国城市污水处理工程污泥处置技术研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(7): 18-23. [Xie K, Yin J, Chen X. Research progress on sludge treatment technology of urban sewage treatment project in China[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(7): 18-23.]

[7] Singh V, Phuleria H C, Chandel M. Estimation of energy recovery potential of sewage sludge in India: Waste to watt approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122538.

[8] Xu Q X, Li X M, Ding R R, et al. Understanding and mitigating the toxicity of cadmium to the anaerobic fermentation of waste activated sludge[J]. Water Research, 2017, 124(1): 269-279.

[9] 张陈俊, 许静茹, 张丽娜, 等. 长江经济带水资源消耗时空差异驱动效应研究[J]. 资源科学, 2018, 40(11): 2247-2259. [Zhang C J, Xu J R, Zhang L N, et al. Driving effect of spatial-temporal difference in water resource consumption in the Yangtze River Economic Zone[J]. Resources Science, 2018, 40(11): 2247-2259.]

[10] 戴俊, 傅彦铭. 环境规制、产业结构对能源效率的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(9): 55-63. [Dai J, Fu Y M. The impact of environmental regulation and industrial structure on energy efficiency[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(9): 55-63.]

[11] Zhou X Y, Lei K, Meng W, et al. Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165: 1462-1472.

[12] Yang X, Pang J, Teng F, et al. The environmental co-benefit and economic impact of China's low-carbon pathways: Evidence from linking bottom-up and top-down models[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110438.

[13] Gastelum J, Krishnamurthy G, Ochoa N, et al. The use of system dynamics model to enhance integrated resources planning implementation[J]. Water Resources Management, 2018, 32: 2247-2260.

[14] Wang X C, Klemes J J, Wang Y T, et al. Water-Energy-Carbon Emissions nexus analysis of China: An environmental input-output model-based approach[J]. Applied Energy, 2020, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114431.

[15] Halkos G, Tsilika K. Dynamic input-output models in environmental problems: A computational approach with CAS software[J]. Computational Economics, 2016, 47(3): 489-497.

[16] Ma Y, Song Z, Li S Q, et al. Dynamic evolution analysis of the factors driving the growth of energy-related CO_2 emissions in China:

An input-output analysis[J]. PLoS ONE, 2020, DOI: 10.1371/journal.pone.0243557.

[17] Bekchanov M, Sood A, Pinto A, et al. Systematic review of water economy modeling applications[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000793.

[18] Zhou Q, Yabar H, Mizunoya T, et al. Exploring the potential of introducing technology innovation and regulations in the energy sector in China: A regional dynamic evaluation model[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 1537-1548.

[19] Kang J D, Ng T S, Su B. Optimizing electricity mix for CO_2 emissions reduction: A robust input-output linear programming model [J]. European Journal of Operational Research, 2020, 287(1): 280-292.

[20] Freire-González J, Decker C A, Hall J W. A linear programming approach to water allocation during a drought[J]. Water, 2018, 10: 363.

[21] Yang W, Song J N, Higano Y, et al. Exploration and assessment of optimal policy combination for total water pollution control with a dynamic simulation model[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 102: 342-352.

[22] Song C, Yan J J, Sha J H, et al. Dynamic modeling application for simulating optimal policies on water conservation in Zhangjiakou City, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 111-122.

[23] Ke W L, Sha J H, Yan J J, et al. A multi-objective input-output linear model for water supply, economic growth and environmental planning in resource- based cities[J]. Sustainability, 2016, DOI: 10. 3390/su8020160.

[24] Hao X X, Yan J J, Sha J H, et al. Exploring the synthetic optimal policies for solving problems of agricultural water use with a dynamic optimization simulation model[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125062.

[25] Forsund F R. Input-output Models: National Economic Models and The Environment[A]. Kneese A V, Sweeney J L. Handbook of Natural Resource and Energy Economics[M]. Amsterdam: Elsevier Science Pub, 1985.

[26] Freeman A M, Havemen R H, Kneese A V. The Economics of Environmental Policy[M]. New York: Wiley, 1973.

[27] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J]. 资源科学, 2020, 42(4): 593-606. [Peng H S, Guo L J, Zhang J H, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource-environmental pressure[J]. Resources Science, 2020, 42(4): 593-606.]

[28] Yan J J, Xu F, Mizunoya T, et al. Endogenous derivation of optimal environmental policies for proper treatment of stockbreeding wastes in the upstream region of the Miyun Reservoir, Beijing[J]. Papers in Regional Science, 2014, 93(2): 477-500.

[29] 魏忠庆, 胡志荣, 上官海东, 等. 基于数学模拟的污水处理厂设计: 方法与案例[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 21-26. [Wei Z Q, Hu Z R, Shangguan H D, et al. Model-based design of sewage treatment plants: Methodology and case studies[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10): 21-26.]

[30] 谢詹东, 张小平, 魏江州, 等. 双膜内循环生物反应处理工艺(DMBR)的应用实践与总结[J]. 中国给水排水, 2017, 33(18): 22-24. [Xie Z D, Zhang X P, Wei J Z, et al. Application and summary of double membrane internal cycling bioreactor treatment process (DMBR)[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(18): 22-24.]

[31] 薄荣业, 王敦球, 金樾, 等. 厌氧陶瓷平板膜生物反应器处理生活污水应用研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(11): 103-106. [Bo R Y, Wang D Q, Jin Y, et al. Study on anaerobic ceramic membrane bioreactor in treating domestic sewage[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11): 103-106.]

[32] 任鸿梅, 任龙飞. 萃取式膜生物反应器在水处理中的应用[J]. 净水技术, 2017, 36(2): 90-92. [Ren H M, Ren L F. Application of extractive membrane bioreactor in wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2017, 36(2): 90-92.]

[33] 肖本益, 唐心漪, 易皓, 等. 两种污泥高级厌氧消化工艺的比较: 高温热处理和低温热碱处理[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(2): 94. [Xiao B Y, Tang X Y, Yi H, et al. Comparison of two advanced anaerobic digestions of sewage sludge with high-temperature thermal pretreatment and low-temperature thermal-alkaline pretreatment[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(2): 94.]

[34] 王涛, 宿宇. 污泥处理处置技术路线综述[J]. 中国环保产业, 2020, (1): 51-55. [Wang T, Su Y. Analysis on stabilization, reducing, harmlessness and resource levels of sludge treatment and disposal technical route[J]. China Environmental Protection Industry, 2020, (1): 51-55.]

[35] 汤姆·蒂坦伯格, 琳恩·刘易斯, 著. 环境与自然资源经济学(第八版)[M]. 王晓霞, 杨鹂, 石磊, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2011. [Tietenberg T, Lewis L. Environmental and Natural Resource Economics (8th Edition)[M]. Wang X X, Yang L, Shi L, Trans. Beijing: Renmin University of China Press, 2011.]

Reuse potential of wastewater and sludge in Fujian Province based on a dynamic optimization model and sustainable urban development

KE Wenlan[1], YAN Jingjing[2], WU Rongrong[3], ZHANG Guofeng[4], SHA Jinghua[2]

(1. Shool of Economics and Trade, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Yango University, Fuzhou 350001, China; 4. School of Economics, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: At present, China has changed from the stage of high-speed development to high-quality development, with the rapid expansion of city size, large amount of urban sewage and sludge discharge, rational disposal and resource utilization of sewage and sludge have become the key issues of water pollution control and energy utilization. In this paper, a dynamic optimization model of regional water environment-economy-energy system was established based on the input-output method to simulate and analyze the balanced development path among sewage and sludge reuse, environmental protection and urban economic growth in nine cities of Fujian Province from 2012 to 2025. The results show that: (1) The comprehensive environmental policy system with the introduction of advanced technology has a significant promoting effect on economic growth. Under the constraints of an average annual COD reduction of 3% and an energy consumption of 145 million tons of standard coal, through technology introduction and policy regulation，by 2025, Fujian Province will achieve an additional sewage treatment capacity of 370 million m^3, and additional sludge utilization capacity of 376 thousand tons, with an average annual GDP growth rate of 8.6%. With the increase of environmental constraints and technological input, the economic has a marginal increasing effect; (2) The impact of environmental policy on regional economy has obvious lag. Local governments need to systematically formulate medium and long-term financial plans to ensure the stability and sustainability of environmental governance effects. (3) The policy system including introduction of sewage and sludge treatment technology provides strong support for the “win-win” development model of environmental governance and economic growth. And innovative technologies can be used to achieve the economic development goals under the constraints of energy conservation and emission reduction, effectively to promote the comprehensive green transformation of economic and social development.

Key words: wastewater and sludge treatment; reuse potential; dynamic optimization model; input-output; Fujian Province