



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202206101 中图分类号 X703 文献标识码 A

任佳雪, 程海鹰, 孟丹, 等. 基于系统动力学模型的城市生活污水处理系统的甲烷排放特征及减排潜力分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11): 3655-3663. [REN Jiaxue, CHENG Haiying, MENG Dan, et al. Methane emission characteristics and emission reduction potential analysis of urban domestic wastewater treatment system based on system dynamics model[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(11): 3655-3663.]

# 基于系统动力学模型的城市生活污水处理系统的甲烷排放特征及减排潜力分析

任佳雪<sup>1,2</sup>, 程海鹰<sup>1</sup>, 孟丹<sup>2</sup>, 陈海涛<sup>3</sup>, 马占云<sup>4,✉</sup>, 高庆先<sup>4</sup>

1. 天津市滨海新区环境创新研究院, 天津 300452; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 1000483; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 4. 中国环境科学研究院, 北京 100012

**摘要** 为全面了解我国城市生活污水处理系统的甲烷排放现状及未来趋势, 根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 清单计算方法核算了 2000—2015 年我国生活污水处理系统的甲烷排放量。基于嵌入中国生活污水处理系统甲烷排放 IPCC 清单计算方法的系统动力学 (SD) 模型, 模拟分析了 2015—2050 年基线情景和 7 种减排情景下的甲烷排放达峰和减排潜力。结果表明: 我国生活污水处理系统甲烷排放总量从 2000 年的  $32.15 \times 10^4$  t 升至 2015 年  $64.78 \times 10^4$  t, 其中, 污水处理过程中的甲烷排放量增长迅速, 生活污水直接排入自然水体及经过处理后排放的甲烷排放量无明显增长; 在模拟时段 (2015—2050 年) 内, 基线情景、节约用水情景、污水回用情景和节水回用情景中未出现生活污水处理系统甲烷排放峰值, 在污水产生源头采取减排措施只能减缓增长速度, 无法达到甲烷排放峰值; 不同情景下的甲烷排放达峰时间及峰值不同, 单一减排情景下的甲烷排放峰值出现在 2035 年后, 而组合减排情景的峰值出现在 2035 年前, 其中全程减排情景峰值出现在 2024 年; 单一减排情景中污水回用减排潜力较好, 可将其作为减排重点方向; 而组合减排情景中全程减排情景具有最大减排潜力。本研究表明, 未来生活污水处理系统甲烷排放量仍呈不断上升趋势, 采用多手段协同减排可实现预期时间内污水处理系统甲烷排放达峰。

**关键词** 系统动力学模型; 生活污水; 排放达峰; 减排潜力; 甲烷排放

全球气候变化一直是人类关注焦点。政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次评估报告进一步明确了近百年全球气候变暖的客观事实<sup>[1]</sup>, 未来变暖幅度取决于温室气体的减排强度。在此背景下, 全球各国纷纷采取行动应对气候变化并制定温室气体减排目标<sup>[2-5]</sup>, “碳达峰、碳中和”已成为全球议题。甲烷 (CH<sub>4</sub>) 排放之后的百年增温效应约为二氧化碳的 28 倍<sup>[6]</sup>, 且甲烷是由人类活动造成的气候影响污染物, 因此备受国际社会关注。多国已签署“全球甲烷承诺”(Global Methane Pledge)<sup>[7]</sup>。据统计报告显示, 2014 年, 我国废弃物处理行业共排放  $656.40 \times 10^4$  t 甲烷。其中, 生活污水甲烷排放量约占 10%, 2014 年生活污水处理甲烷排放比 2012 年增加了 30%<sup>[8]</sup>。这也充分说明, 仅考虑二氧化碳无法全面体现中国的温室气体排放情况, 而

收稿日期: 2022-06-20; 录用日期: 2022-09-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFE0135200); 中央级公益性科研院所基本科研业务创新群体项目 (22060302001001061005)

第一作者: 任佳雪 (1995—), 女, 硕士, 工程师, 759708127@qq.com; ✉通信作者: 马占云 (1980—), 女, 博士, 副研究员, mazy@craes.org.cn

减少甲烷排放是减缓气候变化最具成本效益的内容之一<sup>[9-10]</sup>。

我国温室气体的年排放量较大<sup>[11-12]</sup>。为积极应对全球气候变化、早日实现碳达峰目标,这既需要节能减排技术的支撑,也需要对碳排放趋势进行科学模拟。污水处理也不可避免地会面临能耗和温室气体排放增加的问题<sup>[13]</sup>,城市污水处理系统绿色低碳转型迫在眉睫。在此背景下,研究我国污水处理系统温室气体排放达峰路径具有现实意义。各国学者针对生活污水处理系统产生的温室气体排放研究主要包含温室气体来源、排放特征和减排路径等方面<sup>[14-18]</sup>。目前,研究多集中于污水处理温室气体排放现状,对于未来排放趋势研究相对不足,急需从定性定量角度开展研究。在以往研究中,模型作为预测未来趋势的有效工具被广泛使用,如 IPCC 经验模型、LEAP 模型、灰色 GM(1,1) 模型等<sup>[19-22]</sup>。然而,该类模型多采用静态方式开展,难以满足未来动态变化模拟。而系统动力学(system dynamics, SD)模型采用定性和定量相结合、变静态为动态模拟的方式,可为未来模拟提供有效支撑,根据系统问题设立不同情景进行仿真模拟<sup>[23-24]</sup>,可覆盖污水处理甲烷排放全过程,有助于发现污水处理过程中环境问题的根本原因,进而实现污水处理过程的整体控制。

本研究基于嵌入 IPCC 清单计算方法的系统动力学模型,综合考虑与生活污水处理系统甲烷减排密切相关的现行技术、环境政策和未来经济发展等因素,从人口变化、经济损失、污水处理、甲烷排放 4 个方面选取相关参数,以此预测中国生活污水处理系统甲烷排放量的未来发展趋势,并分析基线情景和 7 种减排情景下的甲烷排放达峰情况和减排潜力,以期在宏观层面为生活污水处理系统温室气体排放模拟及达峰路径提供新思路。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

系统动力学模型主要数据来源于历年专题统计数据,主要有《中国城市建设统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国环境统计年报》《中国环境统计年鉴》等,部分数据来源于《全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》《2016—2030 年国家人口发展规划》与业内专家的咨询信息。活动水平数据来自《中国统计年鉴》《中国环境统计年报》《2006 IPCC 清单指南》《中国第二次国家温室气体清单》。BOD/COD(质量浓度比,下同)是基于分区统计进水生化需氧量(BOD)和进水化学需氧量(COD)的计算资料<sup>[25]</sup>,其他排放因子和相关参数的确定参考文献<sup>[26-27]</sup>。

### 1.2 模型构建

#### 1.2.1 系统边界与结构

本研究基于 FORRESTER J W 教授提出的系统动力学模型,结合 IPCC 清单推荐的生活污水甲烷排放计算方法,开展污水处理系统甲烷排放研究。系统边界涵盖污水产生、污水处理至污水回用及污水排放全过程。基于此,集成了 4 个子系统,即人口子系统、经济损失子系统、生活污水子系统和甲烷排放子系统,其相关边界如下所述。

1) 人口子系统中人口数量将会引起生活用水量的改变,总人口数是初始人口数与其年增长率随时间积累的结果,结合年城镇化率推算出城市人口数量。

2) 经济损失子系统中温室气体减排与减缓气候变化需要充足资金支持,根据投资情况观察对生活污水产生量及甲烷排放量的影响,同时污水处理投资情况对于污水处理量产生一定影响。

3) 生活污水子系统主要考虑用水需求引发排污需求(使用过的生活用水 80% 以上会以废水形式排放),进而影响生活污水排放量和生活污水处理量。

4) 参考已有研究,将城市生活污水处理系统产生的甲烷分为 2 个部分,分别选取参数计算。一部分产生于生活污水排入自然水体( $\text{CH}_4\text{e}$ )(包括未处理和处理后),另一部分则产生于污水处理过程中( $\text{CH}_4\text{r}$ )<sup>[28-30]</sup>。基于《2006 年 IPCC 清单指南》核算生活污水处理系统的甲烷排放量,生活污水

有机成分的特征参数有进出水 COD 和 BOD<sup>[31-32]</sup>。

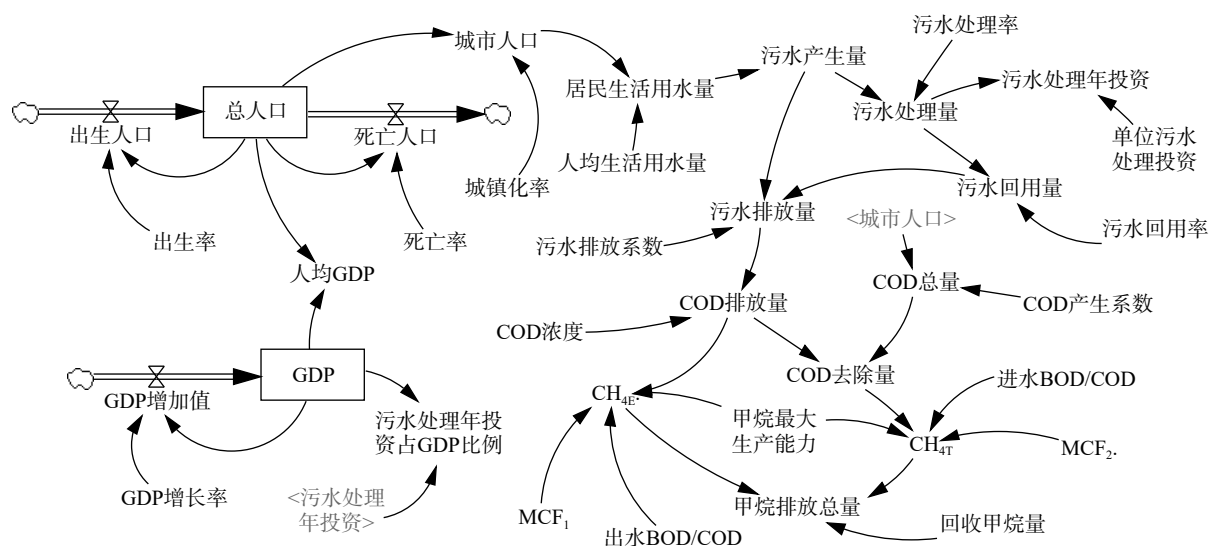
生活污水处理系统甲烷排放量的计算公式为式 (1)。

$$\text{CH}_4\text{排放量} = \text{TOW} \times B_0 \times \text{MCF} - R \quad (1)$$

式中： $\text{CH}_4\text{排放量}$  为甲烷排放总量，即  $\text{CH}_{4\text{T}}$  和  $\text{CH}_{4\text{E}}$  的总和， $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ；TOW 为单位有机物 (以 BOD 表征) 对应的甲烷质量，即  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； $B_0$  为甲烷最大生产能力，缺省值同样以单位有机物 (以 BOD 表征) 对应的甲烷质量计，为  $0.6 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  或  $0.25 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；MCF 为甲烷修正因子； $R$  为回收利用甲烷量， $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

### 1.2.2 模型存量流量图

运用 VENSIM 软件构建嵌入 IPCC 清单计算方法的系统动力学模型，同时进行模拟仿真、参数校准等确保结果精度。模拟以 2010 年为起始年，则模型参数初始值为 2010 年对应值。时间边界为 2010—2050 年。仿真步长为一年。选取 2011—2015 年进行模型验证。全国源自生活污水系统的甲烷排放模型的整体结构如图 1 所示。



注：箭头用来指示变量之间的相互关系；左侧云形状表示系统外界环境；“<>”内为影子变量。

图 1 生活污水处理系统甲烷排放 SD 模型

Fig. 1 Methane emission SD model for domestic sewage treatment system

### 1.3 情景设计

基于现有生活污水处理过程特征，结合国家对于污水处理甲烷排放标准政策，设定了 3 种情景类型：基线情景、单一减排情景和组合减排情景。其中，单一减排情景包括 4 个子情景，分别为节约用水情景、污水回用情景、中部节能情景和终端处理情景。组合减排情景包括节水回用情景、中部终端情景和全程减排情景 3 个子情景。情景的描述及因子设定如表 1 所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型检验及灵敏度分析

#### 2.1.1 模型检验

为检验模型能否有效反映真实情况，需要从模型众多参数中选取重要参数进行误差检验<sup>[37]</sup>。表 2 中数据显示，2011—2015 年城市人口、生活用水量、GDP 及甲烷排放量实测值与模拟值的平均误差分别为 3.4%、1.4%、-0.4% 和 3.9%，各主要因子平均误差均低于 5%。这说明该模型具有较高的可信度，模拟效果较好，可基于该模型系统开展进一步研究。

表1 情景设定  
Table 1 Emission scenario setting

情景种类	基线情景	工艺阶段	情景依据	情景设定
单一减排情景	节约用水情景	污水产生	根据《中国可持续发展水资源战略研究》 <sup>[33]</sup> , 节水意识和水价进一步提升会对用水量起到一定抑制作用 <sup>[34]</sup> , 人均生活用水量将会减少	居民生活用水定额由 $62.00 \times 10^{-3}$ t/人变为 $58 \times 10^{-3}$ t/人
	污水回用情景	污水产生	根据由“污水处理”向“再生利用”转变的要求, 污水处理厂尾水水质达标后可用于生态和景观用水, 预计污水的处理率与回用率将大幅增加	我国污水处理率将在2030年达100%; 将有 $20\% \pm 10\%$ 的出水再生回用, 2050年污水回用率为48%
	中部节能情景	污水处理	城市污水厂的能源消耗主要是电能、热能及药品消耗, 其中电能消耗占60%~90% <sup>[35]</sup> , 生活污水处理过程能耗影响污水处理率	设定2020年污水处理率为96%, 2050年变为100%
	终端处理情景	达标排放	采用热电联产技术回收利用污泥消化过程中甲烷气体 <sup>[36]</sup>	设定2020年甲烷回收率为26%, 2050年变为95%
组合减排情景	节水回用情景	污水产生	节约用水, 循环利用	参数改变综合考虑节约用水情景和污水回用情景
	中部终端情景	污水处理及排放	在污水处理及达标排放过程采取减排手段	参数改变综合依据中部节能情景和终端处理情景增加状态因子
	全程减排情景	污水产生、处理及排放	对已经进行过节水回用处理的生活污水进行处理时, 采用全程减排手段	参数改变综合依据节水回用情景与中部节能情景和终端处理情景增加状态因子

注: 情景依据为当前趋势不加约束的情景作为未来发展的基准; 情景设定即假定本情景不考虑已颁布实施的一系列污水处理节能减排政策措施。

表2 模拟检验结果  
Table 2 Simulation test results

年份	城市人口/(万人)			生活用水量/( $10^8$ t)			GDP/(亿元)			甲烷排放量/( $10^4$ t)		
	模拟值	实测值 <sup>1)</sup>	误差 <sup>2)</sup>	模拟值	实测值	误差 <sup>1)</sup>	模拟值	实测值	误差 <sup>1)</sup>	模拟值	实测值	误差 <sup>1)</sup>
2011	67 368	69 079	2.5	243	248	1.9	489 301	484 753	-0.9	58	53	9.5
2012	69 052	71 182	3.1	254	257	1.3	527 956	539 117	2.1	60	56	6.1
2013	70 692	73 111	3.4	264	268	1.5	594 672	590 422	-0.7	61	59	3.5
2014	72 282	74 916	3.6	274	276	0.5	648 787	644 791	-0.6	63	62	1.4
2015	73 818	77 116	4.5	283	287	1.7	696 149	682 635	-1.9	64	65	-0.8

注: 1)实测值来源于2011—2015年中国专题统计年鉴; 2)误差单位为%。

2.1.2 灵敏度分析

灵敏度分析是指模拟调节参数对输出变量的影响程度<sup>[38]</sup>, 稳定性良好的模型对多数参数的变化应具有较低的灵敏度。本研究选取模型6个主要常数参数开展灵敏度分析, 分别为居民生活用水定额、污水回用率、甲烷最大生产能力、污水排放系数、回收甲烷量、COD产生系数(见表3)。以考查变量对甲烷排放总量的影响, 检验方法为每个参数逐年增加或减少10%。

表3 SD模型灵敏度分析结果  
Table 3 Sensitivity analysis results of SD model

变量	对甲烷排放总量值
居民生活用水定额	3.6
污水回用率	4.5
甲烷最大生产能力	10.0
污水排放系数	3.6
回收甲烷量	0.1
COD产生系数	13.6

除 COD 产生系数和甲烷最大产生能力外，其余常数参数灵敏度均低于 10%，因此 COD 产生系数和甲烷最大产生能力均为高敏感参数。高灵敏度参数是引发模型结果变化的关键，甲烷最大产生能力表示甲烷可产生于污水中一定数量的有机物。而 COD 产生系数则作为 COD 的主要影响参数，两参数均与甲烷排放量息息相关，进而影响生活污水处理系统甲烷排放总量。模型检验和灵敏度分析结果表明，该生活污水处理系统甲烷排放系统动力学模型可用于对实际系统的模拟预测。

## 2.2 2000—2015 年甲烷排放变化情况

根据 IPCC 清单指南方法计算 2000—2015 年源自生活污水处理系统的甲烷年排放量 (见图 2)。全国生活污水处理系统的甲烷排放总量呈波动上升趋势，分为 2 个增长阶段：第一阶段从 2000 年的  $32.15 \times 10^4$  t 增至 2010 年的  $54.43 \times 10^4$  t；第二阶段从 2011 年的  $53.14 \times 10^4$  t 升至 2015 年的  $64.78 \times 10^4$  t。两阶段增速分别为 36.39% 和 5.08%，排放总量从 2010 年后略微减少，且 2011 年后增速明显下降。这可能是由于 2011 年我国出台《全国地下水污染防治规划 (2011-2020 年)》后，国家持续加强污水处理设施建设、提高污水排放标准及强化城镇污水设施运行监管，随后还连续出台多条相关政策<sup>[39]</sup>，引发污水 COD 去除量浓度下降，导致甲烷排放量 ( $\text{CH}_{4\text{T}}$ ) 减少，二者关联性较大。2000—2015 年  $\text{CH}_{4\text{T}}$  排放量增长迅速，从  $19.26 \times 10^4$  t 增至  $50.05 \times 10^4$  t，增长了 1.6 倍； $\text{CH}_{4\text{E}}$  排放量同一时期变化不大。目前，随着我国人口消费水平的提高，生活用水量的增加导致生活污水处理量快速增加，生活污水处理系统的甲烷排放量仍呈不断上升的趋势。

## 2.3 不同情景下甲烷的排放模拟

通过系统动力学模型可预测 2015—2050 年生活污水处理系统甲烷排放量，根据预测结果绘制各情景下甲烷排放量的预测曲线。图 3 表明，生活污水处理系统甲烷排放达峰时间及峰值有所不同，其中在全程减排情景下最早实现甲烷排放达峰，峰值也最小。相反地，在终端处理情景最晚实现甲烷排放达峰且峰值最大。整体达峰时间大致分布在 2024—2044 年。这表明温室气体减排仍是一个长期的过程，未来可加强中长期生活污水处理系统温室气体排放预测研究。

在基线情景下，模拟时间内甲烷未出现排放峰值。甲烷排放量按先快后慢的速率增加，从 2010 年的  $56.36 \times 10^4$  t 增加到 2050 年的  $90.96 \times 10^4$  t。这显然表明该情景无法满足 2030 年碳排放达峰的要求，需要外部政策技术干预。从模型结果来看，节约用水情景和污水回用情景未出现甲烷排放峰值。与基线情景相比，2010—2050 年的甲烷排放量均有所减少，但仍呈缓慢上升趋势。模拟时段内节约用水和污水回用只能减少产生甲烷的排放量和排放速率，却无法达到排放峰值。

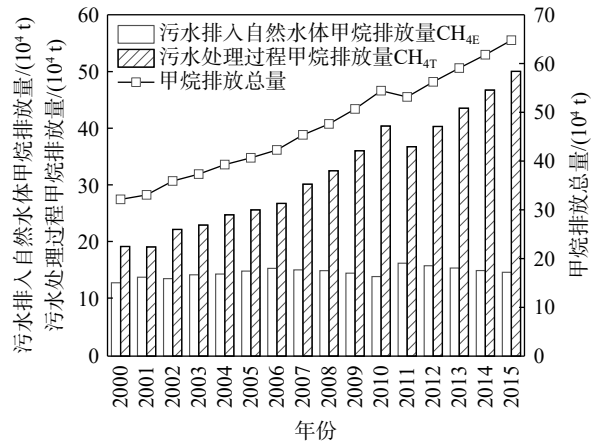


图 2 2000—2015 年源自生活污水的甲烷排放量

Fig. 2 Methane emissions from domestic sewage from 2000 to 2015

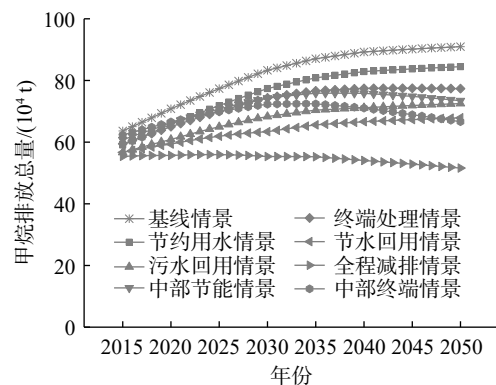


图 3 不同情景模拟结果

Fig. 3 Simulation results of different scenario

在模拟时间内,中部节能情景和终端处理情景均出现甲烷排放峰值,但达峰情景与达峰目标有所差距。达峰时间远晚于2030年,峰值比基线情景有所减少。单一减排情景中的中部节能情景下甲烷排放量达峰时间最早,为2037年。而陈敏敏<sup>[40]</sup>的研究表明,全国超过一半污水处理厂的处理能耗评分低于全国平均值。这说明我国污水处理在降低能耗方面仍有较大潜力。在终端处理情景下,甲烷达峰时间最晚,为2044年,然而峰值也最高,为 $77.46 \times 10^4$  t。

中部终端情景和全程减排情景能实现甲烷排放在2035年前达到峰值。中部终端情景下节能降耗和甲烷回用的协同使用对于提早达峰时间和降低峰值方面具有明显贡献。全程减排情景达峰年份为2024年,在所有情景中最早实现达峰,其峰值为 $55.97 \times 10^4$  t。相比于单一减排情景,组合减排情景的减排量明显增加。其中,全程减排情景的甲烷减排量最多,2010年至2050年减排量为 $1.21 \times 10^4$  t。

以上结果表明,污水处理系统在面临减排时需要多方协同发力,积极推广污水回用、强化居民节约用水意识、降低污水厂能耗的同时回收利用甲烷,可作为实现污水领域2030年排放达峰的有效手段。

## 2.4 减排潜力分析

分析温室气体减排潜力可作为制定减排路径的重要指标<sup>[41-42]</sup>。图4表示不同情景下生活污水处理系统甲烷减排潜力情况,结果亦表明减排效果随减排政策措施实施的深入越来越好。单一减排情景中污水回用情景的减排潜力最大,其次是中部节能情景和终端处理情景,减排潜力最小的是节约用水情景。同时,该情景在源头减少污水产生进而节省后期污水处理费用,因而减排成本最低。这表明日常生活中提倡节约用水对于实现生活污水处理系统甲烷减排十分重要<sup>[43]</sup>。组合减排情景中甲烷减排潜力从高到低依次为全程减排情景、中部终端情景和节水回用情景。

单一减排情景中污水回用情景具有最大减排潜力( $18.45 \times 10^4$  t),污水回用可减少部分源头用水量,降低排入环境中污染物含量的同时节省水费<sup>[44-45]</sup>。而组合减排情景中的全程减排情景具有最大减排潜力( $39.37 \times 10^4$  t)。未来随着扩大碳交易覆盖层面,节能减排带来额外收益的同时也会加速技术的创新。

## 3 结论与展望

1) 我国源自生活污水处理系统的甲烷排放总量由2000年 $32.15 \times 10^4$  t上升至2015年 $64.78 \times 10^4$  t,其中污水处理过程中的甲烷排放量增长迅速,从 $19.26 \times 10^4$  t增长至 $50.05 \times 10^4$  t;生活污水排入自然水体(包括未处理和处理后)的甲烷排放量同一时期无明显变化。随着人口消费水平提高,若不采取节能减排措施2030年和2050年甲烷排放总量分别增加至 $83.31 \times 10^4$  t和 $90.95 \times 10^4$  t。

2) 基线情景甲烷排放量以先快后慢的速率增加,单一减排情景中节约用水和污水回用只能减少甲烷产生量而无法达到排放峰值,中部节能情景和终端处理情景的甲烷排放峰值点分别出现在2037年和2044年,我国污水处理在降低能耗方面仍有较大潜力,单一减排手段仍无法满足国家提出的2030年甚至提前达峰要求。

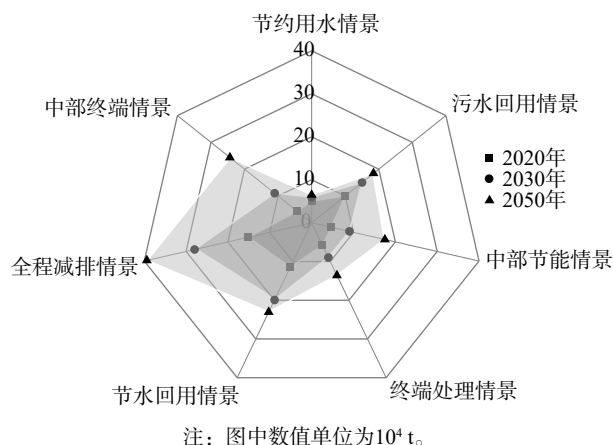


图4 不同情景甲烷减排潜力  
Fig. 4 Methane emission reduction potential under different scenarios

3) 组合减排情景中的节水回用情景未出现峰值, 中部终端情景甲烷排放量峰值出现在 2034 年, 全程减排情景的峰值点出现在 2024 年, 相比单一减排情景而言, 组合减排情景的达峰时间明显提前。

4) 单一减排情景中的污水回用手段减排潜力较好(约为  $18.45 \times 10^4$  t), 污水再生利用潜力巨大可以作为减排重点方向; 而组合减排情景中的全程减排手段具有最大减排潜力为  $39.37 \times 10^4$  t, 未来污水处理方向朝多手段协同减排发展。

5) 本研究采用 IPCC 清单推荐的相关系数计算生活污水处理系统的甲烷排放, 然而, 不同区域通常具有不同的特点, 这可能会导致评估结果存在较大的不确定性。因此, 还应积极探索不同区域或者国家之间的污水处理系统温室气体排放因子, 以降低计算的不确定性。此外, 由于生活污水处理系统产生甲烷过程较为复杂, 涉及社会、经济、环境等因素, 仅从宏观整体的角度评估污水处理系统甲烷排放, 未能很好的体现区域特点, 还应持续完善模型, 强化区域数据收集, 以便更好地指导区域污水处理系统的节能减排工作。

## 参 考 文 献

- [1] [1]马占云,任佳雪,陈海涛,姜华,高庆先,刘舒乐,严薇,李照濛.IPCC 第一工作组评估报告分析及建议[J/OL].环境科学研究:1-11[2022-09-29].
- [2] ZICKFELD K, SOLOMON S, GILFORD D M. Centuries of thermal sea-level rise due to anthropogenic emissions of short-lived greenhouse gases[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(4): 657-662.
- [3] LIU L C, WU G. The effects of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emission taxes: an empirical study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1044-1054.
- [4] GAO Y, GAO X, ZHANG X H. The 2 °C global temperature target and the evolution of the long-term goal of addressing climate change: from the united nations framework convention on climate change to the Paris agreement[J]. *Engineering*, 2017, 3(2): 272-278.
- [5] 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 等. 中国综合气候变化风险区划[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 3-17.
- [6] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.
- [7] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007
- [8] 国家发改委应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[J]. 北京:中国经济出版社, 2016: 9-24.
- [9] ZHOU Y M, Feng Y S. The strategy and technology selection for non-CO<sub>2</sub> greenhouse gas emission control[J]. *Advances in climate change research*, 2014, 9(4): 28-33.
- [10] FANG K, TANG Y Q, ZHANG Q F, et al. Will China peak its energy-related carbon emissions by 2030?lessons from 30 Chinese Provinces[J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113852.
- [11] 马丁, 陈文颖. 中国2030年碳排放峰值水平及达峰路径研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(增刊1): 1-4.
- [12] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2020(28): 5-7.
- [13] 付加锋, 冯相昭, 高庆先, 等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算方法与案例研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(9): 2086-2093.
- [14] ABOOBAKAR A, CARTMELL E, STEPHENSON T, et al. Nitrous oxide emissions and dissolved oxygen profiling in a full-scale nitrifying activated sludge treatment plant[J]. *Water Research*, 2013, 47(2): 524-534.
- [15] DAELMAN M R J, VAN-VOORTHUIZEN E M, VAN-DONGEN L G J M, et al. Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment - results from a long-term study[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(10): 2350-2355.
- [16] MAMAIS D, NOUTSOPOULOS C, DIMOPOULOU A, et al. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions[J]. *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2015, 71(2): 303-308.
- [17] ZOUBOULIS A, TOLKOU A. Effect of climate change in wastewater treatment plants: Reviewing the problems and solutions[J], 2015, 10.1007/978-3-319-10467-6(Chapter 10): 197-220.
- [18] ZHANG Q, NAKATANI J, WANG T, et al. Hidden greenhouse gas emissions for water utilities in China's Cities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 665-677.
- [19] MANNINA G, EKAMA G, CANIANI D, et al. Greenhouse gases from wastewater treatment: a review of modelling tools[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551/552: 254-270.
- [20] 甘晖, 杨燕燕, 刘佳, 等. 福建省2000—2020年间废弃物处理温室气体

- 排放估算及趋势预测[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 93-100.
- [21] KYUNG D, KIM M, CHANG J, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 95: 117-123.
- [22] NAYEB H, MIRABI M, MOTIEE H, et al. Estimating greenhouse gas emissions from Iran's domestic wastewater sector and modeling the emission scenarios by 2030[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236: 117673.
- [23] FORRESTER J W. *Industrial dynamics*[M]. Portland: Productivity Press, 1961.
- [24] FORRESTER J W. *The system dynamics national model: Macrobehavior from microstructure*[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1989.
- [25] 中国城镇供水排水协会排水专业委员会. 中国城镇污水处理厂汇编[M]. 北京: 中国城镇供水排水协会排水专业委员会, 2006.
- [26] 宋丽丽, 罗勇, 高庆先, 等. 生活污水中BOD<sub>5</sub>与COD<sub>Cr</sub>关系的区域性差异分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(10): 1154-1160.
- [27] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 等. 中国污水处理厂甲烷排放研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3810-3816.
- [28] GUIASOLA A, de HAAS D, KELLER J, et al. Methane formation in sewer systems[J]. *Water Research*, 2008, 42(6/7): 1421-1430.
- [29] 乐群, 张国君, 王铮. 中国各省甲烷排放量初步估算及空间分布[J]. 地理研究, 2012, 31(9): 1559-1570.
- [30] 闫旭, 韩云平, 李琦路, 等. 污水处理过程中温室气体产生研究进展[J]. *环境化学*, 2015, 34(5): 853-862.
- [31] 任佳雪, 高庆先, 陈海涛, 等. 碳中和愿景下的污水处理厂温室气体排放情景模拟研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 410-419.
- [32] IPCC. *Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventory*[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [33] 中国工程院“世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(8): 1-17.
- [34] 刘昌明, 何希吾. 中国21世纪水问题方略[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [35] 应启锋, 王佳伟, 高金华, 等. 小红门污水处理厂利用沼气拖动鼓风机的节能效果[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(12): 130-132.
- [36] 吴静, 姜洁, 周红明, 等. 我国城市污水厂污泥厌氧消化系统的运行现状[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(22): 21-24.
- [37] 王其藩. *高级系统动力学*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [38] 贾仁安, 丁荣华. *系统动力学: 反馈动态性复杂分析*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [39] 马占云, 冯鹏, 高庆先, 等. 中国废水处理甲烷排放特征和减排潜力分析[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(5): 343-352.
- [40] 陈敏敏, 吴琼, 张震, 等. 我国城镇污水处理厂环境绩效评价研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(12): 2675-2682.
- [41] KIUILA O, RUTHERFORD T F. The cost of reducing CO<sub>2</sub> emissions: integrating abatement technologies into economic modeling[J]. *Ecological Economics*, 2013, 87: 62-71.
- [42] 戴彦德, 胡秀莲, 等. 中国二氧化碳减排技术潜力和成本研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [43] STOKES J R, HENDRICKSON T P, HORVATH A. Save water to save carbon and money: developing abatement costs for expanded greenhouse gas reduction portfolios[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(23): 13583-13591.
- [44] MAESELE C, ROUX P. An LCA framework to assess environmental efficiency of water reuse: application to contrasted locations for wastewater reuse in agriculture[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128-151.
- [45] 胡洪营, 吴乾元, 吴光学, 等. 污水特质(水征)评价及其在污水再生处理工艺研究中的应用[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(5): 725-733.

(责任编辑: 靳炜)



## Methane emission characteristics and emission reduction potential analysis of urban domestic wastewater treatment system based on system dynamics model

REN Jiaxue<sup>1,2</sup>, CHENG Haiying<sup>1</sup>, MENG Dan<sup>2</sup>, CHEN Haitao<sup>3</sup>, MA Zhanyun<sup>4,\*</sup>, GAO Qingxian<sup>4</sup>

1. Research Institute for Environment Innovation (Tianjin Binhai), Tianjin 300452, China; 2. Department of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

\*Corresponding author, E-mail: mazy@craes.org.cn

**Abstract** In order to comprehensively understand the current situation and future trends of methane emissions from urban domestic wastewater treatment systems in China, methane emissions released from domestic wastewater treatment systems in China during 2000-2015 were accounted for according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) inventory calculation methodology. Based on a system dynamics model (SD) embedded in the IPCC inventory calculation method for methane emissions from domestic wastewater treatment systems in China, the methane emissions peaking and reduction potential were simulated and analyzed for the baseline scenario and seven reduction scenarios from 2015-2050. The results showed that: the total methane emission from domestic wastewater treatment system in China rose from  $32.15 \times 10^4$  t in 2000 to  $64.78 \times 10^4$  t in 2015, among which the methane emission from wastewater treatment process grew rapidly, and the methane emission from domestic wastewater discharged directly into natural water bodies and after treatment did not grow significantly. During the simulation period of 2015-2050, the methane emission peak of domestic wastewater treatment system did not occur in the baseline scenario, water conservation scenario, wastewater reuse scenario and water conservation and reuse treatment scenario, and emission reduction measures at the source of wastewater generation could only slow down the growth rate, but could not reach the peak methane emission. The peak time and peak of methane emissions in different scenarios were different, with peak methane emissions occurring after 2035 for the single reduction scenario and before 2030 for the combined reduction scenario, and the peak of the whole emission reduction scenario occurring in 2024. In the single abatement scenario, the reuse of wastewater had good emission reduction potential and can be regarded as the key direction of emission reduction direction. While in the combination emission of reduction scenarios, the whole emission reduction scenario had the greatest potential for emission reduction. The study showed that methane emissions from domestic wastewater treatment systems would continue to increase in the future, and the use of multiple means of synergistic emission reduction could achieve peak methane emissions from wastewater treatment systems within the expected time frame.

**Keywords** system dynamics model; domestic sewage; emission peak; emission reduction potential; methane emission