

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.16.009

# IPCC 污泥碳排放核算模型中 DOC 取值的不足与修正

郭 怡

(上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082)

**摘 要:** 政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的缺省值模型主要是依据固体废弃物的卫生填埋工艺,而对于不同的污泥处理处置工艺,核算碳排放量时采用该缺省值模型会使计算结果不符合实际情况。为此对污泥处理处置工艺中碳排放核算过程以及参数取值上存在的不足进行了分析研究,提出了污泥可降解有机碳(DOC)的测定方法及计算公式,并对我国不同地域的几座污水厂污泥处理环节的进泥 DOC 进行测定。结果显示,我国污泥实际的 DOC 在 10% ~ 20% 之间,与 IPCC 的推荐值(50%)存在较大差异,表明在核算污泥碳排放时不能简单使用 IPCC 给出的推荐值,参数取值上的不准确性会造成污泥处理处置过程中二氧化碳和甲烷等温室气体排放量计算的不准确性。

**关键词:** 污泥处理处置; 碳排放; 缺省值模型; 可降解有机碳

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)16-0049-05

## Lack and Correction of DOC Value in IPCC Calculation Model of Sludge Carbon Emission

GUO Qia

(Shanghai National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co. Ltd., Shanghai 200082, China)

**Abstract:** The default value model proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was based mainly on the sanitary landfill process of solid waste, and for different sludge treatment and disposal processes, the default value model used in the accounting of carbon emissions will make the calculation results inconsistent with the actual situation. Therefore, the accounting process of carbon emission and the deficiency of parameter value in sludge treatment and disposal process were analyzed and studied, and the determination method and calculation formula of sludge degradable organic carbon (DOC) were put forward, and the sludge DOC of several sewage treatment plants in different regions of China was determined. The results showed that the actual DOC of sludge in China was between 10% - 20%, which was quite different from the recommended value of IPCC (50%), which indicated that the recommended value could not be simply used in the accounting of sludge carbon emissions. The inaccuracy of parameter values would cause inaccuracy in the calculation of greenhouse gas emissions such as carbon dioxide and methane during sludge treatment and disposal.

**Key words:** sludge treatment and disposal; carbon emission; default value model; degradable organic carbon (DOC)

基金项目: 上海城投(集团)有限公司科技创新计划项目(CTKY-ZDXM-2019-017)

不同的污泥处理处置工艺的碳排放核算边界存在较大差异,而目前各大污水处理厂无论采用何种工艺路线,核算碳排放量时一般均使用政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,简称 IPCC)于1996年提出的缺省值模型。但 IPCC 最初是依据固体废弃物的卫生填埋工艺提出的该模型,并不是专门针对污泥处理处置工艺,且其中涉及的参数均来源于 IPCC 的经验值。虽然污泥属于固体废弃物,但与一般固体废弃物在特性上存在较大差异。城市固体废弃物指人类活动产生的日常生活和生产建设等的工业垃圾、商业垃圾和生活垃圾,呈固体与半固体状态;城市污泥成分复杂,具有极强的流变特性,有机质含量较高,环境污染大<sup>[1]</sup>。

因此,直接使用缺省值模型及经验平均值,其计算结果必然不符合实际情况。另外,考虑到发展中国家和发达国家以及各地区区域之间的泥质和环境差异,直接用经验值进行计算,对日处理污泥量一般在几百吨的污水厂而言,得到的二氧化碳和甲烷排放量会存在较大的出入。

## 1 IPCC 碳排放缺省值模型的不足

IPCC 于1996年提出了关于计算固体废弃物卫生填埋方式的碳排放的缺省值模型,该模型并不是针对污泥处理处置碳排放计算提出的,而是只考虑了填埋方案的碳排放计算。截至2016年,IPCC 没有再提出任何单独针对污泥碳排放核算的方法,因此目前国内外大部分污水处理厂在计算污泥二氧化碳及甲烷排放量时都采用经验模型公式,具体如下:

$$E_{\text{CH}_4} = W \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \times F \times 16/12 \quad (1)$$

$$E_{\text{CO}_2} = W \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times (1 - \text{MCF} \times F) \times 44/12 \quad (2)$$

式中  $E_{\text{CH}_4}$ ——甲烷排放量

$E_{\text{CO}_2}$ ——二氧化碳排放量

$W$ ——污泥处理总质量

$\text{DOC}$ ——可降解有机碳的含量,IPCC 推荐值为50%,污泥含水率按90%计

$\text{DOC}_f$ ——实际分解的可降解有机碳的比例,推荐值为50%

$\text{MCF}$ ——甲烷修正因子,推荐值为1.0

$F$ —— $\text{CH}_4$ 的体积比,推荐值为50%

16/12 —— $\text{CH}_4/\text{C}$  分子质量比率

44/12 —— $\text{CO}_2/\text{C}$  分子质量比率

式(1)、(2)中所有的参数都来自 IPCC 的经验值。IPCC 在提出固体废弃物的碳排放核算经验值模型时,将含有有机碳的固体废弃物分为4类:①纸类和织物;②花园和公园废弃物以及其他非食品类易腐败有机物;③食物;④木料和草料。但是,各区域甚至各国对于固体废弃物的分类根据实际情况都有区别,比如我国的固体废弃物中就分为厨余、纸类、织物、竹木、灰渣5类,其中灰渣是 IPCC 没有提到的一个组分,而在我国的固体废弃物中却占了相当大的比重。作为性质与固体废弃物存在明显差异的污泥,其可降解有机碳若直接按 IPCC 推荐值简单代入进行计算,则得出的碳排放量不能准确反映实际情况。

## 2 参数分析与修正

### 2.1 可降解有机碳(DOC)修正分析

IPCC 提出的缺省值模型由于涉及的参数相对详细准确,并且各参数均有经验值可用于直接计算,因此目前各大污水厂在核算污泥碳排放情况时,均使用该模型。该核算方法主要将污水厂处理处置污泥过程中产生的实际数据与 IPCC 给出的经验值相结合,优点在于可以反映污水厂污泥处理处置过程中任意一个时间段的实际排放量,明确区分各类设施设备和自然排放源之间的差异。但其中涉及的计算参数由于来源于经验值,因此在计算过程中会造成计算结果的不准确性。研究中选择对可降解有机碳(DOC)进行修正而不是其他参数,原因在于其他参数在目前的实际计算中,已经具有一定的准确性和取值区间。

①  $\text{MCF}$  即甲烷修正因子,通常 IPCC 给出的推荐值是1.0,但目前在实际计算过程中不同国家或者地区的污水厂会根据当地泥质的特点和自身不同的处理工艺,在计算时对 IPCC 的推荐值进行修改。比如按照我国污泥处理处置的实际情况, $\text{MCF}$ 的取值一般在0.4~1.0之间;采用厌氧消化工艺的污水厂,甲烷修正因子一般取0.8;而采用填埋处置方式的污水厂,甲烷修正因子一般会直接取推荐值1.0;也有部分处理工艺相对落后的填埋场,计算填埋气时甲烷修正因子选择0.4。

② 经验值模型中甲烷的体积比,IPCC 的推荐值为50%<sup>[2]</sup>,也就是 IPCC 在计算碳排放时默认甲

烷占总排放气体的一半。但这一数值目前大部分污水处理厂都可以通过实际监测得到,即使没有监测设备或者没有收集监测数据,也可以使用氧法和碳法计算得出污水厂产气中的甲烷体积比。比如,污泥与餐厨垃圾协同厌氧消化工艺产气中甲烷比重就达到了 60% 左右<sup>[3]</sup>。

在目前实际的碳排放核算中,污水厂都会根据实际情况对上述参数进行调整,并且已经具有相对的准确性。唯独可降解有机碳 DOC 分解比例,不同的污水厂在取值时无论污泥来源何处、泥质有何差别,完全按照 IPCC 的推荐值来计算,即使有一些污泥处理项目使用不同的值,也没有可供参考的取值依据,目前还没有在国内外相关文献中找到一种专门或者较合理的计算、检测方法对具体的取值进行测算。

## 2.2 样本采集和分析方法

### 2.2.1 样品采集

我国地域辽阔,不同地理环境以及经济环境下的不同区域产生的污泥在泥质上也会存在一定差异<sup>[4]</sup>。根据 2017 年全国污水厂名录<sup>[5]</sup>,我国污水量呈现南多北少、东南多西北少的特点。北方城市的污水中进水污染物浓度较高,进水中的 COD、BOD 以及 SS 全年浓度分布呈现偏态分布,而 TKN 和 TP 呈现正态分布<sup>[6]</sup>;有机污染物浓度较高,BOD<sub>5</sub> 为 250.8 mg/L;可生化性较好,约有 38% 的 B/C 在 0.2~0.4 之间,而该比值 >0.4 的占 62%。相比之下,南方污水中的有机物浓度较低,总的 B/C 均可达到 0.5 左右;污水中氮磷含量较高<sup>[7-9]</sup>。南北污水水质的差异也决定了我国南北方以及不同地域污泥泥质的差异<sup>[10]</sup>。因此,为了确保实验测算结果相对全面并且准确,根据我国不同的地域特点以及不同区域污泥泥质的差别,分别采集黑龙江佳木斯、江苏镇江、湖南长沙及云南丽江不同污水处理厂的进泥泥样进行实验检测,测算并比较具体的可降解有机碳数值以及它们与 IPCC 经验值的差别。

### 2.2.2 实验方法分析

采用重铬酸钾法测定污泥的 DOC 含量,主要原理为将污泥泥样通过重铬酸钾法进行加热消煮,则污泥样品中的有机碳会被过量重铬酸钾硫酸溶液氧化,其中有机质的碳元素会被氧化成二氧化碳,六价铬(Cr<sup>6+</sup>)被还原成三价铬(Cr<sup>3+</sup>),将剩余的重铬酸钾溶液用硫酸亚铁标准溶液进行滴定,可以根据有

机碳被氧化前后重铬酸离子量的变化计算出有机碳的含量。

重铬酸钾法原本是用于测定化学需氧量(COD),计算中使用氧的摩尔质量。但在计算可降解有机碳 DOC 时,需要考虑的是碳的含量,因此将氧的毫摩尔质量换成碳的毫摩尔质量,即可用于计算可降解有机碳 DOC 含量。具体计算公式如下:

$$\text{DOC} = \frac{(V_0 - V) \times M \times M_c \times 1.1 \times 100}{4W} \quad (3)$$

式中  $V_0$ ——滴定空白样时消耗的硫酸亚铁标准液的体积, mL

$V$ ——滴定样品时消耗的硫酸亚铁标准液的体积, mL

$M_c$ ——碳的毫摩尔质量, 1/4 的  $M_c$  为 0.003 g/mmol

$M$ ——硫酸亚铁标准溶液的浓度, mol/L

$W$ ——烘干样品质量, g

1.1——氧化校正系数

具体的实验操作方法为:

① 取一定量的样品放置于烘箱内,调至 60 °C 烘干 12 h;

② 取出烘干样品立即进行粉碎并过 20#筛;

③ 将过完筛的样品存放于广口瓶中,敞开瓶口放回烘干箱内,继续在 60 °C 下烘干 2 h;

④ 从烘干箱内取出样品后放入干燥器中进行冷却;

⑤ 称取 0.07 g 烘干冷却后的样品并放入 250 mL 三角瓶中,加入 20 mL 浓度为 0.4 mol/L 的 1/6 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 混合溶液,摇晃均匀;

⑥ 将三角瓶放置于已加热至 185~195 °C 的甘油浴中,在 170~180 °C 下煮沸 5 min,取出直至完全冷却;

⑦ 加入 120 mL 蒸馏水,然后滴入邻菲罗啉指示剂 3 滴,并用标准 FeSO<sub>4</sub> 溶液进行滴定直至样品变为砖红色;

⑧ 记录样品变为砖红色时所消耗的 FeSO<sub>4</sub> 的体积,记为  $V$ ,给每个样品分别做 5 个平行样。

此外,给每一批样品在测定时候均做一个空白样,将此空白样在滴定时所消耗的 FeSO<sub>4</sub> 溶液的用量记为  $V_0$ 。

将实验数据代入式(3)可得出不同污水处理厂的污泥可降解有机碳,具体数值见表 1。



表 1 不同污水处理厂污泥可降解有机碳(DOC)实测值

Tab.1 Degradable organic carbon (DOC) of sludge from different sewage treatment plants

%

样品	采样位置	样品所属污水厂	可降解有机碳 DOC
样品 A	江苏省镇江市	丹徒污水处理厂	12.7
样品 B	江苏省镇江市	京口污水处理厂	16.5
样品 C	江苏省镇江市	镇江协同消化项目(3 个污水厂混合污泥)	15.3
样品 D	黑龙江省佳木斯市	佳木斯污水处理厂	16.9
样品 E	湖南省长沙市	长沙污水处理厂	13.7
样品 F	云南省丽江市	丽江第二污水处理厂	18.7
IPCC 推荐值(干污泥)			50

### 2.3 参数修正结果与对比

IPCC 缺省值模型中给出了各参数推荐值,其中干污泥的可降解有机碳 DOC 比例取值为 50%,但通过上述重铬酸钾法实际测定得到的可降解有机碳的数值与 IPCC 推荐值存在很大的差异。如表 1 所示,江苏省 3 个污泥样品中可降解有机碳比例分别是 12.7%、16.5% 和 15.3%,与 IPCC 给出的推荐值 50% 相差甚远,并且,也可以看出即使是同一个地区的污泥,其可降解有机碳的数值也存在一定差异。

将实验法测算得到的数值代入 IPCC 经验模型计算二氧化碳排放量,并与直接运用 IPCC 推荐值得到的计算结果进行对比,结果见表 2。

表 2 化学实验法 DOC 测定值与 IPCC 推荐值运用于缺省值模型得到的 CO<sub>2</sub> 计算结果比较Tab.2 Comparison of calculation results of CO<sub>2</sub> by chemical experiments and IPCC recommended DOC values applied to default value model t · d<sup>-1</sup>

样品	IPCC 推荐值计算结果(CO <sub>2</sub> )	化学实验法计算结果(CO <sub>2</sub> )	以污泥日处理 100 t 计(日 CO <sub>2</sub> 排放量)	
			IPCC 推荐值	化学实验法
A	0.458W	0.116W	45.8	11.6
B	0.458W	0.151W	45.8	15.1
C	0.458W	0.140W	45.8	14.0
D	0.458W	0.155W	45.8	15.5
E	0.458W	0.126W	45.8	12.6
F	0.458W	0.171W	45.8	17.1
注: W 为日处理污泥总量,假设 A~F 样品取样的污水厂日污泥处理量均为 100 t。				

表 2 结果显示,将实验法得出的 DOC 值代入 IPCC 经验模型中计算得出的二氧化碳排放量与使用 IPCC 推荐值计算的二氧化碳排放量存在明显差异。假设上述所有污水厂日处理污泥量为 100 t,那么使用 IPCC 推荐值计算得到的结果就是每个污水厂的二氧化碳排放量均为 45.8 t/d,而采用实验法

分别对各个污水厂污泥的可降解有机碳进行测算,得到的不同污水厂的二氧化碳排放量存在比较大的差异。另外,实验法测算出的可降解有机碳的值差别不大,最小值(12.7%)和最大值(18.7%)之间只相差了 6 个百分点,但若以日处理量上百吨的污水厂的污泥量代入进行计算,最后产生的气体排放量则会存在几吨甚至十几吨的差异。这也证明了简单使用 IPCC 给出的推荐值计算污泥处理处置过程中的碳排放量是不准确的。

### 3 结论

对现有的碳排放核算方法即 IPCC 的质量平衡法缺省值模型进行了分析与修正,并且对其中起决定作用的可降解有机碳 DOC 的取值进行了实验法测定,得到的结论如下:

① 污泥与其他固体废弃物在性质上存在差异,因此不能简单地使用 IPCC 给出的针对固体废弃物的经验模型对污泥处理处置过程中的碳排放进行核算。

② IPCC 缺省值模型中涉及的参数,只有可降解有机碳 DOC 的数值没有具体的取值方法,IPCC 的推荐值即 50% (污泥含水率按 90% 计),研究中根据不同的地域特点以及不同区域的污泥泥质的差别,使用化学实验法测算我国不同城市及地域污水厂的进泥泥样的可降解有机碳,得到的测算结果最低为 12.7%,最高达到 18.7%,显示不同地域及污水厂的污泥可降解有机碳的比重存在差异,并且和 IPCC 给出的 50% 的推荐值差别较大。

### 参考文献:

- [1] 郭广慧,杨军,陈同斌. 中国城市污泥的有机质和养分含量及其变化趋势[J]. 中国给水排水,2009,25(13):120-121.
- Guo Guanghui, Yang Jun, Chen Tongbin. Concentrations

- and variation of organic matter and nutrients in municipal sludge of China[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(13): 120 – 121 (in Chinese).
- [2] 高庆先, 杜吴鹏, 卢士庆. 中国典型城市固体废物可降解有机碳含量的测定与研究[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(3): 10 – 15.
- Gao Qingxian, Du Wupeng, Lu Shiqing. The measurement and research of degradable organic carbon of municipal solid waste in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20 (3): 10 – 15 (in Chinese).
- [3] Guo Q, Dai X H. Analysis on carbon dioxide emission reduction during the anaerobic synergetic digestion technology of sludge and kitchen waste: Taking kitchen waste synergetic digestion project in Zhenjiang as an example[J]. *Waste Manage*, 2017, 69: 360 – 364.
- [4] 杨倩, 蒋阳月, 王小军, 等. 不同区域污水处理厂活性污泥中微生物菌落结构分析[J]. *化工进展*, 2014, 33(12): 3329 – 3336.
- Yang Qian, Jiang Yangyue, Wang Xiaojun, *et al.* Diversity of bacterial groups in activated sludge samples from different areas of China[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, 33 (12): 3329 – 3336 (in Chinese).
- [5] 郑江, 宋文波, 毛联华. 城镇污水治理行业 2017 年发展综述[J]. *中国环保产业*, 2018(11): 20 – 24.
- Zheng Jiang, Song Wenbo, Mao Lianhua. Development report on town sewage treatment industry in 2017[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2018 (11): 20 – 24 (in Chinese).
- [6] 段存礼, 毕学军, 彭忠. MSBR 工艺在北方典型高浓度城镇污水处理中的应用[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(18): 71 – 75.
- Duan Cunli, Bi Xuejun, Peng Zhong. Application of MSBR process in typical high-concentration municipal wastewater treatment in northern China[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(18): 71 – 75 (in Chinese).
- [7] 霍英斌. 城市污水处理系统微量有机污染物的筛查及去除效果评价[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- Huo Yingbin. Screening and Removal Effect Evaluation of Trace Organic Pollutants in Urban Sewage Treatment System[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014 (in Chinese).
- [8] 姜应和, 张发根, 叶舟, 等. 武汉市城市污水水质特征及其处理对策[J]. *武汉理工大学学报*, 2002, 24(5): 29 – 31, 35.
- Jiang Yinghe, Zhang Fagen, Ye Zhou, *et al.* The characteristics of contaminants of municipal wastewater in Wuhan and its treating processes [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2002, 24(5): 29 – 31, 35 (in Chinese).
- [9] 侯红娟, 王洪洋, 周琪. 低碳高氮磷城市污水脱氮工艺研究[J]. *水处理技术*, 2006, 32(11): 33 – 36.
- Hou Hongjuan, Wang Hongyang, Zhou Qi. Treatment of municipal wastewater with low carbon and high nitrogen & phosphorus content [J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(11): 33 – 36 (in Chinese).
- [10] 吕丰锦, 刘俊新. 我国南北方城市污水处理厂污泥性质比较分析[J]. *给水排水*, 2016, 42(增刊): 63 – 66.
- Lü Fengjin, Liu Junxin. Comparative analysis of sludge properties in urban sewage treatment plants in north and south China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(S1): 63 – 66 (in Chinese).



作者简介: 郭恰 (1988 – ), 女, 浙江绍兴人, 博士, 工程师, 研究方向为污泥处理处置及碳排放。

E-mail: neverland1988129@163.com

收稿日期: 2019 – 07 – 03