

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.009

美国污泥调查(NSSS)概况、数据分析与启示

王涛^{1,2,3}, 王子逸³

(1. 中国机械科学研究总院环保技术与装备研究所, 北京 100044; 2. 机科发展科技股份有限公司, 北京 100044; 3. 机械工业有机固废生物处理与资源化利用工程研究中心, 北京 100044)

摘要: 美国污泥调查(NSSS)是美国污泥法规标准制定和修订的技术数据基础,介绍了NSSS的背景与目的以及流程与方法,概述了美国四次全国范围的污泥调查概况以及NSSS1988、NSSS2001、NSSS2006三次调查结论;从法规制定与技术支持体系构架、动态指标体系、调查方式方法、关注新污染物四个方面,总结了对我国污泥事业发展的启示,指出我国从未开展与NSSS类似的全国范围污泥调查,为更好地开展污泥管理工作,有必要加强此方面的调查研究。

关键词: 美国污泥调查; 污泥; 重金属; 新污染物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0054-06

General Situation and Enlightenment of the National Sewage Sludge Survey (NSSS) in the United States

WANG Tao^{1,2,3}, WANG Zi-yi³

(1. Environmental and Ecosystem Department, China Academy of Machinery Science and Technology Group, Beijing 100044, China; 2. Machinery Technology Development Co. Ltd., Beijing 100044, China; 3. Machinery Industry Engineering Center of Organic Waste Biological Treatment and Resource, Beijing 100044, China)

Abstract: The national sewage sludge survey (NSSS) is a technical database for establishing and revising the sludge management standards in the United States. Firstly, the background and purpose of NSSS and the four national sludge surveys were introduced. Secondly, the process and method of NSSS are introduced. Thirdly, the three conclusions of the national sampling surveys in 1988, 2001 and 2006 are introduced. Finally, the enlightenment for the development of China's sludge industry is summarized from four aspects, including regulatory framework and technical support system, dynamic index systems, investigation methods, and attention to emerging pollutants. And then, it is pointed out that there has never been a nationwide sludge survey similar to NSSS, and it is necessary to strengthen research in this area in order to better carry out sludge management work in China.

Key words: NSSS; sludge; heavy metal; emerging pollutants

根据美国环保署(USEPA)的污泥年度报告,2019年全美共产生污泥约 475×10^4 tDS,其中,土地利用、填埋、焚烧、地表处置以及其他处置方式占比分别为51%、22%、16%、1%、10%。总体上,土地利

用仍占主导地位,受新大气排放标准的影响,焚烧处置比例逐渐降低。

人类对污泥的认识是一个循序渐进的过程。除了重金属等传统污染物,PAHs、SVOCs、PBDEs、

PFAs 等新污染物不断被发现,对大气和土壤环境的影响也逐渐清晰,因此调查污泥中相关污染物的含量对于处置路线以及标准限值的制定至关重要。

全国污泥调查(the National Sewage Sludge Survey, NSSS)作为美国污泥法规标准制定和修订的技术数据基础,在美国污泥处理处置管理过程中发挥着极其重要的作用;其顶层设计理念、实施方法与实施效果等方面值得借鉴,并应在更深层次引起思考。

1 NSSS 的背景与目的

1972 年美国国会通过了《清洁水法》(*Clean Water Act*, CWA),该法案全面规范了美国国家排水系统的基本准则。1979 年美国环保局(USEPA)制定出台了 40 CFR Part 257: *Criteria for Classification of Solid Waste Disposal Facilities and Practices*, 其中包括了污泥(biosolids)处置和利用的相关规定,但在实践过程中暴露出一些问题,如标准指标限值制定过严而脱离实际。1987 年,美国在对 CWA 第 405 (d) 节进行修订时,要求 USEPA 制定针对污泥污染物控制的专门标准^[1]。

1988 年,USEPA 下属部门 Office of Science and Technology 组织开展了全美历史上最大规模的 NSSS,并在此基础上形成了污泥污染物控制标准征求意见稿。1993 年 2 月 19 日,40 CFR Part 503: *Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge* 正式发布,与 CWA 一道成为 30 年来美国污泥处理处置领域的法律基石。

40 CFR Part 503 涉及土地利用、地表处置以及焚烧等三种处置方法,从污染物限值、运行标准、管理条例三个方面进行了全面规范。结构上,40 CFR Part 503 分为总则、土地利用、地表处置、减少病原体和对病媒的吸引、焚烧等 5 个正文部分,以及年污泥利用率计算和病原体灭活方法等 2 个附录。其中 503.32 条款根据病原体浓度(单位质量的病原体数量),将污泥分为 A、B 两个等级。

40 CFR Part 503 每两年审核一次,并根据需要,针对最新关注的污染物开展调查,也称为 TNSSS (the Targeted National Sewage Sludge Survey),调查数据以及对数据的分析与评估结果作为标准修订的依据。美国联邦污泥法规框架与修订流程图见图 1。

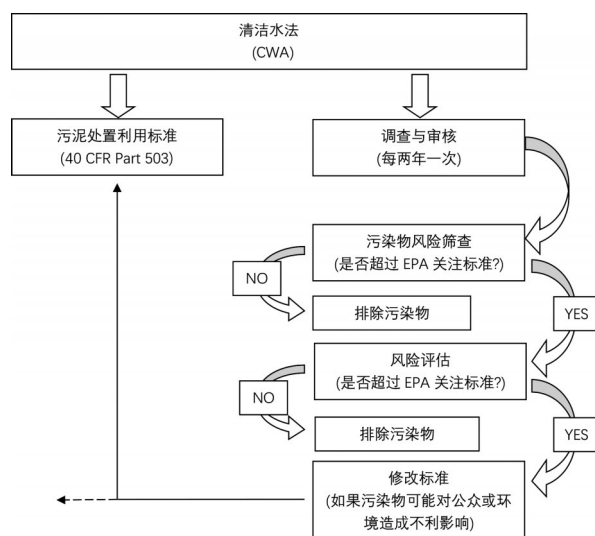


图1 美国污泥法规框架与修订流程

Fig.1 Sludge regulation framework and revision process in the United States

历史上,美国针对污泥曾先后开展 4 次全国范围的技术数据调查:

① 1979 年—1980 年,USEPA 组织开展对全美 40 座公立污水处理厂(POTWs)的运行情况进行调查,以了解污水处理厂重点污染物的去向和影响,并估算污水污泥中的污染物浓度,形成了“40 City Study”报告。

② 1988 年 8 月—1989 年 9 月,USEPA 组织开展第一次 NSSS,采集了 180 座 POTWs 的 208 份污泥样本,共涉及 412 项指标。1992 年 11 月出版了污泥处理利用标准 40 CFR Part 503: *Final Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge*。

③ 2001 年 2 月—3 月,USEPA 组织开展第二次 NSSS,目的是为 40 CFR Part 503 第二版提案(64 FR 72045)提供数据支撑。此次调查共采集了 94 座 POTWs 的 113 份污泥样本,主要针对污泥中二噁英及呋喃类物质浓度进行分析,包括 17 种 PCDDs/PCDFs 和 12 种 PCBs。2007 年 9 月出版了污泥调查报告:2001 *National Sewage Sludge Survey Report*。

④ 2006 年 8 月—2007 年 3 月,USEPA 组织开展第三次 NSSS(针对新污染物的调查,即 TNSSS),采集了 74 座 POTWs 的 84 份污泥样本,共涉及 145 项指标,包括 4 种阴离子、28 种金属、4 种 PAHs、2 种 SVOCs、11 种 PBDEs、72 种药物成分、25 种类固醇激素,其中特别增加了 2003 年标准审查时 USEPA 确定的 9 种物质(硝酸盐、亚硝酸盐、钡、铍、锰、银、荧

蒽、芘、4-氯苯胺)。2009年1月出版了 *Targeted National Sewage Sludge Survey Sampling and Analysis Technical Report*。

2 NSSS 流程与方法

① 确定目标

以NSSS1988为例,其目的主要有以下4个:a. 基于环境风险,评估污染物限值与控制措施;b. 进行监管影响分析(RIA);c. 标准制定总体风险分析(ARA);d. 标准后续修订依据。而NSSS2001的目的主要是为40 CFR Part 50第二版提案(64 FR 72045)提供数据支撑,为全国数据库补充二噁英及呋喃类物质浓度。

② 确定范围

以NSSS1988为例,首先根据USEPA“Office of Municipal Pollution Control”1986年的统计数据,将11 407座二级污水处理厂作为研究对象,按照污水厂的处理规模($>378\ 000$ 、 $37\ 800 \sim 378\ 000$ 、 $3\ 780 \sim 37\ 800$ 、 $<3\ 780\ \text{m}^3/\text{d}$)与污泥处置运行情况(土地利用、焚烧、表面处置、未计入成本的处置方式、未知处理处置方式、停止运行)两个维度,最终划定24个调查分区。

③ 数据采集与分析

以NSSS1988为例,数据采集包括两种方式:问卷调查和采样分析调查。

问卷调查部分收集到462座污水处理厂的相关信息,包含服务范围、污水厂运行、污泥处理处置技术路线、预处理要求、检测频率、财务等一般信息,以及污泥处置与资源化利用和可能的替代方案等具体信息。

采样分析调查共收集到208份污泥样本,由合同实验室分别进行了多达412项指标的化验分析,项目清单是根据CWA第307(a):“priority pollutants, toxic compounds highlighted in the ‘Domestic Sewage Study’”,以及《资源保护法》(PCRA)附录Ⅷ:“pollutants, and contaminants of suspected concern in municipal sludge”编制而成。

为实施上述分析,专门对EPA1624和EPA1625标准方法进行了修改,以满足污泥中VOCs和SVOCs的检测要求;杀虫剂和多氯联苯分析采用EPA1618标准,二噁英及呋喃分析采用EPA1613标准,金属、无机物和典型有机物采用EPA相关标准

方法分析。

④ 数据处理

以NSSS1988为例,最终对关注的39项指标进行了数据统计分析。

根据调查数据,在假设污染物浓度服从对数正态分布的前提下,采用修正后的最大似然估计方法(MLE),得到各指标全国加权平均值。通过一系列数据分析,给出第90百分位数、第95百分位数、第98百分位数、第99百分位数,最终在此基础上,给出标准指标浓度限值(建议值)。

⑤ 形成报告

NSSS1988最终报告正文部分共10章,此外还包括3个附件:Part A1-Data Listings, Part A2-NSSS Data Conventions Data Base, Part A3-Listing of Pollutant-Concentration Data from 16 POTWs in the 40 City Study。NSSS2001最终报告正文部分共7章。NSSS2006最终报告正文部分共7章,此外还包括3个附件:Appendix A-Solids Leaching Procedure for Anions, Appendix B-Method Modifications for the PBDE Analyses, Appendix C-QC Acceptance Criteria。

3 NSSS 调查结果

1988年NSSS共涉及412项指标,最终对39种污染物进行了全国加权平均值分析,包括重金属、有机污染物、磷、总凯氏氮等。以重金属为例,最终得到了全国加权平均值,并推算出各指标数值分布情况,在此基础上确定了最高排放浓度指标限值。1988年全美178座污水厂中污泥重金属检出情况如下:As、Cd、Cr、Cu、Pb、Hg、Mo、Ni、Se、Zn检出比例分别为80%、69%、91%、100%、80%、64%、53%、67%、68%、100%,浓度加权平均值分别为9.52、8.74、124.00、724.00、131.00、5.30、9.63、46.00、5.58、1 220 mg/kg;CV值分别为1.78、2.49、2.64、1.25、1.36、3.07、1.78、2.24、1.41、1.30。

2001年NSSS通过对94个POTWS的113个样品分析,USEPA成功地收集和分析了94座污水处理厂的113份污泥样品。分析结果显示,污泥中二噁英类物质毒性当量(TEQ)为3~718 ng/kgDS。绝大多数样本的TEQ为7~55 ng/kgDS,只有7个样本超过100 ng/kgDS。

2006年NSSS调查主要针对采用二级及以上工艺且处理规模 $>13\ 780\ \text{m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂,共

3 337 座,总处理规模占全美污水处理总量的 94%; 污水厂的 84 份污泥样本,进行了 145 个指标成分的 2006 年 8 月—2007 年 3 月,USEPA 从中抽取了 74 座 化验分析,结果见表 1~3。

表 1 NSSS2006 调查结果之金属、阴离子、PAHs/SVOCs、PBDEs

Tab.1 Metals, anions, PAHs/SVOCs, PBDE in NSSS2006 survey results

类别	分析指标	检出样本数量/份	最小值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	最大值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	类别	分析指标	检出样本数量/份	最小值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	最大值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)
金属	铝	84	1 400	57 300	金属	钒	84	2.04	617
	锑	72	0.45	26.6		钇	84	0.70	26.3
	砷	84	1.18	49.2		锌	84	216	8 550
	钡	84	75.1	3460	阴离子	氟化物	84	7.6	234
	铍	83	0.04	2.3		硝酸盐/亚硝酸盐	84	1.6	6 120
	硼	80	5.70	204.0		水溶性磷	84	11.0	9 550
	镉	84	0.21	11.8	PAHs 和 SVOCs	4-氯苯胺	63	0.051	5.9
	钙	84	9 480	311 000		2-甲基萘	39	0.010	4.6
	铬	84	6.74	1 160		荧蒽	77	0.045	12
	钴	84	0.87	290		芘	72	0.044	14
	铜	84	115	2 580		邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯	84	0.657	310
	铁	84	1 575	299 000		苯并(a)芘	64	0.063	4.5
	铅	84	5.81	450		4-氯苯胺	63	0.051	5.9
	镁	84	696	18 400	PBDEs	BDE-28	84	0.002 2	0.16
	锰	84	34.8	14 900		BDE-47	84	0.073	5
	汞	84	0.17	8.3		BDE-66	84	0.001 8	0.11
	钼	84	2.51	132		BDE-85	84	0.003 2	0.15
	镍	84	7.44	526		BDE-99	84	0.064	4
	磷	84	2 620	118 000		BDE-100	84	0.013	1.1
	硒	84	1.10	24.7		BDE-138	56	0.001 9	0.04
	银	84	1.94	856		BDE-153	84	0.009 1	0.41
	钠	84	154	26 600		BDE-154	84	0.007 7	0.44
	铊	80	0.02	1.7		BDE-183	84	0.002 1	0.12
	锡	78	7.50	522		BDE-209	83	0.15	17
	钛	83	18.50	7 020					

注：水溶性磷比例最小值为 0.000 65,最大值为 0.339 20。

表 2 NSSS2006 调查结果之药物成分

Tab.2 Pharmaceuticals in NSSS2006 survey results

分析指标	检出样本数量/份	最小值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	最大值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	分析指标	检出样本数量/份	最小值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	最大值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)
乙酰氨基酚	2	1 120	1 300	异氯托曲环素	1	3 140	3 140
沙丁胺醇	1	23.2	23.2	林可霉素	3	13.9	33.4
无水金霉素	1	125	125	洛美沙星	2	33.3	39.8
酸酐四环素	52	94.3	1 960	二甲双胍	6	550	1 160
阿奇霉素	80	10.2	6 530	咪康唑	80	14.2	9 210
咖啡因	39	65.1	1 110	米诺环素	32	351	8 650
卡巴多	0	N/A	N/A	萘普生	44	20.9	1 020
卡马西平	80	8.74	6 030	诺氟沙星	29	99.3	1 290
头孢噻肟	0	N/A	N/A	诺孕酯	0	N/A	N/A
金霉素	1	1 010	1 010	氧氟沙星	83	73.9	58 100
西咪替丁	74	7.59	9 780	奥美普林	1	5.91	5.91
环丙沙星	84	74.5	47 500	苯唑西林	0	N/A	N/A
克拉霉素	45	8.68	617	噁唑酸	1	39.4	39.4
克林沙星	0	N/A	N/A	土霉素	29	18.6	467
氯唑西林	0	N/A	N/A	青霉素 G	0	N/A	N/A
可待因	20	9.59	328	青霉素 V	0	N/A	N/A

续表2 (Continued)

分析指标	检出样本数量/份	最小值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	最大值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	分析指标	检出样本数量/份	最小值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	最大值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)
可替宁	39	11.4	690	雷尼替丁	46	3.83	2 250
去氢肾上腺素	19	3.48	24.6	罗红霉素	3	14.3	22.8
去甲基金霉素	3	96	200	萨拉氟沙星	2	179	1 980
地高辛配基	0	N/A	N/A	磺胺氯吡啶	2	35.9	58.7
地高辛	0	N/A	N/A	磺胺嘧啶	3	22.9	140
1,7-二甲基黄嘌呤	4	1 130	9 580	磺胺二甲氧嘧啶	5	3.58	62.2
地尔硫卓	69	1.39	225	磺胺甲基嘧啶	1	5.61	5.61
苯海拉明	84	36.7	5 730	磺胺二甲嘧啶	2	21.5	23.2
强力霉素	76	50.8	5 090	磺胺甲噁唑	0	N/A	N/A
恩诺沙星	14	12.1	66	磺胺甲噁唑	30	3.91	651
4-差向金霉素	0	N/A	N/A	磺胺	8	191	15 600
4-差向脱水四环素	31	126	2 160	磺胺噻唑	1	21	21
4-差向甲状旁腺素	1	974	974	四环素	81	38.3	5 270
4-差向土霉素	8	35.7	54.9	噻苯咪唑	58	8.42	239
4-差向四环素盐酸盐	80	47.2	4 380	三氯卡班	84	187	441 000
红霉素	77	3.1	180	三氯生	79	430	133 000
氟甲唑	0	N/A	N/A	甲氧苄啶	24	12.4	204
氟西汀	79	12.4	3 130	泰乐菌素	0	N/A	N/A
吉非罗齐	76	21.1	2 650	维吉尼亚霉素	15	43.5	469
布洛芬	54	99.5	11 900	华法林	0	N/A	N/A

表3 NSSS2006调查结果之类固醇激素

Tab.3 Steroids and hormones in NSSS2006 survey results

分析指标	检出样本数量/份	最小值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)	最大值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DS}$)
雄烯二酮	32	108	1 520
雄酮	50	21.3	1 030
菜油甾醇	84	2 840	524 000
胆甾醇	84	3 860	4 590 000
胆固醇	81	18 700	5 390 000
粪醇	84	7 720	43 700 000
24-脱氢胆固醇	58	2 730	94 400
17 α -二氢喹啉	1	98.4	98.4
表粪甾烷醇	83	868	6 030 000
马奎宁	1	60.6	60.6
马烯雌酮	15	22.3	107
麦角固醇	53	4 530	91 900
17 α -雌二醇	5	16.1	48.8
17 β -雌二醇	11	22	355
β -雌二醇3-苯甲酸酯	18	30.2	1 850
17 α -乙炔基雌二醇	0	N/A	N/A
雌三醇	18	7.56	232
雌酚酮	60	26.7	965
炔诺酮	5	21	1 360
甲基炔诺酮	4	43.8	1 300
黄体酮	19	143	1 290
β -谷甾醇	73	24 400	1 640 000
β -豆甾烷醇	83	3 440	1 330 000
豆甾醇	76	11 000	806 000
甾酮	17	30.8	2 040

4 启示

4.1 法规制定与技术支持体系构架

美国污泥行业管理遵循一套完整、可操作性强、极具权威性的法规体系,顶层的CWA与40 CFR Part 503基础构成了体系核心内容,每两年对法规体系进行一次严格而非形式化的审查,建立在不定期开展的NSSS数据收集与分析结论基础之上。这需要强有力的资金支持,但这是标准科学性的主要保障。

目前,我国对污泥处理处置技术路线的争论较多,但各方观点多基于各自商业利益而非客观数据;法规与标准纷繁复杂,多头管理造成权威性丧失;标准的制修订实际上由企业推动,缺乏资金的保障,难以做到全面客观,从而也难以落地。

4.2 动态指标体系

我国从第一部污泥领域标准《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284—84)出台一直到《农用污泥污染物控制》(GB 4284—2018)修订^[2],其间出台了10余部国标、行标,但污染物指标构成基本相同,标准限值也变动不大,这与我国快速发展的经济局面以及环保形势显然不相匹配。

4.3 调查方式方法

NSSS主要的调查方法是直接采用,委托合同实验室进行检测分析,直接得到一手数据,这样做将

耗费大量人力、财力,但相对于环境安全与行业发展是值得的。这也是美国多年坚持污泥土地利用处置路线为主的“底气”所在。反观我国污泥数据多由运营单位上报,主管部门决策时难以将其作为依据。

4.4 关注新型污染物

从后两次 NSSS 结果看,新污染物受到广泛关注,如 NSSS2001 的二噁英及呋喃类物质, NSSS2006 的 PAHs、SVOCs 等。

我国污泥相关标准由于修订更新间隔时间较长,现行标准中极少涉及新污染物^[3],应进一步加强此方面的研究。

5 结语

我国从未开展过与 NSSS 类似的全国范围的污泥调查,是污泥管理工作的重大缺陷,应清楚意识到:与标准的引用、转化不同,美国 NSSS 数据和结论对于我国来讲是无法借鉴的,仅作参考。

参考文献:

- [1] 王涛,简映. 40 CFR Part 503 污水污泥利用和处置标准解读与启示[J]. 中国标准化,2020(4):157-162.
WANG Tao, JIAN Ying. Interpretation and implication of 40 CFR Part 503 sewage sludge utilization and disposal standard [J]. China Standardization, 2020

(4): 157-162(in Chinese).

- [2] 王涛. 论我国农用污泥相关标准的制定及实践经验[J]. 中国环保产业,2019(6):50-55.

WANG Tao. Discussion on relevant standard formulation of farm sludge and practice experience in China [J]. China's Environmental Protection Industry, 2019 (6): 50-55(in Chinese).

- [3] 王涛,林阳. 城镇污水处理厂污泥处置标准浅析[J]. 中国环保产业,2010(11):28-31.

WANG Tao, LIN Yang. Analysis on sludge disposal standard of urban sewage treatment plant [J]. China Environmental Protection Industry, 2010 (11): 28-31 (in Chinese).

作者简介:王涛(1974—),男,辽宁沈阳人,大学本科,研究员,博士生导师,机械工业有机固废生物处理与资源化利用工程研究中心副主任兼总工程师,中国机械科学研究总院环保技术与装备研究所(机科发展科技股份有限公司环保事业部)副总工程师,主要从事污泥等有机固废处理处置、环境修复领域工艺与设备方面的研究及工程设计等方面工作,公开发表论文 130 余篇。

E-mail:wangtao3214@126.com

收稿日期:2021-03-01

修回日期:2021-03-03

(编辑:丁彩娟)

完善水利基础设施网络
增强水安全保障能力