

述评与讨论

剩余污泥中 PPCPs 量化评价方法研究

郝晓地, 杨文宇, 曹达启

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷未来污水处理
技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 药物和个人护理品 (Pharmaceutical and Personal Care Products, PPCPs) 作为一种新兴痕量有机污染物已开始备受国际关注。PPCPs 通过水环境迁移与生物积累等方式几乎已遍布整个地球, 它们会对人类健康及其他生物生长造成潜在危害。PPCPs 一般随污水收集而进入污水处理厂; 但因其难以生物降解而很难被分解; 除微量 PPCPs 可通过逸散、光降解等方式释放大气外, 大部分 PPCPs 要么随出水 (直接) 进入环境、要么被吸附于活性污泥表面 (随后可能间接进入环境)。因此, 需要对污泥吸附 PPCPs 进行量化表征。借助固-液分配系数 (K_d 值), 建立了一种简便、快速预测 PPCPs 的计算方法。通过广泛收集现有文献中 PPCPs 的 K_d 值, 结合北京地区污水处理厂的真实情况, 分别计算出剩余污泥中 33 种常见 PPCPs 含量。尽管大多数 PPCPs 在剩余污泥中的吸附率不是很高 ($\leq 20\%$), 但少数 PPCPs 向污泥中的绝对转移量不可小觑, 高达全部 33 种 PPCPs 向污泥中总转移量的 88%。避免污泥中 PPCPs 再次进入环境, 污泥焚烧是一种有效途径。

关键词: 药物和个人护理品; 污水处理; 剩余污泥; 量化评价; 固-液分配系数

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)16-0009-07

Study on Quantitatively Assessing Method of PPCPs in Excess Sludge

HAO Xiao-di, YANG Wen-yu, CAO Da-qi

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: As an emerging trace organic contaminant, pharmaceutical and personal care products (PPCPs) have been paid more and more attention from the world. PPCPs have been spreading almost all over the world through migration in water environment and bioaccumulation in ecology, which could put a healthy threat to human beings and other creatures. PPCPs usually enters wastewater treatment plants (WWTPs) along with collected sewage. Due to the difficulty in the biodegradation for PPCPs, it is hardly be removed via biological process. Except that trace PPCPs can release into atmosphere by escape and photodegradation, most PPCPs either enters the environment with effluent (directly) or is adsorbed on the surface of activated sludge (which may enter the environment indirectly). Therefore, it is necessary to quantitatively characterize the adsorption of PPCPs by sludge. In this study, a simple and fast predicting method on the amount of PPCPs adsorbed in excess sludge is established, based on the solid-liquid partition coefficient (K_d). By extensively collecting K_d values of PPCPs and applying Beijing's practical data, 33 common PPCPs contents in excess sludge were calculated respectively. Although the adsorbing

efficiencies are not very high ($\leq 20\%$) for most of PPCPs, the absolute transfer amount of a few PPCPs to sludge can not be underestimated, up to 88% of the total transfer amount of all 33 kinds of PPCPs to sludge. To prevent PPCPs from entering the environment again, sludge incineration is an effective way.

Key words: pharmaceutical and personal care products (PPCPs); wastewater treatment; excess sludge; quantitative assessment; solid-liquid partition coefficient

不断进步的痕量污染物检测技术与持续上升的民众环保意识使水中微量有机污染物及其危害日益获得关注^[1]。早在1999年,美国学者基于微量有机污染物就提出药物和个人护理品(Pharmaceutical and Personal Care Products, PPCPs)的概念,从而引发对这一类痕量有机污染物的广泛研究。国际上之所以对PPCPs广泛关注是因为它们对人类健康存在潜在风险,而且对其他水生生物乃至陆地生物亦构成一定威胁;即使在痕量浓度情况下,很多PPCPs即可造成严重的毒理学效应,特别是当它们以复杂的混合物形式共存时;而且,大部分PPCPs难以生物降解,并很容易通过食物链形成生物累积而广泛分布、存在于环境之中。

我国已成为世界上最大的PPCPs排放国^[2],水环境中PPCPs分布广度和赋存丰度均很高,河湖等天然水体中检出的PPCPs类别已达百余种,检出浓度为0.9~19 000 ng/L^[3]。因此,PPCPs污染水环境的问题必须重视并亟待研究。目前,有关PPCPs的研究多集中于污水及水环境中检测及分解(生物与化学转化、光降解等)方面,而被活性污泥吸附的PPCPs缺乏快速定量检测方法与评价手段^[4]。鉴于此,广泛收集现有文献中有关PPCPs固-液分配系数(K_d 值),提出一种量化评价活性污泥中PPCPs含量的简便方法。同时,以北京地区污水厂为例,进一步量化北京剩余污泥中PPCPs含量、吸附率。最后,阐述解决含PPCPs污泥的思路与方案。

1 污水中的PPCPs

1.1 来龙去脉

废弃药物未经处理和生物排泄、排遗中的残留,人类使用个人护理品和外用药物后的洗漱和沐浴污水,制药废水排放等均能使PPCPs通过市政管网而进入污水处理厂^[4]。PPCPs大部分为人工化学合成物质,其化学结构稳定、难以生物降解,所以,进入污水处理厂的PPCPs除少量通过逸散、光降解等方式释放大气外,大部分PPCPs要么随出水(直接)进入环境,要么被吸附于活性污泥表面(间接进入环

境)^[1]。因此,污水处理厂既是PPCPs的主要受纳者,也是进入环境的重要源头。换句话说,污水处理厂主要以污泥吸附方式去除一定量PPCPs。

1.2 生态危害

含量不高但数量惊人的PPCPs进入环境后,亦难以生物降解,多残留于环境,会通过饮用水与食物链方式重新摄入人体。环境中的PPCPs,如抗生素等药物,会筛选出抗性基因,使得细菌、病毒耐药性逐步增强,导致依赖抗生素维系生产的农林业、畜牧业经济成本不断增高;更为可怕的是,对多种抗生素具有抗药性的病原体大量出现,这些“超级细菌”最终会使人类陷于“无药可施”的可怕境地^[5]。此外,PPCPs还会抑制藻类及动植物生长,造成水生生物内分泌紊乱,致使动物因器官衰竭而死^[5]。

2 量化评价方法

既然污水厂对PPCPs的去除主要局限于污泥吸附,所以需要了解污泥对PPCPs的吸附性能,或者说希望准确知道污泥中PPCPs的含量大小,以确定PPCPs去除率。这就需要建立量化评价污泥吸附PPCPs的有效方法。本研究拟通过固-液分配系数(K_d 值)来定量评价污泥吸附PPCPs的性能,并通过收集文献 K_d 值建立一种量化评价体系。

2.1 K_d 计算公式

检测污水处理出水中PPCPs相对容易,而对污泥中PPCPs的检测则显得困难。PPCPs在污泥吸附过程会达到动态平衡,固、液两相间PPCPs分布可以用固-液分配系数 K_d 值描述;其定义为混合液达到吸附平衡时,溶质(PPCPs)在固(污泥)、液(污水)两相中的浓度比值,可反映PPCPs在固、液两相中的迁移能力及分离效能。对于一种PPCPs而言,当达到吸附动态平衡时,PPCPs吸附于固相(污泥)中的浓度可由下式计算^[1]:

$$C_s = C_L \cdot K_d \quad (1)$$

式中 C_s ——吸附平衡时,固相(污泥)中PPCPs浓度, $\mu\text{g}/\text{kgDS}$

C_L ——吸附平衡时,液相(水)中PPCPs浓

度, $\mu\text{g/L}$

K_d ——固-液分配系数, L/kg

剩余污泥中 PPCPs 占污水处理厂排放 PPCPs 总量的比例,即,活性污泥对 PPCPs 的吸附率(η)可由下式计算:

$$\eta = \frac{C_s \cdot Y}{C_s \cdot Y + C_L} \times 100\% = \frac{K_d \cdot Y}{K_d \cdot Y + 1} \times 100\% \tag{2}$$

式中 Y ——污泥产率(处理每单位污水排出的剩余污泥量), kgDS/L

剩余污泥中 PPCPs 年吸附转移量计算如下:

$$M_p = C_s \cdot M_s \times 10^{-3} \tag{3}$$

式中 M_p ——剩余污泥中 PPCPs 年吸附转移量, kg/a

M_s ——剩余污泥年生成量, tDS/a

综上,只要参照 PPCPs 相应 K_d 值,结合当地污水处理厂污泥产率、剩余污泥年生成量,当明确出水中 PPCPs 浓度后便能简便计算/预测出剩余污泥中 PPCPs 浓度、吸附率和年吸附转移量。

2.2 收集 K_d 值

文献调研表明,目前有 160 余种 PPCPs 具有可参考的 K_d 值,表 1 列出其中 50 种常见 PPCPs 的 K_d 值^[6-16]。这些 K_d 值均来源于实际污水处理厂的检测数据;不同文献中因不同检测方法出现的 K_d 值差别取平均值,并用标准差表征 K_d 值离散程度(表 1 中括号内数字)。同时,亦对 PPCPs 进行了归纳分类,包括了抗生素、激素、降血脂药、抗抑郁药、抗阻胺剂等 18 类 PPCPs。从表 1 可知,同种 PPCPs 在不同类型污泥中存在 K_d 值差异,可能是不同类型污泥生物相与物理化学性质不尽相同的结果^[17]。

表 1 5 种类型污泥中 50 种 PPCPs 固-液分配系数(K_d)

Tab. 1 Solid-liquid partition coefficients (K_d) of 50 PPCPs in five types of activated sludge $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$

名称	种类	初沉池污泥 K_d	活性污泥 K_d	二沉池污泥 K_d	MBR 污泥 K_d	消化污泥 K_d
阿替洛尔	β 受体阻滞剂	200.3(226.2)	75.8(47.9)	1 750.0(212.1)	68.1(80.1)	11.0
壬基苯酚	表面活性剂	1 613.0		1 149.0		
维思通	肌肉松弛剂	1 432.0(661.9)	765.0(135.8)	490.0(226.3)		
雌二醇	激素	560.0	701.3(146.5)	230.0		250.0
雌三醇	激素	58.0	58.5(6.4)			
雌酮	激素	636.0	467.3(275.5)	5 753.3(5 087.3)		300.0
睾酮	激素	178.0	564.3(723.8)			
黄体酮	激素	750.0	1 900.0	1 100.0		
炔雌醇	激素	647.5(522.6)	951.0(687.7)	349.0		300.0
雄烯二酮	激素	1 218.3(1 154.3)	145.0(15.6)	1 152.3(1 127.8)		
雄甾酮	激素	534.0	499.0(113.1)			
阿托伐他汀	降血脂药	143.1(66.1)	145.5(74.2)	147.5(26.2)		
地尔硫卓	降血脂药		22.0	440.0	794.3	
吉非罗齐	降血脂药		34.0(15.6)	46.8(55.4)	19.3	66 524.2(115 183.1)
氯贝酸	降血脂药	35.7(2.4)		40.2(42.6)		5.0
美托洛尔	降血脂药	43.7(17.5)		122.0(22.3)	125.9	15.3(3.9)
维拉帕米	降血脂药	1 722.0(110.3)	1 366.5(190.2)	515.0(162.6)		
辛伐他汀	降血脂药	954.3(352.2)		981.2(96.8)		1 347.0
地西泮	抗精神药	167.5(174.7)	149.2(79.3)	21.0		400.0
阿奇霉素	抗生素	195.2(225.8)	635.3(673.5)	817.8(33.0)	1 584.9	
红霉素	抗生素	124.1(160.2)	72.7(22.0)	48.1(21.9)	117.6(92.8)	110.0(113.1)
环丙沙星	抗生素		24 450.0(16 895.9)		79 432.8	
磺胺吡啶	抗生素		275.5(27.6)			
磺胺二甲嘧啶	抗生素	15.2(2.8)		28.0(17.7)		15.0
磺胺甲恶唑	抗生素	138.3(190.1)	109.1(111.5)	171.3(181.2)	67.5(10.4)	28.0(24.0)
甲氧苄啶	抗生素	497.6(576.9)	142.1(83.3)	1 637.8(2 265.7)	228.8(89.4)	40.0(39.6)
克拉霉素	抗生素		530.7(583.4)		233.9	
罗红霉素	抗生素	56.7(27.2)	95.0(7.1)	191.6(100.3)		40.0
诺氟沙星	抗生素	288.9(249.0)	8 019.0(11 071.9)	11 310.1(18 698.9)	125 892.5	

续表 1 (Continued)

名称	种类	初沉池污泥 K_d	活性污泥 K_d	二沉池污泥 K_d	MBR 污泥 K_d	消化污泥 K_d
氧氟沙星	抗生素	305.1(237.1)	250.0	793.9(270.5)	15 848.9	
阿米替林	抗抑郁药	7 461.1(4 512.1)	2 660.8(1 907.0)	2 800.0	12 589.3	1 049.0
氟西汀	抗抑郁药	10 000.0	1 767.7(665.5)	4 300.8(2 687.5)		700.0
帕罗西汀	抗抑郁药	14 000.0		8 450.0(212.1)	31 622.8	
舍曲林	抗抑郁药	35 000.0		17 000.0		1 883.0
克霉唑	抗真菌剂	32 000.0		34 000.0		8 128.0
安泰乐	抗阻胺剂	989.0(298.4)	813.5(7.8)	660.0(84.9)	63 095.7	
苯海拉明	抗阻胺剂		243.1(103.4)		3 162.3	
普萘洛尔	抗阻胺剂	641.0	366.0		460.3(54.4)	331.0
佳乐麝香	人造麝香	4 920.0	2 514.0(121.6)	1 810.0		3 700.0
吐纳麝香	人造麝香	5 300.0	4 673.5(1 876.0)	2 400.0		3 000.0
避蚊胺	杀虫剂	100.0	61.7(27.8)			
双酚 A	塑化剂	910.5(843.6)	468.0(52.3)	829.0		
三氯卡班	消毒剂		18 852.0(9 690.2)	25 704.0	630 957.2	
三氯生	消毒剂	3 887.1(2 198.0)	3 195.3(983.2)	25 063.0(29 183.7)	398 107.0	
布洛芬	消炎药	149.6(325.1)	156.2(104.2)	1 021.5(1 999.5)		100.0
萘普生	消炎药	217.0	121.5(22.3)	1 144.4(1 015.1)	31 622.8	36.0
酮洛芬	消炎药	226.0	96.9(114.4)		118.5(65.8)	
咖啡因	兴奋剂	174.4(170.7)	110.0(43.6)	679.8(589.4)	316 227.8	14.0
卡马西平	镇痲剂	287.3(335.6)	80.7(59.8)	104.3(88.7)	176.3(25.1)	43.0
双氯芬酸	止痛药	235.2(177.3)	134.7(23.6)	135.7(89.9)	259.0(87.7)	105.0

3 污泥中 PPCPs 量化评价

北京作为我国首都,人口密度极大(达 1 350 人/ km^2),也是全球医药、化妆品主要消费地区^[18]。所以,以北京为例量化评价污泥中 PPCPs 含量、去

除率等具有一定普遍意义。

3.1 出水中 PPCPs 浓度

统计得出北京的污水处理厂出水中 33 种常见 PPCPs 浓度,结果如表 2 所示^[19-24]。

表 2 北京污水处理厂二级出水中常见 PPCPs 浓度

Tab. 2 Concentrations of different PPCPs from secondary effluents of WWTPs in Beijing

ng · L⁻¹

化合物	最小值	最大值	平均值(标准差)	化合物	最小值	最大值	平均值(标准差)
雄烯二酮	4.50	12.00	7.59(3.15)	布洛芬	139.73	139.73	139.73
雄甾酮	ND	4.30	0.61(1.63)	酮洛芬	ND	104.00	72.00(48.34)
双酚 A	5.00	5.00	5.00	美托洛尔	105.00	300.00	225.80(72.84)
咖啡因	26.00	342.00	132.17(108.86)	萘普生	162.50	162.50	162.50
卡马西平	10.50	602.00	304.34(248.74)	诺氟沙星	9.40	200.00	77.68(60.60)
环丙沙星	ND	55.00	19.63(17.71)	氧氟沙星	150.00	1 200.00	662.50(320.57)
氯贝酸	16.30	146.00	90.83(59.23)	黄体酮	0.80	2.30	1.40(0.51)
避蚊胺	99.70	881.00	469.94(349.12)	普萘洛尔	3.70	3.70	3.70
双氯芬酸	140.00	675.00	324.80(210.63)	罗红霉素	54.00	360.00	167.25(97.09)
地尔硫卓	49.70	49.70	49.70	磺胺二甲嘧啶	1.60	11.00	5.56(3.31)
红霉素	51.00	1 647.00	447.67(551.96)	磺胺甲恶唑	130.00	460.00	297.43(118.02)
雌二醇	ND	0.80	0.36(0.23)	磺胺吡啶	36.00	330.00	217.00(111.22)
雌酮	ND	8.60	1.64(2.85)	睾酮	0.20	1.20	0.79(0.35)
炔雌醇	3.20	3.20	3.20	吐纳麝香	55.00	55.00	55.00
氟西汀	37.97	37.97	37.97	三氯卡班	256.27	256.27	256.27
佳乐麝香	90.00	90.00	90.00	甲氧苄啶	ND	826.00	317.48(277.81)
吉非罗齐	66.90	66.90	66.90				

注: ND 表示低于仪器检出限值。

表 2 显示,北京污水处理厂出水中各类 PPCPs 浓度从低于仪器检出限值到 1 647.00 ng/L 之间不等。PPCPs 浓度平均值超过 100 ng/L 有 14 种,数量超 1/3;平均值超过 300 ng/L 有 6 种,分别为氧氟沙星(662.50 ng/L)、避蚊胺(469.94 ng/L)、红霉素(447.67 ng/L)、双氯芬酸(324.80 ng/L)、甲氧苄啶(317.48 ng/L)、卡马西平(304.34 ng/L)。

3.2 剩余污泥中 PPCPs 浓度

北京污水处理厂多采用 A²/O 及其工艺变型,

剩余污泥主要为二沉池污泥,物理化学性质大体相同。为增加数据样本量及可靠性,采用活性污泥与剩余污泥平均 K_d 作为计算值,标记为 $K_{d_{avg}}$ 。利用表 1 和表 2 数据,将 $K_{d_{avg}}$ 值北京地区出水 33 种 PPCPs 平均浓度代入式(1),得到剩余污泥中各种 PPCPs 含量值(见图 1)。计算结果显示,剩余污泥中有 9 种 PPCPs 浓度超过 100 $\mu\text{g/kg}$,三氯卡班浓度甚至达到了 5 709.18 $\mu\text{g/kg}$ 。计算值与实际污水厂检测值相近^[25],表明基于 K_d 的量化评价方法可靠、可信。

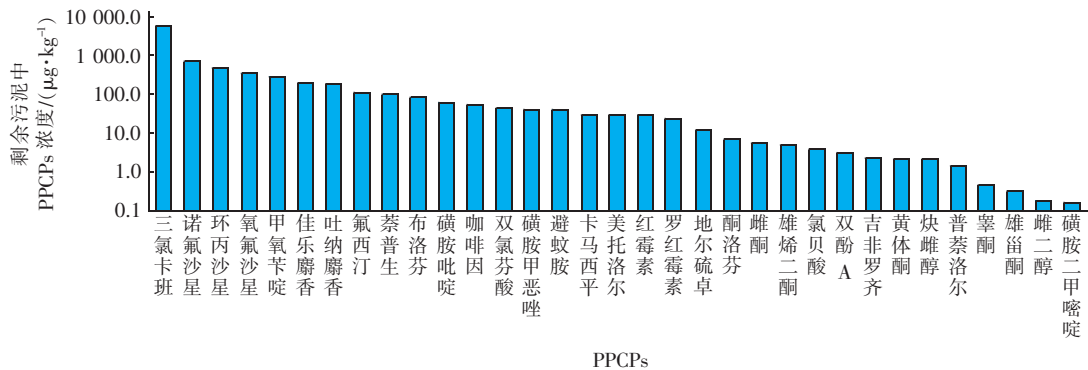


图 1 北京污水处理厂剩余污泥中 PPCPs 含量

Fig. 1 Contents of PPCPs in excess sludge of WWTPs in Beijing

3.3 剩余污泥中 PPCPs 吸附率与年转移量

根据《城镇排水统计年鉴 2014》,北京年污水处理量为 $1.29 \times 10^9 \text{ m}^3$,剩余污泥年产量为 $2.34 \times 10^5 \text{ tDS}$;二者相除即为平均污泥产率($1.81 \times 10^{-4} \text{ kgDS/L}$)。将这些数据与图 1 中含量代入式(2)、(3),可分别计算出 PPCPs 吸附率与年转移量,结果如图 2 所示。

计算结果显示,相对于二级出水来说,PPCPs 在

剩余污泥中的含量并非很高;其中,25 种 PPCPs 吸附率均低于 20%,仅 3 种高于 60%,也有吸附率达 81.6%(环丙沙星)。然而,从绝对量角度来看,剩余污泥中 PPCPs 含量并不可小觑,年转移量列前 5 的分别是三氯卡班(1 337.79 kg/a)、诺氟沙星(175.90 kg/a)、环丙沙星(112.44 kg/a)、氧氟沙星(81.03 kg/a)、甲氧苄啶(66.21 kg/a),占 33 种 PPCPs 年转移总量(2 023.37 kg/a)的 87.6%。

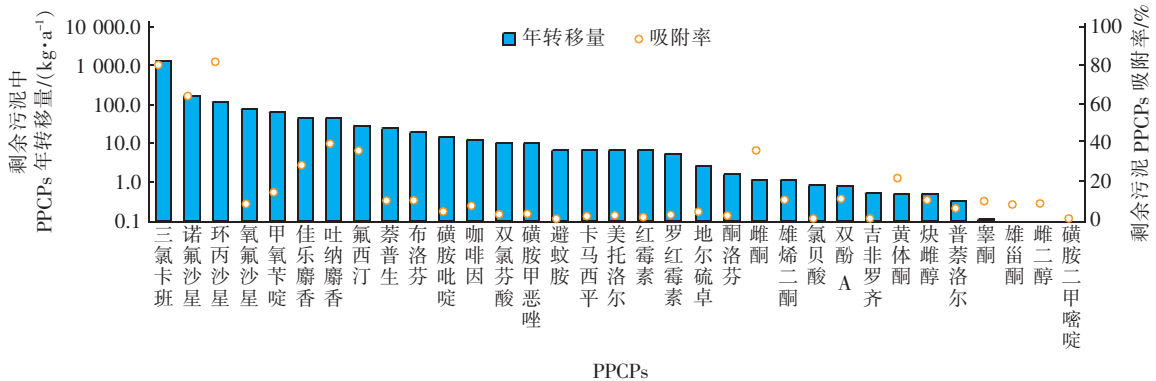


图 2 北京污水处理厂剩余污泥中 PPCPs 吸附率和年转移量

Fig. 2 Adsorption efficiencies and annually transferred amounts of PPCPs in excess sludge of WWTPs in Beijing

4 处置策略

上述计算结果显示,大多数 PPCPs 在剩余污泥

中的吸附率虽然不高,但少数 PPCPs 绝对转移量不可小觑。如果含有 PPCPs 的剩余污泥主要用于填

埋、农业/绿地回田,当外部环境变化时,污泥中所含 PPCPs 会释放到环境之中,对地下水 and 地表水均会构成威胁^[1]。因此,要使吸附进入污泥的 PPCPs 不再进入环境中,最好的办法应该是污泥焚烧处理^[26],这样可将 PPCPs 彻底稳定。

5 结语

药物和个人护理品 (PPCPs) 可以使人“延年益寿”和“青春永驻”,但 PPCPs 残留进入环境问题已遍布全球,不仅人类健康受到威胁,就连远至南极的企鹅也难幸免。

为此,需要了解进入污水及污水处理厂的 PPCPs 的迁移转化规律,特别是 PPCPs 难以生物降解特性下污泥对 PPCPs 吸附去除率。这就需要寻求一种快速、简便量化评价污泥中 PPCPs 含量的方法。通过固-液分配系数(K_d)汇集、归纳,提出一种简单预测剩余污泥中 PPCPs 含量的计算方法,并据此可以计算 PPCPs 吸附率和年转移量。

以北京污水处理厂为例,分别计算出剩余污泥中 33 种常见 PPCPs 含量。虽然大多数 PPCPs 在剩余污泥中的吸附率($\leq 20\%$)不是很高,但少数 PPCPs 绝对转移量不可小觑,高达 33 种 PPCPs 总转移量的 88%。

为杜绝转移至剩余污泥中的 PPCPs 再次进入环境,最为妥善的处置办法是实施污泥焚烧。

参考文献:

- [1] 曹达啟,王振,郝晓地,等. 剩余污泥吸附痕量典型药物影响因素[J]. 化工学报,2017,68(8):3266-3274.
Cao Daqi, Wang Zhen, Hao Xiaodi, *et al.* Controlling factors of excess sludge on adsorbing trace typical pharmaceuticals[J]. CIESC Journal, 2017, 68(8): 3266-3274 (in Chinese).
- [2] Gao J, O'Brien J, Du P, *et al.* Measuring selected PPCPs in wastewater to estimate the population in different cities in China[J]. Sci Total Environ, 2016, 568: 164-170.
- [3] 王丹,隋倩,赵文涛,等. 中国地表水环境中药物和个人护理品的研究进展[J]. 科学通报,2014,59(9):743-751.
Wang Dan, Sui Qian, Zhao Wentao, *et al.* Pharmaceutical and personal care products in the surface water of China: A review[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(9): 743-751 (in Chinese).
- [4] Gao J, Huang J, Chen W, *et al.* Fate and removal of typical pharmaceutical and personal care products in a wastewater treatment plant from Beijing: A mass balance study[J]. Front Environ Sci Eng, 2016, 10(3): 491-501.
- [5] Liu J L, Wong M H. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): A review on environmental contamination in China[J]. Environ Int, 2013, 59: 208-224.
- [6] Kim M, Guerra P, Shah A, *et al.* Removal of pharmaceuticals and personal care products in a membrane bioreactor wastewater treatment plant[J]. Water Sci Technol, 2014, 69(11): 2221-2229.
- [7] Hörsing M, Ledin A, Grabic R, *et al.* Determination of sorption of seventy-five pharmaceuticals in sewage sludge[J]. Water Res, 2011, 45(15): 4470-4482.
- [8] Stevens-Garmon J, Drewes J E, Khan S J, *et al.* Sorption of emerging trace organic compounds onto wastewater sludge solids[J]. Water Res, 2011, 45(11): 3417-3426.
- [9] Stasinakis A S, Thomaidis N S, Arvaniti O S, *et al.* Contribution of primary and secondary treatment on the removal of benzothiazoles, benzotriazoles, endocrine disruptors, pharmaceuticals and perfluorinated compounds in a sewage treatment plant[J]. Sci Total Environ, 2013, 463: 1067-1075.
- [10] Alvarino T, Suarez S, Katsou E, *et al.* Removal of PPCPs from the sludge supernatant in a one stage nitrification/anammox process[J]. Water Res, 2015, 68: 701-709.
- [11] Baalbaki Z, Sultana T, Maere T, *et al.* Fate and mass balance of contaminants of emerging concern during wastewater treatment determined using the fractionated approach[J]. Sci Total Environ, 2016, 573: 1147-1158.
- [12] Blair B, Nikolaus A, Hedman C, *et al.* Evaluating the degradation, sorption, and negative mass balances of pharmaceuticals and personal care products during wastewater treatment[J]. Chemosphere, 2015, 134: 395-401.
- [13] Yan Q, Gao X, Chen Y P, *et al.* Occurrence, fate and ecotoxicological assessment of pharmaceutically active compounds in wastewater and sludge from wastewater treatment plants in Chongqing, the Three Gorges Reservoir Area[J]. Sci Total Environ, 2014, 470: 618-630.
- [14] Hyland K C, Dickenson E R V, Drewes J E, *et al.*

- Sorption of ionized and neutral emerging trace organic compounds onto activated sludge from different wastewater treatment configurations [J]. *Water Res*, 2012, 46(6): 1958 – 1968.
- [15] Fernandez-Fontaina E, Omil F, Lema J M, *et al.* Influence of nitrifying conditions on the biodegradation and sorption of emerging micropollutants [J]. *Water Res*, 2012, 46(16): 5434 – 5444.
- [16] Jia A, Wan Y, Xiao Y, *et al.* Occurrence and fate of quinolone and fluoroquinolone antibiotics in a municipal sewage treatment plant [J]. *Water Res*, 2012, 46(2): 387 – 394.
- [17] Berthod L, Roberts G, Sharpe A, *et al.* Effect of sewage sludge type on the partitioning behaviour of pharmaceuticals: A meta-analysis [J]. *Environ Sci; Water Res Technol*, 2016, 2(1): 154 – 163.
- [18] Wang B, Dai G, Deng S, *et al.* Linking the environmental loads to the fate of PPCPs in Beijing: Considering both the treated and untreated wastewater sources [J]. *Environ Pollut*, 2015, 202: 153 – 159.
- [19] Chang H, Wan Y, Wu S, *et al.* Occurrence of androgens and progestogens in wastewater treatment plants and receiving river waters: Comparison to estrogens [J]. *Water Res*, 2011, 45(2): 732 – 740.
- [20] Xue W, Wu C, Xiao K, *et al.* Elimination and fate of selected micro-organic pollutants in a full-scale anaerobic/anoxic/aerobic process combined with membrane bioreactor for municipal wastewater reclamation [J]. *Water Res*, 2010, 44(20): 5999 – 6010.
- [21] 赵高峰, 杨林, 周怀东, 等. 北京某污水处理厂出水中药物和个人护理品的污染现状 [J]. *中国环境监测*, 2011, 27(S1): 63 – 67.
- Zhao Gaofeng, Yang Lin, Zhou Huaidong, *et al.* Pollution status of pharmaceuticals and personal care productions in a certain sewage plant in Beijing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, 27(S1): 63 – 67 (in Chinese).
- [22] Sui Q, Huang J, Deng S, *et al.* Seasonal variation in the occurrence and removal of pharmaceuticals and personal care products in different biological wastewater treatment processes [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(8): 3341 – 3348.
- [23] Zhou H, Wu C, Huang X, *et al.* Occurrence of selected pharmaceuticals and caffeine in sewage treatment plants and receiving rivers in Beijing, China [J]. *Water Environ Res*, 2010, 82(11): 2239 – 2248.
- [24] Gao L, Shi Y, Li W, *et al.* Occurrence of antibiotics in eight sewage treatment plants in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2012, 86(6): 665 – 671.
- [25] Chen Y, Yu G, Cao Q, *et al.* Occurrence and environmental implications of pharmaceuticals in Chinese municipal sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 2013, 93(9): 1765 – 1772.
- [26] 郝晓地, 陈奇, 李季, 等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 35 – 42.
- Hao Xiaodi, Chen Qi, Li Ji, *et al.* Incineration after drying is an ultimate approach to handling excess sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 35 – 42 (in Chinese).



作者简介: 郝晓地 (1960 –), 男, 山西柳林人, 博士, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术, 现为国际水协期刊《Water Research》区域主编 (Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2019 – 01 – 14