

不同回用用途下典型城市污水再生处理工艺的生命周期评价分析^{*}

侯兴^{1,2} 张文龙^{1,2} 罗小勇^{2,3} 熊维^{1,2} 李轶^{1,2}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室 南京 210098; 2. 河海大学 环境学院 南京 210098;
3. 长江水资源保护科学研究所 武汉 430051)

摘要: 对3种典型城市污水再生处理工艺(微絮凝+砂滤+消毒(MSD)、混凝+转盘过滤+消毒(CRD)和混凝沉淀+超滤+消毒(CUD))进行生命周期环境影响定量评价,探讨了不同工艺在不同回用用途下的环境表现。结果表明:MSD工艺在富营养化(EP)方面的影响略高,归一化结果为 9.32×10^{-5} ,其他方面环境影响均小于CRD和CUD工艺;不同回用用途的污水再生可在某些方面抵消原需水产生的环境影响,有一定环境效益,不同出水用途的替代抵消作用可影响环境表现。以砂滤为主的典型城市污水再生处理工艺在出水用于工业冷却水时,归一化加权结果与其他两种工艺的25%和7.5%,具有较好的应用前景。

关键词: 污水再生; 回用用途; 生命周期评价; 环境影响

DOI: 10.13205/j.hjgc.201702031

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF TYPICAL URBAN WASTEWATER RECLAMATION ALTERNATIVES WITH DIFFERENT RECYCLING USAGE

HOU Xing^{1,2}, ZHANG Wen-long^{1,2}, LUO Xiao-yong^{2,3}, XIONG Wei^{1,2}, LI Yi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China)

Abstract: Three typical urban wastewater reclamation alternatives (MSD, CRD and CUD) were researched using a life cycle assessment method to quantify life cycle environmental impact. Selections of the wastewater reuse treatment processes were considered from the perspective of resource and energy consumption. Characterized and normalized data were calculated and then the main aspects and key factors of three alternatives were analyzed to see different environmental performances. These three alternatives all had advantages and disadvantages in different environmental impact categories, where MSD process had the best environmental performance. When considering the different usages of recycling, wastewater reclamation could offset the environmental impact of demanded water in some areas, resulting in environmental benefits. To a large degree, the offsetting under different recycling usages would affect final environmental performance. The sand-based filtration process with the industrial cooling water application was recommended in this study.

Keywords: sewage recycling; recycling usage; life cycle assessment; environmental influence

0 引言

随着城市建设规模扩大、人口增多,水体遭到严重污染,由水污染造成的水资源短缺已成为现代社会

^{*} 江苏省高校品牌专业建设工程资助项目(PPY2015A051);河海大学大学生创新训练计划(2015102941046);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-002-2)。

收稿日期:2016-05-16

最受关注的问题和制约经济发展的重要因素^[1-2]。在这种严峻形势下,污水再生利用以其可观的社会、环境和经济效益,成为解决水资源短缺问题的主要研究方向^[3]。城市污水回用应以水质要求较低且回用风险性小的工业冷却水、景观环境回用和城市杂用为主^[4]。结合地方政策、用户所需的水质以及经济成本

决定^[5]。污水再生处理工艺的选择主要遵循技术经济原则,技术上使出水水质满足再生回用标准,经济上使成本尽可能低^[6-7]。传统的污水回用途径和再生处理工艺的选择方式一定程度上忽略了整个污水处理过程和回用后资源与能源的消耗情况,以及其对环境产生的直接和间接影响,从水资源与经济节约角度来看,具有一定的局限性^[8-9]。

生命周期分析评价是从区域、国家乃至全球的广度及可持续发展的角度来观察问题^[10],能深入了解污水处理工艺的环境负荷,以便决策者从环境角度选择污水处理工艺^[8]。国内关于污水再生利用的LCA研究仍处于尝试和探索阶段:王巧^[11]研究了城市污水再生利用工程的LCA模型,提出了减小或消除某些环境影响的方法和建议;童乐^[12]等评价了工业园区典型污水再生处理系统全膜法的生命周期环境效应,从生命周期角度选取了环境影响最小的污水再生处理技术。国外关于污水再生利用的LCA研究比较成熟:Meneses^[13]等将污水再生应用于农业灌溉和城市杂用,分析比较了紫外、臭氧等污水再生处理技术的环境影响;Friedrich^[14]等以市政回用为目的,利用LCA分析评价了污水再生利用的环境影响。国内生命周期评价的研究较多,但是主要偏重于综合价值模型、量化计算以及再生处理的生命周期成本,对污水再生处理工艺的案例研究较少。

本文采用生命周期法对典型城市污水再生处理工艺的环境影响进行评价,明确污水再生处理过程中的资源消耗量、能源消耗量以及其对环境产生的直接和间接影响;从环境角度选择污水再生处理工艺;同时结合回用用途比较典型城市污水再生处理工艺的环境效益,对行业进行水处理技术和出水用途的选择提供参考。

1 研究方法

1.1 目标与范围的确定

目标和范围的确定是LCA研究的第一步,也是其后评价过程的出发点和立足点^[8]。本文针对典型城市污水再生处理工艺进行生命周期评价分析,选取了微絮凝+砂滤+消毒(MSD)、混凝+转盘过滤+消毒(CRD)和混凝沉淀+超滤+消毒(CUD)3种工艺作为研究目标。为使评价结果更加精确,生命周期的系统边界应包含污水再生处理系统所有的产污环节,包括污水一级、二级处理和再生处理工艺。为防止其他因素干扰,尽可能体现3种不同典型污水再生处

理工艺的区别,选择二级处理均采用A²O工艺的污水处理厂作为研究对象。生命周期评价的研究范围包括污水处理厂施工建造、运营维护和交通运输3个阶段。由于缺少相关数据,此研究不包括报废拆除阶段。系统生命周期评价范围如图1所示。

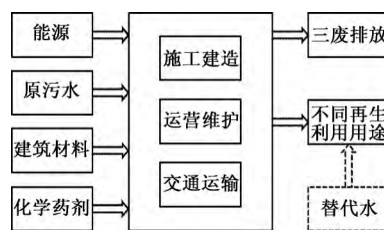


图1 生命周期范围界定

Fig. 1 Life cycle scope definition

3座污水处理厂出水分别用作工业冷却水、景观河道补水和市政杂用水,出水水质均优于GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级A标准,且分别满足工业冷却水、景观河道补水、市政杂用水等水质标准。为方便比较,采用污水再生处理系统处理1 t污水为功能单位,假设3座污水处理厂的运行时间均为50年。

1.2 清单分析

清单分析是量化和评价所研究的产品、工艺或活动在整个生命周期过程中资源和能源的使用,以及环境释放的过程,是LCA研究工作的基础^[8]。本研究主要数据来自实地调研所获得的数据,包括污水水质、剩余污泥主要污染物含量、能源消耗量、药剂消耗量及运输情况等;所需背景数据(如能源生产、药剂生产、污泥焚烧等)优先采用GaBi软件数据库中可代表中国情况的相关数据。对研究涉及到的主要数据进行如下假设:

1) 能耗:本研究系统所消耗的电量主要来自国家电网,其生产数据来自PE数据库中的中国电网数据,能源构成为:77%的煤、17.6%的水电和5.4%的其他能源(核电、重燃料油、天然气、生物燃料等)。

2) 药剂:污水厂运行过程中消耗的各类药剂如絮凝剂、消毒剂、碳源的生产数据均来自Ecoinvent数据库。用于絮凝和除磷的PAC和PAM等在数据库中无法直接获取,但是由于其生产采用丙烯晴为原料,因此选择PE数据库中的丙烯晴替代。

3) 气体排放:污水处理过程中释放的CH₄和N₂O均采用《省级温室气体清单编制指南》和《IPCC国家温室气体清单优良作法指南》所推荐的排放系

数法计算。甲烷排放因子来自文献 [15]。

4) 污泥处理: 污泥中重金属浓度系数来自文献 [16]。污泥为焚烧处理, 焚烧飞灰中重金属百分比选自文献 [17-18]。

5) 交通运输: 假设污水处理厂使用的各种药剂均来自距污水厂 30 km 的工厂, 污泥焚烧厂距污水厂 50 km。药剂运输使用最大载重 3.3 t 的中型卡车, 污泥运输采用最大载重 17.3 t 的重型卡车。GaBi 数据库提供了卡车运输背景数据, 包括柴油燃烧等。

基于以上假设, 表 1 列出了以处理 1 m³ 污水为功能单位时, 不同污水再生处理系统输入和输出的主要材料和能源消耗情况。

表 1 典型城市污水再生处理工艺生命周期清单分析

Table 1 Life cycle inventory analysis of typical wastewater reclamation processes									
输入		MSD	CRD	CUD	输出		MSD	CRD	CUD
进水	水量 /m ³	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	出水	水量 /m ³	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	COD/kg	1.64E-01	3.60E-01	2.94E-01		COD/kg	2.03E-02	2.67E-02	2.38E-02
	BOD ₅ /kg	6.01E-02	1.96E-01	9.80E-02		BOD ₅ /kg	1.94E-03	4.20E-03	1.71E-03
	SS/kg	5.20E-02	3.07E-01	2.25E-01		SS/kg	6.70E-03	7.31E-03	0.00E+00
	NH ₃ -N/kg	2.32E-02	2.36E-02	1.76E-02		NH ₃ -N/kg	4.20E-04	1.19E-03	8.00E-03
	TN/kg	2.70E-02	4.19E-02	2.66E-02		TN/kg	1.17E-02	1.30E-02	1.50E-02
	TP/kg	3.00E-03	1.09E-02	3.54E-03		TP/kg	2.80E-04	2.60E-04	2.10E-04
能耗	电量/(kW·h)	3.50E-01	2.68E-01	4.37E-01	污泥	污泥/kg	4.48E-01	7.20E-01	9.09E-01
建筑材料	混凝土/kg	1.31E-02	8.62E-03	2.30E-02		气体	CH ₄ /kg	7.49E-04	1.74E-03
	钢筋/kg	2.62E-04	1.72E-04	4.60E-04			N ₂ O/kg	1.20E-04	2.27E-04
	PVDF/kg			2.92E-05	重金属		Cd/kg	1.71E-08	2.48E-08
药剂	PAC/kg	2.50E-02		2.50E-02			Pb/kg	2.16E-06	3.12E-06
	PFS/kg		5.40E-02				Cr/kg	1.19E-06	1.72E-06
	PAM/kg	5.20E-04	2.65E-04	1.00E-01			As/kg	8.20E-07	1.19E-06
	ClO ₂ /kg	1.00E-02	2.50E-03	1.05E-02			Hg/kg	1.90E-07	2.75E-07
	O ₃ /kg	5.00E-04		3.00E-03			Cu/kg	9.14E-06	1.32E-05
	NaAc/kg		1.00E-02				Ni/kg	1.15E-07	1.67E-07
	NaOH/kg			5.00E-03			Zn/kg	3.37E-05	4.89E-05

2 结果与讨论

2.1 典型城市污水再生处理工艺的生命周期评价结果比较

基于生命周期清单分析结果, 采用 GaBi6.0 软件内置数据库及 CML2001 方法对 3 种污水再生处理工艺进行生命周期环境影响评价, 核算各类环境影响指标的具体数值。环境影响评价指标包括: 非生物资源消耗(ADP)、酸化(AP)、富营养化(EP)、淡水水生生态毒性(FAETP)、全球变暖(GWP)、人体毒性(HTP)、海洋水生生态毒性(MAETP)、臭氧层消耗(ODP)、光化学氧化(POCP)和陆地生态毒性(TETP)。为比较各环境影响指标的重要性, 对特征化结果进行归一化处理(将特征化结果除以归一化因子的值), 归一化因子采用 CML2001 的世界年人均值(CML2001-Nov.09)。

2.1.1 不同阶段生命周期评价归一化结果

对生命周期评价的特征化数据进行归一化处理, 得到 3 种工艺的 3 个阶段(施工建造、运营维护和交通运输)的归一化数据, 如表 2 所示。运营阶段的归一化数据比其他两阶段大 1~2 个数量级, 由此可得

3 种工艺的共同点, 运营阶段是产生不同种类环境影响的关键环节。相对于污水处理厂 50 年的运营时间来说, 施工和交通阶段产生的环境影响低于总环境影响的 10%。

2.1.2 生命周期评价结果比较

总环境影响归一化结果如表 3 和图 2 所示。3 种工艺同时在酸化、富营养化、全球变暖、人体毒性、海洋水生生态毒性和陆地生态毒性方面对环境影响较大。MSD 工艺除了在富营养化方面产生的影响略高于 CUD 工艺外, 其他方面的影响值均低于另外两种工艺。这是由于该工艺出水水质与 CUD 工艺相比略差, 富营养化影响值较高, 但由于其运营过程中消耗的化学药剂以及用电量最小, 故其他环境影响值较小。CRD 工艺在富营养化、全球变暖、人体毒性、光化学氧化等方面的影响最大, 而 CUD 工艺则在酸化、淡水水生生态毒性、海洋水生生态毒性、陆地生态毒性等方面的影响最大。

将 CML2001 环境影响指标分为人类健康、生态系统和资源 3 大类, 其中人类健康包括人体毒性、臭氧层消耗、全球变暖和光化学氧化; 生态系统包括酸

表 2 典型城市污水再生处理工艺不同阶段生命周期评价归一化结果

Table 2 Life cycle normalized results of typical wastewater treatment processes in different phases

影响指标	MSD			CRD			CUD		
	施工	运营	交通	施工	运营	交通	施工	运营	交通
ADP	1.73E-17	6.05E-16	6.06E-19	1.15E-17	3.28E-16	4.33E-19	5.52E-17	1.15E-15	5.13E-19
AP	1.99E-17	4.10E-15	8.24E-17	1.39E-17	4.82E-15	6.41E-17	5.20E-17	5.34E-15	7.65E-17
EP	4.05E-18	9.28E-15	2.87E-17	2.65E-18	1.02E-14	2.26E-17	8.96E-18	7.80E-15	2.70E-17
FAETP	1.46E-18	1.28E-15	1.21E-17	9.73E-19	1.79E-15	8.62E-18	1.02E-16	1.80E-15	1.02E-17
GWP	4.51E-17	6.64E-15	8.37E-17	3.26E-17	1.00E-14	5.96E-17	1.02E-16	8.66E-15	7.07E-17
HTP	1.18E-17	8.96E-15	4.47E-18	8.05E-18	1.44E-14	3.31E-18	7.29E-17	1.29E-14	3.94E-18
MAETP	7.51E-17	1.66E-14	4.30E-17	6.01E-17	1.82E-14	3.07E-17	1.65E-16	2.24E-14	3.64E-17
ODP	1.28E-20	1.02E-20	1.65E-24	1.29E-20	1.60E-20	1.18E-24	2.26E-20	1.56E-20	1.40E-24
POCP	1.01E-17	3.39E-15	-2.71E-16	9.56E-18	4.64E-15	-2.14E-16	3.41E-17	4.54E-15	-2.56E-16
TETP	5.05E-18	1.05E-14	1.19E-18	3.43E-18	1.49E-14	8.52E-19	1.15E-17	1.51E-14	1.01E-18

表 3 典型城市污水再生处理工艺的 LCA 归一化结果

Table 3 Life cycle normalized results of typical wastewater treatment processes

环境影响指标	MSD	CRD	CUD
ADP	6.23E-16	6.81E-16	1.20E-15
AP	4.20E-15	4.90E-15	5.47E-15
EP	9.32E-15	1.02E-14	7.84E-15
FAETP	1.30E-15	1.80E-15	1.92E-15
GWP	6.77E-15	1.01E-14	8.83E-15
HTP	8.98E-15	1.44E-14	1.30E-14
MAETP	1.67E-14	1.83E-14	2.26E-14
ODP	2.30E-20	2.89E-20	3.82E-20
POCP	3.13E-15	4.44E-15	4.31E-15
TETP	1.05E-14	1.49E-14	1.52E-14

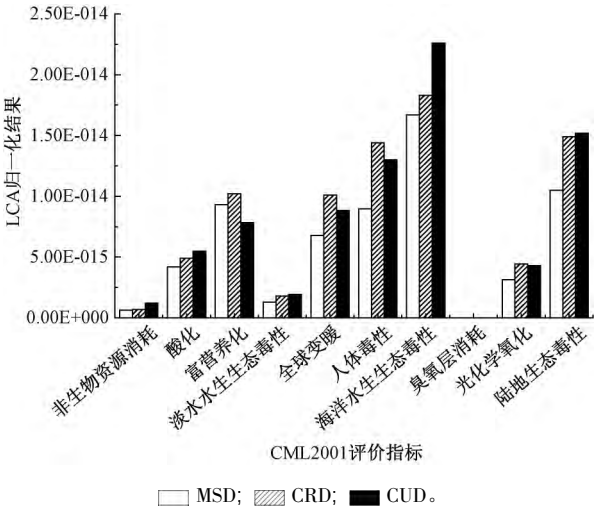


图 2 典型城市污水再生处理工艺的 LCA 归一化结果
Fig. 2 Life cycle normalized results of typical wastewater treatment processes

化、富营养化、淡水水生生态毒性、海洋水生生态毒性和陆地生态毒性;资源包括非生物资源消耗。人类健康、生态系统和资源三类环境影响分别赋以权重因子 0.4、0.4 和 0.2^[19] ,则 3 种再生处理工艺的 LCA 加权

综合结果如图 3 所示。

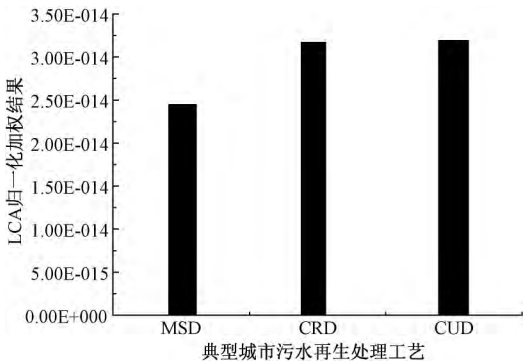


图 3 典型城市污水再生处理工艺的 LCA 归一化加权综合结果
Fig. 3 Life cycle normalized weighted results of typical wastewater treatment processes

由图 3 可见:3 种污水再生处理工艺中,MSD 工艺的环境表现最佳,其 LCA 归一化加权结果为 2.45E-14,CRD 和 CUD 两种工艺的环境影响结果相差不大,其 LCA 加权结果分别为 3.17E-14 和 3.19E-14。造成差异的原因在于 MSD 工艺主要依靠滤料截留污染物,能源、资源消耗较少,而另两种工艺在处理过程中消耗了更多的电能、絮凝剂及其他材料(如超滤所需的 PVDF 膜材料)。

2.2 不同用途下典型城市污水再生处理工艺生命周期评价结果比较

考虑不同回用用途,得到 3 种回用情景:微絮凝+砂滤+消毒工艺处理后用于工业冷却水(MSD-I 情景),混凝+转盘过滤+消毒工艺处理后用于景观河道补水(CRD-L 情景),混凝沉淀+超滤+消毒工艺处理后用于市政杂用水(CUD-M 情景)。3 种情景的环境影响归一化结果如图 4 所示。

将污水回用环节加入总评价后发现,回用水对原

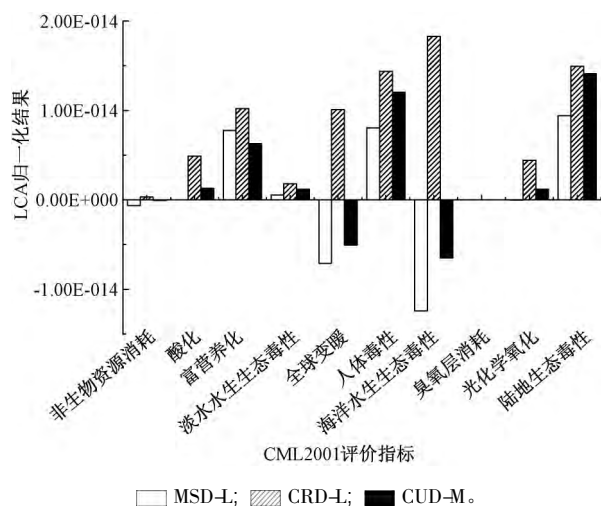


图4 不同情景的生命周期归一化结果

Fig. 4 Life cycle normalized results of different scenarios

需求水起到了替代抵消作用。值得注意的是,与CRD-L情景不同,MSD-L情景和CUD-M情景在非生物资源消耗、全球变暖、海洋水生生态毒性、臭氧层消耗等方面的环境影响归一化数据为负值,说明当采用回用水替代工业冷却水和市政杂用水时,两者之间的环境影响相互抵消,从而产生了环境效益。比较MSD-L情景与CUD-M情景可发现,除富营养化指标外,MSD-L情景所造成的环境影响均优于CUD-M情景,这主要是由于CUD-M情景采用的超滤技术与砂滤技术相比对电量和化学药剂的消耗量更大。

对比3种情景的环境影响,CRD-L情景在所有环境影响指标方面的归一化结果均低于另外两种情景。从生命周期角度解释,CRD-L情景出水作为景观河道补水补充了河道水量,但由于出水中包含的污染物仍然进入了自然水体,可看作污染物的直接排放,故无法起到替代抵消作用。因此,从环境角度来看,污水再生回用比直接排放更具环境效益(景观河道补水可视为直接排放)。

3种情景的LCA加权综合结果如图5所示。可知:MSD-L情景(微絮凝+砂滤+消毒工艺处理后用做工业冷却水)的环境表现最好,其LCA加权结果为 $2.39\text{E-}15$,其次是CUD-M情景,CRD-L情景表现最差,其LCA加权结果分别是MSD-L情景的4.1倍和13.3倍。总体来说,以砂滤为主的典型城市污水再生处理工艺在出水用于工业冷却水时具有最佳的环境表现。

3 结论

本文对典型城市污水再生处理工艺进行生命周

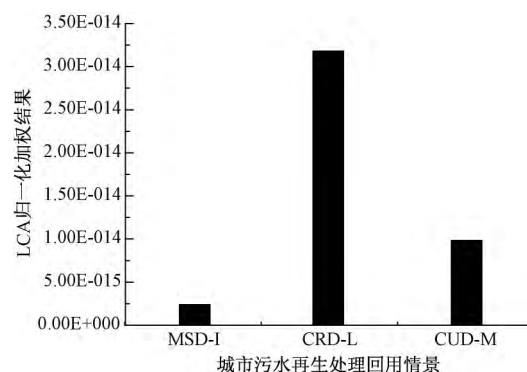


图5 不同情景的生命周期加权综合结果

Fig. 5 Life cycle normalized weighted results of different scenarios

期环境影响定量评价,从资源与能源的消耗和环境角度考虑污水再生处理技术的选择,计算了3种工艺对环境在各方面产生影响的特征化和归一化数据;同时为3种工艺设置了3种不同的回用情景,探讨了不同工艺在不同回用用途下的环境表现。结果表明:3种污水再生处理工艺中,MSD工艺在富营养化(EP)方面的影响略高,归一化结果为 $9.32\text{E-}15$,具有最好的环境表现,其LCA归一化加权结果为 $2.45\text{E-}14$ 。CRD和CUD两种工艺的环境影响结果相差不大,为MSD工艺的1.3倍。考虑不同的回用用途时,污水再生可在某些方面抵消原需水产生的环境影响,产生一定环境效益。不同的出水用途导致的替代抵消作用在很大程度上影响了最终的环境表现,以砂滤为主的典型城市污水再生处理工艺在出水用于工业冷却水时,归一化加权结果仅为另两种的25%和7.5%,具有最佳的应用前景。

参考文献

- [1] Xu Q, Chen Q, Ma J, et al. Water saving and energy reduction through pressure management in urban water distribution networks [J]. Water Resources Management 2014, 28(11): 3715-3726.
- [2] Liu J, Yang W. Water sustainability for china and beyond [J]. Science 2012, 6095(337): 649-650.
- [3] 张文超, 张建新, 白宇, 等. 国内外污水再生利用发展分析[J]. 中国建设信息(水工业市场), 2010(8): 32-34.
- [4] 王效琴, 王启山, 胡晓亮. 我国城市污水回用途径分析[J]. 海河水利 2007(1): 13-15.
- [5] 王培风. 城市污水再生回用技术途径[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2006, 18(3): 59-61.
- [6] 郭有智, 杨彦, 于璐, 等. 城市污水处理回用工艺关键要素分析[J]. 水利科技与经济 2015 21(11): 66-68.
- [7] 方先金, 戴前进, 邵辉煌. 城镇污水再生利用技术选择[J]. 中国建设信息(水工业市场), 2010(8): 13-16.

(下转第189页)

- 特征[J]. 分析化学, 2002, 30(11): 1303-1307.
- [7] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1984: 112-123.
- [8] 杨小莉, 陆婉珍. 用 Langmuir-Blodgett 技术研究原油中沥青质和胶质膜性质[J]. 石油学报. 石油加工, 1999, 15(3): 5-10.
- [9] Liu P, Zhu D, Zhang H. et al. Sorption of polar and nonpolar aromatic compounds to four surface soils of eastern China [J]. Environ Pollut, 2008, 156(3): 1053-1060.
- [10] 程亮, 张保林, 侯翠红. 高剪切条件下纳米腐殖酸的制备与表征[J]. 化工学报, 2012, 63(8): 2648-2654.
- [11] 宋海燕, 尹友谊, 宋建中. 不同来源腐殖酸的化学组成与结构研究[J]. 华南师范大学学报. 自然科学版, 2009(1): 61-66.
- [12] 李丽, 冉勇, 傅家谟. 等. 超滤分级研究腐殖酸的结构组成[J]. 地球化学, 2004, 33(4): 387-397.
- [13] 顾志忙, 王晓蓉, 顾雪元. 等. 傅里叶变换红外光谱和核磁共振法对土壤中腐殖酸的表征[J]. 分析化学, 2000, 28(3): 314-317.
- [14] 张晋京, 宋祥云, 窦森. 连续提取对土壤腐殖质组分数与特性的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 452-456.
- [15] Guan X H, Chen G H, Shang C. Combining kinetic investigation with surface spectroscopic examination to study the role of aromatic carboxyl groups in NOM adsorption by aluminum hydroxide [J]. J Colloid Interf Sci, 2006, 301: 419-427.
- [16] Sun Z H, Li D, Ma H X, et al. Characterization of asphaltene isolated from low-temperature coal tar [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 138: 413-418.
- [17] De Paolis F, Kukkonen J. Binding of organic pollutants to humic and fulvic acids: Influence of pH and the structure of humic material [J]. Chemosphere, 1997, 34(8): 1693-1704.
- [18] 赵波. 腐殖酸分子中与多环芳烃作用的核心官能团研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [19] 何盈盈. 腐殖酸与多环芳烃的非共价结合机制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [20] Gauthier T D, Seitz W R, Grant C L. Effects of structural and compositional variations of dissolved humic materials on pyrene K_{oc} values [J]. Environ Sci Technol, 1987, 21(3): 243-248.
- [21] Xing B, Pignatello J J, Gigliotti B. Competitive sorption between atrazine and other compounds in soils and model sorbents [J]. Environ Sci Technol, 1996, 30(12): 2432-2440.
- [22] Guo X, Wang X, Zhou X, et al. Sorption of four hydrophobic organic compounds by three chemically distinct polymers: Role of chemical and physical composition [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(13): 7252-7259.
- 第一作者: 吴云(1973-) 男, 博士, 副教授, 主要从事废油资源化利用与处置技术、环境污染控制与治理技术及环境友好材料等的研究与开发. wooyun123@163.com
- 通信作者: 邓祥敏(1991-) 女, 硕士. xiangmindeng@126.com

(上接第157页)

- [8] 罗小勇, 黄希望, 王大伟. 等. 生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述[J]. 环境工程, 2013, 31(4): 118-122.
- [9] 杨健, 陆雍森, 施鼎方. 运用生命周期分析(LCA)评估和选择废水处理工艺[J]. 工业用水与废水, 2000, 31(3): 4-6.
- [10] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(6): 155-160.
- [11] 王巧. 污水再生利用工程生命周期评价研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [12] 童乐. 工业园区污水再生利用系统生命周期评价[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [13] Meneses M, Pasqualino J C, Céspedes-Sánchez R, et al. Alternatives for reducing the environmental impact of the main residue from a desalination plant [J]. Journal of Industrial Ecology, 2010, 14(3): 512-527.
- [14] Friedrich E, Pillay S, Buckley C A. Environmental life cycle assessments for water treatment processes: A South African case study of an urban water cycle [J]. Water SA, 2009, 35(1): 73-84.
- [15] 蔡博峰, 高庆先, 李中华. 等. 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 118-124.
- [16] 张丽丽, 李花粉, 苏德纯. 我国城市污水处理厂污泥中重金属分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究, 2013, 26(3): 313-319.
- [17] 方平, 岑超平, 唐子君. 等. 污泥焚烧大气污染物排放及其控制研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 70-80.
- [18] 张岩, 池涌, 李建新. 等. 污泥焚烧过程中重金属排放特性试验研究[J]. 电站系统工程, 2005, 21(3): 27-29.
- [19] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, et al. ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the end point level. First edition. Report 1: Characterisation [Z]. http://www.lcia_recipe.net.
- 第一作者: 侯兴(1993-) 男, 研究生, 主要研究方向为污水处理领域生命周期评价. hhu_hx@163.com
- 通信作者: 李轶(1975-) 男, 教授, 主要研究方向为水资源保护与生态修复. envly@hhu.edu.cn