

城市生活垃圾处理方式生命周期评价的比较研究*

谢小天 孙 荃[#] 张培栋 周景月

(青岛科技大学环境与安全工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要 生命周期评价理论与方法作为一种量化环境影响的工具,在诸多领域中得到了广泛的应用。在垃圾处理领域,生命周期评价最早在 20 世纪 90 年代得到应用。生命周期评价与城市生活垃圾处理的有效结合,将促进城市生活垃圾的减量化、资源化、无害化目标的实现。总结了生命周期评价理论与方法在城市生活垃圾处理中的应用现状。对国内不同城市生活垃圾处理方式环境影响因子进行比较分析,诸如全球变暖潜力、酸化潜力和富营养化潜力等因子。针对其目标范围定义、数据收集、评价方法的选择、结果解释及工艺改进等方面指出了目前研究的局限性和不足。并对未来城市生活垃圾处理生命周期评价的发展方向进行展望。

关键词 城市生活垃圾 生命周期评价 环境影响 全球变暖潜力

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.04.021

Life cycle assessment of municipal solid waste treatment: a review of impact comparative XIE Xiaotian, SUN Quan, ZHANG Peidong, ZHOU Jingyue. (Qingdao University of Science and Technology, College of Environment and Safety Engineering, Qingdao Shandong 266042)

Abstract: In recent, the concept and method of the life cycle assessment (LCA) is widely used and related studies make a big progress in many fields to elucidate the environmental impacts. Within the field of municipal solid waste treatment, life cycle assessment was first applied in the 1990s. Life cycle assessment applied on municipal solid waste treatment to realize the aim of reduction, reuse and recycling. The current application of life cycle assessment method in municipal solid waste treatment had been reviewed in this paper. Essential impact categories, such as global warming potential (GWP), acidification potential (AP) and Eutrophication (EP) were listed and compared to determine waste treatment hierarchy. The shortcomings on definition of the functional unit and the system boundaries, data collection, the selection of the impact assessment methodology, interpreting the results had been pointed out. And the future research direction of life cycle assessment in municipal solid was also analyzed.

Keywords: municipal solid waste (MSW); life cycle assessment (LCA); environmental impacts; global warming potential

城市生活垃圾问题是 21 世纪最重要的环境问题之一,甚至已成为人们生活的公害。城市生活垃圾处理是 21 世纪最有前景的产业之一,城市生活垃圾处理水平也已成为衡量一个国家、一个城市文明和现代化程度的重要标志^[1]。良好的城市生活垃圾处理目标在于垃圾的减量化和减少不利的环境影响^[2]。对城市生活垃圾的处置通常被视为一种对污染物进行处理,以达到保护公众健康、消除环境污染目的的有效手段^[3]。生命周期评价是衡量区域城市生活垃圾处理体系环境效应的重要方法,旨在评价城市生活垃圾处理各个阶段的环境影响,使最终整个处理过程的环境影响最小^[4]。将生命周期评价有效应用到城市生活垃圾的管理中,可以增加环境的

可持续性,促进城市生活垃圾的减量化。

1 中国城市生活垃圾处理现状分析

城市生活垃圾大量排放造成的污染已成为制约我国经济社会发展的重要因素,是我国各大城市面临的重大环境问题^[5]。根据《中国统计年鉴 2013》^[6],我国年垃圾清运量达到 17 080.9 万 t,生活垃圾无害化处理率达 84.8%。我国 2004—2012 年生活垃圾清运总量呈波动上升趋势(见图 1)。由于社会经济条件和自然环境的差异,各省份生活垃圾年清运量存在较大地域性差异(见图 2)。由图 2 可知,广东省 2012 年生活垃圾清运量高达 2 136.0 万 t,西藏的垃圾清运量只有 25.6 万 t。西藏、青海、

第一作者:谢小天,女,1989 年生,硕士研究生,研究方向为生命周期评价。[#] 通讯作者。

* 国家社会科学基金资助项目(No. 14BJY064)。

宁夏、甘肃等西部地区经济相对落后,垃圾产生量少,垃圾无害化处理率低;广东、江苏、浙江、山东等省份经济相对发达,垃圾产生量多,垃圾无害化处理率高。

卫生填埋、焚烧处理和生物处理是我国生活垃圾处理的主要方式。截止 2012 年底,全国共有垃圾卫生填埋处理厂 540 座,焚烧厂 138 座,其他处理厂 23 座。卫生填埋是城市生活垃圾最主要的处理方式,2012 年我国卫生填埋垃圾达 10 512.5 万 t,日均处理 310 927 t,在垃圾无害化处理中所占比例高达 72.5%。焚烧是一种可同时实现垃圾无害化、减量化、资源化的高温热处理技术,在我国有很大的发展空间和发展潜力,处理能力从 2001 年的 6 520 t/d 提升到 2012 年的 122 649 t/d;在垃圾无害化处理中所占比例从 2001 年的 3% 左右提升到 2012 年的 24.7%^[7]。生物处理虽然在我国历史悠久,但处理效率不高。卫生填埋、焚烧处理和生物处理的有机结合,可以解决单一处理系统的缺点,充分发挥各种垃圾处理系统的优势。

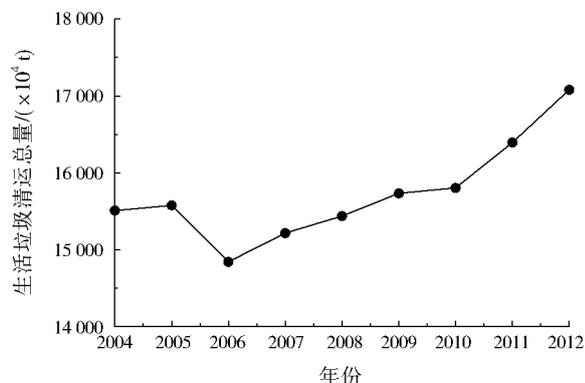


图 1 我国 2004—2012 年生活垃圾清运总量
Fig. 1 Consumption wastes collected and transported from 2004 to 2012

注:数据来自《中国统计年鉴》,图 2 同。

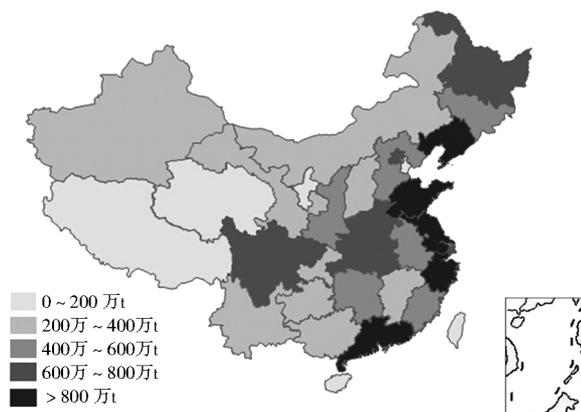


图 2 2012 年我国各省份生活垃圾清运量分布
Fig. 2 Distribution of consumption wastes collected and transported in different provinces in 2012

2 生命周期理论在城市垃圾处理中的应用

生命周期的概念应用很广泛,在农业、工业、建筑业等诸多领域频繁出现,其基本涵义可以简单地理解为“从摇篮到坟墓”的整个过程^[8]。生命周期评价,是一种具有应用价值的环境管理工具^[9]。国际标准化组织对其的定义是:汇总和评估一个产品(或服务)体系在其整个生命周期中的所有投入及产出对环境造成潜在影响的方法^[10]。致力于生命周期分析方法开发的美国环境保护署和环境毒理化学学会认为,它不仅仅是一种理念,也是一种实用的评价方法,它能从整个系统角度考虑各个环节和各项产品,并能评价其环境影响。将生命周期评价的观点应用于城市生活垃圾的管理过程,提供了一种整体的研究观点,将垃圾排放、收集、运输、回收再利用、处理和处置的全部环节作为一个整体进行统筹考虑和分析,对物质能量输入输出以及相应的环境排放物进行识别和量化,并评价各阶段物质、能源利用效率以及排放物的环境影响^[11]。由此可以更深入地研究城市生活垃圾的环境排放和资源消耗的潜在影响,直观得到垃圾处理过程中的每一部分以及整体的环境影响,识别出环境影响的主要承担者,为改进技术工艺、完善管理体制提供相应的理论支持。城市生活垃圾生命周期评价的目的是寻找生活垃圾处理各个阶段环境影响的平衡,找到使垃圾从产生到最终处理整个过程的环境影响降到最小的途径。

我国对城市生活垃圾处理现行的规划更多关注垃圾的末端处理,较少从系统整体角度综合考虑垃圾排放、收集、回收利用及处理处置等环节,未能达到最佳有效利用垃圾处理设施的能力,垃圾的资源性价值得不到最大限度的利用,并且对规划实施方案的效果缺乏定量分析和评价。生命周期评价方法是力求从源头上减少城市生活垃圾的环境影响,为城市生活垃圾管理提供理论依据^[12]。

3 不同城市生活垃圾处理方式生命周期评价比较

我国对生活垃圾处理方式生命周期评价的认识和研究相比发达国家起步较晚,但发展迅速,已成为学术界研究的重点^[13]。徐成、杨建新在 1998 年概括地介绍了城市生活垃圾系统的生命周期管理,并提出了城市生活垃圾处理的生命周期评价系统结构,描述了生命周期评价的发展意义和前景。

目前,城市生活垃圾处理方式生命周期评价的研究不断发展,有针对不同城市生活垃圾处理系统的

表 1 不同城市生活垃圾处理模式的全球变暖潜力、酸化潜力和富营养化潜力比较
Table 1 Comparison of GWP, AP and EP under different waste treatment scenarios

城市	全球变暖潜力	酸化潜力	富营养化潜力	处理方式	文献
沈阳	4.98×10^2	3.80×10^{-1}	6.90×10^{-1}	填埋	[21]
	2.09×10^2	1.20×10	8.08	焚烧	
广州	1.51×10^2	3.46×10^{-1}	1.23×10^{-1}	填埋	[22]
	3.08×10^2	4.43×10^{-1}	4.71×10^{-1}	焚烧	
	1.00×10^2	1.52×10^{-1}	2.61×10^{-1}	综合处理	
北京	2.12×10^2	7.85×10^{-2}	9.73×10^{-2}	填埋	[23]
	4.32×10	1.27	1.31	焚烧	
	1.52×10	2.33×10^{-1}	6.15×10^{-2}	堆肥	
	9.72×10	2.41×10^{-1}	6.65×10^{-2}	综合处理	
成都	8.00×10^3	6.36×10^{-2}	1.23×10^{-1}	填埋	[24]
	2.96×10^2	9.60×10^{-1}	2.75×10^{-1}	焚烧	
	1.46×10^2	7.39×10^{-1}	1.43	综合处理	
大连	1.16×10^2	8.97×10^{-1}	-1.63	填埋	[25]
	5.22×10^2	1.63×10	2.66×10	焚烧	
三门峡	2.10×10^2	7.50×10^{-2}	1.00×10^{-1}	填埋	[26]
	3.10×10^2	7.20×10^{-1}	3.50×10^{-1}	焚烧	
	1.10×10^2	2.00×10^{-1}	1.50×10^{-1}	综合处理	
福州	8.50×10^{-2}		1.05×10^{-1}	填埋	[27]
	5.46×10^{-1}		2.33×10^{-1}	焚烧	

收集、处理和处置方式的生命周期评价研究。如韦保仁等^[14]比较了苏州城市生活垃圾处置方法,利用日本开发的 AIST-LCA 软件,得出垃圾填埋和垃圾焚烧两种处置方法的生态币值。ZHAO 等^[15]根据天津的垃圾问题设计出 6 条垃圾处理方案,经生命周期分析得出提高焚烧比例的方案,其环境影响最小。也有针对特定的垃圾处理工艺的生命周期评价研究。如孔祥娟^[16]对卫生填埋从全生命周期角度进行分析,在界定目标与范围的基础上,对卫生填埋技术生命周期清单进行了分析,建立了全生命周期影响评价模型,并给出了相应的生命周期解释。罗宇等^[17]分析了垃圾焚烧处理生命周期清单中多产品系统所存在的分配问题,以及垃圾焚烧处理系统的组成,详细探讨其分配原则及其影响因素,并从多角度分析和研究垃圾焚烧处理系统环境负荷分配情况。还有针对垃圾特定的组成成分进行生命周期评价的研究,如杜欣等^[18]对餐厨垃圾资源化处理的堆肥法和湿热处理法的环境影响进行比较,得出湿热处理法是一种环境影响较小的处理工艺。生命周期评价理论和方法的应用已从最初的针对产品开发到现在用于战略规划、公共政策制定、市场营销等方面,并将逐渐应用到城市生活垃圾管理中。城市生活垃圾处理的生命周期评价正成为生命周期评价方法在公共政策制定领域的一个重要的研究方向^[19]。

本研究回顾总结了部分国内不同城市生活垃圾

管理体系的生命周期评价,列举和比较了全球变暖潜力、酸化潜力和富营养化潜力等影响类型^[20]。定量评价了不同城市固体废弃物处理模式的环境影响,为有效利用城市生活垃圾处理设施能力提供参考,从而推进城市生活垃圾的可持续发展管理。

城市生活垃圾的主要处理方式有填埋、焚烧以及综合处理,即填埋与生化处理相结合或焚烧与生化处理相结合(见表 1)。城市生活垃圾的生命周期评价主要关注全球变暖潜力,其次是酸化、富营养化潜力。一般来说,填埋的全球变暖潜力和酸化潜力均高于焚烧,而综合处理的全球变暖潜力低于填埋。由于传统的饮食习惯,城市固体废弃物中往往有较高比例的餐厨垃圾,造成城市生活垃圾水分高、热值低,并不适合焚烧。考虑到目前以填埋为主的处理方式将不断减少,焚烧比例将进一步提高,将餐厨垃圾源头分类是提高垃圾热值的关键因素。餐厨垃圾源头收集后进行生化处理,将其转化成生活燃气、电能、热能和有机肥,可实现经济和环保的双丰收。有效的垃圾分类和回收,可以有效促进餐厨垃圾的有效生物化处理,减少温室气体的排放^[28]。

4 局限性及改进

(1) 填埋封场后修复管理未纳入评价范围内

大部分生命周期评价研究工作未把封场后修复管理纳入评价范围内。卫生填埋占地面积大,存在

严重的二次污染,稳定化时间长,封场后还需要长达30年以上的维护管理。所以封场后修复管理是生命周期评价流程中重要的组成部分,对环境影响评价的干扰大,尤其是区域环境影响类型,如生态毒性、人体毒性等方面干扰显著。对卫生填埋工艺进行生命周期评价研究中应加入封场单元,增加一些区域范围内的环境影响类型。

(2) 数据完整性、精确性差

城市生活垃圾处理方式的生命周期评价研究需要大量数据,数据的收集是生命周期评价工作的基础。研究人员必须从多方面收集数据,有些数据仅供企业内部使用,不对外公开使用。对于一些较难获得的数据,研究人员还要根据典型工艺、全国平均水平、国家排放标准进行数据估算^[29]。另外,我国城市生活垃圾成分差异大,工艺流程和环境排放可比性差,研究人员层次不同,对生命周期评价理论理解有所差异。这就造成部分环节数据完整性缺失,精确性较差。为解决这一问题,需建立城市垃圾处理和处置过程中的物质和环境输入输出的数据库,积累处理工艺数据和能源消耗数据,加强政府、企业之间的合作,及时进行底层数据库的更新^[30],为生命周期评价在城市生活垃圾研究方面提供便利。

(3) 影响评价方法单一、代表性差

大部分城市生活垃圾处理方式的生命周期环境影响评价研究中,使用 EDIP 方案确定环境影响类型^[31],利用中国政府削减目标来确定权重。研究中考虑全球尺度的问题(诸如全球变暖、臭氧层破坏等)较多,可以适当增加区域环境影响类型(如对人体的毒性、土地利用等)。各城市的生态状况、环境容量、经济发展状况不同,垃圾处理方案应具有其区域特殊性。研究人员还需加强目标城市或区域的环境基础性研究,确定要保护的目标,如人类健康、生态环境、自然资源^[32]。应根据目标城市或区域周围的环境、人文、经济状况等因素,选择适宜的、有价值的评价模型和评价方法^[33]。除此之外,在城市生活垃圾处理生命周期评价过程中还需加入不确定性和敏感性分析,使其定量化的分析评价特征被广泛理解和接受。还可以通过明确限定环境影响的空间尺度,使用更加合理的标准化基准值,大大降低生命周期评价的不确定性^[34]。

(4) 研究结果直观性差及工艺改进价值低

生命周期评价是一个循环往复的过程,为工艺改进、环境改善提供定量科学的基础。目前,城市生活垃圾处理方式生命周期评价研究中大部分只是数

据的简单统计,很少有相关研究去发掘数据背后的含义^[35]。评价结果不直观、明了,不能全面、完整地反映当前的处理工艺问题。城市生活垃圾处理厂的设计缺乏长远规划,无法达到垃圾产量不断增加的要求。生命周期评价需增强评价的系统性,发挥诊断识别的功能,就评价结果对工艺流程进行改进。

5 规划及展望

妥善解决我国城市生活垃圾处理问题,还有很长的路要走。城市生活垃圾处理问题在很大程度上依赖于政府的管理,因此要将环境因素纳入经济社会决策^[36]。建立城市生活垃圾管理数据库,重视基础数据的收集和整理,对城市生活垃圾的排放进行全面的监测和分析,将数据的收集纳入卫生主管部门的责任范畴。利用生命周期评价结果,合理布置垃圾投放点,选择最优的垃圾车收集行驶路线,减少人力、物质、能量的消耗。结合垃圾处理数据库,进行垃圾分类处理,定制各城市适宜的垃圾分类方案,增强市民的垃圾分类意识。有效的垃圾分类处理对减少环境污染、降低能源消耗、提高资源化利用效率有重要的意义。尽可能地进行物质循环利用以减少排放到环境中的垃圾量,形成经济、有效的生活垃圾处理模式。引进一些先进的处理技术,降低垃圾处理对环境的不利影响。生命周期评价为城市生活垃圾处理规划提供了定量系统的研究工具,它超越了单个环境问题,从多角度全面衡量城市生活垃圾管理方案的优劣,从源头上减少城市生活垃圾的产生,并确保降低垃圾处理过程对环境和人类健康产生的危害^[37]。随着生命周期评价在城市生活垃圾处理方面研究的深入,生命周期评价方法已成为城市生活垃圾处理管理方案的关注点和城市环境策略制定的基础,其评价过程会变得更复杂、更有针对性。所以需要开发生命周期评价在垃圾处理领域运用的技术指南,旨在规范生命周期评价过程,确保结果的有效性^[38]。生命周期评价与城市生活垃圾的管理相结合,力求城市生活垃圾更减量化、资源化^[39]。

参考文献:

- [1] 王树文,文学娜,秦龙. 中国城市生活垃圾公众参与管理与政府管制互动模型构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(4): 142-148.
- [2] MOEINADDINI M, KHORASAN N, DANEHKAR A, et al. Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment (case study: Karaj) [J]. Waste Management, 2010, 30(5): 912-920.

- [3] 徐成,胡聃.城市生活垃圾的生命周期管理[J].中国人口·资源与环境,1999,9(2):58-62.
- [4] 周晓萃,徐琳瑜,杨志峰.城市生活垃圾生命周期分析及处理规划研究[J].中国环境管理,2011(2):33-37.
- [5] 卢苇,马一太,王志国,等.城市垃圾与可持续发展[J].四川环境,2004,23(2):80-83.
- [6] 国家统计局.中国统计年鉴 2013[M].北京:中国统计出版社,2013.
- [7] 包红.我国城市生活垃圾处理技术的现状与发展趋势[J].科技信息,2013(15):435-436.
- [8] 魏薪,董超芳,肖葵,等.材料生命周期评价方法与应用进展[J].科技导报,2012,30(14):75-79.
- [9] OBERSTEINER G, BINNER E, MOSTBAUER P, et al. Land-fill modeling in LCA contribution based on empirical data[J]. Waste Management, 2007, 27(8):58-74.
- [10] ISO 14040-2006, Environmental management - life cycle assessment - principle and framework[S].
- [11] RIGAMONTI L, GROSSO M, GIUGLIANO M. Life cycle assessment of sub-units composing a MSW management system[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(16/17):1652-1662.
- [12] GENTIL E C, DAMGAARD A, HAUSCHILD M, et al. Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions[J]. Waste Management, 2010, 30(12):2636-2648.
- [13] 翟绪璐,陈德珍.建筑垃圾资源化技术的生命周期评估[J].中国资源综合利用,2007,23(5):22-25.
- [14] 韦保仁,王俊,TAHARA K, et al. 苏州市生活垃圾两种处置方法的生命周期影响评价[J].环境工程学报,2009,3(8):1517-1520.
- [15] ZHAO Wei, VAN DER VOET E, ZHANG Yufeng, et al. Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: case study of Tianjin, China[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(5):1517-1526.
- [16] 孔祥娟.生活垃圾卫生填埋技术全生命周期评价体系研究[J].建筑经济,2009(8):115-118.
- [17] 罗宇,黄川,刘元元.垃圾焚烧系统生命周期评价清单的分配方法[J].重庆大学学报:自然科学版,2003,26(3):154-157.
- [18] 杜欣,陈婷,李欢,等.2种典型餐厨垃圾资源化处理工艺的环境影响分析[J].环境工程学报,2010,4(1):189-194.
- [19] OTHMAN S N, NOOR Z Z, ABBA A H. Review on life cycle assessment of integrated solid waste management in some Asian countries[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41(5):251-262.
- [20] 日本全球环境战略研究所.国家温室气体清单指南[R].神奈川:日本全球环境战略研究所,2006.
- [21] 周晓强.沈阳市生活垃圾能源化利用模式研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2013.
- [22] 胡志锋,马晓茜,梁增英.广州市生活垃圾处理工艺的生命周期评价[J].可再生能源,2012,30(1):106-112.
- [23] 纪丹凤,夏训峰,刘骏,等.北京市生活垃圾处理的环境影响评价[J].环境工程学报,2011,5(9):2101-2107.
- [24] 李娜.基于模糊数学理论的城市生活垃圾处理生命周期评价[D].成都:西南交通大学,2007.
- [25] 李雯婧,孙娜,张令戈.大连市生活垃圾处理的生命周期评价[J].环境卫生工程,2009(6):55-57.
- [26] 刘光辉,王宝庆,张飞飞.三门峡市生活垃圾的生命周期评价[J].环境科学导刊,2008,27(6):85-87.
- [27] 易晓娥,张江山. LCA 方法在城市垃圾管理中的应用[J].安全与环境工程,2004,11(2):42-44.
- [28] CHEN T C, LIN C F. Greenhouse gases emissions from waste management practices using life cycle inventory model[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 155(1/2):23-31.
- [29] 王飞儿,陈英旭.生命周期评价研究进展[J].环境污染与防治,2001,23(5):249-252.
- [30] 庄瑛,任馨,吴伟祥,等.城市生活垃圾综合管理决策模型研究进展[J].环境污染与防治,2008,30(1):72-75.
- [31] 杨建新.面向产品的环境管理工具:产品生命周期评价[J].环境科学,1999,20(1):101-104.
- [32] 杨建新,徐成.生命周期环境影响类型分类体系研究[J].上海环境科学,1999,18(6):246-248.
- [33] NIEDERL SCHMIDINGER A, NARODOSLAWSKY M. Life cycle assessment as an engineer's tool[J]. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(2):245-252.
- [34] LO S C, MA H W, LO S L. Quantifying and reducing uncertainty in life cycle assessment using the Bayesian Monte Carlo method[J]. Science of the Total Environment, 2005, 340(1/2/3):23-33.
- [35] 周祖鹏,刘夫云,唐兴春.产品全生命周期评价方法研究前景的探讨[J].机械设计与制造,2011(10):261-263.
- [36] 李顺兴,邓南圣.城市垃圾管理综合体系改革探讨[J].城市环境与城市生态,2002,15(4):19-21.
- [37] SHEKDAR A V. Sustainable solid waste management: an integrated approach for Asian countries[J]. Waste Management, 2009, 29(4):1438-1448.
- [38] COROMINAS L, FOLEY J, GUEST J S, et al. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art[J]. Water Research, 2013, 47(15):5480-5492.
- [39] SEADON J K. Sustainable waste management systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(16/17):1639-1651.

编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2015-01-07)

(上接第 105 页)

- [13] 蔡金州,范先鹏,黄敏,等.湖北省三峡库区农业面源污染解析[J].农业环境科学学报,2012,31(7):1421-1430.
- [14] 宋林旭,刘德富,肖尚斌,等.基于 SWAT 模型的三峡库区香溪河非点源氮磷负荷模拟[J].环境科学学报,2013,33(1):267-275.
- [15] 周亮,徐建刚,孙东琪,等.淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J].环境科学,2013,34(2):547-554.
- [16] 济宁市统计局,国家统计局济宁调查队.济宁统计年鉴 2011[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [17] 环境保护部,国家统计局,农业部.第一次全国污染源普查公报:2010[R].北京:环境保护部,2010.
- [18] 黄亚丽,张丽,朱昌雄.山东省南四湖流域农业面源污染状况分析[J].环境科学研究,2012,25(11):1243-1249.
- [19] 高新吴,江丽华,李晓林,等.“等标污染法”在山东省水环境农业非点源污染源评价中的应用[J].中国生态农业学报,2010,18(5):1066-1070.
- [20] 段华平.农业非点源污染控制区划方法及其应用研究[D].南京:南京农业大学,2010.
- [21] 路尤尤,胡清宇,段华平,等.基于“压力-响应”机制的江苏省农业面源污染源解析及其空间特征[J].农业现代化研究,2012,33(6):731-735.
- [22] 严素定.黄石市农业面源污染的解析及其空间异质性研究[J].农业工程学报,2008,24(9):225-228.
- [23] 邱小琼,王德全,尹娟,等.宁夏农业面源污染及其影响因子解析[J].水土保持学报,2012,26(5):190-194.
- [24] 杨志敏,陈玉成,陈庆华,等.户用沼气对三峡库区小流域农业面源污染的削减响应分析[J].水土保持学报,2011,25(1):114-118.

编辑:丁怀 (修改稿收到日期:2014-10-20)