

张伟倩, 杨天翔, 陈雅敏, 等. 基于生命周期评价的城市固体废弃物处理模式研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(1): 69-73. Zhang Wei-qian, Yang Tian-xiang, Chen Ya-min, et al. Life cycle assessment of municipal solid waste treatment: a comparative literature review[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(1): 69-73.

基于生命周期评价的城市固体废弃物处理模式研究进展

张伟倩, 杨天翔, 陈雅敏, 赵钢, 王寿兵*

(复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘要 通过回顾 2003-2010 年国内外不同城市固体废弃物管理体系生命周期评价结果, 列举比较了不同固体废弃物处理模式下的全球变暖潜力、酸化潜力和净能源效用等影响评价因子的大小, 得出城市固体废弃物处理模式环境影响等级: 填埋的环境影响潜值最大, 焚烧的环境影响潜值小于填埋, 而结合堆肥后环境影响潜值降低。此外, 将固体废弃物资源化引入到处理模式后, 特别是垃圾源头分类回收后, 环境影响潜值大大降低。结合我国城市固体废弃物处理现状, 提出单一的处理模式应转变为综合处理模式, 多种生活垃圾处理方式适当的有机结合, 因地制宜地开展固体废弃物资源化管理, 以及餐厨垃圾源头分类收集处理等建议, 为政府能有效利用城市固体废弃物处理设施的能力提供参考。

关键词 生命周期评价; 城市固体废弃物; 处理模式; 比较分析

中图分类号: X705 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2013.01.016 文章编号: 1003-6504(2013)01-0069-05

Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Treatment : A Comparative Literature Review

ZHANG Wei-qian, YANG Tian-xiang, CHEN Ya-min,

ZHAO Gang, WANG Shou-bing

(Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract : Different municipal solid waste (MSW) treatment scenarios by using life cycle assessment (LCA) methodology from 2003 to 2010 were reviewed. Essential impact categories, such as global warming potential (GWP), acidification potential (AP) and net energy use (NEU), were listed and compared to determine waste treatment hierarchy. It was found that the environmental impact of incineration is lower than landfill, and with biochemical treatment, both landfill and incineration resulted in a lower environmental impact. Resource utilization in MSW treatment system, especially source-separated collection contributed greatly to the low values of environmental impact. Considering the current status of MSW treatment in China, the single treatment model should be turned into a mixed treatment model, source separation and recovery of MSW need urgently conducting, and an optimal system need to be determined locally to reduce the environmental impact.

Key words : life cycle assessment (LCA); municipal solid waste (MSW); treatment scenario; comparative analysis

城市化的快速进程、城市经济的迅猛发展和人口的不断增长导致垃圾产量逐年递增, 垃圾类型日益多样化。据统计, 2006 年, 美国产生了 2.51 亿 t 城市固体废弃物^[1], 而欧盟的 15 个国家产生了 2.19 亿 t 城市固体废弃物^[2]。生命周期评价方法(Life cycle assessment, LCA)是衡量区域废弃物管理体系环境效应的重要方法, 旨在通过评价城市固体废弃物处理各个阶段的环境影响, 使产生到最终处理整个过程的环境影响最小^[3]。近年来, 各国学者开始运用 LCA 评估不同城市固体废

弃物处理模式的能源投入和环境影响。我国对城市固体废弃物生命周期评价的认识和研究还处于起步阶段^[4], 部分学者对城市生活垃圾填埋、焚烧、堆肥等处理工艺进行了环境影响评价^[5-6]。但与国外相比, LCA 在我国城市固体废弃物管理方面的应用还不多。本文回顾了 2003-2010 年部分国内外不同城市固体废弃物管理体系的生命周期评价, 通过列举和比较文献中全球变暖潜力(Global warming potential, GWP)、酸化潜力(Acidification potential, AP)和净能源使用效应

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkyjs@126.com

收稿日期: 2012-03-15; 修回日期: 2012-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(70871025); 上海市科委科技攻关项目(11231202100)

作者简介: 张伟倩(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境生态与环境规划管理 (电子信箱) 11210740018@fuclan.edu.cn; * 通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为环境生态与生命周期评价 (电子信箱) sbwang@fuclan.edu.cn。

(Net energy use, NEU)等影响类型,定量地评价了不同城市固体废弃物处理模式的环境影响,旨在为政府有效利用城市固体废弃物处理设施能力提供参考,从而推进城市固体废弃物的可持续发展管理。

1 国内外垃圾处理方式

1.1 主要的垃圾处理模式

填埋(Landfill)是城市固体废弃物的主要处理方式之一。将垃圾倾倒在选定的场所,填埋到一定厚度,确实后在上面覆盖一层泥土,处理量大,费用低^[7]。

焚烧(Incineration)是城市生活垃圾处理的有效途径之一。通过一定量的过剩空气与固体废弃物在焚烧炉内进行氧化燃烧反应。垃圾中的有毒有害物质在 800~1 200 °C 的高温下氧化、热解而破坏,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^[8]。

生化处理(Biochemical treatment)是将生活垃圾保存在厌氧的条件下和微生物细菌发生作用,有机废弃物首先被分解为一系列可溶性分子态物质^[7],如H₂、CO₂和各种酸,最后被分解为以CH₄为主,并含少量CO和H₂S的可燃气体,是城市固体废弃物,特别是餐厨垃圾资源化利用的有效方法之一。

1.2 国内外现状与发展趋势

英国最早于 1930 年,美国于 1940 年开始采用生活垃圾填埋技术;1920 年代,国外就开始堆肥的技术研究,主要集中于庭院垃圾堆肥和制造有机复合肥技术^[9]。焚烧在国外是一种成熟的固体废弃物处理手段,是许多发达国家处理城市生活垃圾的主要方式,如表 1 所示。

表 1 发达国家的垃圾处理设施比例

Table 1 Percentage of waste treatment facility in developed countries (%)

国家	焚烧	填埋	堆肥	回收
新加坡	100	0	0	0
日本	85	10	5	0
卢森堡	75	22	1	2
瑞士	59	12	7	22
比利时	54	43	0	3
丹麦	48	29	4	19
法国	42	45	10	3
美国	40	33	8	19
德国	36	46	2	16
新加坡	100	0	0	0
日本	85	10	5	0

2010 年,中国生活垃圾清运量已达到 1.58 亿 t^[10]。填埋技术作为城市固体废弃物的传统处置方式,目前仍然是我国大多数城市解决生活垃圾的出路。由于我国城市生活垃圾的低热值性及缺乏对二噁英的有效

监测手段,仅在北京、上海、深圳等经济技术发展水平较高的一些城市采用了焚烧技术。传统堆肥技术在我国虽然历史悠久,但生化处理率并不高,仅为 5%左右^[9]。相比于发达国家,填埋仍在我国城市固体废弃物处理中处理主导地位,焚烧尚需要发展,而生化处理仅处于起步阶段。

2 城市固体废弃物处理方式的 LCA 回顾

LCA 是一种有效评价不同固体废弃物处理模式环境影响的工具^[12-13]。国外已经成功将 LCA 应用到了固体废弃物各种处理情境的评价中^[14]。Arena 等^[15]分析了意大利南部地区的填埋,利用垃圾衍生燃料(Refuse derived fuel, RDF)的焚烧以及大规模焚烧(Mass burn combustion)3 种处理模式,定量地证明了填埋的环境危害性,同时建议 RDF 处理模式需要对玻璃和铝开展源头回收。Beigl 等^[16]考虑了有、无循环利用情境下不同废弃物管理体系的 GWP、AP 和 NEU 和分析比较了德国和奥地利固废处置系统的生态效应,提出应将回收利用引入到整个固废管理系统中。Özeler 等^[17]比较了 7 种不同处置模式下的 LCA 结果,表明源头减量化(Source reduction scenario)是最可行的管理模式,生化处理产生的 GWP 值最低。泰国的一些学者分别评价了填埋和焚烧、焚烧和生化处理的全生命周期,认为焚烧对环境的影响小于填埋^[18],而生化处理有更高的净能源产出^[19]。巴西开展了焚烧处置与飞灰填埋、熔融或者回收利用(造砖块)等方式的 LCA 结果,表明飞灰回用由于消耗了更多的能源,该种处置方式的环境影响最大^[20]。Aye 等^[21]将 LCA 与成本-效益分析(Cost-benefit analysis)相结合评价了印度尼西亚传统市场的固废处置模式。

随着近年来 LCA 的发展,利用 LCA 评价固废管理在中国也呈逐渐增长趋势。韦保仁等^[6]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 2 种处置方法的生态币值。李雯婧等^[22]针对大连市中心城区生活垃圾填埋和焚烧处理工艺模式进行了生命周期评价,结果表明填埋工艺的温室气体排放量高于焚烧工艺。针对北京城市固体废弃物, Zhao 等^[23]基于 EASEWASTE 模型,对几种固体废弃物处理全过程进行了 LCA 评价,提出了需要有效地将餐厨垃圾进行源头分类。Hong 等^[24]利用 LCA 评价了我国填埋、焚烧、填埋和生化处理相结合以及焚烧和生化处理相结合四种处理模式,发现由于 CH₄ 的直接排放导致填埋的 GWP 潜值很高,利用 CH₄ 发电是减少 GWP 值的关键因素。

总体而言,相比国外发达国家,中国对固体废弃

物管理的 LCA 应用还不够成熟,仍处于发展阶段。

选取了 10 篇涉及到 GWP、AP 和 NEU 的文

3 不同城市固体废弃物处理模式 LCA 比较

章^[15-17, 19-22, 24-27]进行归纳整理 结果如表 2 所示。

表 2 不同固体废弃物处理模式的 GWP、AP 和 NEU
Table 2 Comparison of GWP, AP and NEU under different waste treatment scenarios

国家	作者	GWP (kgCO ₂ eq/tMSW)	AP (kgSO ₂ eq/tMSW)	NEU (J/tMSW)	处理模式
意大利	Arena et al.(2003)	490	-0.44	-0.67	填埋
		95	-3.66	-4.95	垃圾衍生燃料焚烧(RDF)
		46	-4.60	-6.35	大规模焚烧
奥地利	Beigl and Salhofer(2004)	152	-0.55	-1.66	上门回收(bring system)
		141	-0.68	-1.67	路边回收(kerbside system)
		145	-0.16	-1.48	不回收
巴西	Mendes et al.(2004)	600	0.13	-3.34	焚烧后飞灰填埋
		625	0.20	-2.84	焚烧后飞灰熔融
		650	0.20	-2.06	焚烧后飞灰回收利用
		920	0.40	2.43	填埋
		900	0.30	1.83	填埋后能源回用
		101	-2.14	-5.61	小型处理厂焚烧
意大利	Consonni et al. (2005a,b)	111	-1.92	-5.02	小型处理厂焚烧,预处理
		122	-1.38	-3.54	小型处理厂焚烧,RDF
		102	-1.78	-4.46	小型处理厂焚烧,预处理+RDF
		-53.7	-3.22	-7.72	大型处理厂焚烧,发电
		-134	-2.91	-8.99	大型处理厂焚烧,30%发电
		-212	-2.59	-10.23	大型处理厂焚烧,60%发电
		-35.8	-2.94	-7.01	大型处理厂焚烧,预处理
		-5.8	-2.27	-5.28	大型处理厂焚烧,RDF
		-29.3	-2.69	-6.23	大型处理厂焚烧,预处理+RDF
		339	1.17	-	焚烧后能源回用
瑞典	Eriksson et al.(2005)	355	1.14	-	90%焚烧,10%填埋+沼气发电
		349	1.79	-	焚烧,70%的餐厨垃圾源头分类后沼气用于公交车燃料
		355	2.16	-	焚烧,70%的餐厨垃圾源头分类后沼气用于发电
		347	1.48	-	焚烧,70%的餐厨垃圾源头分类后沼气用于汽车燃料
		233	1.09	-	焚烧,源头分类 70%~80%的 DPE 和 LDPE
		351	1.13	-	焚烧,源头分类 70%~80%的纸类
		508	0.99	-	填埋
土耳其	zeler et al.(2006)	5 475.9	33.4	-	填埋
		4 523.8	23.5	-	源头减量后填埋
		5 303.9	32.9	-	废物后回收填埋
		6 639.8	35.1	-	废物回收后焚烧+填埋
		3 245.0	33.2	-	废物回收后生化处理+填埋
澳大利亚	Aye and Widjaya(2006)	-	0.03	-	开放式倾倒(BAU)
		-	-0.11	-	分散型小规模焚烧(CPL)
		-	-0.10	-	大规模集约型焚烧(CPC)
		-	-0.50	-	沼气发电(BGP)
泰国	Chaya and Cheewala(2007)	-	2.37	-0.56	填埋发电(LFE)
		-	1.57	-3.58	焚烧+能源回用
		-	-	-	63%生化处理,37%填埋
大连	Li et al.(2009)	1 169.57	0.897	-	填埋
		522.11	16.636	-	焚烧
中国	Hong et al.(2010)	1520	2.17	-	填埋
		-618.5	0.92	-	焚烧
		1 220	1.84	-	填埋+生化处理
		38.59	2.92	-	焚烧+生化处理

从表 2 可以看出：

(1)城市固体废弃物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者焚烧与生化处理相结合。一般来说,填埋的 GWP 值和 AP 值均高于焚烧的潜值,而综合处理的 GWP 和 AP 值低于填埋的潜值。

(2)当在城市固废系统中引入垃圾的资源化利用,即物质回收、物质转化再利用以及能源利用 3 个层级后^[28],GWP、AP 和 NEU 都发生了相应的变化。回收,主要是以源头分类达到减量化的目的。不论是填埋或是焚烧的垃圾处置方式,垃圾经过源头分类后,GWP 和 AP 值都有大大降低(如表中 Eriksson et al ,

2005 ;Özeler et al 2006)。转化利用,如填埋后产生的沼气回收用于发电或者制备再生燃料,降低了 GWP 和 AP 的值,同时减少了净能源的消耗(如表中 Consonni et al 2005a b)。生活垃圾的焚烧处理实现了可燃物的能量转换利用,相比于单一的焚烧处理技术,能源回收的方式减少了对环境的有害影响和净能源的消耗。

(3)对于处理设施的规模而言,开放式的倾倒(open dumping)对环境影响最大,大规模集约型的处置设施优于小规模分散型的处置设施。

4 结论与展望

从近年来国内外不同固体废弃物处理模式下的 LCA 评价结果,综合比较不同处理模式下的 GWP、AP 和 NEU 潜值,得出以下结论和建议:

(1)生命周期评价工作十分庞大和复杂,涉及到产品“从摇篮到坟墓”的全过程,需要耗费大量的人力和物力。原始数据的缺失,系统边界条件的不一致性或不确定性,都可能造成截然不同的结果,并且 LCA 侧重于静态的分析,时效性较差。评价不同区域的城市固体废弃物可能采用不同的边界条件,原始数据来源也各不相同,因此需要结合其他方法来进一步评价和比较处理模式。

(2)填埋的 GWP、AP 和 NEU 等环境影响潜值高于其他的处理方式,表明固体废弃物的填埋环境影响较大的。结合物质回收、再利用和能源回收等资源化的固体废弃物处理方式可以减少环境影响。填埋同时结合沼气发电是一种减少环境影响的有效手段,完善相应的技术,加大对沼气发电的投资是当前减少填埋环境影响的重要努力方向。

(3)由于城市固体废弃物成分复杂,具有较强的复杂性、多变性和地域差异等特点,并受经济发展水平、能源结构、自然条件以及传统习惯等因素的影响,国外对城市固体废弃物的处理一般是随国情不同而采用不同的处理技术,很难具有统一的模式。从技术本身、经济性和环境影响角度分析,每种单独的垃圾处理技术均只适合处理垃圾,比如焚烧适合处理热值较高的可燃垃圾。因此,单一的处理模式不仅难以满足数量日益增长,成分日益复杂的城市固体废弃物无害化、减量化、资源化的要求,而且容易引发二次污染。为解决单一处理方式的不足,城市固体废弃物需要采用综合处理方式,将多种生活垃圾处理方式以适当的方式有机结合。

(4)对我国而言,由于传统的饮食习惯,城市固体废物中往往有较高比例的餐厨果皮类垃圾,造成了城

市生活垃圾水分高、热值低,并不适合进行焚烧。考虑到目前以填埋为主的处理方式将不断减少,焚烧的比例将进一步提高,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。

[参考文献]

- [1] EPA. Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States Facts and Figures for 2006[R]. 2006.
- [2] OECD. OECD Environment Data 2008 Compendium 2006-2008[R].
- [3] 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.
Zhou Xiao-cui, Xu Lin-yu, Yang Zhi-feng. Municipal solid waste life-cycle analysis and its management planning research[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2011(2):33-37.(in Chinese)
- [4] 徐成,杨建新,胡聃.城市生活垃圾生命周期管理[J].城市环境与城市生态,1998,11(3):52-55.
Xu Cheng, Yang Jian-xin, Hu Dan. The life cycle management of urban solid wastes[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 1998, 11(3):52-55.(in Chinese)
- [5] 陶华,陶加林.生命周期评价在中国城市垃圾减量化的应用[J].环境科学学报,1998,1(3):45-48.
Tao Hua, Tao Jia-lin. Application of life cycle assessment to municipal solid waste reduction in China[J]. Research of Environmental Science, 1998, 1(3):45-48.(in Chinese)
- [6] 韦保仁,王俊.苏州城市生活垃圾处置方法的生命周期评价[J].中国人口·资源与环境,2009,19(2):93-97.
Wei Ren-bao, Wang Jun. Life cycle assessment on disposal methods of municipal solid waste in Suzhou[J]. China Population Resource and Environment, 2009, 19(2):93-97.(in Chinese)
- [7] 李智,鞠美庭,史聆聆,等.生命周期评价(LCA):面向可持续发展的城市生活垃圾资源化方法[EB/OL].
<http://www.cn-hw.net/html/32/201106/27877.html>, 2011-06-11[2012-01-15].
Li Zhi, Ju Mei-ting, Shi Ling-ling, et al. Life Cycle Assessment the Method in Urban Solid Waste Resource Recovery for Sustainable Development[EB/OL].
<http://www.cn-hw.net/html/32/201106/27877.html>, 2011-06-11[2012-01-15].(in Chinese)
- [8] 陈胜武.生活垃圾处理技术及发展分析[J].材料与装饰,2011,(8):20-21.
Chen Sheng-wu. Analysis on municipal solid waste treatment techniques and development[J]. Material and Decoration, 2011, (8):20-21.(in Chinese)
- [9] 范留柱.国内外生活垃圾处理技术的研究现状及发展趋势

- [J]. 中国资源综合利用 2007 25(7) 26-28.
Fan Liu-zhu. Recent study and progress tendency of municipal solid waste treatment techniques both at home and abroad [J]. China Resource Comprehensive Utilization, 2007, 25 (7) 26-28.(in Chinese)
- [10] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社 2011.
National Bureau of Statistics of China. China Statistic Year-book[M]. Beijing :China Statistics Press 2011.(in Chinese)
- [11] 上海环境卫生工程设计院. 我国八个试点城市生活垃圾分类收集工作情况调研报告[R].2008.
Shanghai Environmental Engineering Design Research Institute(SEEDRI).Survey Report of MSW Source-Separated Collection in Eight Cities ,China[R].2008.(in Chinese)
- [12] Barton J R , Dalley D , Patel V S. Life cycle assessment for waste management[J]. Waste Management ,1996 ,16 35-50.
- [13] Finnveden G. Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems[J]. Resource Conservation and Recycling ,1999 26 :173-87.
- [14] Harrison K W , Dumas R D , Barlaz M A. Life-cycle inventory model of municipal solid waste combustion[J]. Journal of the Air and Waste Management Association , 2000 , 50 : 993-1003.
- [15] Arena U , Mastellone M , Perugini F. The environmental performance of alternative solid waste management options : a life cycle assessment study[J]. Chemical Engineering Journal , 2003 96 207-22.
- [16] Beigl P , Salhofer S. Comparison of ecological effects and costs of communal waste management systems[J]. Resource Conservation and Recycling 2004 41 83-102.
- [17] Özeler D , Yetis Ü , Demirer G N. Life cycle assessment of municipal solid waste management methods ankara case study[J]. Environment International 2006 32 405-411.
- [18] Liamsanguan C , Gheewala S H. LCA :A decision support tool for environmental assessment of MSW management systems[J]. Journal of Environmental Management , 2008 , 87 : 132-138.
- [19] Chaya W , Gheewala S H. Life cycle assessment of MSW-to-energy schemes in Thailand[J]. Journal of Clean Production , 2007 ,15(15) :1463-1468.
- [20] Mendes M R , Aramaki T , Hanaki K. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in Sao Paulo City as determined by LCA[J]. Resource Conservation and Recycling 2004 41 47-63.
- [21] Aye L , Widjaya E. Environmental and economic analyses of waste disposal options for traditional markets in Indonesia [J]. Waste Management 2006 26(10) :1180-91.
- [22] 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 ,17(6) 55-57.
Li Wen-jing , Sun Na , Zhang Ling-ge. Life cycle assessment of domestic waste treatment in Dalian[J]. Environmental Sanitation Engineering , 2009 , 17(6) 55-57.(in Chinese)
- [23] Zhao J , Christensen T H , Lu W J , et al. Environmental impact assessment of solid waste management in Beijing City , China[J]. Waste Management 2011 31 :793-799.
- [24] Hong J L , Li X Z , Cui Z J. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China [J]. Waste Management 2010 30 2362-2369.
- [25] Consonni S , Giugliano M , Grosso M. Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste. Part A : mass and energy balances[J]. Waste Management 2005a 25 (2) :123-35.
- [26] Consonni S , Giugliano M , Grosso M. Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste. Part B Emission and cost estimates[J]. Waste Management , 2005b , 25(2) :137-48.
- [27] Eriksson O , Carlsson Reich M , Frostell B , et al. Municipal solid waste management from a systems perspective [J]. Journal of Clean Production 2005 13 241-52.
- [28] 周菲. 杭州城市生活垃圾处理体系综合评价方法研究[D]. 长沙 :中南大学 2010.
Zhou Fei. Study on Assessment Methods of Municipal Solid Waste Management System in Hangzhou City[D]. Changsha: Central South University 2010.(in Chinese)

(上接第 39 页)

- [16] Zumft W G. Cell biology and molecular basis of denitrification[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews , 1997 61(4) 533-616.
- [17] Frunzke K , Meyer O. Nitrate respiration , denitrification and utilization of nitrogen sources by aerobic carbon monoxides-oxidizing bacteria[J]. Arch Microbiol ,1990 ,154 :168-174.
- [18] Miyahara M , Kim S W , Fushinobu S , et al. Potential of aerobic denitrification by *Pseudomonas stutzeri* TR2 to reduce nitrous oxide emissions from wastewater treatment plants[J]. Applied and Environmental Microbiology , 2010 , 76(4) :4619-4625.
- [19] Baumann B , Vandermeer J R , Snozzi M , et al. Inhibition of denitrification activity but not of mRNA induction in *Paracoccus denitrificans* by nitrite at a suboptimal pH[J]. Antonie Leeuwenhoek ,1997 72 :183-189.
- [20] Zhu Gui-bing , Peng Yong-zhen , Li Bai-kun , et al. Biological removal of nitrogen from wastewater[J]. Rev Environ Contam Toxicol , 2008 , 192 :159-195.