

美国污水处理厂深度除磷技术分析

蒋松竹¹ 郭黎卿² 尹训飞¹ 张源凯¹ 齐鲁¹ 王洪臣^{1#}

(1.中国人民大学环境学院,北京 100872;2.环境保护部环境规划院,北京 100012)

摘要 污水处理厂控磷是防治湖泊等封闭性水域富营养化最有效的对策之一。但国内污水处理厂传统的除磷技术不足以改善水质,控制水体富营养化。综述了美国环境保护署推荐的深度除磷技术,介绍了美国污水处理厂深度除磷技术的工程案例。结果表明,美国深度除磷技术主要分为 3 大类:生物除磷+化学除磷+沉淀过滤、生物除磷+化学除磷+两级过滤、生物除磷+化学除磷+膜分离。通过对美国深度除磷技术的综述和分析,为中国污水处理厂除磷技术改进及已建设施的提升改造提供了重要参考依据和借鉴意义。

关键词 深度除磷 城市污水 除磷技术 美国污水处理厂

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.03.025

Analysis on the advanced phosphorus removal technology in US WWTPs JIANG Songzhu¹, GUO Liqing², YIN Xunfei¹, ZHANG Yuankai¹, QI Lu¹, WANG Hongchen¹. (1. School of Environment and Nature Resources, Renmin University of China, Beijing 100872; 2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012)

Abstract: Many studies have showed that advanced phosphorus removal in WWTPs may be one of the most effective countermeasures to prevent eutrophication of waters, like lakes. To domestic wastewater treatment plants, conventional phosphorous removal technology, however, is far from improving the water quality and prevent eutrophication of waters. This article reviewed some technologies proposed by EPA and used at WWTPs in the United States. These technologies can be divided into three categories: (1) "biological nutrient removal+ chemical addition + two-stage filtration"; (2) "biological nutrient removal+ chemical addition+ tertiary clarifier+ filtration"; (3) "biological nutrient removal+ chemical addition+ membrane filtration". In addition, the needs of advanced phosphorous removal technology in current China were discussed, which will have for reference phosphorus removal technology improvement and upgrading existing facilities of domestic wastewater treatment plants.

Keywords: advanced phosphorus removal; municipal wastewater; phosphorus removal technology; wastewater treatment plant in US

“十二五”期间,我国在 COD 和 SO₂ 两项主要污染物的基础上,将氨氮和氮氧化物(NO_x)纳入总量控制指标体系。然而,影响水环境质量的主要污染物并不仅仅是 COD 和氨氮,氮、磷已经成为威胁水质的主要污染物,尤其是磷对水体富营养化的贡献远大于氮。近几年,我国^[1-2]和北美^[3]的研究共同表明,淡水富营养化无需控氮、只需控磷。其中最重要的一个理由为氮、磷的循环特点决定水生生态系统的限制因子是磷而非氮。与气体性氮循环相比,沉积型磷循环较慢。由于磷来源有限,且更容易沉积,磷对湖泊初级生产的限制作用必然比氮更强。因此,通过控制磷进入水体可能是最有效的富营养化

防治对策。相较于控制农业面源、城市径流和底泥释放中的磷,控制城镇污水处理厂出水中的磷是最经济、最可行的总量控制策略^[4]。

美国西北部地区很多研究表明,污水处理厂出水 TP 质量浓度必须控制在 0.05 mg/L 以下^[5-6],国家污染物排放削减体系(NPDES)规定的磷排放限值虽然高于该值,但也要求低于 0.2~0.5 mg/L,对于一些敏感地区则要求低于 0.1 mg/L。在我国,污水处理厂的排放标准不断提高,要求出水排入国家和省确定的重点流域及湖泊、水库等封闭、半封闭水域时,执行一级 A 标准,其 TP 限值为 0.5 mg/L。然而,对于一些敏感区域,如巢湖、滇池等^[7],周边污

第一作者:蒋松竹,女,1992年生,硕士研究生,主要从事脱氮除磷研究。# 通讯作者。

水处理厂 TP 达到一级 A 标准也不能有效控制水体富营养化,应以水环境容量为目标,进行总量控制。因此,污水处理厂的深度除磷在我国是未来的发展趋势。

1 除磷技术分类

在污水处理厂已进入实际应用阶段的除磷技术可分为化学、生物和物理除磷技术^[8],如表 1 所示。

表 1 除磷技术分类

Table 1 Classification of phosphorus removal technology

技术分类	原理	备注
化学除磷	化学沉淀	沉淀剂和加药点的选择
	其他	主要是物理化学吸附技术
	同化作用	人工湿地技术等
生物除磷	除磷工艺	缺氧/好氧(A/O)、厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)、序批式活性污泥法(SBR)、Phostrip、生物化学脱氮除磷(BCFS)等工艺
物理除磷	过滤	砂滤池、混合介质滤床、活性砂滤池等
	膜技术	膜生物反应器(MBR)、微滤、超滤、反渗透等

1.1 化学除磷

化学沉淀法是最常用的化学除磷方法。化学沉淀法是指投加的无机金属盐药剂与污水中溶解性的磷酸盐混合后,形成颗粒状非溶解性物质,通过固液分离从污水中去除磷。常用的化学药剂为明矾、氯化铝、氯化铁以及高分子聚合物。化学除磷的优点:操作简单、效果稳定、耐冲击负荷;其缺点:药量大、处理费用较高,且产生大量污泥。化学除磷(不带过滤)出水 TP 在 0.5~1.0 mg/L。

1.2 生物除磷

生物除磷主要是利用微生物过量吸磷作用将磷转移到污泥中,并通过污泥排放完成磷的去除。该技术运行费用低,且比化学除磷产生的污泥量少。但生物除磷效果受影响的因素较多,处理效果不稳定。生物除磷出水 TP 在 0.5~1.0 mg/L。

1.3 物理除磷

物理除磷主要包括过滤和膜技术。过滤能除去水体中颗粒态磷,膜技术既能除去颗粒态磷,也可以除去部分可溶态磷,出水 TP<0.04 mg/L,但成本较高。因此,为达到深度除磷效果,采用物理除磷是必要的。

物理除磷技术始于化学除磷,然而由于其成本高、污泥产量大等缺点,逐步被生物除磷技术取代。随着 TP 排放限值的不断提高,“生物除磷+化学除磷”组合工艺不但减少药剂投加量,而且出水 TP 能

达到 0.1~0.5 mg/L。在某些要求深度除磷(出水 TP 质量浓度小于 0.1 mg/L)的污水处理厂,还需在生物与化学除磷的基础上进一步物理除磷,以去除悬浮物(SS)中残存的磷或部分可溶态磷。

2 美国深度除磷技术

美国环境保护署(EPA)报告中介绍了实际运行过程中采用的深度除磷工艺^[9],如表 2 所示。在美国 EPA 推荐的技术中通常是生物、化学与物理除磷的组合工艺,可将其分为 3 大类:(1)生物除磷+化学除磷+沉淀过滤;(2)生物除磷+化学除磷+两级过滤;(3)生物除磷+化学除磷+膜分离。3 类技术中第 1 类技术最常用,应用范围较广;第 2 类技术能达到出水 TP 质量浓度最低(<0.01 mg/L);而第 3 类技术与第 1 类技术可达性相差不大,且膜分离投资和运行费用都较高,不作为推荐技术,因此本研究不详细介绍。

2.1 生物除磷+化学除磷+沉淀过滤

该技术出水 TP 在 0.01~0.07 mg/L。沉淀过滤既可以采用传统工艺,如平流、竖流和辐流式沉淀,以及砂滤池、多介质滤池和流化床滤池;也可采用新技术,如斜板(管)沉淀池、高密度沉淀池、磁混凝工艺以及活性砂滤池。但 Farmers 污水处理厂与 Iowa Hill 污水处理厂比较来看,传统沉淀过滤出水 TP 月均值甚至低于新技术,可能是新技术的运营维护较复杂、对管理人员要求较高所致。

2.2 生物除磷+化学除磷+两级过滤

该技术出水 TP<0.03 mg/L。Pinery 污水处理厂应用两级普通滤池,出水 TP 为 0.029 mg/L。该滤池滤料为人工合成介质,第 1 级过滤采用上向流式,第 2 级过滤采用下向流式。Walton 污水处理厂和 Stamford 污水处理厂采用两级活性砂滤池,实现了最低出水 TP 质量浓度(<0.01 mg/L)。活性砂滤池集絮凝、沉淀、过滤处理于一体,滤料被连续清洗,过滤效果好,无需反冲洗,被美国 EPA 认定为是一种高效过滤技术。

2.3 生物除磷+化学除磷+膜分离

该技术出水 TP<0.07 mg/L。膜分离可以采用微滤、纳滤、超滤和反渗透。

3 工程案例

3.1 “生物除磷+化学除磷+沉淀过滤”案例

Snake River 污水处理厂收集的污水来自狄龙

表 2 美国 EPA 深度除磷工艺应用实例
Table 2 Advanced phosphorus removal technologies from EPA

工艺类别	污水处理厂	处理能力 ($\text{万 t} \cdot \text{d}^{-1}$)	主要工艺	TP 允许排放限值	出水 TP 月平均质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	备注
	Iowa Hill	0.60	活性污泥法,曝气生物滤池(BAF),化学除磷(明矾),高密度沉淀池,活性砂过滤	0.5 mg/L(日最大值),102 kg/a	0.05	BAF 出水投加硫酸钠约 110 mg/L 以维持碱度,并投加明矾约 135 mg/L,阳离子聚合物为 0.5~1.0 mg/L
	Farmers	1.14	生物营养物去除(BNR),化学除磷(明矾),竖流式沉淀,多介质滤池	0.5 mg/L(日最大值),102 kg/a	0.01	二沉池后投加明矾约 135 mg/L,阳离子聚合物为 0.5~1.0 mg/L
	Snake River	0.99	曝气池,化学除磷(明矾),斜板沉淀池,多介质滤池	0.5 mg/L(日最大值),154 kg/a	0.015	二沉池后投加明矾 50~180 mg/L,平均值为 70 mg/L(冬季相对投加量较多)
生物除磷+化学除磷+沉淀过滤	Rock Creek	16.88	化学除磷(明矾),BNR,沉淀,重力滤池	0.10 mg/L(月最大中值)	0.07	该厂进水 TP 较高(6 mg/L),故在初沉池前加化学试剂以去除部分磷,在初沉池后投加石灰以保持碱度和 pH,二沉池后再次投加明矾
	Durbam	9.07	化学除磷(明矾),A/A/O,沉淀,多介质滤池	0.11 mg/L	0.07	在 A/A/O 前加挥发性脂肪酸(VFA)强化生物除磷,二沉池出水 TP 一般小于 0.5 mg/L
	Milford	1.80	滴滤池,生物转盘,化学除磷,沉淀,混合介质流化床滤池	0.2 mg/L	0.07	生物转盘后投加聚合氯化铝,每天投加量为 1.1~1.5 mg/L
	Alexandria Sanitation Authority	20.25	BNR,多点加药(氯化铁、明矾),斜板沉淀池,双介质重力滤池	0.18 mg/L	0.06	多点加药:在初沉池投加氯化铁和聚合物,二沉池前投加氯化铁和聚合物,之后投加明矾
	Fairfax County, Noman Cole	25.13	BNR,化学除磷(氯化铁),沉淀,重力滤池	0.18 mg/L	<0.06	该厂未进行升级改造前,二沉池后氯化铁投加量为 18~20 mg/L,改造为强化生物除磷系统后投药量降低至 9~10 mg/L
	Pinery	0.76	五段式 BardenPho,化学除磷(明矾),两级过滤	0.05 mg/L(日最大值),137 kg/a	0.029	二沉池后投加明矾 95 mg/L
生物除磷+化学除磷+两级过滤	Stamford	0.19	延时曝气,化学除磷,两级过滤	0.2 mg/L	<0.01	聚合硅酸硫酸铝分解迅速,因此在进入滤池前投加;两级过滤均采用活性砂滤池
	Walton	0.58	曝气池,化学除磷(氯化铝),两级过滤	0.2 mg/L	<0.01	氯化铝的投加点为二沉池、活性砂滤池配水器;两级过滤采用活性砂滤池
	Pine Hill	0.19	生物转盘,砂滤,化学除磷,微滤	0.2 mg/L	0.06	
生物除磷+化学除磷+膜分离	Grand Gorge	0.19	生物转盘,砂滤,化学除磷,微滤	0.2 mg/L	<0.04	
	Ashland	0.87	氧化沟,化学除磷,膜过滤	0.083 mg/L	0.07	

水库南部和东部的居民区,经处理后排入狄龙水库。而狄龙水库是丹佛(人口较多的大城市)地区饮用水水源,故为防止水体富营养化,保障居民饮用水安全,该厂出水水质需满足 NPDES 限值,即 TP 最大

日质量浓度不能超过 0.5 mg/L,年排放量不超过 154 kg。因此,为达到年排放量限值,实际上该污水处理厂出水 TP 质量浓度应在 0.01~0.02 mg/L,2002 年该厂完成升级改造。

表 3 Snake River 污水处理厂出水水质
Table 3 Snake River WWTP performance information

参数	NPDES 限值	月均值 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	月均值范围 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	单次测量最大值 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
TP	0.5 mg/L(日最大值), 154 kg/a	0.015	0.01~0.04	0.080
氨氮	5.8 mg/L	0.25	0.01~1.28	9.85
SS	30 mg/L	0.6	0.2~2.0	4.0
BOD	30 mg/L	0.7	0.3~2.0	3.0

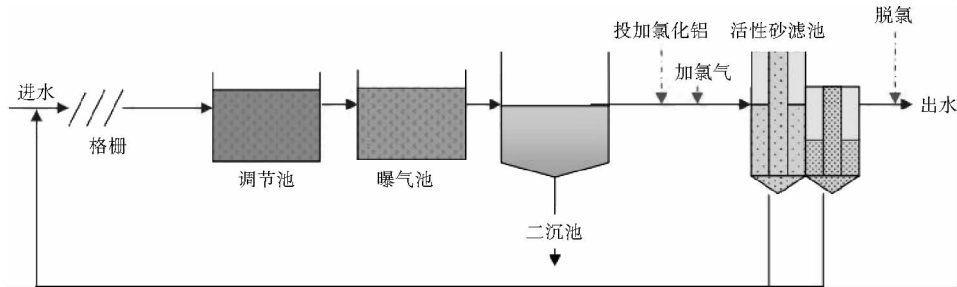


图 1 Walton 污水处理厂工艺流程
Fig.1 Walton WWTP treatment process diagram

表 4 Walton 污水处理厂出水水质
Table 4 Walton WWTP performance information

参数	NPDES 限值 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	月均值 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	月均值范围 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	单次测量最大值 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
TP	0.2	0.010	0.005~0.060	0.060
氨氮	8.8	0.24	0.05~1.40	1.40
SS	30	3.5	2.6~4.9	4.9
BOD	25	3.7	2.5~4.5	21.0

(1) 工艺流程。

工艺流程表达如下:进水→格栅→曝气池→二沉池→化学混凝池→絮凝池→传统矩形斜板沉淀池→混合介质滤床→消毒池→出水。在污水处理中,明矾使用量为 50~180 mg/L,平均使用量为 70 mg/L,且冬季明矾投加量需增大。

(2) 出水水质

Snake River 污水处理厂出水水质见表 3。

该厂经过升级改造后,即使未用强化生物除磷也能达到很好的除磷效果。但二沉池出水 TP 质量浓度变化范围较大(0.5~3.0 mg/L),可能是因为回流污泥再次释磷所致。

3.2 “生物除磷+化学除磷+两级过滤”案例

Walton 污水处理厂设计处理能力为 5 800 t/d,接受的污水一部分来自居民区和商业区,另外一部分来自附近的乳制品加工厂,后者污水量占总污水量的 40%,却占 80%的有机负荷。进水 BOD 平均质量浓度为 350 mg/L,经处理后的水排入特拉华河。特拉华河是纽约市的主要饮用水水源。该厂每

月向用户收取 10 美元污水处理费,在此基础上根据超额水量增收费用。且该厂建设、运行和维护成本由纽约市补贴。

(1) 工艺流程

Walton 污水处理厂在 2003 年升级改造后,工艺包括:格栅(除砂);调节池;曝气池;二沉池(出水氯消毒,防止微生物生长);两级活性砂滤池(出水用二氧化硫脱氯)。具体见图 1。

(2) 出水水质

Walton 污水处理厂出水水质见表 4。

Walton 污水处理厂采用美国 EPA 认可的方式分析出水的 TP、氨氮、SS 和 BOD。大多数样品检测结果都小于排放限值,但低于排放限值并不一定表征优秀的出水水质。

(3) 设施说明

该厂安装的两级活性砂过滤池 TP 去除率高达 96%,可实现连续反冲洗,投资运行成本低,其剖面见图 2。它集混凝、澄清和过滤为一体,无需单设混凝池、澄清池,从而大大降低了一次性投资成本,减少了占地面积。

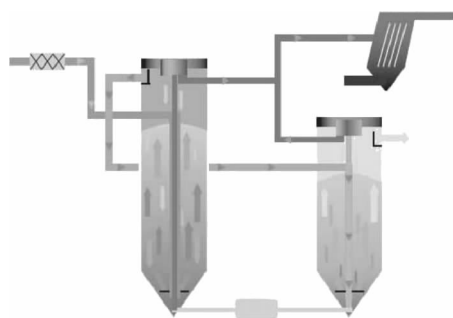


图 2 两级活性砂滤池剖面
Fig.2 Two-stage dynasand filter

二沉池出水被泵提升至配水箱,并在此添加氯化铝和氯气,在重力的作用下进入一级砂滤器,再由一级砂滤器进入二级砂滤器。洗涤废水则回流至进水。一级砂滤池 2 m 深,过滤介质平均直径 1.3 mm;二级砂滤池 1 m 深,过滤介质平均直径 0.9 mm。在运行过程中,几乎没有活性砂的损失。该厂日处理最大能力为 5 800 t/d,在最大流量时使用 3~5 个过滤模块即可处理。过滤模块实际运行数量根据进水量调节。

4 我国污水处理厂深度除磷需求与技术现状

《2012 年中国环境状况公报》^[10]显示,我国长江中下游及其湖库型流域(三峡库区、巢湖、滇池等)富营养化问题仍突出。例如长江中下游干流总体水质为优,但支流总体为轻度污染,而其支流乌江常年为 TP 超标的重度污染;滇池水质总体为劣 V 类,主要污染物指标为 COD 和 TP,处于中度富营养状态。

2006 年,国家环境保护总局对《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 标准和一级 B 标准的执行对象进行修改,即城镇污水处理厂出水排入国家和省确定的重点流域及湖泊、水库等封闭、半封闭水域时,执行一级 A 标准,即我国绝大部分污水处理厂出水 TP 要低于 0.5 mg/L。然而,2006—2012 年,长江中下游及其湖库型流域 TP 超标率基本在 80% 以上,整体形势依然十分严峻。

世界各国都曾面临过水质恶化问题。以美国为例^[11-12],从 19 世纪 60 年代开始,美国五大湖地区特别是伊利湖,出现了严重的富营养化。伊利湖控磷最初控制的重点在点源,主要是城镇生活污水和工业废水,其中城镇生活污水占据主要位

置。政府投入大量资金用于新建污水处理厂和升级已有的污水处理厂,要求出水 TP < 0.1 mg/L,此后点源的 TP 排放量显著下降。在 1972 年伊利湖磷负荷 62% 来自点源,而 1985 年仅为 24%。在 1981 年,伊利湖首次达到《五大湖水水质协议》中的磷负荷目标 11 000 t。

因此,我国应在充分调查磷源的前提下,确定点源磷负荷占 TP 负荷的比例,通过经济成本分析选择控制点源磷负荷或面源磷负荷。若选择控制点源磷负荷,则对污水处理厂出水 TP 的排放不仅有浓度限值,还需基于当地水环境容量的总量限值。如案例中 Snake River 污水处理厂若要达到年排放限值,则其出水平均 TP 实际需在 0.01~0.02 mg/L,远严格于日最大质量浓度限值 0.5 mg/L。因此,对于我国一些敏感区域,如巢湖、滇池等,一级 A 标准的 TP 排放限值太低,应进一步深度除磷^[13]。

然而,我国污水处理厂使用的主流工艺为传统活性污泥法、A/A/O、氧化沟和 SBR 等传统工艺^[14],总体技术水平与发达国家存在差距。因此,美国深度除磷技术为我国污水处理厂除磷技术改进及已建设施的提升改造提供了重要参考依据和借鉴意义。

5 结 语

(1) 从美国 EPA 调研结果来看,目前在美国已经投入运行的深度除磷技术可分为 3 类:生物除磷+化学除磷+沉淀过滤、生物除磷+化学除磷+两级过滤、生物除磷+化学除磷+膜分离。对我国污水处理厂提标改造具有很好的参考价值。

(2) 生物除磷和絮凝沉淀技术在国内外已广泛应用;而过滤技术是一项非常成熟的给水技术,国内在污水处理领域也有一定的建设、运行和管理经验。因此,理论上在国内建设和运行中的污水处理厂能以水环境容量为目标,对 TP 进行总量控制。

参考文献:

[1] WANG Haijun, LIANG Xiaomin, JIANG Pinghong, et al. TN : TP ratio and plank-tivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationship in shallow lakes[J]. Freshwater Biol., 2008, 53(5): 935-944.
[2] 王海军,王洪涛.富营养化治理应该放宽控氮、集中控磷[J].自然科学进展, 2009(6): 599-604.

(下转第 110 页)

境容量和水资源量角度考虑,分配的公平性较差。优化分配后,人口指标和环保投资指标的环境基尼系数均有所上升,分别变为 0.241 和 0.397;水资源量、GDP、水环境容量指标的环境基尼系数均有所下降,降幅分别为 2.13%、0.52%、2.03%。由于各盟市 5 项指标的环境基尼系数差异性较大,要把各个指标的初始环境基尼系数都调整到 0.4 以下是较难实现的,所以优化调整后所得的环境基尼系数总和只是一个相对更优解。与初始分配相比,优化分配后的环境基尼系数总和下降了 0.85%,优化后的分配方案更公平、合理。

3 结 论

(1) 基于环境基尼系数的污染物总量分配模型的求解过程,本质是一个多约束条件下的规划求解过程。5 项评价指标是在充分考虑各种客观条件及影响因素后选取的,在优化分配过程中各评价控制指标间互相制约,较好地提高了最终优化结果的科学性和可操作性。

(2) 内蒙古自治区 COD 总量分配研究选取的 5 项评价指标中,水资源量和水环境容量的权重相对较大,经过优化分配后,这 2 项评价指标的环境基尼系数均有所下降,更符合环境质量改善这一总量控制目标的要求。

(3) 采用综合考虑减排效益的环境基尼系数最小化模型,实现了内蒙古自治区各盟市的 COD 总量优化分配。与初始分配相比,优化分配后的环境基尼系数总和下降了 0.85%,优化后的分配方案更公平、合理。

参考文献:

[1] 董战峰.国家水污染物排放总量分配方法研究[D].南京:南京大学,2010:1-18.
 [2] 王金南,田仁生,吴舜泽,等.“十二五”时期污染物排放总量控制路线图分析[J].中国人口·资源与环境,2010,20(8):70-74.
 [3] 郑英铭,周晶璧,袁国兵.控制排污总量的河流水质管理——实例介绍[J].水资源保护,1993(2):13-18.
 [4] 胡康萍,许振成.水体污染物允许排放总量分配方法研究[J].中国环境科学,1991,11(6):447-451.
 [5] 吴悦颖,李云生,刘伟江.基于公平性的水污染物总量分配评估方法研究[J].环境科学研究,2006,19(2):66-70.
 [6] 李如忠,舒琨.基于多目标决策的水污染负荷分配方法[J].环境科学学报,2011,31(12):2814-2821.
 [7] 陈文颖,侯盾.基于多人合作对策思想的总量控制优化治理投资费用分摊方法[J].环境科学学报,1999,19(1):57-62.

[8] LI Shiyu, MORIOKA T. Optimal allocation of waste loads in a river with probabilistic tributary flow under transverse mixing [J]. Water Environ. Res., 1999, 71(2): 156-162.
 [9] 杨玉峰,傅国伟.区域差异与国家污染物排放总量分配[J].环境科学学报,2001,21(2):129-133.
 [10] 王媛,牛志广,王伟.基尼系数法在水污染物总量区域分配中的应用[J].中国人口·资源与环境,2008,18(3):177-180.
 [11] 内蒙古自治区统计局.内蒙古统计年鉴(2012)[M].北京:中国统计出版社,2012.
 [12] 田平,方晓波,王飞儿,等.基于环境基尼系数最小化模型的水污染物总量分配优化——以张家港平原水网区为例[J].中国环境科学,2014,34(3):801-809.
 [13] 秦迪岚,韦安磊,卢少勇,等.基于环境基尼系数的洞庭湖区水污染总量分配[J].环境科学研究,2013,26(1):8-15.

编辑:卜岩枫 (修改稿收到日期:2015-01-10)

(上接第 106 页)

[3] SCHINDLER D W, HEEKY R E, FINDLAY D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2008, 105(32): 11254-11258.
 [4] EPA. Ohio lake erie phosphorus task force final report [EB/OL]. (2010-08-20). www.epa.ohio.gov/dsw/lakeerie/index.aspx.
 [5] RAGSDALE D. Advanced treatment to achieve low concentration of phosphorus [R]. Washington, D.C.: United States Environment Protection Agency, 2007.
 [6] WALKER J L, YOUNOS T, ZIPPER C E. Nutrients in lakes and reservoirs—a literature review for use in nutrient criteria development [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
 [7] 马巍,李锦秀,田向荣,等.滇池水污染治理及防治对策研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2007,5(1):8-14.
 [8] STROM P F. Technologies to remove phosphorus from wastewater [D]. New Brunswick: Rutgers University, 2006.
 [9] SHIN J K. Municipal nutrient removal technologies reference document [R]. Washington, D.C.: United States Environment Protection Agency, 2008.
 [10] 环境保护部. 2012 年中国环境状况公报 [EB/OL]. [2013-06-06]. http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2012zkgb/201306/t20130606_253418.htm.
 [11] EPA. State of nutrient in the lake erie basin, 2009 [EB/OL]. [2013-01-30]. http://www.epa.gov/greatlakes/erie.html.
 [12] EPA. Lake erie binational nutrient management strategy, 2010 [EB/OL]. [2013-01-30]. http://www.epa.gov/greatlakes/erie.html.
 [13] 王洪臣. 城镇污水处理的发展方向与技术需求 [J]. 给水排水, 2013, 39(5): 1-3.
 [14] 杨勇,王玉明,王琪,等.我国城镇污水处理厂建设及运行现状分析[J].给水排水,2011,37(8):35-39.

编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2015-01-21)