

膜生物反应器工艺应用争议问题分析及改进建议

蒋岚岚 张万里 冯成军

(无锡市政设计研究院有限公司, 江苏 无锡 214072)

摘要 由于膜生物反应器(MBR)是一种相对较新的技术,随着项目数量和处理规模不断增加,其在应用过程中出现了许多有争议的问题。分析了产水量下降、耐水量冲击负荷能力差、存在技术壁垒等技术方面和投资费用较高、能耗高、运行成本较高等经济方面存在的一些主要的争议问题,并提出了相应的改进措施与建议,以期 MBR 工艺的规模化设计应用提供参考。

关键词 城镇污水处理 MBR 工艺 争议问题 改进措施

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.12.019

Analysis of the main controversy and improvements in the application of MBR technology JIANG Lanlan, ZHANG Wanli, FENG Chengjun, (Wuxi Municipal Design Institute Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214072)

Abstract: By the increasing of the scales and numbers of membrane bioreactor (MBR) plants, many controversies appeared in the application since MBR was a new technology in the sewage treatment plants. Some of the main technical and economic controversies such as the decline of flux, the weak ability against the larger amount of influent, technical barriers, higher investment, higher energy consumption, higher running cost and so on, were analyzed in this paper. And some improvements were put forward in order to provide some references for the large-scale application of domestic MBR technology in the future.

Keywords: urban sewage treatment; MBR process; controversies; improvements

由于面临水质标准的提高以及可利用建设用地面积日益减少的双重压力,膜生物反应器(MBR)工艺在市政领域中得到越来越广泛的应用^[1]。MBR 是一种相对较新的技术,随着项目数量和处理规模不断增加,其在应用过程中出现了许多有争议的问题。本研究从技术和经济两个方面对一些主要的争议问题进行了分析并提出了相应的改进措施与建议,以期 MBR 工艺的规模化设计应用提供参考。

1 现状应用情况

近年来,我国 MBR 市场正在加速成长,至 2014 年底,我国已有近 100 座规模超 1 万 m³/d 的 MBR 工程投入运行,并出现了近 20 座超 10 万 m³/d 处理规模的 MBR 工程。据不完全统计,在市政领域中,2014 年底投入运行的 MBR 工程累计处理能力近 350 万 m³/d。预计 2015 年底投入运行或在建的 MBR 工程累计处理能力将超过 600 万 m³/d(见图 1)。

2 应用中存在的争议问题分析

2.1 技术方面

2.1.1 产水量下降

产水量下降的问题主要表现在以下 3 个方面:

第一作者:蒋岚岚,女,1975 年生,硕士,教授级高级工程师,主要从事水污染控制研究。

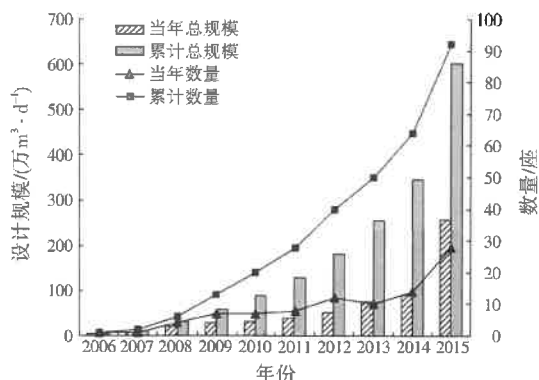


图 1 市政领域大规模的 MBR 工程应用情况
(含 2015 年 在建工程)

Fig.1 The large-scale application of sewage MBR plants
(1)膜通量下降。在 MBR 工程运行过程中,由于物理、化学、生化作用或机械作用,会造成膜污染,尽管采用水力清洗、在线(维护性)和离线(恢复性)化学清洗可以延缓膜污染的加剧,但膜污染本身是一个不可逆的过程,所以膜通量下降是必然的趋势,膜组件的产水量总体上来说呈现逐步衰减的过程。(2)膜清洗周期缩短。MBR 工程通常运行 3~5 年后,跨膜压差在单个清洗周期内会增长加速,运行中需要缩短离线清洗周期以维持产水量,由于离线清洗

时间较长且在清洗周期内都无法连续产水,也降低了总体处理能力。(3)稳定性下降。低温会导致膜通量、产水量的下降外,也会抑制膜的透水性。温度降低时污水中水分子和小颗粒物的活性下降,黏滞性增大,膜通量下降,产水量减少^[2]。从图2可以看出,水温分别在10、20、30℃时,设计膜通量的校正系数分别约为0.75、0.92、1.10,水温10℃时的膜通量相对30℃时约低32%,且不同的膜产品对低温的稳定性差异也较大。

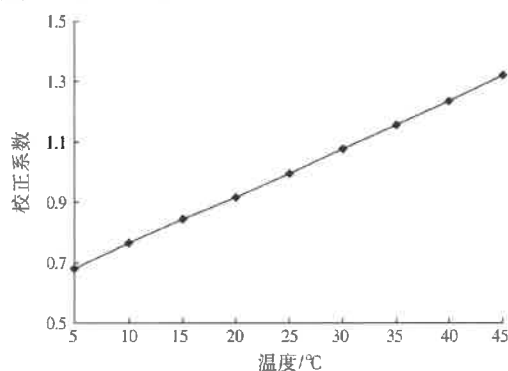


图2 不同水温下的设计膜通量校正系数曲线
Fig.2 The correction factors of flux against the water temperature

实际运行中,很多MBR工程在运行早期一般均能达到设计规模,但随着运行时间的推移,处理能力不断下降。因此,当采用MBR工艺时,必须充分考虑到这一情况,在膜池设计时宜每组预留一定的膜组件安装空间,或设置一些空置的膜池,以备在某些膜组件性能下降后,可以安装新的膜组件以保证维持正常的产水量^[3]。

2.1.2 耐水量冲击负荷能力差

MBR工艺一般分为外置式和浸没式两种。浸没式MBR工艺由于其跨膜压差较小,膜通量很少会超过临界值,因而可以保持长时间稳定的膜通量而无需进行化学清洗。目前我国市政领域应用的MBR工艺主要采用浸没式^[4],依靠水泵负压抽吸出水,水泵的额定流量限制了MBR工艺的最大产水量。由于膜运行时存在一个极限通量,当进水水量超过这个极限时,跨膜压差会急剧加大,导致抽吸出水量下降。但由于全部产水均为通过膜后出水,故MBR工艺出水水质得到保证。而在传统活性污泥工艺中,峰值流量超过设计值时,会使沉淀池的水力负荷加大,出水水质受到影响而导致处理效率下降。但峰值水流可以通过适当加大沉淀池出水堰的堰上水头而流出^[5]。

因此,与传统工艺相比,MBR工艺可以保证出

水水质,但难以承受较大的水量冲击负荷。而城市污水处理厂的流量会随着季节、降雨量、生活习惯或进水组成及处理规模等有所变化,所以对于水量波动较大的城市污水处理厂,应用MBR工艺应格外慎重。

针对这一问题,对于小型污水处理厂,建议通过加大生化池超高、加大抽吸泵的额定流量、适当增大膜片面积来解决,但是会增加投资费用;对于大型污水处理厂,建议与传统污水处理工艺配套使用,以应对水量冲击,而且MBR工艺的高品质产水,还可适当降低配套平行工艺的出水要求。

2.1.3 存在技术壁垒

MBR工艺的应用已越来越广泛,但由于各膜厂商的膜材料和膜组件差异较大,相关的技术参数多掌握在各个膜厂商处,存在较严重的技术壁垒。同时,目前谈及MBR工艺的着眼点主要是膜,但MBR工艺实际上是改进型或强化型的生物处理工艺,是膜与生物反应器的整合。与活性污泥法不同,在技术应用中是全流程的系统概念,包括前端预处理系统、生化处理系统、膜分离系统、污泥处理系统、空气系统和自动控制系统等多个部分,需要进行整体系统设计。而目前,前端预处理、污泥和空气系统没有根据膜分离的特点加以优化调整,生化处理部分与后续膜分离系统之间的衔接缺乏优化设计经验,全流程设计经验和参数不全,忽视控制仪表和设备的选择,缺乏标准化的运行指导,影响了MBR工艺的运行效果、膜寿命和能耗。

2.2 经济方面

2.2.1 投资费用较高

膜组件的技术含量较高,投资较大;同时,MBR工艺的自动化程度较高,需要较为先进的仪表设备,也相应增加了投资费用。据项目统计数据分析可知,市政领域MBR工艺的吨水总投资费用为2100~7000元,平均约3800元,直接工程费用为2000~4500元(包括土建、安装、膜系统及其他设备)。表1列举了部分大型MBR工程的投资情况。投资费用的差异与应用领域(污水处理、污水深度处理、地表水处理、雨水处理)、项目建设时期(新建、扩建、升级改造项目)、膜组件厂商、结构形式(地上式、半地下式和全地下式)等均有较大关系。

据统计,我国2012年所有市政污水处理厂的平均总投资费用是2200元/(m³·d)^[6],可见MBR工艺比传统活性污泥法项目的建设投资费用高较多。但MBR工艺的出水水质优良且可达到再生水

表 1 部分大型 MBR 工程的投资情况
Table 1 The investment of some large-scale MBR plants

项目名称	省/直辖市	处理能力 /(万 m ³ ·d ⁻¹)	吨水投资费用 /(元·m ⁻³ ·d ⁻¹)	项目类型	投运时间	膜供应商
北京密云再生水厂	北京	4.5	2 089	污水深度处理	2006	碧水源
北京顺义引温济榆奥运配套工程	北京	10	4 233	地表水处理	2008	碧水源
无锡市梅村水处理厂二期工程	江苏	3.0	3 107	污水处理扩建	2008	GE
北京门头沟再生水厂	北京	4	3 625	污水处理新建	2009	碧水源
广州京溪污水处理厂	广东	10	5 806	污水处理新建/全地下式	2010	美能
柳林县污水处理厂	山西	3	2 712	污水处理新建	2010	旭化成
北京温榆河资源化工程二期	北京	10	2 438	地表水处理扩建	2011	碧水源
昆明市第四污水处理厂改造工程	云南	6	2 167	污水处理升级改造	2011	碧水源
北京清河再生水厂二期	北京	15	2 633	污水处理扩建	2012	碧水源
无锡市城北污水处理厂四期及续建工程	江苏	7.0	3 371	污水处理扩建	2012	碧水源/久保田
南京城东污水处理厂三期工程	江苏	15	3 838	污水处理扩建	2013	碧水源
昆明第十污水处理厂工程	云南	15	4 973	污水处理新建/全地下式	2013	碧水源
株洲龙泉污水处理厂三期工程	湖南	10	2 740	污水处理扩建/全地下式	2014	津膜科技
山东省烟台套子湾污水处理厂二期工程	山东	15	5 036	污水处理扩建/半地下式	2014	碧水源
泰兴市滨江污水处理厂二期工程	江苏	4	2 750	污水处理扩建	2015	美国科氏
重庆市碧山区污水处理厂工程	重庆	4.25	3 224	污水处理新建	2015	碧水源

回用的标准,因此在比较投资费用时,应以生物处理和再生水处理两部分的费用之和与 MBR 工艺做比较。达到相关再生水回用标准的深度处理工艺很多,如滤布滤池、砂滤、超滤等。对比同地区、同时期、规模接近的 3 个污水处理厂,分别采用 MBR 工艺、二级生物处理+滤布滤池和二级生物处理+浸没式超滤的工程直接投资费用(见图 3)可以看出,MBR 工艺的土建费用略低些,但膜组件的投资较高,其他设备的投资也略高。总体上来说,二级生物处理+滤布滤池的投资费用最低,但是其出水水质不如 MBR 工艺。如考虑接近的出水水质,二级生物处理+浸没式超滤投资与 MBR 工艺投资相差不大,差额在 5%~10%。

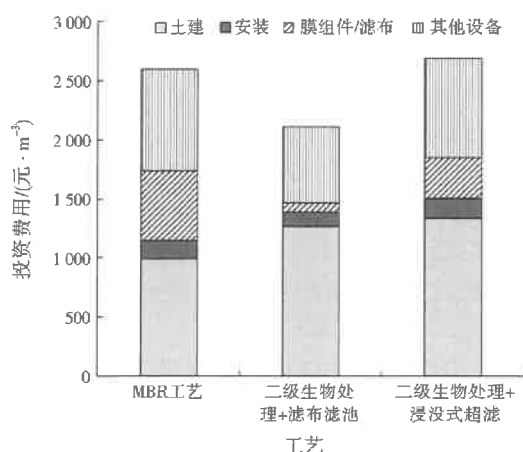


图 3 不同处理工艺的项目工程直接投资费用对比
Fig.3 The contrast of direct investment of different processes

此外,据不完全统计,用于市政领域的 MBR 工

艺的占地面积为 0.12~0.69 m²/(m³·d),而包含三级处理的传统工艺市政污水处理厂的占地面积为 1.2~1.6 m²/(m³·d)^[7]。表明 MBR 工艺在占地面积方面有明显优势。如果进一步考虑征地费用,由于 MBR 工艺占地面积较小,投资差距会进一步缩小。

由此看来,由于 MBR 工艺的一次性投资相对较高,在选择 MBR 工艺时,应因地制宜,综合考虑出水标准要求、占地面积、经济因素、中水回用需求和进水水质处理难度等要素。

2.2.2 能耗高

根据数据分析,市政领域 MBR 工艺的电耗为 0.5~0.8 (kW·h)/m³,成本约为 0.3~0.5 元/m³,主要包含进水提升、预处理系统、生化段搅拌与混合、回流系统、生化段供氧曝气、膜池擦洗、膜抽吸系统、膜清洗系统和辅助系统等。图 4 表示了典型 MBR 工艺不同功能段的能量消耗情况。其中,控制膜表面污堵的膜池擦洗占能量消耗的比例最大,约为 25%;生化段供氧曝气占比也较大,约为 21%。与传统工艺相比,膜池擦洗、膜抽吸系统及膜清洗系统是 MBR 工艺能耗增加的主要方面,总占比近 40%。

MBR 工艺比传统活性污泥法能量消耗高是其主要的劣势所在。近年来,各方也在研究并采用了多种有效的优化方式来减少能源需求,如通过多段氧平衡分析,重新设计生物曝气量;改善膜组件配置,调整膜擦洗曝气系统降低擦洗风量;通过模型模拟技术和自动化控制,寻求更有效的曝气模式来提高曝气效率^[8]。

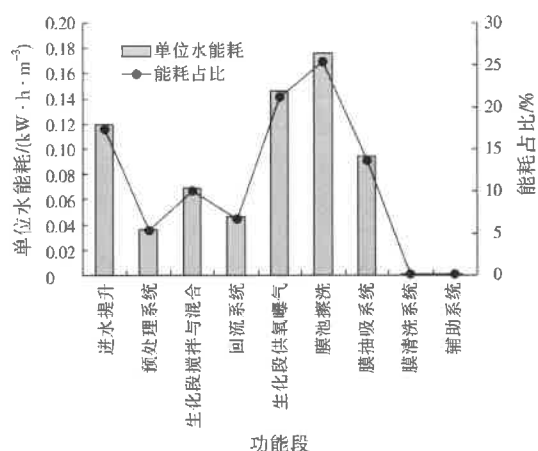


图4 典型MBR工艺不同功能段的能量消耗情况
Fig.4 The consumption in different function areas of typical MBR plant

2.2.3 运行成本较高

MBR工艺的处理成本主要是由电费、药剂费(外加碳源、除磷、膜清洗、消毒)、人工费、污泥处理处置和膜组件设备的折旧费用(寿命)等组成。其中,电费和设备折旧费所占比例较大,成本分别约为0.3~0.5、0.15~0.30元/m³。运行成本的差异与项目规模、膜组件形式、进水水质、结构形式等均有较大关系。

根据《2013 中国环境状况公报》,传统工艺的直接经营成本平均约为0.62元/m³,而MBR工艺的直接经营成本在0.5~0.9元/m³,较传统工艺高约0.15元/m³,加上设备折旧费要高出近0.4元/m³。对比同地区、同时期、接近规模的3个污水处理厂,分别采用MBR工艺、二级生物处理+滤布滤池和二级生物处理+浸没式超滤的经营成本(见图5)可以看出,在不考虑膜/滤布更换费用时,MBR工艺比二级生物处理+浸没式滤布滤池和二级生物处理+浸没式超滤的运行成本分别高约0.138、

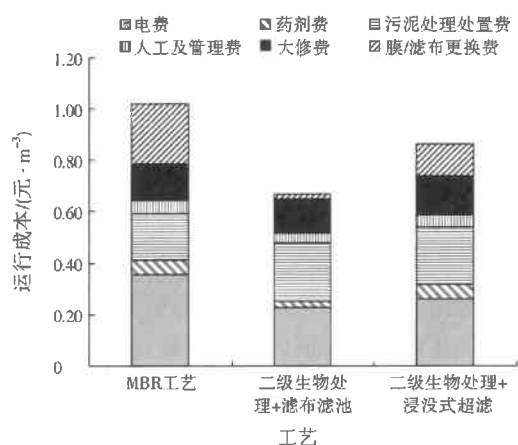


图5 不同处理工艺的项目运行成本对比
Fig.5 The contrast of running costs of different processes

0.046元/m³;在考虑膜/滤布更换费用时,将高出约0.352、0.156元/m³。

由此可见,与传统工艺相比,MBR工艺的高运行成本是其一大弊端,节能降耗及运行成本的优化降低将是MBR工艺发展的主要方向。这涉及到膜材质改性、膜材料价格、膜组件构造、曝气方式及参数的优化、项目水质特性的匹配性、项目自控水平和项目运行管理水平等方面,需要综合优化提升。

3 改进措施与建议

过去的几十年里,世界范围内MBR工艺在学术研究和工程应用方面都取得了令人瞩目的成就,并在很多新的领域不断开发。但是MBR工艺想要进一步提高其核心竞争力,仍然面临着诸多的技术和发展的挑战^[9]。MBR工艺改进的重点应集中在以下5个方面。

3.1 提高膜的制造水平

膜材料是膜分离技术的核心,尤其是MBR工艺要在污水系统下工作,膜长期处于高浓度污泥中,如何保证其通量和使用寿命尤为关键。为了更好地发挥MBR工艺的优势,应提高膜的制造水平,开发新型的针对市政污水处理的膜材料及对现有的膜材料进行改性,制备出具有高通量、高强度、高亲水性能且价格低廉的膜材料。

3.2 改进膜组件

膜组件的优化对于实际装置运行十分重要,是制约膜技术广泛运用的一个关键因素。开发研制性能优越、抗污堵能力强、节能的新型膜组件才能促进MBR工艺更广泛运用。

3.3 整体流程的优化

建议从污染物去除效果和膜污染控制效果两方面来对流程进行整体优化,既要保证MBR工艺的处理效果,又要保证其能长时间稳定运行。目前主要包括:(1)膜与新型污水处理技术的组合;(2)降低能耗的措施和技术;(3)膜污染的控制及运行条件的稳定化;(4)提升氮、磷的去除能力;(5)反应器各段氧平衡分配技术;(6)运行方式的控制与优化。

3.4 标准化

虽然MBR工艺的应用已越来越广泛,但是仍没有国家统一的标准规范。首先,膜产品的种类众多,形式多样,不同膜厂商的膜产品之间缺乏可靠的比较结果,在选择上缺乏可靠的依据;其次,各个膜厂商的自身数据库较完善,有自己的设计参数和规范,但彼此之间相差较大,对于全行业来说没有统一

或综合的设计手册和规范,对于技术人员来说没有充分的设计依据;同时,MBR工艺对运行管理的要求较高,但是膜厂商大多只是提供膜组件,工程公司仅负责工程建设,对于后续维护和管理无相应的规范指导和标准。因此,建议应从膜组件、设计、运行操作3方面建立一整套合理的MBR工艺的规范和标准,有利于提高经济性和竞争力,促进其进一步广泛应用。

3.5 引入市场评估与准入机制

膜厂商较多且在膜组件的设计上又形式多样,用户选择比较困难,许多膜产品在运行开始的1年内差别不是很大,但是在离线清洗后恢复性较差,运行1、2年后差别加大。因此,建议能建立统一的评估机构,对拟应用的各膜厂商产品做1年以上的运行评估,综合考虑膜通量的稳定性、冲击负荷的耐受性、清洗的恢复性、低温的稳定性等,通过整套的评估后,设定同等业绩或规模的准入许可。同时,目前在国内市政领域应用的主要膜组件绝大多数已超过5年,建议对其实际的运行情况进行跟踪核查评定,并设定逐步晋级制度。

4 结 语

随着MBR工艺在市政领域中应用规模和数量的扩大以及MBR工艺所固有的技术特性的显现,应用过程中有争议的问题应得到充分的重视并采取措施逐步予以优化改进。

参考文献:

- [1] 郑邦,魏源送.中国水处理行业可持续发展战略研究报告[M].北京:中国人民大学出版社,2013.
- [2] 蒋岚岚,胡邦,张万里,等.MBR工艺在太湖流域污水处理工程中的应用[J].给水排水,2011,37(1):14-18.
- [3] 蒋岚岚,胡邦,张万里.膜生物反应器工艺设计及工程实例[M].南京:河海大学出版社,2014.
- [4] Water Environment Federation. Membrane systems for wastewater treatment[M]. New York: WEF Press and McGraw-Hill, 2006.
- [5] 陈璐,杨琦.MBR工艺应用于城市污水处理的技术风险[J].中国给水排水,2012,28(10):102-104.
- [6] 环境保护部.2013 中国环境状况公报[R].北京:环境保护部,2013.
- [7] 住房和城乡建设部.城市污水处理工程项目建设标准[R].北京:住房和城乡建设部,2001.
- [8] XIAO Kang, XU Ying, LIANG Shuai, et al. Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: current state and future prospect[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014, 8(6): 805-819.

- [9] 李安峰,潘涛,骆坚平.膜生物反应器技术与应用[M].北京:化学工业出版社,2013.

编辑:贺锋萍 (收稿日期:2015-04-21)

(上接第73页)

(3) 月均NO₂ VCD三道坝镇>84团>西尼尔镇。其中,三道坝镇与西尼尔镇的NO₂ VCD差异显著,三道坝镇与84团的NO₂ VCD差异显著,而西尼尔镇与84团的NO₂ VCD差异不显著。

参考文献:

- [1] 程苗苗,江红,陈健,等.2005—2009年浙江省不同土地类型上空对流层NO₂变化特征[J].生态学报,2011,31(5).
- [2] 肖钟湧,江洪.四川盆地大气NO₂特征研究[J].中国环境科学,2011,31(11):1782-1788.
- [3] 王占山,张大伟,陈添,等.2013年北京市NO₂的时空分布[J].环境科学学报,2015,35(5):1529-1536.
- [4] 张莉君,许慧慧,施烨闻,等.2002—2005年上海市两监测点大气污染物变化规律[J].环境与职业医学,2012,29(1):1-5.
- [5] 张兴赢,张鹏,张艳,等.近10 a中国对流层NO₂的变化趋势、时空分布特征及其来源解析[J].中国科学: D辑 地球科学,2007,37(10):1409-1416.
- [6] 王莉莉,王跃思,吉东生,等.天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J].中国环境科学,2011,31(7):1077-1086.
- [7] 徐鹏,郝庆菊,吉东生,等.重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究[J].环境科学,2014,35(3).
- [8] 樊建凌,胡正义.江西鹰潭地区森林生态系统NO₂浓度变化规律[J].中国环境科学,2006,26(2):171-175.
- [9] 方双喜,牟玉静.NO_x在长江三角洲地区冬小麦农田与大气间的交换[J].环境科学学报,2006,26(12):1955-1963.
- [10] 高晋徽,朱彬,王东东,等.南京北郊O₃、NO₂和SO₂浓度变化及长/近距离输送的影响[J].环境科学学报,2012,32(5):1149-1159.
- [11] 李景林,郑玉萍,刘增强.乌鲁木齐市低空温度层结与采暖期大气污染的关系[J].干旱区地理,2007,30(4):519-525.
- [12] 李蔚,马建中,郭军让.大气NO₂柱浓度多轴差分吸收光谱测量技术及应用[J].气象科技,2013,41(5):796-802.
- [13] 刘鲁宁,申雨璇,辛金元,等.秦皇岛大气污染物浓度变化特征[J].环境科学,2013,34(6):2089-2097.
- [14] 赵克明,李霞,卢新玉,等.峡口城市乌鲁木齐冬季大气污染的时空分布特征[J].干旱区地理,2014,37(6):1108-1118.
- [15] 符传博,陈有龙,丹利,等.近10年海南岛大气NO₂的时空变化及污染物来源解析[J].环境科学,2015,36(1):18-24.
- [16] MA Jianzhong, BEIRLE S, JIN Junli, et al. Tropospheric NO₂ vertical column densities over Beijing: results of the first three years of ground-based MAX-DOAS measurements (2008-2011) and satellite validation[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(3): 1547-1567.
- [17] 叶芳,安俊琳,王跃思,等.北京近地层O₃、NO_x、CO及相关气象因子的分析[J].生态环境,2008,17(4):1425-1432.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2015-08-03)