

朱仁成, 张雅丽, 徐淑敏, 等. 废气生物净化用填料的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(7): 146-152. Zhu Rencheng, Zhang Yali, Xu Shumin, et al. Review in biological filters for the waste gas purification[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(7): 146-152.

废气生物净化用填料的研究进展

朱仁成^{1,2}, 张雅丽², 徐淑敏², 李顺义^{2*}, 贾明³

(1.南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏 南京 210016; 2.郑州大学化工与能源学院, 河南 郑州 450001;

3.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘 要 随着“大气十条”政策的出台和人们环保意识的逐渐增强, 废气污染治理日益受到重视。生物净化技术是目前可生化废气处理中最常用的方法之一。填料在整个技术中起着关键作用, 其理化性质直接影响着废气的净化效果。文章论述了生物法净化废气的机理, 理想填料的基本特性要求, 并分类介绍了国内外一些常用有机、无机、混合、复合填料的特征及其应用。针对现今废气处理用生物填料存在的易破碎、生物活性低及营养缓释性差等问题, 提出未来新型填料的研究方向及发展趋势, 并为生物法净化废气技术的推广应用提供技术支撑。

关键词 填料; 生物过滤; 废气处理; 生物净化

中图分类号: X512 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2015.07.028 文章编号: 1003-6504(2015)07-0146-07

Review in Biological Filters for the Waste Gas Purification

ZHU Rencheng^{1,2}, ZHANG Yali², XU Shumin², LI Shunyi^{2*}, JIA Ming³

(1.College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2.

School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3.Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: The treatment of waste gas has got more and more attention with the promulgation of Atmospheric Pollution Prevention Action Plan and the strengthening of people's environmental protection consciousness. The biopurification technology is one of the most used technologies in the treatment of biodegradable waste gas. The filter plays a key role in the technology and its physico-chemical properties directly determine the purification performance of the biofilter. This paper discusses the mechanism of biofiltration, the ideal characters of filter and introduces the characteristics and applications of some organic, inorganic, mixed and composite filters in China and abroad according to the classification. Finally, suggestions were proposed to enhance the mechanical strength, biological activity and sustained release performance of the filters, and the trends of filter were also put forward, in order to provide technical support for the popularization of biofilter.

Key words: filter; biofiltration; waste gas treatment; biological purification

生物过滤法是目前处理可生化废气最常用和最成熟的技术之一, 尤其是对那些低浓度、大气量有机废气^[1]。生物过滤系统的影响因素有多种, 但对整个装置运行效果影响最大的却是填料, 因为填料的理化性质直接影响着系统中微生物的附着性、填料床的含水率、透气性、更换频率、营养供给及使用寿命等。具有

良好理化性质的填料才能给微生物提供适宜其生长的微环境, 如温度、湿度、pH、营养物质和 O₂ 等^[2]。填料既是微生物附着生长的载体, 又是气液两相传质的介质, 填料的选取不仅影响其对污染物的净化效果, 还关系着整个生物处理系统的稳定性、经济性等^[3]。因此开展填料特性研究, 开发新型废气处理用生物填料

《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) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2014-10-15; 修回: 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(U1304216), 教育部博士点基金新教师类(20124101120015), 河南省科技攻关项目(122102310366), 河南省教育厅重点项目(13A610689)

作者简介: 朱仁成(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事废气污染控制研究 (电话) 0371-67781062 (电子信箱) zhurencheng2006@163.com; * 通讯作者, 副教授, 主要从事大气污染控制研究 (电话) 0371-67781062 (电子信箱) lsy76@zzu.edu.cn。

是十分必要的。近半个世纪以来,生物填料得到了长足的发展,国内外学者在填料研发方面进行了大量研究。本文分别就生物填料的废气净化机理、国内外研究进展及应用和新型填料的发展方向等方面进行探讨。

1 生物填料的废气净化机理

生物法废气净化的实质是利用微生物的新陈代谢作用将废气中的污染物质转变成简单的 CO_2 、 H_2O 以及微生物自身生命物质等^[4]。随着生物废气净化技术的迅速发展,其理论模型也取得了较大进展。虽然不同模型之间的吸附、传质等各有差异,但总体来说生物法废气净化过程主要是污染物从气相经液相最后到达生物膜的传质过程,以及其后被微生物降解或吸收并释放出能量的生物降解过程^[5]。Ottengraf的“吸收-生物膜理论”^[6]是最早提出且比较完整的生物膜数学模型,为生物膜理论的发展奠定了基础,后来的“Devanny 和 Hodge 模型”^[7]、“Deshusses 模型”^[8]以及“Shareefdeen 和 Baltzis 模型”^[9]都是从该模型发展而来的。国内生物膜理论研究比较先进的是孙珮石的“吸附-生物膜(新型)双膜理论”^[10]。

Ottengraf 提出的“吸收-生物膜理论”(如图1(a))是目前影响较大的理论模型^[10]。按照该理论,废气生物净化一般经历以下几个步骤:(1)在浓度差推动力作用下,废气中污染物由气相扩散到液相;(2)液相中的污染物进一步扩散到生物膜上,并被微生物捕获;(3)污染物在生物的新陈代谢过程中被降解,最终转化为小分子化合物(CO_2 和 H_2O 等)。

在 Ottengraf 模型基础上,孙珮石等^[11]建立了“吸附-生物膜(新型)双膜理论”(如图1(b))。该模型认为废气处理需经过以下4个阶段:(1)废气中污染物及 O_2 从气相主体扩散至湿润的生物膜表面并被生物膜吸附;(2)微生物迅速捕获吸附到生物膜表面的污染物及 O_2 ;(3)微生物将捕集到的污染物吞噬到体内,将其做为新陈代谢过程中的能源和营养源,经生化反应最终分解为的小分子无机物(如 H_2O 和 CO_2 等);(4)生化反应气体产物 CO_2 等从微生物膜表面脱附并反向扩散至气相主体中,而 H_2O 等则保留在微生物膜内。

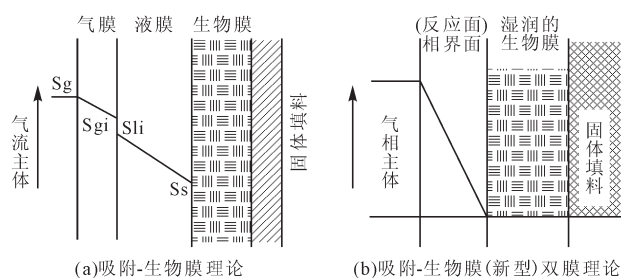


图1 两种理论模型
Fig.1 Schematic diagram of two theoretical model

2 理想填料的基本特性要求

2.1 颗粒尺寸和表面性质

填料应具备一定的比表面积,以利于微生物附着生长^[12]。填料粒径越小,比表面积越大。但粒径过小,造成填料堆积过于密实,流体流经填料表面时阻力较大,能耗随之增加^[3];并且小颗粒填料容易引起堵塞或被流体带走。微生物表面一般带负电荷,若填料表面带有正电荷将有利于微生物的附着,缩短挂膜时间^[13]。

2.2 比表面积和孔隙率

适当的比表面积可以为微生物提供充足的附着面积,增加单位填料微生物的含量,有利于提高生物塔的最大负荷和降解速率。另外,填料孔隙率与比表面积直接相关^[14]。较大孔隙率利于传质,能够为微生物生长提供充足的 O_2 ;一定程度上,孔隙率也决定着填料表面的粗糙程度,粗糙度越大越利于微生物的附着。资料显示,填料层的孔隙率应大于80%,为减少生物塔压头损失和确保废气的均匀分布,直径大于4.0 mm的填料应占60%以上^[15]。

2.3 营养供给能力

营养物质是微生物新陈代谢的基础,最优化的营养成分不仅可以缩短挂膜时间,还可以增加微生物活性,提高污染物的净化效率。装置停运或仅通入清洁空气时,具有营养供给能力的填料可以使微生物保持一定的活性,而不致大量减少;当装置重新启动时生物过滤装置的净化效率可以短时间内得到恢复。

2.4 持水性

从理论模型可知,废气中的污染物质及营养物质等主要是通过水膜被微生物吸附和吸收的,因此运行过程中填料必须具有一定的持续性。另外,良好的持水性对保持微生物的活性及防止填料干裂具有重要作用。为维持微生物的活性,填料的持水量应控制在40%~60%^[15]。

2.5 pH 缓冲能力

绝大多数好氧微生物在降解废气污染物时会产生酸性中间产物或酸类物质。如 NH_3 、 H_2S 等废气降解易产生 HNO_3 和 H_2SO_4 等产物,如果不及时将pH调节至适宜微生物生长的范围,易导致系统发生非正常工况。因此,具有良好的pH缓冲性能的填料既可以避免液体环境中pH波动幅度较大影响微生物生长,又能省去人为调节pH的复杂工序。

2.6 结构强度和耐腐蚀性

微生物在降解污染物的新陈代谢过程中,难免会产生大量的酸碱类中间产物及各种生物酶类,作为微生物膜的直接附着载体,填料必须具有较好的耐生物

腐蚀性。另外,填料长期处于高温、高湿的环境中,如果不具备一定的结构强度,很容易发生填料坍塌、压实等现象,造成整个填料床层的透气性差、气流分布不均匀,进而降低生物废气净化系统的性能。因此,确保填料在长期使用的情况下,不被压碎或生物腐蚀,始终为微生物的生存提供良好的生存环境是理性填料的基本特性之一^[16]。

3 填料的分类、特性及应用

3.1 无机填料

常见的无机填料有活性炭、熔岩石、沸石、珍珠岩、蛭石、陶粒及硅酸盐小球等。部分无机类填料的基本性质及图片如表 1、图 1 所示。从表 1 可知,不同填料,比表面积相差甚大^[16],吸附性能也不同。活性炭具有巨大的比表面积和众多孔穴,其吸附性能明显优于其他填料,具有较强的抗负荷波动性,但活性炭粒径较小,易堵塞,且制作成本较高,工业上很少单独使用^[17]。Duan H Q 等^[14]以活性炭为生物载体处理 H₂S 废气,结果显示该生物塔启动快,去除效率可达 94% 以上。廖强^[18]、吴卫军^[19]、汪凤诞^[20]、魏琛^[21]及席劲瑛^[22]等分别采用不同填料(如陶瓷球、陶粒、珍珠岩及沸石填料等),进行了除苯、甲苯、二甲苯、恶臭等废气,取得了较好效果。无机填料的主要优点是具有化学惰性和稳定性、机械强度高。但通常无机填料的密度较大,且不能给微生物提供营养物质,在工程中单独使用时具有一定局限性^[11]。

表 1 部分无机填料的物理性质
Table 1 Physical properties of some inorganic filters

填料	粒径 /mm	堆积密度 /kg·m ⁻³	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	孔隙率 /%
陶粒 ^[23]	6~8	890	550	54
活性炭 ^[24]	4	768	1.1×10 ⁹	37
沸石 ^[25]	4~5	1 972	—	31

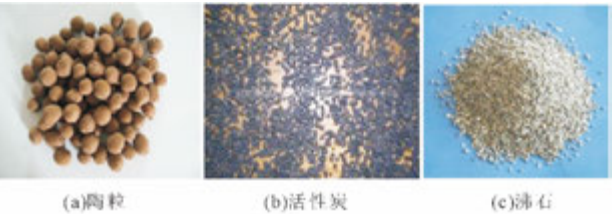


图2 无机填料
Fig.2 Some inorganic filters

3.2 有机填料

有机填料分为天然有机填料和人工合成高分子有机填料。工程中应用较多的天然有机填料有堆肥、木屑、竹炭、甘蔗渣、椰子纤维、树皮及玉米芯等天然的或经过人工适当处理后的填料。部分天然有机填料的基本性质如表 2 所示。从表 2 可知,玉米芯、花生壳

等填料质轻、孔隙率高、含水率适中、富含营养物质,比较适合微生物的附着生长。而堆肥、泥炭等泥质类填料,孔隙率和持水量都较大,也含有营养物质,特别是堆肥自身携带有多种微生物菌群,适合做废气处理填料。K Akushidou 等用锯末作为填料处理养殖业恶臭,结果表明锯末具有通气性好、吸附性强、持水能力适中、适合微生物生长繁殖等特点,是一种较好的除臭填料^[26]。张华新等以木屑为填料处理 H₂S,当进气容积负荷小于 153.2 gH₂S/(m³·d)时,填料塔对 H₂S 的去除率为 90% 以上^[27]。这类填料大部分取自农林牧副产品,来源广泛,价格便宜,具有较好的持水性,含有较高的有机质,但该类填料机械强度不高,容易引起床体压实,产生较大压降,导致填料塔的净化性能下降,通常需 3~5 年更换一次,并且很难再生,限制了这类填料在工业中的广泛应用。常见的人工合成高分子有机材料有鲍尔环、聚氨酯泡沫等。伍永刚^[28]、李昌建^[29]等分别以聚乙烯填料、新型 PP 填料考察对 H₂S 等气体的处理取得了较好的效果。梅瑜等^[30]对 3 种新型不同形状的聚丙烯填料性能进行评价,结果显示空心多面体和纹翼多面球的结构性能参数均优于普通填料。这类填料大多表面光滑、缺乏微孔结构、吸附性能差、不易挂膜,但由于具有质轻、机械强度高、耐用性强、便于批量生产等优点,在工业上仍具有一定的应用^[16]。

表 2 部分有机填料的物理性质
Table 2 Physical properties of some organic filters

填料	粒径 /mm	堆积密度 /kg·m ⁻³	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	孔隙率 /%	持水量 /%
木屑 ^[31]	5~10	150~180	0.05~0.1	50~60	70
玉米芯 ^[23]	10~15	0.11	0.22	69~74	70~80
花生壳 ^[31]	16	52	0.005	74	—
堆肥 ^[32]	—	133	13.4	95	80
泥炭 ^[16]	—	200~350	0.21~0.25	45~60	200~220

3.3 复混填料

复混填料就是由几种不同填料,按一定比例和排布方式,经过简单的物理混合而成,可以弥补单一组分填料的缺陷,充分发挥各填料的优势,是目前应用较多的填充方式,其填料和组合方式的选择对废气的净化效果具有显著影响^[33]。Makowiak 研究表明,几种不同填料混合使用的净化效率比使用单一填料要高;在改善填料性能方面,Nitsche 提出在填料中添加少量活性炭可以提高生物滤池对污染负荷的缓冲力;K Akushidou 研究发现生物塔填充前向填料内添加一些富含微生物的有机填料和提供微生物活动所需的营养物质,能提高填料中微生物的活性^[14]。天然有机填料富含营养物质,但耐用性较差,惰性填料机械性能

好,使用寿命长,但需要周期性补充营养物质和 pH 调节剂。因此,将有机填料和惰性填料按比例掺混而成的复混填料应运而生。Eric Dumont 等^[34]对 UP20、木屑、松树皮、泥炭和火山灰去除 H_2S 的性能进行了比较研究。结果表明,泥炭是去除高浓度 H_2S 的最佳选择,但是泥炭中加入 UP20 后,填料的去除效率得到显著提高。王军等^[35]将改性滤料、挂膜滤料和多孔填料按一定方式混合填充生物滤塔,对 CH_3SH 、VOCs 等的去除效率均大于 98%,混合填料能有效降低塔阻力且避免了“沟流”现象,其性能明显优于单一填料。Roshani 等^[36]以城市固废垃圾堆肥和塑料碎片($1.5\text{ cm} \times 1.0\text{ cm}$)按体积比 1:1 混合后做处理 H_2S 废气填料,有效解决了填料床层的压降较大问题。复混填料可以有效克服单一填料自身固有弱点,进一步提高了填料的净化性能,但在实际工业应用中仍存在比例难以控制、混合难以均匀等问题,增加了填料装填的复杂性,但复混填料为新型填料的开发提供了新的方向。

3.4 新型复合填料

近年来,将多种基本材料按一定比例复合成为填料开发的一种新趋势。这种填料往往将几个特性集于一身,如机械强度大、质轻、pH 缓冲和营养缓释等。Chan 等^[15]以泥炭为原料同时加入硼酸、磷酸氢二钠和硝酸钾等作为 Na 源、K 源和 P 源,并用聚乙烯醇做粘合剂,制得具有营养缓释功能的复合填料,在不外加营养液的条件运行 230 d, VOCs 去除效率仍保持在 98% 以上。E Dumont 等^[37]以碳酸钙、尿素、磷酸和一种粘合剂复合成一种圆柱状 UP20 填料。该填料具有良好的 pH 缓冲性和持水性,同时能够释放营养物质,运行 63 d 后,UP20 对 $10\text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 的 H_2S 去除率仍在 93% 以上,其性能明显优于松树皮,虽然与同类产品相比具有一定优越性,但是成本较高,且不能很好的为微生物提供营养物质,需与其他填料配合使用^[38]。苏会东等^[39]以粉煤灰、水泥、石膏、 CaCl_2 、 NaCl 等为原料,研制出一种新型高强度、具有微量元素缓释功能的生物填料;专利 CN1935332^[40]公布了一种新型组合填料,该填料将聚氨酯泡沫嵌于球形支撑框架内,这样既保证了填料的机械强度,又增大了聚氨酯泡沫的比表面积,易于挂膜,阻力系数仅为 $6.9 \times 10^{-4}/\text{m}$ 。国内陈建孟^[41]、李顺义^[42]、万顺刚^[43]及魏永臣^[44]等都在新型复合填料研究方面做了大量工作,取得了一定进展。图 3 (a)、(b)分别为 E Dumont 和李顺义合成的新型复合填料 UP20^[2]和包埋填料^[42]。复合填料的研发正处于刚起步阶段,距离工业实践应用还有一定距离,需要进一步研究。

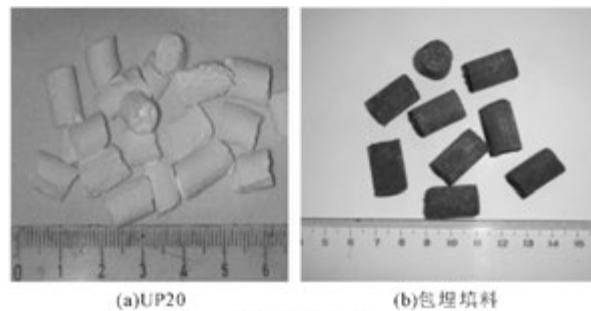


图3 复合填料
Fig.3 Some composite filters

4 生物填料的研究方向

生物填料从最初的土壤、玉米芯等天然材料到新型有机填料和复合填料的出现,其总的发展趋势是弱化自然因素影响,强化人工控制过程。根据理想填料的特性并结合最近研究热点,提出以下几种生物填料的研究发展方向。

4.1 特殊材料填料及组合填料的研究

理想填料应是兼具强度高、耐腐蚀、比表面积大、适宜微生物附着生长、吸附性和持水性强、自身不易分解等各优点于一身的特殊材料。目前,已经开发的填料很难全面满足上述条件,多种填料组合是解决上述问题的一种途径,因此特殊材料开发及组合填料将是今后填料的一个研究方向。

4.2 营养缓释复合填料的开发

开发新型缓释复合填料,控制填料中微生物生长繁殖所需营养元素的缓慢释放,满足净化过程营养的供给,从而保证装置的长期运行。陈建孟等^[39]利用粘合剂、有机矿粉及纤维等材料制得一种新型填料,能在潮湿环境中保持良好的粘结强度,并具有营养缓释功能,系统停运 12 d,其性能恢复时间只需 2 d。

4.3 负载功能微生物填料

利用固定化技术,将微生物包埋到载体上也是今后填料开发的一个新动态。Jerónimo 等^[45]用黏土球形填料外面包层堆肥处理 VOCs 取得了较好的效果。朱仁成等^[46]采用包埋固定法,将功能微生物负载至载体上,制备出一种新型填料,并取得了较好的理化性质和净化性能。普通填料在实际应用过程中,需要进行微生物驯化和挂膜,一方面,漫长的驯化过程延长了启动周期,另一方面,挂膜大多只在填料表面进行,内部微生物数量较少,易被淋洗液带走。负载功能微生物复合填料直接将微生物包埋进填料中,省去了驯化和挂膜过程,可缩短启动周期,提高净化效率,是生物复合填料研发的一个新思路。如何保证填料内部微生物的活性和功能不变性是该填料制作过程的主要技术难点。在水处理中,李志荣曾以聚氨酯包埋固定化硝

化菌颗粒为对象,对包埋在其中的硝化菌增殖衰亡规律进行了研究^[47],但在废气处理中研究的还比较少。

5 总结

随着生物过滤技术研究和应用的不断深入,微生物、填料、水分、pH 及营养等影响因素的作用及存在的一些问题逐渐得到国内外学者的重视。传统填料在工程应用过程中出现的诸多问题急需解决,新型功能填料的开发是一个良好的解决途径。目前新型功能填料的开发已取得了较好的研究进展,但距离工业实用阶段仍有一定距离,仍需大量试验研究。

[参考文献]

- [1] Malhautier L, Khammar N, Bayle S, et al. Biofiltration of volatile organic compounds[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005, 68(1): 16–22.
- [2] Dumont E, Andrès Y, Le C P, et al. Evaluation of a new packing material for H₂S removed by biofiltration[J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 42(2): 120–127.
- [3] 刘玲, 郭兵兵. 生物脱臭填料的研究现状及发展趋势[J]. 当代化工, 2009, 38(2): 169–172.
Liu Ling, Guo Bingbing. Development trend and research of bio-deodorizing carriers[J]. Contemporary Chemical industry, 2009, 38(2): 169–172.(in Chinese)
- [4] 廖强, 陈蓉, 朱恂. 生物膜填料床内废气净化的理论模型[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(2): 76–80.
Liao Qiang, Chen Rong, Zhu Xun. Theoretical models for waste gas treatment in biofilter and biotrickling filter[J]. Chongqing Environmental Science, 2002, 24(2): 76–80.(in Chinese)
- [5] 何坚, 季学礼, 羌宁. 生物滴滤池处理挥发性有机污染物的进展[J]. 上海环境科学, 1999, 18(8): 261–263.
He Jian, Ji Xueli, Qiang Ning. Progress on treating volatile organic compounds by biotrickling filter method[J]. Shanghai Environmental Science, 1999, 18(8): 261–263.(in Chinese)
- [6] Ottengraf S P P, Van D O A H C. Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2001, 76(1): 61–69.
- [7] McNevin D, Barford J. Modelling adsorption and biological degradation of nutrients on peat[J]. Biochemical Engineering Journal, 1998, 2(3): 217–228.
- [8] Baltzis B C, Mpanias C J, Bhattacharya S. Modeling the removal of VOC mixtures in biotrickling filters[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2001, 72(4): 389–401.
- [9] Rittmann B E, Stilwell D, Ohashi A. The transient-state, multiple-species biofilm model for biofiltration processes[J]. Water Research, 2002, 36(9): 2342–2356.
- [10] 孙珮石, 杨显万, 谢蕴国, 等. 生物法净化低浓度挥发性有机废气的动力学问题探讨[J]. 环境科学学报, 1999, 19(2): 153–158.
Sun Peishi, Yang Xianwan, Xie Yunguo, et al. Kinetics of purifying waste gas containing volatile organic compounds (VOC) in low concentration by using the biological methods[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(2): 153–158.(in Chinese)
- [11] 孙珮石. 生物化学法净化低浓度有机废气研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 1999.
Sun Peishi. Purification Research of Low Concentration Volatile Organic Compounds Using Biochemical Process[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 1999.(in Chinese)
- [12] 李琳, 李慧丽, 刘俊新. 废气生物处理填料的特点与选择依据[J]. 化工环保, 2011, 31(6): 490–496.
Li Lin, Li Huili, Liu Junxin. Characteristics and selection basis of packing for waste gas bio-treatment[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2011, 31(6): 490–496.(in Chinese)
- [13] 何坚, 季学礼. 生物滴滤法处理有机废气甲苯工艺填料的选择[J]. 环境技术, 2003, 1(1): 36–40.
He Jian, Ji Xueli. The packing selection for the process of purifying waste gas containing toluene by biotrickling filter[J]. Environmental Technology, 2003, 1(1): 36–40.(in Chinese)
- [14] 徐晓军, 宫磊, 杨虹. 恶臭气体生物净化理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
Xu Xiaojun, Gong Lei, Yang Hong. Theory and Technology of Odorous Gases' Biological Purification[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.(in Chinese)
- [15] Chan W C, Lu M C. A new type synthetic filter material for biofilter: preparation and its characteristic analysis[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2005, 13(1): 7–17.
- [16] 金顺利, 包诚磊, 王毓仁, 等. 废气生物滤床填料研究进展[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(6C): 220–224.
Jin Shunli, Bao Chenglei, Wang Yuren, et al. Research advances in packing materials of biological filter purification for waste gases[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(6C): 220–224.(in Chinese)
- [17] Liang J, Lawrence K C C, Ning X G, et al. Application of biological activated carbon as a low pH biofilter medium for gas mixture treatment[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, 96(6): 1092–1100.
- [18] 廖强, 田鑫, 朱恂, 等. 陶瓷球填料生物滴滤塔降解甲苯废气[J]. 化工学报, 2003, 54(12): 1774–1778.
Liao Qiang, Tian Xin, Zhu Xun, et al. Purifying waste gas containing low concentration toluene in trickling biofilter with ceramic spheres[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(12): 1774–1778.(in Chinese)
- [19] 吴卫军. 生物过滤法净化苯、甲苯和二甲苯混合废气的实

- 验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
- Wu Weijun. Studies on the Treatment of Off-gases Containing BTX Waste-gas by Biofiltration[D]. Xi'an Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.(in Chinese)
- [20] 汪凤诞,初庆东,刘强,等. 陶粒填料生物滴滤塔处理二甲苯废气[J]. 化工环保, 2004, 24(2): 121-124.
- Wang Fengdan, Chu Qingdong, Liu Qiang, et al. Study on treatment of xylene-containing waste gas by trickling biofilter packed with ceramic pellets[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2004, 24(2): 121-124.(in Chinese)
- [21] 魏琛,盛贵尚,张盛莉. 一种陶粒生物填料及制备研究[J]. 烟台大学学报, 2011, 24(3): 241-245.
- Wei Chen, Sheng Guishang, Zhang Shengli. Introduction and preparation of a kind of ceramic biological filter media [J]. Journal of Yantai University, 2011, 24(3): 241-245.(in Chinese)
- [22] 席劲琰,胡洪营,罗彬,等. 不同填料生物滤塔净化城市污水厂恶臭气体研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(3): 1-3.
- Xi Jinying, Hu Hongying, Luo Bin, et al. Comparison of biofilters packed with different media for odor removal from municipal wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(3): 1-3.(in Chinese)
- [23] Liu Q, Babajide A E, Zhu P, et al. Removal of xylene from waste gases using biotrickling filters[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 29(3): 320-325.
- [24] Duan H, Koe L, Yan C, et al. Biological treatment of H₂S using pellet activated carbon as a carrier of microorganisms in a biofilter[J]. Water Res, 2006, 40(14): 2629-36.
- [25] 苑宏英,郭静. 生物焦炭滴滤塔降解苯乙烯废气的中试启动研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(12): 105-107.
- Yuan Hongying, Guo Jing. Pilot-scale study on treatment of waste gases containing styrene by a biotrickling filter [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(12): 105-107.(in Chinese)
- [26] Kabir E, Kim K H. An investigation on hazardous and odorous pollutant emission during cooking activities[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 188(1/2/3): 443-54.
- [27] 张华新,李顺义,杨松波,等. 多层生物滤塔去除废气中硫化氢[J]. 环境工程学报, 2011, 5(1): 157-160.
- Zhang Huaxin, Li Shunyi, Yang Songbo, et al. Research on treatment of odor gas containing hydrogen sulfide by multi-layer biofilter [J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(1): 157-160.(in Chinese)
- [28] 伍永刚,任洪强,丁丽丽. 新型聚乙烯填料生物滴滤床净化硫化氢气体运行特性[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1451-1456.
- Wu Yonggang, Ren Hongqiang, Ding Lili. Study on the start-up of an innovative polyethylene carrier biotrickling filter treating waste gas containing hydrogen sulphide [J]. Environmental Science, 2010, 31(7): 1451-1456.(in Chinese)
- [29] 李昌建,邹克华,宁晓宇,等. 新型 PP 填料生物滴滤法净化高浓度 H₂S 的实地中式研究[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(6): 73-76.
- Li Changjian, Zou Kehua, Ning Xiaoyu, et al. Field pilot study on treating high concentration H₂S by biotrickling filter with the new PP carrier [J]. Environmental Science Survey, 2010, 29(6): 73-76.(in Chinese)
- [30] 梅瑜,成卓韦,王家德,等. 新型生物滴滤填料性能评价[J]. 环境科学, 2014, 34(12): 4661-4668.
- Mei Yu, Cheng Zuowei, Wang Jiade, et al. Performance evaluation of three novel biotrickling packings [J]. Environmental Science, 2014, 34(12): 4661-4668.(in Chinese)
- [31] 张华新. 多层生物滤塔净化硫化氢废气研究 [D]. 郑州:郑州大学, 2010.
- Zhang Huaxin. Research on Treatment of Odor Gas Containing Hydrogen Sulfide by Multilayer Biofilter [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.(in Chinese)
- [32] Ding Y, Shi J, Wu W, et al. Trimethylamine (TMA) infiltration and transformation in biofilters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143(1/2): 341-348.
- [33] Ottengraf S P P, Meesters J J P, Oever A H C. Biological elimination of volatile xenobiotic compounds in biofilters [J]. Bioprocess Engineering, 1986, 1(2): 61-69.
- [34] Dumont E, Andrès Y. Evaluation of innovative packing materials for the biodegradation of H₂S: a comparative study [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2010, 85(3): 429-434.
- [35] 王军,刘发强,秦赏,等. 组合填料在生物滤塔上的应用[J]. 石化技术与应用, 2009, 27(1): 63-66.
- Wang Jun, Liu Faqiang, Qin Shang, et al. Application of compound packing materials in biotrickling filter tower [J]. Petrochemical Technology & Application, 2009, 27(1): 63-66.(in Chinese)
- [36] Roshani B, Torkian A, Aslani H, et al. Bed mixing and leachate recycling strategies to overcome pressure drop buildup in the biofiltration of hydrogen sulfide [J]. Biore-source Technology, 2012, 109(4): 26-30.
- [37] Dumont E, Andrès Y, Le C P, et al. Evaluation of a new packing material for H₂S removed by biofiltration [J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 42(2): 120-127.
- [38] Dumont E, Andrès Y. Evaluation of innovative packing materials for the biodegradation of H₂S: a comparative study [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2010, 85(3): 429-434.
- [39] Su H D, Zhou P F. The experimental study of preparation of unburned ceramsite and its reaction mechanism [J]. Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, 2011: 1874-1878.

(下转第 181 页)

分布布局,逐步完善和配套大型畜禽养殖场畜禽粪便的综合治理设施。发展沼气利用等综合利用项目,增加配套耕地以消纳粪便,变废为宝。(4)生活污水方面,应加强节水观念的宣传,使用少磷或无磷洗涤剂,推广农村污水处理设施的建设。

4 结语

本文基于水环境容量模型估算了长湖流域 COD、TP、TN 的最大年允许负荷,借鉴 TMDL 管理策略,构建了长湖水污染总量控制模式,主要研究结论如下:

(1)长湖流域 COD 的现状负荷不需要进行削减,而 TP、TN 污染已超过目标浓度,不能满足流域水环境功能区要求,其削减百分率分别高达 68.20%、30.60%。

(2)长湖水环境恶化可概括为两大方面:点源污染是造成长湖水水质污染的主要原因。非点源污染则是造成长湖水体富营养化的罪魁祸首。长湖流域的富营养化控制应以非点源控制为主,重点控制农业种植和水产养殖污染。

(3)为保障长湖水水质达到水功能区划要求,改善其水质污染严重的现状,必须从点源、非点源排污现状出发,针对本流域污染特征,采用基于 TMDL 的科学湖泊水质管理方法来指导实践,进行污染治理与富营养化控制。

[参考文献]

- [1] 徐华. 长湖水环境状况及原因分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2): 254-255.
- [2] 邢乃春, 陈捍华. TMDL 计划的背景、发展进程及组成框架[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(9): 535-537.
- [3] 叶兴平, 张玉超. TMDL 计划在污染物总量控制中的应用初探[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(8): 13-16.
- [4] 倪晓. TMDL 计划在流域水污染物总量控制中的应用[J]. 绿色科技, 2012(10): 122-124.
- [5] 徐宗学, 徐华山, 吴晓猛, 等. 流域 TMDL 计划中的关键技术[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 8-13.
- [6] Rhomas GH et Karyony, Hassan AH Phosphorus. Nitrogen loading and trend of fish oath as index of Lake Mafut[J]. Eutrophication Egypt Public Health Assoc, 1993, 68(5/6): 93-615.
- [7] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323-334.
- [8] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004(7): 40-45.
- [9] 帅方敏, 王新生, 陈红兵, 等. 长湖流域非点源污染现状分析[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(5): 118-122.
- [10] 李兆华, 李瑞勤. 长湖水污染防治研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

(上接第 151 页)

- [40] 王家德, 金顺利, 陈建孟, 等. 一种缓释复合生物填料性能评价[J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(12): 1874-1879.
Wang Jiade, Jin Shunli, Chen Jianmeng, et al. Performance evaluation of a slow-release composite media for biofiltration[J]. Scientia Sinica Chimica, 2010, 40(12): 1874-1879.(in Chinese)
- [41] 陈建孟, 王家德, 王毓仁, 等. 一种废气处理用生物填料: 中国, 200620107863[P]. 2007-03-28.
Chen Jianmeng, Wang Jiade, Wang Yuren, et al. A Biological Filter Used for Odor Gases Treatment China, 200620107863[P]. 2007-03-28.(in Chinese)
- [42] 李顺义, 朱仁成, 王岩. 一种包埋微生物复合填料的制备及性能评价[J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 260-265.
Li Shunyi, Zhu Rencheng, Wang Yan. Preparation and performance evaluation of a composite filler embedding microorganisms[J]. Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(1): 260-265.(in Chinese)
- [43] 万顺刚, 李桂英, 安太成. 固定化微生物技术在大气恶臭污染物处理中应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1575-1584.
Wan Shungang, Li Guiying, An Taicheng. Recent advance

- in immobilized microorganisms technology and its application in the treatment of atmospheric odorous pollutants[J]. Journal of Ecoenvironment, 2011, 20(10): 1575-1584.(in Chinese)
- [44] 魏永臣, 程荣, 周伟, 等. 新型填料特性及其在生物脱硫中的应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(6): 1990-1994.
Wei Yongchen, Cheng Rong, Zhou Wei, et al. Characteristics of a new packing material and its application in biodesulfurization[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(6): 1990-1994.(in Chinese)
- [45] Jerónimo H, óscar J, Prado, et al. Development and application of a hybrid inert/organic packing material for the infiltration of composting off-gases mimics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/2/3): 665-672.
- [46] Zhu Rencheng, Li Shunyi, Bao Xiaofeng, et al. Evaluation of new type of synthetic filler for the removal of NO_x[J]. Asian Journal of Chemistry, 2014, 26(24).(in Press)
- [47] 李志荣. 包埋颗粒内硝化菌增殖衰亡规律及硝化特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
Li Zhirong. Cells Proliferation and Decay of Immobilized Nitrifiers and Nitrification Characteristics[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.(in Chinese)