

## 面源污染水治理的人工湿地治理技术

余志敏,袁晓燕,施卫明

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室,中科院南京土壤研究所,南京 210008)

**摘要:**随着社会的发展,点源污染已得到有效治理,面源污染治理的重要性日趋显现,而与之相关的治理技术仍然发展缓慢。为完善其治理技术与措施,作者通过分析面源污染的成因(以农村为主),提出了有效治理面源污染的人工湿地技术,并介绍了该技术的基本原理,综合总结了国内外近年来的应用研究进展。据此,作者认为人工湿地技术以其自身低投入、低能耗、运行管理简单等优势,在面源污染治理中特别是农村面源治理将有十分广阔的前景。

**关键词:**面源污染;径流;人工湿地;温室气体

中图分类号:X52

文献标志码:A

论文编号:2009-1731

### The Technology of Constructed Wetlands to Non-Point Source Pollution Water Treatment

Yu Zhimin, Yuan Xiaoyan, Shi Weiming

(Institute of Soil Science, Chinese Academy, Nanjing 210008)

**Abstract:** With the development of the society, point pollutions were been disposed effectively, non-point source pollution(NPSP) management was become important more and more, but the technology for NPSP still developed very slowly. For consummated its interrelated disposal technology and measure, this paper analyzed the cause of NPSP (emphasis on rural), put forward the constructed wetlands technology which could be available to NPSP control, and introduced the principium, summarized its research improvement of this technology in the world. According to the situation, the author considered that the constructed wetlands technology must be have very spacious and long-term future to control the NPSP especially in rural region with its low-investment, inexpensive, easy maintenance and management predominance.

**Keywords:** non-point source pollution; runoff; constructed wetlands; greenhouse gas

#### 0 前言

随着社会经济的不断发展,世界各国对环境保护工作的重要性认识也越来越深刻,近年来,各种环境法律法规日趋完善,国际合作交流范围逐渐扩大,环境保护工作从点到面不断扩大,环保工作进入了全球性范围合作。中国的环境保护工作随着改革开放的不断深入日趋强化,环境保护理念不断升华。2006年,第六次全国环境保护大会提出“三个转变”,昭示着中国的

环保事业已经进入一个新纪元,把环保工作推向了以保护环境优化经济增长的新阶段,环境保护工作从只重视末端治理,到重视从源头到末端的全过程控制,再到发展循环经济;从只重视单个企业的污染治理,到重视从产业结构调整、提高资源能源利用效率的角度解决环境问题。

随国家环保政策的优化,环境治理不再局限于单个企业单个排污点的治理,面源污染的治理问题逐渐

**基金项目:**国家科技支撑计划课题“农田污染过程阻断关键技术研究”(2006BAD17B03);国家“十一五”重大科技专项课题:典型小流域污染物削减集成技术与示范(2008ZX07101-006-06)。

**第一作者简介:**余志敏,男,1981年出生,湖南岳阳人,助理工程师,硕士,主要从事人工湿地污水处理系统研究。通信地址:210008 江苏省南京市北京东路71号南京土壤研究所植物营养室, Tel: 025-86881586, E-mail: yzm\_fisher@126.com。

**通讯作者:**施卫明,男,1963年出生,浙江人,博士,研究员,博士生导师,主要从事养分管理与农业面源污染控制方面的研究。通信地址:210008 江苏省南京市北京东路71号南京土壤研究所, Tel: 025-86881566, E-mail: wmshi@issas.ac.cn。

**收稿日期:**2009-08-27, **修回日期:**2009-09-08。

得到重视。调查显示,中国131个主要湖泊中有67个呈现富营养化,其中农业面源污染占比例较大<sup>[1]</sup>,重点治理的“三湖”流域中太湖流域总氮和总磷污染量有51.3%和67.5%是农业面源所产生的<sup>[2]</sup>,巢湖流域水体氮磷污染物中农业面源污染占46%<sup>[3]</sup>,滇池流域水体氮磷污染物中面源污染占入滇池污染物总量的45%<sup>[4]</sup>,面源污染的危害性以及治理的重要性由此可见。

## 1 面源污染

### 1.1 分类

面源污染指的是生活污水、农田废水、固体废弃物、农药化肥淋失、城镇地表径流、矿区和建筑区地表径流等随河流和雨水进入水体后造成的污染。由区域性来分析分为城市面源污染和农村面源污染,而中国幅员辽阔的农村基本国情决定了农村面源污染在流域污染中必然占据重要部分。

### 1.2 农村面源污染产生

1.2.1 种植业方面 第一,种植业化肥的施用。由于自身技术水平所限,中国种植业不合理施用化肥情况十分普遍,主要表现为化肥过量施用以及不平衡施用。由于化肥的不合理使用,肥料中的营养成分大量流失,利用率有限,流失的养分容易造成土壤板结,污染水体。第二,种植业农药的使用。由于农药的过量使用,以及落后的使用方法与技术,导致过量的农药残留,通过各种途径进入土壤与水体,造成土壤与水体污染,对人类生存环境产生不利影响。第三,种植业污水灌溉。由于大量的未经处理的污水被直接用于种植业灌溉,已造成土壤、农产品及地下水的严重污染。近年来,种植业污水灌溉面积大幅增长,且污水水质也发生明显变化,污染物浓度及有毒有害成分不断增加。数据显示,中国种植业污水灌溉面积从1963年的63万亩发展1998年的5 427万亩,近年来更有加剧趋势<sup>[5]</sup>。

1.2.2 养殖业方面 一方面,畜禽养殖业产生的畜禽粪便通过冲洗水、降雨或直接排放进入水体,不但对地表水及地下水环境造成严重的污染,对土壤以及空气也能产生严重影响,而且对疾病有一定传播作用。据调查,中国80%的规模化畜禽养殖场没有必要的污染物治理措施,畜禽粪便已经成为中国农业面源污染的主要来源<sup>[6]</sup>。另一方面,主要是水产养殖业的饲料及水产排泄物。水产养殖中不断投放的饲料、水产排泄物、各种水产病虫害药剂通过鱼塘换水、清塘等途径进入水体,带来不可轻视的水体污染。

1.2.3 农村生活污水 一方面,居民生活过程中产生的污水,包括厕所排放污水、洗浴洗涤和厨余污水等。在

中国具有代表性的9个省43个县74个村庄的调查报告表明,96%的村庄没有污水处理系统,生活污水随意排放<sup>[7]</sup>。据估计,到2010年,中国村镇污水排放量可能达到约270亿t<sup>[8]</sup>。另一方面,由于村镇的生产生活垃圾缺乏合理处置措施,垃圾回收利用率低,无处理现象普遍,大多露天堆放,其渗漏液进入水体,对地表水体及地下水环境造成严重影响。

### 1.3 农村面源污染的治理工程技术

由于农村面源污染的分散性、随机性、复杂性等特征,因此其治理工作不能照搬点源污染控制的方法和手段,而需要寻求与面源污染特征规律对应的控制措施。目前,应用在面源污染治理的工程措施主要有垃圾收集坑、农用沼气池、生物净化公厕、高效藻类塘、植被缓冲带、截污沟、蓄洪排洪塘、人工湿地等。而人工湿地技术作为一种高效低耗的生态处理技术,因其自身的适用性及中国农村面积广大的国情,注定其在中国面源污染控制中具有广阔的应用与发展前景。

## 2 人工湿地技术

### 2.1 分类

根据人工湿地内水流方式的不同,一般可将人工湿地分为:(1)表面流人工湿地(Surface Flow Wetland, SFW);(2)潜流人工湿地(Subsurface Flow Wetland, SSFW);(3)垂直流人工湿地(Vertical Flow Wetland, VFM)<sup>[9]</sup>。表面流人工湿地是最为接近天然湿地的一类人工湿地,通常利用天然沼泽、废弃河道等洼地改造而成的,具有自由水面,人工辅以拦污、布水、基底修复等工程措施,防止有害物质对地下水造成危害。而在潜流湿地系统中,污水在床体内部流动,一方面能够充分利用填料表面的生物膜、植物根系等作用,还能延长水力停留时间,从而提高其处理效果及能力;另一方面人或野生动物接触废水以及寄生虫感染可能性小,可以避免难闻气味和其他有害物质的产生,而且冬季还具有保温作用,处理效果受气候影响小。

### 2.2 去除原理

人工湿地不仅能有效去除污水中的悬浮物、有机污染物、氮和磷等,而且能有效去除病原菌、重金属、藻毒素等外源生物活性物质。其污水处理原理十分复杂,是各种因素的综合作用,基质、植物、微生物是人工湿地发挥净化作用的3个主要因素。其中基质作用主要是沉淀、过滤和吸附、以及为湿地植物和微生物的生存提供环境,污染物经过基质的过滤和吸附作用,被截留下来,最后被湿地植物吸收,或以更换填料的方式去除。而微生物作用比较复杂,主要微生物有细菌、放线菌、真菌,污水中的有机物降解、氮磷的去除,主要是

通过各种微生物的联合作用以及水生植物和各种微生物的协同作用进行的。在湿地净化污水的过程中,生物因素(植物、微生物和酶)发挥了重要作用<sup>[10-13]</sup>。

### 2.3 应用研究

人工湿地是20世纪70年代发展起来的一种污水处理技术,其作为一种生态污水净化技术已趋于成熟,具有较高的污染负荷去除率、投资低、处理效果好、操作简单、维护和运行费用低等优点,显示出具有巨大的优越性,但其净化效率仍然受到气候、温度、土壤、植物种类等因素的影响<sup>[14]</sup>。

**2.3.1 国外研究进展** 国外人工湿地应用研究始于20世纪70年代,随着研究工作在各个领域的不断深入,人工湿地污染物净化机理逐渐清晰,其工艺参数愈加优化,工艺技术已经日趋完善,对人类生存环境的改善、污水处理事业发展已经初见成效。在欧洲,如瑞典,自1996年到2002年间,在农业流域建设了超过2350 hm<sup>2</sup>湿地;丹麦也建造了大约3 200 hm<sup>2</sup>湿地<sup>[15]</sup>。在美国,目前有数百处人工湿地工程用于各类废水处理<sup>[16]</sup>。

人工湿地由于可以在大范围的水力负荷条件下运行,有一定污水存储能力,而且能够去除大量的污染物质,因此特别适合处理农业径流面源污染。当人工湿地建设在农业区域时,原表层土壤及湿地底部土壤特性会影响到农业径流污染物的去除。Liikanen等<sup>[17]</sup>研究指出,原表层土壤中因长期耕作,土壤中吸附有大量的磷,如果不去除的话就可能成为湿地处理时磷污染的源头。如果建设湿地时将原表层土壤去除,会大大降低湿地处理径流时土壤中释放出磷的风险,而湿地底部是富含铝氧化物或铁氧化物的土壤时,则有利于人工湿地处理农业径流污染物中磷的去除。

通过人工湿地处理农业径流水的研究,人工湿地可以有效的降低农业径流中除草剂浓度,Detenbeck等人<sup>[19]</sup>报道,通过湿地处理,在一到两周内有超过一半的除草剂能被去除,Kadlec和Hey<sup>[19]</sup>报道在人工河流湿地处理工艺中除草剂的去除率为25%~95%。与植物吸收作用相比,微生物降解是除草剂降解的主要机理<sup>[20]</sup>,在湿地土壤中各类电子受体如氮、硫及碳氧化物处于缺氧状态时,除草剂几乎没有降解<sup>[21]</sup>。Heather等<sup>[22]</sup>人研究中MPN方法检验结果表明,湿地中低密度微生物种群能够矿化除草剂的衍生链,从而使除草剂不产生二次污染。

利用人工湿地处理牲畜养殖废水研究<sup>[23]</sup>发现,人工湿地处理牲畜废水平均一般水深38 cm,氨氮是进水氮污染物的主要形式,而在氧不足的情况下氨挥发

可能是湿地氮去除的主要机理,但是也有研究<sup>[24]</sup>报道氨挥发在湿地处理牲畜废水工艺中氮去除在中只占很小一部分<sup>[1]</sup>。高浓度的氨氮和水深对氮去除的硝化反硝化作用带来不利的影响,而且对湿地植物的生长及活性产生负面作用,从而对人工湿地长期性处理高浓度氮废水有负面的影响<sup>[25-26]</sup>。Hunt等人<sup>[27]</sup>研究表明,在水深较浅(<10cm)的情况下,人工湿地处理牲畜养殖废水氮污染物的主要机理是反硝化作用,但也有研究<sup>[28]</sup>认为,在水深为15~30 cm的情况下,主要机理是植物的吸收及土壤的积蓄。

而人工湿地在处理市政污水时不仅有去除污染物的作用,还具有一定消毒作用。研究结果表明,在地中海环境条件下,大肠菌的去除与其他季节相比在冬季最低,在低温条件下日光照射在杀死大肠菌时起了重要的作用。在充足的日照和高温情况下,大肠菌的去除率达到最高值。此外,发现湿地出水中出现沙门氏菌的可能性与总大肠菌浓度有关,而进水中大肠菌的增加也提高了沙门氏菌出现的机率。当总大肠菌浓度低于10<sup>2</sup>/100 mL时,出水中出现沙门氏菌的可能性最大<sup>[29]</sup>。Giraud等人<sup>[30]</sup>通过人工湿地对40种真菌进行研究对比,筛选出几种对废水中多环芳烃(PAHs)毒物去除的有效菌种,其中有两种菌种对葱的去除能力超过70%,真菌的降解能力和它们的细胞外磷氧化物(PO<sub>4</sub>)活性没有关系。

此外,国外学者在强化人工湿地污染物去除能力方面也做了许多工作,如增强湿地的复氧功能等。一般情况下,植物通过从大气中吸收氧气运输到根系,从而使种植湿地植物的人工湿地有较高的氮去除率<sup>[31]</sup>,而人工曝气对湿地基质的氧化作用比植物供氧作用影响更大<sup>[32]</sup>,因此,有曝气复氧功能的人工湿地也具有比普通人工湿地更高的氮去除效率<sup>[33]</sup>。

**2.3.2 国内研究进展** 中国人工湿地技术研究相对较晚,20世纪90年代,在深圳白泥坑建立起中国第一个人工湿地污水处理工程。近年来,由于科研工作者的不断努力,人工湿地技术在国内取得长足进步,应用领域不断扩大,在城镇污水处理、农田径流废水处理、工业废水处理、养殖废水处理等方面都得到广泛的应用。

人工湿地系统对太湖地区农村生活污水进行了脱氮除磷的试验研究结果表明,在夏季,对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP的去除率分别为83%、80%和83%;在冬季,去除率分别为90%、90%和94%。降低进水容积负荷可延长系统的水力停留时间,有利于保持人工湿地系统的除污效率;二级湿地采用粒径较小的填料有助于维持系统对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP去除效果的稳定性<sup>[34]</sup>。有研究<sup>[35]</sup>

表明,人工湿地在污染物浓度较低的情况下对污水中C、N、P的去除效果都在60%以上,从主要控制目标氮磷的去除效果来看,表现出了对污水中各污染物的良好的降解效果。因此,可以说人工湿地系统是一种用于面源水污染控制的理想选择。

对含高浓度有机物和氮磷的养殖场污水采用人工湿地进行处理,研究结果<sup>[36]</sup>表明:循环出水显著提高了对BOD<sub>5</sub>、COD、SS和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率,且对BOD<sub>5</sub>的去除满足Monod方程;大部分NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N被硝化,对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率与其表面负荷率呈线性关系;随着硝化反应的进行,碱度减少,pH不断降低;循环出水可引入部分氧气,延长了污染物和附着于植物根系微生物的接触时间,提高了污染物的去除率。垂直流人工湿地对有机污染物的去除效果随季节变化差异不明显,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除效率最高可达90%以上<sup>[37]</sup>。岳春雷等人<sup>[38]</sup>采用人工湿地循环处理养鱼废水,湿地出水的硝态氮、总磷、化学需氧量等绝大多数指标达到了国家地面水一类标准;湿地运行以后,在不进行换水的条件下,养鱼池内水质能保持较好的状态,节约了地下水和电能,产生了显著的经济效益和生态效益。

对于油类污染的废水,全坤等人<sup>[39]</sup>通过人工湿地处理研究,结果表明,夏季人工湿地对石油类、COD、BOD<sub>5</sub>、TN、SS的去除率分别为79.22%、81.20%、89.67%、87.61%和89.47%;冬季则达到77.57%、78.98%、79.05%、71.35%、89.88%,证明了人工湿地在处理油类污染水时也存在可行性,进一步拓宽了人工湿地的应用领域。

### 2.3.3 存在的问题

1)人工湿地的堵塞:目前已有的工程应用来看,人工湿地的长期运行仍缺少安全保障,如果设计或管理不善,容易造成湿地的堵塞。有机负荷过高是堵塞的主要原因;系统内产生的生物量不断增加也是造成堵塞的一个因素;厌氧条件也会加速系统的堵塞;另外过多地种植植物和维护不及时也是造成堵塞的原因<sup>[40]</sup>。

2)温度影响:气温的降低会影响人工湿地的正常运行,低温条件下,植物生长代谢缓慢,微生物活性大大降低,从而导致污染物的去除率降低。由于人工湿地对污水中氮的去除主要是通过硝化与反硝化作用达成的,而硝化作用受温度影响大,在温度低于10℃时反应几乎停止,氮的转换效率下降,导致人工湿地在低温季节时去除率下降<sup>[41]</sup>。

3)气体问题:表面流型人工湿地因水流方式的原因,如果进水负荷过高,污水在湿地表面形成厌氧的水域,释放出难闻的气体。此外,人工湿地中微生物的硝

化与反硝化反应有产生温室气体(N<sub>2</sub>O)的潜在效应,而且人工湿地在处理废水时还会产生CH<sub>4</sub>气体<sup>[42-43]</sup>。

### 3 结语

人工湿地技术发展40多年来,其低投入、低能耗、低运营成本等优势逐渐体现,在面源污水处理方面的适用性和可行性也越来越被接受。随着社会经济的不断发展,面源污染水治理的重要性愈发明显,这需要科研工作者更加努力,将治理技术不断完善与优化,人工湿地技术以其独特的优势,在面源污染治理中必将扮演重要的角色。

### 参考文献

- [1] 王道涵,梁成华.农业磷素流失途径及控制方法研究进展[J].土壤与环境,2002,11(2):183-188.
- [2] 李志宏,张云贵,任志志.太湖流域农业氮磷面源污染现状及防治对策[J].中国农学通报,2008(S):24-29.
- [3] 马友华,蒋瑞芳,赵燕萍,等.巢湖流域农业面源污染控制生态补偿探讨[J].中国农学通报,2008(S):30-33.
- [4] 强继红.滇池水环境污染的工程治理综述[J].云南地理环境研究,2002,14(1):61-66.
- [5] 段忠清.我国农村面源污染的成因及其治理.无锡职业技术学院学报[J],2004,3(3):49-51.
- [6] 张翠绵,王占武,李洪涛.固态畜禽废弃物利用现状及发展对策[J].河北农业科学,2004,8(2):100-103.
- [7] 姜立辉,刘广奇.新农村建设污水处理模式的选择[J].建设科技,2006(13):50-51.
- [8] 沈东升,贺永华,冯华军,等.农村生活污水埋式无动力厌氧处理技术研究[J].农业工程学报,2005,21(7):111-115.
- [9] Brix H. Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. Water Sci tech, 1994,30(8):209-223.
- [10] 刘超翔,胡洪营,张健,等.人工复合生态床处理低浓度农村污水[J].中国给水排水,2002,18(7):1-4.
- [11] 刘超翔,董春红.潜流式人工湿地污水处理系统硝化能力研究[J].环境科学,2003,24(1):80-83.
- [12] 李向心,武德虎,孔德玉,等.人工湿地污水处理研究与进展[J].青岛建筑工程学院学报,2004,25(4):56-60.
- [13] 成水平.人工湿地废水处理系统的生物学基础研究进展[J].湖泊科学,1996,8(3):268-273.
- [14] 刘高燕,孙岩,王丽娟,等.对南四湖人工湿地生物降解能力的研究[J].广东化工,2006,33(2):43-45.
- [15] Vymazal J, Greenway M, Tonderski K, et al. Constructed wetlands for wastewater treatment. Ecological Studies, 2006. 190:69-97.
- [16] EPA. U S Guiding principles for constructed treatment wetlands: providing for water quality and wildlife habit[M]. Washington DC: U S EPA, Office of Wetlands, Oceans and Watershed, 2000.
- [17] Liikanen A, Puustinen M, Koskiahio J, et al. Phosphorus removal in a wetland constructed on former arable land [J]. Environ. Qual. 2004,33:1124-1132.
- [18] Detenbeck NE, Hermanutz R. Allen K, et al. Fate and effects of the

- herbicide atrazine in flow-through wetland mesocosms. *Environ. Toxicol. Chem.* 1996,15:937-946.
- [19] Kadlec, RH, Hey D.L. Constructed wetlands for river water quality improvement. *Water Sci. Technol.* 1994,29:159-168
- [20] McKinlay RG, Kasperek K. Observations on decontamination of herbicide-polluted water by marsh plant systems. *Water Res.* 1999, 33:505-511.
- [21] Larsen L, Jorgensen C, Aamand J. Potential mineralization of four herbicides in a ground water-fed wetland area. *J. Environ. Qual.* 2001, 30:24-30.
- [22] Heather B R, Jeffrey J J, James A M, et al. Treatment of atrazine in nursery irrigation runoff by a constructed wetland. *Water Research* , 2003,37:539-550
- [23] Knight, R.L.,Payne V.W.E.Jr., Borer RE, et al. Constructed wetland for livestock wastewater management. *Ecol. Eng.*2000,15:41-55.
- [24] Poach ME, Hunt PG, Sadler EJ , et al. Ammonia volatilization from constructed wetlands that treat swine wastewater. *Trans. ASAE* 2002.45:619-627.
- [25] Clark, E, Baldwin AH. Responses of wetland plants to ammonia and water level. *Ecol. Eng.* 2002.18:257-264.
- [26] Szogi A A, Hunt PG, Humenik FJ. Nitrogen distribution in soils of constructed wetlands treating lagoon wastewater. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2003.67:1943-1951
- [27] Hunt PG, Matheny TA, Szogi AA.. Denitrification in constructed wetlands used for treatment of swine wastewater. *J. Environ. Qual.* 2003.32:727-735.
- [28] Shamir E, Thompson TL, Karpisack MM, et al. Nitrogen accumulation in a constructed wetland for dairy wastewater treatment. *J. Am. Water Res. Assoc.* 2001.37:315-325.
- [29] Zderagas A, Panoras A, Zalidis GC, et al. The effect of environmental conditions on the ability of a constructed wetland to disinfect municipal wastewaters. *Environmental Management*,2002,29(4):510-515
- [30] Giraud F, Guiraud P, Kadri M. et al. Biodegradation of anthracene and fluoranthene by fungi isolated from an experimental constructed wetland for wastewater treatment. *Wat. Res.* 2001,25 (17): 4126-4136
- [31] Lin, YF, Jing, SR, Wang, TW, et al. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands. *Environ. Pollut.* 2002.119 (3), 413-420.
- [32] Maltais-Landry, G, Maranger, R, Brisson, J, Effect of artificial aeration and macrophyte species on nitrogen cycling and gas flux in constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 2009,35(2).
- [33] Nivala, J, Hoos, MB, Cross, C, et al. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Sci. Total Environ.* 2007,380(1-3), 19-27.
- [34] 帖靖玺,钟云,郑正,等.二级串联人工湿地处理农村污水的脱氮除磷研究[J].中国给水排水,2007,23(1):88-96.
- [35] 段志勇,施汉昌,黄霞,等.人工湿地控制滇池面源水污染适用性研究[J].环境工程,2002,20(6):64-66.
- [36] 何连生,朱迎波,席北斗,等.循环强化垂直流人工湿地处理猪场污水[J].中国给水排水,2004,20(12):5-8.
- [37] 丁晔,韩志英,吴坚阳,等.不同基质垂直流人工湿地对猪场污水季节性处理效果的研究[J].环境科学学报,2006,26(7):1093-1100.
- [38] 岳春雷,常杰,葛滢,等.复合垂直流人工湿地对低浓度养殖废水循环净化功能研究[J].科技通报,2004,20(1):15-17.
- [39] 全坤,李刚,籍国东.二级串联人工湿地处理稠油污水的季节变化[J].环境工程,2008,26(1):32-35.
- [40] 雷明,李凌云.人工湿地土壤堵塞现象及机理探讨[J].工业水处理,2004,24(10):9-12.
- [41] Werker AG, JM Dougherty, JL McHenry, et al. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates. *Ecol. Eng.* 2002,19 (1):1-11.
- [42] Mander U, Kuusemets V, Lohmus K, et al. Nitrous oxide, dinitrogen, and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Water Sci. Technol* 2003,48:135-142
- [43] Mørkved, PT, Søvik, AK, Kløve, B, et al. Removal of nitrogen in different wetland filter materials: use of stable nitrogen isotopes to determine factors controlling denitrification and DNRA. *Water Sci. Technol.* 2005,51(9):63-71.