

人工湿地处理农村分散式污水的应用

王文东¹, 张小妮¹, 王晓昌¹, 刘锐², 丁真真³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西西安 710055; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江嘉兴 314006; 3. 西安市环境保护科学研究院, 陕西西安 710002)

摘要 随着我国新农村建设政策的实施和农村经济的蓬勃发展, 农村地区水污染现象也日益严重, 已成为引起流域水质恶化、湖泊富营养化和地下水体污染的主要原因。人工湿地作为分散式污水处理的主要技术之一, 在国外已得到广泛应用。该文结合农村地区污水排放的现状和特点, 对人工湿地在国内外发展现状进行了综述, 系统分析了人工湿地作为分散式处理技术在设计和运行过程中存在的主要问题, 并提出了相应的解决方案, 对人工湿地技术在我国农村地区的推广应用具有一定的借鉴意义。

关键字 人工湿地 分散式污水处理技术 农村地区 生活污水

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2010)05-0017-06

Application of Constructed Wetland Processes for Decentralized Wastewater in Rural Areas

Wang Wendong¹, Zhang Xiaoni¹, Wang Xiaochang¹, Liu Rui², Ding Zhenzhen³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Institute of Ecology and Environment, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314050, China; 3. Xi'an Research Academy of Environmental Sciences Xi'an 710002, China)

Abstract With the implementation of new rural development policy and development of rural economic, water pollution becomes serious in rural areas, which has been the major factor that leads to watershed quality deterioration, eutrophication and ground water pollution. As the major technique of decentralized wastewater treatment method, constructed wetland has been widely put into operation in developed countries. Basing on current situation and characterization of wastewater discharge in rural areas, the characterization, application and development of constructed wetland in the worldwide were reviewed. Major problems encountered in its design and operation processes were discussed, solution measures were also given combining the actual condition in rural areas.

Key words constructed wetland decentralized wastewater treatment technology rural area domestic wastewater

1 农村地区水污染的现状和特点

随着我国新农村建设的实施和农村经济的蓬勃发展, 人类活动强度不断加大, 对自然生态也造成了较大压力。生活污水、养殖废水、农业污水的排放造成河塘、水库水质恶化, 生态功能、涵养功能退化; 化肥农药的过量使用、耕地缺乏休养生息, 造成耕地退化现象严重, 生态环境非常脆弱。同时, 在我国广大的农村地区, 排水设施极不完善, 世界卫生组织(WHO)和世界供水卫生协会(WSSCC)的调查结果表明^[1-2], 在发展中国家, 农村地区的卫生设备

覆盖率仅占总人口的 18%, 远低于城镇地区水平(75%)。目前, 生活和生产污水随意排放, 已成为流域水质恶化、湖泊富营养化和地下水体污染的主要原因, 有效地控制农村地区的水污染现象将对我国生态环境的整体改善有着重要意义。

农村地区居民分布广且分散, 生活污水间歇排放, 水质、水量波动性大, 所含有机物浓度相对偏高; 含有较高的人畜粪尿成分, 氮、磷含量特别是磷含量较高^[3]。因此, 处理时不仅要消减有机物含量, 还要进行脱氮除磷。然而, 我国农村地区经济力量薄弱, 人均收入较低, 科技水平相对落后, 专业技术人员缺乏, 因此, 因地制宜地采用投资省、运行费用少、能耗低、维护管理简单方便、处理效果好且抗冲击负荷能力强的处理工艺, 成为农村地区进行水污染控制的关键。

2 农村污水的常见处理方式

[收稿日期] 2010-03-30

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50838005) 教育部“长江学者与创新团队发展计划”创新团队(IRT0853) 陕西省教育厅重点实验室建设项目(09JS029)。

[作者简介] 王文东(1980-) 男, 讲师, 主要研究方向为水和废水处理与回用理论与技术。E-mail: wwd@xauat.edu.cn。

现有的污水处理方式有集中处理(Centralized System)和分散处理(Decentralized System)两种。集中处理模式的服务范围广、处理水量大、需要居民参与的程度低^[4];对于中小城市,1~2个集中式污水处理设施即可满足当地地表水环境质量或中水回用的要求。因此,集中式污水处理模式在世界各地,特别是在发展中国家已得到了广泛使用^[5]。然而,由于集中式污水处理设施的覆盖范围广、处理水量大,需要铺设大量的管道对居民污水进行收集^[4];工程经验

表明^[6],污水管网的建设费用一般占工程总费用的50%以上,在人口密度较低的地区比重将更高。分散处理模式主要针对一户或几户邻近居民的生活污水进行收集、处理和回用,水量小,避免了高额的管网铺设费用和大规模土建开挖。与集中处理模式相比,分散处理模式所需水量小、投资费用低、不受当地地理和地质条件的影响、维护管理方便(表1),在保证处理效果的基础上,有利于实现流域内水资源的循环利用^[7]。因此,更适合我国广大农村地区。

表1 常见污水处理系统的典型工艺特征^[8]

Tab.1 Typical characteristics of the main wastewater treatment systems

处理过程	污染物去除效率/%				工艺需求			HRT /d	消减污 泥量 /(m ³ ·cap ⁻¹ ·d ⁻¹)
	BOD ₅	N	P	大肠菌群 /(CFU·100 mL ⁻¹)	土地 /(m ² ·cap ⁻¹)	能源 /(W·cap ⁻¹)	土建费用 /(元·cap ⁻¹)		
预处理	0~5	~0	~0	~0	<0.001	~0	16~66	-	-
一级处理	35~40	10~25	10~20	30~40	0.03~0.05	~0	165~248	0.1~0.5	0.6~1.3
兼性塘	75~85	30~50	20~60	60~99	2.0~5.0	~0	82~248	15~30	-
兼性曝气塘	75~90	30~50	20~60	60~99	1.3~3.5	~0	82~206	12~24	-
完全混合曝气	75~90	30~50	20~60	60~99	0.2~0.5	1.0~1.7	82~206	4~9	-
传统活性污泥法	85~93	30~40	30~45	60~90	0.2~0.3	13~2.8	496~992	0.4~0.6	1.1~1.5
延时曝气法	93~98	15~30	10~20	65~90	0.25~0.35	23~4.0	330~661	0.8~1.2	0.7~1.2
SBR	85~95	30~40	30~45	60~90	0.2~0.3	1.5~1.0	413~661	0.4~1.2	0.7~1.5
低速滴滤池	85~93	30~40	30~45	60~90	0.5~0.7	0.2~0.6	413~744	-	0.4~0.6
高速滴滤池	80~90	30~40	30~45	60~90	0.3~0.45	0.5~1.0	330~578	-	1.1~1.5
UASB	60~80	10~25	10~20	60~90	0.05~0.1	~0	165~330	0.3~0.5	0.07~0.1
慢速渗滤	94~99	65~95	75~99	>99	10~50	~0	82~165	-	-
快速渗滤	86~98	10~80	30~99	>99	1~6	~0	41~124	-	-
地表漫流	85~95	10~80	20~50	>99	1~6	~0	41~124	-	-
人工湿地	80~90	20~85	30~80	>90	2~6	~0	41~124	-	-

近年来,分散式污水处理模式在发达国家发展迅速。美国国会(US Congress)及环保署(USEPA)在1987年制定了一系列有针对性的面源污染控制计划,并于2002年出版了污水分散处理系统应用手册^[2],目前已有6千万居民使用分散式污水处理设施^[9]。日本从1977年开始,实行农村生活污水分散处理计划,对不同形式的小型一体化污水分散处理设施进行了研究^[10],并于2001年4月,实行了相关的新法律,以确保农村地区生活污水的净化处理。此外,澳大利亚已有12%的居民采用化粪池进行村镇生活污水处理^[11];大多数加拿大村镇居民已开始使用分散式污水处理设施^[12]。然而在发展中国家,由于缺乏对各种污水处理模式的理解和认识,尽管存在污水量严重不足,资金缺乏等问题,大多数农村和

小城镇地区的污水处理方式仍以集中处理为主^[13]。

目前世界上有70多种分散式污水处理工艺,常见的有化粪池、渗滤、氧化塘和人工湿地等。美国约有36%的农村及零星分布的家庭住宅采用渗滤装置处理生活污水^[14];在瑞典、芬兰和挪威等国家,约有100多万散居住户采用渗滤系统处理生活污水^[15]。但是针对发展中国家开发的工艺却很少;然而这些技术在全世界各地都在照搬套用,严重缺乏创新,使得这些工艺的处理效果并不理想。人工湿地由于具有投资少、能耗低、管理方便等优点如表2所示,在20世纪70年代以来发展迅速,正逐渐被应用于广大中小城镇和乡村地区的生活污水处理^[16]。特别是在提倡低碳经济的今天,人工湿地污水处理技术已引起广泛的关注并开始向农村生活污水处理市场发展。

表 2 人工湿地与污水二级处理的经济分析^[17]

Tab.2 Economical analysis between constructed wetland and secondary biological treatment technique

工程名称	总投资 /10 ⁴ 元	吨废水投资 /元	吨水处理成本 /元	占地面积 /(m ² ·m ⁻³)	处理效果
深圳白坭坑湿地	42.9	138	0.02	2.79	出水 BOD ₅ 和 SS 均为 30 mg/L 除 NH ³ -N 外 均达二级排放标准;
深圳白沿河湿地	800	533	NA	2.0	-
深圳罗芳污水厂	3100	3100	0.649	0.571	出水 BOD ₅ 为 5~6 mg/L COD 为 30 mg/L, SS 为 12 mg/L ^[18] ;
珠海某厂	1500	830	>0.2	1.2	出水 BOD ₅ 为 12~18 mg/L COD 为 25~40 mg/L
深圳某污水处理厂	31047	1242	0.628	-	-

3 人工湿地在农村地区的应用现状

3.1 国外的应用与发展现状

人工湿地污水处理技术最早可追溯到 1903 年,英国在约克郡建立了世界上第一个用于处理污水的人工湿地,距今已有 100 多年的历史^[19]。自 Kichuth 等提出高等植物在人工湿地系统中的“根区法”(The Root-Zone-Method)理论以来^[20],人工湿地技术在世界各国便引起了广泛重视,并在过去的几十年中得到了快速发展。据不完全统计,仅在上世纪 80 年代美国、丹麦、德国、英国等已有数百座人工湿地系统在运行,新西兰也有大约 80 个人工湿地在使用^[21]。截至 2006 年北美有近两万座人工湿地,欧洲建有一万多座人工湿地,亚洲、大洋洲、拉丁美洲也有越来越多的人工湿地建成和投入使用^[22]。

人工湿地早期的应用领域主要是中小城镇和农村的生活污水。20 世纪 80 年代初,美国开始了人工湿地技术的理论研究,总结各国人工湿地污水处理的经验,提出相关的理论和参考设计参数^[23-24]。这标志着人工湿地作为一种独具特色的新型污水处理技术正式进入水污染控制领域。美国东部的 400 多个点源排放是通过人工湿地处理后进入天然水体的;在密执安、威斯康星和佛罗里达等地区,大量的城市污水、雨水、农业径流、矿坑水和固体废物填埋场的渗滤液等都是通过人工湿地处理的,为人工湿地的安全稳定运行积累了丰富的工程经验。

为了使人工湿地的建设和维护管理更加科学、规范化,美国率先提出了一个适用于人工湿地工程建设的设计规范^[2],主要规定了人工湿地的管道设计标准、厂址选择要求、运行管理及设施维护管理等方面的内容。该规范的出台对人工湿地的设计、建设、运行及维护管理方面,起到了很好的规范化和指导作用,极大的促进了人工湿地在世界范围内的推广应用。小到几户或十几户住宅,大到整个城市的

生活污水均可采用该法进行处理。发达国家将人工湿地作为分散式污水技术应用于农村地区的时间较长,在一些国家或地区已经出台了相应的法律或规范,而大多数发展中国家则处于起步阶段,缺乏工程设计依据和运行经验。

3.2 人工湿地国内的发展与应用现状

与发达国家相比,人工湿地在我国发展起步较晚。1987 年天津环保所建设了我国第一个占地 6 hm² 的芦苇湿地^[25],直到“七五”期间才开始对人工湿地较大规模的研究。90 年代以来,关于人工湿地的建设和研究不断提升。除了研究湿地的基本生态功能、类型、经济价值以外,十几年来,在深圳白坭坑人工湿地、崇明森林旅游园区污水处理工程和洪湖人工湿地系统等为代表的工程实践中,我国已在人工湿地的结构、填料类型、植被选择和水流方式等方面都取得了积极的进展^[26]。近年来,各地方城市运用人工湿地技术处理生活污水的行动正悄然展开。成都市活水公园将人工湿地处理污水与城市园林艺术相结合获得了包括 1998 年联合国人居奖在内的多项国际奖项。广西南宁市隆安县的“邕江水源地上游人工湿地处理污水示范工程”已成为南宁市的重点工程。但人工湿地的应用建设总体上表现出大型化的特点,在治理较大范围内水污染、改变局部气候、塑造地域性景观等方面表现突出;而作为分散式污水处理技术在农村和小城镇地区的运行仍处于尝试阶段。

人工湿地技术作为分散式污水处理的主要工艺之一在我国已经引起普遍重视,并开始推广应用。深圳市环境科学研究所深圳、东莞、南京、广州等地区设计了几十座人工湿地,主要用于处理小区及城镇生活污水和景观河湖等。其中,石岩人工湿地系统水质净化工程将垂直流人工湿地用于石岩水库周围的污染治理,达到改善水源水质的目的^[27]。崇明森林旅游园区污水处理工程,采用“生物化学强化絮凝+

序批式垂直流人工湿地”处理技术,设计规模为 3 000 m³/d,湿地面积 5040 m²。工程建成投产后,出水水质良好^[28]。沈阳环境科学研究院针对北方地区气候特点,建立了水平潜流人工湿地在北方地区的工程示范,也取得了良好的处理效果^[29]。针对农村污水处理规模小、分散的特点,张克强等提出了廊道式人工湿地的设计原则和设计方法,通过对水力负荷率、孔隙率、渗透系数、滞留时间、水力坡度、床底坡度、面积参数、浸润线和长宽比等相关参数的系统研究,从水力学的角度对廊道式人工湿地系统进行优化设计^[30]。运行经验表明,这种湿地结构占地小、投资少、运行费用低、处理效率高,达到了农田灌溉水质要求。

在保障对农村生活污水处理低耗和管理方便的前提下,戴世明等研发了滴滤池/人工湿地组合工艺,考察了滴滤池的最佳运行参数以及改善系统脱氮除磷效果的措施,对组合工艺的处理效率进行了优化^[31]。为强化人工湿地对氮、磷等营养物质的去除

效率,刘超翔等在试验研究的基础上,开发了表面流人工湿地、潜流式人工复合生态床和氧化塘组合工艺^[32]。采用该工艺进行滇池流域农村的生活污水处理,设计水量 80 m³/d,表面流人工湿地水力负荷为 4 cm/d,地面以上维持 30 cm 的自由水位,湿地内种植茭白和芦苇。炉渣对提高系统的除磷效率有着明显的促进作用,处理出水水质可达城市污水二级排放标准。李晓东等以冶金废物高炉矿渣作为人工湿地基质,对生活污水中磷的去除作用进行了深入研究^[33]。吸附-解吸实验结果表明高炉矿渣对磷元素的理论饱和吸附量约为石英砂的 12 倍。

此外,为加强我国人工湿地污水处理工程的规范化管理,沈阳环境科学研究院结合人工湿地在国内外的设计经验和运行管理效果,对人工湿地工艺进行优化研究。提出了适合我国气候和水质特点的设计参数,如表 3 所示,对农村地区污水处理技术的设计和运行管理提供依据,促进了人工湿地技术在我国农村地区的推广应用。

表 3 小规模人工湿地设计参数选择

Tab.3 Major parameters applied in small constructed wetland design

湿地类型	进水 BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	有机负荷/(kg BOD ₅ ·ha ⁻¹ ·d ⁻¹)	处理效率/(%)	水力负荷/(m ³ ·ha ⁻¹ ·d ⁻¹)	水力停留时间/d
表面流人工湿地	<50	15~50	<40	<1000	4~8
水平潜流人工湿地	<100	80~120	45~85	150~5000	2~4
垂直潜流人工湿地	<100	80~120	40~80	300~10000	2~4

注:1 ha=10⁴ m²

4 存在的问题与解决对策

经过 20 多年的研究,我国在人工湿地污水处理技术及其工程应用方面取得了一定的发展,但作为一项新型的处理技术应用于农村和小城镇地区生活污水的分散式处理时,还存在诸多问题和局限。常见的问题与解决方案归纳如下:

(1) 运行管理经验不足。人工湿地技术尚属新领域,对人工湿地污染物降解理论研究的不足,使得工程的运行管理缺乏理论支撑,设计参数主要靠摸索的经验参数或经验公式来获得。同时,污水的水质复杂多变、影响系统运行的因素众多,使得对人工湿地系统污染物去除效率的预测难以有效进行。为优化系统的运行管理,急需加强工艺污染物降解理论研究,收集国外已有工程的运行数据,建立系统运行维护数据库和数据指南。

(2) 湿地表面板结。运行期间湿地表面易出现

板结现象。板结程度与植物覆盖率呈密切相关。对于低植被覆盖率的人工湿地系统,表层土壤接受光线直接辐射强度高,有利于藻类及以藻类为生的微小生物的生长繁殖,使得基质表面含有大量生物残体,土壤的板结程度也相对较高。而对于高植物覆盖率的系统,土壤的板结程度则明显降低。此外,污水中一些油污和头发等不溶性杂质也可促使表面板结。为减轻湿地系统出现板结,需适当提高土壤表层的植被覆盖率。工程上常采取翻动表面基质来解决板结,但这只是将表面板结物转移到了基质内部,可能会产生新的负作用。

(3) 建造技术含量高、难度大。湿地表层土壤板结往往伴随基质的堵塞,但这不是基质出现堵塞的唯一原因。湿地的主要问题是缺氧,大量的悬浮物、微生物、杂质的长期积累,使基质层的渗流能力减弱,造成堵塞。此外,基质的水力特征也易引起基质堵塞。这些问题都是在人工湿地设计、施工以及日常

管理中必须解决的。考虑农村地区维护管理的方便可行性,常采用间歇运行的方式避免湿地基质堵塞现象的发生。

长时间连续进水会使系统的基质一直处于还原状态,造成胞外聚合物的积累,同时伴随湿地基质过水能力的不断下降。间歇运行会使基质得到“休息”,保证基质一定的好氧状态,避免胞外聚合物的过度积累,防止基质堵塞。设计过程中需结合处理效率和污水负荷,兼顾基质的过水能力确定湿地的间歇运行周期。基质填料发生堵塞后,建议采用更换部分湿地填料的方法恢复系统的正常稳定运行。

(4) 季节性影响大。人工湿地在我国北方寒冷地区的运行比较困难,虽然潜流湿地对这方面的要求较低,但温度很低时仍会严重影响污染物的去除效率。人工湿地系统的正常运行主要是依靠植物和系统内部结构发挥功能,而季节的变化直接影响这2个方面的效果。因此,解决气温对系统处理效果的影响,是人工湿地在我国北方地区推广应用的关键。

5 结论

二元化的城乡结构使得我国城乡间的污水处理方式差别显著,占全国总面积近90%的广大农村缺乏污水处理系统。传统的二级活性污泥法处理工艺投资高、耗能大、运行管理要求高,对控制大城市的水环境污染起到了关键作用,然而,由于农村和小城镇地区资金紧缺、管理水平相对落后,传统集中式污水处理技术难以推广使用。在我国大力开发高效、简易、低耗的分散式污水处理技术具有重要意义。

人工湿地是一个完整的生态系统,具有较好的经济效益和生态效益,是正在不断得到研究和发展的污水处理实用新技术。运行经验表明该工艺投资低、操作简单、维护方便、出水水质良好,适合在农村地区推广应用;同时,它还可以增加绿地面积、改善和美化生态环境。大力推广和普及人工湿地处理技术,是实现我国农村地区的河流、湖泊面源污染控制,进行社会主义新农村建设的有力手段。

参考文献

[1] Citizen Network on Essential Services. Approaches to Sanitation Services[M]. Water Policy Series A. Water and Domestic Policy Issues A5,2003,12.
[2] Environmental Protection Agency. Wastewater treatment manuals—treatment systems for single houses[R]. A millennium report. EPA,2000.
[3] Paraskevas P A, Giokas D L, Lekkas T D. Wastewater manage-

ment in coastal urban areas: the case of Greece[J]. Water Science and Technology,2002,46(8):177-186.
[4] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review[J]. Ecological Engineering,2001,16:545-560.
[5] Bakir H A. Sustainable wastewater management for small communities in the Middle East and North Africa[J]. Journal of Environmental Management,2001,61:319-328.
[6] Go E, Demir I. Cost analysis of alternative methods for wastewater handling in small communities[J]. Journal of Environmental Management,2006,79(4):357-363.
[7] Massoud M A, Tarhini A, Nasr J A. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries[J]. Journal of Environmental Management,2009,90:652-659.
[8] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review[J]. Ecological Engineering,2001,16:545-560.
[9] Bradley R B, Daigger G T, Rubin R, et al. Evaluation of onsite wastewater treatment technologies using sustainable development criteria[J]. Clean Technologies and Environmental Policy,2002,4:87-99.
[10] 日本建筑中心.净化槽性能评价方法[S],2000.
[11] Ahmed W, Neller R, Katouli M. Evidence of septic system failure determined by a bacterial biochemical fingerprint method[J]. Journal of Applied Microbiology,2005,98:910-920.
[12] Tzarakis K P, Mara D D, Angelakis A N. Wastewater management in Greece: experience and lessons for developing countries [J]. Water Science and Technology,2001,44(6):163-172.
[13] Wilderer P A. Sustainable water management in rural and peri-urban areas: what technology do we need to meet the UN millennium development goals[J]. Water Science and Technology, 2005,51(10):1-6.
[14] 郑展望,徐甦.低能耗污水处理系统在新农村建设中的应用[J].新农村建设,2007(5):38-39.
[15] 田宁宁,杨丽萍,彭应登.土壤毛细管渗滤处理生活污水[J].中国给水排水,2000,16(5):12-15.
[16] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Water Research,1996,33(17):3595-3602.
[17] 王薇,俞燕,王世和.人工湿地污水处理工艺与设计[J].城市环境与城市生态,2001,14(1):59-62.
[18] 周克钊,罗万申,赵忠富,等.深圳市罗芳污水处理厂二期工程调试[J].给水排水,2003,29(4):1-6.
[19] 刘昭军.陕南地区建设人工湿地初探[J].陕西林业科技,2008(4):135-137.
[20] Kichuth R. Degradation and incorporation of nutrients from rural wastewaters by plant rhizosphere under Limnic Conditions[M]. Utilization of Manure by Land Spreading, Commission of the Europe Communities. Back-guys Publishers, Leiden, the Netherlands,1977,243-335.
[21] 于少鹏,王海霞,万忠娟,等.人工湿地污水处理技术及其在我国 (下转第41页)

- [27] 赵由才,牛冬杰. 湿法冶金污染控制技术[M].北京:冶金工业出版社,2003.
- [28] 李远科,张吉库,刘忠生,等.电解气浮/过滤一体化装置处理油田回注水的研究[J].中国给水排水,2010,26(1):28-31.
- [29] 杨菁,管崇武,宋红桥.电凝聚气浮法净化养鱼污水研究[J].净水技术,2008,27(2):47-50.
- [30] V.A.Kolesnikov, S.O.Varaksin, L.A.Kryuchkova. Electroflotation Extraction of Valuable Components from Wash Waters of Electroplating Works, with Water Recycling[J]. Russian Journal of Electrochemistry, 2001, 37(7): 760-764.
- [31] 魏杰,周定. 采用电浮选法脱除电镀废水中 Fe^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 的研究[J]. 环境保护科学, 1997, 23(6): 7、8、12.
- [32] Anon. Electroflocculation:removal of oil, heavy metals and organic compounds from oil-in-water emulsions[J]. Filter Separators, 1996,33(4):341-346.
- [33] 刘艳,鲁秀国,张攀,等.电絮凝-气浮法对模拟染料废水的脱色实验研究[J].华东交通大学学报,2009,26(2):17-21.

(上接第 21 页)

- 发展的现状和前景[J].地理科学进展,2004,23(1):22-29.
- [22] 人工湿地污水处理工程技术规范编制组.人工湿地污水处理工程技术规范(征求意见稿)编制说明[S],2007:2-3.
- [23] Gunes K. Restaurant wastewater treatment by constructed wetlands[J]. Clean-Soil Air Water,2007,35(6):571-575.
- [24] Sengorur B, Ozdemir S. Performance of a constructed wetland system for the treatment of domestic wastewater[J]. Fresenius Environmental Bulletin,2006,15(3):242-244.
- [25] 谌柯,罗培,舒成强,等.西部地区小型人工湿地开发思路分析[J].西华师范大学学报(自然科学版),2008,29(1):96-100.
- [26] 张虎成,田卫,俞穆清,等.人工湿地生态系统污水净化研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2004,5(2):11-15.
- [27] 刘家宝,莫凤莺,雷志洪,等.垂直流人工湿地系统保护饮用水水源的实例[J].给水排水,2005,31(4):10-13.
- [28] 李怀正,叶建锋,王晟,等.垂直潜流人工湿地技术在上海市农村污水处理中的应用和发展[J].环境污染与防治,2008,30(8):84-89.
- [29] 王磊,刘智,陈晓东.北方人工湿地植物选择与调控的实验与应用研究[J].环境科学导刊,2008,27(3):8-10.
- [30] 张克强,杨莉,杨鹏,等.适合农村污水分散处理的廊道式人工湿地设计参数研究[J].西北农业学报,2008,17(1):286-291.
- [31] 戴世明,白永刚,吴浩汀,等.滴滤池/人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].中国给水排水,2008,24(7):21-24.
- [32] 成先雄,严群.农村生活污水土地处理技术[J].四川环境,2005,24(2):39-43.
- [33] 李晓东,师晓春,晁雷,等.高炉矿渣质人工湿地除磷特性研究[J].气象与环境学报,2009,25(1):45-48.

(上接第 25 页)

- ucts[J]. Environmental Science & Technology,2004,38(22): 6025-6031.
- [28] Kull T. P. J., Sjovall O. T., Tammenkoski M. K. Oxidation of the cyanobacterial hepatotoxin microcystin-LR by chlorine dioxide: Influence of natural organic matter[J]. Environmental Science & Technology,2006,40(5): 1504-1510.
- [29] 贾瑞宝,李力,李世俊,等.二氧化氯强化处理含藻水库水研究[J].中国给水排水,2003,19(13):93-95.
- [30] 贾瑞宝,李冬,王珂,等.水库水微囊藻毒素的预氧化处理[J].中国给水排水,2003,19(3):56-57.
- [31] 林萍,潘晓群,吕淑荣.水处理剂投加量对水中微囊藻毒素去除效果影响[J].江苏卫生保健,2008,10(5):1-3.
- [32] 季颖,赵吉娜,黄君礼. ClO_2 对微囊藻毒素(LR)的去除效果和反应特征[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(10):1806-1808.
- [33] 裴海燕,胡文容,丁国际.二氧化氯杀藻特性研究[J].山东大学学报(工学版),2004,34(5):104-108.
- [34] 刘洁生,杨维东,张珩,等.二氧化氯对球形棕囊藻叶绿素 a、蛋白质、DNA 含量的影响[J].热带亚热带植物学报,2006,14(5):427-432.
- [35] 侯翠荣,贾瑞宝.化学氧化破坏藻体及细胞内藻毒素释放特性研究[J].中国给水排水,2006,22(13):98-101.
- [36] 李宗来,于建伟,赵艳梅,等.不同预氧化工艺下蓝藻细胞破坏与土臭素释放[C].全国给水深度处理研究会二〇〇七年年会论文集,江苏昆山,2007:97-102.
- [37] 文竹青,何少华,高伟.环境友好消毒剂二氧化氯的灭活效果和消毒副产物[J].环境科学与管理,2006,31(8):162-165.
- [38] Baribeau H., Prevost M., Desjardins R. Chlorite and chlorate ion variability in distribution systems[J]. Journal American Water Works Association,2002,94(7):96-105.
- [39] Hoehn R. C., Ellenberger C. S., Gallagher D. L. ClO_2 and by-product persistence in a drinking water system[J]. Journal American Water Works Association,2003,95(4): 141-150 .
- [40] 刘卫华,季民,杨洁.高藻水预氧化除藻效能与水质安全性分析[J].中国公共卫生,2005,21(11):1323-1325.
- [41] 尤作亮,张金松.二氧化氯消毒的控制标准及其发展趋势[J].中国给水排水,2004,20(4):53-54.
- [42] 李榕菁.二氧化氯氧化水中腐殖酸对消毒副产物生成及控制之研究[D].台湾:逢甲大学,2003.
- [43] 何涛,鄂学礼,王红伟,等.二氧化氯水消毒副产物的生成规律及其影响因素研究[J].环境与健康杂志,2008,25(2):101-103.
- [44] 刘南,熊鸿燕,李秀安.二氧化氯对水消毒效果及消毒副产物的测定[J].中国消毒学杂志,2007,24(3):215-218.
- [45] Ivancev T I,Dalmacija B.Effects of coagulation processes on aldehydes formation in groundwater treated with common oxidative agents[J].Water Research,2001,35(16):3590-4598.
- [46] Dabrowska A,Swietlik J,Nawrocki J.Formation of aldehydes upon ClO_2 disinfection[J].Water research,2003,37:1161-1169.
- [47] 黄君礼.新型水处理剂——二氧化氯技术及其应用[M].北京:化学工业出版社,2002.