

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.02.018

人工湿地处理农村生活污水研究与应用进展

董 贝,刘 杨,杨 平

(四川大学建筑与环境学院,四川 成都 610065)

摘要 结合农村生活污水特点,分析人工湿地的去污机理以及存在问题,并对其进行技术经济分析,介绍人工湿地在国内外农村的应用情况。结果表明,技术上,人工湿地对有机物去除率较高,可达 60%~99%,采用系统完善、组合湿地、联合其他工艺等改进方法后,人工湿地对氮磷有很好的去除效果;经济上,人工湿地投资运行费用远远低于传统工艺,经济可行性好。指出虽然人工湿地存在气温影响、系统堵塞、植物选择等问题,但作为一种在国外农村地区广泛成功应用的处理工艺,在我国农村具有很强的推广意义。

关键词 农村生活污水;人工湿地;去除率;经济技术分析

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2011)02-0080-07

Research and application progress of rural domestic wastewater treatment with constructed wetlands

DONG Bei, LIU Yang, YANG Ping

(Department of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In consideration of the characteristics of rural domestic wastewater, the removal mechanism and existing problems of constructed wetlands were analyzed. A technical and economic analysis was conducted, and the present application of constructed wetlands in rural areas of the world was summarized. The results indicated that, technically, constructed wetlands had high removal efficiencies for organics, from 60 to 99%. With system improvement, combined constructed wetlands, and other combined techniques, the constructed wetlands also showed high removal efficiencies for nitrogen and phosphorous. According to the economic analysis, the capital cost and operation cost of constructed wetlands were much less than that of traditional treatment, and economically feasible. Although constructed wetlands had some problems, such as influence of temperature, wetland plants selection and clogging, the promotion of constructed wetlands in Chinese rural areas was significant as a widely used successful treatment technique in foreign rural areas.

Key words: rural domestic wastewater; constructed wetlands; removal efficiency; economical efficiency analysis

近年来,我国农村生活污水污染日益严重是造成水污染和水体富营养化的重要原因之一,有资料表明^[1]2007年,我国农村污水排放总量已超过90亿t,而实际处理率尚不及1%。另外,我国农村生活污水分散排放现象严重,超过96%的村庄没有排水渠道和管网,集中收集处理困难。受农村实际经济、技术条件制约,传统二级处理工艺耗资巨大,管理运行困难,不适用于农村生活污水的治理。相较于传统处

理工艺,人工湿地具有处理效果好、投资少、运行维护简便等优点。作为一种经济有效的自然处理工艺,人工湿地在国内外农村和小规模生活污水的治理中都表现出了很好的适用性,对人工湿地的合理建设和运行可有效防治农村生活污水的污染。

1 农村生活污水特点

农村生活污水是指农村地区居民在生活过程中

基金项目:四川省科技厅科研院所科技成果转化资金资助项目(2009)

作者简介:董贝(1987—),男,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为水污染处理及其技术。E-mail:wuxingxue102@163.com

形成的污水,主要来源是单户型的家庭生活污水,可以分为黑水和灰水2类,其中灰水包括洗浴、洗衣和厨房产生的污水,黑水包括粪尿及厕所冲洗水。

1.1 排放特征

农村人均日用水量不及城市人均日用水量的1/3,污水排放量一般较少。但农村生活污水排放随机性强,属于典型的间歇排放,在不同时段排水量变化明显,日变化系数大,一般在3.0~5.0之间。

1.2 水质特征

一方面,由于排水量较小,农村生活污水水质呈现有机物和氮磷浓度高的特点,但由于家庭生活污水中可生化有机物含量高,农村生活污水的生化性一般较好。徐洪斌等^[2]针对我国太湖地区农村生活污水研究发现,其总体排水水质为 $\rho(\text{COD})=350\sim 770\text{ mg/L}$, $\rho(\text{BOD}_5)=200\sim 400\text{ mg/L}$, $\rho(\text{TKN})=30\sim 40\text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP})=2.5\sim 3.5\text{ mg/L}$, $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{COD})$ 在0.45~0.55之间。但另一方面,生活污水中的黑水和灰水在水质、水量上均存在很大差异,灰水水量较大,一般占总水量的50%~80%^[3],但水中污染物质含量明显较低,便于处理,且存在回用价值。研究表明^[4]将灰水回用于冲厕或浇灌,可节约家庭用水总量的30%~50%。黑水虽然水量小,但污染物质、病原菌含量高,处理难度大。Almeida等^[5]针对生活污水进行分析,发现黑水对生活污水中COD、TSS、NH₃-N、PO₄-P的贡献率分别达到了43.9%、77.4%、97.1%、79.8%,可见黑水是生活污水的主要污染源。具体的农村生活污水分类及水质水量对比见表1^[6-8]。

表1 农村生活污水分类及水质水量对比

指标	人均排放/ (L·d ⁻¹)	$\rho(\text{COD})$ / (mg·L ⁻¹)	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ / (mg·L ⁻¹)	$\rho(\text{TP})$ / (mg·L ⁻¹)
黑水	42	806~3138	130~180	21~58
灰水	68~272	13~240	0.05~25.40	0.6~27.3

2 人工湿地去污机理及存在问题

2.1 去污机理

人工湿地处理污水源于对自然湿地的模拟,它利用自然生态系统中物理、化学和生物三重协同作用,来实现污水的净化。

人工湿地对有机物的去除,主要依靠系统中厌氧和好氧微生物的降解作用,植物和基质的沉淀和过滤吸附作用完成。由于湿地系统特有的基质、植物、微生物三重降解作用,在实际应用中,人工湿地系统对污水中有机物普遍表现出很好的去除效果,COD、BOD去除率均可达60%~99%^[9]。但在不同的水力负荷和水力停留时间条件下,湿地系统的表

现具有一定差异,较大的水力停留时间和较小的水力负荷可以取得更好的去除效果。Solano等^[10]比较芦苇湿地系统在7.5 cm/d水力负荷、3 d水力停留时间和15 cm/d水力负荷、1.5 d水力停留时间2种不同条件下表现,发现湿地对COD的去除率分别为85%、77%,BOD₅的去除率分别为77%、68%。另外,Tuszyńska等^[11]认为人工湿地中有机物的去除效果还受进水成分的影响,去除效率主要由进水成分中难降解和不能降解有机物的比例决定。

人工湿地对氮的去除主要包括氨挥发、基质吸附、植物吸收和微生物的硝化/反硝化作用。其中占最主要作用的是硝化/反硝化作用。李林锋等^[12]发现植物吸收对TN的去除作用很小,只占人工湿地TN去除量的0.6%~17.3%,而且植物对氮的吸收还具有短期效应,植物的死亡可导致湿地出水氮浓度提高。而对于氨挥发作用,在pH值小于8时,几乎可以忽略不计^[13]。对于人工湿地系统的脱氮效果,去除率为10%~90%。例如,Vymaza^[14]认为根据湿地类型不同,人工湿地对TN的去除率一般在40%~55%。Greenway等^[15]比较了澳大利亚昆士兰州9座湿地系统的脱氮效果,TN去除率则为18%~86%。但目前普遍认为,由于单级人工湿地不能同时提供很好的厌氧好氧环境,有效地完成硝化/反硝化反应,单级人工湿地对于脱氮并没有很好的效果。

人工湿地系统对磷的最终去除主要通过基质的吸附截留作用,植物和微生物的吸收作用具有短期效应,植物微生物的死亡,会使其机体内35%~75%的磷重新返回湿地系统^[16]。目前常用于人工湿地系统的基质主要有石灰石、页岩、矿渣、沙砾、白云石等,不同的基质表现出不同的吸附特性和去除效果。例如Brooks等^[17]利用硅钙石处理二级出水,发现其有效去除率可达80%~96%。而PROCHASKA等^[18]利用沙砾做基质除磷,效率只有20%。另外,基质的成分和粒径也对吸附效果具有较大影响,Zhu等^[19]发现基质中富含Al³⁺、Fe³⁺、Ca²⁺,可有效促进对磷的吸收,尤其是富含Ca²⁺的基质,最大吸附容量可达3465 mg/kg。Seoa等^[20]认为磷的吸附容量随基质粒径的减小而增大,最适宜的粒径为0.1~2.0 mm,但需要注意的是,过小的粒径可能引起湿地堵塞。

2.2 存在问题

由于其特殊的自然生态系统特性,人工湿地在实际推广运行各个方面仍然存在许多问题。其中最主要的就是温度影响、系统堵塞以及植物选择问题。

人工湿地在运行过程中季节性表现差异较大,Song等^[21]比较中国北方地区人工湿地一年四季的运行情况,发现低温环境下植物吸收作用下降,微生物

物活性降低,湿地的去除作用明显下降。秋冬季节对 BOD₅、COD 的处理率降低约 10%,对 TP 去除率降低 20%,对 NH₃-N 去除率降低更是超过 40%。Akrotas 等^[22]观察 2~26℃不同温度条件下湿地系统表现,发现低温对任何污染物的去除都有一定影响,但对氮磷影响较大,15℃是维持系统有效脱氮除磷的最佳温度。15℃以上时系统对 TKN 和 TP 的平均去除率为 73.9%、70.1%,而 15℃以下时,系统对 TKN 和 TP 的平均去除率仅为 58.5%、41.8%。低温条件下,人工湿地系统运行效率低的问题已成为影响人工湿地广泛推广的最大问题。

湿地堵塞问题被视为人工湿地运行维护过程中的最大难题,当堵塞现象发生时,基质的吸附能力下降,阻碍系统中氧传递,使系统处理能力急速下降,还会产生臭气。有研究表明,堵塞后湿地系统对 COD 的去除效率降低 35.0%,对 NH₃-N 的去除效率降低更是达到 76.2%^[11]。对于湿地的堵塞机理,Chazarenc 等^[23]认为,湿地系统堵塞的最主要影响因素是入水的有机负荷和悬浮固体含量。高有机负荷可以加速微生物代谢,产生更多污泥,而入水中的 TSS 浓度过高则可直接积聚造成基质堵塞。Zhao 等^[24]也认为入水的有机负荷过高会加速基质上生物膜生长,使基质的多孔性能下降,另外 Zhao 发现入水有机颗粒含量、成分也是引起堵塞的重要因素,有机颗粒积聚可使 0~15 cm 的土层渗透性急剧下降。另外,基质的粒径也被视为影响堵塞的重要原因,孔径较大的基质可有效地延迟堵塞现象的发生。

植物是湿地系统的重要组成部分,但植物的生长过程也会给湿地带来一定的影响。首先,植物的新陈代谢会增加系统的污染负荷,植物根区产生有机物 10%~40% 会返回湿地系统^[25]。植物的死亡分解也会大大增加系统有机质和氮的负荷。Chimney 等^[26]研究美国佛罗里达州湿地植物死亡的降解情况发现,大部分湿地中死亡植物的降解率在 70%~90%,植物中丰富的氮磷含量会加大湿地的处理负担。其次,湿地中不同植物的相互作用也可能导致湿地处理效果变差,邵丽等^[27]认为不同种植物在湿地系统中存在对光、水、营养素的竞争,植物之间化学物质的释放也可能起到相互抑制作用,例如香蒲、芦苇等就存在这样的相生相克作用。Womana 等^[28]则认为湿地中不同种的植物的相互作用可使污水停留时间的波动系数增加 0.05~0.40,进而导致系统的处理效率下降 7%。除此之外,湿地植物滋生蚊虫导致的卫生问题也是影响湿地推广应用的一大因素。可见,对植物的有效选择和管理也是影响人工湿地运行效果的一个重大因素。

3 农村应用人工湿地技术分析

由前所述,农村生活污水普遍存在成分复杂、氮磷含量高的问题,而单级人工湿地系统在实际运行中表现的脱氮除磷效果不尽如人意。针对人工湿地系统脱氮除磷效果及运行中存在问题,国内外在处理农村生活污水的实际应用中做了多方面研究和改进。

3.1 人工湿地系统的完善

人工湿地系统完善是指在采用单级人工湿地时,在基质植物选择上,运行条件控制上使人工湿地处于最优化状态,进而提高系统的处理能力和运行效果。

基质的有效选取可有效保证系统的稳定运行。不同基质在脱氮除磷效果方面存在较大差异,Asuman 等^[29]比较以炉渣和沙砾作基质处理生活污水的人工湿地系统表现,发现其对 COD 的去除率分别为 47%、44%,对 NH₃-N 的去除率分别为 88%、53%,对 TP 的去除率分别为 45%、4%。可见,选用吸附量大、稳定性好的基质可有效提高系统的脱氮除磷效率。另外,选用适当基质还可以有效防止湿地堵塞,延长湿地系统运行时间。

植物的存在可有效提高人工湿地系统氧含量,Hench 等^[30]比较有无植物条件下人工湿地系统对农村生活污水的处理效果,发现有植物种植的湿地系统水力传导性更好,DO 质量浓度可达 2.52 mg/L,而无植物种植的湿地系统为 1.62 mg/L,系统硝化作用明显不足,有植物种植的系统对 TKN 的去除率提升超过 40%。另外,植物可以有效地减缓污水流速,稳定基质,冬季还能起到保温作用。申欢等^[31]利用收割植物对湿地进行表面覆盖,有效减少了表面土层的冻结,对 TP、NH₃-N 和 TN 的平均去除率也提高了 15.5%、9.7% 和 5.0%。根据湿地实际条件选用适当物种,依其生长周期进行管理,可有效增强湿地运行效果。

对于运行条件的控制,目前研究较多的是对系统的强化充氧和进水负荷的控制。Zhang 等^[32]比较强化供氧条件下人工湿地处理生活污水情况发现,强化充氧系统具有更稳定的 pH 环境,湿地中硝化菌数量明显增加,活性增强,硝化反应得以顺利进行,同时反硝化作用也得到加强,对 TN 的去除率最高可达 85.1%,而没有强化充氧的湿地系统 TN 去除率只有 36.8%。Munoz 等^[33]也发现对系统充氧可以提高湿地系统温度和增加系统的混合作用,从而提高处理效果。降低入水有机负荷则是防止堵塞的有效措施,Winter 等^[34]研究不同负荷条件下垂直流湿地发现,发现入水有机负荷 COD 小于 20 g/(m²·d)

时可有效防止堵塞。

3.2 组合人工湿地系统

按照工程设计和水体流态的差异,人工湿地可分为表面流、垂直流、潜流3种类型。表面流湿地表面积充氧,建设耗费低,但处理负荷低,效果差;垂直流湿地垂直充氧,系统硝化能力强,但对有机物处理效果较差,且易堵塞;潜流湿地应用最为广泛,有机物处理能力强,且对于低温环境,污水从底部流入,基质可以起到有效的保温作用。但潜流湿地也存在充氧不足、硝化能力差的问题。

目前,针对3种湿地系统不同特点的优势互补,组合湿地系统的应用研究越来越多,湿地系统的组合形式也越来越多样。Tuncsiper^[35]利用联合垂直流潜流人工湿地处理生活污水,发现潜流系统具有较高的 NO_3^- -N去除效率,而对 NH_4^+ -N去除率低,而垂直流系统由于其好氧环境对 NH_4^+ -N具有很好的去除效果,两种系统联合,对 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N的平均去除率分别达到了89%和91%。Ruokojarvi^[36]利用多级复合芦苇湿地系统处理英国农村生活污水,发现经过两级垂直流、潜流湿地处理后,有机物的排放即可达标,后经两级表面流湿地的吸附、分解,系统出水的BOD、 NH_3 -N、 PO_4 -P质量浓度分别可低至1.5 mg/L、0.14 mg/L、0.34 mg/L。王凯军等^[37]利用二级复合湿地处理农村灰水,发现第一级垂直流湿地从表层到底部随着水力停留时间延长,硝化作用逐渐增强,而二级潜流湿地由于DO不足,形成很好的厌氧环境,促使反硝化作用增强,成为湿地内的主要反应。二级系统对COD的去除率为70%,对TN的去除率则达到了99%。

3.3 联合其他工艺

联合其他处理工艺,对污水进行预处理后进入人工湿地系统,不仅可以有效减轻人工湿地的进水污染物负荷,提高污染物去除率,还可以减少进水中SS含量,有效地防止湿地系统堵塞。

目前人工湿地系统最常用的预处理设备为化粪池,但化粪池对SS去除效果差,当进水中有机负荷高时,容易引起系统堵塞。因此,越来越多的其他工艺正被研究应用于人工湿地的预处理。Alvarez等^[38]利用厌氧反应器作为人工湿地的预处理,处理生活污水,发现经预处理后污水中TSS减少30%~50%,进入湿地的TSS质量浓度只有60~100 mg/L,可有效防止系统堵塞,另外,经预处理后入水的污染负荷大大减小,可使湿地系统占用面积减少30%~60%。Tsalkatidou等^[39]研究以稳定塘作为人工湿地的预处理,发现稳定塘的水力负荷是人工湿地的2~3倍,人工湿地处理经稳定塘预处理后污水,去除

率大大提升,BOD₅去除率可达95%。陈和平等^[40]利用厌氧接触氧化池-垂直流人工湿地处理农村生活污水,二级处理后污水中COD、TN、TP去除率达92.2%、75.6%、93.3%。另外,利用滴滤池、土地处理、好氧反应器等处理设备作为人工湿地的预处理也都有被研究。

总体分析,在我国利用人工湿地系统处理农村生活污水在技术上是可行的,但是,具体技术的实施应结合当地农村生活污水的特点和经济情况,例如北方地区冬季温度较低,适合潜流湿地的使用,南方地区水量较大,成分复杂,最好进行相应预处理,而中西部地区土地资源较多,适于建立组合湿地系统。

4 农村应用人工湿地经济分析

从经济上分析,相较于传统二级处理工艺,人工湿地系统具有投资费用低、运行管理维护简便等特点,在农村生活污水处理的实际应用中显示出了很好的经济可行性。投资上,Wynn等^[41]研究人工湿地在美国农村的应用,认为人工湿地的实际投资费用取决于农村的实际情况和具体的处理量,其中最主要的影响因素为土地和基质的价格,对于土地价格合理的农村地区,采用就近的基质材料,人工湿地是一种非常经济有效的处理工艺。维护运行上,Dupoldt等^[42]认为人工湿地的运行和维护具有间歇性,人力耗费少,且技术含量较低,费用主要集中在沟道清理和管理作物上,适用于农村地区技术落后的实际情况。Liu等^[43]分析比较我国人工湿地与传统二级处理工艺的经济指标,发现人工湿地基建投资为1000~2800元/t,处理费用为0.05~0.2元/t;传统二级处理工艺基建投资为1500~4000元/t,处理费用为0.7~1.5元/t。基建投资上,人工湿地不及传统二级处理工艺的1/2~1/3,处理成本上更是低至1/10。对于人工湿地的实际耗费计算,可近似引用Brown、Schueler用于湿地塘的计算公式^[44]:

$$C = 30.6V^{0.705}$$

式中: C 为湿地系统基建费用,美元; V 为湿地工程容积,立方英尺。而湿地的年运行维护费按3%~5% C 计算。以日处理农村生活污水150 m³、2 d停留时间的湿地系统计算,湿地投资费用为143000元,单位投资为950元/m³,年维护运行费用仅为7000元左右。其实在实际应用中,由于我国农村特有的实际情况,人工湿地的经济耗费更低,例如,刘超翔等^[45]利用潜流人工湿地处理滇池流域农村生活污水,处理规模为80 m³/d,在满足出水达标的情况下,工程总投资仅为5.2万元,单位投资为650元/m³,运行成本仅为0.03元/m³。

5 国内外人工湿地农村应用现状

人工湿地系统处理农村生活污水具有基建简易、耐冲击负荷、污泥产量小、运行维护费用低等特点。目前利用人工湿地处理农村生活污水在技术上已基本成熟,并在世界范围内有较广泛的应用^[46]。据统计,至2004年欧洲有超过5000座湿地系统在运行,主要用于处理农村或小规模的生活污水^[47],尤其近年来,用于人口少于500人的农村或社区生活污水的治理和单纯灰水的治理已成为研究应用的重点^[48]。在美国,人工湿地技术是美国环保署用于处理包括农村生活污水在内的分散污水的推荐技术。在应用最多的肯塔基州,有超过1200座小型人工湿地用于分散污水治理^[41]。在英国农村,芦苇湿地得到广泛应用,2000年的统计数据为530余座。芦苇人工湿地不仅使农村生活污水得到有效治理,还为野生动植物提供了生活环境,实现其生态价值^[36]。对于发展中国家,人工湿地被视为最有前途的处理工艺,特别是对于农村地区污水的处理^[49]。在我国,人工湿地系统被视为控制面源污染的有效措施,近年来针对农村生活污水的小型湿地系统也不断增多。例如,浙江省安吉县于2004—2005年建设的150余个小型人工湿地,处理规模仅为0.3~20.0 m³/d,用于处理几家农户或村庄的生活污水,小型湿地结构简单,维护简便,填料使用3年后更换即可继续使用,经济有效地解决了该县农村的生活污水污染问题^[50]。又如四川省遂宁市旗山村利用湿地系统处理400余户农户与13家农家乐生活污水,湿地系统中种植菖蒲、水竹,湿地系统几乎不需管理成本。不仅有效解决了旗山村生活污水的污染问题,还成为农家乐的一大景观^[51]。虽然目前人工湿地在少数地区得到成功应用,但是由于政府规划、工艺参数确定等各方面问题,在我国农村地区人工湿地尚未取得很好的大范围推广。部分国内外人工湿地处理农村生活污水污染物去除情况见表2^[36,50,52-55]。

表2 部分国内外人工湿地处理生活污水污染物去除情况

地区	湿地类型	BOD ₅	COD	TN	NH ₃ -N	TP
爱尔兰	表面流	98	95	—	99	92
丹麦	垂直流	92	—	43	78	25
英国	潜流+垂直流+表面流	98.4	—	—	99.5	93.5
地中海国家	表面流、潜流、垂直流	80~90	75~85	35~50	—	20~35
滇池流域	潜流	—	59.6~70.6	50.4~60.6	70.8~83.0	55.0~66.0
浙江安吉县	潜流	—	63.9~89.0	31.1~63.4	34.4~74.0	60.9~95.9

6 展望

通过对人工湿地的分析比较可以看出,人工湿地技术是一种集环境效益、经济效益于一体的污水处理方式,针对我国广大农村地区生活污水污染的治理,人工湿地表现出了很好的适用性。然而由于工艺本身、运行管理等各方面问题,其广泛的应用受到了限制。为了更好地利用人工湿地处理技术,笔者认为如下几个方面尚需深入研究:①对人工湿地净化所涉及机理,例如目前对基质磷素吸附后的磷素形态转化和释放特征研究较少,系统中微生物种群、光照、气流、水位、气温等因素对污染物去除的影响也需做更深入的分析;②组合有效填料或研发利用新型填料以及培养选择适用于不同环境的植物物种使氮磷得到更持久有效的去除;③人工湿地床体结构、工艺流程和布置形式的优化设计,以及组合工艺的选择使用。相信随着人工湿地系统的不断优化和工程参数的不断确定,在对于农村生活污水的治理上,人工湿地系统一定会获得更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHAO H. Policy and practice for rural wastewater treatment in China [R]. Beijing: Department of Rural Development Ministry of Construction, China, 2007.
- [2] 徐洪斌, 吕锡武, 李先宁, 等. 太湖流域农村生活污水污染现状调查研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S): 375-378.
- [3] AL-AYYOUSI O. Focused environmental assessment of greywater reuse in Jordan [J]. Environmental Engineering Policy, 2002, 3: 67-73.
- [4] JEPPESEN B. Domestic greywater reuse: Australia's challenge for the future [J]. Desalination, 1996, 106: 311-315.
- [5] ALMEIDA M C, BUTLER D, FRIEDLER E. At-source domestic wastewater quality [J]. Urban Water, 1999, 1: 49-55.
- [6] FAN Y B, LI G. Treatment and reuse of toilet wastewater by an airlift external circulation membrane bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2006, 41: 1364-1370.
- [7] ERIKSSON E, AUFART K, HENZE M, et al. Characteristics of greywastewater [J]. Urban Water, 2002, 4: 85-104.
- [8] PALMQUIST H, HANAEUS J. Hazardous substances in separately collected grey and blackwater from ordinary Swedish households [J]. Science Total Environment, 2005, 348: 151-163.
- [9] PARK N, KIM J H, CHO J. Organic matter, anion, and metal wastewater treatment in Damyang surface-flow constructed wetlands in Korea [J]. Ecological Engineering, 2008, 32: 68-71.
- [10] SOLANO M L, SORIANO P, CIRIA M P. Constructed wetlands

- as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages[J]. *Bios Stems Engineering* ,2004 8(1) :109-118.
- [11] TUSZYNSKA A ,PEMPKOWIAK H O. Dependence between quality and removal effectiveness of organic matter in hybrid constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology* ,2008 ,99 : 6010-6016.
- [12] 李林锋 ,年跃刚 ,蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. *环境科学研究* 2009 22(3) 337-342.
- [13] KOOTTATEP T ,POPASERT C. Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetlands located in the tropic [J]. *Water Science Technology* ,1997 36(12) :1-8.
- [14] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of construct wetland[J]. *Science Total Environment* ,2007 380 : 48-65.
- [15] GREENWAY M ,WOOLLEY A. Constructed wetlands in Queensland : performance efficiency and nutrient bioaccumulation[J]. *Ecological Engineering* ,1999 ,12 39-55.
- [16] HEALY M G ,RODGERS M ,MULQUEEN J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters[J]. *Bioresource Technology* 2007 98 2268-2281.
- [17] BROOKS A B ,ROZENWALD M N ,GEOHRING L D ,et al. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering* 2000 ,15 :121-132.
- [18] PROCHASKA C A ,ZOUBOULIS A I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate[J]. *Ecological Engineering* , 2006 26 293-303.
- [19] ZHU T ,JENSSEN P D ,MHLUM T ,et al. Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates(LWA)- potential filter media in treatment wetland[J]. *Water Science Technology* ,1997 35 :103-108.
- [20] SEOA D C ,CHOB J S ,LEE H J ,et al. Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland[J]. *Water Research* ,2005 ,39 :2445 - 2457.
- [21] SONG Z W ,ZHENG Z P ,LI J ,et al. Seasonal and annual performance of a full-scale constructed wetland system for sewage treatment in China[J]. *Ecological Engineering* ,2006 , 26 272-282.
- [22] AKRATOS C S ,TSIHRINTZIS V A. Effect of temperature , HRT ,vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering* 2007 29 :173-191.
- [23] CHAZARENC F ,MERLIN G. Influence of surface layer on hydrology and biology of gravel bed vertical flow constructed wetland[J]. *Water Science Technology* 2005 51(9) 91-97.
- [24] ZHAO L F ,ZHU W ,TONG W. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetland[J]. *Journal of Environmental Sciences* 2009 21 :750-757.
- [25] STOTTMEISTER U ,WIFENER A ,KUSCHK P ,et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances* ,2003 ,22 : 93-117.
- [26] CHIMNEY M J ,PIETRO C K. Decomposition of macrophyte litter in a subtropical constructed wetland in South Florida (USA) [J]. *Ecological Engineering* 2006 27 301-321.
- [27] 邵丽 ,林志祥 ,张洪海 ,等. 人工湿地存在的问题及解决措施[J]. *云南农业大学学报* ,2009 24(4) 603-606.
- [28] WOMANA A ,KRONNAS V. Effect of pond shape and vegetation heterogeneity on flow and treatment performance of constructed wetland[J]. *Journal of Hydrology* 2005 301 :123- 138.
- [29] ASUMAN K ,MERYEM B ,GOKSEL N D. Comparison of the treatment performances of blast furnace slag-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for domestic wastewater treatment in Turkey[J]. *Ecological Engineering* , 2005 24 :187-200.
- [30] HENCHA R ,BISSONNETTE K G ,SEXSTONE A J ,et al. Fate of physical ,chemical and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetland[J]. *Water Research* 2003 37 921-927.
- [31] 申欢 ,胡洪营 ,潘永宝. 潜流式人工湿地冬季运行的强化措施研究[J]. *中国给水排水* 2007 22(5) 44-46.
- [32] ZHANG L Y ,ZHANG L ,LIU Y D ,et al. Effect of limited artificial aeration in constructed wetlands treatment of domestic wastewater[J]. *Desalination* 2010 250 915-920.
- [33] MUNOZ P ,DRIZOB A ,HESSIONC W C. Flow patterns of dairy wastewater constructed wetlands in a cold climate[J]. *Water Research* 2006 40 3209-3218.
- [34] WINTER K J ,GOETZ D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetland[J]. *Water Science Technology* 2003 48(5) 9-14.
- [35] TUNCSIPER B. Nitrogen removal in a combined vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetland system[J]. *Desalination* 2009 247 466-475.
- [36] RUOKOJARVI A. Lakepromo summary : rural wastewater treatment in Finland ,the United Kingdom and Hungary[M]. Savonia :Savonia University of Applied Sciences ,2007 :98 - 103.
- [37] 王凯军 ,陈世朋 ,董娜 ,等. 微型复合垂直流人工湿地处理农村灰水实验研究[J]. *中国给水排水* ,2008 24(17) : 40-43.
- [38] ALVAREZ J A ,RUIZ I ,SOTO M. Anaerobic digesters as a pretreatment for constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering* 2008 33 54-67.
- [39] TSALKATIDOU , M GRATZIOU M ,KOTSOVINOS N. Combined stabilization ponds-constructed wetland system[J]. *Desalination* 2009 248 988-997.
- [40] 陈和平 ,张慎 ,朱建林 ,等. 艳阳接触氧化池/垂直流人工湿地处理农村生活污水[J]. *宁波大学学报 理工版* , 2008 21(4) 568-570.

[41] WYNN J ,BELFI H ,CANTINO H ,et al. Ecological wastewater treatment for Appalachia : constructed wetlands and related innovation[R]. Athens Ohio : rural action ,America ,1997.

[42] DUPOLDT C ,EDWARDS R ,GARBER L ,et al. A Hand book of constructed wetland[M]. Washington DC :U S Government Printing Office ,1995 41-44.

[43] LIU D ,GE Y ,DONG J C ,et al. Constructed wetlands in China : recent developments and future challenges[J]. Front Ecological Environment , 2009 , 7(5) :261-268.

[44] California Stormwater Quality Association. Constructed wetlands TC - 21 design considerations[Z]. California : California Stormwater Quality Association ,2003 5-7.

[45] 刘超翔 ,胡洪营 ,黄霞 ,等 .滇池流域农村污水生态处理系统设计[J]. 中国给水排水 , 2003 , 19(2) :93-94.

[46] YE F X ,LI Y. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities[J]. Ecological Engineering , 2009 , 35 : 1043-1050.

[47] CHEN Z M ,CHEN B ,ZHOU J B ,et al. A vertical subsurface-flow constructed wetland in Beijing[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation , 2008 , 13 :1986-1997.

[48] HABERL R ,PERFLER R ,MAYER H. Constructed wetlands

in Europe[J]. Water Science Technology ,1995 , 32(3) :305-315.

[49] KIVAISI A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries : a review[J]. Ecological Engineering , 2001 , 16 :540-546.

[50] 曹杰 .人工湿地对农村生活污水的处理效果研究[D]. 杭州 :浙江大学 , 2007 22-24.

[51] 汪仁洪 .四川遂宁无人污水处理厂人工湿地种植菖蒲[N]. 华西都市报 , 2009-5-27(30).

[52] SCHOLZ M. The universal design ,operation and maintenance guidelines for farm constructed wetlands in temperate climates [R]. Edinburgh :The University of Edinburgh ,2007.

[53] BRIX H ,ARIAS C A. The use of vertical flow constructed wetlands for onsite treatment of domestic wastewater : New Danish guideline[J]. Eco logical Engineering , 2005 , 25 :491-500.

[54] FAHD K ,MARTIN I ,SALAS J. Experimental plant and the technological transfer centre : urban wastewater treatment experimental platforms for the small rural communities in the mediterranean area[J]. Desalination , 2007 , 215 :12-21.

[55] 刘超翔 ,胡洪营 ,张健 ,等 .人工复合生态床处理低浓度农村生活污水[J]. 中国给水排水 , 2002 , 18(7) :1-4.

(收稿日期 :2010-04-25 编辑 :徐娟)

(上接第 69 页)

从图 4 中可以看出 ,随着 CaCl_2 投加量的增加 ,开始对絮凝起很好的助凝作用 ,当达到 2 mL 左右时 ,助凝效果有所下降 ,但是降低速度较缓慢。可以得出当 CaCl_2 投加量大于 2.5 mL 后 ,增加 CaCl_2 的用量不能有效的提高脱色率。

4 结 论

a. 从土壤中筛选出的 A3 菌种能代谢出高效絮凝剂 ,其最佳培养条件是葡萄糖添加量 2.2%、酵母膏添加量 0.51%、pH 为 7.6、温度为 30.3℃。

b. 创建了 A3 产絮凝剂絮凝率同培养时间的动力学数学模型 : $Y = 96.03 - 338.15/t$ 。

c. 用 A3 菌产絮凝剂处理印染废水 ,有较好的脱色效果。优化处理的处理条件为 pH 值 9、絮凝剂投加量 2.2 mL、 $w = 1\%$ 的 CaCl_2 用量为 2.2 mL。用优化后的条件进行印染废水脱色试验 ,脱色率可达 80%。

参考文献 :

[1] 杨常凤 ,周欣平 ,孔峰 .微生物絮凝剂的培养与对酱油废水处理实验研究[J]. 污染防治技术 , 2008 , 21(2) : 13-15.

[2] 魏晓金 ,李静 ,何绪文 .微生物絮凝剂的絮凝条件及焦化

废水净化研究[J]. 中国工程科学 , 2008 , 11(2) :88-91.

[3] 张迎明 ,赵继红 ,杨劲峰 ,等 .微生物絮凝剂处理氧化铁红染料废水研究[J]. 广东化工 , 2009 , 36(2) :65-67

[4] 刘彬彬 ,闫永胜 ,王珊 .微生物絮凝剂处理造纸中段废水的实验研究[J]. 工业安全与环保 , 2007 , 33(11) :14-16.

[5] 鲍立宁 ,洪桂云 ,宋礼华 .絮凝剂产生菌培养条件的研究及在废水处理中的应用[J]. 生物学杂志 , 2008 , 25(3) :21-24.

[6] 陈盛 ,钱伟 ,罗志敏 ,等 .酸性多糖微生物絮凝剂的提取、纯化与分析[J]. 环境污染治理技术与设备 , 2006 , 12(7) : 61-64.

[7] 朱富坤 ,刘彬彬 ,闫永胜 ,等 .微生物絮凝剂 PF-2 的成分分析及絮凝机制研究[J]. 环境污染与防治 , 2008 , 30(2) : 37-41.

[8] 胡永有 ,高宝玉 .微生物絮凝剂[M]. 北京 :化学工业出版社 , 2007.

[9] 张宏梅 .生物絮凝剂在环境废水处理中的应用[J]. 化工技术与开发 , 2007 , 36(7) :41-44.

[10] 杨正亮 ,郑雪斌 ,冯贵颖 .微生物絮凝剂的研究进展[J]. 安徽农业科学 , 2007 , 35(24) :7593-7594 , 7596.

[11] 罗平 ,罗国源 ,左赵宏 .短芽孢杆菌 RL-2 絮凝机理研究[J]. 环境工程学报 , 2007 , 1(6) :39-42.

(收稿日期 :2009-12-29 编辑 :高渭文)