

人工湿地处理农业径流的研究进展

卢少勇^{1,2}, 张彭义^{1,*}, 余 刚¹, 金相灿²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084 ; 2. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地,
国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012)

摘要 :人工湿地 (CW) 是独特的土壤-植物-微生物-动物系统。按水流方式分为表面流湿地 (FWS) 和潜流湿地 (SFW)。FWS 投资低, 但占地大, 低温地区冬季运行需要独特的考虑。SFW 的保温保水效果好, 卫生条件较好, 但投资高, 易堵塞。SFW 分为水平潜流湿地 (HF) 和垂直潜流湿地 (VF)。HF 床供氧较差, 适于去除 SS 和 BOD, 但 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除较差。VF 床供氧好, 占地小, 适于硝化和去除 BOD, 但对 SS 的去除不如 HF 床, 而且构建费高, 易堵塞。FWS 按系统中的主体植物的不同分为大型自由漂浮植物湿地、大型沉水植物湿地和大型挺水植物湿地。农业径流 (AR) 由农田排水、灌溉余水、村落污水、畜禽养殖污水和部分雨水径流组成。其污水源具有面广、量大、分散、间歇的峰值和高无机沉淀物负荷的特点。中国大多数农村经济基础薄弱, 管理水平不高。农村中的低洼地、低产田和公共用地均可作为生态环境保护用地。农村的污水收集系统欠完善。传统污水处理技术处理 AR 时难度大、维护管理复杂、投资和运行费高。而 CW 的耐冲击负荷能力强、投资低、运行费低、维护管理简便, 但占地较大。因此 CW 适合于有地可用的农村的 AR 的处理。小结了 1982 年起 CW 技术在 AR 处理中的研究和应用。已有研究结合 AR 的水质、水量规律及农村的特点, 进行了 CW 的设计与工艺改进。对氮、磷、有机物、农药和杀虫剂等污染物的去除效果有较多的研究。关于 CW 的运行、维护和管理的研究有沉积物积累、水量平衡、去除效果的衡量、植物收割和费用分析。CW 的运行效果的衡量应当基于进出水负荷量而非基于进出水浓度。总之 CW 在 AR 污染控制中具有良好的应用前景。CW 经合理设计和管理后有望实现“零费用运行”或者“盈利性运行”。

关键词 :人工湿地 ;农业径流

文章编号 :1000-0933 (2007) 06-2627-09 中图分类号 :X149 ,X171 ,S181 文献标识码 :A

Research progress of constructed wetland treating agricultural runoff

LU Shao-Yong^{1,2}, ZHANG Peng-Yi^{1,*}, YU Gang¹, JIN Xiang-Can²

1 Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2 State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (6) 2627 ~ 2635.

Abstract :Constructed wetland (CW) is unique soil-plant-microbe-system, CW can be divided into free surface CW (FWS) and subsurface flow CW (SFW) according to various water flow direction. FWS has low investment but large land consumption, and need unique consideration in winter for its operation. SFW have better temperature and water maintain capability, better sanitary condition, but high investment and high risk of clogging. SFW is divided into horizontal SF (HF) and vertical SF (VF). HF bed has weak oxygen supply, is suitable for SS and BOD removal, but not for ammonia

基金项目 :国家重大科技专项基金资助项目 (K99-05-35-02) ;国家高技术研究发展计划资助项目 (2005AA60101005)

收稿日期 :2006-05-19 ;修订日期 :2006-11-28

作者简介 :卢少勇 (1976 ~) 男, 湖南人, 博士, 主要从事水污染治理与生态修复研究. E-mail :lushy2000@163.com

* 通讯联系人 Corresponding author E-mail :zpy@mail.tsinghua.edu.cn

Foundation item :The project was financially supported by the Major Special Program of the Ministry of Science and Technology (No. K99-05-35-02) ; The Major Special Program of the Ministry of Science and Technology (No. 2005AA60101005)

Received date 2006-05-19 ; **Accepted date** 2006-11-28

Biography LU Shao-Yong, Ph. D., mainly engaged in water pollution control and ecological restoration. E-mail :lushy2000@163.com

removal. VF bed has sound oxygen supply , is suitable for nitrification and BOD removal , but not for SS. VF has high construction fee and is easy for clogging. FWS is divided into floating helophyte CW , submerged helophyte CW and emerged helophyte CW. Agricultural runoff (AR) has relative sophisticated composition , which mainly including agricultural discharge , irrigation residual water , village wastewater , poultry and animal wastewater and some rain-water runoff. Source of AR own characteristics of widespread distribution , large quantity , dispersion , intermittent peak value and high inorganic deposition load. Lots of rural in China have weak economic foundation and low management level. Some lands in the rural , including low land , low-producing farmland and public land , can be utilized for eco-environmental protection. Wastewater collection systems are under-perfect. Traditional wastewater treatment technology for AR treatment will have large difficulty for water collection. It also needs sophisticated maintenance and management , high investment and high running cost. CW has strong impact load resistant capability , low investment and running cost , easy maintenance and management , but has high land use requirement. Thus CW is suitable for wastewater treatment in rural with land available. Study and application of CW technology for AR treatment since 1982 were summarized in this paper. Some design and technology modification have been made based on combined water quality , water quantity regularity and characteristics of rural. Effects of nitrogen , phosphorus , carbon , insecticide and pesticide removal by CW were made by many researchers. Operation , maintenance and management of CW were focused on the accumulation of sediment , water budget , judge of removal efficiency , plant harvesting and cost analysis. The weigh of performance of CW , should be based on the inflow and outflow contaminants load but not on the inflow and outflow contaminants concentration. CW has sound application foreground for control of AR. CW Appropriately designed and managed can realize the non-cost performance or revenue-producing performance.

Key words constructed wetland ; agricultural runoff

人工湿地 (CW) 是 20 世纪 70 年代起发展的新型污水处理和水环境修复技术 ,常为由土壤或人工填料 (如碎石等)和生长在其上的水生植物组成的独特的土壤-植物-微生物-动物生态系统。污水被人为投配到常处于浸水状态、生长水生植物 (如芦苇、香蒲、茭草、浮萍和马蹄莲等)的土地上 ,沿一定方向流动的污水在耐水植物、土壤和微生物的协同作用下被净化^[1~4]。1952 年 ,德国 Plön 水生物学研究院 Käthe Seidel 进行水生植物去酚能力和耐酚性的小试研究^[5]。1972 年 ,Seidel 和 Kickuth 提出根区理论 (Root-Zone Method ,简称 RZM) ,该系统由塑料衬床和生长在土壤上的挺水植物组成 ,系统中土壤的水力传导性低 ,易发生表流 ,降低污水与根围的有效接触 ,可选用多孔介质来克服此缺点^[2,5]。

1977 年 Kickuth 报道了 1974 年建于德国 Othfresen 的首座 CW 工程 (处理城市污水)的运行情况^[5]。1983 年 ,美国 Wolverton 等报道了在 Luisiana 温室进行的 SF 系统的间歇运行试验 ;1985 年 Gersberg 等^[1]报道了在 Santee 进行的连续流现场试验。我国自 “七五 ”期间开始研究 CW ,天津市环境保护研究所 1987 年建成我国首座芦苇 CW 工程 (占地 90 × 666.7m² ,处理水量 1400 m³/d) ;北京市环境保护研究所在北京昌平建成了占地 10000 m²处理 500 m³/d 城镇污水的芦苇 CW 工程 ;国家环保局华南环保所 1990 年在深圳白泥坑建成占地 8400 m²处理 3100 m³/d 服务 7000 人的乡镇生活污水 CW 工程^[6]。

CW 已被应用于工业污水、生活污水、养殖场污水、城市污水和地表水的处理^[1,3,5,7~10]。1952 ~ 1994 年使用植物或 CW 治理各类污染的试验和工程报道共 45 例^[5] ,其中工业污水 24 例 ,农业污水 11 例 ,服务业污水 1 例 ,其它 9 例。到 1994 年为止 ,CW 在的应用情况^[5] : (1) 欧洲 ,德国约 3000 个 ,且有被批准建设的 1000 个 (占地 30 m² ,处理 5 人口当量)。丹麦和英国都至少有 200 个在运行 ,到 1996 年为止奥地利已批准建设 293 个 ,含已运行 160 个和在建 17 个。 (2) 北美 ,约 600 多个处理市政、工业和农业废水 ,400 多个处理煤矿废水 ,50 多个处理生物污泥 ,近 40 个处理暴雨径流 ,30 多个处理奶产品加工废水。 (3) 澳洲 ,新西兰约有 80 个在运行。澳大利亚将湿地用于处理各类污水。 (4) 非洲 ,南非将湿地用于处理各类污水。

1 人工湿地的分类

根据 CW 中的水流方向 ,CW 分为表面流湿地 (FWS)和潜流湿地 (SFW),而 SFW 分为水平潜流 (HCW)和垂直潜流 (VCW)湿地。根据优势大型植物的生长形式 ,CW 分为大型自由漂浮、大型沉水和大型挺水植物系统^[8,11]。

1.1 大型自由漂浮植物系统

大型自由漂浮植物种类多 ,习性异 ,从无根或少根的微小漂浮植物 (*Lemnaceae*-浮萍 ,即 *Lemna* spp. , *Spirodela polyrrhiza* ,*Wolffia* spp.)到具高耸的和/或漂浮的圆形叶丛和水下根发育充分的大型植物 (如 *Eichhornia crassipes*-水葫芦 ,*Pistia stratiotes*-水浮莲或 *Hydrocotyle umbellata*-铜钱草)。大型自由漂浮植物 CW 系统见图 1^[3]。

1.2 大型沉水植物系统

沉水植物的光合组织位于水面下 (图 2)其嫩芽能摄取无机物 ,根部能吸收营养物。沉水植物常仅在有氧水中良好生长 ,而微生物分解有机物会形成缺氧环境 ,所以其不适合于处理含高浓度可生物降解有机物的污水。此外 ,水的浊度太高时降低透光性而妨碍光合作用的进行。因此 ,虽然有采用沉水植物系统处理一级出水的实例 (*Elodea nuttallii* 系统)^[3] ,但沉水植物 CW 系统的主要应用前景应为处理低负荷水 (如二级生物处理的出水等)及河湖的生态修复。

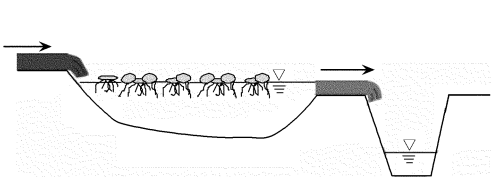


图 1 大型自由漂浮植物人工湿地系统
Fig. 1 Floating helophyte constructed wetland
所示植物为浮萍 the plant is *Lemna* spp.

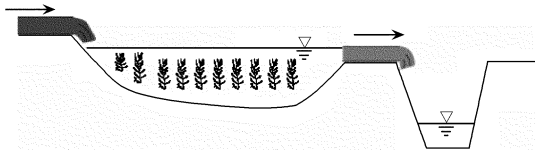


图 2 大型沉水植物人工湿地系统
Fig. 2 Submergent macrophyte constructed wetland
所示植物为菹草 the plant is *Potamogeton crispus* L.

大型沉水植物在其高光合作用活性期间大量消耗水中的溶解性无机碳 ,增加溶解氧 (DO)浓度 ,升高 pH 值 ,利于氨的挥发和磷的化学沉淀 ,利于水中有机物的矿化。植物吸收的营养物多保留在其根部组织和附着的微生物群落 ,植物组织死亡 (如叶子凋落)后释放的营养物易被水生附着生物群落吸收利用 ;系统中产生的大量碎屑物质将积累和保存在沉积物中。^[3]

污水处理中应用前景较好的大型沉水植物种属有 *Egeria densa* (*Dense Waterweed* 伊乐藻属 水蕴草 ,*Egeria* , *Brazilian Elodea* 伊乐藻属)、*Elodea canadensis* 和 *Elodea nuttallii* (*Waterweeds* 伊乐藻属)、角苔 *Ceratophyllum demersum* (*Coontail Hornwort* 金鱼藻)、黑藻属 *Hydrilla verticillata* (*Hydrilla* 软水草)、*Cabomba* (水盾草 鱼草)、*caroliniana* (*Fanwort* 水盾草属)、*Myriophyllum heterophyllum* (*Water milfoil* 聚藻)和 *Potamogeton* spp. (*Pondweeds* 水池草 ,如眼子菜、鸭子草)等。^[3] Dierberg 等^[11]将 *Najas guadalupensis* ,*Ceratophyllum demersum* , *Chara* spp. 和 *Potamogeton illinoensis* 等 3 种植物用于 AR 的处理。

1.3 大型挺水植物系统

以大型挺水植物为主要植物物种的 CW 系统常可建成如下 3 类 :

- (1)表面流湿地 (free water surface wetland 或 surface flow wetland , FWS)
污水从填料 (原土壤或人工填料)表面水平流过 ,有机物的降解主要由附着在植物水下茎杆上的生物膜完成 ,水位浅 ,常为 0.1 ~ 0.6 m。北美多用^[12]。FWS 的优点是投资低 ,易构建。缺点是不能充分利用填料表面的生物膜和植物根系 ,保温保水效果较差 ,在寒冷地区的 FWS 需解决结冰问题 ;卫生条件不好 (如有不良气味)等。图 3-a 所示为 FWS 的典型示意^[8]。
- (2)潜流湿地 (Subsurface Flow Wetland , SF)

污水从填料内部流过 ,水面低于填料的上表面。优点是充分利用填料提供的表面和植物根系 ,占地小 ;累积在填料表面的植物残体能在寒冷气候下具较好的热保护和保湿作用 ,卫生条件较好^[10]。但投资高为其缺点。分为水平潜流系统 (Horizontal Subsurface Flow , HF 或 HSF) (见图 3-b)和垂直潜流系统 (Vertical Subsurface Flow , VF) (见图 3-c)。

HF 系统 在欧洲该系统中的优势植物常为普通芦苇 ,故也常被称为“芦苇床处理系统 (reed bed treatment System , RBTS)” ,在美国则为“植物淹没床 (vegetated submerged bed , VSB)”。

VF 系统 VF 与 HF 的结构设计不同 ;布水也不同 ,VF 系统的布水系统常需覆盖整个湿地表面。但两种系统的污染物去除原理相同 ,通常是预处理后的污水从管道流入植物床并从填料中渗过 ,在流动过程中去除污染物。VF 床供氧好 ,占地小 ,适于硝化和去除 BOD ,但对 SS 的去除不如 HF 床 ,而且构建费高 ,易堵塞 ;HF 床供氧较差 ,适于去除 SS 和 BOD ,但 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除较差^[13]。

(3) 复合系统

不同类型的 CW 处理系统可互相联合或与传统处理系统联合以实现各系统的优势互补 ,这尤为适应强化去氮。^[4]混合系统形式多样 ,如分段布置的垂直流系统和水平流系统。如表面流和潜流系统的组合^[13]、水平潜流和垂直潜流系统的组合^[14]。

不同种类植物 ,其生长周期、营养物吸收能力、供氧能力、对水流流态的改善和对微生物的协助作用等不同 ,因此 ,种植不同植物的湿地系统 ,其处理能力有别。^[4, 5, 15, 16]

2 人工湿地处理农业径流 (AR) 的研究进展

在农业区 ,污水源具有面广、量大、分散、间歇的峰值和高无机沉淀物负荷的特点 ,而且由于历史原因 ,目前农业径流 (主要包括农田排水、灌溉余水、村落污水、畜禽养殖污水和部分雨水径流) 的收集系统多数不完善 ,若采用常规二级污水处理技术 ,污水收运系统的完善费用高 ,因此 AR 污染负荷需选用低投资、高效率和低运转费用的技术 (如 CW) 来削减。^[8]1982 年 Reddy 首次进行 CW 的农业排水处理试验 ,Higgins 等报道了首座 AR 处理 CW 工程 (建于 1989 年)。^[1]迄今为止 ,最大规模的处理农业排水的 CW 是在南佛罗里达州的 FWS ,占地 16000hm^2 ^[1]。

此后关于 CW 处理 AR 的研究主要侧重于湿地的设计、污染物去除、工艺改进和持续有效的运行维护管理等方面。Vymazal 等详细总结了 CW 去除各类污水时的碳、氮、磷、细菌和重金属等的机理^[5]。

2.1 湿地设计与工艺改进

AR 具有高无机沉淀物负荷的特点 ,FWS 可能更适合于其处理 ;从畜禽饲养场和其它源排放的高浓度有机废水可由 SF 或 FWS 处理 ,均须采取合适的预处理措施来强化 SS 和 BOD_5 的去除 ,以降低 CW 堵塞的风险^[1]。通常 AR 的污染物 (COD、TN 和 TP) 浓度和可生化性均比城镇生活污水的低 ,去除率比城镇生活污水处理系统的低。受可用地的形状和位置的限制 ,均匀布水是关键。

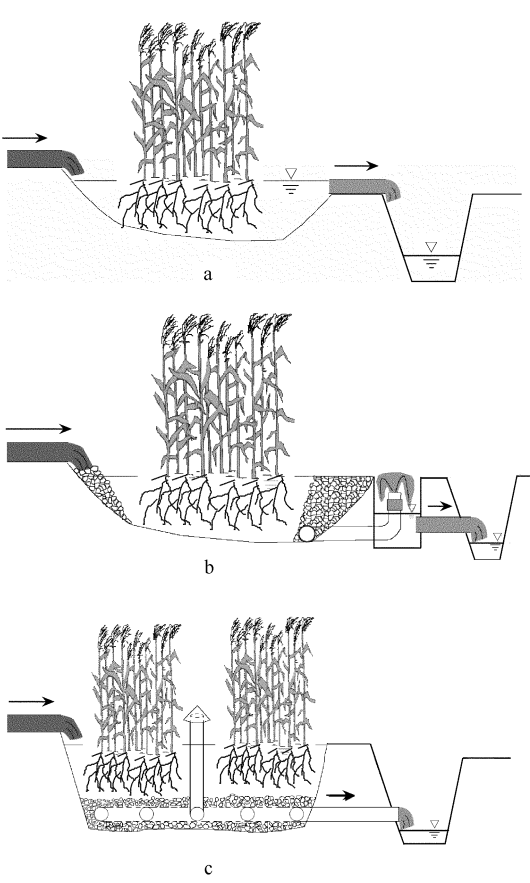


图 3 挺水植物湿地系统

Fig. 3 Emergent hydrophyte constructed wetlands

a 表面流湿地 FWS b 水平潜流系统 Horizontal subsurface flow c : 垂直潜流系统 Vertical subsurface flow

工业和农业污水中,有机物主要包括溶解性有机质 ($<10^3$ amu)和较大颗粒(工业废水, $>1.2\text{ }\mu\text{m}$,工业废物, $>10\text{ }\mu\text{m}$)。在此两范围之间为大的高分子和胶体,在其被细菌新陈代谢之前均需胞外水解。颗粒大小分布将影响营养物去除过程的设计和运行^[17]。

卢少勇等^[18,19]报道了处理 AR 的不规则形状的 CW 中通过堰口高程的合理配置实现多条沟渠来水的均匀布水、通过设计导流墙改善流态,通过排水系统的合理配置实现旱季和雨季的排水与滇池水位变化的和谐。

提高湿地系统中的水力效率的举措有:种植水生植物、进口处放置大石块和在系统中设置透水坝(有阻碍作用兼透水作用)开挖之字沟等^[20]。

Behrends 等^[21]报道 SF 的干湿交替技术的开发,能显著改善湿地的运行。此技术将整个湿地转变成固定膜生物反应器,通过交替好氧和厌氧,来控制氧化还原电位。交替系统通过控制 HRT、交替频率、交替循环时间、交替深度、基质大小和基质组成等来控制污水处理功能。该系统已被用于处理市政/生活污水、高浓度畜禽污水、含酸、难降解化合物、溶剂、防冻剂、重金属、炸药和肥料流失的混合污水。

Sun 等^[22,23]在处理 AR 的垂直流 CW 中采用了出水再循环。研究结果表明再循环显著改善了 BOD₅、COD、悬浮固体(SS)和 NH₄⁺-N 的去除,尤其是 NH₄⁺-N。NH₄⁺-N 氧化成 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 仅在再循环时发生。PO₄³⁻-P 的去除仅在再循环时稍有改善。通常,NH₄⁺-N 的去除率和系统的负荷成比例增加;有再循环后,污水的 pH 值逐渐降低,这是由于硝化过程消耗碱度;无再循环时 pH 值不变。采用再循环时,周围温度对 BOD₅ 的去除无显著影响,但会影响 NH₄⁺-N 的去除。每个处理阶段的出水循环是改善下向流芦苇湿地的合适的技术。

Braskerud^[20]总结认为 CW 的深度宜控制在 0~0.5 m,在植物的协助下,可优化沉降,颗粒沉降距离较短,有助于避免在暴雨时期的再悬浮。

2.2 湿地的污染物去除效果

国内外对 AR 的 CW 处理工艺的污染物去除效果有很多报道,涉及的污染物主要有 COD、BOD₅、总氮(TN)、无机氮、有机氮、氨氮、总磷(TP)、磷酸盐、悬浮物(SS)^[24~26],杀虫剂、除草剂、杀真菌剂和粪大肠菌等。在农业区构建湿地后,土壤中的磷可能会释放到湿地的水相中^[27]。

暴雨水中输送的杀虫剂百菌清(Chlorothalonil)和杀真菌药(fungicide)毒死蜱(chlorpyrifos)对受纳水体中的水生生物系统有致命的不利影响,CW 具有从暴雨径流中去除杀虫剂、杀真菌药和除草剂等潜能,实验表明,CW 对毒死蜱、百菌清、阿特拉津(除草剂)和伏草隆(除草剂)均有一定的截留和去除效果,CW 中试系统使用标志(sentinel)物种 *Ceriodaphnia dubia* 和 *Pimephales promelas*,模拟去除暴雨径流中的毒死蜱和百菌清,径流中的毒性分别下降 98% 和 100%^[28~30]。

CW 对 AR 中污染物的去除效果见表 1 和表 2。

在夏季时污染物负荷去除率和污染物浓度去除率通常要高一些^[32,24]。

2.3 湿地运行、维护与管理

2.3.1 沉积物积累

Braskerud^[20]总结了挪威 7 处运行 3~7a 的处理非点源污染的 FWS (265~900 m²)的沉积状况,认为在可耕种的汇水区,侵蚀和运输过程影响截流,CW 的合适水深应为 0~0.5 m,这可优化沉降。

研究表明(表 1),湿地 I (2800 m²,年均水量 242 m³/d)进水端的 SS 沉积层厚度大于出水端,但沉积层厚度增量差别不大。淤泥沉积厚度并未随着时间呈线性增加,是因为淤泥层中存在厌氧发酵反应会减少淤泥层厚度,而且暴雨时大水量的冲刷作用可能导致已有的淤泥层的破坏。运行 14 个月截留的 SS 量为 130 m³,地表平均增高 6.6 cm。湿地 II (4200 m²,年均水量 252 m³/d)截留的 SS 量为 298 m³,单位面积沉积量为 0.06 m³/m²^[24]。

2.3.2 水量平衡与去除效果的衡量

雨和蒸发蒸腾作用的周期性变化,可能对湿地中的水量计算有重要影响,继而影响表观处理效率。CW

接表 1 (卧表)

和传统的污水处理厂不同 ,CW 中的植物替代了传统污水处理厂中的曝气设施 ,大大降低了 CW 的运行成本和设备费用 ,但是 CW 的植物的蒸腾蒸发作用导致 CW 中的水分大量损失 ,出水水量降低。采用稳定塘-植物床系统处理农田排灌水 ,植物床栽植茭草和芦苇监测结果表明 ,雨季、旱季平均流量分别为 417.1 ,206.8 m³/d ,无降雨期间渗漏、蒸发蒸腾损失的水量之和占进水的 42.1% ~ 60.5%。Martin R. J. 等^[34]报道佛罗里达州某湿地出水约占进水的 29.5%。在 1997 年湿地 A (面积 0.6 hm²)和湿地 D (面积 0.78hm²)的总渗漏损失量分别是 26 兆升和 22 兆升 ,代表了总进水量的 47% 和 27%^[35]。

如果基于从进水和出水的污染物浓度来衡量 CW 的污染物去除效果 ,并基于此判断 CW 与其它污水处理工艺效果的优劣不合理 ,而基于进水负荷的削减率来评判更合理。

2.3.3 植物收割

植物自身生长需要营养物 ,营养物来自污水中提供的氮和磷。但在已有的处理生活污水的 CW 的报道中 ,通过收割植物带走的氮和磷量占来水的氮磷量的比例较小 ,通常在 20% 以内^[5]。笔者在中国云南 AR 的 CW 研究表明从 2003 年 1 月 ~12 月 ,通过植物收割 (2003 年 7 月收割茭草 ,2003 年 12 月收割芦苇和茭草)带走的氮和磷量占进水的氮和磷的比例分别为 32% 和 35% ,在低浓度污水处理的 CW 中植物收割是重要的氮和磷去除途径 ,植物吸收量占系统去除总量的比例和系统的进水负荷以及系统的去除率有关。CW 工程中 ,植物收割和自然凋落总会有部分植物残体在湿地中滞留一段时间 ,若不收割 ,残体滞留量大 ,残体会溶出释放碳、氮和磷^[36] ,恶化出水水质 ,对系统有利的一面 ,是残体形成的覆盖层有利于系统的保温 ,而且残体中的碳可为系统中的反硝化提供碳源。因此适宜的收割频率、方式和时机很重要。

表 2 人工湿地处理杀虫剂、除草剂和杀真菌剂的相关参数与结果^[28-30]

Table 2 Relative parameters and results of constructed wetland for pesticides , herbicides and fungicides treatment ^[28-30]					
项目 Item	浓度 Concentration (μg kg ⁻¹)	半衰期 Half-time (d)		矿化成 CO ₂ 的比例 Ratio of mineralize to CO ₂ (%)	一级速率常数 First order rate constant (h ⁻¹)
		饱水 Saturation	淹水 Inundated		
阿特拉津 Aterazine	84	25 ~27	175	10	
伏草隆 Fluometuron	68	23	-	-	-
阿特拉津 Aterazine	73 ~147	16 ~48	-	-	-
毒死蜱 Chlorpyrifos	-	-	-	-	0.039
百菌清 Chlorothalonil	-	-	-	-	0.295

2.3.4 费用分析

处理 AR 的 CW 的运行、管理和维护工作简便 ,所需费用远低于处理等量污水的常规污水处理厂所需费用^[32-24]。通常 ,处理 AR 的 CW 的吨水投资 100 ~2500 元/ (t/d) ,吨水运行费用 0.02 ~0.40 元/ (t/d) ,变幅较大是因为各工程对出水和对景观改善的要求不同 ,CW 的产品 (优质出水、收割后的植物、截流的固体物)的产供销顺畅时 ,可实现“零费用运行”甚至“盈利性运行”。

处理 AR 的 CW 工程涉及到的运行、维护和管理工作包括垃圾清运、土建和设备的维护、样品测试和植物收割。费用支出包括垃圾收集与清运费 ,人工费 (与管理与维护有关的人力投入) ,样品测试费 ,植物收割费 ,土建设备折旧费等。费用收入项目有收割后的植物以及格栅溢流堰等拦截得到的农田垃圾等的资源化利用 (堆肥、饲料、食物、观赏花卉)和处理后出水的回用等的创收。1995 ~1996 年期间建设于 Ohio 西北部 Defiance、Fulton 和 Van Wert Counties 的 3 个 WRSIS (湿地水库再灌溉系统) ,旨在降低农业区的非点源污染 ,以维持作物产量和创造湿地的野生生境。农业区排水经过 CW 处理后出水存贮在水库中 ,回用作为灌溉用水^[37]。此外 ,潜在的经济效益包括湿地运行后对当地生态环境的改善而带来的效益 ,如工程所在地区可能开发作为旅游景点、拦截与去除污染物减轻受纳水体的污染负荷降低受纳水体水污染治理与生态修复所需的费用。

3 人工湿地处理农业径流的发展前景

通常农业区的沟渠既承担灌溉水以及农田和村落排水的输送功能 ,还兼有泄洪功能 ,因此在沟渠中进行强化处理措施常需要确保沟渠的过水断面 ,以降低农业区的农田和村落被水淹的风险。CW 常需在沟渠末端建设预处理系统。

为减少受纳水体的外源污染物负荷量 ,AR 中的污染物负荷必须得到有效削减。CW 是非常适合于 AR 处理的廉价污水处理系统和生态环境改善系统。通过政府政策的支持及植物优化配置 ,湿地植物、出水、淤泥得以有效资源化利用 ,可望实现在工程建成后完全依靠湿地的产出来支付湿地的日常运行维护和管理费用 ,实现 “零费用运转 ”甚至 “盈利性运转 ”。总之在有富余用地的农业区 ,在社会主义新农村的建设过程中 ,CW 处理技术具有非常广阔的应用和发展前景。

References :

[1] USEPA. Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment : A Technology Assessment. 1993. 832-R-93-008 (4204).

[2] USEPA. Design manual of constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. 1988. EPA 625/1-88/022 : 23 — 25.

[3] Gao Z M , Li X F , Wang S T , *et al.* Treatment for Municipal Wastewater Treatment. Beijing : Standard Press of China , 1990. 458

[4] Lu S Y , Jin X C , Yu G. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland. *Acta Ecologica Sinica* , 2006 , 26 (8) : 2670 — 2677.

[5] Vymazal J. Introduction. In : Vymazal J , Brix H , Cooper P F , *et al* eds. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Leiden : Backhuys Publishers , 1998. 1 — 15.

[6] Shen Y L , Yang Q D. New wastewater treatment technology — constructed wetland. *Pollution Control Technology* , 1996 , 9 (1 2) : 1 — 8.

[7] Luederitz V , Eckert E , Lange-Weber M , *et al.* Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* , 2001 , 18 (2) , 157 — 171.

[8] Vymazal J , Brix H , Cooper P F , *et al.* Removal mechanisms and types of constructed wetlands. In : Vymazal J , Brix H , Cooper P F , *et al* eds. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Leiden : Backhuys Publishers , 1998. 17 — 66.

[9] Dierberg F E , DeBusk T A , Jackson S D , *et al.* Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff : response to hydraulic and nutrient loading. *Water Research* , 2002 , 36 (6) , 1409 — 1422.

[10] Song Z W , Zheng Z P , Li J. Seasonal and annual performance of a full-scale constructed wetland system for sewage treatment in China. *Ecological Engineering* , 2006 26 : 272 — 282.

[11] Vyacheslav G M , Michael A Z , Ludmila I Y , *et al.* The use of constructed wetlands for the treatment of run-off and Drainage Waters : the UK and UKRAINE experience. *Water Science and Technology* , 1996 , 33 (4-5) : 315 — 323.

[12] Kantawanichkul S , Somprasert S , Aekasin U , *et al.* Treatment of agricultural wastewater in two experimental combined constructed wetland systems in a tropical climate. *Water Science & Technology* , 2003 , 48 (5) : 199 — 205.

[13] Jan Vymazal. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering* , 2005 25 475 — 477.

[14] Xu H , Chen H Z , Xiong Q Q , *et al.* Studies on the effective and mechanisms of N and P removal in macrohydrophyte. *Journal of Harbin University of C. E. & Architecture* , 1999 , 32 (4) , 8 69 — 73.

[15] USEPA. Design manual of constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment , 1988 , EPA 625/1-88/022 : 23 — 25.

[16] Sophonsiri C , Morgenroth E. Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal , industrial , and agricultural wastewaters. *Chemosphere* , 2004 55 (5) : 691 — 703.

[17] Lu S Y , Zhang P Y , Yu G , *et al.* Design for farmland irrigation and drainage water treatment . *China Water & Wastewater* , 2003 , 19 (11) : 75 — 77.

[18] Lu S Y , Zhang P Y , Yu G , *et al.* Design and operation of lakeside wetland for treatment of irrigation and drainage. *Journal of Agro-Environmnet Science* , 2004 , 23 (5) , 998 — 1002.

[19] Braskerud B C. Design considerations for increased sedimentation in small wetlands treating agricultural runoff. *Water Science & Technology* , 2002 , 45 (9) , 77 — 85.

[20] Behrends L , Houke L , Bailey E , *et al.* Reciprocating constructed wetlands for treating industrial , municipal and agricultural wastewater. *Water Science & Technology* , 2001 , 44 (11-12) , 399 — 405.

[21] Sun G , Gray K R , Biddlestone A J , *et al.* Treatment of Agricultural Wastewater in a Combined Tidal Flow-downflow Reed Bed System. *Water*

Science and Technology ,1999 ,40 (3) :139 — 145.

[22] Sun G ,Gray K R ,Biddlestone A J ,*et al.* Effect of effluent recirculation on the performance of a reed bed system treating agricultural wastewater. Process Biochemistry ,2003 ,39 (3) :351 — 357.

[23] Lu S Y ,Zhang P Y ,Yu G ,*et al.* Stabilization pond-plant bed composite system treatment of farmland irrigation and drainage water. China Environmental Science ,2004 ,24 (5) ,605 — 609.

[24] Li X D ,Zhou Q ,Zhang R S ,*et al.* A comparative study on nitrogen and phosphorus removal performance for three types of constructed wetlands. Earth Science Frontiers ,2005 ,12 (Suppl). 73 — 76.

[25] Fu R B ,Yang H Z ,Gu G W ,Zhang Z. Removal of nitrogen and phosphorus from agricultural irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetland. China Environmental Science ,2005 25 (6) :669 — 673.

[26] Pant H K ,Reddy K R. Potential internal loading of phosphorus in a wetland constructed in agricultural land. Water Research ,2003 37 :965 — 972.

[27] Weaver M A ,Zablotowicz R M ,Locke M A. 2004. Laboratory assessment of atrazine and fluometuron degradation in soils from a constructed wetland. Chemosphere ,57 (8) ,853 — 862.

[28] Moore M T ,Rodgers Jr. J H ,Cooper C M ,*et al.* Constructed wetlands for mitigation of atrazine-associated agricultural runoff. Environmental Pollution ,2000 ,110 (3) ,393 — 399.

[29] Sherrard R M ,Bearr J S ,Murray-Gulde C L ,*et al.* Feasibility of constructed wetlands for removing chlorothalonil and chlorpyrifos from aqueous mixtures. Environmental Pollution ,2004 ,127 (3) ,385 — 394.

[30] Ding J H ,Shu Q. Application of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Agro-environmental Protection ,2000 ,19 (5) 320.

[31] Liu W X. Study on the application of artificial wetland in agriculture non point source pollution. Research of Environmental Science ,1997 ,10 (4) ,14 — 18.

[32] Kern J ,Idler C. Treatment of domestic and agricultural wastewater by reed bed systems. Ecological Engineering ,1999 ,12 (1-2) :13 — 25.

[33] Martin R J ,Keller H C ,Clarke A R ,*et al.* Long-term performance summary for the boot wetland treatment system. Water Science and Technology ,2001 ,44 (11-12) :413 — 420.

[34] Larson A C ,Gentry L E ,David M B ,*et al.* The role of seepage in constructed wetlands receiving agricultural tile drainage. Ecological Engineering ,2000 ,15 :91 — 104.

[35] Lu S Y ,Zhang P Y ,Yu G ,*et al.* The contaminants release rule of *Zizania caduciflora* , *Phragmites australis* and *Eichhornia crassipes*. China Environmental Science ,2005 25 (5) 554 — 557.

[36] Lee M M S. Vegetation and algal community composition and development of three constructed wetlands receiving agricultural runoff and subsurface drainage. 2002 ,The Ohio State University.

参考文献：

[3] 高拯民 李宪法 王绍堂 等. 城市污水土地处理利用设计手册. 北京：中国标准出版社 ,1990. 458

[4] 卢少勇 金相灿 余刚. 人工湿地的氮去除机理 ,生态学报 ,2006 ,26 (8) :2670 ~ 2677.

[6] 沈耀良 杨铨大. 新型废水处理技术——人工湿地. 污染防治技术 ,1996 ,9 (1 2) :1 ~ 8.

[14] 许航 陈焕壮 熊启权 等. 水生植物塘脱氮除磷的效能及机理研究. 哈尔滨建筑大学学报 ,1999 ,32 (4) 69 ~ 73.

[17] 卢少勇 张彭义 余刚 等. 农田排灌水人工湿地工程的设计. 中国给水排水 ,2003 ,19 (11) :75 ~ 77.

[18] 卢少勇 张彭义 余刚 等. 农田排灌水湖滨带湿地处理系统的设计与运行. 农业环境科学学报 2004 ,23 (5) :998 ~ 1002.

[23] 卢少勇 张彭义 余刚 等. 农田排灌水的稳定塘-植物床复合系统处理. 中国环境科学 ,2004 24 (5) :605 ~ 609.

[24] 李旭东 周琪 张荣社 等. 三种人工湿地脱氮除磷效果比较研究. 地学前缘 (中国地质大学 北京 北京大学) ,2005 ,特刊.

[25] 付融冰 杨海真 顾国维 等. 潜流水平湿地对农业灌溉径流氮磷的去除. 中国环境科学 ,2005 25 (6) 669 ~ 673.

[30] 丁疆华 舒强. 人工湿地在处理污水中的应用. 农业环境保护 ,2000 ,19 (5) 320.

[31] 刘文祥. 人工湿地在农业面源污染控制中的应用研究. 环境科学研究 ,1997 ,10 (4) :14 ~ 18

[35] 卢少勇 张彭义 余刚 等. 茭草、芦苇与水葫芦的污染物释放规律. 中国环境科学 2005 25 (5) 554 ~ 557.

表 1 人工湿地处理系统对碳、氮、磷和悬浮物的去除效果

Table 1 Carbon , nitrogen , phosphorus and suspend solid removal rate in constructed wetlands treating agricultural runoff

Case		Q 流量 Inflow (m ³ /d)	占地 Land Occupation , (m ²)	CBA (km ²)	HRT (d) (HLR (cm/d))	COD	BOD ₅	总氮 TN	无机氮 IN	有机氮 ON	氨氮 NH ₃ -N	TDN	SS	TP	TDP
1 ^[2]	Inf (mg/L)	2					1100				329.5				
	η (%))				—	97.6	71.3				93.1				
2 ^[22]	Cin (mg/L)						400 ~ 1500								
	η (%))					53	74.3				23.1		39.6		34.7
3 ^[31]	Inf m/d							0.003 ~ 0.09	0.005 ~ 0.3						
	Inf (mg/ (m ² · d))							0 ~ 270	29 ~ 105	0 ~ 27					
	Eff (mg/ (m ² · d))							0 ~ 80	0 ~ 12	1 ~ 19					
	η (%))							30 ~ 91							
4 ^[13]	Inf (μg/L)													107	
	Eff (μg/L)	1.5												52	
		3.5												29	
		7												23	
5 ^[32]	Inf (mg/L)	1 ~ 5	1257	0.18											
	η (%))					6.4		35.5				41.2	49.9	24.4	9.8
6 *	Inf (mg/L)	242	2800	0.22	0.7 ~ 8.7 (2.7 ~ 40.3)	116		8.4			3.58			0.87	
	Eff (mg/L)					50.3		3.24			1.22			0.36	
	η (%))					56.5		61.4			66			59	
7 ^[24]	Inf (mg/L)	252	4200	0.23	0.7 ~ 10.5 (1.4 ~ 26.5)	80.7		7.14			2.8			0.6	
	Eff (mg/L)					46.6		3.49			1.2			0.28	
	η (%))					59.7		58.5			66.4			67.8	
8 ^[19]	Inf (mg/L)	674.5	12000	0.67	0.3 ~ 3.7 (2.7 ~ 36.7)	106		5.06			1.6			0.37	
	Eff (mg/L)					50.5		2.34			0.67			0.12	
	η (%))					52.4		53.8			58.4			68.8	

Inf : 进水 ; Eff : 出水 ; η : 去除率 ; HRT : 水力停留时间 (d) ; HLR : 水力负荷 (cm/d) ; TDN : 总溶解态氮 (mg/L) ; TDP : 总溶解态磷 (μg/L) ; CBA : 控制流域面积 (km²)

Inf means influent ; Eff : means effluent ; η : means removal rate ; HRT means hydraulic retention time , in days ; HLR means hydraulic load rate (cm/d) ; TDN means total dissolved nitrogen (mg/L) ; TDP means total dissolved phosphorus (mg/L) ; CBA means controlled basin area (km²)

* 卢少勇. 农田排灌水的人工湿地处理技术及工程示范研究. 北京 清华大学环境科学与工程系 2004

Lu S Y. Technological and Engineering Demonstration Research on Constructed Wetland for Agricultural Irrigation and Drainage Wastewater Treatment. Beijing : Tsinghua University. 2004

表 1 人工湿地处理系统对碳、氮、磷和悬浮物的去除效果

Table 1 Carbon , nitrogen , phosphorus and suspend solid removal rate in constructed wetlands treating agricultural runoff

Case		Q 流量 Inflow (m ³ /d)	占地 Land Occupation , (m ²)	CBA (km ²)	HRT (d) (HLR (cm/d))	COD	BOD ₅	总氮 TN	无机氮 IN	有机氮 ON	氨氮 NH ₃ -N	TDN	SS	TP	TDP
1 ^[2]	Inf (mg/L)	2					1100				329.5				
	η (%))				—	97.6	71.3				93.1				
2 ^[22]	Cin (mg/L)						400 ~ 1500								
	η (%))					53	74.3				23.1		39.6		34.7
3 ^[31]	Inf m/d							0.003 ~ 0.09	0.005 ~ 0.3						
	Inf (mg/ (m ² · d))							0 ~ 270	29 ~ 105	0 ~ 27					
	Eff (mg/ (m ² · d))							0 ~ 80	0 ~ 12	1 ~ 19					
	η (%))							30 ~ 91							
4 ^[13]	Inf (μg/L)													107	
	Eff (μg/L)	1.5												52	
		3.5												29	
		7												23	
5 ^[32]	Inf (mg/L)	1 ~ 5	1257	0.18											
	η (%))					6.4		35.5				41.2	49.9	24.4	9.8
6 *	Inf (mg/L)	242	2800	0.22	0.7 ~ 8.7 (2.7 ~ 40.3)	116		8.4			3.58			0.87	
	Eff (mg/L)					50.3		3.24			1.22			0.36	
	η (%))					56.5		61.4			66			59	
7 ^[24]	Inf (mg/L)	252	4200	0.23	0.7 ~ 10.5 (1.4 ~ 26.5)	80.7		7.14			2.8			0.6	
	Eff (mg/L)					46.6		3.49			1.2			0.28	
	η (%))					59.7		58.5			66.4			67.8	
8 ^[19]	Inf (mg/L)	674.5	12000	0.67	0.3 ~ 3.7 (2.7 ~ 36.7)	106		5.06			1.6			0.37	
	Eff (mg/L)					50.5		2.34			0.67			0.12	
	η (%))					52.4		53.8			58.4			68.8	

Inf : 进水 ; Eff : 出水 ; η : 去除率 ; HRT : 水力停留时间 (d) ; HLR : 水力负荷 (cm/d) ; TDN : 总溶解态氮 (mg/L) ; TDP : 总溶解态磷 (μg/L) ; CBA : 控制流域面积 (km²)

Inf means influent ; Eff : means effluent ; η : means removal rate ; HRT means hydraulic retention time , in days ; HLR means hydraulic load rate (cm/d) ; TDN means total dissolved nitrogen (mg/L) ; TDP means total dissolved phosphorus (mg/L) ; CBA means controlled basin area (km²)

* 卢少勇. 农田排灌水的人工湿地处理技术及工程示范研究. 北京 清华大学环境科学与工程系 2004

Lu S Y. Technological and Engineering Demonstration Research on Constructed Wetland for Agricultural Irrigation and Drainage Wastewater Treatment. Beijing : Tsinghua University. 2004