

寒冷地区应用人工湿地 处理污水研究进展^{*}

戴春雷 刘晓艳 张 雷 李英丽 初 磊

(大庆石油学院地球科学学院)

摘 要 低温影响人工湿地污水的处理效果,限制了人工湿地在寒冷地区的推广应用。文章综合分析了影响寒冷地区人工湿地污水处理效果的因素,提出:潜流式的人工湿地具有一定的保温特点,在潜流湿地土壤上面铺盖一定厚度的覆盖物可以提高保温效果,再选择科学合理的工艺流程——复合垂直流等可提高人工湿地的污水处理效率。有关实例也证明:通过合理的设计,人工湿地可以在寒冷地区成功越冬。

关键词 寒冷地区 人工湿地 污水处理 影响因素 越冬

0 引 言

随着我国经济发展速度的加快,各类废水排放量不断增加,2006 年全国废水排放总量 $536.8 \times 10^8 \text{ t}$,比上年增加 2.3%。废水中污染物大大超过环境容量,增加了环境压力。传统的污水处理只是二级生物处理,主要以去除有机污染物为目的,而对氮、磷等营养物质的去除效果不佳,三级处理虽可解决上述问题,但因投资大和运行费用昂贵而难以大范围推广。因此,人工湿地处理技术的提出和发展,为综合解决上述问题提供了一种新的选择。

湿地被应用于污水净化始于 20 世纪 50 年代,而用人工湿地进行污水净化的研究则始于 20 世纪 70 年代末。人工湿地对于节省资金、保护水环境以及进行有效的生态恢复具有十分重要的现实意义,也越来越受到世界各国的重视和关注。在美国有 600 多处人工湿地工程用于处理市政、工业和农业废水(其中 400 多处被用于处理煤矿废水,50 多处用于处理生物污泥,近 40 处用于处理暴雨径流,超过 30 处用于处理奶产品加工废水),在丹麦、德国、英国各国至少有 200 处人工湿地(主要为地下潜流湿地)系统在运行^[1],新西兰也有 80 多处人工湿地系统投入使用。我国虽有利用人工湿地的天然优势,但进行湿地处理系统研究较晚,在“七五”期间才开始起步,首例采用人工湿地处理污水的研究是 1987 年,由天津市环保研究所建成的占地 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的处理规模 $1400 \text{ m}^3/\text{d}$ 的芦苇湿

地工程。目前已被广泛应用于处理生活污水、工业废水、矿山及石油开采废水,以及深度处理后的垃圾渗滤液等方面的水污染问题。

虽然人工湿地在很多方面得到了广泛的应用,但人工湿地在处理效率上还受很多因素影响,其中,温度因素就限制了人工湿地在寒冷地区(特别是在冬季)的推广应用。本文就人工湿地在寒冷地区的应用研究进展作一阐述,为人工湿地在高纬度地区推广应用研究提供参考。

1 寒冷地区影响人工湿地污水处理效果的主要因素

1.1 人工湿地处理污水的机理研究

人工湿地是在天然湿地的组成、结构和功能理论研究基础上为了不同的目的而加以改进形成的湿地。人工湿地系统是充分利用湿地的功能通过物理、化学及生化反应三重协同作用净化污水。其中物理作用主要是过滤、沉积作用,污水进入湿地,经过基质层及密集的植物茎叶和根系,可以过滤、截留污水中的悬浮物,并沉积在基质中;化学反应主要指化学沉淀、离子交换和氧化还原反应等,这些化学反应的发生主要取决于所选择的基质类型;生化反应主要指微生物在好氧、兼氧及厌氧状态下,通过开环、断键分解成简单分子、小分子等作用,实现对污染物的降解和去除。

^{*} 基金资助项目:黑龙江省科技计划项目(GZ05A601)、省教育厅科技基金(10541005)

戴春雷,大庆石油学院硕士研究生,主要从事水污染防治研究。通讯地址:黑龙江省大庆石油学院地球科学学院,163318

1.2 影响处理效果的主要因素

1.2.1 温度

通过大量研究表明对污水处理起决定性作用的是生化作用,即如果人工湿地里的植物和微生物在湿地中的生长受到影响,将直接影响到人工湿地的处理效果,其中环境温度就是重要的影响因素,温度过低会使生物体内酶的活性降低,使生物的生存能力降低,有的种类甚至无法生存,使湿地里的生物量降低,造成人工湿地污水处理效率大大降低,这也是人工湿地不能在寒冷的高纬度地区大范围推广的主要原因。大量研究表明,水温低于 10℃时,人工湿地的处理效率会明显下降,且有学者^[2]认为,在 4℃以下时湿地中的硝化作用趋于停止。这也就说明在气温很低时即使湿地不结冰,污水的处理效果将受到严重影响;而维维国研究试验设计了五个潜流型的人工湿地,其中 1[#]栽种富贵竹、2[#]栽种美人蕉、3[#]和 4[#]栽种芦苇、5[#]为空白,其中 4[#]湿地采用垂直流式,其他均为推流式。结果表明:当气温在 4℃以下时硝化作用仍然存在(硝化率为 8%~22%),当气温在 4℃以上时,随温度的升高则硝化率迅速增加,如有植物根系存在时,冬季低温下植物根系附近微生物的代谢活动仍然存在,可提高硝化率^[3],而且富贵竹在 8℃以上时,硝化率可达 45%以上。

1.2.2 溶解氧

对于高纬度地区人工湿地,当气温降低水面结冰后,将隔断大气向水中复氧的过程,此时虽然水温低,植物无法正常生长,但在水中还会存在一定量植物的根系及微生物,这些微生物对水中污染物有一定降解作用,由于微生物的好氧呼吸作用消耗大量的水中溶解氧,空气复氧能力低于微生物耗氧量,使水中溶解氧量降低,这将影响微生物对污染物的降解能力,当溶解氧量进一步降低时,微生物将发生厌氧呼吸,此时反硝化作用占主要地位,但如果此时水中有机物负荷高将使水质发生一定的变化,水中溶解氧也是寒冷地区人工湿地冬季处理效果受影响的主要原因之一。

2 寒冷地区人工湿地抵抗低温环境设计

2.1 冬贮兼性塘

人工湿地的处理效果受温度影响,高纬度地区冬季气温低,人工湿地水表面冻结,挺水植物、浮水植物不能正常生长,人工湿地只能在植物根际微生物的

作用下处于低效率甚至无法运行状态,因此寒冷地区人工湿地在处理污水时只能被迫间歇使用,这样使人工湿地污水处理效果下降,排出污水水质低于设计要求,为了保证出水水质,寒冷地区的污水进入人工湿地前先进行预处理,在污水和湿地入口之间建冬贮兼性塘。冬贮兼性塘具有双重功能,一方面可以作为污水处理单元,具有天然生物塘的主要特征,并辅以规范、标准的工程措施。污水在塘内利用藻类供氧和自然复氧等净化过程,大大降低污水处理的运行费用,加上构筑物简单(可利用原有养鱼塘)、投资省、运行管理方便;另一方面作为冬贮塘,解决了污水处理厂连续运行和人工芦苇湿地间歇运行之间的矛盾。但这种方法需要占用大量的土地,在推广中有一定的局限性。

2.2 人工湿地保温设计

人工湿地冬季运行的主要影响因素是温度,温度过低会影响到人工湿地的有效容积,给人工湿地带来一定的负荷冲击;同时会影响到人工湿地对污染物的降解起主要作用的生物的活性。为了提高人工湿地的温度,可以设计隔离层,以保障冬季人工湿地的正常运行。

2.2.1 空气隔层

北方人工湿地的保温措施一般采用冰、雪以及空气层等覆盖的方式,初冬时加大水深,水位上升至冰面后形成一冰层,然后使水位下降,在水位与冰层之间形成绝缘空气层,污水在下面流动,如果冰层上覆盖一层雪可进一步提高保温效果^[4]。

2.2.2 人工湿地类型的选择

温度和溶解氧是寒冷地区人工湿地污水处理效果的主要影响因素,因此在设计寒冷地区人工湿地时要考虑水温和溶解氧。人工湿地的类型主要有表面流、潜流两种,潜流又分为平行流和垂直流。各种类型的湿地都有各自的优缺点,就寒冷地区应用来说,潜流型湿地具有一定的优势,潜流型湿地与大气之间有覆盖层隔断,在冬季对床体中的污水起到一定的保温作用^[5],在寒冷地区人工湿地的应用研究中大多数都采用潜流型。如张一丁等利用潜流型人工湿地解决哈尔滨信义沟的污染;我国东北地区第一座采用人工湿地技术进行污水生态处理的示范工程——满堂河生态污水处理示范厂也是采用潜流人工湿地^[6]。据张显龙^[5]所报道的沈阳污水处理厂,其主要工艺也是潜

流型的,总污水量为 $1500\text{m}^3/\text{d}$,设计规模 $2000\text{m}^3/\text{d}$,运行结果为:冬季(11月~次年3月) COD_{Cr} 去除率为 70.5%, BOD_5 去除率为 81.9%,SS去除率为 85.8%;夏季(4月~7月) COD_{Cr} 去除率为 72.8%, BOD_5 去除率为 81.3%,SS去除率为 86.2%。虽然人工湿地冬季的处理效果某些指标较夏季稍差,但均在 70%以上,其中 BOD_5 冬季夏季的处理效果相当,说明这种类型的湿地可以保障冬季的正常运行及达到较好的处理效果。

2.2.3 设计覆盖层

虽然潜流型的人工湿地可以保持一定的温度,但却并不理想,在潜流型人工湿地的基础上,布置一些覆盖物,可以防止流水的热损失,同时可以更有效解决系统冰冻问题。

覆盖物在整个湿地保温中起到隔离作用,有效的隔离可以提高湿地的污水处理效率。树叶常被认为是一次性隔离物,然而树叶分布经常是不均匀的,同时易使热量散失。即使在隔离层有很小的裂口,也会使流动水中的热量损失很大,在早期的参考资料中曾提到还有的使用树皮、树杆、木屑等。张显龙等人^[5]曾将夏季种植在湿地填料床上用于绿化和美化环境的芦苇、美人蕉、灯心草等植物收割,平铺在填料床上,其上再铺一层塑料薄膜。经这样处理之后,填料床内被处理的污水温度可以保持在 $15^\circ\text{C}\sim 18^\circ\text{C}$,表现出很好的隔离效果。较差的覆盖物会对植物的成长有不利的影响,如用碳含量比较高的木屑作覆盖物,会在植物的生长期引起氮缺乏;被木屑碎片(并非地面)紧紧包裹的覆盖层,会使植物根茎的渗透非常困难。当此类覆盖物分解时,还会降低系统的处理性能。S·华莱士、G·帕金、C·考思等认为隔离层材料的选择原则^[7]应为:

- ◆ 二次有机填料能完全分解而不会影响系统的正常运行;
- ◆ 有营养平衡成份, pH 值为中性;
- ◆ 结构蓬松有高纤维含量,隔热效果好,不会堵塞滤床;
- ◆ 易使种子在覆盖物上发芽生长(如果将植物的种植作为目的之一);
- ◆ 有比较好的湿气涵养能力,这样树苗就不会受到干旱的影响。

评价覆盖物^[7]所用填料优劣的一种方法是:二次有机填料是否增加了背景环境的 BOD_5 值、出水浓度及

其总碳量 C^* 值(表 1 为不同覆盖物的 C^* 值参数)。当覆盖物分解时, C^* 会随着二次有机填料的减少而有所减少。华莱士^[7]在明尼苏达州六个被覆盖物隔离的潜流式人工湿地系统中的实验研究表明,好的系统中覆盖物的 C^* 值低,第一年 BOD_5 的去除率可达 75%,第二年一般会大于 90%^[7]。覆盖物不好的系统中,两年后去除效率不大于 30%。

表 1 各种不同覆盖物的 C^* 值参数 mg/L

材料	C^* (1 年)	C^* (2 年)
木屑	40	20
白杨树皮	60	20
沙子下面的木屑	120	80
芦苇一莎草泥块	5	3
高质量复合肥	5	5

好的覆盖层设计,其表面条件更适于树苗的生长和种子发芽,在植物第一个成长期,可以提高水位对覆盖物进行灌溉,这对植物的生长来说是非常重要的。在夏季潜流人工湿地表面可以选栽去污效果较好的植物,潜流水体可以通过植物复氧,提高污水处理效果。

2.3 提高人工湿地溶解氧

潜流型湿地的床体覆盖层将直接影响大气向水体的复氧,因此潜流型湿地水体中的溶解氧是一个重要考虑因素。大量研究表明,平行流的传氧能力有限,而垂直流的进水方式,将污水由表面纵向流至床底,床体处于不饱和状态,大气中氧由进水带至床体中,较平行流系统具有较高的好氧处理能力^[6]。对于潜流型人工湿地,采用间歇式有利于人工湿地的复氧,如周健等进行的序批式人工湿地的研究。但由于这种类型湿地间歇式运行,当污水量较大时就需要一定的设计规模,因此使其应用受到一定的限制,这种湿地设计较适用于中小城市的污水处理。维维国的实验结果也证明芦苇垂直流湿地的 TN 去除率大于芦苇推流湿地,说明采用垂直流态运行方式,可改善湿地充氧条件,满足微生物对氧的需求,增强了其对含氮有机物的氧化能力。根据污染物的去除机理,在滤床内有较大空气运动的湿地, N 的去除率会比较高。有人通过强制向床体内通风来获得能量和足够的氧气, Green 研究了湿地系统中氧气的分布随时间和空间的变化,并通过给人工湿地增设输气通道,利用慢灌快排的方法使系统进气,以增加内部溶解氧的含量来提高系统

消化能力,在进水平面与基质表面间保持一定的距离可以增强大气的氧传递能力^[7]。通过对人工增氧和无人工增氧对比,采取人工增氧措施的湿地,对SS、COD、TN的去除均有明显的提高。

2.4 工艺流程设计

为了实现人工湿地较好的处理效果,需要科学合理的工艺流程,已有一些较好的设计方案供参考。海热提等报道的吉林省四平市郊区的两级人工湿地,有效解决了单一潜流人工湿地中难以实现含氮化合物有效去除的问题,利用二级湿地进水端丰富的含水量很好地解决了硝化细菌的氧气问题,一级湿地和二级湿地对 NH_4^+-N 的平均去除效率分别为39.55%和76.12%,TP、COD和 BOD_5 两级总的去除效率分别为93.50%、92.23%和96.16%。在“九五”期间由中科院水生生物研究所与德国科隆大学、奥地利维也纳农业大学等共同承担的欧盟国际合作项目中首先提出的复合垂直流人工湿地处理系统,该类型构建湿地由下行流和上行流两池组成,两池中间设有隔墙,底部连通,污水首先经过配水管向下流行,穿越填料,在底部的连通层汇集后,穿过隔墙,中间通过跌水相连,增加上行池中的溶解氧,进入上行池,在上行池中,污水由下向上经过填料,这种工艺流程在处理生活污水方面经过一系列的小试、中试,在深圳、上海等地得到了大规模的应用,其对COD、 BOD_5 的去除率分别达到82.6%和85.8%^[8]。

人工湿地在寒冷地区应用,大多数研究都把重点放在保温措施的设计上,而如果将人工湿地在寒冷地区应用的工艺流程在设计上加以改进,把保温措施与高效的工艺流程有效结合起来,那么在保证人工湿地在寒冷地区成功越冬的同时,还可以提高人工湿地的污水处理效果。复合垂直流人工湿地可以通过有效解决水体复氧的问题,对污水处理效果较好,在实际应用中也得到了验证,但在寒冷地区的应用还未见报道,因此,可以在寒冷地区选择复合垂直流型作为人工湿地的主要工艺,春、夏、秋季节在人工湿地土层表面栽种一些植物,如美人蕉和菖蒲,一则利用美人蕉和菖蒲的生长,增强植物根系微生物的活性,提高对污水的降解速率,二则菖蒲的根茎叶有良好的通气能力,有利于提高潜流型人工湿地污水的复氧率;冬季,选择芦苇、莎草或木屑作为覆盖物,保障湿地的温度。这种结合的工艺设计有利于人工湿地在寒冷地区越冬,同时还可以保障湿地较高的处理效率。

3 结 论

制约人工湿地在寒冷地区应用的主要因素是水温。因此,保温是人工湿地设计主要的考虑因素,潜流式人工湿地具有一定保温功能,在潜流型人工湿地土层上添加空气隔离层或覆盖层,可以提高湿地的保温效果。在覆盖层材料的选择上,材料首先要具有较好的隔温效果,其次不会对湿地水体造成二次污染,同时所选择的材料应有利于湿地栽种植物的生长。两级人工湿地或复合垂直流人工湿地流程设计具有较高的污水处理效果。在寒冷地区采用保温措施与高效的工艺流程——复合垂直流人工湿地相结合的方式,在工艺设计过程中通过通风或人工复氧的方法提高污水复氧速率,不但可以保障人工湿地在寒冷地区成功越冬,而且还具有较高的污水处理效率。

参 考 文 献

- [1] 白晓慧,王宝贞,余敏.人工湿地污水处理技术及其发展应用[J].哈尔滨建筑大学学报,1999,32(6):88~92
- [2] Cookson W R, Comforth I S, Rowarth J S. Winter soil temperature (2 ~ 15°C) effects on nitrogen transformations in clover green manure amended or unamended soils a laboratory and field study[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34: 1401~1415
- [3] 锥维国,王世和,黄娟等.潜流型人工湿地低温域脱氮效果研究[J].中国给水排水,2005,21(8):37~40
- [4] 张一丁,王本德,刘伟等.利用人工湿地法解决哈尔滨信义沟水污染问题[J].长春工程学院学报(自然科学版),2005,6(1):20~21,25
- [5] 张显龙,周力.人工湿地处理城市污水在北方的应用[J].环境工程,2005,23(4):23~24
- [6] 李亚峰,刘佳,王晓东等.垂直流人工湿地在寒冷地区的应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006,22(2):281~284
- [7] 张林,张海良翻译.S·华莱士,G·帕金,C·考思.寒冷地区污水处理的人工湿地设计与运行.中国环保产业[J].2003,6:40~42
- [8] 吴振斌,詹德昊,张晟等.复合垂直流构建湿地的设计方法及净化效果[J].武汉大学学报(工学版),2003,36(1):12~16

(收稿日期 2008-07-08)

(编辑 王 薇)