

聂泽宇,王阿华,陈开宁,等. 茭白秸秆处置现状及其固态脱氮碳源材料制备循环利用思考[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):5-10.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.002

茭白秸秆处置现状及其固态脱氮碳源材料制备循环利用思考

聂泽宇^{1,2,3}, 王阿华^{1,3}, 陈开宁², 孔 宇³

[1. 北控水务(中国)投资有限公司,北京 100102; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏南京 210008;

3. 南京市市政设计研究院有限责任公司,江苏南京 210008]

摘要:随着以长三角地区为代表的城乡经济一体化建设进程的加速,大量的农业废弃茭白秸秆亟待处理,同时污水氮素(硝酸盐态氮)污染物的减排压力亦日益增大,以资源循环利用为纽带,同时解决城乡水体污染及农村地区典型环境问题的命题逐步受到人们的重视。当前,国内已开发多种针对茭白秸秆的环保型资源化利用处置模式,但仍难彻底满足茭白秸秆减量化的处置需求。在国内外已有研究基础上,思考探索将茭白秸秆农业废弃生物质制作成反硝化固态碳源以降低废水硝酸盐排放量的可能性,并提出了相应的研究设想,研究成果有望践行“以废治废”的城乡环境整治循环经济发展新理念,并促进城乡水生态环境的日益改善和经济可持续发展。

关键词:茭白秸秆;固态碳源材料;脱氮;以废治废;循环利用

中图分类号: X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)12-0005-06

当前,城乡河湖的水体氮素污染问题突出,除氨氮外,硝酸盐态氮的污染问题亦不容忽视,例如

水体富营养化所导致的藻类滋生,以及地表饮用水源和城市地下水的污染问题均与硝酸盐态氮密不可分。城乡水体氮素的来源,不仅包括城市污水处理厂的尾水排放和降水输入,还包括农村地区及城乡结合部的农业排水汇入。以城市污水处理厂尾水排放为例,污水中氮素受厂内高度硝化作用后主要以硝酸盐态氮的形式排放,虽已达一级排放标准,但总氮浓度却远超地表Ⅴ类水标准。例如,巢

收稿日期:2019-06-17

基金项目:北京市博士后工作经费资助项目(编号:2017-ZZ-104);南京市市政设计研究院有限责任公司技术创新研发项目(编号:NJSZY-KJLX-201807)。

作者简介:聂泽宇(1985—),男,湖南娄底人,博士,工程师,主要从事城乡水环境综合整治技术研究。E-mail:niezeyu@zju.edu.cn。

and possibility in chemical K fertilizer substitution[J]. Journal of Basic Microbiology,2016,56(1):67-77.

[29] Osifiska - Jaroszuk M, Jarosz - Wilkołazka A, Jaroszuk - Ściśel J, et al. Extracellular polysaccharides from *Ascomycota* and *Basidiomycota*: production conditions, biochemical characteristics, and biological properties[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2015,31(12):1823-1844.

[30] Triveni Y S, Jhansi R P. Biofilm formation of zinc solubilizing, potassium releasing bacteria on the surface of fungi[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2017,6(4):2037-2047.

[31] Rawat J, Sanwal P, Saxena J. Potassium and its role in sustainable agriculture [M]//Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. New Delhi:Springer,2016:235-253.

[32] 杨冬艳,高晶霞,桑 婷,等. 溶磷菌和解钾菌对拱棚连作辣椒生长及土壤养分含量的影响[J]. 北方园艺,2019(6):1-6.

[33] 陈 易,程永毅,郭 涛,等. 一株具紫色土亲和性解钾菌的筛

选及促生效应[J]. 西南大学学报(自然科学版),2016,38(5):58-65.

[34] Bakhshandeh E, Pirdashti H, Lendeh K S. Phosphate and potassium - solubilizing bacteria effect on the growth of rice[J]. Ecological Engineering,2017,103:164-169.

[35] Zhang C S, Kong F Y. Isolation and identification of potassium - solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants[J]. Applied Soil Ecology,2014,82:18-25.

[36] Jha Y, Subramanian R B. Regulation of plant physiology and antioxidant enzymes for alleviating salinity stress by potassium - mobilizing bacteria[M]//Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. New Delhi:Springer,2016:149-162.

[37] 叶维雅,吴海波,刘惠民,等. 2株番木瓜根际促生菌的解磷解钾作用[J]. 江苏农业科学,2017,45(6):247-251.

[38] 尚海丽,毕银丽,彭苏萍,等. 解钾细菌 C6X 对不同富钾矿物含量土壤钾素迁移的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(18):95-101.

湖流域某污水处理厂出水总氮(20.6 mg/L)中 80.6%(16.6 mg/L)的氮是硝酸盐态氮^[1]。而在广大的农村地区,除了农田耕作排放的大量氮素污染物外(硝酸盐态氮为特征污染物)^[2-5],农业废弃生物质的产生量巨大,产生源分布范围极广,其弃置与焚烧所导致的系列环境问题亦较为突出。以茭白为例,经济植物茭白本是净化低污染水体的较好湿地植物^[6],但在长三角地区管理措施未到位的区域,茭白成熟的季节也是当地河流污染、河道拥堵淤塞最严重的时候,造成这种状况的最大祸首,正是丰收后村民大量丢弃的茭白秸秆^[7],受茭白茎叶污染的河流往往存在色泽发黑发臭的现象,大量废弃茭白叶堆积于河道中会造成严重的有机物污染,导致河水发黑和水体富营养化,而采取焚烧的方式则会污染大气环境^[8-10]。多种农业废弃生物质的焚烧和水浸泡试验结果表明,茭白秸秆腐烂后导致的浸泡液中氮含量、磷含量、有机物含量、色度和微生物学指标的增量,均大大超出同等质量的玉米芯、山核桃蒲、稻草和桑枝条,这些材料在闷烧和明火条件下均可产生大量的细颗粒物、氮氧化物和二氧化硫,其中茭白秸秆的二氧化硫排放能力最强^[11]。通常长达 2 m 左右的茭白其食用部分仅长 15~20 cm,其他均被丢弃,常有“一斤茭白一斤废叶”的说法。因此,伴随着大量优质茭白农产品的供给,数以万吨的农业废弃生物质茭白茎叶亟待处理,如何对茭白秸秆进行环保型资源化处置利用,这是以长三角地区为代表的各茭白主产区人们亟须解决的问题。

随着以长三角地区为代表的国内城乡经济建设一体化进程的加速,以资源循环利用为纽带的同时,解决城市水体污染及农村地区环境保护问题的命题受到人们的重视。本研究拟借鉴“以废治废”的循环经济环保发展理念,思考将农业废弃生物质(农作物秸秆等)的消纳与城乡污水中硝酸盐态氮的削减进行有机统一,思考探索建立农业废弃生物质—废水脱氮的循环利用发展新模式,将农业废弃生物质(如茭白秸秆)制作成反硝化固态碳源以去除废水中的硝酸盐,从而降低城乡废水氮素排放总量并实现农业废弃生物质的消纳,实现城乡环境整治循环经济发展新模式,促进城乡水生态环境日益改善和经济可持续发展。

1 长三角地区茭白秸秆处置现状

江南名菜茭白(*Zizania latifolia* Turcz.)属多年

生宿根性沼泽草本植物,原产我国,是重要的水生蔬菜之一,栽种历史悠久,主要分布于我国长江中下游流域一些水资源较为丰富的地区,如江苏苏州(如吴江茭)、无锡(如广益茭、刘潭茭)等地,江苏里下河地区的扬州和南通等地,浙江宁波余姚市(全市总面积约 2 666.67 hm²,其中河姆渡镇被命名为“中国茭白之乡”,种植面积达 2 133.33 hm²,年产茭白超 5 万 t,产值达 1.33 亿元)^[8,10],上海青浦区(上海久负盛名的茭白生产基地,年种植面积超过 2 000 hm²,总产量高达 7 万 t/年)等地区,可以说茭白生产已成为以长三角地区为代表的效益农业中水生蔬菜种植的亮点。

废弃茭白叶资源的合理利用,不仅可变废为宝,节约生产成本,推进当地特色优势农业的产业发展,增加农民收入,还可以有效控制农业面源污染,解决秸秆的焚烧问题。茭白秸秆的环保型资源化应用途径,主要包括制取燃料、制作食用菌栽培基质、生产秸秆有机肥、编制工艺品、制作动物饲料。

1.1 制取燃料

废弃茭白秸秆可充当燃料^[9-10]。在茭白丰收的季节,使用土灶的农户常将晒干的茭白叶作为燃料。余姚市某公司利用茭白草,在常温环境下通过挤压成型的方式,制作成便于运输储藏的生物颗粒燃料,畅销日本,作为火力发电或日常生活燃料,起到有效利用当地废弃茭白叶的效果^[8]。该方法可以充分利用资源,节约能源,但排放的二氧化碳易导致“温室效应”,此外废弃茭白秸秆还可用于制取沼气^[12]。

1.2 制作食用菌栽培基质

禾本科植物鞘叶中的纤维素和营养物质较为丰富,使得茭白叶可作为草腐菌(如大球盖菇等)栽培的合适原料^[9-10,12-15]。浙江省丽水市景宁县某公司利用茭白叶茎栽培黑木耳获得成功,构建了茭白叶茎—食用菌—土壤的生态循环链综合利用模式^[16]。黑木耳属于木腐菌,可利用木材中的纤维素类物质、含氮蛋白质、无机盐和维生素等正常生长,茭白叶经过试验验证可作为黑木耳和平菇等菌菇类的栽培基质,若按茭白秸秆产生量 135 t/hm² 计量,黑木耳的生产量可达 2.25 万袋/hm²,每 1 hm² 茭白田秸秆可节省 30 m³ 的木材使用量,加之菌渣和菌糠作为有机肥的农田回用还可创造潜在的巨大生态循环效益^[16]。

1.3 生产秸秆有机肥

茭白叶秸秆堆腐还田可作为补充农田土壤各

类养分的最直接和简洁的方式^[9,12,15],堆肥过程可掺混动物粪便^[7],并添加菌剂以促进堆肥的成熟进程及产品品质^[17]。浙江省杭州市余杭区农业局将堆肥还田、营养基质和果(菜)园覆盖利用推荐为当地茭白秸秆的 3 种主要肥料化利用方式,以期改善土壤肥力和土壤结构^[14]。浙江省丽水市景宁县农业局引进的秸秆堆腐还田技术^[18],通过将预先浸泡的秸秆(含水量保持在 50%~60%)整齐堆垛,高度为 1.0~1.5 m,宽度 ≥ 2 m,长度不限,每层铺 15~20 cm 厚的秸秆,逐层均匀洒施菌剂和人粪尿,秸秆中添加秸秆腐熟剂 2 kg/t,人畜粪 10%~20% (可以用 5 kg 尿素或 15 kg 碳铵代替),在堆腐过程中每隔 5~7 d 翻垛 1 次,通过增氧从而加快秸秆腐解,其堆腐温度在全年可达 50~60℃,从而保证有效杀灭各种病害的作用^[18]。同时,食用菌栽培基质使用后仍可加工成有机肥料,选择无腐烂,无霉菌污染的菌棒,堆制 3 个月左右,经自然发酵,杀死菌棒中残留的害虫和霉菌,即可制成有机肥料,制成用于花木、蔬菜瓜果的基肥,从而变废为宝。上海地区研究者利用枯草芽孢杆菌作为腐熟剂制得的茭白叶发酵肥,被证实对土壤肥力的提升及番茄品质的改善均具有积极意义^[19]。

1.4 编制工艺品

目前,废弃茭白叶可编织成各式各样的精美工艺品^[15],包括各类新年吉祥物、草席、窗帘、平安符或者一些有象征意义的祭祀用品等,通常一件小工艺品可消耗 10 株左右茭白叶,工艺品生产率为 45 000~60 000 个/hm²,农户可通过挑选、修建后将茭白叶编成一定的形状,再经过专业公司进行烘干、装配(辅以配件如花、凤凰等)和包装后即可入市^[20]。如以此为支柱产业的上海市青浦区和浙江省丽水市缙云县某企业,全年可收集茭白秸秆高于 5 万 t,工艺品编织产值达 4 100 多万元,增加农民收入 1 900 多万元,大大增加就业机会,获得充实人们精神生活的综合效益。

1.5 制作动物饲料

杭州市余杭区农业局认为,茭白秸秆由于其丰富的蛋白质含量使其可作为动物青贮饲料制作的优秀材料,经过乳酸菌发酵的青贮饲料,可作为饲养食草动物的优质食材^[14]。浙江省余姚市探索将碾碎的茭白尾草和其余饲料混合加工成獭兔饲料^[8],可替代原有苜蓿草原料,降低饲养成本,喂养试验结果表明,獭兔长势良好,茭白秸秆消纳量大,

獭兔饲养成本可节省 0.8~1.0 元/只,增收 1 000 余万元,平均增收 4 500 元/hm² 左右,目前已有茭白草饲料加工厂建成,这一举措可促成当地茭白基地、獭兔基地之间资源的循环利用,形成了“茭白叶-獭兔饲养-兔粪-沼气(沼渣)-肥田-有机绿色茭白生产-茭白叶”多层次循环利用模式。茭白叶还可经过压缩糖化制作青贮以提高秸秆适口性^[9,12,15],从而用作鱼类、奶牛和湖羊^[21]等的优质饲料。

目前,茭白秸秆的二次利用仍存在研究和应用上的难题^[10]。如利用废茭白叶堆制肥料、沼气和制作工艺品的效果仍不显著,这是由于茎叶本身主要由纤维素构成,出气量不足,并非沼气制取的最佳原料,而直接还田用作肥料时则存在有机物含量不高,肥力不够,对土壤肥力造成不利影响等缺点,如土壤酸化、茭白连作田易导致茭白病害等^[15],用于生产食用菌时则存在产品质量不稳定、种类单一的问题,用于颗粒燃料生产时存在成本较高等问题,用于编制工艺品时还存在韧性不足的限制等^[10]。村民对于废茭白叶的资源化应用则是知之甚少,然而茭白秸秆数量巨大,而且运输不便,处理费用较高,纯靠政府采取管制措施较难奏效,目前主要依靠村民的自觉才使茭白叶污染问题有所缓解。因此,还须继续探索废弃茭白生物质的多样化环保型资源化处置模式和出路。

2 茭白秸秆制作固态反硝化脱氮碳源材料的循环利用设想

2.1 同类废弃生物质脱氮研究进展

在反硝化脱氮工艺中,生物反应器中的脱氮菌群赖以生存的碳源不足时,须要添加碳源才能促进生物反应器脱氮过程的启动与维持,但通过投加甲醇等常规碳源的使用成本往往较高,因此脱氮微生物所需碳源可尝试用农业生物质废弃物替代。目前,秸秆、椰子壳、花梗、木屑和树叶等农业废弃物作为反硝化脱氮的生物质碳源材料已受到学术界的广泛认可^[22-27],通常这类材料在得到有效降解的同时,可获得较高的废水硝酸盐去除率(约 90%)和氮素反硝化去除速率^[25],其中以木屑为填充基质的反硝化脱氮生物反应器相关研究最为成熟^[28-29],目前已深入到工艺参数及反应器结构等(如温度、水流流态、水力停留时间、堵塞问题)对脱氮效率的影响^[26,28,30-33],反应器中微生物脱氮菌群的脱氮机

制^[29]以及脱氮除磷效率的改进(如除磷材料添加和电化学手段的耦合)^[2,5,34]等方面的研究,并在多个国家已有较多的工程实践案例^[3],其中美国爱荷华州将木屑生物反应器作为该州养分流失削减的最佳管理策略之一,反应器的占地面积仅占农田服务面积的 0.07%^[2],美国爱荷华州立大学的研究者在木屑生物脱氮反应器的研究与工程实践方面做出了突出贡献^[35]。

就城市污水处理厂尾水中的硝酸盐而言,研究发现麦秆适合作为污水处理厂尾水硝酸盐去除的固态反硝化碳源材料^[1,36]。以竹丝固态碳源构建的反应器释碳能力强,对污水处理厂尾水中的硝酸盐去除率高,当进水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 10 mg/L 时其去除率可达 91.41%,电镜扫描结果表明,竹丝与填充前相比其表面的纤维素得到了较好的降解^[37]。另有学者将碱处理秸秆固体碳源添加进潮汐流和潜流人工湿地后,湿地对污水处理厂模拟尾水的总氮去除率分别提高 40%、32%,前者硝态氮的去除符合一级动力学模型,反硝化速率常数是未添加固态碳源组的 2.12 倍^[38]。在其他类型废水硝酸盐态氮的去除方面,由木屑填充的反硝化脱氮生物反应器,在 5℃ 以上的温度环境下,被发现在近 2 年的连续运行过程中,成功地将采矿废水中的硝态氮通过反硝化作用从平均浓度 22 mg/L 削减至低于检测限 (0.06 mg/L)^[29]。就农业硝酸盐态氮污染废水而言,研究者利用树皮、木屑和树叶等废弃生物质有机碳源材料和粗砂等多孔介质材料,构建了脱氮生物反应器,试验周期为 1 年,处理水量为 10 L/d,可将硝酸盐浓度从 3~6 mg/L 稳定地削减至 0.02 mg/L^[39-40]。利用反硝化碳源材料(木屑等)开展的长达 1 年的田间脱氮试验结果表明,出水平均硝酸盐浓度可从 4.8 mg/L 降低至 1.04 mg/L,是同类地区表流湿地去除能力的 40 倍^[41]。木屑反硝化脱氮生物反应器对农田废水中硝酸盐的高去除效率已得到多次试验和实践验证^[2-5],而且还被发现对大肠杆菌和沙门氏菌等微生物病菌以及抗生素等具有较好的去除效果^[28,42]。此外,基于相似的脱氮原理,新西兰某长达 14 年的运行案例表明,利用土壤和锯木屑填充的反硝化脱氮墙,对浅层地下水中硝酸盐态氮的去除效率长期稳定在 92%,且使用寿命达 66 年以上^[43],相似的研究案例经过理论推算发现,在取得较好的硝酸盐去除效果的基础上,木屑生物反应器的使用寿命可达 39 年^[44]。

作为反硝化固态碳源材料,碳源材质的差异也对脱氮效果及在其他方面存在差异。学者比较了麦秆、园林绿化修剪废弃物、锯末灰、玉米芯和木屑在反硝化脱氮反应器中的表现差异,试验结果表明,上述材料的硝酸盐去除效率介于 1.3 ~ 6.2 g/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)之间,出水硝酸盐态氮含量可低至 1 mg/L,反硝化脱氮作用主要受碳源和温度的影响,玉米芯具有最好的脱氮效果,但存在出水总有机碳含量升高等问题,木屑的脱氮效果不及玉米芯的一半,但不存在总有机碳含量升高等问题,因此可将木屑和玉米芯等材料混合使用,从而获得扬长避短的功效^[44-45]。茭白秸秆是一种典型的农业废弃有机质材料,量大面广,其碳氮元素质量分数经测定分别为 18.09%、0.339%^[46],有机质含量高达 65.5%,全氮和全磷含量分别为 3.7%、0.5%^[7],具有碳源释放的潜力,因此利用茭白秸秆作为反硝化碳源的脱氮技术可能是可行且较为经济的办法,不失为硝酸盐态氮污染废水的较好净化思路^[47-48],但国内利用茭白废弃秸秆作为反硝化碳源以脱除硝酸盐的技术开发与应用研究仍鲜见报道。

2.2 茭白秸秆废弃生物质脱氮研究设想

基于上述讨论,建议开发茭白秸秆农业废弃生物质反硝化碳源材料,并辅以微生物复合菌剂(兼具反硝化和纤维素高效降解功能)构建反硝化碳源生物反应器,探明茭白废弃物这一农业废弃生物质碳源对硝酸盐污染废水的反硝化去除效果、强化机制以及碳源材料使用的关键条件,研究该类反硝化固态碳源材料在去除不同类型废水中硝酸盐的适用性,并进行实验室及中试规模的应用验证,为避免茭白秸秆可能存在的腐解速率过快导致出水有机物含量增大等问题,可尝试将茭白秸秆与木屑竹屑等缓慢腐解废弃生物质联用。通过理论、方法和研究体系上的创新和突破,以期建立茭白废弃秸秆作为碳源的环保型资源化利用新模式,为规模化茭白农业生产废弃生物质材料的综合利用和工厂化应用提供技术支撑。主要的研究设想包括以下几个方面。

2.2.1 茭白秸秆生物质碳源分析、相关微生物复合菌剂和改良工艺研发

开展茭白秸秆的营养成分分析,获取剥除茭白后的茭白秸秆的营养价值,主要指标包括干物质含量、粗蛋白含量、粗脂肪含量、粗纤维含量、无氮浸出物含量、粗灰分含量、中性洗涤纤维含量、酸性洗涤纤维含量、氨基酸组成及钙、

磷等微量元素含量。茭白秸秆生物质碳源富含纤维素,可被微生物分解成可利用态碳源如有机酸和醇类等,为反硝化微生物提供碳源。针对茭白秸秆开展纤维素降解菌的筛选、制备及应用研究,同步开展反硝化功能菌的筛选和培育,得到兼具纤维素分解及反硝化脱氮的微生物功能复合菌群并进行鉴定,考察复合菌群的应用对茭白秸秆碳源释放过程的影响。针对茭白秸秆可能存在的碳源释放快、使用寿命偏短,而木屑和竹屑等其他材料存在的碳源释放速率慢但使用寿命长的特点,扬长避短地将上述固态碳源材料结合起来使用,或者结合茭白人造板材^[12]的理念制备缓慢释碳的优质反硝化碳源材料并验证其各项性能。

2.2.2 茭白秸秆固态反硝化碳源的应用技术研究

明确用于有机碳源添加的茭白废弃生物质材料在制作过程中的各种条件,包括预处理、纤维素降解菌和反硝化菌群的接种方法等。通过在厌缺氧条件下实现受硝酸盐污染废水中的氮素反硝化过程,研究反应器的最佳运行条件(pH 值、温度、水力停留时间、溶解氧含量等),开展强化脱氮过程所需的最优流速、流量等各种工艺参数的筛选研究,并在优化各项关键参数的基础上,研究生物质碳源添加后对硝酸盐脱氮生物反应器的快速启动及长效运行维护效果的影响,同时对各类生物质碳源(如茭白秸秆、水稻秸秆、竹屑、木屑等,以及上述材料的组合)的反硝化性能、使用寿命和温室气体(N_2O 、 CH_4 、 CO_2)排放情况进行对比评估。最后,提出相应的技术应用方案,并取得实验室水平、中试规模 and 实际工程应用上的逐级进阶应用成果。

在上述思考过程提出了将茭白秸秆制作成农业生物质固态反硝化碳源材料,以提高生物反应器中的硝酸盐去除效率从而实现废水脱氮的研究设想。若研究应用试验证明科学可行,此研究成果将拓宽茭白秸秆的综合使用途径,在合理处置茭白农业废弃有机质的同时,还可以达到以废治废和废水脱氮处理的双重环境效益,从而有望以资源循环利用为纽带同时解决城乡水体污染及农村地区的典型环境问题,实现城乡环境整治循环经济发展新模式,促进城乡水生态环境的日益改善和经济可持续发展。

参考文献:

[1]陈云峰,文 辉,张彦辉. 不同固态碳源用于反硝化去除污水处

理厂尾水中硝态氮的研究[J]. 给水排水,2010,36(11):140 - 143.

[2]Law J Y, Soupier M L, Raman D R, et al. Exploring multiple operating scenarios to identify low - cost, high nitrate removal strategies for electrically - stimulated woodchip bioreactors [J]. Ecological Engineering, 2018, 120: 146 - 153.

[3]Hassanpour B, Giri S, Pluer W T, et al. Seasonal performance of denitrifying bioreactors in the Northeastern United States: field trials [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 202: 242 - 253.

[4]Husk B R, Anderson B C, Whalen J K, et al. Reducing nitrogen contamination from agricultural subsurface drainage with denitrification bioreactors and controlled drainage [J]. Biosystems Engineering, 2017, 153: 52 - 62.

[5]Hua G, Salo M W, Schmit C G, et al. Nitrate and phosphate removal from agricultural subsurface drainage using laboratory woodchip bioreactors and recycled steel byproduct filters [J]. Water Research, 2016, 102: 180 - 189.

[6]王 哲, 谢 杰, 刘爱武, 等. 经济植物湿地处理洱河流域低污染河水的性能[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1230 - 1235.

[7]符长焕. 茭白草堆肥过程中温度及营养成分的变化[J]. 浙江农业科学, 2009(1): 187 - 189.

[8]艾 方, 朱 明. 宁波市农村生态环境质量持续改善[EB/OL]. (2009 - 12 - 21) [2019 - 07 - 03]. <http://news.163.com/09/1221/09/5R229N1B0001124J.html>.

[9]王保存. 岳西县茭白秸秆综合利用探讨[J]. 现代农业科技, 2018(9): 217 - 219.

[10]张忠兴. 浅论茭白废弃物的综合利用发展[C]//第九届长三角科技论坛——农业机械化分论坛论文集. 常州: 江苏省农业机械学会, 上海市农业机械学会, 浙江省农业机械学会, 2012: 180 - 182.

[11]袁卫东, 陆 娜, 宋吉玲, 等. 农作物废弃物焚烧和水体腐化过程对环境的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(6): 1022 - 1028.

[12]李振平. 景宁县农作物秸秆综合利用现状与建议[J]. 农业开发与装备, 2017(9): 86.

[13]谢金元, 胡 丹. 利用茭白叶栽培食用菌试验[J]. 食药菌, 2011, 19(4): 28 - 29.

[14]杭州市余杭区农业局. 关于印发《余杭区茭白秸秆综合利用实施指导意见》的通知: 余农发(2015)162 号[EB/OL]. (2015 - 09 - 06) [2019 - 07 - 03]. http://www.yuhang.gov.cn/xxgk/zcfg/bmwj/201509/t20150906_1014899.html.

[15]邓曹仁, 陈建明. 浙江省茭白叶综合利用技术成功案例分析[J]. 长江蔬菜, 2017(18): 191 - 193.

[16]王 敏. 浙江景宁茭白叶茎重新利用身价倍增[J]. 蔬菜, 2009(2): 39.

[17]徐四新, 诸海焘, 余廷园, 等. 微生物菌剂对茭白秸秆堆肥过程的影响[J]. 上海农业学报, 2018, 34(1): 37 - 40.

[18]程义华. 景宁推广秸秆堆腐还田技术促茭白产业更好发展[EB/OL]. (2018 - 06 - 21) [2019 - 07 - 03]. <http://www.huabeicm.com/show-15-3002-1.html>.

[19]穆 贞, 胡雪峰, 程 畅, 等. 茭白叶发酵肥施用对土壤肥力和

- 番茄生长的影响[J]. 土壤通报,2016,47(5):1203–1210.
- [20] 张为民. 茭白叶里的“钱途”[J]. 光彩,2009(7):48–49.
- [21] 蒋柏荣,黄利权,陆红星,等. 青贮茭白叶饲喂湖羊增重效果试验[J]. 上海畜牧兽医通讯,2013(5):45.
- [22] 金赞芳,李文腾,潘志彦,等. 地下水硝酸盐去除方法[J]. 水处理技术,2006,32(8):34–37.
- [23] Greenan C M, Moorman T B, Parkin T B, et al. Denitrification in wood chip bioreactors at different water flows [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(4):1664–1671.
- [24] Greenan C M, Moorman T B, Kaspar T C, et al. Comparing carbon substrates for denitrification of subsurface drainage water [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(3):824–829.
- [25] Saliling W J B, Westerman P W, Losordo T M. Wood chips and wheat straw as alternative biofilter media for denitrification reactors treating aquaculture and other wastewaters with high nitrate concentrations[J]. Aquacultural Engineering, 2007, 37(3):222–233.
- [26] Sukias J P S, Tanner C C, Park J B K, et al. Quantifying treatment system resilience to shock loadings in constructed wetlands and denitrification bioreactors[J]. Water Research, 2018, 139:450–461.
- [27] Chang J, Lu Y, Chen J, et al. Simultaneous removals of nitrate and sulfate and the adverse effects of gravel-based biofilters with flower straws added as exogenous carbon source [J]. Ecological Engineering, 2016, 95:189–197.
- [28] Soupir M L, Hoover N L, Moorman T B, et al. Impact of temperature and hydraulic retention time on pathogen and nutrient removal in woodchip bioreactors[J]. Ecological Engineering, 2018, 112:153–157.
- [29] Nordström A, Herbert R B. Determination of major biogeochemical processes in a denitrifying woodchip bioreactor for treating mine drainage[J]. Ecological Engineering, 2018, 110:54–66.
- [30] Christianson L E, Lepine C, Sharrer K L, et al. Denitrifying bioreactor clogging potential during wastewater treatment[J]. Water Research, 2016, 105:147–156.
- [31] Ghane E, Feyereisen G W, Rosen C J. Non-linear hydraulic properties of woodchips necessary to design denitrification beds[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542:463–473.
- [32] Damaraju S, Singh U K, Sreekanth D, et al. Denitrification in biofilm configured horizontal flow woodchip bioreactor; effect of hydraulic retention time and biomass growth[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2015, 15(1):39–48.
- [33] Christianson L, Helmers M, Bhandari A, et al. Internal hydraulics of an agricultural drainage denitrification bioreactor [J]. Ecological Engineering, 2013, 52:298–307.
- [34] Christianson L E, Lepine C, Sibrell P L, et al. Denitrifying woodchip bioreactor and phosphorus filter pairing to minimize pollution swapping[J]. Water Research, 2017, 121:129–139.
- [35] Christianson L E, Bhandari A, Helmers M J. A practice-oriented review of woodchip bioreactors for subsurface agricultural drainage [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 28(6):861–874.
- [36] 文 辉, 陈云峰, 高良敏. 不同碳源材料用于污水厂尾水生物反硝化碳源的效果研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3):499–504.
- [37] 马蕴琦. 竹丝填料反应器用于污水厂尾水生物脱氮的试验研究[D]. 扬州:扬州大学, 2014:43–44.
- [38] 姚川颖. 外加碳源强化人工湿地脱氮研究[D]. 沈阳:东北大学, 2014:64–65.
- [39] Blowes D W, Robertson W D, Ptacek C J, et al. Removal of agricultural nitrate from tile-drainage effluent water using in-line bioreactors[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1994, 15(3):207–221.
- [40] Driel P W V, Robertson W D, Merkley L C. Denitrification of agricultural drainage using wood-based reactors[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(2):565–573.
- [41] Robertson W D, Merkley L C. In-stream bioreactor for agricultural nitrate treatment[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(1):230–237.
- [42] Gottschall N, Edwards M, Craiovan E, et al. Amending woodchip bioreactors with water treatment plant residuals to treat nitrogen, phosphorus, and veterinary antibiotic compounds in tile drainage [J]. Ecological Engineering, 2016, 95:852–864.
- [43] Long L M, Schipper L A, Bruesewitz D A. Long-term nitrate removal in a denitrification wall [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 140(3/4):514–520.
- [44] Warneke S, Schipper L A, Bruesewitz D A, et al. Rates, controls and potential adverse effects of nitrate removal in a denitrification bed [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(3):511–522.
- [45] Warneke S, Schipper L A, Matiassek M G, et al. Nitrate removal, communities of denitrifiers and adverse effects in different carbon substrates for use in denitrification beds [J]. Water Research, 2011, 45(17):5463–5475.
- [46] 孙 蓓. 添加植物碳源对多级复合垂直流人工湿地氮、磷去除能力的影响[D]. 南昌:南昌大学, 2012:62.
- [47] Schipper L A, Vojvodić – Vuković M. Five years of nitrate removal, denitrification and carbon dynamics in a denitrification wall [J]. Water Research, 2001, 35(14):3473–3477.
- [48] Christianson L, Bhandari A, Helmers M. Emerging technology: denitrification bioreactors for nitrate reduction in agricultural waters [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 64(5):139A–141A.