

水芹在污水净化中的应用价值

陈钰婕^{1,2}, 陆金婷^{1,2}, 苏世广³, 徐雅芫², 程江华², 钱坤^{2*} (1. 安徽农业大学生命科学院, 安徽合肥 230000; 2. 安徽省农业科学院农产品加工研究所, 安徽合肥 230000; 3. 安徽省农业科学院畜牧兽医研究所, 安徽合肥 230000)

摘要 我国水体污染问题严重, 治理污水是燃眉之急。水生植物净化水体具有高效、经济、环保等特点, 逐渐被应用于处理生活污水、畜禽养殖污水、沼液等。水芹菜是利用水生植物治污的典型实例, 具有生态效益、经济效益和景观效益。通过分析水芹的特性、品种与分布、栽培方式, 以及将水生植物运用于污水净化的效果、方法与案例, 为促进以水芹为代表的水生植物治污技术的发展与技术推广提供理论和技术支撑。

关键词 水芹; 植物净化; 无土栽培; 污水治理

中图分类号 X52 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)07-0006-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.07.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Application Value of *Oenanthe javanica* in Sewage Purification

CHEN Yu-jie^{1,2}, LU Jin-ting^{1,2}, SU Shi-guang³ et al (1. College of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230000; 2. Agricultural Products Processing Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei, Anhui 230000; 3. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Anhui Academy of Agricultural Science, Hefei, Anhui 230000)

Abstract The problem of water pollution in China is getting worse and worse, so it is urgent to treat sewage. Aquatic plants have been used to treat domestic sewage and livestock and poultry breeding sewage, because of its high efficiency, economy and environmental protection. Water celery is a typical treatment of pollution by aquatic plants, and it has ecological, economic and landscape benefits. This paper analyzes the characteristics, varieties and distribution of celery, cultivation methods, and the effect, methods and cases of using aquatic plants in sewage purification, which provides theoretical and technical support for promoting the development of waste water treatment technology of aquatic plants represented by water celery and promoting the local water celery characteristic varieties.

Key words *Oenanthe javanica*; Plant purification; Soilless cultivation; Sewage treatment

我国经济发展快速, 各行业排放的污水给环境造成了沉重负担, 不论是点源污染还是面源污染都很严重。污水富含营养物质, 不做处理直接排放极易造成水体富营养化、恶臭水体、蓝藻事件的发生。研究者投入大量精力, 尝试了物理、化学以及生物等方法^[1-2] 解决水体污染问题, 取得了一定成效, 但成效有限。水体污染仍是难点问题, 主要原因是处理成本较高、经济价值较小、企业治污积极性不高。选择一些既能治污又有一定经济价值的技术就能提高企业治污的积极性, 实现资源的循环利用, 达到治污目标。利用水生植物净化污水是一种投资低、收益高, 一举多得的方法, 也是一种值得重点推广的治理污水的重要技术路线。

1 水芹的生态适应性

1.1 生物学特性 水芹(*Oenanthe javanica*) 别名蕲、楚葵、蜀芹、紫堇、野芹菜等, 多年生水生宿根草本植物, 伞形花科水芹属分布在湖泊、沼泽和沟渠等潮湿地域, 是一种具有中国传统特色的水生蔬菜。水芹在我国的中南部都有人工栽培, 安徽、江苏、贵州、广东、浙江、云南和江西 7 省的栽培面积较大^[3]。水芹病虫害少, 产量稳定且相对较高。由于各地域气候、水源、土壤等自然条件各不相同, 栽培品种、栽培方法也各有差异, 导致产量有一定区别, 产量 30~75 t/hm², 最高可达 150 t/hm²^[4]。水芹菜环境适应性强, 根系发达, 治污能力强, 可食用也可入药。因含有多种挥发物质而具有独特的芳

香^[5], 叶柄和嫩茎是主要的食用部位, 口感鲜美, 烹饪方法多样^[6]。目前, 水芹已经成为市场上广受青睐的水生蔬菜^[7]。

水芹喜水, 不耐干旱, 是典型的长日照水生植物, 对光照需求高, 不耐阴。短日照条件下植株持续生长, 而在长日照条件下植株迅速进入生殖阶段, 相继开花结果^[4]。

水芹是喜凉性植物, 与大多数水生蔬菜是喜温性植物不同, 其耐寒不耐热。生长适宜温度为 12~24 ℃, 超过 25 ℃ 容易生长不良甚至死苗。水芹种植安全越冬是个难题, 经过人工选育, 已选育出较耐热的新品种, 适于越冬栽培。武汉市蔬菜科学研究所选育的“91-55 水芹”在夏季气温 30~35 ℃ 条件下植株仍然生长正常, 具有早熟、耐热的特点, 宜越冬或早秋栽培^[8]; 宜兴市蔬菜办公室和扬州大学合作选育的“伏芹 1 号”在夏季高温季节采用遮阳网覆盖栽培, 长势好、极耐热、产量高, 叶片为浅绿色, 口感脆嫩、微甜, 符合大众品味^[9]; 安徽省安庆市山泉水生蔬菜研究所徐善新从安庆地方品种中筛选的耐热水芹品系, 既抗寒又耐热, 四季常绿, 有很强的抗病虫能力, 一年可收割 4~5 茬^[10]。

水芹喜肥, 耐肥。有土栽培要求土壤肥沃, 土壤有机质 1.5% 左右, pH 6~7。为求营养器官脆嫩, 肥料以 N 肥为主, 适量配施 P、K 肥^[3]。无土栽培下, 初期水体 TN 含量低于 100 mg/L、COD 低于 1 000 mg/L 可正常生长; 在水芹株高 8~12 cm 时, 水体 TN 含量 200~300 mg/L、COD 1 000~1 200 mg/L 可正常生长; 到水芹株高 18~22 cm 的旺盛生长阶段, 水体 TN 含量 300~400 mg/L、COD 1 200~1 500 mg/L 可正常生长, 1 m² 浮床水芹总产量可达 60 kg^[11]。

水芹育苗多采用无性繁殖。一般选择茎秆粗壮、节间

作者简介 陈钰婕(1996—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向: 水生植物净化水质。* 通信作者, 研究员, 从事农产品加工等相关工作。

收稿日期 2021-07-07

短、腋芽多的健壮植株作为母株留种。8月下旬收割种茎,并将种茎去除顶梢按茎粗大小分级打捆,扎成直径为 30 cm 的圆捆,上面覆盖 3~5 cm 厚新鲜青草或稻草保湿。水芹的发芽温度在 25 ℃ 以下,需将种茎堆放于阴凉通风处,早晚浇凉水防止种堆发热。7~10 d 后,有 90% 以上腋芽萌发、长出 2~3 cm 短根时,将种茎剪成 8~10 cm 长备用,当温度低于 30 ℃ 时方可排种^[12]。

1.2 水芹在安徽省有广泛分布 安徽省处于亚热带季风性湿润气候区域,大多数水生蔬菜都能良好生长^[13]。安徽水芹栽培历史悠久,目前发展面积约 3 333.5 hm²,遍布安徽的长江流域、淮河流域和皖西大别山区,在沿江地区与沿淮地区分布较多,较为著名的品种有桐城水芹、庐江金坝芹芽、蚌埠水芹、舒城水芹、铜陵水芹等^[14]。

桐城水芹在桐城大面积栽培始于明末清初,传承至今已有 300 多年历史,是桐城派文化传承的物质载体和见证,具有独有的品质特色,气味兰香浓郁、口感脆嫩爽口、食用回味无穷,已被认定为地理标志证明商标。目前,桐城水芹种植面积达 333.33 hm²。桐城水芹以传统的露地栽培方式为主,一年可收获 4~6 茬。它的主要特色是泉水种植,水源不断,冬暖夏凉,无需额外施肥。随着有机蔬菜、保健蔬菜的流行,桐城水芹凭借优质、高产、效益好的特性在市场中崭露头角^[15]。

庐江县白湖镇金坝村选用安徽本地水芹品种覆盖栽培,筛选出优质产品“金坝芹芽”。芹芽性凉、甘甜,具有清热平肝、降血糖、散瘀破结等多重功效。该品种已经获得国家地理标志产品认证^[16]。

1.3 水芹的营养价值和商品价值

1.3.1 营养价值。水芹品质鲜嫩,口感清脆,别具芳香,能够增强人的食欲,其营养成分比旱芹更加丰富。刘恒蔚等^[17]研究表明,水芹营养丰富,水芹叶柄中可溶性糖含量为 29.70 mg/g, P 含量为 0.77 mg/g,均高于旱芹;叶片维生素 C 含量为 0.19 mg/g,是旱芹的 2.3 倍;Fe 含量为 0.35 mg/g,是旱芹的 2.9 倍。水芹营养元素丰富,大白菜、黄瓜中维生素 B₂ 的含量只有水芹的 1/7,黄瓜中维生素 C 的含量只有水芹的 1/8,番茄中 Ca 和 Fe 的含量分别只有水芹的 1/19 和 1/29^[18]。可见,水芹的食用价值非常可观。

水芹功效多、主治范围广,是一种优质的保健蔬菜。黄正明等^[19]研究表明,水芹可抗肝炎、镇静安神、降低血压及抗心律失常,又可祛风、利尿、消炎、清热解暑。多食水芹对人体有益。

1.3.2 商品价值。由于富营养化水体与各类沼液中均含有大量的适合水芹菜生长的营养物质,用于净化水体的水芹反而比一般水芹长势要好,产量更大。水芹菜在长江流域可四季生长。如果按照安徽多茬收割技术来进行核算,1 hm² 水芹可以收割 5~6 次,总产量达到 15 万 kg 以上。以安庆山泉水生蔬菜研究所为例,该试验基地种植的水芹年产量 15.0 万~22.5 万 kg/hm²,收 5~6 茬,全年平均价格至少 1 元/kg,产值 20 万元/hm² 左右^[20]。水芹菜具有一定的商品价值,其经济效益显著。

2 水芹适应性强栽培方式多样

水芹喜水喜凉,表现出特别好的生态适应性,在不同区域形成了多种多样的栽培模式,既可单独种植,也可间作套种。

2.1 有土栽培 有土栽培水芹的模式有浅水栽培、湿润栽培和深水栽培,以及用于软化的覆盖栽培。用途不一样,选择的栽培模式就不一样。

浅水栽培要求灌溉与排水条件好,灌水深度根据水芹的不同生长阶段调整,范围在 0~10 cm,最深不超过 20 cm。浅水栽培既能满足水芹对湿润环境的需求,又能避免因为水位过深引起土壤缺氧从而对水芹造成的伤害^[21]。该方式具有一定的优势,是各地主要栽培方式。

深水栽培平均灌水约 70~80 cm 软化植株。从幼苗长到成熟的过程中逐步加深水位,以达到水芹植株始终有 20 cm 露出水面为目的。这种方法种植的水芹香味淡、纤维多、产量高,产量可达到 75.0~112.5 t/hm²^[22]。

湿润栽培是利用旱田或在大棚等设施中栽培水芹,采用湿润灌溉既可以保证植株生长又可以节水。

覆盖软化栽培是安徽庐江金坝独创的方法,一年可收取两茬,该技术采用稻草+薄膜覆盖方式,当植株长到 11~13 片真叶、苗高 25~30 cm 时覆盖培育芹芽,可分批培育、分期采收上市。一般覆盖 15~50 d 可生长出洁白脆嫩的芹芽,揭开覆盖物,用刀齐根切割收获^[23]。

各种栽培模式都与水芹的生物学特性有关,即喜水、不能缺水。

2.2 无土栽培 无土栽培不用土壤等基质栽培植物,又称水培、营养液栽培。水芹无土栽培效益明显,产量高、品质好,且不受季节限制,一般在大棚等设施中进行,1 年最多可生产 6 茬,周年生产、全年供应,一年可以收割 1 万 kg 以上的净菜,病虫害少,无需打药,安全环保。

经典的无土栽培水芹营养液配方复杂,对设施、技术以及成本要求都很高^[24]。除经典的无土栽培,近年有研究者还利用各种农产品加工的废水或养殖场的沼液为基础材料进行无土栽培研究和实践,取得了一定成效。即利用水生植物净化水体的原理及生态浮床技术,既能够美化环境又能够提高生物多样性^[25],该技术在受到污染的水库、河流等水体的治理中也卓有成效^[26]。安庆山泉水生蔬菜研究所选用水芹、水空心菜、茭白、菱角进行生态浮床栽培,已经取得了很好成效。浮床 1 m²/块,可以任意组装,将种苗种植在浮床上,根须会自动伸展到水下,然后互相缠绕成为一个整体。该浮床已经在自然水面(江河湖泊)以及大棚、温室的自然水面进行了成功的种植试验,坚固耐用、抗风浪能力强、透气性好、适应性强^[10]。

2.3 设施栽培 设施栽培是保护地栽培的模式,可选用有土栽培、无土栽培方式。在日光温室、大、小棚等设施条件下,采用营养液无土栽培,也可采用有土条件下的湿润灌溉方式栽培,该模式生长速度较快,生长环境基本可控。

由于水芹喜凉,为了安全越夏栽培,有的地方采用遮阳

网越夏栽培。但要使用耐热品种,并进行遮阳网遮阴以及井水灌溉、适时采收等综合措施。遮阳网覆盖栽培和露地栽培相结合,可形成水芹周年栽培模式^[27],该方法在江苏省宜兴市和苏州市等地有应用。

2.4 轮作栽培 水芹与其他蔬菜轮作栽培可以提高土地利用效率,合理利用农业资源,同时能够提高产量和经济效益。旱生蔬菜、水生蔬菜、水产都可以与水芹混合培养。

2.4.1 水芹-旱生作物配茬模式。可与水芹配茬的蔬菜种类很多,如黄瓜、丝瓜、苦瓜、甜瓜、小白菜、苋菜、大豆等。配茬模式很多,春大豆-水芹大棚水旱轮作模式^[28]、日光温室辣椒-水芹轮作栽培模式^[29]以及黄瓜与水芹水旱轮作栽培技术等均已成功应用。

2.4.2 水芹-水生蔬菜配茬模式。常见轮作模式有莲藕-水芹轮作模式^[30]、茭白-水芹轮作模式^[31]、芡实-水芹轮作模式^[32],均适用于沿江、江淮一带蔬菜生产,这种模式主要是解决水芹耐热性不强的问题,通过配茬做到在适宜的季节生产适宜的作物品种。

2.4.3 水芹-水产种养模式结合。潘复生等^[33]采用浮排水芹-泥鳅模式在安庆市山泉水生蔬菜研究所获得了成功。水芹-青虾模式^[34]、水芹-小龙虾模式产量极高。与水生动物复合,水质需要达到一定的标准,不适用于重污染水体。

3 水芹的污水净化能力

生产和生活中产生的污水直接排入水体,因其含有较多有机物,容易发生水体富营养化。将水生植物种植在污水中,既能去除水体中较多的N、P等元素,又能解决水体中的有机物,一举两得,植株得以生长,水体得以净化。对低污染水体进行生态修复时,使用水生蔬菜成本低且效率高。研究表明,采用植物浮床处理低污染废水对TN和 NH_4^+-N 的去除效果显著,尤以水芹为佳,水生植物有效控制了水体pH的上升和藻类的生长繁殖,有助于改善水环境^[35]。在废水处理上应用较多的水生蔬菜主要有水芹、水空心菜、茭白、水菱等,这些植物有较高的商品价值。

3.1 水芹对污水的净化能力 化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)是衡量水污染程度最主要的指标。小规模试验和大规模示范表明,水芹净化能力较强。

水芹对水体中TN、TP和COD处理能力较高。TN的主要去除效果来自于微生物和物理化学作用,TP的主要去除效果来自植物的吸收和吸附。除了这些途径外,水体N、P的去除还存在氨的挥发、硝化和反硝化等途径^[36],唐萍等^[37]使用水芹在养殖水体中进行漂浮种植试验,结果表明,水样中COD、TN、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的含量分别降低了44.8%、50.3%、23.6%、51.1%、68.1%,效果明显。赵婉婉等^[38]研究发现,水芹能稳定pH和水温,调节溶解氧的含量,降低TN和TP的含量。

水芹有较强的耐污能力,正常生长需较多的营养物质。水芹适应能力很强,在较高氮磷水平(NH_4^+-N 180~220 mg/L,TP 30~35 mg/L)下对水中 NH_4^+-N 、TP、COD的去除效果最好^[39]。王楠等^[40]通过用不同浓度的受污水体室内

培育水芹发现,水芹的生物量与水体中氮磷浓度先呈正相关,持续升高直至达到最大值后,植株生物量与水体中氮磷浓度呈负相关。

水体C:N比影响去污能力。段婧婧等^[41]采用不同C:N比的生活污水研究水芹对低污染水中N、P、COD的净化效果。结果表明,C:N比较高的水体处理的水芹生物量、平均株高和相对生长速率都相对较高。说明通过添加碳源调节C:N比有利于水芹浮床系统对N、P的去除。

种植密度、方式、基质等能够影响水芹对TN、TP的去除效果。种植水芹的浮床密度越大,TP去除效果越好。不同基质对水芹去除TN的促进程度不同^[42]。左杰等^[43]用沙基法和浮床法分别种植水芹,研究不同基质对水芹净化效果的影响,结果表明浮床种植方式使N、P的去除效果更稳定,且更有利于增加植物的总生物量。

不同留茬高度同样会对水芹的治污效果产生影响。周元清等^[44]研究发现,不同留茬处理的水芹对污水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的去除效果存在差异,19 cm留茬高度水芹浮床治污效果最好。

水芹与其他水生蔬菜混合种植能够增强治污效果。在养殖水体中将生菜、水芹菜和黄菖蒲单作栽培,3种植物生长良好,对污水中N、P等有机污染物有不同的处理效果。养殖水体采用“空心菜-水芹”轮作模式后,水中的COD、TN、TP和 NH_4^+-N 等水质指标呈现显著降低^[45]。研究发现,蔬菜漂浮湿地对池塘养殖尾水中TN、TP、COD和TSS的去除率分别为42.6%~58.5%、44.6%~59.9%、57.8%~70.0%和49.7%~74.9%,处理后出水满足池塘养殖水相关排放要求^[46-47]。李纯洁^[48]选取水芹、石龙芮和沼生蕹菜3种适应能力强且生物量大的水生植物做室外模拟水培试验,结果表明3种植物生物量增加速度可观,TN、TP的去除率显著提高,分别达到43.3%~54.1%、54.3%~88.2%,植物组合对TN、TP的去除率均显著高于单一植物,总去除率可达61.3%~65.0%、79.2%~88.6%。

3.2 水芹应用于污水净化后的食用安全性 水芹的主要食用部位是茎叶,微生物、重金属、硝酸盐含量是影响其食用安全的主要指标。

在富营养化水体中种植水芹,水芹表现出很强的适应性和抗氧化能力,其 V_c 含量与可溶性糖的含量较高,未产生大量硝酸盐及重金属富集,亚硝酸盐含量0.5~1.3 mg/kg,远低于国家食品安全标准,水芹营养品质较好^[49-50]。

陈桂顶^[51]在农村生活污水尾水中建立的水芹蔬菜栽培系统,其硫化物、氰化物、苯类物质等有机污染物的含量极低,符合国家食用安全标准,能够实现污水治理和农业生产的有机结合。

常雅军等^[11]将畜禽养殖废弃物经过自然氧化塘发酵处理后,与农田灌溉水按比例混合后作为水芹种植塘的肥料。水芹生长40 d后,对水芹产品的安全性进行检测,其重金属和农药残留量很少,符合国家食品安全标准。

3.3 水芹对一些重金属有富集能力 污水中含有的重金属

随污水来源不同而不同。陈芬等^[52]研究表明,养殖场的沼液中重金属来源于粪尿,其分布规律基本呈现出 $Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > As > Cd > Hg$ 的趋势。唐夏军等^[53]对某规模化猪场沼液和施用沼液的水芹菜不同部位重金属元素含量的测定结果表明,猪场沼液和水芹菜中的重金属元素以 Cu、Fe、Zn、Mn 为主,还有少量的 Cd、Pb。沼液中 Cu、Fe、Zn、Mn、Cd、Pb 的含量均达到国家农田灌溉水质标准。施用沼液后,水芹菜中除了 Pb 之外其余重金属元素的含量均未超过国家限量标准。因水芹在生长的过程中对重金属有一定的富集能力,在重金属浓度较高的废水中,容易造成重金属含量超标从而丧失水生蔬菜的食用价值。

王昕等^[54]选取桐城水芹用 Cd、Pb 复合污染的土壤栽培,水芹各器官中的 Cd、Pb 元素与该元素在土壤中的含量呈正相关,达到最高值后停止上升。中华等用含有 Cd 元素的培养液栽培水芹,当培养液中 Cd 浓度为 0.5 mg/L 时,Cd 去除率 40%,植株 Cd 富集量 13.31 mg/kg;当培养液中 Cd 浓度为 10.0 mg/L 时,Cd 去除率 74%,植株 Cd 富集量 92.98 mg/kg^[55]。

对于 As 和 Hg 2 种元素,在水培条件下,As、Hg 胁迫浓度越大,生物量增加的越少。随着培养液中 As、Hg 浓度的提高,水芹各部分中的 As、Hg 含量也随之提高,水培营养液中 As 和 Hg 的浓度过高时,水芹植株中 As 和 Hg 的含量将超出国家标准限值。水芹适合修复受低浓度 As (5 mg/L) 和 Hg (1 mg/L) 污染的水体^[56]。

张海锋等^[57]对养殖场周围污水排放区周边野生水芹取样检测后发现,Cu、Pb 及 Cd 在水芹内含量分别为 9.78、0.83、1.27 mg/kg,分别是《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)限值的 0.98、4.15、25.40 倍。其中 Pb 和 Cd 均为重度污染,Cu 为警戒-轻度污染。

对于重金属含量较高的工业污水,采用水芹治污可能会导致植株体内富集大量的重金属而产生食品安全问题,使水芹菜丧失食用和商品价值。而农产品加工的废水(如豆制品加工过程中产生的黄浆水)、池塘养殖尾水、严格执行国家相关标准的畜禽养殖场的废水等水体中应用水芹治污技术安全性是可靠的。

4 水芹在污水净化中的应用实践

21 世纪初,徐善新以 PVC 管及尼龙网为材料制作浮排,进行了水芹自然水体浮排无土栽培技术探索,取得成功。该技术不仅实现了水芹周年高产优质生产,产量高、成本低,具有治污、造景、生产的多重功能,通过检测,产品也无重金属残留且口感极佳。并且通过浮排材料的改进,开发了茭白、荸荠、西瓜、辣椒和水稻等水旱生蔬菜和粮食作物的自然水面无土栽培技术。目前,自然水体浮排无土种植技术已在北京、河北、辽宁、吉林、湖北、湖南、江苏、浙江、安徽、上海、海南等省、市推广应用。该研究所在广东温氏食品集团股份有限公司湖北咸宁养殖分场内的水塘直接种植无土水芹,以污水、沼液做养料,水芹生长迅猛。经过水芹 40 d 的吸收净化,黑臭水塘变得清澈,可以养鱼。广东温氏食品集团已在湖北、湖南、江西、广东 4 个省的多个分场利用无土水芹净化水

体,产出了绝对不用化肥的绿色蔬菜,一举数得。河北唐山市某屠宰场,污水长期不能达标,采取污水发酵、水芹净化以后,蔬菜生长茂盛,水体清澈^[10]。

宿迁渔樵农业生态园示范基地生猪规模 1 500 头,日产粪污水 70 m³,自然氧化塘的发酵液用 13 340 m² 水芹种植塘消纳,种植塘布置浮床 7 500 m²/hm²,1 hm² 水芹种植塘能容纳 2 250~2 700 头生猪的粪污水,处理后的水质可循环再利用。全年水芹总产量净菜 10 000 kg 以上,按市场价格 5 元/kg 计算,纯收益可达 60 万元/hm²(包括下脚料收益)。采收净菜后残留的茎叶可用于养殖。在产生经济效益的同时,基地的环境也得到了很大改善^[11]。

乐平金园牧业有限公司的“猪-沼-水芹菜”模式沼液利用率可达 43.7%,该模式中的水芹菜对重金属有稳定的富集能力且符合食品安全标准。按每季两茬计算,产量可达 210 t/hm²,年产值可达 47.7 万元/hm²。同时沼液、土壤中的重金属含量均符合国家安全标准。该模式在产生环境效益的同时带来了经济效益和社会效益^[58]。

黄浆水是豆制品加工副产物,是加工厂主要污染源。一般 1 kg 干豆加工要产生 6~10 t 的黄浆水,工业化处理投入成本和运行成本都较高,在环境保护新常态下,很多豆制品加工企业,尤其是小作坊被关停。受水芹在养殖场污水成功治理的影响,寿县迎淮豆制品有限公司引进了水芹进行试种,取得初步成功。该公司建立了 3 个黑膜沼气池,利用沼液进行水芹种植。安徽省农业科学院农产品加工研究所的研究表明,黄浆水沼液主要含有 N、P、K、Ca,基本不含有重金属,利用水芹处理黄浆水沼液是可行的。

5 结语

水芹作为水生蔬菜,栽培方式简便多样,适应能力强,营养价值高,深受生产者和消费者的喜爱,相关产业的发展方兴未艾。近年来,生态文明建设列入国家战略,污水处理研究成为热点,理论和实践都证明,利用水芹菜治污将成为产业关注的新方法,在技术上是可行的,具有很好的商业价值,对企业治污有很大的吸引力。

利用植物净化污水属于多学科合作的交叉学科,涉及新品种、栽培方法、品质控制、水质调控、浮床与管理、人工湿地选择、营养液的优化等内容。目前,国内外对于水芹及水生蔬菜净化污水研究方向广泛,取得了一系列成果,建立了很多技术模式,并在实践中得到应用。利用水芹净化污水是一种循环农业新技术,符合国家政策和产业发展方向。但是,还要进行更多的精细研究,如水芹不同生长阶段的最佳营养调配方案、水芹安全越冬、水芹净化污水的工程技术(如水培池的配置、污水的过滤与滴灌技术)、水芹净化的生产工艺等。解决关键技术问题,才能更好地推广应用。并在此基础上,形成技术标准,推动产业发展。

水芹作为一种食用性的蔬菜,食用安全性是前提。大多研究表明,规模化养殖场的沼液生产出的水芹是安全的,可以放心食用。但还要深入研究,厘清不同类型水体重金属含量、抗生素含量对安全性的影响。不适于水芹净化的水体,

可采用其他技术路线进行治理,严把安全关。

目前研究和实践的重点是养殖场的沼液以及河道、养殖尾水的水芹净化。近年,笔者所在团队正在开展豆制品加工副产物资源化利用技术研究,农产品加工副产物的肥料化利用是研究重点内容之一。前期分析研究表明,利用水芹净化黄浆水沼液是可行的,投资较少、处理量大,还能形成较好的经济效益,产品安全性好,是一种需要认真研究和大力推广的技术模式,也值得在其他农产品加工副产物的资源化利用中应用。

参考文献

- [1] WEN L, RECKNAGEL F. *In situ* removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: Preliminary results from growth chamber experiment[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2002, 90(1): 9-15.
- [2] GAO J Q, YANG L, ZHONG R, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus removal efficiency between two types of baffled vertical flow constructed wetlands planted with *Oenanthe javanica* [J]. *Water science and technology*, 2020, 81(9): 2023-2032.
- [3] 朱建清, 王铸庭, 胡惠根. 水芹的生物学特性及高产栽培技术初探[J]. *上海农业科技*, 2006(4): 97-98.
- [4] 刘荣国, 刘溶沁. 水芹的生长发育特性及配套栽培技术[J]. *上海蔬菜*, 2007(4): 34-36.
- [5] SEO W H, BAEK H H. Identification of characteristic aroma-active compounds from water dropwort (*Oenanthe javanica* DC.) [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2005, 53(17): 6766-6770.
- [6] 邓静娟. 不同贮藏与烹饪处理对水芹食用品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [7] 刘义满. 水芹史考[J]. *长江蔬菜*, 2010(14): 130-131.
- [8] 叶元英, 柯卫东, 黄新芳, 等. 耐热早熟水芹新品种 91-55 水芹[J]. *长江蔬菜*, 2014(1): 16-17.
- [9] 李良俊, 蒋宁鹏, 王建锋, 等. 伏芹 1 号水芹夏季遮阳网覆盖栽培技术[J]. *长江蔬菜*, 2010(14): 73-74.
- [10] 徐善新, 鲍忠洲. 水芹自然水体无土种植技术的应用[J]. *长江蔬菜*, 2015(22): 147-148.
- [11] 常雅军, 崔键, 姚路路, 等. 畜禽养殖废水规模化生产水芹关键技术[J]. *中国蔬菜*, 2020(3): 102-104.
- [12] 刘本文, 许宇恒. 水芹的营养价值及栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2009(14): 107.
- [13] 俞飞飞, 张其安, 董言香, 等. 安徽省水生蔬菜产业现状及发展建议[J]. *长江蔬菜*, 2019(22): 37-41.
- [14] 王华君. 安徽水芹发展现状及栽培技术[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(11): 56, 84.
- [15] 朱小龙, 胡慧. 桐城水芹的生产技术[J]. *上海蔬菜*, 2020(2): 19-20.
- [16] 周林, 张伟, 王继秀, 等. 金坝芽芹轻简化高产栽培技术[J]. *长江蔬菜*, 2015(22): 145-146.
- [17] 刘恒蔚, 高梦洋, 饶贵珍. 野生水芹与旱芹的营养成分比较分析[J]. *中国野生植物资源*, 2007, 26(1): 36-38.
- [18] 郑毅, 刘新风, 赵国臣, 等. 野生水芹菜的营养价值及高产栽培技术[J]. *北方园艺*, 2013(15): 62-63.
- [19] 黄正明, 杨新波, 曹文斌. 水芹的本草考证[J]. *中草药*, 2001, 32(1): 59-62.
- [20] 谢柳, 蔡立梅, 何明皇, 等. 水芹菜治理水体污染的经济效益研究[J]. *农村经济与科技*, 2019, 30(1): 17-19.
- [21] 陶顺法, 怀海华, 邵琴, 等. 水芹引种及浅水栽培技术要点[J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(10): 1731-1733.
- [22] 尹渝来, 孙芳芳, 鲍忠洲, 等. 不同的水芹栽培方法介绍[J]. *长江蔬菜*, 2017(18): 123-125.
- [23] 朱文革, 吴正斯, 梁军, 等. 水芹覆盖软化栽培技术[J]. *长江蔬菜*, 2013(18): 183-184.
- [24] 叶安华, 周国林, 金凤美, 等. 水芹无土栽培技术[J]. *长江蔬菜*, 2016(8): 25-27.
- [25] WARE J, CALLAWAY R. Public perception of coastal habitat loss and habitat creation using artificial floating islands in the UK [J]. *PLoS One*, 2019, 14(10): 1-16.
- [26] KONG L W, WANG L, WANG Q R, et al. Study on new artificial floating island removing pollutants [J]. *Environmental science and pollution research*, 2019, 26(17): 17751-17761.
- [27] 李良俊, 陈学好, 曹皓生. 水生蔬菜设施高效栽培技术及其应用[J]. *长江蔬菜*, 2009(16): 92-96.
- [28] 张红梅, 曹庆德, 褚芳, 等. 春大豆-水芹大棚水旱轮作高效种植模式的应用[J]. *金陵科技学院学报*, 2014, 30(4): 73-75.
- [29] 顾大路, 吴传万, 杜小凤, 等. 日光温室淮安红椒-水芹轮作栽培技术规程[J]. *农业科技通讯*, 2014(11): 204-206.
- [30] 严从生, 刘茂, 田红梅, 等. 江淮地区莲藕-水芹轮作栽培模式[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(35): 13518, 13520.
- [31] 方家齐, 张世月. 茭白-水芹轮作新模式[J]. *长江蔬菜*, 2005(3): 11-12.
- [32] 周晓春, 张增根. 茭实-水芹高产高效栽培技术[J]. *上海蔬菜*, 2004(6): 46-47.
- [33] 潘复生, 鲍忠洲, 怀于生. 浮排水芹套养泥鳅高效生态种养新技术[J]. *中国蔬菜*, 2017(11): 93-95.
- [34] 葛永华, 何志亮. 水芹、青虾高产高效种养技术[J]. *科学养鱼*, 2006(5): 30-31.
- [35] DUAN J J, ZHAO J N, XUE L H, et al. Nutrient removal of a floating plant system receiving low-pollution wastewater: Effects of plant species and influent concentration [J]. *IOP conference series: Earth and environmental science*, 2016, 41(1): 1-9.
- [36] SUN G, AUSTIN D. A mass balance study on nitrification and deammonification in vertical flow constructed wetlands treating landfill leachate [J]. *Water science & technology*, 2007, 56(3): 117-123.
- [37] 唐萍, 沈金超, 贾军洋. 浮床栽培水芹净化养殖水体的研究[J]. *北方园艺*, 2011(22): 40-42.
- [38] 赵婉婉, 郭丽云, 周国勤, 等. 浮床水芹 (*Oenanthe javanica*) 的生态特性及对池塘水体环境的反馈与响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(5): 433-439.
- [39] 冯优, 陈庆锋, 李金业, 等. 水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2397-2408.
- [40] 王楠, 叶春福, 王波, 等. 不同富营养化程度水体对水芹生长发育影响的研究[J]. *天津农业科学*, 2013, 19(12): 73-75.
- [41] 段婧婧, 薛利红, 冯彦芳, 等. 碳氮比对水芹浮床系统去除低污染水氮磷效果的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(3): 384-391.
- [42] 向文英, 彭颖. 重庆冬季水芹浮床对富营养化水体的修复[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(11): 5393-5398.
- [43] 左杰, 季军, 汪鹏合, 等. 沙基和浮床培养方式种植水芹对人工湿地冬季水质净化能力的对比[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(6): 1342-1349.
- [44] 周元清, 李秀珍, 唐莹莹, 等. 不同处理水芹浮床对城市河道黑臭污水的脱氮效果及其机理研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(10): 2192-2198.
- [45] 郑尧, 陈家家, 胡庚东, 等. “空心菜-水芹”轮作对养殖池塘水质和底质环境的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(1): 98-105.
- [46] 陶玲, 李晓莉, 彭亮, 等. 蔬菜漂浮湿地对池塘养殖尾水的异位处理效果[J]. *淡水渔业*, 2020, 50(6): 52-59.
- [47] 杨静美, 张磊, 刘雯, 等. 植物生态浮床对水禽养殖污水的净化效果[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2016, 29(1): 30-33.
- [48] 李纯洁. 常见水生植物对城市河道水质净化影响试验研究[J]. *水资源开发与管理*, 2020, 18(9): 28-33.
- [49] 张帅, 雷代东, 王晨, 等. 富营养化水体对水芹抗氧化系统和营养品质的影响[J]. *西北植物学报*, 2018, 38(3): 510-516.
- [50] 胡绵好, 袁莉红, 杨肖娥. 水生蔬菜对富营养化水体净化及资源化利用[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(3): 416-420.
- [51] 陈桂顶. 水培蔬菜系统对农村生活污水尾水中氮磷去除及资源化利用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [52] 陈芬, 余高. 晋北地区规模化养殖场畜禽粪便中养分和重金属含量分析[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(5): 143-148.
- [53] 唐夏军, 臧一天, 王尚江, 等. 猪场沼液对水芹菜重金属含量的影响[J]. *家畜生态学*, 2019, 40(12): 65-69.
- [54] 王昕, 徐文娟, 刘颖. Cd、Pb 复合污染在水芹不同器官的富集特性研究[J]. *长江蔬菜*, 2014(22): 53-55.
- [55] 申华, 黄鹤忠, 张皓, 等. 3种观赏水草对水体镉污染修复效果的比较研究[J]. *水生态学杂志*, 2008, 29(5): 52-55.
- [56] 杨倩. 砷、汞污染对水芹的毒害效应及其富集转移特性研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2020.
- [57] 张海锋, 李晓玲, 罗玉红, 等. 宜昌近郊污水灌溉区水芹重金属污染状况及健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8): 1470-1477.
- [58] 张磊, 吴志勇, 徐晓云, 等. 猪场沼液在水芹菜种植中的应用研究: 以乐平金园牧业有限公司种养一体化模式为例[J]. *江西畜牧兽医杂志*, 2015(3): 16-19.