

文章编号: 1674-7054(2020)02-0251-06

浮萍植物的应用价值及综合开发利用

赵新勇, 王友霜, 王健康, 丁成伟, 胡婷婷, 吴玉玲, 李思梦, 赵轶鹏

(江苏徐淮地区徐州农业科学研究所, 江苏 徐州 221000)

摘要: 浮萍科植物生长速度快, 富含生物蛋白质和淀粉, 具有较高的氮磷、有机物和重金属的吸附转移能力。浮萍作为一种新型环境及能源植物, 逐渐受到广泛关注, 而前人对浮萍在农业生产上尤其是与水稻共生互作方面的研究较少且存在争议。因此, 笔者综述了浮萍在植物修复、饲料加工、能源生产及药用价值等方面的研究概况和应用前景, 为更全面地开发浮萍植物提供参考。

关键词: 浮萍; 污水治理; 饲用价值; 能源价值; 药用价值; 农业价值

中图分类号: S 555 文献标志码: A DOI: [10.15886/j.cnki.rdsxb.2020.02.017](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdsxb.2020.02.017)

浮萍 (*Lemna minor L.*) 是一种水生生物, 共 5 属 37 种^[1-3], 在温热带地区可以常年生长, 生长繁殖快, 2~7 d 可以繁殖 1 代。由 (3~6) mm×(2~4) mm 的叶状体和长 2~5 cm、直径小于 0.5 mm 的 1 条细根组成, 叶状体呈绿色, 背面有时呈紫色^[4]。有些种则仅有叶状体, 是世界上最小的单子叶开花植物^[5-7]。浮萍科植物具有无性和有性两种生殖方式, 在适合生长的环境下, 成熟株体以分生新芽孢的方式进行繁殖, 繁殖速率为指数增长模式。浮萍在温度低于 5 ℃ 时进入休眠状态, 如越冬前在其夹囊或开口内生椭圆形的冬芽, 脱离母体沉入水底, 第 2 年当温度回升后重新生长, 再浮出水面形成新的植株^[8-10]。一般 3 月下旬至 4 月底为浮萍生长高峰期, 之后其生长速度和生物量趋于稳定^[11]。浮萍能够吸收大量的氮磷元素, 具有净化污水的作用, 也可降解水中重金属等有毒物质^[12]。此外, 浮萍所含蛋白质、淀粉以及黄酮类物质, 能够用于饲料加工、新能源开发和制造药品^[13-18]。同时, 在农业生产中也可以防止氮素流失提供农田氮素利用率^[19-20]。浮萍科植物生长速度快, 富含生物蛋白质和淀粉, 具有较高的氮磷、有机物和重金属的吸附转移能力。浮萍作为一种新型环境及能源植物, 逐渐受到广泛关注, 而前人对浮萍在农业生产上尤其是与水稻共生互作方面的研究较少且存在争议。因此, 笔者以浮萍植物为论述对象, 综述其在多个领域中的研究价值, 为更全面地开发浮萍植物提供参考。

1 浮萍在污水处理中的作用

由于浮萍生长迅速需要吸收大量的氮磷等营养元素的特点, 最初 Alaerts 等^[12]最早将浮萍处理作为一种革新应用到污水处理中, 并取得了较好的效果。ZHOU 等^[21]利用浮萍作为植物修复材料能够去除养猪废水中的大量营养物质, LUO 等^[22]指出污水中的营养元素经微生物硝化和反硝化之后可由浮萍直接吸收利用。

水体中的氮磷去除与浮萍体内的积累, 在数量上十分相似, 说明水体中氮磷的去除主要是通过浮萍吸收来实现的^[23]。其吸收形式主要以铵态氮为主, 而水体中的硝态氮则需要浮萍通过影响水中微生物进行硝化/反硝化作用之后才能被吸收^[24]。有研究表明^[25], 浮萍可改变水体微生态环境, 发达的通气系统使根际环境富氧, 利于浮萍生长, 根区环境厌氧, 促进硝化和反硝化作用, 为浮萍提供充足的氮素营养。浮

收稿日期: 2019-05-05 修回日期: 2019-07-09

第一作者: 赵新勇(1991-), 男, 硕士. E-mail: 1151626431@qq.com

通信作者: 赵轶鹏(1979-), 男, 博士, 副研究员. 研究方向: 水稻栽培与耕作. E-mail: zhaoyipeng@yeah.net

萍根系分泌物对水体中脱氮细菌具有促进作用,有利于水体氮素的净化^[26]。另外,在打捞过程中,一些附着在浮萍上的氮磷元素以及固体污染物被清除,亦达到水体的净化作用。不同浮萍种类对磷酸盐的吸收效果不同,在低浓度时,稀脉浮萍倍速增长较快,能更快地完成对无水中磷元素的净化和修复,当磷浓度较高时,紫萍对高磷污染具有较强的耐受性,且对磷的吸收速率更快^[27]。谢朦等^[28]以3种太湖浮萍为试验对象,结果发现 *Spirodela polyrhiza*, *L.aequinoctialis*, *L.punctata* 能分别去除 80.3%, 73.7%, 83.8% 的总氮及 98.8%, 96.4%, 99.3% 的总磷,若将 *L.punctata* 用于太湖水体修复不仅可以显著减低富营养化程度,又可获得较高的浮萍干物质。浮萍除了能清除水体氮磷元素之外,还对某些重金属和有机溶剂具有较高净化作用。XIE 等^[29]表明,10 g 新鲜芜萍可去除 200 mL 浓度为 $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的所有镉离子;SETH 等^[30]证实浮萍对镉离子的清除能力要高于镉超富集植物的标准。OSAMA 等^[31]报道浮萍对 1,4-二氧六环和氨氮的吸收量分别达 33.4% 和 64.9%;少根紫萍能更好地反映浮萍对水体污染中镉离子的去除能力。唐利萍等^[32]利用不同品系浮萍制作成生物吸附剂,拥有的高孔隙率和较大的比表面积,以及含有较多的吸附功能团(羟基、羧基、酸胺基、磷酸基等)的特点,通过离子交换、鳌合等方式吸附重金属离子。李阳等^[33]报道将多根紫萍和少根紫萍制作成干粉剂后,对 Cd^{2+} 的吸附率达到 83.2%(少根紫萍)、95.7% (多根紫萍)^[34]。由于不同种类浮萍对各元素的吸收效率存在差异,不同种类浮萍组成混养体系较单一浮萍种类净化水体效果好,因为混养可使组合中的个体充分发挥自身优势,从而达到资源配置的最优化^[35-36]。

2 浮萍的饲用价值

浮萍鲜嫩适口、营养丰富,既可作为水源的清洁剂,又可作为淡水鱼的饲料。张植元等^[13]通过人工养殖紫背浮萍不仅可处理养殖污水,并且还能大面积收获作为饲料原料,将浮萍代替菜粕喂食黄金锦鲤,结果使其生长加速,肥满度上升,且上升趋势随浮萍喂养量提高而增加,形成一个可循环生态水产养殖系统。浮萍用于草鱼的喂养中,浮萍作为天然青饲料,富含各种维生素,与颗粒饲料有机结合,能达到营养互补的目的,满足草鱼在池塘集约化养殖过程中对维生素的需求。当草鱼体重是 59 g,水体温度在 16~30 ℃ 时,浮萍食用量随温度的上升而增加,草鱼成活率高、成本低,经济价值高^[37]。王付民等^[38]认为浮萍对洛克沙肿具有较强的富集作用,而有机砷饲料添加剂不仅能够促进鱼类生长,抗寄生虫害,改善动物质量的作用,同时也解决了水体污染的问题。除此之外,浮萍在对鱼类的烂鲍病、肠炎病和赤皮病中具有良好的防治作用,但过量的浮萍投放也会导致水体中鱼类质量明显下降。有报道指出,在用浮萍喂养罗非鱼的时候发现,当每千克鱼喂养浮萍小于 40 g 时,鱼类能正常生长,但当喂养量大于 40 g 时,罗非鱼的病死率随浮萍的增加而上升^[39]。因此,在鱼类养殖过程中应密切关注水体环境和投喂量的动态平衡。

浮萍干物质中粗蛋白可达到 26.3%~45.5%^[40],可部分替代玉米和大豆等高蛋白动物饲料。与常用饲料相比,浮萍蛋白质氨基酸模式与大豆非常相似,且赖氨酸含量很高,因此浮萍可以替代大豆饼的饲料蛋白源^[41]。王清春等^[42]在幼虫饲料中添加浮萍和添加纯麦麸的效果无显著差异,均能保证黄粉虫幼虫正常生长发育,且在成虫的饲料中用浮萍替代豆饼,能明显提高产卵数,延长寿命。目前传统饲料蛋白质价格昂贵,开发浮萍作为替代品能够降低饲料成本,可促进养殖业的发展。

3 浮萍的能源价值

某些浮萍品种具有较高的淀粉含量,可作为制作生物能源的原材料,以减少化石燃料对环境的污染^[14-15]。浮萍淀粉会因品种、生长状态和发育阶段的不同而变化,但只要对其进行科学的淀粉诱导积累,便能替代谷类作物增加生物乙醇和生物能源的产量^[43]。能源短缺逐渐成为全世界范围内所面临的问题。加之现如今大部分国家依赖于传统能源(如原油、煤矿等),已经引起了严重的大气污染和环境破坏^[44]。生物乙醇的出现,既能减缓人们对矿物燃料的依赖,又能降低对生态环境的污染,被认为是一种极具潜力的新型能源物质^[45],但是,生物乙醇的生产主要材料是谷类作物和甘蔗,如果这些陆生作物用于能源生产,会对粮食及农业用地造成极大的压力^[46]。因此,研究者们逐渐将目光转移到水生生物,希望能够

代替陆生生物生产生物能源。

一般认为,增加浮萍光合产物和降低呼吸消耗是增加淀粉含量的2种有效途径。就增加光合产物的途径,PANKEY等^[47]认为补充CO₂虽然能增加光合产量,但也促进了浮萍的增长,结果导致呼吸作用加强,从而不进行淀粉的积累,而增加光照时间即能提高光合产物又能减少呼吸消耗。CUI等^[48]研究发现,在5,15,25℃和光照强度为40.5 μmol·m⁻²·s⁻¹条件下,延长光照时间可以增加淀粉含量。在降低呼吸消耗的众多途径中,营养缺失是最有效的途径之一。缺氮使淀粉分解活性降低,从而诱导淀粉积累。缺磷可提高蔗糖合成途径来增加淀粉的积累量。另外,部分生物调节剂对浮萍生物量和淀粉的积累也起作用。赵昭等^[49]在研究ABA对浮萍的影响时发现,在浮萍形成休眠体的过程中α,β—淀粉酶的活性整体呈下降趋势,对糖分的利用率降低,淀粉含量增加。

除乙醇发酵之外,厌氧消化处理技术也逐渐得到重视。姜楠等^[50]对浮萍厌氧消化产沼气进行试验,发现浮萍和剩余污泥组合在整个消化过程中pH值适宜时产气的时间最长,挥发性脂肪酸(VFAs)积累量最高,积累产气最高,其中甲烷含量为56.9%,比浮萍和剩余污泥单独厌氧消化组分别高13.0%和9.0%。整个反应过程中NH₄⁺-N含量稳定,未出现氨抑制现象,淀粉酶活性、脱氢酶活性以及微生物活性在此过程中活性较强,且营养物质充足,浮萍经碱处理后的厌氧消化甲烷产量比未处理的高8.0%。在厌氧消化前对浮萍进行预处理,可破坏浮萍组织中的纤维素、半纤维素空间交联结构,可以提高其水解效率及可生物降解性,即热碱预处理可缩短厌氧消化产沼气的时间。

4 浮萍的药用价值

现代医学对浮萍的研究发现,浮萍中含有黄酮类物质,如荭草素、牡荆素、木犀草苷等,具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤、治疗心脑血管疾病等作用^[16~18]。王红等^[51]用HPLC法同时对15个产地的浮萍黄酮类成分进行分析,得出浮萍体内4种黄酮类含量顺序为荭草苷>牡荆苷>木犀草素>芹菜素,木犀草素和芹菜素在不同产地浮萍中的含量相对稳定,而荭草苷和牡荆苷的含有量存在明显差异。蒋祥亮等^[52]对多个地区浮萍黄酮类含量分析结果表明,荭草素、牡荆素、木犀草苷的含量更适合作为浮萍材料测定的指标性成分,陕西和山西的浮萍药材质量较好。

彭亮等^[53]研究紫萍提取物能够保护H₂O₂对内皮细胞氧化损伤的作用,说明浮萍可能具有延缓皮肤衰老的作用。李静等^[54]在浮萍水煎液对皮肤效果的实验中发现,0.5,0.25 g·mL⁻¹浮萍萃取液对小鼠背部皮肤具有延缓衰老的功能;林捷鹏等^[55]用5%的NaOH溶液萃取浮萍内的叶绿素锌钠制作成的润肤霜,其表面光滑无气孔及异色斑点,在40℃和-5℃的条件下放置24 h均未出现膏体油水分离现象,既保证了品质,又降低了成本,且工艺绿色。

5 浮萍在农业和稻作生产上的应用

在农业系统中,氮素主要以铵态氮(NH₄⁺)的形式蒸发,不仅导致氮素流失,降低农田氮素利用率,而且会使水体富营养化、土壤酸化以及温室气体N₂O的排放,严重影响作物产量的提高并对生态环境造成破坏^[56]。近年来,我国大力发展环境友好型农业,尤其是2015年的关于农业化肥用量的“零增长行动计划”中要求,到2020年不增加工业肥料用量以减少对农业环境的破坏,在此前提下,使作物产量得到进一步提升的关键在于如何降低农田氨氮等营养元素的流失^[57]。因此,浮萍等水生生物作为一种“肥料库”逐渐受到人们的重视。

在水稻生产中,由于浮萍生长迅速,会优先利用容易吸收的NH₄⁺,同时浮萍可在短时间内将水面全部覆盖,形成一种保护膜,阻止氨氮的蒸发,降低氨氮等营养的流失,另外,浮萍覆盖还可截取光能,抑制下层稻田杂草的生长,降低水稻茎鞘纹枯病的发生^[19~20]。水稻晒田后,浮萍腐化迅速(一般周期为7 d),增加微生物活性,并且将自身积累的大量氮素释放到土壤中,改善土壤理化性质,从而供给水稻氮素营养,提高光合效率,增加干物质积累以及水稻产量^[58]。

YAO 等^[20] 报道,稻田施用浮萍吸收纯氮可达 $18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中 70%~73% 的氮素来自于人工肥料,且浮萍和微生物的互作对氮素的转移具有显著效果。ZIMMO 等^[59] 发现,施用纯氮水平在 90, 180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的条件下,浮萍可有效减少稻田氨氮的流失,比仅氮肥处理的产量平均分别高 9.8% 和 9.4%。这种将浮萍作为肥料缓冲剂施用,既能够提高无机肥料的肥效,又能减少环境污染,改善稻田土壤性质,提高水稻根系活力。但是,作为稻田生产中常见的水生植物,笔者调查发现,水稻插秧前后若浮萍滋生,会严重影响秧苗的返青发棵,农民也经常将其看成杂草的一种,通过各种方法来抑制其生长^[60]。对于两种截然不同的说法,笔者认为可能是由于水稻在不同阶段对生长空间竞争力的差异引起的。水稻移栽后,苗势较弱,此时浮萍对生长空间的竞争力大于秧苗,导致水稻不易返青活棵,到分蘖拔节期及以后,水稻生长空间的竞争力增强,因此浮萍保肥增效的作用逐渐明显。

6 展望

笔者认为,整合浮萍在各个领域的作用,将作为植物修复污水中的浮萍作为饲料和生物能源的原材料,既能降低污水处理系统中浮萍处理不科学的现象,又能最大化地发掘其利用价值,缓解能源紧张问题,提高其经济效益。而就浮萍在农业生产领域中的作用,笔者认为可在以下几个方面进行扩展研究:(1)由于稻田生态系统受人工干预较大,在整个水稻生长季水肥变化与自然生态系统差异较大,在这一前提下,了解浮萍的生长发育规律及其对农业生态系统的影响是其应用到农业生产上的基础;(2)在大田生产中,根据水稻在不同生育期特点施用肥料、农药及杀虫剂等物质,在此过程中,浮萍和不同时期的水稻之间、浮萍与上述主要栽培措施之间存在的内部关系与互作机理是农田浮萍开发利用的关键。(3)明确浮萍对稻作生产的影响,充分分析浮萍在稻田生态环境中的作用,制定合理的利用方式和途径是综合利用稻田浮萍的最终目的。

参考文献:

- [1] 许亚良, 张家明. 海南岛浮萍群落的分布及影响群落结构的因素 [J]. 热带生物学报, 2015, 6(3): 304–309+314.
- [2] 黄猛, 许亚良, KHAESO K, et al. 水杨酸诱导膨胀浮萍 (*Lemna gibba* SH0204) 开花 [J]. 植物生理学报, 2015, 51(4): 559–565.
- [3] LES D H, CRAWFORD D J, LANDOLT E, et al. Phylogeny and systematics of Lemnaceae, the duckweed family [J]. Systematic Botany, 2002, 27(2): 221–240.
- [4] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 细脉浮萍和紫背浮萍在污水营养条件下的生长特性 [J]. 环境科学, 2004(6): 59–64.
- [5] 黄明星, 朱思思, 张秋鸿. 浮萍研究进展 [J]. 生物学杂志, 2016, 33(3): 92–98.
- [6] 朱晔荣, 马荣, 刘清岱, 等. 浮萍相关研究的几方面重要进展 [J]. 生物学通报, 2010, 45(4): 4–6.
- [7] 薛慧玲, 张云峰, 陈祈磊, 等. 浮萍形态分类鉴定与染色体观察 [J]. 北方园艺, 2014(16): 88–92.
- [8] 梁艺怀, 张琨, 张京信, 等. 青萍生长抑制试验对稀脉浮萍的适用性研究 [J]. 生态毒理学报, 2015, 10(1): 305–311.
- [9] 侯文华, 宋关玲, 汪群慧. 浮萍在水体污染治理中的应用 [J]. 环境科学研究, 2004(S1): 70–73.
- [10] 蔡树美, 张震, 辛静, 等. 光温条件和 pH 对浮萍生长及磷吸收的影响 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6): 63–66+75.
- [11] 王桢桢, 潘杨, 翟笑伟. 封闭景观水体的表观污染机制研究 [J]. 环境工程, 2015, 33(4): 9–13.
- [12] ALAERTS G J, MAHBUBAR M R, KELDERMA. Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon [J]. Water Res, 1996, 30(4): 843–852.
- [13] 张植元, 葛静远, 谷兵, 等. 新型鱼用饲料原料紫背浮萍人工养殖的初步研究 [J]. 中国饲料, 2017(9): 35–38+43.
- [14] ZHAO Y, FANG Y, JIN Y, et al. Pilot-scale comparison of four duckweed strains from different genera for potential application in nutrient recovery from wastewater and valuable biomass production [J]. Plant Biology, 2015, 17: 82–90.
- [15] XU Y L, FANG Y, LI Q, et al. Turion, an innovative duckweed-based starch production system for economical biofuel manufacture [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 124: 108–114.
- [16] 樊修和, 吴启南, 蒋征, 等. UPLC-MS/MS 法测定不同产地浮萍中 9 种核苷类成分的量 [J]. 中草药, 2015, 46(21): 3253–3257.
- [17] WANG B, PENG L, ZHU L, et al. Protective effect of total flavonoids from *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid on human umbilical vein endothelial cell damage induced by hydrogen peroxide [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2007, 60(1): 36–41.

- [18] 苏春英, 苏本华, 孙静. HPLC 法测定浮萍中芹菜素的含量 [J]. *中医药信息*, 2013, 30(3): 32–34.
- [19] LI H, LIANG X, LIAN Y, et al. Reduction of ammonia volatilization from urea by a floating duckweed in flooded rice fields [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 1890–1895.
- [20] YAO Y L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) as green manure for increasing yield and reducing nitrogen loss in rice production [J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 273–282.
- [21] ZHOU L J, CAMPOS Q, CAMPOS L C. Removal of selected emerging PPCP compounds using greater duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) based lab-scale free water constructed wetland [J]. *Water Res*, 2017, 126: 252–261.
- [22] LUO L, HE H J, YANG C P, et al. Nutrient removal and lipid production by *Coelastrella* sp. in anaerobically and aerobically treated swine wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 135–141.
- [23] 辛静, 张震, 钱晓晴, 等. 浮萍去除污水处理厂出水中氮磷的比较研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(11): 100–103.
- [24] 彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 等. 浮萍塘中氮归趋模式模拟分析 [J]. *环境科学*, 2006(10): 1963–1968.
- [25] PAPADOPOULOS F H, TSIHRINTZIS V A, ZDRAGAS A G. Removal of faecal bacteria from septage by treating it in a full-scale duckweed-covered pond system [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(12): 3130–3135.
- [26] LU Y F, ZHOU Y R, NAKAI S, et al. Stimulation of nitrogen removal in the rhizosphere of aquatic duckweed by root exudate components [J]. *Planta*, 2014, 239(3): 591–603.
- [27] 蔡树美, 刘文桃, 张震, 等. 不同品种浮萍磷素吸收动力学特征 [J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(2): 48–52.
- [28] 谢朦, 张飞, 章莹颖, 等. 3种浮萍对富营养化水体的修复 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2447–2453.
- [29] XIE W Y, HUANG Q, LI G, et al. Cadmium accumulation in the rootless macrophyte *Wolffia globosa* and its potential for phytoremediation [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, 15(4): 385–397.
- [30] SETH C S, CHATURVEDI P K, Misra V. Toxic effect of arsenate and cadmium alone and in combination on giant duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) in response to its accumulation [J]. *Environmental Toxicology*, 2007, 22(6): 539–549.
- [31] OSAMA R, IBRAHIM M G, FUJIIA M, et al. Potentials of duckweed (*Lemna gibba*) for treatment of 1,4-dioxane containing wastewater using duckweed multi-ponds system [J]. *Energy Procedia*, 2019, 157: 676–682.
- [32] 唐利萍, 方扬, 靳艳玲, 等. 重金属镉超富集浮萍品种筛选及其对水体中镉的去除效果 [J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(5): 830–836.
- [33] 李阳, 成家杨, 钟钰, 等. 2种浮萍干粉对 Cd²⁺ 的吸附性能 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(15): 248–254.
- [34] 郭国强. 颗粒饲料结合浮萍培育大规格草鱼种高产试验 [J]. *中国水产*, 2006(8): 77–79.
- [35] CRAWFORD K M, WHITNEY K D. Population genetic diversity influences colonization success [J]. *Molecular Ecology*, 2010, 19(6): 1253–1263.
- [36] 李阳, 成家杨, 钟钰, 等. 浮萍多样性对富营养化水体净化效果的影响 [J]. *南方农业学报*, 2017, 48(2): 259–265.
- [37] 张亚辉, 龚江, 梁杰锋, 等. 体重和温度对草鱼摄食小浮萍的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(1): 56–62.
- [38] 王付民, 张璐, 陈杖榴. 浮萍生物富集洛克沙胂与阿散酸的动力学特性研究 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2007(4): 79–83.
- [39] 李新波, 蔡发国, 邓岳松. 浮萍饲用价值研究进展 [J]. *饲料研究*, 2011(10): 3–6.
- [40] 印万芬. 我国主要浮萍科植物的综合开发利用 [J]. *资源节约和综合利用*, 1998(2): 46–48.
- [41] 孔春林, 陈宇. 开发浮萍作饲料 [J]. *广东饲料*, 2006(1): 40–41.
- [42] 王清春, 刘玉升, 方加兴. 饲喂浮萍对黄粉虫生长发育及繁殖的影响 [J]. *环境昆虫学报*, 2017, 39(3): 667–672.
- [43] CHENG J J, STOMP A M. Growing duckweed to recover nutrients from wastewaters and for production of fuel ethanol and animal feed [J]. *Clean-Soil Air Water*, 2009, 37(1): 17–26.
- [44] VERMA R, SUTHAR S. Utility of Duckweeds as source of biomass energy: A review [J]. *Bioenergy Research*, 2015, 8(4): 1589–1597.
- [45] JAMBO S A, ABDULLA R, AZHAR S H M, et al. A review on third generation bioethanol feedstock [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 756–769.
- [46] GE L L, WANG P, MOU H J. Study on saccharification techniques of seaweed wastes for the transformation of ethanol [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(1): 84–89.
- [47] PANKEY R D, DRAUDT H N, DESROSIER N W. Characterization of the starch of *Spirodela polyrrhiza* [J]. *J Food Sci*, 1965, 30(4): 627–31.
- [48] CUI W, XU J, CHENG J J, et al. Starch accumulation in duckweed for bioethanol production [J]. *Biol Eng*, 2011, 3(4): 187–197.
- [49] 赵昭, 史慧娟, 张楠, 等. 浮萍休眠体形成过程中的淀粉积累 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(22): 315–318.
- [50] 姜楠, 任洪艳, 阮文权, 等. 浮萍与剩余污泥厌氧消化产沼气实验 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(8): 4757–4765.
- [51] 王红, 蒋征, 刘杰, 等. HPLC 法同时测定 15 个产地浮萍中 4 种黄酮类成分 [J]. *中成药*, 2016, 38(7): 1569–1573.
- [52] 蒋祥亮, 刘聪燕, 陈彦, 等. 不同产地浮萍中 5 种黄酮成分量及抗氧化活性的化学模式识别研究 [J]. *中草药*, 2017,

- 48(5): 985–990.
- [53] 彭亮, 李知敏. 紫萍提取物对过氧化氢诱导内皮细胞氧化损伤的保护作用研究 [J]. *时珍国医国药*, 2009, 20(4): 996–998.
- [54] 李静, 王媚, 张晓幸, 等. 浮萍水煎液延缓皮肤衰老的实验研究 [J]. *右江民族医学院学报*, 2016, 38(5): 521–523.
- [55] 林捷鹏, 薛俊发, 陈绍芬, 等. 浮萍润肤霜的研制 [J]. *河南化工*, 2011, 28(8): 16–19.
- [56] CHEN M P, SUN F, SHINDO J. China's agricultural nitrogen flows in 2011: Environmental assessment and management scenarios [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2016, 111: 10–27.
- [57] LIU X J, VITOUSEK P, CHANG Y H, et al. Evidence for a Historic Change Occurring in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(2): 505–506.
- [58] HUNG SW, YU L Q, DU AN, G F, et al. Control of weeds and rice sheath blight disease in paddy fields by rice chaff and duckweeds (*lemna spp.*) [J]. *Plant Prot.*, 2003, 29: 22–26.
- [59] ZIMMO O R, STEEN N P, GIJZEN H J. Nitrogen mass balance across pilot-scale algae and duckweed-based wastewater stabilisation ponds [J]. *Water Res.*, 2004, 38: 913–920.
- [60] 韦家书. 水稻田浮萍草综合防治技术 [J]. *南方农业*, 2016, 10(22): 99–100.

Application Value and Comprehensive Utilization of Duckweed

ZHAO Xinyong, WANG Youshuang, WANG Jiankang, DING Chengwei, HU Tingting,

WU Yuling, LI Simeng, ZHAO Yipeng

(Xuzhou Institute of Agricultural Sciences, Xuzhou, Jiangsu 221000, China)

Abstract: Duckweed is a new environmental and energy plant and gradually receives public attention. Duckweed plants grow fast, and is abundant in biological protein and starch with a high capacity of adsorption and transfer of nitrogen and phosphorus, organic matter and heavy metals. Duckweed is well reported to be used not only as a phytoremediation agent with good effect and low cost, but also as raw materials for feed and bio-energy, while a little research is documented on duckweed in agricultural production like paddy rice in their symbiosis and synergism. Some researches showed that duckweed had different influences on paddy rice in different growing seasons, had an inhibitory effect on rice rejuvenation at the transplanting stage and at the tillering and joint stage, and could inhibit the volatilization of ammonium nitrogen (NH_4^+) in the paddy field, which was beneficial to rice growth and yield. The research and development of duckweed as phytoremediation agent, feed, energy and medicine were reviewed, and prospects of comprehensive utilization of duckweed and research of duckweed in paddy field were proposed.

Keywords: duckweed; sewage treatment; feeding value; energy value; medicinal value; agriculture value

(责任编辑:钟云芳)