

万合锋, 武玉祥, 秦华军, 等. 浮萍科植物水环境修复及其资源化利用综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(2): 6–10.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.02.002

浮萍科植物水环境修复及其资源化利用综述

万合锋¹, 武玉祥¹, 秦华军¹, 龙云川¹, 刘勇², 袁果¹

(1. 贵州省生物研究所, 贵州贵阳 550009; 2. 贵阳学院生物与环境工程学院, 贵州贵阳 550005)

摘要:生物生态修复技术以其处理效果好、投资少、耗能低、操作简单、不形成二次污染和生态景观效果好等优点, 在水环境修复中被广泛应用。植物修复是生物生态修复技术的一种, 选取适宜的水生植物是其关键。浮萍科 (Lemnaceae) 植物具有生长速度快、富含生物蛋白质和淀粉、适应环境能力强、易管理的特点, 且具有较高的氮磷、有机物和重金属等吸附转移的能力, 因此常被作为污水生物生态修复处理和环境毒理学试验的优势水生植物和农业生产以及能源行业的重要原材料。系统论述浮萍科植物的生物学特征, 介绍其在环境修复、环境毒理学以及能源、农业生产等领域的开发利用, 提出目前浮萍科植物在水环境修复领域及资源化利用方面存在的主要问题, 并对未来的研究方向进行展望。

关键词:浮萍; 水环境; 生物生态修复; 资源化利用; 植物修复; 吸附转移能力; 环境毒理学试验; 优势水生植物; 生物学特征; 环境修复

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)02-0006-04

随着社会经济的发展和城镇化、工业化程度的提高, 环境污染问题日益突出, 影响人们的正常生活和健康^[1]。治理污染水体常用的物理化学方法投资大且容易造成二次污染^[2-3]。生物生态修复技术是近几年迅速发展起来的污水治理新技术, 遵循生态系统平衡的自然规律, 通过培养动植物、微生物来吸收、降解^[1]、转化和转移水中的污染物^[3], 常用的工程措施有人工湿地、生物浮岛、净化塘、滤坝和滤床等^[1,3], 具有处理效果好、成本低、操作简单、不会形成二次污染和具有美学价值等特点^[2,4-5]。

植物修复是生物生态修复的一种, 主要通过利用水生植物富集、转移氮、磷和重金属等污染物质来治理和调节污染水体, 国内外对该技术的应用研究较多^[6-7], 也展现出了很好的修复效果^[8]。本文以浮萍科植物^[4]为论述对象, 综述其在环境修复中的作用, 为探索低成本、低能耗、生态景观效果好的治污新方法提供参考。

1 浮萍科植物的生物学特征

1.1 植物学分类

水生植物浮萍 (*Duck weed*)^[9] 是浮萍科 (Lemnaceae) 植物的统称^[10], 属被子植物门单子叶植物纲棕榈亚纲浮萍目浮萍科, 属、种分类不完全一致, 现已有的几种分类是 5 属 37 种、5 属 40 种、5 属 38 种、3 属 6 种、4 属 28 种^[4-5,10-14]。其中, 5 属分为多根紫萍属 (*Spirodela*)、少根紫萍属 (*Landoltia*)、浮萍属 [青萍属 (*Lemna*)]、芜萍属 (*Wolffia*) 和扁平无根芜萍属

(*Wolffiella*)^[4,10,13]; 3 属分为紫萍属 (*Spirodela*)、浮萍属 (*Lemna*)、芜萍属 (*Wolffia*)^[11]。

常见的浮萍科植物^[11]有紫萍属的紫萍 (*S. polyrrhiza*)^[15] (别称紫背浮萍)^[16-17]、少根紫萍^[10]; 浮萍属的品藻 (*L. trisulca*)、青萍 (*L. minor*) (别称浮萍^[18-19]、小浮萍^[20-21])、细脉浮萍 (*L. aequinoctialis*)^[22]、稀脉浮萍 (*L. perpusilla*)、膨胀浮萍 (*L. gibba*)^[10]、三叶浮萍 (*L. paucicostata*)^[23]; 芜萍属的芜萍 (*W. arrhiza*)^[11]。近 1 个世纪的研究多集中在青萍、膨胀浮萍、紫萍和少根紫萍等 4 个品种上^[10]。

1.2 形态特征

浮萍科植物是形体最小、结构最简单的被子植物之一, 植株为叶状体, 呈倒卵形或椭圆形。其组成为 (3~6) mm × (2~4) mm 的叶状体加上长 2~5 cm、直径小于 0.5 mm 的 1 条细根^[24], 叶状体呈绿色, 背面有时呈紫色^[10,22]。

1.3 繁殖方式

浮萍科植物主要是无性繁殖^[5], 整个植株高度退化为一个叶状体, 成熟株体从叶状体边缘分生新芽孢, 芽孢发育长大后与母体脱离形成幼体, 数代相连, 有较大的倍增时间和周生产量, 日相对增长率可以达到 0.153~0.519^[25], 4 周内可以繁殖 10~20 次, 繁殖速率近似指数增长^[10], 有较高的生物量增长率^[15], 在环境条件适宜, 营养资源充分时, 繁殖会持续下去, 年干产量高达 55 t/hm²^[18]。另外, 还具有高等植物的特征, 兼具有性繁殖 (种子繁殖) 特点^[26], 越冬前其夹囊或开口内生椭圆形的冬芽, 脱离母体沉入水底, 翌年再浮出水面形成新的植株^[5]。

1.4 生态习性

浮萍科植物生长的 pH 值和温度域较宽^[11]。有研究认为, 浮萍的可生长温度为 10~35 ℃^[27] 或 2~35 ℃^[11], 最佳生长温度为 25 ℃^[27], 当水温低于 5 ℃ 时, 浮萍会进入休眠状态沉入水底, 水温回升后重新恢复生机^[27], 通常 3 月下旬至 4 月底, 浮萍迅速生长, 5 月起繁殖速度和生物量趋于稳定, 并

收稿日期: 2016-08-01

基金项目: 贵州科学院青年基金 (编号: 黔科院 J 合字 [2015] 05 号、黔科院 J 合字 [2015] 04 号)。

作者简介: 万合锋 (1986—), 男, 河南南阳人, 硕士, 助理研究员, 主要从事生物生态修复技术及资源化利用研究。E-mail: whfeng@126.com。

逐渐开始衰败^[28]。

1.5 地理分布

从热带到温带,从淡水到半咸水,从静水到缓流均可见到浮萍科植物^[24],分布遍及世界各地^[10],在多数温带至热带地区全年可以见到^[5,18],多生长于水田、池沼、湖泊等静水中^[29],在氨态氮含量较高的夏季自然水体中也可以见到^[11]。

人们对浮萍的研究已广布于江苏(紫萍、青萍)^[11]、广西(青萍)^[21,30]、四川(浮萍属)^[30-31]、安徽、浙江(浮萍属)^[32-33]、湖北^[24]、山东^[33]、上海^[34](浮萍属种)等省(市、区),其中污染较为严重的云南滇池稀脉浮萍和紫背浮萍较多^[35],因此其研究主要集中在浮萍属和紫萍属上。

2 浮萍科植物在环境修复中的应用

2.1 氮磷吸收转移

2.1.1 吸收机理 浮萍类植物是吸收、转化氮磷等营养物质的重要植物类群^[22],其主要通过促进硝化/反硝化速率来提高系统对总氮(total nitrogen,简称 TN)以铵态氮与硝态氮的形式)的去除^[9]。夏季污水中的氨态氮($\text{NH}_3 - \text{N}$)可通过气态氮挥发、浮萍系统吸收/吸附和硝化反应去除,硝态氮($\text{NO}_x - \text{N}$)完全通过浮萍系统吸收/吸附去除;冬季硝化反应受到抑制,污水中的氨态氮主要通过气态氮挥发去除, $\text{NO}_x - \text{N}$ 含量保持稳定^[34]。浮萍科植物会优先吸收氨态氮^[13,20],只有当水体中的大部分氨态氮被消耗掉以后,才开始大量吸收其他形态的氮^[13]。水体中氮磷的去除量与浮萍体内氮磷养分的积累量动态类似,二者在数量上十分接近,说明水体中氮磷的去除主要是通过浮萍对氮磷的吸收来实现的^[36]。污水处理中常用浮萍与其他水生植物协同吸附水中的污染物质^[36-37]。

2.1.2 影响因素

2.1.2.1 温度、pH 值的影响 高温和低温对浮萍的生长均有抑制作用,而低温的抑制作用更明显,低温下浮萍体内与磷代谢有关的酶活性水平较低,限制浮萍对磷的吸收^[27]。种云霄等认为,稀脉浮萍和紫背浮萍的氮磷含量受培养液温度、光照影响,低温可导致氮含量降低,低温和低光照可导致磷含量降低^[35]。浮萍正常生长的水体 pH 值为 6~9^[20],但也可在 pH 值为 4 的条件下存活^[38]。吴雪飞等调查发现,紫萍和青萍生长水体的 pH 值变化范围为 4.5~7.5^[11],偏离最佳生长 pH 值时,浮萍的生长和对磷的去除将受到抑制^[27]。

2.1.2.2 溶液中氮磷含量的影响 种云霄等研究发现,浮萍氮磷含量受培养液中氮磷含量影响,低含量氮磷可导致浮萍氮磷含量降低^[35],实际应用中可根据污水中氮磷含量选择品种进行去除^[4,35]。

氮对浮萍生长的抑制主要是通过不同形态的氮和非离子态氮实现的,且氮的抑制尤为明显^[22]。在氨态氮为唯一氮源的情况下,当氨态氮含量为 0.2~2.0 mg/L 时,浮萍生长明显被抑制;氨态氮含量 > 2.0 mg/L 时,基本不能生长^[20];当 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量 ≤ 40 mg/L 时,对浮萍生长没有影响^[20]。

不同磷初始含量可影响紫萍对磷的吸收效率,蔡树美等将水体初始磷含量设定为 0.1~15.0 mg/L 时发现,紫萍累积吸收磷量和吸收磷能力均随磷初始含量的升高而增加,当初始磷含量为 45.0 mg/L 时,紫萍对磷的吸收量和吸收能力下

降,生长受到抑制;初始磷含量在 0.3~3.0 mg/L 范围内时,紫萍对磷的去除率会受到影响^[16]。

2.1.2.3 表面活性剂的影响 溶液中的有机物含量会影响浮萍对氮磷的吸收,被高含量有机物污染的浮萍对氮磷的吸收力降低^[37]。精细化工行业生产中使用的表面活性剂,会毒害浮萍生长,影响其对水体氮磷的吸收^[6]。储超等通过采用室内培养模拟富营养化水体的方法得出,当阴离子型表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(sodium dodecyl benzene sulfonate)和阳离子型表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(cetyltrimethylammonium bromide)的含量达到 10 mg/L 时,紫背浮萍明显受到损伤,氮磷吸收率出现负值,尤其对磷吸收的影响更为明显^[6]。

2.1.3 氮磷吸收效果 浮萍科植物对氮磷的吸收具有能力强^[4]、投资少、能耗低、对污染物去除效果好等特点^[36,39],利用它净化污水改善水质已成为环境领域的研究热点^[10,40]。吴雪飞等通过对江苏省水域中的浮萍进行研究得出,浮萍可在氨态氮、硝态氮、总氮、总磷含量范围分别为 0~42、0.2~2.0、0.2~45.0、0.02~13.00 mg/L 的水体中生存^[11];薛慧玲等研究得出,紫背浮萍可适应的氮、磷浓度至少分别为 140、224 mg/L,且对磷有较强的去除能力^[31]。

浮萍能有效转化高含量氨态氮废水中的氮元素,因此在净化高含量氨态氮废水(养殖污水)领域具有较大潜力^[41]。张浩等为寻找处理高含量氨态氮废水(猪场废水等)的浮萍品种,对采集的 520 株浮萍品种分别在 400、250 mg/L 氨态氮下进行初筛和复筛,最终获得 2 个具有较强氨态氮胁迫耐受性的优势品种——少根紫萍和多根紫萍;通过验证试验发现,少根紫萍可在 800 mg/L 氨态氮废水中存活^[38]。

不同种浮萍对水体氮磷的吸收去除效果不同。辛静等以某污水处理厂的二级出水为供试水,考察少根紫萍和稀脉浮萍对水中氮、磷的去除及积累情况得出,稀脉浮萍对水中总氮、总磷的去除量分别是少根紫萍的 1.6、2.2 倍,且体内的氮、磷积累量分别是少根紫萍的 1.6、1.9 倍^[36]。汪宴廷等研究 3 种浮萍(芜萍、少根紫萍、青萍)对 3 种不同稀释倍数猪场厌氧废水中氮、磷的净化效果,结果显示,少根紫萍对污水氮、磷的净化率超过了 75%,净化能力优于芜萍和青萍,适合作四川盆地净化养殖废水中氮、磷的优化品种^[30];蔡树美等研究表明,稀脉浮萍适用于低磷含量污水的净化,紫萍适用于高磷含量污水的净化^[42];鲍妹等在户外条件下研究云南本地的 4 个浮萍品种在不同氮磷含量污水中的生长情况,结果发现,不同浮萍品种在不同氮磷含量污水中的最大生长速率、氮磷含量和氮磷固定能力存在明显的种属差异,其中本地多根浮萍具有最高的生长速率[7.38 g/(m²·d)]和氮固定能力[336.47 mg/(m²·d)]^[4]。

合理的工艺组合可以克服冬季气候对浮萍单种体系污水处理系统的不良影响,实现浮萍污水处理系统在全年气候条件下的连续运行和对污水中氮、磷的高效去除^[39]。在处理废水时最好选择浮萍与其他水生植物的混养体系,以达到较稳定的修复效果(特别是对有机污染物的去除^[43])。例如,黄辉等在以稀释猪场厌氧废水为供试污水的条件下研究认为,在低有机污染条件下,浮萍单种体系对污水中氮、磷的净化效果较好,但是当水体有机污染程度较高时,混养体系不仅能高

效去除污水中的氮、磷,也能稳定良好地去除水体中的高有机污染物^[37,43];黄辉以养猪场废水为供试污水进行研究发现,在模拟冬季气候条件下,少根紫萍-水花生的混养体系对供试废水化学需氧量(chemical oxygen demand,简称 COD)、总磷(total phosphorus,简称 TP)、氨态氮的总去除率可维持在 80% 左右^[39]。因此,在利用浮萍去除水中氮、磷营养物质时,应优先考虑利用各地当季优势浮萍品种及不同品种浮萍的共生复合系统^[11]。

2.2 有机物吸收转移

一般情况,湿地植物在处理高负荷有机废水时会受到不同程度的氧化胁迫,而浮萍对有机污染胁迫具有较高的耐受性,且在胁迫去除后具有一定的恢复能力。研究浮萍对水中有机污染物的耐受规律,可为人工湿地植物的选择提供科学依据^[44]。刘娥等研究浮萍对有机污染胁迫的耐受能力及胁迫去除后浮萍的恢复规律发现,当 COD 小于 400 mg/L 时,浮萍未受到氧化胁迫;当 COD 达到 800 mg/L 时,浮萍体内的活性氧自由基(reactive oxygen species,简称 ROS)含量上升,细胞膜脂过氧化加剧,但抗氧化酶活性升高,抗氧化物质含量增加,浮萍可保持生长,胁迫去除后,抗氧化防御系统恢复到对照水平;值得注意的是,当 COD 超过 1 000 mg/L 时,会造成不可逆伤害,胁迫去除后也不能恢复正常生长^[44]。

2.3 富集重金属元素

浮萍在生长繁殖过程中对重金属、化学污染物质、有毒有害物质也具有一定的富集作用^[27,31]。

李伶等研究得出,浮萍可以吸收水体中低含量的镉,受高含量镉胁迫时反应敏感,可作为水体中镉含量的指示植物^[45]。唐艳葵等以青萍种浮萍为试验材料,考察金属离子含量梯度下青萍的生长状况、叶片色素含量以及金属离子含量对青萍金属离子吸收能力的影响,结果表明,金属离子含量越高,青萍生长受抑制的程度越严重;Cu(Ⅱ)对青萍的毒害大于 Pb(Ⅱ);在 Pb 含量为 40 mg/L、Cu 含量为 4 mg/L 时,青萍对 Pb、Cu 的平均单位鲜质量富集量分别为 26.09、2.49 mg/g,同时青萍的生长受到抑制,叶绿素含量急剧下降,氮、磷从细胞中溶出,得出青萍比较适宜修复低含量 Pb(Ⅱ)污染水体的结论^[21]。张如金等研究甲酸、苹果酸、柠檬酸等 3 种酸处理下的浮萍对铀吸附作用的影响发现,3 种酸处理下的浮萍对铀的吸附量明显提高^[46]。

2.4 生物指示作用

浮萍科植物还可作环境中的指示生物。李天煜研究了我国特有的浮萍属植物——稀脉浮萍对不同来源水(自来水、池塘水、湖水、渗滤液)水质的综合评价和指示效果,在 7 d 的观测期内发现,稀脉浮萍对水质具有一定的评价和指示作用,其叶状体相对增殖率可用于水质的生物学监测和综合评价^[24]。李伶等研究得出,浮萍是良好的水体污染物监测植物和水体重金属污染判定指示植物^[45]。

3 浮萍科植物在环境毒理学中的应用

浮萍科植物也是有毒化学品生物毒性评价的常用植物^[17,32],是国内外生态毒理学研究中重要的试验材料^[19],是最常用于毒性评价的维管束植物^[26]。金小伟等以我国本土紫背浮萍为试验材料,利用其生长抑制和叶绿素含量的变化,

在 96 h 的试验时间条件下成功地评价了 3 种氯酚类化合物(杀虫剂、有机溶剂和合成染料)的毒性效应^[17]。卫麦霞等以三叶浮萍为试验材料,采用光照恒温培养法评价了咪鲜胺及其制剂和主要代谢物对浮萍的生态环境效应和生物毒性^[47]。龚道新等以三叶浮萍为供试植物评价了咪鲜胺(prochloraz)及其制剂施保克(sportak)和主要代谢物对生态环境安全性、色素含量及组成的影响^[23]。戴灵鹏等以体数量、鲜质量和叶绿素为测试指标进行浮萍生长抑制试验,评价 Cu 和乙草胺单一和复合污染的毒性效应^[32]。纳米行业中纳米颗粒的大量生产和应用可能会向环境中释放生态毒性和水生生物毒性^[48];胡长伟等以不同含量的纳米 ZnO 处理浮萍(*Lemna minor* L.) 7 d 后发现,50 mg/L 纳米 ZnO 对浮萍产生了显著的胁迫作用^[33];梁艺怀等对我国本土常见的稀脉浮萍与标准试验生物青萍进行毒性效应终点和毒性响应差异比较试验,在环境基准研究和化学品安全管理中,青萍和圆瘤浮萍已在许多国家成为法定的植物毒性测试标准物^[26]。

浮萍在生物治理蓝藻水华中有一定的应用价值^[29]。微囊藻毒素影响生物体健康,甚至可通过食物链传递到人体,张玮等研究认为,浮萍可以去除 0.058 ng/mg 微囊藻^[29],浮萍塘能有效去除水体中的藻类,并将其维持在较低含量^[9]。

4 浮萍科植物在农业生产、能源等领域中的利用

浮萍科植物在农业和能源领域也存在一定的开发利用价值,是一种优质的饲料^[40],常用于草鱼、家禽和牲畜等的饲养^[4,17,23,31],并且可以降低稻田温室气体的排放量^[49]。例如,郑燕玲等通过构建“浮萍-黄粉虫”食物链显著降低养殖成本^[50];Wang 等研究认为,浮萍可以使稻田减排温室气体(CH₄、N₂O),稻田温室气体排放量降低 17% 左右^[49]。另外,浮萍富含生物蛋白质和淀粉^[40],可作为潜在的生物质能源原料开发^[4,14]。如作为生物乙醇生产的原料^[13,18,31],采用厌氧干发酵产生沼气、沼渣等持续利用。顾新娇等以浮萍和奶牛粪为发酵原料在中温条件下进行半连续厌氧干发酵试验,测得容积产气率可达 0.50 L/(L·d),原料产气率达 0.33 L/g [以挥发性固体(volatile solid,简称 VS)计]^[18]。黄卫东等对浮萍与猪粪(干质量比 1:1,湿质量比 7:1)的混合物、猪粪进行中温厌氧消化产气性能的比较发现,浮萍与猪粪混合物的厌氧消化性能较优,可以提高产气率^[51]。此外,浮萍还具有散热、透疹、利尿等功效,具有一定药用价值^[10]。

5 结语与展望

浮萍科植物具有生长速度快、富含生物蛋白质和淀粉、适应环境能力强、易管理的特点,且具有较高的氮磷、有机物和重金属等吸附转移能力,在污水废水生物生态修复处理、环境毒理学试验和农业生产以及能源行业中的应用已经有大量研究。在当今能源短缺和环境问题日益突出的情况下,浮萍作为生物质原料和优质水生植物在能源生产和环境保护中有巨大的潜在利用价值。

但也存在一些问题,一方面缺少科学管理,浮萍生物量的增长速率决定了其对氮磷的转化能力^[22];水体中浮萍的恶性增殖也会抑制藻的光合作用,阻碍水体的表面复氧,影响溶解氧(dissolved oxygen,简称 DO)含量,使水体厌氧且发黑发臭,

死亡的浮萍又会腐烂分解,进一步加剧水体的表观污染^[28],因此,须要科学管理、定期打捞,以防植物体在水中腐烂而导致氮磷重新进入水体产生污染^[16]。一般根据培养规模、氮磷的去除目标及投入劳动量的强度确定收获频率和收获量^[22]。另一方面研究地域局限,浮萍对水质净化和工程应用研究多集中在南方部分地区。多数地区还存在管理不善,甚至在氧化塘、池塘、湖泊等水环境中的浮萍多数处于无管理状态^[18]。这些问题既限制浮萍在水体净化中的开发利用,又增加水体富营养化和藻华的概率^[11]。

在今后的研究中,应继续开发浮萍在水体污染修复和非粮生物质能源开放中的价值;拓展研究其在温室气体减排、农业生产利用和药用等方面的价值;也要注意其在富集金属和病原体时的安全性问题。

参考文献:

[1] 王亚艳,张剑刚,倪鹏平,等. 原位生态修复技术在城市河道中的应用[J]. 环境工程,2015(3):11-16.

[2] 高翔,白红英,贺映娜. 水体生物-生态修复法在生态河道建设中的应用[J]. 地下水,2010,32(6):81-82.

[3] 王文广. 应用生物生态修复技术治理天津市水环境[J]. 水利水电工程设计,2013,32(2):23-26.

[4] 鲍姝,方扬,靳艳玲,等. 污水氮磷浓度对云南本地浮萍生长及氮磷去除的影响[J]. 应用与环境生物学报,2014,20(1):56-62.

[5] 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,2004,17(增刊1):70-73.

[6] 储超,刘红玉,周仁华,等. 表面活性剂对紫背浮萍吸收氮磷的影响[J]. 环境工程学报,2010,4(7):1571-1575.

[7] 王敏,唐景春,朱文英,等. 大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响[J]. 生态学报,2012,32(14):4535-4543.

[8] 张小龙,王晓昌,刘言正,等. 多级生态塘植物修复技术用于富营养化水体修复[J]. 中国给水排水,2015,31(4):95-98.

[9] 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,2006,27(10):1963-1968.

[10] 于昌江,朱明,马玉彬,等. 新型能源植物浮萍的研究进展[J]. 生命科学,2014,26(5):458-464.

[11] 吴雪飞,刘璐嘉,马晗,等. 江苏省夏季浮萍种类及其生长水环境调查[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(5):554-558.

[12] Azer S A. Taxonomic revision of genus *Lemna* L. (Lemnaceae Gray) in Egypt[J]. Annals of Agricultural Sciences,2013,58(2):257-263.

[13] 张飞,谢朦,唐杰,等. 太湖流域不同种浮萍淀粉积累的研究[J]. 可再生能源,2015,33(6):938-945.

[14] Xu Y L, Ma S, Huang M, et al. Species distribution, genetic diversity and barcoding in the duckweed family (Lemnaceae) [J]. Hydrobiologia,2015,743(1):75-87.

[15] 蒋征,王红,吴启南. PB 试验结合 BBD 响应面法优化浮萍多糖的提取工艺研究[J]. 中药材,2015,38(6):1283-1286.

[16] 蔡树美,诸海焘,钱晓晴,等. 不同磷初始浓度对紫萍生长及磷吸收效率的影响[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(1):88-92.

[17] 金小伟,查金苗,王子健,等. 氯酚类化合物对紫背浮萍生长及叶绿素含量的影响[J]. 中国环境科学,2013,33(12):2257-2261.

[18] 顾新娇,王文国,祝其丽,等. 浮萍与奶牛粪混合厌氧干发酵研究[J]. 环境污染与防治,2014,36(7):18-21.

[19] 宋志慧,黄国兰. 浮萍在水生态毒理学中的应用[J]. 环境科学与技术,2005,28(1):94-96.

[20] 种云霄,胡洪营,钱易. pH 及无机氮化合物对小浮萍生长的影响[J]. 环境科学,2003,24(4):35-40.

[21] 唐艳葵,韦星任,姚秋艳,等. 青萍在 Pb、Cu 污染水体植物修复中的应用研究[J]. 环境工程学报,2011,5(10):2209-2214.

[22] 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,2004,25(6):59-64.

[23] 龚道新,刘明洋,任竞,等. 咪鲜胺及其制剂和主要代谢物对三叶浮萍色素的影响[J]. 农业环境科学学报,2008,27(4):1672-1676.

[24] 李天煜. 稀脉萍(*Lemna paucicostata*) 对水质的综合评价和指示作用[J]. 生态毒理学报,2008,3(6):601-605.

[25] Ziegler P, Adelmann K, Zimmer S, et al. Relative *in vitro* growth rates of duckweeds (Lemnaceae)—the most rapidly growing higher plants[J]. Plant Biology,2015,17(1):33-41.

[26] 梁艺怀,张琨,张京佑,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.

[27] 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.

[28] 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(4):9-13.

[29] 张玮,赵以军,孙茜,等. 浮水草本浮萍对微囊藻毒素影响的试验[J]. 环境科学学报,2006,26(1):85-90.

[30] 汪宴廷,赵晶晶,颜珊,等. 三种浮萍对养殖废水中氮、磷的净化效果研究[J]. 四川畜牧兽医,2014(12):24-25.

[31] 薛慧玲,张云峰,陈祈磊,等. 水体中氮含量对紫背浮萍生长的影响[J]. 环境科学与技术,2013,36(增刊2):37-41.

[32] 戴灵鹏,张磊,陈露露,等. 铜与乙草胺对浮萍的联合毒性效应[J]. 农业环境科学学报,2009,28(4):772-776.

[33] 胡长伟,刘旭. 纳米 ZnO 对浮萍(*Lemna minor* L.) 的生态毒性及其聚集性和溶解性分析[J]. 农业环境科学学报,2012,31(9):1690-1695.

[34] 沈根祥,徐介乐,胡双庆,等. 浅水体浮萍污水净化系统的除氮途径[J]. 生态与农村环境学报,2006,22(1):42-47.

[35] 种云霄,胡洪营,钱易. 环境及营养条件对稀脉浮萍和紫背浮萍氮磷含量的影响[J]. 环境科学,2005,26(5):67-71.

[36] 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.

[37] 黄辉,刘杰,赵浩,等. 浮萍放养体系对污水氮磷的净化效果[J]. 农业环境科学学报,2007,26(增刊1):242-245.

[38] 张浩,方扬,靳艳玲,等. 耐高氨氮浮萍的筛选及优势品种的生长特性[J]. 应用与环境生物学报,2014,20(1):63-68.

[39] 黄辉. 冬季浮萍放养体系对养猪场废水的处理效果[J]. 环境科学与技术,2009,32(9):27-31.

[40] Goopy J P, Murray P J. A review on the role of duckweed in nutrient reclamation and as a source of animal feed[J]. Journal of Animal Science,2003,16(2):297-305.

[41] Bergmann B A, Classen J J. Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed[J]. Transactions of the ASAE,2015,43(2):263-269.

[42] 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.

罗芳,田苗,夏庆利,等. 新型职业农民主导下的家庭农场规模经营研究述评与展望[J]. 江苏农业科学,2018,46(2):10-16.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.02.003

新型职业农民主导下的家庭农场规模经营研究述评与展望

罗芳¹,田苗²,夏庆利³,孙芳敏¹,王庆¹

(1. 黄冈师范学院商学院,湖北黄冈 438000;2. 肇庆学院经济与管理学院,广东肇庆 526000;3. 黄冈师范学院教务处,湖北黄冈 438000)

摘要:家庭农场形成较早,是各国普遍采用的一种农业经营模式,学界给予了高度关注。新型职业农民则出现得较晚,且该提法也不具有普遍性,研究相对较少。新型职业农民主导下的家庭农场规模经营是中国当前的实践热点问题,有必要对其相关理论观点进行整理。首先,回顾新型职业农民的内涵、成员结构、培育,重点介绍培育的必要性、模式、效果;其次,梳理家庭农场内涵、特征、发展现状、优势、影响规模的因素、适度规模界定、经营绩效及风险,并重点聚焦经营绩效,包括指标体系的构建、评估以及绩效影响因素等。再次,分析新型职业农民与家庭农场耦合机制的研究成果。最后进行述评与展望。

关键词:新型职业农民;家庭农场;规模经营;综述

中图分类号:F324.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)02-0010-07

家庭农场源于欧美,发展至今已有 200 多年的历史^[1]。在全球 5.7 亿多个农场中,有 5 亿个以上由家庭经营,管理了 70%~80% 的耕地,生产的粮食约占世界总产量的 80%^[2]。联合国将 2014 年确定为国际家庭农业年,以突出家庭农场及农户在保障粮食安全和消除贫困中作出的重要贡献。家庭农场在我国出现的时间不长,2008 年中国共产党第十七届中央委员会第三次全体会议首次将家庭农场作为农业规模经营主体之一提出。2013 年中央一号文件倡导发展家庭农场,鼓励并支持承包土地向专业大户、家庭农场、农民合作社流转^[3]。这极大地加快了土地流转的步伐,家庭农场如雨后春笋般涌现,实现了传统农业向现代农业的转型,进一步夯实中国粮食安全的生产组织模式基础。2016 年年末,中国乡村常住人口为 58 973 万人,占全国人口总数的 42.6%,占比呈下降趋势^[4];

农民的非农就业达 28 171 万人,较 2015 年增长 1.5%^[5]。乡村缺乏高素质青壮年从事农业生产,将来谁来种地成为农业发展的第 1 瓶颈问题,该问题引起了政府部门的高度关注。2006、2012 年的中央一号文件分别首次提出新型农民、新型职业农民的概念^[6]。新型职业农民是未来中国农业的继承人,在促进农业现代化进程、回应谁来种地的问题中起不可替代的主体作用^[7]。同时,家庭农场为新型职业农民“如何种地”搭建了广阔的平台。培育新型职业农民、探索家庭农场的适度规模以及规避经营风险已成为破解现代农业“谁会种地”这一难题的重要突破口。因此,对新型职业农民主导下的家庭农场规模经营研究成果的理论梳理具有重要现实指导意义。

本文主要从 4 个方面展开论述,首先,整理新型职业农民的内涵和成员结构,并在此基础上,从新型职业农民培育的必要性、模式和方法、培育效果等层面较为详实地解构新型职业农民培育的研究现状;其次,梳理家庭农场规模经营的内涵、特征、现状、趋势,以及农场规模的影响因素、适度规模的定义、经营风险等;重点整理经营绩效,包括绩效评估指标体系构建、家庭农场经营绩效评估、绩效影响因素等方面;再次,分析新型职业农民与家庭农场的耦合性;最后对已有研究进行

收稿日期:2017-05-13

基金项目:湖北技术创新软科学研究类项目(编号:2017ADC083、2017ADC082);湖北省教育厅优秀中青年科研项目(编号:Q20162907)。

作者简介:罗芳(1968—),女,湖南安乡人,博士,副教授,研究方向为农村经济发展与农民福祉。E-mail:1098243781@qq.com。

[43]黄辉,赵浩,饶群,等. 浮萍与水花生净化 N、P 污染性能比较[J]. 环境科学与技术,2007,30(4):16-18.

[44]刘娥,张建,魏榕,等. 有机污染胁迫对人工湿地中浮萍抗氧化系统的影响[J]. 环境工程学报,2013,7(9):3296-3300.

[45]李伶,袁琳,宋丽娜,等. 镉对浮萍叶绿素荧光参数的影响[J]. 环境科学学报,2010,30(5):1062-1068.

[46]张如金,王帅,胡永林,等. 三种酸处理下浮萍对铀吸附作用的研究[J]. 江西化工,2014(4):84-86.

[47]卫麦霞,龚道新,黎定军,等. 咪唑胺及其制剂和主要代谢物对三叶浮萍 SOD 和 POD 活性的影响[J]. 农业环境科学学报,

2008,27(3):1072-1076.

[48]Song L, Vijver M G, Peijnenburg W J. Comparative toxicity of copper nanoparticles across three Lemnaceae species[J]. Science of the Total Environment,2015,518-519(6):217-224.

[49]Wang C, Li S C, Lai D Y, et al. The effect of floating vegetation on CH₄ and N₂O emissions from subtropical paddy fields in China[J]. Paddy and Water Environment,2015,13(4):425-431.

[50]郑燕玲,赖锦洪,杨靖,等. 浮萍饲喂黄粉虫的效益分析[J]. 草业科学,2015,32(3):458-463.

[51]黄卫东,张东旭,夏维东. 推流式反应器厌氧消化浮萍和猪粪混合物[J]. 环境工程学报,2013,7(1):323-328.