

朱雪珍,周毅峰,唐巧玉,等. 珍稀水生蔬菜莼菜研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(19):18-28.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.19.003

# 珍稀水生蔬菜莼菜研究进展

朱雪珍<sup>1</sup>, 周毅峰<sup>2</sup>, 唐巧玉<sup>2</sup>, 杨 洋<sup>1</sup>, 周利娟<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学/天然农药与化学生物学教育部重点实验室, 广东广州 510462;

2. 湖北民族大学/生物资源保护与利用湖北省重点实验室, 湖北恩施 445000)

**摘要:**莼菜是一种传统的珍稀水生蔬菜,具有丰富的营养价值和多种生物活性,深受人们的喜爱。本文主要从5个方面对莼菜进行综述,并对莼菜的研究和发展进行展望。从生长环境与分布、形态、解剖学、遗传学等4个方面阐述了莼菜的特性特征,以期为研究莼菜与环境间的适应机理、保证莼菜引种扩种以及保护莼菜种质资源提供理论依据;对莼菜的营养价值与生物活性进行介绍,为深入研究莼菜应用价值、开发莼菜食品、抗菌抗肿瘤药物等新型莼菜产品提供依据;结合莼菜的生长环境、设施栽培、种苗的选育与定植和水肥管理对莼菜的栽培技术、生产机械进行介绍,以期指导田间莼菜生产工作,提高莼菜的产量和质量;介绍莼菜田主要病虫害的发生情况和防治措施,提出开发安全低毒、低残留、环境友好易降解的植物源农药具有重要意义;对莼菜中农药残留现状进行概述,提出建立一种快速高效莼菜农残的检测方法对于加强田间管理、改善水体环境、保证莼菜高质量生产具有重要意义。

**关键词:**莼菜;特性;生物活性;生产技术;病虫害防治;农药残留

**中图分类号:**S645.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)19-0018-11

莼菜(*Brasenia schreberi* J. F. Gmel.)属原始花被亚纲睡莲科(Nymphaeaceae)莼属(*Brasenia*),多年生淡水水生宿根草本植物,别称湖菜、马蹄草、水葵、露葵,是一种传统的珍稀水生蔬菜。莼菜属于药食两用植物,富含多糖、蛋白质、维生素、微量元素等营养物质,加上其独特而美味的食用口感,深受古今中外人们的喜爱。近年来,由于多方面因素的影响,莼菜的种性严重退化,其产量和质量受到影响,本文从莼菜的特性、营养价值和药用价值、生产技术、病虫害发生情况及其防治方法以及莼菜农药残留现状方面进行综述,并对莼菜的研究和发展进行展望,以期为进一步研究莼菜、提高莼菜产量和质量、保护莼菜资源、开发新型莼菜产品提供理论依据。

## 1 莼菜的特性

### 1.1 生长环境与分布

莼菜性喜温暖水湿,生长于池塘、沼泽和湖泊

中,于水深20~60 cm的水域中生长良好,在中国原产于东南浅水湖泊,目前有湖北利川、重庆石柱、四川雷波、杭州西湖和江苏太湖等产区<sup>[1-2]</sup>。也广泛且零星地分布在东亚、加拿大、澳大利亚、西伯利亚、非洲、西印度群岛、美洲温带和热带地区的淡水池塘和湖泊中<sup>[3-6]</sup>。莼菜在欧洲灭绝的原因可能与花周期的特殊性、种子传播不畅或缺乏适合其生存的水体等因素有关<sup>[7-9]</sup>。莼菜的生长发育过程中需要适宜光照强度和温度、清洁的水质和肥力充足的土壤。另有研究表明,不同生长形态的水生植物对竞争和化感作用的反应和适应差异很大,因此莼菜不宜与其他水生植物混种<sup>[10-11]</sup>。

### 1.2 形态特性

莼菜茎呈椭圆状,分为地下匍匐茎、水中茎。地下匍匐茎多为白色,也有黄色和褐色,匍匐生长于地下泥土中,根为须根,簇生于地下匍匐茎各节上;水中茎是由地下匍匐茎萌发出的须根和叶片,水中茎细长,有较多分支,秋末水中茎顶端形成粗壮、较短节间的休眠芽,休眠芽多为绿色或淡红色。叶子深绿、互生,幼嫩叶片卷曲,嫩茎和叶背面有一层黏性胶状物包裹,叶片展平后呈椭圆形,全缘,大都浮于水面,叶长约15 cm、宽9 cm左右,叶两面光滑无毛,叶面绿色或浅绿色,叶背面暗红色或仅叶缘及叶脉处为暗红色。叶柄长20~30 cm,水深处

收稿日期:2021-10-25

基金项目:广东省自然科学基金(编号:2020A151501858)。

作者简介:朱雪珍(1998—),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事植物源农药研究。E-mail:15093249365@163.com。

通信作者:周利娟,博士,教授,主要从事植物源农药研究。E-mail:zhoulj@scau.edu.cn。

可长至 1 m。完全花,花两性,暗红色或淡绿色;萼片、花瓣呈条形,各 3 片,长约 1 cm;子房上位;柱头细长,从幼小心皮端向花的中心略微弯曲;由伸长的花柄托出水面开放,莼属植物是风媒传粉,花粉顶盖的不连续性减少了壁中孢粉蛋白的数量,这可能允许更有效的风传播,授粉后花梗向下弯曲,花没入水中<sup>[12-13]</sup>。果近纺锤形,为聚合果,内含种子 1~2 粒,种子淡黄色,圆卵形,长约 4 mm,直径为 3 mm 左右<sup>[10]</sup>。

### 1.3 解剖学特性

莼菜作为一种淡水水生植物,其特点是黏液覆盖植物幼嫩的茎、叶和芽等水下器官,黏液是由莼菜毛分泌产生的,莼菜能适应寡营养的水体环境与黏液毛的结构有关,对莼菜进行活体切片发现莼菜表面分泌黏液的黏液毛是表皮细胞外的单个细胞,具黏液泡和腺毛,Yang 等研究发现,莼菜腺毛由 2 个盘状柄细胞和 1 个腺体细胞组成,腺体细胞围绕着 1 个表皮上覆盖着一层薄薄角质层的贮藏空间,且嫩枝表面的角质层不连续<sup>[14]</sup>。莼菜腺毛幼嫩期主要是通过贮藏空间分泌黏液,成熟期腺毛依靠嗜铁物质和动态原生质体渗透和吸收离子,老化腺毛不再吸收离子,通过离子积累加速衰老和解体。这也正说明随着叶片的老化,黏液含量逐渐减少,对莼菜活体黏液毛离子通透性进行的生理试验表明,莼菜能适应寡营养的水体环境与黏液毛的结构有关,也为未来的肥料研究提供新的见解<sup>[14-15]</sup>。

植物的质外体结构是保护植物体生理功能的屏障,张中原对莼菜茎叶结构进行解剖分析发现表皮外黏液和不连续角质层及其下木质化皮层构成莼菜的保护屏障<sup>[16]</sup>,Yang 等的研究也发现莼菜大多数茎通常具有双侧维管束的柄,且每一个维管束有 2 组初生木质部管胞和初生韧皮部筛管元件,每一维管束周围有 1 个带凯氏带的内胚层,表皮有腺毛或“黏液毛”和不连续的角质层<sup>[17]</sup>。水生植物发达的通气组织、扩散的细胞间隙以及木质部的集中都是对水生生境的有效适应<sup>[18]</sup>。

莼菜休眠芽(即冬芽)作为一种营养繁殖、休眠越冬的理想器官,具有较为特殊的生物学特征,通过研究冬芽叶片的超微结构发现即使在冬季超低的温度条件下,各细胞器的结构完整且能保持正常的生理功能。研究莼菜越冬功能叶对温度胁迫的耐性、莼菜夏季和冬季休眠芽的形态特征及冬芽的休眠原因,对实现莼菜复壮、打破莼菜冬芽休眠、促

进种子萌发具有重要意义,同时也为生产中如何采取相应的措施提高冬芽的抗寒能力,从而保证引种、扩种的成功提供有益的启示<sup>[19-22]</sup>。

### 1.4 遗传学特性

莼菜于 1999 年被列入我国国家 I 级重点保护野生植物,由于长年缺乏对莼菜品种有效的纯化、复壮和保护措施,导致莼菜种性严重退化,影响其质量和产量<sup>[23]</sup>。利用一些技术手段在基因和分子水平上研究莼菜并采取科学有效的措施多方面保护莼菜具有非常重要的意义。为了解莼菜的遗传变异,Liu 等用 31 个微卫星标记,发现其中有 28 个是多态性的,用下一代测序技术开发莼菜的微卫星标记有助于深入研究濒危物种的进化史和对其进行有效保护<sup>[24]</sup>。张光富等使用分子标记技术(ISSR)对我国 5 个现存莼菜群体以及江苏省、浙江省莼菜的遗传多样性和群体结构模式的研究表明,莼菜在物种水平上遗传多样性水平较低<sup>[25]</sup>。Li 等利用简单序列标记(SSR)对 21 个莼菜群体的遗传多样性和变异进行研究,结果也同样证明了莼菜较低的遗传多样性<sup>[26]</sup>。朱红莲等在分子水平上对莼菜野生品种和栽培品种的核苷酸多样性进行分析,发现野生莼菜核苷酸的多样性较丰富,表明目前莼菜栽培品种人工驯化程度较低<sup>[27]</sup>。另外,通过曼特尔(Mantel)检验表明,遗传距离与地理距离之间密切相关,相关系数达到 0.91,无性系生长、生境分裂、种群隔离、种群间基因流动受限和农业措施等都可能是维持我国莼菜遗传结构的重要因素<sup>[25]</sup>,应建立莼菜种质资源保护,制定监测方案和研究莼菜的生态环境,采用就地保护的方式以便加强莼菜间的基因交流,更加有效地保护莼菜的种性和品质<sup>[28-29]</sup>。除就地保护外,迁地保护也是保护生物多样性的一项重要措施,最小种群规模的确定是濒危物种迁地保护的重要组成部分,Kim 等利用扩增片段长度多态性(AFLP)标记鉴定了来自韩国大陆(MGC)和济州岛(JNS)的自然种群中最有效地获取莼菜遗传多样性的方法,并发现核心种质很好地代表了整个种质的多样性,因此,建议建立一个基于莼菜遗传信息的管理单元来评估对莼菜进行迁地保护的最小种群规模<sup>[30]</sup>。

## 2 莼菜的营养价值和生物活性

### 2.1 营养价值

莼菜中富含多糖、蛋白质以及多种氨基酸、微

量元素和黄酮类化合物,这些都是人体所需要的营养物质,莼菜也因此具有非常高的营养价值和食用价值<sup>[31]</sup>。

莼菜生长过程中形成附着在莼菜嫩梢及茎叶表面的透明胶状黏液,这种胶状物被称为胶质,是由莼菜黏液毛的腺细胞分泌到体外的,莼菜能适应寡营养的水体环境与黏液毛的结构有关<sup>[15,32]</sup>。莼菜胶质作为一种光合产物,在一定程度上可以反映莼菜的生长情况,莼菜生长发育越好,胶质含量越丰富,反之胶质越稀薄,因此可用胶质含量(MucC)来比较不同种植区莼菜的品质<sup>[1]</sup>。莼菜胶质中含有大量的多糖、多酚、蛋白质、维生素、组胺及微量元素等多种营养物质<sup>[33-38]</sup>。

莼菜中含有大量的蛋白质和赖氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸等 17 种氨基酸,且莼菜中蛋白质的含量明显高于其他水生蔬菜,吴洪梅等采用考马斯亮蓝 R-250 比色法测定了我国四大产区的蛋白质质量分数,结果显示四川产区蛋白质含量相对较高,达到 3.39 g/kg,这为人体提供了大量营养和能量<sup>[1]</sup>。

莼菜中含有锌、铁、硒、铜、钙等 27 种人体所需的元素。研究发现,莼菜是一种强集锌植物,具有较强的富集微量元素锌的能力,对环境锌的吸收利用能力远高于其他植物,锌含量高达 153 ~ 288  $\mu\text{g/g}$ 。其他微量元素如铁、硒、铜的含量分别为 393  $\mu\text{g/g}$ 、0.23  $\text{pg/g}$ 、56.5  $\mu\text{g/g}$ <sup>[10,39]</sup>,这些微量元素在人体中起着防癌抗癌、维持机体正常生理功能的作用。

莼菜中也含有大量的维生素,如含有维生素 B<sub>12</sub> (含量为 14.75 mg/g),它可促进蛋白质的生物合成和碳水化合物、脂肪、蛋白质的代谢,增加叶酸的利用率,临床上主要用来治疗巨幼细胞性贫血、恶性贫血、肝脏疾病等;莼菜中维生素 C 含量为 35.43 mg/g,维生素 C 是一种高效抗氧化剂,可以美白护肤、提高机体免疫力、治疗缺铁性贫血、预防关节疼痛、防止牙龈出血<sup>[10]</sup>。莼菜卷叶的胶质中还含有其他蔬菜中少见的维生素 B<sub>2</sub>,这对人体的生长发育、新陈代谢以及防止视力退化方面都有着很好的作用,但要注意收集利用,防止维生素 B<sub>2</sub> 在加工时大量流失<sup>[40]</sup>。

将莼菜与不同的食材一起烹饪也会产生不同的功效,例如将莼菜与银鱼一起炖汤可起到养肝护肝、增强记忆力、排毒养颜、清热的作用<sup>[41]</sup>。除了莼菜鲜食及罐头产品外,以莼菜为原料研制出的莼菜

保健饮料、莼菜保健面包、莼菜清蛋糕、莼菜水馒头、莼菜戚风蛋糕、莼菜炼乳等产品也深受人们的喜爱<sup>[42-47]</sup>。

总之,莼菜不仅可以为人体提供营养和能量,还对调控机能和抑制疾病方面有着积极作用,是一种高营养兼药用保健价值的特色食品<sup>[48]</sup>。

## 2.2 酶抑制活性

莼菜多糖通过抑制相关酶的活性来起到降血糖、降血压、降血脂的作用,被用于食品或医药行业,作为一种降血脂保健补充剂或抗糖尿病补充剂或降血压保健品<sup>[49-50]</sup>。莼菜体外胶可以通过抑制  $\alpha$ -淀粉酶和  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的活性,降低淀粉分解,延缓碳水化合物的吸收,具有平稳降糖的作用<sup>[36]</sup>;Takahashi 等研究发现,莼菜的一种热水提取物对肾素和凝乳酶有较强的抑制作用,对血管紧张素转化酶(ACE)和血管紧张素转化酶 2(ACE2)活性有显著的抑制作用,因此,莼菜可用于治疗高血压、心衰以及肾小球疾病<sup>[51]</sup>;100  $\mu\text{g/mL}$  的莼菜水提取物和乙醇提取物即可强烈抑制 HepG2 细胞分泌甘油三酯和胆固醇<sup>[52]</sup>,莼菜中的黄酮类物质可以抑制人体皮下脂肪细胞脂质的积累<sup>[53]</sup>。另外,研究发现,以甘露糖为基础的多糖,如葡甘聚糖和半乳甘露聚糖已被证明能降低血液胆固醇,这表明由葡萄糖、半乳糖和甘露糖组成的莼菜多糖也可能降低血浆胆固醇<sup>[50,54-55]</sup>。

Ahn 等进行的体外试验发现,莼菜胶质多糖处理角质层细胞后,可以增加具有交联皮肤屏障作用的转谷氨酰胺酶 1(TGM1)的基因表达,透明质酸合成酶 3(HAS3)基因(一种合成水结合基质透明质酸的酶)和调节水和甘油运动的水通道蛋白 3(AQP3)的表达,这说明,莼菜胶状多糖具有保湿、抗炎、促进胶原蛋白合成等作用,对皮肤具有保护和补水作用<sup>[56]</sup>。

人类免疫缺陷病毒 I 型(HIV-1)的逆转录酶(RT)具有以 RNA 和 DNA 为模板指导的 DNA 聚合酶活性和核糖核酸酶(RNaseh)活性。Hisayoshi 等在 2014 年曾报道过莼菜的乙醇和水提取物能抑制 HIV-1 逆转录酶的 DNA 聚合酶活性<sup>[57]</sup>,进一步研究发现,莼菜的乙醇和水提取物不仅能强烈抑制 DNA 聚合酶的活性,而且强烈抑制核糖核酸酶水解 RNA/DNA 杂交链中的 RNA 链的活性(EC<sub>50</sub> 值为 1~2  $\mu\text{g/mL}$ ),以此来阻止 HIV-1 复制。这为开发抗 HIV-1 新药以及研究 DNA 聚合酶活性位点与

HIV-1 逆转录酶的核糖核酸酶活性之间的功能关系提供了有用的信息<sup>[58]</sup>。

### 2.3 抗癌活性

莼菜胶质具有抑制洋葱未分化细胞有丝分裂的作用,故认为莼菜有抗癌活性<sup>[59]</sup>。多糖是一种较好的免疫促进剂,可以增加小鼠免疫器官的质量,促进巨噬细胞吞噬异物的功能,从而抑制肿瘤的产生和发展,可作为一种治疗癌症的辅助食品,尤其对胃癌、肠癌等消化道癌有很好的治疗效果<sup>[10,36,60]</sup>。陈晶等的研究表明,莼菜多糖能破坏宫颈癌细胞膜,改变细胞形态,从而抑制宫颈癌细胞,且抑制作用具有时间依赖性和浓度依赖性<sup>[61]</sup>。

### 2.4 抗氧化活性

莼菜胶质层中含有胡萝卜素、抗坏血酸、多糖、黄酮、酚类等多种抗氧化成分,可以起到滋润、清洁、保养皮肤的功效。

吕家龙等在莼菜胶质和卷叶中分离并测定了类胡萝卜素和抗坏血酸的含量,发现它们都随卷叶的增大而增加,具有非常好的抗氧化、清除自由基、延缓衰老的作用<sup>[40]</sup>。Xiao 等也发现莼菜胶质中的多糖具有很好的抗氧化活性,且抗氧化能力和还原能力与多糖中硫酸根和糖醛酸的含量呈正相关关系<sup>[48]</sup>。除胶质中多糖外,Li 等发现莼菜茎叶共生菌中的多糖对羟基自由基具有显著的抗氧化活性<sup>[62]</sup>。韩芳等对不同产区莼菜中的黄酮类物质进行抗氧化活性比较发现,莼菜黄酮对 ABTS 自由基清除率高于 DPPH 自由基清除率,且重庆市石柱土家族自治县产区的莼菜总黄酮抗氧化能力最好<sup>[63]</sup>。Legault 等从莼菜甲醇和水提取物中分别分离得到具有抗氧化活性的 2 种主要酚类化合物:槲皮素-7-O- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖苷和没食子酸,槲皮素-7-O- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖苷除具有更强的抗氧化活性外,还具有抗菌消炎活性<sup>[64]</sup>。28 名女性连续食用含有莼菜提取物和清酒干粉的膳食补充剂 14 d 后,皮肤干燥问题明显改善,28 d 后改善了包括皮肤暗沉在内的 9 种症状<sup>[65]</sup>。因此,从莼菜中提取天然安全的抗氧化成分用于美容保湿面膜的应用中具有广阔的发展前景。

### 2.5 优良的润滑性

莼菜胶质具有许多纳米片结构,这种纳米片结构之间形成水化层,由于大量水分子的存在而具有超润滑性,超低摩擦系数为 0.005,莼菜的超润滑性可作为生物润滑剂用于机械行业,这将会是部分解

决能源问题的最有效策略之一<sup>[66-67]</sup>。莼菜这种优良的润滑性也可用于光滑的药丸的制作上,通过在药丸表面涂抹这种黏液涂层,降低药丸与喉咙的摩擦,使人们服用更舒适安全<sup>[68]</sup>。此外,莼菜的润滑作用还可以用于化妆品中改善皮肤粗糙度<sup>[56]</sup>。

### 2.6 抑菌活性

莼菜具有抑菌活性,韩芳等对湖北利川、重庆石柱、四川雷波、浙江西湖四大产区的莼菜进行检测分析得到 7 种黄酮类物质(主要为异鼠李素、槲皮素、山奈酚),采用滤纸片法发现莼菜黄酮对变形杆菌(*Proteus vulgaris*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)具有不同程度的抑菌活性,对变形杆菌和大肠杆菌的抑制效果优于铜绿假单胞菌,3 种细菌对莼菜提取物表现为中度敏感,我国四大产地中,重庆石柱产地的莼菜黄酮的抑菌效果最好<sup>[63]</sup>。

### 2.7 抑藻活性

莼菜具有抑制藻类生长的作用,Elakovich 等研究发现莼菜甲醇提取物可以抑制蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidos*)的生长,也可以低程度抑制水华鱼腥藻(*Anabena flos-aquae*)的生长<sup>[69]</sup>。另外,研究发现莼菜甲醇提取物对有害蓝藻铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的生长有很强的抑制作用,这有利于抑制藻类水华的发生<sup>[70-71]</sup>。

### 2.8 杀虫活性

为减少植食性昆虫对植物产生的负面影响,植物会进化出一系列抵御草食性昆虫的机制。Thompson 等研究发现,莼菜黏液胶质含量和植食性动物对叶片的伤害程度有关,黏液可以减少植食性动物对莼菜的啃食,但其中的机制尚未清楚,有待进一步研究<sup>[72]</sup>。

### 2.9 化感作用

莼菜还具有化感作用,Elakovich 等对莼菜的 3 种索氏提取液研究发现,莼菜具有抑制莴苣幼苗和浮萍生长的能力,是一种很有前途的水生杂草的化感植物<sup>[69]</sup>。

### 2.10 促进水质净化与发展

随着城市化的发展,越来越多的工业废水、农业废水和生活废水的排放造成水体环境破坏,可饮用的淡水资源受到不同程度的污染,也会导致水生植物光合速率、蒸腾速率和相对生长速率下降,影响植物正常的生长发育,对水体污染治理和水质净化修复的需求十分迫切。生物修复作为一种节能、

可持续的方法,具有自然处理能力强、现场处理、维护量低等优点,广泛应用于废水处理净化水质<sup>[73]</sup>。莼菜具有净化水质的作用,是一种天然且廉价的水质净化器<sup>[74]</sup>。朱秀红等采用生态浮床技术对污染水体净化效果进行研究发现,莼菜可以有效地吸收富营养化水体中的氮、磷等污染物<sup>[75]</sup>。Xiang 等研究发现,莼菜可以降低焦化废水(浓度 <30%)化学需氧量(COD)并降低氮和氨的含量,对焦化废水具有很好的缓解效果<sup>[76]</sup>。

重金属因其毒性、持久性、不降解性和生物累积性而对人类健康有着严重的危害,而莼菜叶片会吸收水体中的 As、Cd、Cr、Cu 等重金属,Cui 等首次将水生蔬菜(莼菜)摄入量纳入人类健康环境水质标准(AWQC)推导和风险评估的传统方法中,该方法可促进风险评估和水质标准的制定<sup>[77]</sup>。

### 3 莼菜的生产技术

莼菜的生产技术与莼菜产量和质量密切相关,因此,应该从莼菜的栽培技术、生产机械等多方面入手保护莼菜。

#### 3.1 栽培技术

3.1.1 生长环境 莼菜性喜温暖水湿,对气候也有较严的要求,须选择较温暖和潮湿的生长环境<sup>[78]</sup>,适宜在海拔 1 000 ~ 1 500 m、年降水量为 1 200 ~ 1 400 mm 的环境下生长。莼菜对温度和土壤 pH 值也有一定的要求。最适宜长在 pH 值在 5.5 ~ 6.8、腐殖质含量丰富的酸性土壤中<sup>[79]</sup>,适宜生长的温度为 20 ~ 30 ℃,温度过高或过低都不利于莼菜的生长发育。

莼菜叶片会吸收水体中 Cs、Cr<sup>6+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Hg<sup>2+</sup>、As<sup>3+</sup> 等重金属离子而受到胁迫毒害,从而导致形态学、生物化学和超微结构的多种伤害<sup>[19,80-84]</sup>,龚汉雨等对湖北省利川市莼菜田重金属离子的含量研究发现,重金属含量均达到 I 类水质标准,未出现污染问题,对莼菜的生长没有影响,说明重金属离子对莼菜的毒害可能表现出剂量效应<sup>[85]</sup>。因此,要选择没有重金属污染的水田进行种植,保障莼菜健康生长。

建立有效的环境监测和控制方法,对莼菜田管理具有重要意义。夏春风等结合应用物联网、传感器、单片机和太阳能等技术,研制出一种太湖莼菜种植环境监测系统,用于监测莼菜种植水田的水位、流量、水温、pH 值、水质和病虫害数量等,及时发

现并改善种植环境,以保证莼菜的产量和质量<sup>[86]</sup>。

3.1.2 设施栽培 设施栽培是一种既能满足植物保护要求,又能满足蔬菜市场需求的潜在栽培策略,但要在室内进行大规模种植,还需要进行一系列的前期试验。光质是控制植物生长发育的主要因素之一,因此成为室内种植的重要因素。Li 等采用红蓝比为 5 : 1 的发光二极管(RB-LED)、白光 LED(W-LED)、白光荧光(W-Fluo)等 3 种不同光质的人工光源,研究了莼菜幼苗对不同光质的响应,发现莼菜对不同光质的响应与大多数陆生植物不同,在设施栽培中适当使用红、蓝光源可提高莼菜芽和卷叶的产量,配合白光源可保证光合产物的充分积累<sup>[87]</sup>。此外,还推荐在保护地栽培中使用性能优于白光 LED 光源的白色荧光光源。

3.1.3 水肥管理 莼菜田对水质和水位的控制也有一定的要求。Xie 等通过对利川、杭州和苏州的莼菜进行研究,发现水质中的高锰酸钾指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮的浓度(TN<sub>w</sub>)、导电性(EC<sub>w</sub>)以及沉积物有机碳含量(SOC)都影响莼菜胶质的含量,从而影响莼菜的品质<sup>[3]</sup>,因此,良好的水质对于莼菜的保护有着重要作用。在莼菜养殖过程中,定时更换清水也可以防止发生病虫害影响品质,一般在生长旺盛期,3 d 左右可更换 1 次清水。

莼菜田水位的控制与气孔位置有关,气孔是植物与空气接触进行气体交换的重要部位,由于莼菜的气孔分布于上表皮,莼菜叶片气孔与水位的关系影响其生长。张依南等通过分析不同水位条件下莼菜叶片的结构特征与生理功能,发现水位的深浅会影响阳光的渗入进而影响水温和光合作用,由于浮叶植物对水位变化的敏感性,水生生态系统应该考虑季节变化、温度变化、莼菜生长期变化等多方面因素进行多次水位调节的科学补水措施以更好地保护莼菜的生长发育<sup>[88]</sup>。

莼菜田需肥量不大,以有机肥为主。为保证水质干净整洁,一般不使用人粪尿等土杂肥作追肥,研究发现不同浓度的营养液下莼菜植株的长势情况不同,浓度较高的营养液反而不利于莼菜的生长,因此,莼菜可能更适合在寡营养条件下生长,在每年冬春根茎萌芽前,可施加适量腐熟饼肥和过磷酸钙或腐熟有机液肥,在生长旺盛阶段,一般不用施加肥料,以免抑制其生长<sup>[16,78]</sup>。另有研究表明,不同的肥料配比下,莼菜的长势不同,若将化肥和有机肥配合施用,可促进莼菜的生长,提高莼菜的

产量和品质<sup>[89-93]</sup>。

### 3.2 生产机械

莼菜属于水生蔬菜,与旱生蔬菜有所不同,水中环境复杂,不适宜机械化大规模种植与采收,莼菜的种植与采收大都采用人工方式,但手工采摘效率低、耗时耗力、工作量,也会因为采摘不及时导致一些莼菜老化带来经济损失等问题,因此,发展相对应的生产机械,使种植和采收机械化可大大提高生产效率,有效保护莼菜种植业的发展。

近年来,各科研院校、农业生产应用企业及种植户针对水生蔬菜的生产进行机械研制与开发,也取得一些成果。研究人员设计了一种手动控制的莼菜采摘器来降低手工采摘的劳动强度<sup>[94]</sup>;研发的一种莼菜施肥装置可以将肥丸施加到莼菜穴中,还根据莼菜水田光照采光、雨水引流以及莼菜胶质形成等研发出了一系列莼菜种植机械<sup>[95]</sup>。吴波通过对恩施州莼菜生产机械化的现状和问题进行了分析,建议恩施州莼菜生产农机农艺融合技术,以促进推动莼菜产业标准化、规模化、产业化,进一步推动莼菜产业早日实现现代化<sup>[96]</sup>。

## 4 莼菜病、虫、草防治

### 4.1 危害莼菜的主要病虫害

莼菜田主要病害有枯萎病、叶腐病、叶斑病。枯萎病又称腐败病,病株叶片边缘呈现青枯斑并向内扩展至整片叶枯焦变褐;叶腐病俗称“烂叶子病”,常发生在不洁净的水田中,叶片边缘先发病,呈水渍状,然后逐渐向内扩张导致全叶发病而腐烂;叶斑病由链格孢菌(*Alternaria alternata*)引起,在重庆石柱产地叶斑病危害比较严重,主要从叶片边缘开始发病,由黑色小点逐渐扩大成具轮纹的黑褐色大斑,病斑边缘具黄色晕环,多个病斑可聚合并使整个叶片逐渐腐烂<sup>[97]</sup>。

虫害有菱角萤叶甲(*Galerucella birmanica*)、荷缢管蚜(*Rhopalosiphum nymphaeae*)、卷叶螟类、食根金花虫(*Donacia lenzi*),食根金花虫幼虫潜入泥中,危害地下茎幼嫩节间,造成地上部叶子细小、发黄,长势衰退。其他均通过啃食浮在水面的叶片和嫩梢而造成危害。此外,还有耳萝卜螺(*Radix auricularia*,别称椎实螺)和大脐圆扁螺(*Hippeutis umbilicali*)等软体动物危害,造成莼菜缺刻和穿孔,严重时可将整片叶吃光<sup>[98-99]</sup>。

草害有青苔、鸭舌草(*Monochoria vaginalis*)、蘋

(*Marsilea quadrifolia*)、眼子菜(*Potamogeton distinctus*)、水绵(*Spirogyra communis*)及各种水藻等<sup>[98]</sup>。

### 4.2 病、虫、草害防治

对莼菜病虫害的防治,应该从当地实际情况出发,优先采用农业防治、物理防治和生物防治,辅之以化学防治的方法。

4.2.1 农业防治 农业防治的方法主要是从农业技术方面出发,通过改善农业生态环境,防治病虫害等有害生物危害,从而保护栽培作物安全健壮生长的应用技术方法。

莼菜田农业防除的方法有以下几个方面:一是选用抗、耐病虫莼菜品种以减轻病虫危害,减少化学农药用量,此方法具有简单易操作、经济有效、事半功倍的优点。二是加强田间管理,及时添换清水,保持水质清澈。如在莼菜萌芽前,及时捞出聚集在莼菜田四周和流水口的椎实螺;在莼菜未长满水面前进行人工除草,降低成虫基数;生长期结合采收,随时下田捞除水绵、水藻等<sup>[100]</sup>。三是合理轮作,对于受害严重的田块,可采用水生蔬菜与旱生蔬菜轮作的方式,还可改为鱼池,养殖食草、食螺鱼类,年后重新种植莼菜。四是适时更新换代,植株生长开始减弱后,可以部分或全部拔除,选用健壮植株的种茎重新排种。

4.2.2 物理防治 物理防治指利用简单工具和各种物理因素,如光、热、电、温度、湿度、放射能和声波等防治病虫害的措施。物理防治是最为古老的一种防治手段。莼菜田中应用物理防治一般有以下几个方法:一是及时疏剪生长过密、老黄叶过多的茎叶及发病植株的枝叶,并清除出水面,避免病株扩散。二是利用成虫的趋光性,安装黑光灯来诱杀成虫,以降低虫口密度。三是利用害虫的趋化性,配制加有适量敌百虫的糖醋液诱杀害虫或用柳枝蘸洒敌百虫诱杀<sup>[101]</sup>。

4.2.3 生物防治 建立一个莼菜田生态系统,少量养殖食草、食螺鱼类,如草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲫鱼(*Carassius auratus*)、黄鳝(*Monopterus albus*)等,引入鸭、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、蛙类等,一方面利用有益生物控制草害和虫害、降低虫口密度,减少病虫害的发生;另一方面构成复杂食物链,带来更大的经济效益<sup>[98,102]</sup>。

植物源农药又称植物性农药,属于生物农药的一种,是指从植物中提取出来生物碱、类黄酮、萜烯

类、酚类、甾体和多糖等具有生物活性的天然化学物质制成的混合药剂。植物源农药来源于植物体,具有易降解、不宜产生抗药性、绿色低毒、低残留等优点,符合绿色农业的发展趋势,其开发和研究也成了新农药开发的热点。而莼菜对生长环境要求严格,在水田中使用化学农药会引起水生生态系统的破坏,农药残留也会影响莼菜品质和安全,而植物源农药相对化学农药来说更不容易对施用植物及环境中的非靶标生物造成药害,在环境中易降解,不会破坏水田生态系统,一方面可以防止莼菜田中的病虫害发生,提高莼菜品质与高产,保证莼菜产品的绿色可持续发展;另一方面又可以减少农药残留超标而导致的进出口竞争力下降的问题。因此,筛选并开发适用于莼菜田中的植物源农药以代替化学农药,保证莼菜的绿色有机发展具有重要的意义。

然而,根据文献报道,植物源农药多用于林业、农田病虫害等有害生物的防治,在水生植物中的应用较少,如植物提取物防治陆生植物枯萎病的研究已有很多报道,丁香(*Syringa oblata*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、石榴(*Punica granatum*)以及万寿菊(*Tagetes erecta*)等植物提取物对枯萎病菌都有很好的抑制效果<sup>[103-107]</sup>,但这些植物源杀菌剂能否对水生植物枯萎病起到很好的效果尚未可知。近年来国内外研究发现,藜麦(*Chenopodium quinoa*)皂苷、油茶(*Camellia oleifera*)籽饼、茶皂素(tea saponin)等都表现出很好的杀螺活性,具有开发成绿色农药的潜力<sup>[108-110]</sup>。针对浮萍(*Lemna minor*)暴发式生长带来的问题,Elakovich 等研究表明,睡莲(*Nymphaea tetragona*)、粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)、竹节水松(*Cabomba caroliniana*)、莼菜萃取物能抑制浮萍的生长<sup>[111]</sup>;张乐婷等研究发现泽漆(*Euphorbia helioscopia*)浸提液低浓度情况下就会破坏浮萍部分抗氧化酶系统从而抑制浮萍生长<sup>[112]</sup>。张饮江等发现黄连(*Coptis chinensis*)、地锦草(*Euphorbia humifusa*)和泽泻(*Alisma plantago-aquatica*)提取液都能有效抑制紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)的生长<sup>[113]</sup>。虎刺楸木(*Aralia finlaysoniana*)提取物也对一些水生杂草具有明显的抑制作用<sup>[114]</sup>。从白屈菜(*Chelidonium majus*)中提取出的白屈菜红碱和血根碱通过破坏 PS II 供体侧而抑制铜绿微囊藻的生长<sup>[115-116]</sup>,从黄连中提取出的小檗碱(亦称黄连素)通过强烈抑制

藻细胞  $\text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+} - \text{ATPase}$  活性,改变铜绿微囊藻细胞膜通透性从而抑制其生长<sup>[117]</sup>,Wu 等研究发现,10 mg/L 的小檗碱处理浮萍 3 d 后,对浮萍的叶绿素 a 和叶绿素 b 抑制率分别为 52.24% 和 50.53%,处理 7 d 后,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的合成完全被抑制,说明 10 mg/L 小檗碱具有显著的除草活性<sup>[118]</sup>,研究人员还发现黄连碱类和小檗碱类物质对浮萍等常见杂草具有显著除草活性,具有开发为新型植物源除草剂的潜力<sup>[119-122]</sup>。此外,台湾杉(*Taiwania cryptomerioides*)茎皮精油也被报道对水绵有明显的抑制作用<sup>[123]</sup>,这些都为开发绿色、安全的植物源除草剂适用于莼菜田防治浮萍等水生杂草提供了理论依据。

4.2.4 化学防治 化学防治是莼菜病虫害防治的一种重要手段和应急措施<sup>[124]</sup>。由于莼菜是将其嫩芽嫩叶(卷叶)加工成食品,农药的使用会影响莼菜的品质与安全以及莼菜后期的丰产,因此,如果确要施用农药时,必须按照国家的有关规定限量施用,而且要注意采收前的禁用期。在种植之前,可以用生石灰消毒田间,清除病原。采用等量式波尔多液喷洒防治枯萎病和叶腐病;用含 30%~38% 有效氯的漂白粉水剂防治根腐病<sup>[40]</sup>;赵瑶等室内平板筛选和田间小区试验,筛选出不影响植株生长的吡唑醚菌酯作为防治莼菜叶斑病的备选药剂<sup>[97]</sup>。防治虫害可在莼菜萌芽前,用适量 20% 氯虫苯甲酰胺悬浮剂防治菱角萤叶甲和食根金花虫,但要注意施用次数和安全间隔期。防治水绵可喷 0.5% 硫酸铜溶液或撒施草木灰防除。在实际生产中应明确,莼菜田防治方法应有别于其他旱生蔬菜,应该在加强病虫害预测预报、掌握病虫害发生动态的情况下,针对病虫害种类对症下药,选择关键时期进行防治。同时,主要病虫害的药剂防治应优先选择防治效果好、残留标准较宽、安全高效低毒药剂,以降低由农药残留超标给莼菜出口带来的风险<sup>[98]</sup>。

综上,应从田块选择与生长环境、栽植、水肥管理、生产机械、病虫害防治等方面,调节土壤的水、肥、光、热等条件,结合莼菜的生长需求,适量使用有机肥,将用地与养地结合,在病虫害防治上要尽量采用预防为主、农业防治的措施,药剂防治时要选用高效、低毒、低残留的绿色农药保证莼菜健壮生长<sup>[92]</sup>。

## 5 莼菜中农药残留现状

水生蔬菜具有中国传统特色,被誉为是中国特



色菜,莼菜作为一种濒危的水生蔬菜,所具有的特殊风味和保健功能广受国内外消费者欢迎,有越来越多的公司投入开发莼菜系列产品以及进出口贸易,在莼菜生产过程中,为保证其品质 and 安全性,莼菜田一般很少使用农药,随着农业科技的发展和农药的不合理使用,一方面莼菜会直接接触并吸收农药,另一方面,农药残留导致水体生态环境发生巨变,莼菜从水体中吸收农药污染物并在体内富集<sup>[124-125]</sup>,近年来莼菜又面临着品种退化问题、土壤连作养分殆尽、病虫害暴发等问题<sup>[126]</sup>,再加上各个国家和地区对食品安全问题的管理日益严格,莼菜出口面临严峻的挑战<sup>[127]</sup>,对水生蔬菜进行农残检测具有非常重要的意义。邢峰等模拟莼菜加工的清洗、杀青、护绿和储藏 4 个步骤,对敌百虫、毒死蜱、氯氰菊酯和多菌灵 4 种农药残留量变化进行检测,结果发现清洗和杀青过程是主要的影响因素<sup>[128]</sup>。综合考虑莼菜品质和农药残留 2 个方面因素,建议莼菜清洗时间为 30 min,在不影响莼菜品质的前提下尽量延长杀青时间。

目前,国内外莼菜农残检测的文献有限,建立一种对莼菜农药残留的监测体系,关注农药残留的状况并采取相关措施控制农药残留变得尤为急迫且重要。

## 6 研究展望

通过对莼菜的特性、营养价值和生物活性、生产技术、病虫害防治和农药残留现状多方面综述,为研究莼菜、进一步开发莼菜价值以及保护莼菜提供了科学依据。但对于莼菜的研究,在以下方面值得加强:(1)对莼菜的遗传多样性研究发现,莼菜栽培品种人工驯化的程度很低,对莼菜品种进行原生境保护、建立合理的采样点采样进行异地保存以及建立合理的生态环境都是亟待解决的问题。(2)莼菜具有的多种活性物质对开发新型降“三高”、抗肿瘤以及抗 HIV-1 的药物提供了新的思路。(3)莼菜具有的抗菌、抗藻、抗虫和抑制莴苣幼苗生长的能力,这为利用其作为化感植物进行水生植物管理提供了依据。(4)莼菜生产中病虫害严重影响莼菜的品质,国内外对于应用植物源农药防治莼菜田病虫害的研究报道较少,开发高效低毒、低残留、环境友好易降解的植物源农药具有广阔的前景。(5)水体环境条件对莼菜的品质有很大的影响,为检测水体环境、便于莼菜田间管理、防止

莼菜农药残留超标与重金属污染、保证莼菜品质和产量,关注莼菜田重金属污染情况并建立一种快速高效莼菜农残的检测方法显得尤为重要。

## 参考文献:

- [1] 吴洪梅,吕泽芳,张昭,等. 四大莼菜产区商品成分种类和质量分数测定及比较研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2017,39(5):76-82.
- [2] 沈珉,黄炳元. 太湖莼菜无公害栽培技术[J]. 中国蔬菜,2006(9):50-51.
- [3] Xie C, Li J F, Pan F, et al. Environmental factors influencing mucilage accumulation of the endangered *Brasenia schreberi* in China[J]. Scientific Reports,2018,8:17955.
- [4] Kim C, Na H R, Choi H K. Conservation genetics of endangered *Brasenia schreberi* based on RAPD and AFLP markers[J]. Journal of Plant Biology,2008,51(4):260-268.
- [5] Chepinoga V V. *Brasenia schreberi* (Cabombaceae): a new species for the flora of Siberia[J]. Botanicheskii Zhurnal,1999,84(6):144-147.
- [6] Kim C, Jung J, Na H R, et al. Population genetic structure of the endangered *Brasenia schreberi* in south Korea based on nuclear ribosomal spacer and chloroplast DNA sequences[J]. Journal of Plant Biology,2012,55(1):81-91.
- [7] Lemdahl G, Broström A, Hedenäs L, et al. Eemian and early weichselian environments in southern Sweden: a multi-proxy study of till-covered organic deposits from the Småland peneplain[J]. Journal of Quaternary Science,2013,28(7):705-719.
- [8] Drzymulska D. On the history of *Brasenia* S. in the European Pleistocene[J]. Vegetation History and Archaeobotany,2018,27(3):527-534.
- [9] Field M H, Ntinou M, Tsartsidou G, et al. A palaeoenvironmental reconstruction (based on palaeobotanical data and diatoms) of the middle pleistocene elephant (*Palaeoloxodon antiquus*) butchery site at Marathousa, Megalopolis, Greece[J]. Quaternary International,2018,497:108-122.
- [10] 刘美玉,习向银,罗丽娟,等. 莼菜资源利用研究综述及展望[J]. 长江蔬菜,2011(10):7-10.
- [11] Gopal B, Goel U. Competition and allelopathy in aquatic plant communities[J]. The Botanical Review,1993,59(3):155-210.
- [12] Endress P K. Carpels in *Brasenia* (Cabombaceae) are completely ascidiate despite a long stigmatic crest[J]. Annals of Botany,2005,96(2):209-215.
- [13] Taylor M L, Osborn J M. Pollen ontogeny in *Brasenia* (Cabombaceae, Nymphaeales)[J]. American Journal of Botany,2006,93(3):344-356.
- [14] Yang C D, Zhang X, Zhang F, et al. Structure and ion physiology of *Brasenia schreberi* glandular trichomes *in vivo*[J]. PeerJ,2019,7:e7288.
- [15] 张帆,杨朝东,王晓娥,等. 莼菜活体黏液毛结构及离子通透性生理研究[J]. 长江大学学报(自然科学版),2020,17(3):



- 85–90,10.
- [16] 张中原. 莼菜茎叶的解剖和组织化学特征及其胁迫生理研究[D]. 荆 州: 长江大学, 2017.
- [17] Yang C D, Zhang X, Seago J L, et al. Anatomical and histochemical features of *Brasenia schreberi* (Cabombaceae) shoots[J]. *Flora*, 2020, 263: 151524.
- [18] Tsyrenova D J. Micromorphology of relict hydrophytes from the lower amur region[J]. *Inland Water Biology*, 2020, 13(4): 496–502.
- [19] 徐国华, 施国新, 刘 丽, 等. Cr<sup>6+</sup> 对莼菜冬芽叶片急性毒害与保护酶系活性变化关系的研究[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(6): 1034–1040.
- [20] 徐国华, 魏锦城, 陈维培, 等. 莼菜冬芽越冬生理研究[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(4): 610–615.
- [21] 覃章辉. 莼菜种子和冬芽的萌发生理及叶片对温度胁迫的响应[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2019.
- [22] 覃章辉, 皮秀权, 陈银花, 等. 利川莼菜休眠芽形态特征及形成原因探究[J]. *长江蔬菜*, 2020(2): 29–31.
- [23] 李佳楠, 董元火. 杭州西湖莼菜种质资源保护区的莼菜群落特征[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(27): 14905–14906.
- [24] Liu H, Long Z C, Li L N, et al. Development and characterization of microsatellite loci in *Brasenia schreberi* (Cabombaceae) based on the next – generation sequencing[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2016, 15(2): gmr. 15027886.
- [25] 张光富, 高邦权. 江浙莼菜遗传多样性和遗传结构的 ISSR 分析[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 662–668.
- [26] Li Z Z, Gichira A W, Wang Q F, et al. Genetic diversity and population structure of the endangered basal angiosperm *Brasenia schreberi* (Cabombaceae) in China[J]. *PeerJ*, 2018, 6: e5296.
- [27] 朱红莲, 杜 娟, 刘正位, 等. 我国野生莼菜考察及遗传多样性研究[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(6): 1586–1595.
- [28] 高邦权, 张光富, 陈会艳. 不同生境下莼菜群落的物种多样性[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 283–287.
- [29] Chemeris E V, Bobrov A A, Lansdown R V, et al. The conservation of aquatic vascular plants in Asian Russia[J]. *Aquatic Botany*, 2019, 157: 42–54.
- [30] Kim C, Na H R, Jung J, et al. Determination of the minimum population size for *ex situ* conservation of water – shield (*Brasenia schreberi* J. F. Gmelin) inferred from AFLP analysis[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2012, 35(4): 301–306.
- [31] 刘 虹, 黄 文, 黄凌丽, 等. 莼菜资源及其营养成份研究进展[J]. *植物学研究*, 2019, 8(1): 7–14.
- [32] 吕家龙, 祝金明, 李 敏. 莼菜腺细胞的观察及其泌胶机理的探讨[J]. *浙江农业大学学报*, 1995, 21(3): 314–318.
- [33] 孙雨欣, 毛水芳, 陈银宁, 等. 莼菜体外胶的分离及其体外功能活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(2): 55–60.
- [34] 张守花, 张新海, 刘延奇, 等. 莼菜多糖的提取工艺优化研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(15): 138–144.
- [35] 宁 可. 莼菜多糖提取分离、结构鉴定及抗氧化研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 1–78.
- [36] Feng S M, Ning K, Luan D, et al. Chemical composition and antioxidant capacities analysis of different parts of *Brasenia schreberi* [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(8): e14014.
- [37] Kakuta M, Misaki A. The polysaccharide of “Junsai (*Brasenia schreberi* J. F. Gmel)” mucilage; fragmentation analysis by successive Smith degradations and partial acid hydrolysis[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1979, 43(6): 1269–1276.
- [38] 唐巧玉, 周毅峰, 吴永尧. 莼菜水溶性多糖提取工艺优化研究[J]. *北方园艺*, 2008(3): 40–41.
- [39] 肖鸢轩, 王昆仑, 周海燕. 莼菜中锌蛋白的分离及初步分析[J]. *湖南农业科学*, 2020(4): 64–68.
- [40] 吕家龙, 祝金明, 董伟敏, 等. 西湖莼菜卷叶及其胶质中营养成分的研究[J]. *营养学报*, 1996, 18(2): 238–240.
- [41] Luo Q Y, Wu M, Sun Y N, et al. Optimizing the extraction and encapsulation of mucilage from *Brasenia schreberi* [J]. *Polymers*, 2019, 11(5): 822.
- [42] 张 驰, 刘信平, 周大寨, 等. 莼菜饮料的研制[J]. *食品研究与开发*, 2005, 26(2): 89–93.
- [43] 鲜 瑶, 闵燕萍, 李洪军, 等. 莼菜保健面包的研制[J]. *食品工业科技*, 2009, 30(8): 245–246, 339.
- [44] 贾于晶, 马 良, 李秀红, 等. 莼菜清蛋糕的研制[J]. *农业工程*, 2016, 6(6): 46–50, 53.
- [45] 陈倩玉, 申勤勤, 陈 兰, 等. 莼菜水馒头制作配方的优化[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(23): 162–168, 174.
- [46] 张 丽, 郭桂梅, 严钰澳, 等. 莼菜戚风蛋糕卷的研制[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(3): 97–101.
- [47] 贾小丽, 陈加展, 刘 兰, 等. 莼菜炼乳的配方优化[J]. *黑河学院学报*, 2021, 12(4): 184–188.
- [48] Xiao H W, Cai X R, Fan Y J, et al. Antioxidant activity of water – soluble polysaccharides from *Brasenia schreberi* [J]. *Pharmacognosy Magazine*, 2016, 12(47): 193–197.
- [49] Feng S M, Luan D, Ning K, et al. Ultrafiltration isolation, hypoglycemic activity analysis and structural characterization of polysaccharides from *Brasenia schreberi* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 135: 141–151.
- [50] Kim H, Wang Q, Shoemaker C F, et al. Polysaccharide gel coating of the leaves of *Brasenia schreberi* lowers plasma cholesterol in hamsters[J]. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 2015, 5(1): 56–61.
- [51] Takahashi S, Ai S T, Shimoda H, et al. Inhibition of renin – angiotensin system related enzymes (renin, angiotensin converting enzyme, chymase, and angiotensin converting enzyme 2) by water shield extracts[J]. *Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 17(1): 3–13.
- [52] Takahashi J, Toshima G, Matsumoto Y, et al. *In vitro* screening for antihyperlipidemic activities in foodstuffs by evaluating lipoprotein profiles secreted from human hepatoma cells[J]. *Journal of Natural Medicines*, 2011, 65(3/4): 670–674.
- [53] Shimoda H. Anti – adipogenic polyphenols of water shield suppress TNF –  $\alpha$  – induced cell damage and enhance expression of HAS2 and HAPB<sub>2</sub> in adiponectin – treated dermal fibroblasts[J]. *Natural Products Chemistry & Research*, 2014, 2(5): 1000146.

- [54] Zhang Z S, Wang H, Jiao R, et al. Choosing hamsters but not rats as a model for studying plasma cholesterol – lowering activity of functional foods[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2009, 53(7): 921 – 930.
- [55] Boban P T, Nambisan B, Sudhakaran P R. Hypolipidaemic effect of chemically different mucilages in rats: a comparative study[J]. The British Journal of Nutrition, 2006, 96(6): 1021 – 1029.
- [56] Ahn S, Gil S, Kwon O, et al. Skin hydration effect of *Brasenia schreberi* mucilage polysaccharide extract[J]. Journal of the Society of Cosmetic Scientists of Korea, 2017, 43(3): 223 – 230.
- [57] Hisayoshi T, Shinomura M, Konishi A, et al. Inhibition of HIV – 1 reverse transcriptase activity by *Brasenia schreberi* (Junsai) components[J]. Journal of Biological Macromolecules, 2014, 14(1): 59 – 65.
- [58] Hisayoshi T, Shinomura M, Yokokawa K, et al. Inhibition of the DNA polymerase and RNase H activities of HIV – 1 reverse transcriptase and HIV – 1 replication by *Brasenia schreberi* (Junsai) and *Petasites japonicus* (Fuki) components[J]. Journal of Natural Medicines, 2015, 69(3): 432 – 440.
- [59] 以莼菜浸膏为活性成分的抗炎药[J]. 国外医药(植物药分册), 1992, 7(3): 139.
- [60] 王淑如, 夏尔宁, 周 岚. 莼菜多糖的提取、分离及某些生物活性的研究[J]. 中国药科大学学报, 1987, 18(3): 187 – 189.
- [61] 陈 晶, 张秋玉, 余光辉. 莼菜粗多糖对 HeLa 细胞生长影响的初步研究[J]. 中医学, 2020, 9(2): 177 – 184.
- [62] Li C L, Song X Y, Zhang Q Y, et al. Isolation and identification of symbiotic bacteria from *Brasenia schreberi* and analysis of their polysaccharide producing characteristics and antioxidant activity[J]. American Journal of Plant Sciences, 2020, 11(3): 307 – 322.
- [63] 韩 芳, 李京凌, 袁 婧, 等. 四大产区莼菜黄酮类物质组成分析及抗氧化、抑菌活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 236 – 242.
- [64] Legault J, Perron T, Mshvildadze V, et al. Antioxidant and anti – inflammatory activities of quercetin 7 – O –  $\beta$  – D – glucopyranoside from the leaves of *Brasenia schreberi* [J]. Journal of Medicinal Food, 2011, 14(10): 1127 – 1134.
- [65] Takashima A, Sano K, Murakami M, et al. Open – label study of effects of dietary supplement with water shield extract and sake cake powder on the skin condition of healthy adult females[J]. Journal of Biological Macromolecules, 2018, 18(3): 59 – 61.
- [66] Li J J, Liu Y H, Luo J B, et al. Excellent lubricating behavior of *Brasenia schreberi* mucilage[J]. Langmuir, 2012, 28(20): 7797 – 7802.
- [67] Wang Z N, Li J J, Liu Y H, et al. Macroscale superlubricity achieved between zwitterionic copolymer hydrogel and sapphire in water[J]. Materials & Design, 2020, 188: 108441.
- [68] Liu P X, Liu Y H, Yang Y, et al. Mechanism of biological liquid superlubricity of *Brasenia schreberi* mucilage[J]. Langmuir, 2014, 30(13): 3811 – 3816.
- [69] Elakovich S D, Wooten J W. An examination of the phytotoxicity of the water shield, *Brasenia schreberi* [J]. Journal of Chemical Ecology, 1987, 13(9): 1935 – 1940.
- [70] Lee M K, Park H J, Kwon S H, et al. Tellimoside, a flavonol glycoside from *Brasenia schreberi*, inhibits the growth of cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa* LB 2385) [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2013, 56(1): 117 – 121.
- [71] Kolmakov V I, Gladyshev M I. Growth and potential photosynthesis of cyanobacteria are stimulated by viable gut passage in crucian carp [J]. Aquatic Ecology, 2003, 37(3): 237 – 242.
- [72] Thompson K A, Sora D M, Cross K S, et al. Mucilage reduces leaf herbivory in Schreber's watershield, *Brasenia schreberi* J. F. Gmel. (Cabombaceae) [J]. Botany, 2014, 92(5): 412 – 416.
- [73] Salgado J M, Abrunhosa L, Venâncio A, et al. Combined bioremediation and enzyme production by *Aspergillus* sp. in olive mill and winery wastewaters [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 110: 16 – 23.
- [74] 邢湘臣. 莼菜史话[J]. 农业考古, 2003(3): 180 – 182, 192.
- [75] 朱秀红, 夏 丹, 杨 阳, 等. 4 种水生植物对污染水体净化效果的研究[J]. 河南农业大学学报, 2013, 47(1): 87 – 91.
- [76] Xiang Y L, Xiang Y K, Wang L P, et al. Effects of coking wastewater on the growth of five wetland plant species[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, 100(2): 265 – 270.
- [77] Cui L, Li J, Gao X Y, et al. Human health ambient water quality criteria for 13 heavy metals and health risk assessment in Taihu Lake[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2021, 16(4): 1 – 11.
- [78] 吴爱珍. 杭州地区发展西湖莼菜种植产业助力精准扶贫研究[J]. 山西农经, 2020(16): 81 – 82.
- [79] 雷必胜, 王 玲. 莼菜有机生态型高产栽培技术[J]. 科技资讯, 2013, 11(12): 153.
- [80] Pinder J E III, Hinton T G, Whicker F W. Foliar uptake of cesium from the water column by aquatic macrophytes [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2006, 85(1): 23 – 47.
- [81] 丁小余, 施国新, 常福辰, 等.  $\text{Cd}^{2+}$  污染对莼菜叶片形态学伤害反应的研究[J]. 西北植物学报, 1998, 18(3): 417 – 422.
- [82] 李大辉, 施国新, 常福辰, 等.  $\text{Hg}^{2+}$  对莼菜冬芽叶结构和淀粉粒含量的影响[J]. 南京师大学报(自然科学版), 1998, 21(3): 62 – 66.
- [83] 宋东杰, 施国新, 杨顶田.  $\text{As}^{3+}$  对莼菜冬芽的毒害[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2000, 23(1): 72 – 76.
- [84] Cheng S P. Effects of Heavy metals on plants and resistance mechanisms[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2003, 10(4): 256 – 264.
- [85] 龚汉雨, 宋雪扬, 邓楚洪, 等. 重金属离子含量对利川莼菜生长的影响[J]. 生物资源, 2018, 40(1): 83 – 91.
- [86] 夏春风, 杜经纬. 太湖莼菜种植环境监测系统研究[J]. 南方农机, 2020, 51(15): 35 – 36.
- [87] Li J F, Yi C Y, Zhang C R, et al. Effects of light quality on leaf growth and photosynthetic fluorescence of *Brasenia schreberi* seedlings[J]. Heliyon, 2021, 7(1): e06082.

- [88]张依南,张 蔚,田 昆,等. 不同水位下莼菜叶片气孔及光合特性的相关性分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2019,39(5):35-42.
- [89]郑阳霞,向 前,张伟伟,等. 配方施肥对莼菜生长、产量及品质的影响[J]. 长江蔬菜,2018(14):65-67.
- [90]潘 璠. 莼菜不同叶色品种的生理生态学研究[D]. 南京:南京大学,2020:1-74.
- [91]谢 春. 环境因子对莼菜生长的影响及优质莼菜种源筛选[D]. 南京:南京大学,2019:1-88.
- [92]吴 云. 利川福宝山莼菜高产优质无公害栽培技术[J]. 农业科技通讯,2009(9):197-198.
- [93]王苗苗,吴宜钟,吴亚胜,等. 莼菜优质高产种植技术[J]. 现代农业科技,2018(1):64-65.
- [94]夏春风,马燕平,沈长生,等. 水生莼菜植物手动控制采摘器的设计[J]. 农机化研究,2014,36(7):114-116,120.
- [95]龚恒翔,汪静妹,雷波泽,等. 用于莼菜施肥的施肥装置:CN105210522A[P]. 2020-06-02.
- [96]吴 波. 恩施州莼菜生产机械化发展对策研究[D]. 武汉:华中农业大学,2020:1-51.
- [97]赵 瑶,王文泽,彭 伟,等. 莼菜叶斑病的防治药剂研究[J]. 农学学报,2014,4(6):17-19,76.
- [98]姚琰珺,刘 欣,章强华,等. 出口莼菜如何防范农药残留超标[J]. 中国蔬菜,2011(11):25-27.
- [99]Ding J Q, Wang Y, Jin X. Monitoring populations of *Galerucella birmanica* (Coleoptera: Chrysomelidae) on *Brasenia schreberi* and *Trapa natans* (Lythraceae): implications for biological control[J]. Biological Control, 2007,43(1):71-77.
- [100]王昌全,李焕秀,彭国华,等. 土壤及水质条件与莼菜生长的关系[J]. 四川农业大学学报,2000,18(3):265-268.
- [101]闫凯莉,唐良德,吴建辉,等. 诱杀技术在害虫综合治理(IPM)中的应用[J]. 中国植保导刊,2016,36(6):17-25.
- [102]黄国林. 莼菜-泥鳅生态套养模式及技术要点浅析[J]. 南方农业,2020,14(8):146-147.
- [103]Torre A, Caradonia F, Matere A, et al. Using plant essential oils to control Fusarium wilt in tomato plants [J]. European Journal of Plant Pathology, 2016,144(3):487-496.
- [104]孙红霞. 甘草根提取物对番茄枯萎病菌生物活性及抑菌机理的研究[D]. 太谷:山西农业大学,2014:1-46.
- [105]Rongai D, Pulcini P, Pesce B, et al. Antifungal activity of pomegranate peel extract against *Fusarium* wilt of tomato [J]. European Journal of Plant Pathology, 2017,147(1):229-238.
- [106]刘佳斌,苏 炜,王金胜. 万寿菊根部生物碱类提取物抑菌活性成分的研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(3):746-747.
- [107]魏倩倩,郑瑞瑞,陈云坤,等. 3种植物提取物对6种枯萎病菌的生物活性研究[J]. 中国农学通报,2021,37(9):155-159.
- [108]Joshi R C, Martín R S, Saez - Navarrete C, et al. Efficacy of quinoa (*Chenopodium quinoa*) saponins against golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) in the Philippines under laboratory conditions[J]. Crop Protection, 2008,27(3/4/5):553-557.
- [109]张世萍,戴玉海,江洪,等. 施用油茶饼杀灭钉螺的研究[C]//全国畜禽和水产养殖污染监测与控制治理技术交流研讨会论文集. 北京:中国环境科学学会,2008:265-273.
- [110]麻程军,王 瑞,刘彬,等. 茶皂素杀螺活性及对3种水生生物的安全性[J]. 农药学报,2021,23(1):139-145.
- [111]Elakovich S, Woofen J W. Allelopathic potential of sixteen aquatic and wetland plants [J]. Journal of Aquatic Plant Management, 1989,27:78-84.
- [112]张乐婷,张饮江,张曼曼,等. 泽漆水浸液及茶皂素浸提液对浮萍的抑制效果[J]. 上海海洋大学学报,2014,23(6):890-896.
- [113]张饮江,宋盈颖,赵 圆,等. 针对浮萍暴发式生长的植物源除草剂的筛选[J]. 上海海洋大学学报,2016,25(4):575-581.
- [114]Miao H, Sun Y Y, Yuan Y F, et al. Herbicidal and cytotoxic constituents from *Aralia armata* (Wall.) seem [J]. Chemistry & Biodiversity, 2016,13(4):437-444.
- [115]刘彦彦,邵继海,刘德明,等. 白屈菜红碱对铜绿微囊藻生长和光合系统的影响[J]. 水生生物学报,2015,39(1):149-154.
- [116]Lin Y Q, Chen A W, He Y X, et al. Responses of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) to sanguinarine stress: morphological and physiological characteristics associated with competitive advantage [J]. Phycologia, 2019,58(3):260-268.
- [117]毕相东,林月娇,张 波,等. 小檗碱对铜绿微囊藻细胞膜通透性的影响[J]. 江苏农业科学,2012,40(8):229-231.
- [118]Wu J, Ma J J, Liu B, et al. Herbicidal spectrum, absorption and transportation, and physiological effect on *Bidens pilosa* of the natural alkaloid berberine [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017,65(30):6100-6113.
- [119]邝芷琪,王少婷,黄 伦,等. 小檗碱的农用活性研究进展[J]. 农药,2017,56(2):88-93,107.
- [120]周利娟,黄继光,田延琴. 小檗碱类物质在作为除草剂方面的应用:CN111493080B[P]. 2021-07-09.
- [121]周利娟,黄继光,田延琴. 黄连碱类物质在作为除草剂方面的应用:CN111480654A[P]. 2021-06-15.
- [122]Zhang X H, Zhu T F, Bi X Y, et al. Laboratory bioassay, greenhouse experiment and 3D-QSAR studies on berberine analogues: a search for new herbicides based on natural products [J]. Pest Management Science, 2021,77(4):2054-2067.
- [123]Liu H M, Huang J G, Yang S F, et al. Chemical composition, algicidal, antimicrobial, and antioxidant activities of the essential oils of *Taiwania flousiana* gaussen [J]. Molecules, 2020, 25(4):967.
- [124]马晓艳,蒋建荣,潘喻佳. 2012年苏州市水生蔬菜中有机磷农药残留状况监测及分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2013,23(15):3112-3113.
- [125]杨 松,邹 楠,高云,等. 固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法检测环境水体中18种农药残留[J]. 色谱, 2020,38(7):826-832.
- [126]吴洪梅,于 杰. 石柱县莼菜产业现状及发展思考[J]. 南方农业, 2015,9(22):89-91.
- [127]唐 璜. 出口莼菜及类似产品风险预警探究[J]. 南方农业, 2017,11(30):91-93.
- [128]邢 峰,郑军科,赵素华,等. 四种农药在莼菜加工过程中的残留量变化[J]. 农药学报,2016,18(4):503-508.