

我国水生蔬菜种质资源保存现状及创新利用

刘玉平, 孙亚林, 王直新, 黄新芳, 匡晶, 周凯, 钟兰, 季群, 刘正位, 李峰, 李双梅,
彭静, 黄来春, 杨英楠, 邢俊浩, 钱紫燕, 王海宁, 王莹, 柯卫东, 朱红莲
(武汉市农业科学院蔬菜研究所, 武汉 430207)

摘要: 水生蔬菜在我国有着悠久的栽培历史, 是我国特色水生经济作物, 主要包括莲、茭白、芋、荸荠、慈姑、蕹菜、菱、芡实、水芹、莼菜、香蒲、豆瓣菜 12 类。国家水生蔬菜种质资源圃(武汉)长期从事水生蔬菜种质资源的收集、保存、评价与利用工作, 收集国内外种质资源 3449 份, 建立了完善的保存体系, 筛选出 140 份优异种质资源, 推动了水生蔬菜基因组解析、遗传多样性和分子标记等基础研究, 促进了水生蔬菜新品种的选育和产业的可持续发展。本文总结和回顾了近 20 年来国家水生蔬菜种质资源圃(武汉)种质资源收集保存现状, 以及水生蔬菜种质资源创新利用所取得的进展, 并对种质资源的收集、保存、鉴定评价及共享服务机制进行了展望, 以期为我国水生蔬菜种质资源的保护和有效利用及产业发展提供参考。

关键词: 水生蔬菜; 种质资源圃; 保存; 利用

Conservation Status and Innovative Utilization of Aquatic Vegetable Germplasm Resources of China

LIU Yuping, SUN Yalin, WANG Zhixin, HUANG Xinfang, KUANG Jing, ZHOU Kai, ZHONG Lan, JI Qun,
LIU Zhengwei, LI Feng, LI Shuangmei, PENG Jing, HUANG Laichun, YANG Yingnan, XING Junhao,
QIAN Ziyang, WANG Haining, WANG Ying, KE Weidong, ZHU Honglian
(Institute of Vegetables, Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430207)

Abstract: China's aquatic vegetables primarily include 12 categories, such as lotus (*Nelumbo nucifera*), water bamboo (*Zizania latifolia*), taro (*Colocasia esculenta*), water chestnut (*Eleocharis dulcis*), arrowhead (*Sagittaria* spp.), water spinach (*Ipomoea aquatica*), water caltrop (*Trapa* spp.), gorgon eurgale (*Euryale ferox*), water dropwort (*Oenanthe* spp.), water shield (*Brasenia schreberi*), common cattail (*Typha* spp.) and watercress (*Nasturtium officinale*). They have a long cultivation history in China and are characteristic aquatic economic crops. The National Aquatic Vegetable Germplasm Repository (Wuhan) has long been engaged in the collection, conservation, evaluation and utilization of aquatic vegetable germplasm resources. To date, it has maintained 3449 germplasm accessions from both domestic and international sources, established a comprehensive conservation system, and identified 140 elite germplasm resources. These achievements have facilitated fundamental research in genome sequencing, genetic diversity analysis, and molecular marker development in aquatic vegetables, ultimately advancing the breeding of new aquatic vegetable varieties and promoting the sustainable development of the industry. This article summarizes and reviews the progress in germplasm collection and conservation over the past two decades, as well as progress made in the innovation and utilization of aquatic vegetable germplasm resources. We further discuss prospects on future germplasm

收稿日期: 2025-01-08 网络出版日期: 2025-03-06

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250108002>

第一作者研究方向为水生蔬菜种质资源育种, E-mail: liuyuping118@126.com

通信作者: 朱红莲, 研究方向为水生蔬菜种质资源与育种, E-mail: zhuhonglian2014@163.com

柯卫东, 研究方向为水生蔬菜种质资源与育种, E-mail: wdke63@163.com

基金项目: 国家园艺种质资源库; 国家现代农业产业技术体系(CARS-24)

Foundation projects: National Horticultural Germplasm Bank; National Modern Agricultural Industry Technology System (CARS-24)

collection, conservation, characterization, evaluation, and sharing mechanisms, aiming to offer insights for the protection, effective utilization, and industrial development of aquatic vegetable germplasm resources in China.

Key words: aquatic vegetable; germplasm repository; conservation; utilization

水生蔬菜是指在淡水中生长的、其产品可供作蔬菜食用的维管束植物,是我国传统的独具特色的一类经济作物,主要包括莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)、茭白[*Zizania latifolia* (Griseb.) Turcz. ex Stapf]、芋[*Colocasia esculenta* (L.) Schott]、水芹(*Oenanthe* spp.)、慈姑(*Sagittaria* spp.)、荸荠[*Eleocharis dulcis* (Burm. f.) Trin. ex Hensch.]、蕹菜(*Ipomoea aquatica* Forssk.)、芡实(*Euryale ferox* Salisbury)、菱角(*Trapa* spp.)、莼菜(*Brasenia schreberi* J. F. Gmel.)、香蒲(*Typha* spp.)、豆瓣菜(*Nasturtium officinale* R. Brown)12类。这些蔬菜不仅富含多种维生素和矿物质,还具有独特的风味及药用价值,对农业产业结构的优化和居民膳食结构的丰富起到了重要作用^[1],为我国水生蔬菜产业发展提供了重要的物质保障^[2]。中国是世界上水生蔬菜综合开发利用水平最高、产业发展基础最好的国家,种植面积和产量均居世界首位,据国家特色蔬菜产业技术体系统计,我国水生蔬菜的种植面积已超过86.6万hm²,形成了以长江流域为核心、珠江流域和黄河流域为主要产区并辐射全国的产业布局^[3]。

我国是大部分水生蔬菜的起源中心,在长期的自然选择和栽培驯化中,孕育出众多适应不同环境的品种,形成了极为丰富的种质资源。我国历来重视水生蔬菜种质资源的收集与保存,“国家种质武汉水生蔬菜种质资源圃”于1990年由原农业部依托武汉市农业科学院蔬菜研究所挂牌成立,2003年在国债项目“国家种质武汉水生蔬菜资源圃改建与扩建”支持下,资源圃的面积由最初的0.4 hm²扩大至5.3 hm²。2012年,因城市扩张建设,经原农业部批准,资源圃整体搬迁至武汉市江夏区郑店街,占地面积13.3 hm²,设置有资源保存区、资源评估区、引种隔离区、温室大棚以及办公区等,水生蔬菜种质资源保存能力达到3500份。2022年更名为“国家水生蔬菜种质资源圃(武汉)”(以下简称“资源圃”),是72个第一批国家级农作物、农业微生物种质资源库(圃)之一^[4]。该资源圃是我国唯一的国家级水生蔬菜资源圃,主要从事水生蔬菜种质资源的收集、保存、鉴定评价和利用研究,已收集保存国内外12类水生蔬菜种质资源3449份,是全球保存水生蔬菜种

类和资源数量最丰富的资源圃。此外,江苏苏州、江西广昌和南昌、福建建宁、浙江金华、广西南宁等地也保存了部分种类的水生蔬菜种质资源,各地保存的资源种类不同,可为资源圃提供补充和备份。本文总结了资源圃近20年来水生蔬菜种质资源收集、保存、评价和利用情况,并对未来种质资源的收集保存和创新利用提出了展望和建议。

1 资源圃水生蔬菜资源的保存现状

1.1 资源收集情况

我国大规模收集水生蔬菜种质资源始于20世纪80年代初,在国际作物遗传资源委员会“中国莲藕、茭白资源征集”、国家科学技术委员会“水生蔬菜资源圃建立及保存技术研究”“水生蔬菜资源的收集繁种和鉴定编目”等项目资助下,资源圃主要对我国长江流域及其以南地区水生蔬菜资源进行收集,收集保存水生蔬菜种质资源1000余份。2001年以后,资源圃扩大了水生蔬菜资源考察收集的范围,先后对我国20多个省(直辖市)及水生蔬菜种质资源较丰富的国家的水生蔬菜种质资源进行考察收集,重点对我国东北地区、西南地区、东南沿海及重要湖泊、河流和山地的野生资源进行收集。2015年启动“第三次全国农作物种质资源普查与收集行动”,资源圃共接收来自19个省、市、自治区的农科院、推广中心等单位移交的水生蔬菜种质资源1429份。

在资源收集过程中,发现了不同生态类型的莲资源。从泰国、新加坡、马来西亚等低纬度地区收集的莲为热带生态型,表现为终花期在11月上中旬,根状茎不膨大或略微膨大。从我国黑龙江、吉林等高纬度地区收集的莲为温带生态型,表现为5月中旬开始结藕,立叶较少,株高40 cm左右。从美国收集到美洲黄莲(*Nelumbo lutea*)为温带和亚热带2个生态型,其中温带型只长浮叶,不长立叶,不开花;亚热带型可形成立叶,正常开花。收集到一些国内知名水生蔬菜的地方品种,主要包括安徽的潜山雪湖贡藕、绩溪水芋、庐江芹芽,广西的荔浦芋、贺州香芋、栗木莲藕、桂林白慈,广东的肇庆芡实、乐昌香芋、北乡马蹄,江西的登龙粉芋、全南荸荠,湖南的寸三莲、汉寿玉臂藕、毛俊香芋等。收集到一些

稀有野生资源,如抚远野莲、梁山古代莲、普兰店古代莲、癞子菱角、澄江菱等,特别是在湖南宜章县莽山、桂东县寒口乡、茶陵县湖里湿地和江西兴国县社富乡以及贵溪市龙虎山收集到野生莼菜。莼菜是我国二级保护植物,野生莼菜的分布非常稀少。

1.2 资源保存

水生蔬菜种质的繁殖方式分为无性繁殖和有性繁殖。大多数水生蔬菜种质以无性繁殖为主,通过匍匐茎、根状茎扩大生长范围,并在一定时期形成球茎、膨大根状茎等休眠器官,这些既是食用器官,也是繁殖器官。而少数水生蔬菜种质,如菱角、芡实、蕹菜等,以有性繁殖为主,通过自花授粉或常异花授粉产生种子,用种子进行保存和更新。

资源圃主要采用田间保存方式,一般为缸或池,实行“一品一缸”或“一品一池”的隔离保存。根

据不同水生蔬菜的生长习性和对生态环境的要求,选用不同规格的保存设施。例如,芋、蕹菜等只需土壤湿润或浅水(1~2 cm)即可,莲、茭白等则需要水位在10~20 cm,而菱、芡实等则要求水位在50~100 cm。由于种质资源来源广泛,生态型多样,一些热带、亚热带地区的种质资源引种到温带后难以越冬,因此必须在温室或大棚中保存,以确保其安全越冬。尽管水生蔬菜种质多为无性繁殖,但地方品种资源或野生资源往往是混杂群体,且无性繁殖个体也可能出现突变。因此,每份种质资源必须保存一定的群体大小,以保持原有的遗传丰富性。水生蔬菜种质资源各作物保存设施规格、繁殖更新器官与数量易引起混杂的繁殖器官见表1。通过这些措施可以有效防止根状茎、匍匐茎等相互穿插混杂现象的发生。

表1 水生蔬菜种质资源保存、繁殖更新情况

Table 1 Conservation and multiplication of aquatic vegetable germplasm resources

作物名称 Crop name	保存池规格(m ²) Specification of conservation pool	更新繁殖器官 Propagated organs	更新繁殖数量(株/份) Number of propagated specimens	易引起混杂的繁殖器官 Reproductive organs contributing to admixture
莲 Lotus	6	根状茎	4	种子
茭白 Water bamboo	3	短缩茎	6	根状茎
芋 Taro	1(旱地)	球茎、匍匐茎	7	匍匐茎
蕹菜 Water spinach	4(旱地)	种子、匍匐茎	8	异花授粉种子
水芹 Water dropwort	3	地上茎、根状茎	30	种子
荸荠 Water chestnut	3	球茎	10	种子
菱 Water caltrop	6	果实	6	果实
莼菜 Water shield	33	根状茎、短缩茎	50	种子
豆瓣菜 Watercress	6	种子、匍匐茎	50	异花授粉种子
慈姑 Arrowhead	3	球茎、珠芽	6	种子
芡实 Gorgon eurgale	33	种子	5	种子
蒲菜 Common cattail	3	根状茎	6	种子

截至2024年底,国家水生蔬菜种质资源圃(武汉)已保存来自国内26个省级行政区以及13个国家的水生蔬菜种质资源3449份(表2),是目前世界上保存水生蔬菜种类、资源数量、生态型和类型最丰富的资源圃。

此外,资源圃还积极开展了莲^[5]、芋^[6-7]、慈姑^[8]、荸荠^[9]等水生蔬菜茎尖组织培养工作,取得了较大进展,成功诱导形成了试管繁殖器官。其中,荸荠、芋的试管球茎可以在人工控制的环境下长期保存,并对部分重要资源和难以越冬、越夏的资源进行离体保存,有效降低了资源丢失的风险(数据未发

表)。离体保存技术为水生蔬菜种质资源的长期安全保存提供了新的手段,也为后续的种质创新和遗传研究提供了有力支撑。

1.3 资源鉴定编目

在国家科技基础条件平台建设专项、农业部行业标准制订和修订项目的支持下,先后起草完成《莲种质资源描述规范和数据标准》^[10]、《茭白种质资源描述规范和数据标准》^[11]、《芋种质资源描述规范和数据标准》^[12]、《蕹菜种质资源描述规范和数据标准》^[13]、《水芹种质资源描述规范和数据标准》^[14]、《菱种质资源描述规范和数据标准》^[15]、《荸荠种质

表2 水生蔬菜种质资源保存编目概况

Table 2 Overview of cataloging and preserving aquatic vegetable germplasm resources in the repository

序号 No.	作物名称 Crop name	保存种质份数 Number of germplasm accessions preserved	编目种质份数 Number of catalogued germplasm accessions		种 Species
			总计 Total	国外引进 Import from aboard	
1	莲	843	721	38	莲、美洲黄莲
2	茭白	338	262	3	菰
3	芋	1171	1190	28	滇南芋、芋、大野芋、海芋、千年芋
4	蕹菜	109	78	2	蕹菜
5	水芹	278	190	4	水芹、中华水芹
6	荸荠	170	154	3	荸荠
7	菱	229	143	1	细果野菱、欧菱
8	莼菜	15	13	0	莼菜
9	豆瓣菜	19	18	5	豆瓣菜
10	慈姑	158	132	3	慈姑、野慈姑、利川慈姑、小慈姑
11	芡实	53	38	0	芡实
12	蒲菜	66	60	0	水烛、宽叶香蒲
合计 Total		3449	2999	87	23

资源描述规范和数据标准》^[16]、《芡实种质资源描述规范和数据标准》^[17]、《蒲菜种质资源描述规范和数据标准》^[18]、《慈姑种质资源描述规范和数据标准》^[19]等10种水生蔬菜的描述规范和数据标准以及NY/T 2938-2016《芋种质资源描述规范》^[20]、NY/T 2937-2016《莲种质资源描述规范》^[21]、NY/T 2941-2016《茭白种质资源描述规范》^[22]等3项行业标准。该系列规范和行业标准分别从基本信息、形态特征、生物学特性、品质特性、抗逆性、抗病虫性等方面进一步规范了我国水生蔬菜种质资源鉴定与评价,促进了我国水生蔬菜种质资源信息平台的建设与共享。

对保存在圃内的水生蔬菜资源按照各个作物的数据描述规范和数据标准,进行了规范化整理和数据补充采集。在品质性状鉴定方面,水生蔬菜主要食用根茎和幼嫩的叶,主要测试干物质、淀粉、维生素C和蛋白质含量等,完成莲^[23]、芋^[24-25]、荸荠^[26]、慈姑^[27]、豆瓣菜^[28]等1100份水生蔬菜种质资源品质性状的测定和数据整理;在抗病性状鉴定方面,建立芋疫病抗性鉴定方法和荸荠秆枯病鉴定方法^[29-30],完成350份芋资源和30份荸荠资源抗病性鉴定。依据《中国植物志》^[31],规范了水生蔬菜种质资源的学名,将原先12个科13个属34个种整理成12个科15个属23个种(含2个近缘种)。截至2024年12月,编目入圃资源保存总数为2999份(表2),

其中地方品种1935份,野生资源735份,选育品种和遗传材料共329份。目前已经完成12种水生蔬菜种质资源2999份的共性数据和特性数据整理工作,整理数据值26万余个,提供了1478份资源的图像1662张,并上报国家园艺种质资源信息网(www.nhgrc.cn),为水生蔬菜种质资源共享利用提供坚实的基础。

1.4 优异种质发掘

在分析种质资源多年鉴定数据的基础上,按照NY/T 2183-2012《农作物优异种质资源评价规范 茭白》^[32]、NY/T 2182-2012《农作物优异种质资源评价规范 莲藕》^[33]、NY/T 2327-2013《农作物种质资源鉴定评价技术规范 芋》^[34]和黄新芳等^[35]报道的选择原则,并结合我国水生蔬菜科研和生产的实际,筛选出140份优异种质资源,占资源总数的5.48%,其中莲32份、茭白11份、芋54份、荸荠29份、慈姑2份、蕹菜1份、菱5份、芡实1份、水芹2份、香蒲1份、豆瓣菜2份,优异资源为遗传研究和品种改良提供了宝贵材料(图1)。发掘黄湾贡藕、沔城藕等粉质莲藕资源5份,该类资源具有皮白、煨汤口感粉糯的特点;发掘81-35和81-43莲优异亲本资源2份,该类型资源具有入泥浅(低于30 cm)、产量高、配合力高的特点;发掘芦林湖藕、武植2号等藕带脆嫩资源2份,该类资源藕带表皮白色,平均长58 cm,粗

1.4 cm,单支重 90 g 以上;发掘美人茭、姜湖茭白等商品性好的茭白资源 2 份,该类型资源肉质茎白色,肉质细嫩,单个重 150 g 以上,采收期长,纤维素少;发掘荔浦芋、Phichit 芋等高淀粉芋种质 6 份,淀粉含量达 25% 以上;发掘高要黄肉芋、雨林红梗等芋肉

颜色特异的种质 3 份,该类资源芋数量极少,芋肉颜色为黄色或红色,而一般资源芋肉颜色为白色;发掘泗角荸荠、资阳芥、余干芥、六合芥等优良平脐荸荠资源 7 份,该类资源肉厚,易削皮,商品性好,单个球茎质量达 45 g 以上。



A: 南强短节(整藕质量高); B: 黄湾贡藕(粉质); C: 芦林湖藕(藕带脆嫩); D: 大紫红(脆质); E: 洪山李桥芋(子芋质量高); F: 高要黄肉芋(芋肉黄色); G: 美人茭(高产、商品性好); H: 姜湖茭白(净茭率高); I: 泗角荸荠(平脐、品质优); J: 黑龙潭慈姑(淀粉含量高); K: 溧阳水芹(耐低温,纤维素含量低); L: 癞子菱角(两角圆钝)

A: Nanqiangduanjie(The whole lotus root weight is high); B: Huangwangongou(The lotus root tastes powdery); C: Lulinhuou(The lotus sprout tastes crispy and tender); D: Dazihong(The lotus root tastes crispy); E: Hongshanliqiaoyu(The weight of cormels is high); F: Gaoyaohuangrouyu(The flesh color of taro is yellow); G: Meirenjiao(The fleshy stems have high yield and good marketability); H: Jianghujiabai(The rate of net water bamboo is high); I: Sijiaobiqi(The navel part of the bulb is flat with elite comprehensive characters); J: Heilongtangcigu(The bulbs are high in starch content); K: Liyangshuiqin(The plant is cold tolerant, and the stem has a low cellulose content); L: Laizilingjiao(Both horns of the fruit are rounded and blunt)

图 1 部分水生蔬菜优异资源

Fig. 1 Snapshots of selected elite aquatic vegetable germplasm resources

2 种质资源的创新利用

近 20 年来,资源圃向中国科学院植物研究所、北京市农林科学院、中国农业科学院作物科学研究所、西南林业大学、华中农业大学、江苏省农业科学

院、湖北省农业科学院等高校及科研院所提供资源 7300 份次,用于开展品种选育、倍性鉴定、基因组测序、起源及亲缘关系、遗传多样性、传粉生物学、抗性鉴定等方面研究。向江苏、安徽、广西、云南、四川、重庆、河南、山东等 20 多个省的农技推广部门、

合作社、企业、种植户等提供资源3000份次,用于农业生产、水体净化、生态园区的建设等。

2.1 支撑基础研究

在基因组研究方面,完成了中间湖野莲的基因组测序^[36],组装基因组大小在792 Mb左右,注释了36385个基因。此外,武汉大学、浙江大学、江苏省农业科学院、南京农业大学、扬州大学先后完成了莲^[37]、茭白^[38]、菱^[39]、芋^[40]、水芹^[41]、芡实^[42]等基因组测序,水生蔬菜高质量基因组的完成为研究植物遗传进化、重要功能基因分子机理和分子遗传育种提供重要支撑。

在遗传多样性研究方面,对296份不同地理位置的莲花种质进行重测序分析,发现美洲黄莲与莲具有较远的遗传距离,可明确划分为两个种。遗传多样性分析表明,野莲的多样性从南到北呈递减趋势,东南亚和云南地区野莲多样性高于长江流域和东北地区野莲,推测云南和东南亚地区可能为亚洲莲的起源中心。此外,栽培莲中的子莲和藕莲亲缘关系较远,推测它们可能由不同区域的野莲驯化而来^[43]。对来自我国16个省份的234份多子芋和多头芋种质资源进行遗传多样性分析,这些资源可分为8个组,分组与地理来源相关性不大,最终筛选出41份核心种质资源,可代表总体99.71%的遗传变异^[44]。对国内和东南亚的69份二倍体芋资源进行遗传多样性分析,这些资源可以分为5个群,其中,野芋和匍匐茎魁芋遗传关系较近,槟榔芋与花用芋遗传关系较近,野芋的遗传多样性最高,槟榔芋的遗传多样性最低^[45]。对158份水芹种质资源进行遗传聚类分析,可将其分为线叶水芹(*Oenanthe linearis*)和水芹(*Oenanthe javanica*)两个组,与表型聚类结果一致,线叶水芹进一步细分为线叶型和深裂叶型两种^[46]。利用SNP标记分析111份慈姑种质的遗传多样性,未能将野慈姑亚种(*S. trifolia* subsp. *trifolia*)和华夏慈姑亚种(*S. trifolia* subsp. *leucopetala*)区分成两个独立的分支,可能是由于慈姑为异花授粉作物,两个亚种之间可以杂交^[47]。对19份豆瓣菜多样性进行分析,发现基于表型分析可将其划分为2类,群体结构分析和主成分分析均将其归为一组,表明豆瓣菜资源虽然表型上存在变异,但遗传基础狭窄,遗传多样性不高^[48]。对27份莼菜种质进行遗传多样性分析,发现野生资源的核苷酸多样性高于栽培品种,栽培品种与野生资源之间的遗传分化较小,说明目前莼菜栽培品种的人工驯化程度较低^[49]。通过表型和分子标记对种质资源进行遗传

多样性分析,有助于解析我国水生蔬菜种质资源的亲缘关系和遗传背景差异,为种质资源的收集、保存以及遗传育种工作提供重要的理论基础。

在产量性状方面,邢俊浩^[23]调查了205份核心莲资源的22个农艺性状,筛选出整藕质量大于3.50 kg的2份莲地方种质:巴河藕、南强短节,通过全基因组关联分析(GWAS, genome-wide association study),找到与主藕质量相关联SNP位点2个,获得6个候选基因,找到与主藕节间质量的SNP位点2个,获得2个候选基因。Liu等^[50]构建了莲藕高密度SNP遗传图谱,共鉴定出14个与主藕数量和藕形指数相关的显著QTL,确定*cqREI-LG2*为主效QTL,*NnBEL6*为候选基因,并验证了其在马铃薯块茎膨大中的作用。刘正位等^[51]以圆柱形莲子资源中间湖野莲和圆球形莲子资源清迈野莲为亲本,构建了F₂遗传群体,利用197个SSR标记对亲本及F₂单株进行基因分型,找到了单粒质量、开花数、心皮数、饱粒数等6个莲子产量性状关联的28个QTL位点。

在品质性状方面,对205份莲核心种质的淀粉、粉脆质地等性状进行鉴定,发现选育品种的淀粉含量等营养品质性状低于地方品种与野生资源;野莲资源淀粉含量更高,但粉质特性并不突出,说明莲淀粉含量与粉脆特性相关性较低^[23]。糖含量是影响鲜食莲子口感的重要因素,对45份子莲资源的可溶性固形物、蔗糖、果糖、葡萄糖含量等7个品质性状鉴定,筛选出蔗糖含量高(25 mg/g以上)的种质3份,分别为太空2号、宣莲、广昌白花莲(数据未发表)。Song等^[52]以古代莲(低甜度)、建选17(高甜度)为材料,通过莲子发育转录组分析,鉴定到1个在莲子子叶中优势表达的基因*NnSUS1*,两个品种的CDS区域没有检测到变异,但在启动子区域发现了2个SNP和1个InDel。这些变异可能影响*NnSUS1*基因的表达调控,从而导致可溶性糖含量的差异。

2.2 支撑育种

水生蔬菜除菱角、芡实、蕹菜、豆瓣菜4种作物用种子繁殖外,其他几乎都是无性繁殖;育种方法主要依靠系统选育、诱变育种,育种效率较低。近年来系统开展了芋、荸荠、慈姑、菱、莼菜等作物的传粉生物学^[53-57]和种子生物学^[58-62]研究,在杂交育种技术方面取得突破,为水生蔬菜种质创制、新品种选育提供了新途径。

利用发掘的优异种质,通过系统选育、杂交育种和诱变育种等手段,获得了一批优异株系,选育

出了适应不同消费需求的水生蔬菜新品种28个,获得新品种保护权7项。

在莲育种上,以81-35为骨干亲本,先后杂交选育出鄂莲5号、鄂莲7号^[63]、鄂莲9号、鄂莲10号^[64]、鄂莲11号、鄂莲12号、鄂莲13号和鄂莲14号等^[65];以81-43为骨干亲本杂交选育出鄂莲6号^[66]、白玉藕和鄂莲15号等系列莲藕品种。这些莲品种具有入泥浅、藕形美观、产量高的显著特点;它们既有粉质藕,也有脆质藕,满足不同口感需求;同时,早熟、中熟和晚熟品种配套齐全,能够实现全年均有鲜藕供应。以芦林湖藕为骨干亲本选育出了白玉簪1号、白玉簪2号、白玉簪3号等系列藕带品种,比传统的地方品种增产20%以上。利用太空莲36号和建造17号为骨干亲本选育了鄂子莲1号、翠玉^[67]、翠丰、超新星等系列子莲新品种,莲子单粒鲜重由3g提高到4.4g,单粒重量提高了45%以上,单位面积产量提高了40%以上。

在茭白育种上,从古夫茭变异单株中选育出鄂茭3号,从鄂茭2号变异株中选育出鄂茭4号。在芋育种上,从四川多子芋资源走马羊红禾系统选育出鄂芋1号^[68],从井冈山芋头变异单株系统选育出鄂芋2号,以荔浦芋为亲本杂交选育出魁芋新品种汉青红^[69],成为我国首个通过杂交选育的芋新品种。在荸荠育种上,从台湾荸荠实生后代选育出鄂荸荠2号,由团风荸荠诱变选育出鄂荸荠3号,由四角大荠系统选育出鄂荸荠4号。在菱育种上,以嘉鱼菱为母本,汉川红菱为父本,通过人工杂交、系谱选择选育出早熟菱新品种六月菱^[70]。在水芹育种上,从玉祁水芹的实生后代经单株选择育成鄂水芹1号。这些新品种具有优质、丰产、易采挖等特点,适应不同的消费习惯,为水生蔬菜种业带来了显著的变革。

2.3 支撑产业提升

水生蔬菜优异种质在农业产业结构调整和产业可持续发展中发挥重要作用,为水生蔬菜产业高质量发展做出了重要贡献。资源圃利用优异种质选育的水生蔬菜新品种资源已在国内水生蔬菜主要产区直接利用,近10年累计利用面积267万hm²以上,创造经济效益2000亿元以上。其中鄂莲系列莲藕新品种资源已成为国内莲藕主栽品种,在黄河流域、长江流域、珠江流域20多个省、市、自治区的主产区大面积利用,在国内主产区覆盖率达85%以上^[71]。鄂子莲系列品种逐渐受到消费者青睐,特别是鄂子莲1号,主要种植于武汉近郊作为鲜食子莲,其粒大饱满、口感清甜,深受市场欢迎,在湖北种植

面积逐年扩大^[72]。白玉簪系列藕带品种产量达400~500kg/667m²,较传统品种提高20%以上,成为湖北省藕带产区主栽品种,推动了藕带加工业的发展,藕带加工年产值达50亿元以上^[65]。菱、荸荠、茭白、芋等水生蔬菜新品种资源在主产区均进行了示范利用。水生蔬菜优异种质的利用,支撑一批企业成为国家、省、市的龙头企业,扶持了一大批合作社、种植户,带动周边农民脱贫致富。

另外,资源圃还加强对水生蔬菜著名地方品种的开发利用,一方面是对著名地方品种的提纯复壮,对湖北浠水县地方品种巴河藕、仙桃地方品种沔城藕、潜江市地方品种黄湾贡藕和汉川地方品种杨林沟芋头开展提纯复壮,然后返回原产地种植,取得良好经济效益和社会效益。沔城藕是一个古老的地方品种,距今已有一千多年历史,是著名的“仙桃三宝”之一,生吃如秋梨般清甜,熟食如板栗般粉扑,由于长期种植,出现品种混杂退化、产量下降和品质变差的情况^[73],提纯复壮后的沔城藕品质恢复如初,产量由750kg/667m²提高到1500kg/667m²,市场销售价格较其他品种高2元/kg,极大激发了农户的种植积极性,在沔城回族镇已发展到133hm²以上。另一方面,对已经消失的品种进行扩繁并返回到原产地以恢复当地生态环境,蔡甸莲花湖藕因独特的风味在宋代被列为贡品,但因城市湖泊治理被清理而消失,利用资源圃内先前收集保存的莲花湖藕,经扩繁后返回原产地种植,逐渐恢复了当地生态。这些著名地方品种资源的利用,有力地促进了当地国家地理标志保护产品的保护,使古老传统的地方品种焕发了新的生机,不仅有助于保护生物多样性,还促进了地方经济发展和农民增收。

3 展望

3.1 加强水生蔬菜种质资源收集

通过30多年积累以及“第三次农作物种质资源普查与收集行动”的开展,资源圃已对我国大部分地区的水生蔬菜种质资源进行了考察收集,但国内部分地区水生蔬菜野生资源、特色地方品种仍有遗漏,另外资源圃国外资源占比还较低,因此,为了有效保护水生蔬菜资源,计划重点开展以下工作:一是开展野生资源收集方法的研究,通过明确收集目标与范围、合理确定取样数量、科学设置取样点分布以及利用现代技术辅助取样等方法,更全面、准确地收集野生资源,为后续研究、保护和利用工作奠定坚实的基础。二是水生蔬菜种质资源的定向

收集,对我国云南、四川、贵州等偏远地区水生蔬菜野生资源、特色地方品种以及柬埔寨等东南亚国家水生蔬菜种质资源进行考察收集,不断完善水生蔬菜核心种质资源库。三是加强国际交流与合作,与种质资源丰富的国家和地区合作,制定科学的引进与收集策略,有针对性地引入或收集国外珍贵资源,从而提高资源圃内国外资源的数量与占比。

3.2 加强水生蔬菜种质资源保存技术研究

目前水生蔬菜种质资源的保存方式主要以田间种植保存为主,保存形式较单一,在植物病虫害、极端天气等因素影响下,种质资源存在混杂和丢失的风险,因此为了安全有效地保存种质资源,亟待重点开展以下工作,一是进一步提升资源圃硬件设施,改善水生蔬菜种质资源保存条件,如建立隔离圃、人工气候室等,并规范资源维护和更新程序,防止资源混杂和丢失,保障资源安全;二是进一步优化种质资源离体保存技术,延长离体保存时间,降低保存成本,对珍稀或难以常规保存的资源进行离体保存;三是加强顽拗型种子(茭白、水芹、莼菜、慈姑、芡实、菱等)保存技术的研究,完善资源保存方式。

3.3 加强水生蔬菜种质资源鉴定评价和挖掘利用

资源圃保存水生蔬菜资源数量居世界第一位,尽管在种质资源的收集与保存方面取得了显著成就,但目前基础研究较薄弱,已开展精准鉴定的资源仍十分有限。表型组学和分子生物学的快速发展为水生蔬菜种质资源的鉴定评价以及挖掘利用提供了强大的技术支撑。在此背景下,计划在前期工作的基础上,重点从以下三个方面开展工作:一是继续完善水生蔬菜种质资源的鉴定,特别是对“第三次全国农作物种质资源普查与收集行动”接收的资源进行系统全面的数据采集,进一步挖掘优异种质资源;二是推进主要水生蔬菜种质资源的精准鉴定工作,重点聚焦产量、品质、抗莲腐败病、抗芋疫病、耐盐、宜机化等性状和基因型的精确评估,并挖掘育种性状相关的优异基因,为新种质创制及育种利用提供基因资源;三是搭建水生蔬菜种质资源数据挖掘平台,充分借助人工智能、云计算等前沿技术^[74],深入剖析海量种质资源数据,为高效筛选水生蔬菜资源提供有力保障。

3.4 完善水生蔬菜种质资源共享服务机制

在国家科技基础条件平台建设项目的支持下,水生蔬菜种质资源共享服务机制已基本建立,并在全社会实现种质资源实物与数据共享。然而,当前仍存在共享服务效率不高,服务反馈不及时等问

题,未来将从三方面优化服务,一是创新服务形式,提高服务水平。开展形式多样的活动,如定期开展科普宣传和现场展示活动,让参观者更直观认识和了解水生蔬菜种质资源。二是增强服务意识,主动靠前服务。面向科研院所、龙头企业和规模种植户,提供种质资源实物、科学数据和栽培技术等一站式服务。同时,密切追踪用户的最新需求,精准筛选并提供契合用户需求的种质资源,为科研、生产等活动提供坚实有力的资源支撑,促进水生蔬菜优异资源共享利用。三是深化面向水生蔬菜主产区的专题服务,持续开展以“乡村振兴和产业可持续发展”为主题的专题服务,巩固前期工作成效,发挥优异种质资源对产业的支撑作用,促进水生蔬菜产业高质量发展。

参考文献

- [1] 柯卫东,黄新芳,李建洪,严守雷,刘义满,李峰.我国水生蔬菜科研与生产发展概况.长江蔬菜,2015(14):33-37
Ke W D, Huang X F, Li J H, Yan S L, Liu Y M, Li F. Overview of the research and production development of aquatic vegetables in China. Journal of Changjiang Vegetables, 2015(14): 33-37
- [2] 吴曼,宗义湘,赵帮宏,朱红莲.中国水生蔬菜产业发展现状、存在问题及发展思路.长江蔬菜,2019(2):35-41
Wu M, Zong Y X, Zhao B H, Zhu H L. Development status, problems and development ideas of aquatic vegetables industry in China. Journal of Changjiang Vegetables, 2019(2): 35-41
- [3] 柯卫东,李峰,黄新芳,刘义满,彭静.水生蔬菜种质资源研究及利用进展.中国蔬菜,2007(B08):72-75
Ke W D, Li F, Huang X F, Liu Y M, Peng J. Research and utilization progress of germplasm resources of aquatic vegetables. China Vegetables, 2007(B08): 72-75
- [4] 农业农村部种业管理司.关于第一批拟确定国家级农作物、农业微生物种质资源库的公示.(2022-08-10)[2024-12-08].
http://www.zys.moa.gov.cn/gsgg/202208/t20220810_6406720.htm
Department of Seed Industry, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Announcement on the first batch of national crop and agricultural microbial germplasm repositories. (2022-08-10)[2024-12-08]. http://www.zys.moa.gov.cn/gsgg/202208/t20220810_6406720.htm
- [5] 柯卫东,彭静,刘玉平,刘义满,黄新芳,叶元英,李双梅,李峰,朱红莲,黄来春,赵春,李明华. CN201010552971.9 试管藕诱导技术. 2012-05-23
Ke W D, Peng J, Liu Y P, Liu Y M, Huang X F, Ye Y Y, Li S M, Li F, Zhu H L, Huang L C, Zhao C, Li M H. CN201010552971.9 Test tube lotus rhizome induction technology. 2012-05-23
- [6] 刘玉平,柯卫东,王芸,孙亚林,黄新芳,王燕韦,李明华,黄来

- 春,钟兰,周凯,匡晶,刘正位,季群,赵春. CN112931207A 一种脱毒试管芋的育苗方法. 2023-03-10
- Liu Y P, Ke W D, Wang Y, Sun Y L, Huang X F, Wang Y W, Li M H, Huang L C, Zhong L, Zhou K, Kuang J, Liu Z W, Ji Q, Zhao C. CN112931207A A seedling raising method of virus-free test tube taro. 2023-03-10
- [7] 刘玉平,柯卫东,叶元英,黄新芳,黄来春. 芋脱毒快繁技术研究. 中国蔬菜,2007(B08): 30-32
- Liu Y P, Ke W D, Ye Y Y, Huang X F, Huang L C. Studies on technology for virus-elimination and rapid propagation of taro (*Colocasia esculenta*). China Vegetables, 2007 (B08): 30-32
- [8] 朱红莲,柯卫东,汪李平. 培养条件对慈姑试管球茎形成的影响. 中国蔬菜,2007(B08): 35-37
- Zhu H L, Ke W D, Wang L P. Effect of culture condition on micro-tuber induction of *Saginata sagittifolia* L.. China Vegetables,2007(B08): 35-37
- [9] 彭静,柯卫东,李峰,黄来春,李汉华. 荸荠的组培快繁与大田种植. 中国蔬菜,2007(B08): 33-35
- Peng J, Ke W D, Li F, Huang L C, Li H H. Tissue culture and rapid propagation of Chinese water chestnut [*Eleocharis tuberosa* (Roxb.) Roem. et Schult.] and its plantation in the fields. China Vegetables,2007 (B08): 33-35
- [10] 柯卫东,李峰. 莲种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2005
- Ke W D, Li F. Descriptors and data standard for lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.). Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [11] 刘义满,柯卫东. 茭白种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2005
- Liu Y M, Ke W D. Descriptors and data standard for water bamboo [*Zizania latifolia* (Griseb.) Turcz. ex Stapf]. Beijing: China Agriculture Press,2005
- [12] 黄新芳,柯卫东. 芋种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006
- Huang X F, Ke W D. Descriptors and data standard for taro [*Colocasia esculenta* (Linn.) Schott]. Beijing: China Agriculture Press,2006
- [13] 刘义满,柯卫东. 蕹菜种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006
- Liu Y M, Ke W D. Descriptors and data standard for water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.). Beijing: China Agriculture Press,2006
- [14] 叶元英,柯卫东. 水芹种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006
- Ye Y Y, Ke W D. Descriptors and data standard for water dropwort (*Oenanthe* spp.). Beijing: China Agriculture Press, 2006
- [15] 彭静,柯卫东. 菱种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2013
- Peng J, Ke W D. Descriptors and data standard for water caltrop (*Trapa* spp.). Beijing: China Agriculture Press,2013
- [16] 李峰,柯卫东. 荸荠种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2013
- Li F, Ke W D. Descriptors and data standard for water chestnut [*Eleocharis dulcis* (Burm. f.) Trin. ex Hensch.]. Beijing: China Agriculture Press,2013
- [17] 柯卫东,朱红莲. 芡实种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2013
- Ke W D, Zhu H L. Descriptors and data standard for gorgon eurgale (*Euryale ferox* Salisb.). Beijing: China Agriculture Press,2013
- [18] 李双梅,柯卫东. 蒲菜种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2013
- Li S M, Ke W D. Descriptors and data standard for common cattail (*Typha* spp.). Beijing: China Agriculture Press,2013
- [19] 李峰,柯卫东. 慈姑种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2013
- Li F, Ke W D. Descriptors and data standard for arrowhead *Sagittaria trifolia* L. var. *sinensis* (Sims) Makino. Beijing: China Agriculture Press,2013
- [20] 孙亚林,黄新芳,熊兴平,董红霞,江用文,李峰,李明华,柯卫东,匡晶,刘正位,王芸. NY/T 2938-2016 芋种质资源描述规范. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016
- Sun Y L, Huang X F, Xiong X P, Dong H X, Jiang Y W, Li F, Li M H, Ke W D, Kuang J, Liu Z W, Wang Y. NY/T 2938-2016 Descriptors for taro germplasm resources. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic China, 2016
- [21] 朱红莲,柯卫东,熊兴平,李峰,江用文,彭静,刘玉平,匡晶,刘正位,王芸,钟兰. NY/T 2937-2016 莲种质资源描述规范. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016
- Zhu H L, Ke W D, Xiong X P, Li F, Jiang Y W, Peng J, Liu Y P, Kuang J, Liu Z W, Wang Y, Zhong L. NY/T 2937-2016 Descriptors for lotus germplasm resources. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic China, 2016
- [22] 钟兰,刘义满,熊兴平,黄来春,江用文,李双梅,周凯,柯卫东,朱红莲,孙亚林,董红霞. NY/T 2941-2016 茭白种质资源描述规范. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016
- Zhong L, Liu Y M, Xiong X P, Huang L C, Jiang Y W, Li S M, Zhou K, Ke W D, Zhu H L, Sun Y L, Dong H X. NY/T 2941-2016 Descriptors for water bamboo germplasm resources. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic China, 2016
- [23] 邢俊浩. 莲藕主要农艺性状鉴定与群体遗传结构分析. 武汉: 华中农业大学, 2023
- Xing J H. Identification of main agronomic traits and analysis of population genetic structure of lotus root. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023
- [24] 黄新芳,彭静,柯卫东,刘义满,孙亚林,董红霞,李峰,刘玉平,朱红莲,李双梅,叶元英,黄来春,李明华,王芸,钟兰,周凯. 206份芋种质资源品质性状分析. 植物遗传资源学报, 2014,15(3): 519-525
- Huang X F, Peng J, Ke W D, Liu Y M, Sun Y L, Dong H X, Li F, Liu Y P, Zhu H L, Li S M, Ye Y Y, Huang L C, Li M

- H, Wang Y, Zhong L, Zhou K. Analysis on quality characters of 206 taro [*Colocasia esculenta* (Linn.) Schott] germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(3): 519-525
- [25] 黄新芳,孙亚林,杨英楠,柯卫东,彭静,董红霞,刘玉平,李峰,李双梅,朱红莲,刘义满,黄来春,李明华,周凯,匡晶,刘正位,王芸,钟兰,季群,王直新. 多子芋种质资源主要农艺及品质性状鉴定评价与优异种质筛选. *中国蔬菜*, 2024(7): 92-98
Huang X F, Sun Y L, Yang Y N, Ke W D, Peng J, Dong H X, Liu Y P, Li F, Li S M, Zhu H L, Liu Y M, Huang L C, Li M H, Zhou K, Kuang J, Liu Z W, Wang Y, Zhong L, Ji Q, Wang Z X. Identification and evaluation on the main agricultural and qualitative traits and screening of elite and rare germplasm resource in taro with numerous cormels germplasm resources. *China Vegetables*, 2024(7): 92-98
- [26] 李峰,彭静,李双梅,黄来春,柯卫东,李明华. 荸荠种质资源品质性状综合评价. *湖北农业科学*, 2013, 52(21): 5241-5244
Li F, Peng J, Li S M, Huang L C, Ke W D, Li M H. Comprehensive evaluation on quality characters of Chinese water chestnut. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(21): 5241-5244
- [27] 李峰,彭静,刘玉平,叶元英,刘义满,黄来春,朱红莲,李双梅,柯卫东. 慈姑种质资源的品质性状分析. *中国蔬菜*, 2012(4): 48-53
Li F, Peng J, Liu Y P, Ye Y Y, Liu Y M, Huang L C, Zhu H L, Li S M, Ke W D. Quality traits analysis of corm in arrowhead germplasm. *China Vegetables*, 2012(4): 48-53
- [28] 李双梅,黄新芳,彭静,朱红莲,刘玉平,李明华,钟兰,季群,匡晶,柯卫东. 豆瓣菜种质资源主要营养成分及重金属含量测定与评价. *中国农学通报*, 2022, 38(36): 56-61
Li S M, Huang X F, Peng J, Zhu H L, Liu Y P, Li M H, Zhong L, Ji Q, Kuang J, Ke W D. Main nutrient components and heavy metal contents of watercress germplasm resources: Determination and evaluation. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(36): 56-61
- [29] 王直新,孙亚林,谢甲涛,黄新芳,柯卫东,朱红莲,刘玉平,董红霞. DB42/T 2106—2023 芋疫病抗性室内离体接种鉴定技术规程. 武汉: 湖北省市场监督管理局, 2023
Wang Z X, Sun Y L, Xie J T, Huang X F, Ke W D, Zhu H L, Liu Y P, Dong H X. DB42/T 2106—2023 Code of practice for identification of taro to leaf blight in room. Wuhan: Administration for Market Regulation of Hubei Province, 2023
- [30] 李峰,柯卫东,李双梅,彭静,李明华,孙亚林. 荸荠种质资源对秆枯病的田间抗性鉴定. *中国蔬菜*, 2013(4): 82-85
Li F, Ke W D, Li S M, Peng J, Li M H, Sun Y L. Identification of field resistance to stem blight in Chinese water chestnut resources. *China Vegetables*, 2013(4): 82-85
- [31] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 2004
Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. *Flora of China*. Beijing: Science Press, 2004
- [32] 刘义满,柯卫东,李峰,江用文,钟兰,黄新芳,彭静,朱红莲,李双梅. NY/T 2183-2012 农作物优异种质资源评价规范 茭白. 北京: 中华人民共和国农业部, 2012
Liu Y M, Ke W D, Li F, Jiang Y W, Zhong L, Huang X F, Peng J, Zhu H L, Li S M. NY/T 2183-2012 Evaluating standards for elite and rare germplasm resources: Water bamboo [*Zizania latifolia* (Griseb.) Turcz. ex Stapf.]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic China, 2012
- [33] 柯卫东,李峰,彭静,江用文,朱红莲,刘玉平,孙亚林,黄来春. NY/T 2182-2012 农作物优异种质资源评价规范 莲藕. 北京: 中华人民共和国农业部, 2012
Ke W D, Li F, Peng J, Jiang Y W, Zhu H L, Liu Y P, Sun Y L, Huang L C. NY/T 2182-2012 Evaluating standards for elite and rare germplasm resources: Lotus root [*Nelumbo nucifera* Gaertn.]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic China, 2012
- [34] 黄新芳,柯卫东,刘义满,李峰,江用文,熊兴平,孙亚林,董红霞,叶元英,刘玉平,彭静,李双梅,朱红莲,黄来春,王芸,钟兰,周凯. NY/T 2327-2013 农作物种质资源鉴定评价技术规范 芋. 北京: 中华人民共和国农业部, 2013
Huang X F, Ke W D, Liu Y M, Li F, Jiang Y W, Xiong X P, Sun Y L, Dong H X, Ye Y Y, Liu Y P, Peng J, Li S M, Zhu H L, Huang L C, Wang Y, Zhong L, Zhou K. NY/T 2327-2013 Technical code for evaluating crop germplasm resources: Taro [*Colocasia esculenta* (Linn.) Schott]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic China, 2013
- [35] 黄新芳,柯卫东,刘义满,李峰,江用文,熊兴平,孙亚林,董红霞,叶元英,刘玉平,彭静,李双梅,朱红莲,黄来春,王芸,钟兰,周凯,李明华. 芋优异种质资源鉴定评价研究. *长江蔬菜*, 2013(18): 85-91
Huang X F, Ke W D, Liu Y M, Li F, Jiang Y W, Xiong X P, Sun Y L, Dong H X, Ye Y Y, Liu Y P, Peng J, Li S M, Zhu H L, Huang L C, Wang Y, Zhong L, Zhou K, Li M H. Evaluation on elite and rare germplasm resources of taro. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2013(18): 85-91
- [36] Wang Y, Fan G, Liu Y, Sun F, Shi C, Liu X, Peng J, Chen W, Huang X, Cheng S, Liu Y, Liang X, Zhu H, Bian C, Zhong L, Lv T, Dong H, Liu W, Zhong X, Chen J, Quan Z, Wang Z, Tan B, Lin C, Mu F, Xu X, Ding Y, Guo A Y, Wang J, Ke W. The sacred lotus genome provides insights into the evolution of flowering plant. *The Plant Journal*, 2013, 76(4): 557-567
- [37] Gui S, Peng J, Wang X, Wu Z, Cao R, Salse J, Zhang H, Zhu Z, Xia Q, Quan Z, Shu L, Ke W, Ding Y. Improving *Nelumbo nucifera* genome assemblies using high-resolution genetic maps and BioNano genome mapping reveals ancient chromosome rearrangements. *The Plant Journal*, 2018, 94: 721-734
- [38] Guo L B, Qiu J, Han Z J, Ye Z H, Chen C, Liu C J, Xin X F, Ye C Y, Wang Y Y, Xie H Q, Wang Y, Bao J D, Tang S, Xu J, Gui Y J, Fu F, Wang W D, Zhang X C, Zhu Q H, Guang X M, Wang C Z, Cui H F, Cai D G, Ge S, Tuskan G A, Yang X H, Qian Q, He S Y, Wang J, Zhou X P, Fan L J.

- A host plant genome (*Zizania latifolia*) after a century-long endophyte infection. *The Plant Journal*, 2015, 83(4): 600-609
- [39] Lu R S, Chen Y, Zhang X Y, Feng Y, Comes H P, Li Z, Zheng Z S, Yuan Y, Wang L Y, Huang Z J, Guo Y, Sun G P, Olsen K M, Chen J, Qiu Y X. Genome sequencing and transcriptome analyses provide insights into the origin and domestication of water caltrop (*Trapa* spp., Lythraceae). *Plant Biotechnology Journal*, 2022, 20(4): 761-776
- [40] Yin J M, Jiang L, Wang L, Han X Y, Guo W Q, Li C H, Zhou Y, Denton M, Zhang P T. A high-quality genome of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott), one of the world's oldest crops. *Molecular Ecology Resources*, 2021, 21(1): 68-77
- [41] Liu J X, Liu H, Tao J P, Tan G F, Dai Y, Yang L L, Feng K, Wang H, Li T, Liu Y H, Duan A Q, Fang F, Shu S, Xiong A S. High-quality genome sequence reveals a young polyploidization and provides insights into cellulose and lignin biosynthesis in water dropwort (*Oenanthe sinensis*). *Industrial Crops and Products*, 2023, 193: 116203
- [42] Wu P, Zhang L K, Zhang K, Yin Y L, Liu A L, Zhu Y, Fu Y, Sun F F, Zhao S P, Feng K, Xu X W, Chen X H, Cheng F, Li L J. The adaptive evolution of *Euryale ferox* to the aquatic environment through paleo-hexaploidization. *The Plant Journal*, 2022, 110(3): 627-645
- [43] Liu Z, Zhu H, Zhou J, Jiang S, Wang Y, Kuang J, Ji Q, Peng J, Wang J, Gao L, Bai M, Jian J, Ke W. Resequencing of 296 cultivated and wild lotus accessions unravels its evolution and breeding history. *The Plant Journal*, 2020, 104(6): 1673-1684
- [44] Wang Z X, Sun Y L, Huang X F, Li F, Liu Y P, Zhu H L, Liu Z W, Ke W D. Genetic diversity and population structure of eddoe taro in China using genome-wide SNP markers. *PeerJ*, 2020, 8: e10485
- [45] 王直新,孙亚林,黄新芳,刘玉平,朱红莲,李峰,李明华,柯卫东. 基于SNP标记的二倍体芋种质群体结构和遗传多样性分析. *分子植物育种*, 2024, 22(10): 3236-3246
- Wang Z X, Sun Y L, Huang X F, Liu Y P, Zhu H L, Li F, Li M H, Ke W D. Population structure and genetic diversity analysis of diploid taro based on SNP markers. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(10): 3236-3246
- [46] Ji Q, Zhu H L, Huang X F, Zhou K, Liu Z W, Sun Y L, Wang Z X, Ke W D. Uncovering phylogenetic relationships and genetic diversity of water dropwort using phenotypic traits and SNP markers. *PLoS ONE*, 2021, 16(7): e0249825
- [47] Ji Q, Li F, Huang X F, Li S M, Wang Z X, Liu Z W, Huang L C, Yang Y N, Zhu H L, Ke W D. Assessment of phylogenetic relationships and genetic diversity of *Sagittaria trifolia* using phenotypic traits and SNP markers. *PLoS ONE*, 2024, 19(6): e0302313
- [48] 季群,李双梅,朱红莲,柯卫东. 基于表型性状及SNP标记的豆瓣菜种质资源遗传多样性分析. *中国蔬菜*, 2021(2): 64-71
- Ji Q, Li S M, Zhu H L, Ke W D. Genetic diversity analysis of watercress germplasm resources based on phenotypic traits and SNP markers. *China Vegetables*, 2021(2): 64-71
- [49] 朱红莲,杜娟,刘正位,孙亚林,李明华,彭静,周凯,柯卫东. 我国野生莼菜考察及遗传多样性研究. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(6): 1586-1595
- Zhu H L, Du J, Liu Z W, Sun Y L, Li M H, Peng J, Zhou K, Ke W D. Investigation and genetic diversity of wild water shield (*Brasenia schreberi*) in China. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(6): 1586-1595
- [50] Liu Y, Song H, Zhang M, Yang D, Deng X, Sun H, Liu J, Yang M. Identification of QTLs and a putative candidate gene involved in rhizome enlargement of Asian lotus (*Nelumbo nucifera*). *Plant Molecular Biology*, 2022, 110: 23-36
- [51] 刘正位,郭丹丹,彭静,朱红莲,匡晶,季群,王直新,丁毅,柯卫东. 莲子产量相关性状的QTL定位. *园艺学报*, 2020, 47(8): 1565-1576
- Liu Z W, Guo D D, Peng J, Zhu H L, Kuang J, Ji Q, Wang Z X, Ding Y, Ke W D. QTL mapping of six seed yield related traits in lotus. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, 47(8): 1565-1576
- [52] Song H, Xin J, Yang D, Dong G, Deng X, Liu J, Zhang M, Chen L, Su Y, Yang H, Yang M, Sun H. NnSUS1 encodes a sucrose synthase involved in sugar accumulation in lotus seed cotyledons. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 210: 108591
- [53] 孙亚林,柯卫东,黄新芳,董红霞,张龙辉,何燕红. 芋花粉活力测定及最佳贮藏方法的选择. *中国农学通报*, 2015, 31(4): 62-67
- Sun Y L, Ke W D, Huang X F, Dong H X, Zhang L H, He Y H. Determination of taro pollen viability and choice of the best storage method. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(4): 62-67
- [54] 李峰,李双梅,柯卫东,刘玉平,彭静. 荸荠花粉活力测定及贮藏寿命研究. *湖北农业科学*, 2016, 55(10): 2564-2566
- Li F, Li S M, Ke W D, Liu Y P, Peng J. Study on viability and storage life of *Heleocharis dulcis* pollen. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(10): 2564-2566
- [55] 李峰,刘玉平,黄新芳,孙亚林,彭静. 培养基配方对慈姑花粉萌发与花粉贮藏寿命的影响. *中南农业科技*, 2023, 44(4): 249-251
- Li F, Liu Y P, Huang X F, Sun Y L, Peng J. The impact of culture medium formula on the germination of arrowhead pollen and the storage life of pollen. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2023, 44(4): 249-251
- [56] 李双梅,柯卫东,彭静,黄新芳,李明华. 菱花粉生物学研究. *中国蔬菜*, 2019(8): 54-58
- Li S M, Ke W D, Peng J, Huang X F, Li M H. Studies on pollination biology of water caltrop. *China Vegetables*, 2019(8): 54-58
- [57] 李双梅,柯卫东,叶元英,黄来春. 莼菜传粉生物学及杂交技术研究. *中国蔬菜*, 2011(12): 70-74
- Li S M, Ke W D, Ye Y Y, Huang L C. Studies on pollination biology and hybridization of *Brasenia schreberi*. *China*

- Vegetables, 2011(12): 70-74
- [58] 孙亚林,柯卫东,黄新芳,董红霞,何燕红. 芋种子萌发特性的研究. 中国蔬菜, 2016(5): 58-62
Sun Y L, Ke W D, Huang X F, Dong H X, He Y H. Studies on characteristics of taro seed germination. China Vegetables, 2016(5): 58-62
- [59] 李双梅,柯卫东,李峰,黄新芳. 不同处理方法对荸荠种子发芽的影响. 中国蔬菜, 2011(8): 55-59
Li S M, Ke W D, Li F, Huang X F. Effects of different treatments on seeds germination of waternut. China Vegetables, 2011(8): 55-59
- [60] 钟兰,李峰,李双梅,黄来春,刘玉平,柯卫东. 慈姑种子发芽特性研究. 中国蔬菜, 2015(2): 42-44
Zhong L, Li F, Li S M, Huang L C, Liu Y P, Ke W D. Studies on seed germination characteristics of arrowhead. China Vegetables, 2015(2): 42-44
- [61] 李双梅,柯卫东,黄新芳,彭静,李明华,钟兰,王芸,王春丽. 菱果实形态发育变异调查研究. 湖北农业科学, 2019, 58(22): 126-130
Li S M, Ke W D, Huang X F, Peng J, Li M H, Zhong L, Wang Y, Wang C L. Investigation on variation of fruit morphology development of water caltrop. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(22): 126-130
- [62] 李双梅,柯卫东,朱红莲. 不同处理方法对莼菜种子发芽的影响. 中国蔬菜, 2013(05X): 76-79
Li S M, Ke W D, Zhu H L. Effect of different treatments on seed germination of water shield (*Brasenia schreberi* J. F. Gmel). China Vegetables, 2013(05X): 76-79
- [63] 柯卫东,刘义满,黄新芳,李峰,彭静,朱红莲,黄来春. 莲藕新品种‘鄂莲7号’. 园艺学报, 2010, 37(11): 1885-1886
Ke W D, Liu Y M, Huang X F, Li F, Peng J, Zhu H L, Huang L C. A new lotus root cultivar ‘Elian 7’. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(11): 1885-1886
- [64] 柯卫东,彭静,朱红莲,孙亚林,刘玉平,李峰,黄新芳,李双梅,刘义满,黄来春,赵春,李明华,匡晶,刘正位. 早熟莲藕新品种鄂莲10号选育. 长江蔬菜, 2017(18): 92-93
Ke W D, Peng J, Zhu H L, Sun Y L, Liu Y P, Li F, Huang X F, Li S M, Liu Y M, Huang L C, Zhao C, Li M H, Kuang J, Liu Z W. Breeding of Elian No. 10, a new cultivar of early-maturing lotus root. Journal of Changjiang Vegetables, 2017(18): 92-93
- [65] 刘正位,匡晶,朱红莲,彭静,王芸,柯卫东. 莲属植物资源和育种研究进展. 园艺学报, 2020, 47(9): 1845-1858
Liu Z W, Kuang J, Zhu H L, Peng J, Wang Y, Ke W D. Germplasm resources and genetic breeding of *Nelumbo*: A systematic review. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(9): 1845-1858
- [66] 柯卫东,刘义满,黄新芳,李峰,彭静,朱红莲,黄来春. 莲藕新品种鄂莲6号的选育. 长江蔬菜, 2009(16): 30-31
Ke W D, Liu Y M, Huang X F, Li F, Peng J, Zhu H L, Huang L C. New lotus cultivar, Elian No. 6. Journal of Changjiang Vegetables, 2009(16): 30-31
- [67] 朱红莲,季群,匡晶,周凯,刘正位,黄来春,柯卫东. 鲜食子莲新品种‘翠玉’. 园艺学报, 2023, 50(S01): 99-100
Zhu H L, Ji Q, Kuang J, Zhou K, Liu Z W, Huang L C, Ke W D. A new fresh seed lotus cultivar ‘Cuiyu’. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(S01): 99-100
- [68] 黄新芳,刘玉平,柯卫东,刘义满,叶元英,李双梅,李茂年,彭静,李峰,黄来春,朱红莲,李明华,孙亚林. 早中熟芋新品种鄂芋1号的选育. 长江蔬菜, 2011(16): 55-56
Huang X F, Liu Y P, Ke W D, Liu Y M, Ye Y Y, Li S M, Li M N, Peng J, Li F, Huang L C, Zhu H L, Li M H, Sun Y L. Breeding of a new early-mid ripening taro cultivar, E’yu No. 1. Journal of Changjiang Vegetables, 2011(16): 55-56
- [69] 孙亚林,王直新,刘玉平,黄新芳,朱红莲,柯卫东. 芋新品种‘汉青红’. 园艺学报, 2024, 51(S2): 115-116
Sun Y L, Wang Z X, Liu Y P, Huang X F, Zhu H L, Ke W D. A new taro cultivar ‘Hanqinghong’. Acta Horticulturae Sinica, 2024, 51(S2): 115-116
- [70] 李双梅,柯卫东,彭静,黄新芳,李明华. 早熟菱新品种‘六月菱’. 园艺学报, 2021, 48(S02): 2857-2858
Li S M, Ke W D, Peng J, Huang X F, Li M H. A new early-maturing water caltrop cultivar ‘June-Water Caltrop’. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(S02): 2857-2858
- [71] 冯凯,赵书平,吴鹏,李良俊. 水生蔬菜种业发展现状及建议. 江苏农业科学, 2022, 50(18): 245-249
Feng K, Zhao S P, Wu P, Li L J. The development status and suggestions of aquatic vegetable seed industry. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(18): 245-249
- [72] 李峰,柯卫东,黄新芳,朱红莲,钟兰,彭静,李双梅,周雄祥,宗义湘,吴曼,袁田垚. 湖北省莲产业发展调研报告. 湖北农业科学, 2020, 59(23): 101-106, 109
Li F, Ke W D, Huang X F, Zhu H L, Zhong L, Peng J, Li S M, Zhou X X, Zong Y X, Wu M, Yuan T Y. Research report on lotus industry development in Hubei province. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(23): 101-106, 109
- [73] 湖北日报. “沔城藕”历时5年提纯复壮, 成为国家地理标志产品——浓浓家乡味, 还是粉糯香甜“那一口”. (2023-07-01) [2024-12-08]. https://news.hubeidaily.net/mobile/c_1594207.html
Hubei Daily. “Miancheng lotus root” has undergone a five-year process of purification and rejuvenation, and has become a product with national geographical indication—rich in the flavors of home, still tender and sweet, “that particular taste.” (2023-07-01) [2024-12-08]. https://news.hubeidaily.net/mobile/c_1594207.html
- [74] 潘恺,方涛,陈丽娜,曹永生. 基于云计算的农作物种质资源数据挖掘平台研究. 植物遗传资源学报, 2015, 16(3): 649-652
Pan K, Fang W, Chen L N, Cao Y S. Research of crop germplasm resources data mining platform based on cloud computing. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(3): 649-652