

# 哈尼梯田稻种资源挖掘与利用综述

罗文学 张耀 苏正亮

(云南省红河州农业科学院,蒙自 661199)

**摘要:**种质资源是作物育种的物质与遗传基础,哈尼梯田稻种资源丰富,蕴含着丰富的遗传多样性和优异基因,但这些宝贵资源尚未得到充分的利用与开发。鉴于社会发展可能带来的种质资源遗失风险,提出进一步加强稻种资源保护和系统鉴定与评价策略,并探讨了适应现代农业发展需求的哈尼梯田稻种资源创新与利用途径,旨在保护哈尼梯田稻种资源的多样性,为地区水稻育种提供新选择,推动哈尼梯田的可持续发展。

**关键词:**哈尼梯田;种质资源;水稻育种;遗传多样性

## Summary of Mining and Utilization of Rice Resources in Hani Terraces

LUO WENXUE, ZHANG YAO, SU ZHENG LIANG

(Honghe Academy of Agricultural Sciences, Mengzi 661199, Yunnan)

水稻是全世界主要的粮食作物之一,其育种研究对确保粮食安全和推动可持续发展至关重要。随着社会进步和人们生活水平提升,对水稻品质、产量及抗性的要求日益提高。稻种资源是育种基础,水稻矮秆育种和杂种优势利用的技术突破均得益于优异种质资源的发掘。当前水稻品种的同质化趋势加剧,遗传基础狭窄,遗传多样性减少。野生稻和地方种质遗传多样性丰富,因此发掘和利用优良种质资源是突破水稻遗传基础狭窄的有效策略<sup>[1]</sup>。

哈尼梯田位于云南省红河州南部的红河、绿春、金平、元阳等县,2013年获世界文化遗产殊荣,也是全球重要的农业文化遗产之一。受当地错综复

杂的地形、地貌以及丰富多样的民族习俗的影响,哈尼梯田稻区孕育出了种类繁多且独具特色的地方水稻品种<sup>[2]</sup>。近年来,随着社会的快速发展和人口结构的变化,青壮年劳动力大量外出务工,寻求更为稳定和丰厚的收入来源,再加之传统稻种相较于外来杂交稻收益更低,导致出现了梯田闲置与传统稻种无人愿意栽种的困境。这不仅威胁到了哈尼梯田的稻种多样性,也对哈尼稻作文化的传承与发展构成了严峻挑战。如何有效应对这一挑战,是亟待深入研究的重要课题。

### 1 哈尼梯田稻种资源的调查与收集

为满足稻种资源保护与利用的需求,自20世纪50年代起我国就开始开展稻种资源的征集工作。步入“七五”计划时期后,国家大力支持科技攻关项目和基础研究工作,农业部门得以广泛深入开展稻种

**基金项目:**云南省重大科技专项计划(202402AE090035);农业种业成果集成创新与转化示范(202305AR340003)

**通信作者:**苏正亮

[20]李雪源,王俊锋,梁亚军,郑巨云,龚照龙,艾先涛,郭江平,莫明.新疆转基因抗虫棉发展回顾、现状及建议.中国棉花,2019,46(8):4-5,24

[21]于江艳.新疆大面积推广转基因抗虫棉.(2016-08-12)[2024-11-08].<https://news.ifeng.com/c/7fc29pKt4Za>

[22]齐学礼,陈艳艳,王永霞,赵明忠,董海滨.中国作物育种先进技术的研发现状与发展建议.分子植物育种,<http://kns.cnki.net/kcms/>

detail/46.1068.S.20240102.1707.020.html

[23]马亮,韩婷,张晓琦.新疆棉花,凭什么世界顶级?.初中生世界,2021(S5):22-23

[24]陈丽,宋玉兰,王广良.新疆棉花和纺织服装产业集群高质量发展战略选择.棉纺织技术,2024,52(5):89-97

[25]刘宇.农业农村高质量发展面临的困境与优化措施探析.河南农业,2024(2):75-77

(收稿日期:2024-11-08)

资源的调查、搜集、整理及保存工作。这一系列举措为稻种资源的有效保护与利用奠定了坚实的基础<sup>[3]</sup>。

从1949年到20世纪80年代初期,哈尼梯田地区种植的传统稻种有数百个,且多为红米;以元阳县为例,虽然可能存在同种异名的现象,但县域内栽培有超过240个地方水稻品种,有水稻和旱稻,其中籼稻品种达到171个<sup>[4]</sup>。随着时间的推移,稻种资源也经历了一定程度的流失,截至2000年,哈尼梯田地区仍然保留有150个地方品种。到2013年,黄绍文<sup>[5]</sup>报道元阳县的地方稻种数量已不足80个。为此,自2018年起,红河州农业科学院组织开展地方种质资源普查,在哈尼梯田地区收集到地方稻种80余个;这些稻种资源均来自高海拔杂交稻不能适应地区,可能具有独特的适应性和生存能力<sup>[6]</sup>。目前,除省级层面外,红河州也建立了原生地与异地种质资源库(圃),如元阳县新街镇和红河县宝华镇建立原生境保护区,红河州农业科学院建成蒙自和建水两地红米种质资源圃。因建立时间较晚,许多资源尚未得到充分挖掘与详细记录,导致部分优质稻种面临遗失的风险,但通过持续的努力和实施有效的保护措施,仍有望挽救并充分利用这些珍贵的种质资源。

## 2 哈尼梯田稻种资源研究进展

**2.1 农艺性状鉴定评价** 农艺性状是指作物在生长发育过程中表现出来的各种形态特征和生理特性,包括株高、株型、叶形、叶色、花序、果穗、籽粒等。这些性状直接或间接地影响着作物的产量、品质和抗逆性。农艺性状鉴定评价是作物遗传育种和种质资源研究中的重要环节,通过对作物的各种农艺性状进行系统的鉴定和评价,为作物的遗传育种提供参考<sup>[7]</sup>。

目前,哈尼梯田主要种植的地方品种有月亮谷、花谷、高山早谷、冷水谷、红脚老梗、薄竹谷、白脚老梗和蚂蚱谷等。月亮谷是该地区种植面积最大的地方品种<sup>[3]</sup>。哈尼族水稻的种植管理方式随海拔呈现垂直分异性,不同海拔区域的水稻品种具有不同的耐寒或耐热特性。具体而言,海拔1600~1900m气候温凉的上半山区域,栽培有小花谷、冷水谷、月亮谷等耐寒稻谷品种;海拔1200~1600m气候温和的中半山区域,种植大老梗谷、细老梗谷、红脚老梗等温性稻谷品种;海拔800~1200m气候温热的下半山区域,种植老皮谷、老糙谷、大蚂蚱谷等耐热品种;海拔150~800m的炎热潮谷区域,种植麻糯等耐高

热稻谷品种<sup>[8]</sup>。研究还发现,月亮谷在元阳哈尼梯田不同海拔点上均有种植,其株高、穗长、有效穗数等农艺性状无显著差异<sup>[9~10]</sup>,说明月亮谷有较好的环境适应性,这一优势促使月亮谷的农艺性状表现出稳定性和独特性,或许该品种是研究生态适应性的理想品种。

红河哈尼梯田地区种植的稻种类型是以红米为主的籼稻品种,糯稻也占一定的比例,这些稻种在株高、千粒重、有效穗数、每穗粒数、结实率、穗长等主要农艺性状上均存在显著差异,普遍呈现出适应性强、植株偏高、穗较长、二次枝梗丰富以及强落粒性的特征<sup>[5,11]</sup>。梯田稻种在不同时期的表型差异不显著,但呈现一定的变化规律。如随时间推移,梯田稻种播期历期延长、株高降低、穗粒数增加、谷粒长宽比增大,籼稻、糯稻、红米以及落粒性强的品种所占比例在减少,表型多样性在下降,株型变得更加紧凑<sup>[12~13]</sup>。说明哈尼梯田地区长期自然选择和人工驯化,使得地方品种具有丰富的表型多样性,但随着社会发展,传统地方品种种植面积越来越小,品种特征特性在减退,品种多样性在降低。

**2.2 遗传多样性分析** 哈尼梯田稻种的表型多样性直接反映了其基因多样性,基因多样性是物种多样性的核心;丰富的等位基因不仅是物种适应多样环境的基础,也是杂交育种中亲本选择的关键。狭隘的基因组信息往往不利于目的性状的筛选和集中。因此,开展对地方稻种的保护工作以维持水稻基因库信息的多样性,对拓宽亲本具有重要意义<sup>[14]</sup>。

汤翠凤等<sup>[15]</sup>用Shannon-Wiener多样性指数分析云南省各州(市)地方水稻品种农艺性状多样性,结果显示,云南省地方水稻的遗传多样性最丰富的是滇南和滇西南地区,相较于其他民族,哈尼族、景颇族和彝族等少数民族居住区水稻的表型多样性更丰富。红河哈尼梯田正位于滇南哈尼族、彝族等少数民族聚居地。陈越等<sup>[16]</sup>也用Shannon-Wiener多样性指数分析了云南省地方水稻表型多样性,发现红河稻种表型多样性在云南省位于前列。董超等<sup>[12]</sup>研究发现哈尼族地区稻作地方品种数量性状种间、种内的变异系数为8.93%~96.62%,显示了广泛的遗传变异范围。这些研究结果都揭示了哈尼梯田及其周边地区水稻种质资源丰富的表型多样性。哈尼梯田稻种除了表型具有丰富的多样性外,

所携带的基因同样也具有丰富的遗传多样性。马孟莉等<sup>[17]</sup>利用简单序列重复(SSR, Simple sequence repeats)标记分析元阳哈尼梯田60份红米地方品种遗传多样性,平均每对引物扩增4.77个条带。白秀红等<sup>[18]</sup>利用12对微卫星(SSR)引物进行了遗传多样性分析,共检测到66个等位基因座,平均每对引物扩增5.5个条带。龙晓波等<sup>[19]</sup>用高密度单核苷酸多态性(SNP, Single nucleotide polymorphism)分子标记检测获得94份多态性丰富的哈尼梯田红米种质资源。朱有勇<sup>[20]</sup>指出哈尼梯田传统农家品种的基因多样性指数高于现代改良品种3倍之多。这些研究结果不仅揭示了哈尼梯田稻种基因组中存在广泛的变异,还预示着其中蕴含了丰富的遗传变异资源,可能潜藏着众多对抗病害、逆境(如干旱、盐碱等)、贫瘠土壤以及极端温度等不利环境条件的基因,如哈尼梯田品种月亮谷中*deeper rooting1*基因启动子区域含有一个名为*inditto2*的转座子,可增强水稻避旱性和生态适应性<sup>[21]</sup>。深入研究和挖掘哈尼梯田稻种的遗传变异资源,有助于更好地理解地区水稻的遗传多样性和进化历程,为育种提供宝贵的基因资源和创新思路。

徐福荣等<sup>[22-23]</sup>用SSR分子标记分析哈尼梯田不同时期内地方水稻品种遗传多样性,发现在不同的时期,变异位点众多,等位基因频率高,且存在显著的群体结构和连锁不平衡现象,但基因多样性未发生显著变化,保持着其遗传多样性和特征,同时籼粳分化趋势明显。说明哈尼梯田稻种资源在漫长的历史演变中,经过自然与人工选择发生了遗传变异,既保留了其遗传上的连续性,又展现了适应环境变化的多样性,哈尼梯田及其稻种极有可能是探索稻作籼粳演化历程理想的资源与环境。

哈尼梯田稻种拥有丰富遗传多样性的原因有以下几点:一是自然环境因素,哈尼梯田地区立体气候明显,地势起伏、海拔悬殊,形成独特的立体气候,梯田内生态环境多样,要求稻种具有高度适应性和遗传多样性<sup>[24-25]</sup>。二是农户种植习惯与选择,哈尼族等少数民族地区1300多年的稻作文化发展,形成了独特的农耕文化,哈尼族还有交换稻种习俗,农户根据经验、环境选择优良性状稻种,促进遗传多样性形成。三是民族风俗习惯与宗教信仰,哈尼族等民族敬畏自然和神灵,稻米不仅作为日常食

物,红米、糯米等还常用于祭祀,特定稻种因符合节日、口感或仪式被广泛种植,使其遗传多样性得以保持<sup>[26-27]</sup>。哈尼梯田稻种遗传多样性是多因素共同作用的结果,这些因素相互交织、相互影响,共同构成了哈尼梯田稻种的遗传多样性。

### 2.3 抗稻瘟病基因挖掘

稻瘟病是水稻最主要的病害之一,其造成的危害既广泛又严重,导致产量大幅下降,甚至绝收,在水稻品种审定过程中,对稻瘟病抗性的评估采取了极为严格的“一票否决”制度,选育并利用抗病品种是防控该病害最为经济、高效且安全的措施<sup>[28]</sup>。因此,发掘、研究与利用抗稻瘟病种质资源,成为了水稻抗稻瘟病育种工作的核心。稻瘟病病菌频繁变异产生新的生理小种,致使原本针对特定小种的抗性基因失效,导致多数携带这些抗性基因的水稻品种在连续种植几年后,抗病性逐渐减弱<sup>[29]</sup>。为应对稻瘟病病菌不断变异带来的挑战,科研人员正不断探索新的抗病基因和育种策略。通过广泛的种质资源收集与鉴定,期望能够发现更多具有新颖抗病机制的基因,为水稻抗稻瘟病育种提供更多的遗传资源。随着基因编辑技术的快速发展,科学家们已经能够更精确地操作和改良水稻基因组中的抗病基因,这是水稻稻瘟病抗性育种最直接有效的方法,能够针对特定的稻瘟病生理小种设计出更具针对性的抗性策略。目前已确定了500多个与抗病基因相关的数量性状位点,鉴定出稻瘟病抗性基因100多个,其中30多个基因已成功实现克隆<sup>[30-31]</sup>。

长期单一品种的连续种植不可避免地会导致品种退化、抗性减弱。然而,哈尼梯田稻种如月亮谷、红脚老梗等已有上百年的持续种植历史,种植区域虽适合稻瘟病的发生,但未发生过稻瘟病大流行<sup>[4]</sup>。说明那些在生产中历经长久连续栽培的梯田稻种,在与病菌的长期共同演化历程中,经历环境与人工的双重选择,很可能蕴含着新的抗病基因和持久的抗性资源。林菁菁等<sup>[32]</sup>用SSR分子标记技术分析哈尼梯田稻种稻瘟病菌多样性,发现月亮谷、红脚老梗、白脚老梗上分离的生理小种数最为丰富,分别有9个、7个、6个生理小种。这一结果不仅揭示了这些品种在稻瘟病抗性方面的复杂性,也暗示了它们可能蕴含着更为多样的抗病基因。严红梅等<sup>[29]</sup>从不同时期哈尼梯田地方品种中筛选出5份抗2个主要生理小种的资源。涂敏等<sup>[33]</sup>利用24对

SSR 引物分析抗性多样性,指出哈尼梯田水稻品种的抗性遗传多样性和抗病品种比例方面均在省内位居前列。说明哈尼梯田的水稻品种在稻瘟病抗性方面具有丰富的遗传多样性和潜在的育种价值。夏欣等<sup>[34]</sup>进一步分析了哈尼梯田地区水稻品种对稻瘟病抗性的基因型与病害发生风险的关系,认为携带质量抗性基因如 *Piz-t*、*Pik-h*、*Pib*、*Pit*、*Pi1*、*Pik-m*、*Piz-5* (*Pi2*)、*Pi12*、*Pi11*、*Pi20*、*Pita-2* 的水稻品种,在哈尼梯田地区面临稻瘟病的风险相对较低,相反,那些仅携带 *Pi19*、*Pik-p*、*Pi7* 和 *Pik* 基因的品种,则更容易受到稻瘟病的侵袭。这一结果为根据基因型预测水稻品种的稻瘟病抗性提供了一定的依据。孙一丁等<sup>[35]</sup>指出云南地方品种中抗性基因 *Pik-h*、*Pi5*、*Pita* 频率较高,普遍缺乏 *Pi9*、*Pi2* 基因;哈尼梯田地区的月亮谷和花谷两个稻种同时含有 *Pik-h*、*Pi5* 和 *Pita* 这 3 种基因,显示出强大的稻瘟病抗性潜力,而蚂蚱谷稻种则含有 *Pik-h*、*Pi5* 或 *Pita* 中的至少一种基因,同样具备一定的抗病能力。

潘凝辉等<sup>[36]</sup>和杨洼洁等<sup>[37]</sup>用单粒传统系法 (SSD, Single seed descend) 研究地方品种月亮谷抗稻瘟病基因和病菌侵染机制,结果显示 *Os09g0561100* 基因的变异可能影响水稻细胞壁相关的受体激酶表达量和功能,该基因在稻瘟菌侵染过程中扮演重要角色。在抗病纯系 R 与感病纯系 S 之间,该基因存在 3 个 SNP 变异,导致氨基酸序列改变,这可能揭示了月亮谷对稻瘟菌侵染的抗性机制。哈尼梯田地方品种种类多、遗传异质性丰富,特别是群居内部个体间遗传异质性高,个体间表型差异明显,哈尼梯田稻种可作为优异基因资源进一步发掘和利用。但目前在功能基因的结构组成、表达模式上的研究还较少。因此,为探究抗性机制和发掘新的抗性资源,应深入分析哈尼梯田品种的遗传多样性内在机制和分子基础,为优良种质资源的保护提供理论支持。

#### 2.4 稻米品质研究

稻米的食用方式多种多样,其品质要求取决于具体用途。随着人们生活质量的提升,对稻米的口感、营养价值和安全性的要求也在不断提高。因此,育种工作者在保持和提高产量的同时,也更重视稻米品质的改良工作。稻米的品质包括外观、加工特性、蒸煮品质和适口性等多个方面。稻米的品质等级受多方面因素的共同影响,包括直链淀粉含量 (AC, Amylose content)、遗传特

性、矿质元素的含量、生态环境条件以及栽培方式等。其中,淀粉的含量、构成及特性对稻米品质具有直接的影响。淀粉糊化度分析仪 (RVA, Rapid visco analyzer) 所测得的谱特性与 AC 及胶稠度 (GC, Gel consistency) 之间存在紧密关联,是评估稻米糊化特性的关键指标<sup>[38-39]</sup>。蜡质基因 *Wx* 对淀粉的 RVA 谱特性具有调控作用,能调节直链淀粉的合成过程,并直接决定直链淀粉的含量。当 *Wx* 基因中的保守位点发生等位变异时,会导致直链淀粉的含量发生变化,进而引起稻米中直链淀粉分布的差异<sup>[40]</sup>。云南省地方稻种资源中发现 *Wx* 等位基因 (*Wx*、*Wxhb*、*Wxzm*) 的多种变异位点,这些资源主要集中在滇西地区,滇南地区较少<sup>[41-42]</sup>。

研究表明,哈尼梯田地区以米粒细长籼稻红米品种为主,品质差异明显,60% 的品种为中低 AC 品种;其整精米率相对稳定,碾米品质良好;所有品种的 GC 值均高于 60.00mm,总体较高,稻米适口性好;垩白度较高,外观品质较差<sup>[43-44]</sup>。这是由哈尼梯田地区多样化的民俗用途而导致,该地区民族节日繁多,且均需制作糯米粑粑,因此对黏性强、AC 低于 2% 的糯米品种需求较大;红河地区民众喜爱食用米线,对中等直链淀粉含量 (9% < AC < 20%) 的稻米品种需求量大,这类稻米品种适宜作为主食或用于制作米线等副食品。总体来说,哈尼梯田稻米品质研究目前仍然集中于分析品质性状的多样性和营养物质成分分析,而从基因和分子水平的研究还较少。

### 3 哈尼梯田稻种资源在育种实践中的应用

20 世纪 50 年代以前,红河州水稻生产以当地农家稻种为主,这些稻种具有独特风味和生态适应性,但产量较低。进入 20 世纪 60 年代,红河州开始逐步推广经过初步筛选的优质地方稻种,如冷水谷、蚂蚱谷、月亮谷等,这些优质稻种得到了广泛的推广与应用。到了 20 世纪 70 年代后期,红河州在原有地方稻种的基础上,筛选出了一批具有育种潜力的材料,为红河州水稻育种工作提供了有力的支持<sup>[45]</sup>。例如,红河州农业科学院利用凤山紫糯选育出红优 1 号和红稻 9 号,产量高、品质优良;通过薄竹谷杂交选育的红稻 8 号,高山早谷选育的红阳 3 号和红稻 13 号等品种,田间和品质表现优异,受种企和稻米加工企业的青睐,是目前哈尼梯田地区的主栽品种。哈尼梯田红米因其优良的品质荣获“云

南六大名米”称号。

截至目前,红河州农业科学院利用哈尼梯田稻种资源已创制2000多份育种材料,并成功培育出“红稻”“红优”和“红阳”等系列品种;但目前哈尼梯田稻种资源的利用程度和手段仍然有限,主要依赖于传统杂交育种技术,现代生物技术的广泛应用尚需进一步加强。具有矮秆、大穗、大粒和长粒型等优良性状的种质资源,如七月种植的矮秆七月糯、香型大穗香糯、紫糯、大穗强糯性的黄糯谷、大穗强适应性的月亮谷、谷粒细长的细蚂蚱谷以及高结实率的香稻长毛香等,尚未得到充分的发掘和利用。

#### 4 展望与建议

哈尼梯田稻种资源的挖掘与利用是一项长期而艰巨的任务。通过加强稻种资源的保护与创新利用、推动稻作文化的传承与创新,以及促进农文旅融合发展等措施,可以充分发挥哈尼梯田稻种资源的优势和潜力,为当地经济发展和社会进步作出贡献。

##### 4.1 加强地方水稻种质资源的收集与保存体系

构建全面的水稻种质资源收集网络,选派具有专业知识与沟通能力的科研团队深入农村,特别是偏远地区进行稻种补充收集,与农民紧密合作,精准采集地方水稻种质资源。同时,建立低温库、基因库等先进保存设施,科学调控环境参数,保障种质资源的长期活性与遗传稳定。建立健全管理机制,制定严格的标准与规范,确保收集与保存工作的规范性与连续性,实现种质资源的高效利用与保护。

**4.2 利用现代生物技术,建立完善的鉴定体系** 利用SSR、SNP等分子标记技术,对哈尼梯田稻种资源进行基因型鉴定,以构建其遗传图谱,为遗传分析与育种奠定基础。同时,结合表型性状观察,统计生长周期、株高、穗型等农艺特征,筛选优良种质。运用生物信息学技术整合分子标记与表型数据,通过预测模型与关联分析,揭示与重要农艺性状相关的分子标记,为分子标记辅助选择提供理论支撑。此外,建立严格的质量控制体系,确保鉴定结果准确可靠,并定期验证更新,以适应种质资源变化。

**4.3 推动地方水稻种质资源的创新与利用** 加强科研投入,运用基因测序等现代生物技术,深入探究种质资源的优良基因,并结合转基因育种、诱变育种、单倍体育种等现代生物技术,将哈尼梯田地方水稻种质资源中的多个优良性状聚合,创新出具有高

产、优质、抗逆等优良性状的水稻新品种。加强与省内外高校、研究机构的合作,借鉴先进经验和技术手段,推动哈尼梯田地方水稻种质资源的挖掘与利用工作。同时,结合市场需求和现代人饮食结构与健康需求的变化,重视功能性稻米的开发,如富含硒、锌、铁等微量元素以及花青素、黄酮等生理活性物质的功能性稻米,以满足市场对健康食品的需求;借鉴哈尼梯田独特的稻鱼鸭共生、稻鳅共作等生态种植模式,为培育出抗倒伏、抗病虫草害、共生适应性强的水稻新品种提供新的方向。

#### 参考文献

- [1] 魏兴华. 我国水稻品种资源研究进展与展望. 中国稻米, 2019, 25 (5): 8-11
- [2] 周颖, 许建初, 王立刚, 李玉义. 哈尼梯田农耕文化系统可持续发展稳态机制研究. 中国农业综合开发, 2023 (1): 11-19
- [3] 杨德卫, 张海峰, 余文权. 我国水稻种质资源创新研究与利用进展. 植物遗传资源学报, 2024, 25 (4): 495-508
- [4] 王红崧, 王云月, 杨燕楠, 李小龙, 陈娟, 韩光煜, 单祖鹏. 元阳哈尼梯田农民种子系统和农业文化景观格局. 生态环境学报, 2019, 28 (1): 16-28
- [5] 黄绍文. 哈尼梯田稻作传统品种多样性及其变迁. 农业考古, 2023 (4): 50-58
- [6] 苏正亮, 张耀. 红河哈尼梯田地方红米种质资源保护与利用. 云南农业科技, 2024 (3): 22-24
- [7] 王孟宇. 作物遗传育种. 北京: 中国农业大学出版社, 2018
- [8] He X H, Sun Y, Gao D, Wei F G, Pan L, Guo C W, Mao R Z, Xie Y, Li C Y, Zhu Y Y. Comparison of agronomic traits between rice landraces and modern varieties at different altitudes in the paddy fields of Yuanyang Terrace, Yunnan Province. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2 (1): 46-50
- [9] 董超, 徐福荣, 杨文毅, 汤翠凤, 张恩来, 杨雅云, 阿新祥, 张斐斐, 卢光德, 王艳, 戴陆园. 云南元阳哈尼梯田水稻地方品种月亮谷的遗传变异分析. 中国水稻科学, 2013, 27 (2): 137-144
- [10] 翟婉婉, 李雪萍, 徐返, 王扬, 刘胜, 刘永胜, 李成云, 王云月, 谢勇. 云南水稻地方品种月亮谷的群体多样性分析. 植物遗传资源学报, 2016, 17 (3): 423-432
- [11] 徐福荣, 张恩来, 董超, 张敦宇, 汤翠凤, 余腾琼, 阿新祥, 彭新喜, 杨雅云, 戴陆园. 云南元阳哈尼梯田地方稻种的主要农艺性状鉴定评价. 植物遗传资源学报, 2010, 11 (4): 413-417, 423
- [12] 董超, 阿新祥, 汤翠凤, 张斐斐, 杨雅云, 申时全, 戴陆园. 云南哈尼族地区稻作地方品种的表型多样性分析及优异资源筛选. 南方农业学报, 2020, 51 (5): 1013-1021
- [13] 李金梅, 崔迪, 汤翠凤, 阿新祥, 余腾琼, 马小定, 张恩来, 刘昌文, 徐福荣, 戴陆园, 韩龙植. 两个时期收集的云南水稻农家品种表型多样性比较. 植物遗传资源学报, 2015, 16 (2): 238-244
- [14] 何柳, 宋英杰, 龙春林. 哈尼梯田水稻农家品种遗传多样性的原生

- 境保护研究进展. 中国农学通报, 2020, 36 ( 10 ):87-94
- [15] 汤翠凤, 张恩来, 董超, 阿新祥, 张斐斐, 申时全, 韩龙植. 云南新收集水稻地方品种的表型多样性分析. 植物遗传资源学报, 2018, 19 ( 6 ):1106-1116
- [16] 陈越, 丁明亮, 张敦宇, 付坚, 钟巧芳, 肖素勤, 柯学, 程在全. 云南水稻种质资源农艺性状表型多样性分析及综合评价. 南方农业学报, 2019, 50 ( 9 ):1922-1930
- [17] 马孟莉, 郑云, 周晓梅, 张婷婷, 张晓倩, 卢丙越. 云南哈尼梯田红米地方品种遗传多样性分析. 作物杂志, 2018 ( 5 ):21-26
- [18] 白秀红, 高东, 余磊, 苏源. 云南元阳梯田湿地水稻地方品种遗传多样性分析. 分子植物育种, 2012, 10 ( 1 ):1017-1024
- [19] 龙晓波, 李国为, 叶昌荣, 程计华, 张哲, 尹合兴, 赵健, 李正和, 曹桂元, 易丽媛, 罗正华, 杨秀美, 符岂玮, 彭俊华, 贾高峰, 田冰川. 基于高密度 SNP 标记的云南元阳红米种质资源遗传多样性分析. 杂交水稻, 2022, 37 ( 4 ):15-20
- [20] 朱有勇. 元阳梯田红米稻作文化——一项亟待研究和保护的农业科学文化遗产. 学术探索, 2009 ( 3 ):14-15, 23
- [21] Zhao Y T, Wu L X, Fu Q J, Wang D, Li J, Yao B L, Yu S, Jiang L, Qian J, Zhou X, Han L, Zhao S L, Ma C R, Zhang Y F, Luo C Y, Dong Q, Li S J, Zhang L N, Jiang X, Li Y C, Luo H, Li K X, Yang J, Luo Q, Li L C, Peng S, Huang H C, Zuo Z L, Liu C G, Wang L, Li C Y, He X H, Friml J, Du Y L. *INDITTO2* transposon conveys auxin-mediated *DRO1* transcription for rice drought avoidance. Plant Cell & Environment, 2021, 44 ( 6 ): 1846-1857
- [22] 徐福荣, 董超, 杨文毅, 汤翠凤, 阿新祥, 张恩来, 杨雅云, 张斐斐, 戴陆园, 张红生. 利用微卫星标记比较云南元阳哈尼梯田两个不同时期种植的水稻地方品种的遗传多样性. 中国水稻科学, 2011, 25 ( 4 ):381-386
- [23] 徐福荣, 张恩来, 董超, 戴陆园, 张红生. 云南元阳哈尼梯田两个不同时期种植的水稻地方品种表型比较. 生物多样性, 2010, 18 ( 4 ): 365-372
- [24] 高东, 杨木青, 李锐, 潘磊, 何霞红. 元阳 3 个长期连续栽培水稻地方品种内部遗传异质性分析. 植物遗传资源学报, 2012, 13 ( 3 ): 484-487
- [25] 王红崧, 毕振佳, 王云月, 单祖朋, 李享. 哈尼梯田传统稻种遗传多样性影响因素. 江苏农业科学, 2019, 47 ( 1 ):60-66
- [26] 邓伟, 吕莹, 董阳均, 徐雨然, 杨华涛, 张锦文, 张建华, 奎丽梅, 涂建, 相罕章. 云南水稻种质资源的遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2023, 24 ( 3 ):624-635
- [27] 高东, 何霞红, 朱有勇. 元阳水稻地方品种多样性变化及换种规律研究. 植物遗传资源学报, 2011, 12 ( 2 ):311-313
- [28] 燕孟娇, 贾晓清, 郝丽芬, 宋培玲, 皇甫海燕, 郭晨, 皇甫九茹, 杨永青, 史志丹, 李子钦. 水稻稻瘟病抗病基因挖掘及育种研究进展. 北方农业学报, 2021, 49 ( 2 ):94-103
- [29] 严红梅, 李进斌, 汤翠凤, 杨雅云, 徐福荣. 云南元阳哈尼梯田不同时期种植的地方品种稻瘟病抗性评价. 中国农学通报, 2011, 27 ( 15 ):263-268
- [30] 邹拓, 范婧芳, 耿雷跃, 杜琪, 张启星, 张薇. 水稻抗稻瘟病基因定位与利用研究进展. 分子植物育种. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20241025.1048.002>
- [31] 杨婕, 杨长登, 曾宇翔, 侯雨萱, 陈天晓, 梁燕. 水稻稻瘟病抗性基因挖掘与利用研究进展. 中国水稻科学, 2024, 38 ( 6 ):591-603
- [32] 林菁菁, 李进斌, 刘林, 李夏, 李会芬, 何霞红, 朱书生, 李成云, 朱有勇. 云南元阳哈尼梯田稻瘟病菌遗传多样性分析. 植物病理学报, 2009, 39 ( 1 ):43-51
- [33] 涂敏, 王云月, 卢宝荣, 杨学辉. 云南省水稻品种稻瘟病抗性差异与遗传多样性相关研究. 湖北农业科学, 2011, 50 ( 6 ):1149-1152
- [34] 夏欣, 陈平, 杨伟, 徐返, 王云月, 李成云, 郑凤萍, 刘永胜, 谢勇. 水稻地方品种‘月亮谷’纯系对田间稻瘟病菌的选择. 植物保护, 2018, 44 ( 4 ):74-80
- [35] 孙一丁, 马继琼, 杨奕, 李进斌, 许明辉. 5 个稻瘟病抗性基因在云南水稻育种中的利用分析. 分子植物育种, 2018, 16 ( 6 ): 1844-1854
- [36] 潘凝辉, 管丽蓉, 李海伦, 赵婕, 李成云, 王云月, 谢勇. 水稻地方品种‘月亮谷’稻瘟病抗性相关候选基因的筛选. 分子植物育种. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240313.1456.010>
- [37] 杨滢洁, 李海伦, 魏环宇, 潘凝辉, 徐返, 李成云, 王云月, 刘永胜, 王扬, 谢勇. 水稻地方品种单粒传纯系对稻瘟菌侵染早期的表型响应与转录组分析. 分子植物育种. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240424.1454.007>
- [38] Zeng D L, Tian Z X, Rao Y C, Dong G J, Yang Y L, Huang L H, Leng Y J, Xu J, Sun C, Zhang G H, Hu J, Zhu L, Gao Z Y, Hu X M, Guo L B, Xiong G S, Wang Y H, Li J Y, Qian Q. Rational design of high-yield and superior-quality rice. Nature Plants, 2017, 3 ( 4 ):1-5
- [39] Tong C, Chen Y L, Tang F F, Chuan T, Ya L C, Fu F T, Fei F X, Yan H, Hao C, Jin S B. Genetic diversity of amylose content and RVA pasting parameters in 20 rice accessions grown in Hainan, China. Food Chemistry, 2014, 161:239-245
- [40] 于新, 张亚东, 朱镇, 刘凌, 陈涛, 赵庆勇, 周丽慧, 姚姚, 赵春芳, 王才林. 携带 *Wx-mq* 基因水稻新品种(系)稻米 RVA 谱特征及与直链淀粉含量的相关性. 华北农学报, 2013, 28 ( 5 ):53-58
- [41] Chen H, Shan J, Yang K, Shan J, Yang K, Wang Y Y, Lu C M. Abundant variation of *Waxy* gene in Yunnan rice landraces and molecular characterization of a novel *Wx<sup>zm</sup>* allele. Crop Science, 2014, 54 ( 5 ):2152-2159
- [42] 赵才美, 程在全, 殷富有, 李定琴, 陈玲, 钟巧芳, 肖素勤, 陈越, 王波, 黄兴奇. 云南省地方稻种资源研究进展. 河南农业科学, 2020, 49 ( 9 ):1-10
- [43] 吴晓霞, 刘承晨, 黄绍文, 薛达元, 刘巧泉, 金银根. 元阳哈尼梯田当前栽培水稻品种品质性状分析. 扬州大学学报:农业与生命科学版, 2017, 38 ( 2 ):62-68
- [44] 卢丙越, 刘帆, 张薇, 孟衡玲, 王田涛, 雷恩. 云南哈尼梯田红米地方品种品质性状分析. 粮油食品科技, 2021, 29 ( 3 ):25-31
- [45] 李全衡, 陈洁, 郑智, 温宪勤. 云南省水稻品种科研育种及应用. 中国种业, 2021 ( 12 ):27-30

(收稿日期: 2024-12-04)