DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.03.003

新型激光光源在水稻育苗中的应用进展

杨明来[1, 2, 3], 秦莉[4, 5], 贾鹏[4, 5], 梁雪梅[1, 2], 于合龙[1, 2], 卞婷[3], 马强[3], 王辉[3], 李成龙[3], Sicheng TIAN[6], 王英[7*]

(1. 吉林农业大学信息技术学院,吉林长春,130118; 2. 吉林农业大学智慧农业学院,吉林长春,130118; 3. 浙江长芯光电科技有限公司,浙江杭州,310017; 4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春,130033; 5. 国家特种发光科学与技术重点实验室,吉林长春,130033; 6. 阿贝光子学院,耶拿,07745,德国; 7. 上海交通大学电子信息与电气工程学院,上海市,200240)

摘要:水稻幼苗需要充足的光照才能正常生长,早春育苗的增温需求推动了温室、大棚和工厂化设施育苗的发展,但由于玻璃、塑料等棚膜材质对阳光的反射和吸收,设施育苗缺光问题凸显。补充光照可以较好解决设施育苗缺光问题,以LED为代表的补光光源已经在设施育苗中得到推广应用,但其依然存在能耗居高不下的问题。激光是人工光源中唯一与太阳光具有平行光特性的光源,具有相关性好、单色性好、方向性好、亮度高、能量大、光电转换效率高、节能等特点。但以氦氖激光为代表的传统激光光源体积大、成本高,难以在作物生长中应用和普及。采用半导体激光器结合匀光技术开发新型激光光源,体积小、成本低,可以实现对水稻秧苗的大面积均匀激光辐照,其单灯照射面积可以达到60~70 m^2。同时新型激光光源在保留传统激光相关性、单色性、方向性的同时,还具有高效节能的特点,能耗仅为传统LED光源1/30。研究表明,在水稻育苗过程中采用新型激光光源进行合理辐照,可以提升秧苗品质,插秧后返青快,分蘖多,抽穗早,最终实现水稻的稳产、增产。自2021年以来在全国多地试验结果表明,采用新型激光光源在插秧前辐照水稻秧苗20 d左右,可以实现超过10%的增产。这一结果不仅为我国水稻提质增效提供了重要的技术支撑和保障,也为其他植物在各阶段补光提供了新的方法和手段。

关键词:激光光源;植物补光;水稻育苗;弱激光;光调控

中图分类号:S24 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-7217(2024)03-0022-11

杨明来, 秦莉, 贾鹏, 梁雪梅, 于合龙, 卞婷, 马强, 王辉, 李成龙, Sicheng TIAN, 王英. 新型激光光源在水稻育苗中的应用进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(3): 22-32

YANG Minglai, QIN Li, JIA Peng, LIANG Xuemei, YU Helong, BIAN Ting, MA Qiang, WANG Hui, LI Chenglong, Sicheng TIAN, WANG Ying. Progress in the application of new laser light source in rice seedling production [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(3): 22-32

0 引言

《"十四五"推进农业农村现代化规划》及《中共中央 国务院关于学习运用"千村示范、万村整治"工程经验有力有效推进乡村全面振兴的意见》进一步释放重农强农的强烈信号,把粮食增产的重心放到大面积提高单产上,以确保粮食产量保持在65 kt以上,这为科技和农业领域人员提出了目标和挑战[1-2]。水稻是我国主粮作物,其产量和品质直接关系到国家的粮食安全和人民的生活水平[3-4]。水稻育苗作为水稻种植的关键环节,对于提高水稻的产量、品质以及整体种植效益具有至关重要的作用。大田育秧由于受自然条件影响,使秧苗品质不稳定。随着农业科技的发展,为了提高秧苗品质,提高土地的利用率,水稻育苗逐渐向品质可控的集中育苗方向发展[5-11]。

现有集中育苗方式主要采用温室大棚育苗和工厂化育苗的方式,这些方式虽然可以保障秧苗在合适的温度、湿度及水肥的条件下进行生长,但普遍存在光照不足的问题。光是植物进行光合作用的必要条件,是植物生长发育、营养积累的关键要素。然而现有温室

收稿日期:2024-06-20 修回日期:2024-08-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1710700);中国工程院战略研究与咨询项目(重点)(JL2022-04);吉林省农业重大技术协同推广试点项目(2024XT0708)

第一作者:杨明来,男,1970年生,吉林公主岭人,博士,研究员;研究方向为激光农业。E-mail: yangminglai@163.com

*通信作者:王英,女,1970年生,吉林长春人,博士,研究员;研究方向为光化学。E-mail: wangying@sjtu.edu.cn

大棚内的光照度只能达到露天的20%～80%，如果采用立体育秧，各育秧架之间的遮光会更为严重。特别是早稻育秧通常在早春，这一阶段往往阴雨天气较多，光照度明显不足，因此对于水稻育苗采用人工补光来提高水稻秧苗品质势在必行[12-15]。

植物补光的研究可以追溯到1880年，甚至更早，距现在已有140多年历史，当时采用的是碳弧灯，而后随着照明设备的发展，白炽灯、荧光灯、高压钠灯等不断被应用到植物生长补光领域[16-17]，近年来随着LED灯的发展，由于其发光效率相对较高、发热低、光谱相对精准、耗电相对较低，而被广泛应用于植物补光的研究和推广中。虽然LED耗电相对较低，但仍然在植物工厂中占超过70%的运行费用，植物补光技术的应用受到了阻碍[18-19]。

激光技术具有光电转换效率高、波长精准的优点，自发明以来就引起了农业领域科学家的关注，在育种、杀虫、除草、检测、农机等多方面进行了广泛的研究。我国自20世纪70年代以来在激光诱变育种方面进行了一系列的研究。但由于传统激光器体积大、波长单一、价格昂贵等问题，激光在农业领域特别是在种植领域的应用受到了限制。近年来，随着半导体激光器的发展，解决了上述问题，从而使激光技术在农业领域的应用得到了发展[20-27]。

在此基础上，我们着重探讨新型半导体激光光源对植物生长的影响，特别是通过弱激光对水稻秧苗进行辐照提高水稻幼苗的光合作用，从而达到水稻增产的效果，为激光植物生长灯在育苗领域的应用提供理论和实践基础。

1　不同光源在水稻育苗中的应用进展

1.1　传统光源在水稻育苗中的应用

“光、温、水、肥、气”是植物生长的5个关键要素。随着科学技术的发展，其中4个要素“温、水、肥、气”对植物的作用机理和规律清晰明了，基本已经实现精准控制，但“光”这个要素的控制一直是植物生长调控中的一个难题。光是植物生长的能量来源，植物通过光合作用实现能量的转换和存储，并且通过信号调控来影响植物的生长，经过多年不懈努力，人类基本掌握了人工光参与光合的作用的调控规律，总结出来包括光强、光质、光周期调控3要素，这3个要素在植物生长过程中相互作用和制约，并与“温、水、肥、气”相互作用，影响了植物生长的全过程，从而使“光”调控成为植物生长最为复杂的要素。与此同时，不同光源对植物的影响不同，其光质严重影响光调控效能，因此，研究低碳节能、符合植物生长规律的光源，成为光生物学领域的新挑战[28]。

“光”调控在传统的研究和应用中主要以模仿太阳光进行补光为主，此阶段主要为了解决温室大棚等场景中植物严重缺光的问题。在最初的阶段主要采用全光谱光源如白炽灯、荧光灯、高压钠灯等，相比较来看，这些光源价格较低，但光谱基本固定、不易调节；光合效率低，使用寿命相对较短，而且通常白炽灯发光效率低，荧光灯还有水银，而高压钠灯也还有其他有毒物质，因此对环境也并不友好[12,29]。

这些光源虽然部分解决了植物缺光的问题，但由于这些缺点，使得被市场逐渐淘汰。等离子植物补光灯也是近年来开发的一种光谱光源，具有绿色环保、光谱接近太阳光光谱的特点，对水稻秧苗进行补光在一定程度上也促进了水稻幼苗的生长[30]。此外，采用光生态膜进行光反射及转换的方式进行补光虽然不能调节光质，但在缺光环境下对植物的生长也具有一定的效果[31-32]。

LED光源是近年来发展起来的主要光源之一，全光谱LED灯由于能耗相对较低逐渐替代了上述光源成为主流光源之一。此外，由于LED光源相对窄的波长范围，使得光质调控在生产中应用成为可能。近年来LED光源在植物生长补光中的应用被广泛研究[33-40]。

水稻是我国重要的主粮作物，主要采用移栽方式种植，秧苗素质直接关系到水稻的品质和产量，是水稻高产的前提。研究发现，在水稻育秧中使用LED光源进行补光可以显著影响水稻幼苗生长及生理特性，并且对水稻秧苗内源激素含量、抗氧化酶活性、可溶性蛋白和丙二醛等含量均可产生影响。但LED光源仍然存在光分散度大，波长不精准、能耗高、照射面积小、照射高度低问题，也没有解决植物光能利用率不高的问题，从而限制了其在农作物补光领域的应用[41-42]。

1.2　激光光源在水稻育苗中的应用

激光光源是20世纪以来人类重大发明之一，是人工光源中唯一与太阳光具有平行光特性的光源，而且还具有相关性好、单色性好、方向性好、亮度高、能量大、光电转换效率高、节能等特性。激光作为光源用于植物育种、生长等方面的研究虽然可以追溯到20世纪70年代。在这一阶段主要使用氦氖激光对水稻幼苗进行短时间处理，从而实现水稻幼苗抗逆性提高的效果[43]。不过由于在最初阶段激光波长有限，价格昂贵，体积大，强度高等问题使得激光在植物生长中的应用受到很大的限制，激光光源在生产实际中难以得到应用推广。

随着半导体激光器的发展，激光波长逐渐丰富，价

格不断下降,体积不断减小,为激光作为光源广泛应用于农业生产中奠定了基础。2002年日本采用波长680 nm半导体激光器,并结合含5%蓝光的荧光灯作为光源对水稻幼苗进行补光,缩短了水稻幼苗的生长期。近年来,基于半导体激光器的激光植物生长灯在逐步发展,激光光源替代传统光源用于作物补光和生长的时代正在来临[44-50]。

2 新型激光光源在水稻育苗中的应用进展

2.1 新型激光光源的特点

半导体激光光源体积小,能耗低,可以通过多个激光器的组合形成点光源、面光源,通过不同波长的激光器组成不同光质可调的光源,再采用光强、照射时长等控制系统,形成植物生长的光配方,实现作物可控生长。

由图1可见,通过国产化替代的激光芯片,我们结合农业发展需求,将先进的透镜组件与激光结合起来,匀光成矩形光斑,并根据植物生长选择660 nm红光、450 nm蓝光、730 nm远红光等多种波长激光器进行组合,从而开发出国内第一款(型号)适用于水稻育苗的激光植物生长灯,实现作物辐照的无缝拼接,减少光能损耗,从而满足植物生长过程对光的需求。

与传统光源相比,新型光源不仅具有波长精准、方向性好等优点,而且节能及降本优势凸显,以高压钠灯和LED植物生长灯为例,表1对比了不同光源的能耗及相关技术参数。可以看出,新型激光植物灯每年的耗电量约8 460 kWh/hm^2,而在相同条件下,高压钠灯耗电高达1.01×10^6 kWh/hm^2,LED专用植物灯耗电也要近6.57×10^5 kWh/hm^2,显然新型激光植物生长灯具有明显的优势,这为激光技术在水稻育苗等农业领域中的应用提供了巨大的空间(表1)。

同时,根据不同的应用场景(如温室、大棚、植物工厂、露天、植物生长箱等环境),可设计不同类型的光照几何形态,实现从1~100多m^{2}实现光照覆盖。亦可以根据植保要求,通过顶照、侧照等模式实现植物照射均匀覆盖,从而满足包括主粮、水果、蔬菜、菌菇、中草药等不同作物在苗期、生长期、花期、果期等不同生长阶段对光的需求。

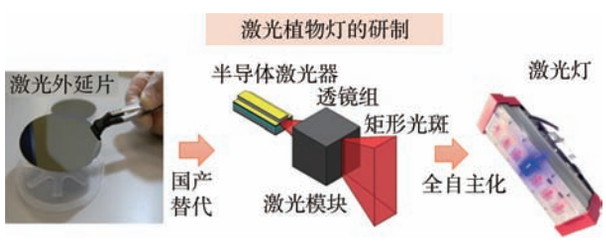


图1 新型激光植物生长灯原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of the new laser plant growth lamp principle

表1 不同类型光源对比

Table 1 Comparison of different types of light sources

	新型光源	传统光源	传统光源
类型	激光植物灯(温室优选)	高压钠灯(荷兰首选)	LED专用植物灯(国内温室用)
单灯功率/W	13~20	1 055	400
示例			
功率/(kW·hm^{-2})	3(150台)	690(660台)	450(1 125台)
耗电量/(kWh·hm^{-2}·y^{-1})	8 640	1 007 400	657 000
光合光子通量*PPF*/(μmol·s^{-1})	10~15	1 470~1 950	662~1 655
光量子通量密度*PPFD*/(μmol·s^{-1}·m^{-2})	0.2~0.6	根据作物的需求计算	
特点	超低功耗,超低*PPFD*,显著效果	高能耗,只能局限于少数种植场景使用	

2.2 新型激光光源在水稻育苗中的应用场景

我国水稻种植面积占全国谷物种植面积的30%左右,育苗是水稻种植工作中的重要环节,直接关系到水稻的品质和产量,是水稻高产的前提[51-54]。水稻育苗过程中离不开光,如果幼苗生长环境光照不足,光合作用会受到抑制,从而导致光合产物减少,水稻幼苗生长发育缓慢,株高及鲜重降低,幼苗易发生病害且抵抗力较差,甚至幼叶发黄、枯萎,进而影响水稻开花、灌浆

等生长发育过程，使得水稻营养物质积累减少、空粒秕粒增多、产量下降。而近年来，随着集中化育秧的发展，温室大棚和工厂化育苗不断发展壮大，这一发展虽然解决了“温、水、肥、气”的影响，可以实现相对标准化的育秧和商品化的供秧，但不可忽视的是设施光损高达20%～80%，不利于水稻秧苗的高质量培育，南方部分工厂化运动式苗床育秧叫停，和补光效率不佳有直接关联。因此在水稻育苗过程中增加光照，改善光损失情况已经势在必行。

与LED灯不同，新型激光光源不仅具有波长精准、能耗仅为LED灯1/30的优点，而且还具有体积小、照射面积大、铺设简单、工程量低、遮挡面积小、不影响其他设施安装等优势，因此可以满足温室大棚、工厂化育苗、露天等各类育苗场景。图2为新型激光植物生长灯在不同环境下的应用场景。从图中可以看出，激光灯可以根据应用场景调整照射方式及照射角度，光场分布均匀。显然新型激光植物生长灯在水稻育苗领域及其他植物补光领域具有广泛的应用前景。

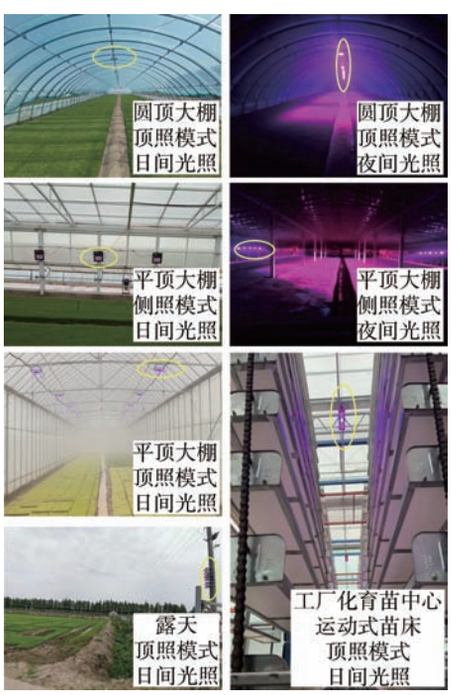


图2　激光植物生长灯在不同环境下的应用场景（黄色圈为激光光源）

Figure 2　Application scenarios of laser plant growth lamp in different environments (laser light source in the yellow circle)

2.3　新型激光光源在水稻育苗中典型试验

为了深入研究激光光源在水稻育苗增产中作用，作者从2021年开始在吉林、浙江、黑龙江、江苏、江西、海南、上海等多地进行水稻育苗试验，试验品种包括早稻和晚稻典型品种，育苗方式包括塑料软盘育秧及大田育苗，在插秧前补光14～25 d，光源采用激光光源，光源红光中心波长660 nm，蓝光中心波长450 nm，部分基地同步采用LED进行补光对比，设施非补光对照组，进行水稻育苗试验工作。

试验过程发现，经过激光照射，秧苗长势好，根系发达白根粗壮，达标早。可以通过红蓝激光调控长势，同时根据气温变化，调控秧苗矮壮效果非常明显。基因组分析发现，激光处理组基因上调数量超过LED处理组10倍以上，代谢通路基因富集明显，吲哚-3-乙酸（IAA）等激素含量显著增加。生长过程监测可见，水稻普遍提早抽穗，分蘖增加大于3%，部分早稻提早成熟。中晚稻根系活性好，增产显著。

2.4　激光水稻育苗试验

甘南双河农场农业科研所为首农集团水稻科学试验、示范和推广工作重要单位，试验在春季水稻育苗期开展，采用新型激光植物生长灯补光照射20 d，并对2叶苗期、插秧前、分蘖期、收获期水稻进行系统分析，并最终进行测产对比。

2.4.1　试验地概况及试验设计

水稻补光育秧棚设置在农科所水稻育秧棚内，补光水稻栽培设置在农科所水稻试验地内，试验地土质为黑土，地力均衡，前茬作物为水稻。

通过水稻秧苗各叶龄对于光照需求的习性调节激光补光红光和蓝光的比例，进而对比水稻秧苗素质，生育期，考种调查，产量等数据来检测激光补光的应用效果，试验采用3个积温带的水稻品种，分别是第1积温带品种：航天品种，第2积温带品种：松粳20，第3积温带品种：龙粳31。

2.4.2　秧苗及根系对比

从图3水稻秧苗生长对比照片可见，经过激光光源辐照后，秧苗植株形态更加合理，秧苗没有出现徒长，植株挺立，平均株高降低，1叶长和2叶长平均缩短，根长增加，茎基宽增加，地上/地下部分鲜重，干重增加。

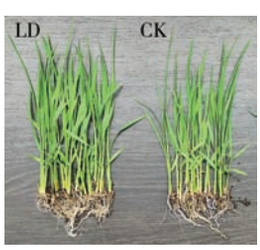


图3　水稻幼苗在激光植物生长灯和自然光下生长情况

Figure 3　Growth of rice seedlings under laser plant growth lamp and natural light

通过观察苗床底部秧苗根部发育可以发现（图4），激光不同辐照后水稻秧苗根系整体发育由于对照组，根长增长，白根增多，盘根均匀，这不仅有利于秧苗生

长,也对移栽后缓苗具有积极作用。

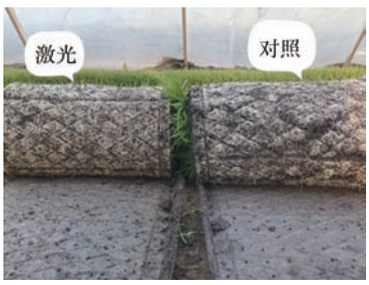


图4 激光植物生长灯和自然光下水稻幼苗根系发育情况

Figure 4 Root development of rice seedlings under laser plant growth lamp and natural light

2.4.3 结果与分析

1)稻苗素质调查:2叶期。经过对试验秧苗2叶期调查发现(表2),经激光辐照后,秧苗植株形态更加合理,秧苗没有出现徒长,植株挺立,株高平均降低5.2%,1叶长和2叶长平均短1.6%和6.2%,根长平均增加2.4%,茎基宽平均增加8.5%,地上部分鲜重增加6.2%,干重无增加,地下部分鲜重增加4.3%,干重增加15.3%。

显然激光辐照作用有利于秧苗根系的生长及营养物质的积累,有利于秧苗的径宽发育,从而使秧苗素质得到增强。

表2 2叶期稻苗素质调查

Table 2 Investigation of rice seedling quality in two-leaf stage

处理	叶龄	株高/cm	1叶/cm	2叶/cm	根长/cm	根数	茎基宽/cm	苗基宽/cm	地上部分		地下部分	
									鲜重/g	干重/g	鲜重/g	干重/g
龙粳31光照	1.95	6.505	1.965	3.87	3.42	5.3	0.8	0.475	0.4	0.075	0.55	0.135
龙粳31对照	1.965	7.165	1.97	4.315	4.03	5.2	0.675	0.475	0.455	0.075	0.545	0.115
松粳20光照	1.945	7.7	2.075	4.81	5.145	5.5	0.75	0.475	0.485	0.08	0.715	0.15
松粳20对照	1.945	7.75	2.14	4.61	5.06	5.35	0.725	0.5	0.495	0.08	0.66	0.145
航天品种光照	1.93	6.91	2.09	3.715	3.66	4.35	0.725	0.475	0.415	0.07	0.71	0.175
航天品种对照	1.98	7.335	1.615	4.245	4.915	4.25	0.7	0.475	0.435	0.07	0.685	0.14

2)秧苗素质调查:插秧前。根据对秧苗素质调查因素对比可知(表3),应用激光补光后,株高降低3.7%,根长、根数、茎基宽、苗基宽分别增加了32.8%、12.0%、17.4%、9.9%,地上部分干鲜重和地下部分干鲜重分别增加了4.6%、27.7%和51.4%、69.3%。这表明秧苗在激光辐照下干物质积累明显高于对照组,表明秧苗光合作用效率更高。

同时激光辅助的水稻秧苗根长更长,根数更多,说明水稻秧苗在激光辐照下不仅有利于根系的纵向生长,对根系的横向生长也有促进作用。这些优势不仅有利于秧苗插秧后缓苗,也使秧苗抗倒伏抗病能力增强,为水稻提质增产奠定了基础。

3)分蘖期初期田间调查。将激光辐照的水稻秧苗和对照组秧苗进行插秧种植,在相同环境及管理条件下,激光辐照育苗的水稻秧苗在苗期由于激光的作用,吸收了其代谢生理足够的光照,插秧后返青速度明显优于对照组,较常规育苗生育期提前,更早分蘖,更快进行根的生长发育(表4)。与对照组相比,激光辅助组株高、3叶长、4叶长和5叶长分别增加4.6%、29.5%、10.3%和-14.9%,根长、根数、茎基宽、苗基宽、地下部分干鲜重分别增加7.8%、1.0%、4.1%、1.9%,33.7%、19.1%,地上部分干鲜重减少7.1%、12.2%。在实际生产中促进分蘖早生快发、根系发达是提高分蘖成穗率,保证足穗的关键。显然,分蘖初期激光辐照后的水稻秧苗优先生长根部及分蘖这一特点为后续水稻提质增产提供了保障。

4)考种与测产调查。为进一步研究激光辐照育苗后对水稻产量的影响,我们进行了考种及测产调查(表5)。应用激光辐照育苗后,所种植的水稻分蘖、穗长、有效粒数、千粒重提升效果显著,可以有效地降低空瘪率,应用激光辐照技术后龙粳31增产10.35%,松粳20增产16.19%,航天品种增产18.96%,说明激光苗期补光对于光感型且生育期长的水稻品种增产作用极显著,对于适宜当地种植的品种增产效果亦显著。

表 3　插秧前秧苗素质调查

Table 3　Investigation of seedling quality before transplanting

处理	叶龄	株高/cm	1叶/cm	2叶/cm	3叶/cm	4叶/cm	根长/cm	根数	茎基宽/cm	苗基宽/cm	地上部分		地下部分	
											鲜重/g	干重/g	鲜重/g	干重/g
龙粳31光照	3.03	10.47	2.07	5.05	5.60	1.80	3.89	7.30	1.10	0.90	1.13	0.17	0.82	0.13
龙粳31对照	3.04	10.66	2.11	5.06	6.17	2.40	3.71	6.80	1.10	0.85	1.09	0.16	0.64	0.09
松粳20光照	3.07	9.82	1.99	5.17	5.81	1.70	4.82	8.00	1.20	1.10	1.14	0.21	1.15	0.13
松粳20对照	3.26	9.95	2.44	5.19	5.29	2.93	3.47	7.40	1.20	1.05	1.05	0.17	0.67	0.10
航天品种光照	3.30	9.92	1.39	4.64	5.39	2.38	4.58	9.40	1.35	1.25	1.25	0.23	1.39	0.21
航天品种对照	3.07	10.80	1.83	4.53	5.57	2.82	2.96	7.80	1.15	1.05	1.23	0.15	0.90	0.09

表 4　分蘖初期田间调查

Table 4　Field investigation at early tillering stage

处理	株高/cm	3叶/cm	4叶/cm	5叶/cm	分蘖	根长/cm	根数	茎基宽/cm	苗基宽/cm	地上部分		地下部分	
										鲜重/g	干重/g	鲜重/g	干重/g
龙粳31光照	23.76	12.93	13.68	11.20	1	9.54	15.30	2.25	1.75	5.36	0.78	4.44	0.40
龙粳31对照	22.31	9.52	11.73	14.49	0	9.46	15.20	2.20	1.75	5.56	0.96	3.50	0.40
松粳20光照	22.19	8.56	14.35	11.34	1	9.73	17.70	2.20	1.85	4.10	0.70	5.50	0.58
松粳20对照	21.48	6.62	14.02	13.93	0	9.53	17.70	2.00	1.75	4.98	0.80	4.34	0.54
航天品种光照	22.88	11.13	13.82	11.54	1	8.79	17.40	1.90	1.75	5.52	0.72	5.58	0.54
航天品种对照	22.01	9.03	12.34	11.94	0	7.30	17.00	1.90	1.75	5.52	0.76	3.78	0.36

表 5　考种与测产调查

Table 5　Seed test and production measurement survey

处理	分蘖	穗长/cm)	有效粒	无效粒	空瘪率	千粒重/g	折合产量/(kg·hm^{-2})	增产比例/%
龙粳31光照	23	16.4	106	13	10.9	26.9	10 155	10.35
龙粳31对照	21	16.2	91	14	13.3	26.5	9 202.5	/
松粳20光照	25	22.2	92	9	8.9	26.1	10 399.5	16.19
松粳20对照	23	21.6	80	19	19.2	25.3	8 950.5	/
航天品种光照	23	24.4	110	13	10.6	28.9	9 100.5	18.96
航天品种对照	20	24.1	96	14	12.7	28.0	7 650	

2.5 其他地区苗期激光补光情况

为进一步探索新型激光光源对不同品种、不同地域、不同环境条件下水稻育苗的适应性,自2021年本研究团队开始进行水稻苗期激光补光增产试验,首先在吉林省柳河试验有机稻,秧苗农艺性状好,抗倒伏,缓苗快,水肥吸收充分,10月5日收割测产,增产显著,生理生化指标良好。

2022年开始扩大试验面积,品种从晚稻扩展到早稻、中稻,地域从吉林省扩展到黑龙江、浙江、江西、海南等地,整体情况良好,并分别由吉林省农科院水稻所、中国水稻所等机构共同合作研究试验,测产数据如表6所示。

表6 三年来激光补光水稻幼苗种植测产数据

Table 6 Yield measurement data by laser supplemented rice seedlings in the past three years

年份	品种	试验地点	增产比例%
2021	五常稻花香4号	国信农业柳河基地	27.3
2022	龙粳31	北大荒查哈阳农场	7.76
	龙粳31	首农双河研究所	10.35
	松粳20	首农双河研究所	16.19
	航天品种	首农双河研究所	18.96
	吉粳129(耐盐碱)	吉林水稻所镇赉基地	11.21
	南粳46	绿腾农业湖州基地	15
2023	中佳早52	江西农大上高基地	9.5
	天优华占	台州农科院	9.06
	天优华占	金华婺州良种场	18.93
	天优华占	温州原种场	32
	野香优莉丝	江西农大上高基地	20.1
	甬优1540	中国水稻所富阳基地	12~22(多配方)
	甬优1540(夜间)	温岭国聪农场	13.9
	甬优1540	温岭国聪农场	12
	吉粳129(耐盐碱)	吉林水稻所镇赉基地	12.6
	超优千号(制种)	广陵高科陵水种植基地	27.5
平均			16.6

试验结果表明,增产比例平均超过16%。使用激光植物生长灯辐照进行水稻育苗后,水稻插秧后返青速度快,分蘖、穗长、有效粒数、千粒重及产量都得到显著提升。通过激光补光后的秧苗,其耐盐碱胁迫能力、抵御病虫害能力、水肥吸收能力,以及抗倒伏能力亦有显著提升。

同时通过夜间苗期补光,可以促进早稻提前抽穗,生育期可以缩短3~5 d,为南方双季稻茬口对接提供了较为可能的技术操作空间。目前试验中的巨型稻长势好,农业性状优良,抽穗提前5 d左右,有望实现种植区域北移。

3 结论

水稻是我国重要的主粮作物,主要采用移栽方式种植,秧苗素质直接关系到水稻的品质和产量,是水稻高产的前提。水稻作为喜光植物,育苗阶段光照对水稻产量具有直接的影响。传统光源由于具有光电转化效率低,光谱不精准、能耗高的问题使得在水稻育苗中难以应用和推广。激光具有高方向性、高亮度、高单色性及高相干性的特点,其频率、振动方向、相位高度一致。具有电光转换效率高,谱带窄,传播距离远、节能等优点。

在保持激光原有的特性之外,通过将匀光技术与激光结合起来,实现了新型激光光源的开发,所开发光源能耗仅为LED光源的1/30,从而为激光应用于水稻育苗及其他作物的生长开拓了新的方向和空间。在新型激光光源辐照下,植物对特定激光发射波长的光子有很高的吸收能力,可以提高植物的光合效率。

经过深入研究探索，新型激光光源用于水稻苗期补光已经得到较为可喜的试验成果，其技术逐步趋于稳定，并已经在分子生物学方面得到印证。

新型激光光源育苗对喜光品种产量增加有显著促进作用，对传统品种增长亦有明显效果。我国水稻种植面积大、品种多，使用新型激光光源补光技术可以应用到综合促早熟技术领域，尤其在寡照年份使用效果更为显著，对保障我国粮食安全，作物提质增产具有重要的意义。

随着半导体激光技术的发展，激光功率、波长的可调性越来越高，价格越来越便宜，为激光技术在农业作物种植中的应用提供了广阔的空间。

参 考 文 献

[1] 国务院. 国务院关于印发“十四五”推进农业农村现代化规划的通知 [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022－02/11/content_5673082.htm, 2022－02－11.

[2] 曹哲, 付威.《关于学习运用“千村示范、万村整治”工程经验有力有效推进乡村全面振兴的意见》解读——加快乡村产业全链发展[J]. 现代化农业, 2024(5): 31－33.

[3] 彭玉玲, 李凯茜, 徐学娴, 等. 2001—2020年全球粮食安全研究的发展趋势分析[J]. 中国食物与营养, 2022, 28(8): 13－20.
PENG Yuling, LI Kaixi, XU Xuexian, et al. Global trends in food safety research from 2001 to 2020 [J]. Food and Nutrition in China, 2022, 28(8): 13－20.

[4] 陈兆荣, 李停, 王珺. 科技创新、农业高质量发展对我国粮食安全影响的实证分析[J]. 吉林工商学院学报, 2022, 38(1): 23－27.
CHEN Zhaorong, LI Ting, WANG Jun. Empirical analysis of impact of scientific and technological innovation and high-quality agricultural development on grain security in China [J]. Journal of Jilin Business and Technology College, 2022, 38(1): 23－27.

[5] 吴文祥. 旱耕湿润育秧在水稻育种中的应用研究[J]. 园艺与种苗, 2021, 41(3): 88－89.
WU Wenxiang. Study on the application of dry farming and moist seedling raising in rice breeding [J]. Horticulture & Seed, 2021, 41(3): 88－89.

[6] 陈云. 水稻栽培及病虫害绿色防控技术要点[J]. 种子科技, 2023, 41(22): 94－96.

[7] 罗锡文, 王在满. 水稻生产全程机械化技术研究进展[J]. 现代农业装备, 2014(1): 23－29.

[8] 郭小鸥, 余聪华, 薛晓波. 不同育秧方式对机插水稻生长发育及产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2019(9): 68－70.

[9] 陈小林. 水稻旱育秧育种技术[J]. 农技服务, 2016, 33(10): 63.

[10] 汪雅婷. 水稻种植田间管理技术分析[J]. 棉花科学, 2023, 45(2): 36－38.

[11] 康永涛. 水稻旱育苗的技术核心[J]. 黑龙江科技信息, 2016(22): 257.

[12] 刘艺涵, 李晶, 陈晓丽, 等. 设施光环境调控技术装备研究现状与发展趋势[J]. 河北农业科学, 2023, 27(6): 83－88.
LIU Yihan, LI Jing, CHEN Xiaoli, et al. Research status and development trends of facility light environment regulation technology and equipment [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2023, 27(6): 83－88.

[13] 樊一凡, 张艳艳, 王艺媚, 等. 不同播期温光条件对籼稻产量和品质的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(2): 17－27.
FAN Yifan , ZHANG Yanyan , WANG Yimei, et al. Effects of temperature and light conditions on yield and quality of indica rice under different sowing dates [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(2): 17－27.

[14] 余恩唯, 蔡沁, 徐益, 等. 分蘖期弱光胁迫对水稻产量和品质的影响及其氮肥调控效应[J]. 作物研究, 2023, 37(5): 443－447.
YU Enwei, CAI Qin, XU Yi, et al. Effects of low light stress at tillering stage on yield and quality of rice and its regulation of nitrogen fertilizer [J]. Crop Research, 2023, 37(5): 443－447.

[15] 赵富阳, 马波, 胡继芳, 等. 不同光周期条件下寒地粳稻光周期敏感性评价[J/OL]. 作物杂志, 1－8[2024－08－01].
ZHAO Fuyang, MA Bo, HU Jifang, et al. Evaluation of photoperiod sensitivity of agronomic traits of rice varieties under different photoperiod conditions [J]. Crops, 1－8[2024－08－01].

[16] 李思博, 杜孝明. 关于温室钠灯补光系统的经济分析[J]. 农业工程技术, 2021, 41(1): 59－61.

[17] 王鹏, 曾固, 熊姜玲, 等. 植物工厂中光质对高品质蔬菜生产的影响研究进展[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(23): 24－29.
WANG Peng, ZENG Gu, XIONG Jiangling, et al. Research progress of the influence of light on high quality vegetable production in plant factory [J]. Anhui Agriculture Science Bull, 2021, 27(23): 24－29.

[18] ARCEL M M, LIN X, HUANG J, et al. The application of LED illumination and intelligent control in plant factory, a new direction for modern agriculture: A review [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1732: 012178.

[19] ARDIANSYAH, HARDANTO A, SUMARNI E. Biomass growth of red spinach in plant-factory system under three kinds of LED light sources [J]. IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 653(1): 012100.

[20] 梁雪梅, 贾鹏, 秦莉, 等. 激光在土地保护、农作物生长及害虫防治领域应用研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2021, 43(2): 130－137.
LIANG Xuemei, JIA Peng, QIN Li , et al. Research progress of laser application in land protection, crop growth and pest control [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021, 43(2): 130－137.

[21] NADIMI M , SUN D W, PALIWAL J. Recent applications of novel laser techniques for enhancing agricultural production [J]. Laser Physics, 2021, 31(5): 053001.

[22] ZHENG W J, HOU S C, SU M. Laser induced rapid decontamination of aromatic compound from porous soil simulant [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(8): 083106.

[23] ZHENG W J, GOLSHAN N H, CELESTIN S J, et al. Highly efficient in situ oxidization of metal ions in porous media with high power laser [J]. Applied Optics, 2018, 57(15): 4232－4236.

[24] THORAT S A, POOJARI P, KANIYASSERY A, et al. Red laser-mediated alterations in seed germination, growth, pigments and withanolide content of Ashwagandha (*Withania somnifera* (*L.*) *Dunal*) [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B Biology, 2021, 216: 112144.

[25] SWATHY P S, KIRAN K R, JOSHI M B, et al. He - Ne laser accelerates seed germination by modulating growth hormones and reprogramming metabolism in brinjal [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 7948.

[26] ALMUHAYAWI M S, HASSAN A, ABDEL-MAWGOUD M, et al. Laser light as a promising approach to improve the nutritional value, antioxidant capacity and anti-inflammatory activity of flavonoid-rich buckwheat sprouts [J]. Food Chemistry, 2020, 345(2): 128788.

[27] OOI A, WONG A, NG T K, et al. Growth and development of Arabidopsis thaliana under single-wavelength red and blue laser light [J]. Scientific Reports, 2016, 6:33885.

[28] 马旭, 林超辉, 齐龙, 等. 不同光质与光照度对水稻温室立体育秧秧苗素质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 228－235.
MA Xu, LIN Chaohui , QI Long, et al. Effect of different lighting quality and intensities on quality of rice seedling by greenhouse stereoscopic nursing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 228－235.

[29] 赵静, 周增产, 卜云龙, 等. 植物工厂补光照明方法现状与趋势[J]. 农业工程技术, 2018, 38(7): 30－34.

[30] 孔祺生, 朱强, 锺耀才, 等. 等离子植物补光灯对水稻秧苗素质的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(1): 79－80, 85.
KONG Qisheng, ZHU Qiang, ZHONG Yaocai, et al. Effect of plasma plant fill light on quality of rice seedlings [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2016, 44(1): 79－80, 85.

[31] 王士勇, 王崇生. 光生态膜在水稻育苗上应用试验研究[J]. 垦殖与稻作, 2004(2): 18－19.
WANG Shiyong, WANG Chongsheng. Application study of light-ecological film to seedling raising in paddy [J]. Reclaiming and Rice Cultivation, 2004(2): 18－19.

[32] 张海峰, 毛毳. 扣棚新型材料光生态膜在水稻育苗中的主要技术及其特点[J]. 农业科技通讯, 2008(3): 82.

[33] 许仁良, 张国良, 闫元景, 等. LED蓝红光及其组合对水稻秧苗素质的影响[J]. 淮阴工学院学报, 2016, 25(5): 39－44, 59.
XU Renling, ZHANG Guoliang, YAN Yuanjing, et al. Effects of LED blue, red and its combinations on rice seedlings quality [J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2016, 25(5): 39－44, 59.

[34] 王国莉, 宋冠华, 黄素杏, 等. 发光二极管(LED)红蓝光照对不同水稻品种秧苗素质的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(10): 6－10.
WANG Guoli, SONG Guanhua, HUANG Suxing, et al. Effects of red and blue illumination from light-emitting diode (LED) on seedling quality of different rice cultivars [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2014, 43(10): 6－10.

[35] 刘萍, 张粟, 黄丹丹, 等. LED补光对水稻秧苗生长及产量因子的影响[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(10): 4－9.
LIU Ping, ZHANG Su, HUANG Dandan, et al. Effect of light-emitting diodes on the seedling growth and yield factor of rice [J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(10): 4－9.

[36] 张喜娟, 来永才, 孟英, 等. 红蓝光源LED在水稻立体化育秧模式中的应用研究[J]. 作物杂志, 2014(5): 122－128.
ZHANG Xijuan, LAI Yongcai, MENG Ying, et al. The application of red and blue LED light source in tridimensional rice seedlings mode [J]. Crops, 2014(5): 122－128.

[37] 熊亚利, 王国莉, 吕镇城, 等. 不同波长蓝光LED对两个品种水稻秧苗生长的影响[J]. 广西植物, 2016, 36(3): 315－322.
XIONG Yali, WANG Guoli, LÜ Zhencheng, et al. Effects of different blue LEDs on the seedling growth of two rice cultivars [J]. Guihaia, 2016, 36(3): 315－322.

[38] 刘萍，张粟，蒋世翠，等. LED补光对水稻秧苗素质及其生理特征和产量的影响[J]. 土壤与作物，2021，10(1)：67－78.
LIU Ping，ZHANG Su，JIANG Shicui，et al. Effects of light-emitting diodes on the seedling quality，physiological characteristics and grain yield of rice [J]. Soils and Crops，2021，10(1)：67－78.

[39] 高义卓，向镜，叶天承，等. 不同光质配比的LED光源补光对水稻机插秧苗生长发育的影响[J]. 中国稻米，2024，30(1)：58－62.
GAO Yizhuo，XIANG Jing，YE Tiancheng，et al. Effects of LED light Supplementation with different light quality ratios on growth and development of the machine-transplanted rice seedlings [J]. China Rice，2024，30(1)：58－62.

[40] 屈成，刘芬，陈光辉，等. LED红蓝光质对水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 核农学报，2020，34(9)：2095－2102.
QU Cheng，LIU Fen，CHEN Guanghui，et al. Effects of LED red and blue Light ratio on growth and physiological characteristics of rice seedlings [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2020，34(9)：2095－2102.

[41] 刘文科，吴启保，查凌雁. LED连续光照的植物生理作用及植物工厂应用策略[J]. 照明工程学报，2020，31(5)：5－8，21.
LIU Wenke，WU Qibao，ZHA Lingyan. Application strategies and physiological mechanisms of LED continuous light for plant factory with artificial light [J]. China Illuminating Engineering Journal，2020，31(5)：5－8，21.

[42] 李佳，袁方，高青，等. 新型低能耗植物工厂蔬菜高效栽培关键技术研究与进展[J]. 特种经济动植物，2024，27(3)：164－166.

[43] 孟菁，董倩楠，王燕，等. He-Ne激光对盐胁迫下水稻幼苗抗氧化活性的影响[J]. 激光生物学报，2016，25(4)：336－341.
MENG Jing，DONG Qiannan，WANG Yan，et al. Effects on antioxidant system of rice under salt stress and He-Ne laser [J]. Acta Laser Biology Sinica，2016，25(4)：336－341.

[44] 谭萌，宋姝钰，王博，等. 激光补光灯对大棚黄瓜种植的应用研究[J]. 中国农机装备，2024(6)：37－39.
TAN Meng，SONG Shuyu，WANG Bo，et al. Application study on laser light for cucumber cultivation in greenhouse [J]. China Agricultural Machinery Equipment，2024(6)：37－39.

[45] 智永祺，赵虎，王森，等. 红蓝LD不同光质对茄子育苗的影响[J]. 农业技术与装备，2023(11)：18－19，27.
ZHI Yongqi，ZHAO Hu，WANG Sen，et al. Effect of different light quality of red and blue LD on seedling cultivation of eggplant [J]. Agricultural Technology & Equipment，2023(11)：18－19，27.

[46] 杨明来，王英，戚行江，等. 激光技术在农业补光领域的应用与发展前景[J]. 照明工程学报，2023，34(5)：12－18.
YANG Minglai，WANG Ying，QI Xingjiang，et al. Application and future prospects of laser technology in agricultural supplemental light [J]. China Illuminating Engineering Journal，2023，34(5)：12－18.

[47] 葛诗蓓，金迪迪，杨明来，等. 不同比例红蓝光对茶叶品质成分的影响与相关调控机理研究[J]. 浙江农业学报，2022，34(10)：2105－2111.
GE Shibei，JIN Didi，Y ANG Minglai，et al. Effects and regulation mechanism of different proportions of red and blue light on quality components in tea (*Camellia sinensis L.*) plant [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis，2022，34(10)：2105－2111.

[48] 刘文科. 植物工厂激光二极管照明的生理基础与应用策略[J]. 中国照明电器，2021(6)：4－6.
LIU Wenke. Physiological basis and application strategy for laser diode (LD) lighting in plant factory [J]. China Light & Lighting，2021(6)：4－6.

[49] 党聪聪，褚庆全. 激光植物生长生理效应及植物工厂应用价值探讨[J]. 照明工程学报，2021，32(2)：19－24.
DANG Congcong，CHU Qingquan. Effects of laser light on plant growth and physiology and its application evaluation in plant factory [J]. China Illuminating Engineering Journal，2021，32(2)：19－24.

[50] 高振，卢彩云，李洪文，等. 基于计算机视觉的种子分布信息检测关键技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(3)：50－60.
GAO Zhen，LU Caiyun，LI Hongwen，et al. Research progress and the prospect of crucial technology of seed spacing information detection based on computer vision [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2023，4(3)：50－60.

[51] 耿言刚. 水稻规格化育秧及机械插秧技术研究[J]. 南方农机，2024，55(7)：79－81，101.

[52] 沈金奎. 水稻全程机械化毯状育苗示范结果浅析——以贵州省兴义市德卧镇毛杉树村为例[J]. 南方农机，2024，55(7)：85－87.

[53] 顾永勤，杨肖蓉. 现代化水稻集中育秧中心规划与运营管理的探索[J]. 农业装备技术，2024，50(1)：39－41，44.

[54] 王玉博，王悦，刘雄，等. 水稻光周期调控开花的研究进展[J]. 中国水稻科学，2021，35(3)：207－224.
WANG Yubo，WANG Yue，LIU Xiong，et al. Research progress of photoperiod regulation in rice flowering [J]. Chinese Journal of Rice Science，2021，35(3)：207－224.

Progress in the application of new laser light source in rice seedling production

YANG Minglai[1, 2, 3], QIN Li[4, 5], JIA Peng[4, 5], LIANG Xuemei[1, 2], YU Helong[1, 2], BIAN Ting[3], MA Qiang[3], WANG Hui[3], LI Chenglong[3], Sicheng TIAN[6], WANG Ying[7*]

(1. *College of Information Technology, Jilin Agricultural University, Changchun* 130118, *China*; 2. *Institute of Smart Agriculture, Jilin Agricultural University, Changchun* 130118, *China*; 3. *Zhejiang Changxin Optoelectronic Technology Limited Company, Hangzhou* 310017, *China*; 4. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*; 5. *State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun* 130033, *China*; 6. *Abbe school of photonics, Jena* 07745, *Germany*; 7. *School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: Rice seedlings need sufficient light for normal growth. The increasing temperature demand of early spring seedling has promoted the development of greenhouses, greenhouses and factory facilities. However, due to the reflection and absorption of sunlight by glass and plastic, the lack of light in facility seedlings is prominent. Supplementary lighting can better solve the problem of lack of light in facility seedling, LED as the representative of the supplementary light source has been promoted and applied in facility seedling, but it still has high energy consumption problem. Laser is the only artificial light source with parallel light characteristics of sunlight, with good correlation, good monochromism, good directivity, high brightness, large energy, photoelectric conversion efficiency, energy saving and so on. Studies have shown that the special light quality of laser can effectively improve the photosynthesis efficiency of seedlings. The traditional laser light source represented by He-Ne laser is large in volume, high in cost, and difficult to be popularized. Using semiconductor laser combined with uniform light technology to develop a new laser light source, small size, low cost, can achieve a large area of uniform laser irradiation of rice seedlings, the single lamp irradiation area can reach 60-70 square meters. At the same time, the new laser light source retains the traditional laser correlation, monochromism and directivity, and also has the characteristics of high efficiency and energy saving, and the energy consumption can be only 1/30 of the traditional LED light source. The results showed that reasonable irradiation of new laser light source in the process of rice seedling cultivation can improve the quality of seedlings, fast greening after transplanting, more tillers, early heading, and finally achieve stable and increased rice yield. Since 2021, the test results in many places across the country have shown that the use of a new laser light source to irradiate rice seedlings for about 20 days before transplanting can achieve a yield increase of more than 10%. This result not only provided important technical support and guarantee for improving the quality and yield of rice in China, but also provided a new method and means for other plants to fill light at various stages.

Keywords: laser light source; plant light supplement; rice seedling; weak laser; light control