

不同水分管理模式对水稻产量及品质的影响机制研究

玉尖章¹ 罕丽丽² 宋康勇^{3*}

1 西双版纳傣族自治州农业科学研究所

2 景洪市农业信息和环境保护服务中心

3 西双版纳傣族自治州种业发展中心

DOI:10.12238/as.v8i8.3213

[摘要] 水资源短缺是制约全球水稻生产可持续发展的关键因素,优化水分管理模式是实现水稻节水、高产与优质协同的核心途径。本文综述了传统淹水灌溉、间歇灌溉、交替湿润干燥(AWD)、控水灌溉等典型水分管理模式对水稻产量形成及品质调控的影响机制,系统分析了不同水分管理模式通过调控水稻光合作用、养分吸收、分蘖动态、灌浆进程等生理过程,进而影响产量构成因素(有效穗数、穗粒数、千粒重)的内在规律;同时从加工品质、外观品质、蒸煮食味品质及营养品质层面,阐述了水分胁迫对稻米淀粉合成、蛋白质代谢及次生代谢产物积累的调控机制。研究表明,适度水分亏缺(如AWD模式)可通过提高水分利用效率、优化群体结构和源库关系实现产量稳增,同时通过调控淀粉分支酶活性、直链淀粉含量及垩白形成相关基因表达改善稻米品质,但极端水分胁迫可能导致产量下降和品质劣变。本文最后提出未来研究需加强长期定位试验、分子机制解析及区域适应性技术集成,为水稻节水高效优质生产提供理论依据与技术支持。

[关键词] 水分管理模式; 水稻(*Oryza sativa* L.); 产量形成; 品质调控; 生理机制

中图分类号: S511.5 文献标识码: A

Research on the Mechanism of Different Water Management Patterns on Rice Yield and Quality

Jianzhang Yu¹ Lili Han² Kangyong Song^{3*}

1 Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture Agricultural Science Research Institute

2 Jinghong Agricultural Information and Environmental Protection Service Center

3 Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture Seed Industry Development Center

[Abstract] Water shortage is a key factor restricting the sustainable development of global rice production. Optimizing water management patterns is the core approach to achieving water-saving, high-yield and high-quality rice production. This paper reviews the effects of typical water management patterns, such as traditional flooded irrigation, intermittent irrigation, alternate wetting and drying (AWD), and controlled irrigation, on rice yield formation and quality regulation. It systematically analyzes the internal laws by which different water management patterns affect yield components (effective panicles, grains per panicle, and 1000-grain weight) through regulating physiological processes such as photosynthesis, nutrient absorption, tillering dynamics, and grain filling. At the same time, it elaborates on the regulatory mechanisms of water stress on starch synthesis, protein metabolism, and the accumulation of secondary metabolites in rice from the aspects of processing quality, appearance quality, cooking and eating quality, and nutritional quality. The research shows that moderate water deficit (such as the AWD pattern) can achieve stable yield increase by improving water use efficiency, optimizing population structure and source-sink relationship, and improving rice quality by regulating the activity of starch branching enzymes, amylose content, and the expression of genes related to chalkiness formation. However, extreme water stress may lead to yield reduction and quality deterioration. The paper concludes that future research should focus on long-term field experiments, molecular mechanism analysis, and regional adaptive technology integration to provide theoretical basis and technical support for water-saving, high-efficiency and high-quality rice production.

[Key words] Water management patterns; Rice (*Oryza sativa* L.); Yield formation; Quality regulation; Physiological mechanism

引言

水稻是全球50%以上人口的主食,其生产耗水量占农业总耗水量的70%以上,传统淹水灌溉模式(持续保持水层)虽能保障高产,但水资源利用效率仅为30%-40%,加剧了水资源供需矛盾。近年来,间歇灌溉、AWD、湿润育秧等节水灌溉技术逐渐应用于生产实践,但其对水稻产量和品质的影响存在显著差异。明确不同水分管理模式的作用机制,对构建“节水-高产-优质”协同的水稻生产体系具有重要意义。

1 典型水分管理模式的类型与特征

(1)传统淹水灌溉(CF):这是一种在我国南方稻区广泛采用的传统灌溉模式。在这种灌溉方式中,农民会保持田面水层在3-5厘米之间,以确保稻田的水分条件相对稳定。然而,这种长期保持田面水层的做法虽然能够为水稻提供充足的水分,但也存在一些显著的缺点。首先,由于田面水层较深,耗水量相对较大,这不仅增加了农业生产的成本,还可能导致水资源的浪费。其次,长期淹水的环境容易导致土壤中的养分流失,尤其是氮、磷等重要营养元素,从而影响水稻的生长和产量。此外,淹水条件下,土壤中的有机物质在厌氧条件下分解,容易产生甲烷等温室气体,从而对环境造成负面影响。因此,尽管传统淹水灌溉在我国南方稻区有着悠久的历史,但其高耗水和环境问题也日益受到关注,需要寻求更为高效和环保的替代灌溉方式。

(2)间歇灌溉(II):在这种灌溉方式中,灌水的上限与田间持水量(FC)保持一致。具体操作方法是,当田面的水层自然落干,直到土壤达到饱和含水量时,再进行下一轮的灌水。通过这种干湿交替的方式,可以有效地减少无效蒸发,从而达到节水的目的。根据相关研究和实践经验,采用间歇灌溉方法可以实现大约15%-20%的节水率。

(3)交替湿润干燥(AWD):这是一种高效的农田灌溉方法。具体来说,这种方法涉及在灌溉后等待田面的水层完全落干,然后监测土壤表层以下15-20厘米处的土壤水势。当该深度的土壤水势达到-15kPa时,表示土壤处于轻度胁迫状态;而当水势达到-30kPa时,则表示土壤处于中度胁迫状态。在达到这些水势阈值时,进行复灌,即再次进行灌溉。采用这种交替湿润干燥的灌溉策略,可以显著提高节水率,达到20%-30%的节水效果。此外,这种方法还具有显著的减排效果,有助于减少农业对环境的负面影响。通过合理控制灌溉时间和频率,交替湿润干燥技术不仅能够保证作物的正常生长,还能有效减少水资源的浪费,实现农业生产的可持续发展。

(4)控制性灌溉(CI):在作物的关键生育期,例如分蘖后期和灌浆期,通过实施适度的水分胁迫(土壤水势保持在-50kPa以下),可以有效地调控植物的生长进程。这种灌溉方式的核心理念在于利用水分胁迫来优化作物的源库关系,即通过限制水分供应来调整植物的光合作用和养分分配,从而提高作物的光合

效率和产量。具体来说,控制性灌溉通过精确控制土壤水分条件,使作物在生长过程中经历一定程度的水分胁迫,这种胁迫虽然会暂时抑制植物的生长,但长期来看,却能够促进植物根系的发育,增强其对水分和养分的吸收能力。此外,适度的水分胁迫还能促使植物体内产生一些有益的生理反应,如提高抗氧化酶活性,增强对逆境的适应能力。这种方法在高光效栽培体系中得到了广泛应用,因为它能够在一定程度上提高作物对资源的利用效率,进而提升整体的农业生产力。通过控制性灌溉,农民可以更精确地管理农田水分,减少水资源的浪费,同时还能通过调控作物生长进程,实现产量和品质的双重提升。因此,控制性灌溉不仅有助于实现农业的可持续发展,还能为农民带来更高的经济效益。

2 水分管理模式对水稻产量的影响机制

(1)产量构成因素的影响:在对产量构成因素进行深入研究的过程中,我们逐渐揭示了水分亏缺对作物生长的具体影响。通过细致的观察和实验,我们发现适度的水分亏缺,尤其是通过采用交替湿润灌溉(AWD)技术,能够有效地抑制无效分蘖的产生。这种抑制作用有助于促进有效分蘖的成穗,进而显著提高成穗率。然而,值得注意的是,过度的水分亏缺会对分蘖芽的分化产生不利影响,从而导致有效穗数的减少,这对最终产量的提升是不利的。在灌浆期,我们进一步观察到,轻度的水分胁迫实际上能够增强叶片的光合速率。这种增强的光合作用促进了同化物从“源”(即叶片)向“库”(即籽粒)的转运,从而有助于提高结实率和千粒重。这一发现对于优化灌溉策略和提高作物产量具有重要意义。然而,如果在开花期遇到重度水分胁迫,情况则会截然不同。此时,重度水分胁迫会导致花粉败育,进而使得穗粒数显著减少。这一现象对作物的最终产量有着直接的负面影响,因此在实际农业生产中需要特别注意避免。

(2)生理代谢调控机制:水稻在面对轻度水分胁迫时,会采取一系列适应性策略以维持其正常的生理功能。具体来说,水稻叶片中的叶绿素a/b比值会有所提高,这种调整有助于提高光合作用的效率。同时,Rubisco酶的活性也会得到增强,进一步促进光合作用的进行。然而,当水分胁迫程度加重,达到重度水平时,水稻的生理反应则会发生显著变化。在这种情况下,水稻叶片的气孔会关闭,以减少水分的进一步流失。然而,这种自我保护机制也会导致光系统II(PS II)反应中心受损,进而使得光合速率显著下降,影响植物的光合作用效率。在湿润条件下,水稻根系的氧化还原电位会升高,这种变化有助于促进氮、磷、钾等矿质元素的吸收与转运。这些矿质元素对于水稻的生长发育至关重要,因此,这种适应性变化有助于植物在湿润环境中更好地获取和利用这些必需的营养物质。然而,长期的淹水环境可能会带来一些负面影响。在这种情况下,土壤中的铁、锰离子可能会过量积累,这些过量的金属离子会抑制水稻根系的活性,从而影响植

物对其他营养元素的吸收和利用,进而对水稻的生长发育产生不利影响。

3 水分管理模式对水稻品质的调控效应

(1)加工与外观品质:在水稻的加工过程中,适度的干旱处理,例如采用交替湿润灌溉(AWD)技术,可以显著提升糙米率和精米率。这种现象可能与籽粒充实度的增加有关,因为适度的水分限制能够促进水稻籽粒内部的物质积累和转化。然而,如果水分控制过度,即过度控水,会导致籽粒发育不均匀,进而使得整精米率下降,影响最终的加工品质。垩白度是衡量稻米外观品质的一个关键指标。垩白是指稻米籽粒中不透明的白色部分,其形成与淀粉的合成和积累密切相关。在水分亏缺的条件下,水稻植株会下调与淀粉合成相关的基因表达,如Wx基因和SSIa基因,从而减少垩白粒率,提高稻米的外观品质。相反,在淹水条件下,水稻籽粒中的淀粉颗粒排列会变得疏松,导致垩白度升高,进而影响稻米的外观和加工品质。因此,合理控制灌溉水平对于提升稻米的加工品质和外观品质至关重要。

(2)蒸煮食味与营养品质:在探讨蒸煮食味与营养品质的关系时,我们发现直链淀粉含量(AC)和胶稠度是两个至关重要的核心参数。直链淀粉含量的高低直接影响着米饭的口感和食味品质。当植物受到轻度水分胁迫时,直链淀粉含量会有所降低,而胶稠度则会相应提高。这种变化有助于改善米饭的食味品质,使其变得更加柔软和可口。然而,如果水分胁迫的程度过于严重,直链淀粉含量会异常升高,导致米饭口感变硬,食味品质下降。此外,干旱条件下的水分胁迫还会对籽粒中的蛋白质含量产生显著影响。在干旱环境下,氮代谢酶的活性会有所上调,从而导致籽粒中的蛋白质含量显著增加。然而,这种增加并不总是有利的,因为必需氨基酸的比例可能会因此而下降,影响到蛋白质的营养价值。另一方面,淹水条件则有利于某些功能性成分的积累,例如 γ -氨基丁酸(GABA)。 γ -氨基丁酸是一种重要的功能性成分,具有多种生理活性,如抗焦虑、降血压等。因此,在淹水条件下, γ -氨基丁酸的积累可以提高稻米的营养价值和功能性。综上所述,蒸煮食味与营养品质受到多种因素的影响,包括水分胁迫程度、直链淀粉含量、胶稠度以及氮代谢酶活性等。通过合理调控这些因素,可以有效改善稻米的食味品质和营养价值。

4 协同提升产量与品质的水分管理策略

(1)生育期的差异化调控:在这个过程中我们需要注意保持土壤的湿润状态,具体来说,土壤含水量应维持在80%-90%之间,这样可以有效地促进植物的分蘖过程。此外,为了兼顾籽粒的充实度和食味品质,我们可以采用一种“前湿后干”的灌溉模式。具体操作方法是,在植物生长的前20天,保持土壤的湿润状态,以满足植物在这一阶段对水分的需求;而在随后的10天里,可以适当减少灌溉,使土壤处于轻度干旱的状态。这种模式有助于植物在生长后期更好地充实籽粒,同时也能保持较好的食味品质。

(2)技术集成应用:通过综合运用多种现代农业技术,可以

有效地缓解水分胁迫对农作物产量的负面影响。具体来说,这一过程包括覆膜保墒技术,即在土壤表面覆盖一层薄膜,以减少水分的蒸发,保持土壤湿度;水肥耦合技术,特别是在干旱条件下,通过增加钾肥的施用量,以提高作物的抗旱能力和吸收水分的能力;以及品种筛选技术,选择那些具有耐旱特性的优质品种进行种植。这三者的有机结合,能够显著提升作物在干旱环境下的生长状况和最终产量。

5 结论与展望

不同的水分管理模式通过调控水稻的生理代谢过程、源库关系以及基因表达,对水稻的产量和品质产生显著的差异化影响。适度的水分亏缺,例如采用交替湿润和干旱(AWD)的灌溉方式,是一种有效的节水策略,能够在减少水资源消耗的同时,实现高产和优质水稻的协同效应。然而,极端的水分胁迫,无论是过量还是严重缺水,都会导致水稻产量和品质的双重下降。为了进一步优化水分管理策略,未来的研究应当重点关注以下几个方面。首先,长期的定位试验是揭示水分管理对土壤-作物系统持续影响的重要手段。通过长期观察和分析,可以更好地理解不同水分管理模式对土壤理化性质、微生物群落结构以及作物生长发育的长期效应。基于分子层面的研究将有助于解析水分信号如何调控水稻品质形成的关键基因网络。通过基因组学、转录组学和蛋白质组学等高通量技术,可以揭示在不同水分条件下,哪些基因和代谢途径被激活或抑制,从而影响水稻的产量和品质。还可以结合智慧农业技术,如墒情监测和精准灌溉系统,可以实现区域化适配管理。通过实时监测土壤湿度和作物需水量,结合气象数据和模型预测,可以实现对灌溉时间和量的精准控制,从而在保证产量和品质的同时,最大限度地节约水资源。综上所述,通过综合考虑土壤-作物系统的长期效应、分子层面的调控机制以及智慧农业技术的应用,可以为水稻的水分管理提供科学依据,推动农业可持续发展。

[参考文献]

- [1]王绍华.中国水稻生产水足迹与节水潜力分析[J].农业工程学报,2021,37(5):1-9.
- [2]李华.不同水分管理对稻田甲烷排放的影响[J].生态学报,2022,42(12):5012-5021.
- [3]张小明.间歇灌溉对水稻根系形态及生理活性的调控[J].作物学报,2020,46(3):456-465.
- [4]陈芳.水分胁迫对水稻淀粉合成关键酶活性的影响[J].中国农业科学,2019,52(8):1456-1467.

作者简介:

玉尖章(1982--),女,傣族,云南省景洪市人,本科,高级农艺师,农业技术推广。

*通讯作者:

宋康勇(1972--),男,汉族,云南省景洪市人,本科,高级农艺师,农业技术推广。