

节水灌溉条件下小麦优质高产栽培技术优化与生理机制

保永林

师宗县大同街道农业农村发展服务中心

DOI:10.32629/as.v9i4.3922

[摘要] 水资源短缺已成为制约全球及我国北方麦区农业可持续发展的关键瓶颈。在保障国家粮食安全与生态安全的双重压力下,探索节水灌溉条件下小麦优质高产的栽培技术及其生理调控机制显得尤为迫切。本文系统综述了近年来国内外关于节水灌溉对小麦生长发育、产量形成及品质构成的影响,深入剖析了限水灌溉诱导小麦产生补偿性生长的生理基础,包括根系构型优化、水分利用效率提升、光合特性改善以及碳氮代谢协同调控等关键机制。文章重点探讨了基于土壤墒情监测的精准灌溉制度、宽幅精播与垄作沟灌等农艺措施、抗旱品种选育及化学调控剂等综合技术体系的优化路径。研究表明,适度水分亏缺不仅能显著降低无效蒸腾,还能通过激发作物自身的抗逆潜能,实现“以水调肥、以水控质、以水增产”的目标。未来研究应进一步聚焦于多因子耦合下的精准调控模型构建及分子水平的抗旱机理挖掘,为建立资源节约型与环境友好型的小麦生产模式提供理论支撑。

[关键词] 小麦; 节水灌溉; 优质高产; 生理机制; 水分利用效率; 栽培技术

中图分类号: S512.1 文献标识码: A

Optimization of High-Quality and High-Yield Cultivation Techniques and Physiological Mechanisms of Wheat under Water-Saving Irrigation Conditions

Yonglin Bao

Agricultural and Rural Development Service Center of Datong Sub-district, Shizong County, Yunnan Province 655705, China

[Abstract] Water shortage has become a key bottleneck restricting the sustainable development of agriculture in global and northern wheat-growing areas of China. Under the dual pressure of ensuring national food security and ecological security, it is particularly urgent to explore the cultivation techniques and physiological regulation mechanisms for high-quality and high-yield wheat under water-saving irrigation conditions. This paper systematically reviews the effects of water-saving irrigation on the growth and development, yield formation, and quality composition of wheat at home and abroad in recent years, and deeply analyzes the physiological basis of compensatory growth induced by limited water irrigation in wheat, including key mechanisms such as root system configuration optimization, improvement of water use efficiency, improvement of photosynthetic characteristics, and coordinated regulation of carbon and nitrogen metabolism. The article focuses on the optimization paths of comprehensive technical systems, including precise irrigation systems based on soil moisture monitoring, wide-row precision sowing and ridge-furrow irrigation, drought-resistant variety breeding, and chemical regulators. The research shows that moderate water deficit can not only significantly reduce ineffective transpiration but also achieve the goals of "regulating fertilizer with water, controlling quality with water, and increasing yield with water" by stimulating the crop's own stress resistance potential. Future research should further focus on the construction of precise regulation models under multi-factor coupling and the exploration of drought resistance mechanisms at the molecular level to provide theoretical support for the establishment of resource-saving and environment-friendly wheat production models.

[Key words] Wheat; Water-saving irrigation; High-quality and high-yield; Physiological mechanism; Water use efficiency; Cultivation techniques

引言

小麦作为云南师宗县最主要的粮食作物之一,其稳定生产直接关系到粮食安全与社会稳定。然而,随着全球气候变暖加剧、极端干旱事件频发以及工业化、城镇化进程的加速,农业用水矛盾日益尖锐。我国作为小麦生产大国,主产区主要集中在黄淮海平原及西北旱地,这些区域普遍面临水资源总量不足、时空分布不均以及地下水超采严重等问题。传统的漫灌方式不仅水资源浪费巨大,还易导致土壤板结、养分流失及生态环境恶化,难以适应现代农业绿色高质量发展的需求。因此,发展节水灌溉农业,实现小麦生产的“减量增效”,即在水资源投入减少的前提下,保持甚至提高小麦的产量与品质,已成为当前农业科学研究的核心议题。节水灌溉并非简单的减少用水量,而是一门涉及气象学、土壤学、植物生理学及农艺学的系统工程。其核心在于通过精确控制灌水时间、灌水量和灌水方式,使土壤水分状况始终处于作物生长的最佳或次佳区间,从而最大限度地发挥作物的自身潜力。近年来的研究发现,作物对水分胁迫具有一定的适应性和补偿机制,适度的水分亏缺(Deficit Irrigation)反而能刺激根系下扎,优化冠层结构,提高光能利用率和水分利用效率(WUE),进而实现优质高产。然而,目前关于节水灌溉阈值的确立、不同生育期水分敏感性的差异、水肥耦合效应以及其背后的深层生理生化机制仍存在诸多争议和未解之谜。

1 节水灌溉对小麦生长发育及产量品质形成的影响

水分是小麦生命活动的介质,直接参与光合作用、物质运输及细胞膨大等生理过程,其供应状况深刻影响着小麦的形态建成、产量构成要素及籽粒品质。在节水灌溉条件下,小麦的生长发育呈现出显著的阶段性响应特征和可塑性。

1.1 对营养生长与生殖生长的调控效应

在云南师宗县,适度缺水对小麦营养生长具有抑制作用,表现为株高降低、叶片面积指数(LAI)减小,但这往往有利于构建合理的群体结构,减少基部节间长度,增强茎秆强度,从而降低倒伏风险。更重要的是,节水灌溉能显著促进根系发育。在水分胁迫初期,地上部生长受抑,而根系为了获取深层土壤水分会加速向下延伸,根冠比(R/S)增大,根系体积、长度及表面积显著增加,特别是深层根系的比例提高,增强了作物吸收深层土壤水分和养分的能力。在生殖生长方面,拔节至抽穗期是小麦对水分最敏感的临界期,此期严重缺水会导致小花退化率增加,穗粒数显著下降;而灌浆期缺水则会缩短灌浆持续时间,降低千粒重。然而,研究表明,实施非充分灌溉(如仅在全生育期灌水1-2次),若timing选择得当(如在拔节期和开花期等关键需水期供水),不仅能满足生殖器官发育的基本需求,还能通过延缓后期叶片衰老,维持较高的光合势,从而补偿因群体减小带来的产量损失,实现产量结构的优化,即依靠穗粒数和千粒重的协同增加来弥补穗粒数的潜在不足。

1.2 对产量构成与水肥耦合的交互作用

产量是穗数、穗粒数和千粒重三要素的乘积。节水灌溉条件下,这三要素的平衡关系发生了微妙变化。传统大水漫灌往往

造成前期旺长、无效分蘖多、成穗率低,而节水灌溉通过控制无效分蘖,提高了成穗率,使群体更加健壮。同时,水分与肥料(尤其是氮肥)存在显著的耦合效应。在水分充足时,过量施氮易导致徒长和贪青晚熟;而在节水条件下,合理的减氮配水能促进氮素向籽粒转运,提高氮肥生产力。研究发现,在亩灌水60-90立方米的限额内,配合优化施氮策略,小麦产量可达到甚至超过常规灌溉水平,且水分利用效率(WUE)显著提高20%-30%。这种“以水促肥、以肥调水”的耦合机制,是实现节水高产的关键。

1.3 对籽粒品质形成的双重影响

小麦品质主要包括加工品质(如面筋强度、沉降值)和营养品质(如蛋白质含量)。水分状况对蛋白质积累具有复杂影响。一般而言,轻度至中度水分胁迫有利于提高籽粒蛋白质含量,因为缺水抑制了淀粉的合成积累速度快于蛋白质,导致蛋白质相对比例上升;同时,胁迫诱导的活性氧信号可能激活相关基因表达,促进贮藏蛋白的合成。然而,严重缺水会导致灌浆提前终止,籽粒饱满度差,虽蛋白含量高但面筋质量下降,烘焙品质变劣。相反,适量的节水灌溉(如补充关键期水分)能在保证籽粒充实度的同时,优化谷蛋白与醇溶蛋白的比例,改善面筋网络结构,从而实现产量与品质的同步提升。例如,在黄淮海麦区,拔节水与开花水的合理搭配,被证明是协调高产与强筋品质的有效途径。

2 节水灌溉诱导小麦高产优质的生理生态机制

揭示节水灌溉下小麦高产优质的内在生理机制,是制定科学栽培技术的理论基础。云南师宗县现有研究证实,适度水分亏缺通过触发一系列复杂的生理生化反应,激发了小麦的补偿生长机制和抗逆适应性。

2.1 根系构型优化与水分吸收动力学

根系是作物感知土壤水分变化并做出响应的首要器官。在节水灌溉产生的干湿交替环境中,小麦根系表现出极强的可塑性。一方面,土壤干燥层产生的脱落酸(ABA)信号随蒸腾流向上运输,诱导气孔部分关闭,减少水分散失;另一方面,深层湿润土壤刺激根系向深处生长,形成“深根密植”的构型。这种构型优化扩大了根系的吸水面积,提高了对深层土壤储水的利用率。生理学研究显示,节水条件下小麦根系的氧化酶活性增强,细胞壁延展性增加,促进了根尖穿透紧实土层的能力。此外,根系分泌物的组成发生变化,增加了有机酸和糖分的分泌,改善了根际微环境,促进了有益微生物群落繁衍,进而活化土壤中难溶性磷钾养分,间接提升了水肥耦合效率。

2.2 光合特性改善与碳同化分配调控

光合作用是产量形成的源泉。适度水分胁迫虽然瞬时降低了气孔导度,限制了CO₂进入,但长期来看,它诱导了小麦光合机构的适应性调整。首先,叶片叶绿素含量下降速度减缓,功能叶寿命延长,特别是在灌浆后期,节水处理组的旗叶光合速率往往高于大水漫灌组,这得益于延缓了叶片衰老进程。其次,非气孔限制因素得到改善,Rubisco酶活性及电子传递效率在复水后表现出超补偿效应。更为关键的是,光合产物的分配模式发生了改

变。在水分充足时,光合产物大量流向茎叶等营养器官;而在节水条件下,同化物向生殖器官(穗和籽粒)的分配比例显著增加。这种“源-库”关系的重新调配,确保了有限的碳资源集中供给籽粒灌浆,提高了经济系数,是节水高产的重要生理基础。

2.3 御系统与渗透调节机制

水分胁迫必然伴随活性氧(ROS)的爆发,若不及时清除将导致膜脂过氧化和细胞损伤。节水灌溉条件下,小麦体内构建了高效的抗氧化防御体系。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等保护酶活性显著增强,抗坏血酸-谷胱甘肽循环加速运转,有效清除了过剩的ROS,维持了细胞膜的完整性和稳定性。同时,小麦通过积累脯氨酸、可溶性糖、甜菜碱等相容性溶质进行渗透调节,降低细胞渗透势,维持细胞膨压,保证在低水势环境下仍能进行正常的代谢活动。这些生理机制的协同作用,使得小麦在经历适度干旱后,一旦获得水分补充(如降雨或灌溉),能迅速恢复生长并表现出补偿性增长,最终实现产量的稳定。

2.4 转导与基因表达调控

植物激素在小麦响应水分胁迫中扮演信使角色。ABA作为主要的逆境激素,在节水灌溉中起核心调控作用。它不仅调控气孔开闭,还介导了根系生长、叶片衰老及籽粒灌浆等多个过程。此外,细胞分裂素(CTK)与ABA的比值变化决定了源库关系的平衡,乙烯和茉莉酸也参与了胁迫信号的传递。在分子水平上,节水灌溉诱导了多种抗旱相关基因的表达,如编码水通道蛋白(PIPs/TIPs)的基因、LEA蛋白基因及转录因子(如DREB、NAC、WRKY家族)基因。这些基因的上调表达增强了细胞保水能力、稳定了蛋白质结构并激活了下游抗逆通路,从遗传本质上赋予了小麦在节水条件下高产优质的潜力。

3 节水优质高产栽培技术体系的优化策略

基于上述理论与机制,构建集成化的栽培技术体系是实现小麦节水优质高产的必由之路。该体系应涵盖品种选择、耕作播种、水肥管理及化学调控等多个环节。

3.1 品种的筛选与合理布局

品种是内因,是节水潜力的载体。应大力推广具有“深根系、高WUE、抗衰老、强筋质”特性的抗旱节水品种。不同生态区应根据降水模式和土壤类型选择适宜品种,如在半干旱区选择雨养型或补灌型品种,在井灌区选择水肥高效型品种。同时,注意品种的多样化布局,避免单一品种种植带来的生态风险。

3.2 与宽幅精播技术

改良土壤物理性状是提高天然降水利用率和灌溉水效率的

基础。推行每隔2-3年进行一次深松或深耕(深度30cm以上),打破犁底层,增加土壤蓄水容量,促进根系下扎。在播种环节,推广宽幅精播技术,将行距由传统的20cm放宽至25-30cm,播幅加宽至8-10cm,降低群体密度,改善通风透光条件,减少个体间竞争,培育壮苗。配合适量播种,基本苗控制在适宜范围(如每亩15-20万),构建高质量群体起点。

3.3 监测的精量灌溉与水肥耦合

摒弃经验灌溉,建立基于土壤墒情实时监测和作物需水模型的精准灌溉制度。利用张力计、频域反射仪(FDR)等设备监测土壤含水率,确定最佳灌水阈值。一般建议在越冬水(视墒情而定)、拔节水和开花水三个关键节点进行精准补水,全生育期灌水次数控制在2-3次,亩总灌水量控制在90-120立方米。推行水肥一体化技术,将氮肥分期施用,适当减少基肥比例,增加拔节期和孕穗期的追肥比例,实现水肥同步供应,提高肥料利用率,促进籽粒蛋白质积累。

4 结论

综上所述,节水灌溉条件下小麦优质高产是一个多因素协同作用的复杂过程。通过深入理解其生理机制,集成应用良种、良法、良技,完全可以在大幅减少水资源投入的同时,实现小麦产量与品质的双提升,为我国农业的绿色可持续发展提供坚实保障。未来,随着智慧农业技术的发展,基于物联网的精准水肥决策系统将进一步提升节水栽培的智能化水平,推动小麦生产迈向新台阶。

[参考文献]

- [1]王孜琪,夏辉.水氮耦合对滴灌冬小麦生长、品质和水分利用效率的影响[J].江苏农业科学,2026,54(02):116-125.
- [2]李楠,李浩然.长期水氮定位对小麦幼苗质量及产量形成的调控效应[J/OL].水土保持学报,1-16[2026-03-11].
- [3]李仁崑,毛思帅,兰宏亮,等.中等肥力条件下甘薯滴灌不同灌溉量与产量的关系[J].中国农学通报,2025,41(33):45-50.
- [4]固灿平.控释氮肥比例对水稻氮素利用、产量及品质的影响[D].扬州大学,2025.
- [5]毕新铜.黄淮南部麦区高产优质小麦品种鉴定及其生理特征分析[D].河南农业大学,2025.
- [6]刘淋茹.施磷对干旱胁迫下小麦小花发育及其生理特性的调控效应[D].河南农业大学,2025.

作者简介:

保永林(1974--),男,汉族,云南师宗县人,本科,职称:高级农艺师,研究方向:农业技术推广。