

# 河北坝上地区藜麦不同节水栽培模式的节水增效比较

李 扬<sup>1</sup> 卢 川<sup>2</sup> 李孟琪<sup>2</sup> 吕 玮<sup>2</sup> 李悦有<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>河北农业大学生命科学学院,保定 071000;<sup>2</sup>河北省科技创新服务中心,石家庄 050000)

**摘 要:**针对华北北缘生态脆弱区水资源刚性约束与地下水超采治理需求,以河北坝上地区藜麦生产为基础,基于2018–2025年定点示范与规模种植调研数据,对传统喷灌、有机旱作雨养与膜下滴灌3种模式进行对比评价,围绕产量、灌溉量、灌溉水分利用效率与经济收益,构建“农艺表现—资源消耗—收益稳定性”分析框架。结果表明:坝上地区3种藜麦种植模式在灌溉投入与水分利用效率方面差异显著。膜下滴灌模式在90m<sup>3</sup>/667m<sup>2</sup>灌溉量条件下平均产量为143kg/667m<sup>2</sup>,灌溉水分利用效率为1.59kg/m<sup>3</sup>,单位水产出显著高于传统喷灌模式。有机旱作雨养模式实现零灌溉,适宜生态敏感区与水源极度受限区,但产量波动较大,其经济可行性依赖组织化经营与品牌溢价。生态脆弱区农业转型宜采用“节水工程+农艺增效+生态治理+社会化服务”组合路径,将滴灌覆膜、水肥一体化与残膜回收、轮作休耕协同配置,以实现节水稳产与生态风险可控。综上,膜下滴灌模式在坝上地区表现出最优的节水增效与稳产性,可作为效率驱动型主推模式;有机旱作雨养模式适用于生态敏感与极度缺水单元,但需以订单与品牌体系对冲波动风险。

**关键词:**藜麦;种植模式;水分利用效率;生态脆弱区;膜下滴灌;有机旱作雨养;技术路径

## Comparison of Water-Saving and Efficiency-Enhancing Effects of Different Quinoa Cultivation Modes in the Bashang Area of Hebei

LI Yang<sup>1</sup>, LU Chuan<sup>2</sup>, LI Mengqi<sup>2</sup>, LYU Wei<sup>2</sup>, LI Yueyou<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>College of Life Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei;

<sup>2</sup>Hebei Science & Technology Innovation Service Center, Shijiazhuang 050000)

生态脆弱区常呈现“水资源短缺—生态承载脆弱—收益波动偏大”的叠加约束。在华北平原及其北缘地区,节水技术与水资源治理政策并行推进,

**基金项目:**现代种业科技创新专项(21326305D);农业高质量发展关键共性技术攻关专项(19227527D);国际科技合作/港澳台科技合作专项(25296301D)

**通信作者:**吕玮,李悦有

但灌溉效率提升后可能伴随用水结构调整与扩种效应,对区域节水目标形成潜在挤出。相关研究表明,应将节水工程与农艺增效、制度约束及经营组织协同配置,方能实现稳定的资源节约绩效<sup>[1]</sup>。河北坝上地区属农牧交错带与生态安全屏障区,年降水量350~450mm,且时空分布不均、蒸发量高,农业生产

[13] 孔福苓,薛德,张丽,张承琪,公丕峰,罗汉民. 淄博市40个玉米品种的种植比较试验. 中国种业,2025(1):103–110

[14] 杨红旗,路凤银,郝仰坤,董兵. 中国玉米产业现状与发展问题探讨. 中国农学通报,2011,27(6):368–373

[15] 杜霞,豆攀,陈祥,孔凡磊,袁继超. 气象条件对川中丘陵地区玉米生长和产量的影响及播期优化——以中江为例. 湖南农业大

学学报:自然科学版,2022,48(3):257–264

[16] 陈冰,卢悦,胡义熬,房爱忠. 不同玉米品种产量及其构成因素差异分析. 现代农业科技,2024(9):28–31

[17] 何长安,徐艳霞,蓝岚,黄新育,刘兴焱,王辉,杨耿斌,纪春学,张恒. 黑龙江省早熟玉米青贮品种选择及性能比较研究. 现代畜牧科技,2018(12):11–12 (收稿日期:2025-11-26)

对水分波动高度敏感。近年来,农业用水替代与高效灌溉被用于缓解地下水超采压力,客观上推动种植制度向“节水、稳产、增效、可持续”转型<sup>[2-3]</sup>。

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)具备耐旱、耐瘠薄等适应性,适合在冷凉半干旱区作为结构调整作物种植<sup>[4]</sup>。农业农村部发布的《2019年藜麦生产技术指导意见》,为北部春播区良种选择、密植与水肥管理提供了规范化框架<sup>[5-6]</sup>。在坝上地区,藜麦作为“小杂粮+特色经济作物”已形成示范推广与订单组织并行的生产格局,种植面积逐年上涨,逐步成为种植结构调整的重要选项之一。相较于高耗水作物,藜麦生育期水分需求相对较低,更易与灌溉配额约束和高效节水灌溉制度衔接;同时其籽粒商品价值较高,具备在“减水”背景下通过提升单位水产出维持收益的潜力。

坝上地区在推广藜麦种植的过程中形成了常规喷灌、雨养有机与膜下滴灌等多样化栽培模式。不同模式在资源投入、产出效益与生态风险上差异明显,但现有报道多聚焦单一模式,缺乏基于统一指标口径的系统比较。因此,本文以坝上地区藜麦为研究对象,基于2018–2025年连续示范与产业实践形成的台账数据开展分析,比较不同水分投入方式下的产量表现、单位水产出与收益稳定性,探索各模式的适用边界与关键风险点,旨在结合成本构成与生态风险控制要点提出分区适配的推广建议,为生态脆弱区农业转型提供可复核的区域适配型技术路径。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

以河北省坝上地区沽源县为核心试验区,辅以张北县、康保县对比观测点数据。坝上地区属中温带半干旱大陆性季风气候,海拔1300~1600m,年均气温1~4℃,无霜期90~110d,年降水量350~450mm,且70%以上集中于7~9月。土壤以栗钙土、风沙土为主,有机质含量偏低,保水保肥能力有限。

### 1.2 试验材料与种植模式

2018–2025年在坝上地区示范推广3种典型藜麦种植模式,各模式均以当地主栽品种坝藜2号为试验材料。

模式1(传统喷灌):采用固定式喷灌,以关键

生育期补水为主,补水时期主要集中在出苗至苗期、现蕾至开花期及灌浆期等产量形成敏感阶段;其余时期根据土壤墒情与降水情况进行必要调节,全生育期灌水量为210~250m<sup>3</sup>/667m<sup>2</sup>。

模式2(有机旱作雨养):全生育期不灌溉,以降水为主要水分来源,配套垄沟集雨、覆盖保墒与中耕除草等措施提高降水利用效率;有机投入以改良土壤肥力和提升保水保肥能力为目标,主要包括腐熟农家肥/堆肥等有机肥源基施,生育期结合长势适量补施有机肥或生物有机肥;病虫害优先采用农业与生物防控措施。

模式3(膜下滴灌):采用地膜覆盖与膜下滴灌配套管理,滴灌2~3次,灌水节点以苗期、现蕾至开花期及灌浆初期为主,并根据降水与墒情对灌水次数与水量进行动态调整;全生育期总灌水量控制在80~100m<sup>3</sup>/667m<sup>2</sup>之间,同时配套滴施养分管理以提高投入效率。为适应坝上冷凉、风大及生育期偏短等生态条件,在膜下滴灌模式中同步采用“矮、密、早”配套栽培策略。“矮”指通过合理群体调控与水肥管理抑制无效营养生长、降低倒伏风险并提高群体通风透光;“密”指在保证基本株型与通风条件的前提下适度提高种植密度,以增加单位面积穗数和群体截光;“早”指适当提前播期并配套促早熟管理,使关键生育阶段尽量避开低温霜冻风险窗口、提高成熟一致性。

### 1.3 指标体系与计算方法

以产量(kg/667m<sup>2</sup>)、生育期灌溉量(m<sup>3</sup>/667m<sup>2</sup>)、灌溉水分利用效率(WUE, Water use efficiency, kg/m<sup>3</sup>)与经济收益为核心指标。WUE计算公式:WUE=Y/I,式中Y为籽粒产量,I为生育期灌溉量。雨养模式不计算灌溉水分利用效率。

### 1.4 数据来源与一致性处理

数据来源于河北省科技创新服务中心在坝上地区建立的定点试验示范基地2018–2025年连续观测记录及规模种植户生产调研台账。为保证可比性,灌溉量统一按生育期累计补水量计算;产量以折合每667m<sup>2</sup>干籽粒产量计;经济指标采用“统一计价口径+区间成本”的方式进行相对比较。

### 1.5 统计分析

以年度均值作为重复(2018–2025年,n=8)进行描述统计,结果以平均值±标准差(最小值—

最大值)表示。模式间差异采用单因素方差分析(ANOVA)检验;当满足方差齐性与正态性假定时采用LSD法进行多重比较,否则采用Kruskal-Wallis 检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量、灌溉量与水分利用效率

如表1所示,3种模式均可实现藜麦成熟,但产量水平、灌溉投入与灌溉水分利用效率存在显著差

异。膜下滴灌模式每667m<sup>2</sup>平均产量为143kg,显著高于传统喷灌模式(120kg)与有机旱作雨养模式(92kg)。膜下滴灌模式每667m<sup>2</sup>的平均灌溉量为90m<sup>3</sup>,较传统喷灌模式(230m<sup>3</sup>)明显降低,其WUE为1.59kg/m<sup>3</sup>,显著高于传统喷灌模式(0.52kg/m<sup>3</sup>)。

### 2.2 年度数据与极端年景表现

将2018-2025年逐年灌溉量与产量进行汇总,结果见表2、图1。有机旱作雨养模式依靠自然降水,在低降水量年份(如2020年)产量明显下行,而传

表1 2018-2025年不同藜麦种植模式的平均产量与水分利用效率比较

指标	传统喷灌模式	有机旱作雨养模式	膜下滴灌模式
生育期灌溉量(m <sup>3</sup> /667m <sup>2</sup> )	230 ± 13.09 (210~250) a	0c	90 ± 6.55 (80~100) b
平均产量(kg/667m <sup>2</sup> )	120 ± 5.81 (112~130) b	92 ± 10.69 (76~110) c	143 ± 4.63 (137~150) a
WUE(kg/m <sup>3</sup> )	0.52 ± 0.05 (0.48~0.62) b	-	1.59 ± 0.10 (1.44~1.73) a
年际产量变异系数(%)	4.8	11.6	3.2
概括适用类型	设施完备区的过渡模式	生态敏感单元/品牌农业	规模化主体/订单收购区

数据以年度平均值为重复(n=8);同一行不同小写字母表示在0.05水平上存在显著差异

表2 2018-2025年不同模式逐年灌溉量与产量汇总

年份	传统喷灌模式		有机旱作雨养模式		膜下滴灌模式	
	喷灌量(m <sup>3</sup> /667m <sup>2</sup> )	产量(kg/667m <sup>2</sup> )	灌溉量(m <sup>3</sup> /667m <sup>2</sup> )	产量(kg/667m <sup>2</sup> )	滴灌量(m <sup>3</sup> /667m <sup>2</sup> )	产量(kg/667m <sup>2</sup> )
2018	240	118	0	88	85	140
2019	220	125	0	95	90	145
2020	240	115	0	76	95	150
2021	210	130	0	110	80	138
2022	230	112	0	85	100	148
2023	220	123	0	96	90	142
2024	230	117	0	101	85	144
2025	250	120	0	85	95	137

表中数据为示范与调研台账汇总后的年度平均值,用于模式间比较与波动分析

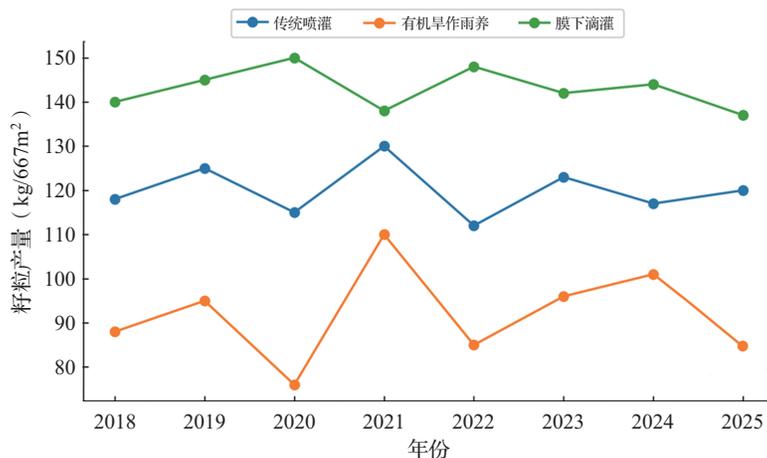


图1 2018-2025年不同种植模式下藜麦产量年际变化

统喷灌模式和膜下滴灌模式在灌溉配额约束下仍保持相对稳定的产量水平。

### 2.3 经济效益与成本构成

在示范期内,藜麦收购价受订单类型、品质等级与市场波动影响。为增强经济评价的可复核性,采用“价格情景(9~12元/kg)+成本区间”方法估算纯收益(表3),并进一步拆分关键投入项(表4)。从价格情景测算结果看,膜下滴灌模式在低价情景(9元/kg)下每667m<sup>2</sup>纯收益为637~767元,仍高于传统喷灌模式的520~630元;在高价情景(12元/kg)下,膜下滴灌模式纯收益可达1066~1196元,收益上限与稳定性均明显优于另外2种模式。有机旱作雨养模式虽实现零灌溉,但受年际产量波动与认证/人工投入影响,纯收益区间仅为208~624元/667m<sup>2</sup>,低价情景下收益偏弱,其经济可行性更依赖组织化经营带来的品质分级、品牌溢价与成本控制。成本构成表明,膜下滴灌模式的增量成本主要来自地膜与滴灌带及配件投入(合计约230元/667m<sup>2</sup>),但通过精准供水与同步施肥降低无效耗水与养分损失,同时在示范期获得更高平均产

量(143kg/667m<sup>2</sup>),可实现“以投入换效率、以效率换收益”的路径;传统喷灌模式的水电/水费支出更高(典型值约90元/667m<sup>2</sup>),在配额约束趋严背景下成本上行风险更突出。综合来看,膜下滴灌模式更适合作为坝上地区效率驱动型转型路径的核心技术包;有机旱作雨养模式更适用于水源极度受限或生态敏感单元,并需要与认证体系、订单收购和社会化服务同步配置以对冲波动风险。

### 2.4 推广边界条件与风险控制要点

为提高技术推广的可操作性,结合示范经验从水源条件、地形土壤、经营主体能力与生态风险控制等方面提出边界条件(表5)。其中,膜下滴灌模式需同步建立残膜回收与再利用机制,避免残膜累积带来的土壤环境风险。边界条件为示范期经验归纳,建议在分区推广中与用水配额、社会化服务及订单市场同步匹配。

## 3 讨论

膜下滴灌模式的高灌溉水分利用效率体现了“工程节水—农艺增效—养分管理”的协同作用。

表3 不同模式经济效益情景估算

模式	平均产量(kg/667m <sup>2</sup> )	产值(元/667m <sup>2</sup> )	生产成本(元/667m <sup>2</sup> )	纯收益(元/667m <sup>2</sup> )
传统喷灌模式	120	1080~1440	450~560	520~990
有机旱作雨养模式	92	828~1104	480~620	208~624
膜下滴灌模式	143	1287~1716	520~650	637~1196

以2018~2025年平均产量计,产值按收购价9~12元/kg计算;生产成本为示范期典型区间,含地膜与滴灌带当季投入,固定设施按折旧计入,成本区间受补贴与服务外包方式影响较大

表4 不同模式关键投入项构成

(元/667m<sup>2</sup>)

成本项目	传统喷灌模式	有机旱作雨养模式	膜下滴灌模式
种子	40	40	40
肥料/有机投入	150	200	140
灌溉水电/水费	90	0	40
地膜	0	0	110
滴灌带及配件(折旧+耗材)	0	0	120
植保(药剂/生物防控)	50	70	45
机械作业(整地、播种、机收等)	80	70	80
人工(含维护、除草等)	120	150	120
认证/品牌与检测	0	50	0
合计(典型值)	550	600	715

实际成本随规模、机械化水平、服务外包与补贴情况变化,此处均只计算典型值

表5 不同模式适用边界条件与风险控制要点

维度	传统喷灌模式	有机旱作雨养模式	膜下滴灌模式
水源条件	水源相对稳定,允许较高灌溉配额	以降水为主,水源极度受限区优先	水源稳定且可精准配水,配额约束明显区优先
地形土壤	平地或缓坡,土壤质地不限	坡度较大或生态敏感单元,需保墒培肥	地势平坦、便于铺膜与管网布设,风沙土需加强固土
经营主体与组织	单户可实施,但水电成本较高	需要较强管理与品牌/认证组织能力	适合合作社/订单企业组织,服务外包可降低运维成本
核心增效环节	关键期补灌与合理追肥	垄沟集雨+有机培肥+轮作休耕	测墒补灌+水肥一体化+密植早熟+机械化配套
主要风险与控制	水耗高、成本上升,需防止无序扩种	产量波动,认证成本与市场不确定	残膜污染与设施维护,需建立回收与运维体系

覆膜可抑制土壤无效蒸发并改善根际微环境,滴灌实现定点补水与同步施肥,密植提高群体截光与单位面积穗数,从而在较低灌溉配额下维持稳产。相关研究亦指出,亏缺灌溉与滴灌可显著提高藜麦水分生产力,但效果受土壤类型与灌溉制度影响,应在区域适配的基础上优化灌溉时序<sup>[7-10]</sup>。

生态脆弱区农业转型不宜仅以单项工程节水为目标,应形成与生态约束相匹配的组合范式。在具备水源与组织化条件的地块,效率驱动型技术包可提升单位水产出并增强收益稳定性;在生态敏感单元或水源极度受限区,雨养有机与轮作休耕等路径可通过降低外部投入与提升地力来增强系统韧性。两类路径的边界条件与配套政策不同,需与用水配额管理、订单市场与社会化服务协同设计。

覆膜节水增产效应明确,但残膜累积可能带来土壤结构破坏与微塑料风险。治理上建议以“回收率—残留量—再生利用率”构建量化指标体系:示范区宜将回收率目标设定为 $\geq 85\%$ ,并参照残膜残留量限值( $75\text{kg}/\text{hm}^2$ )开展监测与评价。通过合作社或订单企业组织“统一铺设—统一回收—统一机收”,将回收、运输与再生利用嵌入社会化服务体系,可显著降低单户治理成本。

本文基于多年示范与调研台账开展模式比较,经济效益采用情景估算,仍需进一步引入全生命周期成本核算与风险收益分析,并量化补贴、服务外包与品牌溢价对收益的贡献。此外,3种模式对土壤有机碳、盐分迁移、农田生物多样性等长期生态效应尚需长期定位观测支撑,并应开展可降解地膜、智慧测墒与精准施肥等技术在坝上场景下的组合优化研究。

综上所述,坝上地区节水增效的主推路径应以膜下滴灌为核心,通过关键生育期精准供水与养分协同提高单位水产出。在生态敏感或极度缺水单元,

可配置雨养有机、轮作休耕等韧性型措施以降低用水压力。生态脆弱区农业转型宜采用“节水工程+农艺增效+生态治理+社会化服务”的组合路径,将膜下滴灌与残膜回收、轮作休耕等措施协同配置,以实现节水稳产与生态风险可控。

## 参考文献

- [1] 陈杰,许朗,吴东立.华北平原节水技术、灌溉用水量反弹效应与地区异质性——基于 Malmquist 和 LMDI 指数分析.自然资源学报,2022,37(8):2181-2194
- [2] 长城网.《河北省地下水超采综合治理五年实施计划(2018—2022年)》出台.(2018-06-20)[2025-12-15].[https://www.xiongan.gov.cn/2018-06/20/c\\_129897749.htm](https://www.xiongan.gov.cn/2018-06/20/c_129897749.htm)
- [3] 河北日报.河北省印发《关于加快发展节水农业的实施方案》.(2021-09-08)[2025-12-15].[https://www.xiongan.gov.cn/2021-09/08/c\\_1211361339.htm](https://www.xiongan.gov.cn/2021-09/08/c_1211361339.htm)
- [4] 宫永超,魏玉明,谢坤,杨永义,丛磊,辛富刚,李娜娜,蒲艳艳,田汝美.山东4个地市藜麦种植试验初探.中国种业,2025(1):77-82
- [5] 农业农村部新闻办公室.2019年藜麦生产技术指导意见.(2019-03-28)[2025-12-15].[http://www.moa.gov.cn/ztl/2019cg/jzsd\\_25134/201903/t20190328\\_6177384.htm](http://www.moa.gov.cn/ztl/2019cg/jzsd_25134/201903/t20190328_6177384.htm)
- [6] 王晨静,赵习武,陆国权,毛前.藜麦特性及开发利用研究进展.浙江农林大学学报,2014,31(2):296-301
- [7] Jacobsen S E, Mujica A, Jensen C R. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. Food Reviews International, 2003, 19(1-2):99-109
- [8] 刘小月,任永峰,赵志媛,张娜,苗新岳,张舒,韩云飞,张鹏,赵沛义.滴灌对内蒙古阴山北麓藜麦水分利用及产量的影响.北方农业学报,2023,51(4):56-63
- [9] Talebnejad R, Sepaskhah A R. Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa. Agricultural Water Management, 2015, 159:225-238
- [10] Garcia M, Raes D, Jacobsen S E. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. Agricultural Water Management, 2003, 60(2):119-134

(收稿日期:2025-12-15)