

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0409

不同栽培模式对小麦复种娃娃菜体系产量及土壤质量的影响

赵娟¹, 马栋¹, 汤莹², 崔云玲², 李金荷¹, 陈苍¹, 杨惠玲¹

(1. 酒泉市农业科学研究院 甘肃酒泉 735000; 2. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所 兰州 730000)

摘要:为优化河西走廊地区麦后复种栽培模式,系统比较了不同栽培模式对春小麦-娃娃菜复种体系产量、经济效益及土壤理化特性的影响,以筛选适宜该区域的高效种植模式。试验采用随机区组设计,以春小麦酒春7号和娃娃菜京春娃3号为试验材料,设置4种栽培模式:小麦浅埋滴灌+麦后增密直播滴灌娃娃菜(SDD)、小麦浅埋滴灌+麦后直播滴灌娃娃菜(SD)、小麦浅埋滴灌+麦后翻耕覆膜直播滴灌娃娃菜(SM),以及传统漫灌(小麦常规栽培+麦后翻耕覆膜直播漫灌娃娃菜,FF),测定土壤理化性状、作物产量及经济效益等指标,并采用TOPSIS法进行综合评价。结果表明,与FF模式相比,滴灌模式(SDD、SD、SM)整体改善了土壤结构与养分状况。其中,SDD和SD模式显著降低土壤容重,SDD模式下0~20 cm耕层土壤容重较FF降低6.13%,>0.25 mm大团聚体比例提高2.65%。在养分方面,SDD模式显著提升了土壤有机质、碱解氮及有效磷含量。与FF相比,SDD模式下小麦产量提高4.29%,娃娃菜净菜产量提高22.36%,体系产投比提升15.33%。经济收益纯收入排序为:SDD>SM>SD>FF。TOPSIS综合评价结果显示,SDD模式综合表现最优。综上所述,在河西走廊麦后复种体系中,采用浅埋滴灌小麦麦茬增密直播娃娃菜的栽培模式,能够有效改善土壤质量、提高系统产量与经济效益,是该区域值得推广的高效复种栽培方式。

关键词:娃娃菜;浅埋滴灌;麦后复种;经济效益;土壤质量

中图分类号:S634.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-171-07

Effects of different cultivation patterns on yield and soil quality in wheat replanting system of baby cabbage

ZHAO Juan¹, MA Dong¹, TANG Ying², CUI Yunling², LI Jinhe¹, CHEN Cang¹, YANG Huiling¹

(1. Jiuquan Institute of Agricultural Sciences Research, Jiuquan 735000, Gansu, China; 2. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To optimize the post-wheat multiple cropping cultivation pattern in the Hexi Corridor region, this study systematically compared the effects of different cultivation patterns on the yield, economic benefits, and soil physicochemical properties of the spring wheat - baby cabbage multiple cropping system, aiming to identify an efficient cultivation pattern suitable for the region. A randomized block design with three replicates was adopted using spring wheat Jiuchun 7 and baby cabbage Jingchunwa 3. Four cultivation patterns were established: shallow-buried drip irrigation with wheat stubble and increased density direct seeding of baby cabbage (SDD); shallow-buried drip irrigation with wheat stubble and normal density direct seeding of baby cabbage (SD); shallow-buried drip irrigation with post-wheat plowing, film mulching, and direct seeding of baby cabbage (SM); and traditional flood irrigation (conventional wheat cultivation with post-wheat plowing, film mulching, and flood irrigation for baby cabbage, FF). Soil physicochemical properties, crop yield, and economic benefits were measured, and a comprehensive evaluation was conducted using the TOPSIS method. Compared with FF, the drip irrigation patterns (SDD, SD, SM) generally improved soil structure and nutrient status. SDD and SD significantly reduced soil bulk density. In the 0-20 cm soil layer, SDD decreased bulk density by 6.13% and increased the proportion of macroaggregates (>0.25 mm) by 2.65% relative to FF. SDD also significantly increased soil organic matter, available nitrogen, and available phosphorus contents. Compared with FF, SDD increased wheat yield by 4.29% and baby cabbage net yield by 22.36%, and the system's output - input ratio increased by 15.33%. The net economic benefit followed the order: SDD>SM>SD>FF. The TOPSIS comprehensive evaluation ranked SDD as the best performing mode. In the post-wheat multiple cropping system of the Hexi Corridor, the shallow-buried drip irrigation pattern

收稿日期:2025-06-06;修回日期:2026-02-12

基金项目:“十四五”国家重点研发计划(2022YFD1900200)

作者简介:赵娟,女,助理研究员,研究方向为作物育种及栽培技术。E-mail:chirinese@126.com

通信作者:马栋,男,副研究员,研究方向为作物育种及栽培技术。E-mail:623747480@qq.com

with direct seeding of baby cabbage at increased density after wheat harvest can effectively improve soil quality, enhance system yield, and increase economic benefits, representing an efficient multiple cropping cultivation method worthy of promotion in this region.

Key words: Baby cabbage; Shallow-buried drip irrigation; Post-wheat cropping; Economic benefit; Soil quality

河西走廊西部绿洲灌区作为我国西北地区核心农业生产带,依托得天独厚的光热资源和相对完善的灌溉条件,形成了以春小麦、玉米、经济作物为主导的集约化农业生产体系,素有“西北粮仓”的美誉^[1-2]。该地区属于典型的一年一熟有余、两熟不足农业生态区,春小麦7月中下旬收获后至初霜期(10月中旬)仍存在 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、降水占比60%的“秋闲期”,为麦后复种提供了充足的光热资源保障。

在实现全球粮食安全与推动资源高效利用的双重目标下,间套复种技术凭借“时空资源互补性”,既成为破解耕地约束的关键路径,又在我国粮食增产增收中发挥了重要作用^[3]。研究表明,间套复种可优化作物空间配置,提高复种指数、光能利用率和水分利用效率,兼具了作物一年多熟、增产增收和农业可持续发展、生态保育双重效益^[4-9]。尤其在河西走廊等生态脆弱区,麦后复种模式可有效开发秋闲期资源,充分发挥区域优势,提高土地和劳动力资源利用率,减少农田裸露导致的土壤风蚀、提高氮磷钾养分循环效率,对缓解人地矛盾、提高经济和社会效益以及保障生态安全等均具有重要意义^[10-11]。

在众多蔬菜品种中,娃娃菜凭借生育期短、耐寒性强、营养价值高、经济效益显著及易于贮存运输等优点^[12-13],已成为河西灌区高原夏菜产业的核心品类,在当地农业生产中占据重要地位^[14-18]。然而,麦后复种娃娃菜的可持续性受限于土壤耕作技术的适配性,通过机械手段对土壤耕层结构进行优化调整,进而有效协调土壤中的水、肥、气、热关系,有助于作物根系的生长发育和养分吸收^[19]。Wang

等^[20]研究认为,深翻可有效提高0~200 cm土壤蓄水量,同时有效降低土壤容重,更利于植株根系生长,提高作物水肥吸收效率,提高植株抗旱、抗倒伏性^[21-25]。也有研究认为,免耕能有效减少农田土壤扰动、降低风蚀风险,在降低投入的同时保持高产^[26]。现有研究多聚焦不同耕作技术对主粮作物的短期效应^[27-28],缺乏针对麦-菜复种系统的全生命周期评价,更鲜见基于土壤质量-作物产量-资源效率的多目标协同优化研究。

本研究以河西走廊西部小麦复种娃娃菜体系为研究对象,探讨不同栽培模式下小麦、娃娃菜的生长状况、产量表现以及土壤理化性质的差异。旨在构建一种高效、节水、生态友好的一年两熟种植模式,为本区域农业的绿色增效提供理论依据和技术支持,同时也为我国类似生态区的农业可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料及来源

春小麦品种选用酒春7号(酒泉市农业科学研究院选育),复种娃娃菜品种为京春娃3号(北京市农林科学院蔬菜研究中心选育)。供试春小麦、娃娃菜品种特性见表1。

1.2 试验区域概况

试验于2024年3—10月在酒泉市肃州区上坝镇进行,该地日照时间为3000~3300 h,无霜期130~150 d,降雨量小,蒸发量大,积温高,温差大。试验用地播种前采集0~20 cm耕层基础土样测定土壤理化性质。

表1 供试春小麦、娃娃菜品种特性

Table 1 Characteristics of spring wheat and baby cabbage for examination

作物 Crop	品种 Variety	熟期 Ripening period	株型 Plant type	株高 Plant height/cm	全生育期 Whole growth period/d
春小麦 Spring wheat	酒春7号 Jiuchun 7	中熟 Mid-maturing	紧凑 Compact	90.0	102
娃娃菜 Baby cabbage	京春娃3号 Jingchunwa 3	早熟 Early-maturing	叠抱 Clustered	21.9	55

1.3 试验设计及因素

试验采用随机区组设计,3次重复。小麦及麦后复种娃娃菜共设置4种不同栽培模式,分别为处理1:小麦浅埋滴灌+麦后增密直播滴灌娃娃菜(SDD);处理2:小麦浅埋滴灌+麦后直播滴灌娃娃

菜(SD);处理3:小麦浅埋滴灌+麦后翻耕覆膜直播滴灌娃娃菜(SM);处理4:小麦传统栽培模式+麦后翻耕覆膜直播漫灌娃娃菜(FF)。

各处理施肥水平一致,小麦种植密度一致,SD、SM和FF娃娃菜每小区种植1782株,SDD娃娃菜

每小区种植 2228 株。

小区面积 16 m×8.25 m=132 m²。

1.4 测定指标及测定方法

1.4.1 产量及经济效益 分别在小麦和娃娃菜收获期进行全区收获记产,娃娃菜测产时,将采收的娃娃菜未抱紧的外叶全部剥除,保留具有商品价值的净菜测产,并根据当地实际市场价格计算经济效益。

1.4.2 土壤指标 小麦播种前、娃娃菜收获后采集 0~20 cm 土壤样品,采用 pH S-3C 型酸度计测定土壤 pH^[29],采用电导法测定全盐含量,采用重铬酸钾容量法测定有机质含量,采用碱解扩散法测定速效氮含量,采用钼锑抗比色法测定有效磷含量,采用 NH₄OAC 浸提-火焰光度法测定速效钾含量^[30],采用环刀法测定土壤容重^[31]。采用 Elliott^[32]土壤团聚体湿筛法测定土壤团聚体占比。

1.4.3 综合效益评价 采用 TOPSIS 法^[33-34](优劣解距离法)对各处理下复种体系的产量、经济效益和土壤质量进行评价。采用熵权法分析各个指标的权重,再将不同指标的权重代入到 TOPSIS 中,从而获得各处理综合排名。

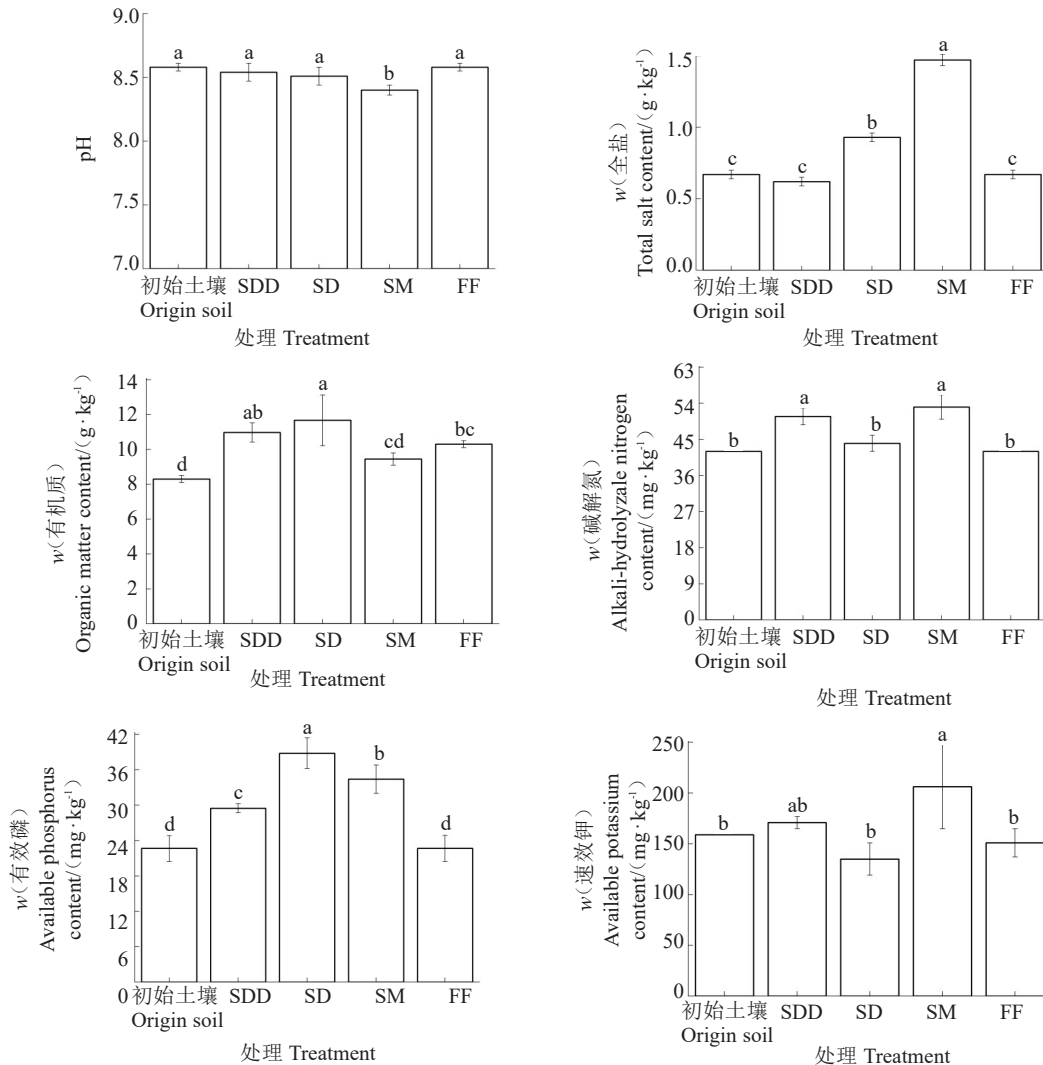
1.5 数据统计分析

采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 进行数据整理和统计分析,采用 SPSSPRO 进行 TOPSIS 分析,采用 OriginPro 2024 作图。

2 结果与分析

2.1 不同栽培模式对土壤养分含量的影响

由图 1 可知,不同耕作模式对土壤理化性质产生显著影响。与播前土壤相比,各处理土壤 pH 均有所降低,其中 SM 土壤 pH 显著降低 0.18。SDD



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1 不同栽培模式对土壤养分含量的影响

Fig. 1 Effects of different cultivation patterns on soil nutrient content

和 FF 土壤全盐含量与播前无差异,SD 和 SM 土壤全盐含量较播前显著上升。各处理有机质含量均有所提高,分别提高了 32.13%、40.56%、13.86%和 24.10%。碱解氮和有效磷含量除 FF 与播前一致外,其他处理均高于播前,分别较播前提升 4.8%~26.4%和 30.0%~71.2%。速效钾含量各处理间差异较大且较播前有增加也有降低,变化范围在-15.1%~29.7%。与传统复种模式(FF)相比,麦茬直播模式(SDD、SD)的有机质、碱解氮和有效磷含量分别提升了 6.48%和 13.27%、20.79%和 4.76%、30.00%和 71.18%,此外 SDD 模式的速效钾含量亦高于 FF 模式 13.22%。值得注意的是,与翻耕覆膜播种娃娃菜(SM)相比,麦茬直播娃娃菜模式(SDD 和 SD)的有机质含量显著提高,说明留茬直播模式较翻耕覆膜直播模式更有利于土壤有机质的持续积累与系统稳定。

2.2 不同栽培模式对土壤物理性状的影响

不同栽培模式对土壤容重的影响差异显著(图 2),SDD 和 SD 土壤容重显著低于 FF,分别为 1.53 和 1.51 g·cm⁻³。SM 与 FF 土壤容重无显著差异。

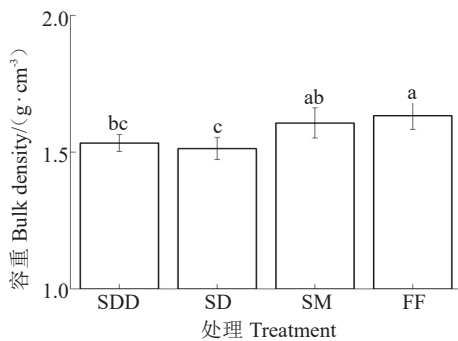


图 2 不同栽培模式对土壤容重的影响
Fig. 2 Effects of different cultivation patterns on soil bulk density

土壤团聚体结构是维持土壤肥力的物质基础,其粒径分布特征及稳定性是评估土壤抗蚀性能的核心指标。通过湿筛法测定的水稳性团聚体组成显示(图 3),土壤水稳性团聚体粒径<0.25 mm 微团聚体为优势粒级,占比在 87.11%~89.94%;0.25~0.5 mm 中团聚体占比在 5.33%~6.15%;>0.5 mm 粒径大团聚体占比最低,为 5.13%~6.90%。不同栽培模式对大团聚体形成具有差异化影响,SM 模式下>0.25 mm 大粒径团聚体占比最高,为 13.02%,其次为 SDD 模式,占比为 11.62%,FF 模式第三,占比为 11.32%。

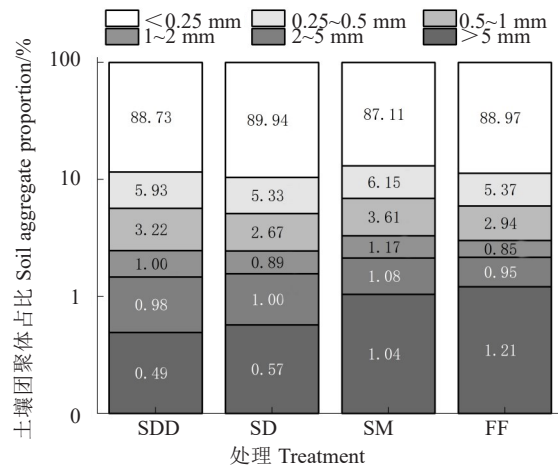


图 3 不同栽培模式对土壤团聚体的影响

Fig. 3 Effects of different cultivation patterns on soil aggregate

2.3 不同栽培模式对复种体系产量的影响

由图 4 可知,浅埋滴灌模式下小麦较传统漫灌栽培小麦每 667 m²增产 24.22 kg,增幅 4.29%,增产效果显著。不同栽培模式对娃娃菜鲜菜产量和净菜产量构成显著影响,鲜菜产量和净菜产量呈相同变化趋势,由高到低依次为 SDD>SM>SD>FF。与 FF 相比,SDD 模式显著提高了娃娃菜鲜菜产量 25.19%和净菜产量 22.36%;SM 模式显著提高了娃娃菜鲜菜产量 22.74%和净菜产量 21.78%;SD 模式下娃娃菜鲜菜产量和净菜产量增幅分别为 9.82%和 8.51%,二者之间无显著差异。

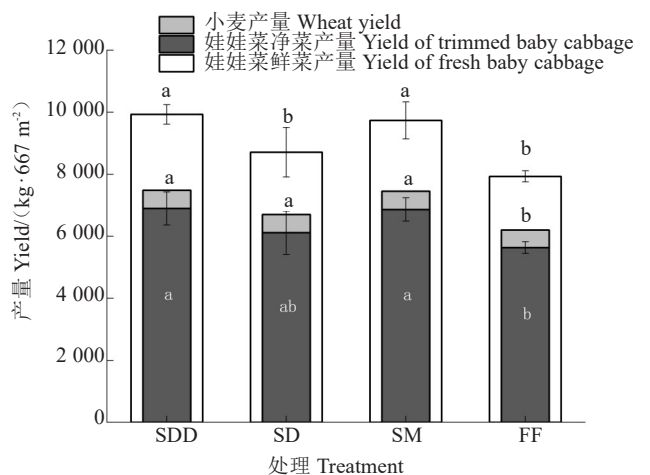


图 4 不同栽培模式对复种体系产量的影响

Fig. 4 Effects of different cultivation patterns on yield of multiple cropping systems

2.4 不同栽培模式对复种体系经济效益的影响

根据图 5 与表 2 数据分析,结合 2024 年甘肃

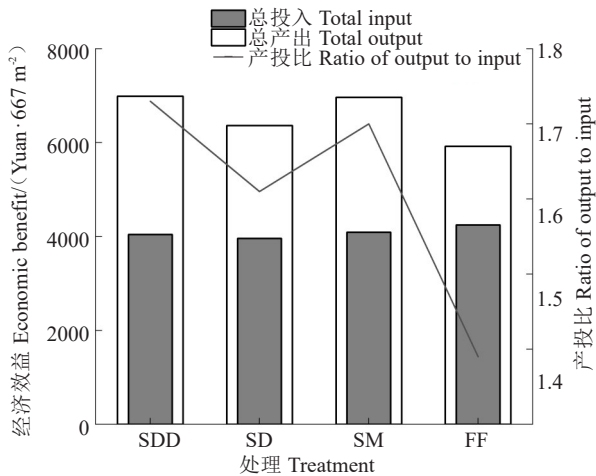


图5 不同栽培模式对复种体系经济效益的影响

Fig. 5 Effects of different cultivation patterns on economic effectiveness of multiple cropping systems

省酒泉市农产品市场行情(小麦单价 2.5 元·kg⁻¹、娃

娃菜单价 0.8 元·kg⁻¹)进行计算,得出不同栽培模式下麦后复种体系的经济效益,各模式总成本投入介于 3 961.9~4 246.5 元·667 m²,总经济产出范围为 6 354.52~6 989.50 元·667 m²。SDD、SD、SM 和 FF 模式下复种体系经济效益纯收入分别为 2 945.80、2 403.14、2 871.22 元和 2 108.07 元·667 m²。产投比由高到低依次为 SDD>SM>SD>FF,表明 SDD 模式在资源利用效率与经济效益方面表现最优。

2.5 不同栽培模式下复种体系综合评价

基于 TOPSIS 法(优劣解距离法)对不同栽培模式下土壤养分、物理性质、复种体系产量和经济效益进行综合评价。由表 3 可知,各处理综合得分指数介于 0.219~0.703,评价排序从优到劣为 SDD>SM>SD>FF。可见小麦浅埋滴灌+麦茬增密

表2 不同栽培模式对复种体系经济效益的影响

Table 2 Effect of different cultivation patterns on economic effectiveness of multiple cropping systems

处理 Treatment	总投入 Total input/(Yuan·667 m ²)									产出 Output/(Yuan·667 m ²)	纯收入 Net income/(Yuan·667 m ²)	产投比 Output-input ratio
	种子 Seed	人工 Labor	农机 Machinery	水费 Water fee	肥料 Fertilizer	农药 Pesticide	滴灌带 Drip tape	地膜 Plastic mulch	合计 Total			
SDD	312	1 847.25	270	234	637.25	410	333.2	0.0	4 043.7	6 989.50	2 945.80	1.73
SD	279	1 829.25	270	234	637.25	410	302.4	0.0	3 961.9	6 365.04	2 403.14	1.61
SM	279	1 829.25	340	234	637.25	410	302.4	60.2	4 092.1	6 963.32	2 871.22	1.70
FF	279	2 156.25	340	350	651.00	410	0.0	60.2	4 246.5	6 354.52	2 108.07	1.50

表3 TOPSIS 评价结果和排序

Table 3 Evaluation results and rank by TOPSIS

处理 Treatment	正理想解距离 Positive ideal solution distance (D ⁺)	负理想解距离 Negative ideal solution distance (D ⁻)	综合得分指数 Composite score index	排序 Rank
SDD	0.344 269 86	0.814 910 26	0.703 005 72	1
SD	0.534 026 64	0.677 556 99	0.559 232 54	3
SM	0.447 393 90	0.823 160 98	0.647 875 18	2
FF	0.928 637 51	0.260 125 88	0.218 820 57	4

直播娃娃菜是最优的复种栽培模式。

3 讨论与结论

土壤中的有机质、氮素、磷素和钾素是为植物供能的主要养分来源,在作物光合产物合成、养分代谢循环、土壤质量调控及农产品品质产量形成中均具有重要意义^[35-39]。在本研究中,不同的栽培模式对耕层土壤养分含量有显著影响。除 SD 模式下的速效钾含量低于 FF 外,其他情况下滴灌栽培模式(SDD、SD、SM)对土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量均有提高效果。土壤容重和土壤团聚体结构作

为衡量土壤质量的关键物理指标,与土壤养分稳定、土壤透气保水性等密切相关^[40-42]。在本研究中,麦茬直播模式(SDD、SD)下土壤容重显著低于传统漫灌模式(FF),翻耕覆膜模式(SM)下>0.25 mm 大粒径团聚体占比最高,说明翻耕后土壤聚合性更好,更易形成大团聚体;其次为麦茬增密直播模式(SDD),说明增加娃娃菜密度后,根系分泌物和微生物活性增强,利于微团聚体向大团聚体的转化。

在本研究中,浅埋滴灌小麦较传统漫灌栽培小麦产量增幅 4.29%,浅埋滴灌娃娃菜较传统漫灌栽培娃娃菜鲜菜和净菜产量均有所增加,其中 SDD、

SM模式下娃娃菜产量显著增加。说明滴灌较漫灌更有利于小麦麦后复种娃娃菜体系产量的提升。在本研究中,不同栽培模式复种体系经济效益纯收入由高到低依次为SDD>SM>SD>FF。与翻耕覆膜模式(SM)相比,麦茬直播模式(SDD、SD)减少了整地翻耕覆膜和残膜回收等环节,极大地缩减了时间、人力和农机投入,是一种绿色、高效、低成本的环境友好型多样化种植模式。基于TOPSIS法(优劣解距离法)的综合评价,SDD模式在土壤养分、物理性质、复种体系产量和经济效益等指标中综合表现最佳。

综上所述,SDD模式(小麦浅埋滴灌麦茬增密直播滴灌娃娃菜栽培模式)可有效减少作业环节,提高复种体系产量和经济效益,且在此基础上保持或提升耕层土壤养分,维持土壤结构稳定,为河西走廊西部绿洲灌区麦后复种娃娃菜绿色高效生产提供了技术支持,具有重要的推广应用价值。

参考文献

- [1] 卢秉林,车宗贤,包兴国,等.河西绿洲灌区玉米产量对长期秸秆带状覆膜还田方式的响应[J].植物营养与肥料学报,2023,29(6):1037-1047.
- [2] 蒋紫薇.间作与氮磷配施对河西灌区青贮玉米产量、品质及氮磷利用的影响[D].兰州:兰州大学,2023.
- [3] 王巧玲,赵晓红,刘根红,等.施氮量对麦后复种不同蔬菜模式土壤养分及产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2024,59(2):107-116.
- [4] 杨友琼,吴伯志.作物间套作种植方式间作效应研究[J].中国农学通报,2007,123(11):192-196.
- [5] 刘露露,刘根红,买晓凤,等.宁夏引黄灌区春小麦复种牧草模式综合效益评价[J].干旱地区农业研究,2022,40(1):50-60.
- [6] 常丹丹,王旭,田新会,等.甘肃中部地区秋播小黑麦套作式复种甜高粱的效应及品质研究[J].草业学报,2021,30(11):212-220.
- [7] 刘翠,杜文华,田新会.甘肃陇中地区中熟早熟青贮玉米品种生产性能研究[J].草原与草坪,2024,44(3):195-202.
- [8] 李纯,傅廷栋,杨小牛.春播油菜绿肥试验简报[J].湖北农业科学,1987(1):10-11.
- [9] 李爱兵,贺建华,宋家全,等.高原夏菜娃娃菜主要复种模式及栽培技术[J].甘肃科技纵横,2017,46(7):32-34.
- [10] 张洋.河西走廊生态环境脆弱性评价及驱动力分析[D].兰州:兰州交通大学,2022.
- [11] 唐国永.麦后复种油菜的品种选择及栽培试验[J].湖北农业科学,2013,52(14):3249-3252.
- [12] 许爱霞,牟龙,田强,等.不同农药在娃娃菜中的安全间隔期研究[J].中国果菜,2019,39(8):40-42.
- [13] 夏成明,史嘉莉,马栋,等.化肥减量配施有机肥和微生物菌剂对麦后复种娃娃菜产量与品质的影响[J].中国瓜菜,2024,37(10):132-140.
- [14] 张凯,张玉鑫,陈年来,等.甘肃省高原夏菜种植气候区划[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(5):179-185.
- [15] 李文德,张文斌,张荣,等.张掖市高原夏菜产业现状与发展建议[J].甘肃农业科技,2014(7):47-49.
- [16] 孙艳霞,聂战声,王道霞,等.3个娃娃菜品种在天祝县高海拔冷凉灌区对比试验初报[J].甘肃农业科技,2014(3):26-27.
- [17] 张思成.兰州市红古区娃娃菜一年三熟高效栽培技术[J].甘肃农业科技,2007(8):70-71.
- [18] 王学军.临洮县高寒旱区早熟甘蓝复种娃娃菜栽培技术[J].甘肃农业科技,2010(1):53-54.
- [19] 李霞,任佰朝,范霞,等.冬小麦-夏玉米生产体系中播前耕作对夏玉米产量形成的影响[J].中国农业科学,2015,48(6):1074-1083.
- [20] WANG Y X, CHEN S P, ZHANG D X, et al. Effects of subsoiling depth, period interval and combined tillage practice on soil properties and yield in the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(6):1596-1608.
- [21] 闫秋艳,董飞,贾亚琴,等.耕作方式对旱地麦田土壤蓄水变化特征及小麦产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):222-228.
- [22] ZHAI L C, WANG Z B, SONG S J, et al. Tillage practices affects the grain filling of inferior kernel of summer maize by regulating soil water content and photosynthetic capacity[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245:106600.
- [23] 李冬梅,郭华,朱海燕,等.耕作方式对玉米生长发育、根分布及产量形成的影响[J].玉米科学,2014,22(5):115-119.
- [24] 刘卫玲,程思贤,周金龙,等.深松(耕)时机与方式对土壤物理性状和玉米产量的影响[J].河南农业科学,2018,47(3):7-13.
- [25] 王秀珍,邱立春.中耕深松对土壤蓄水及玉米根系生长的影响[J].沈阳农业大学学报,2011,42(5):630-633.
- [26] 韩上,武际,李敏,等.深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J].植物营养与肥料学报,2020,26(2):276-284.
- [27] 赵若含.耕作与施氮对麦玉两熟制农田土壤特性和产量的影响机制[D].河南新乡:河南科技学院,2021.
- [28] 周正萍,田宝庚,陈婉华,等.不同耕作方式与秸秆还田对土壤养分及小麦产量和品质的影响[J].作物杂志,2021(3):78-83.
- [29] 王馨.铁氧化物改性生物炭对滨海湿地土壤Pb-Cd复合污染修复及固碳机制的研究[D].山东青岛:青岛大学,2023.
- [30] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012.
- [31] 刘洋.多年不同耕作措施及秸秆还田对土壤理化特性的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- [32] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3):627-633.
- [33] 张书铨,罗东坤,王叶,等.一种新的多属性决策方法:广义综合评价模型[J].统计与决策,2021,37(24):37-41.
- [34] 苏开,梁琼,刘俊,等.基于熵权-TOPSIS模型的水培生菜适宜种植密度优化[J].新疆石河子:石河子大学学报(自然科学版),2024,42(3):281-287.
- [35] 魏强,吴国宏,闫沛斌.甘肃兴隆山耕地向华北落叶松林演变

- 过程中土壤物理性质的变化特征[J].中南林业科技大学学报,2025,45(4):1-13.
- [36] 周永杰,谢军红,李玲玲,等.长期少免耕与氮肥减量对全膜双垄沟播玉米产量及碳排放的调控作用[J].中国农业科学,2021,54(23):5054-5067.
- [37] SÄNGER A, REIBE K, MUMME J, et al. Biochar application to sandy soil: Effects of different biochars and N fertilization on crop yields in a 3-year field experiment[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2016, 63(2): 213-229.
- [38] 张亚洁,华晶晶,李亚超,等.种植方式和磷素水平互动对陆稻和水稻产量及磷素利用的影响[J].作物学报,2011,37(8):1423-1431.
- [39] 李雨阳,赵喜辉,郝威名,等.施磷量对不同磷敏感型水稻产量、品质及根系生长的影响[J].中国土壤与肥料,2023(12):219-226.
- [40] 张恒硕,查同刚,张晓霞.晋西黄土区退耕年限对土壤物理性质的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(6):123-133.
- [41] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质[J].应用生态学报,2010,21(10):2479-2486.
- [42] 张广立,岑柏霆,龙新宪,等.粪肥施用对土壤团聚体的影响: Meta 分析[J].土壤,2024,56(3):610-622.