

## 覆盖栽培对渭北旱地冬小麦生产力及土壤肥力的影响

刘高远<sup>1</sup>, 杨玥<sup>1</sup>, 张齐<sup>1</sup>, 杨莉莉<sup>1</sup>, 梁连友<sup>1,2</sup>, 马强<sup>3</sup>, 同延安<sup>1,2\*</sup>

(1 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 富平现代农业综合试验示范站, 陕西富平 711799;  
3 富平农业技术推广中心, 陕西富平 711799)

**摘要:**【目的】覆盖栽培可以有效地改善土壤物理、化学及生物学特性, 对土壤质量与作物生产力的持续提高具有重要作用。本研究通过 3 年田间定位试验, 比较了渭北旱地几种覆盖栽培方式下冬小麦生产力及土壤肥力状况, 以最大化地发挥覆盖措施的作用和效益。【方法】本试验于 2014 年 9 月—2017 年 6 月在陕西富平综合试验站进行, 共设 4 个处理, 包括传统栽培 (CK)、秸秆覆盖 (NPS)、地膜覆盖 (NPP) 和垄沟覆盖 (RFPS), 每个处理重复 3 次, 完全随机排列设计。于冬小麦收获期采集植株样品及表层 (0—20 cm) 和亚表层 (20—40 cm) 土壤样品, 分析冬小麦生产力、土壤养分、有机碳、活性有机碳及酶活性的变化。【结果】与 CK 相比, RFPS、NPP 和 NPS 产量分别显著增加了 51.8%、41.3% 和 13.7%, 水分利用率分别提高了 40.9%、34.0% 和 11.2%, 处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 3 种覆盖栽培方式均提高了冬小麦籽粒和秸秆氮磷钾吸收量, 尤其是 RFPS 和 NPP 处理 ( $P < 0.05$ )。RFPS 处理较 CK 显著 ( $P < 0.05$ ) 提高了表层土壤全量氮磷钾 (6.5%、4.5% 和 8.0%)、速效氮磷钾 (46.1%、37.8% 和 19.5%)、有机碳 (5.1%)、活性有机碳 (15.1%) 含量及 3 种酶 (蔗糖酶、脲酶和磷酸酶) 活性 (24.6%、34.6% 和 27.4%), 增幅明显高于 NPP 与 NPS 处理, 且明显改善亚表层土壤质量; NPP 处理表层土壤蔗糖酶活性较 CK 显著 ( $P < 0.05$ ) 提高了 9.6%, 0—40 cm 土层氮磷钾、有机碳及其他酶活性差异较小; NPS 处理表层土壤速效氮磷钾含量较 CK 显著 ( $P < 0.05$ ) 提高了 22.7%、19.9% 和 15.0%, 有机碳提高了 4.1%, 活性有机碳提高了 12.5%, 3 种酶活性分别提高了 12.0%、15.5% 和 12.0%, 且一定程度上改善了亚表层土壤质量, 但对 0—40 cm 土层全量氮磷钾含量影响较小。【结论】垄沟覆盖栽培方式对提高渭北旱地冬小麦生产力及土壤肥力水平具有显著效果, 可在当地农业生产中推广使用。

**关键词:** 渭北旱地; 覆盖方式; 垄沟覆盖; 秸秆覆盖; 地膜覆盖

## Effects of three mulching modes on winter wheat productivity and soil fertility in dryland of Weibei Rainfed Area

LIU Gao-yuan<sup>1</sup>, YANG Yue<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>, YANG Li-li<sup>1</sup>, LIANG Lian-you<sup>1,2</sup>, MA Qiang<sup>3</sup>, TONG Yan-an<sup>1,2\*</sup>

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Fuping Modern Agricultural Comprehensive Experiment Station, Fuping, Shaanxi 711799, China;

3 Fuping Agricultural Technology Promotion Center, Fuping, Shaanxi 711799, China)

**Abstract:** 【Objectives】Mulching cultivations can effectively improve soil physic-chemical and biological characteristics, which have played important roles in continuous improvement of soil quality and crop productivity. In this experiment, we compared the effects of several mulching ways in dryland of Weibei Rainfed Area, to make the best use of these measurements on improving crop productivity and soil fertility in this area.

【Methods】The experiment was conducted in winter wheat from September 2014 to June 2017 in Fuping Experimental Station, Shaanxi Province. There were four treatments, no mulching (CK), mulched with straw (NPS), plastic film (NPP) and ridge-furrow with plastic film and straw mulch (RFPS). At harvest, the soil samples of 0–20 cm and 20–40 cm depth were collected for analyzing soil nutrients, organic carbon (SOC),

收稿日期: 2017-09-11 接受日期: 2018-01-20

基金项目: 黄土高原区农田水肥高效项目 (K303021215); 陕西省旱地土壤培肥与旱情监测项目 (K3330216006) 资助。

联系方式: 刘高远 E-mail: liugaoyuan@hotmail.com; \* 通信作者 同延安 Tel: 029-87081213, E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

liable organic carbon (LOC) and enzyme activities, and wheat samples were collected for determining wheat productivity. 【 **Results** 】 Compared with CK, the yields of the RFPS, NPP and NPS treatments were significantly increased by 51.8%, 41.3% and 13.7%, and water use efficiencies were increased by 40.9%, 34.0% and 11.2%, respectively ( $P < 0.05$ ); the effects among the three treatments were significantly different as well. Compared with the CK, mulching cultivations increased N, P and K uptakes of winter wheat, especially in the RFPS and NPP treatments ( $P < 0.05$ ). The contents of total N, P and K in the surface soil of RFPS were increased by 6.5%, 4.5% and 8.0%, the contents of available N, P and K were increased by 46.1%, 37.8% and 19.5%, SOC content increased by 5.1% and LOC increased by 15.1%, and the activities of invertase, urease and phosphatase increased by 24.6%, 34.6% and 27.4%, respectively ( $P < 0.05$ ); and all the increases were significantly higher than those of the NPP and NPS ( $P < 0.05$ ). The NPP treatment increased the invertase activity by 9.6% in surface soil ( $P < 0.05$ ), but did not increase significantly the contents of soil nutrients, SOC and other enzyme activities in 0–40 cm layer, and even reduced the contents of total N and SOC, compared with the CK. The NPS treatment increased the contents of available N, P and K by 22.7%, 19.9% and 15.0% ( $P < 0.05$ ), SOC by 4.1% and LOC by 12.5%, and the activities of invertase, urease and phosphatase by 12.0%, 15.5% and 12.0%, respectively. However, the NPS treatment had little effects on the contents of total N, P and K in 0–40 cm soil layer. 【 **Conclusions** 】 The mode of ridge-furrow with plastic film and straw mulch performs well in increasing winter wheat productivity and soil fertility in dryland of Weibei Rainfed Area, and can be recommended in local agricultural production for the test area.

**Key words:** Weibei dryland; mulching mode; ridge-furrow mulch; straw mulch; plastic film mulch

我国旱地面积占国土面积 70% 以上, 干旱半干旱耕地是冬小麦、玉米等粮食作物的主要产地, 占可耕地面积近 55%, 已成为中国农业持续发展战略目标集中的重要产区<sup>[1-2]</sup>。在西北地区, 旱地农田面积占全国耕地总面积的 1/3 以上, 且尚有 2600~3300 万  $\text{hm}^2$  土地可供开垦与农耕<sup>[3]</sup>。然而, 由于该区水分缺乏与土壤贫瘠同时存在, 作物实际产量未达到其生产潜力的 50%, 严重制约旱区农业生产增长及稳定性<sup>[4]</sup>。因此, 寻求有效的栽培管理措施以提高土壤肥力及生产力是旱地农作物稳产高产的关键, 也是该区农业生产中亟待解决的问题。

土壤养分是反映土壤肥力变化的重要指标, 也是揭示土壤条件动态的敏感性指标, 其养分含量和分布特征直接影响土壤肥力和农田生态恢复力度与方向<sup>[5-6]</sup>。土壤有机碳 (SOC) 与作物养分吸收、土壤物理特性 (改善土壤结构) 及生物学特性 (提高生物多样性和增强微生物活性) 密切相关<sup>[7]</sup>。活性有机碳 (LOC) 是 SOC 的重要组成部分之一, 周转速率快且对田间管理措施反应敏感, 其强烈的氧化作用在土壤食物网循环过程中具有重要地位, 因而常常被作为评价土壤肥力和作物生产力的早期指标<sup>[8]</sup>。土壤酶活性是植物、动物和微生物活动的产物<sup>[9]</sup>, 是土壤微生物特性及理化特性的总体现, 能准确反映早期农田土壤肥力水平的变化<sup>[10]</sup>。因此, 许多学者常常把土

壤养分、SOC、LOC 含量及酶活性水平作为评价土壤肥力及作物生产力变化的综合指标<sup>[11-12]</sup>。大量研究表明, 覆盖栽培可以改善土壤结构、提高土壤养分含量、促进有机质更新及增强微生物繁殖速率<sup>[13-14]</sup>, 在土壤肥力保持与提升方面具有重要作用。Jordán 等<sup>[15]</sup>通过 3 年大田试验发现, 秸秆覆盖 ( $\times 10 \text{ t}/\text{hm}^2$ ) 显著提高了土壤有机质含量, 增加土壤水分储量与有效性, 并且改善了土壤容重、孔隙度和团聚体稳定性。Zhang 等<sup>[14]</sup>通过 4 年大田试验发现, 玉米秸秆覆盖后脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性分别较不覆盖增加了 19.6%、39.4% 和 44.3%, 且明显提高了玉米产量和水分利用率。罗珠珠等<sup>[16]</sup>研究发现, 在免耕 + 秸秆和免耕 + 地膜覆盖栽培 6 年后, 土壤速效养分和 SOC 含量均有所增加, 且二者均显著提高了作物 (春小麦与豌豆) 产量。相关研究发现, 垄沟覆盖 (垄上覆膜且沟内秸秆或覆草) 和秸秆覆盖较露地栽培增加了土壤养分和有机质含量, 提高了水分利用率<sup>[17-18]</sup>, 增加了微生物数量及酶活性, 促进了有效性养分的释放及有毒物质的降解, 进而改善了土壤环境<sup>[19]</sup>。然而, 一些学者则认为覆盖栽培也可能会降低作物的养分吸收量, 甚至会造成减产, 这很大程度上取决于区域气候环境条件<sup>[20-21]</sup>。因此, 针对不同区域选择适宜的覆盖栽培方式对提高作物生产力及土壤肥力是非常关键的。

渭北旱塬位于我国黄土高原南部, 被称为陕西省的“第二粮仓”, 在确保我国粮食供应与安全方面占有举足轻重的地位。该地区年降雨量约 500 mm 且多集中在 7—9 月, 年水分蒸发量明显高于降雨量, 属于典型旱作农业区; 同时, 由于该区表层土壤土质疏松、SOC 含量低、保水保肥性差, 造成冬小麦生育中后期缺水、倒伏等现象, 影响产量甚至绝收。干旱胁迫和地力贫瘠成为当地冬小麦生产的主要限制因素<sup>[2, 6]</sup>。而以往的研究主要集中在不同覆盖栽培下作物产量、水分利用率及土壤结构变化特征<sup>[22-24]</sup>, 以不同方式覆盖栽培对土壤肥力进行评价的研究较少, 尤其是缺乏土壤养分及生物学特性资料<sup>[21, 25]</sup>。本研究以渭北旱塬旱地冬小麦为例, 探讨覆盖栽培对冬小麦生产力、土壤养分、SOC、LOC 及酶活性的影响, 进一步揭示不同覆盖栽培方式下土壤肥力的变化特征, 旨在筛选出与当地冬小麦栽培相适应的增产增效生产模式, 为旱区农田土壤质量及生产性能的提高提供相关理论依据与技术支撑, 以指导我国旱区农业生产的可持续发展。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2014 年 9 月—2017 年 6 月在陕西渭南富平县淡村镇富平现代农业综合试验示范站 (34°74'N, 109°10'E) 进行。该区位于关中平原与陕北高原的过渡带, 海拔 472 m, 年平均气温 12.5℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温 4400.4℃, 无霜期为 222 d, 年平均降水量约为 500~550 mm, 多集中在 7—9 月份, 年蒸发量为 1826.7 mm, 属于典型旱作农业区。该区土壤类型为灰垆土, 属垆土亚类垆黄土土属, 0—20 cm 呈灰黄棕色, 粉砂质壤土, 疏松; 20—29 cm 呈浊黄橙色, 粉砂质粘壤土, 块状结构, 紧实。该土壤类型易导致农作物生育期内发生倒伏。试验前耕层土壤容重为 1.32 g/cm<sup>3</sup>、pH 为 8.34、有机质含量 11.40 g/kg、全氮 0.58 g/kg、全磷 0.41 g/kg、全钾 12.02 g/kg、速效氮 9.18 mg/kg、有效磷 9.35 mg/kg、速效钾 122.3 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设传统栽培 (CK)、秸秆覆盖 (NPS)、地膜覆盖 (NPP) 和垄沟覆盖 (RFPS, 垄上覆盖地膜且沟内覆盖秸秆), 共 4 个处理, 重复 3 次, 12 个小区, 小区面积为 90 m<sup>2</sup> (18 m × 5 m), 完全随机排列设计。种植制度为冬小麦—休闲, 耕作方式为免耕。

肥料品种与施用方法: 氮肥为尿素 (含 N 46.4%), 磷肥为磷酸二铵 (含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 44%), 各小区肥料于冬小麦播种前一次性作为基肥施入, 具体施肥方案见表 1。NPS 处理中秸秆为上季该小区冬小麦秸秆, 覆盖前进行风干和粉碎处理 (约为 5~10 cm), 于当季冬小麦播种后均匀撒施于各小区, 年平均用量约为 5000 kg/hm<sup>2</sup>。NPP 处理在冬小麦播种前 15 天覆盖地膜 (厚度为 0.008 mm, 宽度为 45 cm), 地膜间距为 60 cm, 地膜行间进行播种。RFPS 处理在冬小麦播种前 15 天进行田间起垄工作, 起垄的规格为高 15 cm、宽 35 cm, 垄上覆盖地膜 (地膜规格同 NPP); 之后, 垄沟内进行播种, 播后沟内覆盖秸秆 (秸秆处理与施用同 NPS 处理), 年平均施用量约为 6500 kg/hm<sup>2</sup>。本试验所选冬小麦品种为小堰 22 (当地常用品种), 播种量为 180 kg/hm<sup>2</sup>。试验期间 (2014 年 9 月—2017 年 6 月), 每年冬小麦播种期 (10 月上旬) 和收获期 (6 月上中旬) 基本一致。冬小麦生长期所需水分均来自于降雨, 其他田间管理与当地保持一致。

表 1 施肥与田间管理方案

Table 1 Fertilizer application and field management

处理 Treatment	施肥量 (kg/hm <sup>2</sup> ) Fertilizer application		秸秆量 Straw amount (kg/hm <sup>2</sup> )
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
CK	135	90	0
NPS	135	90	5000
NPP	135	90	0
RFPS	135	90	6500

### 1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集 植株样品采集时间分别为 2015 年 6 月 5 日、2016 年 6 月 9 日和 2017 年 6 月 11 日。于冬小麦收获前 1 天, 分别在各小区中央选取 3 行进行人工收割。晒干后, 分别测定茎秆与籽粒产量, 以采样面积产量折算每公顷地上部干物质累积量。人工收割时, 各小区另取 15 株小麦, 每个处理重复 3 次, 于 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘干、粉碎, 测定籽粒与秸秆养分吸收量, 根据单位面积干物质产量计算籽粒与秸秆累积量。

土样采集时间分别为 2015 年 6 月 7 日、2016 年 6 月 10 日和 2017 年 6 月 14 日。于冬小麦收获后用口径为 5 cm、长度为 1 m 的土钻, 以 20 cm 为间隔, 分别采集 0—100 cm 土层土样, 每个小区随机

取 3 个点, 分别用于土壤质量含水量 (GSW) 的测定。同时, 采用“5 点式”取样法采集表层 (0—20 cm) 及亚表层土壤 (20—40 cm) 样品, 每个小区同层混匀, 为 1 个样品, 重复 3 次。土样去除杂质后, 一部分自然风干、研磨, 分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛用于土壤养分、SOC 与 LOC 测定; 另一部分鲜样冷藏, 过 1 mm 筛用于土壤酶活性测定。另外, 各小区分别用体积为 200 cm<sup>3</sup> 的环刀采集表层及亚表层土样用于土壤容重 (BD) 的测定。

1.3.2 测定项目与方法 土样分析: 土壤养分 (全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷和速效钾) 及 SOC 的测定参考《土壤农化分析》<sup>[26]</sup>。蔗糖酶活性用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定, 单位以 Glucose mg/(g·24h) 表示<sup>[27]</sup>; 脲酶活性用靛酚蓝比色法测定, 单位以 NH<sub>3</sub>-N mg/(g·24h) 表示<sup>[27]</sup>; 碱性磷酸酶用酸苯二钠比色法, 以 Phenol mg/(g·24h) 表示<sup>[27]</sup>; LOC 测定采用 KMnO<sub>4</sub> 氧化法, 并以试验前 SOC 为参照计算碳库管理指数 (CPMI), 具体参考 Zhang 等<sup>[4]</sup>的测定方法。

植株样分析: 样品杀青及烘干后, 将茎秆剪成 2 cm 小段, 与籽粒分别进行磨碎, 用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消解, 消煮液测定全氮、全磷和全钾含量。其中, 全氮和全磷用流动分析仪测定, 全钾用火焰光度计测定。

水分利用率: 各个小区 GSW 和 BD 的分析参考 Mccarty 等<sup>[28]</sup>测定方法。冬小麦生育期内水分利用率 (WUE) 计算公式<sup>[18]</sup>:

$$SWS (\text{mm}) = GSW \times BD \times SD$$

$$ET (\text{mm}) = \Delta SWS + P_e$$

$$WUE [\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})] = Y/ET$$

式中: SWS 为土壤储水量; SD 为土层深度; ET 为生育期内总耗水量;  $\Delta SWS$  为收获后与播种前土壤储水量之差;  $P_e$  为生育期有效降水量; Y 为籽粒产量。

## 1.4 数据处理与分析

通过 Excel 2013 进行数据收集与整理。采用 SPSS 19.0 处理软件对数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 运用最小显著差异法 (Fisher's LSD) 检验各处理平均值在 5% 水平上的差异显著性, OriginPro 2016 进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 覆盖栽培对冬小麦产量、水分利用率及养分吸收量的影响

2.1.1 冬小麦产量与水分利用率 由 2015—2017 年试验结果 (表 2) 可以看出, 不同覆盖栽培均显著提高

了冬小麦产量。与 CK 相比, RFPS 处理分别增加了 56.0%、57.6% 和 43.2%, NPP 处理分别增加了 43.6%、45.9% 和 35.8%, NPS 处理分别增加了 8.1%、11.1% 和 20.5%; 覆盖栽培以 RFPS 最高, NPP 次之, 其次是 NPS, 处理之间差异显著。不同覆盖栽培对冬小麦水分利用率的影响表明, 在 2015—2017 年, RFPS 处理分别较 CK 显著提高了 42.8%、45.3% 和 36.5%, NPP 处理分别较 CK 显著提高了 35.9%、39.2% 和 29.5%; 2015 和 2016 年 NPS 处理冬小麦水分利用率与 CK 差异不显著, 但 2017 年较 CK 显著提高了 18.2%。覆盖栽培处理之间冬小麦水分利用率总体表现为 RFPS > NPP > NPS, 差异达到显著水平。

表 2 不同覆盖栽培下冬小麦产量与水分利用率  
Table 2 Yield and water use efficiency of winter wheat under different mulching modes

年份 Year	处理 Treatment	产量 Grain yield (kg/hm <sup>2</sup> )	水分利用率 WUE [kg/(hm <sup>2</sup> ·mm)]
2015	CK	3846.96 d	12.31 c
	NPS	4157.70 c	12.89 c
	NPP	5523.44 b	16.72 b
2016	RFPS	6002.76 a	17.57 a
	CK	3678.50 d	12.24 c
	NPS	4085.18 c	13.12 c
	NPP	5367.24 b	17.03 b
2017	RFPS	5795.39 a	17.78 a
	CK	4485.73 d	18.37 d
	NPS	5405.24 c	21.71 c
	NPP	6092.10 b	23.79 b
	RFPS	6425.47 a	25.08 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理之间在  $P < 0.05$  水平上差异显著 Data followed by different small letters within a column are significantly different among treatments at  $P < 0.05$  level.

2.1.2 养分吸收量 不同覆盖栽培对冬小麦氮、磷和钾吸收量的影响不同 (表 3)。3 年 (2015—2017 年) 试验结果表明, 不同覆盖栽培均显著提高了冬小麦吸氮量。与 CK 籽粒吸氮量相比, RFPS 分别提高了 74.5%、76.5% 和 73.7%, NPP 处理分别提高了 60.4%、63.2% 和 62.5%, NPS 处理分别提高了 24.0%、24.1% 和 31.0%, 且覆盖栽培之间差异显著; 同时, 覆盖栽培均显著提高了秸秆吸氮量, 以 RFPS 和 NPP 处理显著高于 NPS 处理。由 2015—2017 年试验结果发现, 覆盖栽培均提高了冬小麦吸磷量。其中, RFPS

表 3 不同覆盖栽培对冬小麦氮、磷与钾吸收量的影响 (kg/hm<sup>2</sup>)  
Table 3 Effects of different mulching modes on N, P and K uptakes of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	吸氮量 N uptake		吸磷量 P uptake		吸钾量 K uptake	
		籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw
2015	CK	66.20 d	16.38 c	13.85 b	1.29 b	17.93 b	62.35 c
	NPS	82.09 c	21.08 b	15.73 ab	1.66 b	22.20 a	91.33 b
	NPP	106.22 b	23.83 a	18.15 a	1.92 a	23.04 a	96.78 b
	RFPS	115.50 a	27.24 a	18.86 a	2.07 a	23.25 a	103.69 a
2016	CK	64.40 d	15.67 c	13.67 b	1.28 b	17.17 b	61.56 c
	NPS	79.95 c	20.76 b	16.29 ab	1.62 b	22.39 a	89.01 b
	NPP	105.11 b	23.42 a	18.29 a	1.95 a	22.76 a	94.12 b
	RFPS	113.65 a	26.39 a	20.20 a	2.01 a	23.94 a	100.47 a
2017	CK	77.51 d	17.69 c	14.52 b	1.34 b	19.44 b	65.60 c
	NPS	101.51 c	23.65 b	17.05 ab	1.79 ab	24.50 a	101.92 b
	NPP	125.97 b	26.66 a	19.16 a	2.11 a	25.47 a	103.31 b
	RFPS	134.64 a	30.20 a	21.36 a	2.24 a	27.33 a	113.21 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著 Data followed by different small letters within a column are significantly different among treatments at  $P < 0.05$  level.

处理籽粒吸磷量较 CK 分别显著提高了 36.1%、47.8% 和 47.1%，NPP 处理较 CK 分别显著提高了 31.0%、33.8% 和 31.9%，且二者均显著提高了秸秆吸磷量；而 NPS 处理吸磷量与 CK 之间无显著差异。试验期间 (2015—2017 年)，覆盖栽培均显著提高了冬小麦吸钾量。与 CK 籽粒吸钾量相比，RFPS 处理分别提高了 29.7%、39.4% 和 40.6%，NPP 处理分别提高了 28.5%、32.6% 和 31.0%，NPS 处理分别提高了 23.8%、30.4% 和 26.0%，覆盖栽培之间差异并不显著；覆盖栽培均显著增加了秸秆吸钾量，以 RFPS 处理显著高于 NPP 和 NPS 处理。

## 2.2 覆盖栽培对土壤养分的影响

### 2.2.1 全氮、全磷和全钾 不同覆盖栽培对表层及亚表层土壤全氮、全磷和全钾含量影响不同 (表 4)。

由 2015—2017 年试验结果发现，RFPS 处理表层土壤全氮含量分别较 CK 显著增加了 4.3%、6.2% 和 9.0%，且 2016 和 2017 年亚表层土壤全氮含量分别较 CK 显著提高了 11.7% 和 15.6%；NPP 和 NPS 处理的全氮含量与 CK 之间无显著差异，但 NPP 处理在一定程度上降低了全氮含量。3 年试验结果表明，2015 年不同处理表层土壤全磷差异不明显，而 2016 和 2017 年 RFPS 处理表层土壤全磷含量分别较 CK 显著增加了 4.5% 和 6.3%；各处理亚表层土壤全磷含量与 CK 之间差异未达到显著水平。在试验期

间 (2015—2017 年)，RFPS 处理表层土壤全钾含量分别较 CK 显著增加了 5.8%、7.9% 和 10.3%，而处理 NPP、NPS 和 CK 之间无显著差异；不同处理亚表层土壤全钾变化较小，差异均未达到显著水平。

### 2.2.2 速效氮、有效磷和速效钾 不同覆盖栽培均提高了 0—40 cm 土层速效养分含量，RFPS 和 NPS 处理较 CK 提高较为明显，而 NPP 处理与 CK 之间差异不显著 (表 5)。

3 年试验结果表明，与 CK 表层土壤速效氮含量相比，2015—2017 年 RFPS 处理分别显著提高了 46.0%、53.3% 和 38.6%，NPS 处理分别显著提高了 25.0%、30.3% 和 24.5%，且 RFPS 处理增幅显著高于 NPP 和 NPS 处理。亚表层土中，RFPS 处理的速效氮含量分别较 CK 显著提高了 31.8%、29.8% 和 22.1%；2015 和 2016 年 NPS 处理的速效氮含量与 CK 无显著差异，但 2017 年较 CK 显著提高了 15.2%。与 CK 表层土壤有效磷含量相比，2015—2017 年 RFPS 处理分别显著增加了 33.2%、41.0% 和 39.3%，NPS 处理分别显著增加了 18.9%、20.9% 和 19.8%，且覆盖栽培之间差异显著。亚表层土中，RFPS 处理的有效磷含量分别较 CK 显著增加了 14.3%、16.9% 和 18.8%；2015 和 2016 年 NPS 处理与 CK 无显著差异，而 2017 年较 CK 显著增加了 13.5%。2015—2017 年 RFPS 处理表层土壤速效钾含量分别较 CK 显著增加了 11.6%、18.6% 和 28.0%；2015 年 NPS 处理表

表 4 不同覆盖栽培下土壤全氮、全磷和全钾含量 (g/kg)  
Table 4 Soil total N, P and K contents under different mulching modes

年份 Year	处理 Treatment	全氮 Total N		全磷 Total P		全钾 Total K	
		0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
2015	CK	0.60 b	0.49 a	0.46 a	0.39 a	12.02 b	12.03 a
	NPS	0.61 ab	0.52 a	0.47 a	0.41 a	12.35 b	12.19 a
	NPP	0.59 b	0.50 a	0.46 a	0.41 a	12.30 b	12.10 a
	RFPS	0.62 a	0.53 a	0.47 a	0.42 a	12.72 a	12.36 a
2016	CK	0.61 b	0.48 b	0.46 b	0.40 a	12.15 b	12.06 a
	NPS	0.64 ab	0.52 ab	0.47 b	0.42 a	12.75 b	12.28 a
	NPP	0.60 b	0.50 b	0.46 b	0.41 a	12.64 b	12.14 a
	RFPS	0.65 a	0.54 a	0.49 a	0.43 a	13.11 a	12.41 a
2017	CK	0.63 b	0.48 b	0.48 b	0.40 a	12.45 b	12.16 a
	NPS	0.66 ab	0.53 ab	0.49 ab	0.44 a	13.40 ab	12.48 a
	NPP	0.62 b	0.51 b	0.48 b	0.42 a	13.01 b	12.35 a
	RFPS	0.68 a	0.56 a	0.51 a	0.45 a	13.73 a	12.60 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著 Data followed by different small letters within a column are significantly different among treatments at  $P < 0.05$  level.

表 5 不同覆盖栽培下土壤速效氮、有效磷和速效钾含量 (mg/kg)  
Table 5 Soil available N, P and K contents under different mulching modes

年份 Year	处理 Treatment	速效氮 Available N		有效磷 Available P		速效钾 Available K	
		0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
2015	CK	11.48 c	8.37 b	10.85 c	5.05 b	126.53 b	98.89 a
	NPS	14.35 b	9.80 b	12.90 b	5.17 b	135.63 b	99.87 a
	NPP	11.65 c	8.97 b	11.35 c	5.08 b	132.09 b	99.63 a
	RFPS	16.76 a	11.03 a	14.45 a	5.78 a	141.26 a	100.26 a
2016	CK	12.21 c	8.83 b	10.98 c	5.15 b	131.30 b	99.19 a
	NPS	15.91 b	10.26 ab	13.28 b	5.63 ab	149.38 a	99.79 a
	NPP	13.53 c	9.22 b	12.03 c	5.25 b	133.62 b	99.30 a
	RFPS	18.71 a	11.46 a	15.48 a	6.02 a	155.79 a	101.23 a
2017	CK	11.85 c	8.62 b	10.88 c	5.12 b	128.22 b	99.51 a
	NPS	14.75 b	9.93 a	13.04 b	5.81 a	158.90 a	105.21 a
	NPP	13.03 bc	9.06 b	10.92 c	5.41 ab	136.06 b	102.27 a
	RFPS	16.43 a	10.53 a	15.15 a	6.08 a	164.16 a	105.42 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著 Data followed by different small letters within a column are significantly different among treatments at  $P < 0.05$  level.

层土壤速效钾含量与 CK 无显著差异, 但 2016 和 2017 年分别较 CK 显著增加了 13.8% 和 24.0%。与 CK 相比, 覆盖栽培对亚表层土壤速效钾含量影响较小, 差异均未达到显著水平。

### 2.3 覆盖栽培对 SOC、LOC 及 CPMI 的影响

不同覆盖栽培对 SOC 含量的影响明显不同 (表 6)。试验结果表明, 2015—2017 年 RFPS 处理表层 SOC 含量分别较 CK 显著增加了 4.8%、5.6% 和

表 6 不同覆盖栽培下土壤有机碳、活性有机碳及碳库管理指数  
Table 6 Contents of SOC, LOC and CPMI under different mulching modes

年份 Year	处理 Treatment	有机碳 SOC (g/kg)		活性有机碳 LOC (g/kg)		碳库管理指数 CPMI (%)	
		0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
2015	CK	7.32 b	4.85 a	1.33 b	0.60 a	114.23 b	81.84 a
	NPS	7.55 ab	4.88 a	1.43 ab	0.63 a	124.66 ab	85.95 a
	NPP	7.24 b	4.83 a	1.37 b	0.62 a	118.80 b	84.63 a
	RFPS	7.67 a	4.89 a	1.47 a	0.68 a	128.55 a	95.06 a
2016	CK	7.34 b	4.85 a	1.35 b	0.61 a	115.91 b	82.92 a
	NPS	7.67 a	4.92 a	1.52 a	0.67 a	133.26 a	92.16 a
	NPP	7.18 b	4.81 a	1.42 b	0.64 a	124.45 b	88.97 a
	RFPS	7.74 a	4.97 a	1.55 a	0.72 a	135.91 a	99.89 a
2017	CK	7.46 b	4.88 a	1.40 b	0.64 a	120.39 b	89.12 a
	NPS	7.80 a	5.01 a	1.63 a	0.70 a	144.47 a	101.83 a
	NPP	7.20 b	4.81 a	1.45 b	0.67 a	127.06 b	92.93 a
	RFPS	7.83 a	5.02 a	1.67 a	0.79 a	149.29 a	112.17 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著 Data followed by different small letters within a column are significantly different among treatments at  $P < 0.05$  level.

5.0%; 2015 年 NPS 处理表层 SOC 含量与 CK 差异不显著, 但 2016 和 2017 年分别较 CK 显著增加了 4.6% 和 4.5%; 而 NPP 处理表层 SOC 含量与 CK 之间无显著差异, 且一定程度上降低了 SOC 含量。与表层土相比, 各处理亚表层 SOC 含量变化较小, 差异均未达到显著水平。

不同覆盖栽培表层土壤 LOC 含量与 CPMI 结果表明 (表 6), 在 2015—2017 年, RFPS 处理表层土壤 LOC 含量分别较 CK 显著提高了 10.6%、14.9% 和 19.5%, 相应地 CPMI 处理分别显著提高了 12.5%、17.3% 和 24.0%; 2015 年 NPS 处理表层土壤 LOC 含量与 CK 之间差异不显著, 但 2016 和 2017 年分别较 CK 显著增加了 12.9% 和 16.8%, 相应地 CPMI 处理分别显著增加了 15.0% 和 20.0%; NPP 处理表层土壤 LOC 含量及 CPMI 处理与 CK 之间均无显著差异。覆盖栽培对亚表层土壤 LOC 含量及 CPMI 影响较小, 各处理较 CK 均有所增加, 但差异均未达到显著水平。

## 2.4 覆盖栽培对土壤酶活性的影响

2.4.1 蔗糖酶活性 图 1 显示, 试验期间 (2015—2017 年), RFPS 处理蔗糖酶活性分别较 CK 显著增加了 19.4%、24.6% 和 29.7%; 2015 年 NPP 和 NPS 处理蔗糖酶活性与 CK 之间无显著差异, 而 2016 年分别较 CK 显著增加了 9.1% 和 13.5%, 2017

年分别较 CK 显著增加了 13.6% 和 15.9%。不同覆盖栽培下亚表层土壤蔗糖酶活性的结果显示 (图 1), 在 2015—2017 年, RFPS 处理蔗糖酶活性分别较 CK 显著增加了 33.4%、37.4% 和 43.5%; 2015 年 NPS 处理蔗糖酶活性与 CK 之间无显著差异, 但 2016 和 2017 年分别较 CK 显著提高了 16.5% 和 19.2%; NPP 处理蔗糖酶活性与 CK 之间差异不显著。

2.4.2 脲酶活性 在 2015~2017 年试验期间, 不同覆

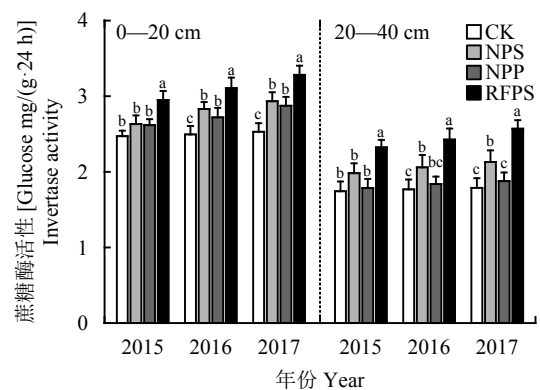


图 1 不同覆盖栽培下土壤蔗糖酶活性 (37°C)

Fig. 1 Soil invertase activity under different mulching modes (37°C)

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著 Different letters above the bars are significantly different among treatments at  $P < 0.05$ .]

盖栽培下土壤脲酶活性之间存在明显差异 (图 2)。2015—2017 年表层土中, RFPS 处理脲酶活性分别较 CK 显著增加了 26.0%、35.4% 和 42.2%; 2015 年 NPS 处理脲酶活性较 CK 无显著差异, 而 2016 和 2017 年分别较 CK 显著增加了 16.3% 和 19.0%; NPP 处理脲酶活性与 CK 之间无显著差异。亚表层土中, RFPS 处理脲酶活性分别较 CK 显著增加了 10.6%、12.1% 和 13.6%, 但处理 NPP、NPS 和 CK 之间差异未达到显著水平。

2.4.3 磷酸酶活性 图 3 显示, 在 2015—2017 年, RFPS 处理表层土壤磷酸酶活性分别较 CK 显著增加了 19.8%、26.6% 和 35.6%; 2015 年 NPS 处理磷酸酶活性与 CK 之间无显著差异, 而 2016 和 2017 年分

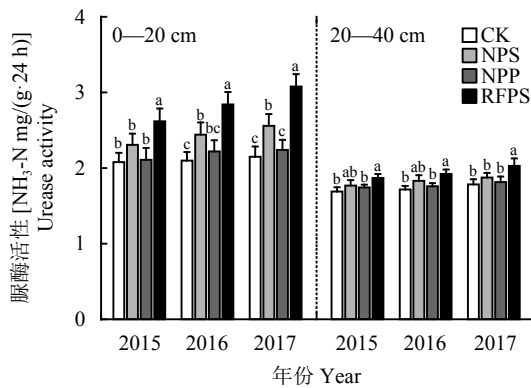


图 2 不同覆盖栽培下土壤脲酶活性 (37°C)

Fig. 2 Soil urease activity under different mulching modes (37°C)

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著 Different letters above the bars are significantly different among treatments at  $P < 0.05$  level.]

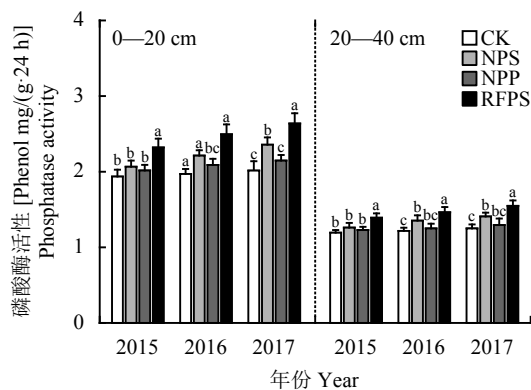


图 3 不同覆盖栽培下土壤磷酸酶活性 (37°C)

Fig. 3 Soil phosphatase activity under different mulching modes (37°C)

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著 Different letters above the bars are significantly different among treatments at  $P < 0.05$  level.]

别较 CK 显著增加了 12.4% 和 16.7%; NPP 处理磷酸酶活性与 CK 之间无显著差异。2015—2017 年不同覆盖栽培下亚表层土壤磷酸酶活性, RFPS 处理磷酸酶活性分别较 CK 显著增加了 16.7%、20.2% 和 23.9%; 2015 年 NPS 处理磷酸酶活性与 CK 间无显著差异, 但 2016 和 2017 年分别较 CK 显著提高了 11.1% 和 12.7%; NPP 处理与 CK 之间差异未达到显著水平。

### 3 讨论

#### 3.1 冬小麦产量、水分利用率和养分吸收量

作物产量与水分利用率是土壤肥力及生产性能的综合体现。大量研究表明, 覆盖栽培可以有效地提高土壤水分有效性、作物产量及水分利用率<sup>[29]</sup>。刘金海等<sup>[30]</sup>研究发现, 地膜覆盖和秸秆覆盖栽培下冬小麦产量分别较露地栽培显著提高了 56.8% 和 14.7%, 且二者较不覆盖均明显提高了水分利用率。Chen 等<sup>[18]</sup>通过 3 年大田试验研究发现, 垄沟覆盖栽培冬小麦年平均产量和水分利用率分别较露地平作显著提高了 30.3% 和 22.5%。这些研究结论与本结果基本一致 (表 2)。本研究还发现, 不同覆盖栽培处理对冬小麦产量和水分利用率的影响顺序为 RFPS > NPP > NPS, 且处理之间差异显著。这主要是由于垄沟覆盖不仅具有较好的集水性和保水性, 使雨水入渗到更深土层, 而且还可以降低无效的行间蒸发, 相应地增强了冬小麦对土壤肥水的吸收和利用能力<sup>[31]</sup>; 地膜覆盖冬小麦的产量显著高于秸秆覆盖, 这可能与地膜覆盖具有较高的水分利用率 (表 2)、养分吸收量 (表 3) 及良好的温度条件有关<sup>[32]</sup>。

作物养分吸收是决定作物生产力的重要因素, 是土壤理化性质及生物学特性的综合反映<sup>[14, 33]</sup>。本研究发现, RFPS 和 NPP 处理较 CK 均显著提高了冬小麦养分吸收量; NPS 处理较 CK 显著提高了冬小麦对氮和钾的吸收量, 而对磷的吸收量相对较低 (表 3)。这可能是由于作物养分吸收量与土壤水分储量及有效性密切相关, 较高的水分利用率一定程度上可以提高作物对养分的吸收能力<sup>[34]</sup>。相对于地膜覆盖, 秸秆覆盖保水性略差且水分利用率较低 (表 2), 降低了养分吸收量<sup>[29]</sup>; 另一方面, 秸秆中含氮和钾较高 (表 3), 而含磷较少且易被土壤吸附固定, 因此降低了作物对磷的吸收<sup>[35]</sup>。垄沟覆盖较其他覆盖方式显著提高了水分利用率 (表 2), 相应地增强了土壤养分有效性及干物质转运能力<sup>[17, 36]</sup>。



### 3.2 土壤养分

土壤养分是评价土壤肥力的重要指标之一, 其含量和有效性直接关系到土壤环境好坏、供肥能力强弱及作物产量高低<sup>[5, 37]</sup>。Zhang 等<sup>[4]</sup>通过 3 年大田试验发现, 秸秆还田土壤速效氮和有效磷含量分别较不还田增加了 27.5% 和 10.8%, 且产量增加了 22.5%~22.8%。付威等<sup>[38]</sup>研究发现, 地膜覆盖改善了土壤物理性质, 且增加了土壤速效养分含量。高亚军等<sup>[39]</sup>研究发现, 渭北旱地冬小麦垄沟覆盖提高了土壤速效氮含量。这些研究结论与本试验结果相一致(表 5)。本研究还发现, 在试验期间(2015—2017 年), 随着栽培年限的增加, RFPS 处理明显提高了表层土全量养分和 0—40 cm 土层速效养分含量, NPS 处理提高了 0—40 cm 土层速效养分含量, 前者增幅明显高于后者, 而 NPP 处理 0—40 cm 土层养分变化较小且降低了表层土全氮含量。这主要是由于秸秆覆盖可以改良土壤理化性质(团聚体结构、土壤容重、孔隙度等)<sup>[18]</sup>, 减少水分蒸散, 促进根系、凋落物及秸秆腐解, 增强了速效养分的释放与供应<sup>[2, 22]</sup>; 地膜覆盖增强了有机物(根系残茬、凋落物等)矿化速率, 提高了有效养分释放, 但这些有机物数量相对于秸秆覆盖是非常低的<sup>[40]</sup>, 而且矿化量增加可能会导致土壤有机氮降低<sup>[41]</sup>; 垄沟覆盖增强了雨水入渗, 沟内秸秆覆盖提高了保水性, 改善了更深层土壤微生态环境, 促进了难溶性物质的分解与转化, 增加了稳态养分含量, 从而提高了土壤养分有效性和库容量<sup>[31]</sup>。

### 3.3 SOC、LOC 和 CPMI

SOC 是土壤养分转化与循环的核心, 其含量及活性高低是影响土壤质量的重要指标<sup>[42]</sup>。尤其是 LOC, 直接参与土壤生物化学转化过程, 是土壤养分转化的重要驱动力<sup>[10]</sup>。付鑫等<sup>[43]</sup>研究发现, 秸秆覆盖显著地提高了表层 SOC 含量 13.2%, 而地膜覆盖对表层 SOC 的积累无促进作用, 甚至降低了表层及亚表层 SOC 含量。张英英等<sup>[44]</sup>在 15 年长期定位试验中发现, 秸秆覆盖较不覆盖 SOC、LOC 及 CPMI 显著增加了 16.3%、28.3% 和 37.0%。梁贻仓等<sup>[45]</sup>研究发现, 秸秆覆盖显著提高了 SOC、LOC 和 CPMI, 而地膜覆盖对其影响则较小。这些结论与本试验结果基本一致(表 6)。本研究还发现, 在试验期间(2015—2017 年), 随着种植年限的增加, RFPS 较 NPP 和 CK 显著提高了表层土 SOC、LOC 及 CPMI, 且明显提高了亚表层土 LOC 及 CPMI。这主要是由于垄沟覆盖具有更高的水分保持与供应能力(表 2)

及良好的温度条件, 增加了冬小麦生物量且丰富了土壤有机碳源(根系残茬、凋落物、秸秆等)的投入, 提高了微生物数量及活性, 增强了有机物的转化能力和活性<sup>[46]</sup>。此外, 本研究还发现, RFPS 处理较 NPS 处理可能更有利于提高 SOC、LOC 和 CPMI, 这可能与不同覆盖方式下有机物矿化速率和矿化量有关<sup>[45, 47]</sup>。

### 3.4 土壤酶活性

土壤酶活性是作物吸收养分的重要驱动因子, 被认为是有机质分解的“传感器”<sup>[48]</sup>。覆盖栽培可以改善土壤质量及环境条件, 因而对土壤酶活性具有很大的影响<sup>[49-50]</sup>。Zhang 等<sup>[4]</sup>研究发现, 秸秆覆盖较不覆盖 0—60 cm 土层脲酶、磷酸酶和转化酶活性分别增加了 19.6%、39.4 和 44.3%。杜社妮等<sup>[51]</sup>研究发现, 地膜覆盖提高了土壤蔗糖酶和磷酸酶活性, 而对脲酶活性影响较小。李荣等<sup>[52]</sup>研究指出, 垄上覆地膜且沟内覆玉米秸秆可以明显提高土壤肥力及酶活性水平。本研究发现, 覆盖栽培均提高了土壤蔗糖酶、脲酶及磷酸酶活性, 且表层土壤增幅高于亚表层。这主要是由于覆盖栽培能够改善土壤理化性质, 增加根系生物量, 增强土壤呼吸, 促进根系酶或分泌物的释放, 从而提高了土壤酶活性<sup>[53]</sup>; 而相对于亚表层土壤, 表层土壤具有较高的微生物数量和活跃度, 且土壤酶活性存在表层富集效应, 因而表层土壤酶活性高于亚表层<sup>[54]</sup>。本研究还发现, 随着栽培年限的增加, RFPS 与 NPS 处理均显著增强了表层土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性, 且前者增幅显著高于后者。这主要是由于秸秆覆盖提高了表层土壤持水性和有机底物, 增加了微生物数量及生物量碳氮, 为酶活性累积提供了良好的环境条件<sup>[10, 29]</sup>; 而垄沟覆盖较秸秆覆盖受外界变化干扰小, 土壤性质趋于稳定, 更易于形成优越的微环境, 促进微生物生长与繁殖, 进而增强了亚表层土壤酶活性<sup>[51]</sup>。另外, 本研究还发现, 随着栽培年限的增加, NPP 处理明显提高了表层土壤蔗糖酶活性, 但对脲酶和磷酸酶活性影响较小。这一结果可能与土壤多糖分解速率<sup>[55]</sup>、尿素和磷酸基团含量有关<sup>[51]</sup>。

## 4 结论

1) 3 种覆盖栽培方式均提高了冬小麦籽粒产量 ( $P < 0.05$ ) 和水分利用率, 其增幅顺序为垄沟覆盖 > 地膜覆盖 > 秸秆覆盖 ( $P < 0.05$ ); 同时, 3 种覆盖栽培方式均有效地增加了冬小麦籽粒和秸秆氮磷钾吸

收量,尤其是垄沟覆盖和地膜覆盖 ( $P < 0.05$ )。

2) 垄沟覆盖显著增加了表层土壤养分、有机碳、活性有机碳及酶活性水平 ( $P < 0.05$ ),其增幅明显高于地膜覆盖和秸秆覆盖,而且改善了亚表层土壤肥力状况;地膜覆盖显著提高了表层土壤蔗糖酶活性水平 ( $P < 0.05$ ),而对土壤养分、有机碳、活性有机碳和其他酶活性影响较小,甚至一定程度上降低了全氮和有机碳含量;随着栽培年限的增加,秸秆覆盖显著提高了表层土壤速效养分、有机碳、活性有机碳和酶活性水平 ( $P < 0.05$ ),但对亚表层土壤微环境影响较小。

综上所述,垄沟覆盖栽培方式对提高渭北旱地冬小麦生产力及土壤肥力水平具有显著效果,可在当地农业生产中推广使用。

### 参 考 文 献:

- [1] 蔡艳,郝明德. 长期轮作对黄土高原旱地小麦产量、养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 864–872.  
Cai Y, Hao M D. Effects of long-term rotation on the wheat yield, nutrient uptake and soil fertility in the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 864–872.
- [2] 薛澄,王朝辉,李富翠,等. 渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4395–4405.  
Xue C, Wang Z H, Li F C, *et al.* Effects of different fertilization and mulching cultivation methods on yield and soil water use of winter wheat on Weibei dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(21): 4395–4405.
- [3] Li F M, Xiong Y C, Li X G, *et al.* Integrated dryland agriculture sustainable management in Northwest China[M]. Germany: Springer International Publishing, 2016.
- [4] Zhang P, Chen X L, Wei T, *et al.* Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 160: 65–72.
- [5] 徐娜,党廷辉,刘文兆. 黄土高原沟壑区农田土壤养分与作物产量变化的长期监测[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1240–1248.  
Xu N, Dang T H, Liu W Z. Effects of soil nutrient balance and crop yields after 10-years' fertilization in the gully area of the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1240–1248.
- [6] 王芳,张金水,高鹏程,同延安. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 702–709.  
Wang F, Zhang J S, Gao P C, Tong Y A. Effects of application of different organic materials on soil microbiological properties and soil fertility in Weibei rainfed highland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 702–709.
- [7] Lemke R L, Vandenbygaart A J, Campbell C A, *et al.* Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 135(1): 42–51.
- [8] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview[J]. Advances in Agronomy, 2005, 85(4): 221–268.
- [9] Tautges N E, Sullivan T S, Reardon C L, Burke I C. Soil microbial diversity and activity linked to crop yield and quality in a dryland organic wheat production system[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 108: 258–268.
- [10] 柳燕兰,宋尚有,郝明德. 长期定位施肥对黄绵土酶活性及土壤养分状况的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 798–803.  
Liu Y L, Song S Y, Hao M D. Enzyme activities and soil nutrition status as affected by a long-term located fertilization in a loessial soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(4): 798–803.
- [11] Wei T, Zhang P, Wang K, *et al.* Effects of wheat straw incorporation on the availability of soil nutrients and enzyme activities in semiarid areas[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0120994.
- [12] 张鹏,贾志宽,路文涛,等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1122–1130.  
Zhang P, Jia Z K, Lu W T, *et al.* Effects of organic fertilization on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1122–1130.
- [13] Kabiri V, Raiesi F, Ghazavi M A. Tillage effects on soil microbial biomass, SOM mineralization and enzyme activity in a semi-arid Calcixerpts[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 232: 73–84.
- [14] Fan T L, Stewart B A, Wang Y, *et al.* Long-term fertilization effects on grain yield, water-use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, 106(4): 313–329.
- [15] Jordán A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J]. Catena, 2010, 81(1): 77–85.
- [16] 罗珠珠,蔡立群,李玲玲,等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤养分和作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 171–176.  
Luo Z Z, Cai L Q, Li L L, *et al.* Long-term effects of tillage system on soil nutrients and grain yields in rainfed area of Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 171–176.
- [17] Mo F, Wang J Y, Zhou H, *et al.* Ridge-furrow plastic-mulching with balanced fertilization in rainfed maize (*Zea mays* L.): An adaptive management in east African Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 236: 100–112.
- [18] Chen Y L, Liu T, Tian X H, *et al.* Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[J]. Field Crops Research, 2015, 172: 53–58.
- [19] Calbrix R, Barray S, Chabrerie O, *et al.* Impact of organic amendments on the dynamics of soil microbial biomass and bacterial communities in cultivated land[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(3): 511–522.
- [20] 李富翠,赵护兵,王朝辉,等. 旱地夏闲期秸秆覆盖和种植绿肥对冬

- 小麦水分利用及养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 119–125.
- Li F C, Zhao H B, Wang Z H, *et al.* Effects of straw mulching and planting green manure on water use and nutrients uptake of winter wheat on dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 119–125.
- [21] Liu X H, Ren Y J, Gao C, *et al.* Compensation effect of winter wheat grain yield reduction under straw mulching in wide-precision planting in the North China Plain[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 213.
- [22] Chen Y L, Liu T, Tian X H, *et al.* Improving winter wheat grain yield and water use efficiency through fertilization and mulch in the Loess Plateau[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(6): 2059–2068.
- [23] Zhang S L, Sadras V, Chen X P, Zhang F S. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management[J]. *Field Crops Research*, 2014, 163: 55–63.
- [24] 何晓雁, 郝明德, 李慧成, 蔡志风. 黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1333–1340.
- He X Y, Hao M D, Li H C, Cai Z F. Effects of different fertilization systems on yield of wheat and water and fertilizer use efficiency in the Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1333–1340.
- [25] 郭胜利, 高会议, 党廷辉. 施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 808–814.
- Guo S L, Gao H Y, Dang T H. Effects of nitrogen application rates on wheat grain yield and soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 808–814.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis (3rd Edition)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- Guan S Y. *Soil enzyme and its research method*[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [28] Mccarty G W, Lyssenko N N, Starr J L. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(6): 1564–1571.
- [29] Lin W, Liu W Z, Xue Q W. Spring maize yield, soil water use and water use efficiency under plastic film and straw mulches in the Loess Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38995.
- [30] 刘金海, 党占平, 曹卫贤, 于爱萍. 不同覆盖和播种方式对渭北旱地小麦产量及土壤水分的影响[J]. *麦类作物学报*, 2005, 25(4): 91–94.
- Liu J H, Dang Z P, Cao W X, Yu A P. Effect of different mulching and sowing methods on wheat yield and soil water content in Weibei dryland[J]. *Acta Tritical Crops*, 2005, 25(4): 91–94.
- [31] Gao Y J, Li Y, Zhang J C, *et al.* Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dryland area of China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85(2): 109–121.
- [32] Wu Y, Huang F Y, Jia Z K, *et al.* Response of soil water, temperature, and maize (*Zea mays* L.) production to different plastic film mulching patterns in semi-arid areas of northwest China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 166: 113–121.
- [33] Huang G B, Chen W, Li F R. *Rainfed farming systems in the Loess Plateau of China*[M]. Germany: Springer International Publishing, 2011.
- [34] 何刚, 王朝辉, 李富翠, 等. 地表覆盖对旱地小麦氮磷钾需求及生理效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(9): 1657–1671.
- He G, Wang Z H, Li F C, *et al.* Nitrogen, phosphorus and potassium requirement and their physiological efficiency for winter wheat affected by soil surface managements in dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9): 1657–1671.
- [35] Li S X, Wang Z H, Li S Q, *et al.* Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116(2): 39–49.
- [36] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 等. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 853–863.
- Huang T M, Zheng X F, Hou Y Y, *et al.* Yield and N, P and K uptake and utilization of winter wheat affected by straw return to soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 853–863.
- [37] Delgadobaquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, *et al.* Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands[J]. *Nature*, 2013, 502(7473): 672–676.
- [38] 付威, 樊军, 胡雨彤, 等. 施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1158–1167.
- Fu W, Fan J, Hu Y T, *et al.* Effects of fertilization and film mulching on soil physical and chemical properties and winter wheat yield on the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1158–1167.
- [39] 高亚军, 李云, 李生秀, 等. 旱地小麦不同栽培条件对土壤硝态氮残留的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2901–2910.
- Gao Y J, Li Y, Li S X, *et al.* Effects of different wheat cultivation methods on residual nitrate nitrogen in soil in dryland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2901–2910.
- [40] Li R, Hou X Q, Jia Z K, *et al.* Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on soil water, temperature, and maize yield in Loess Plateau region of China[J]. *Soil Research*, 2012, 50(2): 105–113.
- [41] 汪景宽, 刘顺国, 李双异. 长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤无机氮和氮素矿化率的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 107–110.
- Wang J K, Liu S G, Li S Y. Effect of long-term plastic film mulching and fertilization on inorganic N distribution and organic N mineralization in brown earth[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 107–110.
- [42] Guo S L, Wu J S, Coleman K, *et al.* Soil organic carbon dynamics in a dryland cereal cropping system of the Loess Plateau under long-term nitrogen fertilizer applications[J]. *Plant & Soil*, 2012, 353(1–2): 321–332.
- [43] 付鑫, 王俊, 刘全全, 李蓉蓉. 秸秆和地膜覆盖对旱作玉米田土壤团聚体及有机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(2): 405–413.
- Fu X, Wang J, Liu Q Q, Li R R. Effect of straw and plastic film mulching on aggregate size distribution and organic carbon contents in a rainfed corn field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2): 405–413.

- [44] 张英英, 蔡立群, 武均, 等. 不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 1-7.  
Zhang Y Y, Cai L Q, Wu J, *et al.* The relationship between soil labile organic carbon fractions and the enzyme activities under different tillage measures in the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 1-7.
- [45] 梁贻仓, 王俊, 刘全全, 刘文兆. 地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 161-167.  
Liang Y C, Wang J, Liu Q Q, Liu W Z. Effects of soil surface mulching on soil organic carbon and its fractions in a wheat field in loess plateau, China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 161-167.
- [46] Gan Y T, Siddique K M, Turner N C, *et al.* Ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 118: 429-476.
- [47] 李蓉蓉, 王俊, 毛海兰, 付鑫. 秸秆覆盖对冬小麦农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 187-192.  
Li R R, Wang J, Mao H L, Fu X. Effects of straw mulching on soil organic carbon and fractions of soil carbon in a winter wheat field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 187-192.
- [48] Kotrocó Z, Veres Z, Fekete I, *et al.* Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 70(2): 237-243.
- [49] Acosta-Martínez V, Tabatabai M A. Enzyme activities in a limed agricultural soil[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2000, 31(1): 85-91.
- [50] 张彬, 何红波, 白震, 等. 保护性耕作对土壤微生物特性和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 230-236.  
Zhang B, He H B, Bai Z, *et al.* The effects of conservation tillage on the characteristics of soil microorganisms and the activities of soil enzymes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 230-236.
- [51] 杜社妮, 白岗栓. 玉米地膜覆盖的土壤环境效应[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 56-59.  
Du S N, Bai G S. Studies on effects of plastic film mulching on soil environment of maize field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(5): 56-59.
- [52] 李荣, 侯贤清, 贾志宽. 沟垄二元覆盖对渭北旱塬区土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1259-1268.  
Li R, Hou X Q, Jia Z K. Effects of dual-mulching of ridge and furrow on soil fertility and maize yield in the Weibei tablelands[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1259-1268.
- [53] Gregorich E G, Monreal C M, Carter M R, *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(4): 367-385.
- [54] Jin K, Sleutel S, Buchan D, *et al.* Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(1): 115-120.
- [55] 汪景宽, 张继宏, 须湘成. 地膜覆盖对土壤有机质转化的影响[J]. 土壤通报, 1990, (4): 189-193.  
Wang J K, Zhang J H, Xu X C. Effect of plastic film mulch on soil organic matter transformation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1990, (4): 189-193.