

# 不同覆盖措施对陇中旱作梯田土壤生态系统 多功能性及春小麦产量的影响

杨楠<sup>1,2</sup>, 逢蕾<sup>1,2</sup>, 王明<sup>1,2</sup>, 郑浩飞<sup>1,2</sup>, 苟磊刚<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070)

**摘要:**为明确不同覆盖措施对陇中旱作梯田土壤微生态及春小麦产量的影响,基于甘肃省农业科学院定西试验站的定位试验,采用单因素随机区组设计,设置地膜覆盖(PM)、秸秆碎秆覆盖还田(SR)和秸秆整秆带状覆盖(SM)3种覆盖措施,以无覆盖为对照(CK),探究不同覆盖措施下土壤理化性质、酶活性、土壤生态系统多功能性(EMF)及春小麦产量的变化。结果表明,与CK相比,SR处理显著提高土壤有机碳、全氮、全磷、速效氮、速效磷含量,增幅分别为18.4%、16.9%、14.6%、16.6%、12.7%;SM处理显著提高土壤有机碳、速效氮和速效磷含量,增幅分别为13.3%、28.4%、9.6%。3种覆盖措施均显著提高土壤含水量,其中PM增幅最大(93.3%)。SR处理对土壤酶活性影响最显著,PM和SM处理次之。各处理土壤EMF的大小表现为SR>PM>SM>CK。PM和SR处理产量分别显著增加13.4%和18.2%。综合来看,秸秆碎秆覆盖还田可作为当地适宜的覆盖措施。

**关键词:**覆盖措施;土壤酶活性;土壤养分;土壤生态多功能性

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)12-1691-08

## Effects of Different Mulching Treatments on Soil Ecosystem Multifunctionality and Spring Wheat Yield in Dryland Terraces of Longzhong

YANG Nan<sup>1,2</sup>, PANG Lei<sup>1,2</sup>, WANG Ming<sup>1,2</sup>, ZHENG Haofei<sup>1,2</sup>, GOU Leigang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Crop Science in Arid Habitats, Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Agriculture College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** To clarify the effects of different mulching measures on the soil microecology and spring wheat yield in dryland terraces of Longzhong, a field experiment was conducted at the Dingxi Experimental Station of the Gansu Academy of Agricultural Sciences. A single-factor randomized block design was adopted with three mulching treatments: plastic film mulching (PM), straw residue mulching and incorporation (SR), and strip mulching with intact straw (SM), with no mulching (CK) as the control. The changes of these mulching measures on soil physicochemical properties, enzyme activities, ecosystem multifunctionality (EMF), and spring wheat yield were investigated. The results showed that, compared with CK, SR treatment significantly increased soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, and available phosphorus contents by 18.4%, 16.9%, 14.6%, 16.6%, and 12.7%, respectively. SM treatment significantly increased soil organic carbon, available nitrogen, and available phosphorus by 13.3%, 28.4%, and 9.6%, respectively. All three mulching treatments significantly improved soil water content, with the highest increase observed under PM

收稿日期:2025-02-25 修回日期:2025-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(32160525);永登县庄浪河(柳树镇-红城镇)段土地整治和生态修复综合治理项目(GSAU-JSYF-2024-22);国家级大学生创新创业训练项目(202210733010)

第一作者 E-mail:2192943968@qq.com(杨楠)

通讯作者 E-mail:125530457@qq.com(逢蕾)

(93.3%)。SR treatment had the most pronounced effect on soil enzyme activities, followed by PM and SM. The ranking of soil EMF was SR>PM>SM>CK. PM and SR treatments significantly increased spring wheat yield by 13.4% and 18.2%, respectively. Overall, straw residue mulching and incorporation proved to be the most suitable mulching practice for the region.

**Keywords:** Coverage measures; Soil enzyme activity; Soil nutrients; Soil ecological versatility

陇中地区属于典型的生态脆弱区,降水量少,蒸发量大,干旱是制约当地粮食产量的主要因素。西北旱区在保障中国粮食安全方面具有重要作用,因此提高该地区作物产量具有重要意义<sup>[1]</sup>。基于当地气候条件,农业生产中普遍采用地表覆盖措施以达到蓄水保墒的作用,其中秸秆和地膜是最常见的覆盖材料<sup>[2]</sup>。研究表明,秸秆覆盖不仅能够有效降低土壤水分无效蒸发,还能改善土壤养分供应<sup>[3]</sup>,相比之下,地膜覆盖在蓄水保墒方面优于秸秆覆盖,但其对土壤养分改善作用有限<sup>[4]</sup>,长期地膜覆盖会加快土壤养分耗损,改变土壤理化性质,削弱土壤生产力,进而对生态环境产生不利影响<sup>[5]</sup>。

土壤酶活性是衡量土壤肥力与生态功能的重要指标,在有机物分解转化、营养供给及物质循环过程中发挥关键作用<sup>[6]</sup>。其高低既能反映土壤微生物的活性水平及生化过程的相对程度,也能反映土壤养分的转化及转运能力<sup>[7]</sup>。相关研究显示,长期覆盖能够有效提高黄土高原农田土壤酶活性,如葡萄糖苷酶,酸性磷酸酶和脲酶,并与颗粒物组分中氮素含量呈正相关<sup>[8]</sup>;戴依莎等<sup>[3]</sup>提出,秸秆覆盖能够显著提高土壤酶活性,促进小麦增产。由于覆膜期间土壤水热条件的不同,其对酶活性的影响存在较大差异。白雪等<sup>[9]</sup>报道,地膜覆盖在一定程度上抑制作物生长期间土壤碳氮循环酶活性,但促进了磷酸酶活性。

土壤生态功能多样性是指土壤生态系统内能够同时提供并维持多种功能的能力,可通过参与土壤养分循环相关酶来表征,反映土壤养分状况和生物活性,是评价土壤碳、氮、磷循环过程的重要指标<sup>[10-11]</sup>。对于农田生态系统而言,土壤的主要功能是养分供给,生物间的正向互作有助于促进养分循环与作物发育,进而提高产量与肥力,实现可持续供给<sup>[12]</sup>。而田间各种农艺措施(有机肥、秸秆还田等)显著影响土壤生态多功能性<sup>[13]</sup>。因此,在实际生产中需充分考虑土壤生态功能之间的协同效应,针对具体需求进行优化管理。

然而,现有研究多集中于通过覆盖措施改善

水热条件达到增产目的<sup>[14]</sup>,且不同生态区域间存在差异。本研究以陇中旱作梯田为对象,通过测定不同覆盖措施下土壤酶活性的变化,结合生态系统多功能性,综合评估土壤养分状况,旨在阐明陇中旱地实现春小麦增产和维持生态多功能性的有效覆盖措施。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于甘肃省农业科学院定西试验站(35°35'N,104°36'E)进行,该地区海拔1970 m,属于中温带半干旱气候区,年均气温6.2℃,年辐射总量5898 MJ·m<sup>-2</sup>,年日照时数2500 h,≥10℃积温2075.1℃,无霜期140 d。该地区为典型旱地雨养农业区,年降水量415 mm,6—9月降水量占全年总量的68%,降水相对变率24%,400 mm降水保证率为48%,2023和2024年作物生育期内降水量分别为185.5、191.3 mm,平均温度分别为14.6、15.7℃,两年均为欠水年;2022年播种前0~20 cm土壤有机碳含量6.31 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量0.83 g·kg<sup>-1</sup>,速效氮含量5.6 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷含量7.89 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量128.25 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

本试验是自2022年开始的定位试验,采用单因素随机区组设计,设置地膜覆盖(PM)、秸秆碎秆覆盖(SR)和秸秆整秆带状覆盖(SM),以无覆盖为对照(CK),每个处理3次重复,共12个小区,小区面积为35 m<sup>2</sup>(7 m×5 m)。PM处理采用黑膜覆盖,膜宽1.2 m,膜厚0.01 mm,上一季覆盖的地膜在第二季春季整地时移除后重新覆膜;SR处理是将玉米秸秆铡成约5 cm的碎秆,上一季覆盖的秸秆在第二季春季整地时旋耕还田,旋耕深度为15 cm,播种后重新覆盖,覆盖量9000 kg·hm<sup>-2</sup>(风干基);SM处理小区分种植带和覆盖带,两带相间排列,种植带和覆盖带年际间轮换,种植带与覆盖带宽度均为50 cm,总带宽100 cm,覆盖量9000 kg·hm<sup>-2</sup>(风干基),春季整地

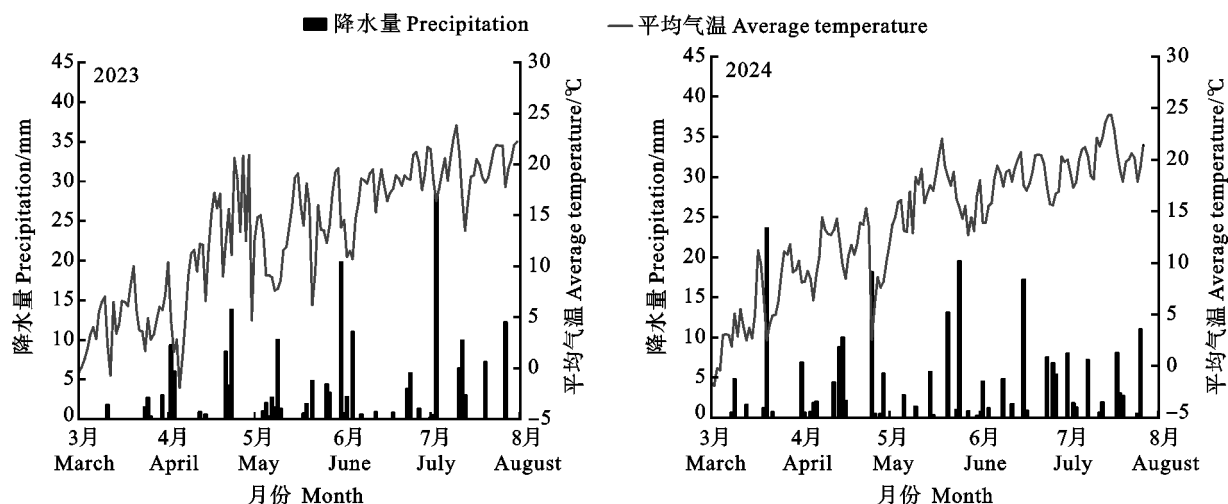


图 1 2023 和 2024 年春小麦生育时期气温和降水量

Fig. 1 Temperature and precipitation during the growth period of spring wheat in 2023 and 2024

时将上年覆盖在小区表面的玉米秸秆整秆移除,然后将新的玉米秸秆整秆覆盖在上一年种植带的位置。SR、SM、CK 处理均为条播,行距均为 16 cm,PM 为穴播,行距 22 cm。供试春小麦品种为陇春 35,播种量  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,于 2023 和 2024 年 3 月 25—28 日播种,7 月 25—28 日收获。施肥量为纯 N  $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$   $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,肥料种类为尿素和磷酸二铵,于播种前旋耕整地时一次性施入,生育期不灌水。3 种覆盖措施均为周年覆盖,其他管理措施同当地大田生产一致。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 土壤理化性质的测定

在 2023—2024 年春小麦收获期,采用五点取样法采集各小区 0~20 cm 的耕层土壤,过 2 mm 筛除去杂质,自然风干后研磨,用于土壤理化性质测定<sup>[15]</sup>。土壤含水量(SWC)采用烘干称重法测定;土壤 pH 值采用玻璃电极计测定,土水比为 1:2.5(w/v);土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化还原滴定法测定;土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;土壤全磷(TP)采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$  消解法测定;土壤速效氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )采用  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  KCl 溶液浸提后用全自动化学间断分析仪测定;土壤有效磷(AP)采用  $\text{NaHCO}_3$  浸提-钼锑抗比色法测定。

#### 1.3.2 土壤酶活性测定

采用 96 微孔板荧光法测定土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶( $\beta\text{G}$ )、半纤维素酶( $\beta\text{X}$ )、纤维素酶(CBH)、几丁质酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和酸性

磷酸酶(ACP)活性。在 2024 年春小麦开花期,采用五点取样法采集小区 0~20 cm 耕层土壤,过 2 mm 筛除去杂质,于  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  冰箱保存。称取 1 g 新鲜土样,加入 150 mL 蒸馏水,恒温震荡 30 min 后培养 3~24 h,取土壤悬浊液于 96 孔板上,加入底物和缓冲液,利用酶标仪进行测定。

#### 1.3.3 土壤生态系统多功能性指数计算

为获得一个定量的多功能性指标,采用 Z-score 对测得的每种酶活性进行标准化,标准化后各参数的平均值即土壤生态系统多功能性(EMF)指数<sup>[10]</sup>。其计算公式如下:

$$z_i = \frac{v_i - M}{SD}$$

$$\text{EMF} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{6}$$

式中, $z_i$  为第  $i$  种酶活性的标准化参数; $v_i$  为第  $i$  种酶测得的实际活性; $M$  为测得酶活性的均值; $SD$  为测得酶活性的标准差; $n$  为指标数量。

#### 1.3.4 产量及其构成因素的测定

在春小麦收获期,CK、PM 和 SR 处理按照 18 行 4 m(面积为  $11.52 \text{ m}^2$ )测产,SM 处理按照 9 行 4 m(面积  $11.52 \text{ m}^2$ ,3:3 即 3 行种小麦和 3 行不种覆盖,各处理播量一致),所有样品脱粒后自然风干(含水量约 13%)后称重。同时,取部分植株于  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  烘至恒重,计算秸秆含水量,并换算测产区实际小麦地上部秸秆生物量。收获指数=(籽粒干重/地上部分总干重) $\times 100\%$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理(产量及其构成因素和土壤理化性质数据为 2023 和 2024 年的平均值,土壤酶活性为 2024 年开花期采集样品所测),用 SPSS 22.0 对数据进行统计分析,用 R 语言 4.3.2“ggplot2”包作图,采用 Duncan 法在 0.05 水平上进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖措施对土壤理化性质的影响

不同处理间 0~20 cm 土层土壤理化性质(除 pH 外)均存在显著差异(表 1)。与 CK 相比,SR

和 SM 处理均显著提高土壤有机碳、速效氮和速效磷含量,SR 处理增幅分别为 18.4%、16.6%、12.6%,SM 处理增幅分别为 13.3%、28.4%、9.6%;SR 处理下全氮和全磷含量分别显著提高 16.9% 和 14.6%。此外,3 种覆盖措施均显著提高了土壤含水量,PM、SR 和 SM 处理较 CK 分别显著提高 93.3%、20.9% 和 66.4%;土壤 pH 值在处理间无显著差异。这表明秸秆覆盖(SR 和 SM)对于改善土壤养分状况具有积极作用。

2.2 不同覆盖措施对土壤酶活性的影响

不同覆盖措施对土壤酶活性的影响存在差异(图 2)。与 CK 相比,SR 处理下  $\beta$ G、 $\beta$ X、CBH、NAG、

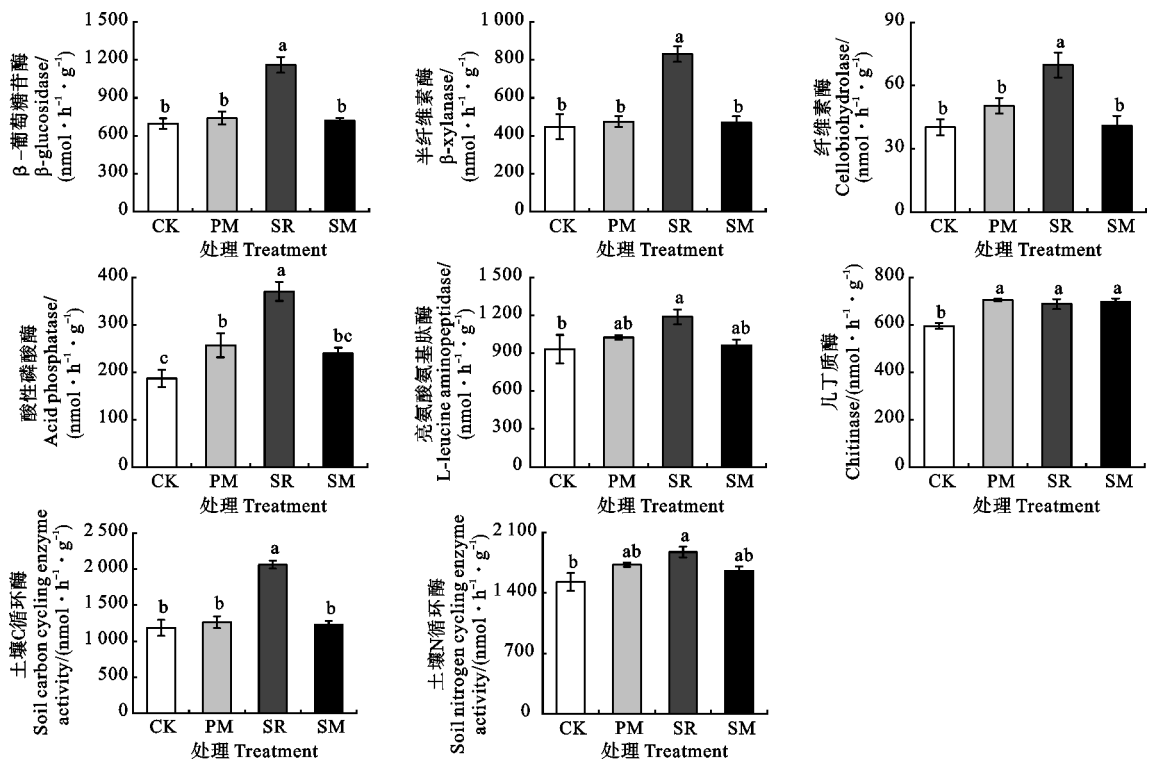
表 1 不同覆盖措施下土壤的理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties under different mulching treatments

处理 Treatment	有机碳 Organic carbon/(g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/(g · kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus/(g · kg <sup>-1</sup> )	速效氮 Rapidly available nitrogen/(mg · kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus/(mg · kg <sup>-1</sup> )	含水量 Moisture content/%	pH
CK	6.84±0.27c	0.77±0.03b	0.82±0.02b	29.27±1.10c	25.85±1.41b	5.69±0.24d	7.59±0.07a
PM	7.06±0.07bc	0.79±0.02b	0.88±0.03ab	31.11±1.95bc	25.45±1.03b	11.00±0.64a	7.62±0.03a
SR	8.10±0.15a	0.90±0.01a	0.94±0.04a	34.13±0.78ab	29.12±0.78a	6.88±0.10c	7.67±0.10a
SM	7.75±0.43ab	0.84±0.03ab	0.85±0.02ab	37.59±0.50a	28.34±1.63a	9.47±0.18b	7.83±0.07a

同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。表 2 同。

Different letters after the values in the same columns indicate significant differences among different treatments(P<0.05). The same in table 2.



图柱上不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。图 3 同。

Different lowercase letters above bars indicate significant differences among different treatments (P<0.05). The same in figure 3.

图 2 不同覆盖措施下的土壤酶活性

Fig. 2 Soil enzyme activity under different mulching treatments

LAP、ACP 活性分别显著提高 66.7%、85.5%、73.1%、15.5%、27.4%、98.1%；PM、SM 处理下 NAG 活性分别显著提高 18.5%、16.9%；PM 处理下 ACP 活性显著提高 37.4%。总体上，SR 处理对土壤酶活性影响最显著，PM 和 SM 处理次之。

### 2.3 不同覆盖措施对土壤生态多功能性的影响

各处理土壤 EMF 的大小表现为 SR>PM>SM>CK(图 3)。与 CK 相比，SR、PM 处理显著提高土壤生态系统多功能性，增幅分别为 244.3%和 94.3%( $P<0.05$ )。

### 2.4 不同覆盖措施对春小麦产量及其构成因素的影响

覆盖措施对春小麦产量、生物量及穗粒数、穗数和收获指数均存在显著影响，但对千粒重影响不显著(表 2)。与 CK 相比，PM 和 SR 处理产量分别显著增加 13.4%和 18.2%；PM、SR 处理生物量分别显著提高 8.0%和 7.4%，SM 显著降低了

9.2%；PM 和 SR 处理穗粒数分别显著提高 36.4%和 21.6%；PM 和 SM 处理穗数分别显著降低 17.3%和 11.1%；SR 处理收获指数显著提高 10.0%，其余处理无显著变化。

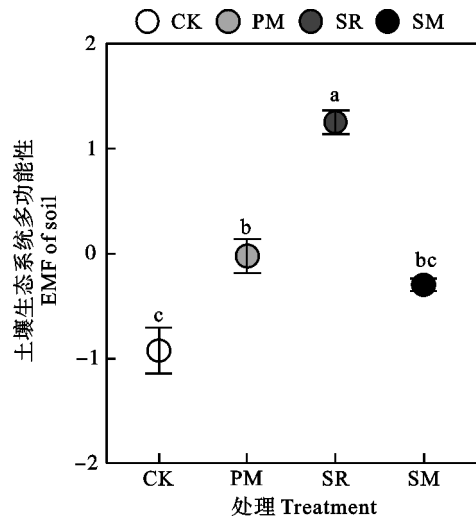


图 3 不同覆盖措施的土壤生态系统多功能性  
Fig.3 EMF of soil under different mulching treatments

表 2 不同覆盖措施下春小麦产量及其构成因素和收获指数

Table 2 Yield and its components of spring wheat and harvest index under different mulching treatments

处理 Treatment	产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	生物量 Biomass/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	穗数 Spike number/ (×10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	收获指数 Harvest index
CK	3 013.90±33.94b	7 464.51±111.28b	29.33±0.33c	44.56±0.29a	230.57±0.96a	0.40±0.01b
PM	3 418.46±14.78a	8 062.04±96.68a	40.00±1.15a	44.90±1.23a	190.76±5.12b	0.42±0.01ab
SR	3 561.67±87.17a	8 018.27±127.66a	35.67±1.45b	44.28±0.38a	226.04±7.52a	0.44±0.01a
SM	2 899.07±84.14b	6 779.11±22.12c	30.67±1.33c	46.18±0.40a	205.02±4.29b	0.43±0.01ab

## 3 讨论

### 3.1 不同覆盖措施对土壤理化性质和春小麦产量及其构成因素的影响

覆盖措施能显著提高土壤含水量，地膜覆盖对土壤含水量的提升最为明显，较无覆盖增加 93.3%，有效阻断空气与膜下水分接触，抑制水分蒸发，具有良好的保水作用<sup>[16]</sup>。秸秆覆盖下土壤含水量分别显著提高了 20.9%(SR)和 66.4%(SM)，这是由于秸秆覆盖能降低土壤温度、减少土壤水分蒸发。其中，秸秆整秆带状覆盖效果优于碎秆覆盖还田，可能与其半封闭式覆盖结构有利于雨水下渗有关。在土壤养分方面，秸秆碎秆覆盖还田显著提高土壤全氮含量，而地膜覆盖下土壤全氮含量无明显变化，这与卜玉山等<sup>[17]</sup>研究结果一致，这是由于秸秆覆盖能有效缓解因微生物分解而损失的土壤氮素<sup>[18]</sup>。秸秆覆盖后，通过

腐解作用产生的有机物质随雨水下渗，通过外源秸秆的投入激发土壤微生物有机物料的降解潜力，显著增加土壤有机碳含量<sup>[19]</sup>，其中以秸秆碎秆覆盖还田增幅最大(18.4%)，整秆覆盖次之(13.3%)，这与碎秆更易分解相关。秸秆碎秆覆盖还田显著增加全磷含量，这与秸秆覆盖后水热条件发生改变引起的磷活化有关<sup>[20]</sup>。速效养分的响应存在差异，本研究中秸秆覆盖能显著提高速效磷含量(9.6%~12.6%)，增加土壤磷素的生物有效性和利用效率<sup>[21]</sup>，而地膜覆盖下土壤速效磷含量略有下降，可能与覆膜减少雨水冲刷和侵蚀有关<sup>[22]</sup>。速效氮含量在秸秆覆盖下显著升高，而地膜覆盖较秸秆覆盖偏低，可能由于残膜导致土壤孔隙度增加、养分淋失加剧，从而降低了有效氮含量<sup>[23]</sup>。

本研究中，地膜覆盖和秸秆碎秆覆盖还田均能显著提高春小麦产量和生物量。与无覆盖相比，

地膜覆盖和秸秆碎秆覆盖还田分别增产 13.4% 和 18.2%，生物量分别提高 8.0% 和 7.4%。秸秆整秆带状覆盖生物量和产量均较秸秆碎秆覆盖还田显著下降。其减产主要受穗数影响，一方面由于覆盖带占据了部分土地面积，在种植带进行局部密植，缩小了株距，不利于根系发育，导致穗数减少、成穗率下降；另一方面，前期地温偏低亦可能造成苗势减弱和成活率下降，从而影响群体产量<sup>[24]</sup>。而秸秆碎秆覆盖还田通过增加表层土壤中的养分含量，促进作物对养分的吸收利用，从而提高作物产量<sup>[25]</sup>。

### 3.2 不同覆盖措施对土壤酶活性及生态系统多功能性的影响

土壤酶在土壤养分循环中发挥着关键作用，参与有机质分解及养分转化，维持土壤养分的动态平衡。徐文等<sup>[2]</sup>发现，在黄土高原北部，秸秆覆盖和地膜覆盖措施显著促进 C、N、P 循环胞外酶活性，增幅分别为 21.0%~161.1%、1.1%~60.7% 和 17.6%~37.7%，其中秸秆覆盖效果更为显著。土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、半纤维素酶和纤维素酶是与土壤碳代谢密切相关的水解酶。马立晓等<sup>[26]</sup>通过对中国土壤碳循环酶活性 Meta 分析发现，秸秆还田能够显著增加土壤碳循环酶活性。本研究中，秸秆碎秆覆盖还田显著提高碳循环相关酶活性，其中  $\beta$ -葡萄糖苷酶、半纤维素酶和纤维素酶活性分别较对照提高 66.7%、85.5% 和 73.1%，与王玉霞等<sup>[27]</sup>研究结果一致，这可能是因为秸秆快速降解后产生的水溶性化合物和易分解物质为胞外酶提供了充足的底物，使酶活性显著增加<sup>[28]</sup>。几丁质酶和亮氨酸氨基肽酶是与氮转化有关的水解酶，亮氨酸氨基肽酶可水解蛋白质，其活性可反映土壤氮的转化和供给情况。本研究结果表明，覆盖措施显著提高几丁质酶活性，秸秆碎秆覆盖还田显著提高亮氨酸氨基肽酶活性。可能是秸秆覆盖还田后，能被微生物利用的底物增加，增强微生物代谢活动，诱导微生物分泌更多的氮转化酶<sup>[29]</sup>。Li 等<sup>[30]</sup>研究表明，亮氨酸氨基肽酶在地膜覆盖下最高，原因在于地膜覆盖下土壤温度和水分含量较高，从而加剧了微生物与作物之间的养分竞争。本研究中，地膜覆盖虽提高了亮氨酸氨基肽酶活性，但不显著，可能与残膜效应改变微生物生理特征有关<sup>[31]</sup>。酸性磷酸酶是催化有机磷化合物矿化的酶，能将有机磷水解为无机磷，提高有效磷的含量<sup>[32]</sup>。秸秆碎秆覆盖还田显著提

高酸性磷酸酶活性(98.1%)，且秸秆覆盖后土壤速效磷的增加也验证了更多的酸性磷酸酶促使有机磷向无机磷的转化，进而改善了土壤磷素供给能力，促进作物养分吸收利用。

本研究结果表明，不同覆盖措施下土壤生态系统多功能性表现为 SR>PM>SM>CK。由于秸秆碎秆覆盖还田旋耕后与土壤充分混合，显著提高土壤 C、N 循环相关酶活性，增加了土壤碳输入，促进了微生物代谢活动，进而改善土壤生化过程，提升生态系统多功能性<sup>[33]</sup>。土壤生态系统多功能性与土壤全氮和全磷呈显著正相关，土壤 N、P 养分的利用会影响微生物的活动，并提高生物多样性<sup>[34]</sup>，从而驱动土壤多个功能<sup>[35]</sup>。高土壤生态多功能性通常伴随着高土壤养分状况和较好的微生物代谢特征<sup>[36]</sup>，反之，则会对土壤生态系统多功能性造成消极影响。地膜覆盖下的土壤生态系统多功能性和土壤酶活性均低于秸秆碎秆覆盖还田，可能是由于地膜对于土壤气体交换有所限制，不利于微生物的生长，使其作用效果低于秸秆碎秆覆盖还田。

## 4 结论

基于陇中旱作梯田定位试验发现，秸秆碎秆覆盖还田能显著提高土壤碳氮磷循环相关酶活性，促进土壤养分循环，增加土壤速效养分和全量养分含量，提高土壤生态多功能性和小麦产量。

### 参考文献:

- [1] 赵仰徽, 齐向辉, 任稳江, 等. 半干旱区雨养农田绿肥作物轮作休耕技术措施研究[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(1): 123. ZHAO Y H, QI X H, REN W J, et al. An approach to green manure crop rotation fallow techniques for rainfed farmland in semi-arid areas [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(1): 123.
- [2] 徐文, 郝嘉琪, 姜天宇, 等. 黄土高原长期覆盖措施下农田土壤酶活性与微生物养分限制的响应特征[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 1056. XU W, HAO J Q, JIANG T Y, et al. Response characteristics of farmland soil enzyme activity and microbial nutrient restriction under long-term mulching measures in the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2): 1056.
- [3] 戴伊莎, 成欣, 刘帮艳, 等. 秸秆和紫云英协同覆盖对西南旱地土壤养分、酶活性及小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1339. DAI Y S, CHENG X, LIU B Y, et al. Impacts of synergistic mulching of straw and milk vetch on soil nutrients, enzyme activities and wheat yield in upland of southwest China [J]. *Chi-*

- nese Journal of Soil Science, 2021, 52(6): 1339.
- [4] 王平, 陈娟, 谢成俊, 等. 干旱地区覆盖方式对土壤养分及马铃薯产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 118.  
WANG P, CHEN J, XIE C J, et al. Effects of different covering modes on soil nutrient and potato (*Solanum tuberosum* L.) yield in arid areas [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4): 118.
- [5] ZHANG S L, WANG J Q, HAO X H. Fertilization accelerates the decomposition of microplastics in mollisols [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137950.
- [6] 曹婷婷, 郭振. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究进展[J]. 农业科学, 2019, 9(6): 444.  
CAO T T, GUO Z. Research advance of the relationship between soil enzyme activity and soil fertility in forest land [J]. *Hans Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 9(6): 444.
- [7] 黄炳林, 王孟雪, 金喜军, 等. 不同耕作处理对土壤微生物、酶活性及养分的影响[J]. 作物杂志, 2019, 35(6): 104.  
HUANG B L, WANG M X, JIN X J, et al. Effects of different tillage treatments on soil microorganisms, enzyme activities and nutrients [J]. *Crops*, 2019, 35(6): 104.
- [8] CHEN H Q, LIANG Q, GONG Y S, et al. Reduced tillage and increased residue retention increase enzyme activity and carbon and nitrogen concentrations in soil particle size fractions in a long-term field experiment on Loess Plateau in China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104296.
- [9] 白雪, 周怀平, 解文艳, 等. 不同类型地膜覆盖对玉米农田土壤酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 385.  
BAI X, ZHOU H P, XIE W Y, et al. Effects of different plastic film mulching on soil enzyme activity in maize farmland [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 385.
- [10] WAGG C, BENDER S F, WIDMER F, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(14): 5266.
- [11] 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 等. 土壤多功能性对微生物多样性降低的响应[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5275.  
CHEN G X, WU C F, GE T D, et al. Response of soil multifunctionality to reduced microbial diversity [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5275.
- [12] FAN K K, DELGADO-BAQUERIZO M, ZHU Y G, et al. Crop production correlates with soil multitrophic communities at the large spatial scale [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151: 108047.
- [13] LI K L, ZHANG H Y, LI X L, et al. Field management practices drive ecosystem multifunctionality in a smallholder-dominated agricultural system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 313: 107389.
- [14] 杨慧敏, 王涛, 窦瑛霞, 等. 不同降水年型地膜覆盖及秸秆覆盖提高小麦产量和氮素利用的效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 1906.  
YANG H M, WANG T, DOU Y X, et al. Effects of plastic film mulching and straw mulching on wheat yield and nitrogen utilization during different precipitation years [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11): 1906.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] 张丽华, 徐晨, 闫伟平, 等. 半干旱区地表覆盖方式对土壤水温效应及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 180.  
ZHANG L H, XU C, YAN W P, et al. Effects of surface mulching on soil water and temperature efficiency and maize yield in semi-arid area [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2): 180.
- [17] 卜玉山, 邵海林, 王建程, 等. 秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 325.  
BU Y S, SHAO H L, WANG J C, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen in plowed layer of spring corn and spring wheat fields mulched with straw and plastic film [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 325.
- [18] 王钰皓, 庞津雯, 杨佳霖, 等. 不同覆盖方式对旱作农田土壤碳氮含量及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 28.  
WANG Y H, PANG J W, YANG J L, et al. Effects of different mulching methods on soil carbon and nitrogen content and maize yield in semiarid farmland [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 28.
- [19] 王根林, 段衍, 刘峥宇, 等. 秸秆覆盖休耕对土壤 C、N、P 循环功能基因的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 330.  
WANG G L, DUAN Y, LIU Z Y, et al. Effects on carbon, nitrogen, and phosphorus cycling functional genes under straw mulching and fallow cultivation [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 330.
- [20] 李千雪, 李春越, 张文婷, 等. 秸秆覆盖还田保护性耕作对黄土旱塬土壤磷素组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 374.  
LI Q X, LI C Y, ZHANG W T, et al. Effects of conservation tillage with straw mulching on soil phosphorus components in the Loess Plateau [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 374.
- [21] SHENG H J, NIU D, SUN G Y, et al. Research progress of effect of direct straw returning on soil microorganism, physical and chemical characteristics and enzyme activities [J]. *Hans Journal of Soil Science*, 2016, 4(2): 23.
- [22] 蒋锐, 郭升, 马德帝. 旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 322.  
JIANG R, GUO S, MA D D. Review of plastic film mulching system and its impact on soil ecological environment in China's rainfed drylands [J]. *Chinese Journal of Eco-Agri-*

- culture*, 2018, 26(3):322.
- [23]胡志娥,肖谋良,王双,等.地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响[J].环境科学,2022,43(3):1654.  
HU Z E, XIAO M L, WANG S, *et al.* Effects of plastic mulch film on soil nutrients and ecological enzyme stoichiometry in farmland [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1654.
- [24]程宏波,柴守玺,陈玉章,等.西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应[J].生态学报,2015,35(19):6324.  
CHENG H B, CHAI S X, CHEN Y Z, *et al.* Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in rainfed agricultural areas of northwestern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19):6324.
- [25]LIU J, FANG L C, QIU T Y, *et al.* Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: A global meta-analysis [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(6):78.
- [26]马立晓,李婧,邹智超,等.免耕和秸秆还田对我国土壤碳循环酶活性影响的荟萃分析[J].中国农业科学,2021,54(9):1913.  
MA L X, LI J, ZOU Z C, *et al.* Effects of No-tillage and straw returning on soil C-cycling enzyme activities in China: Meta-analysis [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(9):1913.
- [27]王玉霞,刘耀峰,鱼小军.不同覆盖模式对陇中干旱区扁蓿豆草地土壤酶活性的影响[J].草原与草坪,2022,42(1):108.  
WANG Y X, LIU Y F, YU X J. Effects of different mulching patterns on soil enzyme activities of *Medicago ruthenica* grassland in arid area of central Gansu [J]. *Grassland and Turf*, 2022, 42(1):108.
- [28]刘子熙,王治统,赵德强,等.土壤增温和秸秆还田对土壤养分和胞外酶活性的影响[J].生态学报,2023,43(23):9874.  
LIU Z X, WANG Z T, ZHAO D Q, *et al.* Effects of soil warming and straw return on soil nutrients and extracellular enzyme activities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9874.
- [29]王妙芬,梁美美,杨庆,等.秸秆及其生物炭添加对土壤酶活性的影响[J].福建农业科技,2021,52(7):16.  
WANG M F, LIANG M M, YANG Q, *et al.* Effects of the addition of straw and biochar on the activities of soil enzyme [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2021, 52(7):16.
- [30]LI Y, ZHANG X C, YANG N, *et al.* Long-term straw and plastic film mulching have divergent effects on maize rhizosphere enzyme activity and bacterial community structure [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 364: 108894.
- [31]张美,刘金铜,付同刚,等.农田残留地膜累积生态效应研究进展[J].生态毒理学报,2023,18(3):227.  
ZHANG M, LIU J T, FU T G, *et al.* Review on cumulative ecological effects of mulching film residues in farmland [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2023, 18(3):227.
- [32]王俊华,尹睿,张华勇,等.长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J].生态环境,2007,16(1):193.  
WANG J H, YIN R, ZHANG H Y, *et al.* Changes in soil enzyme activities, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1):193.
- [33]HAN Z Q, XU P S, LI Z T, *et al.* Microbial diversity and the abundance of keystone species drive the response of soil multifunctionality to organic substitution and biochar amendment in a tea plantation [J]. *GCB Bioenergy*, 2022, 14(4): 493.
- [34]TIEMANN L K, BILLINGS S A. Changes in variability of soil moisture alter microbial community C and N resource use [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9):1847.
- [35]CHEN Q L, DING J, ZHU D, *et al.* Rare microbial taxa as the major drivers of ecosystem multifunctionality in long-term fertilized soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 141:107686.
- [36]YANG R Z, YANG Z, YANG S L, *et al.* Nitrogen inhibitors improve soil ecosystem multifunctionality by enhancing soil quality and alleviating microbial nitrogen limitation [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 880:163238.