

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.03.007

# 不同保水剂及覆盖材料对西南旱作农田土壤特性和油菜生长的影响

宋稳锋, 王志远, 吴心瑶, 任可, 刘铭,  
甄雨卓, 宋李霞, 刘超计, 王龙昌

西南大学 农学与生物科技学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室/南方山地农业教育部工程研究中心, 重庆 400715

**摘要:** 为应对西南旱作农田耕地质量下降、水土流失严重等问题, 通过田间小区试验, 以不施加保水剂+无覆盖处理(A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>)为对照, 探索不同保水剂: 不施加保水剂(A<sub>1</sub>)、常规农用保水剂(A<sub>2</sub>)、微生物保水剂(A<sub>3</sub>), 不同覆盖材料: 无覆盖(B<sub>1</sub>)、地膜覆盖(B<sub>2</sub>)、秸秆覆盖(B<sub>3</sub>)处理下对土壤特性的影响。结果表明, 油菜花期以前不同覆盖处理配施保水剂能有效提高0~20 cm土层含水量, 生长后期秸秆覆盖处理的保水效果减弱; 不同覆盖处理配施保水剂可以显著提高土壤养分含量, 其中A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理的土壤碱解氮、有机质质量分数较对照处理显著提高了12.93%和45.79%, A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>处理的土壤速效磷质量分数较对照处理显著提高了12.97%; A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>及A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>处理显著提高土壤蔗糖酶活性, 各处理对过氧化氢酶活性无显著影响; 通过Biolog-ECO培养发现A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>及A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理能够显著提高土壤微生物碳源代谢活性(AWCD), A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理下土壤微生物对胺类碳源、氨基酸类碳源的利用率较对照处理显著提高了48.53%和33.94%, 丰富度指数(R)、香农指数(H)和优势度指数(D)均在A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理下达到峰值; A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理下的油菜株高, 地上部、地下部干物质质量及油菜产量显著高于对照处理。综合而言, 不同覆盖材料及保水剂对土壤特性有积极影响, 地膜覆盖配施微生物保水剂处理(A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>)能够显著改善土壤含水量和土壤养分状况, 提高土壤酶及微生物活性, 有利于油菜的生长和产量的增加, 适宜在西南旱作区推广应用。

**关键词:** 西南旱作农田; 保水剂; 覆盖材料; 土壤特性;

油菜生长

中图分类号: S154.1; S157.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)03-0088-12

## Effects of Different Water Retaining Agents and Mulching Materials on Soil Characteristics of Dry Farmland and Growth of Rapeseed in Southwest China

SONG Wenfeng, WANG Zhiyuan, WU Xinyao,  
REN Ke, LIU Ming, ZHEN Yuzhuo, SONG Lixia,

收稿日期: 2022-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871583); 国家公益性行业(农业)科研专项(201503127); 西南大学大学生创新创业训练计划项目(S20211063530)。

作者简介: 宋稳锋, 硕士研究生, 主要从事农田土壤生态研究。

通信作者: 王龙昌, 教授, 博士研究生导师。

## LIU Chaoji, WANG Longchang

College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University/Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education/Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In order to cope with the problems of the decline in the quality of cultivated land and serious soil erosion of dryland farmland in southwest China, through the field plot experiment, with no application of water-retaining agent + no mulching treatment ( $A_1B_1$ ) as a control, the treatments of different water-retaining agents of no application of water-retaining agent ( $A_1$ ), conventional agricultural water-retaining agent ( $A_2$ ), microorganisms water retention agent ( $A_3$ ), combined with different mulching materials of no mulching ( $B_1$ ), plastic film mulching ( $B_2$ ), straw mulching ( $B_3$ ) were explored for their effects on soil characteristics and rapeseed plant growth. The results showed that different mulching treatments combined with water-retaining agent can effectively increase the water content of the 0—20 cm deep soil layer before the flowering stage of rapeseed, but the water-retaining effect of straw mulching treatment was weak in the later stage of growth. The mulching treatment combined with the application of water-retaining agent can significantly increase the soil nutrient content, among which the soil alkaline hydrolyzed nitrogen and organic matter in the  $A_3B_2$  treatment were significantly increased by 12.93% and 45.79% compared with the control, and the soil available phosphorus in the  $A_3B_3$  treatment was significantly increased by 12.97% compared with the control.  $A_3B_2$  treatment and  $A_2B_3$  treatment significantly increased soil invertase activity, but no any treatment had significant effect on catalase activity. It was found by Biolog-ECO culture that  $A_2B_1$  and  $A_3B_2$  treatments could significantly increase soil microbial carbon source metabolic activity (AWCD). The utilization rate of amine carbon sources and amino acid carbon sources by soil microorganisms under  $A_3B_2$  treatment was significantly increased by 48.53% and 33.94%, respectively, compared with the control, and the Richness index ( $R$ ), Shannon-Wiener index ( $H$ ) and Simpson index ( $D$ ) reached to their peaks under  $A_3B_2$  treatment. The plant height, aboveground dry matter weight, underground dry matter weight and yield of rapeseed under  $A_3B_2$  treatment were significantly higher than those of under control treatment. In conclusion, different mulching materials and water-retaining agents have positive effects on soil properties, and the treatment of mulching with microbial water-retaining agent ( $A_3B_2$ ) can significantly improve soil water content and soil nutrients, and increase soil enzymes and microbial activities. So, it is beneficial to the growth of rapeseed and yield increase, and it is suitable to popularize and apply in dry farming areas of southwest China.

**Key words:** dryland farmland in southwest China; water-retaining agent; mulching materials; soil characteristics; growth of rapeseed

西南地区生物种类和生态系统丰富多样,具有适宜农业生产的自然资源及生态环境<sup>[1]</sup>,但由于全区近95%的土地为山地丘陵,山高坡陡、地块分散的耕地类型使得地表物质稳定性差、水土流失严重<sup>[2]</sup>,高岩红等<sup>[3]</sup>对渝西南典型紫色土农田有机碳密度的调查研究发现,其有机碳密度仅为 $2.49\text{ kg/m}^2$ ,远低于全国的平均水平 $3.15\text{ kg/m}^2$ .此外,西南地区特殊的地理地形和环境气候,造成降雨时空分布不均,表现出明显的季节性干旱和区域性干旱<sup>[4]</sup>.旱作农田是西南地区农业生产的重要生产基础,因此在雨养型农业区,提高土壤水分利用率及土壤肥力是提高作物产量的关键所在.

地膜覆盖和秸秆覆盖是两种较为经典的集雨抑蒸、保墒保肥的耕作措施.研究表明,地膜覆盖和秸秆覆盖可以改善土壤水分状况<sup>[5-7]</sup>,地表秸秆覆盖是土壤外源碳的输入方式,有利于增加土壤有机碳<sup>[8]</sup>,提高土壤肥力,减少养分的流失<sup>[9-10]</sup>.保水剂是一种高分子聚合物,它能够利用反复吸水和释水的特性减少水分蒸发和促进降水下渗<sup>[11-12]</sup>.马征等<sup>[13]</sup>、白岗栓等<sup>[14]</sup>和王琰等<sup>[15]</sup>研究发现保水剂能够增加土壤孔隙度,

改善土壤团粒结构, 增强土壤团聚体对养分的吸收及固持能力, 提高土壤微生物活性, 从而促进植物的生长发育. 施用保水剂及添加覆盖材料是应对土壤干旱的有效措施, 然而在极度干旱的条件下, 施用单一保水剂可能造成水分竞争现象, 反而不利于作物生长<sup>[12,16]</sup>, 此外, 单一地膜覆盖也会造成作物生长后期脱水、脱肥<sup>[17]</sup>, 将保水剂与其他农艺措施结合起来可能是消除这种弊端的有效途径, 从而可以更好地维护土壤健康和农田生态环境<sup>[18]</sup>. 基于此, 本研究以西南旱地油菜为研究对象, 探索不同保水剂与不同覆盖材料及其组合处理对农田土壤特性及油菜生长的影响, 并基于 Biolog-ECO 生态板法, 阐明微生物群落功能与不同处理之间的响应关系, 为解决西南旱区水资源、养分利用问题提供理论依据, 同时为该地区农业可持续发展奠定基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2018 年 10 月至 2019 年 5 月在重庆市云阳县宝坪镇江南村试验地(108°54'E, 30°55'N)进行. 试验地土壤类型为紫色土, 试验区前茬作物为高粱, 试验前土壤有机质质量分数为 18.3 g/kg, 全氮、全磷、全钾质量分数分别为 0.79, 0.57, 14.96 g/kg, 碱解氮、速效磷、速效钾质量分数分别为 84.00, 5.68, 188.03 mg/kg, 试验期间气象数据如图 1 所示.

### 1.2 试验设计

试验采用 3×3 双因素随机区组设计. A 因素为不同保水剂添加处理: 不加保水剂、常规农用保水剂(吸水性树脂, 产自日本触媒公司, 施用量为 22.50 kg/hm<sup>2</sup>)、微生物保水剂(长沙圣华科技发展有限公司, 施用量为 22.50 kg/hm<sup>2</sup>); B 因素为不同覆盖处理: 不覆盖、黑色地膜覆盖(厚度为 0.006 mm, 宽度为 60 cm, 起垄覆盖, 垄沟比 40:40)、秸秆覆盖(高粱秸秆, 用量为 7 500 kg/hm<sup>2</sup>). 试验共设计 9 个处理, 分别为不施加保水剂+无覆盖(A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>)、单一地膜覆盖(A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>)、单一秸秆覆盖(A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>)、单施常规农用保水剂(A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>)、地膜覆盖配施常规农用保水剂(A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>)、秸秆覆盖配施常规农用保水剂(A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>)、单施微生物保水剂(A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>)、地膜覆盖配施微生物保水剂(A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>)、秸秆覆盖配施微生物保水剂(A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>), 各小区随机排列, 每个处理 3 次重复, 共计 27 个小区, 小区面积 16 m<sup>2</sup>(4 m×4 m).

供试作物为油菜(*Brassica napus* L.), 品种为“渝油 28”, 2018 年 10 月 18 日播种, 2019 年 5 月 6 日收获. 各处理播种密度均为 150 000 株/hm<sup>2</sup>(行距 40 cm, 株距 33.3 cm), 将“宜施壮”缓释型油菜专用配方肥(N:P:K=25:7:8)作为基肥全部穴施, 按纯氮量 225 kg/hm<sup>2</sup> 施入, 保水剂按 22.50 kg/hm<sup>2</sup> 与细土混合, 均匀撒入播种穴内, 播种后用土将穴填平. 大区四周设置保护行, 生育期内不灌水, 其他管理操作同当地常规耕作方式.

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 植株生长指标的测定

于成熟期在每个小区随机选取具有代表性的植株 4 株, 用剪刀沿根茎分割部位剪断, 收集地上部, 根部采用挖掘法小心挖出, 装入尼龙网带. 用卷尺测量油菜的株高(根茎分割处到生长点), 游标卡尺测量茎粗, 将每个小区的油菜植株全部采收脱粒, 晾干后称质量测产.

#### 1.3.2 土壤样品的采集与测定

采用五点取样法钻取 0~20 cm 土层土壤(含水量测定于油菜各生育时期内钻取的土样), 自然风干后

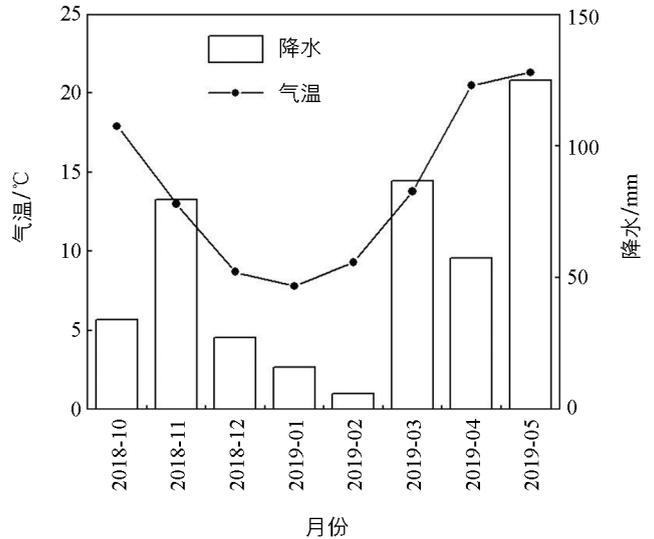


图 1 油菜生育期内各月份的气温与降水

研磨过筛;在油菜成熟期取根际土壤样品,将植株根系用铁铲从土壤中挖出,慢慢抖掉与根系结合比较松散的土壤,然后用经火焰灭菌的镊子刮取附着在作物根系上的薄层土壤(<10 mm)作为根际土壤,按四分法取样,除去杂物后迅速过2 mm筛,于4℃冰箱保存,用于土壤微生物的测定。

土壤水分与土壤养分含量测定参照鲍士旦<sup>[19]</sup>方法:土壤含水量采用铝盒烘干法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散吸收法测定;土壤有效磷采用0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>浸提,钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用1 mol/L NH<sub>4</sub>Ac浸提,原子吸收分光光度计法(AA-7000,日本岛津)测定;土壤有机质采用水合热法测定。土壤酶活测定参照关松荫<sup>[20]</sup>方法:蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定。

土壤微生物群落功能测定:采用Biolog-ECO生态板法,将土样放在25℃条件下活化24 h,取相当于10 g风干土质量的鲜土样于100 mL三角瓶中,加入100 mL经灭菌的氯化钠溶液(0.9 mol/L,下同),以200 r/min震荡30 min,静置2 min,取一定量上清液并用氯化钠溶液稀释至1 000倍,制备出接种液。用接种液接种Biolog-ECO生态板,接种量为150 μL,每样1板,每板3次重复。接种好的微孔板放入25℃恒温培养箱中培养240 h,每隔24 h使用Infinite M200 Pro(TECAN公司)多功能酶标仪测定吸光度。测定波长分别为590 nm(颜色+浊度)和750 nm(浊度)。微生物代谢活性用590 nm下的吸光度值减去750 nm下的吸光度值表示,其中数值小于0.06时按0处理。相关计算公式如下<sup>[21-22]</sup>。

(1) 孔的平均颜色变化率(Average Well Color Development, AWCD):

$$A_{AWCD} = \frac{\sum(C_i - R)}{n}$$

式中: $C_i$ 为第*i*个非对照孔的吸光值; $R$ 为对照孔的吸光值; $n$ 为培养基碳源种类数( $n=31$ )。

(2) Richness 丰富度指数( $R$ ),指被利用的碳源总数目,本研究中为每孔中( $C_i - R$ )的值大于0.25的孔数。

(3) Shannon-Wiener 香农指数( $H$ ):

$$H = - \sum(P_i \cdot \ln P_i)$$

式中: $P_i$ 为第*i*个非对照孔中的吸光值与所有非对照孔吸光值总和的比值,即

$$P_i = (C_i - R) / \sum(C_i - R)$$

(4) Simpson 优势度指数( $D$ ):

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

(5) Pielou 均匀度指数( $J$ ):

$$J = H / \ln R$$

式中: $R$ 为被利用的碳源总数。

## 1.4 数据统计与分析

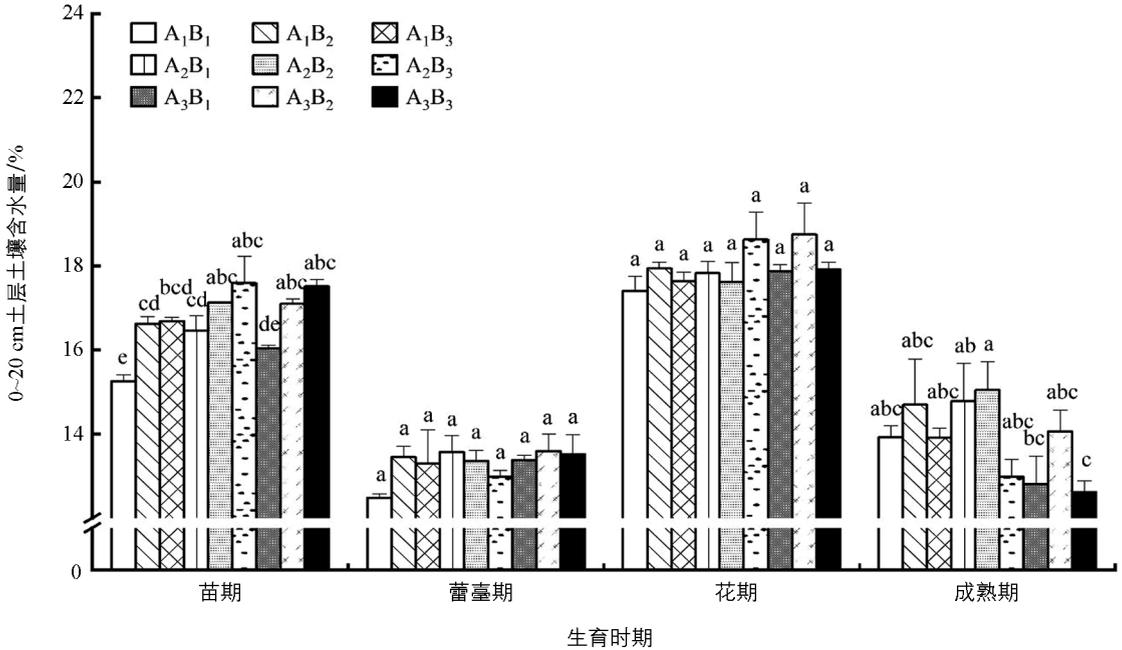
用Microsoft Excel 2019进行数据统计分析,用SPSS 18.0统计软件中的General Linear Model进行单因变量方差分析,多重比较采用Duncan新复极差法,用Origin 2022软件进行主成分分析及图形绘制。本研究数据结果均采用3次重复的平均值±标准误差的形式呈现,各处理在 $p < 0.05$ 水平差异有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同保水剂及覆盖材料对土壤含水量的影响

在油菜整个生育期内,0~20 cm土层土壤含水量整体表现为先下降后升高再降低的趋势,花期前各处理下的土壤含水量均大于对照处理(图2)。苗期时,除A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>处理外,其余处理土壤含水量显著高于对照处理;除A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>外,施用保水剂及添加覆盖材料的处理能提高土壤含水量,覆盖材料配施保水剂对土壤含水量的提升效果要优于单一保水剂或覆盖材料处理。蕾薹期时,各处理土壤含水量变化范围为12.48%~13.59%,A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理下土壤含水量最高,处理间差异无统计学意义。花期时,由于降水量较大,各处理的土

壤含水量均保持在较高水平,  $A_3B_2$  处理达到最高的 18.74%, 处理间差异无统计学意义. 成熟期时,  $A_2B_2$  处理的土壤含水量最高, 在相同保水剂水平下, 土壤含水量表现为  $B_2 > B_1 > B_3$ .



图中不同小写字母表示处理间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ), 下同.

图 2 不同处理下 0~20 cm 土层土壤含水量

## 2.2 不同保水剂及覆盖材料对土壤养分的影响

表 1 为成熟期土壤养分情况. 除  $A_1B_2$  处理外, 其余处理的土壤碱解氮质量分数均高于对照处理, 其中  $A_3B_2$  和  $A_2B_2$  处理的碱解氮质量分数相较于  $A_1B_1$  处理显著提高了 12.93%, 10.91%. 在相同覆盖条件下, 各处理的土壤碱解氮质量分数均表现为  $A_3 > A_2 > A_1$ , 地膜覆盖配施保水剂可以显著提高土壤碱解氮质量分数, 且微生物保水剂的效果要优于常规农用保水剂. 与碱解氮类似, 各处理的土壤速效磷质量分数均高于对照处理,  $A_3B_3$  和  $A_1B_3$  处理土壤速效磷质量分数较对照显著提高了 12.97%, 11.79%. 在相同保水剂处理条件下, 各处理土壤速效磷质量分数均表现为  $B_3 > B_2 > B_1$ .  $A_2B_3$  处理下的速效钾质量分数最高, 显著高于  $A_2B_2$ ,  $A_3B_1$ ,  $A_3B_2$  处理, 和其他处理差异无统计学意义. 保水剂及覆盖材料处理对土壤速效钾质量分数的影响不大. 除  $A_1B_2$ ,  $A_2B_1$  处理外, 其他处理土壤有机质质量分数均显著高于对照处理, 其中  $A_3B_2$  处理最高, 增幅达 45.79%.

表 1 成熟期土壤养分

处理	碱解氮/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效钾/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机质/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
$A_1B_1$	86.78 ± 4.22bc	5.37 ± 0.11b	143.46 ± 1.41ab	17.38 ± 0.66c
$A_1B_2$	85.75 ± 4.21c	5.69 ± 0.14ab	152.62 ± 17.62ab	17.40 ± 0.94c
$A_1B_3$	87.29 ± 3.87bc	6.00 ± 0.46a	183.68 ± 13.86ab	21.87 ± 0.78ab
$A_2B_1$	89.83 ± 12.83abc	5.55 ± 0.33ab	156.46 ± 34.41ab	20.23 ± 1.50bc
$A_2B_2$	96.25 ± 6.31a	5.64 ± 0.09ab	150.84 ± 21.87b	21.43 ± 1.43ab
$A_2B_3$	93.33 ± 3.5abc	5.95 ± 0.24ab	188.83 ± 7.51a	21.47 ± 2.32ab
$A_3B_1$	90.03 ± 4.04abc	5.62 ± 0.13ab	132.99 ± 11.05b	23.10 ± 0.06ab
$A_3B_2$	98.00 ± 3.50a	5.86 ± 0.20ab	135.65 ± 0.81b	25.37 ± 1.07a
$A_3B_3$	94.50 ± 8.08ab	6.07 ± 0.25a	179.31 ± 20.76ab	22.20 ± 1.64ab

注: 同列数字后不同小写字母表示处理间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ), 下同.

## 2.3 不同保水剂及覆盖材料对土壤酶活性的影响

不同处理下的蔗糖酶活性均高于对照组(表 2), 其中  $A_3B_2$ ,  $A_2B_3$  处理较对照显著提升了 40.99%,

35.76%。在同一覆盖处理下, 蔗糖酶活性表现为  $A_3B_1 > A_2B_1 > A_1B_1$ ,  $A_3B_2 > A_2B_2 > A_1B_2$ ,  $A_2B_3 > A_1B_3 > A_3B_3$ , 其中  $A_3B_2$  处理显著高于  $A_1B_2$  处理, 说明保水剂的施用有利于提高土壤蔗糖酶活性, 在地膜覆盖条件下效果显著; 在同一保水剂处理条件下, 蔗糖酶活性分别表现为  $A_1B_3 > A_1B_2 > A_1B_1$ ,  $A_2B_3 > A_2B_2 > A_2B_1$ ,  $A_3B_2 > A_3B_1 > A_3B_3$ , 其中  $A_3B_2$  处理显著高于  $A_3B_3$  处理. 各处理之间的土壤过氧化氢酶活性差异无统计学意义.

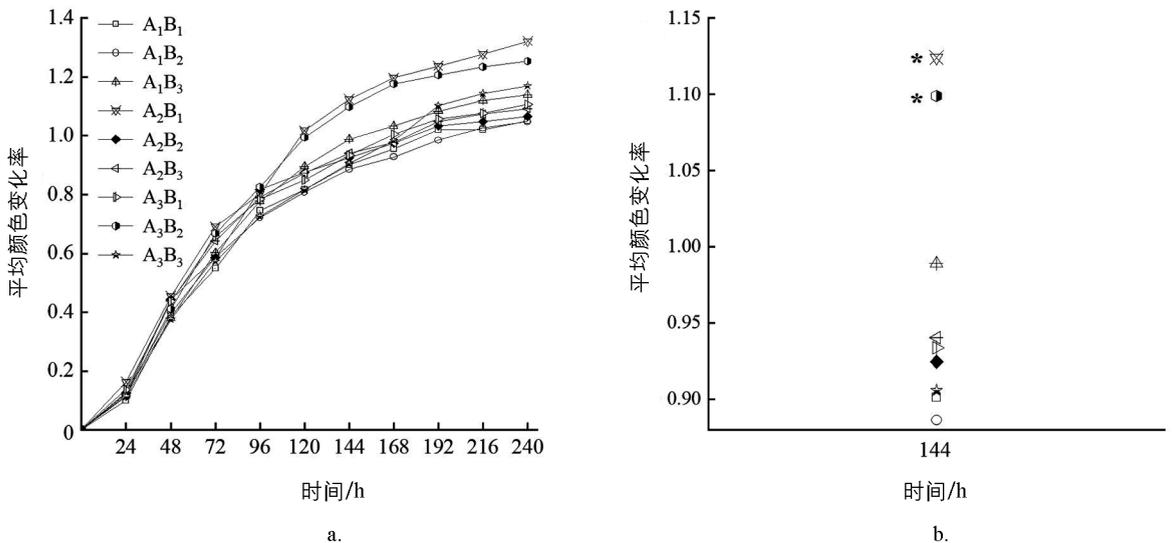
表 2 不同处理下的土壤酶活性

处理	土壤蔗糖酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	土壤过氧化氢酶/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )
$A_1B_1$	$23.32 \pm 0.71\text{c}$	$0.01564 \pm 0.00025\text{a}$
$A_1B_2$	$25.18 \pm 0.47\text{c}$	$0.01531 \pm 0.00050\text{a}$
$A_1B_3$	$27.65 \pm 3.27\text{abc}$	$0.01580 \pm 0.00020\text{a}$
$A_2B_1$	$24.19 \pm 1.75\text{c}$	$0.01534 \pm 0.00015\text{a}$
$A_2B_2$	$27.64 \pm 2.43\text{abc}$	$0.01570 \pm 0.00010\text{a}$
$A_2B_3$	$31.66 \pm 0.78\text{ab}$	$0.01570 \pm 0.00010\text{a}$
$A_3B_1$	$27.31 \pm 2.17\text{abc}$	$0.01537 \pm 0.00005\text{a}$
$A_3B_2$	$32.88 \pm 0.91\text{a}$	$0.01557 \pm 0.00025\text{a}$
$A_3B_3$	$26.03 \pm 1.14\text{bc}$	$0.01541 \pm 0.00025\text{a}$

## 2.4 不同保水剂及覆盖材料对土壤微生物的影响

### 2.4.1 AWCD 变化

随着培养时间的增加, 各处理的土壤微生物活性不断升高(图 3a). 从培养 24 h 起, AWCD 值迅速升高, 144 h 以后颜色变化趋于平缓, 此时, 除  $A_1B_2$  处理外, 各处理下的土壤微生物 AWCD 值相较于对照处理有不同程度的提高, 其中  $A_2B_1$  和  $A_3B_2$  处理较对照处理显著提高了 24.72% 和 21.91%(图 3b). 对不同处理根际土壤培养 144 h 后各碳源 AWCD 值进行主成分分析, 从 31 种碳源中提取 6 个主成分因子, 其占比分别为 43.15%, 15.76%, 10.71%, 8.98%, 6.94% 和 5.84%, 累计方差贡献率为 91.38%, 可以基本表征不同处理下土壤中微生物的碳源利用特征. 选取占比较大的 PC1 和 PC2 作图(图 4), 结果显示,  $A_2B_1$  处理的综合得分最高,  $A_3B_2$  处理次之, 且所有处理综合得分均高于对照处理, 表明施加保水剂和覆盖处理均能影响土壤微生物的碳源利用率.



图中“\*”代表处理与对照间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ).

图 3 不同处理 AWCD 的变化

### 2.4.2 不同类型碳源的利用差异

各处理下的胺类碳源的  $AWCD$  值相较于对照处理均有不同程度的提高(图 5a),  $A_3B_2$  处理显著高于对照处理, 增幅达 48.53%, 其余处理差异无统计学意义; 与胺类碳源类似, 施加保水剂及添加覆盖材料的各处理对氨基酸类碳源的利用强度均有提高, 与对照处理相比,  $A_2B_1, A_3B_2$  处理的  $AWCD$  值显著提高了 34.71% 和 33.94%, 无覆盖条件下,  $AWCD$  值表现为  $A_2 > A_3 > A_1$ , 其中  $A_2B_1$  显著高于  $A_1B_1$ , 地膜覆盖条件下表现为  $A_3 > A_2 > A_1$ , 且  $A_3B_2$  显著高于  $A_1B_2$ (图 5b); 对于糖类碳源, 各处理下的  $AWCD$  值变化规律与氨基酸类碳源表现基本一致, 但不覆盖、地膜覆盖、秸秆覆盖条件下的各处理间差异无统计学意义, 施加常规农用保水剂条件下,  $AWCD$  值表现为  $B_1 > B_3 > B_2$ , 且  $A_2B_1$  显著高于  $A_2B_2$ (图 5c); 对于羧酸类碳源,  $A_2B_1$  处理显著高于  $A_1B_2$  和  $A_3B_3$  处理, 其他处理与对照处理之间差异无统计学意义(图 5d); 对于双氢化合物类、聚合物类两类碳源, 各处理均高于对照(聚合物类  $A_1B_2$  处理除外), 且均以  $A_3B_2$  处理的  $AWCD$  值最高, 增幅分别为 49.15% 和 19.14%, 但处理间差异并无统计学意义(图 5e-5f).

### 2.4.3 微生物功能多样性指数

各处理的香农指数( $H$ )和优势度指数( $D$ )表现变化一致, 均表现为  $A_3B_2$  处理最高,  $A_3B_1$  处理最低(表 3), 其中  $A_3B_2 > A_3B_3 > A_3B_1$ , 且  $A_3B_2$  显著高于  $A_3B_1$ , 说明施加微生物保水剂情况下, 地膜覆盖可以提高土壤微生物的香农指数( $H$ )和优势度指数( $D$ ); 不同处理之间的丰富度指数( $R$ )和均匀度指数( $J$ )差异无统计学意义.

表 3 土壤微生物功能多样性指数

处理	丰富度指数( $R$ )	香农指数( $H$ )	优势度指数( $D$ )	均匀度指数( $J$ )
$A_1B_1$	$27.67 \pm 0.67a$	$3.28 \pm 0.02ab$	$0.9600 \pm 0.001ab$	$0.989 \pm 0.002a$
$A_1B_2$	$28.33 \pm 0.33a$	$3.30 \pm 0.01ab$	$0.9607 \pm 0.001ab$	$0.988 \pm 0.002a$
$A_1B_3$	$27.33 \pm 0.88a$	$3.28 \pm 0.30ab$	$0.9597 \pm 0.001ab$	$0.990 \pm 0.007a$
$A_2B_1$	$28.67 \pm 0.33a$	$3.31 \pm 0.01ab$	$0.9617 \pm 0.001ab$	$0.988 \pm 0.001a$
$A_2B_2$	$28.67 \pm 0.33a$	$3.31 \pm 0.01ab$	$0.9613 \pm 0.001ab$	$0.987 \pm 0.002a$
$A_2B_3$	$28.33 \pm 0.88a$	$3.28 \pm 0.01ab$	$0.9599 \pm 0.001ab$	$0.983 \pm 0.006a$
$A_3B_1$	$27.33 \pm 0.33a$	$3.27 \pm 0.02b$	$0.9590 \pm 0.001b$	$0.987 \pm 0.003a$
$A_3B_2$	$29.00 \pm 0.58a$	$3.32 \pm 0.01a$	$0.9622 \pm 0.001a$	$0.987 \pm 0.004a$
$A_3B_3$	$29.00 \pm 0.00a$	$3.29 \pm 0.01ab$	$0.9600 \pm 0.001ab$	$0.979 \pm 0.003a$

### 2.5 不同保水剂及覆盖材料对油菜生长和产量的影响

$A_3B_2, A_2B_2, A_3B_3$  处理下的油菜株高显著高于对照处理, 不同处理下的茎粗均大于对照处理, 但处理间差异无统计学意义, 油菜的地上及地下部分干质量均以  $A_3B_2$  处理最高, 且显著高于对照处理(表 4). 值得注意的是, 在相同保水剂处理中, 地膜覆盖处理下的地上部干物质质量要大于不覆盖及秸秆覆盖处理, 而这个规律在地下部干物质质量方面也基本成立.

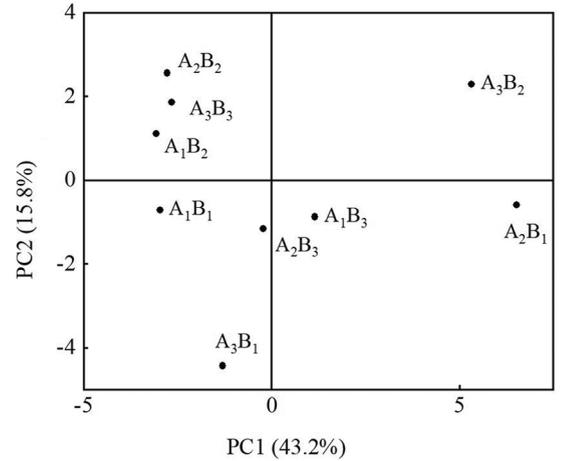


图 4 不同处理下土壤微生物碳源代谢主成分分析

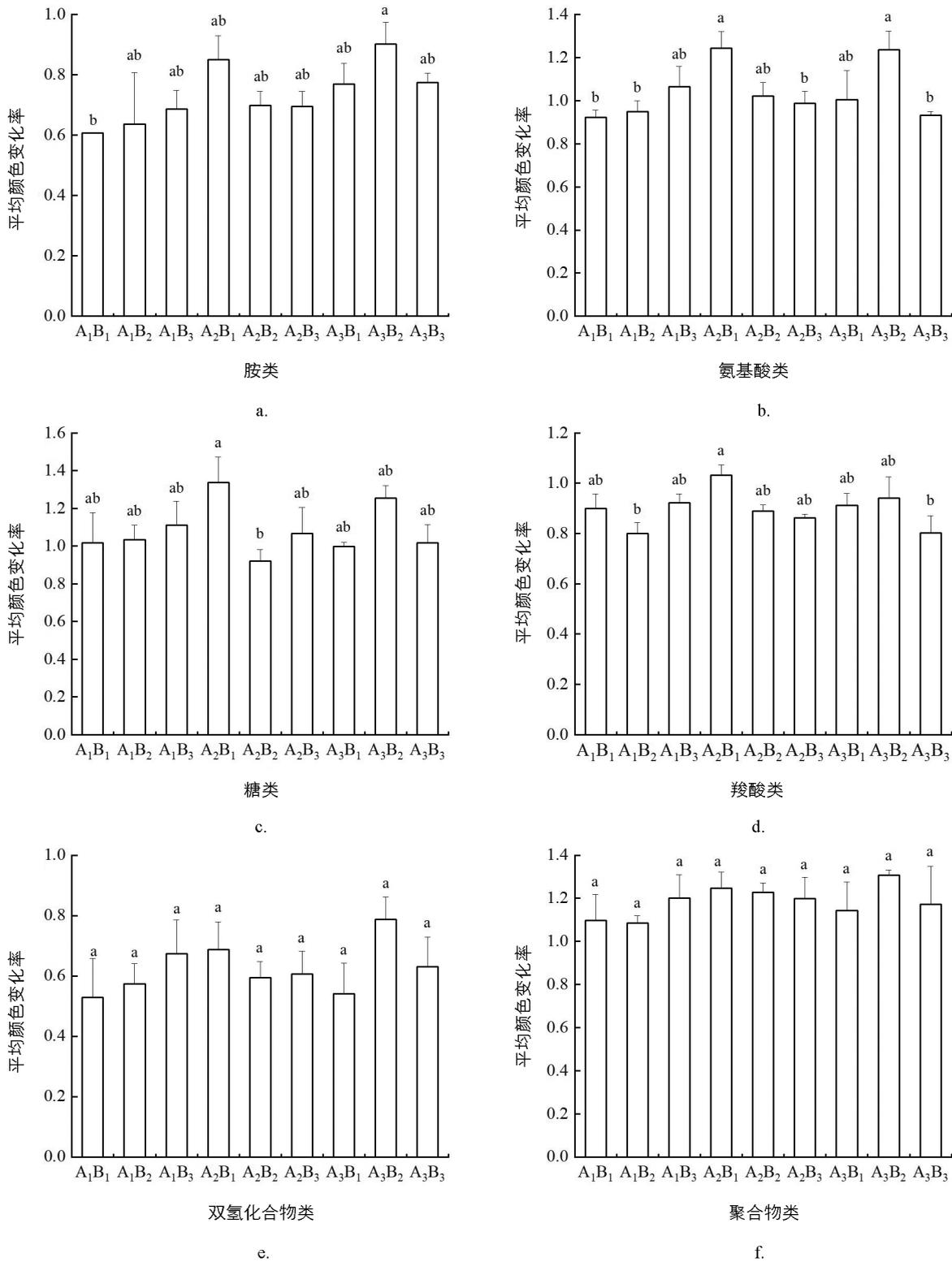


图 5 144 h 不同处理下微生物对 6 类碳源的利用率

由图 6 可以看出, 除去 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub> 处理后的油菜产量要低于对照 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub> 处理的油菜产量, 其余处理的油菜产量均高于对照组. 其中 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub> 处理下的油菜产量最高, A<sub>2</sub>B<sub>2</sub> 处理次之, 分别较对照处理显著提高 34.45% 和 24.88%.

表 4 成熟期油菜株高、茎粗及干物质质量

处理	株高/cm	茎粗/cm	地上部干物质质量/g	地下部干物质质量/g
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	137.9±3.75cd	15.28±0.8a	47.41±1.13bc	11.78±1.52b
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	148.3±3.39abc	17.92±1.08a	60.86±8.54ab	17.42±1.17ab
A <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	135.0±4.91d	15.93±0.98a	38.75±5.34c	14.46±3.19ab
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub>	143.9±2.75abcd	18.2±0.75a	52.03±3.85bc	16.64±1.47ab
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	152.1±3.53ab	18.25±0.76a	60.72±6.01ab	17.32±0.91ab
A <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	140.8±3.27bcd	17.36±0.79a	48.25±4.45bc	17.81±0.93a
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub>	141.0±4.08bcd	18.3±0.90a	43.38±5.30c	15.77±0.92ab
A <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	154.4±3.61a	18.44±0.58a	74.85±1.88a	19.78±0.17a
A <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	150.1±3.38ab	16.57±0.45a	47.13±2.25bc	15.36±2.71ab

### 3 讨论

相对于无覆盖的地表,地膜覆盖和秸秆覆盖处理避免了农田土壤直接暴露于空气中,地膜与秸秆形成的屏障截获土壤中蒸发的水汽,在地膜或秸秆上冷凝后再次回到土壤中,减少了水分散失<sup>[23]</sup>.保水剂是一种高分子聚合物,以其强的吸水、释水能力来增加土壤含水量<sup>[24]</sup>.本研究中,施用保水剂及添加覆盖材料的处理能提高0~20 cm土层土壤含水量,覆盖材料配施保水剂对土壤含水量的提升效果要优于单一保水剂或覆盖材料处理,但是在成熟期,秸秆覆盖处理下的土壤含水量却低于对照处

理,这是由于随着生育进程的推进,油菜自身冠层和植被覆盖度会增加,并且随着秸秆的腐解程度加深,其抑制水分蒸发的效果会减弱,秸秆覆盖对表层土壤含水量的影响变小<sup>[25]</sup>.此外秸秆覆盖的抑制蒸发的作用与降雨量有关,微降雨时期,部分雨水会被地表覆盖的秸秆截获和吸收,日间温度较高会加速雨水蒸发,一定程度上阻碍了雨水的下渗<sup>[26]</sup>.

研究表明,保水剂对土壤中的氮、磷、钾元素有较强的吸附作用,在调节土壤水分状况的同时,有效降低土壤养分流失<sup>[27]</sup>.徐媛等<sup>[28]</sup>的研究指出,地膜覆盖能够增加土壤速效氮、速效磷及有机质质量分数,有效地保持土壤养分.秸秆作为外来碳源,其矿化分解形成的营养元素首先会被土壤中的微生物转化为自身的生物量,随着微生物的死亡这部分营养很快被再次释放出来,增加了土壤中可以供植物吸收利用的养分源<sup>[29]</sup>,提高土壤肥力<sup>[30]</sup>.本研究中,地膜覆盖、秸秆覆盖和保水剂处理均能提高土壤中速效养分质量分数和有机质的质量分数,这与前人研究一致.在农田土壤中,无论是覆盖地膜还是有机物料秸秆,都可以减缓雨水对土壤的冲击,降低地表径流量<sup>[31]</sup>,这也避免了由于强降水而使土壤养分随雨水流失<sup>[10, 32]</sup>,其次,地表覆盖形成的隔离层有效地遏制了杂草种子及幼芽的萌发,削弱了杂草与作物之间的养分竞争<sup>[33]</sup>.

土壤中足够的养分供应是保证植物生长发育的前提条件,从本试验结果来看,施加保水剂和覆盖地膜处理有利于油菜的生长发育,地膜覆盖配施微生物保水剂处理显著提高了油菜株高及地上部、地下部干物质质量以及油菜籽粒产量.保水剂、地膜覆盖及秸秆覆盖缓和了作物生长发育过程中的水分供求矛盾,减少了土壤中的有效养分的流失,提高了作物的光合速率及干物质积累量<sup>[34]</sup>,增加了作物的产量<sup>[35-36]</sup>.而本研究中,秸秆覆盖处理下的油菜生长指标并未见提高,这可能由于前期秸秆覆盖处理不利于油菜的出苗,种子萌发到突破秸秆层的这段时间里,作物所吸收的光照不足,苗期的光合作用受到影响,一定程度上限制了油菜幼苗正常的生长发育,从而影响到了最终产量<sup>[37]</sup>.

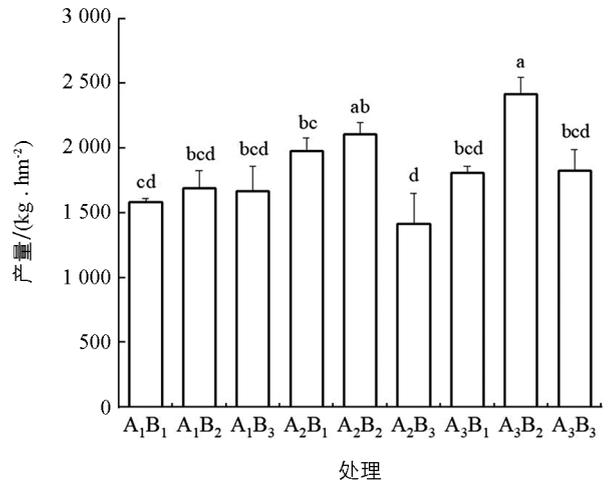


图 6 不同处理下的油菜产量

土壤酶活性可用作土壤肥力和微生物活性的指标<sup>[38]</sup>。大量研究表明,添加秸秆残留物可以激发土壤中各类催化反应,大幅提高矿化分解外源有机物关键酶的活性<sup>[39-41]</sup>。王静等<sup>[42]</sup>的研究表明,地膜覆盖种植能提高土壤中过氧化氢酶、蔗糖酶等酶的活性,但吴宏亮等<sup>[43]</sup>的研究却发现,地膜覆盖处理对过氧化氢酶活性并无显著影响。保水剂以其蓄水保墒特性,对土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶等的合成具有显著促进作用<sup>[44]</sup>,微生物保水剂中复合的微生物菌种,有利于土壤胞外酶的产生<sup>[45]</sup>。本研究中,各处理对于土壤过氧化氢酶活性无明显影响,这与吴宏亮等<sup>[43]</sup>的研究类似,保水剂、秸秆覆盖和地膜覆盖处理均有利于提高土壤蔗糖酶活性,当地膜覆盖配施微生物保水剂时,土壤蔗糖酶活性的提升效果显著,但秸秆覆盖配施微生物保水剂处理的效果不佳,这可能与不同类型保水剂与秸秆之间的交互作用以及土壤环境中水热因子的变化相关<sup>[46]</sup>,具体原因有待进一步探究。

地膜覆盖通过改变土壤水热条件,促进土壤微生物的生长繁殖,提高微生物活性<sup>[47]</sup>;Govaerts等<sup>[48]</sup>研究指出秸秆覆盖处理下的土壤微生物群落丰富度和多样性指数均显著高于无覆盖处理,Zhang等<sup>[49]</sup>的试验将传统地膜覆盖与秸秆覆盖处理相结合,发现二者协同覆盖不仅可以显著增加土壤真菌数量,还能够缓解单一地膜覆盖对土壤有机质的过度消耗;Zhang等<sup>[50]</sup>的试验表明,生物肥料与高吸水聚合物混施对于提高土壤微生物量、种群数量有一定的促进作用。ECO微平板检测获得的AWCD值提供不同微生物对相同碳源的利用情况,反映了微生物对碳源的利用能力,从功能代谢方面显示了微生物群落功能多样性,可用于描述土壤微生物代谢活性<sup>[51]</sup>。

本实验中,A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>和A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理的AWCD值显著高于对照处理,不同保水剂和覆盖材料处理对微生物的代谢活性产生了显著影响,丰富度指数、香农指数和优势度指数均在A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理达到峰值,说明A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理可以驱动微生物群落结构的正向调节,但这种促进作用并未对微生物多样性产生显著影响;本研究结果中,秸秆覆盖处理下的微生物丰富度与对照处理差异无统计学意义,这与前人的结论不一致,主要原因可能是:土壤干旱影响土壤孔隙间气体交换<sup>[52]</sup>,微生物对气体利用率降低导致短期内的代谢活性受阻<sup>[53]</sup>,进而影响微生物丰富度<sup>[54]</sup>;土壤微生物参与的秸秆腐解过程本身需要养分供应,这可能会造成其与微生物保水剂中微生物群的养分存在竞争现象<sup>[55]</sup>。同时,秸秆覆盖处理后期土壤含水量偏低,恶化了土壤中微生物的生存环境。此外,本研究还发现,A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>处理下微生物对胺类、氨基酸类碳源的利用率明显提高,偏好胺类、氨基酸类的微生物种群得到富集<sup>[21]</sup>,这可能是油菜根际分泌物构成的异质性所致<sup>[56]</sup>,胺类碳源大多数由氨基酸脱羧而成,根系通过增加分泌胺类、氨基酸类碳源诱导微生物转化更多的氮素养分,促进自身的光合作用及叶绿素的合成,有利于油菜高产量和高品质的形成<sup>[57]</sup>。

## 4 结论

地膜覆盖、秸秆覆盖以及两种不同的保水剂处理可以明显提高土壤含水量,增加土壤速效养分,土壤理化性状的改善促进了土壤微生物及相关酶活性的提高,有利于油菜的生长发育,覆盖材料与保水剂结合的多元化处理模式为改善农田生态环境提供了更多、更全面的选择。综合而言,地膜覆盖配施微生物保水剂处理(A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>)在土壤特性及油菜生长等指标方面表现得优于其他处理,可以作为西南地区油菜生产中应对季节性干旱和肥力低下问题的有效措施。

## 参考文献:

- [1] 林子雁,肖焱,史雪威,等.西南地区生态重要性格局研究[J].生态学报,2018,38(24):8667-8675.
- [2] 王龙昌,谢小玉,张臻,等.论西南季节性干旱区节水型农作制度的构建[J].西南大学学报(自然科学版),2010,32(2):1-6.
- [3] 高岩红,瞿雪梅,梁颖涛,等.渝西南典型区农田表层土壤有机碳库研究[J].西南大学学报(自然科学版),2014,36(5):120-126.
- [4] 马丽琿,周婷婷,徐刚,等.重庆市干旱时空分布规律研究[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(8):82-91.
- [5] 蒋文君,康银红,陈瑶,等.不同覆盖方式对土壤水热分布的影响[J].土壤通报,2022,53(1):74-80.
- [6] ZHANG Y Y. Effects of Ridging and Mulching Combined Practices on Proso Millet Growth and Yield in Semi-Arid Regions of China [J]. Field Crops Research, 2017, 213: 65-74.

- [7] 刘萌,付威,樊军,等. 耕作与覆盖措施对黄土塬区春玉米田土壤水气传输的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 814-825.
- [8] 郭书亚,尚赏,王坤,等. 秸秆覆盖深松对夏玉米田土壤有机碳库的影响 [J]. 作物杂志, 2022(2): 113-118.
- [9] YAŞAR KORKANÇ S, HALIL S. The Effects of Mulching with Organic Materials on the Soil Nutrient and Carbon Transport by Runoff under Simulated Rainfall Conditions [J]. Journal of African Earth Sciences, 2021, 176: 104152.
- [10] 程鹏,廖超林,肖其亮,等. 横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 1036-1046.
- [11] 裴雪霞,党建友,张定一,等. 休闲期耕作方式和施用保水剂对旱地小麦产量及水分利用率的影响 [J]. 核农学报, 2021, 35(5): 1243-1251.
- [12] 纪冰祎,赵驰鹏,吴玥,等. 不同水分条件下保水剂对黄瓜根系和叶片生理特征的影响 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 114-121.
- [13] 马征,姚海燕,张柏松,等. 保水剂对粘质潮土团聚体分布、稳定性及玉米养分积累的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 221-226.
- [14] 白岗栓,何登峰,耿伟,等. 不同保水剂对土壤特性及烤烟生长的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 31-43.
- [15] 王琰,井大炜,付修勇,等. 保水剂施用量对杨树苗土壤物理性状与微生物活性的影响 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 53-58.
- [16] 司徒艳结,卫尤明,杨俊颖,等. 保水剂对作物生长的不利影响及发生机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1318-1328.
- [17] 李艳,郑亚军. 渗水地膜覆盖对花生叶绿素含量和细胞膜透性的影响 [J]. 河北农业科学, 2006, 10(3): 46-49.
- [18] 纪冰祎. 农用保水剂发展的现状分析与探讨 [J]. 农业经济, 2022(4): 21-23.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] 赵倩,任广伟,王杰,等. 施用韩国假单胞菌(*Pseudomonas koreensis*)CLP-7 对连作烟田土壤质量及微生物群落功能多样性的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5357-5366.
- [22] 王宇峰,孟会生,李廷亮,等. 培肥措施对复垦土壤微生物碳氮代谢功能多样性的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 81-90.
- [23] 罗玲. 不同地表覆盖模式对避雨葡萄园土壤性质及果实品质的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- [24] 李荣,勉有明,侯贤清,等. 秸秆还田下保水剂用量对砂性土性状与玉米产量的影响 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 260-271.
- [25] 马江波. 黄土高原坡面深层土壤水分孔式调控技术及效应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [26] 牟鸿燕. 半湿润区不同覆盖模式的土壤生态效应对春玉米生长的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [27] 马焕成,罗质斌,陈义群,林文杰. 保水剂对土壤养分的保蓄作用 [J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(4): 404-407.
- [28] 徐媛,鲍雅静,李政海,等. 蒙辽农牧交错区玉米碳氮含量对不同种植方式的响应 [J]. 西南农业学报, 2020, 33(8): 1736-1740.
- [29] 凌宁,荀卫兵,沈其荣. 根际沉积碳与秸秆碳共存下作物与微生物氮素竞争机制及其调控 [J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(4): 589-597.
- [30] 杜建斌. 旱灾对我国粮食主产省粮食产量的影响及抗旱对策研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [31] KADER M A, SENGE M, MOJID M A, et al. Recent Advances in Mulching Materials and Methods for Modifying Soil Environment [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 168: 155-166.
- [32] 周晓莹,贾立志,桑卫国. 基于文献统计的 CSLE 模型中耕作措施因子的确定 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 116-121, 130.
- [33] 李淑英,路献勇,程福如,等. 油-棉连作棉田油菜秸秆覆盖对棉田杂草发生及土壤杂草种子库的动态影响 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(9): 138-144.
- [34] 吴阳生,王天野,王呈玉,等. 施用保水剂对半干旱地区玉米生长发育的影响 [J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 64-68.
- [35] 康永亮,武继承,郑惠玲,等. 长期施用保水剂对小麦生长和水分利用的影响 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 83-90.
- [36] 田露,刘景辉,赵宝平,等. 保水剂和微生物菌肥施肥对旱作燕麦干物质积累、分配、转运和产量的影响 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2996-3003.

- [37] 闫宗正, 陈素英, 张喜英, 等. 秸秆覆盖时间和覆盖量对冬小麦田温度效应及地上地下生长的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1779-1791.
- [38] BADIANE N N Y, CHOTTE J L, PATE E, et al. Use of Soil Enzyme Activities to Monitor Soil Quality in Natural and Improved Fallows in Semi-Arid Tropical Regions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(3): 229-238.
- [39] 刘辉. 设施土表覆盖秸秆对缓解土壤盐渍化及蔬菜生长的影响 [D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [40] SICZEK A, FRAC M. Soil Microbial Activity as Influenced by Compaction and Straw Mulching [J]. *International Agrophysics*, 2012, 26(1): 65-69.
- [41] ADAMAVIČIENE A, ROMANECKAS K, PILIPAVIČIUS V, et al. Interaction of Maize and Living Mulch: Soil Chemical Properties and Bioactivity [J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2012, 10(3/4): 1219-1223.
- [42] 王静, 张天佑, 徐万海, 等. 旱地全膜覆盖种植模式对土壤酶活性的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 738-741.
- [43] 吴宏亮, 许强, 陈阜, 等. 不同覆盖措施对旱区农田土壤酶活性及西瓜产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 173-178.
- [44] 李庆国, 张晓文. 保水剂施用方式对杨树苗根系特性和生长及土壤酶活性的影响 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(14): 36-40.
- [45] 左秋玉. 微生物保水剂与桉树专用肥对大花序桉苗木生长及肥力效应影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [46] 王政, 王柱石, 张然, 等. 保水剂与肥料配施对土壤水分和酶活及烤烟生长的影响 [J]. 江西农业学报, 2021, 33(9): 83-91.
- [47] LIU X E, LI X G, HAI L, et al. Film-Mulched Ridge-Furrow Management Increases Maize Productivity and Sustains Soil Organic Carbon in a Dryland Cropping System [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(4): 1434-1441.
- [48] GOVAERTS B. Influence of Tillage, Residue Management, and Crop Rotation on Soil Microbial Biomass and Catabolic Diversity [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37(1/2): 18-30.
- [49] ZHANG M M, ZHAO G X, LI Y Z, et al. Straw Incorporation with Ridge-Furrow Plastic Film Mulch Alters Soil Fungal Community and Increases Maize Yield in a Semiarid Region of China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 167: 104038.
- [50] ZHANG J F, ZHAO T N, SUN B P, et al. Effects of Biofertilizers and Super Absorbent Polymers on Plant Growth and Soil Fertility in the Arid Mining Area of Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(9): 1920-1935.
- [51] 邹春娇, 齐明芳, 马建, 等. Biolog-ECO 解析黄瓜连作营养基质中微生物群落结构多样性特征 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 942-951.
- [52] DRURY C F, FINDLAY W I, MCKENNEY D J. Nitric Oxide and Nitrous Oxide Production from Soil: Water and Oxygen Effects [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 766-770.
- [53] 宋贤冲, 王会利, 秦文弟, 等. 退化人工林不同恢复类型对土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 841-848.
- [54] XU L, NAYLOR D, DONG Z, et al. Drought Delays Development of the Sorghum Root Microbiome and Enriches for Monoderm Bacteria [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(18): 4284-4293.
- [55] 马星霞. 秸秆覆盖与施氮肥对玉豆复种模式土壤养分及农田  $N_2O$ 、 $NH_3$  和  $CH_4$  排放强度的影响研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [56] ZHANG W, MASON G A. Modulating the Rhizosphere Microbiome by Altering the Cocktail of Root Secretions [J]. *Plant Physiology*, 2022, 188(1): 12-13.
- [57] 张叶, 聂凌利, 邢蔓, 等. 施氮水平对油菜生育后期氮素吸收积累和分配的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 67-73.