

DOI: 10.5846/stxb202107302071

刘美霞, 刘秀, 赵燕, 董雯怡, 刘恩科. 地膜覆盖对旱作春玉米农田土壤微生物碳源代谢的影响. 生态学报, 2022, 42(22): 9213-9225.

Liu M X, Liu X, Zhao Y, Dong W Y, Liu E K. Effects of film mulching on soil microbial carbon source metabolism in dry-farmland. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9213-9225.

地膜覆盖对旱作春玉米农田土壤微生物碳源代谢的影响

刘美霞^{1,2}, 刘秀^{1,2}, 赵燕³, 董雯怡^{1,2,*}, 刘恩科^{1,2}

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

2 农业农村部农膜污染防治重点实验室, 北京 100081

3 河南科技大学园艺与植物保护学院, 洛阳 471002

摘要: 土壤微生物碳源代谢特征是评价土壤质量变化的重要指标。依托山西省东部晋中市寿阳县农业环境与作物高效用水科学观测试验站, 采用 Biolog-ECO 微孔板技术探究覆膜(FM)与裸地不覆膜处理(LD)对旱作春玉米拔节期、灌浆期和收获期3个关键生育期不同土层深度下(0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm)土壤微生物碳源代谢的影响。结果表明: 1) FM 措施可以显著增加土壤微生物对碳源的利用能力, 显著提高了土壤微生物的优势度指数, 但降低了土壤微生物的均匀度指数。2) 在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层, FM 与 LD 处理土壤微生物碳源利用情况均表现为灌浆期较高, 而 20—30 cm 土层, 表现为收获期较高, 差异均主要体现在碳水类、羧酸类、氨基酸类 3 大类碳源上。3) 拔节期和灌浆期 0—10 cm 土层中 FM 处理的土壤微生物碳源利用能力显著高于 LD 处理; 然而收获期 0—10 cm 土层中恰好相反, 呈现出 LD 处理下土壤微生物碳源利用能力显著高于 FM 处理。4) 此外, Pearson 相关分析表明, FM 处理土壤微生物对碳水类碳源和羧酸类碳源 2 大类碳源的利用能力主要与土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)含量相关性较好, 呈现出正相关关系; 对氨基酸类碳源的利用能力主要与土壤含水量、pH、SOC、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量相关性较好。LD 处理下, 土壤微生物对碳水类、羧酸类和氨基酸类碳源的利用能力与土壤中 TN 含量的相关性较好, 且呈现正相关关系。

关键词: 地膜覆盖; 旱作农田; 玉米; 微生物碳源; 多样性

Effects of film mulching on soil microbial carbon source metabolism in dry-farmland

LIU Meixia^{1,2}, LIU Xiu^{1,2}, ZHAO Yan³, DONG Wenyi^{1,2,*}, LIU Enke^{1,2}

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory for Prevention and Control of Residual Pollution in Agricultural Film, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China

3 School of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471002, China

Abstract: The metabolic characteristics of soil microbial carbon source are important indexes to evaluate the change of soil quality. Based on the scientific observation and experiment station of agricultural environment and efficient water use for crops in Shouyang County, Jinzhong City, eastern Shanxi Province, this study used Biolog-ECO microplate technology to explore the effects of film mulching (FM) and no film mulching (LD) on the carbon source metabolism of soil microorganisms in different soil depths (0—10 cm, 10—20 cm and 20—30 cm) in 3 key growth stages of dry-farming spring corn. The results show that: 1) the FM measures can significantly increase the utilization ability of soil

基金项目: 国家自然科学基金国际合作与交流项目(31961143017); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2021YFE0101300); 国家自然科学基金项目(31871575, 41601328)

收稿日期: 2021-07-30; **网络出版日期:** 2022-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongwenyi@caas.cn

microorganisms to carbon sources, significantly improve the richness index of soil microorganisms, but reduce the evenness index of soil microorganisms. 2) In 0—10 cm and 10—20 cm soil layers, the utilization of microbial carbon sources in FM and LD treatments were higher in filling period, while in 20—30 cm soil layer, the harvest period was higher, and the differences were mainly reflected in 3 types of carbon sources: carbonaceous water, carboxylic acids and amino acids. 3) The utilization capacity of microbial carbon source in 0—10 cm soil layer of FM treatment was significantly higher than that of LD treatment at jointing stage and filling stage; However, in the 0—10 cm soil layer at harvest time, the oppositely is true, showing that the utilization capacity of soil microbial carbon source under LD treatment is significantly higher than that under FM treatment. 4) In addition, Pearson correlation analysis showed that under FM treatment in this study, the utilization ability of soil microorganisms to 2 kinds of carbon sources, namely, carbohydrate carbon source and carboxylic carbon source, had a good correlation with soil organic carbon(SOC) and total nitrogen(TN) content, showing a positive correlation; The utilization ability of amino acid carbon sources is mainly related to soil water content, pH, SOC, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content. Under LD treatment, the utilization ability of carbon sources such as carbonaceous water, carboxylic acids and amino acids by soil microorganisms had a good correlation with TN content in soil, and showing a positive correlation.

Key Words: film mulching; dry-farmland; corn; microbial carbon source; diversity

水资源短缺是限制世界许多国家粮食生产的一个重要因素,在全世界 1400 万 km^2 耕地中,位于干旱半干旱的耕地有 600 万 km^2 ,占 42.9%,我国干旱半干旱地区面积占全国总耕地面积的 52.5%^[1-2]。黄土高原是典型的干旱半干旱地区,也是我国旱作农业最重要的区域之一,由于气温低、降水少、可用水资源有限和土壤肥力低等原因,极大地限制了该地区的农业生产发展^[3-5]。地膜覆盖由于具有良好的保温、保水等效果而在我国北方广泛应用^[6]。前人研究结果表明地膜覆盖能够显著降低土壤水分蒸发,从而起到保水保墒的作用^[7-8]。Zhao 等^[9]在地膜覆盖对旱作农田马铃薯水分利用效率和块茎产量的研究中发现,全覆盖处理的土壤水分利用效率最高,比对照提高了 56.8%—70.3%;马铃薯产量比对照高 57.4%—78.2%。张万文等^[10]在研究地膜覆盖对春玉米增产试验中发现,覆膜处理下的玉米的产量比裸地提高 2940 kg/hm^2 ,增产率达 48%。由此可见,地膜覆盖在提高了我国干旱半干旱地区粮食产量、保障我国粮食安全方面起到重要作用。

土壤微生物是土壤生态系统中重要的组成部分,在维持生态系统物质转化、养分循环以及能量流动过程中发挥着关键作用^[11]。土壤微生物碳源代谢特征反映了土壤微生物生态功能,常被作为评价土壤质量的重要指标^[12-13]。然而环境因素(生物因素和非生物因素)和人为措施都会直接或间接地影响到土壤微生物代谢活性,而地膜覆盖由于改变了土壤微环境(水分和温度等),进而会对土壤微生物代谢活性造成一定的影响,因此研究地膜覆盖下的土壤微生物碳源代谢特征对衡量土壤质量具有重要的意义。Biolog-ECO 微孔板能定量分析描述微生物对不同碳源的代谢多样性,被证明是研究微生物群落碳源代谢多样性的一种简单快速的方法,近 20 年来被广泛应用^[14]。贾鹏丽等^[15]运用 Biolog 生态板在研究东北黑土区不同土地利用方式(种植玉米、水稻、大豆及土豆)对土壤微生物碳源代谢多样性的研究发现,不同土地利用方式显著影响了土壤微生物群落碳源代谢多样性,并且碳水类、氨基酸类和羧酸类碳源为黑土微生物代谢的主要碳源类型,其中以碳水类尤为突出。近年来,关于土壤微生物对碳源利用多样性的研究主要集中在不同施肥处理、不同土壤类型以及不同作物影响效应对比研究中。通过对不同的土壤类型(黑土、褐土、潮土、红壤、灰漠土)^[16-20]以及不同作物类型^[21]进行研究表明,不同的农艺措施均可引起土壤微生物对六大类碳源利用能力以及微生物多样性的变化,但不同的地区其变化程度甚至是变化趋势有所不同^[22]。

目前,对地膜覆盖的研究主要集中对于在土壤温度、水分、养分变化以及作物产量的影响上^[7]。黄土高原是典型的传统旱作农业区,春玉米是该地区主要粮食作物之一,然而对覆膜措施下旱作春玉米不同的生育期以及不同土层中土壤微生物碳源代谢特征的变化研究鲜有报道,而这是衡量地膜覆盖条件下旱作农田土壤

肥力固持特征的基础。因此,本试验依托山西省东部晋中市寿阳县农业环境与作物高效用水科学观测试验站为研究平台,开展地膜覆盖措施对春玉米农田土壤微生物碳源代谢特征的研究,探讨作物的不同生育期及不同土壤层次土壤微生物碳源代谢多样性与环境因子之间的相互作用关系,以期为我国北方旱作春玉米农田生产以及土壤质量提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究在山西省东部晋中市寿阳县(37°44′52″N, 113°12′11″E)农业环境与作物高效用水科学观测试验站进行,该地区属于晋东豫西典型旱作农业区,海拔 1202 m,属于温带大陆性季风气候区,属于半湿润偏干旱气候类型,试验地地势平坦,无灌溉条件。该地区年平均温度 7.4℃,无霜期 140 d 左右,日照时数为 2858.3 h。近 5 年年均降水量为 518.3 mm,年内分布不均匀,主要集中在 6—9 月,占全年降雨量的 80% 以上。2020 年主要集中在 7—8 月份,其中 7 月份 97.6 mm、8 月份 254.1 mm;玉米生长的其他月份降雨量较少(图 1)。

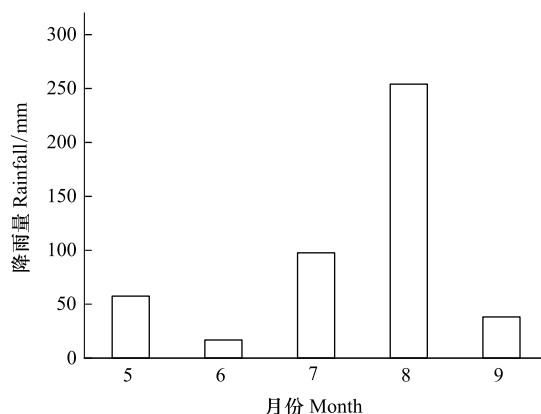


图 1 2020 年玉米生育期月降雨量

Fig.1 Monthly rainfall of maize growth period in 2020

1.2 试验设计

定位试验开始于 2015 年,种植制度为一年一熟制,种植作物为春玉米。试验共设 2 个处理:地膜覆盖(FM)和裸地不覆膜(LD),每个处理 3 次重复,共 6 个小区,每个小区为 48 m²(长 8 m×宽 6 m),采用完全随机区组设计。春玉米供试品种为“郑单 958”,种植密度 60000 株/hm²,行距 50 cm,株距 33.3 cm。各处理的肥料用量一致,氮肥为尿素(含 N 46.7%)240 kg/hm²、磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)150 kg/hm²、钾肥为氯化钾(KCl 60%)75 kg/hm²。覆膜采用人工铺设,地膜为微白色普通 PE 农用地膜,厚度 0.008 mm,宽度 1.2 m。

1.3 样品采集与测定

于 2020 年 5—10 月分别在玉米拔节期、灌浆期和收获期 3 个时期采集 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 3 个不同深度土壤样品。按照“V”型取样方式,使用直径 5 cm 的螺旋钻探针进行 3 次重复钻探。一部分土样过 2 mm 筛,放入自封袋中,用冰袋运回实验室,4℃ 保存,用于完成土壤微生物碳源代谢多样性测定;一部分新鲜土样过 2 mm 筛用于测定铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N);其余土壤样品自然风干后分别过 2 mm 和 100 目筛,用于测定土壤 pH、有机碳(SOC)、全氮(TN)等指标。

1.3.1 土壤微生物碳代谢功能多样性测定

应用 Biolog 生态平板(ECO Micro Plate)对土壤微生物碳源代谢能力进行分析^[23]:在超净工作台上,称取新鲜土壤样品 5 g,加入 45 mL 经灭菌处理后的 0.85% NaCl 溶液,用封口膜密封三角瓶瓶口,固定于水平摇床上,以 250 r/min 均匀震荡 30 min,取出摇匀,静置 10 min,然后依次稀释至 10⁻²、10⁻³ 的悬浮液。最后用 8 孔道移液器向 Biolog-ECO 板的每个孔中加入 150 μL 的 10⁻³ 悬浮液。将接种好的 Biolog-ECO 微平板放入 27℃ 生化恒温培养箱内培养,分别于 0、24、48、96、120、144、168、192 h 在微孔板自动读数装置读取 590 nm 波长下的数值吸光值。

Biolog-ECO 平板测定的每孔的颜色变化率(Average well color development, AWCD),来表示微生物群落利用单一碳源能力即微生物整体活性,计算公式如下:

$$AWCD = \sum (C_i - R) / n$$

式中, C_i 为碳源的每个孔的光密度值, R 为对照孔的光密度值, n 为碳源的数目。

本实验对培养了 144 h 的 Biolog-ECO 平板孔中的光密度值进行统计分析,用 Shannon 多样性指数(H)、优势度指数(D)和均匀度指数(E)表征土壤微生物群落碳源代谢多样性。计算方法:

多样性指数 H :

$$H = - \sum P_i \times \ln P_i$$

优势度指数 D :

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

均匀度指数 E :

$$E = H/\ln S$$

式中, P_i 为第 i 孔吸光值与空白对照孔吸光值之差和所有反应孔吸光值之差总和的比值, S 是 Biolog-ECO 平板中有颜色孔的数量。

1.3.2 土壤养分含量测定

土壤含水量采用烘干法测定;pH 采用水浸提电位法(1:5 的土水比)测试;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热法测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法测定,具体方法参见《土壤农化分析》^[24]。土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量按水土比 1:5 加入 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提,采用 AA3 全自动连续流动分析仪(SEAL,德国)测定^[25]。

1.4 数据处理

试验数据使用 Excel 2019(Microsoft 2019)整理,采用 Sigmaplot 12.5 作图,采用 Origin 2021 软件进行 Pearson 相关分析及作图。利用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析和主成分分析,方差分析多重比较采用最小显著差异(LSD)法,在 $P < 0.05$ 水平下检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤理化性质的影响

由表 1 可知,春玉米生长的拔节期和灌浆期土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量随土层深度增加逐渐降低;覆膜(FM)和裸地(LD)处理下的不同深度的 SOC 和 TN 基本上呈现出拔节期 > 灌浆期 > 收获期的变化趋势;硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)呈现出收获期 > 拔节期 > 灌浆期的变化趋势;而土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)在作物不同的生育期以及不同的土壤深度没有明显的变化趋势。拔节期 FM 措施显著提高了 0—10 cm 表层土壤含水量($P < 0.05$),然而灌浆期 FM 处理下的各层土壤中的水分含量显著低于 LD 处理,收获期 FM 与 LD 处理下土壤水分含量未呈现出显著性差异。同时,与 LD 相比,FM 显著增加了 0—10 cm 表层土壤 SOC 含量($P < 0.05$,表 1);而 10—20 cm 和 20—30 cm 土层中土壤 SOC 差异不显著。除灌浆期与收获期 20—30 cm 土层,其余各土层中 TN 含量均呈现出 FM 高于 LD 处理。此外,与 LD 处理相比,FM 措施下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量明显降低; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在拔节期和收获期含量显著降低($P < 0.05$),而灌浆期含量显著增高($P < 0.05$)。各处理间土壤 pH 值差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 不同处理对土壤微生物碳源利用强度及多样性的影响

不同处理土壤 AWCD 值变化见图 2。随着培养时间的延长,土壤微生物 AWCD 值逐渐提高。培养的前 24 h 内各处理的 AWCD 值变化不显著,24—144 h 土壤 AWCD 值迅速增长 144 h 后缓慢增长,直至趋于稳定。拔节期呈现 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm 的变化趋势,且在 144 h 时 FM 显著高于 LD 处理;且在 0—10 cm、10—20 cm 呈现出显著性差异。灌浆期在 0—10 cm、20—30 cm 土层以及以及收获期 10—20 cm、20—30 cm 土层中 FM 处理土壤 AWCD 值大于 LD 处理,而灌浆期 0—20 cm 土层和收获期 0—10 cm 土层的变化情况恰好相反:呈现出 LD 处理大于 FM 处理的变化趋势。

表 1 各处理对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different treatment on soil physicochemical characteristics

处理 Treatment		拔节期 Jointing stage		灌浆期 Filling stage		收获期 Harvesting stage	
		FM	LD	FM	LD	FM	LD
土壤含水量	0—10 cm	19.6±0.6a	18.1±0.5b	20.6±0.2b	21.4±0.4a	15.5±0.3ns	15.7±0.6ns
Soil water content/%	10—20 cm	20.5±1.8ns	19.8±1.3ns	20.3±0.2b	21.3±0.5a	16.0±0.5ns	16.4±0.4ns
	20—30 cm	18.9±0.2ns	19.5±0.3ns	16.8±0.2b	18.4±0.4a	15.4±0.6ns	16.0±0.1ns
pH	0—10 cm	8.4±0.06ns	8.4±0.11ns	8.8±0.02ns	8.7±0.04ns	8.3±0.10ns	8.3±0.06ns
	10—20 cm	8.5±0.03ns	8.4±0.05ns	8.8±0.09ns	8.7±0.03ns	8.3±0.03ns	8.5±0.01ns
	20—30 cm	8.6±0.01ns	8.4±0.09ns	8.8±0.06ns	8.8±0.01ns	8.4±0.02ns	8.5±0.04ns
有机碳	0—10 cm	11.49±2.34a	10.30±0.25b	10.39±0.11a	9.56±0.05b	9.62±0.16a	8.94±0.08b
SOC/(g/kg)	10—20 cm	10.22±0.88ns	10.32±0.28ns	9.42±0.09ns	9.47±0.21ns	7.94±0.12ns	7.83±0.70ns
	20—30 cm	8.24±0.48ns	9.33±0.64ns	9.29±0.68ns	9.14±0.20ns	9.12±0.84ns	9.06±0.77ns
全氮	0—10 cm	0.91±0.01a	0.86±0.01b	0.80±0.03ns	0.83±0.02ns	0.80±0.02b	0.83±0.01a
TN/(g/kg)	10—20 cm	0.85±0.02a	0.75±0.02b	0.71±0.03ns	0.73±0.02ns	0.80±0.02a	0.74±0.02b
	20—30 cm	0.74±0.01a	0.61±0.03b	0.50±0.03b	0.67±0.02a	0.58±0.02b	0.68±0.01a
铵态氮	0—10 cm	4.18±0.16b	4.34±0.47a	4.61±0.22ns	4.62±0.23ns	3.86±0.10b	3.91±0.28a
NH ₄ ⁺ -N/(mg/kg)	10—20 cm	4.19±0.07ns	4.21±0.42ns	4.68±0.25b	5.90±0.62a	3.84±0.20b	4.07±0.30a
	20—30 cm	4.15±0.18a	3.98±0.14b	4.59±0.04b	4.68±0.30a	3.56±0.21b	4.09±0.40a
硝态氮	0—10 cm	24.78±3.30b	37.75±1.67a	10.44±0.96a	7.99±0.16b	32.88±2.07b	47.89±2.61a
NO ₃ ⁻ -N/(mg/kg)	10—20 cm	26.24±1.69ns	28.06±3.37ns	11.70±3.74a	7.40±0.10b	40.09±1.12b	29.01±1.88a
	20—30 cm	9.99±0.77b	32.35±2.17a	7.36±2.72a	4.65±0.13b	27.68±1.98a	16.00±7.94b

同一行小写字母表示同一生育期不同处理之间的差异显著 ($P<0.05$), 相同的字母表示差异不显著 ($P>0.05$); FM: 覆膜处理 plastic film mulching; LD: 裸地不覆膜处理 no film mulching; SOC: 土壤有机碳 soil organic carbon; TN: 全氮 total carbon

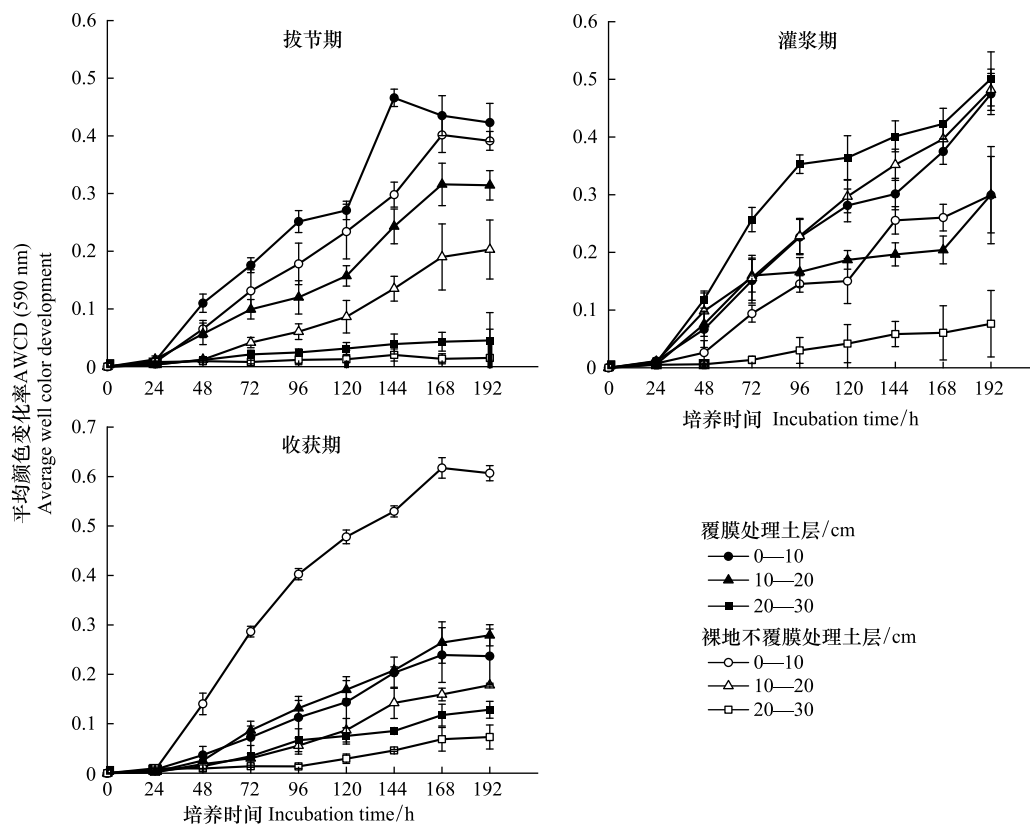


图 2 不同处理微生物平均颜色变化率

Fig.2 Average color change rate of soil microorganisms with different treatment

FM: 覆膜处理 plastic film mulching; LD: 裸地不覆膜处理 no film mulching

Biolog 主成分分析法能显示土壤微生物群落在不同的处理下对各类碳源的反应情况,是反应土壤微生物群落结构特征的有效手段^[26]。根据培养 144 h 的 AWCD 数据,对 31 种碳源利用情况进行主成分分析(图 3)。在主成分分析中,样本之间距离越近,表明样本间微生物群落代谢功能差异越小^[27]。本研究选取拔节期、灌浆期和收获期前两个主成分进行分析:主成分 1(PC1) 和主成分 2(PC2)。其中方差贡献率分别为 44.7%、15.7%、26.3%、23.0%、30.1%、20.3%,累计方差贡献率为 60.4%、49.3%、50.4%,说明 PC1、PC2 是微生物群落碳源利用差异的主要来源,可以解释大部分的信息。图 3 显示,FM 措施下不同处理土壤微生物碳源利用对 PC1 和 PC2 相关的碳源利用能力不同,各处理在 PC 轴上表现出明显的差异,表明 FM 显著改变了土壤微生物对碳源的利用能力。按照每个碳源在区分能力方面的贡献率大小进行排序,选取每个主成分的前十个碳源进行分析,结果表明碳水类碳源在 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 土层中 PC1 的权重比较大,可以认为碳水类碳源是区分不同处理的主要碳源。此外,与 PC2 相关较大的碳源随土层深度增加依次为羧酸类、碳水类和氨基酸类碳源,它们是区分 FM 与 LD 处理的另一部分主要碳源类型。

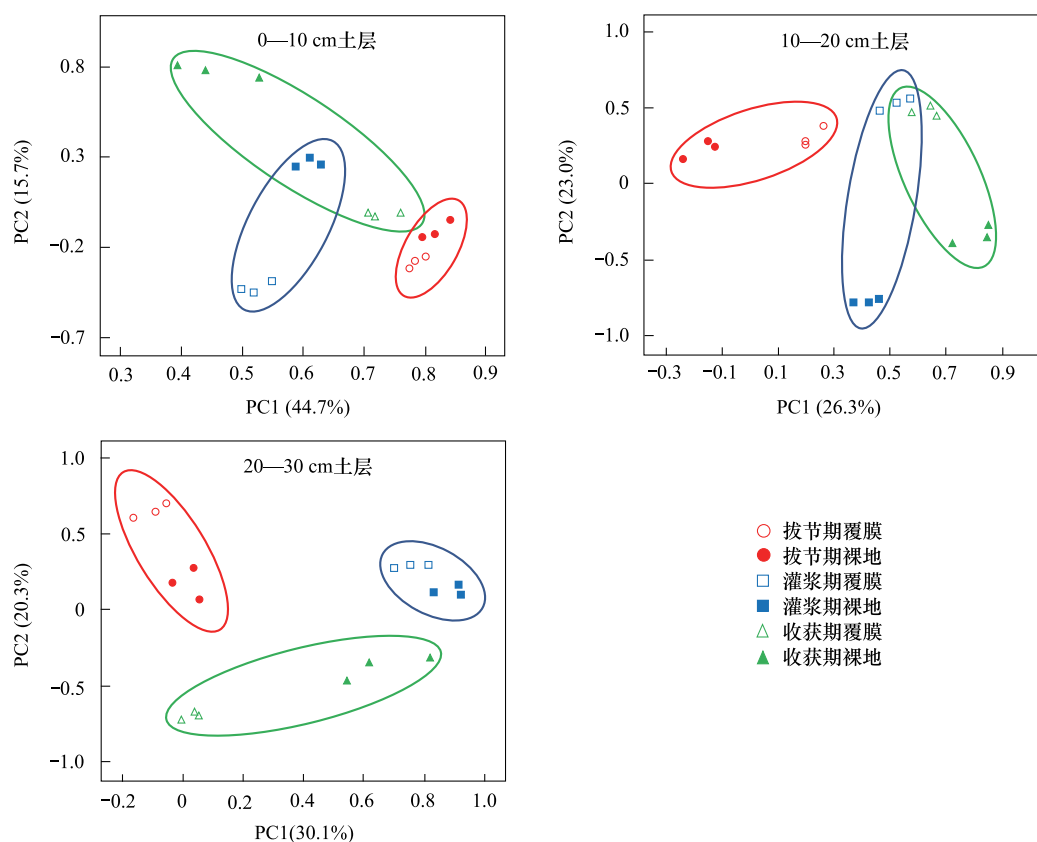


图 3 土壤微生物碳源利用的主成分分析 (PCA)

Fig.3 Principal components analysis for carbon utilization of soil microbial communities

PC1:主成分 1 Principal component 1;PC2:主成分 2 Principal component 2

初始载荷因子为各碳源与各主成分的相关系数,载荷因子值越高,表示该碳源对主成分的影响越大^[28]。如表 2 所示拔节期对 PC1 影响较大的碳源有 14 种,其中碳水类的有 6 种(分别为 β -甲基-D-葡萄糖苷、I-赤藻糖醇、D-甘露醇、D-纤维二糖、葡萄糖-1-磷酸盐、D,L-a-甘油);羧酸类有 2 种(D-半乳糖醛酸、a-丁酮酸);氨基酸类有 2 种(L-天冬酰胺酸、L-苏氨酸);胺类 1 种(苯乙基胺);芳香类 1 种(2-羟苯甲酸);多聚物类 2 种(α -环式糊精、肝糖)。拔节期对 PC2 影响较大的碳源有 4 种,其中羧酸类有 2 种(D-半乳糖醛酸、D-葡萄糖胺酸);氨基酸类有 1 种(L-精氨酸);多聚物类 1 种(吐温 40)。灌浆期对 PC1 影响较大的碳源有 15 种,其中碳水类的有 6 种(分别为 β -甲基-D-葡萄糖苷、D-木糖/戊醛糖、D-甘露醇、N-乙酰基-D-葡萄糖胺、D-纤维二糖、D,L-a-甘

油);羧酸类有 2 种(γ -羟基丁酸、 α -丁酮酸);氨基酸类有 2 种(L-天冬酰胺酸、L-苏氨酸);胺类 1 种(苯乙基胺);芳香类 1 种(Acid 2-羟基苯甲酸);多聚物类 3 种(吐温 40、 α -环式糊精、肝糖)。灌浆期对 PC2 影响较大的碳源有 6 种,其中碳水类的有 4 种(分别为 β -甲基-D-葡萄糖苷、D-木糖/戊醛糖、D-纤维二糖、葡萄糖-1-磷酸盐);羧酸类有 1 种(D-葡萄糖胺酸);氨基酸类有 1 种(L-天冬酰胺酸)。收获期对 PC1 影响较大的碳源有 8 种,其中碳水类的有 2 种(分别为 N-乙酰基-D-葡萄糖胺、葡萄糖-1-磷酸盐);羧酸类有 4 种(丙酮酸甲酯、 γ -羟基丁酸、衣康酸、D-苹果酸);氨基酸类有 1 种(L-苯基丙氨酸);多聚物类 1 种(吐温 80)。收获期对 PC2 影响较大的碳源有 8 种,其中碳水类的有 4 种(分别为 L-赤藻糖醇、D-甘露醇、D-纤维二糖、D-半乳糖酸 γ -内酯);羧酸类有 1 种(D-葡萄糖胺酸);氨基酸类有 3 种(L-天冬酰胺酸、L-苯基丙氨酸、L-苏氨酸);多聚物类 1 种(吐温 80)。

表 2 不同处理在 PC1 与 PC2 上的荷载值

Table 2 Correlation analysis of different treatment with PC1 and PC2

碳源类型 Carbon source		拔节期 Jointing stage		灌浆期 Filling stage		收获期 Harvesting stage	
		PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
碳水类 Carbonaceous water	β -甲基-D-葡萄糖苷 β -Methyl-D-Glucoside L	0.841 *	-0.245	0.816 *	0.989 *	-0.453	0.024
	D-木糖/戊醛糖 D-Xylose	0.206	-0.364	-0.840 *	0.917 *	0.247	0.135
	L-赤藻糖醇 i-Erythritol	0.804 *	-0.387	-0.103	0.255	0.394	0.942 *
	D-甘露醇 D- Mannitol	-0.886 *	-0.084	0.997 *	-0.683	-0.300	0.936 *
	N-乙酰基-D-葡萄糖胺 A-Acetyl-D-Glucosamine	-0.009	-0.335	0.986 *	0.307	0.971 *	0.094
	D-纤维二糖 D-Cellobiose	0.986 *	0.621	0.974 *	0.917 *	-0.535	0.935
	葡萄糖-1-磷酸盐 Glucose-1-Phosphate	0.946	0.010	0.170	0.900 *	-0.735	-0.212
	α -D-乳糖 α -D-Lactose	-0.085	-0.677	-0.271	-0.204	-0.594	-0.171
	D,L- α -甘油 L- α -Glycerol Phosphate	-0.865 *	-0.008	-0.820	-0.106	-0.582	-0.229
	D-半乳糖酸 γ -内酯 D-Galactonic Acid- γ -Lactone	-0.080	0.212	-0.047	0.110	-0.671	0.888 *
羧酸类 Carboxylic acids	丙酮酸甲酯 Pyruvic Acid Methyl Ester	0.534	-0.473	0.174	-0.474	-0.753 *	-0.535
	D-半乳糖醛酸 D-Galacturonic Acid	0.708 *	-0.917 *	0.268	0.095	0.041	-0.841 *
	D-葡萄糖胺酸 D-Glucosaminic Acid	0.458	0.986 *	-0.034	0.946 *	-0.265	-0.206
	γ -羟基丁酸 γ -Hydroxybutyric Acid	-0.028	-0.082	0.897 *	-0.414	0.700 *	-0.341
	衣康酸 Itaconic Acid	-0.535	-0.065	-0.691	-0.233	-0.747 *	-0.300
	α -丁酮酸 α -Ketobutyric Acid	-0.829 *	0.054	-0.738 *	-0.087	-0.659	-0.188
	D-苹果酸 D-Malic Acid	-0.016	-0.255	-0.580	0.286	-0.753 *	0.300
氨基酸类 Amino acids	L-精氨酸 L-Arginine	-0.326	0.974 *	-0.196	0.465	-0.406	-0.288
	L-天冬酰胺酸 L-Asparagine	0.949 *	-0.373	0.986 *	0.839 *	0.212	0.731 *
	L-苯基丙氨酸 L-Phenylalanine	-0.118	-0.076	-0.183	-0.277	-0.771 *	0.826 *
	L-丝氨酸 L-serine	0.090	0.275	0.019	-0.428	-0.494	-0.288
	L-苏氨酸 L-Threonine	-0.793 *	-0.035	-0.711 *	-0.037	0.694	-0.788 *
	甘氨酸-L-谷氨酸 Glycine-L-Glutamic Acid	-0.164	-0.027	-0.132	-0.123	0.565	0.659
胺类 Amines/amides	苯乙基胺 Phenylethylamine	-0.935 *	-0.099	-0.863 *	-0.110	-0.441	-0.165
	腐胺 Putrescine	-0.665	0.090	-0.504	-0.055	-0.506	0.235
芳香类 Phenolic compounds	2-羟基苯甲酸 2-Hydroxy-Benzoic Acid	-0.956 *	-0.093	-0.914 *	-0.130	-0.776	-0.129
	4-羟基苯甲酸 4-Hydroxy-Benzoic Acid	-0.200	-0.019	-0.455	-0.066	-0.618	-0.212
多聚物类 Polymers	吐温 40 Tween-40	-0.131	0.847 *	1.038 *	-0.490	-0.112	0.400
	吐温 80 Tween-80	0.313	0.098	0.159	0.090	0.931 *	0.853 *
	α -环式糊精 α -Cyclodextrin	-0.899 *	-0.100	-0.791 *	-0.163	-0.171	-0.147
	肝糖 Glycogen	-0.865 *	-0.102	-0.823 *	-0.138	0.100	0.082

* 代表荷载值 ≥ 0.7 ;PC1;主成分 1 Principal component 1;PC2;主成分 2 Principal component 2

本研究中各处理土壤微生物对 6 大类碳源的利用率大小依次为:碳水类 > 羧酸类 > 氨基酸类 > 多聚物

类 > 芳香类 > 胺类(图4)。各时期各土层不同处理下土壤微生物群落对同一类型的碳源的利用程度存在明显差异($P < 0.05$)。具体表现在:与 LD 相比,FM 处理显著增加了拔节期 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm、灌浆期 0—10 cm 和 20—30 cm 以及收获期 10—20 cm 和 20—30 cm 土层中土壤微生物对碳水类、羧酸类两大类碳源的利用率($P < 0.05$,图4);而 FM 和 LD 处理下土壤微生物对胺类、芳香类两大类碳源的利用率都较低,且处理间未见显著性差异($P > 0.05$,图4);收获期 0—10 cm 土层中,土壤微生物对六大类碳源的利用率呈现出 FM 处理低于 LD 处理,且处理间差异显著($P < 0.05$,图4)。

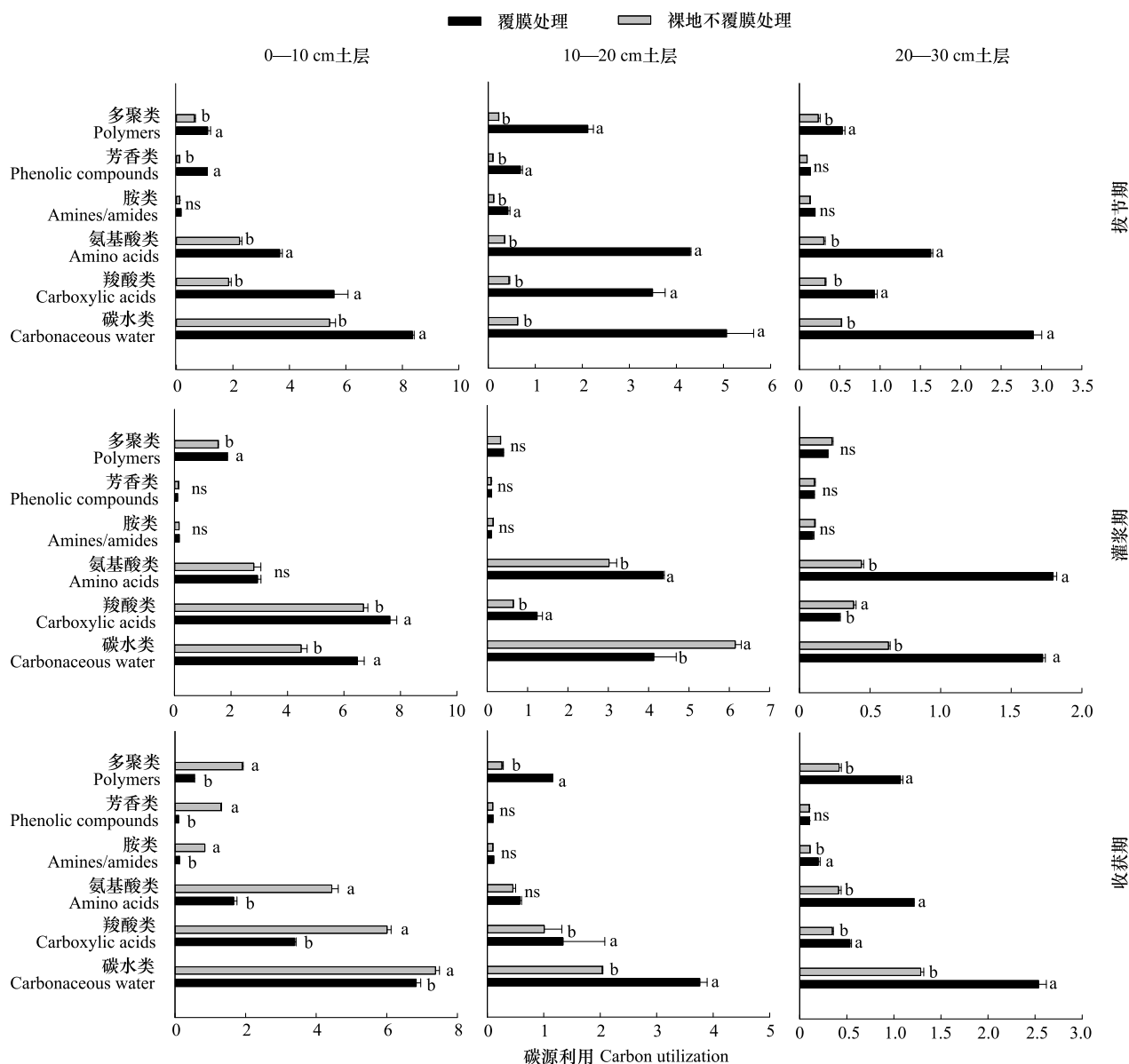


图4 各处理对土壤微生物碳源代谢多样性的影响

Fig.4 Influences of different treatment on carbon source metabolic diversity of soil microorganisms

同一行小写字母表示同一生育期不同处理之间的差异显著($P < 0.05$),相同的字母表示差异不显著($P > 0.05$)

为了进一步的确定 FM 对各时期不同土层土壤微生物碳源代谢多样性的影响状况,本研究计算了 FM 和 LD 处理 Shannon 多样性指数(H)、优势度指数(D)和均匀度指数(E)(表3)。结果表明,不同指数在两处理中差异显著($P < 0.05$)。具体来看,与 LD 相比,FM 处理在拔节期 10—20 cm、20—30 cm,灌浆期 0—10 cm、20—30 cm 以及收获期所有土层中的 Shannon 多样性指数(H)相对较低;而拔节期 0—10 cm,灌浆期 10—

20 cm 土层中的 Shannon 多样性指数(H)相对较高。对于均匀度指数,FM 处理下拔节期各个土层、灌浆期 0—10 cm、20—30 cm 以及收获期 10—20 cm、20—30 cm 土层中土壤微生物均匀度指数(E)相对较低;而在灌浆期和收获期 10—20 cm 土层土壤微生物均匀度指数(E)相对较高。对于优势度指数(D)结果表明,在拔节期 10—20 cm、20—30 cm,灌浆期不同土层以及收获期 0—10 cm、20—30 cm 土层均呈现出 FM 处理显著高于 LD 处理(表 3)。

表 3 土壤微生物群落多样性指数

Table 3 Diversity index of soil microbial communities

处理 Treatments	土层/cm Soil layer	Shannon 指数 Shannon index(H)		优势度指数 Dominance index(D)		均匀度指数 Evenness index(E)	
		FM	LD	FM	LD	FM	LD
拔节期 Jointing stage	0—10	2.956±0.012a	2.873±0.014b	0.064±0.001b	0.081±0.011a	0.824±0.003a	0.850±0.004a
	10—20	2.739±0.003b	3.397±0.007a	0.084±0.023a	0.035±0.006b	0.783±0.002b	1.745±0.004a
	20—30	2.876±0.022b	3.412±0.005a	0.086±0.003a	0.034±0.023b	1.121±0.015b	3.102±0.004a
灌浆期 Filling stage	0—10	2.739±0.006b	2.893±0.052a	0.092±0.003a	0.077±0.005b	0.758±0.005ns	0.789±0.003ns
	10—20	2.639±0.060a	2.608±0.058b	0.112±0.009ns	0.102±0.003ns	0.784±0.002ns	0.733±0.008ns
	20—30	2.256±0.007b	3.381±0.007a	0.220±0.028a	0.036±0.004b	0.814±0.017b	1.887±0.009a
收获期 Harvesting stage	0—10	2.885±0.011b	3.069±0.025a	0.071±0.006a	0.055±0.012b	0.818±0.004a	0.777±0.004b
	10—20	2.534±0.029b	2.859±0.069a	0.083±0.006b	0.097±0.026a	0.877±0.010b	1.151±0.027a
	20—30	2.739±0.040b	2.990±0.020a	0.103±0.010ns	0.099±0.003ns	0.886±0.012b	0.982±0.006a

:同一行小写字母表示同一生育期不同处理之间的差异显著($P<0.05$),相同的字母表示差异不显著($P>0.05$)

2.3 土壤微生物碳源利用与环境影响因子相关关系

为了明确影响不同处理下各土层土壤微生物碳源利用能力与土壤环境因子的相关关系,将土壤环境因子(土壤含水量、pH、SOC、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)与土壤微生物碳源利用情况进行 Pearson 相关关系分析(图 5)。试验结果表明,FM 条件下碳水类、羧酸类、氨基酸类和芳香类四大类碳源与土壤理化性质相关性较高,基本上呈现出显著的正相关关系;LD 条件下胺类和芳香类两大类碳源与土壤理化性质的相关性较高。具体表现为:FM 条件下土壤微生物对碳水类碳源的利用能力与土壤 SOC 含量和 TN 含量呈极显著的正相关关系;羧酸类和芳香类两大类碳源的利用能力与 SOC 含量和 TN 含量呈极显著的正相关关系,与土壤含水量呈现出显著的正相关关系;对氨基酸类碳源的利用能力与土壤含水量、土壤 pH、SOC、TN 以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈现显著或极显著的正相关关系,而与土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈显著的负相关关系;对多聚物类碳源的利用能力与土壤 TN 含量呈极显著的正相关关系。LD 条件下,土壤微生物对碳水类、羧酸类、氨基酸类和多聚物类四大类碳源的利用能力与土壤 TN 含量呈极显著的正相关关系;对胺类与芳香类碳源的利用能力与土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈极显著的正相关关系,但与土壤含水量呈极显著的负相关关系,同时芳香类碳源又与 pH 呈显著的负相关关系。

3 讨论

土壤微生物群落碳源代谢特征可以反映不同碳源代谢利用的差异,体现土壤微生物整体活性和微生物群落生态功能多样性^[29]。本研究结果表明,地膜覆盖显著影响了土壤微生物对六大类碳源的代谢活性。覆膜处理的土壤微生物对碳源的利用程度总体上高于裸地不覆膜处理,并随土壤深度的增加而呈现出递减趋势($P<0.05$)(图 2),说明地膜覆盖对提高土壤微生物总体代谢活性尤其是表层土壤微生物代谢活性具有重要的作用^[30]。相关研究认为,长期的地膜覆盖导致了土壤理化性质的差异是土壤微生物碳源代谢活性产生差异的主要决定因素^[31],由于地膜覆盖很大程度上改善了土壤微环境,促进了植物根系生长和土壤养分循环转化,为土壤微生物的生长代谢提供了适宜的条件,进而提高了土壤微生物的代谢活性^[31],但随着土壤深度的增加覆膜措施产生的作用逐渐减小,使得覆膜与裸地处理下土壤微生物碳源利用能力之间的差异逐渐缩小。

Shannon 多样性指数(H)、优势度指数(D)和均匀度指数(E)常被用作表征土壤微生物多样性指数^[17]。

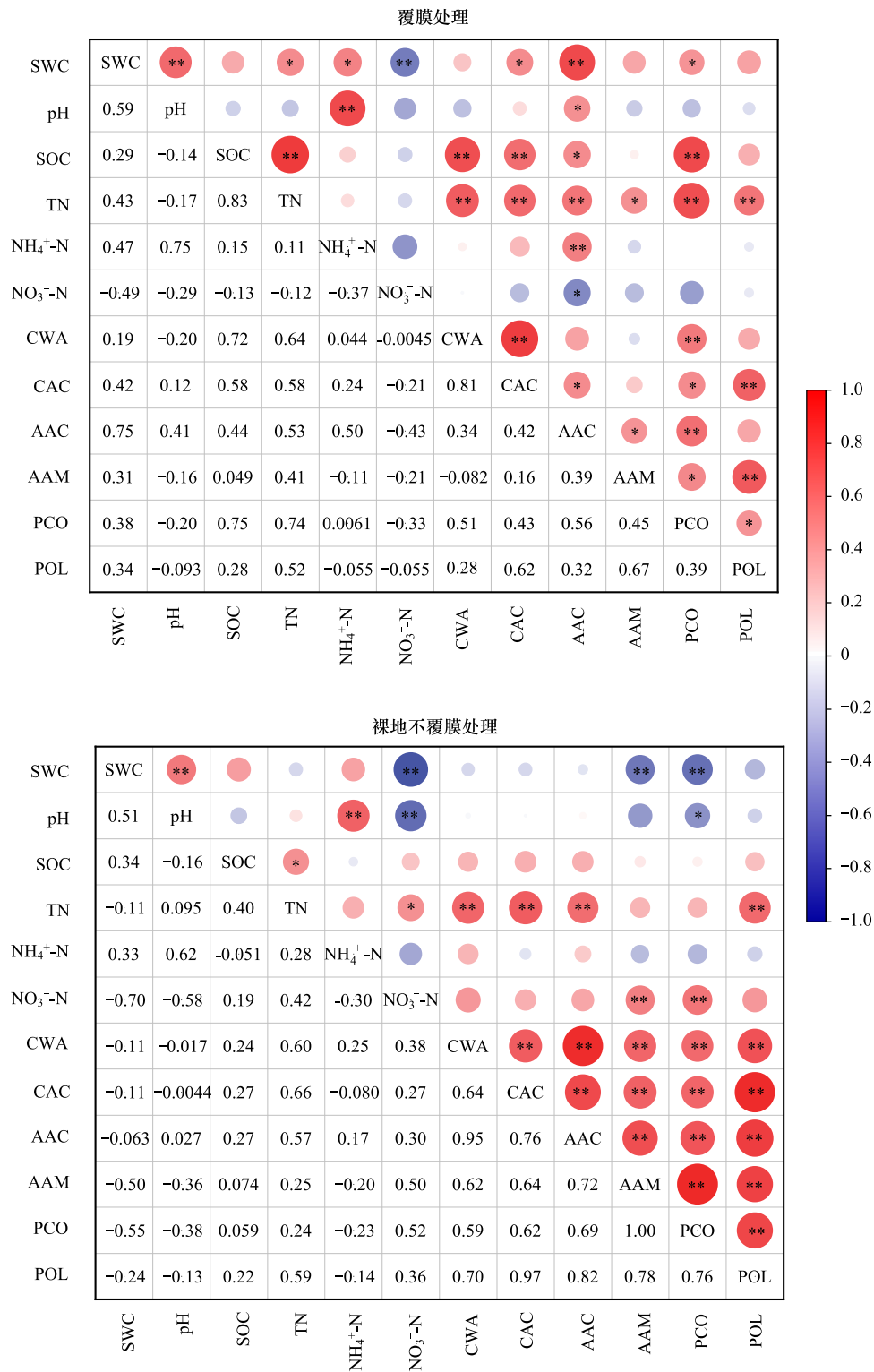


图5 土壤理化性质与土壤微生物群落碳源利用多样性之间的相关性分析

Fig.5 Pearson correlation analysis between soil physical/chemical characteristics and soil microbial communities diversity indices

* 表示显著相关($P<0.05$); ** 表示极显著相关($P<0.01$)。SWC:含水量 soil water content;SOC:有机碳 soil organic carbon;TN:全氮 total nitrogen;CWA:碳水类 carbonaceous water;CAC:羧酸类 Carboxylic acids;AAC:氨基酸类 Amino acids;AAM:胺类 Amines/amides;PCO:芳香类 Phenolic compounds;POL:多聚物类 Polymers

多样性指数是优势度和均匀度指数组合起来的一个指标,能够比较全面地反映出微生物的物种多样性; D 值是用来衡量群落组成水平最常用的指标之一,其数值的大小反映出群落受优势度物种影响的大小程度; E 值表示种群的物种优势度,其值越大,群落中物种越丰富^[18]。我们发现长期进行地膜覆盖显著影响了土壤微生物碳源代谢的多样性指数。与 LD 相比,FM 措施增加了土壤微生物的优势度指数(D)。这与 Huang 等^[32]在黄土高原半干旱区进行不同覆盖措施对玉米农田土壤微生物群落影响试验中的研究结果基本一致。大量研究表明^[31],土壤微生物多样性对土壤养分、pH、水分和温度等外界条件变化十分敏感,从表 1 中我们可以发现覆膜处理在各个生育期均能有效改善土壤理化性质,能够为土壤微生物创造一个相对稳定而又潮湿的土壤养分环境,促进了土壤微生物多样性的提升。然而,本研究中 FM 处理相比 LD 处理土壤微生物的均匀度指数(E)。侯晓杰等^[33]在东北地区进行的不同施肥与地膜覆盖对玉米田土壤微生物功能多样性的研究中研究结论与此一致,他们指数由于地膜覆盖条件下长期施入无机肥料不利于土壤氮素的挥发,太多的氮素可能对微生物的活性起到极大的抑制作用,而某些土壤微生物抵抗外界干扰的能力较弱,从而降低了土壤微生物的均匀度。

在本研究中覆膜与裸地处理土壤微生物对六大类碳源的相对利用率均呈现出碳水类 > 羧酸类 > 氨基酸类 > 多聚物类 > 芳香类 > 胺类的趋势,主要集中于碳水类、羧酸类和氨基酸类三大类碳源,是土壤中最活跃的有机碳库^[26],其中碳水类碳源约占土壤有机质总量的 5%—25%,是土壤微生物生存的主要碳源^[34],与土壤微生物活性显著相关,是土壤活性有机碳库的重要组分。覆膜措施对土壤微生物碳源利用能力的增加效果呈现出拔节期 > 灌浆期 > 收获期的变化趋势,地膜覆盖下拔节期、灌浆期的土壤微生物显著增强了对碳水类、羧酸类和多聚类三大类碳源的代谢能力($P < 0.05$),而收获期对各类碳源的代谢能力均呈现出显著降低趋势($P < 0.05$)。本研究中土壤微生物碳源利用状况与土壤 SOC、TN 含量呈显著或极显著的正相关关系。拔节期和灌浆期是土壤水热条件较好以及植物生长最旺盛的时期,作物生长带走了大量的土壤养分,而黄土高原地区土壤养分含量水平本身就很低,土壤有机物质分解作用的加强,直接导致收获期土壤养分含量降低^[35],而土壤微生物和作物根系竞争有限的矿化养分,也不利于土壤微生物的后期生长^[36]。10—20 cm 土层中,与 LD 相比,FM 处理下拔节期土壤微生物对各类碳源的代谢能力均表现出显著增加趋势($P < 0.05$);灌浆期土壤微生物碳源利用差异主要为碳水类、羧酸类和氨基酸类三大类碳源;而收获期主要表现在碳水类、羧酸类和多聚物类三大类碳源(图 4)。这说明了 10—20 cm 土层中,土壤微生物代谢的主要碳源类型随着作物生育期不断地发生着变化。Yang 等^[37]在研究长期覆盖对苹果园土壤微生物碳代谢季节性影响的试验中发现,不同季节覆盖作物对土壤微生物碳源代谢能力的影响存在差异,作者解释到这与不同覆盖作物根系分泌物的差异以及根系生理活动的季节性差异息息相关。在 20—30 cm 土层,FM 与 LD 处理在各时期土壤微生物碳源利用能力主要差异均表现在碳水类、羧酸类和氨基酸类三大类碳源的利用上(图 4)。一方面说明 FM 虽然能显著提高土壤微生物对 20—30 cm 土壤微生物碳源的利用能力,但并未改变土壤微生物主要的碳源代谢类型;另一方面说明碳水类、羧酸类和氨基酸类三大类碳源是土壤微生物碳源代谢的主要碳源,这与前人研究结果基本一致^[18]。同时,本试验通过对培养 144 h 的碳源的 AWCD 值进行主成分因子荷载值分析,发现不同处理之间土壤微生物碳源代谢能力差异主要集中在碳水类 4 类、氨基酸类 2 类、羧酸类 1 类共 7 类碳源中(表 2)。综合分析可知,覆膜措施有利于提高土壤微生物对碳源的利用能力,各处理间差异较大,且对碳水类、氨基酸类两大类碳源的利用能力最高。由图 1 我们还发现,作物生长的不同时期内(拔节期、灌浆期和收获期),FM 措施对拔节期土壤微生物碳源利用的增加效果最为明显。各时期土壤微生物碳源代谢能力整体上呈现出 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm 的变化趋势,且 FM 措施下土壤微生物碳源利用能力基本上高于 LD 处理。一方面说明随着土层深度的增加微生物碳源利用能力显著降低,另一方面说明 FM 措施能显著改善土壤微环境,促进微生物碳源代谢活性。同时,0—10 cm 和 10—20 cm 土层,表现为灌浆期土壤微生物碳源利用能力较高,而 20—30 cm 土层,表现为收获期碳源利用能力较高,差异均主要体现在碳水类、羧酸类、氨基酸类三大类碳源。进一步表明碳水类、羧酸类和氨基酸类三大类碳源是区分各处理主要的碳源类型^[18]。

在土壤生态系统中,微生物是土壤物质循环和能量流动的主要参与者,对土壤养分的吸收和转化起着非常重要的推动作用^[37]。本试验结果显示碳水类、羧酸类和氨基酸类三大类碳源是影响 FM 与 LD 处理土壤微生物碳源利用差异的主要因素。其中,土壤微生物对碳水类和羧酸类两大类碳源的利用能力与土壤 SOC 和 TN 含量;对氨基酸类碳源的利用能力与土壤含水量、pH、SOC、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量;对芳香类碳源的利用能力与土壤含水量、pH、SOC、TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量上呈现出显著或极显著的相关关系。说明土壤微生物碳源利用能力与土壤微环境变化相互影响、密切相关。Spohn 等^[38]在对温带草地长期施肥措施对土壤微生物碳利用效率和生物量周转关系的试验中发现,土壤养分能有效的通过影响微生物碳源代谢活性来控制土壤碳循环。总之,土地利用方式的变化对土壤微生物的活性和多样性有较大的影响^[15]。地膜覆盖后,微生物的群落结构和代谢功能以及与之相适应的碳源利用方式必然会影响土壤中各种养分的循环转化过程,从而影响土壤养分的数量及形态。

4 结论

1) 连续五年地膜覆盖措施显著提高了旱作春玉米农田土壤微生物碳源代谢活性及多样性指数,使土壤微生物对碳源的利用方式发生改变与 LD 相比,FM 措施增加了土壤微生物的碳源优势度指数,而降低了土壤微生物碳源均匀度指数。

2) FM 与 LD 处理土壤微生物对六大类碳源的相对利用率均呈现出碳水类 > 羧酸 > 氨基酸 > 多聚物 > 胺类 > 酚酸的趋势;且 FM 与 LD 处理土壤微生物碳源利用能力在各时期均随土层增加而降低。其中在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,各处理土壤微生物碳源利用情况均表现为灌浆期较高,而 20—30 cm 土层,表现为收获期碳源利用能力较高,且差异均主要体现在土壤微生物对碳水类、羧酸类、氨基酸类三大类碳源的利用上。

3) 在 0—10 cm 土层中,拔节期和灌浆期 FM 处理的土壤微生物碳源利用能力显著高于 LD 处理;然而收获期恰好相反,呈现出 LD 处理的土壤微生物碳源利用能力显著高于 FM 处理,初步推测覆膜措施增强了土壤微生物和作物对表层土壤养分的吸收,导致后期土壤养分与土壤微生物碳源利用效率降低。

4) 此外,本试验中碳水类、羧酸类和氨基酸类三大类碳源是土壤微生物碳源利用的主要碳源类型。而 pearson 相关分析表明,FM 处理下,土壤微生物对碳水类和羧酸类两大类碳源的利用能力主要与土壤 SOC 和 TN 含量相关性较好,呈现显著的正相关关系;对氨基酸类碳源的利用能力主要与土壤含水量、pH、SOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量相关性较高。LD 处理下,土壤微生物对碳水类、羧酸类和氨基酸类碳源的利用能力与土壤中 TN 含量的相关性较好,呈现正相关关系。

参考文献 (References):

- [1] Dong B D, Liu M Y, Jiang J W, Shi C H, Wang X M, Qiao Y Z, Liu Y Y, Zhao Z H, Li D X, Si F Y. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 93-101.
- [2] Huang F Y, Liu Z H, Zhang P, Jia Z K. Hydrothermal effects on maize productivity with different planting patterns in a rainfed farmland area. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104794.
- [3] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [4] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. *中国科学 D 辑*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [5] 李双双, 延军平, 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(07): 960-970.
- [6] Gao H H, Yan C R, Liu Q, Li Z, Yang X, Qi R M. Exploring optimal soil mulching to enhance yield and water use efficiency in maize cropping in China: a meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 2019, 225: 105741.
- [7] Li C J, Wen X X, Wan X J, Liu Y, Han J, Liao Y C, Wu W. Towards the highly effective use of precipitation by ridge-furrow with plastic film mulching instead of relying on irrigation resources in a dry semi-humid area. *Field Crops Research*, 2016, 188: 62-73.
- [8] Li F M, Wang J, Xu J Z, Xu H L. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78(1): 9-20.
- [9] Zhao H, Wang R Y, Ma B L, Xiong Y C, Qiang S C, Wang C L, Liu C G, Li F M. Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water

- use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfed ecosystem. *Field Crops Research*, 2014, 161: 137-148.
- [10] 张万文, 王萍, 王彦华, 孙义荣. 春玉米地膜覆盖增产因素研究. *杂粮作物*, 2000, 20(2): 28-30.
- [11] Gavazov K, Ingrisch J, Hasibeder R, Mills R T E, Buttler A, Gleixner G, Pumpanen J, Bahn M. Winter ecology of a subalpine grassland: effects of snow removal on soil respiration, microbial structure and function. *Science of the Total Environment*, 2017, 590/591: 316-324.
- [12] Bending G D, Turner M K, Rayns F, Marx M C, Wood M. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1785-1792.
- [13] 隋跃宇, 焦晓光, 高崇生, 程伟, 张兴义, 刘晓冰. 土壤有机质含量与土壤微生物量及土壤酶活性关系的研究. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1036-1039.
- [14] Wang Y, Ouyang Z Y, Zheng H, Wang X K, Chen F L, Zeng J. Carbon metabolism of soil microbial communities of restored forests in Southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(5): 789-799.
- [15] 贾鹏丽, 冯海艳, 李森. 东北黑土区不同土地利用方式下农田土壤微生物多样性. *农业工程学报*, 2020, 36(20): 171-178.
- [16] 范瑞英, 杨小燕, 王恩姮, 邹莉, 陈祥伟. 黑土区不同林龄落叶松人工林土壤微生物群落功能多样性的对比研究. *北京林业大学学报*, 2013, 35(2): 63-68.
- [17] 何翠翠, 李贵春, 尹昌斌, 张洋. 有机肥氮投入比例对土壤微生物碳源利用特征的影响. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 383-393.
- [18] 刘红梅, 安克锐, 王慧, 张思宇, 赵建宁, 杨殿林, 张贵龙. 不同施肥措施对华北潮土区玉米田土壤微生物碳源代谢多样性的影响. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2336-2344.
- [19] 宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧. 长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征. *环境科学*, 2019, 40(3): 1475-1482.
- [20] 徐万里, 唐光木, 葛春辉, 王西和, 刘骅. 长期施肥对新疆灰漠土土壤微生物群落结构与功能多样性的影响. *生态学报*, 2015, 35(2): 468-477.
- [21] 严君, 韩晓增, 陈旭, 邹文秀, 陆欣春, 郝翔翔. 施肥对小麦、玉米和大豆连作土壤微生物群落功能多样性的影响. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(6): 171-177.
- [22] 张宇宁, 梁玉婷, 李广贺. 油田土壤微生物群落碳代谢与理化因子关系研究. *中国环境科学*, 2010, 30(12): 1639-1644.
- [23] Salomo S, Münch C, Röske I. Evaluation of the metabolic diversity of microbial communities in four different filter layers of a constructed wetland with vertical flow by BiologTM analysis. *Water Research*, 2009, 43(18): 4569-4578.
- [24] 张雪丽. 地膜覆盖对旱作春玉米氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [25] Bao S D. *Soil Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing China Agricultural Press. 2000.
- [26] 王利彦, 周国娜, 朱新玉, 高宝嘉, 许会道. 凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响. *生态学报*, 2021, 41(7): 2709-2718.
- [27] Galgani F, Cadiou Y, Bocquene G. Routine determination of enzyme kinetics using Plate reader. *Biotechnology and Bioengineering*, 1991, 38(4): 434-437.
- [28] Mandal U K, Warrington D N, Bhardwaj A K, Bar-Tal A, Kautsky L, Minz D, Levy G J. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis. *Geoderma*, 2008, 144(1/2): 189-197.
- [29] Bandopadhyay S, Sintim H Y, DeBruyn J M. Effects of biodegradable plastic film mulching on soil microbial communities in two agroecosystems. *PeerJ*, 2020, 8: e9015.
- [30] de Oliveira Almeida D, Klauber Filho O, Almeida H C, Gebler L, Felipe A F. Soil microbial biomass under mulch types in an integrated apple orchard from Southern Brazil. *Scientia Agricola*, 2011, 68(2): 217-222.
- [31] Zhou L F, Feng H. Plastic film mulching stimulates brace root emergence and soil nutrient absorption of maize in an arid environment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(2): 540-550.
- [32] Huang F Y, Liu Z H, Mou H Y, Li J L, Zhang P, Jia Z K. Impact of farmland mulching practices on the soil bacterial community structure in the semiarid area of the loess plateau in China. *European Journal of Soil Biology*, 2019, 92: 8-15.
- [33] 侯晓杰, 汪景宽, 李世朋. 不同施肥处理与地膜覆盖对土壤微生物群落功能多样性的影响. *生态学报*, 2007, 27(2): 655-661.
- [34] Hu S, Coleman D C, Carroll C R, Hendrix P F, Beare M H. Labile soil carbon pools in subtropical forest and agricultural ecosystems as influenced by management practices and vegetation types. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1997, 65(1): 69-78.
- [35] 宋秋华, 李凤民, 王俊, 刘洪升, 李世清. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响. *生态学报*, 2002, 22(12): 2125-2132.
- [36] Miatto R C, Wright I J, Batalha M A. Relationships between soil nutrient status and nutrient-related leaf traits in Brazilian cerrado and seasonal forest communities. *Plant and Soil*, 2016, 404(1/2): 13-33.
- [37] Yang J F, Zhang T R, Zhang R Q, Huang Q Q, Li H K. Long-term cover cropping seasonally affects soil microbial carbon metabolism in an apple orchard. *Bioengineered*, 2019, 10(1): 207-217.
- [38] Spohn M, Pötsch E M, Eichorst S A, Woebken D, Wanek W, Richter A. Soil microbial carbon use efficiency and biomass turnover in a long-term fertilization experiment in a temperate grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 168-175.