

冬油菜覆盖对土壤理化性状及微生物的影响

焦锦堂¹, 孙万仓¹, 方彦¹, 陈其鲜³, 崔小茹³, 缪纯庆⁴, 白静⁴, 安丽容⁵,
雒兴刚⁵, 万海元⁵, 陶肖蕾¹, 王旺田², 杨刚¹, 马骊¹, 武军艳¹

(1. 省部共建旱生境作物学国家重点实验室/甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省农业技术推广总站, 甘肃 兰州 730070;
4. 张掖市农业科学研究院, 甘肃 张掖 734000; 5. 甘肃省金塔县农业技术推广中心, 甘肃 金塔 735300)

摘要:于2021—2022年在甘肃省兰州市永登县上川镇甘肃农业大学油菜育种基地设置5个不同类型冬油菜覆盖处理,即‘陇油7号’覆盖(SC)、“天油2号”覆盖(WC)、“陇油99”覆盖(LX)、“陇油88”覆盖(SR)、“天油2288”覆盖(WR),以冬闲无覆盖为对照(CK),通过研究冬闲田不同类型冬油菜覆盖对土壤理化性质及微生物的影响,以期为该区筛选适宜秋冬闲田覆盖的油菜类型提供依据。结果表明:五叶期白菜型覆盖量比甘蓝型高,进入越冬期后甘蓝型覆盖量高于白菜型;白菜型品种和甘蓝型品种均具有良好的覆盖效果,甘蓝型品种‘陇油88’和白菜型品种‘陇油99’在不同时期的覆盖效果各有优势,二者均可以作为冬闲覆盖材料。冬前甘蓝型覆盖各项光合指标均高于白菜型,甘蓝型品种较白菜型具有覆盖优势。冬油菜覆盖具有降低土壤容重和提高土壤孔隙度的作用,随土层深度的增加土壤容重和土壤孔隙度均表现为先升高后降低;冬油菜覆盖可以增加0~30 cm土层土壤含水量,白菜型覆盖的保水效果优于甘蓝型覆盖。与CK相比,覆盖处理0~30 cm土层土壤全氮、全磷、全钾、铵态氮、硝态氮含量分别增加了54.00%、85.00%、20.62%、15.30%、39.30%;甘蓝型覆盖处理0~30 cm土层土壤全氮、全磷、全钾含量比白菜型高,白菜型覆盖处理的土壤铵态氮和硝态氮含量比甘蓝型高。土壤基础养分氮磷钾含量与细菌和真菌的优势菌门呈正相关关系,短期冬油菜覆盖可以提高春小麦生物量但对其产量没有影响。综上可知,甘蓝型冬油菜覆盖在提高光合特性和土壤氮磷钾含量方面的表现比白菜型好,白菜型冬油菜覆盖在增加土壤含水量和土壤硝、铵态氮含量方面优于甘蓝型,因此甘蓝型冬油菜‘陇油88’和白菜型冬油菜‘陇油7号’是本区较为理想的覆盖作物,二者混播效果更佳。

关键词:冬油菜覆盖;干物质质量;土壤含水量;氮素积累;土壤微生物多样性

中图分类号:S565.4 **文献标志码:**A

Effects of different winter rape mulchings on soil physical and chemical properties and microorganisms

JIAO Jintang¹, SUN Wancang¹, FANG Yan¹, CHEN Qixian³, CUI Xiaoru³, MIAO Chunqing⁴,
BAI Jing⁴, AN Lirong⁵, LUO Xinggang⁵, WAN Haiyuan⁵, TAO Xiaolei¹, WANG Wangtian²,
YANG Gang¹, MA Li¹, WU Junyan¹

(1. The State Key Laboratory of Crops in Arid Habitat Jointly Built by the Province and the Ministry/Agricultural College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. School of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Gansu Provincial Agricultural Technology Promotion Station, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4. Zhangye Agricultural Science Research Institute, Zhangye, Gansu 734000, China; 5. Agricultural Technology Promotion Center of Jinta County, Gansu Province, Jinta, Gansu 735300, China)

Abstract: From 2021–2022, five different types of winter rape mulching treatments were set up in the rape breeding base of Gansu Agricultural University, Shangchuan Town, Yongdeng County, Lanzhou, Gansu Province,

收稿日期:2022-12-20

修回日期:2023-03-03

基金项目:国家自然科学基金项目(32260519);2022年现代丝路寒旱农业科技支撑项目(GSLK-2021-9);国家现代农业产业技术体系(CARS-12)

作者简介:焦锦堂(1998–),男,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为作物育种。E-mail:13679302671@163.com

通信作者:马骊(1991–),男,甘肃张掖人,副研究员,主要从事油菜遗传育种研究。E-mail:348369277@qq.com

武军艳(1981–),女,甘肃平川人,教授,主要从事强冬性油菜品种改良研究。E-mail:94790094@qq.com

including ‘Longyou 7’ mulching (SC), ‘Tianyou 2’ mulching (WC), ‘Longyou 99’ mulching (LX), ‘Longyou 88’ mulching (SR), and ‘Tianyou 2288’ mulching (WR) to provide a basis for selecting suitable types of rapeseed for autumn and winter fallow field coverage in this area. The results showed that the coverage of *Brassica rapa* during the five-leaf stage was higher than that of *Brassica napus*, and after entering the overwintering stage, the coverage of *Brassica napus* was higher than that of *Brassica rapa*. Both the *Brassica napus* and *Brassica rapa* varieties had good coverage effects. The *Brassica napus* varieties ‘Longyou 88’ and *Brassica rapa* ‘Longyou 99’ had their own advantages in coverage effects at different stages, and both were used as winter fallow coverage materials. Before winter, the photosynthetic indicators of the *Brassica napus* were higher than those of the *Brassica rapa*, and the *Brassica napus* varieties had coverage advantages over the *Brassica rapa*. Winter rapeseed mulching had the effect of reducing soil bulk density and increasing soil porosity. With the increase of soil depth, both soil bulk density and soil porosity first increased and then decreased. Winter rapeseed mulching increased the soil moisture content of 0~30 cm soil layer, and the water retention effect of cabbage mulching was better than that of cabbage mulching. Compared with CK, the content of total nitrogen, total phosphorus, total potassium, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen in the 0~30 cm soil layer increased by 54.00%, 85.00%, 20.62%, 15.30%, and 39.30%, respectively. The content of total nitrogen, total phosphorus, and total potassium in the 0~30 cm soil layer of the *Brassica napus* coverage treatment was higher than that of the *Brassica rapa*, while the content of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in the soil of the *Brassica rapa* coverage treatment was higher than that of the *Brassica napus*. The content of nitrogen, phosphorus, and potassium in soil basic nutrients was positively correlated with the dominant phylum of bacteria and fungi. Short term winter rapeseed coverage increased the biomass of spring wheat but had no effect on its yield. In summary, the coverage of *Brassica napus* performed better than that of *Brassica rapa* in improving photosynthetic characteristics and soil nitrogen, phosphorus, and potassium content. The coverage of *Brassica rapa* winter rapeseed was better than that of *Brassica napus* in increasing soil water content and soil nitrate and ammonium nitrogen content. Therefore, *Brassica napus* ‘Longyou 88’ and *Brassica rapa* ‘Longyou 7’ are ideal coverage crops in this area, and their mixed planting effect is better.

Keywords: winter rape mulching; dry matter quality; soil water content; nitrogen accumulation; soil microbial diversity

西北地区气候酷寒,干旱少雨,热量不足,农作物一年一熟,具有光温一季有余两季不足的特点,每年农田裸露空闲时间达半年左右,导致了光、热、水、土资源的浪费和流失,对生态环境也造成了不良影响^[1]。冬季地膜和秸秆覆盖是北方常见并广泛应用的一种土壤保育方法,但残膜导致的土壤污染和秸秆覆盖的高成本是农业可持续发展的主要限制因素^[2]。覆盖作物能降低土壤风蚀、改善土壤水分、优化土壤理化性状、减少光热水肥的流失、增加土壤微生物数量,在保护生态环境、提升耕地质量、保育农田等方面发挥重要作用^[3]。因此充分利用秋闲田种植覆盖作物是保护土地耕性、减少土壤风蚀的重要措施^[4]。李峰等^[4]研究发现越冬作物覆盖能够有效增加地表覆盖度,随着覆盖度的增加,地表径流和土壤侵蚀逐渐减少,作物覆盖通过减轻土壤侵蚀和减少地表径流从而改变地表输沙量。另外,覆盖作物还可以限制土壤水分消耗,具有较好的保水效果,进而增加土壤含水量,平衡土

壤pH^[5]。有研究表明,作物覆盖对氨氧化微生物基因丰度有显著性影响,而土壤pH、含水量、铵态氮和硝态氮含量是影响氨氧化微生物群落结构变化的主要因素^[6]。作物覆盖通过影响根际土壤养分环境,促进土壤生物活性和养分循环,降低氮素流失从而改善土壤健康状况,有效提高土壤肥力和生产力^[7-8]。除了利于土壤保持丰富的有机质及氮、磷、钾含量外,覆盖作物还可以改变根际土壤微生物的群落结构,改变土壤通气状况抑制厌氧细菌的生长^[9-10]。微生物群落的组成与土壤有机质、土壤pH、电导率以及土壤基础养分含量息息相关^[11-12],覆盖作物通过增加土壤基础养分和提高碳源利用能力,增加土壤微生物种群丰富度,提高土壤酶活性^[13-14],从而促进土壤微生物的代谢活动^[15-16]。

油菜是我国主要的油料作物,也是重要的绿肥作物,冬油菜生长迅速,营养体大,覆盖效果好,具有品种类型多、适应性广、用途多、种植成本相对较小等优点^[17],充分利用这些优点作为覆盖作物对西

北地区农田土壤保护和培肥土壤具有重要意义^[18]。冬季作物覆盖作为一种有效节水、减蚀的农田保育措施,在小黑麦^[19]、玉米^[20]、冬毛苕子和二月兰^[21]等作物中已经被证实并得到广泛应用,但以冬油菜作为冬季覆盖作物的研究还不多见,且在西北干旱地区能作为覆盖材料的冬油菜品种尚不明确。因此,本研究选用 5 个不同类型冬油菜品种,通过测定不同品种越冬前的生物量,明确其对土壤理化性质及土壤微生物的影响,以期为冬油菜作为冬季覆盖作物的可行性提供理论依据,同时为筛选适宜西北地区种植的冬油菜覆盖品种提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于 2021—2022 年在甘肃省兰州市永登县上川镇(103.5°E,36.73°N)甘肃农业大学油菜育种基地进行。该区为温带大陆性季风气候,平均海拔 2 150 m,年平均降雨量为 231 mm,年蒸发量 1 879.9 mm,干旱指数达 5.40,年平均气温 5℃左右,年平均无霜期 126 d,年平均风速 2.3 m·s⁻¹。土壤类型为沙壤土,供试土壤养分理化性状:pH 8.70,全氮 0.70 g·kg⁻¹,全磷 0.92 g·kg⁻¹,全钾 20.21 g·kg⁻¹;硝态氮 5.36 mg·kg⁻¹,铵态氮 2.75 mg·kg⁻¹,土壤肥力偏低^[22]。

1.2 试验设计

供试冬油菜包括 3 个白菜型品种(‘陇油 7 号’,‘天油 2 号’和‘陇油 99’)和 2 个甘蓝型品种(‘陇油 88’和‘天油 2288’),如表 1 所示,采用随机区组设计,设‘陇油 7 号’覆盖(SC)、“天油 2 号”覆盖(WC)、“陇油 99”覆盖(LX)、“陇油 88”覆盖(SR)、“天油 2288”覆盖(WR)及无覆盖对照(CK)共 6 个处理,3 次重复,18 个小区,小区面积 50 m²(5 m×10 m)。

供试冬油菜于 2021 年 8 月 20 日播种,采用人工单行开沟播种,行距 20 cm,株距 10 cm,每穴 2~3 粒。播种前所有覆盖处理按当地常规施肥水平统一施基肥,氮肥施用量为 225 kg·hm⁻²,磷肥(P₂O₅)施用量为 150 kg·hm⁻²,翌年 4 月将冬油菜地上部分刈割,此阶段为油菜季。油菜刈割后全部覆盖地表,于 2022 年 4 月 10 日在各处理原区播种春小麦(‘陇春 10 号’),采用人工单行开沟播种,播种量 195 万株·hm⁻²,行距 20 cm,同年 7 月 23 日收获,此阶段称为小麦季。油菜季与小麦季田间管理相同。油菜季主要研究覆盖作物的生物量及其对土壤水分的影响,小麦季主要研究覆盖作物对土壤氮素、微生物和小麦产量的影响。

表 1 供试冬油菜植株养分含量				
Table 1 Nutrient content of tested winter rape plants				
类型 Type	品种 Variety	N /(g·kg ⁻¹)	P /(g·kg ⁻¹)	K /(mg·kg ⁻¹)
甘蓝型 <i>B.napus</i>	陇油 88 Longyou 88	0.99	0.09	2.16
	天油 2288 Tianyou 2288	0.88	0.07	2.20
白菜型 <i>B.rapa</i>	陇油 7 号 Longyou 7	0.40	0.04	0.47
	天油 2 号 Tianyou 2	0.38	0.03	0.59
	陇油 99 Longyou 99	0.64	0.05	0.93

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质积累和光合指标的测定 干物质质量:于油菜的五叶期和越冬期分别取样,每个小区取 5 株,剪去根,置于 105℃ 恒温下杀青 30 min,80℃ 鼓风干燥箱烘干至恒重,冷却后称重,计算地上部干物质质量。光合特性:于油菜的苗期、五叶期和越冬期,每处理随机选取 10 片叶用 TARGAS-1 便携式光合测定仪(PP SYSTEMS 公司,美国)测定其净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO₂ 浓度。

1.3.2 土壤物理性状和含水量的测算 于油菜季的返青期用 100 cm³ 的环刀切割未搅动的自然土壤,使环刀里充满土样,105℃ 烘干后称量干土重。土壤容重和孔隙度计算公式如下:

土壤容重(g·cm⁻³)= 土壤干重(g)/环刀容积(cm³)

孔隙度(%)=(1-容重/土壤密度)×100%
式中,环刀容积为 100 cm³;土壤密度为 2.65 g·cm⁻³。

于油菜的苗期、五叶期、枯叶期和返青期,每个小区选择 3 点,分别取 0~10、10~20、20~30 cm 土层土样,在烘箱中 105℃ 烘 12 h,用烘干法测定土壤水分含量(SWC),计算公式如下:

SWC(%)=(*M*_鲜-*M*_干)/(*M*_干-*m*)×100%
式中,*M*_鲜为鲜土重+铝盒重,*M*_干为烘干土重+铝盒重,*m*为铝盒重。

1.3.3 土壤养分测定 于小麦的收获期(2022 年 7 月),各小区分别取 0~10、10~20、20~30 cm 土层土样,自然风干、去杂、充分研磨后过 100 目网筛混匀干燥保存。全氮、全磷、硝态氮以及铵态氮含量测定参考邹锋等^[23]方法,全钾含量测定参考任尚学^[24]的方法。

1.3.4 土壤微生物群落结构测定 于小麦的收获期(2022 年 7 月),各小区采用五点取样法分别取 0~10、10~20、20~30 cm 土层土样,除去动植物残体

及石砾等杂质,充分研磨混匀,过 2 mm 筛后分装至 2 ml 的 EP 管中,于-80 ℃ 温度下储藏,用 Illumina Novaseq 6000 进行测序^[25]。

1.3.5 春小麦产量及产量构成因素 于小麦收获期,每个小区随机选取 20 株长势均匀的小麦,进行株高、穗长、穗粒数、单株总分蘖数、单株有效分蘖数的测定;各处理选择未被取样破坏具有代表性的 1 m²样方小麦进行收割,称量鲜质量,风干后称量干质量,脱粒后称重,并计算小麦产量和生物量。

1.4 数据统计

利用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据整理计算,Origin 8.1 作图,SPSS 17.0 进行统计分析,不同覆盖方式间的差异采用独立样本 *t* 检验,多重比较采用 LSD 法,显著性水平为 *P*<0.05。

2 结果与分析

2.1 不同类型冬油菜覆盖干物质积累与光合特性

表 2 为各处理冬油菜五叶期和越冬期的干物质(因苗期油菜植株矮小,尚未在地表形成有效覆盖,故未对该时期进行取样测定),由表 2 可知,不同覆盖处理在五叶期和越冬期的干物质量有差异,五叶期不同类型冬油菜的干物质量差异显著,‘陇油 7 号’和‘陇油 99’比‘天油 2 号’、‘陇油 88’、‘天油 2288’分别高 19.53%、50.42%、110.65% 和 26.80%、59.58%、123.47%,‘天油 2 号’比‘陇油 88’、‘天油 2288’分别高 25.85%、76.23%,‘陇油 88’比‘天油 2288’高 40.04%;白菜型平均比甘蓝型高 69.52%。在越冬期,‘陇油 88’比‘陇油 99’、‘天油 2288’、‘天油 2 号’、‘陇油 7 号’分别高 15.78%、54.18%、90.62%、102.11%,‘陇油 99’比‘天油 2288’、‘天油 2 号’、‘陇油 7 号’分别高 33.17%、64.65%、74.57%,‘天油 2288’比‘天油 2 号’、‘陇油 7 号’分别高 23.66%、31.09%;甘蓝型比白菜型高 31.32%。总体而言,五叶期白菜型油菜生长比甘蓝型快,覆盖量比甘蓝型高,进入越冬期后甘蓝型持续生长,甘蓝型覆盖量比白菜型高;造成这种现象的原因可能与两类作物的抗寒性有关,甘蓝型抗寒性较弱对环境变化反应迟钝,而白菜型具有强抗寒性,对外部低温反应灵敏,在低温环境下逐渐停止生长并开始为越冬做准备。以上分析表明白菜型品种和甘蓝型品种均具有良好的覆盖效果,品种间相较,甘蓝型品种‘陇油 88’和白菜型品种‘陇油 99’在不同时期的覆盖效果各有优势,二者均可以作为冬闲覆盖材料。

不同类型冬油菜各生育时期光合特性的各项

指标均表现为随生育期的推进先升高后降低,在生长最为旺盛的五叶期达到最大(图 1)。不同类型冬油菜覆盖冬前光合特性差异显著,甘蓝型冬油菜覆盖处理的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度分别较白菜型覆盖高 39.7%、51.8%、49.3% 和 11.7%,且差异显著(*P*<0.05),同种类型冬油菜之间光合特性无差异。可见,甘蓝型油菜整体光合能力优于白菜型油菜,且前者较后者生长旺盛,因此在冬前甘蓝型油菜的覆盖效果较白菜型优越。

2.2 不同类型冬油菜覆盖对土壤容重及孔隙度的影响

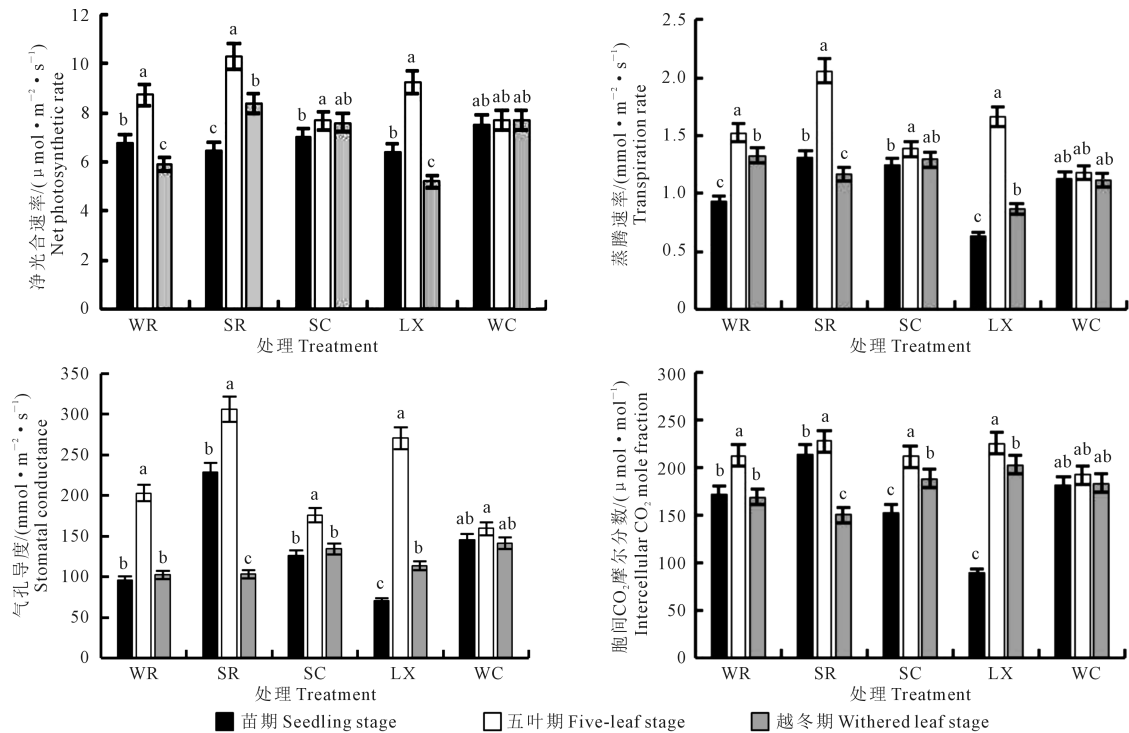
各类型冬油菜覆盖对不同深度土壤容重及孔隙度的影响显著(图 2)。0~10 cm 土层,覆盖处理的土壤容重较 CK 平均降低了 0.11 g·cm⁻³,以 SC 和 WC 处理效果最显著;各覆盖处理的土壤孔隙度均显著高于 CK(*P*<0.05)平均提高了 8.3%,以 SC 和 WC 处理效果最好。10~20 cm 土层,覆盖处理的土壤容重较 CK 平均降低了 0.19 g·cm⁻³,土壤孔隙度较 CK 平均提高了 15.5%,以 SC 效果最好,各覆盖处理均与 CK 差异显著(*P*<0.05)。20~30 cm 土层,覆盖处理的土壤容重较 CK 平均降低了 0.09 g·cm⁻³,土壤孔隙度较 CK 平均提高 7.1%。不同类型间,3 种白菜型覆盖处理的平均土壤容重比甘蓝型低,土壤孔隙度比甘蓝型高;说明不同土层的土壤容重和土壤孔隙度差异较小,冬油菜覆盖具有降低土壤容重和提高土壤孔隙度的作用,不同类型油菜品种对土壤容重和孔隙度的影响有所不同。

表 2 不同类型冬油菜覆盖处理冬前干物质质量/(kg·hm⁻²)
Table 2 Dry matter mass before winter under different types of winter rapeseed coverage treatment

类型 Type	品种 Variety	处理 Treatment	生育时期 Growth stage	
			FS	WP
甘蓝型 <i>B.napus</i>	陇油 88 Longyou 88	SR	4733.33±259.83c	22016.66±143.79a
	天油 2288 Tianyou 2288	WR	3380.00±140.41d	14280.00±202.57c
白菜型 <i>B.rapa</i>	陇油 7 号 Longyou 7	SC	7120.00±517.39a	10893.33±246.06d
	天油 2 号 Tianyou 2	WC	7553.33±149.78a	19016.67±143.79b
	陇油 99 Longyou 99	LX	5956.66±219.42b	11550.00±716.68d

注:FS:五叶期;WP:越冬期;SR:‘陇油 88’覆盖;WR:‘天油 2288’覆盖;SC:‘陇油 7 号’覆盖;LX:‘陇油 99’覆盖;WC:‘天油 2 号’覆盖。同列不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著(*P*<0.05)。下同。

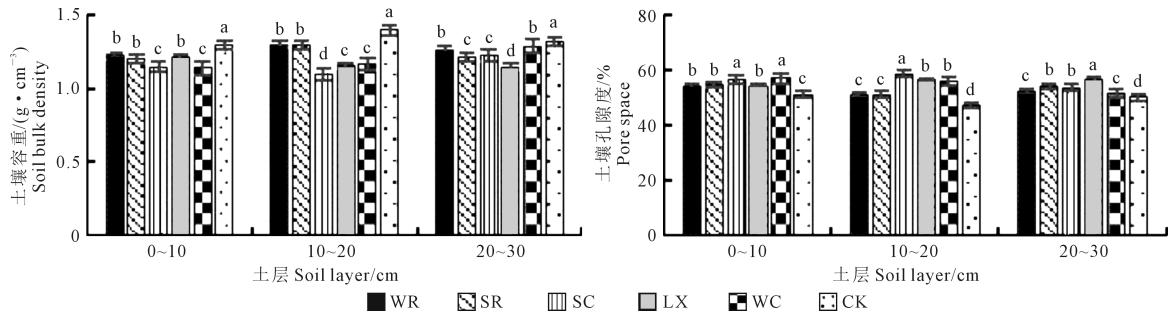
Note:FS: Five-leaf stage; WP: Overwintering stage; SR: ‘Longyou 88’ mulch; WR: ‘Tianyou 2288’ mulch; SC: ‘Longyou 7’ mulch; LX: ‘Longyou 99’ mulch; WC: ‘Tianyou 2’ mulch. Different lowercase letters in the same column showed significant difference among different treatments(*P*<0.05). The same below.



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$); SD: 苗期; FS: 五叶期; WP: 越冬期; WR: ‘天油 2288’ 覆盖; SR: ‘陇油 88’ 覆盖; SC: ‘陇油 7 号’ 覆盖; LX: ‘陇油 99’ 覆盖; WC: ‘天油 2 号’ 覆盖。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). SD: Seedling stage; FS: Five-leaf stage; WP: Withered leaf stage; WR: ‘Tianyou 2288’ mulch; SR: ‘Longyou 88’ mulch; SC: ‘Longyou 7’ mulch; LX: ‘Longyou 99’ mulch; WC: ‘Tianyou 2’ mulch. The same below.

图 1 不同类型冬油菜在各生育时期的光合特性

Fig.1 Photosynthetic characteristics of different types of winter rape at different growth stages



注:不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same soil layer ($P<0.05$). The same below.

图 2 不同类型冬油菜覆盖对土壤容重及孔隙度的影响

Fig.2 Effects of different types of winter rapeseed mulching on soil bulk density and porosity

2.3 不同类型冬油菜覆盖对土壤含水量的影响

2.3.1 对全生育时期土壤含水量的影响 冬油菜覆盖对不同深度土壤含水量的影响显著 (图 3)。0~10 cm 土层,覆盖处理的土壤含水量比 CK 平均增加 75.4%,LX 处理提高最显著;10~20 cm 土层,覆盖处理的土壤含水量较 CK 平均增加 37.2%,LX、SC 和 WC 处理提高效果显著;20~30 cm 土层,覆盖处理的土壤含水量较 CK 平均增加 13.1%,LX 处理提高最显著。0~30 cm 土层,甘蓝型冬油菜覆盖处理间差异均不显著。0~10 cm 和 20~30 cm 土层,不同白菜型品种覆盖处理之间差异有所不同;0~10

cm 土层,LX 处理显著高于 SC 和 WC 处理,后两个处理间差异不显著;20~30 cm 土层,土壤含水量表现为 LX>WC>SC。不同冬油菜类型间,0~30 cm 土层白菜型处理的土壤平均含水量较甘蓝型高 10.4%。说明冬油菜覆盖可以增加 0~30 cm 土层土壤含水量,且增幅随土层深度的增加逐渐减小,白菜型覆盖较甘蓝型覆盖优势更显著。

2.3.2 对各生育时期土壤含水量的影响 不同覆盖处理在各生育时期对土壤含水量影响显著 (表 3),各处理平均土壤含水量在五叶期达最大值 (21.13%),此后逐渐降低,在返青期最低 (7.55%);与

CK 相比,覆盖处理 0~30 cm 土层平均土壤含水量在各生育时期分别增加了 40.45%、37.65%、42.96%、10.58%,返青期增幅最小;白菜型覆盖的土壤平均含水量比甘蓝型品种高 14.72%,说明白菜型覆盖的保水效果优于甘蓝型覆盖。可能原因是甘蓝型冬前剧烈的营养生长加快了土壤水分的消耗;WR、SR 和 SC 处理的变异系数小于 CK 处理,表明 WR、SR 和 SC 处理降低了土壤水分波动,供水稳定性优于裸地对照。

2.4 不同类型冬油菜覆盖对土壤养分的影响

2.4.1 不同类型冬油菜覆盖对耕层土壤全效养分的影响 如表 4 所示,覆盖处理 0~30 cm 土层土壤

全氮、全磷、全钾含量均高于 CK,平均分别高 54.00%、56.34%、60.81% ($P<0.05$);不同类型冬油菜覆盖处理间土壤全氮、全磷、全钾含量差异显著 ($P<0.05$),甘蓝型平均分别较白菜型高 29.09%、9.89%、34.62%;甘蓝型处理间,SR 的全氮、全磷、全钾含量比 WR 分别高 25.64%、6.28%、17.07%;白菜型处理间,LX 的全氮、全磷、全钾含量比 SC 和 WC 分别高 13.14%、17.44%、11.65%和 32.48%、12.26%、24.58%。各处理表现为 $SR>WR>LX>SC>WC>CK$,变化趋势与植株养分含量相似,说明冬油菜覆盖使土壤 N、P、K 含量升高,可能是植株养分向土壤养分转化的结果。

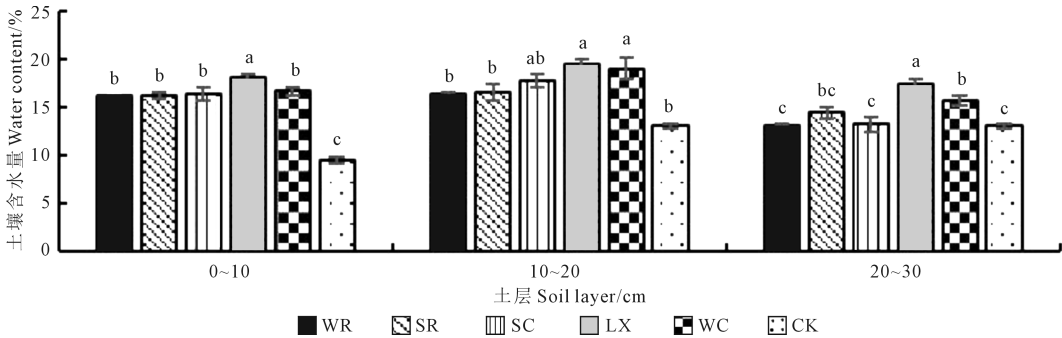


图 3 不同类型冬油菜覆盖对 0~30 cm 土层土壤含水量的影响
Fig.3 Effect of different types of winter rapeseed mulching on soil moisture content in 0~30 cm soil layer

表 3 不同覆盖对各生育时期对土壤含水量的影响/%
Table 3 Effects of different straw mulchings on soil water content in different growth stages of spring wheat

处理 Treatment	生育时期 Growth stage				平均 Mean	变异系数 CV/%
	SD	FS	WP	RP		
WR	17.09±2.86ab	19.76±1.60b	11.37±1.07cd	5.78±0.14b	13.50±1.20b	15.41
SR	18.22±1.48ab	21.55±0.37ab	13.71±0.53bcd	7.72±0.22ab	15.30±0.54ab	6.10
SC	15.24±2.72ab	23.36±1.53ab	14.09±0.77abc	7.95±0.72ab	15.16±1.28ab	14.59
LX	20.14±1.31a	22.92±0.61ab	18.08±0.94a	18.08±1.01ab	17.28±0.35ab	3.51
WC	18.00±1.07ab	23.85±0.62a	16.46±2.45ab	10.16±1.12a	17.12±0.72a	7.30
CK	11.94±1.05b	15.35±1.74c	9.730±1.02d	5.69±0.90b	10.68±1.17c	18.90
平均 Mean	16.77	21.13	13.91	7.55	14.84	10.97
变异系数 CV/%	22.96	16.48	24.89	25.56	18.19	

表 4 不同类型冬油菜覆盖的土壤全效养分含量
Table 4 Total nutrient content of soil covered with different types of winter rapeseed

类型 Type	处理 Treatment	全氮	全磷	全钾
		Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	Total phosphorus /(g·kg ⁻¹)	Total potassium /(mg·kg ⁻¹)
甘蓝型 <i>B.napus</i>	WR	1.73±0.84b	2.48±0.22ab	54.67±2.65b
	SR	2.18±0.40a	2.63±0.39a	64.00±2.33a
白菜型 <i>B.rapa</i>	SC	1.52±0.48bc	2.17±0.88c	43.89±3.49cd
	LX	1.72±0.80b	2.54±0.11ab	49.00±2.03bc
	WC	1.30±1.76c	2.27±0.88bc	39.33±0.23d
	CK	0.78±1.16d	1.06±1.75d	34.67±0.51e

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。
Note:Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$).The same below.

2.4.2 不同冬油菜覆盖对耕层土壤铵态氮的影响 覆盖处理 0~30 cm 土层土壤铵态氮含量在同种类型冬油菜间差异不显著,在不同类型冬油菜间差异显著(图 4),覆盖处理的土壤铵态氮含量平均比 CK 高 28.85%,SC、LX、WC 处理分别比 WR 和 SR 高 13.79%、20.79%、9.91%和 8.37%、15.03%、4.67%;白菜型平均比甘蓝型高 12.03%。可见冬油菜覆盖能增加土壤铵态氮含量,白菜型冬油菜在提升土壤铵态氮含量方面效果显著,有提升冬闲裸露田土壤肥力的潜力。

2.4.3 不同冬油菜覆盖对耕层土壤硝态氮的影响 不同类型冬油菜覆盖对 0~30 cm 土层土壤硝

态氮含量影响显著(图 4),覆盖处理的土壤硝态氮含量均显著高于 CK,平均比 CK 高 35.97%。SC 处理较其他处理具有显著优势,比 WR、SR、LX、WC 处理分别高 15.78%、32.35%、15.35%、28.11%,WR、SR、LX、WC 处理间差异不显著。以上结果表明冬油菜覆盖能增加土壤硝态氮含量,SC 处理对提高效果最显著。

2.5 不同冬油菜覆盖对土壤微生物群落结构的影响

2.5.1 不同处理对土壤微生物群落 Alpha 多样性的影响 基于对不同作物覆盖对土壤理化性质的研究,在甘蓝型覆盖和白菜型覆盖中各筛选出一种覆盖处理(SR 和 SC)进行 Alpha 多样性检测。Alpha 多样性反映了处理的丰富度和多样性,Chao 和 ACE 指数用于衡量物种数量的多少;香农指数和辛普森指数则表征处理物种的多样性,其值越大,表示样本中物种多样性越高^[21]。OTUs 表示了真实存在的生物学序列,能够实现样本中真实的物种甚至菌株水平物种的鉴定。

对土壤样本进行细菌检测,共获得有效序列 2887196 条。样品覆盖度在 0.98 以上,测序数据量合理。依据 97%序列相似性对所测序列进行聚类分析,样本平均 OTUs 数为 1530.64(图 5)。由表 5 可知,覆盖处理的 Chao 指数和 ACE 指数均高于 CK,即土壤中细菌种群数量有所增加;香农指数和辛普森指数也高于 CK,即覆盖处理条件下土壤细菌

多样性也有所增加,说明覆盖处理增加了土壤细菌群落的种群数量和种群多样性。不同覆盖品种间,SC 处理的 Chao 指数和 ACE 指数均显著高于 SR 处理,分别提高 4.21%和 4.39%;SC 处理与 SR 处理间香农指数和辛普森指数均差异不显著。说明 SC 处理更有利于增加土壤细菌种群数量,对土壤细菌多样性的影响二者之间没有显著差异。

对土壤样本进行真菌检测,共获得有效序列 2880035 条。样品覆盖度在 0.99 以上,依据 97%序列相似性对所测序列进行聚类分析,样本平均 OTUs 数为 190.78(图 5)。由表 5 可知,与 CK 相比,覆盖处理的真菌群落数量(Chao 和 ACE 指数)呈现上升趋势,香农指数和辛普森指数反映的真菌群落多样性呈现下降趋势。说明覆盖处理具有增加土壤真菌的种群数量降低种群多样性的作用。不同覆盖处理间多样性和丰富度具有显著性差异(表 5),SR 处理的 Chao 指数和 ACE 指数较 SC 处理分别显著提高 14.18%和 15.41%;两处理间香农指数和辛普森指数差异不显著。说明 SR 处理比 SC 处理对土壤真菌群落数量的影响较大,对土壤真菌多样性的影响其二者之间没有显著差异。

2.5.2 不同处理对土壤微生物群落组成的影响

由图 6A 可知,样本中门水平上共获得细菌群落 33 个,土壤中细菌优势菌门为 Proteobacteria、Acidobacteriota、Actinobacteriota、Gemmatimonadota、Bacteroidota

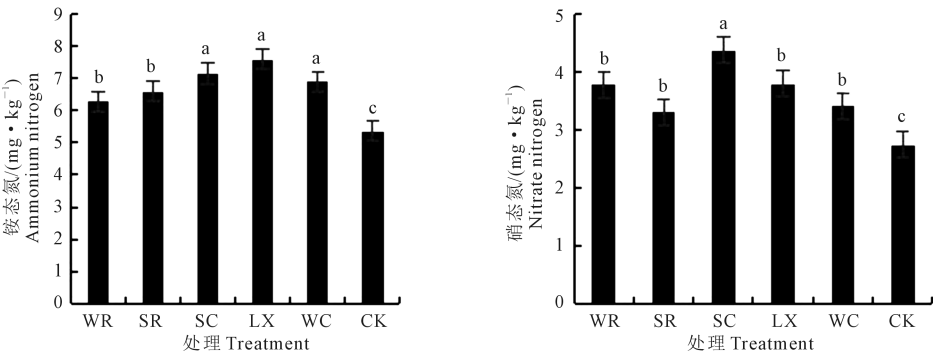


图 4 不同类型冬油菜覆盖的土壤铵态氮和硝态氮含量

Fig.4 Ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content in soil covered with different types of winter rapeseed

表 5 不同覆盖土壤微生物多样性指数

Table 5 Soil microbial diversity index with different straw mulching

类型 Type	处理 Treatment	ACE 指数 ACE index	Chao 指数 Chao index	辛普森指数 Simpson index	香农指数 Shannon index	覆盖度 Coverage
细菌 Bacteria	CK	1436.25±31.42b	1422.04±31.10b	0.996±0.004b	9.18±0.07b	0.999±0.001a
	SC	1556.79±7.09a	1539.79±7.44a	0.997±0.005b	9.41±0.02a	0.998±0.001b
	SR	1491.29±11.08b	1477.56±10.90b	0.997±0.005ab	9.30±0.01ab	0.998±0.001ab
真菌 Fungi	CK	172.58±12.69b	173.99±12.07b	0.870±0.005a	4.11±0.24a	0.999±0.001a
	SC	185.50±0.74b	190.08±1.38b	0.769±0.030b	3.94±0.12b	0.999±0.001a
	SR	214.09±4.73a	217.04±3.99a	0.769±0.031b	3.82±0.14b	0.999±0.001a

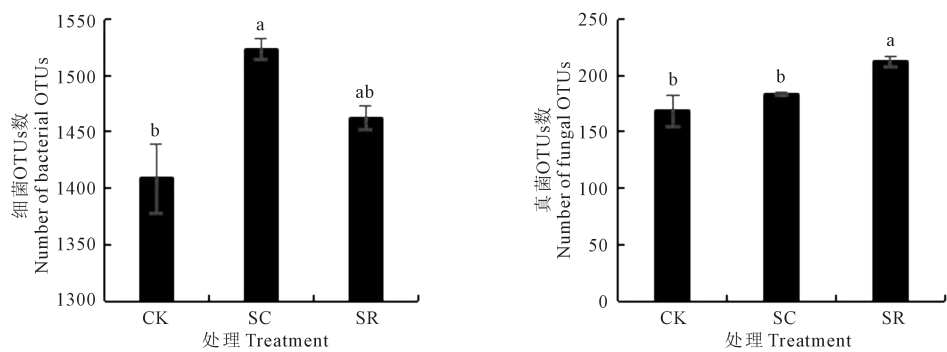


图 5 土壤细菌和真菌 OTUs
Fig.5 Soil bacteria and fungi OTUs

和 Chloroflexi,CK 处理下各优势菌门相对丰度分别为 25.56%、18.48%、24.48%、10.81%、4.56%、6.29%; SC 处理下相对丰度分别为 26.59%、21.36%、16.14%、12.11%、3.37%、5.61%,Proteobacteria、Acidobacteriota、Actinobacteriota 的丰度较 CK 有所增加;SR 处理下各优势菌门相对丰度分别为 36.22%、16.83%、14.32%、9.85%、4.70%、6.74%,Proteobacteria 和 Chloroflexi 丰度较 CK 有所增加;两种覆盖处理均降低了 Actinobacteriota 的丰度。有益菌门 Proteobacteria 含量显著增加,参与植物残体分解的 Actinobacteriota 含量显著降低,说明冬油菜覆盖增加了细菌优势菌门的丰度,有益菌门含量增加,由于分解了大量的植物残体,参与植物残体分解的菌门含量下降。

样本中门水平上共获得真菌群落 30 个(图 6B),土壤中真菌优势菌门为 Ascomycota、Basidiomycota、Mortierellomycota、unclassified Fungi、Chytridiomycota,CK 处理下各优势菌门相对丰度分别为 74.57%、2.67%、0.90%、7.45%、9.28%,SC 处理下相对丰度分别为 77.05%、12.36%、1.65%、7.81%、1.09%,SR 处理下相对丰度分别为 67.76%、10.89%、3.95%、15.54%、1.64%。覆盖处理能增加真菌群落优势菌门的相对丰度,其中有益菌门 Ascomycota、Basidiomycota、Mortierellomycota、unclassified Fungi 含量均增加;参与植物纤维分解的 Chytridiomycota 含量显著降低。说明冬油菜覆盖增加了真菌优势菌门的丰度,有益菌门含量增加,参与植物残体分解的菌门含量下降。

2.5.3 土壤理化性质与土壤微生物群落的相关性

RDA 分析可反映菌群与环境因子之间关系,不同颜色代表不同样本组,两箭头之间的夹角体现正负相关性,锐角表示正相关,钝角表示负相关;不同样本在环境因子上的垂直投影的长短代表环境因子对样本的影响程度,越长表示影响越大,反之则越小。土壤理化性质与微生物之间的相关性结果显

示,在土壤细菌中 Axis-1 和 Axis-2 分别解释了细菌群落变量的 68.65%和 24.53%(图 7),土壤全氮、硝态氮、铵态氮、电导率和 pH 显著影响细菌群落组成,其 *P* 值分别为 0.024、0.024、0.256、0.720 和 0.034,对群落结构的解释度分别为 2.4%、2.4%、25.6%、72.0%和 3.4%。土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量与 Acidobacteriota、Gemmatimonadota、Proteobacteria 呈正相关关系,与 Actinobacteriota、Bacteroidota、Chloroflexi 呈负相关关系;pH 与 Acidobacteriota、Actinobacteriota、Gemmatimonadota、Bacteroidota 呈正相关关系,与 Proteobacteria、Chloroflexi 呈负相关关系;电导率与 Bacteroidota、Chloroflexi、Proteobacteria 呈正相关关系,与 Acidobacteriota、Actinobacteriota、Gemmatimonadota 呈负相关关系。表明覆盖处理通过调整土壤理化性质从而增加或减少土壤细菌的菌群数量和种类,根据土壤养分与土壤微生物的相关性,选择具有针对性的覆盖材料是提升土壤微生物有益菌的新途径。

土壤真菌中 Axis-1 和 Axis-2 分别解释了真菌群落变量的 65.10%和 28.27%(图 7),土壤全氮、硝态氮、铵态氮、电导率和 pH 显著影响细菌群落组成,其 *P* 值分别为 0.062、0.226、0.034、0.588 和 0.064,对群落结构的解释度分别为 6.2%、22.6%、3.4%、58.8%和 6.4%。土壤全氮、硝态氮、铵态氮与 Ascomycota、Basidiomycota、Mortierellomycota、unclassified Fungi 呈正相关关系,与 Chytridiomycota 呈负相关关系;pH 与 Ascomycota、Chytridiomycota 呈正相关关系,与 Basidiomycota、Mortierellomycota、unclassified Fungi 呈负相关关系;电导率与 Basidiomycota、Mortierellomycota、unclassified Fungi 呈正相关关系,与 Ascomycota、Chytridiomycota 呈负相关关系。表明覆盖处理通过调整土壤理化性质从而改变土壤真菌群落的数量和种类。

2.6 不同作物覆盖对春小麦生物量和产量的影响

如表 6 所示,覆盖处理对春小麦生物量有显著影响,各处理的生物量为 11.33~12.52 t·hm⁻²,比 CK 处理显著提高 23.37%~43.41%。覆盖处理的株高、穗粒数、单株总分蘖数、生物量分别较 CK 高 4.43%、23.82%、78.17%、33.44%,其穗长、单株有效分蘖数、产量与 CK 无差异。不同类型间相较,LX 处理的生物量较 WR 处理显著提高 16.25%;WR 和

SR 处理的株高分别比 SC 处理显著提高 2.27% 和 2.49%;SR 处理的穗粒数比 WR、SC、LX、WC 处理分别显著提高 12.08%、11.14%、21.79%、28.94%;WR、SR、SC、LX 处理总分蘖数显著高于 WC 处理,平均提高 27.78%。说明覆盖处理可通过增加株高和总分蘖数增加春小麦的生物量,短期不同类型冬油菜覆盖对提高小麦产量效果不明显。

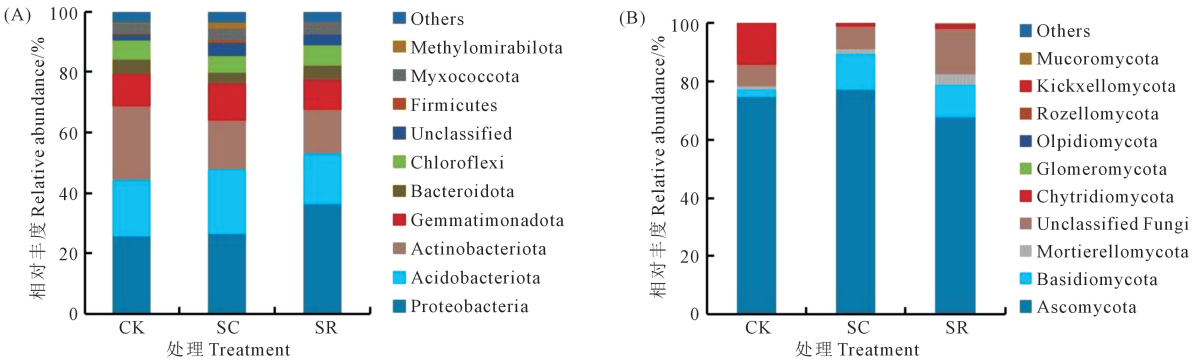
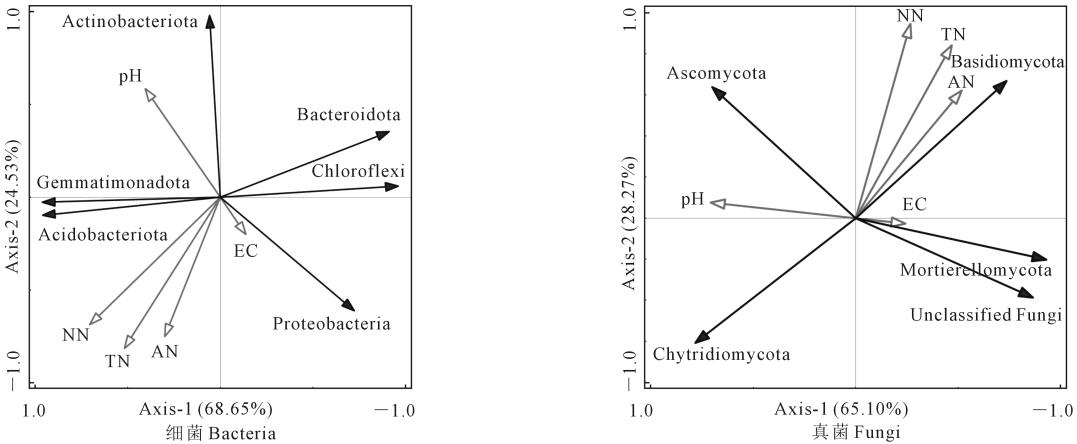


图 6 土壤细菌相对丰度 (A) 和真菌相对丰度 (B)
Fig.6 Relative abundance of soil bacteria (A) and fungi (B)



注: TN—全氮;pH—pH;EC—电导率;NN—硝态氮;AN—铵态氮。
Note: TN—Total nitrogen;EC—Conductivity;NN—Nitrate nitrogen;AN—Ammonium nitrogen.

图 7 土壤基础养分与细菌和真菌群落组成的 RDA 分析
Fig.7 RDA analysis of soil basic nutrients and bacterial and fungal community composition

表 6 不同覆盖对春小麦产量及其构成要素的影响							
Table 6 Effects of different types of straw mulching on yield and its components of spring wheat							
处理 Treatment	株高 Height/cm	穗长 Spike length /cm	穗粒数 Number of grains per spike	单株总分蘖数 Tillering number per plant	单株有效分蘖数 Effect ivetillering number per plant	生物量 Biomass /(t·hm ⁻²)	产量 Yield /(t·hm ⁻²)
WR	52.24±0.35a	8.79±0.05a	33.11±0.79b	2.58±0.13a	2.50±0.09a	10.77±0.91b	1.39±0.06ab
SR	52.35±0.17a	9.08±0.33a	37.11±0.68a	2.81±0.10a	2.51±0.10a	12.38±0.37a	1.39±0.08ab
SC	51.08±0.08b	8.75±0.09a	33.39±0.52b	2.61±0.20a	2.16±0.37a	11.22±0.16ab	1.41±0.03ab
LX	51.77±0.47ab	8.68±0.24a	30.47±0.37c	2.58±0.13a	2.21±0.11a	12.52±0.27a	1.44±0.08a
WC	51.5±0.09ab	8.68±0.29a	28.78±0.29c	2.07±0.23b	1.91±0.45ab	11.33±0.28ab	1.37±0.04ab
CK	49.59±0.29c	8.55±0.06a	26.31±0.19d	1.57±0.42b	1.55±0.25ab	8.73±0.19c	1.32±0.04b
显著性分析 Significance test (P value)							
覆盖模式 Cropping pattern	0.043 *	NS	0.031 *	0.042 *	NS	0.034 *	NS

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$);*:差异显著 ($P<0.05$);NS:差异不显著。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$);*:The difference is significant ($P<0.05$);NS:The difference is not significant.

3 讨 论

3.1 不同类型冬油菜干物质积累特性

有研究发现冬前冬油菜生物量的多少直接影响覆盖度,干物质积累量与其覆盖度呈正相关^[7],较大的干物质积累量利于提高覆盖度。可能是因为生物量越大其覆盖地表的面积就越大,能最大程度地减少土地裸露面积^[4]。本研究发现,冬前不同类型冬油菜的干物质质量差异显著,甘蓝型冬油菜的干物质质量均高于白菜型冬油菜,甘蓝型冬油菜较白菜型生长速度快,其各项光合指标也高于白菜型冬油菜。可能是因为白菜型冬油菜越冬性强,在逆境中能够即时做出响应机制,将更多的营养储存在根部用于越冬,而甘蓝型冬油菜对低温不敏感^[26],大部分养分用于地上部分的营养生长导致生物量高,这与李鹏等^[27]研究结果吻合。说明在冬前甘蓝型油菜较白菜型具有较高的覆盖度,更具有覆盖优势。

3.2 不同类型冬油菜覆盖对土壤理化性状的影响

有研究表明冬春季植物覆盖对积累有效降水、提高土壤贮水能力、减少土壤蒸发具有重要意义^[28]。冬油菜覆盖能明显抑制水分的自由蒸发从而减少土壤水分的流失^[29]。本研究发现冬油菜覆盖可以增加冬前各生育时期0~30 cm土层的土壤含水量,五叶期增幅最显著;白菜型处理的土壤含水量高于甘蓝型且土壤含水量随土层深度的增加逐渐减小。可能原因是冬前甘蓝型冬油菜地上部分的持续生长,消耗了土壤耕层的水分,导致土壤含水量比白菜型低^[30]。白菜型覆盖较甘蓝型覆盖的优势在于保持土壤的高含水量,因此在减少水分消耗方面白菜型覆盖处理优于甘蓝型。作物覆盖除了能保持土壤高含水量外还可以调节土壤容重和孔隙度^[31-32]。本试验表明冬油菜覆盖具有降低土壤容重和提高土壤孔隙度的作用,原因是冬油菜根部较大且侧根较多,冬油菜覆盖有可能改善土壤结构,使土壤变得松软^[33]。

前人研究发现,氮肥施用量过大,会导致大量的氮肥通过淋失、挥发、地表径流等形式损失,从而直接导致作物减产,生态环境面临巨大挑战^[34-35]。采用有机绿肥代替化肥是解决当前问题的新途径^[36]。本研究发现冬油菜覆盖不仅能减少土壤风蚀、降低水分蒸发,而且有较高氮蓄积量,与冬闲对照相比,覆盖处理的土壤全氮含量显著增加,铵态氮和硝态氮的含量也有所提高;这与高仁才等^[37]研究结果一致。一方面可能是冬绿肥区大量有机物质的腐解与腐殖化促进了土壤氮、磷、钾元素的分

解和利用^[38],另一方面是长时间的覆盖活跃了土壤微生物环境的细菌、真菌群落和碳代谢^[39]。本研究还发现,冬油菜覆盖增加了返青期土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量,甘蓝型冬油菜覆盖的土壤全氮含量较白菜型覆盖低。朱明川等^[22]表明在单位面积株数相同的情况下,甘蓝型冬油菜对土壤氮素的吸收量高于白菜型冬油菜,这可能就是甘蓝型覆盖土壤氮素含量较白菜型覆盖低的原因,与本研究结果相吻合。说明冬油菜覆盖能够增加冬闲田的土壤氮素含量,提高土壤肥力,但是不同覆盖品种对氮素的响应不同,白菜型冬油菜作为覆盖材料更有利于降低土壤氮素消耗。

3.3 不同类型冬油菜覆盖对土壤微生物群落多样性和组成的影响

土壤微生物的多样性与组成是衡量土壤微环境的重要指标,长期耕地施肥使土地微生物群落内部结构发生改变^[40]。通过冬季覆盖处理可以保持土壤微生物群落多样性,覆盖处理可以增加根际土壤微生物种群丰富度和保持群落物种的均匀性^[41]。本研究结果表明,冬油菜覆盖具有增加土壤微生物种群多样性的优势,覆盖处理的土壤细菌和真菌菌群丰富度均有不同程度的增加。土壤氮素含量与土壤细菌、真菌的菌群数量和种类呈正相关关系,白菜型冬油菜覆盖的微生物数量显著高于甘蓝型冬油菜,甘蓝型品种对土壤真菌群落的影响最显著,而白菜型品种对土壤细菌群落的影响最显著。其原因可能与不同类型冬油菜根部代谢活动有关,有待进一步研究。说明不同类型冬油菜覆盖对细菌和真菌的微生物环境各有优劣势,在生产中将两个品种混合种植(套作、轮作或混合撒播)效果可能会更好。短期不同类型冬油菜覆盖可以提高春小麦生物量但对提高产量没有显著效果。因此建立良好的油菜覆盖制度是维持土壤微生物群落环境稳定的新途径。

4 结 论

冬油菜覆盖对提高冬闲田的土壤理化性质、春播作物生物量、土壤微生物数量具有显著效果。不同类型冬油菜覆盖处理间,白菜型品种和甘蓝型品种均具有良好的覆盖效果,甘蓝型品种‘陇油88’和白菜型品种‘陇油99’在不同时期的覆盖效果各有优势,二者均适宜作为冬闲覆盖材料;冬油菜覆盖能显著降低0~30 cm土层土壤容重和提高土壤孔隙度,其0~30 cm土层土壤含水量和土壤全效养分含量也有所增加,白菜型品种覆盖对土壤硝态氮和

铵态氮作用更显著,甘蓝型品种覆盖对提高土壤氮磷钾含量效果更好。此外,冬油菜覆盖增加了细菌和真菌优势菌门菌群含量,有益菌门含量增加,参与植物残体分解的菌门类含量减少;土壤全效养分含量与优势菌门的含量呈正相关关系。因此‘陇油88’和‘陇油7号’是本区较为理想的覆盖作物。鉴于白菜型和甘蓝型用于覆盖材料具备的不同优点,强冬性甘蓝型和强冬性白菜型品种混种的覆盖效果更佳。

参 考 文 献:

[1] 曹文. 绿肥生产与可持续农业发展[J]. 中国人口·资源与环境, 2000,(增刊2): 108-109.
CAO W. Sustained agriculture and production of green manure[J]. China Population, Resources and Environment, 2000,(S2): 108-109.

[2] 蒋洪丽, 雷琪, 张彪, 等. 覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3426-3438.
JIANG H L, LEI Q, ZHANG B, et al. Effects of mulching and application of organic and chemical fertilizer on greenhouse gas emission and water and nitrogen use in summer maize farmland[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3426-3438.

[3] 孙万仓, 裴新梧, 马骊, 等. 我国北方冬季覆盖作物研究进展及发展前景[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(1): 128-136.
SUN W C, PEI X W, MA L, et al. Advances and outlook of winter cover crop development research in northern China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(1): 128-136.

[4] 李峰, 慕晶, 耿智广, 等. 越冬作物覆盖保水效应及对后茬大豆水分利用效率和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(5): 116-125.
LI F, MU J, GENG Z G, et al. Water conservation effect of overwintering crops mulching and its effect on water use efficiency and yield of subsequent soybean[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(5): 116-125.

[5] 樊志龙, 柴强, 曹卫东, 等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1389-1402.
FAN Z L, CHAI Q, CAO W D, et al. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1389-1402.

[6] SONG W C, WANG J, HOU L. Effects of frequency and amount of stover mulching on soil nitrogen and the microbial functional guilds of the endosphere and rhizosphere[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 976154.

[7] 彭琼, 刘宝元, 曹琦, 等. 作物覆盖度对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 97-103.
PENG Q, LIU B Y, CAO Q, et al. Effect of crop coverage on soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 97-103.

[8] 任丽华, 李晓阳, 马晓彤. 多品种覆盖对免耕种植系统土壤健康的改善作用[J]. 水土保持应用技术, 2022,(5): 9-10.
REN L H, LI X Y, MA X T. Effect of multi-variety mulching on soil health of no-tillage cropping system[J]. Technology of Soil and Water

Conservation, 2022,(5): 9-10.

[9] 周泉, 张小短, 马淑敏, 等. 间作绿肥对油菜根际土壤碳氮及根际微生物的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7965-7971.
ZHOU Q, ZHANG X D, MA S M, et al. Effects of intercropping green manure on soil carbon, nitrogen and soil microbial in rapeseed rhizosphere[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7965-7971.

[10] 隋鑫, 霍海南, 鲍雪莲, 等. 覆盖作物的种植现状及其对下茬作物生长和土壤环境影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2666-2674.
SUI X, HUO H N, BAO X L, et al. Research advances on cover crop plantation and its effects on subsequent crop and soil environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2666-2674.

[11] CHEN S H, XIANG X L, MA H L, et al. Response of soil bacterial communities in wheat rhizosphere to straw mulching and N fertilization[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 982109.

[12] 韦安培, 丁文超, 胡恒宇, 等. 耕作方式及秸秆还田对土壤性质、微生物碳源代谢及小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 145-152.
WEI A P, DING W C, HU H Y, et al. Effects of tillage methods and straw return on soil properties, metabolism of microbial carbon source and wheat yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 145-152.

[13] RAMADHAN M N. Yield and yield components of maize and soil physical properties as affected by tillage practices and organic mulching[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28(12): 7152-7159.

[14] LI H Y, ZHANG Y H, SUN Y G, et al. No-tillage with straw mulching improved grain yield by reducing soil water evaporation in the fallow period: a 12-year study on the Loess Plateau[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 224: 105504.

[15] CHEN S M, YAO F Y, MI G H, et al. Crop rotation increases root biomass and promotes the correlation of soil dissolved carbon with the microbial community in the rhizosphere [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 1081647.

[16] 李青梅, 张玲玲, 刘红梅, 等. 覆盖作物多样性对猕猴桃园土壤微生物群落功能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 351-359.
LI Q M, ZHANG L L, LIU H M, et al. Effects of cover crop diversity on soil microbial community functions in a kiwi fruit orchard[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(2): 351-359.

[17] DU X B, CHEN C, LUO L J, et al. Long-term no-tillage direct seeding mode for water-saving and drought-resistance rice production in rice-rapeseed rotation system[J]. Rice Science, 2014, 21(4): 210-216.

[18] GRICE E A, KONG H H, CONLAN S, et al. Topographical and temporal diversity of the human skin microbiome[J]. Science, 2009, 324(5931): 1190-1192.

[19] 叶桃林, 肖小平, 肖春芳, 等. 双季稻主产区冬闲期绿色覆盖作物与保护性种植模式研究 I. 饲用小黑麦新品种引进筛选及适应性研究[J]. 作物研究, 2005, 19(3): 165-167.
YE T L, XIAO X P, XIAO C F, et al. Study on green cover crops and protective planting pattern in winter fallow period in main producing areas of double cropping rice I. Introduction and adaptability of

- the forage triticale varieties [J]. *Crop Research*, 2005, 19(3): 165-167.
- [20] YANG H K, LI J G, WU G, et al. Maize straw mulching with no-tillage increases fertile spike and grain yield of dryland wheat by regulating root-soil interaction and nitrogen nutrition[J]. *Soil & Tillage Research*, 2023, 228: 105652.
- [21] FU X, WANG J, PENG Z P, et al. Late topdressing can sustain wheat grain yield under straw mulching in the Loess Plateau of China [J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(6): 3487-3497.
- [22] 朱明川, 武军艳, 马骊, 等. 北方冬油菜养分积累特点及与产量性状的灰色关联度分析[J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(1): 72-82.
- ZHU M C, WU J Y, MA L, et al. Grey correlation analysis of nutrient accumulation characteristics and yield traits of winter rapeseed in north China[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2023, 45(1): 72-82.
- [23] 邹锋, 袁德义, 高超, 等. 自动间断化学分析仪与原子吸收光谱法测定授粉受精期油茶子房的元素含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(4): 1095-1099.
- ZOU F, YUAN D Y, GAO C, et al. The content of mineral elements in camellia oleifera ovary at pollination and fertilization stages determined by auto discrete analyzers and atomic absorption spectrophotometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(4): 1095-1099.
- [24] 任尚学. 土壤全钾的测定方法[J]. *土壤通报*, 1961,(2): 52-56.
- REN S X. Method for determining total potassium in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1961,(2): 52-56.
- [25] CALLAHAN B J, MCMURDIE P J, ROSEN M J, et al. DADA2: high-resolution sample inference from illumina amplicon data[J]. *Nature Methods*, 2016, 13(7): 581-583.
- [26] LI F, ZHANG G H, CHEN J, et al. Straw mulching for enhanced water use efficiency and economic returns from soybean fields in the Loess Plateau China[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 17111.
- [27] 李鹏, 马骊, 徐芳, 等. 越冬前北方不同类型强冬性冬油菜形态及生理响应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(5): 42-51.
- LI P, MA L, XU F, et al. Comparison of morphological and physiological responses of two different species of northern winter rapeseed before overwintering[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(5): 42-51.
- [28] LIU L, ZHANG L, LIU J, et al. Soil water and temperature characteristics under different straw mulching and tillage measures in the black soil region of China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 76(3): 256-262.
- [29] ZHANG J X. Study on the effect of straw mulching on farmland soil water [J]. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022, 2022: 3101880.
- [30] 徐莹莹, 王俊河, 刘玉涛, 等. 秸秆不同还田方式对土壤物理性状、玉米产量的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(5): 78-84.
- XU Y Y, WANG J H, LIU Y T, et al. Effects of different returning methods of straw on soil physical property, yield of corn[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(5): 78-84.
- [31] 张婧, 陈庆锋, 刘伟, 等. 秸秆还田对盐碱地土壤及作物生长的影响研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(11): 13-22.
- ZHANG J, CHEN Q F, LIU W, et al. Research progress on the effect of straw returning on soil and crop growth in saline-alkali soil [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(11): 13-22.
- [32] STANEK-TARKOWSKA J, CZYZ E A, PASTUSZCZAK M, et al. The impact of using different doses of biomass ash on some physical properties of podzolic soil under the cultivation of winter oilseed rape [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(11): 6693.
- [33] 马星竹, 边道林, 郝小雨, 等. 不同耕作措施对东北玉米农田土壤物理性质的影响[J]. *土壤与作物*, 2022, 11(1): 54-61.
- MA X Z, BIAN D L, HAO X Y, et al. Effects of different tillage systems on soil physical properties of corn field in northeast China[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(1): 54-61.
- [34] 董林林, 王海侯, 陆长婴, 等. 秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1143-1150.
- DONG L L, WANG H H, LU C Y, et al. Effects of straw returning amount and type on soil nitrogen and its composition [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1143-1150.
- [35] 颜晓元, 夏龙龙, 逯超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 177-183.
- YAN X Y, XIA L L, TI C P. Win-win nitrogen management practices for improving crop yield and environmental sustainability[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 177-183.
- [36] LIEBMAN A M, GROSSMAN J, BROWN M, et al. Legume cover crops and tillage impact nitrogen dynamics in organic corn production [J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(3): 1046-1057.
- [37] 高仁才, 陈松鹤, 马宏亮, 等. 秋闲期秸秆覆盖与减氮优化根系分布提高冬小麦产量及水氮利用效率[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(14): 2709-2725.
- GAO R C, CHEN S H, MA H L, et al. Straw mulching from autumn fallow and reducing nitrogen application improved grain yield, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat by optimizing root distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(14): 2709-2725.
- [38] WANG K K, HU W S, XU Z Y, et al. Seasonal temporal characteristics of in situ straw decomposition in different types and returning methods[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(4): 4228-4240.
- [39] ZHANG W T, WANG Y, LI C Y, et al. Long-term ground cover affects soil bacterial community and carbon metabolism in the Loess Plateau, China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(4): 918-931.
- [40] 杨希森, 于济淼, 王冰, 等. 秸秆还田对土壤养分供应及微生物群落的影响[J]. *智慧农业导刊*, 2022, 2(18): 50-52.
- YANG X M, YU J S, WANG B, et al. Effects of straw returning on soil nutrient supply and microbial community [J]. *Journal of Smart Agriculture*, 2022, 2(18): 50-52.
- [41] LIU B, XIA H, JIANG C C, et al. 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 841: 156608.