

祁连山区轮作对燕麦土壤酶活性及微生物数量的影响

鲁金香¹, 柴继宽¹, 赵桂琴^{1*}, 魏孔涛¹, 杨震²

(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 山丹县三宝农业科技发展有限公司, 甘肃 山丹 734100)

摘要:【目的】通过燕麦与油菜、箭筈豌豆、青稞、大麦等作物轮作, 研究该种植模式对土壤酶活性和土壤微生物数量的影响。【方法】在山丹马场连续3年种植燕麦的地块上, 设6个处理, 分别种植箭筈豌豆、燕麦+箭筈豌豆、油菜、青稞、大麦、燕麦, 研究不同处理下土壤酶活性及微生物数量的变化情况。【结果】土壤酶活性随土层加深而逐渐下降, 轮作较连作显著提高了土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性; 燕麦与豆科轮作的土壤酶活性明显高于它与禾本科轮作, 其中以燕麦—箭筈豌豆轮作效果最显著, 开花期0~20 cm 土层土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性较连作分别增加了55.92%、20.36%和51.47%。轮作也显著增加了土壤微生物数量, 其中燕麦→箭筈豌豆处理下增幅最大, 0~10、10~20和20~30cm 土层土壤细菌数量较连作分别增加了23.34%、16.51%和38.92% ($P < 0.05$); 真菌数量分别增加了110%、135.29%和150%; 放线菌数量分别增加112.65%、107.41%和175.38%。【结论】燕麦与豆科轮作对土壤酶活性和微生物数量的提高幅度显著大于它与禾本科轮作。在祁连山区燕麦生产中, 燕麦与箭筈豌豆轮作有望修复连作障碍, 改善土壤环境。

关键词: 燕麦; 轮作; 土壤酶活性; 土壤微生物

中图分类号: S544.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2023)03-0108-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2023.03.014



燕麦(*Avena sativa*)为禾本科燕麦属一年生草本植物, 喜冷凉, 耐贫瘠, 在世界各地广泛栽培, 是优质的粮饲兼用作物^[1]。燕麦茎秆柔软, 叶片丰富, 适口性好, 制作的干草和青贮料消化率高, 是奶牛最佳的禾本科粗饲料之一^[2]。近年来, 随着国内规模化牧场增多、奶牛存栏量增加, 对燕麦的需求激增, 国内燕麦干草供不应求, 进口量逐年增加, 价格持续攀高, 进一步

刺激了相关企业的生产积极性。燕麦在甘肃省主要分布于祁连山区和甘南州等地区, 祁连山区的山丹、永昌、民乐等地已经发展为燕麦商品草基地, 燕麦成为该地区经济发展的支柱产业^[3-6]。

甘肃的山丹军马场历史上就有燕麦种植, 近10年来更是发展成为省内最大的商品草种植基地。随着燕麦种植效益的逐渐凸显和当地自然条件的限制, 燕麦连作在山丹军马场已成为非常普遍的现象。有的地块已经连续5年以上种植燕麦, 导致土壤状况变差, 燕麦产量下降。已有研究表明, 燕麦连作3年以上就会产生连作障碍, 导致产量下降、土壤养分消耗加快、土壤酶活性降低、土壤微生物区系发生变化等问题^[7-9]。而轮作能有效克服连作障碍, 有利于作物生长和提高产量^[10]。土壤生物学特性的变化是连作障碍的主要原因之一, 利用生物指标来指示土壤质量或

收稿日期: 2022-03-07; **修回日期:** 2022-03-14

基金项目: 甘肃省区域科技合作与创新发展的专项(21CX6NG301); 甘肃农业大学科技创新基金—盛彤笙创新基金(GSAU-STIS-2018-21)

作者简介: 鲁金香(1996-), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生。

E-mail: 878190794@qq.com

*通信作者。E-mail: zhaogq@gsau.edu.cn

土壤健康是研究土壤状况的有效手段^[11]。土壤酶活性和微生物数量是衡量土壤肥力水平和土壤质量的重要生物学指标,土壤酶活性代表了土壤中物质代谢的旺盛程度,因此在一定程度上可反映土壤的养分状况^[12-13]。曹莉等^[14]研究了轮作不同种类豆科牧草对连作马铃薯田土壤酶活性的影响,发现轮作箭筈豌豆、天蓝苜蓿和陇东苜蓿对土壤脲酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶活性的提高均有明显的促进作用。轮作还可促进旱地小麦对氮、磷、钾等养分的吸收,且对氮、钾吸收的影响程度高于磷;粮草短周期轮作有利于提高小麦产量,长周期轮作有利于提高小麦秸秆产量和生物产量^[15]。

土壤微生物和土壤养分之间密切相关,土壤养分可作为表征土壤肥力的指标,而土壤微生物数量分布可以敏感地反映土壤肥力变化,可作为评价土壤肥力水平的生物学指标,直接影响土壤养分的有效性和肥力状况^[16]。张成君等^[17]研究了玉米-豌豆、玉米-玉米、2龄苜蓿、高粱-马铃薯、燕麦-玉米、马铃薯-燕麦、豌豆-高粱7种轮作处理的差异,发现7种轮作处理对土壤可培养微生物数量影响显著,与其他轮作模式相比,2龄苜蓿、玉米-玉米和高粱-马铃薯模式的细菌数量和微生物总数显著下降,各处理下土壤微生物数量以细菌占绝对优势,放线菌次之,真菌数量最

少,并有明显的土层垂直分布规律。

目前,关于燕麦栽培方面的研究,主要集中在栽培管理^[18-19]、混播利用^[20-22]、刈割制度^[23]等方面。针对祁连山区燕麦轮作对土壤酶活性和微生物影响的研究还十分有限,连作障碍是土壤还是其他因素造成的、其严重程度如何均有待深入研究。因此,本研究拟在山丹马场通过燕麦与油菜、箭筈豌豆、青稞、大麦等作物的轮作,研究该模式对土壤酶活性及土壤微生物的影响,以期从这两个方面体现轮作对燕麦连作障碍的修复作用,为该地区实行燕麦轮作提供技术参考。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试燕麦品种为陇燕3号,箭筈豌豆品种为中牧324,油菜品种为青油9号,青稞品种为一品白,大麦品种为甘饲一号,供试材料均由甘肃农业大学草业学院提供。

1.2 试验地概况

田间试验设在山丹军马场,位于河西走廊中部,祁连山冷龙岭北麓的大马营草原,海拔2780 m,年均温1℃,昼夜温差大,≥0℃年年有效积温1834℃。年平均降水量380 mm,土壤为黑钙土,土质为壤土,耕层(0~30 cm)土壤基本理化性状见表1。

表1 耕层土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of cultivated soil

土层/cm	pH值	有机质/(g·kg ⁻¹)	速效氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)
0~10	7.55	80.84	125.2	32.24	302.34	2.23
10~20	7.64	82.41	102.78	26.37	223.25	2.43
20~30	7.90	76.91	114.45	14.26	156.63	2.02

1.3 试验设计

于2020年开展轮作试验,在已连续3年(2017—2019年)种植燕麦的地块上,于2020年6月13日分别种植箭筈豌豆、燕麦+箭筈豌豆、油菜、青稞、大麦、燕麦。播前结合翻地施入尿素150 kg/hm²,过磷酸钙300 kg/hm²作基肥。小区面积100 m²(10 m×10 m),区距1 m,重复3次。机械条播,单播燕麦行距15 cm,播种量262.5 kg/hm²;油菜行距30 cm,播种量7.5 kg/hm²;大麦行距20 cm,播种量187.5 kg/hm²;青稞行距25 cm,播种量225 kg/hm²;箭筈豌豆行距为

25 cm,播种量105 kg/hm²;燕麦与箭筈豌豆分别以各自单播量的60%、40%混播,行距25 cm。没有灌溉条件,出苗后人工除草2次。

1.4 土样采集

以燕麦的生育时期始点为准,分别在燕麦分蘖期(7月14日)、拔节期(8月8日)、开花期(9月9日)和灌浆期(9月29日),在各小区用五点取样法用土钻采集0~10、10~20和20~30 cm土样,挑除可见石砾和根系后,装入自封袋,密封后放入冰盒带回实验室自然风干1周,过1 mm筛后存于自封袋中,测定过氧化氢

酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶及脲酶活性。灌浆期土样分2份,1份风干过筛测定土壤酶活性,1份直接测定微生物数量。

1.5 土壤酶活性及微生物数量测定

1.5.1 土壤酶活性测定 土壤过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定^[24],其活性以1 h内1 g土消耗0.1 mol/L KMnO₄的mL数表示;碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定^[25],其活性以24 h后1 g土壤中释放出酚的mg数表示;用3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性^[26],酶活性以24 h后1 g土壤中生成葡萄糖的mg数表示;脲酶活性采用苯酚一次氯酸钠比色法测定^[27],其活性以24 h后1 g土中NH₃-N的mg数表示。

1.5.2 土壤微生物数量的测定 采用稀释平板计数法对土壤3大类微生物数量进行测定,其中真菌数量测定采用马丁-孟加拉红培养基,放线菌数量用改良高氏一号培养基,细菌数量采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基^[28]。称取5 g土样倒入装有45 mL无菌水的200 mL三角瓶中,稀释度为10⁻¹,摇床(120 r/min,常温)振荡20 min,取1 mL到装有9 mL无菌水的试管中,稀释度为10⁻²,以此类推依次制成10⁻³、10⁻⁴、10⁻⁵和10⁻⁶。取0.1 mL各稀释度的土壤悬液加到培养基上,用玻璃棒涂皿,然后倒置于25~30 °C恒温培养箱中培养,细菌培养3~4 d,真菌培养2~3 d,放线菌培养5~7 d。最后取出培养皿,选取菌落数在10~200之间的培养皿进行计数。

1.6 数据处理与分析

采用Excel 2019对数据进行初步整理,以SPSS 21.0软件对测定指标进行ANOVA模型分析,结合Duncan法进行多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 轮作对土壤酶活性的影响

2.1.1 轮作对土壤过氧化氢酶活性的影响 0~30 cm土壤过氧化氢酶活性均随着土层加深而下降,0~10 cm土层过氧化氢酶活性最高,20~30 cm土层最低。不同生育时期,轮作箭筈豌豆的0~10、10~20和20~30 cm土层过氧化氢酶活性均高于其他组合,而燕麦连作的则显著低于轮作处理($P < 0.05$)。轮作对增加过氧化氢酶活性效果显著,且随着生育时期的

推进而增加,在开花期达到最大,轮作箭筈豌豆后0~10、10~20和20~30 cm土壤过氧化氢酶活性在开花期较燕麦连作分别升高62.94%、48.81%和48.05%;轮作燕麦+箭筈豌豆混播后分别增加47.06%、44.64%和40.26%;轮作油菜后土壤过氧化氢酶活性增幅较前二者小,分别为20.59%、14.88%和9.74%。轮作青稞后增幅进一步减小。轮作大麦后0~10、10~20和20~30 cm土壤过氧化氢酶活性较燕麦连作分别增加16.47%、10.12%和12.34%。灌浆期各土层的土壤过氧化氢酶活性较开花期明显下降,从分蘖期开始总体呈先升后降的变化趋势(表2)。

2.1.2 轮作对土壤碱性磷酸酶的影响 土壤碱性磷酸酶主要参与土壤含磷化合物的合成及土壤磷素循环,其活性的高低会直接影响土壤中有有机磷的分解转化和生物有效性^[29-31],通常按磷酸酶的最适土壤酸碱度将其分为酸性磷酸酶(pH值4~5)、中性磷酸酶(pH值6~7)和碱性磷酸酶(pH值8~10),由于供试土壤的pH ≥ 7.5 ,故选择碱性磷酸酶作为土壤磷循环的主要指标^[32]。

随着土层深度的增加,土壤碱性磷酸酶活性显著降低。4个生育时期中,分蘖期的土壤碱性磷酸酶活性最大,随后逐渐下降,到灌浆期降至最低。轮作箭筈豌豆后3个土层的碱性磷酸酶活性高于其他轮作处理。轮作箭筈豌豆后0~10、10~20和20~30 cm土壤碱性磷酸酶活性在开花期较燕麦连作分别提高了57.14%、45.45%和42.31%;轮作燕麦+箭筈豌豆后分别提高了51.43%、39.39%和53.85%,酶活性仍保持较高水平;轮作油菜后土壤碱性磷酸酶活性较连作的增幅分别为25.71%、21.21%和30.77%。轮作青稞和大麦后开花期0~10cm土层的碱性磷酸酶活性较连作仍有显著增加,但10~20 cm土层无明显变化(表3)。

2.1.3 轮作对土壤蔗糖酶的影响 随着土层加深,土壤蔗糖酶活性也逐渐下降。同一土层的蔗糖酶活性随着生育时期的推进呈先升后降的趋势,从分蘖期开始逐渐增加,开花期达到最大,随后显著下降。轮作显著影响了土壤蔗糖酶的活性(表4),轮作箭筈豌豆后0~10、10~20和20~30 cm土壤蔗糖酶活性在燕麦开花期较连作分别升高了19.72%、21.01%和

表 2 轮作对土壤过氧化氢酶活性的影响

Table 2 Effect of oat single-sequence rotation on soil catalase activity

mL/g

土层/cm	处理	过氧化氢酶活性			
		分蘖期	拔节期	开花期	灌浆期
0~10	箭筈豌豆	2.26 ^a	2.39 ^a	2.77 ^a	2.53 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	2.20 ^a	2.33 ^a	2.50 ^b	2.36 ^b
	油菜	1.89 ^b	1.96 ^b	2.05 ^c	1.88 ^c
	青稞	1.84 ^b	1.92 ^b	2.01 ^c	1.82 ^c
	大麦	1.82 ^b	1.88 ^b	1.98 ^c	1.78 ^c
	燕麦	1.51 ^c	1.65 ^c	1.70 ^d	1.55 ^d
10~20	箭筈豌豆	2.21 ^a	2.30 ^a	2.50 ^a	2.31 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	2.11 ^a	2.21 ^a	2.43 ^a	2.28 ^a
	油菜	1.72 ^b	1.85 ^b	1.93 ^b	1.77 ^b
	青稞	1.68 ^b	1.79 ^b	1.86 ^b	1.70 ^b
	大麦	1.66 ^b	1.73 ^b	1.85 ^b	1.67 ^b
	燕麦	1.36 ^c	1.45 ^c	1.68 ^c	1.46 ^c
20~30	箭筈豌豆	2.01 ^a	2.14 ^a	2.28 ^a	2.09 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	1.98 ^a	2.05 ^a	2.16 ^a	1.95 ^a
	油菜	1.44 ^b	1.50 ^b	1.69 ^b	1.39 ^b
	青稞	1.54 ^b	1.60 ^b	1.72 ^b	1.51 ^b
	大麦	1.54 ^b	1.62 ^b	1.73 ^b	1.53 ^b
	燕麦	1.19 ^c	1.31 ^c	1.54 ^c	1.37 ^b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同

表 3 轮作对土壤碱性磷酸酶活性的影响

Table 3 Effect of oat single-sequence rotation on soil alkaline phosphatase activity

mg/(g·d)

土层/cm	处理	碱性磷酸酶活性			
		分蘖期	拔节期	开花期	灌浆期
0~10	箭筈豌豆	0.85 ^a	0.65 ^a	0.55 ^a	0.45 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	0.73 ^{ab}	0.63 ^a	0.53 ^a	0.42 ^{ab}
	油菜	0.67 ^b	0.53 ^{ab}	0.44 ^{ab}	0.38 ^{abc}
	青稞	0.61 ^{bc}	0.48 ^b	0.42 ^{ab}	0.35 ^{abc}
	大麦	0.60 ^{bc}	0.47 ^b	0.41 ^{ab}	0.34 ^{bc}
	燕麦	0.49 ^c	0.40 ^b	0.35 ^c	0.30 ^c
10~20	箭筈豌豆	0.73 ^a	0.51 ^a	0.48 ^a	0.38 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	0.65 ^{ab}	0.51 ^a	0.46 ^{ab}	0.37 ^{ab}
	油菜	0.56 ^b	0.48 ^a	0.40 ^{abc}	0.35 ^{abc}
	青稞	0.53 ^{bc}	0.37 ^b	0.33 ^{bc}	0.31 ^{abc}
	大麦	0.52 ^{bc}	0.36 ^b	0.32 ^c	0.29 ^{bc}
	燕麦	0.39 ^c	0.36 ^b	0.33 ^{bc}	0.27 ^c
20~30	箭筈豌豆	0.66 ^a	0.46 ^a	0.37 ^{abc}	0.34 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	0.56 ^{ab}	0.44 ^{ab}	0.40 ^a	0.33 ^{ab}
	油菜	0.50 ^{bc}	0.39 ^{abc}	0.34 ^{abc}	0.32 ^{ab}
	青稞	0.40 ^{cd}	0.33 ^{cd}	0.32 ^{abc}	0.30 ^{ab}
	大麦	0.40 ^{cd}	0.34 ^{bcd}	0.30 ^{cd}	0.28 ^{ab}
	燕麦	0.30 ^d	0.27 ^d	0.26 ^d	0.23 ^b

36.07%; 燕麦+箭筈豌豆混播处理分别增加了 15.49%、16.67% 和 29.51%, 其次为油菜。青稞和大麦较连作的土壤蔗糖酶活性增幅基本一致(表 4)。

2.1.4 轮作对土壤脲酶活性的影响 土壤脲酶活性

在 0~10 cm 土层中基本无明显变化, 20~30 cm 土层才有所下降(表 5)。同一土层中, 随生育时期的推进, 土壤脲酶活性总体呈先降后升的趋势, 从分蘖期开始下降, 开花期降至最低, 随后有所增加。另外, 轮作对土

表4 燕麦轮作对土壤蔗糖酶活性的影响

Table 4 Effect of oat single-sequence rotation on soil invertase activity

mg/(g·d)

土层/cm	处理	土壤蔗糖酶活性			
		分蘖期	拔节期	开花期	灌浆期
0~10	箭筈豌豆	1.60 ^a	1.64 ^a	1.70 ^a	1.42 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	1.58 ^a	1.60 ^a	1.64 ^{ab}	1.39 ^{ab}
	油菜	1.55 ^{ab}	1.58 ^a	1.61 ^{abc}	1.37 ^{ab}
	青稞	1.46 ^b	1.49 ^{ab}	1.52 ^{bc}	1.33 ^b
	大麦	1.45 ^{bc}	1.49 ^{ab}	1.52 ^c	1.33 ^b
	燕麦	1.35 ^d	1.37 ^c	1.42 ^d	1.26 ^c
10~20	箭筈豌豆	1.56 ^a	1.63 ^a	1.67 ^a	1.40 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	1.54 ^a	1.59 ^{ab}	1.61 ^a	1.36 ^a
	油菜	1.53 ^{ab}	1.55 ^{ab}	1.59 ^a	1.35 ^a
	青稞	1.45 ^{bc}	1.46 ^{ab}	1.50 ^b	1.29 ^b
	大麦	1.44 ^c	1.45 ^b	1.50 ^b	1.29 ^b
	燕麦	1.31 ^d	1.32 ^c	1.38 ^c	1.23 ^c
20~30	箭筈豌豆	1.51 ^a	1.61 ^a	1.66 ^a	1.36 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	1.50 ^a	1.53 ^{bc}	1.58 ^{ab}	1.32 ^a
	油菜	1.49 ^{ab}	1.54 ^a	1.57 ^{ab}	1.31 ^a
	青稞	1.40 ^{ab}	1.42 ^b	1.45 ^b	1.28 ^a
	大麦	1.38 ^{bc}	1.42 ^b	1.44 ^b	1.27 ^a
	燕麦	1.13 ^c	1.15 ^c	1.22 ^c	0.94 ^b

壤脲酶活性的影响也较其他酶活性小,分蘖期各轮作处理0~10 cm土层脲酶活性变化在1.25~1.32之间,较连作增加了4.17%~10.00%;开花期较连作增加了

3.70%~10.19%;灌浆期较连作增幅加5.17%~6.90%。其他2个土层的脲酶活性变化与0~10 cm相似。不同轮作处理之间的差异也比较小。

表5 轮作对土壤脲酶活性的影响

Table 5 Effect of oat single-sequence rotation on soil urease activity

mg/(g·d)

土层/cm	处理	土壤脲酶活性			
		分蘖期	拔节期	开花期	灌浆期
0~10	箭筈豌豆	1.32 ^a	1.28 ^a	1.19 ^a	1.24 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	1.32 ^a	1.27 ^{ab}	1.15 ^{ab}	1.23 ^a
	油菜	1.26 ^{ab}	1.24 ^{ab}	1.13 ^b	1.24 ^a
	青稞	1.25 ^{ab}	1.23 ^b	1.12 ^b	1.22 ^a
	大麦	1.25 ^{ab}	1.23 ^b	1.12 ^b	1.22 ^a
	燕麦	1.20 ^b	1.17 ^c	1.08 ^c	1.16 ^b
10~20	箭筈豌豆	1.31 ^a	1.27 ^a	1.18 ^a	1.22 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	1.30 ^a	1.24 ^{ab}	1.14 ^{ab}	1.22 ^a
	油菜	1.24 ^{ab}	1.22 ^b	1.11 ^{bc}	1.22 ^a
	青稞	1.24 ^{ab}	1.22 ^b	1.09 ^{cd}	1.21 ^a
	大麦	1.24 ^{ab}	1.21 ^b	1.08 ^{cd}	1.21 ^a
	燕麦	1.18 ^b	1.15 ^c	1.05 ^d	1.14 ^a
20~30	箭筈豌豆	1.24 ^a	1.23 ^a	1.14 ^a	1.21 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	1.23 ^a	1.17 ^b	1.11 ^a	1.20 ^a
	油菜	1.20 ^{ab}	1.17 ^b	1.09 ^a	1.18 ^{ab}
	青稞	1.16 ^b	1.15 ^b	1.07 ^a	1.14 ^b
	大麦	1.16 ^b	1.14 ^b	1.06 ^a	1.14 ^b
	燕麦	1.07 ^c	1.04 ^c	0.95 ^b	1.04 ^c

2.2 轮作对土壤微生物数量的影响

土层深度对微生物数量有明显影响。随着土层加深,微生物数量逐渐下降,0~10 cm 土层中微生物数量显著大于 10~20 和 20~30 cm 土层(表 6)。和连作相比,轮作显著提高了燕麦灌浆期土壤中细菌、真菌和放线菌的数量($P < 0.05$)。箭筈豌豆处理下 0~10、10~20 和 20~30 cm 土层土壤细菌数量较燕麦连作分别增加了 23.34%、16.51% 和 38.92% ($P < 0.05$);真菌数量增幅更大,分别增加了 110%、135.29% 和 150%;放线菌数量分别增加 112.65%、107.41% 和 175.38%。3 个土层中,轮作箭筈豌豆、燕

麦+箭筈豌豆的土壤各微生物数量及总数之间均无明显差异;轮作青稞和大麦的处理之间也无显著差异,但其数值显著低于轮作箭筈豌豆、燕麦+箭筈豌豆。轮作箭筈豌豆的土壤上层、中层和下层真菌数量较轮作大麦分别增加了 50%、73.91% 和 94.44%;放线菌数量分别增加 46.69%、53.81% 和 124.26%;细菌数量增幅相对较小,分别增加了 15.82%、8.88% 和 23.85%,微生物总数也相应显著增加。轮作油菜的土壤上、中、下层土壤微生物数量均显著高于燕麦连作,但是低于轮作箭筈豌豆和燕麦+箭筈豌豆,而高于轮作青稞和大麦,在 5 个轮作处理中居于中间位置。

表 6 轮作对土壤微生物数量的影响

Table 6 Effect of oat single-sequence rotation on the quantity of soil microorganism

土层/cm	处理	细菌/ ($\times 10^7$ cfu·g ⁻¹)	真菌/ ($\times 10^3$ cfu·g ⁻¹)	放线菌/ ($\times 10^5$ cfu·g ⁻¹)	总数/ ($\times 10^7$ cfu·g ⁻¹)
0~10	箭筈豌豆	15.51 ^a	4.20 ^a	4.67 ^a	15.52 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	15.03 ^a	3.90 ^b	4.43 ^b	15.10 ^b
	油菜	14.04 ^a	3.50 ^c	3.85 ^c	14.05 ^c
	青稞	13.52 ^{ab}	3.00 ^d	3.33 ^d	13.53 ^d
	大麦	13.39 ^{ab}	2.80 ^e	3.19 ^e	13.40 ^d
	燕麦	12.57 ^b	2.00 ^f	2.20 ^f	12.60 ^e
10~20	箭筈豌豆	13.32 ^a	4.00 ^a	3.78 ^a	13.33 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	13.01 ^b	3.60 ^b	3.62 ^b	13.02 ^b
	油菜	12.71 ^c	3.00 ^c	2.92 ^c	12.71 ^c
	青稞	12.54 ^d	2.60 ^d	2.62 ^d	12.54 ^d
	大麦	12.24 ^e	2.30 ^e	2.46 ^e	12.30 ^e
	燕麦	11.44 ^f	1.70 ^f	1.82 ^f	11.50 ^f
20~30	箭筈豌豆	8.83 ^a	3.50 ^a	3.62 ^a	8.83 ^a
	燕麦+箭筈豌豆	8.38 ^b	3.20 ^b	3.35 ^b	8.40 ^b
	油菜	7.75 ^c	2.20 ^c	2.39 ^c	7.80 ^c
	青稞	7.35 ^d	1.90 ^d	1.73 ^d	7.40 ^d
	大麦	7.13 ^e	1.80 ^e	1.62 ^d	7.13 ^e
	燕麦	6.35 ^f	1.40 ^f	1.32 ^e	6.40 ^f

2.3 不同处理下土壤酶活性和微生物数量的相关性

不同土壤酶活性之间均呈显著或极显著正相关。微生物数量中,细菌数量与微生物总数的相关性达到了 1.000,即细菌数量直接决定了微生物数量的多少。微生物数量与土壤酶活性之间也呈显著或极显著正相关(表 7)。

3 讨论

3.1 不同轮作处理下土壤酶活性的变化

土壤酶参与土壤中的生物化学反应过程,对土壤

代谢以及生物循环有着重要作用^[33-35]。轮作能够促进土壤酶活性的上升,土壤中脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性明显增加,其原因可能是轮作向土壤中输入物质的种类和数量相对较多,并且轮作更有利于土壤良性发育^[36]。王静等^[37]在宁夏银北盐碱地开展草田轮作系统定位试验,发现轮作能够明显提高 0~20 cm 土层土壤酶活性,且不同轮作处理之间差异显著,苜蓿翻耕后轮作饲用玉米和甜高粱的土壤酶活性高于其他处理。相比于连作,荞麦轮作后土壤过氧化氢

表7 不同处理下燕麦灌浆期的土壤酶活性、微生物数量的相关性

Table 7 Correlation between soil enzyme activity and microbial quantity during filling stage of oat under different treatments

指标	过氧化氢酶活性	碱性磷酸酶活性	蔗糖酶活性	脲酶活性	细菌数量	真菌数量	放线菌数量	微生物总数
过氧化氢酶活性	1	0.796**	0.698**	0.610*	0.626*	0.935**	0.909**	0.628*
碱性磷酸酶活性		1	0.778**	0.707**	0.608*	0.748*	0.762*	0.609*
蔗糖酶活性			1	0.779**	0.586*	0.756*	0.745*	0.588*
脲酶活性				1	0.591*	0.657*	0.663*	0.592*
细菌数量					1	0.655*	0.715*	1.000**
真菌数量						1	0.974**	0.567
放线菌数量							1	0.716*
总数								1

注: *和**分别表示在0.05和0.01水平显著相关

酶活性在出苗后急剧上升并在开花期达到峰值^[38]。本研究也得到类似结果,各处理过氧化氢酶均在开花期达到最大值。轮作模式下土壤过氧化氢酶活性更高,土壤氧化能力更强,过氧化氢的分解得到提升,加强了土壤呼吸强度^[39]。王丽红等^[40]在连续种植2年马铃薯的土壤上进行轮作试验,发现小麦—豌豆—马铃薯轮作时土壤过氧化氢酶活性有增加的趋势;豌豆—马铃薯—豌豆轮作的土壤蔗糖酶活性增加,且在马铃薯成熟期增幅最大,为47.95%;土壤脲酶活性在马铃薯块茎膨大期比小麦—马铃薯—小麦轮作增加了14.73%。轮作豆科植物后土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性均显著提高^[35],本研究也证实了这一点,燕麦轮作箭筈豌豆的土壤酶活性均显著高于轮作大麦和青稞。

土壤酶活性随着土层加深而逐渐降低,不同轮作模式下稻田的土壤过氧化氢酶和脲酶活性均表现为0~10 cm土层高于10~20 cm土层^[41]。但在本研究中,各轮作处理0~10 cm和10~20 cm土层两种酶的活性并无明显差异,但高于20~30 cm土层。土壤脲酶的作用是将施入土壤中的尿素分解成便于植物吸收的氨,脲酶活性与土壤微生物数量、有机质含量、全氮和速效氮含量密切相关^[42]。土壤有机质分解速率受环境温度的影响,在土壤微生物适宜的温度范围内,土壤有机质分解速率与温度呈正相关关系^[43]。本研究试验地位于祁连山区,该地区海拔较高,年均温只有1℃,较低的温度可能抑制了有机质的分解,从而导致0~20 cm土壤脲酶活性变化不明显。

土壤酶活性还与植物的生育期密切相关。土壤

过氧化氢酶活性从燕麦分蘖期至灌浆期总体呈先升后降的变化趋势,蔗糖酶活性与之类似,也在分蘖期和拔节期较低,随后明显上升,到开花期最大,灌浆期明显下降。罗珠珠等^[44]也发现小麦田土壤酶活性随小麦生育期变化显著,土壤蔗糖酶活性在春小麦苗期较低,随着生育期的推进,拔节期土壤蔗糖酶活性上升,到灌浆期出现峰值,随后逐渐降低。本研究中土壤脲酶活性从分蘖期到开花期持续降低,可能是由于这段时期作物生长旺盛,对土壤养分吸收迅速,出现与微生物争夺氮素营养的局面,从而抑制了土壤微生物的生长和繁殖,造成土壤脲酶活性降低。分蘖期的土壤碱性磷酸酶活性最大,随后逐渐下降,灌浆期降至最低,可能是因为土壤中的速效磷被吸收而迅速减少,诱导磷酸酶活性增强;随着生育进程的推进,到灌浆期(9月)后,由于高寒地区温度降低,作物生长速度减缓,根系对磷素的吸收也有所减缓,抑制了磷酸酶活性。

3.2 不同轮作处理下土壤微生物数量的变化

土壤微生物是土壤中活的有机体,是最活跃的土壤肥力因子之一。细菌、放线菌和真菌是土壤微生物的3大类群,构成了土壤微生物的主要生物量,它们的区系组成和数量变化能反映出土壤生物活性水平。不同生理类群的土壤微生物利用不同有机质作为营养和能量来源,与土壤酶共同参与土壤的矿化过程及土壤中C、N、P和S等元素的循环,其数量和功能受种植模式和栽培管理措施等因素的直接影响。甘草连作、轮作模式对土壤微生物数量的影响差异显著,随着连作年限的增加,土壤微生物数量明显降低,而

与棉花、小麦轮作后土壤微生物数量较连作显著提高^[45]。孙倩等^[46]在宁夏中部干旱带设置谷子—大豆、谷子—籽粒苋、谷子—藜麦3种轮作模式,以谷子连作为对照,研究土壤微生物群落结构的变化,发现轮作可以提高土壤细菌丰富度指数、真菌多样性指数和真菌丰富度指数。土壤中3大类群微生物数量以细菌最多,占总菌数的90.3%以上,放线菌次之,为2.6%~5.4%左右,真菌最少^[47]。本研究中,各个土层的细菌数量也最多,在 $10^7\sim 10^8$ 水平;其次是放线菌,为 10^5 水平,真菌数量最少,数量级为 10^3 。因此细菌数量的变化对土壤微生物总数的影响最大。0~10 cm土层细菌数量最多,然后随土层加深而递减;放线菌和真菌的变化也是如此。同一土层中,轮作显著提高了微生物数量,5个轮作处理的微生物总数均大于燕麦连作;其中以轮作箭筈豌豆、燕麦+箭筈豌豆处理的微生物数量最多,而禾本科的青稞、大麦轮作后土壤微生物数量有一定增加但增幅不及轮作豆科。李凯等^[48]也发现,轮作大豆之后,西瓜根际土壤微生物总生物量、细菌和放线菌数量均高于连作。轮作改善了土壤微生物的原有结构,土壤的养分循环加速,推动了微生物数量的增加,进而改善了土壤环境。

3.3 土壤酶活性与微生物数量的相关性

土壤微生物数量与土壤酶活性密切相关,均为表征土壤质量的重要生物学指标,能较敏感地反映出土壤环境的微小变化。本研究中,4种土壤酶活性之间均呈显著或极显著正相关,表明不同酶在进行酶促反应时,不仅自身具有专一特性,与其他酶之间也存在共性。酶的专一性反映土壤中与其相关的有机化合物转化进程,而有共性关系的酶其总体活性在一定程度上反映了土壤肥力水平的高低^[49]。另外,细菌数量与微生物总数的相关性高达1,细菌数量直接决定了微生物的总数,这与表6中的数据相一致,细菌数量和微生物总数均在 $\times 10^7$ 数量级,二者几乎没有差异。微生物数量增多、代谢活动加强能够提高土壤酶活性,而酶活性的提高也促进了土壤中物质转化速率,为微生物繁殖提供养分和良好的土壤微生态环境^[50],因此微生物数量与土壤酶活性之间是显著相关的^[51]。本研究也证明了这一点,微生物数量与土壤酶活性之间均呈显著或极显著正相关。

4 结论

轮作对土壤酶活性和微生物数量有显著影响。轮作处理下各土层的土壤酶活性较连作均显著增加;轮作还显著提高了各土层中细菌、真菌和放线菌的数量。轮作豆科对土壤酶活性和微生物数量的提高幅度显著大于轮作禾本科。微生物数量与土壤酶活性显著相关。在祁连山区燕麦生产中,燕麦与箭筈豌豆轮作有望修复连作障碍,改善土壤环境。

参考文献:

- [1] 姜慧新,柏杉杉,吴波,等. 22个燕麦品种在黄淮海地区的农艺性状与饲草品质综合评价[J]. 草业学报,2021,30(1):140—149.
- [2] 侯龙鱼,朱泽义,杨杰,等. 我国饲草用燕麦现状、问题和潜力[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),2019,45(3):248—253.
- [3] 赵桂琴,师尚礼. 青藏高原饲用燕麦研究与生产现状、存在问题与对策[J]. 草业科学,2004,21(11):17—21.
- [4] 张耀生,周兴民,王启基. 高寒牧区燕麦生产性能的初步分析[J]. 草地学报,1998(2):115—123.
- [5] 乔月静,郭来春,葛军勇,等. 燕麦与豆科作物间作对土壤酶活和微生物量的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2022,55(3):54—61.
- [6] 赵世锋,巴图巴根,任长忠,等. 阿旗草用燕麦生产调查及种植前景分析[J]. 农学学报,2015,5(12):86—93.
- [7] 钱述华. 山丹马场燕麦干草产业发展现状及对策[J]. 现代农业科技,2017(5):233+237.
- [8] 柴继宽. 轮作和连作对燕麦产量、品质、主要病虫害及土壤肥力的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2012.
- [9] 董加凯. 山丹军马场农业发展的思索[J]. 甘肃农业,2010(6):26—29.
- [10] 董艳,鲁耀,董坤,等. 轮作模式对设施土壤微生物区系和酶活性的影响[J]. 土壤通报,2010,41(1):53—55.
- [11] 杨尚东,李荣坦,吴俊,等. 番茄连作与轮作土壤生物学特性及细菌群落结构的比较[J]. 生态环境学报,2016(1):76—83.
- [12] 周芸,李永梅,范茂攀,等. 不同基肥处理对山原红壤土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J]. 应用与环境生物学报,2020,26(3):603—611.
- [13] 惠竹梅,岳泰新,张瑾,等. 西北半干旱区葡萄园生草体系中土壤生物学特性与土壤养分的关系[J]. 中国农业科学,2011,44(11):2310—2317.

- [14] 曹莉,秦舒浩,张俊莲,等. 轮作豆科牧草对连作马铃薯田土壤微生物菌群及酶活性的影响[J]. 草业学报, 2013,22(3):139-145.
- [15] 蔡艳,郝明德. 轮作模式与周期对黄土高原旱地小麦产量、养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015,21(4):864-872.
- [16] 程云飞,李炳韵,胡英宏,等. 不同连作年限对菠萝园土壤养分及可培养微生物数量的影响[J]. 热带生物学报, 2021,12(2):185-191.
- [17] 张成君,康文娟,师尚礼,等. 基于主成分-聚类分析评价不同轮作模式对土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2020,34(1):292-300.
- [18] 王盼忠,徐惠云. 晋北旱地燕麦生产现状及丰产栽培措施[J]. 农业科技通讯, 2019(2):162-164.
- [19] 汪鹏斌,宋美娟,童永尚,等. 保护播种对高寒区刈割型混播草地产草量及品质的影响[J]. 草地学报, 2021,29(8):1818-1827.
- [20] 田福平,时永杰,周玉雷,等. 燕麦与箭筈豌豆不同混播比例对生物量的影响研究[J]. 中国农学通报, 2012,28(20):29-32.
- [21] 马晓东,孙金金,汪鹏斌,等. 青海省甘德县燕麦+毛苕子+豌豆混播比例生产性能的综合评价[J]. 草原与草坪, 2020,40(6):76-83.
- [22] 秦燕,刘勇,张永超,等. 不同混播比例对燕麦和箭筈豌豆混播草地植物生长特征的影响[J]. 草地学报, 2020,28(6):1768-1774.
- [23] 张莹,陈志飞,张晓娜,等. 不同刈割期对春播、秋播燕麦干草产量和品质的影响[J]. 草业学报, 2016,25(11):124-135.
- [24] 马志良,赵文强,刘美. 高寒灌丛生长季根际和非根际土壤多酚氧化酶和过氧化氢酶活性对增温的响应[J]. 应用生态学报, 2019,30(11):3681-3688.
- [25] 石春芳,王志勇,冷小云,等. 土壤磷酸酶活性测定方法的改进[J]. 实验技术与管理, 2016,33(7):48-49+54.
- [26] 肖焯,黄志刚,肖茵曦,等. 不同水位时期东洞庭湖湿地土壤微生物量碳氮和酶活性变化[J]. 应用生态学报, 2021,32(8):2958-2966.
- [27] 丰骁,段建平,蒲小鹏,等. 土壤脲酶活性两种测定方法的比较[J]. 草原与草坪, 2008,28(2):70-72.
- [28] 章家恩,刘文高,胡刚. 不同土地利用方式下土壤微生物数量与土壤肥力的关系[J]. 土壤与环境, 2002(2):140-143.
- [29] 张伟,龚久平,刘建国. 秸秆还田对连作棉田土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2011,20(5):881-885.
- [30] 白艳茹,马建华,樊明寿. 马铃薯连作对土壤酶活性的影响[J]. 作物杂志, 2010(3):34-36.
- [31] 陈军,王立光,叶春雷,等. 耕作制度对胡麻土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019,37(3):177-184+214.
- [32] 解媛媛,谷洁,高华,等. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2010,17(2):233-238.
- [33] 邓少虹,林明月,李伏生,等. 施肥对喀斯特地区植草土壤碳库管理指数及酶活性的影响[J]. 草业学报, 2014,23(4):262-268.
- [34] 张锦强,苏学德,李鹏程,等. 不同肥料配施对克瑞森葡萄根区土壤微生态的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022,57(2):104-110.
- [35] 李晓婷,李立军,李杨,等. 轮作方式对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2018,34(9):68-73.
- [36] 李春格,李晓鸣,王敬国. 大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响[J]. 生态学报, 2006(4):1144-1150.
- [37] 王静,程昱润,肖国举,等. 宁夏银北不同草田轮作模式对细菌群落组成特征的影响[J]. 农业机械学报, 2021,52(7):283-292.
- [38] 高扬,高小丽,马瑞瑞,等. 轮作连作荞麦田主要微生物类群及土壤酶活性变化[J]. 中国农业大学学报, 2014,19(4):47-53.
- [39] 阳显斌,李廷轩,张锡洲,等. 烟蒜轮作与套作对土壤微生物类群数量的影响[J]. 土壤, 2016,48(4):698-704.
- [40] 王丽红,郭晓冬,谭雪莲,等. 不同轮作方式对马铃薯土壤酶活性及微生物数量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016,34(5):109-113.
- [41] 孙红. 不同水旱轮作模式对稻田土壤微生物及水稻生长发育的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2017.
- [42] 李正,刘国顺,敬海霞,等. 绿肥与化肥配施对植烟土壤微生物量及供氮能力的影响[J]. 草业学报, 2011,20(6):126-134.
- [43] 何念鹏,刘远,徐丽,等. 土壤有机质分解的温度敏感性:培养与测定模式[J]. 生态学报, 2018,38(11):4045-4051.
- [44] 罗珠珠,黄高宝,蔡立群,等. 不同耕作方式下春小麦生育期土壤酶时空变化研究[J]. 草业学报, 2012,21(6):94-101.
- [45] 祖勒胡玛尔·乌斯满江,朱军,李晓瑾,等. 甘草不同种植模式与土壤微生态关联性的研究[J]. 中国现代中药,

- 2016, 18(11):1474—1478.
- [46] 孙倩, 吴宏亮, 陈卓, 等. 不同作物轮作对谷田土壤酶活性和土壤细菌群落的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12):2385—2393.
- [47] 邹莉, 袁晓颖, 李玲, 等. 连作对大豆根部土壤微生物的影响研究[J]. 微生物学杂志, 2005(2):27—30.
- [48] 李凯, 吴宏亮, 许强, 等. 砂田轮作模式对土壤酶活性及微生物区系的影响[J]. 北方园艺, 2014(18):185—189.
- [49] 汪成忠, 胡永红, 周翔宇, 等. 水稻秸秆还田对崇明盐碱地土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, (08):132—138.
- [50] 陆梅, 田昆, 张仕艳, 等. 不同干扰程度下高原湿地纳帕海土壤酶活性与微生物特征研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(12):2783—2788.
- [51] 宋达成, 吴昊, 王理德, 等. 民勤退耕区次生草地土壤微生物及土壤酶活性变化特征[J]. 中国草地学报, 2021, 43(6):85—93.

Effects of crop rotation on soil enzyme activities and microorganisms of oat in Qilian Mountain area

LU Jin-xiang¹, ZHAO Gui-qin^{1*}, WEI Kong-tao¹, CHAI Ji-kuan¹, YANG Zhen²

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. Sanbao Agricultural Science and Technology Development Company of Shandan County, Shandan 734100, China)

Abstract: [Objective] Through the rotation of oats with rapeseed, *Vicia sativa*, highland barley and barley, the effects on soil enzyme activity and soil microbial quantity were studied. [Method] Therefore, a rotational cropping experiment was conducted in the field planting oat for 3 years in Shandan Army Horse Farm. Common vetch, oat+common vetch, rape, nakedbarley, barley and oat were planted respectively. [Result] The results showed that soil enzyme activity declined with the increasing soil depth. Crop rotation significantly increased soil catalase, invertase and alkaline phosphatase activities compared with continuous cropping. The enzyme activity of oat-legume rotation was much higher than that of oat-grass, among which, oat-common vetch rotation had the most significant effect. At flowering stage, the activities of catalase, invertase and alkaline phosphatase in the 0~20 cm soil layer increased 55.92%, 20.36% and 51.47%, respectively. Cropping rotation also significantly increased the number of soil microorganisms. The treatment of oat-common vetch gave the greatest increment, the number of soil bacteria in 0~10 cm, 10~20 cm and 20~30 cm soil layers increased 23.34%, 16.51% and 38.92%, respectively, compared with continuous cropping ($P<0.05$). The number of fungi increased 110%, 135.29%, and 150%, and the number of actinomycetes increased 112.65%, 107.41%, and 175.38%, respectively. [Conclusion] The rotation of oat-legume increased soil enzyme activity and number of microorganisms significantly more than that of oat-grass. In the production of oat in Qilian Mountains, the rotation of oat-common vetch is expected to repair continuous cropping obstacles and improve the soil environment.

Key words: oat; rotation; soil enzyme activity; soil microorganism