



焦金铨, 安晓虎, 王妍茏, 等. 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对复垦土壤氮素形态和酶活性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(2): 298-305.

JIAO Jincheng, AN Xiaohu, WANG Yanlong, et al. Effect of different organic rotten materials and *Pseudomonas fluorescens* application on nitrogen morphology and enzyme activities of reclaimed soil[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(2): 298-305.

不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对复垦土壤 氮素形态和酶活性的影响

焦金铨, 安晓虎, 王妍茏, 孟会生*, 张杰, 郝鲜俊, 王帅兵

(山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801)

摘要: [目的] 本文旨在探究不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施在矿区复垦土壤的有效合理施用。 [方法] 以玉米作为供试作物, 采用盆栽试验研究不同有机腐熟物(羊粪、牛粪、猪粪、鸡粪)与荧光假单胞菌配施对复垦土壤氮素形态和酶活性影响。 [结果] 有机腐熟物配施荧光假单胞菌可以在单施有机腐熟物的基础上有效提高复垦土壤各氮素、微生物量碳/氮含量和酶活性。以鸡粪配施荧光假单胞菌对各氮素、微生物量碳/氮含量以及4种土壤酶活性的提升效果最为显著, 其与单施鸡粪处理相比, 铵态氮含量显著提高13.12%, 微生物量碳显著提高20.21%, 蛋白酶活性显著提高16.11%。 [结论] 腐熟鸡粪与荧光假单胞菌配施效果最好, 可作为复垦土壤中较为合理的施用方式。

关键词: 有机腐熟物; 荧光假单胞菌; 复垦土壤; 氮素形态; 酶活性

中图分类号: S154.2; S153.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-2030(2024)02-0298-08

Effect of different organic rotten materials and *Pseudomonas fluorescens* application on nitrogen morphology and enzyme activities of reclaimed soil

JIAO Jincheng, AN Xiaohu, WANG Yanlong, MENG Huisheng*, ZHANG Jie, HAO Xianjun, WANG Shuaibing

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: [Objectives] The paper aimed to explore the reasonable and effective application of different organic rotten materials combined with *Pseudomonas fluorescens* in reclaimed soil of mining area. [Methods] Maize was selected as the experimental crop to be performed in pot experiment, which was to study the effects of different organic rotten materials (sheep manure, cow manure, pig manure, chicken manure) combined with *P. fluorescens* on nitrogen form and enzyme activities of reclaimed soil. [Results] Based on the only application of organic rotten material, the combined application of different organic rotten material with *P. fluorescens* could effectively improve nitrogen content, microbial biomass carbon and nitrogen contents and enzyme activities of reclaimed soil. And the application of chicken manure combined with *P. fluorescens* showed the most significant improvement effect on nitrogen content, microbial biomass carbon and nitrogen contents and four soil enzyme activities, which significantly increased the content of ammonium nitrogen, microbial biomass carbon and protease activity by 13.12%, 20.21% and 16.11% respectively compared with the only application of chicken manure. [Conclusions] Combined application of rotten chicken manure with *P. fluorescens* showed the best effect, which could be used as a reasonable application method in reclaimed soil.

Keywords: organic rotten material; *Pseudomonas fluorescens*; reclaimed soil; nitrogen forms; enzyme activity

山西作为我国重要的产煤大省, 长期为我国的社会、经济、基础建设等方面做出突出的贡献。但由于以往长期粗放式的开采模式以及对环境保护方面的忽视产生了严重的生态环境问题^[1], 全省矿区面积16 779.44 km², 有3 000 km²因采煤而受损^[2]。急需复垦的土壤因长期无植被覆盖, 导致其水土流失严重、土壤肥力贫瘠, 特别是植被所必需营养元素十分缺乏, 微生物数量较正常耕地土壤也十分稀少^[3], 因此如何提高复垦土壤氮素含量、恢复其土壤肥力是当前复垦土壤修复方向重要研究内容之一。而氮素作为植物所必需的营养元素, 对提高植物的产量、品质改善有着极其重要的作用。土壤酶不仅可以体现微生物

收稿日期: 2023-04-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1710255-3, 41907215); 山西农业大学科技创新基金项目(2017ZZ08)

*通信作者: 孟会生, 博士, 副教授, 主要从事矿区土壤复垦等研究, E-mail: huishengmeng@126.com。

物活性,还可以促进氮素形态转化并供给植物吸收。因此,想要提高复垦土壤肥力离不开土壤氮素和土壤酶。

针对提高土壤氮素含量以及土壤酶活性的方法,大多是以传统的培肥措施为主。由于复垦土壤比一般的耕地更加贫瘠、生物活性低下,同普通耕地一样施用化肥或有机肥达不到良好的效果,大量施用化肥又会导致土壤养分结构失调、物理性状变差、pH 值大幅降低、土壤板结等危害^[4],仅施用有机肥来改善土壤生态环境又可能使施入土壤的有效养分含量相对较低,导致肥效降低^[5]。已有相关研究发现,不同有机肥配施化肥虽然能够提高土壤中全氮含量,但效果并不显著^[6]。已有研究表明荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)作为一类分布广、易繁殖的植物促生菌,是十分重要的土壤有益微生物^[7],其与拉恩氏菌配施能够明显提高土壤养分及生物活性^[8]。在传统施肥模式的基础上配施荧光假单胞菌来改善土壤生态环境的同时,也能极大避免土著微生物对外源微生物的拮抗作用,从而找到一种更加科学合理的施肥措施来有效提高土壤中氮素含量及土壤酶活性。

目前,针对生物菌剂应用于复垦土壤的研究主要集中在对矿区土壤微生物活性以及植物的吸收利用上,但对于与不同有机腐熟物配施应用于复垦土壤的研究较少,更未见不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对氮素形态上的研究报道。因此,本试验利用不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施,探究何种有机腐熟物配施荧光假单胞菌对土壤氮素形态、微生物量碳、氮以及土壤酶活性的影响效果最好,为荧光假单胞菌更好应用于复垦土壤提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤取自山西省晋中市榆次区后沟村复垦的土壤。该试验地于 2019 年秋被复垦,2020 年种植玉米,土壤类型为石灰性褐土,质地为中壤土。0~20 cm 土壤 pH 值为 8.21,有机质含量为 5.35 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.172 g·kg⁻¹,碱解氮含量为 14.50 mg·kg⁻¹,有效磷含量为 5.62 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 86.31 mg·kg⁻¹。2021 年 3 月取样风干,充分过筛混匀备用。

1.1.2 供试有机腐熟物 有机腐熟物为完全腐熟的猪粪、鸡粪、牛粪和羊粪。其养分含量见表 1,由太谷区鸿昊养殖专业合作社提供。

表 1 供试有机腐熟物的养分含量

Table 1 Nutrient content of organic rotten material used in the experiment

有机腐熟物 Organic rotten material	有机质 Organic matter	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	%
猪粪 Pig manure	16.80	0.56	0.70	1.19	
鸡粪 Chicken manure	29.43	1.45	0.54	1.56	
牛粪 Cow manure	15.58	0.39	0.50	1.56	
羊粪 Sheep manure	25.93	0.65	0.51	1.01	

1.1.3 供试菌剂 供试菌剂为课题组前期筛选出的具有高效固氮能力且不存在拮抗作用的 N64-1、N137-1 荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescent*)菌株,固氮量分别为 4.54、4.44 μg·mL⁻¹,固氮酶活性分别为 41.74、30.55 nmol·h⁻¹·mL⁻¹。菌株用 LB 液体培养基(蛋白胨 10 g·L⁻¹,酵母提取物 5 g·L⁻¹,NaCl 10 g·L⁻¹)培养至对数生长期,菌剂的有效活菌数≥2×10⁸ CFU·mL⁻¹。

1.1.4 供试作物 供试作物为玉米(*Zea mays* L.),品种为‘五谷 568’,全生育期 130 d,由甘肃五谷种业有限公司提供。

1.2 试验设计

试验于山西农业大学资源环境学院温室内进行,采用完全随机设计并进行盆栽试验,每盆装土 7.5 kg,试验前将腐熟的有机腐熟物(羊粪、牛粪、猪粪、鸡粪)与土壤混匀一起装入盆中,每盆有机腐熟物用量以每千克土中氮含量为 0.20 g 计算,有机腐熟物+荧光假单胞菌处理中加入荧光假单胞菌菌剂 20 mL(N64-1、N137-1 各 10 mL,混合施入玉米苗根系周围),在不施加菌剂的处理中加入同等用量的 LB 培养基。设置如下处理:对照(T1,不施有机腐熟物并加入同等用量的 LB 培养基)、对照+荧光假单胞菌(T2)、羊粪(T3)、羊粪+荧光假单胞菌(T4)、牛粪(T5)、牛粪+荧光假单胞菌(T6)、猪粪(T7)、猪粪+荧光假单胞菌(T8)、鸡粪(T9)、鸡粪+荧光假单胞菌(T10),共 10 个处理,每个处理 4 个重复,一共 40 盆。

1.3 样品的采集与测定

玉米于 2021 年 3 月 8 日播种,待出苗后每盆定植 2 株,于 7 月 20 日收获。玉米收获时采集 0~20 cm 土壤样品,测定土壤各项指标,采用半微量凯氏法测定土壤全氮含量^[9],采用酚二磺酸比色法测定土壤硝态氮含量^[9],采用纳氏比色法测定土壤铵态氮含量^[9],采用 Bremner 法测定土壤有机氮组分含量^[10],采用氯仿熏蒸法测定土壤微生物量碳/氮含量^[11-12]。采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性^[13],采用茚三酮比色法测定土壤蛋白酶活性^[14],采用酚二磺酸比色法测定土壤硝酸还原酶活性^[14],采用磷酸苯二钠比色法测定土壤碱性磷酸酶活性^[15]。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2020 软件处理数据;用 SPSS 22.0 统计软件进行方差分析;采用 Duncan's 法进行差异显著性检测($P<0.05$);采用 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同有机腐熟物和荧光假单胞菌配施对复垦土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量的影响

从表 2 可知:与对照处理相比,各施肥处理均不同程度提高复垦土壤全氮、硝态氮、铵态氮含量;与相应未配施菌剂处理相比,配施菌剂可以有效提高复垦土壤全氮、硝态氮、铵态氮含量。以鸡粪+菌剂的土壤全氮、铵态氮含量最高,分别为 $0.608 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $24.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较单施鸡粪处理分别提高 5.01% 和 13.12% ($P<0.05$);较牛粪配施菌剂处理分别显著提高 21.36% 和 45.87% ($P<0.05$);较猪粪配施菌剂处理分别显著提高 18.98% 和 32.37%;较羊粪配施菌剂处理相比虽有一定的提高但差异不显著。土壤硝态氮含量以羊粪+菌剂处理最高,为 $26.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较单施羊粪处理显著提高 24.17%,但与其他 3 种有机腐熟物配施菌剂处理相比差异均不显著。双因素方差分析表明施用不同有机腐熟物料和是否施用菌剂均显著影响土壤中全氮、硝态氮、铵态氮含量,但施用不同有机腐熟物和增施菌剂两者之间无显著交互作用。上述结果表明,在不同有机腐熟物处理的基础上配施荧光假单胞菌可以有效提高土壤中全氮、硝态氮、铵态氮含量。

表 2 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对复垦土壤全氮(TN)、硝态氮(NN)与铵态氮(AN)含量的影响

Table 2 Effect of different organic rotten materials (M) with *Pseudomonas fluorescens* (B) on the contents of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen (AN) and nitrate nitrogen (NN) in the reclaimed soil

处理 Treatment	TN 含量/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ TN content	AN 含量/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ AN content	NN 含量/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ NN content
T1	0.264 ± 0.018^e	4.97 ± 0.55^g	5.34 ± 0.41^d
T2	0.268 ± 0.018^e	5.06 ± 0.48^g	5.42 ± 0.34^d
T3	0.530 ± 0.021^b	20.50 ± 1.34^{cd}	21.31 ± 3.28^{bc}
T4	0.602 ± 0.022^a	22.81 ± 2.13^{ab}	26.46 ± 2.43^a
T5	0.477 ± 0.026^d	15.00 ± 1.36^f	19.38 ± 3.93^c
T6	0.501 ± 0.012^{bc}	16.78 ± 1.18^{ef}	24.68 ± 3.41^{ab}
T7	0.488 ± 0.017^{cd}	16.53 ± 0.45^{ef}	20.10 ± 2.51^c
T8	0.511 ± 0.025^{bcd}	18.59 ± 1.39^{de}	24.58 ± 2.03^{ab}
T9	0.579 ± 0.023^a	21.88 ± 2.01^{bc}	22.15 ± 3.65^{abc}
T10	0.608 ± 0.022^a	24.75 ± 1.90^a	25.56 ± 2.37^{ab}
有机腐熟物 (M)	**	**	**
菌剂 (B)	*	**	**
M×B	ns	ns	ns

注: T1: 对照; T2: 对照+菌; T3: 羊粪; T4: 羊粪+菌; T5: 牛粪; T6: 牛粪+菌; T7: 猪粪; T8: 猪粪+菌; T9: 鸡粪; T10: 鸡粪+菌。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。* $P<0.05$; ** $P<0.01$; ns: 无显著差异。下同。

Note: T1: Control; T2: Control + bacteria; T3: Sheep manure; T4: Sheep manure + bacteria; T5: Cow manure; T6: Cow manure + bacteria; T7: Pig manure; T8: Pig manure + bacteria; T9: Chicken manure; T10: Chicken manure + bacteria. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). * $P<0.05$; ** $P<0.01$; ns: No significant difference. The same as follows.

2.2 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对复垦土壤有机氮组分的影响

从图 1 可知,所有施肥处理土壤各有机氮组分含量均显著高于不施有机腐熟物(CK、CK+菌)处理,其中酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮、酸解未知态氮分别占土壤全氮的 19.40%~25.54%、24.10%~33.54% 和 6.75%~16.07%,酸解氨基糖态氮占土壤有机氮的 5.05%~7.96%。

鸡粪+菌处理的酸解总氮、酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基糖态氮含量在所有处理中最高,分别为 435.11 、 140.67 、 198.96 和 $44.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较单施鸡粪处理均有一定程度的提高,但差异不显著;与羊粪+菌处理相比,酸解氨态氮含量显著提高 9.97% ($P<0.05$),酸解氨基糖态氮含量显著提高 14.00%

($P < 0.05$), 酸解总氮、酸解氨基酸态氮含量有一定提高但差异不显著; 较牛粪+菌处理的酸解总氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基糖态氮含量分别显著提高 11.26%、12.87%、22.22%、35.31% ($P < 0.05$), 较猪粪+菌处理的酸解总氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基糖态氮含量均显著提高 9.00%、10.01%、17.90%、36.59% ($P < 0.05$)。酸解氨基酸态氮、酸解氨基糖态氮含量在羊粪+菌处理与单施羊粪处理中差异显著, 在其他各配施菌剂处理与相对应的单施有机腐熟物处理中均差异不显著。

酸解未知态氮含量在配施荧光假单胞菌处理中低于对应的单施有机腐熟物处理。所有处理酸解未知态氮含量为 29.14~85.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以羊粪处理的酸解未知态氮含量最高 (85.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 配施荧光假单胞菌后, 以牛粪+菌处理的酸解未知态氮含量最高 (61.83 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 与其余配施荧光假单胞菌的处理相比, 除猪粪+菌处理外均差异显著。

双因素方差分析表明, 施用不同有机腐熟物料和施用菌剂均显著影响土壤中各有机氮组分含量, 但施用不同有机腐熟物和增施菌剂两者之间无显著交互作用。

由此可见, 在不同有机腐熟物处理的基础上配施荧光假单胞菌可以不同程度提高土壤中酸解总氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基糖态氮含量。

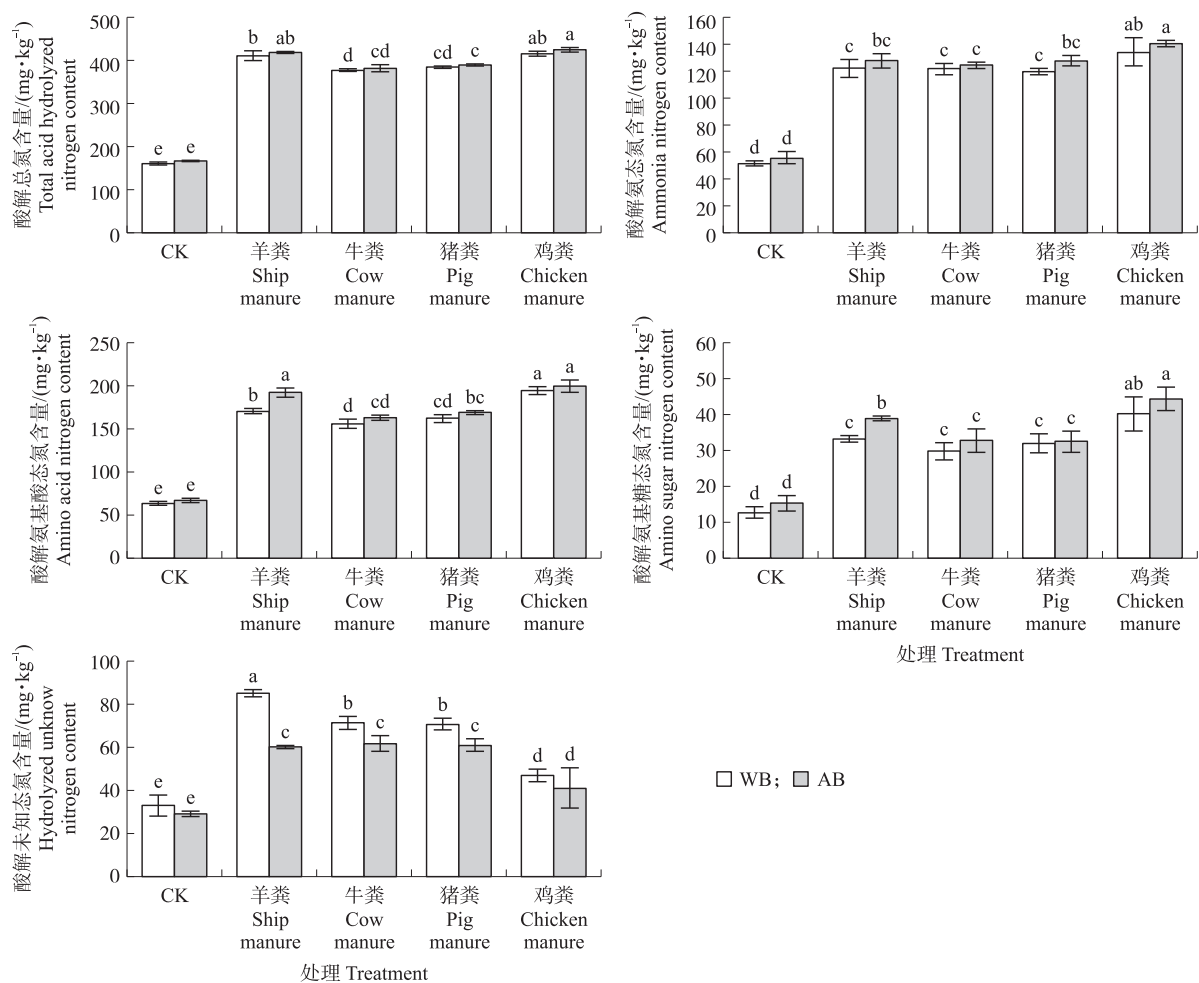


图 1 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对有机氮组分的影响

Fig. 1 Effect of different organic rotten materials and *P. fluorescens* application on the organic nitrogen fraction

CK: 对照; WB: 不加菌剂; AB: 加菌剂。下同。

CK: Control; WB: Without bacteria; AB: Adding bacteria. The same as follows.

2.3 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对复垦土壤微生物量碳/氮含量的影响

从图 2 可知, 不同施肥处理均能不同程度提高复垦土壤微生物量碳/氮含量, 且与对照以及对照+菌处理相比均差异显著。羊粪+菌处理相比单施羊粪处理微生物量碳含量显著提高 23.74% ($P < 0.05$); 牛粪+菌处理与单施牛粪处理相比, 微生物量氮含量显著提高 26.07% ($P < 0.05$); 猪粪+菌处理与单施猪粪处理

相比,微生物量碳/氮含量分别显著提高 28.13%和 24.37% ($P<0.05$);鸡粪+菌处理与单施鸡粪处理相比微生物量碳/氮含量分别显著提高 20.21%和 16.72% ($P<0.05$)。除此之外,以鸡粪+菌处理土壤微生物量碳/氮含量最高,较羊粪+菌处理显著提高 21.31%和 24.33% ($P<0.05$),较牛粪+菌处理显著提高 54.76%和 46.13%、较猪粪+菌处理显著提高 61.61%和 52.22% ($P<0.05$)、较单施鸡粪处理显著提高 20.21%和 16.72% ($P<0.05$)。双因素方差分析表明施用不同有机腐熟物料和是否施用菌剂均显著影响土壤中微生物量碳/氮含量,但施用有机腐熟物和菌剂两者之间无显著交互作用。由此可见,除牛粪+菌剂处理的微生物量碳、羊粪+菌剂处理的微生物量氮以外,不同有机腐熟物处理的基础上配施荧光假单胞菌均可进一步提高土壤中微生物量碳/氮含量。

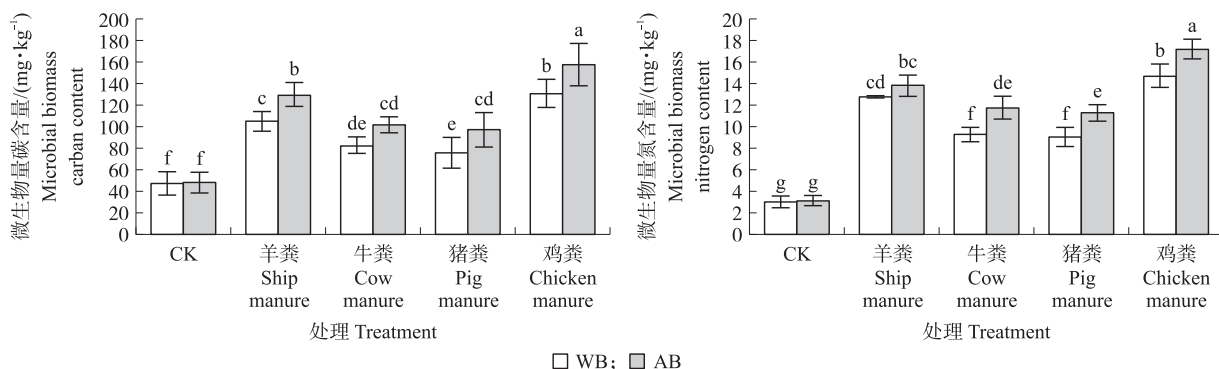


图2 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对微生物量碳、氮含量的影响

Fig. 2 Effect of different organic rotten materials and *P. fluorescens* application on the microbial biomass carbon and nitrogen contents

2.4 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对复垦土壤酶活性的影响

从图3可知,不同施肥处理下复垦土壤酶活性和不施肥相比均显著提高,在不同有机腐熟物处理的基础上配施荧光假单胞菌均可以进一步提高土壤中土壤酶活性。以鸡粪+菌处理的土壤酶活性最高,比单施鸡粪处理土壤蛋白酶、磷酸酶、脲酶和硝酸还原酶活性分别显著提高 16.11%、12.72%、10.88%和 11.59% ($P<0.05$),与其他3种有机腐熟物配施菌剂相比,土壤蛋白酶活性提高 14.41%~35.83%、土壤磷酸酶活性提高 15.28%~51.96%、土壤脲酶活性提高 9.00%~35.02%、土壤硝酸还原酶活性提高 9.23%~22.12%

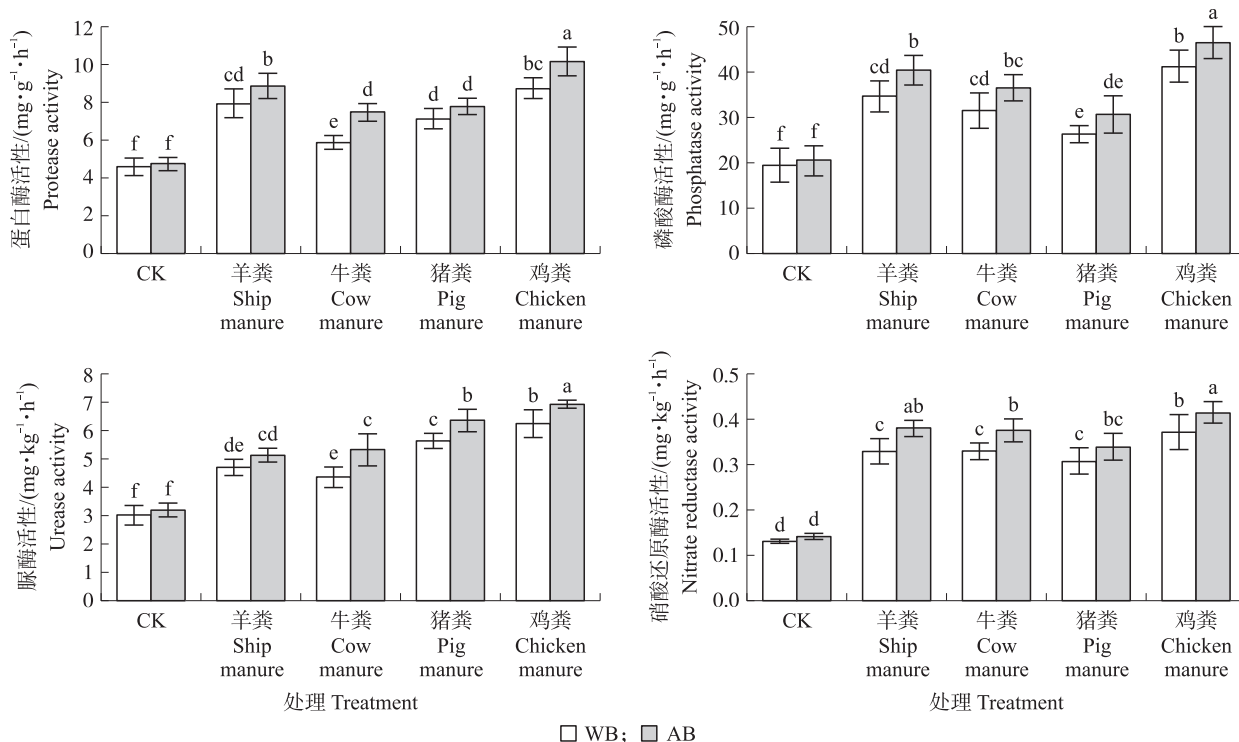


图3 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对土壤酶活性的影响

Fig. 3 Effect of different organic rotten materials and *P. fluorescens* application on soil enzyme activity

($P < 0.05$)。羊粪+菌处理相比单施羊粪处理土壤蛋白酶、磷酸酶、脲酶和硝酸还原酶活性分别显著提高11.84%、16.68%、9.05%和15.55% ($P < 0.05$);牛粪+菌处理与单施牛粪处理相比土壤蛋白酶活性显著提高27.86% ($P < 0.05$)、土壤脲酶活性显著提高22.03% ($P < 0.05$)、土壤硝酸还原酶活性显著提高13.68% ($P < 0.05$),猪粪+菌与单施猪粪处理相比土壤脲酶活性显著提高12.76% ($P < 0.05$)。双因素方差分析表明施用不同有机腐熟物料和是否施用菌剂均显著影响各土壤酶活性,但施用不同有机腐熟物和是否增施菌剂两者之间无显著交互作用。

3 讨论

3.1 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对土壤各氮素形态的影响

本试验研究结果表明,施用不同有机腐熟物可以有效提高土壤中各氮组分含量,在此基础上配施菌剂能够进一步提高土壤中相关氮素含量(酸解未知态氮含量除外)。这与张若扬等^[16]研究4种不同培肥处理对氮素矿化效果的影响以及梁利宝等^[17]研究不同培肥处理对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响所得到的结果一致。在本试验中,酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮、酸解未知态氮分别占土壤全氮的19.40%~25.54%、24.10%~33.54%和6.75%~16.07%,酸解氨基糖态氮占土壤有机氮的5.05%~7.96%,这与Stevenson^[18]和吴汉卿等^[19]的研究结果一致。单施有机腐熟物的基础上配施菌剂能够进一步提高土壤中相关氮素含量是因为施入有机腐熟物后能够提高土壤中有机质含量^[20-22],而土壤有机质含量的变化能够引起荧光假单胞菌群落结构变化^[23]。复垦土壤有机质含量极低,在施入有机腐熟物的基础上配施荧光假单胞菌菌剂,为该菌提供了良好的生存环境,因此提高了荧光假单胞菌在氮素方面的改良效果。鸡粪配施菌剂处理土壤各氮素含量提高效果最好的原因可能是鸡的肠道短、排泄快,对饲料的消化吸收不完全,导致鸡粪中残留的微量元素及营养物质与猪粪和牛粪相比较多^[24]。因此,鸡粪配施菌剂对各氮素含量的提升效果最好(硝态氮除外)。

配施菌剂后酸解未知态氮含量一定程度减少,其原因可能是配施菌剂后在一定程度上促进了酸解未知态氮向酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基糖态氮以及无机态氮转化。酸解氨基酸态氮与微生物的活动密切相关^[25],而酸解氨基糖态氮又可以反映土壤微生物对氮素同化吸收利用过程^[26],配施菌剂后,具有高效固氮能力的荧光假单胞菌能对氮素同化吸收利用,并参与氮素在土壤中的循环转化,再加上复垦土壤本身微生物数量稀少,因此与单施有机腐熟物相比,更加积极的微生物活动可能造成酸解未知态氮向酸解氨基酸态氮以及酸解氨基糖态氮的转化。除此之外,由于酸解氨态氮可作为一个含有大量易矿化有机氮的临时氮库^[27],配施菌剂后更加积极的微生物活动作用也一定程度上增加了酸解氨态氮含量。这一现象也一定程度上反映了配施荧光假单胞菌对土壤氮素的固定以及矿化的积极作用,而配施荧光假单胞菌对各氮素形态转化的具体机制还需进一步研究。

3.2 不同有机腐熟物与荧光假单胞菌配施对复垦土壤微生物量碳/氮和酶活性的影响。

土壤微生物是影响土壤化学变化的主要因素,是表现土壤质量变化过程中最敏感和最有潜力的指标^[28-29],而微生物的活性是由各种生物酶来调节,因此土壤酶活性是衡量土壤肥力的一个重要指标。栗丽等^[30]、孟会生^[31]的研究结果表明,配施菌剂后土壤微生物数量显著增加,且土壤脲酶、蛋白酶、磷酸酶活性均有一定程度的提高。在本研究中,单施不同有机腐熟物可以显著提高复垦土壤微生物量碳/氮水平,配施荧光假单胞菌后效果显著。这可能是因为有机腐熟物中具有丰富的氨基酸和纤维素,而氨基酸与纤维素对微生物的生命活动有着重要作用,它们可以为微生物提供良好的生活环境^[32]。活性微生物在进入土壤后迅速繁殖,可能会刺激其他微生物的生长,从而提高土壤微生物量碳、氮的水平。除此之外,添加荧光假单胞菌处理的酶活性较未添加的处理均有不同程度增加,其原因可能是复垦土壤本身微生物数量就较少,减少了土壤原有微生物对添加的外源微生物的拮抗作用,而土壤中活体微生物数量的增加能够增强土壤生物活性和生化活性,促进土壤酶活性提高。

参考文献 References:

[1] 庞耀龙.我国采煤沉陷区现状、综合治理模式及治理建议[J].西部探矿工程,2020,32(1):153-155.

Pang Y L. The current situation, comprehensive treatment model and governance suggestions of coal mining subsidence areas in China[J] Journal of Western Exploration Engineering, 2020, 32(1): 153-155 (in Chinese with English abstract).

- [2] 高健永,王楚涵,张慧芳,等. 复垦土壤团聚体稳定性和胶结物质对不同施肥的响应[J]. 应用与环境生物学报,2022,28(4):1042-1050.
Gao J Y,Wang C H,Zhang H F,et al. Reclaimed soil aggregate stability and response of cementitious material to different fertilizations[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2022,28(4):1042-1050(in Chinese with English abstract).
- [3] 洪坚平,谢英荷,孔令节,等. 矿山复垦区土壤微生物及其生化特性研究[J]. 生态学报,2000,20(4):669-672.
Hong J P,Xie Y H,Kong L J,et al. Soil bacteria and their biochemical characteristics on reclamation of coal mines[J]. Acta Ecologica Sinica,2000,20(4):669-672(in Chinese with English abstract).
- [4] 王艳博,黄启为,孟琳,等. 有机无机肥料配施对盆栽菠菜生长和土壤供氮特性的影响[J]. 南京农业大学学报,2006,29(3):44-48.
DOI:10.7685/j.issn.1000-2030.03.009.
Wang Y B,Huang Q W,Meng L,et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizer application on growth of spinach and soil nitrogen supply[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2006,29(3):44-48(in Chinese with English abstract).
- [5] 奚振邦,王寓群,杨佩珍. 中国现代农业发展中的有机肥问题[J]. 中国农业科学,2004,37(12):1874-1878.
Xi Z B,Wang Y Q,Yang P Z. The issue on organic manure in developing modern agriculture in China[J]. Scientia Agricultura Sinica,2004,37(12):1874-1878(in Chinese with English abstract).
- [6] 李燕青,温延臣,林治安,等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(10):1669-1678.
Li Y Q,Wen Y C,Lin Z A,et al. Effects of different organic fertilizers and chemical fertilizers on nitrogen use efficiency and soil fertility[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2019,25(10):1669-1678(in Chinese with English abstract).
- [7] 岳东霞,张要武,陈融,等. 荧光假单胞菌工程菌株的构建及对黄瓜枯萎病的防治效果[J]. 华北农学报,2008,23(06):101-104.
Yue D X,Zhang Y W,Chen R,et al. Construction of engineering strains of *Pseudomonas fluorescens* and its control effects on cucumber fusarium wilt disease[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2008,23(6):101-104(in Chinese with English abstract).
- [8] 乔志伟. 石灰性土壤溶磷细菌的筛选鉴定及在复垦土壤上的应用[D]. 太原:山西农业大学,2014.
Qiao Z W. Screening and identification phosphorus solubilizing bacteria in calcareous soil and the application in coal mining reclaimed soil[D]. Taiyuan:Shanxi Agricultural University,2014(in Chinese with English abstract).
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2013:30-49.
Bao S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing:China Agriculture Press,2013:44-49(in Chinese).
- [10] Bremner J M. Organic Forms of Nitrogen[M]. Madison:American Society of Agronomy,1965:1238-1255.
- [11] 周桦,宇万太,马强,等. 氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物量碳的改进[J]. 土壤通报,2009,40(1):154-157.
Zhou H,Yu W T,Ma Q,et al. Improvement of chloroform fumigation leaching method for the determination of soil microbial biomass carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science,2009,40(1):154-157(in Chinese with English abstract).
- [12] 吕盛,王子芳,高明,等. 秸秆不同还田方式对紫色土微生物量碳、氮、磷及可溶性有机质的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(5):266-272.
Lü S,Wang Z F,Gao M,et al. Effects of different straw return methods on microbial biomass carbon,nitrogen,phosphorus and soluble organic matter in purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(5):266-272(in Chinese with English abstract).
- [13] 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(2):70-72.
Feng X,Duan J P,Pu X P,et al. Comparison of two assays for soil urease activity[J]. Grassland and Turf,2008(2):70-72(in Chinese with English abstract).
- [14] 蔡红,沈仁芳. 改良茚三酮比色法测定土壤蛋白酶活性的研究[J]. 土壤学报,2005,42(2):306-313.
Cai H,Shen R F. Study on the determination of soil protease activity by modified indane colorimetry[J]. Acta Pedologica sinica,2005,42(2):306-313(in Chinese with English abstract).
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:332-334.
Guan S M. Soil Enzymes and Their Research Methods[M]. Beijing:Agriculture Press,1986:332-334(in Chinese).
- [16] 张若扬,郝鲜俊,韩阳,等. 不同有机肥对采煤塌陷区土壤氮素矿化动态特征研究[J]. 水土保持学报,2020,34(2):188-194.
Zhang R Y,Hao X J,Han Y,et al. Study on the dynamic characteristics of soil nitrogen mineralization in coal mining subsidence area by different organic fertilizers[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(2):188-194(in Chinese with English abstract).
- [17] 梁利宝,闫峰,许剑敏. 不同培肥处理对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):262-266.
Liang L B,Yan F,Xu J M. Effects of different fertilization treatments on soil nitrogen morphology in reclaimed coal mining subsidence areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(1):262-266(in Chinese with English abstract).
- [18] Stevenson F J. Nitrogen in agricultural soils[M]. Madison:American Society of Agronomy,1982:67-122.
- [19] 吴汉卿,张玉龙,张玉玲,等. 土壤有机氮组分研究进展[J]. 土壤通报,2018,49(5):1240-1246.
Wu H Q,Zhang Y L,Zhang Y L,et al. Soil Organic Nitrogen Fractions;a Review[J]. Chinese Journal of Soil Science,2018,49(5):1240-1246(in Chinese with English abstract).
- [20] 吴瑕,周浩楠,刘德阳,等. 有机肥与生物炭对小白菜光合作用及硝酸盐积累的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(4):403-412.
Wu X,Zhou H N,Liu D Y,et al. Effects of organic fertilizer and biochar on photosynthesis and nitrate accumulation in Chinese cabbage[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2023,54(4):403-412(in Chinese with English abstract).

- [21] 李彦,孙翠平,井永苹,等. 长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响[J]. 农业环境科学学报,2017,36(7):1386-1394.
Li Yan,Sun C P,Jing Y P, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on soil fertility and nitrate nitrogen transport in fluvo-aquic soil[J]. Journal of Agro-Environment Science,2017,36(7):1386-1394.
- [22] 李媛,郝鲜俊,高文俊,等. 不同有机肥对矿区复垦土壤磷素累积及淋失风险研究[J]. 水土保持学报,2022,36(2):344-351.
Li Y,Hao X J,Gao W J, et al. Study on phosphorus accumulation and leaching risk of soil reclamation in mining areas by different organic fertilizers[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(2):344-351(in Chinese with English abstract).
- [23] Dignam B,O'Callaghan M,Condon L M, et al. Impacts of long-term plant residue management on soil organic matter quality, *Pseudomonas* community structure and disease suppressiveness[J]. Soil Biology and Biochemistry,2019,135:396-460.
- [24] 张鸣,高天鹏,李昂,等. 畜禽粪肥与化肥配施对春小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(2):216-221.
Zhang M,Gao T P,Li A, et al. Effects of combined application of livestock and poultry manure and chemical fertilizer on spring wheat yield and nutrient uptake and utilization[J]. Journal of Triticeae Crops,2014,34(2):216-221(in Chinese with English abstract).
- [25] Zhang X D,Wulf A. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, mannosamine, and galactosamine in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry,1996,28(9):1201-1206.
- [26] Amelung W,Zhang X. Determination of amino acid enantiomers in soils[J]. Soil Biology & Biochemistry,2001,33(4/5):553-562.
- [27] Lü H J,He H,Zhao J, et al. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season[J]. Plant & Soil, 2013,373(1/2):595-607.
- [28] 王延军,宗良纲,李锐,等. 不同肥料对有机栽培番茄生长和土壤酶及微生物量的影响[J]. 南京农业大学学报,2007,30(3):83-87.
DOI:10.7685/j.issn.1000-2030.2007.03.016.
Wang Y J,Zong L G,Li R, et al. Effects of different fertilizers on the growth of tomato and soil enzymes activities and microbial biomass-C[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2007,30(3):83-87(in Chinese with English abstract).
- [29] 刘晓星,吕光辉,杨晓东,等. 艾比湖流域5种土壤类型的酶活性和理化性质[J]. 干旱区研究,2012,29(4):579-585.
Liu X X,Lü G H,Yang X D, et al. Enzymatic activity and physicochemical properties of 5 soil types in the Ebine Lake Basin[J]. Arid Zone Research,2012,29(4):579-585(in Chinese with English abstract).
- [30] 栗丽,李廷亮,孟会生,等. 菌剂与肥料配施对矿区复垦土壤养分及微生物学特性的影响[J]. 应用与环境生物学报,2016,22(6):1156-1160.
Li L,Li T L,Meng H S, et al. Effects of combined application of microbial agents and fertilizers on soil nutrients and microbial characteristics in reclaimed soil[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2016,22(6):1156-1160(in Chinese with English abstract).
- [31] 孟会生. 配施菌肥对不同复垦年限土壤微生物多样性及磷有效性的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2015.
Meng H S. Effects of combined fungal fertilizer on soil microbial diversity and phosphorus availability at different reclamation years[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University,2015(in Chinese with English abstract).
- [32] 孙凤霞,张伟华,徐明岗,等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2792-2798.
Sun F X,Zhang W H,Xu M G, et al. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil[J]. Journal of Applied Ecology,2010,21(11):2792-2798(in Chinese with English abstract).

责任编辑:刘怡辰