

土壤不同形态碳氮含量和酶活性对培养时间及外源碳投入的响应

杨苏^{1,2}, 刘耀斌¹, 章欢³, 李辉信¹, 张永春², 艾玉春², 汪吉东²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院,南京 210095;2.农业农村部江苏耕地保育科学观测实验站,江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,南京 210014;3.江苏大学农业装备工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:在绿色农业科技的推动下,有机物料资源化利用备受青睐,但有机物料种类不同对土壤肥力的提升效果不同,为探究有机物料施用对潮土不同形态碳氮含量及酶活性的动态影响,通过为期1年的培养试验,设置添加10 g/kg的秸秆菌渣(S)、树枝菌渣(B)、小麦秸秆(W)、黑麦草秸秆(R)和蚕豆秸秆(BB),并以空白处理作为对照(CK)。结果表明:与CK相比,有机物料施用显著增加土壤不同形态碳氮含量及酶活性,随培养时间的延长,有机碳及全氮含量呈增加的趋势,增幅分别为25.4%~42.9%和35%~60%,易氧化有机碳和碱解氮含量呈先上升后下降的趋势,最大值分别为2.80,43.26 mg/kg,水溶性有机碳、微生物量碳氮和酶活性则呈下降的趋势,最大值分别为346 mg/kg,293 μg/g和23.08 μg/g。有机物料施用会增加土壤酶活性提高土壤呼吸速率,通过对3个取样期7种水解酶的分析发现,酶活性表现为:LAP>PHOS>NAG>BG>CB>AG>XYL,即参与氮循环酶活性>参与磷循环酶活性>参与碳循环酶活性,绿肥秸秆主要增加氮循环酶活性,且以BB处理酶活性最高,菌菇渣主要增加碳循环酶活性,B处理酶活性高于S处理。有机物料施用会影响土壤酶活性,增加不同形态碳氮含量,但增幅因有机物料种类不同而有所差异,且碳氮组分对培养时间的响应不一。总体而言,小麦秸秆和蚕豆秸秆腐殖化系数最高,对不同组分碳氮含量增加效果最优。

关键词:绿肥秸秆;菌菇渣;酶活性;碳含量;氮含量

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0340-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbxcx.2020.04.049

Responses of Different Forms of Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activities to Cultivation Time and Exogenous Carbon Input

YANG Su^{1,2}, LIU Yaobin¹, ZHANG Huan³, LI Huixin¹,
ZHANG Yongchun², AI Yuchun², WANG Jidong²

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

2.Agricultural Science and Technology Research Institute of Agricultural and Rural Sciences, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014;

3.College of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013)

Abstract: With the promotion of green agricultural technology, the utilization of organic materials has been favored, but different types of organic materials have different effects on improving soil fertility. In order to explore the dynamic effect of organic materials application on the content of carbon and nitrogen in different forms and the enzyme activity in alluvial soil, a one-year culture test was conducted with treatments including add 10 g/kg of straw fungus residue (S), dendritic fungus residue (B), wheat straw (W), ryegrass straw (R), broad bean straw (BB), and Control (CK). The results showed that compared with CK, the application of organic materials significantly increased the carbon and nitrogen content in different forms and enzyme activity in soil. With the increase of the cultivation time, the organic matter and total nitrogen content showed increase trends with increases of 25.4% to 42.9% and 35% to 60%, respectively. The contents of easily oxidizable organic carbon and alkali-hydrolyzable nitrogen increased first and then decreased, and maximized at 2.80 and 43.26 mg/kg. Organic carbon, microbial biomass carbon and nitrogen,

收稿日期:2019-12-18

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800301);江苏省农业科技自主创新项目(CX(17)-1001);江苏省重点研发计划项目(BE2019378);国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10-B9)

第一作者:杨苏(1994—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事土壤修复与养分均衡研究。E-mail:2017103075@njau.edu.cn

通信作者:李辉信(1964—),男,江西吉安人,博士,教授,主要从事土壤生态相关研究。E-mail:huixinli@njau.edu.cn

and enzyme activity showed a downward trend with the maximum values were 346 mg/kg, 293 $\mu\text{g/g}$, and 23.08 $\mu\text{g/g}$. Organic material application could increase soil respiration rate by increasing soil enzyme activity. Through analysis of 7 hydrolytic enzymes at three sampling periods, the enzyme activity was: LAP>PHOS>NAG>BG>CB>AG>XYL, which indicating enzyme activity in the nitrogen cycle>enzyme activity in phosphorus cycle > enzyme activity in carbon cycle. Green manure straw mainly increased nitrogen cycle enzyme activity, and BB treatment had the highest enzyme activity. Mushroom residue mainly increased carbon cycle enzyme activity, the treatment activity of B was higher than that of S. Organic material application will affect soil enzyme activity and increase the content of different forms of carbon and nitrogen, but the increase varies depending on the types of organic material, and the response of the carbon and nitrogen components to the culture time is different. In general, wheat straw and broad bean straw showed the highest humification coefficient, and had the best effect on increasing the carbon and nitrogen content of different components.

Keywords: green manure straw; mushroom residue; enzyme activity; carbon content; nitrogen content

中国秸秆生产量大,每年能产生约5亿t秸秆、600多万t菌菇渣^[1],秸秆及菌渣在农业生态系统中被广泛应用,但存在季节集中、堆放困难和工业利用效益低等问题,是农业废弃物处理中的难题^[2]。农田系统碳投入主要来源于作物根系及其分泌物、有机肥投入和秸秆还田,而秸秆作为一种重要的有机肥源,将其还田利用一直是传统农业生产中土壤培肥的主要方式,同时也是解决秸秆出路与实现秸秆资源有效利用的最重要途径^[3]。前人^[4-7]的研究表明,秸秆还田能够改善土壤水热状况,提高土壤呼吸速率,还能通过增加有机碳输入量,补偿土壤碳矿化损失,提高土壤有机碳含量,改善微生物介导的土壤生态系统功能,提高养分含量,增加酶活性等培肥效应。秸秆还田技术还能提高氮素利用率,减少氮肥施用量和氮素损失量^[8],增加地上部含氮量和作物产量。由于不同秸秆类型在养分含量方面存在差异,还田后在土壤中腐解速率不同,导致其在改善土壤性质、促进作物生长发育方面存在差异^[9-10]。

有机物料(秸秆和菌菇渣)中的水溶性或苯醇溶性物质以及蛋白质等小分子物质分解最快,其次是纤维素和半纤维素,最难分解的是木质素。李忠佩等^[11]认为,有机物料的分解速率随木质素含量的升高而降低,但在红壤上的研究^[12]表明,物料分解和木质素含量并不直接相关,而是与有机物料碳氮比值直接相关。张红^[13]对不同植物秸秆的腐解特征和微生物功能多样性进行了研究认为,C/N低、体积小的秸秆在腐解前期分解速度快,而C/N高、体积小的秸秆会在腐解后期加快分解;张丹等^[14]在中国西南山区的试验研究表明,秸秆还田可增强土壤微生物对氮素固持能力,有效降低土壤氮素流失风险,且玉米秸秆在增产、固氮方面的作用优于蚕豆秸秆。

潮土是黄淮海地区分布面积最广的土壤类型,部分土壤存在养分匮乏、耕层结构差、作物产量低下等土壤障碍问题,通过添加外源有机物料,如秸秆还田、增施有

机肥和有机物料等已经成为改良潮土结构、增加土壤碳投入的主要方式。陈书涛等^[15]认为,土壤酶活性的增强可导致土壤有机质周转速度加快,从而促进土壤呼吸的增强,而有机物料的施用又增加了土壤碳的投入,但有机物料种类对二者的贡献如何还有待进一步探究。本研究通过添加等用量的绿肥秸秆(小麦、蚕豆、黑麦草)和菌菇渣(秸秆菌渣、树枝菌渣),通过对土壤碳排放、不同形态碳氮含量及酶活性的分析,探究不同有机物料施入下土壤碳的矿化与微生物活性及土壤养分的关系,找到潮土固碳减排的最佳有机物料种类,为减缓温室效应提供优化途径,为潮土改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

本试验为土培试验,供试土壤类型为潮土,取自江苏省盐城市滨海县界牌镇黄河湾绿色科技有限公司试验基地,该基地(33°43'N,119°37'E)属北温带,气候温和,地势较高,降雨充沛,雨热同季,常年平均气温14.1℃,平均降水量942.6mm。供试土壤基础指标为:有机质含量5.86g/kg,全氮含量0.22g/kg,全磷含量0.50g/kg,有效磷含量2.63mg/kg,速效钾含量63.3mg/kg,pH8.1。

1.2 试验设计

本试验为室内培养试验,共设置6个处理,分别为对照(CK)、秸秆菌渣10g/kg(S)、树枝菌渣10g/kg(B)、小麦秸秆10g/kg(W)、黑麦草秸秆10g/kg(R)和蚕豆秸秆10g/kg(B),供试土壤类型为潮土,所用土壤为0—20cm的表层土壤,过2mm筛备用。试验开始前将供试土壤与添加物混合均匀放入盆钵中,为防止土壤从盆钵底部露出,在每个盆钵底部放置1个100目的圆形网筛,目的是保证水能通过而土壤不能通过。每盆(直径20cm,高20cm,盆钵盖子上均有橡胶软塞,供采气使用)装土重折合为风干土5kg,于25℃下培养360天,每个处理3次重复,在培养的第1,3,5,7,9,16,23,

30,60,90,120,150,200,250 天用 50 mL 带三角阀门的注射器收集 1 h 前和 1 h 后的气体各 1 针筒,采用 GC7890 Agilent Technologies 测定 CO₂ 含量,用差值法计算 1 h 内 CO₂ 排放量,累计加和求 CO₂ 排放总量。每 120 天采用完全破坏性取样 1 次,取样 3 次,共 54 个钵。于 2018 年 6 月 18 日在江苏省农科院进行,供试菌渣由盐城市亭湖区春秋菌业专业合作社提供,秸秆菌渣(S)系草菇生产后的秸秆类菌渣,简称秸秆菌渣;树枝菌渣(B)系香菇生产后树枝类菌渣,简称树枝菌渣;小麦秸秆、黑麦草秸秆和蚕豆秸秆由江苏省盐城市滨海县界牌镇黄河湾绿色科技有限公司试验基地提供,均为 2018 年当季作物秸秆。有机物料具体养分含量见表 1。

表 1 物料养分含量

添加物料	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	C/N
小麦秸秆	3.11	0.85	16.5	270	86.8
蚕豆秸秆	20.50	3.31	28.5	393	19.2
黑麦草秸秆	6.80	1.96	39.5	238	60.0
秸秆菌渣	4.32	8.94	19.4	258	59.7
树枝菌渣	5.22	6.71	18.7	328	62.8

1.3 土壤样品采集

土壤样品采用完全破坏性取样,样品磨碎过筛后用于有机质、易氧化有机碳、全氮、碱解氮含量的测定,鲜样存于 4 °C 冰箱,用于酶活性、微生物量碳氮、水溶性有机碳、铵态氮、硝态氮含量的测定。

1.4 测定项目与方法

土壤碳氮测定:有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定;易氧化有机碳含量采用高锰酸钾氧化法测定;水溶性有机碳含量按水土比为 10:1 体积比浸提,然后用 multi N/C 3100/1 碳氮分析仪直接测定得到的浸提液;全氮含量采用全自动凯氏定氮法、碱解氮采用碱解扩散法、微生物量碳氮采用氯仿熏蒸法、铵态氮采用靛酚蓝比色法、硝态氮采用重氮化耦合比色法测定,CO₂ 排放量采用 7890A GC System 气相色谱仪测定差值法计算。7 种与碳氮磷循环相

关的酶活性采用荧光定量 96 孔板法测定。

腐殖化系数=分解后残留在土壤中的有机碳/加入土壤的秸秆有机碳×100%

土壤酶活性计算公式为:

$$\chi'_\lambda = x_\lambda / \sum_i \chi_i \quad (i=1,2,3,4) \quad (1)$$

$$Y' = (\prod_i Y'_i)^{\frac{1}{n}} \quad (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

式中: χ_i 为单一酶活性的测定值; χ'_λ 为归一化的酶活性; i 为酶的总活性(参与碳、氮磷循环酶总活性、总酶活性); Y'_i 为归一化的酶活性(本试验中参与碳循环酶 $n=4$,参与氮循环酶 $n=2$;总酶活性 $n=6$)^[16]。

CO₂ 排放量计算公式为:

$$\text{CO}_2 \text{ 排放量} = \frac{\sum F_i + F_i + 1}{2} \times 24 \times (d_{i+1} - d_i)$$

式中: F 为 CO₂ 通量; i 为取样时间; d 为取样日期。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016、SPSS 25.0、Origin 2018 软件进行数据处理和分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)配合 Duncan's 检验多处理间均值的显著性,利用双变量相关(Pearson)分析测定指标的相关性,采用 RStudio 进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 添加外源有机物料对土壤不同形态有机碳的影响

与对照相比,添加外源有机物料可增加土壤不同形态有机碳含量,增幅为 8.9%~25.6%(表 2)。随着培养时间的延长,土壤有机碳含量呈上升趋势,易氧化有机碳含量呈先上升后下降的趋势,而水溶性有机碳和微生物量碳含量呈下降趋势,土壤活性有机碳含量在总有机碳中的比例呈下降趋势。与 R、S 和 B 处理相比,W 处理显著提升有机质和易氧化有机碳含量,且与 BB 处理无显著差异,在培养 120 天时 S 处理的水溶性有机碳含量达到最大值(342 mg/kg),比 CK 提高 41 mg/kg,在培养的第 120、240 天,B 处理的微生物量碳含量显著高于 W、BB 和 CK 处理。

表 2 有机物料施用下不同形态碳含量

处理	有机碳/(g·kg ⁻¹)			水溶性有机碳/(mg·g ⁻¹)			易氧化有机碳/(g·kg ⁻¹)			微生物量碳/(μg·g ⁻¹)		
	120 天	240 天	360 天	120 天	240 天	360 天	120 天	240 天	360 天	120 天	240 天	360 天
S	5.32±0.38b	5.63±0.70b	5.99±0.18bc	344±3.59a	259±17.85a	252±9.55a	1.19±0.09d	2.01±0.12c	0.99±0.06ab	271±6.36ab	214±25.77a	143±2.48bc
B	5.02±0.48b	6.09±0.39ab	6.29±0.61b	329±3.52b	187±26.42b	173±8.18ab	1.39±0.08d	1.85±0.03c	0.81±0.27b	190±9.36c	170±14.40b	91±48.46c
W	6.07±0.48a	6.36±0.39a	6.59±0.23a	342±5.68a	230±8.84ab	190±109ab	2.36±0.11b	2.80±0.16a	1.30±0.16a	215±56.62bc	110±8.41c	178±16.30b
R	5.10±1.09b	5.54±0.58b	5.78±0.71c	323±6.12b	214±42.61ab	94±9.46bc	1.92±0.11c	2.43±0.05b	0.82±0.14b	255±10.10ab	179±5.84b	136±25.40bc
BB	5.79±0.26a	6.19±0.29ab	6.54±0.10a	346±4.86a	207±38.61ab	97±15bc	3.20±0.07a	2.65±0.03a	1.31±0.15a	293±15.26a	245±11.3a	201±18.01a
CK	4.61±0.36c	3.93±0.11c	3.74±0.12d	301±4.84c	80±10.24c	57±1.21c	0.70±0.04e	0.62±0.05d	1.01±0.07ab	20±8.15d	43.7±0.98d	49±11.10d

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。

2.2 添加外源有机物料对土壤 CO₂ 的排放速率及排放通量的影响

通过 360 天的培养试验发现,随着培养时间的增

加,各处理 CO₂ 的排放速率呈先上升后下降的趋势,在培养的第 5 天达到最大值,在培养的 5~60 天 CO₂ 排放速率呈急速下降趋势,在 60~250 天趋于稳定

(图 1a)。与对照相比,添加有机物料显著增加 CO₂ 的排放速率,不同有机物料的 CO₂ 排放速率不同,主要表现为:R>BB>W>S>B,在培养的前 23 天,有机物料种

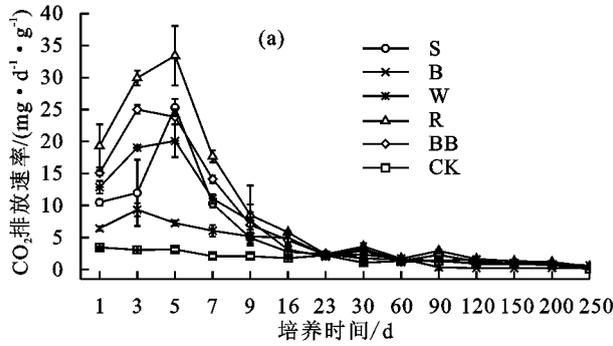
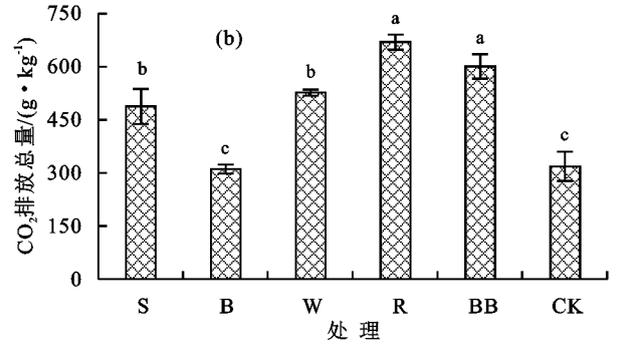


图 1 有机物料施入下 CO₂ 排放速率及排放总量

类对 CO₂ 排放速率的影响较大,培养后期与 CK 处理相比差异减小,除 B 处理外,BB、R、S 和 M 处理均显著增加土壤的 CO₂ 排放总量 ($p < 0.05$) (图 1b)。



2.3 不同有机物料的腐殖化系数研究

对 5 种有机物料腐殖化系数的分析(图 2)发现,小麦秸秆腐殖化系数最高,其值为 51.2%,显著高于其他有机物料 ($p < 0.05$);其次为蚕豆秸秆,树枝菌渣的腐殖化系数最低,但秸秆菌渣、树枝菌渣、黑麦草秸秆和蚕豆秸秆的腐殖化系数无显著差异,而腐殖化系数越高,对土壤有机碳的积累贡献越大。因此小麦秸秆对土壤碳的积累贡献最大。

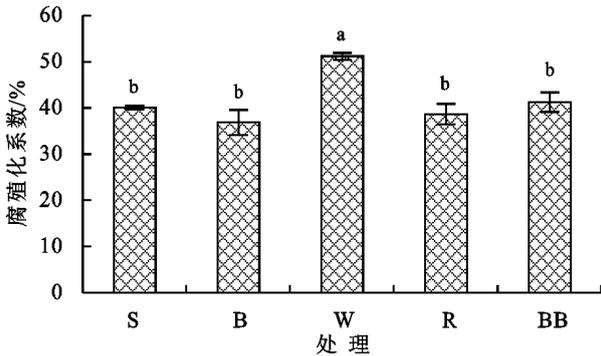


图 2 不同有机物料的腐殖化系数

2.4 添加外源有机物料对土壤不同形态氮的影响

与对照相比,添加外源有机物料显著增加土壤总氮、碱解氮和微生物量氮含量,但对铵态氮和硝态氮含量的增加效果不明显。随着培养时间的增加,全氮含量呈逐渐增加趋势,碱解氮、铵态氮和硝态氮含量呈先增加后降低趋势,而微生物量氮呈逐渐下降的趋势(表 3)。培养 120 天后,添加有机物料的活性氮在土壤总氮的占比为 13.5%~26.7%,培养 240 天后提高到 57.8%~69.8%,而培养 360 天占比略有下降,达到 20.1%~45.9%。在培养前期添加绿肥秸秆对活性氮的提升效果优于菌菇渣,在培养 360 天后,BB 处理全氮含量达到最大,为 0.45 g/kg,显著高于 CK,但与添加有机物料的处理相比差异不显著。就添加有机物料种类而言,添加小麦秸秆和蚕豆秸秆提升土壤氮的效果最好,BB 处理通过增加铵态氮和硝态氮及微生物量氮含量来增加土壤全氮含量,在培养 240 天时,铵态氮、硝态氮和微生物量氮含量分别比 W 处理分别提高 0.83 mg/kg,220 mg/kg 和 5.49 μg/g。

表 3 有机物料施用下不同形态氮含量

处理	全氮/(g·kg ⁻¹)			碱解氮/(mg·kg ⁻¹)			铵态氮/(mg·kg ⁻¹)			硝态氮/(mg·kg ⁻¹)			微生物量氮/(μg·g ⁻¹)		
	120 天	240 天	360 天	120 天	240 天	360 天	120 天	240 天	360 天	120 天	240 天	360 天	120 天	240 天	360 天
S	0.27±0.03c	0.30±0.05d	0.32±0.28b	30.20±2.22c	42.63±2.48a	24.63±0.99a	6.71±1.57ab	12.21±1.50b	7.37±0.73a	187.85±31.07b	207.68±81.62b	196.23±45.4a	17.84±4.9ab	9.18±2.41ab	14.32±4.70a
B	0.26±0.04c	0.37±0.02b	0.37±0.18ab	22.10±0.94d	37.55±7.68b	18.81±0.73b	4.51±0.65bc	12.33±0.42b	4.33±0.19b	258.84±41.11a	270.74±47.23b	156.21±8.64b	22.15±1.99a	11.19±1.55ab	5.04±1.80b
W	0.30±0.05ab	0.34±0.03a	0.41±0.15a	31.90±5.56bc	31.59±1.76bc	27.54±4.26a	4.82±0.06abc	18.02±1.48a	4.64±1.79b	150.22±12.07b	99.19±8.03c	61.59±11.27c	16.92±0.44ab	7.33±0.42b	4.78±0.140b
R	0.28±0.04b	0.29±0.06c	0.33±0.11ab	38.20±1.42ab	28.26±2.23c	24.82±0.73a	6.99±0.52a	11.80±1.34b	3.15±0.36b	149.32±24.29b	241.79±8.56b	154.09±34.24b	21.54±8.57ab	6.76±2.10b	4.66±1.50b
BB	0.32±0.01a	0.34±0.02a	0.45±0.28a	45.28±4.65a	43.26±3.59a	27.15±2.34a	6.36±1.61abc	18.85±1.40a	3.20±0.08b	297.50±16.11a	289.51±12.53a	234.91±23.08a	23.08±5.28a	12.82±4.20a	11.54±3.30a
CK	0.20±0.02d	0.17±0.03e	0.17±0.08e	17.11±1.98d	16.36±2.43d	15.51±2.62b	4.36±0.21c	11.00±1.20b	3.65±0.61b	153.87±5.35b	124.78±16.09c	76.39±10.08c	10.77±2.3b	6.24±1.31b	2.77±0.64b

2.5 参与土壤碳氮磷循环酶活性

参与碳氮磷循环酶的活性对添加外源有机物料响应不同,总体而言,各处理中氮循环酶活性>磷循环酶活性>碳循环酶活性,且随培养时间的延长,土壤酶活性总体呈现下降的趋势,但氮循环酶活性在培养 360 天时呈增加的趋势(图 3)。S 处理在培养 120 天时土壤碳氮磷循环酶活性显著高于其他处理,而在培养 240 天时 B 处理碳循环酶活性最高,W 处理氮

循环酶活性最高,R 处理磷循环酶活性最高。但培养 360 天后,CK 酶活性最高。

2.6 不同形态碳氮含量与酶活性的相关性分析

总水解酶活性以 7 种水解酶活性标准化后累加和来表示,碳循环酶活性以 AG、BG、CB 和 XYL 4 种水解酶活性标准化后累加和来表示,主要反映土壤酶降解纤维素的能力;氮循环酶活性以 LAP 和 NAG 水解酶活性标准化后累加和来表示,主要反映土壤酶降解

几丁质、蛋白质的能力;磷循环酶活性以 PHOS 水解酶活性来表示,主要反映土壤酶降解含磷有机化合物的能力。从表 4 可以看出,土壤有机碳与易氧化有机碳及水溶性有机碳呈显著正相关, R^2 分别为 0.534 和 0.504,表明外源有机物料对土壤有机碳的增加主要是通过增加土壤中活性碳的含量来实现的。微生物量碳与易氧化有机碳、可溶性有机碳及微生物量碳的相关性均达显著水平,其中与可溶性有机碳的相关性更高, R^2 为 0.534,而碳循环相关的酶活性只与微生物量碳达到显著水平。

从表 5 可以看出,全氮含量与微生物量氮呈极显著正相关($p < 0.01$),而与活性氮含量呈负相关,氮循环酶活性与微生物量氮呈显著正相关($p < 0.05$),而与磷循环酶呈极显著正相关,相关性达到 0.827,与铵态氮和硝态氮呈显著负相关。碱解氮与铵态氮和硝态氮含量呈极显著正相关。

2.7 不同处理间的主成分分析

对土壤不同形态碳氮含量和酶活性进行主成分分析,提取 3 个主成分,3 个培养期累积贡献率分别为 70.54%,74.57%和 75.36%,其中第 1 主成分(PC1)贡献率分别为 37.94%,46.38%,41.05%,第 2 主成分(PC2)贡献率分别为 17.94%,17.07%,20.32%,所以提取前 2 个主成分进行分析。从图 4 可以看出,培养 120 天时,与 CK 相比,有机物料施用显著增加土壤各形态碳氮含量及酶活性,BB 处理对 AG 酶活性及 SOM 含量影响最大,W 处理对 XYL 酶、LAP 酶活性及 EOC、DOC、MBN 含量影响最大,S 处理对 NAG 酶活性及土壤全氮含量影响最大。AG 酶活性与 SOM 与 EOC 含量呈显著正相关,XYL 酶活性与 DOC 与 MBN 呈显著正相关。培养前期有机物料种类对不同形态碳氮含量及酶活性的影响差异不明显,随培养时间的延长,差异逐渐变大,至培养

360 天时,不同有机物料分布在不同区域,S、B 处理主要指增加 AN 含量,W 处理主要增加 SOM 含量,BB 处理主要增加 LAP 及 NAG 酶活。对指标间的夹角分析可知,BG、XYL 酶活性与 EOC 含量相关较大,AG 酶活性与 MBC 和 SOM 相关性较大。

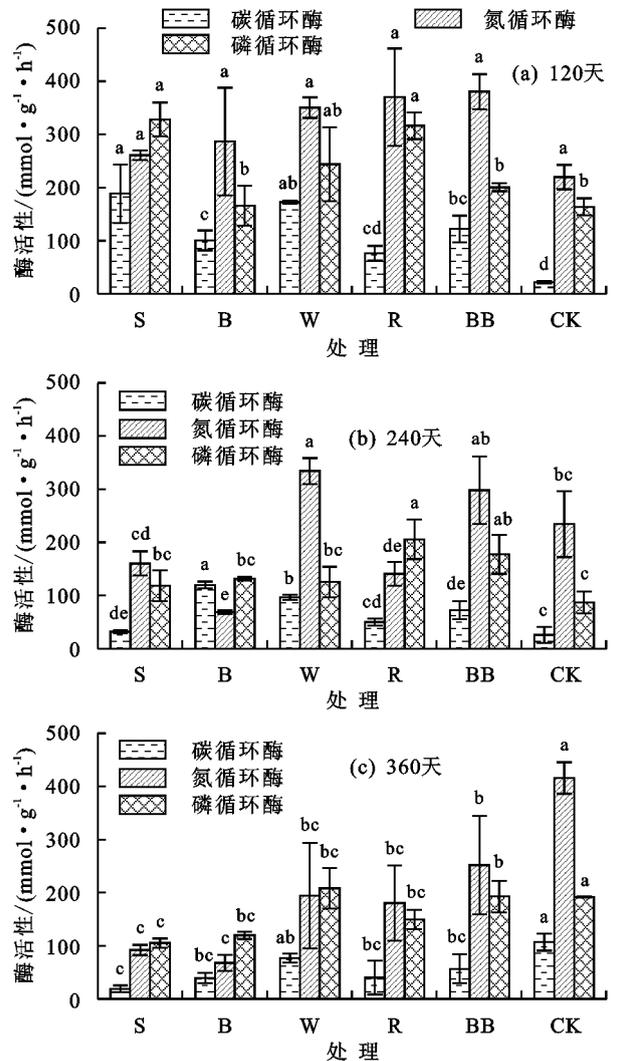


图 3 土壤碳氮磷循环酶活性

表 4 不同形态碳含量及酶活性的相关性

项目	有机碳	易氧化有机碳	可溶性有机碳	微生物量碳	碳循环酶
有机碳	1	0.534**	0.504**	0.210	0.155
易氧化有机碳	0.534**	1	0.422**	0.327*	-0.193
可溶性有机碳	0.504**	0.422**	1	0.534**	0.007
微生物量碳	0.210	0.327*	0.534**	1	0.271*
碳循环酶	-0.155	-0.193	0.007	0.271*	1

注: * 表示显著相关($p < 0.05$); ** 表示极显著相关($p < 0.01$)。下同。

表 5 不同形态氮含量及酶活性的相关性

项目	全氮	碱解氮	铵态氮	硝态氮	微生物量氮	氮循环酶	磷循环酶
全氮	1	-0.093	-0.136	-0.091	0.427**	-0.204	-0.169
碱解氮	-0.093	1	0.544**	0.459**	-0.264	-0.036	0.026
铵态氮	-0.136	0.544**	1	0.701**	-0.376	-0.318*	-0.213
硝态氮	-0.091	0.459**	0.701**	1	-0.498	-0.465**	-0.251
微生物量氮	0.427**	-0.264	-0.376**	-0.498	1	0.285*	0.293*
氮循环酶	-0.204	-0.036	-0.318*	-0.465	0.285*	1	0.827**
磷循环酶	-0.169	0.026	-0.213	-0.251	0.293*	0.827**	1

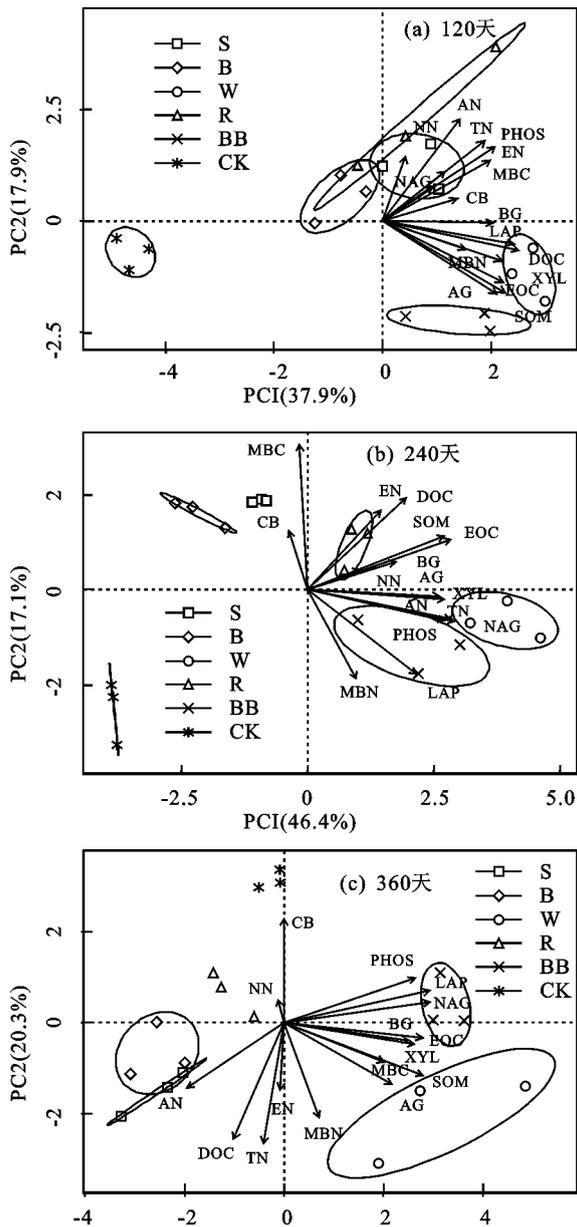


图 4 土壤不同形态碳氮含量与酶活性之间关系

3 讨论

添加有机物料的种类和培养时间的差异导致碳排放量不同,5种有机物料对比发现,木质菌渣碳排放总量显著低于其他处理,这与栗方亮等^[17]的研究结论一致。有机物料在微生物及酶的选择作用下,先分解蛋白类物质和碳水化合物^[18],但随着培养时间的延长,微生物生命活动所需的养分下降,酶呼吸的底物减少,CO₂排放量呈现下降趋势。土壤酶活性表现出与CO₂排放速率一致的趋势。这一方面是由于微生物是驱动有机物质分解的主要参与者,它们会分泌纤维素酶、半纤维素酶、木质素酶等促进秸秆自身的氧化分解过程,增加CO₂排放,同时秸秆和菌菇渣自身含有丰富的纤维素、木质素以及氮、磷、钾等多种营养元素^[19],这些物质为微生物的繁殖提供了养分,增加了微生物的呼吸。有研究^[20]表明,有机物料刚进

入土壤时,微生物会先分解蛋白类物质和碳水化合物,促进包裹在土壤团聚体和腐殖质中酶的释放,但随着培养时间的延长,有机物料中易分解物质减少,难降解的复杂化合物如纤维素、复杂的高分子化合物等增多,碳氮比下降,酶活性降低,CO₂排放通量降低。Wurzburger等^[21]认为,有机物料通过改变土壤碳、氮活性影响微生物对碳源和氮源的利用率,导致参与碳和氮循环酶活性不同。通过对7种水解酶的对比发现,小麦秸秆主要增加氮循环酶活性,蚕豆秸秆主要增加碳循环酶的活性,这是由于小麦秸秆具有较高的碳氮比,蚕豆秸秆碳氮比较低,还田后会导致土壤大环境的碳氮比变化,当碳氮比较高时,氮素相对不足,会促进与氮循环相关的酶活性增加,而当氮含量高时,碳素相对不足,会促进碳循环酶的活性增加,以调节碳氮比满足微生物的需求,但培养360天时发现,CK处理酶活性最高,这是由于未添加有机物料,有机质含量呈下降的趋势。为满足微生物的生命活性,需要激发更多的酶活性来分解土壤自身碳素。

碳氮库是土壤的重要组成部分,能够直接或间接决定土壤质量^[22]。本试验结果显示,绿肥秸秆及菌菇渣还田可为微生物提供物质和能量来源,促进微生物的生命活动及繁衍,增加与碳氮循环相关酶的活性,进而增加土壤碳氮含量,且绿肥秸秆效果优于菌菇渣,这与赵涵^[23]的研究结论不同,可能是由于试验所用菌菇渣中难降解物质比秸秆中多,进入土壤后的利用率低,养分释放慢;另外,多数真菌自身的碳氮比大约为10:1,即同化1份碳需要16~20份有机碳来获取能量,同化1份氮需要消耗25~30份有机碳,因此真菌最适分解有机质的碳氮比为(25~30):1^[24],碳氮比过高或过低均不利于有机物的分解。蚕豆属于豆科作物,其秸秆中的碳氮比为19.2,小麦和黑麦草秸秆的碳氮比分别为86.8:1和60:1,远超出真菌最适碳氮比范围,不利于真菌分解有机物,因此添加蚕豆秸秆的土壤中微生物量碳氮高于小麦秸秆和黑麦草秸秆。但随着培养时间的延长,土壤中活性碳氮含量呈现先上升后下降的趋势,培养超过240天,土壤中的活性养分呈降低的趋势,这与Liu等^[25]研究结论一致。

土壤活性碳氮组分是微生物生长的速效基质,其含量的高低直接影响土壤微生物活性^[26]和土壤养分的供应水平。本试验结果显示,有机物料通过增加土壤中活性碳氮(水溶性有机碳、易氧化有机碳、铵态氮、硝态氮、碱解氮、微生物量碳氮)含量来增加土壤有机碳及全氮含量,其活性组分含量与总量之间呈显著正相关关系,同时土壤碳含量的提高通常会伴随土壤氮素储存的增加,二者之间具有良好的耦合效应。

4 结论

(1)添加外源有机物料增加土壤活性碳氮的含量提升了土壤总有机碳和全氮。土壤总有机碳、全氮含量随培养时间的延长呈递增趋势,易氧化有机碳、碱解氮、铵态氮和硝态氮呈先上升后下降的趋势,而水溶性有机碳、微生物量碳氮及碳氮循环酶活性呈逐渐下降的趋势。

(2)5种有机物料相比,小麦秸秆的腐殖化系数最高,对土壤有机碳的增加效果最优,但与蚕豆秸秆无显著差异,而添加蚕豆秸秆后土壤全氮含量显著高于其他处理,因此潮土添加蚕豆秸秆对碳氮含量的增加效果最优,且培养时间为240天效果最佳。

参考文献:

- [1] 路文涛,贾志宽,张鹏,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):522-528.
- [2] 马超,周静,刘满强,等.秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J].土壤学报,2013,50(5):915-921.
- [3] 郭树芳.节水灌溉对华北平原旱作农田CO₂和N₂O排放特征的影响[D].北京:中国科学院大学环境科学,2016.
- [4] 王丙文,迟淑筠,田慎重,等.不同玉米秸秆还田方式对冬小麦田土壤呼吸的影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1374-1380.
- [5] Strickland M S, Callahan M A, Gardiner E S, et al. Response of soil microbial community composition and function to a bottomland forest restoration intensity gradient[J].Applied Soil Ecology,2017,119:317-326.
- [6] 苏衍涛,王凯荣,刘迎新,等.稻草覆盖对红壤旱地土壤温度和水分调控效应[J].农业环境科学学报,2008,27(2):670-676.
- [7] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等.黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J].土壤学报,2010,47(5):979-986.
- [8] Watanabe T, Man L H, Vien D M, et al. Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta[J].Soil Science and Plant Nutrition,2009,55(6):754-763.
- [9] Xiao K C, Xu J M, Tang C X, et al. Differences in carbon and nitrogen mineralization in soils of differing initial pH induced by electrokinesis and receiving crop residue amendments [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013,67:70-84.
- [10] Xu J M, Tang C, Chen Z L. Chemical composition controls residue decomposition in soils differing in initial pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(3):544-552.
- [11] 李忠佩,林心雄.瘠薄红壤中有机物质的分解特征[J].生态学报,2002,22(8):1224-1230.
- [12] 李忠佩,刘明,江春玉.红壤典型区土壤中有机质的分解、积累与分布特征研究进展[J].土壤,2015,47(2):220-228.
- [13] 张红.植物秸秆腐解特性及微生物多样性的响应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [14] 张丹,付斌,胡万里,等.秸秆还田提高水稻—油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J].农业工程学报,2017,33(9):133-140.
- [15] 陈书涛,桑琳,张旭,等.增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响[J].环境科学,2016,37(2):703-709.
- [16] 田善义,王明伟,成艳红,等.化肥和有机肥长期施用对红壤酶活性的影响[J].生态学报,2017,37(15):4963-4972.
- [17] 栗方亮,王焯平,张青,等.室内恒温条件下稻田土壤中菌渣的分解过程及CO₂释放特征[J].中国生态农业学报,2017,25(2):267-275.
- [18] 李永涛,戴军,Thierry B,等.不同形态有机碳的有效性在两种重金属污染水平下水稻土壤中的差异[J].生态学报,2006,26(1):138-145.
- [19] 李明德,吴海勇,聂军,等.稻草及其循环利用后的有机废弃物还田效用研究[J].中国农业科学,2010,43(17):3572-3579.
- [20] Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Gil-Sotres F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality[J].Soil Biology and Biochemistry,2008,40(9):2146-2155.
- [21] Wurzbürger N, Brookshire E. Experimental evidence that mycorrhizal nitrogen strategies affect soil carbon [J].Ecology,2017,98(6):1491-1497.
- [22] Zhao L, Wu X D, Wang Z W, et al. Soil organic carbon and total nitrogen pools in permafrost zones of the Qinghai-Tibetan Plateau[J].Scientific Reports,2018,8(1):3656.
- [23] 赵涵.秸秆和菌渣施用对灰色冲积水稻土碳形态变化及青刀豆肥效的影响研究[D].成都:四川农业大学,2011.
- [24] 杨敏芳,朱利群,韩新忠,等.不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1387-1393.
- [25] Liu X J, Xu W, Pan Y P, et al. Liu et al. suspect that Zhu et al. (2015) may have underestimated dissolved organic nitrogen (N) but overestimated total particulate N in wet deposition in China[J].Science of The Total Environment,2015,520:300-301.
- [26] 周国朋.双季稻田稻草与豆科绿肥联合还田下土壤碳、氮转化特征[D].北京:中国农业科学院,2017.