

模拟酸雨及秸秆添加对农田土壤微生物呼吸及酶活性的影响

张旭, 陈书涛, 陈桂发, 蔡敏, 周丽, 崔娜欣, 邹国燕

引用本文:

张旭, 陈书涛, 陈桂发, 等. 模拟酸雨及秸秆添加对农田土壤微生物呼吸及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 823–832.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1230>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米银对四种不同性质土壤微生物量及酶活性的影响

舒昆慧, 张丽, 伍玲丽, 司友斌, 刘沁雪

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 907–914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1325>

土壤微生物对邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯胁迫的生态响应

夏庆兵, 王军, 朱鲁生, 王金花, 刘文军

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1344–1350 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.017>

不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响

王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 李勇, 于建光

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 125–133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0956>

生物修复对石油污染土壤微生物活性的影响

陈凯丽, 吴蔓莉, 叶茜琼, 李炜, 袁婧

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 279–285 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0991>

外源Cd胁迫对红壤性水稻土微生物量碳氮及酶活性的影响

郭碧林, 陈效民, 景峰, 张晓玲, 杨之江, 刘巍, 刘文心

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1850–1855 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0344>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张旭, 陈书涛, 陈桂发, 等. 模拟酸雨及秸秆添加对农田土壤微生物呼吸及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 823–832.

ZHANG Xu, CHEN Shu-tao, CHEN Gui-fa, et al. Effects of simulated acid rain and straw amendment on microbial respiration and enzyme activities of farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 823–832.



开放科学 OSID

模拟酸雨及秸秆添加对农田土壤微生物呼吸及酶活性的影响

张旭^{1,2,3}, 陈书涛³, 陈桂发^{1,2}, 蔡敏^{1,2}, 周丽^{1,2}, 崔娜欣^{1,2}, 邹国燕^{1,2*}

(1. 上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403; 2. 上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201415; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要:为研究模拟酸雨及秸秆添加对农田土壤微生物呼吸及酶活性的影响,通过室内培养试验,设置4个模拟酸雨强度,分别为去离子水(pH 6.7)、pH 4.0、pH 3.0和pH 2.0,每个模拟酸雨pH下设置0、0.6、1.2、1.8 g共4个秸秆添加量,观测不同处理下土壤微生物呼吸的动态变化,并在培养试验结束后测定不同处理下的土壤转化酶和过氧化氢酶活性以及pH值。结果表明:不同模拟酸雨pH和秸秆添加量与土壤微生物呼吸之间的关系均可用一元线性方程描述,其 P 值均达到显著水平($P<0.05$)。双因素方差分析结果表明,不同模拟酸雨pH和秸秆添加量处理下的土壤微生物呼吸均存在极显著差异($P<0.001$),但两者对土壤微生物呼吸无显著交互影响。土壤转化酶和过氧化氢酶活性与秸秆添加量均呈显著($P<0.05$)正相关关系。土壤微生物呼吸与过氧化氢酶活性存在极显著($P<0.001$)线性正相关关系,与转化酶活性存在显著($P<0.05$)线性正相关关系。基于转化酶和过氧化氢酶活性的双因子模型比单纯线性模型提高了对土壤微生物呼吸变异的解释量($R^2=0.955, P<0.001$)。研究表明,短期模拟酸雨降低了土壤微生物呼吸和过氧化氢酶活性,这可能意味着短期酸雨会抑制土壤物质循环过程,对农田生态系统造成负面影响。

关键词:农田; 土壤微生物呼吸; 模拟酸雨; 秸秆; 酶活性; 黄棕壤

中图分类号: S154; X517 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)04-0823-10 doi:10.11654/jaes.2020-1230

Effects of simulated acid rain and straw amendment on microbial respiration and enzyme activities of farmland soil

ZHANG Xu^{1,2,3}, CHEN Shu-tao³, CHEN Gui-fa^{1,2}, CAI Min^{1,2}, ZHOU Li^{1,2}, CUI Na-xin^{1,2}, ZOU Guo-yan^{1,2*}

(1. Institute of Eco-Environmental Protection Research, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Low-Carbon Agriculture, Shanghai 201415, China; 3. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to investigate the effects of simulated acid rain (SAR) and straw amendment on soil microbial respiration (SMR) and the enzyme activities of farmland, an indoor incubation experiment was performed. Four SAR treatments were set up with different pH values of 6.7, 4.0, 3.0, and 2.0. Furthermore, there were four straw amendment treatments for each SAR treatment. The dynamic changes of SMR were measured. The invertase activities, catalase activities, and pH of the soil for different treatments were also measured after the incubation experiment. The results showed that the pH values under the different SAR and straw amendment treatments were significantly ($P<0.05$) and linearly correlated with SMR. Two-way ANOVA showed that SAR and straw amendment significantly ($P<0.001$) influenced

收稿日期: 2020-10-26 录用日期: 2020-12-24

作者简介: 张旭(1990—),男,江苏淮安人,硕士,助理研究员,主要从事水环境治理以及生态修复等相关研究。E-mail: zhangxu@saas.sh.cn

*通信作者: 邹国燕 E-mail: zouguoyan@263.net

基金项目: 上海市农委科技兴农项目(2019-02-08-00-12-F01136); 国家自然科学基金项目(41375006)

Project supported: Shanghai Municipal Agricultural Commission Project (2019-02-08-00-12-F01136); The National Natural Science Foundation of China(41375006)

SMR, whereas these two factors had no significant combined impacts on SMR ($P>0.05$). The invertase and catalase activities were positively correlated with the amounts of the amended straw. A simple linear regression model could explain the relationship between SMR and catalase activity ($P<0.001$) and that between SMR and invertase activity ($P=0.028$). A binary linear regression model ($P<0.001$, $R^2=0.955$) based on invertase and catalase activities was better able to explain the variations in SMR than the simple linear regression model. It can be concluded that short-term SAR reduced SMR and catalase activity, suggesting that short-term acid rain may inhibit the processes of soil matter cycling and has negative impacts on agroecosystems.

Keywords: farmland; soil microbial respiration; simulated acid rain; straw; enzyme activity; yellow brown soil

酸雨已成为全球性环境问题之一^[1],其对陆地生态系统地下生态过程具有一系列潜在影响^[2]。研究表明,酸雨可导致植物受损和土壤酸化,还会对农田生态系统碳循环产生影响^[3]。我国是农业大国,农业生产会产生大量的秸秆。我国每年产生约10.4亿t秸秆,占世界的1/7,其中有近1/5的秸秆被露天焚烧^[4]。秸秆焚烧产生大量的酸性气体(氮氧化物等),从而会加剧全球酸雨污染^[5]。目前,秸秆还田是常见的农业管理措施,秸秆含有丰富的碳、氮、磷以及微量营养元素^[6],可作为能量和养分的载体;秸秆还田可以改变土壤生物化学过程^[7-8]。

土壤呼吸是陆地生态系统中重要的碳循环过程^[9],其量值仅次于全球陆地总初级生产力(GPP)的估算值^[10]。土壤呼吸主要分为自养呼吸(根系呼吸)与异养呼吸(微生物呼吸),其中土壤微生物呼吸指土壤有机碳和凋落物分解产生的 CO_2 排放通量^[11],占土壤呼吸总量的52.1%^[12],是土壤中微生物生命活动的重要标志,并能够在一定程度上反映土壤有效养分、土壤通透性的优劣以及微生物活性和群落结构^[13]。土壤酶是一种催化剂,是土壤生态系统中的重要组成部分,是评价土壤肥力、土壤微生物活性的重要指标^[14]。土壤转化酶(Invertase)是一种水解酶,它能够将土壤中的大分子糖分解成葡萄糖和果糖,从而为土壤微生物提供养分;土壤过氧化氢酶(Catalase)是一种与土壤相关的还原酶,它通过催化过氧化氢分解从而将有毒物质快速转化为其他无害或毒性较小的物质^[15]。研究土壤微生物呼吸、土壤转化酶和过氧化氢酶活性对于深入认识土壤碳氮循环具有重要意义。

国内外关于酸雨和秸秆还田对土壤碳氮循环过程的影响和对土壤微生物的影响已有大量研究:秸秆施用会提高土壤转化酶、过氧化氢酶活性以及土壤微生物呼吸速率^[16-17];酸雨 H^+ 浓度越高,其对酶活性的抑制作用越强^[18];酸雨会对农田土壤微生物呼吸产生影响,但其影响趋势并不确定(减少、增加或无影响)^[19-20]。这些研究主要集中在单因素对土壤微生物

呼吸及酶活性的影响,然而酸雨强度和秸秆还田量的交互作用对土壤微生物和酶活性影响如何?目前仍少见报道。本研究通过室内培养试验,设置不同强度的模拟酸雨pH和秸秆添加量,研究模拟酸雨和秸秆添加对土壤酶活性和微生物呼吸的影响规律及其内在机制,以期合理评估未来酸雨日益严重情况下农田土壤碳循环的变异过程和进行合理的秸秆还田提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自南京信息工程大学农业气象试验站(32.16°N, 118.86°E),该站长期实行冬小麦(淮麦19号)-大豆(八月白)轮作,土壤类型为黄棕壤(灰马肝土属),基本理化性状为:0~20 cm土壤pH为6.3,土壤有机碳和全氮含量分别为19.4 g·kg⁻¹和1.15 g·kg⁻¹,田间持水量为25.6%。该站年均温度为15.6℃,年降水量为1 100 mm,年降水pH为4.92,年酸雨发生频率38%,酸雨类型为“硫-硝酸混合型”^[21]。于2014年9月,用小铲子除去表土,取离地面0~20 cm处的土壤盛入清洁的牛皮纸袋中,随后置于阴凉处自然风干,用研钵磨碎后过2 mm筛,放入自封袋中密封保存备用。秸秆为该站种植的冬小麦——淮麦19号,于2014年6月冬小麦收获后将秸秆晾干,粉碎成0.5~1.0 cm并混合均匀,放入自封袋中密封保存备用。

1.2 培养试验

模拟酸雨强度的选择参照以往的研究^[22-24],即模拟酸雨强度一般设置在pH 4.0~2.0之间。设置4个模拟酸雨强度,用 $n(\text{H}_2\text{SO}_4)$ 和 $n(\text{HNO}_3)$ 按4.5:1配制pH 1.0的酸雨母液^[25],再将适量去离子水和酸雨母液混合配制成pH为pH=6.7(去离子水CK)、pH=4.0(A1)、pH=3.0(A2)、pH=2.0(A3)的模拟酸雨供试液。每个模拟酸雨pH下设置4个秸秆添加量(0、0.6、1.2、1.8 g),共16个处理,即去离子水+秸秆(CK-0、CK-0.6、CK-1.2、CK-1.8)、pH 4.0+秸秆(A1-0、A1-0.6、A1-

1.2、A1-1.8)、pH 3.0+秸秆(A2-0、A2-0.6、A2-1.2、A2-1.8)、pH 2.0+秸秆(A3-0、A3-0.6、A3-1.2、A3-1.8)。每个处理设置3个重复。

分别向489 mL广口培养瓶中放入60 g干土,加去离子水10.6 mL,调节土壤的含水量为15%。在培养试验开始前,预先对土壤进行7 d预培养,为抵消水分蒸发的影响,于每日下午16:00采用称取质量的方法滴加去离子水调节土壤含水量。随后,将秸秆按添加量均匀覆盖于土壤表面并进行一次模拟降雨,降雨量为10 mL,于20℃的培养箱进行密封培养。培养期间于每日下午16:00采用称取质量的方法分别用对应的模拟酸雨调节土壤含水量,以保持含水量不变。滴加时,使用移液管缓慢滴加,避免因滴加水对土壤微生物呼吸产生短期内的激发效应。

1.3 土壤微生物呼吸速率的测定

秸秆中大部分物质经过30 d的培养会完全分解^[26],因此该试验培养天数设置为31 d。于试验开始的第1、2、3、5、7、10、14、20、27、31 d的上午9:00使用SoilBox-FMS(土壤CO₂排放量测量系统,Miller公司,美国)测定土壤CO₂排放速率,共测定10次。

1.4 土壤pH、转化酶及过氧化氢酶的测定

培养试验结束后,采用pH计(Starter 2100, Sartorius公司,德国)测定土壤pH(水土比为2.5:1);采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤转化酶活性^[27];采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性^[28]。

1.5 数据分析

使用加权累积法估算各处理累积土壤微生物呼吸量(31 d土壤微生物呼吸总量)。原始数据使用Excel 2019进行初步整理和绘制图表,使用SPSS 25软件进行统计分析和方差分析。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨及秸秆添加对土壤pH的影响

在相同秸秆添加量、不同模拟酸雨pH作用下,培养试验结束后的土壤pH随模拟酸雨pH的降低而降低;在相同模拟酸雨pH、不同秸秆添加量作用下,各处理对外源酸的缓冲能力存在差异(图1)。

供试土壤初始pH为6.3,CK-0处理在去离子水作用下土壤pH略微上升。与CK-0相比,A1-0、A2-0和A3-0处理土壤pH分别下降0.27、0.33、0.34个单位,CK-0.6、CK-1.2、CK-1.8土壤pH分别下降0.23、0.35、0.21个单位;在模拟酸雨和秸秆添加复合作用下,土壤pH介于5.69~5.92之间。以上结果表明,模

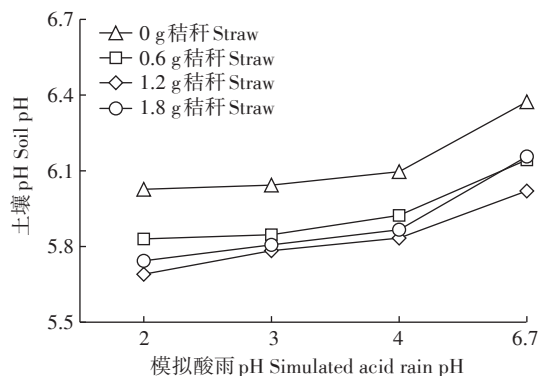


图1 不同处理土壤pH

Figure 1 Soil pH under different treatments

拟酸雨和秸秆添加均会降低土壤pH,并且两种因素复合处理比单一处理的土壤pH降幅更大。

2.2 土壤微生物呼吸的时间变异性

在不同秸秆添加量和模拟酸雨pH条件下,各处理累积土壤微生物呼吸量均随着培养时间的延长而逐渐升高,但增加速率逐渐降低,表明试验前期土壤微生物呼吸速率高于后期(图2)。在相同秸秆添加量下,累积土壤微生物呼吸量随着模拟酸雨pH的减小而减小,不同观测日期的累计土壤微生物呼吸量差异达到极显著水平($P<0.001$)。在相同模拟酸雨pH下,不同秸秆添加量处理的累积土壤微生物呼吸量存在极显著差异($P<0.001$),CK-1.8处理的累积土壤微生物呼吸量最大,A3-0处理的累积土壤微生物呼吸量最小。

2.3 土壤微生物呼吸与模拟酸雨pH及秸秆添加量的关系

模拟酸雨pH与31 d的累积土壤微生物呼吸的关系可用一元线性方程描述(图3),其 P 值均达到显著水平($P<0.05$)。0、0.6、1.2、1.8 g秸秆添加量下累积土壤微生物呼吸量分别为0.063~0.204、0.092~0.232、0.108~0.206、0.127~0.301 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。1.8 g秸秆添加量下的模拟酸雨pH与土壤微生物呼吸的线性回归方程斜率最大,表明在1.8 g秸秆添加量条件下土壤微生物呼吸对模拟酸雨pH变异的响应程度最大。

秸秆添加量与31 d的累积土壤微生物呼吸的关系也可用一元线性方程描述(图4),其 P 值均达到显著水平($P<0.05$)。CK、A1、A2和A3条件下累积土壤微生物呼吸量分别为0.204~0.301、0.113~0.186、0.074~0.151、0.063~0.127 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。CK-1.8处理的土壤微生物呼吸量最高,CK-0处理的土壤微生物呼吸量高于A1-1.8、A2-1.8和A3-1.8这3个处理,表明在

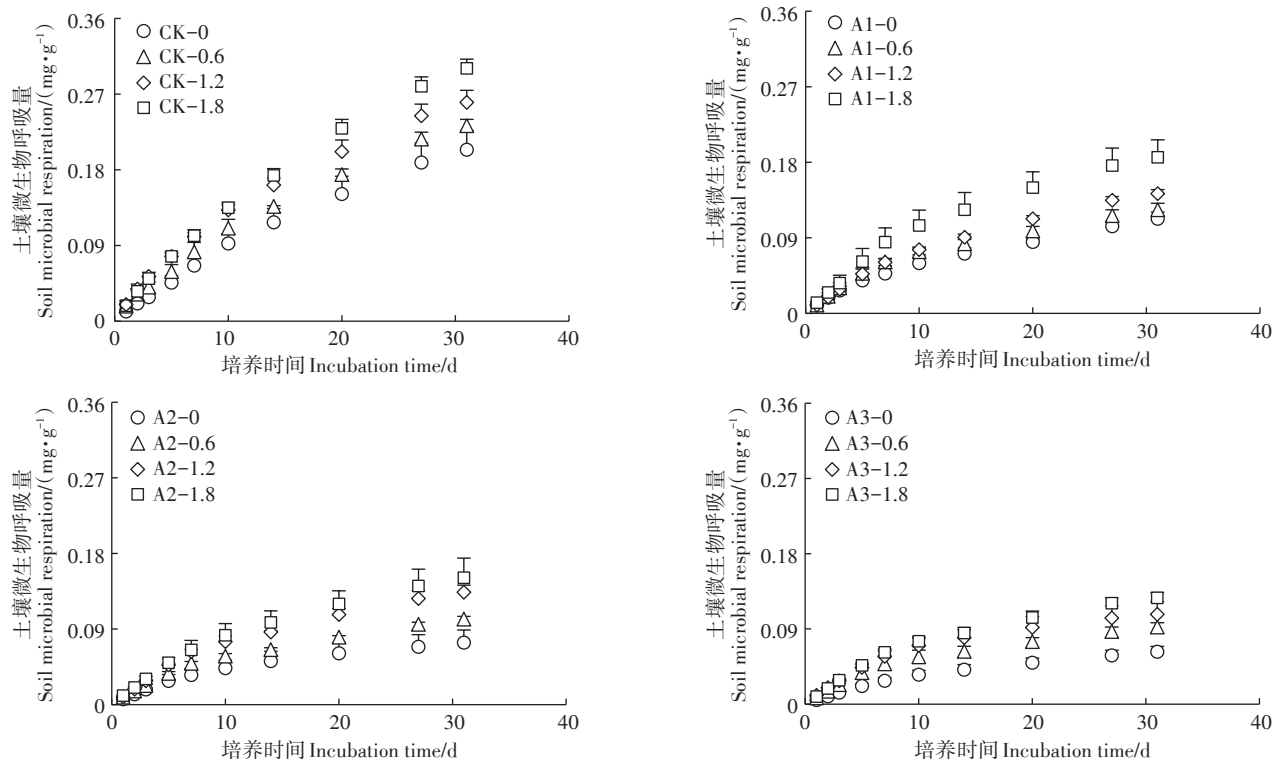


图2 土壤微生物呼吸的时间变异性

Figure 2 Temporal variability in the soil microbial respiration

模拟酸雨和秸秆添加复合影响下,模拟酸雨对土壤微生物呼吸的抑制作用大于秸秆添加对土壤微生物呼吸的促进作用,即模拟酸雨和秸秆添加交互作用表现为抑制土壤微生物呼吸。

由于模拟酸雨 pH 和秸秆添加量对土壤微生物呼吸均有显著影响,故以模拟酸雨 pH (x_1) 及秸秆添加量 (x_2) 作为两个变量分析其对土壤微生物呼吸 (y) 的复合影响,结果表明, y 与 x_1 和 x_2 的关系可用如下方程描述:

$$y = 0.033x_1 + 0.043x_2 - 0.018 (R^2=0.985, P<0.001)$$

相比基于模拟酸雨 pH 和秸秆添加量的单因素拟合方程,该方程对土壤微生物呼吸同样具有较高的解释性(98.5%)。

双因素方差分析结果表明(表1),不同模拟酸雨 pH ($F=26.544, P<0.001$) 和秸秆添加量 ($F=111.069, P<0.001$) 处理下土壤微生物呼吸均具有极显著差异,但两者的交互作用对土壤微生物呼吸无显著影响 ($F=0.457, P=0.892$)。

2.4 土壤转化酶和过氧化氢酶活性

由表2可见, A1-0、A2-0、A3-0 这3个处理转化酶活性分别比 CK-0 显著 ($P<0.05$) 提高了 23.09%、124.09%、100.33%, A2 强度的酸雨对转化酶活性的促

进作用最强。秸秆添加量与转化酶活性呈显著正相关 ($P<0.05$), CK-0.6、CK-1.2、CK-1.8 这3个处理转化酶活性分别比 CK-0 提高了 75.08%、228.41%、366.78%。总体来看,模拟酸雨、秸秆添加、模拟酸雨及秸秆添加处理较对照提高了土壤转化酶活性,对转化酶活性均表现出促进作用。

与 CK-0 处理过氧化氢酶活性相比, A2-0、A3-0 两个处理分别显著 ($P<0.05$) 降低了 3.1%、4.4%, 而 A1-0 处理无显著影响; CK-0.6、CK-1.2、CK-1.8 这3个处理分别提高了 2.12%、5.78%、10.38%, 秸秆添加量与过氧化氢酶活性呈显著正相关 ($P<0.05$)。总体来看,短期高强度模拟酸雨(A1、A2)显著抑制土壤过氧化氢酶活性,低强度模拟酸雨(A3)无显著影响;秸秆添加、模拟酸雨及秸秆添加较对照提高了过氧化氢酶活性,对过氧化氢酶活性均表现出促进作用。

2.5 土壤微生物呼吸与土壤酶活性的关系

相同模拟酸雨 pH 条件下,各处理 31 d 的累积土壤微生物呼吸与转化酶活性之间的关系均可用一元线性方程描述,但土壤微生物呼吸对转化酶活性增加的响应程度存在差异(图5)。CK 和 A2 条件下转化酶活性与土壤微生物呼吸存在显著相关关系 ($P<0.05$)。对于所有模拟酸雨处理,土壤微生物呼吸与转化酶活

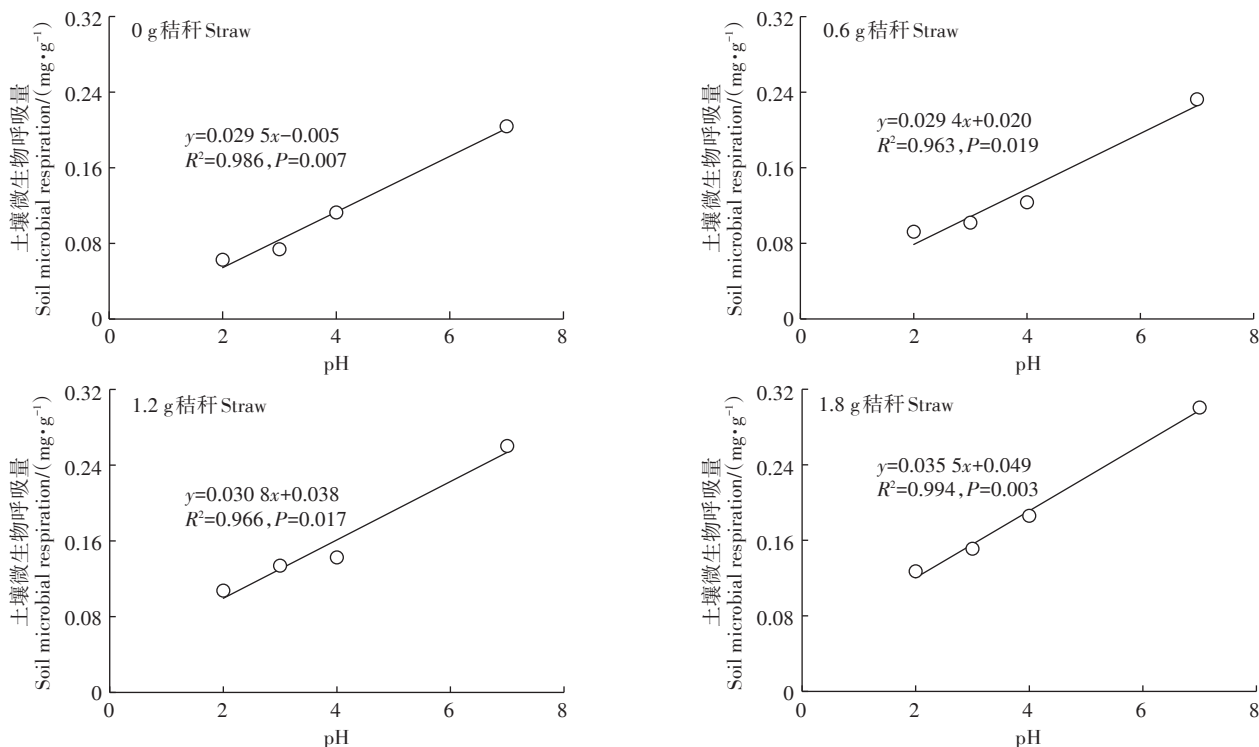


图3 土壤微生物呼吸与模拟酸雨pH的关系

Figure 3 Relationship between SMR and pH of SAR

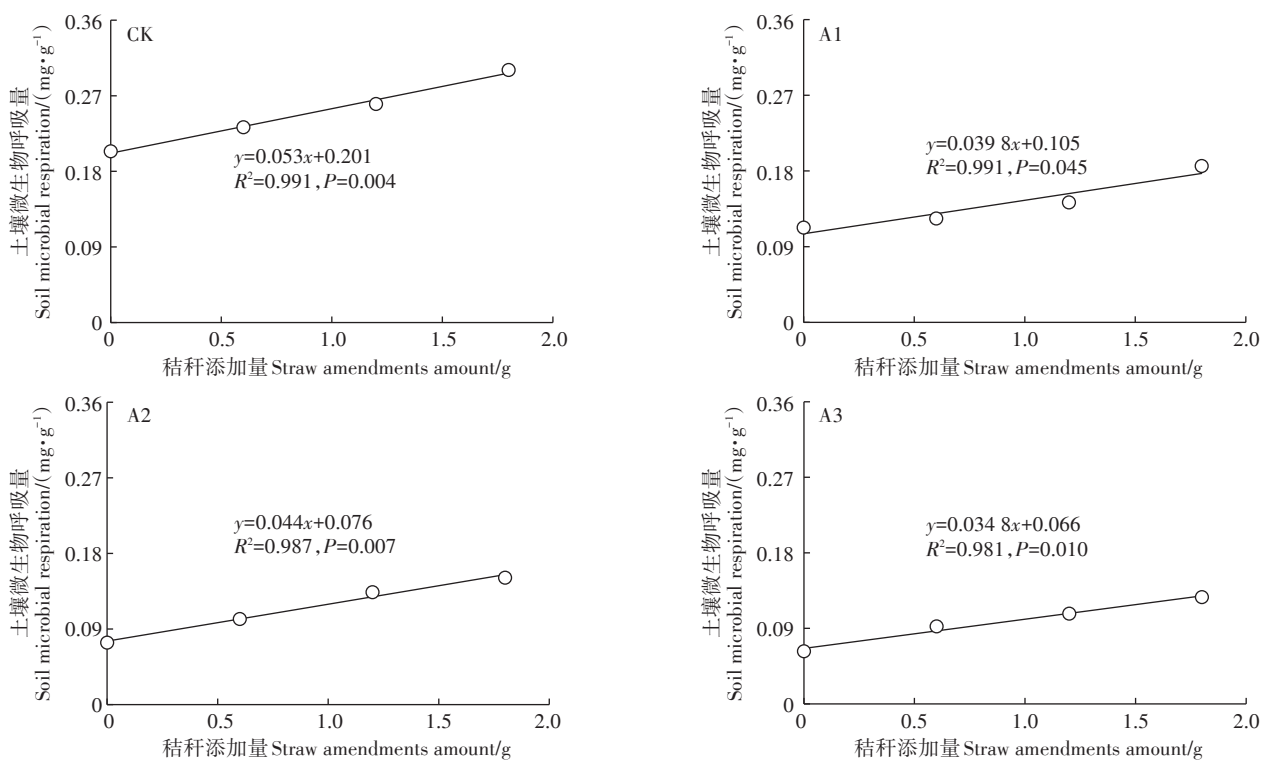


图4 土壤微生物呼吸与秸秆添加量的关系

Figure 4 Relationship between SMR and straw amendments amount

性之间的关系也可用一元线性方程描述,其 P 值达到显著水平($P < 0.05$)(图6)。

相同模拟酸雨pH条件下,31 d的累积土壤微生物呼吸与过氧化氢酶活性均可用一元线性方程描述

表1 模拟酸雨pH、秸秆添加量对土壤微生物呼吸影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA for analyzing the effects of the pH of SAR and amended straw on SMR

误差源 Source	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F值 F-ratio	P
模拟酸雨 pH	0.040	0.013	26.544	<0.001
秸秆添加量	0.167	0.056	111.069	<0.001
模拟酸雨 pH×秸秆添加量	0.002	<0.001	0.457	0.892
误差	0.016	0.001		

表2 不同处理的土壤酶活性(mL·g⁻¹)

Table 2 Soil enzyme activities under different treatments(mL·g⁻¹)

土壤酶 Soil enzyme	模拟酸雨 Simulated acid rain	秸秆添加量 Straw amendments			
		0 g	0.6 g	1.2 g	1.8 g
转化酶活性	A3	12.06±0.63ABc	11.36±1.12Bc	24.83±0.65Ab	39.41±1.71Aa
	A2	13.49±3.20Ab	16.81±1.71Ab	24.41±0.80Aa	27.16±1.21Ba
	A1	7.41±1.42Bb	10.46±0.90Bb	23.54±1.21Aa	25.32±1.43Ba
	CK	6.02±0.90Cd	10.54±1.74Bc	19.77±0.44Bb	28.10±0.86Ba
过氧化氢酶活性	A3	8.11±0.31Bd	8.35±0.32Bc	8.67±0.34Bb	9.19±0.85Ba
	A2	8.22±0.48Bd	8.61±0.38Ac	8.76±0.40Bb	9.26±0.43ABa
	A1	8.48±0.23Ac	8.66±0.64Ac	9.02±0.84Ab	9.43±0.37Aa
	CK	8.48±0.30Ad	8.66±0.35Ac	8.97±0.64Ab	9.36±0.45ABa

注:不同小写字母表示不同秸秆添加量条件下同一模拟酸雨pH间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同秸秆添加量条件下不同模拟酸雨pH间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences of the same pH of SAR under different straw amendments ($P<0.05$), different capital letters indicate significant differences of the different pH of SAR in the same straw amendments ($P<0.05$).

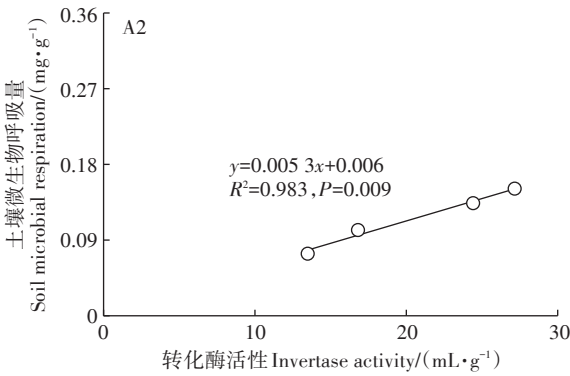
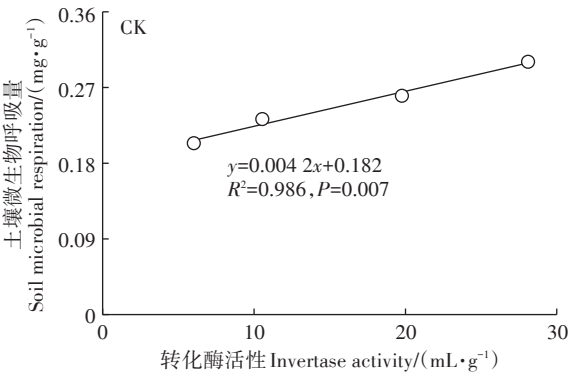


图5 土壤微生物呼吸与土壤转化酶活性的关系

Figure 5 Relationship between SMR and soil invertase activity

(图7),其 P 值均达到显著水平($P<0.05$)。对于所有模拟酸雨处理,土壤微生物呼吸与过氧化氢酶活性之间的关系也可用一元线性方程描述,其 P 值达到极显著水平($P<0.001$)(图8)。

总体来看,土壤转化酶和过氧化氢酶活性是反映土壤微生物呼吸量大小的良好指标。

由于土壤转化酶、过氧化氢酶对土壤微生物呼吸

均有显著影响,故而以转化酶活性(x_1)、过氧化氢酶活性(x_2)作为两个变量分析其对土壤微生物呼吸(y)的复合影响,结果表明, y 与 x_1 和 x_2 的关系可用如下方程描述:

$$y=-0.001x_1+0.98x_2-0.712(R^2=0.955,P<0.001)$$

相比基于土壤转化酶或过氧化氢酶活性的单因素拟合方程,该方程对土壤微生物呼吸具有更高的解

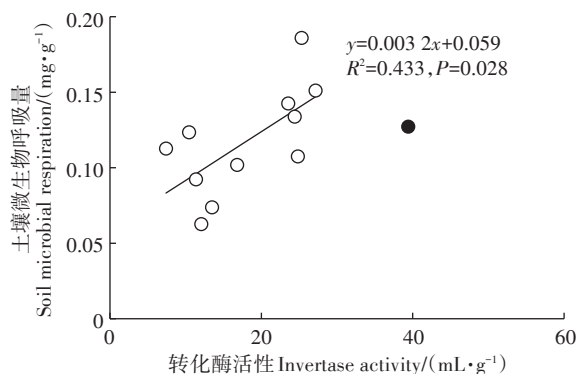
释量(95.5%)。

3 讨论

3.1 模拟酸雨、秸秆添加对土壤微生物呼吸的影响

土壤微生物是土壤生态系统的核心,其种类、数量和活性会影响土壤微生物呼吸量,也与土壤中可利用的碳氮等营养元素含量有关^[17]。以往研究表明,酸

雨对土壤微生物的影响主要以负面为主^[2,29-30]。一方面,酸雨会加速土壤酸化,导致土壤环境恶化,降低土壤微生物量;另一方面,酸雨会改变土壤微生物群落结构,使土壤微生物活性降低,从而抑制土壤微生物呼吸^[29]。刘义凡^[30]研究发现,土壤微生物呼吸会随着酸雨 H^+ 浓度的增大而降低。秸秆还田不仅可以增加土壤有机质含量,提高土壤生物学肥力^[31],还可以显著增加土壤微生物的数量^[32]。张庆忠等^[33]研究发现,



实心黑点为离群点,在回归方程中未包括该点

Solid black point in the figure is outliers, which is not included in the regression equation

图6 模拟酸雨处理土壤微生物呼吸与转化酶活性的关系

Figure 6 Relationship between SMR and soil invertase activity in SAR treatments

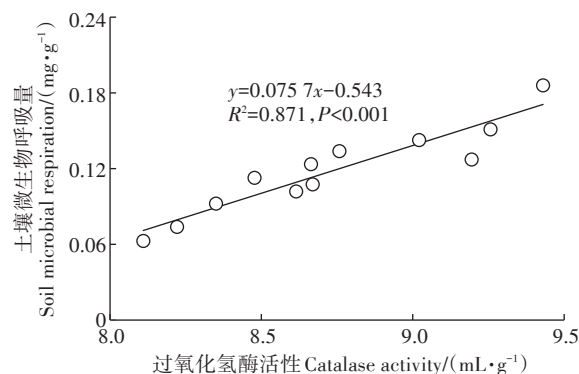


图8 模拟酸雨处理土壤微生物呼吸与过氧化氢酶活性的关系

Figure 8 Relationship between SMR and soil catalase activity in SAR treatments

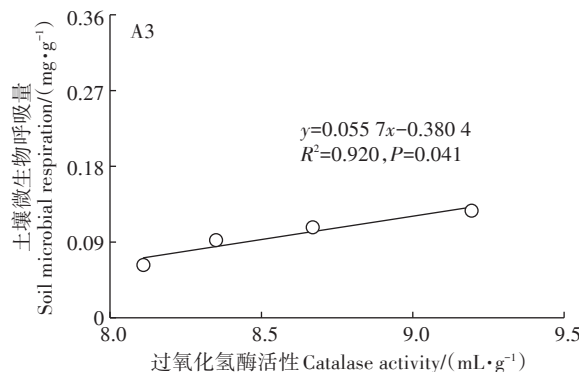
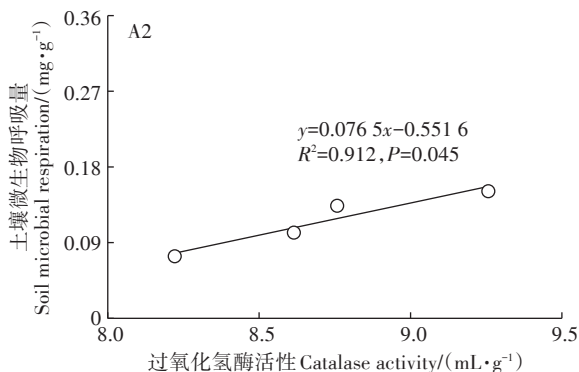
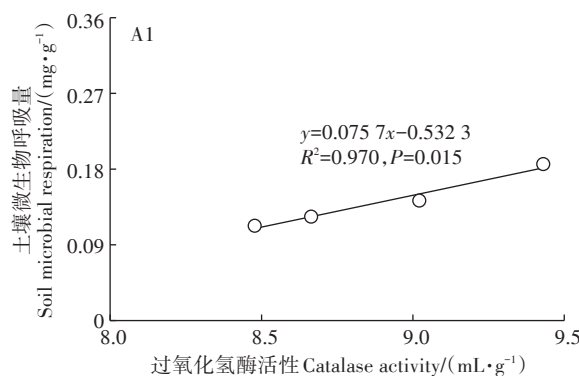
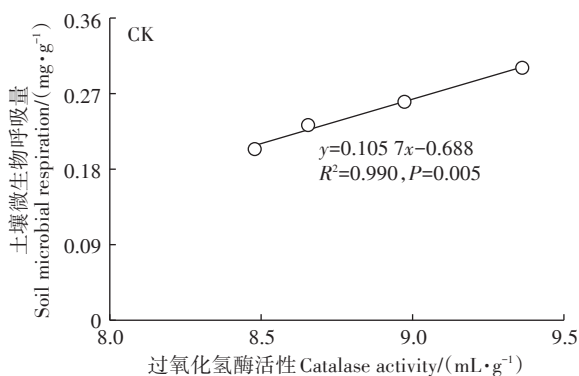


图7 土壤微生物呼吸与过氧化氢酶活性的关系

Figure 7 Relationship between SMR and soil catalase activity

秸秆还田可促进土壤呼吸速率。总之,模拟酸雨和秸秆添加会通过影响土壤微生物过程来影响土壤微生物的呼吸作用。

在本研究中,模拟酸雨显著抑制了土壤微生物呼吸,而秸秆添加显著促进了土壤微生物呼吸。总体来看,模拟酸雨 pH 和秸秆添加双因子处理对土壤微生物呼吸的影响表现为各自效应的复合,但这两个因子复合后并未对土壤微生物呼吸产生显著影响。这可能是由于秸秆添加的促进作用和模拟酸雨的抑制作用相互抵消所致。故在今后的研究中,我们有必要深入研究两因子复合对土壤微生物呼吸的影响机制。

3.2 模拟酸雨、秸秆添加对酶活性的影响

土壤酶活性通常被认为是土壤微生物活性和功能的指标^[34]。酸雨会影响土壤微生物数量以及土壤对各种胁迫的敏感性^[35]。此外,模拟酸雨会降低土壤 pH,土壤 pH 会改变酶与土壤中腐殖质或黏土间的吸附行为,影响酶的解离状态,从而改变土壤中酶的活性^[36]。何伟静等^[37]研究发现,土壤转化酶和过氧化氢酶活性随着酸雨 H⁺浓度的增大而降低,表现出抑制作用。而韩玮等^[38]研究发现,模拟酸雨对土壤转化酶和过氧化氢酶活性表现为先激活后抑制效应。而王俊龙等^[39]研究发现,酸雨在短时间内对土壤转化酶和过氧化氢酶表现为抑制作用,之后逐渐转化为促进作用。在本研究中,土壤 pH 随模拟酸雨 pH 的降低而降低,与 Kang 等^[36]的研究结果一致;模拟酸雨对土壤转化酶活性表现为促进作用,高强度模拟酸雨对过氧化氢酶活性表现为抑制作用。酸雨对土壤酶的影响比较复杂,出现研究结果不一致的原因可能是酸雨对土壤酶活性的影响与土壤类型、酸雨 H⁺浓度以及成分有关,短期的模拟酸雨处理并不一定会实质性地改变土壤 pH,而是改变了土壤碳、氮等营养元素的有效性,这可能对土壤酶产生激活、抑制或无影响^[40]。

秸秆添加可以提高土壤转化酶和过氧化氢酶活性^[17,41-42]。如:陈书涛等^[41]研究发现,小麦秸秆施用显著提高了土壤转化酶和过氧化氢酶活性,徐国伟等^[42]也得到了类似的结论。胡乃娟等^[43]研究发现,25% 小麦秸秆还田量可以显著提高土壤转化酶和过氧化氢酶活性。而韩新忠等^[44]的研究结果表明,25% 和 50% 小麦秸秆还田量显著提高了土壤转化酶和过氧化氢酶活性,75% 秸秆还田量显著提高了土壤过氧化氢酶活性。与以往的研究类似,本研究结果也表明,土壤转化酶和过氧化氢酶活性与秸秆添加量呈显著正相关,其活性随着秸秆添加量的增大而增大。一方面,施入

土壤中的秸秆腐解后,会增加土壤养分含量,为土壤中的微生物提供充分的养分^[31];另一方面,秸秆还田能够增加土壤中微生物的代谢速度,加快营养元素和有机质的循环转化,从而提高土壤养分的生物有效性^[8],这一系列反应直接或间接地提高了土壤酶活性。

3.3 土壤酶活性与土壤微生物呼吸的关系

土壤中各类酶活性的大小可以决定生物化学反应速率^[45],生物化学反应速率又影响着土壤微生物呼吸的强弱。土壤酶活性和土壤微生物呼吸显著的线性回归关系很好地体现了土壤中各生物学过程的内在联系(图6和图8)。以往的研究也验证了土壤酶活性和土壤微生物呼吸的相关性^[34,46-47]。例如,Li 等^[34]研究发现,土壤酶活性对不同酸雨类型或强度的响应与土壤微生物数量对酸雨的响应相似。Cox 等^[46]研究发现,土壤酶活性的增强可以促进土壤微生物呼吸作用;万忠梅等^[47]研究发现,湿地的土壤微生物呼吸与土壤转化酶、过氧化氢酶活性存在显著正相关关系。本研究结果与万忠梅等^[47]的研究结果一致,即土壤微生物呼吸与转化酶、过氧化氢酶活性的变化具有一致性,他们之间存在显著正相关关系。土壤微生物呼吸为酶促反应,不同类型土壤的酶活性与土壤微生物呼吸的相关性存在差异^[48]。关于不同环境、不同条件下土壤酶活性与土壤微生物呼吸的关系有待进一步研究。

4 结论

(1)土壤微生物呼吸与模拟酸雨 pH 和秸秆添加量之间的关系均可用线性方程描述,秸秆添加显著促进了土壤微生物呼吸,模拟酸雨 pH 显著抑制了土壤微生物呼吸,而两者的交互作用对土壤微生物呼吸无显著影响。

(2)在无秸秆添加条件下,与去离子水处理相比,pH4.0、pH3.0、pH2.0 模拟酸雨处理使得转化酶活性分别显著提高了 23.09%、124.09%、100.33%;pH 3.0、pH 2.0 处理使得过氧化氢酶活性显著降低了 3.1%、4.4%,pH 4.0 处理无影响。在去离子水条件下,与未添加秸秆相比,0.6、1.2、1.8 g 秸秆添加量使得转化酶活性分别显著提高了 75.08%、228.41%、366.78%,使得过氧化氢酶活性分别显著提高了 2.12%、5.78%、10.38%。

(3)对于所有模拟酸雨处理,土壤微生物呼吸与过氧化氢酶活性之间存在极显著的线性回归关系,与转化酶活性之间存在显著的线性回归关系,过氧化氢

酶和转化酶活性双因素拟合方程对土壤微生物呼吸具有更高的解释量。

(4)土壤微生物呼吸与土壤酶活性有关,转化酶和过氧化氢酶活性可在一定程度上解释不同处理下土壤微生物呼吸的变异。

参考文献:

- [1] Chen S T, Shen X S, Hu Z H, et al. Effects of simulated acid rain on soil CO₂ emission in a secondary forest in subtropical China[J]. *Geoderma*, 2012, 189/190:65–71.
- [2] Li Y F, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Effects of simulated acid rain on soil respiration and its component in a mixed coniferous–broadleaved forest of the three gorges reservoir area in southwest China[J]. *Forest Ecosystems*, 2019, 6:1–16.
- [3] Vet R, Artz R S, Carou S. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 93:3–100.
- [4] Wang S C, Zhao Y W, Wang J Z, et al. The efficiency of long-term straw return to sequester organic carbon in northeast China's cropland [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(2):436–448.
- [5] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算 [J]. 资源科学, 2006, 28(1):9–13. CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, ZHENG Fang-cheng, et al. Estimating the quantity of crop residues burnt in open field in China[J]. *Resources Science*, 2006, 28(1):9–13.
- [6] Turmel M S, Speratti A, Baudron F, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 134:6–16.
- [7] 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.
- [8] Fang Y Y, Singh B, Singh B P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80:136–145.
- [9] Mitchell P J, Simpson A J, Soong R, et al. Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81:244–254.
- [10] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, et al. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1):29–70.
- [11] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3):425–448.
- [12] Wang Q K, Yu Y Z, He T X, et al. Aboveground and belowground litter have equal contributions to soil CO₂ emission: An evidence from a 4-year measurement in a subtropical forest[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421:7–17.
- [13] 高寒, 王宏燕, 李传宝, 等. 玉米秸秆不同腐解处理还田对黑土碳氮比的影响研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(6):1392–1397. GAO Han, WANG Hong-yan, LI Chuan-bao, et al. Effects of different maize straw returning modes on C/N ratios in mollisol[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6):1392–1397.
- [14] Burns R G, Deforest J L, Marxsen J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58:216–234.
- [15] 叶江华, 王海斌, 李远华, 等. 不同树龄茶树根际土壤酶活性的变化分析[J]. 中国土壤与肥料, 2016(5):25–29. YE Jiang-hua, WANG Hai-bin, LI Yuan-hua, et al. Analysis on changes of soil enzyme activity in rhizosphere soil of tea tree with different planting years[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(5):25–29.
- [16] Hamido S A, Kpombrekou-A K. Cover crop and tillage effects on soil enzyme activities following tomato[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(2):269–274.
- [17] Zhang P, Chen X L, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160:65–72.
- [18] Kim H, Kang H. The impacts of excessive nitrogen additions on enzyme activities and nutrient leaching in two contrasting forest soils[J]. *The Journal of Microbiology*, 2011, 49(3):369–375.
- [19] Will M E, Graetz D A, Roof B S. Effect of simulated acid precipitation on soil microbial activity in a typic quartzipsamment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 15(4):399–403.
- [20] Liang G, Liu X, Chen X, et al. Response of soil respiration to acid rain in forests of different maturity in southern China[J]. *PLoS One*, 2013, 8(4):e62207.
- [21] 吴洪颜, 严文莲, 蒋义芳. 2017年南京酸雨特征及连续发生的成因分析[J]. 气象科学, 2020, 40(2):278–284. WU Hong-yan, YAN Wen-lian, JIANG Yi-fang. A study on characteristics of successive acid rain in Nanjing in 2017 and its causes[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40(2):278–284.
- [22] Wang W X, Wang T. On acid rain formation in China[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(23):4091–4093.
- [23] Liang G H, Hui D F, Wu X Y, et al. Effects of simulated acid rain on soil respiration and its components in a subtropical mixed conifer and broadleaf forest in southern China[J]. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 2016, 18(2):246–255.
- [24] 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 等. 模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(3):1235–1244. CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, et al. Effects of simulated acid rain on soil respiration and heterotrophic respiration in a secondary forest[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3):1235–1244.
- [25] Zhang J E, Ouyang Y, Ling D J. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from the Latosol in south China[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11):2131–2137.
- [26] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 125–126. SHEN Shan-min. China soil fertility[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1988: 125–126.
- [27] Gopal M, Gupta A, Arunachalam V, et al. Impact of azadirachtin, an insecticidal allelochemical from neem on soil microflora, enzyme and respiratory activities[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(16):3154–

- 3158.
- [28] Gianfreda L, Ruggiero P. Enzyme activity in soil[M]. Berlin:Springer-Verlag, 2006:257-311.
- [29] Chen S T, Zhang X, Liu Y F, et al. Simulated acid rain changed the proportion of heterotrophic respiration in soil respiration in a subtropical secondary forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 86: 148-157.
- [30] 刘义凡. 模拟酸雨对亚热带次生林土壤碳氮循环关键过程的影响[D]. 南京:南京信息工程大学, 2015:46-47. LIU Yi-fan. Effects of simulated acid rain on the key processes of soil carbon and nitrogen cycle in a subtropical secondary forest[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015:46-47.
- [31] 王晓飞, 李志洪, 郭梦桥, 等. 不同方式秸秆还田对土壤呼吸的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(13): 80-82. WANG Xiao-fei, LI Zhi-hong, GUO Meng-qiao, et al. Effects of different methods of returning straw on soil respiration[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(13): 80-82.
- [32] Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 144-152.
- [33] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883-2887. ZHANG Qing-zhong, WU Wen-liang, WANG Ming-xin, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [34] Lü Y, Wang C, Jia Y, et al. Effects of sulfuric, nitric, and mixed acid rain on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities in subtropical forests of China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 79: 1-9.
- [35] Reddy G B, Reinert R A, Eason G. Lobolly pine needle nutrient and soil enzyme activity as influenced by ozone and acid rain chemistry[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(8): 1059-1064.
- [36] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: Annual variation and controlling factors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3): 449-454.
- [37] 何伟静, 江洪, 马元丹. 模拟酸雨胁迫对青冈幼苗土壤酶的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(30): 14833-14836. HE Wei-jing, JIANG Hong, MA Yuan-dan. Effect of simulating acid rain stress on the soil enzymes of cyclobalanopsis glauca[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(30): 14833-14836.
- [38] 韩玮, 孙晨曦, 苏敬. 模拟增温和酸雨对水稻土酶活性及温度敏感性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(12): 1117-1124. HAN Wei, SUN Chen-xi, SU Jing. Effects of elevated temperature and simulated acid rain on enzyme activity and temperature sensitivity of paddy soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(12): 1117-1124.
- [39] 王俊龙, 王丹, 俞飞, 等. 模拟酸雨与凋落物对柳杉幼苗根际土壤酶活性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(3): 373-379. WANG Jun-long, WANG Dan, YU Fei, et al. Enzyme activity in rhizosphere soil of *Cryptomeria fortunei* seedlings with simulated acid rain and litter[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2014, 31(3): 373-379.
- [40] 刘连贵, 曹洪法, 高映新, 等. 模拟酸雨对土壤微生物活性的影响[J]. 环境科学研究, 1991, 4(3): 37-41. LIU Lian-gui, CAO Hong-fa, GAO Ying-xin, et al. Effects of simulated acid precipitation on soil microbial activity[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1991, 4(3): 37-41.
- [41] 陈书涛, 桑琳, 张旭, 等. 增温及秸秆施用对冬小麦土壤呼吸和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 703-709. CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, et al. Effects of warming and straw application on soil respiration and enzyme activity in a winter wheat cropland[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2016, 37(2): 703-709.
- [42] 徐国伟, 段骅, 王志琴, 等. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 934-942. XU Guo-wei, DUAN Hua, WANG Zhi-qin, et al. Effect of wheat-residue application on physical and chemical characters and enzymatic activities in soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(3): 934-942.
- [43] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371-377. HU Nai-juan, HAN Xin-zhong, YANG Min-fang, et al. Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(2): 371-377.
- [44] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192-2199. HAN Xin-zhong, ZHU Li-qun, YANG Min-fang, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2192-2199.
- [45] Rinnan R, Stark S, Tolvanen A. Responses of vegetation and soil microbial communities to warming and simulated herbivory in a subarctic heath[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 97(4): 788-800.
- [46] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 184-187.
- [47] 万忠梅, 宋长春, 杨桂生, 等. 三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 409-412. WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun, YANG Gui-sheng, et al. The active soil organic carbon fraction and its relationship with soil enzyme activity in different types of marshes in the Sanjiang Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 409-412.
- [48] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(3): 387-401.