

DOI: 10.20103/j.stxb.202211193352

刘子熙, 王治统, 赵德强, 吴 玟, 凌俊, 周顺利, 温媛. 土壤增温和秸秆还田对土壤养分和胞外酶活性的影响. 生态学报, 2023, 43(23): 9867-9876.
Liu Z X, Wang Z T, Zhao D Q, Wu G, Ling J, Zhou S L, Wen Y. Effects of soil warming and straw return on soil nutrients and extracellular enzyme activities. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9867-9876.

土壤增温和秸秆还田对土壤养分和胞外酶活性的影响

刘子熙¹, 王治统¹, 赵德强¹, 吴 玟², 凌 俊¹, 周顺利¹, 温 媛^{1,*}

¹ 中国农业大学农学院, 北京 100193

² 安徽农业大学农学院, 合肥 230036

摘要: 气候变暖和秸秆还田是影响农田生态系统碳氮循环和土壤养分周转的重要因子, 然而两者的交互作用尚缺乏系统研究。通过大田模拟试验, 设置土壤正常温度+秸秆不还田、土壤正常温度+秸秆还田、土壤增温+秸秆不还田和土壤增温+秸秆还田四个处理, 探讨土壤增温与秸秆还田对土壤养分循环及胞外酶活性的影响。结果显示, 土壤增温使硝态氮含量、土壤可溶性有机碳含量和氧化酶活性分别增加了 40.4%、25.8% 和 6.0%, 但也使土壤水分、铵态氮含量与土壤微生物量碳分别损失了 10.6%、33.4% 和 29.9%。秸秆还田则使土壤含水量、全氮、铵态氮、有效磷与可溶性有机碳的含量分别增加了 7.5%、7.2%、44.1%、32.3% 和 18.4%, 同时也使土壤碳氮磷循环酶的活性分别增加了 46.2%、22.9% 和 20.6%。因此研究表明, 土壤增温提高了氧化酶的活性, 加速了土壤碳的转化, 也使土壤氮矿化与硝化反应速率提高。秸秆还田通过增加外源有机物质, 丰富了土壤的碳、氮源, 使土壤养分含量提高, 一定程度上弥补了增温带来的养分损失。

关键词: 土壤增温; 秸秆还田; 土壤养分; 土壤酶活性

Effects of soil warming and straw return on soil nutrients and extracellular enzyme activities

LIU Zixi¹, WANG Zhitong¹, ZHAO Deqiang¹, WU Gong², LING Jun¹, ZHOU Shunli¹, WEN Yuan^{1,*}

¹ College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

² College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract: Climate warming and straw return are crucial factors to influence soil carbon and nitrogen cycles, and soil nutrient turnover in agricultural ecosystem, but little is known about their interactive effects. In this study, we carried out a field experiment at the Wujiao Experimental Station of China Agricultural University in Hebei province, China. This region has a typical temperate continental climate with an average temperature of 12.9 °C and annual mean precipitation of ~500 mm. Soil texture is silty loam with bulk density of 1.5 g/cm³, SOC of 8.4 g/kg, TN of 1.0 g/kg. Two-factorial design of two levels of soil temperature (ambient temperature vs. warming +3.5 °C) and two levels of straw return practice (straw removal vs. straw return) was set up, forming four treatments (ambient temperature with straw removal, CK; ambient temperature with straw return, S; soil warming with straw removal, T; soil warming with straw return, TS). Each treatment had three replicates, resulting in a total of 12 plots (3 m × 4 m for each). Soil warming was manipulated using heating cables, which placed at 20 cm soil depth with 25 cm intervals. The heating cable was installed in October 2018 with an uninterrupted supply of electricity from 2018—2021. For the straw return treatments, crop straw was chopped and then incorporated into 0—15 cm soil depth, while all straw was manually removed for the straw removal treatments. We sampled 0—20 cm soils on June 15, 2021. To quantify the interactive effect of soil warming and straw return on soil quality, we

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31901472); 国家玉米产业技术体系项目 (CARS-02-16)

收稿日期: 2022-11-19; **网络出版日期:** 2023-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenyuan@cau.edu.cn

measured soil moisture, pH, soil organic carbon, total nitrogen, ammonium, nitrate, available phosphorus, microbial biomass, and soil extracellular enzymes. The findings showed that soil warming increased nitrate, dissolved organic carbon, and oxidase activity by 40.4%, 25.8%, and 6.0%, respectively. However, warming reduced soil water content, ammonium, and microbial biomass carbon by 10.6%, 33.4%, and 29.9%, respectively. Straw return increased soil water content, total nitrogen, ammonium, available phosphorous, and dissolved organic carbon by 7.5%, 7.2%, 44.1%, 32.3%, and 18.4%, respectively. Meanwhile, the activities of C-, N-, P-cycle enzymes increased by 46.2%, 22.9%, and 20.6%, respectively. Soil warming also increased the oxidase activity and accelerated soil carbon turnover. At the same time, soil nitrogen mineralization and nitrification were improved by soil warming. In sum, straw return enriched soil carbon and nitrogen by inputting exogenous organic matter and increased the content of available nutrients, which compensated the loss of soil nutrients caused by the increased temperature.

Key Words: soil warming; straw return; soil nutrient; soil enzyme activity

全球变暖深刻影响着人类的生存与发展,2011—2020 年的全球陆地平均温度比 1850—1900 年高 1.59℃,到本世纪末,预计增温幅度达 3.3—5.7℃^[1]。近 50 年来,我国的地表平均温度已升高 1.1℃^[2],极大的改变了农田生态系统碳氮循环过程^[1]。气候变暖通过改变微生物代谢和酶活性^[3-5],加速土壤有机质矿化,降低土壤碳封存量^[6]。与此同时,气候变暖也加速氮周转,增加净氮矿化,虽然这在一定程度上提升了土壤无机氮含量,促进了微生物固氮和植物氮吸收,但在长时间尺度上也会加剧氮损失风险^[7]。

全球农业每年产生约 40 亿吨的作物秸秆^[8],合理、高效的利用秸秆资源对维持农田生态健康具有重要意义。作物秸秆还田能够显著改善土壤物理性状(如土壤容重),提高土壤水稳性大团聚体的比例,提高土壤含水量等^[9-10]。同时,秸秆还田可以提高作物生产力并增加土壤有机质含量^[11],加速大团聚体形成,从而增强农田土壤固碳潜力^[12-13]。一项基于全球的 meta 分析表明,秸秆还田使水田与旱地土壤的有机碳含量提高了 12.8%左右^[14]。秸秆中也含有丰富的氮、磷、钾、微量元素,是作物吸收的重要养分库^[15]。秸秆的分解可以增加土壤速效养分有效性^[16],并通过提高土壤有机质、有效磷和速效钾含量提高土壤肥力^[17-18]。秸秆还田还为土壤微生物的生长繁殖提供了丰富的可利用资源,增加了土壤微生物群落的多样性^[19]。

土壤微生物直接参与土壤养分循环等重要的生物化学过程,对维持土壤健康和生产力具有重要意义^[20-21]。土壤酶是农田生态系统有机质分解和养分循环的生物催化剂,土壤酶活性通常用来表征土壤微生物活动的强度^[22]。在气候变暖的情况下,土壤酶活性可能随之增加,土壤有机碳氮矿化的速度加快,土壤可供植株利用的养分也增加^[23-24]。此外,土壤酶在不同环境下对增温的响应有一定差异,例如在温带森林系统中,增温增加了 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和过氧化物酶的活性,降低了 β -葡萄糖苷酶活性^[25]。然而在北寒带森林中,增温使 β -葡萄糖苷酶活性升高了 15%^[26]。目前有关于森林与草原生态系统中土壤酶活性的研究较多,但是在农田生态系统中土壤酶对土壤增温的响应研究很少。秸秆还田被认为有助于维持土壤微生物群落的多样化和提高胞外酶活性^[27]。秸秆还田还可以通过改变土壤微生物群落组成,显著提高 β -葡萄糖苷酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和土壤酸性磷酸酶活性^[28],使有机态氮磷加速向无机氮和有效磷等土壤养分转化,促进土壤的氮磷循环。秸秆的添加降低了氧化酶(酚氧化酶、过氧化物酶)的活性,表明秸秆作为外源碳的输入使微生物对稳定性底物的利用减少,使木质素等难分解组分积累,提高了土壤有机碳的含量^[29],增强土壤的固碳能力。

土壤养分对增温与秸秆还田有不同的响应趋势,土壤增温提高了微生物的代谢速度,使有机质的矿化速度加快,不利于土壤碳的固存。同时,土壤温度升高使氮的周转率提高,造成氮损失。秸秆还田通过降低土壤容重,增大土壤的总孔隙度,可以维持土壤良好的水分条件,减轻增温对土壤微生物和土壤酶的负面影响。然而,土壤增温和秸秆还田对土壤养分循环的交互影响尚不明晰。同时,在农田生态系统中,土壤胞外酶作为土壤养分循环的重要驱动力,其在土壤增温和秸秆还田二者耦合的情况下的响应目前也尚不清楚。因此,本研

究的目的是探索土壤增温与秸秆还田对土壤养分与土壤胞外酶活性的影响及其交互作用。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

该试验布设于河北省沧州市吴桥县中国农业大学吴桥实验站(37°36'N, 116°21'E)。该地年均温 12.9℃, 年降水量约 500 mm, 属温带季风型气候。土壤为粉质壤土(砂粒 18.6%, 粉粒 70.2%, 黏粒 11.2%), pH 值为 7.9, 容重为 1.5 g/cm³, 孔隙度为 43.4%, 土壤有机碳含量为 8.4 g/kg, 土壤全氮含量为 1.0 g/kg。该区域种植方式为冬小麦-夏玉米轮作。每年 6 月到 10 月为夏玉米生长季, 每年 11 月到次年 5 月为冬小麦生长季。

本研究设置两个水平土壤温度处理(正常温度和增温 3.5℃)和两种秸秆还田处理(秸秆不还田和秸秆还田), 共组成四个处理, 分别为土壤正常温度+秸秆不还田(CK), 土壤正常温度+秸秆还田(S), 土壤增温+秸秆不还田(T)和土壤增温+秸秆还田(TS)。每个处理设置三次重复, 共设置 12 个小区, 每个小区面积为 12 m² (3 m × 4 m)。

在增温处理小区埋设加热电缆, 平行铺设, 深度为 20 cm, 间距为 25 cm, 保证样地增温的均匀性。同时, 每个小区外围用 10 cm 厚 50 cm 深的泡沫板环绕一周以减少周围土壤温度对增温区域的影响。同时, 不增温小区也做同样处理, 以减少或消除因铺设电缆对作物根系及土壤压实的影响。增温试验开始于 2018 年 10 月, 在 2018—2021 年间持续增温, 0—20 cm 处土层平均增温 3.5℃, 日增温趋势图如图 1 所示。

秸秆还田小区设置与当地常规秸秆还田方式一致, 玉米秸秆在收获后用旋耕机打碎为 5—10 cm 碎片, 之后通过模拟旋耕的方式人工混入 0—15 cm 土层; 小麦秸秆用联合收割机粉碎后覆盖还田。对于秸秆不还田的小区, 在收获后将小麦、玉米秸秆人工移除。冬小麦和夏玉米秸秆还田量分别为 8000 kg/hm² 和 10000 kg/hm²。其他诸如灌溉、施肥与收获等农事操作与当地农户保持一致。

1.2 土壤样品采集及测定

在 2021 年 6 月 15 日冬小麦成熟期采集土壤样品。每个小区随机选取 5 个点采用 S 型取样法取样并混合, 取样深度为 0—20 cm 处。土壤样品过 2 mm 筛后, 去除可见秸秆、根系和杂质后, 于 4℃ 冰箱保存, 在两周内完成所有指标的测定。

1.3 土壤理化性质

土壤含水量(SWC), 在取样结束后采用烘干法测定(105℃ 烘干至恒重)。土壤 pH 采用水土比 2.5:1 (V:m) 浸提—pH 计法测定。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法测定^[30], 称取 0.3 g 过 0.25 mm 筛的土壤样品, 加入重铬酸钾氧化土壤有机质, 剩余的重铬酸钾采用硫酸亚铁滴定。土壤全氮采用全自动凯氏定氮仪测定^[31]。土壤无机态氮(NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N)采用比色法进行测定^[32], 即土壤样品用 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提, 水土比为 4:1, 分别在波长为 667 nm 和 540 nm 波长下测定(Multiskan GO, Thermo, 美国)。土壤有效磷(AP)采用钼蓝比色法进行测定^[33], 土壤样品用 2.5% 醋酸浸提, 水土比为 10:1, 在 820 nm 波长下测定。可溶性有机碳(DOC)使用总有机碳分析仪(TOC 仪)进行测定(TOC-L CPN, Shimadzu Corp., 东京, 日本), 称 5 g 土壤置于棕色瓶中, 加入 20 mL K₂SO₄ (0.5 mol/L), 置于摇床 200 rpm 转速振荡 20 min, 利用滤纸进行过滤分离, 取滤液

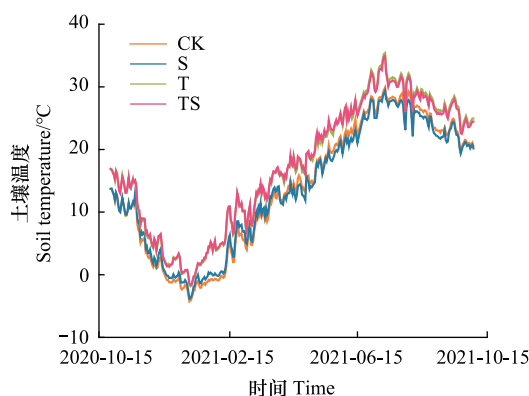


图 1 2020 年 10 月—2021 年 10 月土壤增温趋势图

Fig.1 Temporal variability of soil temperature during Oct 2020—Oct 2021

CK: 正常温度秸秆不还田; S: 正常温度秸秆还田; T: 增温秸秆不还田; TS: 增温秸秆还田

置于 TOC 仪上进行测定^[34]。

1.4 土壤微生物量碳氮的测定

微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)均采用氯仿熏蒸法进行测定^[34-35],称 5 g 土壤置于棕色瓶中,在真空皿中进行氯仿熏蒸 24 h,熏蒸结束后加入 20 ml K_2SO_4 (0.5 mol/L),置于摇床 200 rpm 转速振荡 20 min,利用滤纸进行过滤分离,取滤液置于 TOC 仪上进行测定。根据测定结果计算 MBC 和 MBN 的含量,计算公式为 E/K ,其中 E 为熏蒸与未熏蒸土壤中可提取的碳(氮)的差值, K 为微生物生物量的转换系数, $K_C = 0.45^{[36]}$, $K_N = 0.54^{[37]}$ 。

1.5 土壤酶的测定

土壤胞外水解酶(β -1,4-葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶、 β -1,4-木糖苷酶、 β -1,4-*N*-乙酰氨基葡萄糖苷酶、L-亮氨酸氨基肽酶、碱性磷酸酶)采用荧光光度法测定^[38]。简要步骤为:称取 1 g 新鲜土样加入 50 mL 蒸馏水,置于 200 r/min 旋转式摇床(25 °C)振荡 30 min 后转移到高玻璃皿中。在磁力搅拌器的不断搅拌下,将 50 μ L 土壤悬浊液加入到 96 孔微孔板中,并依次加入 50 μ L 缓冲液和 100 μ L 酶反应底物溶液。每个样品设置两个技术重复。另外,用 4-甲基伞形酮(MUB)和 7-氨基-4-甲基香豆素(AMC)分别做两个标准曲线(0、100、200、500、800、1200 pmol/孔),其中 AMC 为亮氨酸酶的标准曲线,MUB 为除亮氨酸酶以外其他水解酶的标准曲线。最后将加入样品悬浊液后将微孔板放置于 25 °C 条件下培养 30 min、60 min、120 min 后,使用荧光酶标仪(Fluoroskan, ThermoFisher, 美国)分别进行荧光测定(激发光波长为 355 nm;发射光波长为 460 nm)。参照标准溶液的荧光值将样品所得荧光值转化为 MUB 和 AMC 的量。以 L-DOPA 左旋多巴为底物,在 96 孔微孔板上用分光光度法测定了酚氧化酶和过氧化物酶活性^[39]。土壤酶活性单位表示为 $nmol\ g^{-1}\ h^{-1}$ 。在此对同一类型的酶活性进行了标准化计算,以碳循环相关酶活性为例:

$$C-acq = \sqrt[3]{Glu \times Cello \times Xyl}$$

式中, $C-acq$ 代表 C 循环相关酶活性,Glu、Cello 和 Xyl 分别代表 β -1,4-葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶和木聚糖苷酶。另外, β -1,4-*N*-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸酶为氮循环相关酶,磷酸酶为磷循环相关酶,酚氧化酶与过氧化物酶为氧化酶。

1.6 统计分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)计算 CK、S、T、TS 四个处理在不同指标之间的效应,多重比较采用最小显著差异法(LSD), P 值在 <0.05 水平下具有统计学差异。采用双因素方差分析(two-way ANOVA)计算土壤增温和秸秆还田对环境因子、土壤酶活性、土壤理化性质等的交互作用,多重比较采用最小显著差异法(LSD), P 值在小于 0.05 水平下具有统计学差异。采用 SPSS 22.0 进行数据分析,采用 Origin 2021b 进行作图。

2 结果

2.1 增温和秸秆还田对土壤理化性质的影响

与 CK 相比,S、T 和 TS 处理均使土壤含水量降低,减幅分别为 2.8%、20.0% ($P < 0.05$) 和 3.7%。增温处理(T 和 TS 加和后取平均值记为增温处理)较不增温处理(CK 和 S 加和后取平均值记为不增温处理)土壤含水量降低,平均减幅为 10.6% ($P < 0.05$);秸秆还田处理(S 和 TS 加和后取平均值记为秸秆还田处理)较秸秆不还田处理(CK 和 T 加和后取平均值记为秸秆不还田处理)土壤含水量提高,平均增幅为 7.5% ($P < 0.05$)。与 CK 相比,S、T 和 TS 处理均使 pH 降低,减幅分别为 3.3% ($P < 0.05$),1.0% 和 0.6%。增温处理显著提高了土壤的 pH 值,平均增幅为 0.9% ($P < 0.05$),秸秆还田处理显著降低了土壤的 pH 值,平均减幅为 1.4% ($P < 0.05$),S 处理的 pH 值最低,为 7.8。与 CK 相比,S 处理使 SOC 含量升高 8.7%,T 处理和 TS 处理分别使 SOC 含量降低了 10.6% 和 0.7%,且增温处理使 SOC 含量降低了 9.6%。与 CK 相比,S、T 和 TS 处理均使 DOC 含量升高,增幅分别为 17.8%、25.2% ($P < 0.05$) 和 48.8% ($P < 0.05$)。增温处理与秸秆还田处理均增加了 DOC 含量,平均增

幅分别为 25.8% 和 18.4% ($P < 0.05$), 且 CK 处理的 DOC 含量最低, 只有 40.4 mg/kg; TS 处理的 DOC 含量最高, 为 60.1 mg/kg (图 2)。

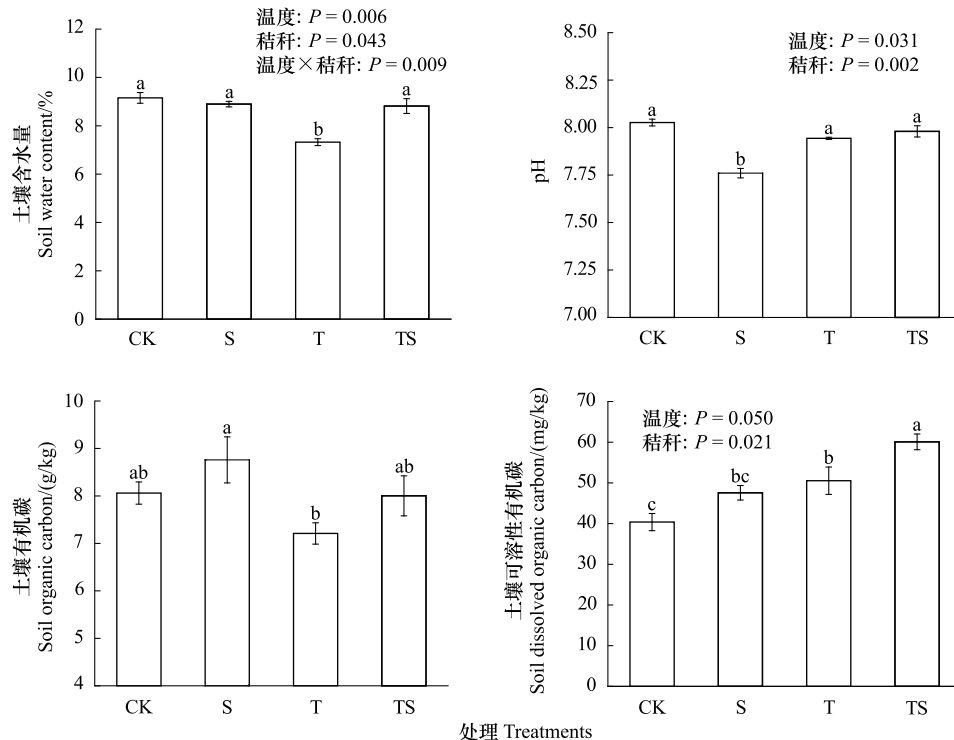


图 2 土壤增温和秸秆还田对土壤含水量、pH、有机碳与可溶性有机碳的影响

Fig.2 Effect of soil warming and straw return on soil water content, pH, SOC and DOC

CK: 正常温度秸秆不还田 ambient temperature with straw removal; S: 正常温度秸秆还田 Ambient temperature with straw return; T: 增温秸秆不还田 Soil warming with straw removal; TS: 增温秸秆还田 Soil warming with straw return

与 CK 相比, S 处理使 TN 含量升高 6.6%, T 处理使 TN 含量降低了 6.3%, TS 处理使 TN 含量升高了 1.1% (图 3)。秸秆的添加使 TN 含量平均增加了 7.2% ($P < 0.05$)。与 CK 相比, S 处理使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量升高 35.3% ($P < 0.05$), T 处理和 TS 处理分别使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降低了 39.4% ($P < 0.05$) 和 3.8%。增温处理使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量平均减少了 33.4% ($P < 0.05$); 秸秆还田处理使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量平均增加了 44.1% ($P < 0.05$), 其中 T 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最低, 为 0.7 mg/kg。S 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高, 为 1.6 mg/kg。与 CK 相比, S 处理和 T 处理分别使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量降低 30.4% 和 10.9%, TS 处理使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量升高了 49.0% ($P < 0.05$)。增温处理显著提高了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量, 平均增幅为 40.4% ($P < 0.05$), 其中 TS 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于其他三个处理, 为 14.8 mg/kg。与 CK 相比, S 处理和 TS 处理分别使 AP 含量升高 39.0% ($P < 0.05$) 和 14.7%, T 处理使 AP 含量降低了 8.2%。秸秆还田处理使 AP 含量平均增加了 32.3% (图 3, $P < 0.05$)。

2.2 增温和秸秆还田对土壤微生物生物量的影响

与 CK 相比, S 处理使 MBC 含量升高 25.2%, T 处理和 TS 处理分别使 MBC 含量降低了 13.2% 和 29.0%。增温降低了 MBC 的含量, 平均减幅为 29.9% ($P < 0.05$)。其中, TS 处理的 MBC 含量最低, 为 185.9 mg/kg。S 处理的 MBC 含量最高, 为 327.6 mg/kg。而 MBN 在不同处理间没有显著差异 (图 4)。

2.3 增温和秸秆还田对土壤胞外酶活性的影响

与 CK 处理相比, S 处理提高了纤维素二糖酶, T 处理提高了过氧化物酶和酚氧化酶的活性, TS 处理提高了磷酸酶, $\beta\text{-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖}$ 和木聚糖苷酶的活性 ($P < 0.05$)。秸秆还田处理提高了木聚糖苷酶、纤维素二糖酶 $\beta\text{-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶}$ 和磷酸酶的活性, 增温处理提高了酚氧化酶的活性, 秸秆还田和增温

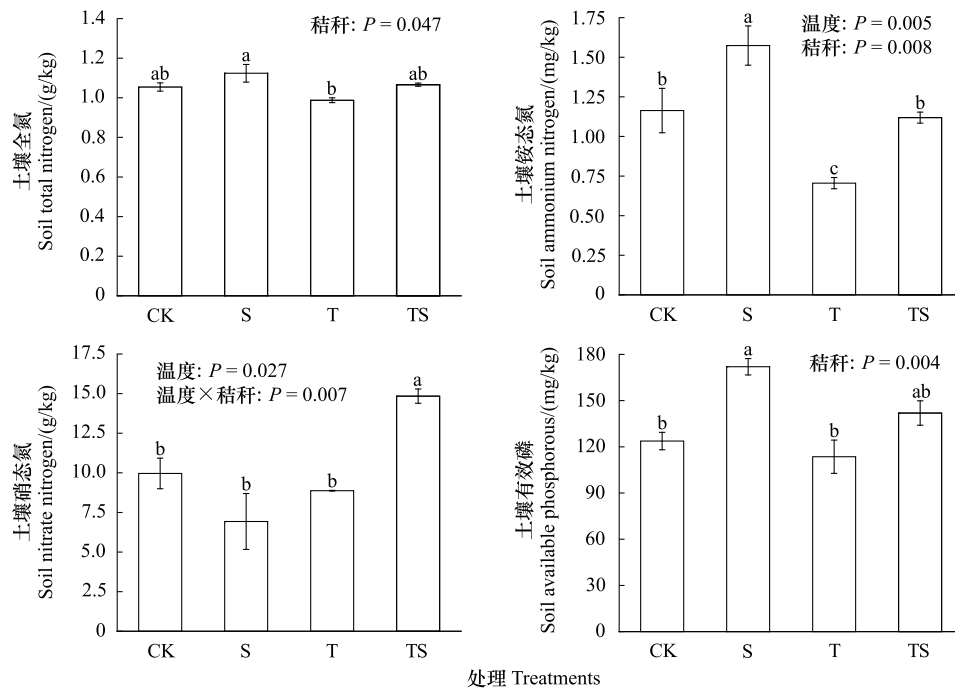


图3 土壤全氮、铵态氮、硝态氮与有效磷对增温与秸秆还田的响应

Fig.3 Response of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and AP to soil warming and straw return

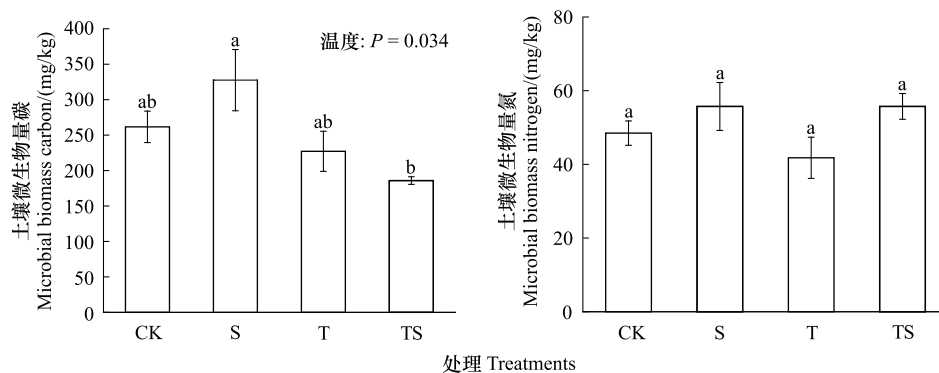


图4 土壤微生物量有机碳与微生物量有机氮对增温与秸秆还田的响应

Fig.4 Response of MBC and MBN to soil warming and straw return

共同作用下过氧化物酶的活性提高了 ($P < 0.05$)。与 CK 相比, S 处理使碳循环相关的酶活性升高 56.0% ($P < 0.05$), T 处理使碳循环相关的酶活性降低 5.4%, TS 处理使碳循环相关的酶活性升高 28.5%。秸秆的添加使碳循环相关的酶活性平均增加 46.2% ($P < 0.05$), 且 S 处理的碳循环相关的酶活性最高, 为 $84.6 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。与 CK 相比, S、T 和 TS 处理均使氮循环相关的酶活性升高, 增幅分别为 30.5% ($P < 0.05$)、13.9% 和 32.5% ($P < 0.05$)。秸秆的添加使氮循环相关的酶活性平均增加 22.9% ($P < 0.05$), 且 CK 处理的氮循环相关的酶活性最低, 为 $121.5 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。与 CK 相比, S、T 和 TS 处理均使磷循环相关的酶活性升高, 增幅分别为 12.7%、0.9% 和 29.6% ($P < 0.05$)。秸秆的添加使磷循环相关的酶活性平均增加 20.6% ($P < 0.05$), 且 TS 处理的磷循环酶活性最高, 为 $92.8 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。与 CK 相比, S、T 和 TS 处理均使氧化酶活性升高, 增幅分别为 4.2%、10.6% ($P < 0.05$) 和 5.7%。增温使氧化酶活性平均增加 6.0% ($P < 0.05$), 且 T 处理的氧化酶活性最高, 为 $5974.8 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, CK 处理的氧化酶活性最低, 为 $5410.0 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (图 5)。

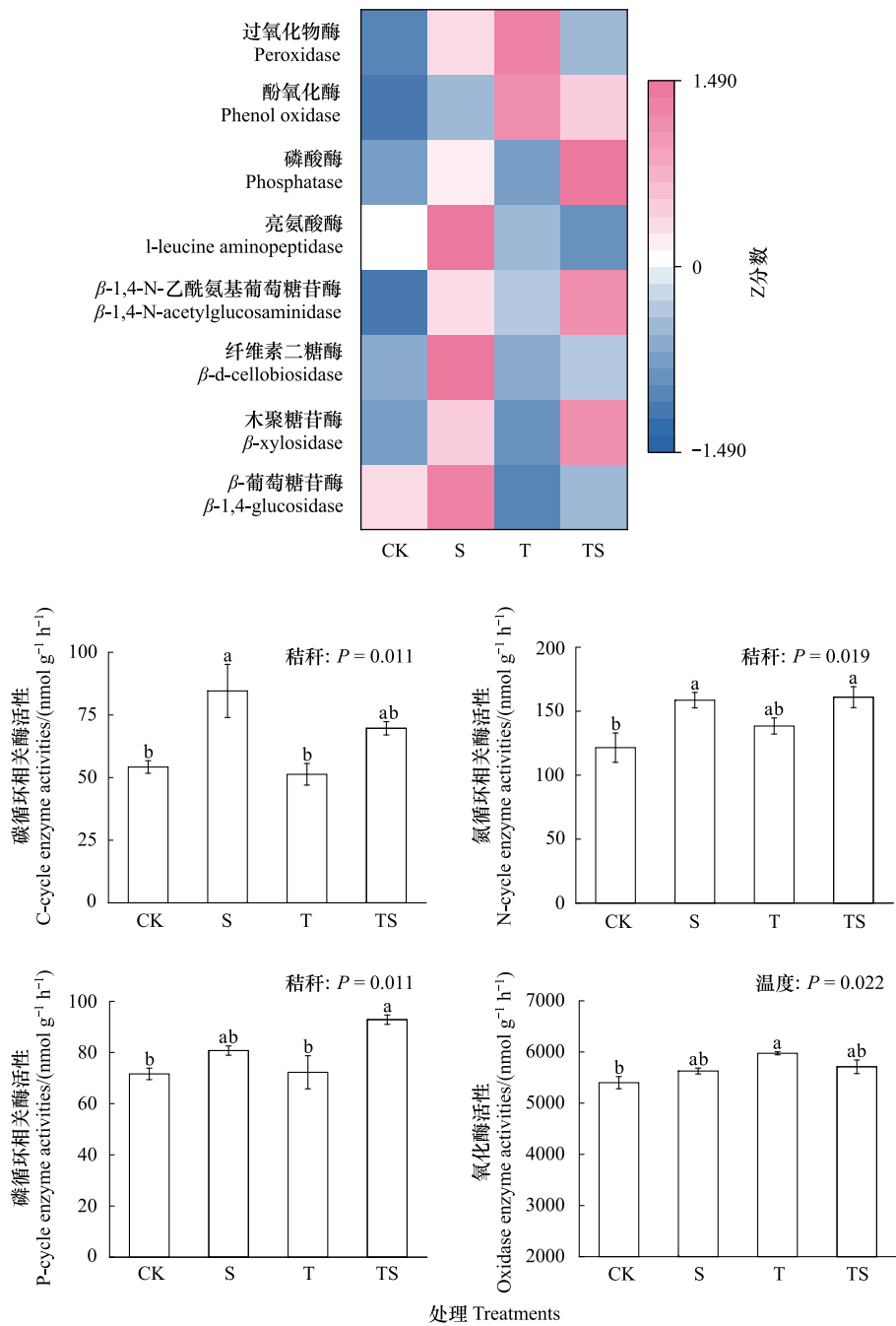


图 5 土壤胞外酶对增温与秸秆还田的响应

Fig.5 Response of soil extracellular enzymes to warming and straw return

3 讨论

3.1 土壤增温和秸秆还田对土壤理化性质的影响

土壤增温显著降低了土壤水分含量,温度升高引起的水分蒸发是土壤含水量降低(图 2, $P<0.05$)的直接原因^[40],此外增温导致作物蒸腾速率加快^[41],也会加剧土壤水分的散失。而秸秆还田后可以有效保持土壤水分,是因为秸秆可以阻断毛管水上升到地表蒸发^[42]。秸秆腐解形成的土壤有机质也可以吸附大量水,Libohova 等^[43]的研究表明土壤增加 1%的有机质可增加 2%—5%的土壤保水能力。此外,秸秆还田有助于土壤团聚体形成,良好的土壤结构对保持土壤含水量有很大帮助^[44]。本研究也发现秸秆还田可使增温造成的

土壤水分损失减少 21.8% (图 2, $P<0.05$), 表明秸秆还田有助于应对气候变暖带来的干旱问题。秸秆还田还可调节土壤 pH 值, 作物秸秆的投入增加了土壤中的有机氮, H^+ 通过有机氮的氨化作用被消耗形成 NH_4^+ , 随后的硝化作用使 NH_4^+ 变为 NO_3^- , 可能导致 H^+ 的释放和土壤 pH 值的降低^[45], 这有利于碱性土壤改良和小麦的生长。

增温显著提高了 DOC 含量 (图 2, $P<0.05$), 刘芙蓉等^[46] 也发现 0—15 cm 土壤增温后 DOC 增加了 61.4%。这可能是温度的升高影响了土壤酶的活性^[47], 土壤有机质降解的速度加快, 进而提高了 DOC 含量。秸秆作为外源有机物料, 提供了微生物活动所需的碳源, 使微生物的活性升高^[48]。在微生物分解秸秆的过程中, DOC 作为不稳定碳组分被释放 (图 2, $P<0.05$), 这与人前研究中秸秆还田使 DOC 含量提高 273.5% 的结果一致^[49], 这表明秸秆还田对提高土壤不稳定碳组分有一定的效果。增温使 SOC 含量降低了 9.6%, 秸秆还田在一定程度上弥补了增温带来的碳损失, 使增温处理下的 SOC 增加了 11.0%, 但 SOC 的增减并不显著 (图 2)。表明在变暖的条件下秸秆还田可能在一定程度上提高土壤质量。

温度升高会使土壤硝化作用增强, 促进 NH_4^+ 向 NO_3^- 的转化^[50]。本研究也发现增温后 NH_4^+-N 含量降低 (图 3, $P<0.05$), 而 $NO_3^- -N$ 含量升高 (图 3, $P<0.05$)。秸秆作为一种含氮的有机物质添加到土壤中, 有效增加了土壤 TN 和 NH_4^+-N 的积累量 (图 3, $P<0.05$)。而增温在一定程度上造成的 TN 和 NH_4^+-N 损失, 在添加秸秆后分别减少了 13.4% 和 0.7% (图 3), 表明秸秆还田可能在一定程度上弥补了增温带来的 TN 和 NH_4^+-N 损失。秸秆还田增加了土壤的 AP 含量 (图 3, $P<0.05$), 与陈昊等^[51] 小麦玉米全量还田的处理使 AP 含量提高了 162.1% 的趋势一致。这是秸秆腐解过程中可以释放 AP 的结果^[52]。秸秆还田对土壤的改良作用也有助于减少土壤矿物质对磷的固定, 增加土壤有效磷含量。

3.2 土壤增温和秸秆还田对土壤微生物生物量和酶活性的影响

增温显著降低了土壤 MBC 的含量 ($P<0.05$), 虽然秸秆还田在一定程度上提高了土壤 MBC 的含量, 但无法弥补其损失。这与奚晶阳等^[53] 在高寒沼泽草甸的增温研究中的研究规律一致。增温导致土壤含水量降低, 会抑制微生物的生长和繁殖, 进而限制土壤微生物种群规模, 使土壤 MBC 的含量降低^[54]。随着温度升高, 土壤中的有机质下降也会导致土壤微生物数量减少^[55], 进而导致 MBC 的含量降低 (图 4)。

温度是土壤酶活性的重要调控因子^[8], 温度升高提高酚氧化酶的活性, 并增加酚氧化酶的反应速率^[56], 本研究中酚氧化酶和过氧化酶活性随温度的升高而升高 (图 5, $P<0.05$), 可加快土壤中的酚类化合物的氧化和转化速度, 促进了土壤碳循环, 加快了土壤有机碳的转化, 土壤固碳能力减弱^[22]。秸秆还田显著提高了木聚糖酶、纤维素二糖酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和磷酸酶活性 (图 5, $P<0.05$)。这与贺美等^[57] 的研究结果一致: 秸秆的加入使木聚糖酶活性提高了 17.2%、纤维素二糖酶活性提高了 1.7%、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性提高了 15.4%。这是因为秸秆快速降解后产生的水溶性化合物和易分解物质为胞外酶提供了充足的底物, 使酶活性显著增加^[58]。

在本研究中, 随着秸秆加入导致的碳氮相关的酶活性升高 (图 5, $P<0.05$), DOC 与 NH_4^+-N 的含量显著升高 (图 2、图 3, $P<0.05$), 这是因为酶活性的升高有助于有机碳、氮的矿化^[59]。研究结果显示, 秸秆还田增加了磷酸酶活性 (图 5, $P<0.05$), 与蔡丽君等^[60] 秸秆还田使磷酸酶活性增加 4.9%—22.2% 的研究趋势一致。磷酸酶活性的提高可能会使有机磷化物的分解加快, 使可供作物吸收利用的有效磷含量增加^[61], 本研究中有有效磷含量的增加也印证了这一点 (图 3, $P<0.05$)。土壤有机质随着碳氮磷循环酶活性的增加而加快分解, 释放出更多作物所需的氮磷等元素, 有利于作物生长。土壤酶对秸秆的响应表明, 秸秆的加入使土壤酶的活性升高, 加快了土壤速效养分的释放, 可在一定程度上弥补增温带来的土壤养分损失, 维持土壤肥力。

4 结论

本研究表明土壤增温降低了土壤含水量、铵态氮含量和微生物量碳, 提高了氧化酶活性、可溶性有机碳和硝态氮含量。而秸秆还田下, 外源有机物质输入增加了土壤碳氮磷循环相关酶活性, 促进了有机质的周转与

速效养分的释放,提高了全氮、铵态氮、有效磷等土壤养分含量,一定程度上弥补了气候变暖下农田土壤养分的损失。因此,本研究表明秸秆还田措施是未来气候变暖条件下保育农田土壤肥力与生物活性的重要手段。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: the Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge.
- [2] 周梦岩, 苏丽丽, 石书兵. 气候变化对农业的影响研究进展. 农村经济与科技, 2016, 27(9): 13-15.
- [3] Cookson W R, Osman M, Marschner P, Abaye D A, Clark I, Murphy D V, Stockdale E A, Watson C A. Controls on soil nitrogen cycling and microbial community composition across land use and incubation temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(3): 744-756.
- [4] Feng R F, Yang W Q, Zhang J, Deng R J, Jian Y, Lin J. Effects of simulated elevated concentration of atmospheric CO₂ and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4019-4026.
- [5] Koch O, Tschirko D, Kandeler E. Temperature sensitivity of microbial respiration, nitrogen mineralization, and potential soil enzyme activities in organic alpine soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(4): 4.
- [6] Pendall E, Bridgman S, Hanson P J, Hungate B, Kicklighter D W, Johnson D W, Law B E, Luo Y Q, Megonigal J P, Olsrud M, Ryan M G, Wan S Q. Below-ground process responses to elevated CO₂ and temperature: a discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytologist*, 2004, 162(2): 311-322.
- [7] Rustad L, Campbell J, Marion G, Norby R, Mitchell M, Hartley A, Cornelissen J, Gurevitch J, GCTE-NEWS. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 2001, 126(4): 543-562.
- [8] Lal R. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management*, 2008, 28(4): 747-758.
- [9] 邹洪涛, 王胜楠, 闫洪亮, 马迎波, 范庆锋, 黄毅, 张玉龙. 秸秆深还田对东北半干旱区土壤结构及水分特征影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 52-60.
- [10] 王秋菊, 姜宇, 周鑫, 米刚, 刘鑫, 李婧阳, 刘峰, 中本和夫, 黄丹萍. 豆麦轮作区麦秸长期还田对作物产量及土壤化学性质的影响. 农业工程学报, 2019, 35(24): 113-120.
- [11] Zhao X, Liu B Y, Liu S L, Qi J Y, Wang X, Pu C, Li S S, Zhang X Z, Yang X G, Lal R, Chen F, Zhang H L. Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: a meta-analysis. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 694-709.
- [12] Zhao H L, Shar A G, Li S, Chen Y L, Shi J L, Zhang X Y, Tian X H. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.
- [13] Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, Sun H Y, Niu J F, Liu X W. Effects of straw and manure management on soil and crop performance in North China Plain. *CATENA*, 2020, 187: 104359.
- [14] Liu C, Lu M, Cui J, Li B, Fang C M. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [15] Xia L L, Lam S K, Wolf B, Kiese R, Chen D L, Butterbach-Bahl K. Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems. *Global Change Biology*, 2018, 24(12): 5919-5932.
- [16] Yang H S, Xu M M, Li Y F, Xu C F, Zhai S L, Liu J. The impacts of ditch-buried straw layers on the interface soil physicochemical and microbial properties in a rice-wheat rotation system. *Soil and Tillage Research*, 2020, 202: 104656.
- [17] 赵鹏, 陈阜. 秸秆还田配施氮肥对夏玉米氮利用及土壤硝态氮的影响. 河南农业大学学报, 2009, 43(1): 14-18.
- [18] 刘晓霞, 陶云彬, 章日亮, 吴东涛, 王军君, 陈一定. 秸秆还田对作物产量和土壤肥力的短期效应. 浙江农业科学, 2017, 58(3): 508-510, 513.
- [19] 李玉洁, 王慧, 赵建宁, 皇甫超河, 杨殿林. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响. 应用生态学报, 2015, 26(3): 939-948.
- [20] 胡明慧, 赵建琪, 王玄, 熊鑫, 张慧玲, 褚国伟, 孟泽, 张德强. 自然增温对亚热带森林土壤微生物群落与有机碳代谢功能基因的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 359-369.
- [21] 蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用. 植物生态学报, 2010, 34(8): 979-988.
- [22] Sinsabaugh R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(3): 391-404.
- [23] 段益莉, 李继侠, 江强, 赵鸿宇. 长白山东坡不同海拔落叶松土壤微生物碳代谢及酶活性研究. 生态环境学报, 2019, 28(4): 652-660.
- [24] 李富, 臧淑英, 刘赢男, 吴祥文, 倪红伟. 冻融作用对三江平原湿地土壤活性有机碳及酶活性的影响. 生态学报, 2019, 39(21): 7938-7949.
- [25] 王一, 刘彦春, 刘世荣. 暖温带森林土壤酶活性对增温的响应及其环境解析. 林业科学研究, 2017, 30(1): 117-124.
- [26] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. *Global Change Biology*, 2008, 14(12): 2898-2909.
- [27] Yan S S, Song J M, Fan J S, Yan C, Dong S K, Ma C M, Gong Z P. Changes in soil organic carbon fractions and microbial community under rice straw return in Northeast China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00962.
- [28] 王妙芬, 梁美美, 杨庆, 高人. 秸秆及其生物炭添加对土壤酶活性的影响. 福建农业科技, 2021, 52(7): 10-17.
- [29] 钱瑞雪, 刘岩, 陈智文, 何红波, 张清. 玉米秸秆添加对土壤碳氮周转相关酶活性动态的影响. 土壤通报, 2020, 51(5): 1109-1116.
- [30] Kalembsa S J, Jenkinson D S. A comparative study of titrimetric and gravimetric methods for the determination of organic carbon in soil. *Journal of*

- the Science of Food and Agriculture, 1973, 24(9): 1085-1090.
- [31] Bremner J M. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. The Journal of Agricultural Science, 1960, 55(1): 11-33.
- [32] Wen Y, Zang H D, Freeman B, Ma Q X, Chadwick D R, Jones D L. Rye cover crop incorporation and high watertable mitigate greenhouse gas emissions in cultivated peatland. Land Degradation & Development, 2019, 30(16): 1928-1938.
- [33] Wang Z W, Chen L L, Liu C L, Jin Y B, Li F Y, Khan S, Liang X Q. Reduced colloidal phosphorus loss potential and enhanced phosphorus availability by manure-derived biochar addition to paddy soils. Geoderma, 2021, 402: 115348.
- [34] Zhou J, Wen Y, Shi L L, Marshall M R, Kuzyakov Y, Blagodatskaya E, Zang H D. Strong priming of soil organic matter induced by frequent input of labile carbon. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 152: 108069.
- [35] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [36] Joergensen R G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EC} value. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(1): 25-31.
- [37] Joergensen R G, Mueller T. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EN} value. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(1): 33-37.
- [38] Liu T Y, Hao L F, Bai S L, Wang Y L. Ecosystem stoichiometry and microbial nutrient limitation of shrub rhizosphere soils in response to arbuscular mycorrhizal fungi inoculation. Journal of Soils and Sediments, 2022, 22(2): 594-606.
- [39] Dunn C, Jones T G, Girard A, Freeman C. Methodologies for extracellular enzyme assays from wetland soils. Wetlands, 2014, 34: 9-17.
- [40] 张富仓, 张一平, 张君常. 温度对土壤水分保持影响的研究. 土壤学报, 1997, 34(2): 160-169.
- [41] 杜康, 张北赢. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征. 水土保持研究, 2020, 27(6): 72-76.
- [42] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响. 土壤通报, 2001, 32(5): 209-213.
- [43] Libohova Z, Seybold C, Wysocki D, Wills S, Schoeneberger P, Williams C, Lindbo D, Stott D, Owens P R. Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 73(4): 411-421.
- [44] Mulumba L N, Lal R. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 106-111.
- [45] Cai Z J, Xu M G, Wang B R, Zhang L, Wen S L, Gao S D. Effectiveness of crop straws, and swine manure in ameliorating acidic red soils: a laboratory study. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(9): 2893-2903.
- [46] 刘芙蓉, 王红梅, 张咏梅. 增温和 CO_2 浓度加倍对川西亚高山针叶林土壤可溶性有机碳、氮的影响. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2844-2849.
- [47] 徐振锋, 唐正, 万川, 熊沛, 曹刚, 刘庆. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2727-2733.
- [48] Cong P, Wang J, Li Y Y, Liu N, Dong J X, Pang H C, Zhang L, Gao Z J. Changes in soil organic carbon and microbial community under varying straw incorporation strategies. Soil and Tillage Research, 2020, 204: 104735.
- [49] 张玉娇, 邱慧珍, 郭亚军, 张建斌. 不同施氮量下玉米秸秆还田对土壤有机碳及其组分的影响. 国土与自然资源研究, 2022(2): 87-90.
- [50] Butler S M, Melillo J M, Johnson J E, Mohan J, Steudler P A, Lux H, Burrows E, Smith R M, Vario C L, Scott L, Hill T D, Aponte N, Bowles F. Soil warming alters nitrogen cycling in a New England forest: implications for ecosystem function and structure. Oecologia, 2012, 168(3): 819-828.
- [51] 陈昊, 饶继翔, 孙庆业. 秸秆还田方式对土壤理化性质的综合影响评价. 安徽农业大学学报, 2021, 48(4): 661-667.
- [52] Guan X K, Wei L, Turner N C, Ma S C, Yang M D, Wang T C. Improved straw management practices promote *in situ* straw decomposition and nutrient release, and increase crop production. Journal of Cleaner Production, 2020, 250: 119514.
- [53] 奚晶阳, 白炜, 尹鹏松, 刘永万. 模拟增温对长江源区高寒沼泽草甸土壤有机碳组分与植物生物量的影响研究. 生态科学, 2019, 38(1): 92-101.
- [54] Cederlund H, Thierfelder T, Stenström J. Functional microbial diversity of the railway track bed. Science of the Total Environment, 2008, 397(1/2/3): 205-214.
- [55] Bradford M A, Davies C A, Frey S D, Maddox T R, Melillo J M, Mohan J E, Reynolds J F, Treseder K K, Wallenstein M D. Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature. Ecology Letters, 2008, 11(12): 1316-1327.
- [56] Seo J, Jang I, Jung J Y, Lee Y K, Kang H. Warming and increased precipitation enhance phenol oxidase activity in soil while warming induces drought stress in vegetation of an Arctic ecosystem. Geoderma, 2015, 259/260: 347-353.
- [57] 贺美, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣. 黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1942-1951.
- [58] Liu L, Cheng M, Yang L, Jin J Y, Fu M J. Effects of different nitrogen applications and field return depth on the diversity and function of bacteria in returned straw in cold paddy fields. Sustainability, 2022, 14(21): 13716.
- [59] Nannipieri P, Trasar-Cepeda C, Dick R P. Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. Biology and Fertility of Soils, 2018, 54(1): 11-19.
- [60] 蔡丽君, 张敬涛, 盖志佳, 刘婧琦, 张伟, 赵桂范, 郑海燕, 王庆胜, 龚振平, 马春梅. 免耕条件下秸秆还田量对土壤酶活性的影响. 土壤通报, 2015, 46(5): 1127-1132.
- [61] 关松荫, 沈桂琴, 孟昭鹏, 姚造华, 闵九康. 我国主要土壤剖面酶活性状况. 土壤学报, 1984, 21(4): 368-381.