

DOI: 10.20103/j.stxb.202209182671

梁裕华, 曹瑞, 王芝慧, 李旭清, 王怀宾, 冯忠娟, 董慧慧, 安文丽, 武启骞, 杨万勤. 不同经营模式茶园土壤微生物熵对台风干扰的响应. 生态学报, 2023, 43(17): - .

Liang Y H, Cao R, Wang Z H, Li X Q, Wang H B, Feng Z J, Dong H H, An W L, Wu Q Q, Yang W Q. Response of soil microbial quotient to typhoon disturbance in different management modes of tea plantations. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): - .

不同经营模式茶园土壤微生物熵对台风干扰的响应

梁裕华^{1,2}, 曹 瑞², 王芝慧², 李旭清², 王怀宾², 冯忠娟², 董慧慧², 安文丽², 武启骞^{1,*},
杨万勤²

1 浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300

2 台州学院生命科学学院, 台州 318000

摘要: 台风干扰可能显著影响我国东南沿海山地茶园土壤有机碳稳定性和矿化过程, 而土壤微生物熵 (qMB) 是指示土壤有机碳稳定性和矿化潜力的敏感指标。因此, 研究不同经营模式茶园土壤微生物熵对台风干扰的响应, 可为山地茶园土壤碳库管理提供重要科学依据。为此, 以浙江省台州市天台县苍山顶传统化肥经营的纯茶园 (M0)、林茶间作 (M1)、茶园养鸡 (M2)、施用微生物肥料的纯茶园 (M3) 四种经营模式茶园为研究对象, 在 2021 年 7 月 28 日台风“烟花” (第 6 号台风) 来临前一天 (T1)、台风过境后一天 (T2) 和台风过境后 7 天 (T3), 按照表层土壤 (0—10 cm) 和亚表层土壤 (10—30 cm) 采集四种经营模式的茶园土样, 同步测定土壤有机碳 (SOC) 含量、微生物生物量碳 (MBC) 和可溶性有机碳 (DOC) 含量。结果表明: (1) 台风干扰对 M2 和 M3 的土壤有机碳影响更显著, 而且不同经营模式茶园中表层和亚表层的土壤有机碳含量对台风干扰的响应存在差异; (2) 台风干扰对 M2 的土壤微生物熵影响更显著, 对表层土壤的微生物熵影响更显著, 说明台风干扰对 M2 土壤有机碳稳定性和矿化影响显著, M2 的土壤微生物熵对台风干扰的响应显著; (3) 台风干扰对 M2 的土壤微生物生物量碳影响最显著, 对 M0 和 M1 的影响最弱, 且不同经营模式茶园中不同土层的土壤微生物生物量碳对台风干扰的响应存在差异; (4) 台风干扰对 M0 的土壤可溶性有机碳含量影响更显著, M1 和 M3 次之, 对 M2 的影响最弱。而且不同经营模式茶园中表层和亚表层土壤的可溶性有机碳含量对台风干扰的响应存在差异。综上, 台风干扰会对不同经营模式茶园土壤微生物熵影响程度不同, 说明台风干扰对不同经营模式茶园土壤有机碳稳定性具有不同程度的影响, 其中 M2 的土壤有机碳是响应台风干扰最敏感的经营模式茶园。

关键词: 台风干扰; 山地茶园; 土壤微生物生物量; 土壤可溶性有机碳

Response of soil microbial quotient to typhoon disturbance in different management modes of tea plantations

LIANG Yuhua^{1,2}, CAO Rui², WANG Zhihui², LI Xuqing², WANG Huaibin², FENG Zhongjuan², DONG Huihui², AN Wenli², WU Qiqian^{1,*}, YANG Wanqin²

1 College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China

2 School of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, China

Abstract: Typhoon disturbance might significantly affect the stability and mineralization process of soil organic carbon in mountain tea plantations along the southeast coast of China. Meanwhile, soil microbial quotient (qMB) is a sensitive indicator of soil organic carbon stability and mineralization potential. As a result, understanding on the response of soil microbial quotient in tea plantations with different management modes to typhoon disturbance can provide an important scientific basis for managing soil carbon pools in mountain tea plantations. Therefore, the concentrations of soil organic

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32201537)

收稿日期: 2022-09-18; 网络出版日期: 2023- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiqianwu@zafu.edu.cn

carbon, dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in surface soil (0—10 cm) and subsurface soil (10—30 cm) in four management tea plantation modes, i.e., traditional tea plantation with chemical fertilizer (M0), tree and tea intercropping plantation (M1), tea plantation with breeding chickens (M2), and traditional tea plantation with microbial fertilizer (M3) in Tiantai County, Zhejiang Province, were measured before one day of Typhoon Fireworks (Typhoon No. 6) coming (T1), and after one day (T2) and seven days (T3) of typhoon passing. The results showed that (1) the strongest effects of typhoon disturbance on soil organic carbon in tea plantations were observed in M2 and M3. Moreover, the responses of organic carbon in surface and subsurface soils to disturbance also varied greatly with tea plantation management modes; (2) More significant effects of typhoon disturbance on soil microbial quotient were observed in M2 mode compared with other tea plantation management modes, and the effects of typhoon disturbance on subsurface soil microbial quotient were more significant, suggesting that typhoon disturbance had stronger effect on soil organic carbon stability and mineralization in M2 mode, and the response of soil microbial quotient in M2 mode to typhoon disturbance was more sensitive; (3) The strongest effects of typhoon disturbance on soil microbial biomass carbon were observed in M2 mode, and the weakest effects of those in M0 and M1. Moreover, the responses of soil microbial biomass carbon in surface and subsurface soils to typhoon disturbance varied greatly with tea plantation management modes; And (4) the strongest effects of typhoon disturbance on soil dissolved organic carbon in tea plantations were observed in M0, and followed by M1, M3 and M2. Moreover, the responses of dissolved organic carbon in surface and subsurface soils to disturbance also varied greatly with tea plantation management modes. In conclusion, the effects of typhoon disturbance on soil microbial quotient varied greatly with tea plantation management modes, suggesting that the response of soil organic carbon stability to typhoon disturbance varied with tea plantation management modes. Moreover, the most sensitive response of soil organic carbon to typhoon disturbance in tea plantations was observed in M2.

Key Words: typhoon disturbance; mountain tea plantations; soil microbial biomass; soil dissolved organic carbon

台风是发生在北太平洋西部的风力达到 12 级及以上的热带气旋^[1],是影响我国东南沿海地区生态系统结构和功能的最重要干扰因子^[2-3]。特别重要的是,在全球气候变化情景下,台风干扰的频次和强度预计将逐渐增加^[4],这可能会对台风影响区生态系统土壤碳循环产生更显著的影响。理论上,台风干扰可能通过多个途径显著影响土壤有机碳稳定性和矿化过程,从而影响土壤碳吸存(Carbon sequestration)。台风伴生的强降雨事件不仅会增加土壤含水量,改变土壤水分有效性^[5],而且会造成土壤碳和养分淋溶流失,改变土壤养分有效性^[6],从而改变土壤微生物群落结构与功能,影响土壤有机碳稳定性和矿化过程。然而,有关台风干扰对山地茶园土壤有机碳稳定性和矿化过程的潜在影响尚未见报道。

土壤微生物熵是土壤微生物生物量碳与土壤有机碳的占比^[7],能够有效反映土壤微生物对有机碳同化与维持微生物呼吸需求之间的平衡关系^[8],是指示土壤有机碳稳定性和矿化潜力的敏感性指标^[9-10]。普遍认为,土壤微生物熵受土壤微生物、气候条件和土壤性质的综合影响^[8,11-12]。有研究表明,土壤微生物生物量是决定土壤微生物熵变化的关键因素^[8-9];但也有研究认为,土壤温、湿度和基质质量是调节土壤微生物熵的重要因子^[8]。可见,有关土壤微生物熵的关键驱动因子的研究结果还具有很大的不确定性。台风是沿海地区生态系统的最重要干扰因子,可能会通过伴生的强降雨事件增加土壤含水量和养分含量,刺激微生物生长^[13],促使微生物同化更多的碳,导致土壤微生物熵增加;也可能因为强风暴雨使凋落物被带走,土壤养分输入量减少^[14-15],造成微生物生物量减少和微生物熵降低。因此,深入研究土壤微生物熵对台风干扰的响应有助于理解台风干扰对土壤有机碳稳定性和矿化过程的影响机制,为土壤有机碳库管理提供科学依据。

茶是深受大众喜爱的饮品,具有降脂、降血糖、降血压、防癌和防治心血管疾病等功效^[16-18]。茶叶作为我国主要的经济产物之一,茶叶产量和种植面积均为世界第一^[19]。然而,受长期集约化—纯茶园经营的影响,山地茶园土壤普遍存在有机碳含量较低、土壤板结和养分亏缺等土壤生态问题^[19-21]。同时,我国东南沿海山

地既是龙井茶、铁观音和红茶等品牌的茶叶产区^[19],又是台风干扰频繁的区域^[22-23]。例如,浙江省是我国东南沿海地区受台风干扰次数较严重的省份之一^[24],平均每年有 5 个台风登陆或影响浙江省,且台风强度和频次有明显增加的趋势^[25-27]。理论上,台风干扰带来的强风和强降雨对土壤温湿度、土壤可溶性有机质、养分有效性等的影响可能在不同程度上影响土壤微生物群落结构和活性,最终影响土壤微生物熵。然而,有关台风干扰如何影响茶园土壤有机碳稳定性和矿化潜势迄今缺乏相应的研究报道。另一方面,为了修复退化茶园土壤、防治病虫害、提高土壤肥力和茶叶产量与品质,茶园经营者常常采用林茶间作、茶豆间作、茶园养鸡、施用微生物肥料等模式^[28-31]。然而,这些茶园经营管理模式对土壤有机碳稳定性和矿化潜势的影响以及这些模式的土壤有机碳稳定性和矿化潜势对台风干扰的响应,也仍缺乏较为深入的研究。因此,为理解不同经营模式茶园的土壤微生物熵对台风干扰的响应是否存在差异,本文以浙江天台山龙井茶茶园为研究对象,研究了 2021 年 7 月 28 日台风“烟花”对不同经营模式的茶园土壤微生物熵的影响,以期对浙江东南沿海山地茶园土壤碳库管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省台州市天台县天台山(121°10′—121°15′ E, 29°08′—29°11′ N, 海拔 587—899 m),属于亚热带季风气候,四季分明、降水丰富,年均气温 17.0 °C,年均日照总时数 1756.3 h,年平均降水超过 120 d,年降水量 1185—2029 mm,多年平均降水量 1632 mm^[23, 32]。苍山顶生态茶园位于天台苍山半山腰至山顶,该茶园于二十世纪六、七十年代在荒山荒坡上种植而成,面积约 173 hm²,茶园生产的茶叶主要用于“浙江龙井茶”加工,现由天台青云茶业有限公司经营。为了改良和修复退化土壤、防治病虫害、提高茶叶产量和品质,天台青云茶业有限公司自 2019 年与台州学院土壤生态与修复研究团队合作,开展茶园土壤生态改良与提质增效技术研发与示范研究,进行了林茶间作、茶园养鸡、微生物肥料应用等试验示范。林茶间作、茶园养鸡、微生物肥料应用和化肥应用等模式的土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 不同经营模式茶园土壤理化性质

Table 1 Soil physio-chemical properties of tea plantations under different management modes

经营模式 Management modes	土层 Soil layers	土壤温度 Soil temperature/°C	土壤湿度 Soil moisture/%	pH	土壤容重 Soil bulk density /(g/cm ³)	土壤有机质 Soil organic matter/%	土壤氮含量 Soil nitrogen concentration/ (g/kg)	土壤磷含量 Soil phosphorus concentration/ (g/kg)
M0	A	24.14	40.71	4.51	0.83	27.77	1.15	0.23
	B	23.49	33.83	4.46	1.00	38.67	0.80	0.13
M1	A	23.66	46.37	4.55	0.71	26.39	1.07	0.16
	B	21.61	38.43	4.50	0.98	16.56	0.84	0.10
M2	A	26.84	44.22	4.27	0.83	49.63	1.46	0.23
	B	24.50	39.77	4.43	1.02	39.32	0.99	0.17
M3	A	24.26	38.21	4.44	0.98	33.32	0.81	0.23
	B	23.43	33.64	4.45	1.23	16.87	0.64	0.12

M0:传统化肥经营的纯茶园 traditional tea plantation with chemical fertilizer; M1:林茶间作 tree and tea intercropping plantation; M2:茶园养鸡 tea plantation with breeding chickens; M3:施用微生物肥料的纯茶园 traditional tea plantation with microbial fertilizer; A:0—10 cm 的土壤 0—10 cm of soil; B:10—30 cm 的土壤 10—30 cm of soil

1.2 实验设置与样品采集

2020 年夏季在浙江省台州市天台县苍山顶生态茶园,选择传统化肥经营的纯茶园(M0)、林茶间作(M1)、茶园养鸡(M2)和施用微生物肥料的纯茶园(M3)四种不同经营模式的茶园为研究对象。在不同经营模式的茶园选择长宽均为 50 m,面积为 2500 m²的地块为研究样地。传统茶园施肥情况为每年 1 月份施加一次尿素,每 100 m²茶园施加约 4 kg 尿素。M0 是在传统纯茶园选定样地,其坡度为 22°;M1 的茶园中乔木

行距间隔 25 m,同一行乔木间距 5 m,乔木的种植年限约为 30 年,M1 坡度为 18°,乔木郁闭度为 15%;M2 是 2020 年 7 月在传统纯茶园内使用高 2 m 的围栏合围长为 50 m 的研究样地,并一次性投放 300 只生长 40 天的大黄鸡,M2 的坡度为 8°;M3 也是在传统纯茶园内选定样地,于 2021 年 3 月和 4 月喷洒以芽孢杆菌为主的微生物培养液,每 100 m²茶园每次喷洒 450 g 微生物肥料,时隔半个月喷洒一次,共 4 次,M3 的坡度为 11°。最后,在四种经营模式茶园,分别选择 3 个相互间隔至少 10 m,长宽均为 10 m,面积为 100 m²的地块作为重复样方。

2021 年 7 月,根据台风预警信息,于台风来临前一天(7 月 27 日,T1)、台风过境后一天(7 月 29 日,T2)和台风过境后 7 天(8 月 4 日,T3)三个时期进行土壤样品采集。在不同经营模式茶园每个重复样方内随机选择 5 个点使用土钻按表层(0—10 cm)和亚表层(10—30 cm)土壤层次分别采集土壤样品,混合装入密封袋,迅速带回实验室。在实验室内,去除土壤中动植物残体和石砾后,过 2 mm 分样筛,一半样品用密封袋保存于 4 °C 冰箱用于微生物生物量碳和可溶性有机碳含量测定;另一半放置于牛皮纸上,在室温下自然风干后密封保存,用于土壤有机碳含量、土壤氮含量和土壤磷含量测定。

1.3 土壤样品测定

土壤含水量采用烘干法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 值采用土:水(1:2.5)的方法测定^[33];土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法,称取 0.01 g 土样,加入 5 mL 0.8 mol/L 的重铬酸钾溶液和 5 mL 硫酸溶液,230 °C 消煮 15 min,用 0.2 mol/L 的硫酸亚铁溶液滴定剩余重铬酸钾量,最后通过公式计算得出土壤有机碳含量^[34];土壤可溶性有机碳含量采用硫酸钾—重铬酸钾外加热法测定,称取 5 g 土样,加入 25 mL 0.5 mol/L 的硫酸钾溶液浸提 30 min 后过滤,取 5 mL 浸提液加入 5 mL 0.018 mol/L 的重铬酸钾—浓硫酸溶液,混匀后于 179 °C 消煮 10 min 后,用 0.2 mol/L 硫酸亚铁溶液滴定^[35];土壤全氮含量参考谭波等^[34]方法,称取 0.2 g 土样,加入一颗定氮片和 10 mL 浓硫酸过夜后于 180 °C 消煮 30 min,再经 350 °C 消煮 1 h 后,冷却定容于 100 mL 容量瓶中,取滤液于连续流动分析仪(Bran+Luebbe AA3, Germany)测定;土壤全磷含量采用连续流动分析法测定,称取 0.2 g 土样,加入 5 mL 浓硫酸和 1 mL 高氯酸混匀,180 °C 消煮 30 min 后,再于 350 °C 消煮至澄清,冷却后定容于 100 mL 容量瓶中,取滤液于连续流动分析仪(Bran+Luebbe AA3, Germany)测定。

土壤微生物生物量碳采用改进的氯仿熏蒸—硫酸钾浸提法测定^[33]。首先,分别称取两份 5 g 新鲜土壤样品置于真空干燥器中,一份使用氯仿熏蒸 24 h,另一份不经氯仿熏蒸;完成熏蒸的样品加入 25 mL 0.5 mol/L 的硫酸钾溶液浸提过滤;然后取 5 mL 滤液于消煮管中,加入 5 mL 0.018 mol/L 重铬酸钾—浓硫酸溶液混匀后 179 °C 消煮 10 min,然后用 0.2 mol/L 硫酸亚铁溶液滴定消煮液中剩余重铬酸钾含量,土壤微生物生物量碳为熏蒸土样与未熏蒸土样的差值。最后,通过土壤微生物量碳占有有机碳的百分比来计算土壤微生物熵^[9]。

1.4 数据处理与统计分析

通过 SPSS 26.0(IBM SPSS Statistics Inc., USA)软件,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对台风前后不同经营模式茶园土壤有机碳含量、微生物熵、微生物生物量碳和可溶性有机碳含量进行差异显著性检验;采用多因素方差分析(MANOVA)检验经营模式、台风时期、土层及其交互作用对微生物熵、微生物生物量碳和可溶性有机碳含量的影响;采用 Pearson 相关分析,分析台风前后土壤微生物熵、微生物生物量碳和可溶性有机碳含量与土壤理化性质之间的相关性。所有图片基于 R 语言(4.0.4)中 ggplot2 包和 Adobe Illustrator 2021 (Eastman Kodak, USA)软件完成。

2 结果与分析

2.1 台风对不同经营模式茶园土壤有机碳含量的影响

不同经营模式茶园的土壤有机碳含量的表现为 M2>M1>M0>M3(图 1)。同时 M0、M1 和 M3 的表层土壤有机碳含量大于亚表层土壤有机碳含量,而 M2 亚表层土壤有机碳含量大于表层土壤有机碳含量。M2 的表层土壤有机碳含量在台风干扰下表现为先上升后下降,M3 的亚表层土壤有机碳含量在台风干扰下呈上升趋势。不同经营模式茶园土壤有机碳含量受台风的影响程度因经营模式而异。其中,在不同台风时期 M2 的表

层土壤有机碳含量差异显著($P<0.05$),其他经营模式茶园无显著差异;在不同台风时期仅 M3 的亚表层土壤有机碳含量差异显著($P<0.05$),其他经营模式茶园无显著差异。M2 在台风过境后一天的表层土壤有机碳显著最高,而 M3 在台风过境后 7 天的亚表层土壤有机碳显著最高。M2 土壤有机碳含量对台风响应最敏感,M3 次之,M0 和 M1 没有响应。

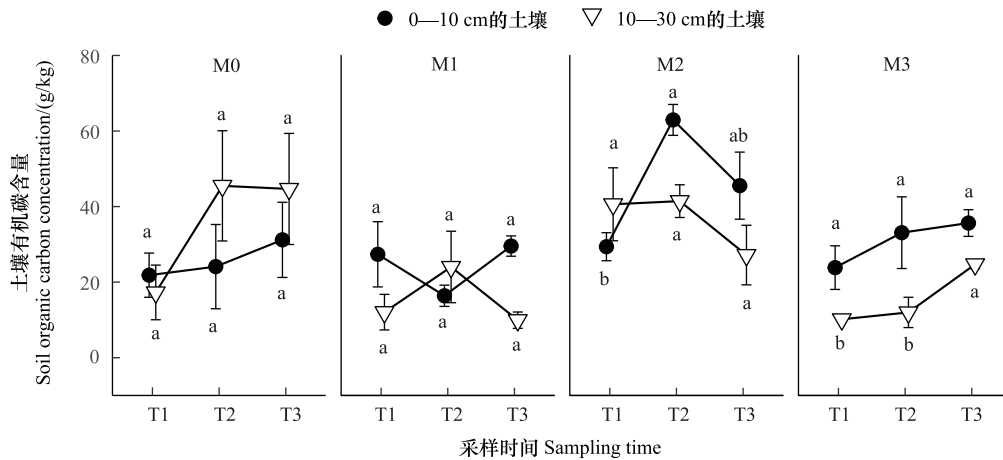


图 1 2021 年台风“烟花”对浙江天台山不同经营模式茶园土壤有机碳含量的影响

Fig.1 Effects of Typhoon "Fireworks" on soil organic carbon concentration in tea plantations with different management modes in Tiantai Mountain, Zhejiang Province in 2021

图中不同小写字母表示不同台风时期茶园土壤有机碳含量的差异显著($P<0.05$);T1:台风来临前一天;T2:台风过境后一天;T3:台风过境后第 7 天;M1:林茶间作;M2:茶园养鸡;M3:施用微生物肥料的纯茶园;A:0—10 cm 的土壤;B:10—30 cm 的土壤

2.2 台风干扰对不同经营模式茶园土壤微生物熵的影响

茶园土壤微生物熵随着经营模式、土层和台风干扰及其相互作用而显著变化(图 2)。不同经营模式茶园的土壤微生物熵的表现为 $M3>M1>M0>M2$ 。而且除 M2 外,M0、M1 和 M3 表层土壤的微生物熵均大于亚表层土壤的微生物熵。M3 的亚表层土壤微生物熵经历台风后呈下降趋势,而 M1 的亚表层土壤和 M2 两个土层的土壤经历台风干扰表现出一致的升高趋势。不同经营模式茶园土壤微生物熵对受台风影响程度不同。其中,在不同台风时期 M2 的表层土壤微生物熵差异显著($P<0.05$),其他经营模式茶园无显著差异;在不同台风时

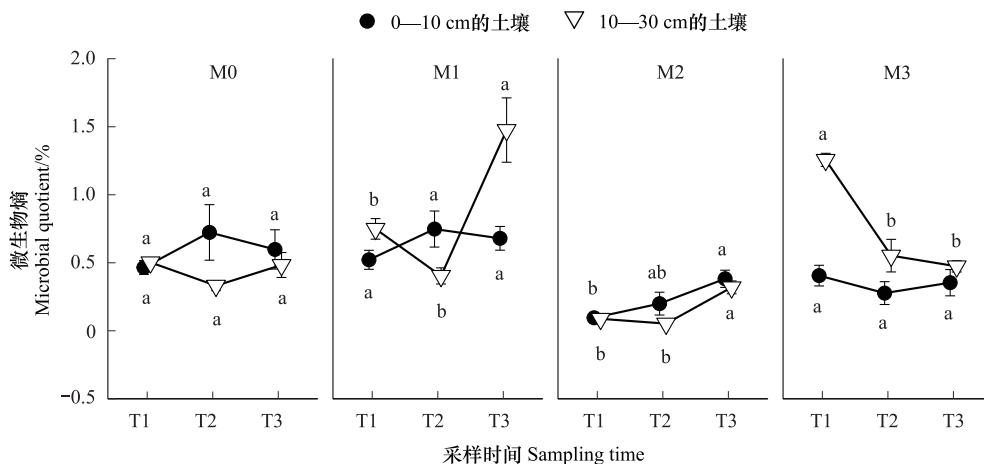


图 2 2021 年台风“烟花”对浙江天台山不同经营模式茶园土壤微生物熵的影响

Fig.2 Effects of Typhoon "Fireworks" on soil microbial quotient in tea plantations with different management modes in Tiantai Mountain, Zhejiang Province in 2021

期 M1、M2、M3 的亚表层土壤微生物熵均差异极显著 ($P < 0.01$), M0 无显著差异。M1 的亚表层土壤中台风过境后 7 天的微生物熵显著最高; M2 的表层土壤中台风过境后 7 天的土壤微生物熵显著高于台风来临前一天, 而其亚表层土壤中台风过境后 7 天的土壤微生物熵显著最高; M3 在台风来临前一天的亚表层土壤中微生物熵显著最高。M2 微生物熵对台风干扰响应更敏感, 其次是 M1 和 M3, M0 最弱。

2.3 台风干扰对不同经营模式茶园土壤微生物生物量碳含量的影响

不同经营模式茶园的土壤微生物生物量碳的表现为 $M3 > M1 > M0 > M2$ (图 3)。同时 M0 和 M1 的表层土壤微生物生物量碳大于亚表层土壤微生物生物量碳, 而 M2 和 M3 亚表层土壤微生物生物量碳大于表层土壤微生物生物量碳。M2 的表层和亚表层土壤微生物生物量碳在台风干扰下呈上升趋势, M3 的亚表层土壤微生物生物量碳在台风干扰下是先下降后上升。不同经营模式茶园土壤微生物生物量碳受台风的影响程度因经营模式而异。其中, 在不同台风时期 M2 的表层土壤微生物生物量碳差异显著 ($P < 0.05$), 其他经营模式茶园无显著差异; 在不同台风时期 M3 的亚表层土壤微生物生物量碳差异极显著 ($P < 0.01$), M2 差异显著 ($P < 0.05$), 其他经营模式茶园无显著差异。M2 在台风来临前一天的表层微生物生物量碳显著最低, 而 M2 在台风过境后一天的亚表层土壤微生物生物量碳显著最低。M2 微生物生物量碳对台风响应最敏感, M3 次之, M0 和 M1 没有响应。

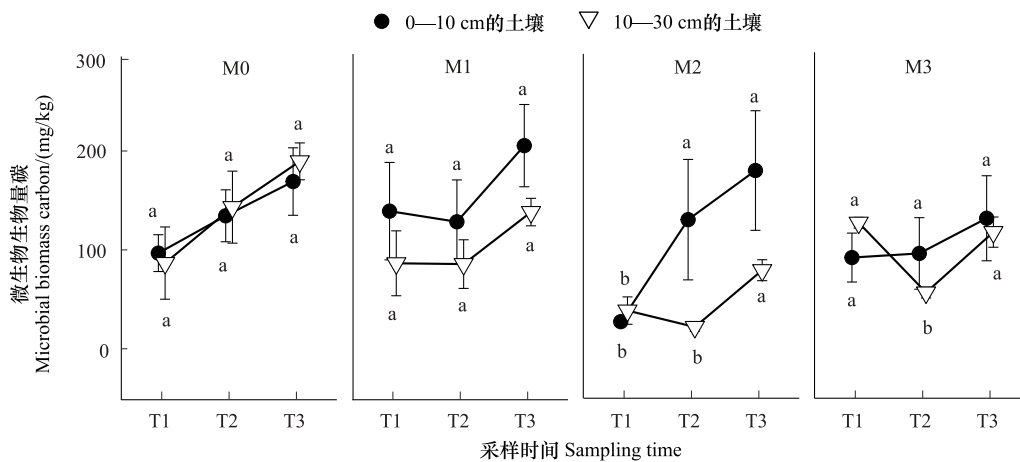


图 3 2021 年台风“烟花”对浙江天台山不同经营模式茶园土壤微生物生物量碳的影响

Fig.3 Effects of Typhoon "Fireworks" on soil microbial biomass carbon in tea plantations with different management modes in Tiantai Mountain, Zhejiang Province in 2021

2.4 台风对不同经营模式茶园土壤可溶性有机碳含量的影响

不同经营模式茶园的土壤可溶性有机碳含量的表现为 $M2 > M3 > M0 > M1$ (图 4)。同时 M0 和 M1 的表层土壤可溶性有机碳含量大于亚表层土壤可溶性有机碳含量, 而 M2 和 M3 的亚表层土壤可溶性有机碳含量大于表层土壤可溶性有机碳含量。M0 的亚表层土壤可溶性有机碳含量在台风干扰下呈下降趋势, 但 M1 的亚表层土壤可溶性有机碳含量在台风干扰下却呈上升趋势。在台风来临前 M2 的表层和亚表层土壤可溶性有机碳含量最高, M3 的表层土壤可溶性有机碳含量最低, M1 的亚表层土壤可溶性有机碳含量最低。不同经营模式茶园土壤可溶性有机碳含量受台风的影响程度也因经营模式而异。其中, 在不同台风时期 M0 的表层土壤可溶性有机碳含量差异极显著 ($P < 0.01$), M3 模式差异显著 ($P < 0.05$), 其他经营模式茶园无显著差异; 不同台风时期 M0 和 M1 的亚表层土壤可溶性有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$), 其他经营模式茶园无显著差异。M0 在台风过境后一天的表层土壤可溶性有机碳含量显著最低, 而其亚表层土壤中台风过境后 7 天的土壤可溶性有机碳含量显著低于台风来临前一天的土壤可溶性有机碳含量。M1 在台风来临前一天的亚表层土壤可溶性有机碳含量显著低于台风过境后 7 天后土壤可溶性有机碳含量。M3 在台风过境后一天的表层土壤可溶性有机碳含量显著高于台风过境后 7 天的土壤可溶性有机碳含量。M0 的可溶性有机碳含量对台风干扰响应更

敏感, M1 和 M3 次之, M2 最弱。

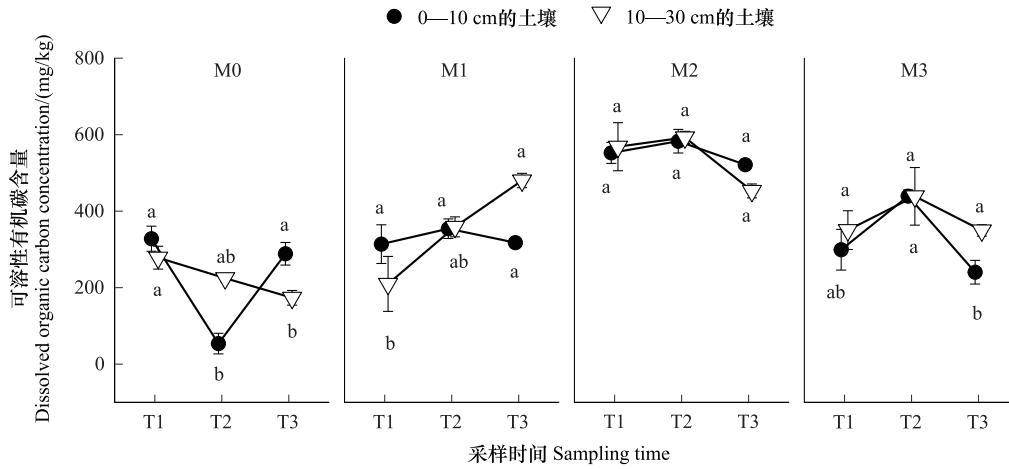


图 4 2021 年台风“烟花”对浙江天台山不同经营模式茶园土壤可溶性有机碳含量的影响

Fig.4 Effects of Typhoon "Fireworks" on soil dissolved organic carbon concentration in tea plantations with different management modes in Tiantai Mountain, Zhejiang Province in 2021

2.5 茶园土壤微生物熵的关键驱动因子

经营模式、台风时期、土层及其相互作用均显著影响了茶园土壤微生物熵(表 2)。而对茶园土壤微生物生物量碳,经营模式、台风时期和土层有显著影响。经营模式,经营模式与台风的交互作用以及经营模式、台风时期和土层的交互作用显著影响可溶性有机碳含量。土壤微生物熵与土壤微生物生物量碳为显著正相关,而与土壤可溶性有机碳含量、温度、有机质、土壤磷含量显著负相关(表 3)。同时,茶园土壤微生物生物量碳与土壤含水量、有机质、土壤氮含量为显著正相关。土壤可溶性有机碳含量与土壤温度、含水量、有机质表现为正相关性。

表 2 台风干扰对不同经营模式茶园土壤微生物熵、微生物生物量碳和可溶性有机碳的影响

Table 2 Effects of typhoon disturbance on soil microbial quotient, microbial biomass carbon and dissolved organic carbon of tea plantations under different management modes

	df	qMB	MBC	DOC		df	qMB	MBC	DOC
M	3	35.977 ***	3.983 *	78.901 ***	M * T	6	8.507 ***	0.961	9.613 ***
T	2	7.310 **	9.071 ***	1.173	M * L	3	11.248 ***	1.830	0.938
L	1	6.825 *	5.230 *	1.085	M * T * L	6	5.725 ***	0.691	5.074 ***
T * L	2	10.888 ***	0.988	1.758					

df: 自由度 degree of freedom; qMB: 土壤微生物熵 soil microbial quotient; MBC: 土壤微生物生物量碳 soil microbial biomass carbon; DOC: 土壤可溶性有机碳 soil dissolved organic carbon; M: 经营模式 management modes; T: 台风时期 typhoon periods; L: 土层 soil layers; *, P < 0.05; **, P < 0.01; ***, P < 0.001

表 3 茶园土壤理化性质与微生物熵、微生物生物量碳、可溶性有机碳的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil physicochemical properties with soil microbial quotient, microbial biomass carbon and dissolved organic carbon in tea plantations

	MBC	DOC	土壤温度 Soil temperature	土壤湿度 Soil moisture	pH	土壤容重 Soil bulk density	土壤有机质 Soil organic matter	土壤氮含量 Soil nitrogen concentration	土壤磷含量 Soil phosphorus concentration
qMB	0.34 **	-0.30 **	-0.25 *	-0.19	0.02	0.08	-0.552 **	-0.2	-0.28 *
MBC		-0.16	0.12	0.30 *	0.06	-0.06	0.41 **	0.39 **	0.11
DOC			0.35 **	0.32 **	-0.08	0.17	0.35 **	0.2	0.14

表中数字代表相关系数 r

3 讨论

3.1 不同经营模式茶园对土壤有机碳稳定性的影响

影响土壤有机碳稳定性的因素有有机碳自身的分子结构性质、土壤生物和非生物因子都会影响土壤有机碳的稳定性^[36-37],例如土壤可溶性有机碳、土壤微生物、植被类型、土壤水分和温度等。本项研究结果表明,土壤有机碳稳定性会因经营模式的不同而改变。有研究表明,在不同植被类型中微生物生物量碳在土壤有机碳中的百分比不同^[11]。此外,土壤微生物熵还会因土地利用方式的不同而存在差异^[12,38],因为土壤中凋落物形成以及微生物群落结构不同^[39-41],导致土壤中有机碳的积累与微生物生物量碳同化存在差异^[42],所以微生物熵随之发生变化^[43]。在本研究中,M2在台风来临前的微生物熵和土壤微生物生物量碳在四个经营模式茶园中最低,可能是因为M2中的鸡粪含有的较多腐殖质在酸性土壤中不易溶解^[44],使微生物能吸收的碳减少,而土壤有机碳积累^[45],导致微生物熵偏低。还有研究证明,土壤可溶性有机碳含量与土壤微生物熵具有密不可分的关系,因为土壤可溶性有机碳含量对土壤有机碳的形成、土壤有机碳稳定性以及微生物群落结构有显著影响^[46-48]。本研究中台风来临前M2的土壤可溶性有机碳含量最高,但其土壤微生物熵最低,可能是土壤为维持碳库稳定而处于一种动态平衡状态。另外,有研究表明环境因子也会对微生物熵的产生影响,例如土壤温度,其可能是通过升高温度使微生物更多地同化土壤中碳,使微生物生物量碳增加^[46],从而提高了微生物熵。

3.2 不同经营模式茶园土壤对台风干扰的响应

在本研究中,M1、M2和M3的亚表层土壤微生物熵响应台风干扰的程度显著大于表层土壤,可能的原因是台风的强降雨通过淋滤作用,将土壤上一部分的凋落物碎片和养分带到了亚表层土壤中而被截留,通过微生物的分解与同化而使微生物熵对台风做出响应。本研究结果表明,M2土壤微生物熵对台风干扰更敏感。在不同的台风时期茶园土壤微生物生物量碳都有上升的趋势,可能原因是台风带来的降雨以及台风过境后天气转暖,增加了土壤中水的可利用性和提高了土壤温度,使微生物活性增加。其中,台风干扰下M2的微生物熵和微生物生物量碳呈上升趋势,可能原因是台风带来的强降雨降低了土壤的酸度促使土壤中有机碳更多的溶解而增加了微生物分解代谢所需的有机碳^[44],微生物可利用碳的增加和温度的作用使微生物生长,土壤微生物生物量碳提高,故而提高了土壤微生物熵。有研究表明,微生物活动容易受气候变化的影响^[49],而且温度对土壤有机质和微生物的活性与生物量有显著影响^[10],从而导致土壤微生物熵变化。然而与M1和M2不同的是,在台风干扰下M3的亚表层土壤微生物熵呈下降趋势。M3喷洒的微生物肥料以芽孢杆菌为主,芽孢杆菌是一种对外界有害因子抵抗力强的细菌,它不仅耐旱耐高温,而且还耐酸碱性^[50]。因此,芽孢杆菌在偏酸性的茶园土壤中可能更适宜生存,喷洒了微生物肥料后土壤中的微生物群落优势物种可能发生了转变,所以M3在不同台风时期中的土壤微生物熵变化趋势与其他经营模式茶园不同。还可能是因为台风强降雨把一部分微生物冲走,导致土壤微生物生物量碳降低,表层土壤的可溶性有机碳被截留在亚表层土壤增加了有机碳含量,从而使M3的土壤微生物熵降低。因此,证明台风干扰会对不同经营模式茶园土壤微生物熵影响程度不同,其对茶园土壤有机碳稳定性造成一定的影响。

4 结论与展望

以往研究多关注不同经营模式茶园对茶叶质量与产量,土壤的有机碳和养分的影响,但往往忽略台风对茶园土壤造成的变化,和土壤微生物熵对台风的响应。本文研究表明,为不同经营模式茶园土壤碳对台风的响应提供基础。同时,台风期间不同经营模式茶园土壤微生物熵中茶园养鸡和林茶间作的亚表层土壤趋势一致,说明这两种经营模式茶园应对台风的响应的效果有相似之处。不过,本研究对于茶园土壤微生物熵对台风影响的长期响应还缺乏持续关注。因此,想要深入了解台风对不同经营模式茶园土壤微生物熵的长期影响,还需要进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] World Meteorological Organization. Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. Geneva, WMO, 1993.
- [2] Xi W M, Peet R K, Lee M T, Urban D L. Hurricane disturbances, tree diversity, and succession in North Carolina Piedmont forests, USA. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(1): 219-231.
- [3] Zong S W, He H S, Liu K, Du H B, Wu Z F, Zhao Y, Jin H. Typhoon diverged forest succession from natural trajectory in the treeline ecotone of the Changbai Mountains, Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2018, 407: 75-83.
- [4] International Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Geneva, IPCC, 2021.
- [5] 从辰宇, 韩剑桥, 焦菊英, 冯伟, 马春玲, 谢梦霞, 刘元昊, 黑哲, 戈文艳, 李连胜, 王国振, 王飞. 台风“利奇马”暴雨引发的土壤侵蚀调查研究——以山东省临朐县为例. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 337-344, 349.
- [6] Salmo S G, Lovelock C E, Duke N C. Assessment of vegetation and soil conditions in restored mangroves interrupted by severe tropical typhoon ‘Chan-hom’ in the Philippines. *Hydrobiologia*, 2014, 733(1): 85-102.
- [7] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Soil Research*, 1992, 30(2): 195-207.
- [8] Xu X F, Schimel J P, Thornton P E, Song X, Yuan F M, Goswami S. Substrate and environmental controls on microbial assimilation of soil organic carbon: a framework for Earth system models. *Ecology Letters*, 2014, 17(5): 547-555.
- [9] Cao R, Yang W Q, Chang C H, Wang Z, Wang Q, Jiang Y R, Li H, Tan B. Soil microbial biomass carbon and freeze-thaw cycles drive seasonal changes in soil microbial quotient along a steep altitudinal gradient. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(9): e2021JG006325.
- [10] Ghosh A, Das A, Das D, Ray P, Bhattacharyya R, Biswas D R, Biswas S S. Contrasting land use systems and soil organic matter quality and temperature sensitivity in North Eastern India. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: 104573.
- [11] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749.
- [12] Woloszczyk P, Fiencke C, Elsner D C, Cordsen E, Pfeiffer E M. Spatial and temporal patterns in soil organic carbon, microbial biomass and activity under different land-use types in a long-term soil-monitoring network. *Pedobiologia*, 2020, 80: 150642.
- [13] Ziegler S E, Billings S A, Lane C S, Li J W, Fogel M L. Warming alters routing of labile and slower-turnover carbon through distinct microbial groups in boreal forest organic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 60: 23-32.
- [14] Lin K C, Hamburg S P, Tang S L, Hsia Y J, Lin T C. Typhoon effects on litterfall in a subtropical forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(11): 2184-2192.
- [15] Yue S D, Zhang X M, Xu S C, Liu M J, Qiao Y L, Zhang Y, Liang J H, Wang A D, Zhou Y. The super typhoon Lekima (2019) resulted in massive losses in large seagrass (*Zostera japonica*) meadows, soil organic carbon and nitrogen pools in the intertidal Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148398.
- [16] Jin D Y, Xu Y, Mei X, Meng Q, Gao Y, Li B, Tu Y Y. Antiobesity and lipid lowering effects of theaflavins on high-fat diet induced obese rats. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(3): 1142-1150.
- [17] 蓝雪铭, 刘志彬, 倪莉. 乌龙茶保健功效的研究进展. *中国食品学报*, 2014, 14(2): 201-207.
- [18] 王茹茹, 肖孟超, 李大祥, 凌铁军, 谢忠稳. 黑茶品质特征及其健康功效研究进展. *茶叶科学*, 2018, 38(2): 113-124.
- [19] FAO and CAAS. Carbon Neutral Tea Production in China - Three Pilot Case Studies. Rome, 2021.
- [20] 杨永耀. 发展生态茶园走可持续茶业之路. *茶业通报*, 2000, 22(3): 26-27.
- [21] 韩文炎, 阮建云, 林智, 吴洵, 许允文, 石元值, 马立峰. 茶园土壤主要营养障碍因子及系列茶树专用肥的研制. *茶叶科学*, 2002, 22(1): 70-74, 65.
- [22] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015: 123-209.
- [23] 王怀宾, 胥晓, 杨万勤, 曹瑞, 王芝慧, 郑冰倩, 吕浩池, 刘婷婷. 城市园林不同生活型植物叶片碳、氮、磷生态化学计量特征及其对台风的响应. *生态学报*, 2021, 41(22): 8931-8938.
- [24] 谈科, 姜彤, 王艳君, 温姗姗, 苏布达, 翟建青. 1984—2019 年影响中国东南沿海城市的热带气旋及其经济损失变化特征. *海洋通报*, 2021, 40(4): 465-472.
- [25] 董加斌, 黄新晴. 登陆浙江的台风路径分类和暴雨落区分析. *浙江气象*, 2019, 40(3): 13-19.
- [26] 韩鹏, 郭桂祯, 李鑫磊, 刘菁菁. 浙江省台风灾情时空分布特征及影响因素研究. *自然灾害学报*, 2022, 31(4): 97-106.
- [27] 朱业, 丁骏, 卢美, 王晶, 王勤. 1949—2009 年登陆和影响浙江的热带气旋分析. *海洋预报*, 2012, 29(2): 8-13.

- [28] 萧自位, 王丽娟, 毛加梅, 朱兴正, 王小李, 郑丽, 唐建维. 西双版纳不同林茶复合生态系统碳储量. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1617-1625.
- [29] 宋同清, 王克林, 彭晚霞, 王久荣, 肖润林, 曾馥平, 汤宇. 亚热带丘陵茶园间作白三叶草的生态效应. 生态学报, 2006, 26(11): 3647-3655.
- [30] 徐文武, 俞燎远, 周小芬. 茶园养鸡生态循环农业发展模式研究. 茶叶, 2016, 42(1): 31-33.
- [31] Yan P, Shen C, Fan L C, Li X, Zhang L P, Zhang L, Han W Y. Tea planting affects soil acidification and nitrogen and phosphorus distribution in soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 254: 20-25.
- [32] 邹奕巧, 孙欧文, 刘海英, 蔡人岳, 林松, 葛宏立, 吴家森. 浙江省天台县不同森林类型枯落物及土壤水文特性. 水土保持通报, 2020, 40(3): 170-174.
- [33] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 谭波, 王滨, 李俊, 常晨晖. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1257-1264.
- [34] 谭波, 倪祥银, 吴福忠, 李娇. 森林土壤实验常规分析方法. 成都: 四川大学出版社, 2020.
- [35] Rochette P, Gregorich E G. Dynamics of soil microbial biomass C, soluble organic C and CO₂ evolution after three years of manure application. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 78(2): 283-290.
- [36] 徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 崔晓阳. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 222-230.
- [37] 崔向超. 秸秆对茶园土壤有机碳稳定性影响的研究进展. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2019, 32(2): 259-265.
- [38] Koné A W, Yao M K. Soil microbial functioning and organic carbon storage: can complex timber tree stands mimic natural forests? *Journal of Environmental Management*, 2021, 283: 112002.
- [39] Wu W X, Zhou X G, Wen Y G, Zhu H G, You Y M, Qin Z W, Li Y C, Huang X M, Yan L, Li H Y, Li X Q. Coniferous-broadleaf mixture increases soil microbial biomass and functions accompanied by improved stand biomass and litter production in subtropical China. *Forests*, 2019, 10(10): 879.
- [40] Koutika L S, Cafiero L, Bevivino A, Merino A. Organic matter quality of forest floor as a driver of C and P dynamics in acacia and eucalypt plantations established on a Ferralic Arenosols, Congo. *Forest Ecosystems*, 2020, 7: 40.
- [41] Wang J C, Zou Y K, Di Gioia D, Singh B K, Li Q F. Conversion to agroforestry and monoculture plantation is detrimental to the soil carbon and nitrogen cycles and microbial communities of a rainforest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 147: 107849.
- [42] Koné A W, Kassi S P A Y, Koffi B Y, Masse D, Maïga A A, Tondoh J E, Kisaka O M, Touré G P T. *Chromolaena odorata* (L.) K&R (Asteraceae) invasion effects on soil microbial biomass and activities in a forest-savanna mosaic. *CATENA*, 2021, 207: 105619.
- [43] Borase D N, Murugean S, Nath C P, Hazrab K K, Singh S S, Kumar N, Singh U, Praharaj C S. Long-term impact of grain legumes and nutrient management practices on soil microbial activity and biochemical properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(14): 2015-2032.
- [44] 刘天海, 羊淑琴, 刘付彭, 苗人云, 余洋, 吴翔, 唐杰, 王勇, 彭卫红, 谭昊. 麦秸鸡粪发酵有机肥对六妹羊肚菌连作的影响. 生物技术通报, 2022, 38(12): 1-11.
- [45] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, Campbell E E, Haddix M L, Wall D H, Parton W J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776-779.
- [46] Xu G, Chen J, Berninger F, Pumpanen J, Bai J W, Yu L, Duan B L. Labile, recalcitrant, microbial carbon and nitrogen and the microbial community composition at two *Abies faxoniana* forest elevations under elevated temperatures. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 91: 1-13.
- [47] Ma C, Chen X, Zhang J Z, Zhu Y P, Kalkhajah Y K, Chai R S, Ye X X, Gao H J, Chu W Y, Mao J D, Thompson M L. Linking chemical structure of dissolved organic carbon and microbial community composition with submergence-induced soil organic carbon mineralization. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 930-939.
- [48] Zhang X Q, Li Z W, Nie X D, Huang M, Wang D Y, Xiao H B, Liu C, Peng H, Jiang J Y, Zeng G M. The role of dissolved organic matter in soil organic carbon stability under water erosion. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 724-733.
- [49] Xu Z W, Zhang T Y, Wang S Z, Wang Z C. Soil pH and C/N ratio determines spatial variations in soil microbial communities and enzymatic activities of the agricultural ecosystems in Northeast China: Jilin Province case. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103629.
- [50] 陈中义, 张杰, 黄大昉. 植物病害生防芽孢杆菌抗菌机制与遗传改良研究. 植物病理学报, 2003, 33(2): 97-103.