

茶园土壤微生物量碳的质量分数及其影响因素的研究

李梦菡, 张丽平, 李 鑫, 颜 鹏, 张 兰, 韩文炎*

(中国农业科学院茶叶研究所, 浙江 杭州 310008)

摘 要: 对 148 个茶园土壤的微生物量碳 (MBC) 质量分数及其影响因素进行了研究。结果表明, 茶园土壤 MBC 的质量分数 (ω_{mic}) 在 38.1 ~ 680.2 mg · kg⁻¹ 之间, 平均为 246.0 mg · kg⁻¹, 其含量变化幅度较大, 主要受到土壤有机碳、pH、茶园管理方式、植茶年限、成土母质以及全氮量的影响。(1) 茶园土壤的 ω_{mic} 与有机碳的质量分数 (ω_{org}) 呈显著正相关, 与 pH 存在一定范围的正相关, 改良过度酸化的土壤能明显提高 ω_{mic} 。(2) ω_{mic} 随植茶年限的增加呈现先升高后降低的趋势, 在 45 年左右的茶园中含量最高, 达到了 (597.7 ± 89.2) mg · kg⁻¹。(3) 有机管理茶园的 ω_{mic} 显著高于转换茶园和常规茶园 ($P < 0.05$)。(4) 花岗岩、安山斑岩和红砂岩发育的茶园土壤的 ω_{mic} 显著高于第四纪红土和石灰岩发育的土壤 ($P < 0.05$)。(5) ω_{mic} 随茶园全氮量的增加也呈先升高后降低的趋势。在茶园土壤 ω_{mic} 的影响因素中, 影响最大的是土壤有机碳, 其次为 pH、成土母质、植茶年限及全氮量。由此可见, 要提高茶园土壤的 ω_{mic} , 可采取多施有机肥, 推广有机茶园管理模式, 合理施氮, 适当提高土壤 pH 和改植换种老茶园等措施。

关键词: 茶园; 土壤微生物量碳; 有机碳; pH; 有机茶园模式

土壤微生物量碳 (MBC) 是土壤有机质中最活跃的部分, 是土壤养分的重要来源, 约占土壤有机碳的 1% ~ 5%^[1]。我国土壤 MBC 的质量浓度变幅为 42.0 ~ 2064.0 kg · hm⁻², MBC 参与土壤有机质的分解, 并与土壤碳、氮、磷和硫等养分元素的循环密切相关^[2-3]。作为土壤活性有机碳的表征指标之一, MBC 虽然占比较小, 但由于直接参与了土壤生物化学过程, 是重要的土壤有效养分储备库, 其在土壤养分转化、有机物代谢及污染物的降解中发挥着非常重要的作用, 被认为是整个生态系统养分和能量循环的关键和动力^[4-5]。此外, MBC 具有极高的灵敏度, 可以在土壤有机碳发生变化之前反映出土壤微小的变化, 能作为土壤生态系统变化的预警指标^[6]。

茶园土壤微生物具有固氮、释钾、解磷和分解有机物质以及增强土壤保湿性等优点, 能有效调节茶园小气候, 促进茶芽萌发及茶树次生代谢, 减少

茶树病虫害, 因此对茶园土壤微生物的研究非常重要^[7]。目前对茶园土壤 MBC 含量的研究较少, 主要集中在对水稻、小麦和蔬菜等大田作物的研究上。现有的研究表明, 茶园土壤的 MBC 含量比其他农业用地如蔬菜、柑橘和稻田等土壤高^[8-9], 中龄茶园高于幼龄和老龄茶园^[10], 间作三叶草和覆盖茶园较高^[11]。但目前对茶园土壤 MBC 及其影响因素的研究还不够全面和明确。

本文采用熏蒸提取法^[12], 对浙江不同类型茶园共 148 个土壤样本的 MBC 质量分数 (ω_{mic}) 进行了测定, 分析了土壤 pH、有机碳、树龄、茶园管理方式以及成土母质等因素对茶园土壤 MBC 的影响, 以此为茶园土壤改良, 提高土壤肥力水平提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 取样地点与方法

土壤样品主要采自浙江杭州、绍兴、金华和丽水地区有代表性的茶园。所取茶园土壤样品总数 148 个, 包括不同的土壤 pH、植茶年限、成土母质、施肥类型、管理方式等。茶园取土时, 先除去土表的枯株落叶, 取土深度为 0 ~ 20 cm。样品多点采集混合, 样品中的石头、植物根系和易见的动物拣除后, 尽快拿回实验室, 过 2 mm 筛, 过湿

收稿日期: 2019-12-17; 录用日期: 2020-02-21

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点项目 (2017YFE0107500); 中国农业科学院科技创新工程 (CAAS-ASTIP-2015-TRICAAS-08)。

作者简介: 李梦菡 (1996-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为茶树栽培生理与生态。E-mail: lmhan0813@126.com。

通讯作者: 韩文炎, E-mail: hanwy@tricaas.com。

的土样稍加晾干后过筛,但应避免过度干燥,以免影响土壤微生物的活性。将样品分成两部分,一部分存放在4℃的冰箱中或直接进行土壤微生物量测定,另一部分风干、研磨、过筛,用于土壤基本理化性质的测定。

不同类型茶园土壤,包括石灰石粉改良、不同管理方式、不同植茶年龄、不同成土母质茶园的取样地点及基本情况见图1、表1。这些茶园在取样时均取3个独立的土样,每个土样由8~10个取样点混合,土样质量较大时用四分法减少至合适的量。

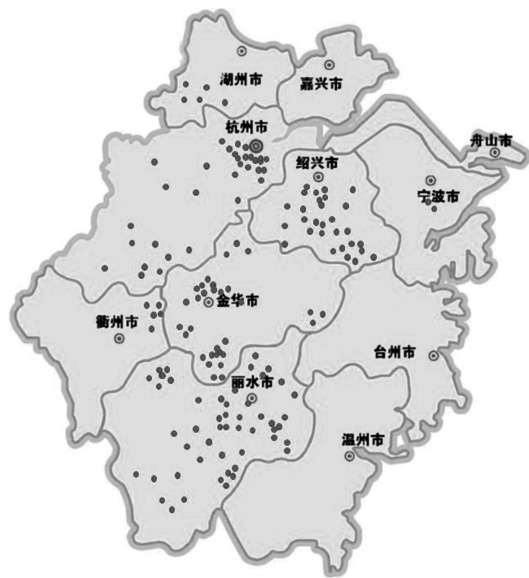


图1 茶园土壤取样点

表1 取样点基本情况

项目	数量(个)	取样地点
不同理化性质的茶园	148	杭州、绍兴、金华、宁波、丽水、衢州
不同有机质的茶园	148	绍兴, 金华
不同种植年限的茶园	24	杭州, 丽水
不同成土母质的茶园	15	杭州, 绍兴, 金华, 衢州

注:测定样品中多数土壤的种植年龄及成土母质不够明确,因此为了可靠性只选择了种植年龄清楚明确、成土母质特征明显且差异较大的样品进行分析。

1.1.1 不同石灰石粉改良茶园

取自中国农业科学院茶叶研究所严重酸化的改良试验地,该试验地碳酸钙使用量分别为0、1200、2400、4800和7200 kg·hm⁻²,其中7200 kg·hm⁻²处理于2002年秋和2003年春分2次施入,其余处理于2002年秋一次性施入。碳酸钙均匀施于茶树行间后深翻。本次测定土壤取于2010

年秋季施基肥前。

1.1.2 不同管理方式茶园

本试验茶园管理方式选择了有机、转换和常规茶园,其中转换茶园是指开始按有机生产方式管理,从常规茶园向有机茶园过渡的类型。取样点分别是绍兴御茶村和金华武义采云间公司基地。取样时绍兴点按有机茶园管理方式已达9年,武义点为11年。绍兴点有机茶园有机肥的使用量为9000 kg·hm⁻²,有些年份每年施2次,武义点年施有机肥6000 kg·hm⁻²;转换茶园按有机农业管理方式均为2年。常规茶园化肥与有机肥相结合,有机肥使用量一般在4500 kg·hm⁻²左右,化肥纯氮使用量一般在450 kg·hm⁻²左右。

1.1.3 不同种植年限茶园

本试验不同种植年龄茶园分别取自杭州中国农业科学院茶叶研究所生产茶园和丽水景宁惠明茶业公司。杭州点种植年龄分别为0(森林土)、10、50、90年茶园,景宁点为0(生荒地)、6、24、46年生茶园。除森林土和生荒地外,其它不同种植年龄的茶园管理方式基本相同。

1.1.4 不同成土母质茶园

本试验选择的成土母质为第四纪红土、石灰岩、第三纪红砂岩、安山斑岩和花岗岩,分别取自兰溪赤山湖农庄、杭州翁家山、龙游大鼓山茶场、杭州中国农业科学院茶叶研究所和嵊州金庭镇。所取茶园的树龄均为35年左右,茶园管理方式基本相同。

1.2 样品测定

主要测定土壤MBC的质量分数 ω_{mic} ,以及其它土壤基本理化性质,包括粘粒、pH、有机碳、全氮、有效磷、交换性钾和交换性镁的质量分数等。

1.2.1 土壤微生物量碳的测定

采用熏蒸提取法^[12]。准确称取30.00 g(按干土计算)土样6份,其中3份至烧杯中作熏蒸处理,3份于塑料瓶中不作熏蒸处理,直接浸提。熏蒸处理的土样放入可抽真空的干燥器内,底部放有几张湿的滤纸,一小烧杯除去乙醇的氯仿(约30 mL,内放碎滤纸片或防爆玻璃珠若干,看氯仿是否沸腾)和一小烧杯钠石灰吸收熏蒸期间释放的CO₂。抽真空后,让氯仿沸腾约2~3 min后关闭真空阀。把真空干燥器放入25℃黑暗恒温室内保持24 h。然后拿出干燥器底部的湿纸,擦净,抽真空3~5次,每次3~5 min,彻底除去土样中的氯仿。

将熏蒸处理的土样转入塑料瓶内,加 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 溶液浸提,土液比为 1:4,振荡 30 min,过滤。滤液测定土壤可溶性有机碳的浓度。如不能及时测定,则放入 -18°C 冰箱中保存。

滤液中的可溶性有机碳用 TOC-500 有机碳自动分析仪测定。土壤 MBC 的质量分数用公式 $B_c=E_c/K_c$ 计算,式中 B_c 为微生物量碳, E_c 是熏蒸与未熏蒸土样提取可溶性有机碳浓度的差值, K_c 为转换系数,本文采用 0.45^[13]。

1.2.2 土壤其他理化性质的测定

土壤 pH 用蒸馏水提取,土液比为 1:1,玻璃电极法测定。土壤有机碳和全氮采用 Elmentar VarioMax CN 自动分析仪测定。土壤有效磷用 Bray 1 ($0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{F}-0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HCl}$) 提取,土液比为 1:10,振荡提取 0.5 h;交换性钾和交换性镁用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH 7.0 的乙酸铵浸提,土液比为 1:10,振荡提取 0.5 h^[14]。溶液中的磷、钾和镁的质量分数用 ICP-AES 测定。土壤粘粒的质量分数采用比重计法测定。

所有测定均重复 3 次。

1.3 数据处理

所有数据均以土壤干重计,数据整理采用 Excel 2016,单因素方差分析 (ANOVA) 采用数理统计软件 SPSS 13.0 运算,处理间平均数的比较采用最小显

著差数法 (LSD),显著性差异设定为 $P<0.05$ 。图表中的数据用平均值 $\pm$ 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 供试土壤的基本理化性质

对 148 个供试茶园土壤基本理化性状的测定表明,茶园土壤 pH 在 3.09 ~ 6.36 之间,平均为 4.02;土壤有机碳的质量分数在 0.32% ~ 4.30% 之间,平均为 1.86%;土壤全氮的质量分数在 0.04% ~ 0.45% 之间,平均为 0.16%;土壤有效磷在 $0.4 \sim 670.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,变幅较大,变异系数高达 151.0%;交换性钾在 $27.3 \sim 378.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $104.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;交换性镁在 $9.5 \sim 189.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $42.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤粘粒的质量分数在 20.0% ~ 56.6% 之间,平均为 39.2% (表 2)。结果表明,供试茶园土壤基本处于偏酸性环境,多数低于茶园最适 pH 4.5 ~ 5.5;不同土壤间各理化性状差异较大,除有效磷外,交换性镁的变异系数也高达 86.7%。但多数供试土壤的有机碳、全氮、有效磷、交换性钾达到了高产茶园土壤营养指标^[15],交换性镁的平均值也接近于该指标。因此,供试茶园土壤肥力水平总体较高。

表 2 供试茶园土壤的基本理化性质

项目	样品数	最小值	最大值	平均值	变异系数 (%)
pH (H_2O)	148	3.09	6.36	4.02	13.9
有机碳 (%)	148	0.32	4.30	1.86	39.8
全氮 (%)	148	0.04	0.45	0.16	43.8
粘粒 (%)	126	20.0	56.6	39.2	20.8
有效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	148	0.4	670.8	91.3	151.0
交换性钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	130	27.3	378.2	104.2	60.3
交换性镁 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	130	9.5	189.8	42.1	86.7

注:由于部分茶园未检测粘粒含量、交换性钾、交换性镁含量,因此这 3 项的样品数未达 148。

2.2 土壤微生物量碳及微生物熵

所测茶园土壤 MBC 的 ω_{mic} 在 $38.1 \sim 680.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $246.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤微生物熵,即土壤 MBC 与有机碳的比值 ($C_{\text{mic}}/C_{\text{org}}$),在 0.38% ~ 4.28% 之间,平均为 1.37%。 ω_{mic} 集中于 $200 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,占样品总数的 73.0%, $100 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间土样占 34.5%,低于 100

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和高于 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样品占比较少 (表 3)。有研究表明,长期种植单一作物的土壤 $C_{\text{mic}}/C_{\text{org}}$ 平均为 2.30%^[16]。测定结果表明,仅有 9.5% 的茶园土壤 $C_{\text{mic}}/C_{\text{org}}$ 高于 2.30%,低于 1.37% 的土壤占 59.4%。 $C_{\text{mic}}/C_{\text{org}}$ 作为碳动态和土壤质量的有效指标^[17],反映了茶园土壤有机碳转化为 MBC 的效率较低。

表 3 茶园土壤微生物量碳的分布状况

项目	土壤微生物量碳的质量分数 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)					合计
	<100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	>400	
样品数 (个)	21	51	29	28	19	148
样品数比 (%)	14.2	34.5	19.6	18.9	12.8	100

2.3 茶园土壤微生物量碳的影响因素

2.3.1 土壤微生物量碳与多种影响因子的相关性分析

对所测茶园土壤样品的 MBC 与土壤 pH、有机碳含量、全氮量以及粘粒含量进行了多元线性回归分析, 由于管理方式、种植年龄与成土母质数据及样本量的特殊性, 故未纳入此分析。结果表明, 模型认为有机碳对 MBC 的影响最大; $F=13.268$, $P=0.000$ ($P<0.05$), 因此 MBC 与 pH、TN、粘粒、有机碳具有线性关系, 且多元线性回归方程为 $Y=36.618+13.246X_1-548.059X_2-1.226X_3+160.727X_4$ (X_1 为 pH、 X_2 为 TN、 X_3 为粘粒、 X_4 为有机碳), 且 $P_1=0.587$ 、 $P_2=0.079$ 、 $P_3=0.395$ 、 $P_4=0.000$, 故有机碳具有显著性意义, 而 TN、pH 和粘粒含量未达显著性意义。

2.3.2 土壤 pH 对土壤微生物量碳的影响

对所测茶园土壤的 MBC 与 pH 的相关性分析表明, 在一定范围内, 两者存在正相关。具体表现为, 对严重酸化的茶园土壤使用石灰石粉进行改良后, ω_{mic} 可明显提高。图 2 表明, 随着石灰石粉使用量的增加, 土壤 pH 提高, ω_{mic} 也随之增加, 且以碳酸钙使用量 $2400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理最高, 达 $(581.0 \pm 20.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 当碳酸钙使用量增加到 4800 和 $7200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, pH 虽进一步升高, 但 ω_{mic}

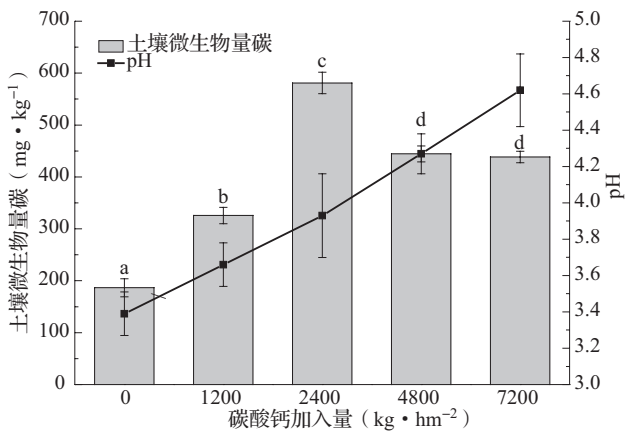


图 2 石灰石粉使用量与土壤微生物量碳及 pH 的关系

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

反而有所降低, 说明 pH 对茶园土壤 ω_{mic} 的影响较为复杂。

2.3.3 土壤有机碳对土壤微生物量碳的影响

对所测茶园土壤 MBC 与有机碳的相关分析表明, 两者存在极显著的正相关, 相关方程为 $Y=109.79X+42.193$ ($R^2=0.303$, $P<0.001$) (图 3)。可见, 有机质能为土壤微生物提供营养物质, 促进微生物数量的增加, 从而提高茶园土壤的 ω_{mic} 。

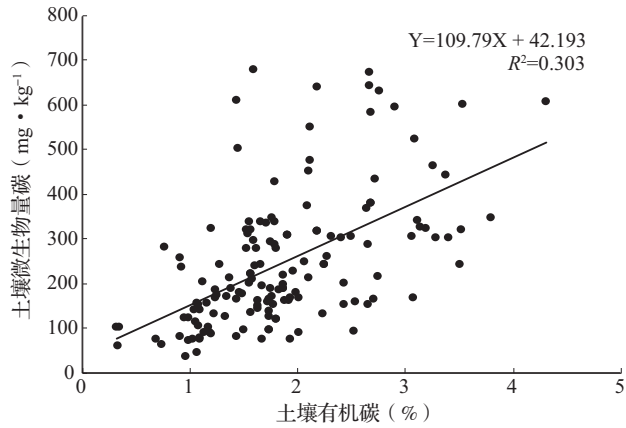


图 3 土壤微生物量碳与有机碳的关系

2.3.4 管理方式对土壤微生物量碳的影响

茶园管理方式不同, 对土壤 MBC 的 ω_{mic} 也有明显的影响。本文选择了有机、转换和常规茶园, 比较了土壤 ω_{mic} 的差异。结果表明, 无论是绍兴市取样点还是金华市武义点, 均表现为有机茶园的 ω_{mic} 显著高于转换茶园, 转换茶园又明显高于常规茶园 (表 4)。例如, 绍兴御茶村有机茶园的 ω_{mic} 高达 $605.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别是转换和常规茶园的 1.73 和 2.12 倍。本文还结合了管理方式对土壤有机碳的 ω_{org} 的影响进行分析 (表 4), 结果发现其在有机茶园中明显高于转换茶园与常规茶园, 与 ω_{mic} 的变化一致。因此推测, 有机茶园由于不施化学肥料和农药, 加强有机肥的使用, 从而提高了土壤的 ω_{org} , 有利于土壤微生物活性的增加。

表4 茶园管理方式对土壤微生物量碳及有机碳的影响

茶园类型	土壤微生物量碳含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		土壤有机碳质量分数 (%)	
	绍兴	武义	绍兴	武义
有机	605.6 $\pm$ 17.1a	199.0 $\pm$ 17.2a	2.58 $\pm$ 0.21a	1.91 $\pm$ 0.05a
转换	350.7 $\pm$ 21.3b	169.1 $\pm$ 8.1ab	2.40 $\pm$ 0.12a	1.81 $\pm$ 0.08ab
常规	285.2 $\pm$ 12.2b	114.8 $\pm$ 9.4b	2.20 $\pm$ 0.22a	1.75 $\pm$ 0.04c

注：表中同一列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.5 种植年限对土壤微生物量碳的影响

本试验对丽水市景宁点种植年龄为0 (生荒土)、6、24、46年生茶园及杭州点0 (森林土)、10、50、90年茶园土壤的 ω_{mic} 进行了分析。结果表明,景宁点除6年生茶园比生荒土略低外, ω_{mic} 均随茶园种植年龄增加而明显提高,且46年生茶园显著高于其他年龄茶园。杭州点也有同样的趋势, ω_{mic} 随植茶年龄增加而提高,50年生的茶园土壤最高,90年生的最低,但不同树龄间无显著性差异(表5)。

表5 植茶年限对土壤微生物量碳的影响

取样地点	树龄 (年)	土壤微生物量碳的质量分数 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
景宁	0	86.1 $\pm$ 17.5 cd
	6	66.7 $\pm$ 16.6 d
	24	175.4 $\pm$ 60.3 bc
	46	597.7 $\pm$ 89.2 a
杭州	0	172.7 $\pm$ 16.8 a
	10	203.2 $\pm$ 34.3 a
	50	214.1 $\pm$ 30.1 a
	90	165.3 $\pm$ 27.1 a

注：表中同一取样点不同树龄后面不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3.6 成土母质对土壤微生物量碳的影响

试验研究了常见成土母质对茶园土壤MBC的 ω_{mic} 的影响,结果表明花岗岩发育的 ω_{mic} 最高,其次是安山斑岩,红砂岩第三,石灰岩第四,第四纪红土最低(表6)。其中花岗岩、安山斑岩和红砂岩等母质发育的砂质土壤显著高于石灰岩和第四纪红土发育的粘质土壤。由于偏砂性土壤的粘粒含量远低于粘质土壤,因此试验对所测茶园土壤粘粒与 ω_{mic} 相关性进行了分析。结果表明,粘粒含量与 ω_{mic} 的关系呈负相关,直线方程为 $Y = -1.605X + 318.06$ ($R^2 = 0.0076$),尽管相关性不显著,但依然能推测较高的粘粒含量应不利于茶园土壤MBC

的提高。

表6 成土母质对茶园土壤微生物量碳的影响

取样地点	成土母质	土壤微生物量碳的质量分数 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
兰溪	第四纪红土	156.4 $\pm$ 20.9a
杭州	石灰岩	218.4 $\pm$ 26.1b
龙游	第三纪红砂岩	302.5 $\pm$ 31.6c
杭州	安山斑岩	315.6 $\pm$ 11.7c
嵊州	花岗岩	336.3 $\pm$ 39.5c

注：表中数字后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.7 其他土壤基本理化性质对微生物量碳的影响

对茶园土壤全氮量、有效磷、交换性钾和交换性镁的质量分数与 ω_{mic} 的相关性进行了分析,结果表明全氮量与 ω_{mic} 之间存在极显著正相关,直线相关方程为 $Y = 816.51X + 119.23$ ($R^2 = 0.1454$, $P < 0.001$),如果用幂函数拟合,则相关性更高,相关方程为 $Y = 774.52X^{0.6621}$ ($R^2 = 0.2022$, $P < 0.001$) (图4),表明当全氮量过高时, ω_{mic} 呈下降趋势。有效磷、交换性钾和交换性镁与MBC的相关性不明显,均未达显著水平。

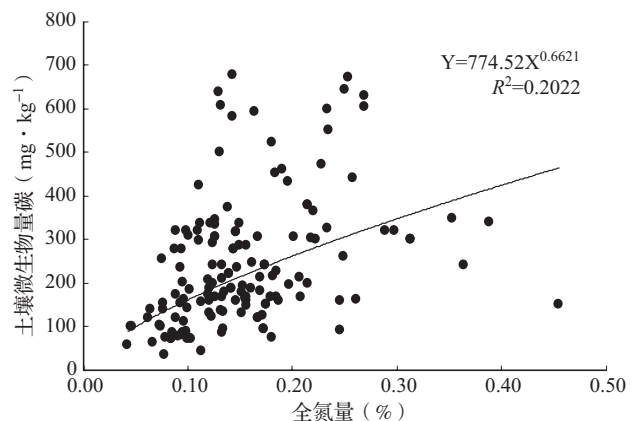


图4 茶园土壤微生物量碳与全氮量的关系

3 讨论

茶园是一个比较特殊的生态系统,土壤呈酸

性, pH 可低至 3.0 以下, 如本文测定的土壤中最低 pH 为 3.09; 茶树每 1 ~ 4 年进行一次重修剪, 修剪的枝叶留在茶园, 茶树修剪物富含茶多酚和铝, 从而在表土层累积^[18]; 为了提高茶叶产量和品质, 茶园有机肥和化肥的施用量均较高, 导致茶园土壤理化和生物性状与一般农田土壤相比, 具有十分明显的区别。土壤微生物量不仅是土壤微生物数量的指标, 更是土壤其它理化性质是否有利于土壤微生物活性的反映, 即具有较高微生物量的土壤中微生物的多样性和活性也较高。

本文的研究结果表明, 茶园土壤 MBC 的 ω_{mic} 在 38.1 ~ 680.2 mg · kg⁻¹ 之间, 平均 246.0 mg · kg⁻¹, 在一般农田土壤 100 ~ 600 mg · kg⁻¹ 的范围内, 比浙江 8 个茶园土壤的测定结果 96.1 ~ 273.2 mg · kg⁻¹^[10] 和贵州 6 个茶园土壤的测定结果 44.6 ~ 407.1 mg · kg⁻¹^[19] 略高, 也比处于同一地区的其它作物土壤测定结果略高。Yao 等^[9] 测定了 8 个红壤, 发现茶园 ω_{mic} 达 400.2 mg · kg⁻¹, 仅次于森林土壤 (465.6 mg · kg⁻¹), 高于桔园 (108.4 ~ 264.4 mg · kg⁻¹)、水稻 (301.8 mg · kg⁻¹) 和菜园 (152.2 mg · kg⁻¹) 土壤。Nioh 等^[8] 对日本茶园土壤的测定也表明, 其 ω_{mic} 仅低于森林土壤, 比种植蔬菜、马铃薯和小麦的土壤高。退化的板栗土壤改种茶树后, ω_{mic} 明显提高^[20]。可见, 尽管茶园土壤 pH 较低, 且有较高含量的铝和多酚类等影响土壤微生物活性的成分, 但微生物生物量并不低, 且略高于其它多数土壤。

对茶园土壤 MBC 影响因素的研究表明, 茶园土壤 MBC 的 ω_{mic} 与土壤基本理化性质和管理方式密切相关。相关研究表明^[18] ω_{mic} 与土壤 pH 和 ω_{org} 呈正相关, 本文得出了一致的结果 (图 1 和图 2), 但在本文中 ω_{mic} 与土壤 pH 的相关性相对较差, 148 个调查样品的相关性分析未达到显著性水平, 不同石灰石粉使用量的土壤中, ω_{mic} 并非随 pH 升高呈直线增加, 这可能与多数微生物已逐渐适应了茶园土壤特殊的酸性环境和高酚类含量有关。随着茶树种植年龄的提高, 尽管土壤 pH 降低, 交换性 Al³⁺ 和可溶性酚类化合物含量明显提高, 但土壤 MBC 含量却随之提高^[21]。然而, 这种适应也有一定的限度, 如本文用石灰石粉改良土壤后, 发现 pH 过低或过高均会降低 ω_{mic} , 这可能是因为 pH 的变化影响了土壤对微生物所需营养物质的供给状态及菌体细胞膜蛋白的稳定性; Xue 等^[22] 的研究也表明在酸性茶园土壤中, 随着碳酸钙用量的增加, 细菌

类磷脂脂肪酸含量增加, 但真菌和放线菌类 PLFA 含量在碳酸钙用量从 0 g · kg⁻¹ 到 3.2 g · kg⁻¹ 表现为增加, 而从 3.2 g · kg⁻¹ 到 6.4 g · kg⁻¹ 呈下降趋势。本文对不同种植年限茶园的分析结果也表明在树龄 50 年左右时 ω_{mic} 最高, 种植年限更高的茶园, 虽然土壤有机质含量较高, 但由于 pH 较低以及酚类物质的进一步增加, 会导致 ω_{mic} 降低。Xue 等^[23] 的研究也表明, 50 年生的茶园土壤的 ω_{mic} 显著高于荒地、8 年生和 90 年生的茶园土壤。本研究前期也表明, 茶园土壤微生物的活性以及细菌的数量总体上随 pH 的提高而增强, 但 pH 过高时反而有所降低^[24-25]。

此外, 土壤质地对微生物量碳也有明显的影响, 花岗岩、安山斑岩和红砂岩发育的土壤中 ω_{mic} 显著高于第四纪红土和石灰岩发育的土壤。Deng 等^[26] 对花岗岩、红砂岩和第四纪红土的研究也发现, 土壤微生物量碳以花岗岩最高, 红砂岩次之, 第四纪红土最低。这与偏砂性的土壤比粘土更有利于茶树根系生长, 茶叶香气更好是一致的。曹顺爱等^[27] 在对我国茶园土壤母质的对比研究中也发现, 花岗岩和板页岩母质上的茶园有利于生产高品质的茶叶, 而第四纪红土和石灰岩母质上的茶园少有名茶出现。不过, 已有相关研究发现成土母质与土壤有机碳、pH 也存在显著相关性^[28], 且受二者的影响较为复杂。例如, 以砂页岩发育的偏砂性土壤, 质地适中, pH 偏酸性, 土壤有机质含量较高; 而以石灰岩发育的土壤质地粘重, pH 为中性或微碱性, 有机质含量低于砂页岩发育的土壤。因此, 成土母质与微生物量碳之间是否存在着必然联系还有待于进一步研究。

为了提高茶叶产量和品质, 茶园施肥量较高。最近的研究表明, 我国茶园养分投入总量 (N、P₂O₅ 和 K₂O 之和) 为 796 kg · hm⁻², 其中有机养分投入量平均占总养分投入量的 15%^[29], 与 20 年前相比, 养分投入总量 703.2 kg · hm⁻²^[30] 有进一步提高。本文结果表明, 有机茶园土壤的 ω_{mic} 显著高于转换茶园, 转换茶园又高于常规茶园, 这与有机茶园大量使用有机肥, 不使用化学肥料和农药有关。这与众多的研究结果一致, 即施有机肥对提高土壤 MBC 具有明显的促进作用^[11, 17, 31]。如黄瑶等^[32] 的研究表明施有机肥、间作三叶草和覆盖稻草与施化肥的对照相比, ω_{mic} 提高了 34% ~ 81%, 其中以间作三叶草配合施有机肥的效果最好。但化肥则

具有两面性, 适量施用化肥, 化肥与有机肥配合施用, 或少量化肥与绿肥间作相结合对提高 MBC 有促进作用, 但过量施化肥, 特别是过量施氮肥则有不影响。如施有机肥、“化肥+间作豆科绿肥”和“有机肥+化肥+间作豆科绿肥”处理条件下的 ω_{mic} 分别比不施肥增加了 1.49、1.26 和 1.87 倍, 但仅施化肥的处理却下降了 0.46 倍^[33]。本文对土壤其他理化性质与 MBC 相关性分析也表明, ω_{mic} 受到土壤全氮量的显著影响, 随着土壤全氮量的提高, ω_{mic} 显著增加, 但当全氮量过高时则呈下降趋势。这可能也与茶园施肥有关, 氮肥过量的土壤中硝态氮含量较高, 其不易被土壤吸附固定, 极易淋洗损失, 不仅降低氮素利用率, 还会降低土壤 pH, 从而引起微生物活性的降低; 而施用较多有机肥的茶园土壤中, 不仅具有较高的矿化基质, 而且微生物活性也较强^[34]。如 Nioh 等^[8] 也发现茶园过量施氮会降低土壤的 ω_{mic} , 当施氮量从 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 提高到 $1200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, ω_{mic} 降低了 83%。

4 结论

本试验结果及上述分析表明, 茶园土壤 MBC 的质量分数在 $38.1 \sim 680.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 $246.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤微生物熵在 $0.38\% \sim 4.28\%$ 之间, 平均为 1.37% 。MBC 含量主要受到土壤有机碳、pH、茶园管理方式、植茶年限、成土母质以及全氮量的影响。影响最大的因素是有机碳, 其次为 pH、植茶年限、成土母质及土壤全氮量。因此, 要提高茶园土壤微生物的数量和活性, 保持茶园活力, 应该采取加强茶园有机肥的使用, 增加覆盖和间作, 推广有机茶园管理模式, 合理施肥, 适当提高土壤 pH, 改植换种老茶园等措施。

参考文献:

- [1] 张成霞, 南志标. 土壤微生物生物量的研究进展 [J]. 草业科学, 2010, 27 (6): 54-61.
- [2] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义 [J]. 土壤, 1997, 29 (2): 61-69.
- [3] 赵先丽, 程海涛, 吕国红, 等. 土壤微生物生物量研究进展 [J]. 气象与环境学报, 2006, 22 (4): 68-72.
- [4] 李延茂, 胡江春, 汪思龙, 等. 森林生态系统中土壤微生物的作用与应用 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (10): 253-256.
- [5] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳 [J]. 生态学杂志, 2006, 25 (11): 1412-1417.
- [6] Hargreaves P R, Brookes P C, Ross G J S, et al. Evaluating soil microbial biomass carbon as an indicator of long-term environmental change [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35 (3): 401-407.
- [7] 周才碧, 陈文品. 茶园土壤微生物的研究进展 [J]. 中国茶叶, 2014, 36 (3): 14-15.
- [8] Nioh I, Isobe T, Osada M. Microbial biomass and some biochemical characteristics of a strongly acid tea field soil [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 1993, 39 (4): 617-626.
- [9] Yao H, He Z, Wilson M J, et al. Microbial biomass and community structure in a sequence of soils with increasing fertility and changing land use [J]. Microbial Ecology, 2000, 40 (3): 223-237.
- [10] 薛冬, 姚槐应, 黄昌勇. 植茶年龄对茶园土壤微生物特性及酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2005, 19 (2): 84-87.
- [11] 徐华勤, 肖润林, 向佐湘, 等. 不同生态管理措施对丘陵茶园土壤微生物生物量和微生物数量的影响 [J]. 土壤通报, 2010, 41 (6): 1355-1359.
- [12] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987, 19 (6): 703-707.
- [13] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1990, 22 (8): 1167-1169.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 韩文炎, 阮建云, 林智, 等. 茶园土壤主要营养障碍因子及系列专用肥的研制 [J]. 茶叶科学, 2002, 22 (1): 70-74.
- [16] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic matter carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. Australian Journal of Soil Research, 1992, 30 (2): 195-207.
- [17] 隋跃宇, 焦晓光, 高崇生, 等. 土壤有机质含量与土壤微生物量及土壤酶活性关系的研究 [J]. 土壤通报, 2009, 40 (5): 1036-1039.
- [18] Han W Y, Kemmitt S J, Brookes P C. Soil microbial biomass and activity in Chinese tea gardens of varying stand age and productivity [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39 (7): 1468-1478.
- [19] 李渝, 刘彦伶, 黄兴成, 等. 贵州不同茶区土壤养分及微生物量分析评价 [J]. 灌溉排水学报, 2018, 27 (8): 78-105.
- [20] 徐秋芳, 田甜, 吴家森, 等. 退化板栗林 (套) 改种茶树和毛竹后土壤生物学性质变化 [J]. 水土保持学报, 2011, 25 (3): 180-184.
- [21] 俞慎, 何振立, 陈国潮, 等. 不同树龄茶树根层土壤化学特性及其对微生物区系和数量的影响 [J]. 土壤学报, 2003, 40 (3): 433-439.
- [22] Xue D, Huang X D, Yao H Y, et al. Effect of lime application on microbial community in acidic tea orchard soils in comparison

- with those in wasteland and forest soils [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22 (8): 1253–1260.
- [23] Xue D, Yao H Y, Huang C Y. Microbial biomass, N mineralization and nitrification, enzyme activities, and microbial community diversity in tea orchard soils [J]. Plant & Soil, 2006, 288 (1–2): 319–331.
- [24] 韩文炎, 王皖蒙, 郭赟, 等. 茶园土壤细菌丰度及其影响因素研究 [J]. 茶叶科学, 2013, 33 (2): 147–154.
- [25] 沈晨, 范利超, 韩文炎. pH 和肥料对茶园土壤基础呼吸的影响 [J]. 土壤通报, 2017, 48 (5): 1226–1232.
- [26] Deng H, Yu Y J, Sun J E, et al. Parent materials have stronger effects than land use types on microbial biomass, activity and diversity in red soil in subtropical China [J]. Pedobiologia, 2015, 58 (2–3): 73–79.
- [27] 曹顺爱, 吕军. 土壤母质及其物理性状与茶叶品质关系 [J]. 茶叶, 2003, 29 (1): 13–16.
- [28] 何腾兵, 董玲玲, 刘元生, 等. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (6): 157–162.
- [29] 倪康, 廖万有, 伊晓云, 等. 我国茶园施肥现状与减施潜力分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (3): 421–432.
- [30] 韩文炎, 李强. 茶园施肥现状与无公害茶园高效施肥技术 [J]. 中国茶叶, 2002, 24 (6): 29–31.
- [31] 唐劲驰, 周波, 黎健龙, 等. 蚯蚓生物有机培肥技术 (FBO) 对茶园土壤微生物特征及酶活性的影响 [J]. 茶叶科学, 2016, 36 (1): 45–51.
- [32] 黄瑶, 肖润林, 杨知建, 等. 不同培肥措施对丘陵红壤茶园土壤微生物量碳的影响 [J]. 现代生物医学进展, 2009, 9 (1): 134–136.
- [33] 王利民, 邱珊莲, 林新坚, 等. 不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析 [J]. 生态学报, 2012, 32 (18): 5930–5936.
- [34] 韩文炎, 徐建明. 茶园土壤 NO_3^- -N 含量与净硝化速率的研究 [J]. 茶叶科学, 2011, 31 (6): 513–520.

Study on the mass fraction of soil microbial biomass carbon and its influencing factors in tea gardens

LI Meng-han, ZHANG Li-ping, LI Xin, YAN Peng, ZHANG Lan, HAN Wen-yan* (Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou Zhejiang 310008)

Abstract: The content of microbial biomass carbon (MBC) and its influencing factors in 148 tea garden soils were studied. The results showed that the mass fraction of MBC (ω_{mic}) in tea gardens ranged from 38.1 ~ 680.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with an average of 246.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and its content varies greatly, mainly influenced by soil organic carbon, pH, tea plantation management, tea plant standing age and soil parent material. (1) There was a significant positive correlation between ω_{mic} and the mass fraction of organic carbon (ω_{org}) in tea garden soil, and a certain positive correlation with pH. Liming of very acidic soil could significantly increase its ω_{mic} . (2) ω_{mic} increased initially and then decreased with the increase of tea plant standing age, with the highest around 45 years old, reaching $(597.7 \pm 89.2) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. (3) ω_{mic} in the organic management tea gardens was significantly higher than those in conventional and conversional tea gardens ($P < 0.05$). (4) ω_{mic} was significantly higher in the soils derived from parent materials of granite, Anshan porphyry and red sandstone than these derived from quaternary red soil and limestone ($P < 0.05$). (5) ω_{mic} increased firstly and then decreased with the increase of total N in tea gardens. Among the influencing factors of ω_{mic} in tea garden soil, organic carbon was the most influential factor, followed by soil pH, soil parent material, age of tea plant and total N. Therefore, in order to improve ω_{mic} in tea gardens to maintain and improve soil fertility, we should take the measures, such as applying more organic fertilizer, promoting the organic management, controlling the amount of nitrogen fertilizer applied, increasing soil pH appropriately and replacing old tea gardens.

Key words: tea garden; soil microbial biomass carbon; organic carbon; pH; organic management