

不同垦殖方式下果园土壤有机碳的空间分布特征

王义祥, 翁伯琦*, 黄毅斌, 王成己, 罗旭辉

(福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013)

摘要:以福建尤溪玉池果园水土流失定位观测点为平台,研究了不同果园垦殖方式对土壤有机碳分布的影响。结果表明,不同垦殖方式下果园土壤有机碳在小生境分布和坡面再分布两个尺度上呈现出不同的分布特征,水平方向上,清耕果园土壤有机碳含量呈沿树干向外减少的分布规律,而生草果园土壤有机碳含量水平变化不明显;垂直方向上,果园土壤有机碳含量随土层加深而逐渐减少;坡面再分布上,清耕果园表现为下坡位>中坡位>上坡位,生草果园为中坡位>下坡位>上坡位。生草垦殖模式降低了果园土壤有机碳的水平分异,但促进果园土壤有机碳的垂直分异。在以上结果的基础上,提出了小生境混合取样的果园土壤采样方法。

关键词:果园;红壤;有机碳;空间分布

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)12-2511-07

Spatial Distribution of Soil Organic Carbon in Orchards Under Different Reclamation Modes

WANG Yi-xiang, WENG Bo-qi*, HUANG Yi-bin, WANG Cheng-ji, LUO Xu-hui

(Institute of Agricultural Ecology, Fujian Academy of Agriculture Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: The information on the spatial distribution of soil organic carbon is critical for appropriate measurements of soil productivity, hydrology characteristics and carbon balance. A better understanding of the spatial distribution of soil organic carbon and its impact factors will increase the accuracy for estimating organic carbon storage. Thus three types of orchard soils with different reclamation modes (located at Yuchi village, Fujian Province) were chosen to study the spatial variability of soil organic carbon content. Results showed that there were different distribution characteristics of soil organic carbon in the orchard on microhabitat distribution and redistribution slope. Soil organic carbon contents in the clean-tillage orchard showed less outward along the trunk in the horizontal direction. But there was no significant difference in soil organic carbon along the trunk in the herbage interplanting orchard. Soil organic carbon under different cultivating systems decreased with soil depth in vertical direction. On the slope re-distribution, soil organic carbon content varied greatly with different cultivating methods, for example, the downhill bits > middle slope > upper slope under clean tillage treatment, the middle slope > downhill bit > upper slope under herbage interplanting. Herbage interplanting reduced the horizontal heterogeneity of soil organic carbon in orchards, but increased the vertical variation. On the basis of the above results, a mixed sampling method from different niches under canopy of fruit trees was proposed.

Keywords: orchard; red soil; organic carbon; spatial distribution

土壤有其自然异质性,它们的性质在空间上是连续变化的,其中许多性质也是随时间变化的^[1]。这种变异性源于其自然的形成过程,包括环境的物理和化学特征、生物系统的相互作用,以及土壤的经营措施。土

壤空间变异性的研究始于 20 世纪 70 年代,长期以来特别在农业和环境科学中受到重视^[2-3]。土壤有机碳的空间分布是研究土壤生产力、土壤水文特性和以碳为基础的温室气体收支平衡的基础资料^[4]。从全球和区域尺度上的研究结果来看,土壤有机碳储量和分布的估算结果往往存在较大的差异。例如,全球陆地生态系统土层有机碳的储量估算值为 1 115~2 293 Pg^[5-6],对我国陆地生态系统土壤有机碳储量的估算值为 50~186Pg^[7]。此外,当前关于果园碳库测定还没有标准

收稿日期:2011-04-27

基金项目:国家科技支撑计划课题(2008BAD95B08);福建省科技计划项目(2009R10036-4);福建省农科院创新团队建设项目

作者简介:王义祥(1978—),男,博士,主要从事恢复生态与红壤保育研究。E-mail:sd_wolong@163.com

* 通讯作者:翁伯琦 E-mail:boqiwen@yahoo.com.cn

的方法,这有可能为将来的积极管理或参与碳交易所需要。因此,从不同尺度上了解土壤有机碳空间分布及其影响因素,有助于提高有机碳储量估计的精确性。本研究以山地果园为研究对象,从植物个体、土壤剖面 and 坡面 3 个不同的尺度上探讨果园土壤有机碳储量的空间变化,分析不同垦殖方式对其产生影响,以其为果园土壤有机碳储量的精确估计提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于尤溪果园水土流失定位观测站内。该定位站建于 1995 年冬,隶属于福建省农业科学院农业生态研究所,位于福建省尤溪县西城镇玉池村,北纬 26°25',东经 117°57',属中亚热带季风性湿润气候,夏季暖热,冬季温凉,春夏多雨,降水丰富。年平均气温 19.2 ℃,1 月份气温最低,月平均气温 8.0~12.0 ℃,7 月份最高,月平均气温 26.6~28.9 ℃。光照资源比较丰富,全年光照时数为 4 422.8 h。年平均降雨量 1 620.6 mm,年均蒸发量 1 346.4 mm,年内降水分布不均匀,10 月至次年 1 月是少雨季,合计雨量仅占年雨量的 13%左右;2 至 6 月为春雨、梅雨季,大雨、暴雨较多,合计雨量约占年雨量的 62%。

1.2 试验处理

果园试验地坡向为东南,坡度 15°;成土母质为花岗岩残积坡积物,土壤类型为红壤,供试果树为种植年限 15 a 的油桃树 (*Prunus persica* var. *nectarina* Maxim),初始土壤基础理化性状见表 1。试验采用裂区设计,共 3 个处理,分别为顺坡开垦+清耕(T₁)、梯台开垦+清耕(T₂)、梯台开垦+套种平托花生(*Arachis pintoi*)(T₃),牧草套种方式为带状,每个处理 3 个重复,每个处理小区面积为 100 m²,随机排列,具体的处理做法见表 2。所有小区果树的施肥管理相同,每年在秋冬季施肥 2~3 次,肥料为硫酸钾复合肥,施肥量为每株 1.5 kg。施肥点在每株油桃树冠滴水线附近,

表 1 果园试验地初始土壤基本理化性状

Table 1 The basic physical and chemical properties of experimental orchard soil

基本理化性质	土层深度	
	0~20 cm	20~40 cm
物理性砂粒/%	45.05	42.01
物理性粘粒/%	54.95	58.00
pH	4.35	4.39
有机质/g·kg ⁻¹	23.10	20.30
CEC/cm ^{ol} ·kg ⁻¹	7.35	6.09
全氮/g·kg ⁻¹	0.96	0.79
全磷/g·kg ⁻¹	0.23	0.23
碱解氮/mg·kg ⁻¹	100.85	92.35
速效钾/mg·kg ⁻¹	31.60	19.55

挖条形沟(宽 15 cm,深 10 cm),均匀撒入肥料后即覆土。

1.3 取样方法

1.3.1 以树体为中心取样法

每个小区随机选取 3 棵果树,以果树为中心,沿对角线方向分别选取距果树 60、120、180 cm 处采集 0~20 cm 土样 12 个。将 3 棵果树不同距离采集的土壤样品分别混合均匀,采用四分法取混合样。在采集土壤样品的同时,挖取体积为 20 cm×20 cm×20 cm 的样方 3 个,收集所有肉眼可见的根系,清洁根系表面,烘干并称重。

1.3.2 垂直剖面土壤取样法

在每个小区中随机选取 3 棵果树,在距离果树 120 cm 处挖取 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 共 5 个层次的土壤剖面,分不同层次采集土壤,将 3 棵果树不同层次采集的土壤样品分别混合均匀,采用四分法取混合样,采用环刀法采集并测定土壤容重。同时逐层挖取 20 cm×20 cm×20 cm 土体 3 个,经破碎过筛后,收集所有根系,清洁根系表面,烘干并称重。

1.3.3 沿坡面土壤取样法

在每个调查小区分别从坡顶至坡底沿 5、15 cm

表 2 试验处理

Table 2 Field experimental design

代号	处理	具体做法	年径流量/mm
T ₁	顺坡+油桃+清耕	25 m 长的小区坡面顺坡种植 8 株果树,坡面自然长草,每年中耕除草 3~4 次。	1 895.3
T ₂	梯台+油桃+清耕	25 m 长的小区坡面修建成 8 个梯台,台面宽 4 m,每个梯台中间开挖直径 80 cm、深 80 cm 的坑,种一株果树,台面自然长草,每年中耕除草 3~4 次。	455.1
T ₃	梯台+油桃+平托花生	小区梯台同 T ₂ ,梯台的埂种植百喜草和南非马唐,台面种植平托花生,果树种植方式同 T ₂ 。	148.4

注:年径流量数据为 2008 年和 2009 年观测的平均值。

和25 m的间距设3个取样断面,每个断面等间各采集0~20 cm原状土样3个,分别装入铝盒内,同时采用环刀法采样测定土壤容重。将野外取回的原状土样,按土壤自然裂隙轻轻掰成10 mm左右的小土团,在阴凉处风干备用。土壤团聚体的分离测定采用湿筛法^[8]。

1.4 分析方法

有机碳含量测定采用重铬酸钾外加热法,容重测定采用环刀法。

1.5 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度的计算公式如下:

$$C_i = d_i \times \rho_i \times Q_i$$

式中: i 为第 i 个土层; C_i 为土壤有机碳密度; d_i 为土层厚度; ρ_i 为土壤容重; Q_i 为土壤有机碳含量。

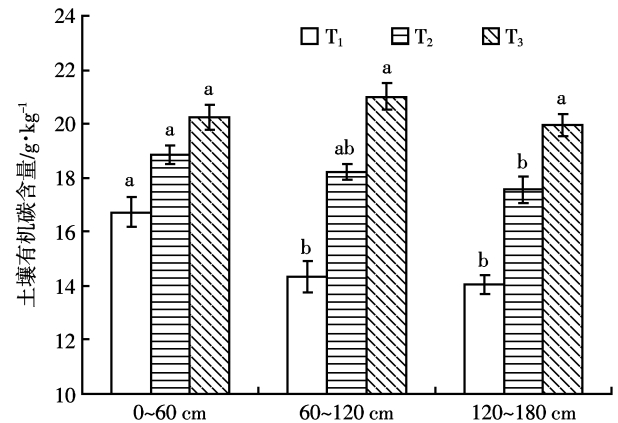
1.6 数据处理

利用 Microsoft Excel 2003 和 DPS7.05 统计软件进行数据计算处理及差异显著性检验和相关性分析,多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳的微生物分布特征

由图1、图2可以看出,不同垦殖方式下油桃园土壤有机碳含量和碳密度随离树干基部距离不同而变化的规律不尽一致。就 T_1 处理而言,0~20 cm土层土壤有机碳含量和碳密度随距离果树的变化均表现为0~60 cm>60~120 cm>120~180 cm,其中距树干基部0~60 cm处土壤有机碳含量和碳密度比距60~120 cm和120~180 cm处的分别提高11.6%和8.4%、17.3%和12.9%,且差异性均达显著水平,但距60~120 cm和120~180 cm处之间的差异不显著。就 T_2 处理而言,0~20 cm土层土壤有机碳含量和碳密度随离树干基部距离不同而变化的规律与 T_1 处理相似,均表现为土壤有机碳含量和碳密度随离树干距离增加而减少的趋势,其中距离0~60 cm处土壤有机碳含量比120~180 cm处的高7.3%,差异达显著水平,但与60~120 cm处的差异则不显著。就 T_3 处理而言,土壤有机碳含量随离树干基部距离不同的变化均表现为60~120 cm>0~60 cm>120~180 cm,但各处土壤有机碳含量间的差异均不显著, T_3 处理各处土壤有机碳密度之间的差异亦均不显著。由此可见,清耕垦殖方式果园土壤有机碳含量和碳密度均表现出随着与树干距离增加而显著减少的水平变化规律,而生草垦殖方式果园土壤有机碳含量和碳密度的水平变化则不明显。



同一处理中不同小写字母表示不同位点间差异达到显著水平($P < 0.05$),下同。

图1 不同离树体距离0~20 cm土层的土壤有机碳含量

Figure 1 Organic carbon content in 0~20 cm soils from different distance to fruit tree

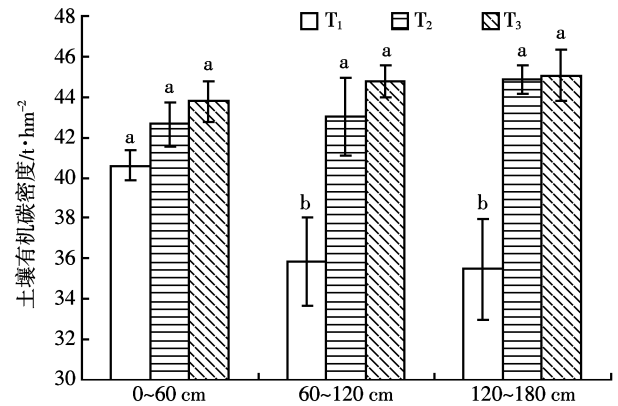


图2 不同离树体距离0~20 cm土层的土壤有机碳密度

Figure 2 Organic carbon density in 0~20 cm soils from different distance to fruit tree

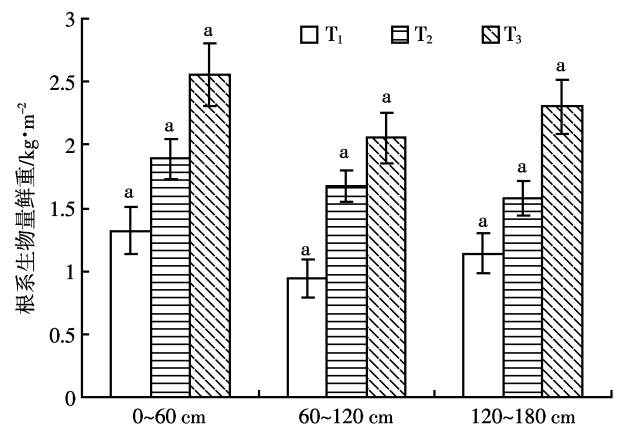


图3 不同离树体距离0~20 cm土层的根系生物量

Figure 3 Root biomass in 0~20 cm soils from different distance to fruit tree

由图 3 可知,0~20 cm 土层中,同一处理距树干不同部位的根系生物量间无显著性差异;但 T_3 处理根系生物量分别是 T_1 和 T_2 处理的 1.94~2.19 倍和 1.23~1.46 倍,且与 T_1 和 T_2 处理间差异均达到显著性水平。对同一处理的根系生物量与土壤有机碳含量的相关分析表明,土壤有机碳含量与根系生物量具有显著的相关性。

2.2 土壤有机碳的垂直分布特征

由图 4 可以看出, T_1 、 T_2 和 T_3 处理土壤有机碳含量均随着土层的加深而减少,其中 T_1 和 T_2 处理的 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤有机碳含量均显著高于 60~80 cm 和 80~100 cm 土层,分别比 60~80 cm 和 80~100 cm 土层高 164.5%~228.5%和 243.5%~308.5%、148.9%~177.4%和 223.3%~244.9%及 135.6%~

138.3%和 196.3%~206.1%;而 T_3 处理各土层间的土壤有机碳含量均存在显著性差异,其中 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤有机碳含量分别比 60~80 cm 和 80~100 cm 土层高 165.2%和 244.5%、121.4%和 187.6%、68.0%和 118.2%。

由图 5 可以看出, T_1 、 T_2 和 T_3 处理土壤有机碳密度亦均随着土层的加深而减小,且 T_1 、 T_2 和 T_3 处理的 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤有机碳密度均显著高于 60~80 cm 和 80~100 cm 土层,分别比 60~80 cm 和 80~100 cm 土层高 134.2%~206.8%和 197.3%~260.1%、87.2%~179.6%和 137.6%~189.7%、63.7%~168.6%和 107.8%~178.3%。

上述结果表明,不同垦殖方式果园土壤有机碳含量和密度均呈随土层深度增加而下降的垂直分布规

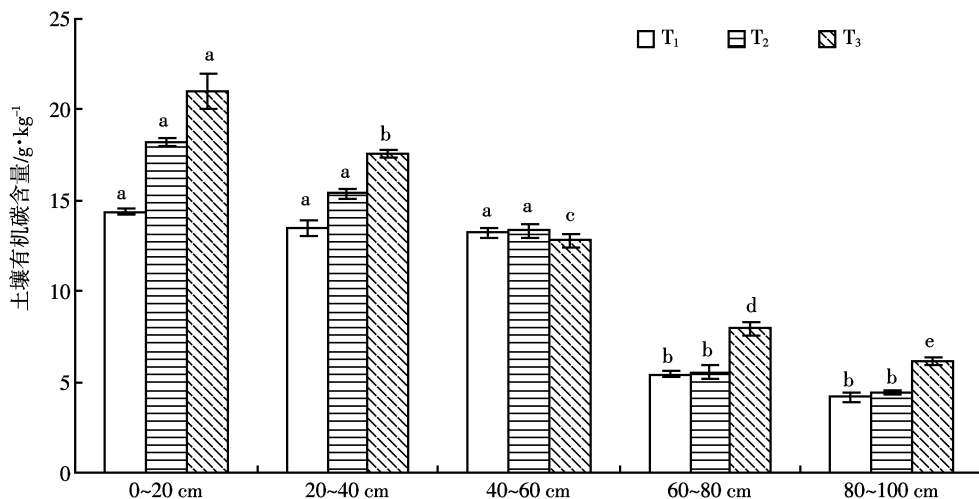


图 4 不同土层的土壤有机碳含量

Figure 4 Organic carbon contents in different soil layers

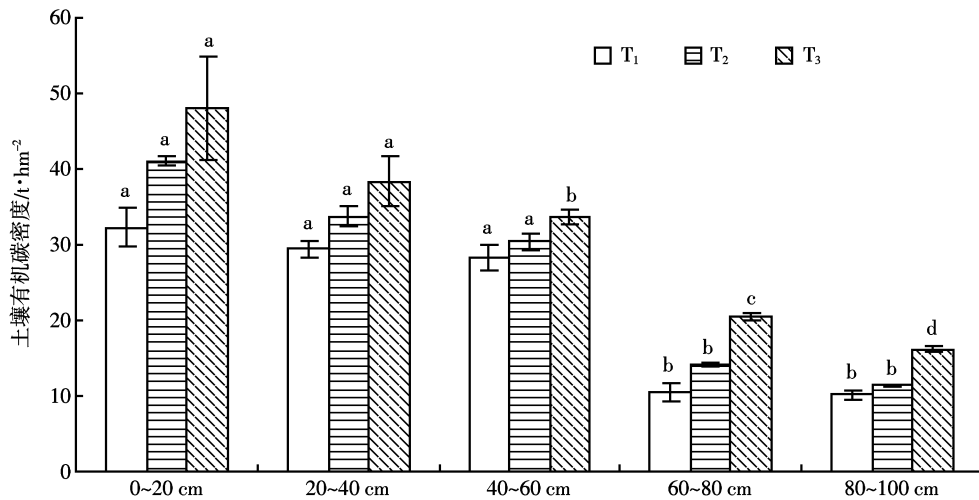


图 5 不同土层的土壤有机碳密度

Figure 5 Organic carbon density in different soil layers

律,且 60 cm 以上各土层的土壤有机碳含量和密度均显著高于 60 cm 以下的土层,以生草垦殖方式的差异较大。

2.3 土壤有机碳的再分布特征

由图 6 可以看出, T_1 、 T_2 和 T_3 处理中坡位和下坡位土壤大团聚体(>0.25 mm)的百分含量均高于上坡位。由图 7 可以看出, T_1 和 T_2 处理 0~20 cm 土层的上坡位土壤有机碳含量比中坡位和下坡位分别降低了 26.08% 和 29.63%, 7.93% 和 11.50%, 其与中坡位和下坡位的差异均达到显著水平, 中坡位和下坡位间的差异则不显著, 表明清耕垦殖方式下无论是顺坡还是梯台种植, 上坡位 0~20 cm 土层的土壤有机碳均表现出随径流而明显下移的趋势。 T_3 处理 0~20 cm 土层的土壤有机碳含量以中坡位最高, 比上坡位和下坡位分别提高 9.2% 和 7.1%, 且不同坡位间的差异均达到显著水平, 表明生草栽培方式下上坡位随径流下移的土壤有机碳主要淀积于中坡位。就土壤有机碳密度而言(图 8), T_1 和 T_2 处理 0~20 cm 土层的上坡位土壤有机碳密度比中坡位和下坡位分别降低了 24.49% 和 25.22%、5.28% 和 5.70%, 其中 T_1 处理上坡位土壤有机碳密度与中坡位和下坡位间存在显著性差异, 中坡位和下坡位间无显著性差异, 但 T_2 处理不同坡位间均无显著性差异。 T_3 处理 0~20 cm 土层的中坡位土壤有机碳密度比上坡位和下坡位分别提高 9.24% 和 7.12%, 其与上坡位差异显著, 与下坡位差异不显著, 且上坡位和下坡位间的差异亦不显著。

3 讨论

土壤是不均一、具有高度空间异质性的复合体。

土壤有机碳空间异质性产生的原因包括母岩矿物学特性、微地形因素、土壤动物活动、不同的凋落物类型及其数量、根吸收及周转, 与树冠分布有关的现象如

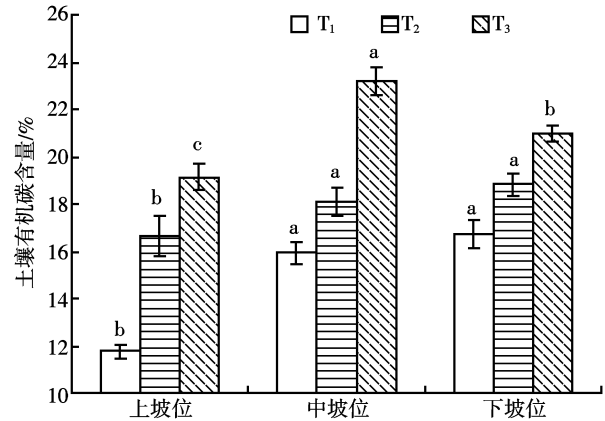


图 7 不同坡位 0~20 cm 土层的果园土壤有机碳含量

Figure 7 Soil organic carbon content in 0~20 cm layer at different slope position

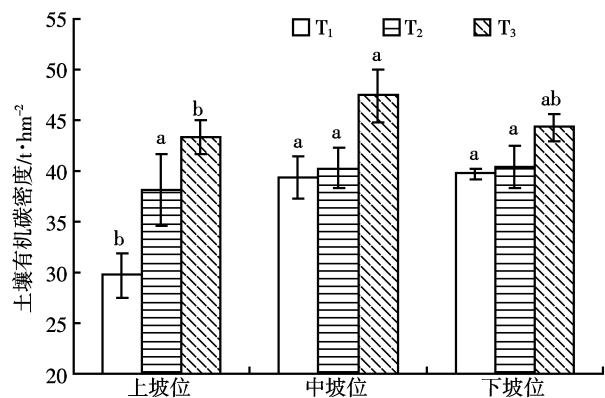


图 8 不同坡位 0~20 cm 土层的果园土壤有机碳密度

Figure 8 Soil organic carbon density in 0~20 cm layer at different slope position

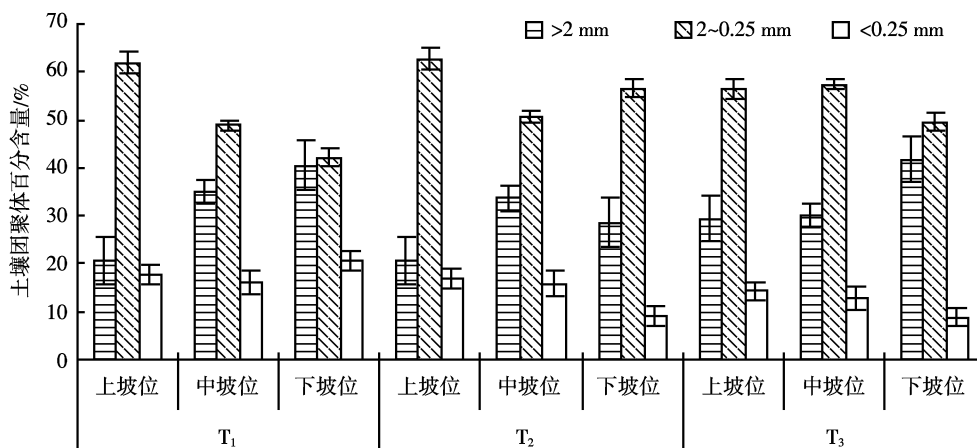


图 6 不同坡位 0~20 cm 土层的果园土壤团聚体百分含量

Figure 6 Percentage of soil aggregates in 0~20 cm layer at different slope position

降雨分布、树干流,干扰因子如林火及营林措施的影响等^[9]。甘卓亭等研究表明,苹果园土壤有机碳含量5 a沿树干向外增加,10 a则减少,15 a和20 a的果园其变化较小^[10]。本研究结果表明,在植物个体和土壤剖面尺度上果园土壤有机碳存在一定的空间异质性。 T_1 和 T_2 处理0~20 cm土层土壤有机碳含量和碳密度均随距树干距离的增大而减小,表现出一定的微生境异质性。Kelly和Burke对北美半干旱草地土壤有机质小尺度空间异质性的研究也表明,在植物个体尺度上,土壤表层的养分差异相当大,植物下部土壤全C、全N和有机C相对较丰富,这主要是由于土壤有机碳来源为根系分泌、根生物量、地下微生物、动物和植物凋落物,凋落物和根系补充与分解使植物个体(或死亡个体)下形成了“养分斑”^[11]。本研究结果表明, T_1 和 T_2 处理果园土壤有机碳水平方向上分布的差异与根系分布具有显著相关性,相关系数为0.862($r_{0.05}=0.755$, $r_{0.01}=0.875$, $n=6$),说明清耕垦殖方式果园土壤有机碳含量在水平方向上的空间变化受根系分泌和死亡根系补充的显著影响。 T_3 处理与树干不同距离处的根系生物量无显著性差异,这与土壤有机碳含量和碳密度的变化一致,说明生草管理通过改变表层土壤中根系分布降低了土壤有机碳在水平分布上的异质性。

土壤有机碳主要分布于土壤表层,容易遭受土壤侵蚀的影响。土壤侵蚀一方面加速侵蚀部位土壤有机碳(SOC)库的损耗,同时迁移的土壤物质在低洼的景观部位发生累积,并埋藏富含有机碳的原始土壤,从而隐遁(sequestration)一定数量的有机碳^[12-14]。有研究认为,遭受侵蚀的土壤有机碳中只有10%从流域中输出,大部分随地表径流沿坡面在田间和相邻地块发生再分配^[15]。另外,土壤侵蚀过程中有机碳的迁移还要受到其他诸多因素的影响,如植被覆盖度、土壤性质、当地的气候条件以及人为扰动等。本研究结果表明, T_1 和 T_2 处理0~20 cm土层有机碳含量和碳密度均呈现为下坡位>中坡位>上坡位的再分布特征,这是因为在清耕垦殖方式下,由于缺少地被覆盖,土壤侵蚀尤其是水力侵蚀通过地表径流的形式容易将坡上部的地表植物残体、凋落物以及由雨滴击溅分散的细小颗粒物质剥蚀、搬运,从而导致土壤有机碳储量减少,同时来自坡上部侵蚀下来的土壤物质在低洼的景观部位(如坡下部)大量累积^[16]。 T_1 和 T_2 处理微团聚体有机碳均呈现上坡位<中坡位<下坡位,这主要是由于微团聚体易被地表水流携带迁移,从而在下坡位

沉积下来;而 T_3 处理中坡位和下坡位间无显著性差异,说明生草栽培减弱土壤侵蚀作用,并明显截留了微团聚体随地表水流的迁移。 T_3 处理0~20 cm土层中坡位土壤有机碳碳密度分别比上坡位和下坡位提高9.24%和7.12%,其与上坡位差异显著,而与下坡位差异不显著,这是由于果园生草栽培减少了地表裸露,减弱降雨对微团聚体结合态有机碳的剥蚀、搬运作用,致使上坡位因地表径流携带下移的物质积累于中坡位。另外, T_3 处理年径流量显著低于 T_1 和 T_2 处理,说明坡面愈长,坡面微地形变异愈大,坡面产流量小,土壤侵蚀对有机碳的侵蚀搬运作用被减弱。 T_3 处理0~20 cm土层下坡位土壤有机碳密度比上坡位增加1.98%,但增加幅度低于 T_1 处理(33.72%)和 T_2 处理(6.05%),这主要是由于梯台开垦比顺坡开垦模式更有利于防止水土流失,且果园生草栽培的水土保持效果最好^[17]。

经营方式的变化既可改变土壤有机物的输入,又可通过对小气候和土壤条件的改变影响土壤有机碳的分解速率,从而改变土壤有机碳储量。有研究认为,果园生草增加土壤有机质含量,增加量随土壤和环境条件而变化,增加最多的是表土,向下依次减少^[18-19]。本研究结果表明,不同垦殖方式下果园土壤有机碳含量和碳密度均随土层的加深而降低,这与以往的许多研究结果一致^[20-21]。本研究还发现, T_1 、 T_2 和 T_3 处理0~20、20~40 cm和40~60 cm土层的土壤有机碳均显著高于60~80 cm和80~100 cm土层,这与60~100 cm土层几乎没有根系分布有一定的相关性。相关分析表明,垂直方向上不同垦殖方式果园土壤有机碳含量与根系重量也呈极显著正相关,相关系数为0.984($r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$, $n=5$)。

4 结论

清耕处理不同坡位0~20 cm土层土壤有机碳含量和碳密度的变化规律为下坡位>中坡位>上坡位,而生草栽培处理不同坡位的变化规律为中坡位>下坡位>上坡位,说明土壤侵蚀导致坡上部和中部的有机碳发生迁移并在坡下沉积,而生草栽培可减弱由地表径流引起的对土壤表层细小颗粒物质剥蚀、搬运作用。不同垦殖方式下果园土壤有机碳在水平和垂直方向均存在着一定的分布特征,其中顺坡清耕和梯台清耕处理土壤有机碳含量和碳密度沿树干向外均减少,而梯台生草处理的土壤有机碳含量和密度在水平分布上则没有显著差异;3种垦殖方式处理果园土壤有

机碳含量和碳密度均随土层加深而逐渐降低,其中以生草垦殖方式的差异较大。因此,生草垦殖方式可以减少果园土壤有机碳的水平差异,但增大了果园土壤有机碳的垂直差异。

了解果园土壤有机碳在植物个体尺度上的变化,可为果园土壤有机碳储量研究的合理采样和精确估算提供科学依据。在开展果园土壤有机碳储量研究时,沿水平方向的采样应适当增加样点密度,尤其是清耕垦殖方式的果园土壤;也可将样地划分成不同小生境类型,小生境内土样采取多点混合取样,然后根据各类小生境的面积权重来确定采样点的样品混合构成比例,以此混合样作为该样点的土壤样品。

参考文献:

- [1] Heuvelink, GBM, Webster R. Modelling soil variation: Past, present, and future[J]. *Geoderma*, 2001, 100(3-4):269-301.
- [2] Webster R. Optimally partitioning soil transects[J]. *Journal of Soil Science*, 1978, 15:191-204.
- [3] Kyriakidis PC, Journel AG. Geostatistical space-time models: A review [J]. *Mathematical Geology*, 1999, 31(6):651-684.
- [4] Kern J S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58:439-455.
- [5] Eswaren H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57:192-194.
- [6] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *Eur J Soil Sci*, 1996, 47:151-163.
- [7] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量的研究 [J]. 科技通报, 1999, 15(5):330-332.
PAN Gen-xing. Study on carbon reservoir in soils of China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5):330-332.
- [8] 李昌新, 黄山, 彭现宪, 等. 南方红壤稻田与旱地土壤有机碳及其组成的特征差异[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):606-611.
LI Chang-xin, HUANG Shan, PENG Xian-xian, et al. Differences in soil organic carbon fractions between paddy field and upland field in red soil region of south China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):606-611.
- [9] 王庆成, 程云环. 土壤养分空间异质性与植物根系的觅食反应[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6):1063-1068.
WANG Qing-cheng, CHENG Yun-huan. Response of fine roots to soil nutrient spatial heterogeneity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6):1063-1068
- [10] 甘卓亭, 张掌权, 陈静, 等. 黄土塬区苹果园土壤有机碳分布特征 [J]. 生态学报, 2010, 30(8):2135-2140.
GAN Zhuo-ting, ZHANG Zhang-quan, CHEN Jing, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in apple orchards on Loess Tableland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(8):2135-2140.
- [11] Kelly R B, Burke I C. Heterogeneity of soil organic matter following death of individual plants in short grass steppe[J]. *Ecology*, 1997, 78(4):1256-1261.
- [12] Vanden Bygaart A J. Erosion and deposition history derived by depth-stratigraphy of ^{137}Cs and soil organic carbon [J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 61:187-192.
- [13] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. *Environment International*, 2003, 29:437-450.
- [14] Liu S, Bliss N, et al. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2):1074-1098.
- [15] Mccarty G W, Ritchie J C. Impact of soil movement on carbon sequestration in agricultural ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116:423-430.
- [16] Pennock D J, Anderson D W, de Jong E. Landscape-scale changes in indicators of soil quality due to cultivation in Saskatchewan[J]. *Canada. Geoderma*, 1994, 64:1-19.
- [17] 黄毅斌, 罗旭辉, 郑仲登, 等. 垦植方式对山地果园水土流失的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 3(3):30-34, 41.
HUANG Yi-bin, LUO Xu-hui, ZHENG Zhong-deng, et al. Effects of different exploitation manners on soil and water losses in hilly orchard [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 3(3):30-34, 41.
- [18] Skjemstad J O, Dalai R C, Janik L J, et al. Changes in chemical nature of soil organic carbon in Vertisols under cereal cropping in southern Queensland, Australia[J]. *Journal of Soil Research*, 2001, 39:343-359.
- [19] Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, et al. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65:1473-1478.
- [20] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏, 等. 华南亚热带山地土壤剖面有机质分布特征数值模拟研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8):1239-1246.
CHEN Qing-qiang, SHEN Cheng-de, SUN Yan-min, et al. Quantitative simulation on the vertical distribution of soil organic matters in mountainous soil profiles in the subtropical area, south China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8):1239-1246.
- [21] 孙维侠, 史学正, 于东升. 土壤有机碳的剖面分布特征及其密度的估算方法研究: 以我国东北地区为例[J]. 土壤, 2003, 35(3):236-241.
SUN Wei-xia, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng. Distribution pattern and density calculation of soil organic carbon in profile[J]. *Soils*, 2003, 35(3):236-241.