

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201701002

引文格式: 孙凡, 严思维, 林勇明, 等. 汶川震区不同气候区受损植被土壤有机碳储量和碳密度分布特征 [J]. 广西植物, 2017, 37(12): 1498-1507

SUN F, YAN SW, LIN YM, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon storage and carbon density from damaged vegetation under different climate types in Weichuan earthquake region [J]. *Guihaia*, 2017, 37(12):1498-1507

汶川震区不同气候区受损植被土壤 有机碳储量和碳密度分布特征

孙凡^{1,2}, 严思维^{1,2}, 林勇明^{1,2*}, 陈爱民^{1,2}, 邓浩俊^{1,2}, 杜 锟^{1,2}, 吴承祯^{1,2,3}, 洪 伟^{1,2}

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002; 3. 武夷学院 生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

摘 要: 以汶川地震灾区半干旱干暖河谷气候区、亚热带湿润季风气候区未受损区 (Undestroyed region, UR) 与受损治理区 (Destroyed and treated region, DR) 为研究区, 测定不同层次 (0~5、5~10、10~20 cm) 土壤的含水量、容重及有机碳含量, 分析不同气候区 UR 与 DR 有机碳储量和有机碳密度 (Soil organic carbon density, SOCD) 的分布特征。结果表明: (1) UR 各土层的 SOC 含量均显著高于 DR ($P < 0.05$), 并随土层深度递增呈先增后减趋势; 同一处理不同土层间 SOC 含量差异均不显著 ($P > 0.05$), 但随土层加深有不同变化趋势。 (2) UR 各土层 SOCD 均显著高于 DR ($P < 0.05$), 并随土层深度递增呈增加趋势; 同一处理不同土层间 SOCD 差异不显著, 均随土层深度递增而增加。 (3) 方差分析显示, 两个气候区不同处理对 SOC 含量的影响差异达到极显著水平 ($P < 0.01$), 但处理和土层的交互作用及不同土层对 SOC 含量的影响不显著 ($P > 0.05$)。不同处理和不同土层以及二者的交互作用对 SOCD 的影响差异极显著 ($P < 0.01$), 其中处理与气候类型的交互作用对 SOCD 的影响差异达显著水平 ($P < 0.05$)。这表明研究区内受损治理区土壤有机碳含量低于未受损区, 定量化受损区与未受损区土壤有机碳差异, 可为评价灾区生态恢复措施效益提供数据支撑。
关键词: 汶川地震, 土壤有机碳密度, 不同气候区, 土壤有机碳含量

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)12-1498-10

Distribution characteristics of soil organic carbon storage and carbon density from damaged vegetation under different climate types in Wenchuan earthquake region

SUN Fan^{1,2}, YAN Si-Wei^{1,2}, LIN Yong-Ming^{1,2*}, CHEN Ai-Min^{1,2}, DENG Hao-Jun^{1,2},
DU Kun^{1,2}, WU Chen-Zhen^{1,2,3}, HONG Wei^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 3. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, Fujian, China)

收稿日期: 2017-03-31 修回日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (41201564) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (41201564)].

作者简介: 孙凡 (1992-), 男, 安徽黄山人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统恢复, (E-mail) 1041609260@qq.com。

* 通信作者: 林勇明, 博士, 副教授, 主要研究方向为恢复生态学, (E-mail) monkey1422@163.com。

Abstract: Taking typical regions affected by Wenchuan earthquake as research area including semi-arid dry warm river valley and subtropical humid monsoon climates, we set up the undestroyed region (UR) and destroyed and treated region (DR) as sampling plots. We determined soil water content, bulk specific gravity and organic carbon (soil organic carbon, SOC) content in different levels (0–5, 5–10, 10–20 cm). We analyzed the distribution characteristics between undestroyed region and destroyed and treated region in different climatic regions. The results were as follows: (1) SOC content of each soil layer in UR was significantly higher than that of DR in two typical climatic regions ($P < 0.05$), while SOC increased first and then decreased with the soil depth. The SOC content in different soil layers in the same climatic region had no significant difference ($P > 0.05$) with a fluctuated trend. (2) SOCD in UR was significantly higher than that in DR ($P < 0.05$) and increased with the soil depth. It did not show significantly different ($P > 0.05$) in different soil layers in the same climatic region. (3) Treatments in both climatic regions significantly influenced SOC content, but the interaction between treatments and soil layers and the influence of different soil layers was not significant ($P > 0.05$). Different treatments and soil layers as well as their correlation significantly influenced SOCD ($P < 0.01$), the interaction between treatments and climate types was significantly different ($P < 0.05$). The results indicate that soil organic carbon content in destroyed and treated region is lower than that in undestroyed region. Our results will supply the data for evaluating the effects of ecological restoration measures.

Key words: Wenchuan earthquake, soil organic carbon density (SOCD), different climate types, soil organic carbon content

“5.12”汶川 8.0 级特大地震及其引发的滑坡、泥石流等次生灾害导致大量水土流失、土壤质量下降、植被资源衰退甚至灭绝等一系列生态环境问题(金增芳,2013;张德罡,2002;吴聪等,2012)。地震灾害影响气候环境,地震及由其造成的次生灾害毁坏作为碳循环中重要组成部分的植被,造成灾区 CO_2 吸收能力下降,碳循环失衡(徐玖平和何源,2010)。由于灾区地质条件差,水文条件复杂,山体岩石破碎,沟谷坡度较大,滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害频发(麦积山等,2015),该区域不仅是青藏高原高寒植被区与东部湿润森林区的结合部,也是长江中上游重要的水源涵养区,因此,如何加快灾区生态修复进程,对于维系灾区生态安全、构筑长江中上游生态屏障具有重要的现实意义(林青等,2011)。

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是有机质残体经过土壤微生物作用后形成的含碳成分的特殊高分子化合物,可反映土壤质量和健康状态,对生物生长和土壤肥力造成直接影响(苏永中和赵哈林,2002;刘景双等,2003)。土壤有机碳不仅为植物和土壤微生物生长提供碳源,而且在很大程度上影响土壤团聚体的形成、土壤抵抗侵蚀、土

壤养分存储供应、土体结构稳定、持水力等,其数量及分布反应了地表植被空间分布,时间演替及人为干扰等因素(吴家森等,2014)。目前针对灾区震后生态系统恢复的研究报道较多,主要集中在灾区生态恢复、土壤种子库、土壤微生物群落、土壤结构、抗侵蚀能力、植被恢复等方面(徐旭等,2011;张坤,2014),而针对不同气候区 SOC 的研究则主要涉及单个气候区内不同土地利用类型土壤有机碳的空间分布格局及其与土壤性质、土壤侵蚀、植被演替等关系(苏正安等,2016;杨宁等,2013;彭怡等,2013;许旭等,2011;唐国勇等,2010)。但关于灾区不同气候区内土壤有机碳受损状况及恢复程度的研究不多,难以精确评价地震破坏对区域性碳循环的影响效应。

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,全球大约有 1 500 Pg 的碳以有机态的形式存在于土壤中,是陆地植被碳库(500~600 Pg)的 2~3 倍,大气碳库(750 Pg)的 2 倍(王建林等,2010)。地震灾区土壤结构的破坏则会使土壤中的有机质充分暴露在空气中,促进了土壤呼吸作用,加速了土壤有机质的分解。受损后土壤原有碳储蓄库功能丧失,土壤碳汇功能下降,并且区域性气候变化的

可能性加大。因此,研究灾区碳储量分布特征对于制定应对灾区水土流失、生态修复、气候变化的策略和措施具有重要意义。鉴于此,本文以四川汶川地震灾区为研究区,通过分析两种气候区受损治理区与未受损区不同土层 SOC 变化特征,以期为灾区水土流失防治、构建合理水保措施、完善灾区生态修复提供数据支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区为四川地震极重灾区,位于四川盆地西北部与青藏高原东南部交界地带,地理位置为 102°49′~105°38′ E、30°45′~33°03′ N,受灾区域总面积达 26 410 km²,其中受灾情况最为严重的为茂县、北川县、汶川县、绵竹市、都江堰市、彭州市、什邡市、安县、平武县、青川县等 10 个县(市)。试验区分别设置于汶川县威州镇和绵竹市汉旺镇生态治理典型示范区内,其中威州镇(102°51′~

103°44′ E,30°45′~31°43′ N)属于典型的半干旱干暖河谷气候区,气温年较差小,日较差大,春季气温回升较快,秋季下降迅速,≥10℃的积温大,持续时间长,低温稳定,年均气温 11.2~12.9℃,降水较为充沛,干湿季明显,但由于蒸发量大,全年水分亏损,年平均降水量 416 mm,雨季平均降雨量 425.2 mm,干季平均降雨量 81.9 mm;土壤质地以砾石土为主,其次为壤土和粘土,粗骨性强,地质条件差,水文条件复杂,山体岩石破碎,沟谷坡度较大(张永双等,2013)。汉旺镇(104°09′~104°09′ E,31°27′~31°27′ N)属于典型亚热带湿润季风气候,气候温和,降水充沛,四季分明,属于亚热带湿润季风气候区,年平均气温 15℃,年最大降雨量为 1 421.4 mm(1961 年),年最小降雨量为 699.3 mm(1965 年);基带土壤为黄壤及紫色土,海拔约 650 m(张广帅等,2015)。在四川地震极重灾区选择半干旱干暖河谷气候区及亚热带季风气候区不同受损程度植被土壤为研究对象(表 1),研究区生态恢复工程依托日本国际协力机构(JICA)

表 1 采样点基本情况

Table 1 General information of sampling sites

气候类型 Climate type	处理 Treatment	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Elevation (m)	盖度 Coverage (%)	平均坡度 Average slope (°)	植被构成 Vegetation composition
半干旱干暖 河谷气候 Semi-arid dry warm river valley climate	受损治理 DR	103°57′ E,31°47′ N	1 371	42	42	狗尾草、刺槐、岷江柏等 <i>Setaria viridis</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Cupressus chengiana</i> , et al
	未受损 UR(CK)	103°47′ E,31°33′ N	1 232	60	32	狗牙根、白刺花、刺果蔷薇等 <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Sophora davidii</i> , <i>Rosa acicularis</i> , et al
亚热带湿润 季风气候 Subtropical humid monsoon climate	受损治理 DR	104°15′ E,31°46′ N	722	60	39	川滇盘果菊、飞生蓬、竹柳等 <i>Prenanthes henryi</i> , <i>Conyza canadensis</i> , <i>Salix fragilis</i> , et al
	未受损 UR(CK)	104°16′ E,31°46′ N	729	70	34	刺槐、莎草、扁桃等 <i>Tobinia pseudoacacia</i> , <i>Cyperus rotundus</i> , <i>Amygdalus communis</i> , et al

资助的中日合作项目“四川省地震灾后森林植被恢复项目”,在威州选取一个受损治理区样地(Destroyed and treated region, DR),面积约 1.6 hm²,在相邻区域选取未受损区样地(Undestroyed region, UR)作为对照,面积约 1 hm²;在汉旺选取一个受损

治理区样地,面积约 1.7 hm²,在相邻区域选取未受损区样地作为对照,面积也约为 1 hm²。

1.2 样品采集及分析方法

2015 年 12 月,分别在两个气候区内受损治理区(DR)和未受损区(UR)各设置 9 块 20 m × 20 m

表 2 采样点土壤容重

Table 2 Soil bulk density of sampling sites

气候类型 Climate type	样地类型 Type of sampling site	土壤容重 Soil bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		
		0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm
半干旱温暖河谷气候 Semi-arid dry warm river valley climate	受损治理 DR	1.09 ± 0.10Aa	1.12 ± 0.10Ab	0.95 ± 0.23Aa
	未受损 UR(CK)	1.53 ± 0.13Ab	1.32 ± 0.17Ab	1.30 ± 0.09Ab
亚热带湿润季风气候 Subtropical humid monsoon climate	受损治理 DR	1.41 ± 0.19Aa	1.44 ± 0.11ABa	1.35 ± 0.10Aa
	未受损 UR(CK)	1.58 ± 0.04Aa	1.53 ± 0.12Aa	1.35 ± 0.14Aa

注:不同处理(DR或UR)同一土层间差异显著以小写字母来表示,同一处理不同土层间差异显著以大写字母表示。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments on the same soil layer at 0.05 level, different capital letters indicate significant differences among different soil depths on the same treatment at 0.05 level.

固定样地用于土壤样品采集。土壤样品采集用军工铲挖取,取样深度为0~20 cm(分为0~5,5~10,10~20 cm 三层),每层土壤取样时去除腐殖质层,在样地内以随机取点方式重复采样3次,将相同层次土壤样品分别混合为一个样品;挖开土壤剖面在各剖面土层中部平稳打入环刀,采集环刀土样,将样品带回室内,放在室内阴凉处风干,称量烘干土重量,最后按照环刀法计算方法测定土壤容重。所有土样带回实验室,在室内自然风干,除杂、研磨、过100目筛,将处理好的土壤样品移入密封袋中封好,用于土壤有机碳含量的测定。

土壤含水量采用烘干法测定,土壤容重采用环刀法,土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定(鲍士旦,2000)。

1.3 计算方法

土壤有机碳密度(Soil organic carbon density, SOCD)是指单位面积一定深度的土层总SOC的储量。一般认为SOCD是由SOC质量分数、>2 mm砾石体积百分比和土壤容重共同决定。土壤剖面内某一土层*i*的土壤有机碳密度 $\text{SOCD}_i(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ 计算公式(曹生奎等,2014):

$$\text{SOCD}_i = C_i B_i D_i (1 - \delta_i) / 100$$

式中, C_i 为第*i*层SOC质量分数($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), B_i 为第*i*层土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), D_i 为第*i*层土层厚度(cm), δ_i 为第*i*层土壤中>2 mm的砾石百分比。

1.4 数据处理

数据先转化为对数形式以提高方差齐性和正态分布,再由Excel 2013整理、SPSS 17.0软件进行分析,然后进行方差分析采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和双因素方差分析(two-way ANOVA)比较不同数据之间的差异,差异水平均为0.05,采用Excel 2013制图,所有数据均表示平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 不同气候区土壤有机碳含量分布特征

两个气候类型不同处理(DR和UR)不同土层SOC分布如图1所示。两个气候同一处理不同土层间SOC含量差异均不显著($P>0.05$),但随土层加深有不同变化趋势。

在半干旱温暖河谷气候区中(图1:a),SOC均随土层深度增加呈递增趋势。同一土层,未受损区SOC含量均显著高于受损治理区,差异均达显著水平($P<0.05$)。

在亚热带湿润季风气候区中(图1:b),同一处理不同土层SOC含量变化趋势一致,随土层深度递增呈现先增后减的趋势,均表现为5~10 cm土层>10~20 cm土层>0~5 cm土层,以5~10 cm土层含量最高。同一土层,未受损区SOC含量均高

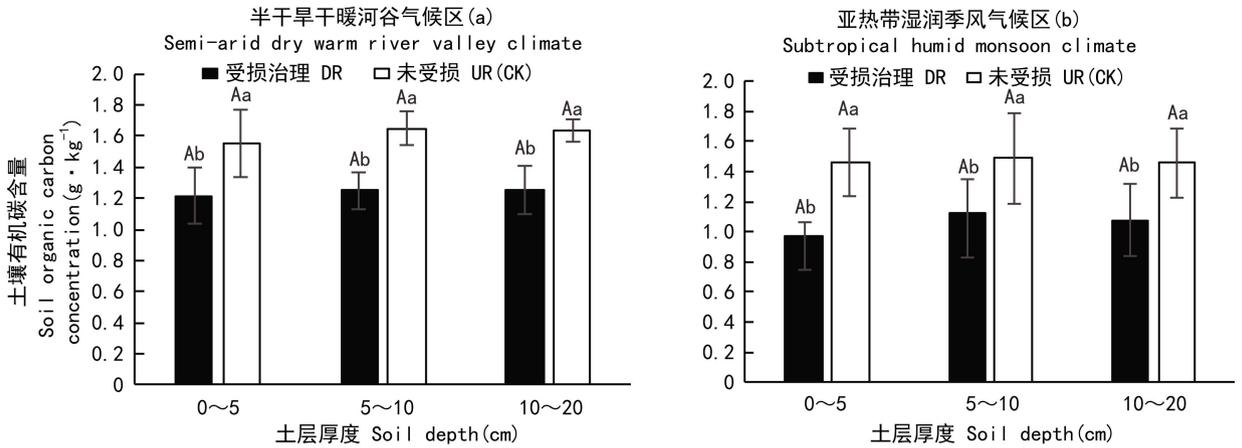


图 1 不同气候类型两种处理区 SOC 含量分布 不同处理(DR 或 UR)同一土层间差异显著以小写字母来表示,同一处理不同土层间差异显著以大写字母表示。下同。

Fig. 1 Distribution of SOC in two treatments in different climate types Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments on the same soil layer at 0.05 level, different capital letters indicate significant differences among different soil depths on the same treatment at 0.05 level. The same below.

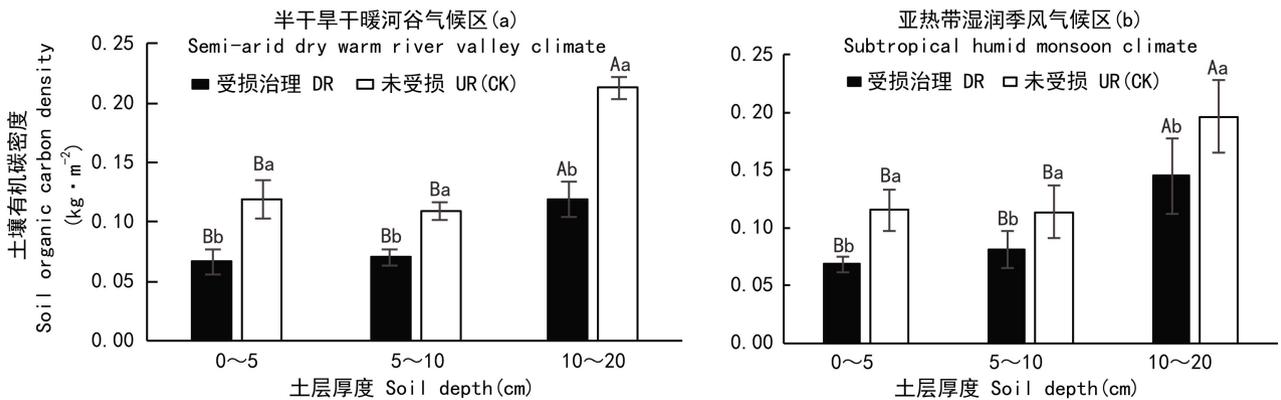


图 2 不同气候类型两种处理区 SOCD 含量分布

Fig. 2 Distribution of SOCD in two treatments under different climate types

于受损治理区,均达到显著水平($P < 0.05$)。

2.2 不同气候区土壤有机碳密度分布特征

对不同气候类型 SOCD 的分析结果显示,在半干旱干暖河谷气候中(图 2:a),未受损区各土层 SOCD 表现为 10~20 cm 土层 > 0~5 cm 土层 > 5~10 cm 土层,受损治理区各土层 SOCD 表现为随土层深度递增呈增加的趋势。其中,同一处理 10~20 cm 土层 SOCD 显著高于 0~5 cm 和 5~10 cm 土层($P < 0.05$),0~5 cm 和 5~10 cm 两土层间差异不显著($P > 0.05$)。同一土层,未受损区 SOCD 含量均高于

受损治理区,差异均达显著水平($P < 0.05$)。

在亚热带湿润季风气候中(图 2:b),未受损区与受损治理区各土层 SOCD 大小均表现为随土层深度递增而增加的趋势,且各个土层间差异达显著水平($P < 0.05$)。各个土层中,未受损区 SOCD 含量均高于受损治理区,未受损区与受损治理区土壤各土层间差异达显著水平($P < 0.05$)。

2.3 不同气候、土层与土壤有机碳和土壤有机碳密度的关系

方差分析结果(表 3)显示,不同处理、不同气

表 3 处理和土层对 SOC 含量和 SOCD 的双因素方差分析结果

Table 3 Results of two-way ANOVA for effects of treatments and soil depth on SOC concentration and SOCD

指标 Indicator	变差来源 Source of variation	离差平方和 Sum of squares of deviation	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	显著性 Significance
SOC	处理 Treatment	2.758	1	2.758	73.582	0.000
	土层 Soil depth	0.080	2	0.040	1.065	0.351
	气候类型 Climate type	0.499	1	0.499	13.310	0.001
	处理 * 土层 Treatment * Soil depth	0.005	2	0.003	0.068	0.935
	处理 * 气候类型 Treatment * Climate type	0.007	1	0.007	0.181	0.672
	土层 * 气候类型 Soil depth * Climate type	0.005	2	0.002	0.061	0.941
	处理 * 土层 * 气候类型 Treatment * Soil depth * Climate type	0.030	2	0.015	0.400	0.672
	SOCD	处理 Treatment	0.050	1	0.050	150.609
土层 Soil depth		0.091	2	0.046	137.661	0.000
气候类型 Climate type		0.000	1	0.000	0.822	0.368
处理 * 土层 Treatment * Soil depth		0.004	2	0.002	6.268	0.003
处理 * 气候类型 Treatment * Climate type		0.001	1	0.001	4.335	0.042
土层 * 气候类型 Soil depth * Climate type		0.000	2	0.000	0.375	0.689
处理 * 土层 * 气候类型 Treatment * Soil depth * Climate type		0.001	2	0.001	1.932	0.154

候类型对 SOC 的影响差异达到极显著水平 ($P < 0.01$), 其余因素及其交互作用对 SOC 的影响不显著 ($P > 0.05$)。不同处理、不同土层及二者交互作用对 SOCD 的影响达极显著水平 ($P < 0.01$), 处理及气候类型的交互作用对 SOCD 影响达显著水平 ($P < 0.05$), 其余因素及其交互作用对 SOC 的影响不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 土壤有机碳密度与土壤容重的关系

图 3 为研究区内 SOCD 随土壤容重增加的变化趋势。通过分析得出 SOCD 与土壤容重间存在显著的负相关关系 ($R = 0.484, P < 0.05$)。因此, 在研究区内土壤有机碳密度随着容重的增加而呈减小的趋势。

3 讨论

地震及其次生灾害造成土壤养分流失及植被破损, 改变了土壤理化性质和养分空间格局, 使坡面失稳和土壤质量下降, 从而加剧水土流失及植被衰退甚至灭绝等一系列生态环境问题(麦积山等, 2015)。研究表明, 未受损区 SOC 含量显著高于受损治理区, 两个气候区同一处理不同土层间 SOC 含量差异均不显著。半干旱干暖河谷气候区未受损区及受损治理区不同土层 SOC 含量差异不显著, 可能是地震产生的扰动造成土层紊乱所引起; 而同一土层受损治理区及未受损区 SOC 含量

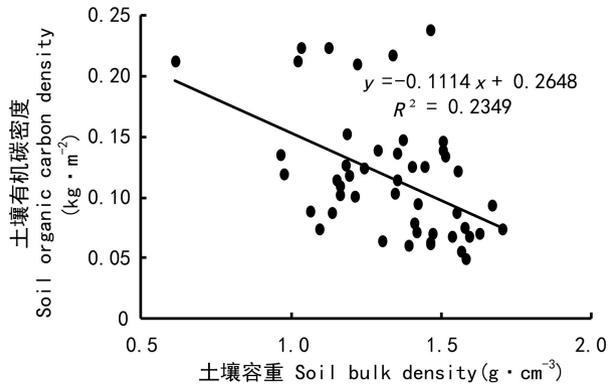


图3 SOCD与土壤容重的关系

Fig. 3 Relationship between the SOCD and soil bulk density

差异极显著,表明治理区SOC尚未恢复到原生水平。未受损区各土层SOC含量大小表现为5~10 cm土层>10~20 cm土层>0~5 cm土层,而受损治理区随土层深度增加呈微弱递增趋势。究其原因,这是由于地震使表层土壤松散且受损(0~5 cm),从而导致SOC在5~10 cm累积,而未受损区植被生长发育良好,土壤碳内循环较为稳定,故在不同土层中差异较小;亚热带湿润季风气候区受损治理区及未受损区不同土层SOC含量无显著差异,除5~10 cm土层外,受损治理区SOC含量均显著低于未受损区,反映震后受损治理区土壤碳储蓄库功能仍未达到震前水平。

SOC含量是土壤物质循环的主要中间环节,作为衡量土壤肥力高低的重要指标,可直接反映地表植被覆盖情况,同时又是大气中CO₂的主要来源,作为受气候和大气CO₂浓度变化影响的碳库,在碳素循环中具有重要作用(展争艳等,2005; Li et al, 2007)。对于健全、完整的生态系统而言,地表植被群落、土壤环境及地下微生态系统处于一种相互关联的状态,地上植被、土壤养分与微生物群落之间具有显著的相互作用关系(张广帅等, 2015),汶川地震及其次生灾害不仅对地表形态、植被覆盖造成严重影响,而且阻断SOC主要来源途径,进一步限制土壤微生物碳源利用种类,导致微生物数量急剧减少并使其群落组成趋于单一

(赵丽丽等,2016),后期恢复过程中受损治理区土壤微生物数量、种类受到限制,土壤腐殖质及生物残体分解速率不及未受损区,这也是受损治理区SOC不及未受损区的原因之一。

受损治理区SOC含量随土层深度变化趋势与未受损区表现差异,原因可能是地震对地表植被的破坏导致原有“植被—土壤”系统严重受损,半干旱干暖河谷气候区受损治理区植被覆盖率较未受损区低18%,亚热带湿润季风气候区受损治理区植被覆盖率较未受损区低38%。植物通过细根周转为土壤输入碳和养分改善土壤环境,有效促进土壤微生物活动,从而深刻影响根际土壤有机质分解和养分代谢等过程(梁儒彪等,2015),凋落物的积累和分解是植物营养及能量从林木冠层转移到土壤中的主要途径(吴春生等,2016)。地震灾区受损治理区与未受损区地表植被生物量的差距不仅影响地表枯落物数量,植物根系对于深层土壤有机质也缺乏补充。此外,裸露地表与空气充分交换及降水的冲刷使表层高腐殖质性土壤流失,深层土壤有机质缺乏外界碳源补充并且微生物活动减弱,造成SOC逐渐分解释放,因此形成受损治理区SOC含量不及未受损区的结果。

土壤SOCD主要由有机碳含量及土壤容重共同决定,可反映土壤紧实程度、质地及有机质状况,本研究表明土壤容重与SOCD呈现负相关性(图3),证实了前人得出的土壤有机碳含量往往与容重呈负相关性的观点(肖毅峰,2013)。土壤容重增大会导致土壤孔隙度减少,团聚体相互靠近形成板结,同时气体扩散率降低,土壤环境趋于厌氧环境,致使植被根系无法正常生长(邹养军等,2007)。本研究发现亚热带湿润季风气候区SOCD随土壤深度递增呈现增加趋势,受损治理区与未受损区SOCD均为显著差异。其原因可能是地震引起的山体滑坡等扰动导致土壤紧实度降低,破坏了原有土壤结构并导致地表裸露;降水冲刷山体造成表土层剥落,产生大量粉砂粒并堆积,导致土壤容重增大,表现为土壤出现板结及孔隙度下降,受损植被恢复困难,且植被返还土壤的枯落物受高容重土壤阻挡,其积累与腐殖质化过程均发生于地表,极易受降水冲刷造成流失而无法

补充土壤 SOC,仅依赖植物根系补充,因此受损治理区有机碳密度不及未受损区。而半干旱干暖河谷气候区受损治理区 SOCD 与未受损区表现差异,可能是由二者地表植被覆盖情况不同所导致。

SOC 与 SOCD 可能受到多因子的影响。通过双因素方差分析表明,地震后不同处理方式(即受损治理区或未受损区)对 SOC 含量存在显著影响,灾区不同气候区自身环境条件对 SOC 可能存在不同的影响。不同处理、不同土层、处理和土层及处理和气候类型的交互作用对 SOCD 存在显著影响,这说明地震扰动对于研究区 SOCD 存在一定的影响,但研究区地表植被类型、气候类型、海拔、坡度也可影响土壤剖面 SOCD 分布趋势。半干旱干暖河谷气候区受损治理区样地平均坡度达 42° (表 1),显著高于其他样地,内部分布较多陡坡。地震及次生灾害导致研究区内部大量滑坡,表层高腐殖质土壤流失,原先深层土壤取代表层土壤裸露地表,灾后人工措施虽在一定程度上改善灾区土壤理化性质,但植被覆盖度仍低于未受损区 18%,对整个土壤环境改善效果较差;亚热带湿润季风气候区样地坡度较为平缓,受损治理区及未受损区植被差异较小,但样地海拔远不及半干旱干暖河谷气候区,相关研究表明,受低海拔地区温度较高的影响,土壤有机质分解速率加快(解宪丽等, 2004;施政等, 2008),因而亚热带湿润季风气候区 SOCD 不及半干旱干暖河谷气候区,加上降水充沛,导致土壤养分损失较多,表现为受损治理区 SOC 低于未受损区。两个气候区自然环境的不同也会导致表层土壤有机质损失速率产生差异。

总之,地震通过短期内对土壤剖面层次破坏及扰动影响土壤理化性质,且破坏了区域内生态系统稳定状态,造成植被破损,弱化地表植被对土壤理化性质的改良效果。植被恢复对于 SOC 的影响效应是一个长期过程,恢复过程中植物通过根系及枯落物重新补充土壤中有有机碳,逐步改变植被受损带来的水土流失问题,理想恢复状态下受损治理区土壤剖面 SOC 含量应逐步偏向受灾前水平,即向未受损区 SOC 含量靠近;而本研究得出治理区土壤剖面的 SOC 含量较未受损区仍然存在较大差距,反映出该地区植被恢复在短期内对土壤

剖面 SOC 的恢复效果不佳,后期恢复过程中土壤及植被类型、研究区气候特征等对土壤有机碳输入与转化将直接影响受损治理区土壤有机碳水平。

4 结论

(1)不同气候区地表植被、地形、降水对土壤有机质含量影响大,研究区未受损区 SOC 含量均高于受损治理区,呈现先增后减的趋势,未受损区 SOCD 均高于受损治理区,呈现随土层深度递增而增加的趋势。(2)一般土壤 SOC 含量随土层深度递增而增加,但本研究发现两个气候区内不同处理 SOC 分布情况呈现不同的变化趋势。研究区受损治理区与未受损区 SOC 含量及密度仍有一定差距,不同气候区受损治理区地表植被盖度仍未达到受灾前水平,裸露地块多,在强降水作用下极易导致水土流失,致使土壤养分受损。因此,基于不同气候区降水及气温迥异,应考虑植被恢复过程中采取相应的人为措施进行改良以便于生态恢复过程中减少 SOC 损失速率,防止其进一步演变为碳源,造成生态环境持续恶化。(3)结合本研究区基本情况,由地震及其次生灾害引起土壤剖面理化性质异常及地表植被受损,造成 SOC 垂直分布特征出现反常,应考虑逐步提高灾区植被覆盖率及减少裸露地面比例,在生态脆弱区特别是滑坡体坡面应考虑采取工程措施减缓纵比降以弱化降水冲刷带来的养分流失,稳定区域内表层土壤,为新生植物群落构建良好生境,促进研究区碳储蓄库恢复功能,避免 SOC 进一步释放到大气中。基于地表植被重构的基础上提高土壤 SOC 含量,促使灾区生态状况向受损前转化,在此基础上构建适应本地区的、更加稳定的生态系统。

参考文献:

- BAO SD, 2000. Soil chemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press; 30-34. [鲍士旦, 2000. 土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版社; 30-34.]
- CAO SK, CHEN KL, CAO GC, et al, 2014. Characteristics of soil carbon density distribution of the *Kobresia humilis*

- meadow in the Qinghai Lake basin [J]. *Acta Ecol Sin*, 34(2):482-490. [曹生奎, 陈克龙, 曹广超, 等, 2014. 青海湖流域矮嵩草甸土壤有机碳密度分布特征 [J]. *生态学报*, 34(2):482-490.]
- JIN ZF, 2013. Yushu seismic landslide characteristics and formation mechanism and its control measures [J]. *Build Struct*, 43(suppl. 2):686-689. [金增芳, 2013. 玉树地震滑坡的特征与形成机理及治理措施 [J]. *建筑结构*, 43(suppl.2):686-689.]
- LI ZP, HAN FX, SU Y, et al, 2007. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China [J]. *Geoderma*, 138(1/2):119-126.
- LIANG RB, LIANG J, QIAO MF, et al, 2015. Effects of simulated exudate C:N stoichiometry on dynamics of carbon and microbial community composition in a subalpine coniferous forest of western Sichuan, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 39(5):466-476 [梁儒彪, 梁进, 乔明锋, 等, 2015. 模拟根系分泌物 C:N 化学计量特征对川西亚高山森林土壤碳动态和微生物群落结构的影响 [J]. *植物生态学报*, 39(5):466-476.]
- LIN Q, ZENG J, MA J, et al, 2011. Microbial carbon utilization in rhizosphere soils of secondary plants in earthquake fault zone of Xinjiang [J]. *Chin J Appl Ecol*, 22(9):2297-2302. [林青, 曾军, 马晶, 等, 2011. 新疆地震断裂带次生植物根际土壤微生物碳源利用 [J]. *应用生态学报*, 22(9):2297-2302.]
- LIU JS, YANG JS, YU JB, et al, 2003. Study on vertical distribution of soil organic carbon in wetlands of Sanjiang Plain [J]. *J Soil Water Conserv*, 7(3):5-8. [刘景双, 杨继松, 于君宝, 等, 2003. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究 [J]. *水土保持学报*, 7(3):5-8.]
- MAI JS, ZHAO TN, ZHENG JK, et al, 2015. Spatial variability of surface soil nutrients in the landslide area of Beichuan County, South-west China, after 5·12 Wenchuan Earthquake [J]. *Chin J Appl Ecol*, 26(12):3588-3594. [麦积山, 赵廷宁, 郑江坤, 等, 2015. 北川震后滑坡体表层土壤养分的空间变化 [J]. *应用生态学报*, 26(12):3588-3594.]
- PENG Y, WANG YK, FU B, et al, 2013. Spatial distribution of carbon storage function and seismic damage in Wenchuan earthquake stricken areas [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(3):798-808. [彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等, 2013. 汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估 [J]. *生态学报*, 33(3):798-808.]
- SHI Z, WANG JS, HE R, et al, 2008. Soil respiration and its regulating factor along an elevation gradient in Wuyi Mountain of Southeast China [J]. *Chin J Ecol*, 27(4):563-568. [施政, 汪家社, 何容, 等, 2008. 武夷山不同海拔土壤呼吸及其主要调控因子 [J]. *生态学杂志*, 27(4):563-568.]
- SU YZ, ZHAO HL, 2002. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects [J]. *J Desert Res*, 22(3):220-228. [苏永中, 赵哈林, 2002. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展 [J]. *中国沙漠*, 22(3):220-228.]
- SU ZA, LI Y, XIONG DH, et al, 2016. Effect of soil erosion in slope cultivated land of Longmenshan earthquake zone on lateral movement of soil organism carbon [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 32(3):118-124. [苏正安, 李艳, 熊东红, 等, 2016. 龙门山地震带坡耕地土壤侵蚀对有机碳迁移的影响 [J]. *农业工程学报*, 32(3):118-124.]
- TANG GY, LI K, SUN YY, et al, 2010. Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley [J]. *Chin J Environ Sci*, 31(5):1366-1371. [唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等, 2010. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征 [J]. *环境科学*, 31(5):1366-1371.]
- WANG JL, OU YH, WANG ZH, et al, 2010. Influential factors and distribution characteristics of topsoil organic carbon of alpine grassland ecosystem in the south slope of Gongga South Mountain-Laguigangri Mountain [J]. *Chin J Soil Sci*, 41(2):346-350. [王建林, 欧阳华, 王忠红, 等, 2010. 贡嘎南山-拉轨岗日山南坡高寒草原生态系统表层土壤有机碳分布特征及其影响因素 [J]. *土壤通报*, 41(2):346-350.]
- WU C, WANG JN, LU T, et al, 2012. Effect of Wenchuan earthquake on soil physical and chemical properties of with the Longmen Mountain, southwestern China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 18(6):911-916. [吴聪, 王金牛, 卢涛, 等, 2012. 汶川地震对龙门山地区山地土壤理化性质的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 18(6):911-916.]
- WU CS, LIU YQ, WEI XH, et al, 2016. Relationships between biomass and carbon storage of litter and fine root in subtropical typical forests [J]. *J SW For Univ*, 36(5):45-51. [吴春生, 刘苑秋, 魏晓华, 等, 2016. 亚热带典型森林凋落物及细根的生物量和碳储量研究 [J]. *西南林业大学学报*, 36(5):45-51.]
- WU JS, QIAN JF, TONG ZP, et al, 2014. Changes in soil organic carbon and soil microbial functional diversity of *Carya cathayensis* plantations under intensive managements [J]. *Chin J Appl Ecol*, 25(9):2486-2492. [吴家森, 钱进芳, 童志鹏, 等, 2014. 山核桃林集约经营过程中土壤有机碳和微生物功能多样性的变化 [J]. *应用生态学报*, 25(9):2486-2492.]
- XIAO YF, 2013. Soil organic carbon spatial distribution and the analysis of the influencing factors in Mangshan [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology. [肖毅峰, 2013. 莽山土壤有机碳空间分布及其影响因子分析 [D]. 长沙:中南林业科技大学]
- XIE XL, SUN B, ZHOU HZ, et al, 2004. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. *Acta Pedol Sin*, 41(5):687-699. [解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等, 2004. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子 [J]. *土壤学报*, 41(5):687-699.]
- XU JP, HE Y, 2010. The overall planning reconstruction model

- of low carbon ecosystem balance in post Sichuan earthquake [J]. *Chin Pop Resourc Environ*, 20(7):12-19. [徐玖平, 何源, 2010. 四川地震灾后生态低碳均衡的统筹重建模式 [J]. *中国人口资源与环境*, 20(7):12-19.]
- XU X, LUO CD, YU XG, et al, 2011. Effect of vegetation restoration models on soil anti-erodibility in seismic disastrous areas of Northern Sichuan [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 32(5):35-39. [许旭, 罗承德, 喻晓钢, 等, 2011. 川北地震灾区不同植被恢复模式对土壤抗蚀性的影响 [J]. *四川林业科技*, 32(5):35-39.]
- YANG N, ZOU DS, YANG MY, et al, 2013. Relationships between vegetation characteristics and soil properties at different restoration stages on slope land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, South-central China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 24(1):90-96. [杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等, 2013. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系 [J]. *应用生态学报*, 24(1):90-96.]
- ZHANG DG, 2002. Effect of deforestation and landslide on soil of *Rhododendron* shrub ecosystem in the eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Pratac Sin*, 11(3):72-75. [张德罡, 2002. 砍伐与滑坡对东祁连山杜鹃灌丛草地土壤肥力的影响 [J]. *草业学报*, 11(3):72-75.]
- ZHANG GS, DENG HJ, DU K, et al, 2015. Soil seed bank and its correlations with aboveground vegetation in ecological restoration zones of Wenchuan earthquake region [J]. *Chin J Eco-Agric*, 23(1):69-79. [张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等, 2015. 汶川地震生态治理区土壤种子库及其与地上植被的关系 [J]. *中国生态农业学报*, 23(1):69-79.]
- ZHANG GS, LIN YM, MA RF, et al, 2015. Carbon source metabolic diversity of soil microbial community under different climate types in the area affected by Wenchuan earthquake [J]. *Chin J Environ Sci*, 36(2):669-677. [张广帅, 林勇明, 马瑞丰, 等, 2015. 汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 [J]. *环境科学*, 36(2):669-677.]
- ZHANG K, 2014. Investigation and analysis of landslide vegetation in severely damaged areas after Wenchuan earthquake [D]. Lanzhou:Lanzhou University. [张坤, 2014. 汶川地震极重灾区受损植被恢复调查分析 [D]. 兰州:兰州大学.]
- ZHANG YS, CHENG YL, YAO X, et al, 2013. The evolution process of Wenchuan earthquake-landslide-debris flow geo-hazard chain [J]. *Geol Bull Chin*, 32(12):1900-1910. [张永双, 成余粮, 姚鑫, 等, 2013. 四川汶川地震—滑坡—泥石流灾害链形成演化过程 [J]. *地质通报*, 32(12):1900-1910.]
- ZHAN ZY, LI XG, ZHANG DG, et al, 2005. Effects of land use on organic C concentration and structural properties in alpine grassland [J]. *Acta Pedol Sin*, 42(5):777-782. [展争艳, 李小刚, 张德罡, 等, 2005. 利用方式对高寒牧区土壤有机碳含量及土壤结构性质的影响 [J]. *土壤学报*, 42(5):777-782.]
- ZHAO LL, ZHONG ZK, SHI ZM, 2016. Effects of Wenchuan earthquake on soil microbial communities and nutrients in *Cupressus chenginana* forest [J]. *Chin J Soil Sci*, 47(1):98-104. [赵丽丽, 钟哲科, 史作民. 汶川地震对岷江柏林土壤微生物群落及养分的影响 [J]. *土壤通报*, 2016, 47(1):98-104.]
- ZOU YJ, MA FW, HAN MY, et al, 2007. Advance in research of effect and mechanism of higher soil compaction on plant growth [J]. *Agric Res Arid Areas*, 25(6):212-215. [邹养军, 马锋旺, 韩明玉, 等, 2007. 土壤紧实胁迫与植物抗胁迫响应机理研究进展 [J]. *干旱地区农业研究*, 25(6):212-215.]