

DOI:10.11766/trxb201901220367

黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响*

张 祎 李 鹏 肖 列[†] 赵宾华 时 鹏

(西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

摘 要 土壤有机碳 (SOC) 作为土壤中重要的组成部分及植物生长的主要元素, 在地球生态系统中起着举足轻重的作用, 是全球环境尤其是气候变化的重要影响因素。以黄土高原王茂沟小流域为研究对象, 通过间隔为 150 m 经纬网格分 5 层采集 0~100 cm 土壤样品, 采集土壤样品包括 4 种地形 (坡顶、坡上、坡中、坡下) 和 5 种土地利用类型 (坡耕地、林地、草地、灌木、梯田), 共采集土壤样品 1 540 个, 探讨地形和土地利用方式对黄土丘陵沟壑区小流域 SOC 含量和分布影响, 并通过 Kriging 插值计算流域内 SOC 空间分布。结果表明, 黄土丘陵第一副区王茂沟小流域在 0~100 cm 土层中, SOC 平均含量坡上 ($4.49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和坡中 ($4.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量最高, 其次为坡下 ($3.97 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 坡顶 SOC 含量最低 ($3.34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$); 坡耕地 SOC 含量最低。林地 ($4.31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、梯田 ($4.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、草地 ($4.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和灌木 ($3.82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别较坡耕地 ($3.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) SOC 含量增加 24.2%、22.4%、18.7% 和 10.1%。表层 SOC 更易受到环境因子的影响, 梯田等水土保持措施可明显固存深层 (>20 cm) SOC。方差成分估计表明, 土地利用、地形、深度以及土地利用与地形的交互作用对流域剖面 SOC 含量空间分布有着极显著的影响 ($P<0.01$), 其中地形对 SOC 含量的贡献率最高 (32.50%)。土地利用与地形的交互作用在各因子的交互作用中表现出对 SOC 含量变异解释度最高 (7.4%)。流域 SOC 在空间上呈斑块分布, 随着深度的增加, 流域 SOC 的空间分布向均一性发展。研究结果为黄土区水土保持措施规划及退耕还林的固碳效益评价提供了科学依据。

关键词 黄土丘陵区; 土壤有机碳; 地形; 土地利用

中图分类号 TV121+.2 **文献标识码** A

土壤有机碳 (SOC) 是重要的土壤属性之一, 在陆地生态系统功能中起着重要作用^[1], SOC 含量大小对土壤性质以及质量起着至关重要的影响, 是评价土壤肥力的重要指标^[2]。陆地生态系统中的碳储量大约是大气中 CO₂ 的 2 倍多, 陆地植被碳库的 3 倍^[3]。全球 0.3 m 土壤深度的碳储量为 684~724 Pg, 1 m 土壤深度碳储量为 1 462~1 548 Pg^[4]。大量的有机碳被储存在土壤中, 即使是土

壤碳含量的微小变化也会显著改变大气中 CO₂ 的浓度, 并造成全球气候变化^[5]。因此, 学者们在全球^[6]、国家^[7]和区域^[8]尺度上对 SOC 分布以及储量进行了大量的研究, 然而这些研究由于数据来源的不同和 SOC 固有的空间变异性, 导致结果的不确定性。SOC 受到诸多因素的影响, 包括气候, 地形、土壤质地、土地利用等, 因此在给定区域建立一个详细的数据库, 应该考虑到以上因素。黄土高

* 国家自然科学基金项目 (41701603, 41601092)、陕西省技术创新引导专项 (2017CGZH-HJ-06) 资助 Supported by the National Natural Foundation of China (Nos. 41701603, 41601092), Shaanxi Provincial Technology Innovation Guidance Project (No. 2017CGZH-HJ-06)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xiaosha525@163.com

作者简介: 张 祎 (1991—), 男, 山西长治人, 博士研究生, 主要从事水土保持与土壤有机碳方面研究。E-mail: 18202915856@163.com

收稿日期: 2019-01-22; 收到修改稿日期: 2019-05-10; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-06-19

原地区地形破碎, 土地利用类型复杂多样, 在区域尺度上, 形成了典型的黄土高原沟壑和黄土丘陵沟壑等流域侵蚀地貌特征, 成为世界上水土流失最严重的地区之一^[9]。受水土流失的影响, SOC在黄土丘陵沟壑的梁峁顶、梁峁坡、沟谷地等呈现不同规律的迁移^[10-11]。经过长期的植被恢复与重建, 黄土高原土地利用和植被发生了明显的变化。从另一个角度而言, 地形支配着水、热资源的分配, 从而影响植被和土地利用方式在空间上的配置, 对SOC的输入产生作用^[12]。因此在黄土高原地区, 地形和土地利用对SOC库的响应最为敏感^[13], 而在不同流域尺度SOC的研究^[14-15]中, 地形与土地利用方式共同作用下有机碳变化研究的报道较少, 并且已有的研究大多集中在传统统计和地理统计上^[16], 不同土层尤其是深层(>20 cm) SOC受地形及土地利用因子共同作用的贡献率计算更是鲜见。

在本文中, 选择在黄土高原典型流域-王茂沟流域开展相关工作, 对研究区SOC的分布和储量进行研究。通过分析典型小流域0~100 cm土层SOC的分布特征, 分析地形、土地利用对其分布的影响, 基于方差探讨黄土高原小流域地形、植被及其交互作用对SOC的影响贡献率, 从小流域尺度揭示各因子对SOC垂直分布的影响规律, 为黄土高原地区植被恢复的土壤碳效应评估和生态规划提供理论依据, 对科学认识黄土高原土壤在全球变化的作用与响应机制具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择陕西省绥德县王茂沟流域为研究区, 其位于陕西省绥德县东南5 km处无定河流域(图1a), 是黄河中游黄土丘陵区第一副区具有代表性的流域之一(110°20'~110°22'E, 37°34'~37°36'N)。王茂沟流域面积5.97 km², 主沟长3.75 km, 沟道平均比降2.7, 沟壑密度4.3 km·km⁻², 海拔936~1 188 m, 该流域的平均坡度为2.7%。流域内高地和沟壑土地面积为2.97 km², 占总面积的46.7%(图1b)。流域属大陆性季风气候, 年平均气温10.2 °C, 多年平均降雨量513.1 mm, 主要集中在7—9月, 汛期降水量占全年降水

量的73.1%, 且多以暴雨形式出现。土壤类型均为黄绵土, 水土流失严重, 流域年输沙量可达74.13 Mg·hm⁻²·a⁻¹。作为黄土高原水土流失的典型流域, 王茂沟流域主要以水力侵蚀为主。

从20世纪50年代开始, 为改善黄土丘陵区严重的水土流失, 黄河水利委员会绥德水土保持科学实验站将王茂沟流域作为试验性治理小流域之一。直至90年代, 生物措施(退耕还林还草)及工程措施(梯田, 淤地坝)在流域内大面积开展。其中修筑梯田112.47 hm², 植树造林199.96 hm², 恢复草地27.25 hm², 淤积坝地25.16 hm²(图1c)。人工草被主要为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、赖草(*Leymus secalinus* T.)、大针茅(*Stipa grandis* P.)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* N.)、长芒草(*Stipa bungeana* T.)等, 人工林地主要为杏树(*Armeniaca vulgaris* L.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、枣树(*Ziziphus jujube* M.)等, 坡耕地主要种植大豆(*Glycine max* M.)、谷子(*Setaria italica*)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)等, 灌木植被主要为柠条(*Caragana Korshinskii* M.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、酸枣(*Ziziphus jujube* M.)等, 梯田主要植被类型为苹果(*Malus domestica*)、杏树(*Armeniaca vulgaris* L.)、侧柏(*Platycladus orientalis* L.)等, 坝地主要种植玉米(*Zea mays*)。水土流失治理面积为367.81 hm², 侵蚀控制率为61.61%^[17]。

1.2 样品采集

基于小流域内地形和土地利用两大因素, 采用“分层采样的方法”收集土壤样品。将地形(坡顶、坡上、坡中、坡下)作为一级层次, 将不同地形部位土地利用方式(坡耕地、林地、草地、灌木地、梯田)作为二级层次, 对土壤样品进行系统分析。在2014年7月, 在研究区进行网格采样, 网格间距为150 m, 结合王茂沟流域实际地形后, 样点分布情况见图1c。使用直径为6.9 cm手钻进行土壤样品采集, 共布设采样点位216个, 每个点位采样深度为100 cm, 分为5层(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm)。并对应在采样原位各层使用环刀采集土样, 测量土壤容重, 用于有机碳储量计算。在采集土壤样品同时, 记录采样点土地利用类型、坡度和坡向等相关

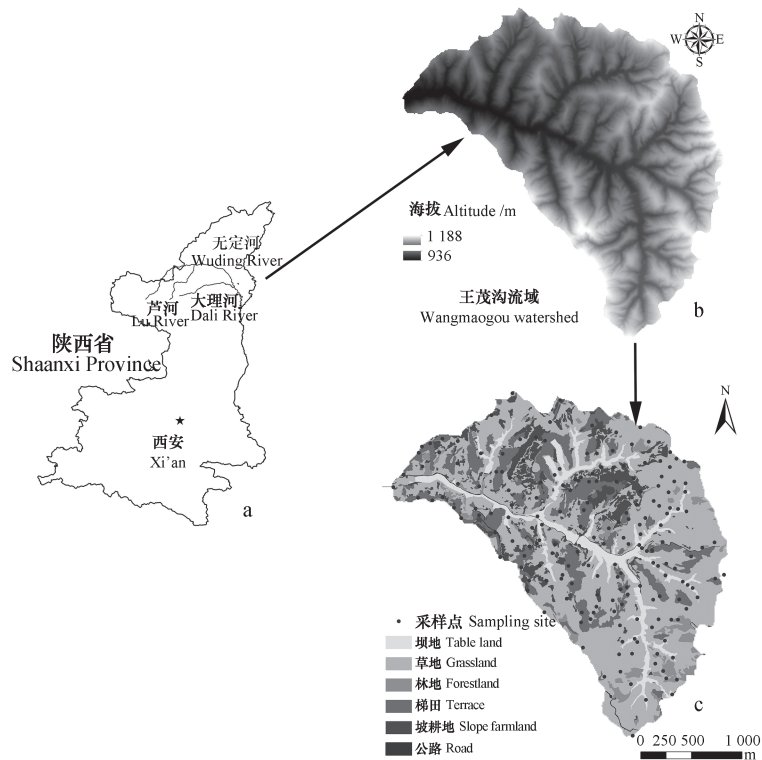


图1 研究区概况

Fig.1 General situations of the study region

信息。其中，坡耕地土壤样品75个，林地55个，草地325个，灌木地90个，梯田225个，共得到分析样品770个，环刀样770个。

1.3 分析方法

有机碳采用德国耶拿公司生产的有机碳分

析仪multi N/C[®]3100测定，取研磨过100目筛的土样1.000 g，用1 mol·L⁻¹的盐酸溶液浸泡24 h，去除土壤中的无机碳，用TOC分析仪测定土壤中的有机碳含量；土壤容重采用环刀法测定（表1）。

表1 各土地利用类型下的土壤容重

Table 1 Soil bulk density relative to land use / (g·cm⁻³)

土层深度 Soil depth/cm	坡耕地 (n=75) Slope farmland	林地 (n=55) Forestland	草地 (n=325) Grassland	灌木地 (n=90) Shrub land	梯田 (n=225) Terrace
0 ~ 20	1.11 ± 0.09Aa	1.27 ± 0.10Ab	1.25 ± 0.22Ab	1.11 ± 0.11Aa	1.19 ± 0.14Aa
20 ~ 40	1.21 ± 0.08Aa	1.42 ± 0.23Bb	1.34 ± 0.17Bb	1.27 ± 0.21Bb	1.27 ± 0.09Bb
40 ~ 60	1.33 ± 0.10Ba	1.53 ± 0.09Bb	1.49 ± 0.40Bb	1.28 ± 0.14Ba	1.38 ± 0.13Bb
60 ~ 80	1.31 ± 0.08Ba	1.54 ± 0.12Bb	1.50 ± 0.09Bb	1.30 ± 0.17Ba	1.40 ± 0.20Bb
80 ~ 100	1.34 ± 0.12Ba	1.56 ± 0.15Bb	1.52 ± 0.10Bb	1.32 ± 0.09Ba	1.42 ± 0.22Bb

注：大写字母表示同一深度不同坡位0.05水平差异性显著；小写字母表示同一坡位不同深度0.05水平差异性显著。表头中的数字代表该土地利用下的样点数。下同Note: Capital letters represent significant difference in 0.05 levels between slope positions the same in depth, and lowercase letters do significant differences in 0.05 levels between soil layers the same in slope position. The numbers in the header indicate the number of samples in the column of land use. The same below

1.4 数据处理

经检验研究区的土壤有机碳数据满足平稳假

设，因此本文采用ArcGIS 10.2中的普通Kriging插值方法进行有机碳储量的空间插值，重点考虑区域

化变量数据的空间相关性,并以GS+软件拟合的半变异函数进行插值。估算某测量点 z 值的通用方程为^[18]:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^s Z_X W_X \quad (1)$$

式中, Z_0 为待估计值, Z_X 为已知点的 x 值, W_X 为与已知点关联的权重, s 为用于估算的已知点的数目, 权重由数据空间特性拟合的半变异函数得到。

有机碳储量可以通过以下等式计算^[19]:

$$D_i = \rho_i \cdot h_i \cdot c_i \quad (2)$$

$$SOC_i = D_i \cdot A_i \quad (3)$$

式中, ρ_i 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), h_i 为土层厚度 (cm), c_i 为有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), SOC_i 为有机碳储量 (kg), A_i 代表每个土地利用面积 (m^2), D_i 为有机碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。

根据野外实测数据与实验室的分析结果,采用一般线性模型 (GLM) 分析了土地利用、地形、深度以及它们的交互作用对SOC的影响。利用

SPSS18.0对SOC含量进行方差分析 (ANOVA)。

2 结 果

2.1 地形对剖面SOC分布特征的影响

研究区0~100 cm土层SOC含量在3.13~4.72 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,且以表层SOC含量最高。地形显著影响了剖面SOC的空间分布 (表2),表现为坡上 (4.49 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 坡中 (4.30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 坡下 (3.97 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 坡顶 (3.34 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。100 cm土层中,坡上、坡中、坡下SOC含量分别较坡顶高34.6%、28.9%和18.8% ($P < 0.05$)。坡顶、坡上和坡中位置,0~20 cm土层SOC含量均显著高于20~100 cm各土层SOC含量,同一坡位,20 cm以下土层SOC含量差异不显著;而在该流域坡下部位,包括表层在内,各层SOC含量之间均无显著性差异。

表2 地形对土壤剖面SOC空间分布的影响

Table 2 Effects of topography on spatial distribution of soil organic carbon in soil profile / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土层深度 Soil depth/cm	坡顶(n=160) Slope top	坡上(n=240) Upper slope	坡中(n=230) Middle slope	坡下(n=140) Downslope
0~20	3.71 ± 0.59Aa	4.72 ± 0.43Ba	4.59 ± 0.63Ba	4.18 ± 0.68Ca
20~40	3.29 ± 0.59Ab	4.45 ± 0.48Bb	4.35 ± 0.44Bb	4.01 ± 0.60Ca
40~60	3.13 ± 0.73Ab	4.42 ± 0.30Bb	4.22 ± 0.42Bb	3.84 ± 0.62Ca
60~80	3.24 ± 0.68Ab	4.46 ± 0.43Bb	4.16 ± 0.51Bb	3.92 ± 0.55Ca
80~100	3.32 ± 0.59Ab	4.41 ± 0.50Bb	4.19 ± 0.51Bb	3.89 ± 0.59Ca
平均值Mean	3.34A	4.49B	4.30B	3.97C

2.2 土地利用方式对剖面SOC分布特征的影响

土地利用方式也显著影响剖面SOC含量空间分布特征 (表3)。100 cm土层中,坡耕地SOC含量最低,仅为3.47 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$)。林地 (4.31 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、梯田 (4.25 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、草地 (4.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和灌木 (3.82 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)分别较坡耕地SOC含量增加24.2%、22.4%、18.7%和10.1%。0~20 cm土层林地SOC含量最高 ($P < 0.05$)。SOC含量在60 cm出现临界层,在60 cm土层以上,坡耕地SOC含量最低,其他各土地利用类型之间SOC含量均没有显著性差异;在60 cm土层以下,仅梯田与坡耕地SOC含量表现出显著性差异 ($P < 0.05$)。且对于同一土地利用而言,林地、草地、灌木表层 (0~20 cm)

SOC与其各自深层土壤SOC含量表现出显著差异。

2.3 地形与土地利用交互作用对剖面SOC分布特征的影响

地形和土地利用方式交互作用极显著 ($P < 0.01$)影响土壤剖面SOC分布特征 (图2)。坡顶草地 (3.19 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、灌木 (3.60 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、梯田 (3.33 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)SOC平均含量分别为坡耕地 (2.93 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的1.09倍、1.23倍、1.14倍,坡顶0~20 cm土层SOC含量均显著高于坡耕地,草地、灌木、梯田0~20 cm土层SOC含量均高于其他各土层SOC含量 ($P < 0.05$)。除坡耕地外,其余各土地利用0~20 cm土层SOC含量均显著高于

表3 土地利用对土壤剖面SOC空间分布的影响

Table 3 Effects of land use on spatial distribution of soil organic carbon in soil profile/ (g·kg⁻¹)

土层深度 Soil depth/cm	坡耕地(n=80) Slope farmland	林地(n=55) Forestland	草地(n=330) Grassland	灌木地(n=75) Shrub land	梯田(n=230) Terrace
0~20	3.5 ± 0.63Ca	5.37 ± 0.41Ba	4.43 ± 0.58Aa	4.11 ± 0.47Aa	4.37 ± 0.63Aa
20~40	3.48 ± 0.74Ba	4.06 ± 0.28Ab	4.14 ± 0.66Ab	3.73 ± 0.53Ab	4.25 ± 0.64Aa
40~60	3.41 ± 0.58Ba	4.10 ± 0.48Ab	3.99 ± 0.74Ab	3.69 ± 0.50Ab	4.19 ± 0.67Aa
60~80	3.47 ± 0.50Ba	4.01 ± 0.71ABb	4.03 ± 0.74ABb	3.81 ± 0.52ABb	4.23 ± 0.69Aa
80~100	3.51 ± 0.50Ba	4.01 ± 0.53ABb	4.02 ± 0.68ABb	3.78 ± 0.58ABb	4.24 ± 0.69Aa
平均值Mean	3.47B	4.31A	4.12A	3.82A	4.25A

其他土层SOC含量 ($P < 0.05$), 20~40 cm土层林地、草地、灌木SOC含量均显著高于坡耕地, 其余各土层间SOC含量分布较为均一。坡中位置, 坡耕地在0~60 cm土层SOC含量最低, 林地、草地、梯田0~20 cm土层SOC含量均显著高于各20~100 cm土层SOC含量 ($P < 0.05$)。在坡下位置, 坡耕地SOC含量在0~80 cm土层显著低于草地和灌木, 草地和灌木0~20 cm土层SOC含量最高 ($P < 0.05$), 坡耕地各土层之间SOC含量差异不显著。同一地形条件下生态建设措施的不同, 可以导

致进入土壤的植物残体数量和性质各异, 且由于人为干扰程度的不同, 影响土壤碳素矿化、运输以及植物的吸收利用, 最后导致土壤中SOC含量存在差异。在不同的地形条件下, 坡耕地0~20 cm土层SOC含量均表现为最低, 且各土层之间SOC含量变化也较为一致, 与Zhao等^[20]研究结论一致。将坡耕地恢复为林地、草地、梯田或者灌木地可以显著增加SOC的含量, 对于区域而言, 进行生态恢复可增加碳截存量, 从而加强土壤碳汇的能力及区域碳储量。

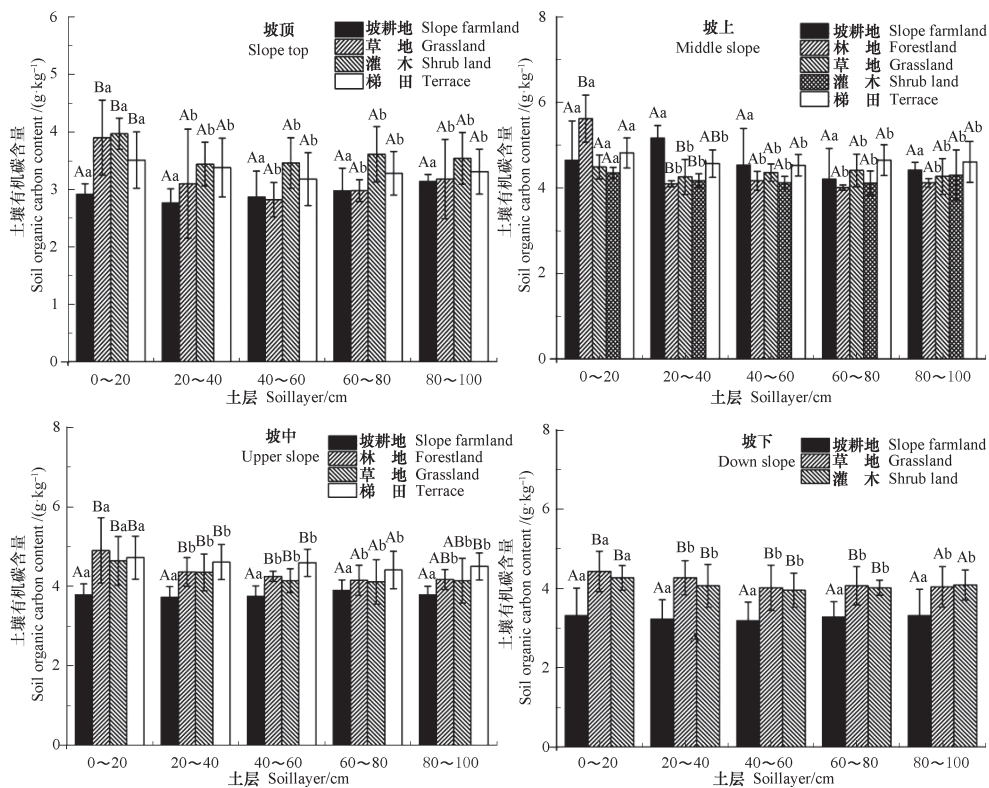


图2 同一地形不同土地利用方式对土壤剖面SOC空间分布的影响

Fig. 2 Effects of land-uses the same in topography on spatial distribution of soil organic carbon in soil profiles

2.4 剖面SOC含量的影响因子

根据一般线性模型 (GLM) 的方差成分分析, 对土地利用、地形、深度及其交互作用对SOC含量变异性的贡献进行了计算。各因子以及土地利用与地形的交互作用对流域剖面SOC含量空间分布有极显著影响 ($P < 0.01$)。土地利用与深度的交互作用、地形与深度的交互作用以及土地利用、地形、深度三者的交互作用对剖面SOC含量分布影响不显著。7种不同角度的对比分析发现, 地形对SOC含量影响最为显著, 可解释32.50%的变异性。其次为土地利用与地形的交互作用, 可解释7.40%的变异性, 地形对其贡献率较其他影响因子高出3倍甚至更高。单因子的贡献率中, 土层深度对SOC含量的影响最小, 解释其5%的变异性。土地利用与深度对SOC的交互作用影响最小, 仅解

释其0.80%的变异性。由此可知, 地形是本研究区SOC的重要影响因子。

2.5 区域SOC空间分布特征

以上文数据和分析为基础, 通过GS+软件对王茂沟流域不同土层SOC进行半方差函数分析 (表4), 研究土壤特性空间分布的方向性和相关距离, 根据软件得出的决定系数和残差平方和选择最优插值模型并对流域未采集部位SOC进行最优内插估值和成图。对Kriging插值模型结果进行正交检验, 参考最优模型评价标准: 标准平均值最接近于0, 均方根预测误差最小, 平均标准误差最接近于均方根预测误差, 标准均方根预测误差最接近于1, 插值结果精度越高。因此, 本文采用普通Kriging插值模型对王茂沟流域土壤有机碳含量的插值结果满足精度要求。

表4 不同土层土壤有机碳的半方差结构特征

Table 4 Semivariance analysis of SOC in soil layers relative to depths

深度 Depth /cm	块金值 C_0	基台值 C_0+C_1	空间依赖程度 GD/%	变程 Range/m	模型 Model	决定系数 R^2	残差平方和 RSS
0 ~ 20	0.73	4.57	15.97	159	高斯	0.761	0.344
20 ~ 40	0.27	4.58	5.9	188	球状	0.72	0.438
40 ~ 60	0.28	4.92	5.7	234	球状	0.756	1.06
60 ~ 80	0.54	4.6	11.7	273	指数	0.799	0.505
80 ~ 100	0.22	4.72	4.7	221	球状	0.77	0.659

将流域内各层SOC含量通过K-S正态检验, 通过比较检测P值, 均与正态性没有显著差异 ($P > 0.05$), 流域SOC符合正态分布, 因此根据半方差分析所得出的参数, 对各土层的SOC进行普通Kriging插值 (图3), 空间分布基本呈现相似的格局。总体而言, 王茂沟流域SOC集中呈斑块分布。随着深度的增加, 流域SOC的空间分布向均一性发展, 这是因为土壤表层与外界环境因子相互作用更加密切, 异质性更强。SOC高的地区对应于林地、灌木地、草地和梯田, 与实际调查相符。这些地区由于管理良好, 土壤流失减小, 同时林地、灌木地、梯田凋落物等外源出入碳聚集在土壤表层, 可为微生物活动提供充足的能量和物质来源, 从而会促进土壤中生物的活动。草地地上部分的枯枝落叶可以为土壤提供大量的碳源。因此, 这些地区具有良好的保肥保水作用。

3 讨论

3.1 地形和土地利用对SOC的影响

复杂的地形因子对土壤的物质、能量过程、理化性质、土地生产力、土壤水分状况、微气候等均会产生影响^[21]。坡位、坡向、海拔等相关地形因素控制着小尺度区域尤其是坡面土壤的水、肥、气、热等。千沟万壑的黄土高原, 地形破碎、复杂多变, 起伏的地形地貌景观对SOC有重要影响。坡位不同, 土壤有机质空间分布特征及凋落物腐殖化、矿化过程也不尽相同, 与本研究结果相同。在黄土高原腹地延河流域, Sigua等^[22]也发现沟坡 (即坡面) SOC含量较岭顶高。坡 (岭) 顶土地利用类型相对单一, 农作物和果树是其主要的植被类型, 由于人为翻耕, 土壤的通透性增加, 土壤质地松软, 水蚀作用强烈, 水土流失严重, 土壤中

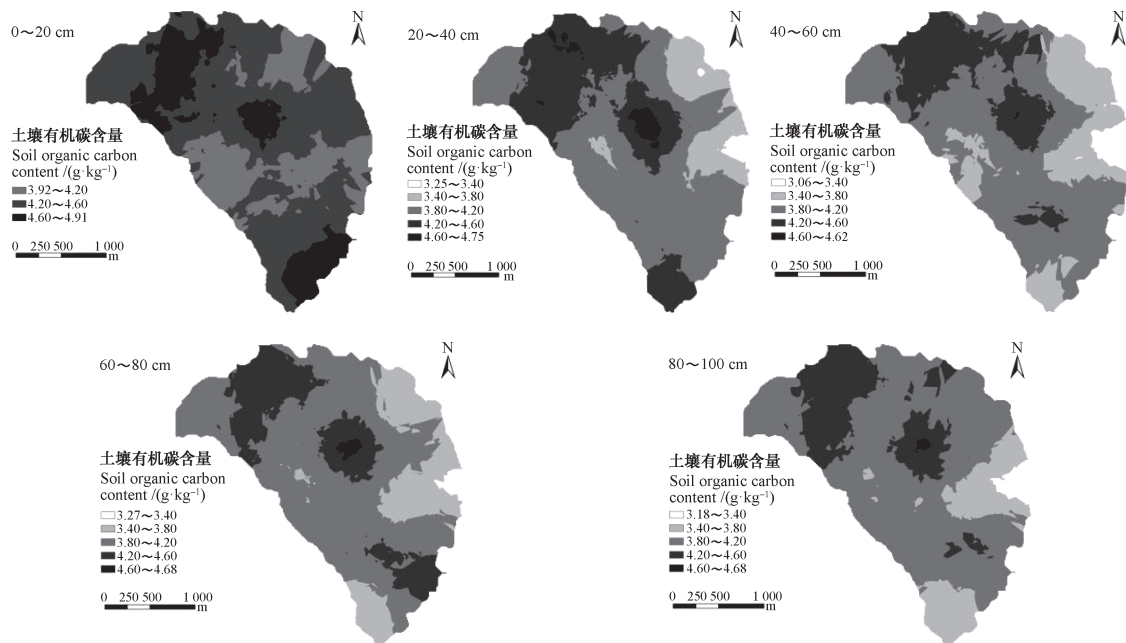


图3 王茂沟流域土壤有机碳含量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of SOC in Wangmaogou watershed

SOC也随之流失；作物收获后其植物体内的碳不能归还至土壤中，导致坡耕地不利于SOC的积累和保护^[23]。坡上、坡中位置植被类型最为完整且具有多样性，凋落物等外源输入碳聚集在土壤表层，同时为微生物活动提供充足的能量和物质来源，从而促进了土壤表层的生物活动^[24]，表层较多的SOC输入，以及发达的植被细根分布，使其控制土壤侵蚀和水土流失能力较强^[25]。尽管坡下有来自其他坡位侵蚀泥沙的碳输入，但经过坡上和坡中植被的拦截作用，到达坡下的泥沙所携带的SOC含量较低，因此坡下SOC输入较小，使得坡下SOC含量相对较低。正是由于不同地形部位对SOC含量影响的不同，使得地形因子对SOC变异性的解释度最高。

针对土地利用方式的结构调整，不仅可以明显控制和减缓土壤侵蚀的发生，而且是提高陆地生态系统SOC的有效措施。在耕作过程中，土壤在耕层内上下扰动，导致本研究区坡耕地SOC含量在垂直方向上未呈现出表层高于底层的现象。与坡耕地相比，梯田种植物多样性较高，枯落物层、根系发达程度均较坡耕地高，导致梯田整体SOC含量高于坡耕地。0~60 cm土层是SOC在土壤剖面中分布变化最为活跃的层次，尤其表现在退耕还林（草）之后的土地利用类型中；60~100 cm土层是SOC分布相对稳定的区域^[26]，这与本文得出的流域SOC

空间分布结果一致。林地凋落物在土壤表层大量积累和分解，致使0~20 cm土层SOC急剧增加。研究结果显示将坡耕地恢复为灌木、林地、草地、梯田后，均可以增加0~60 cm土层SOC含量。总体来看坡耕地在退耕还林或撂荒后，由于枯落物输入、微生物活动等影响，表层土壤有机碳含量明显增加。而梯田作为我国较常用的水土保持耕作措施，改善了农业生产条件，增加土壤通透性，提高了水分入渗量和蓄存量，从而影响土壤水、肥、气、热状况^[27]。

3.2 各因子及其交互作用对SOC变异的贡献

分布在0~100 cm深度的SOC，极易受人为干扰和气候变化的影响，同时土地利用^[28]、地形^[29]、土壤类型、成土母质、管理措施^[30]等多种因子也会使得SOC分布及空间异质性发生改变。我国黄土高原地区千沟万壑，支离破碎，土地利用类型复杂多样，形成了典型的沟壑侵蚀地貌（梁峁顶、梁峁坡及沟谷地）。因此该区有机碳的分布也往往是多种因子综合作用的结果，针对某一具体地区而言，SOC的主控因子也就会因时间、空间和尺度不同而不同。赵明月等^[31]对陕西安塞县典型小流域的有机碳研究发现，该区地形因子对有机碳含量和密度的影响高于土地利用；而在黄河腹地延河流域^[32]，植被类型对SOC的影响大于地形因子。

在本研究流域, 地形因子对SOC含量影响最大, 其中又以坡位对SOC含量的影响最大^[33]。黄土高原梁峁顶土地利用方式相对单一, 由于常年遭受暴雨冲蚀, 且植被盖度较低, 侵蚀剧烈, 在坡位较高、单一土地利用方式两种因素的共同影响下, 其SOC含量最低。峁坡上广泛分布梯田、林地、草地及果园等, 植被盖度较高, 有效减缓了水土-养分流失的发生, 使得峁坡面SOC含量高于坡顶。因此, 与其他因子的交互作用相比, 土地利用与地形的交互作用对本研究流域SOC含量变异性贡献最大(7.4%)。此外, 分布在坡顶的坡耕地表层土壤结构疏松, 植被盖度较低, 且遭受雨滴击溅、冲刷程度更大, 因而较其他坡位、土地利用更易发生侵蚀, 伴随土壤侵蚀的表层有机碳也随之流失, 从而表现出坡顶表层SOC含量最低, 随着土层变深, SOC含量逐渐增加的规律。林草地有机碳的输入多以表层枯落物为主, 加之梯田肥料施入, 且侵蚀相对坡顶较弱, 因此坡上、坡中、坡下各土地利用方式下均以土壤表层SOC含量最高。较深层土壤水分匮乏, 通气性较好, 微生物相对活跃, 促进了SOC的分解, 使得深层土壤SOC含量较低。不同土地利用方式下SOC含量的垂直变化规律较为一致, 因而土地利用与土层深度的交互作用对SOC含量变异的解释度最低。除梯田外, 其他土地利用方式深层(>20 cm) SOC含量显著小于表层(0~20 cm)土壤, 说明人为活动对土壤干扰程度明显, 经过人为精耕细作与水土保持措施的有效发挥, SOC可以有效被固存。

综上所述, 为了增加研究区碳储量, 不仅要合理规划不同地貌部位的土地利用, 还应减少坡耕地面积及人为干扰等不利因素, 重视水土保持措施生态、社会、经济效益, 降低区域内SOC的流失, 增加区域土壤“碳汇”能力。

4 结 论

黄土丘陵第一副区王茂沟小流域在0~100 cm土层中, SOC平均含量坡上、坡中含量最高, 其次为坡下, 坡顶SOC含量最低; 坡耕地SOC含量最低。林地、梯田、草地和灌木分别较坡耕地SOC含量增加24.2%、22.4%、18.7%和10.1%。表层SOC更易受到环境因子的影响, 梯田等水土保持措施

可明显固存深层SOC。方差成分估计表明, 土地利用、地形、深度以及土地利用与地形的交互作用对流域剖面SOC含量空间分布有着极显著的影响($P<0.01$), 其中地形对SOC含量的贡献率最高, 达到32.50%。土地利用与地形的交互作用在各因子的交互作用中表现出对SOC含量变异解释度最高。流域SOC在空间上呈斑块分布, 随着深度的增加, 流域SOC的空间分布向均一性发展。

参 考 文 献

- [1] Liu Y, Yu D, Wang N, et al. Impacts of agricultural intensity on soil organic carbon pools in a main vegetable cultivation region of China. *Soil & Tillage Research*, 2013, 134 (8) : 25—32
- [2] Gregorich E G, Monreal C M, Carter M R, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74 (4) : 367—385
- [3] 张玮, 任宗萍, 李鹏, 等. 黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响. *水土保持学报*, 2018, 32 (1) : 97—103
Zhang Y, Ren Z P, Li P, et al. Effects of ecological restoration on soil organic carbon and total nitrogen in the small watershed of loess hilly region of China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (1) : 97—103
- [4] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65 (1) : 2—3
- [5] Chen L F, He Z B, Du J, et al. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. *Catena*, 2016, 13 (7) : 37—43
- [6] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40 (3) : 468—470
- [7] Arrouays D, Deslais W, Badeau V. The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. *Soil Use & Management*, 2010, 17 (1) : 7—11
- [8] 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究. *土壤学报*, 2004, 41 (2) : 298—300
Sun W X, Shi X Z, Yu D S, et al. Estimation of soil organic carbon density and storage of northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (2) : 298—300

- [9] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响. 农业机械学报, 2015, 46 (4) : 176—182
Ru H, Zhang J J, Li Y T, et al. Fractal features of soil particle size distributions and its effect on soil erosion of Loess Plateau (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (4) : 176—182
- [10] 李光录, 姚军, 庞小明. 黄土丘陵区土壤和泥沙不同粒径有机碳分布及其侵蚀过程. 土壤学报, 2008, 45 (4) : 740—744
Li G L, Yao J, Pang X M. Distribution and erosion process of organic carbon in the different particle size fractions in loess hills region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (4) : 740—744
- [11] Zhong B, Xu Y J. Topographic effects on soil organic carbon in Louisiana watersheds. Environmental Management, 2009, 43 (4) : 662
- [12] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, 2004, 123 (1) : 1—22
- [13] Ritchie J C, Mccarty G W, Venteris E R, et al. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. Geomorphology, 2007, 89 (1) : 163—171
- [14] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测——以陕西省横山县为例. 土壤学报, 2008, 45 (4) : 577—584
Lian G, Guo X D, Fu B J, et al. Spatial variability and prediction of soil nutrients on a county scale on the Loess Plateau-A case study of Hengshan County, Shaanxi Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (4) : 577—584
- [15] 杨帆, 黄来明, 李德成, 等. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素. 土壤学报, 2015, 52 (6) : 1226—1236
Yang F, Huang L M, Li D C, et al. Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (6) : 1226—1236
- [16] Xiong X, Grunwald S, Myers D B, et al. Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. Science of the Total Environment, 2014, 49 (3) : 974—982
- [17] Gao H D, Li Z B, Li P, et al. Quantitative study on influences of terraced field construction and check-dam siltation on soil erosion. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22 (5) : 946—960
- [18] Matheron G. Principles of geostatistics. Economic Geology, 1963, 58 (8) : 1246—1266
- [19] Xu G, Li Z, Li P, et al. Spatial variability of soil available phosphorus in a typical watershed in the source area of the middle Dan River China. Environmental Earth Sciences, 2014, 71 (9) : 3953—3962
- [20] Zhao B, Li Z, Li P, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors under the condition of ecological construction in a hilly-gully watershed of the Loess Plateau China. Geoderma, 2017, 29 (6) : 10—17
- [21] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响. 土壤学报, 2019, 12 (1) : 1—12
Wang F H, Huang R, Gao M, et al. Effect of combined application of biochar and straw on organic carbon content in purple soil aggregates. Acta Pedologica Sinica, 2019, 12 (1) : 1—12
- [22] Sigua G C, Coleman S W, Albano J, et al. Spatial distribution of soil phosphorus and herbage mass in beef cattle pastures: Effects of slope aspect and slope position. Nutr Cycl Agroec, 2011, 23 (6) : 1100—1107
- [23] 毛艳玲, 杨玉盛, 邹双全, 等. 土地利用变化对亚热带山地红壤团聚体有机碳的影响. 山地学报, 2007, 25 (6) : 706—713
Mao Y L, Yang Y S, Zou S Q, et al. Effects of land use on soil organic carbon in aggregates of hilly red soil in subtropical China (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2007, 25 (6) : 706—713
- [24] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响. 应用生态学报, 2018, 29 (1) : 247—259
Wang B R, Yang J J, An S S, et al. Effects of vegetation and topography features on ecological stoichiometry of soil and soil microbial biomass in the hilly-gully region of the Loess Plateau China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 (1) : 247—259
- [25] Li Z, Zhao Q G. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. Plant & Soil, 2001, 23 (2) : 175—185
- [26] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响. 应用生态学报, 2011, 22 (4) : 971—978
Wei Y W, Su Y R, Chen X B, et al. Effects of human disturbance on soil aggregates content and their organic C stability in Karst regions (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (4) : 971—

- 978
- [27] 赵忠, 李鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究. 应用生态学报, 2000, 11 (1): 38—40
Zhao Z, Li P, Wang N J. Distribution patterns of root systems of main planting tree species in Weibei Loess Plateau (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11 (1): 38—40
- [28] Stephens B B, Gurney K R, Tans P P, et al. Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. Science, 2007, 316 (5832): 1732—1735
- [29] 姜航, 高菲, 崔晓阳. 帽儿山次生林区土壤有机碳储量及地形因子的影响. 森林工程, 2015, 31 (3): 15—20
Jiang H, Gao F, Cui X Y. Soil organic carbon storage and effects of topographical factors of the secondary forest region of Maoer Mountains (In Chinese). Forest Engineering, 2015, 31 (3): 15—20
- [30] 张忠启, 于法展, 于东升, 等. 红壤区土壤有机碳时间变异及合理采样点数量研究. 土壤学报, 2016, 53 (4): 891—900
Zhang Q Z, Yu F Z, Yu D S, et al. Temporal variability of soil organic carbon and rational sample size in red soil region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (4): 891—900
- [31] 赵明月, 赵文武, 钟莉娜. 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, 2014, 34 (5): 1105—1113
Zhao M Y, Zhao W W, Zhong L N. Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon: a case study in the hilly and gully area of Northern Shaanxi Province (In Chinese). Acta Ecology Sinica, 2014, 34 (5): 1105—1113
- [32] 邱宇洁, 许明祥, 师晨迪, 等. 陇东黄土丘陵区坡改梯田土壤有机碳累积动态. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (1): 87—98
Qiu Y J, Xu M X, Shi C D, et al. Dynamic accumulation of soil organic carbon of terrace changed from slope cropland in the hilly loess plateau of eastern Gansu Province (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20 (1): 87—98
- [33] 孟国欣, 查同刚, 张晓霞, 等. 植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响. 生态学杂志, 2017, 36 (9): 2447—2454
Meng G X, Zha T G, Zhang X X, et al. Effects of vegetation type and terrain on vertical distribution of soil organic carbon on abandoned farmlands in the Loess Plateau (In Chinese). Chinese Journal of Ecology 2017, 36 (9): 447—2454

Effects of Topography and Land Use on Soil Organic Carbon in Hilly Region of Loess Plateau

ZHANG Yi LI Peng XIAO Lie[†] ZHAO Binhua SHI Peng

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract 【Objective】As an important component of agricultural soil a major element for plant growth, soil organic carbon (SOC) plays an important role in the earth ecosystem. Huge amounts of organic carbon are stored in the soil, and even a minor change in soil carbon could significantly change the concentration of CO₂ in the atmosphere, which drives global climate change. How SOC is distributed and stored is a very important factor affecting soil quality and SOC fixation. 【Method】In this study, soil samples were collected from 5 soil layers in each of the 0~100 cm soil profiles distributed in a 150m rectangular grid pattern in fields different in slope position (slope top, upper slope, middle slope, and down slope) and in land use (cultivated land, forest land, grassland, shrubland, terrace) in the Wangmaogou watershed of the Loess Plateau. A total of 1 080 soil samples were gathered for analysis of how topographies and land use patterns influence on content and distribution of SOC via Kriging interpolation. 【Result】Among the slope positions, the upper slopes were the highest (4.49 g·kg⁻¹), and followed by the middle

slopes ($4.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), the down slopes ($3.97 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and slope tops ($3.34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) in average SOC content of the 0 ~ 100 cm soil profiles, while among the land use patterns. the forest land ($4.31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) was the highest, and followed by the terraced field ($4.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), grassland ($4.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), shrub land ($3.82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and cultivated land ($3.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Obviously the forest land, terraces, grassland and shrub land was 24.2%, 22.4%, 18.7% and 10.1%, respectively, higher than the cultivated land. SOC in the topsoil was more susceptible to environmental factors, like terracing and some other soil erosion control practices, which can obviously sequester SOC in the deep soil layers (>20 cm). Variance component estimation shows that interactions between land use, topography, depth, land use and topography had extremely significant influences on spatial distribution of SOC content ($P<0.01$). Topography contributed the most to total SOC, reaching 32.50%. And interactions between land use & topography explained 7.4% of the variability of SOC. Spatially, SOC was distributed in patch and increased with depth in the watershed, and turned to be homogeneous in distribution. 【 Conclusion 】 All the findings in this study may serve as theoretical foundations for water and soil conservation and evaluation of carbon sequestration effects.

Key words Loess Hilly Region; Soil organic carbon; Topographies; Land uses

(责任编辑: 檀满枝)