

黄土高原沟壑区王东沟小流域土壤有机碳空间分布

郭胜利*, 车升国, 梁 伟, 杨勤科

(西北农林科技大学水土保持研究所, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:地貌和土地利用是影响土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 空间变异的重要因素。以黄土高原沟壑区王东沟小流域 (8.3 km²) 为对象, 在考虑地貌单元和土地利用影响的基础上, 采集 0—20cm 样品 448 个, 0—200cm 样品 33 个。研究了地貌单元 (塬面、塬坡和沟道) 和土地利用方式对 SOC 含量的影响。结果表明, 地貌单元和土地利用对小流域表层和深层 SOC 的含量分布影响都有显著差异。0—20cm 土层的 SOC 含量, 沟道 > 塬面 > 塬坡; 塬面表层 SOC 含量的变化平缓; 塬坡和沟道 SOC 变异大于塬面。0—200cm 土层 SOC 三地貌单元差异达极显著水平 ($P > 99.9\%$), 塬面 SOC 含量最高 (5.37 g kg⁻¹), 塬坡 (3.06 g kg⁻¹) 最低。不同地貌单元条件下土地利用方式对表层和剖面 SOC 含量分布的影响也存在明显差异。塬面区, 人工草地 SOC 含量亦明显高于农田和果园, 但仅 40cm 以上土层 SOC 达到显著差异。在塬坡上, 不同土地利用类型间, 发生显著差异深度达到 140cm。沟道内, 林草两种土地利用类型间的 SOC 含量无显著差异。在估算该地区 SOC 密度和储量时, 需要充分考虑地貌单元和土地利用方式的影响。

关键词:小流域; SOC; 塬面; 塬坡; 沟道

SOC spatial distribution at small Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau

GUO Shengli*, CHE Shengguo, LIANG Wei, YANG Qinke

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest University of Agriculture and Forestry/ Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract: Patterns of soil organic carbon (SOC) vary widely across the landscape and land uses leading to large uncertainties in the SOC budget especially for agricultural landscapes where water erosion redistributes soil and SOC across the landscape. Samples from 448 sites (0—20cm) and 33 sites (0—200cm) were collected during May 2004 at Wangdonggou watershed in the gully region of the Loess Plateau to measure SOC, and analyzed the effect of land use, landform (tableland, slope land, and gully) and depth on SOC. Soil sampling units were defined on the basis of land form (tableland, slope land, and gully) and land use (arable, orchard, grassland, and woodland). There was significant variation in SOC concentration across the landforms ($P > 99.9\%$). For the top soil of 0—20 cm, SOC concentration was greatest at the gully position (9.1 g kg⁻¹), next was at the tableland position (7.8 g kg⁻¹), and least (6.8 g kg⁻¹) at the slope position. For the soil profiles (0—200 cm), the average of SOC concentration was greatest at the table land position, next was at the slope position, and least at the gully position. Land use impact SOC across the three landforms significantly. For the table land position, SOC content in 0—40cm under grassland was significantly higher than crop land and orchard. For slope land position, SOC content in 0—140 cm under grassland and woodland was significantly higher than under crop land and orchard. For the gully position, SOC content across the depth under grass land was not significantly different from woodland. On the tableland, SOC in 0—20 cm varied between 6.49 and 8.56 g kg⁻¹, on the slope land, the range of SOC concentrations increased (5.79—9.95 g kg⁻¹), and varied most in the gully (5.79—10.64 g kg⁻¹). Our study also indicates that geomorphic position and land use are important for estimating SOC density and stock within a watershed in the region.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40771125); 中国科学院“西部之光”资助项目

收稿日期:2009-01-17; **修订日期:**2009-10-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

Key Words: small watershed; soil organic carbon; tableland; slopeland; gully

土壤是陆地生态系统中最大而活跃的碳库之一^[1],约为大气圈和生物圈碳库的 2.5 倍^[2]。摸清土壤碳库的背景,认识和掌握不同利用条件下土壤碳库的变化与驱动因子,对于理解整个生态系统碳库动态与变化具有重要的科学意义。目前,大量文献从小比例尺大尺度上报道了土壤有机碳(Soil organic C,SOC)空间分布格局特征及其储量^[3-9]。但由于不能准确地获取局域尺度内 SOC 有关信息,致使同一区域的研究结果常常存在较大差异^[10-14]。开展小尺度大比例尺 SOC 储量研究,有助于更好地理解大尺度条件下 SOC 演变机理。地处西北的黄土高原地区,水土流失严重,地形破碎,土壤表层 SOC 空间变异显著。大量研究揭示了陕北黄土区 0—20cm 土层 SOC 与土地利用的关系^[15-24]。但在黄土高原地区南部的高原沟壑区,塬面、塬坡、沟道地貌单元分明,不同地貌单元上的土壤类型和土地利用又有差异。但地貌单元对小流域 SOC 分布的影响报道较少。本研究以高原沟壑区的小流域为对象,研究了塬面、塬坡、沟道地貌单元对 SOC 含量空间变化的影响,并讨论了地貌单元与土地利用的交互作用对小流域 SOC 分布的影响。以期揭示大比例尺小尺度条件下地貌单元与 SOC 含量变化及其空间分布特征的关系,为准确估算黄土区大比例尺度 SOC 储量提供参考。

1 材料与方法

1.1 小流域概况

王东沟小流域位于陕西省西部长武县(东经 107°40′—107°42′,北纬 35°12′—35°16′),为“中国科学院长武黄土高原农业生态试验站”和“长武农田生态系统国家野外研究站”的所在地。小流域土地面积 8.3 km²,塬面、塬坡、沟道约各占土地面积的 1/3,沟壑密度为 2.78 条 / km²,属典型的黄土高原沟壑类型区。塬面海拔 1220 m,小流域内从塬面到沟底的最大高差为 280m。大陆季风气候,年均气温 9.1℃,≥10℃积温 3029℃,多年平均降水 584 mm。季节性分布不均,7—9 月份降水占总量的 55%。小流域内土地利用类型有农田、果园、荒草地、林地等。主要土壤类型为黑垆土(分布于塬面)和黄绵土(分布于塬坡和沟道),母质为深厚的中壤质马兰黄土。塬面地势平坦,为粮果主要种植区;塬坡土壤侵蚀严重,为水土流失的主要治理地段。经过 1980—1990 年期间大规模综合治理,土壤侵蚀模数已由治理前的 1860 t km⁻²下降至目前的 895 t km⁻²以下。

1.2 采样与分析方法

样品采集与分析:根据小流域塬面、塬坡和沟道特征,同时考虑不同地貌单元上土地利用方式的影响,于 2004 年 5 月采集表层(0—20cm)土壤样品 448 个(图 1),0—200cm 土壤剖面样品 33 个(表 1)。其中,塬面因地势平坦,土地利用类型主要为农地和果园,共计采集表层样品 85 个,剖面样品 9 个;塬坡地形起伏多变,土地利用类型相对复杂(人工林地、荒草地、果园、人工苜蓿、农地),共计采集表层样品 251 个,剖面样品 19 个;沟道,主要土地利用类型为林地和草地,共计采集表层样品 112 个,剖面样品 5 个。0—20cm 土样为直径 3cm 的土钻采集。0—200cm 剖面样品采用直径为 3cm 的土钻,间隔 20cm 保存。采样点均以 GPS 定位。土样

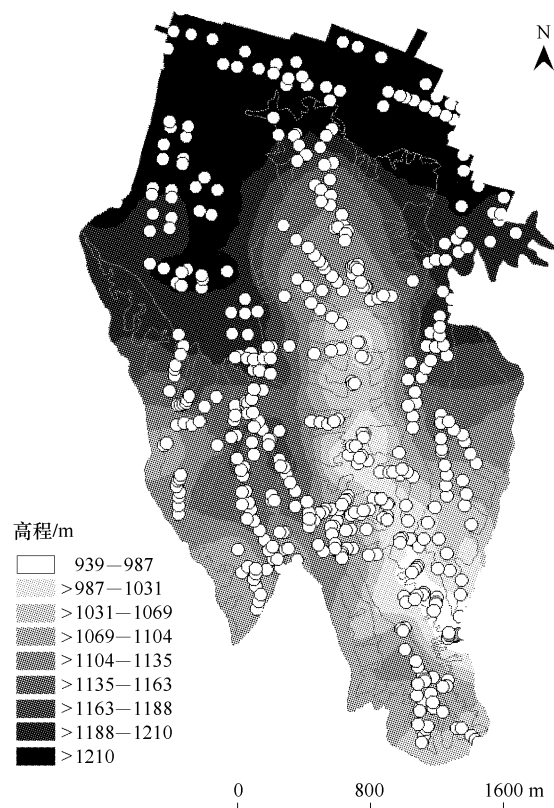


图1 黄土高原沟壑区王东沟小流域高程图(DEM)和表层(0—20cm)土壤采样点分布图

Fig.1 Distribution map of soil surface sample points (0—20cm) at Wangdonggou watershed in gully region of Loess Plateau

风干,磨细过 0.25mm 筛后,测定 SOC($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法)^[25]含量(g kg^{-1})。环刀法测定 0—20cm 和 0—200cm 土层的容重(g cm^{-3})。

表 1 黄土高原沟壑区王东沟小流域不同地貌单元面积及 0—20cm、0—200cm 样品采集数

Table 1 Sampling in the profile of 0—20cm and 0—200cm in landforms at Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau			
地貌单元 Landform	面积 Area / hm^2 *	0—20cm 采样数 Sample number	0—200cm 采样数 Sample number
塬面 Tableland	238.7	85	9
塬坡 Slopeland	295.9	251	19
沟道 Gully	245.8	112	5
总计 Sum	780.4	448	33

* 扣除小流域内村庄院落面积

1.3 数据处理

将采样点的定位数据按不同地貌单元导入 Arcgis9.2 软件中,每个点赋以相应的 SOC 含量的属性值,经阿尔伯斯投影转化,生成以米为单位的平面坐标,利用地统计分析模块克里金内插法,先分别生成各个地貌单元 SOC 含量分布图,然后叠加合成小流域 SOC 含量分布图。

测定数据采用 SAS6.12 软件包统计分析了地貌单元、土地利用及其交互作用对小流域 SOC 变异性的影响。当方差分析(F 检验)显著时,再进行 3 种地貌单元、4 种土地利用方式间的多重比较(t 检验)。SOC 正态分布利用柯尔莫哥洛夫 Kolmogorov-Smirnov 法检验。

2 结果与分析

2.1 数据统计特征与数据检验

统计结果(表 2)显示,整个小流域表层平均 SOC 含量为 7.58g kg^{-1} ,变异系数为 26.9%,属中等变异。塬面 SOC 含量为 7.77g kg^{-1} ,变异系数为 7.5%,属弱变异。与塬面相比,沟道 SOC 含量提高 17.0%,塬坡则降低 12.0%。同时,两者的变异程度均达 26.0% 以上,属中等变异。

表 2 王东沟小流域表层 SOC 数据统计特征

Table 2 Descriptive statistical characteristic of SOC at Wangdonggou small watershed							
地貌单元 Landforms	样本数 Sample No	SOC/(g kg^{-1})				变异系数 C V(%)	正态检验 P
		最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	中值 Median		
塬面 Tableland	85	6.41	9.50	7.77	7.79	7.5	0.6707
塬坡 Slopeland	251	2.71	15.97	6.84	6.48	25.7	< 0.01
沟道 Gully	112	3.59	15.18	9.09	8.89	26.7	0.8097
合计 Sum	448	2.71	15.97	7.58	7.30	26.9	< 0.01

利用 Arcgis 软件的地统计分析模块对不同地貌单元 SOC 数据进行正态分布检验。直方图和正态 QQPlot 分布图的检验结果表明,塬面和沟道 SOC 符合正态分布,塬坡 SOC 数据经对数转化后近似符合正态分布。因此,将 SOC 数据按地貌单元进行分区插值。

2.2 地貌单元与小流域表层 SOC 含量的空间分布特征关系

图 2 显示,0—20cm 土层 SOC 含量水平在小流域中基本遵循沟道 > 塬面 > 塬坡的空间分布特征。小流域中 SOC 含量高于 8.56g kg^{-1} 的斑块主要分布在小流域的沟道内,低于 6.49g kg^{-1} 的斑块则与塬坡的空间位置相一致。在塬面上,>6.49— 8.56g kg^{-1} 范围的 SOC 占居了主导,并且变化平缓。在塬坡上,>5.79— 9.95g kg^{-1} 范围的 SOC 占居着主导地位,SOC 含量梯度变化增大。沟道内,SOC 变化范围为 >5.79— 10.64g kg^{-1} ,SOC 含量梯度变化进一步增大。

2.3 地貌单元对剖面 SOC 含量的影响

地貌单元、土层深度是影响 SOC 变异重要因素,并且地貌单元与土层深度存在显著的交互作用(表 3)。0—200cm 土层平均,塬面 SOC 含量最高(5.37 g kg^{-1}),塬坡(3.65 g kg^{-1})最低,沟道(3.71 g kg^{-1})介于二者之间,三地貌单元的 SOC 差异达显著水平($P>99\%$)。在 200cm 土壤剖面中,同一土层有机碳含量因地貌单元存在显著差异(表 4)。表 4 显示,表层(0—20cm)SOC,沟道含量(10.03 g kg^{-1})最高,塬面(8.20 g kg^{-1})次之,塬坡(7.25 g kg^{-1})最低,三者之间差异极显著($P>99.9\%$)。 $>20\text{—}40\text{cm}$ 土层,SOC 含量塬面最高,沟道次之,塬坡最低($P>99\%$)。但 $>40\text{—}200\text{cm}$ 土层中 SOC 含量,塬面土壤显著高于塬坡和沟道,而塬坡和沟道间的差异不显著。这些结果表明,地貌单元对表层土壤和底层 SOC 的含量分布影响存在显著差异。

2.4 土地利用对小流域 SOC 空间分布的影响

地貌单元、土地利用及其二者的相互作用都是影响小流域 SOC 空间分布差异的重要因素,但来源于地貌单元的变异最大(表 5)。本研究发现,不同地貌单元条件下土地利用方式对 SOC 含量和剖面分布的影响也存在明显差异。表 6 显示,塬面区,平均 SOC 含量以人工草地最高,农田次之,果园最低。但仅 40cm 以上土层

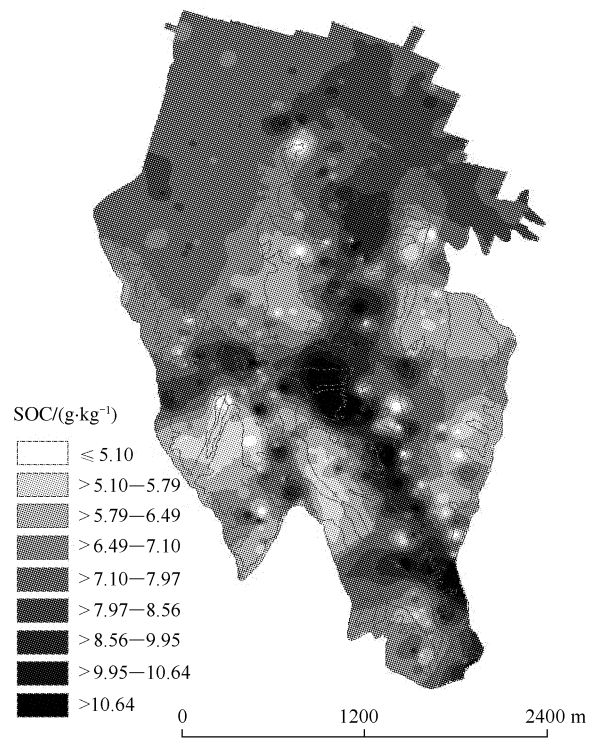


图2 黄土高原沟壑区王东沟小流域表层 SOC 空间分布图 (g kg^{-1})

Fig. 2 Distribution of SOC in 0—20 cm at Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau

表3 王东沟小流域地貌单元与土层深度对 SOC 含量影响的方差分析

Table 3 The analysis of variability of SOC content at Wangdonggou small watershed

误差来源 Error source	自由度 DF	均方 MS	F
地貌单元 Landforms	2	4.8428	201.03 ***
土层深度 Depth	9	1.9480	80.87 ***
地貌单元 × 土层深度 Landform × Depth	18	0.2854	11.85 ***

* 表示多重比较结果, * 表示差异显著水平为 $P>95\%$, ** $P>99\%$, *** $P>99.9\%$;下同

SOC 含量,人工草地 SOC 含量明显高于农田和果园。在塬坡上,整个剖面 SOC 含量林草地显著高于农地,与果园差异不显著。0—20cm 土层 SOC 林草地显著高于果园和农地; $>20\text{—}40\text{cm}$,草地显著高于林地和农地,果园与林地无显著差异,但显著高于农地。 $>60\text{—}100\text{cm}$ 土层,农地又显著高于林草地和果园; $>100\text{—}140\text{cm}$ 农地仅显著高于果园而与其他土地利用类型无显著差异; $>140\text{—}200\text{cm}$ 4 种土地利用类型间无显著差异。这一结果表明,塬坡上,不同土地利用类型间,发生显著差异深度达到 140cm。沟道内,林草两种土地利用类型间的 SOC 含量没有明显差异,这可能主要与二者有机物质输入差异不明显有关。

3 讨论

地貌单元影响土壤发育、迁移、沉积、风化、分解等物理化学过程^[26],从而造成土壤理化性质和土壤养分含量的空间分异。在图 3 上可以看到,小流域内塬面和沟道地表的坡度较小(地面坡度小于 7°),SOC 含量相对较高而变化平缓;塬坡上坡度变化剧烈(地面坡度处于 $>7\text{—}64^\circ$ 间),SOC 含量变化最大。在黄土高原沟壑区,SOC 含量与不同地貌条件下土壤发育、水土流失等密切相关。塬面地势平坦,水土流失较弱,土壤发育相对成熟,在剖面中可以清楚看到“垆土层”的存在, SOC 含量相对较高,并且含量变化平缓。但塬坡坡度一般

表 4 王东沟小流域地貌单元对剖面 SOC 含量影响的方差分析

Table 4 Effect of landform on SOC at Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau

土层深度 Soil depth/cm	SOC/(g kg ⁻¹)			F
	塬面 Tableland	塬坡 Slope land	沟道 Gully	
0—20	8.20 ± 0.67b	7.25 ± 0.60c	10.03 ± 1.18a	43.70 ***
>20—40	6.96 ± 0.84a	4.56 ± 0.70c	5.22 ± 1.53b	11.15 **
>40—60	5.36 ± 0.60a	3.44 ± 0.45b	3.46 ± 0.25b	35.21 ***
>60—80	5.47 ± 0.31a	3.68 ± 0.15b	2.66 ± 0.38b	143.57 ***
>80—100	6.16 ± 0.53a	3.32 ± 0.13b	2.57 ± 0.31b	158.76 **
>100—120	5.65 ± 0.49a	3.01 ± 0.32b	2.60 ± 0.25b	109.00 ***
>120—140	5.06 ± 0.87a	2.83 ± 0.24b	2.69 ± 0.26b	30.89 ***
>140—160	3.93 ± 1.00a	2.75 ± 0.29b	2.73 ± 0.26b	6.66 *
>160—180	3.27 ± 0.77a	2.87 ± 0.29ab	2.51 ± 0.33b	3.28
>180—200	3.63 ± 0.67a	2.79 ± 0.33b	2.63 ± 0.38b	6.52 *
平均 Mean	5.37 ± 1.52a	3.65 ± 0.75b	3.71 ± 2.37b	89.86 **

平均值(g kg⁻¹)后的字母为多重比较结果,两两之间若有一个字母相同,表示差异不显著

表 5 王东沟小流域地貌单元与土地利用对 SOC 含量影响的方差分析

Table 5 The analysis of variability of SOC content at Wangdonggou small watershed

误差来源 Error source	自由度 DF	均方 MS	F
地貌单元 Landform	2	132.88	49.84 ***
土地利用 Land use	3	17.01	6.38 ***
地貌单元 × 土地利用 Landform × Land use	3	17.78	6.67 ***

表 6 土地利用方式对 SOC 含量分布的影响

Table 6 Effect of land use on SOC at Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau

土层 Soil depth /cm	SOC/(g·kg ⁻¹)								
	塬面 Tableland			塬坡 Slope land				沟道 Gully	
	农地 Cropland	草地 Grassland	果园 Orchard	农地 Cropland	草地 Grassland	果园 Orchard	林地 Woodland	草地 Grassland	林地 Woodland
0—20	7.66 ab	8.64 a	7.20 b	4.91b	8.54a	5.62b	9.94a	9.08 a	10.33 a
>20—40	6.29 b	7.01 a	6.24 b	3.87c	5.43a	4.54ab	4.38 bc	5.15 a	4.13 a
>40—60	5.10 a	5.25 a	5.25 a	3.57a	3.57a	3.25 a	3.36 a	3.29 a	3.46 a
>60—80	5.21 a	5.56 a	5.29 a	5.51a	2.97b	3.10b	3.14 b	2.62 a	2.56 a
>80—100	5.63 a	6.69 a	5.51 a	4.61a	2.98b	2.83 b	2.89 b	2.59 a	2.51 a
>100—120	5.62 a	5.63 a	5.19 a	3.31a	2.95ab	2.87b	2.94ab	2.39 a	2.80 a
>120—140	5.10 a	5.00 a	4.63 a	3.17a	2.86ab	2.64b	2.64b	2.48 a	2.74 a
>140—160	4.13 a	3.49 a	4.00 a	2.82a	2.86a	2.65a	2.66 a	2.87 a	2.80 a
>160—180	3.40 a	3.00 a	3.76 a	2.85a	3.05a	2.73 a	2.85 a	2.46 a	2.75 a
>180—200	3.38 a	3.28 a	3.60 a	2.71a	3.00a	2.68 a	2.78 a	2.76 a	2.86 a
平均 Mean	5.15 a	5.36 a	5.07 a	3.25b	3.82a	3.28ab	3.76a	3.57 a	3.69 a

在 7°以上,水土流失强烈,SOC 积累十分缓慢,因而在整个小流域内塬坡部位 SOC 含量最低,空间变异较塬面显著增大。沟道遭受一定的水土流失影响,同时由于地势低洼又承接来自塬坡侵蚀的泥沙和径流。较好的水分条件促进了沟道内林草植被的生长;其次,来自塬坡表层土壤的泥沙中 SOC 含量较高。这些因素促进了沟道表层 SOC 的积累。因此,整个小流域内,表层 SOC 含量呈现沟道 > 塬面 > 塬坡,由于水土流失主要发生在表层土壤,深层以塬面 SOC 含量最高。

表 7 表明坡度显著影响王东沟小流域 SOC 含量空间分布特征。相同土地利用类型条件下,SOC 随坡度的增加而逐渐降低,其中草地和果园降低较为强烈,从 0—7°到 >28°分别降低 25.0% 和 27.0%,而林地仅降

低 7.0%。从流域整体看,SOC 随坡度亦呈现递减的趋势,从 0—7°到 >28°,SOC 含量降低 18.0% (图 2)。

表 7 王东沟小流域不同坡度对 SOC 含量分布的影响
Table 7 Effect of slope on SOC at Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau

土地利用 Landuse	SOC /(g kg ⁻¹)			
	0—7°	>7—12°	>12—28°	>28°
农地 Cropland	7.31	5.3	/	/
林地 Woodland	8.42	8.47	8.12	7.82
草地 Grassland	8.39	8.53	7.85	6.25
果园 Orchard	6.76	6.19	6.04	4.92
平均 Mean	7.72	7.13	7.33	6.33

上述的结果表明,王东沟小流域 SOC 含量的空间分布特征受地貌单元(坡度)和土地利用类型等综合因素的影响。图 2 和图 3 表明,王东沟小流域不同地形因子和土地利用类型下 SOC 含量存在明显差异。按地形因子来说,王东沟小流域 SOC 含量高值斑块区与坡度 <7°的地区较为一致,中值斑块区与坡度在 >7—28°间的地区较为一致,低值斑块则主要分布于陡峭地区;按土地利用方式来说,SOC 高值斑块与林地和天然草地的分布一致,中值斑块则与苜蓿、塬面农地和梯田分布一致,而低值斑块则与果园和陡壁吻合。2007 年 Ritchie 等^[27]在 Maryland 和 Iowa 研究发现,土地管理方式和坡度显著影响 SOC 含量。De Gryze 等^[28]在 Belgium 同样指出地形起伏显著影响土壤养分的空间分布特征。鉴于此,在黄土高原沟壑区,在研究 SOC 密度和储量的空间分布变化时,需要充分考虑地貌单元的影响。但地貌单元和土地利用对 SOC 的交互影响值得进一步关注。

4 结论

地貌单元和土地利用对小流域表层和深层 SOC 的含量分布影响都有显著表层。0—20cm 土层的 SOC 含量,沟道 > 塬面 > 塬坡;塬面表层 SOC 含量的变化平缓 (>6.49—8.56g kg⁻¹);塬坡和沟道 SOC 含量变化显著。0—200cm 土层 SOC 三地貌单元差异达极显著水平 ($P>99.9\%$),塬面 SOC 含量最高(5.37g kg⁻¹),塬坡(3.06g kg⁻¹)最低,沟道(3.71g kg⁻¹)介于二者之间。不同地貌单元条件下土地利用方式对表层和剖面 SOC 含量分布的影响也存在明显差异。塬面区,人工草地 SOC 含量亦明显高于农田和果园,但仅 40cm 以上土层 SOC 达到显著差异。在塬坡上,不同土地利用类型间,发生显著差异深度达到 140cm。沟道内,林草两种土地利用类型间的 SOC 含量无显著差异。在估算该地区 SOC 密度和储量时,需要充分考虑地貌单元和土地利用方式的影响。

References:

- [1] Batjes N H, Sombroek W G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology*, 1997, 3(2): 161-173.
- [2] Smith P. Soil as carbon sinks: the global context. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 212-218.
- [3] Oldeman L R. The global extent of soil degradation. //Greenland D J, Szabolcs I eds. *Soil resilience and sustainable land use*. Wallingford: CAB

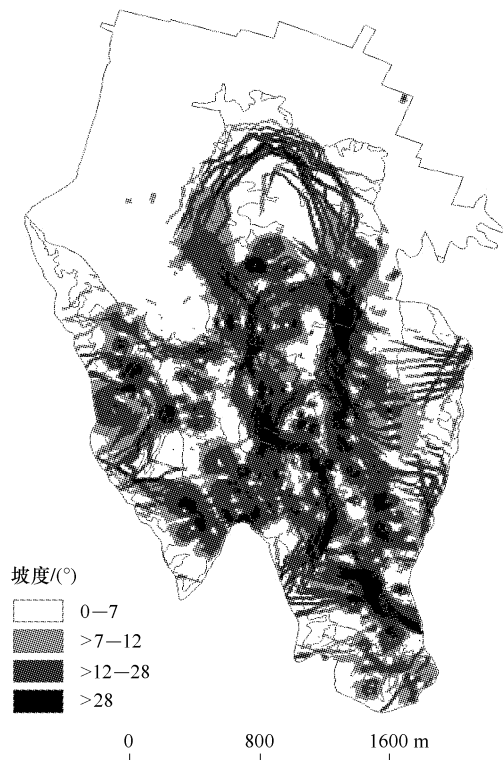


图 3 黄土高原沟壑区王东沟小流域坡度分级图
Fig. 3 The groups of slope at Wangdonggou small watershed in gully region of the Loess Plateau

- International, 1994: 99-118.
- [4] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, 29(4): 437-450.
- [5] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [6] Arrouays D, Deslais W, Badeau V. The carbon content of topsoil and its geographical distribution on France. *Soil Use and Management*, 2001, 17(1): 7-11.
- [7] Eswaren H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soil of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [8] Batjes N H. Mitigation of atmospheric CO₂ concentrations by increased carbon sequestration in the soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(3): 230-235.
- [9] Martens D A, Reedy T E, Lewis D T. Soil organic carbon content and composition of 130-year crop, pasture and forest land-use managements. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 65-78.
- [10] Li K R, Wang S Q, Cao M Q. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China Series D-Earth Science*, 2004, 47(1): 49-57.
- [11] Yu D S, Shi X Z, Sun W X, Wang H J, Liu Q H, Zhao Y C. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1000000 soil database. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [12] Fang J Y, Liu G H, Xu H L. Carbon cycle and global significance of the terrestrial ecosystem in China. In: Wang G C, Wen Y P eds. *Related processes of greenhouse gas concentrations and monitoring emissions*. Beijing: Press of Environmental Science in China, 1996: 81-149.
- [13] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, Zhu S L, Huang F H. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533-543.
- [14] Pan G X. Study on Carbon Reservoir in Soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330-332.
- [15] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Spatial-temporal variation and factors of soil fertilizer at a small catchment on Loess Plateau. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(3): 294-299.
- [16] Fu B J. The effect of land-use structure on the distribution of soil nutrients in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Chinese Sciences Bulletin*, 1999, 44(8): 732.
- [17] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environment in the Yangjuangou catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3): 241-246.
- [18] Lian G, Guo C D, Fu B J, Hu C X. Spatial distribution of soil properties in a small catchment of the Loess Plateau based on environmental correlation. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(4): 554-558.
- [19] Fu B J, Chen L D, Ma K M, Zhou H F, Wang J. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi. *Catena*, 2000, 39(1): 69-78.
- [20] Lian G, Guo C D, Fu B J, Hu C X. Spatial variability and prediction of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 946-954.
- [21] Guo S L, Wu J S, Dang T H. Effects of crop rotation and fertilization on aboveground biomass and soil organic C in semi-arid region. *Scientia Agriculture Sinica*, 2008, 41(3): 744-751.
- [22] Wang J, Fu B J, Qiu Y, Chen L D, Yu L. Spatial distribution patterns of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau — Kriging method. *Geographical Research*, 2003, 22(3): 373-379.
- [23] Gong J, Chen L D, Fu B J, Li Y M, Huang L, Huang Y L, Peng H J. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2292-2296.
- [24] Zhang X Y, Chen L D, Fu B J, Li Q, Qi X, Ma Y. Soil organic carbon changes as influenced by different agricultural land use types and management practices: A case study in Yanqing Basin, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3198-3204.
- [25] Nelson D W and Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter//Page A L, Miller R H, Keeney D R eds. *Methods of soil analysis, part 2 chemical and microbiological properties (second edition)*. Madison: Wisconsin USA, 1992: 562-564.
- [26] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, Frank K. Soil properties associated with landscape position. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 235-239.
- [27] Ritchie J C, McCarty G W, Venteris E R, Kaspar T C. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. *Geomorphology*, 2007, 89(1/2): 163-171.
- [28] De Gryze, Six J, Bossuyt H, Oost K V, Merckx R. The relationship between landform and the distribution of soil C, N and P under conventional and minimum tillage. *Geoderma*, 2008, 144(1/2): 180-188.

参考文献:

- [11] 于东升, 史学正, 孙维侠, 王洪杰, 刘庆花, 赵永存. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. *应用生态学报*, 2005,

16(12):2279-2283.

- [12] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义//王庚辰, 温玉璞主编. 温室气候浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 81-149.
- [13] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库分析及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(5): 533-543.
- [14] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库研究. 科技通报, 1999, 15(5): 330-332.
- [15] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 陈利顶. 黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因子. 自然科学进展, 2004, 14(3): 294-299.
- [17] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊沟圈为例. 地理学报, 1999, 54(3): 241-246.
- [18] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 基于环境相关法的土壤属性空间分布特征研究——以黄土丘陵区沟壑区小流域为例. 地理科学, 2008, 28(4): 554-558.
- [20] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测. 生态学报, 2008, 28(3): 946-54.
- [21] 郭胜利, 吴金水, 党廷辉. 轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响. 中国农业科学, 2008, 41(3): 744-751.
- [22] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶, 余莉. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局——Kriging 插值分析. 地理研究, 2003, 22(3): 373-379.
- [23] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 李延梅, 黄志霖, 黄奕龙, 彭鸿嘉. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2292-2296.
- [24] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 李琪, 齐鑫, 马岩. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响——以北京市延庆盆地为例. 生态学报, 2006, 26(10): 3198-3204.