

黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素

孙文义^{1,3}, 郭胜利^{1,2,*}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水保所, 陕西杨凌 712100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 研究局域尺度土壤有机碳空间分布特征, 对准确估算大尺度土壤碳库储量和变化具有重要意义。以黄土丘陵沟壑区典型小流域为对象, 采集 0-10、10-20、20-40、40-60、60-80、80-100cm 土层中(898 个土壤样品), 采用多元线性逐步回归和地理信息系统(GIS)相结合方法, 分析了地形(峁顶、峁坡、沟底)、土地利用(农田、果园、川坝地、草地、灌木林、乔木林) 等作用下, 小流域不同深度土壤有机碳含量的空间分布特征。结果表明: 地形因素不仅对表层(0-10cm) 土壤有机碳含量空间分布差异影响显著, 而且对深层(40-100cm) 影响也显著, 且空间格局图上 40-100cm 可以清晰地看地沟底与峁顶和峁坡显著差异。在 0-10cm 土层, 峁顶以中值斑块(50%) 和低值斑块(48%) 为主; 峁坡以中值斑块(62%) 为主, 其次是低值斑块(22%); 沟底中值斑块占 70%, 其次为低值斑块(23%)。40-100cm 均为低值斑块, 沟底低值绿色斑块占 34%, 远高于峁坡(8%) 和峁顶(13%)。土地利用对表层(0-40cm) 有机碳含量影响显著, 对 40-100cm 土层无影响。在 0-10cm 土层, 乔木林、灌木林、草地上高值斑块分别占 18%、47%、10%, 川坝地、农田和果园没有高值斑块, 中值斑块分别占 80%、53%、85%、73%、39%、23%。10-40cm 土层, 乔木林、灌木林、草地、川坝地、农田和果园中值斑块分别占 21%、46%、22%、19%、5%、4%。但在 40-100cm 土层, 各土地利用下有机碳均处于低值斑块区。坡向上 0-100cm 各层土壤有机碳含量半阴坡(北部、东北、东部) 最高, 半阳坡(西部、西南、南部) 含量较低。

关键词: 空间分布; 土壤有机碳; 土层; 土地利用; 地形

The spatial distribution of soil organic carbon and it's influencing factors in hilly region of the Loess Plateau

SUN Wenyi^{1,3}, GUO Shengli^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A and F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China

3 Institute Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy Science, Beijing 100101, China

Abstract: Understanding of soil organic carbon (SOC) spatial distribution variability at a local scale are important when developing SOC budgets, explaining the role of SOC reservoir in regional, global climate and environmental issues. In this study, Yangou watershed in the hilly region of the Loess Plateau was selected to investigate the SOC distribution under different land uses and topographies. Topography at the watershed consists of tableland, slopeland, and gullyland. Land use type at the watershed includes farmland, orchard, plain land, grassland, shrubland, and woodland. A total of 53 soil cores was taken as a 100 m 100 m grid across the watershed. At each site, each soil cores with three replicates were segmented into 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100cm sections. Spatial variability of SOC at different depths in relation to topography and land use was evaluated using multiple linear stepwise regression and geographic information system (GIS) analyses. A total of 898 SOC measurements was combined with the digital land use map and the digital topography map of Yangou watershed. The results showed as follows. Topography, land use and aspect

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41071338); 基本科研业务费青年项目(Z109021003)

收稿日期: 2010-01-25; **修订日期:** 2011-01-14

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

significantly influence SOC spatial distribution at 1m soil layer at the watershed and formed spatially arborizations and strips of SOC at the different depths. Topography significantly affect spatial distribution of soil organic carbon in top soil (0–10 cm), but also significantly affect subsoil SOC spatial distribution (40–100 cm). For SOC at the top soil of the watershed, the topography of tableland was dominated by middle value polygon (50%) and low value polygon (48%); slopeland by middle value polygon (62%), followed by low value polygon (22%); gullyland by middle value polygon (70%), followed by low value polygon (23%). For SOC at the subsoil of the watershed, tableland, slopeland and gullyland were also dominated by low value polygon and low value green polygon of gullyland accounted for 34%, much higher than slopeland (8%) and tableland (13%). Land use significantly affect SOC spatial distribution at topsoil depth (0–40 cm), but little effect on subsoil SOC distribution (40–100 cm). Woodland, shrubland and grassland show a greater SOC accumulation than farmland and orchard. Based on SOC distribution across the three topographies, there appears significantly variability in the SOC within 1 m soil depth. For the topsoil depth (0–10 cm), the high value polygon of woodland, shrubland and grassland accounted for 18%, 47% and 10% respectively, while plain land, farmland and orchard were no high value polygon, the middle value plague of them accounted for 80%, 53%, 85%, 73%, 39% and 23% respectively. For the subsoil depth (40–100cm), the middle value polygons of woodland, shrubland, grassland, plain land, farmland and orchard accounted for 21%, 46%, 22%, 19%, 5% and 4% respectively. But, SOC in 40–100cm across all land uses was at low value polygon. For aspect, SOC contents of the area of semi-shady (East + northeast + north) were high, while the area of semi-sunny (West + South West + South) were low. Soil organic carbon reserves at the watershed at 1 m soil layer was 217.6×10^3 Mg, and 67.5% of SOC reserve was at subsoil (20–100cm). We concluded that topography, land use and depth control SOC spatial distribution at a watershed in the hilly region of the Loess Plateau.

Key Words: spatial distribution; soil organic carbon; depths; land use; topography

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,准确估算土壤碳库储量对正确评价土壤在陆地生态系统碳循环、全球碳循环以及全球环境变化中的作用有重要意义^[1-5]。但由于不能准确地获取局域尺度内土壤有机碳含量信息,致使同一地区或区域研究结果常常存在较大的差异。例如依据全国第二次土壤普查资料估算我国土壤有机碳储量,其结果变化于 50—186Pg 范围^[6-11]。因此,以省区为单位的研究逐步开展^[12-13],这一研究方法对于地形变化不十分剧烈地区是适宜的(东部平原)。在地处西北的黄土高原地区,地形破碎,水土流失严重,开展大比例尺小范围土壤有机碳空间分布特征的研究更有意义。

黄土高原地面支离破碎,沟壑密度一般在 2—5km/km² 以上,地面裂度多在 20%—50% 左右,最高可达 65% 以上。在水土流失严重的丘陵沟壑区,土壤多年平均侵蚀模数高达 8373—9000 t/km²^[14-16]。长期水土流失不仅导致了土壤有机碳大量流失,而且形成了黄土残塬、黄土梁、黄土峁等各种侵蚀沟壑地貌类型。地形和土地利用是影响表层土壤有机碳空间分布的重要因素^[17-18]。在黄土丘陵沟壑区,水土流失导致了流域内水土资源的重新分配,使得低洼部位承接了来自峁顶和峁坡的径流和泥沙;由于土壤水分的分异又影响了植被和土地利用方式在空间上的配置,进而影响到土壤有机碳的输入。如此常年累月有可能使得沟底土壤有机碳得到富集,而峁坡土壤有机碳含量因水土流失而降低。另一方面,因退耕和林草植被建设的实施不仅有效地减轻了水土流失而且提高土壤有机碳积累。因此,在黄土区,土壤有机碳空间分布因地形、土地利用十分复杂。目前大量研究多集中于土地利用与管理措施等方面^[19-20],但地形以及地形和土地利用相互作用条件下对土壤有机碳的空间变异研究较少^[21]。本研究以黄土高原丘陵沟壑区典型小流域为尺度,分析了地形、土地利用对不同深度(1m 土层)土壤有机碳空间分布的影响,并探讨了地形和土地利用方式等多种影响因子共存条件下小流域土壤有机碳空间分布特征。

1 材料与方法

1.1 流域自然概况

燕沟流域(36°28′00″—36°32′00″N,109°20′00″—109°35′00″E)位于陕西省延安市宝塔区,主沟长 8.6 km,

呈东南-西北流向,总面积约 48 km²,海拔 986—1425 m,以梁峁地貌为主,沟壑密度为 4.8 km/km²,属于典型黄土丘陵沟壑区。流域内,峁顶和沟底坡度为 0—5°,面积占总面积的 8.7%; 峁坡坡度为 5—84°,可采样面积占总面积的 84.5%。研究区气候为暖温带半湿润向半干旱过渡的类型,年平均气温 9.8 °C,多年平均降雨量约 558 mm。土壤为半熟化状态的黄绵土(约占 90% 以上),肥力较低。治理前(1997 年以前)流域水土流失面积 42.55 km²,占总面积的 88.65%,土壤侵蚀模数为 9000 t·km⁻²·a⁻¹,属强度水土流失地区^[22]。流域 14 个行政村 2006 年底总人口 3133 人,人口密度为 67.8 人/km²。

该区植被类型多样,属暖温带阔叶林向温带草原过渡地带。人工草被主要为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.),分布较少;人工灌木林主要为柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、杠柳(*Periploca sepium* Bge);人工乔木林主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Pobulus davidiana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、任用杏(*Prnuus armeniac sibirica*)、侧柏(*Biota orientalis*)。天然草被主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis* L.)、黄蒿(*Artemisia scoparia*);天然灌木林主要为黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*S. viciifdia*)、虎榛子(*Ostryopsis Davidiana* Dene)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius* Turcz)、北京丁香(*Syringa pekinensis* Rupr);天然乔木林主要为辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、天然小乔木鼠李(*Rhamnus davurica*)。其中,灌木林分布最广。1997 年以来,在流域南部、中部、北部配置了不同的水土流失治理措施,南部主要以涵养水源的天然次生林为主,中部以人工水土保持植被为主,北部以农田林果植被为主^[23]。目前流域内,峁顶土地利用类型主要有农田、果园,峁坡土地利用类型有农田、果园、天然草地、人工灌木林、天然灌木林、人工乔木林、天然乔木林,沟底土地利用类型有农田、果园、天然草地、天然灌木林、人工乔木林、天然乔木林。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 土样采集

基于小流域内地形和土地利用(图 1,图 2)两大因素,采用“分层采样的方法”采集土壤样品研究流域 SOC 变异影响因素。将流域划分为上游、中游和下游 3 个区段,在每个区段上,将地形(峁顶、峁坡、沟底)

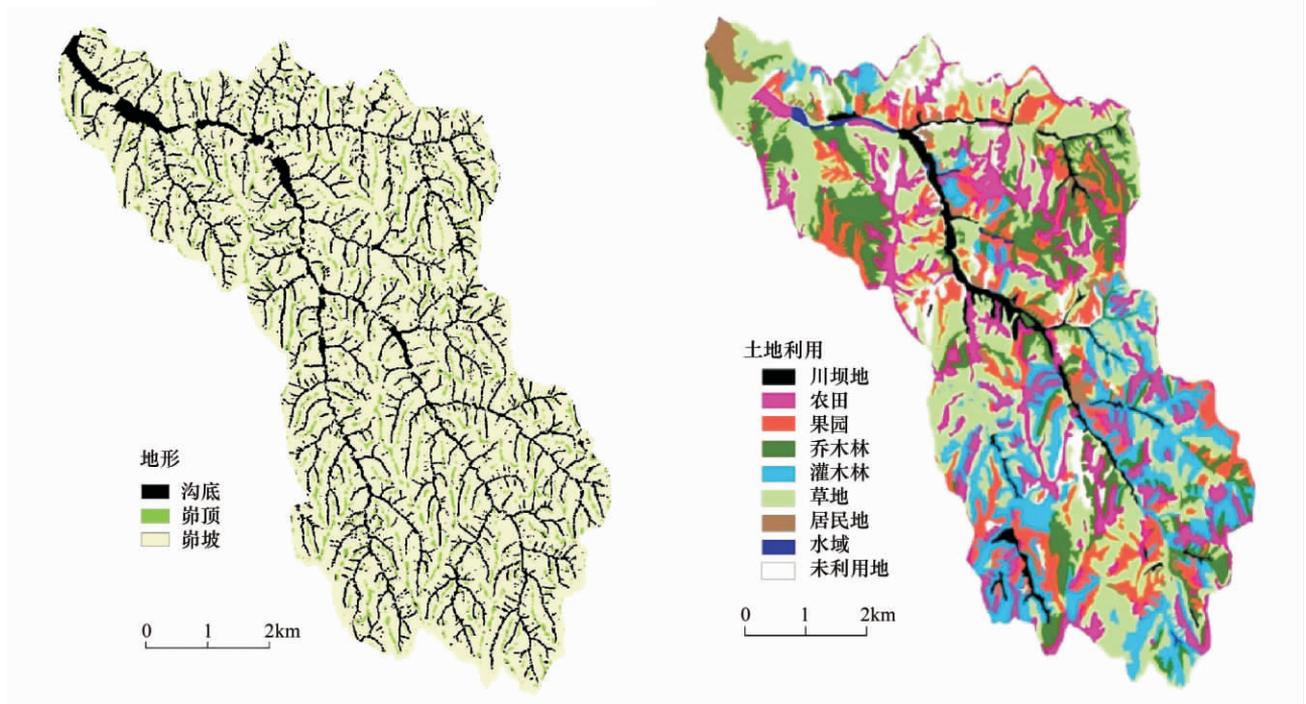


图 1 燕沟流域地形图

Fig. 1 Topography of YanGou watershed

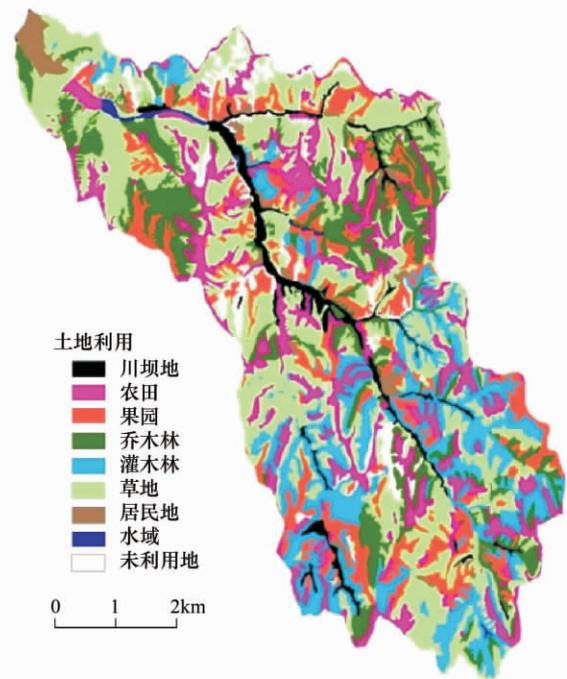


图 2 燕沟流域土地利用图(2003 年)

Fig. 2 Landuse of YanGou watershed (2003)

作为一级层次,不同地形部位土地利用方式(川坝地、农田、果园、草地、灌木林、乔木林)作为二级层次,采集到地形之上每种土地利用方式下所有典型植被(面积较广、生长良好而集中)的土壤样本。同时结合了燕沟流域间隔 30s 生成经纬格网进行了优化定位,并根据当地实际地形条件于 2009 年 6 月进行了采样。对于土地利用方式单一,生长均匀,面积较广的区域布点较少;土地利用方式复杂,且为典型植被的区域加密布点;某些环境较为恶劣,地势险峻的地方,在该区域典型植被可采集到边缘部位进行了采样。在流域尺度上采集到不同地形部位、不同土地利用类型的土壤样本 53 个,每个样本分别取 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100cm 共 6 个层次,且每个样本重复 3 次,实际共采集到 898 个土壤样品(由于实际采样过程中,当“60—80cm”、“80—100 cm”土层出现岩石层时,采集不到土壤样品,但保证了每个土壤样本至少有一个重复是完整的 6 个土层数据)。采集土钻直径为 3cm。地形和土地利用类型所占面积及采样情况详见表 1。

表 1 黄土丘陵区燕沟流域地形和土地利用面积、采样数及其所占比例

Table 1 Topography, Landuse area, sample size and their proportion in YanGou watershed of hilly region, Loess Plateau

影响因子 Factor	面积 / hm ² Area	面积比例 / % Area proportion	样本数 / N Sample number	样本比例 / % Sample proportion
地形 Topography				
沟底 Gullyland	671.51	15.5	10	18.9
峁顶 Tableland	240.92	5.6	8	15.1
峁坡 Slopeland	3407.96	78.9	35	66.0
总计 Sum	4320.39	100.0	53	100.0
土地利用 Landuse				
川坝地 Plainland	182.48	4.2	3	5.7
农田 Farmland	686.13	15.9	12	22.6
果园 Orchard	620.74	14.4	6	11.3
乔木林 Woodland	652.11	15.1	10	18.9
灌木林 Shrubland	696.43	16.1	13	24.5
草地 Grassland	1482.50	34.3	9	17.0
总计 Sum	4320.39	100.0	53	100.0

在燕沟流域川坝地、农田、果园、草地、灌木林、乔木林 6 种典型土地利用方式的土壤剖面上,用环刀采集 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100cm 土层原状土壤,各层重复 3 次,烘干称重,获取各土层的土壤容重,采样时间为 2007 年 5 月。

1.2.2 样品处理与分析

新鲜土样混合均匀后,风干,风干样过 0.25mm 筛后,测定土壤有机碳(SOC)($H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 外加热法)^[24]。

土壤有机碳储量的计算公式为:

$$C_i = d_i \times \rho_i \times O_i / 100$$

$$S_i = A_i \times C_i$$

式中, i 为土壤不同层次, C 为土壤有机碳密度(kg/m^2), d 为土层厚度(cm), ρ 土壤容重(g/cm^3), O 为土壤有机碳含量(g/kg), A 各类型所占面积, S 为土壤有机碳储量。

1.2.3 数据处理与统计分析

将采样点的定位数据导入 ArcGIS9.2,经投影转换

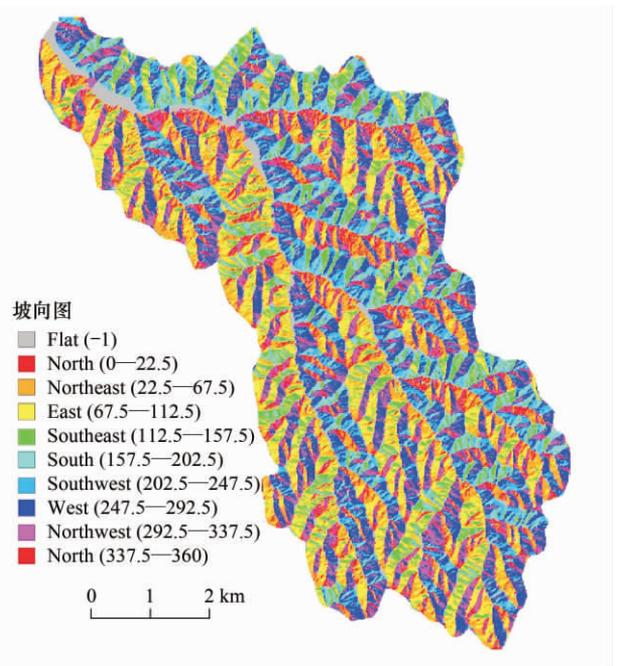


图 3 燕沟流域坡向图

Fig. 3 Aspects of YanGou watershed

(投影类型为阿尔伯斯) 为以“m”为单位的平面坐标,最后生成样点分布图(图4)。

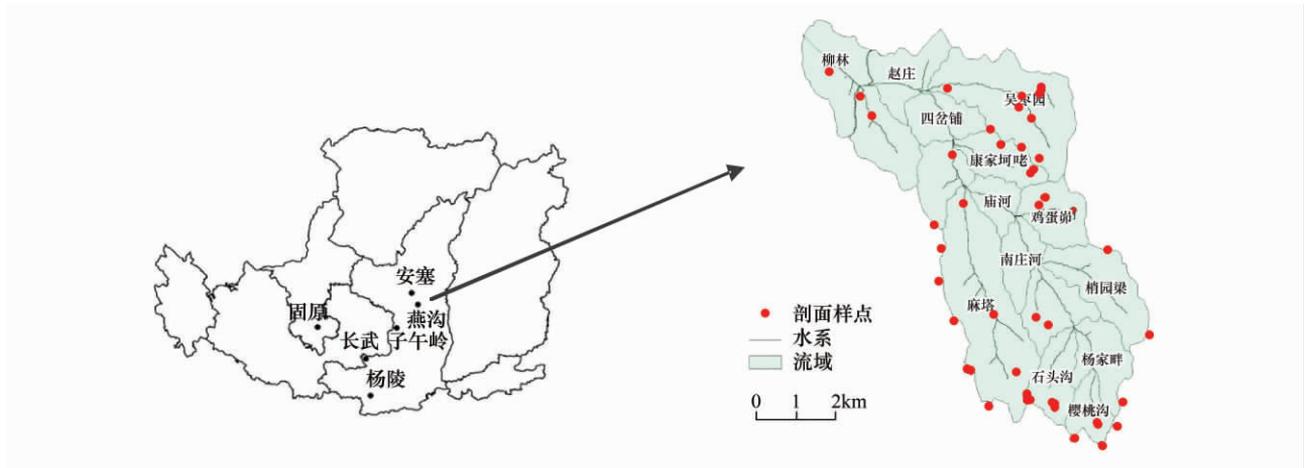


图4 黄土丘陵区燕沟流域位置及样点分布

Fig. 4 Location and sample sites of YanGou watershed in hilly region, the Loess Plateau

将整个流域 53 个土壤剖面数据,按实际采样所处地形、土地利用方式和坡向不同进行划分,对应的土壤有机碳平均含量作为该地形、土地利用方式和坡向的属性编码值,从而将字符型变量转换为数值型变量(表 2)。为了模拟真实地形地貌特征,用经度、纬度、高程描述最基本的三维特征,坡向、坡度描述微地形地貌特征,地形(峁顶、峁坡、沟底) 描述宏观地形地貌特征。以土地利用、地形、经度、纬度、高程、坡度、坡向为自变量,土壤有机碳含量为因变量,利用 SAS8.1^[25] 软件统计分析建立多元线性逐步回归模型(将显著性水平 $P > 0.15$ 剔除)。

表 2 黄土丘陵区燕沟流域地形和土地利用类型和坡向编码值

Table 2 The coding values of topography, Landuse and aspect in YanGou watershed of hilly region, the Loess Plateau

影响因子 Factor	土层 Depth/cm	编码值 Coding value					
		0—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100
坡向 Aspect	东	9.00	7.33	4.94	4.28	3.58	3.65
	平地	8.75	6.58	4.93	3.74	3.42	2.89
	东北	11.44	9.66	6.63	5.61	5.04	4.47
	北	9.19	5.98	5.33	4.27	3.62	4.10
	西北	5.25	4.64	3.07	2.76	2.63	2.61
	东南	4.27	3.72	3.24	2.24	2.30	3.13
	南	4.49	3.96	2.94	2.97	2.73	2.23
	西南	7.87	5.36	3.24	2.61	2.20	1.93
	西	6.40	5.10	4.15	3.69	3.01	3.62
地形 Topography	沟底	8.87	8.03	5.96	4.98	4.65	4.42
	峁顶	4.43	3.84	3.18	3.03	2.97	2.96
	峁坡	10.71	7.22	5.03	3.86	3.32	3.23
土地利用 Landuse	川坝地	6.50	6.12	4.90	4.49	3.72	4.21
	农田	5.82	5.43	4.17	3.31	2.97	2.67
	果园	5.04	4.30	3.35	3.21	3.11	3.39
	乔木林	11.60	6.45	4.61	3.69	3.27	3.47
	灌木林	13.40	9.26	6.58	5.03	4.41	4.08
	草地	9.99	7.73	5.25	4.07	3.71	3.35

从流域数字高程模型(1:1万比例尺,空间分辨率为5m,地形图数字化而来)提取信息,绘制流域的经度图、纬度图、坡度图、坡向图、地形图。利用 ArcGIS9.2 图层运算功能,将经度图、纬度图、坡度图及编码(编码值 $\times 100$)后的地形图、土地利用图(2003年)(1:1万比例尺,空间分辨率为5m,在2001年土地利用类型图基

基础上,经过现场更新调查而成)(不考虑居民地、水域和未利用地)、坡向图按照多元线性回归方程进行叠加运算,生成流域土壤有机碳含量空间分布图。根据土壤有机碳含量空间分布图对不同地形和土地利用类型土壤有机碳含量进行统计,分别计算各类型密度和储量。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量变化影响因子

不同深度条件下,影响土壤有机碳空间分布的因子不同(表3)。0—10cm 土层,坡向($P < 0.01$)、地形($P = 0.069$)和土地利用($P < 0.01$)与土壤有机碳含量显著相关。10—20cm 坡向($P < 0.01$)、经度($P < 0.01$)、地形($P < 0.15$)、土地利用($P < 0.01$)与土壤有机碳含量显著相关。20—40cm 坡向($P < 0.01$)、经度($P < 0.01$)、地形($P = 0.055$)与土壤有机碳含量显著相关。40—100cm 除坡向($P < 0.01$)、坡度($P < 0.05$)、纬度($P < 0.01$)和土地利用($P < 0.02$)之外,高程($P < 0.05$)在40—60cm、地形($P < 0.05$)在80—100cm还与土壤有机碳含量存在显著相关。因此,地形、土地利用、坡向是流域土壤有机碳含量变化主要影响因子,在整个剖面上对土壤有机碳含量存在显著影响。坡度、经度、纬度、高程在剖面局部层次上对土壤有机碳含量存在显著影响。

表3 黄土丘陵区燕沟流域多元线性回归模型及有关参数

Table 3 Multivariable linear regression model and corresponding parameters in YanGou watershed of hilly region, the Loess Plateau

土层 Depth/cm	预测变量 Forecast variable	参数估计值 Parameter estimate	标准误差 Standard error	<i>F</i>	<i>P</i>
0—10	常量	-4.19254	1.56849	7.14	0.0087
	坡向	0.00592	0.00152	15.08	0.0002***
	地形	0.00301	0.00164	3.37	0.0692*
	土地利用	0.00538	0.00119	20.27	<0.0001***
10—20	常量	-3780.65858	1482.09117	6.51	0.0121
	经度	34.48144	13.53187	6.49	0.0122***
	坡向	0.00663	0.00141	22.25	<0.0001***
	地形	0.00302	0.00199	2.30	0.1324*
	土地利用	0.00582	0.00165	12.46	0.0006***
20—40	常量	-4089.12865	1267.70048	10.40	0.0017
	经度	37.31958	11.57438	10.40	0.0017***
	坡向	0.00808	0.00166	23.67	<0.0001***
	地形	0.00458	0.00236	3.77	0.0551*
40—60	常量	1433.31950	353.61698	16.43	0.0001
	纬度	-39.07876	9.58854	16.61	<0.0001***
	高程	-0.00659	0.00318	4.28	0.0412**
	坡度	-0.02275	0.01068	4.54	0.0357**
	坡向	0.00482	0.00185	6.75	0.0108***
	土地利用	0.00880	0.00246	12.82	0.0005***
	地形	0.00636	0.00281	5.12	0.0259**
60—80	常量	702.64030	209.59039	11.24	0.0012
	纬度	-19.34014	5.73512	11.37	0.0011***
	坡度	-0.02548	0.01197	4.53	0.0358**
	坡向	0.00631	0.00200	9.99	0.0021***
	土地利用	0.00789	0.00335	5.55	0.0206**
80—100	常量	568.33743	161.74200	12.35	0.0007
	纬度	-15.65127	4.42775	12.49	0.0006***
	坡度	-0.02732	0.00984	7.70	0.0067***
	坡向	0.00654	0.00186	12.37	0.0007***
	土地利用	0.00713	0.00248	8.28	0.0050***

*、**和***分别表示相关性达到显著($P < 0.15$)、($P < 0.05$)和极显著水平($P < 0.01$)

2.2 土壤有机碳含量空间分布格局

流域不同土层土壤有机碳含量呈镶嵌树枝状和条带状空间分布格局(图5),并与地形、土地利用方式和坡向有密切关系(表4)。

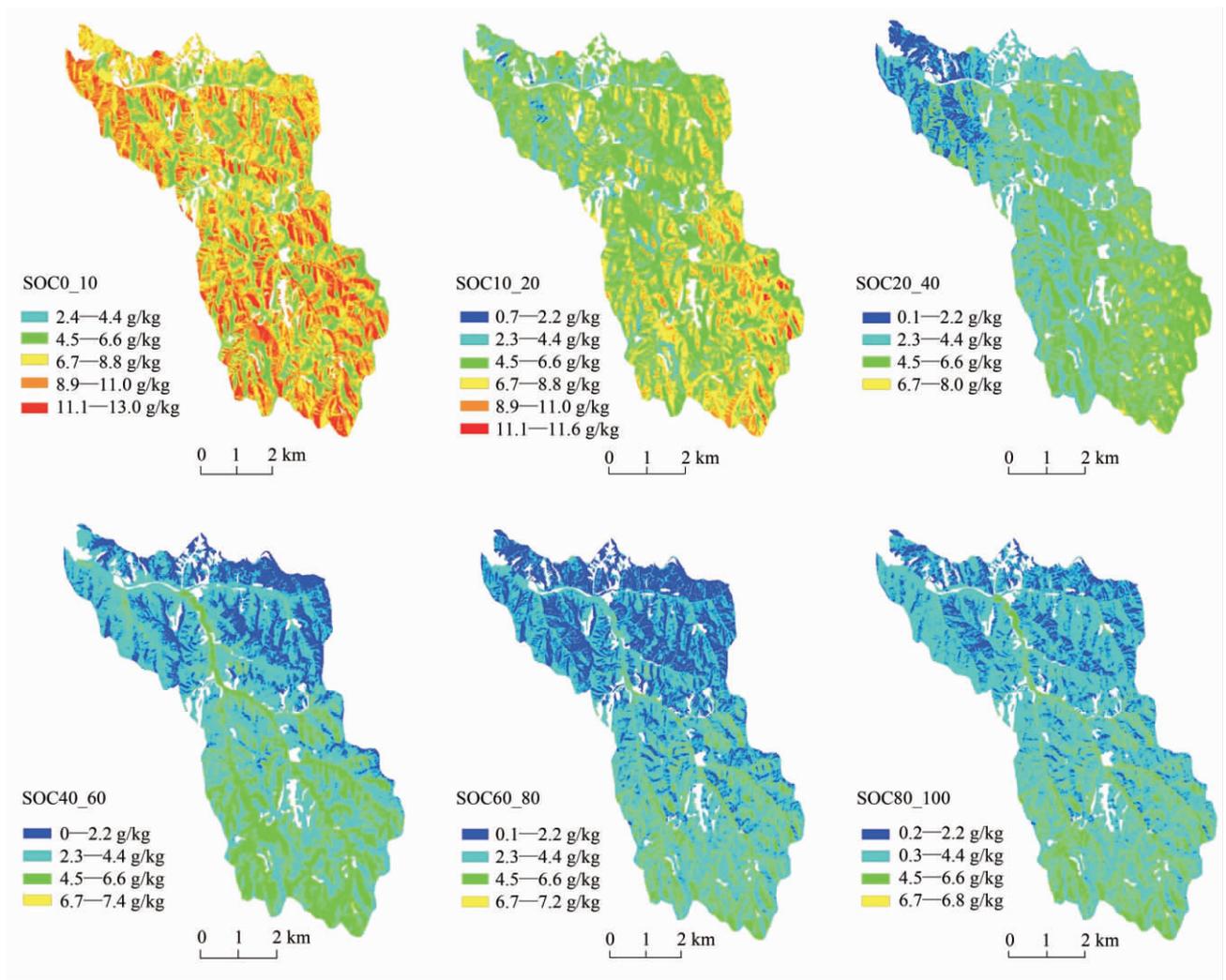


图5 黄土丘陵区燕沟流域土壤有机碳空间分布

Fig. 5 The contents of spatial distribution of soil organic carbon in YanGou watershed of hilly region, the Loess Plateau

地形对不同深度流域土壤有机碳含量空间分布有显著影响。0—10cm 崩坡、沟底土壤有机碳平均含量分别是崩顶(6.7 g/kg)的1.3、1.2倍,其含量分别变化于4.3—13.0、3.7—12.5、2.4—11.1 g/kg。崩顶以中值(50%)和低值斑块(48%)为主;崩坡以中值斑块(62%)为主,其次是低值(22%)和高值斑块(16%);沟底中值斑块占70%,其次为低值(23%)和少量高值斑块(7%)。10—40cm 土壤有机碳平均含量表现为崩坡(5.1 g/kg)、沟底(5.6 g/kg)分别是崩顶平均含量(4.3 g/kg)的1.2、1.3倍。崩顶、崩坡和沟底均以低值斑块为主,其次为中值斑块,但所占比例不同。崩顶中值斑块占10%,低值占90%;崩坡中值斑块占20%,低值占80%;沟底中值斑块占25%,低值占75%。40—100cm 土壤有机碳含量沟底平均含量(4.0 g/kg)比崩顶(3.3 g/kg)高21%,崩坡平均含量(3.1 g/kg)比崩顶低6%。崩顶、崩坡和沟底均以低值青色斑块为主,但沟底低值绿色斑块占34%,远高于崩坡(8%)和崩顶(13%)。

上述结果表明,地形上崩顶、崩坡和沟底均随土层深度增加由高值区向低值区变化,但不同地形其变化存在显著差异。崩顶在不同深度都处于土壤有机碳含量偏低区。崩坡随土层深度增加,从高值区向低值区降幅较大,0—10cm 偏高区高于沟底,10—40cm 偏高区低于沟底但远高于崩顶,40—100cm 略低于崩顶,却远低于

沟底。沟底在不同深度都处于土壤有机碳含量偏高区。因此,空间格局图上 40—100cm 可以清晰地看地沟底与崩顶和崩坡显著差异。

土地利用方式对不同深度土壤有机碳空间分布同样存在显著差异。0—10cm 土壤有机碳灌木林、乔木林、草地和川坝地土壤有机碳平均含量分别是农田(6.2 g/kg)的 1.7、1.6、1.4、1.2 倍,果园含量(5.8 g/kg)低于农田 6%。乔木林、灌木林、草地高值斑块分别占 18%、47%、10%,川坝地、农田和果园没有高值斑块。乔木林、灌木林、草地、川坝地、农田和果园中值斑块分别占 80%、53%、85%、73%、39%、23%。10—40cm 灌木林、川坝地、乔木林、草地土壤有机碳平均含量分别是农田(4.5 g/kg)1.4、1.2、1.2、1.1 倍,果园是农田的 92%。灌木林有 2% 高值斑块,在空间分布图上表现为东南方向红色斑块。乔木林、灌木林、草地、川坝地、农田和果园中值斑块分别占 21%、46%、22%、19%、5%、4%。40—100cm 灌木林、川坝地、草地、乔木林土壤有机碳平均含量分别是农田(2.7 g/kg)的 1.6、1.5、1.2、1.1 倍,果园含量略低于农田。除灌木林有 1% 中值斑块外,其它土地利用方式均处于低值斑块区。灌木林低值绿色斑块占 51%,乔木林低值斑块占 7%,但青色斑块占 75%;草地低值绿色斑块仅占 11%,川坝地却占 40%;农田和果园绿色斑块分布较少,主要为低值青色斑块,分别占 69%、70%。

上述结果表明,农田和果园在不同深度均处于土壤有机碳含量偏低区;灌木林在不同深度均处于土壤有机碳含量偏高区,草地、乔木林和川坝地处于灌木林和农田、果园之间。乔木林土壤有机碳含量随土层深度增加降幅较大,与川坝地相比,0—10cm 有机碳含量高于川坝地 34%,但 40—100cm 低于川坝地 4%。

从坡向上看,0—100cm 各层土壤有机碳含量均为东北方向最高,东南、南部或西南方向含量较低。其平均有机碳含量东部、东南、南部、西南、西部、西北、北部分别为东北方向(6.5 g/kg)的 82%、59%、56%、62%、68%、62%、82%。0—10cm 半阴坡(东+东北+北)高值斑块占 38%,中值斑块占 60%;半阳坡(西+西南+南)高值斑块没有,中值斑块占了 62%。10cm 以下土层规律与 0—10cm 基本一致。

从剖面层次上看,随着土层深度增加,除 80—100cm 略升高外,土壤有机碳含量呈降低趋势,由高值斑块红色和橙色向低值斑块青色和蓝色逐渐过渡。从空间格局上看,土壤有机碳含量东部高于西部,主要体现在 10—40cm 土层;南部高于北部,主要体现在 40—100cm。

2.3 土壤有机碳碳储量特征

流域表层(0—20cm)土壤有机碳密度为 1.63 kg/m²,1m 土层土壤有机碳密度为 5.04 kg/m²。1m 土层土壤有机碳总储量为 217.6 × 10³t,深层(20—100cm)土壤有机碳储量占总储量的 67.5%(表 5)。

表 5 黄土丘陵区燕沟流域土壤有机碳储量

Table 5 The storages of soil organic carbon in YanGou watershed of hilly region, the Loess Plateau

影响因子 Factor	土壤有机碳密度 C density/(kg/m ²)			土壤有机碳储量 C storage(×10 ³ t)			
	0—20cm	0—100cm	A(0—20cm)	B(20—100cm)	C(0—100cm)	B/C(%)	
地形 Topography	沟底 Gullyland	1.65	5.66	11.1	27.0	38.0	70.9
	崩顶 Tableland	1.36	4.65	3.3	7.9	11.2	70.8
	崩坡 Slopeland	1.65	4.94	56.3	112.1	168.4	66.6
土地利用 Landuse	川坝地 Plainland	1.81	6.27	3.3	8.1	11.4	71.2
	农田 Farmland	1.44	4.53	9.9	21.2	31.1	68.2
	果园 Orchard	1.30	4.47	8.1	19.7	27.7	71.0
	乔木林 Woodland	1.70	4.65	11.1	19.2	30.3	63.4
	灌木林 Shrubland	2.05	6.58	14.3	31.5	45.8	68.9
	草地 Grassland	1.62	4.80	24.0	47.2	71.2	66.3
	总计 Sum	1.63	5.04	70.6	147.0	217.6	67.5

地形上,1m 土层内土壤有机碳储量表现为崩坡 > 沟底 > 崩顶;崩坡储量(168.4 × 10³t) 占总储量(217.6

$\times 10^3 \text{ t}$) 的 77%; 沟底储量($38.0 \times 10^3 \text{ t}$) 占总储量的 17%; 峁顶($11.2 \times 10^3 \text{ t}$) 仅占总储量 5%。峁顶深层(20—100cm) 土壤有机碳储量($112.1 \times 10^3 \text{ t}$) 是表层($56.3 \times 10^3 \text{ t}$) 的 2.0 倍; 沟底深层土壤有机碳储量($27.0 \times 10^3 \text{ t}$) 是表层($11.1 \times 10^3 \text{ t}$) 的 2.4 倍; 峁顶深层土壤有机碳储量($7.9 \times 10^3 \text{ t}$) 是表层($3.3 \times 10^3 \text{ t}$) 的 2.4 倍(表 5)。

土地利用方式上, 1m 土层土壤有机碳总储量表现为草地 > 灌木林 > 农田 > 乔木林 > 果园 > 川坝地。其储量分别占总储量($217.6 \times 10^3 \text{ t}$) 的 33%、21%、14%、14%、12%、5%。草地深层储量($47.2 \times 10^3 \text{ t}$) 是表层($24.0 \times 10^3 \text{ t}$) 的 2.0 倍; 灌木林深层储量($31.5 \times 10^3 \text{ t}$) 是表层($14.3 \times 10^3 \text{ t}$) 的 2.2 倍; 农田深层储量($21.2 \times 10^3 \text{ t}$) 是表层($9.9 \times 10^3 \text{ t}$) 的 2.1 倍; 乔木林深层储量($19.2 \times 10^3 \text{ t}$) 是表层($11.2 \times 10^3 \text{ t}$) 的 1.7 倍; 川坝地深层储量($8.1 \times 10^3 \text{ t}$) 是表层($3.3 \times 10^3 \text{ t}$) 的 2.5 倍(表 5)。

3 讨论

本研究显示, 峁顶在不同深度都处于土壤有机碳含量偏低区, 沟底在不同深度都处于土壤有机碳含量偏高区, 而峁坡随土层深度增加, 由略高于沟底高值区向略低于峁顶低值区变化。因而 40cm 以上空间分布图不能清晰地表现出沟底土壤有机碳与峁坡显著差异, 而 40—100cm 却可以清晰地看到沟底与峁坡显著差异。流域内土壤有机碳在不同土层上空间分布的这种差异不仅与地形因素有关, 而且与该地区土地利用方式配置密切相连。地形一方面通过侵蚀和水土流失使沟底承接了来自峁顶和峁坡富含较高有机碳的泥沙, 并不断沉积积累; 另一方面降水通过地形的再分配由坡地汇集到低洼的沟道, 土壤水分的分异影响植被和土地利用方式在空间上的配置, 进而影响到土壤有机碳的输入^[26-27], 如此常年累月使得沟底整个剖面土壤有机碳含量都较高。峁坡一方面因水土流失作用使土壤有机碳含量降低, 另一方面由于其所占面积之大(占整个流域的 78.9%), 1997 年以来退耕还林还草和封山育林综合治理后, 土地利用方式配置较为完整, 分布有大量天然草地、人工灌木林、天然灌木林、人工乔木林和天然乔木林, 使得上层(40cm 以上) 土壤有机碳含量得到大幅度提高。而沟底面积较小(占整个流域 15.5%) 人为干扰较大, 土地利用方式配置又劣于峁坡。所以, 40cm 以上受土地利用方式影响较大, 掩盖了地形影响下水土流失变化, 40cm 以下才显著表现出地形对土壤有机碳空间分布影响。

本研究显示, 空间格局土壤有机碳含量东部高于西部, 主要体现在 10—40cm 土层; 南部高于北部, 主要体现在 40—100cm。土壤有机碳含量这种空间分布与流域综合治理措施空间配置密切相关。东部偏南分布有大量的天然灌木林, 东部偏北分布有大量的天然乔木林。这使得 10—40cm 土层土壤有机碳含量东部显著高于西部。该流域解放后到 80 年代中期, 人口增长等原因导致该流域坡耕地开荒增加和天然次生林向南部缩减。1997 年以来, 在流域南部、中部、和北部分别配置了不同的综合治理措施, 南部以涵养水源的天然次生林为主、中部以人工水土保持植被为主、北部以农田林果植被为主^[23]。因而 40—100cm 土层土壤有机碳含量南部显著高于北部。

地统计方法和克里格插值对于地形变化不十分剧烈、比较平坦的平原地区可以得到较好的探测和模拟, 但在黄土区应用却受到了一定的局限性。该区地形破碎、土地利用空间变化快等特点显著, 基于半变异函数的克里格插值难以将复杂的地形参数用于研究土壤有机碳空间变化, 本研究采用经度、纬度、高程、坡向、坡度、地形(峁顶、峁坡、沟底) 参数来描述真实地形地貌特征。经度、纬度、高程来描述最基本的三维特征; 坡向、坡度建立微地形地貌特征, 地形(峁顶、峁坡、沟底) 建立宏观性地形地貌特征。通过对真实地形地貌特征模拟, 采用多元线性逐步回归和地理信息系统(GIS) 相结合的方法, 在黄土丘陵沟壑区对土壤有机碳空间格局的模拟得到了较好效果。

综合考虑各种因素, 计算所得燕沟流域表层(0—20cm) 土壤有机碳密度为 1.63 kg/m^2 , 略低于 2007 年王小丽^[17] 计算所得土壤有机碳密度 1.72 kg/m^2 , 这可能与样点分布和所考虑影响因子有关。王小丽样点分布多集中于康家圪佬, 且未考虑地形因素对土壤有机碳含量影响。在加密的表层(0—20cm) 314 个样点(图 6) 研究结果显示, 表层(0—20cm) 土壤有机碳(图 7) 平均含量为 7.7 g/kg ; 与剖面 53 个样点(图 4) 表层(0—20cm) 土壤有机碳平均含量 7.2 g/kg 相比, 仅相差 0.5 g/kg , 相对误差为 6.5%。

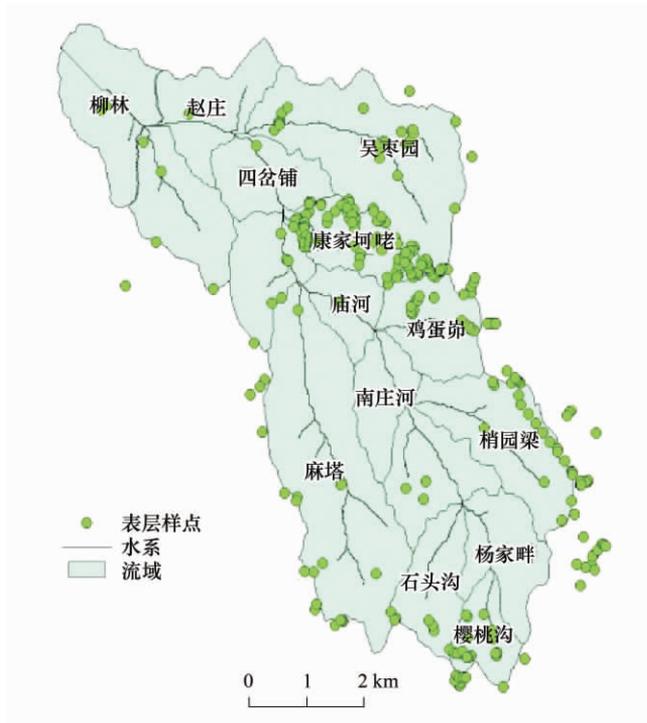


图6 燕沟流域表层样点分布

Fig. 6 Surface sample sites of YanGou watershed

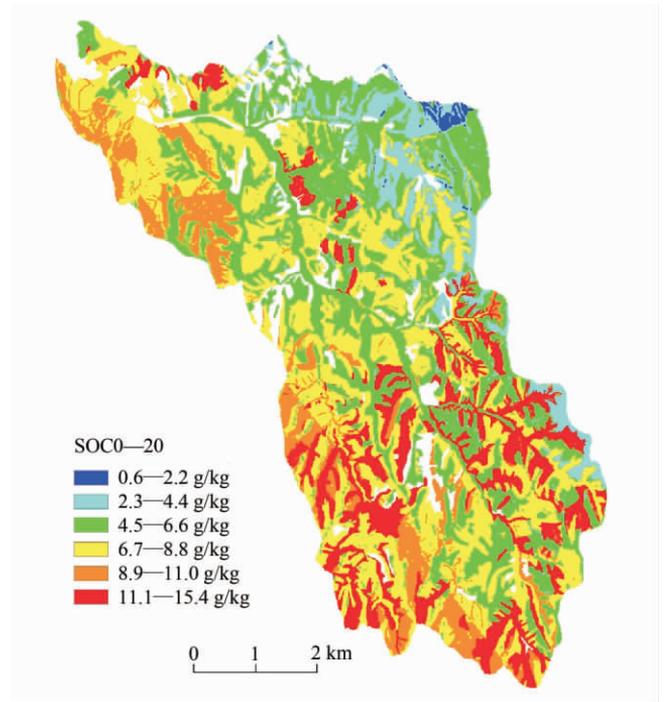


图7 燕沟流域表层土壤有机碳空间分布

Fig. 7 The surface contents of spatial distribution of soil organic carbon of YanGou watershed

准确地获取局域尺度内土壤有机碳变异因素是准确估算黄土区有机碳储量的基础。本研究显示地形、土地利用、坡向是流域土壤有机碳含量变化主要影响因子,在整个剖面上对土壤有机碳含量都存在显著影响。本研究计算所得1m土层土壤有机碳密度为 5.04 kg/m^2 ,低于全国平均土壤有机碳密度 9.60 kg/m^2 ^[11]。还显示,在黄土丘陵沟壑区,在地形部位上,沟底是土壤有机碳蓄存的重要场所,但由于所占面积较少,崩坡上层也成为土壤有机碳蓄存另一重要场所。在土地利用方式上,天然灌木林、天然乔木林和草地表现出更强土壤有机碳蓄存能力。剖面层次上,尽管表层(0—20cm)土壤有机碳蓄存能力较大,但深层(20—100)土壤有机碳蓄存能力也不容忽视。本研究中,1m土层土壤有机碳总储量为 $217.6 \times 10^3 \text{ t}$,深层(20—100cm)土壤有机碳储量占总储量的67.5%。

4 结论

4.1 地形、土地利用、坡向是流域0—100cm土层有机碳含量变化主要影响因子;而坡度、经度、纬度、高程在剖面局部层次上对土壤有机碳含量存在显著影响。

4.2 地形上崩顶、崩坡和沟底均随土层深度增加由高值区向低值区变化。崩顶在不同深度都处于土壤有机碳含量偏低区;崩坡随土层深度增加,从高值区向低值区降幅较大;沟底在不同深度都处于土壤有机碳含量偏高区。空间格局图上40—100cm可以清晰地看地沟底与崩顶和崩坡显著差异。

4.3 农田和果园在不同深度均处于土壤有机碳含量偏低区;灌木林在不同深度均处于土壤有机碳含量偏高区,草地、乔木林和川坝地处于灌木林和农田果园之间。

4.4 坡向上0—100cm各层土壤有机碳含量半阴坡(北部、东北、东部)最高,半阳坡(西部、西南、南部)含量较低。

References:

- [1] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, King A W, Dale V H, De Angelis D L. The global carbon cycle. *American Scientist*, 1990, 78: 310-326.
 [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.

- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. American Association for the Advancement of Science, 2004: 1623-1627.
- [4] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3) : 317-327.
- [5] Lal R, Kimble J, Levine E, Whitman C. World soils and greenhouse effect: an overview. *Soils and Global Change*, 1995: 1-25.
- [6] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China // Wang G C, Wen Y P. Monitoring and Relevant Process of Greenhouse Gas Concentration and Emission. Beijing: China Environment Sciences Publishing House, 1996: 129-139.
- [7] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5) : 330-332.
- [8] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, Zhu S L, Huang F H. Study on spatial distribution character analysis of the soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5) : 533-544.
- [9] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China*, 2003, 33(1) : 72-80.
- [10] Liu J Y, Wang S Q, Chen J J, Liu M L, Zhang D F. Storages of soil organic carbon and nitrogen and land use changes in China: 1990-2000. *Acta Geographica Sinica*. 2004, 59(4) : 483-496.
- [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] Men M X, Peng Z P, Liu Y H, Yu Z R. Spatial distribution of soil organic carbon and nitrogen in HenBei province based on soter. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4) : 469-473.
- [13] Zhao Y C, Shi X Z, Yu D S, Zhao Y F, Sun W X, Wang H J. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in HeBei province. *China Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3) : 379-385.
- [14] Tang K L, Zhang Z Z, Kong X L, Zha X, Shi R Y. A study of soil loss and degradation on the Loess Plateau. *Bulletin of soil and Water Conservation*, 1987, 7(6) : 12-18.
- [15] Zha X C, Tang K L. Change about soil erosion and soil properties in reclaimed forestland of Loess hilly region. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3) : 464-469.
- [16] Jiao F, Yang Q K, Lei H Z. Present situation of land use and proposals for rational use at Yan Gou Gully watershed. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, 18(7) : 5-8.
- [17] Wang X L, Duan J J, Guo S L. Organic carbon density of topsoil and its spatial distribution of small watershed in loess hilly region. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science)*, 2007, 35(10) : 98-102, 109.
- [18] Sun W Y, Guo S L, Song X Y. Effects of topographies and landuses on spatial distribution of surface soil organic carbon in hilly region of Loess Plateau. *Journal of National Resources*, 2010, 25(3) : 443-453.
- [19] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of landuse chang on the regional environment in the YangJuanGou catchment in the loess plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3) : 241-246.
- [20] Chen L D, Zhang S R, Fu B J, Peng H J. Correlation analysis on spatial pattern of land use and soil at catchment scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12) : 2497-2505.
- [21] Zhong B, Xu Y J. Topographic effects on soil organic carbon in Louisiana watersheds. *Environmental Management*, 2009, 43(4) : 662-672.
- [22] Xu Y, Sidle R. Landuse change and its regulation of YanGou watershed in Loess hilly-gully region. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6) : 657-666.
- [23] Yang G, Xue Z D. A discussion on spatial arrangement of vegetation of articial construction and the main construction techniques. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(2) : 136-139.
- [24] Nelson D W, 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: Soil Science Society of America Inc, 1982: 562-564.
- [25] SAS Release(8.1) . S Cary, USA: AS Institute Inc, 1999.
- [26] Batjes N H. Management Options for Reducing CO₂-concentrations in the Atmosphere by Increasing Carbon Sequestration in the Soil. Report 410-200-031, Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change and Technical Paper 30, Wageningen: International Soil Reference and Information Centre, 1999.
- [27] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2) : 1-22.

参考文献:

- [6] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库 // 王庚臣, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及有关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 129-139.

- [7] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. 科技通报, 1999, 15(5): 330-332.
- [8] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [9] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学, 2003, 33(1): 72-80.
- [10] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 刘明亮, 庄大方. 1990-2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. 地理学报, 2004, 59(4): 483-496.
- [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] 门明新, 彭正萍, 刘云慧, 宇振荣. 基于 SOTER 的河北省土壤有机碳、氮密度的空间分布. 土壤通报, 2005, 36(4): 469-473.
- [13] 赵永存, 史学正, 于东升, 赵彦锋, 孙维侠, 王洪杰. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究. 土壤学报, 2005, 42(3): 379-385.
- [14] 唐克丽, 张仲子, 孔晓玲, 查轩, 史瑞云. 黄土高原水土流失与土壤退化的研究. 水土保持通报, 1987, 7(6): 12-18.
- [15] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林地土壤侵蚀与土壤性质变化. 地理学报, 2003, 58(3): 464-469.
- [16] 焦峰, 杨勤科, 雷会珠. 燕儿沟流域土地利用现状及合理利用途径. 水土保持通报, 1998, 18(7): 5-8.
- [17] 王小利, 段建军, 郭胜利. 黄土丘陵区小流域表层土壤的有机碳密度及其空间分布. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(10): 98-102, 109.
- [18] 孙文义, 郭胜利, 宋小燕. 地形和土地利用类型对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响. 自然资源学报, 2010, 25(3): 443-453.
- [19] 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——以延安市羊圈沟流域为例. 地理学报, 1999, 54(3): 241-246.
- [20] 陈利顶, 张淑荣, 傅伯杰, 彭鸿嘉. 流域尺度土地利用与土壤类型空间分布的相关性研究. 生态学报, 2003, 23(12): 2497-2505.
- [22] 徐勇, Sidle R C. 黄土丘陵区燕沟流域土地利用变化与优化调控. 地理学报, 2001, 56(6): 657-666.
- [23] 杨光, 薛智德. 陕北黄土丘陵区植被建设中的空间配置及其主要建造技术. 水土保持研究, 2000, 7(2): 136-139.