

地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区小流域土壤无机碳分布的影响

张瑞^{1,3}, 曹华², 黄传琴², 谭文峰^{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. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 地形和土地利用方式对土壤无机碳(SIC)的空间分布和碳汇效应有重要影响。以黄土高原丘陵沟壑区纸坊沟小流域为对象, 研究土地利用、地形对 0—200 cm 土层内 SIC 空间分布的影响。结果表明, 地形对纸坊沟流域 SIC 空间分布呈极显著影响($P < 0.01$), 表现为峁顶(15.32 g/kg) > 坡地(14.45 g/kg) > 沟底(12.27 g/kg)的变化趋势; 土地利用方式影响该流域 SIC 分布, 其含量表现为灌木地 > 草地 > 林地 > 农地, 其中灌木地极显著高于林地、草地和农地, 林地和草地极显著高于农地, 而林地与草地无显著差异; 地形与土地利用交互作用极显著影响 SIC 空间分布($P < 0.01$)。相关结果可为黄土高原土壤碳库提供基础数据, 有助于明确黄土高原在中国陆地碳循环中的作用。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 土地利用; 地形; 土壤无机碳(SIC)

中图分类号: S153.6⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2012)04-0143-05

Effects of Topography and Land Use on Spatial Distribution of Soil Inorganic Carbon in a Small Watershed of the Loess Hilly-gully Region

ZHANG Rui^{1,3}, CAO Hua², HUANG Chuan-qin², TAN Wen-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 3. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039)

Abstract: It is significant to accurately assess regional spatial distribution characteristics and influencing factors of soil inorganic carbon and to study effects of land use and topographies on spatial distribution of soil inorganic carbon. Taking Zhifanggou small watershed, which is situated in loess hilly-gully region, as an object, influences of land use and topographic on the distribution of inorganic carbon on 0—200 cm soil layer were studied. Results showed that the terrain had a significant influence on the spatial distribution of soil inorganic carbon on Zhifanggou small watershed, and ranged as: Table land(15.32 g/kg) > slope land(14.45 g/kg) > gully land(12.27 g/kg). There were differences in the distribution of soil inorganic carbon under different land use. Soil inorganic carbon content in shrub land were significantly higher than those in wood land, grassland and farmland, wood land and grassland significantly higher than those in farmland. But there were no significant difference between wood land and grassland, and soil inorganic carbon content under different land use could be ordered as follows: Shrub land > grassland > woodland > farmland; interaction of topographic position and land use significantly affected the spatial distribution of soil inorganic carbon($P < 0.01$). The result can provide basic information for soil carbon pool of the Loess Plateau, it is helpful to know that the Loess Plateau which is important to carbon cycle of terrestrial ecosystems of China.

Key words: loess hilly-gully region; land use; topography; soil inorganic carbon(SIC)

全球气候变化、温室效应等环境问题, 日益引起人们对陆地生态系统中碳平衡、碳分布和储量的关注。陆地生态系统碳循环作为全球碳循环的重要组成部分, 在全球碳收支平衡中占据主导地位^[1]。土壤是陆地生态系统中最大的碳库, 包括土壤有机碳(SOC)和无机碳(SIC)两部分^[2]。SOC 积极地参与短期的 CO₂ 净通量^[3], 土壤有机碳储量即使很小的变动都会改变大气中 CO₂ 的浓度^[4]。同样, 土壤无机碳库在全球陆地碳循环中有

收稿日期: 2012-04-26

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 黄土高原水土侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(10502)

作者简介: 张瑞(1986—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事土壤与环境研究。E-mail: ruizhanghs@163.com

通讯作者: 谭文峰(1971—), 男, 湖北武汉人, 博士, 研究员, 主要从事土壤化学与环境研究。E-mail: wenfeng.tan@hotmail.com

着重要的作用^[5]。此外,认为土壤碳储存能力是缓解未来日益增加的大气 CO₂ 的潜在选择。目前,我国关于土壤碳的研究多集中于 SOC 储量与密度的分布及其对大气 CO₂ 的影响。虽然碳酸盐岩是地球上最主要的碳库,占全球总碳量的 99.55%^[6],但是对以碳酸盐形式存在的 SIC 的研究相对薄弱^[7]。SIC 是干旱半干旱地区土壤碳最主要的存在形式^[3,5]。该地区占全球陆地面积的 1/3,其 SIC 储量大约是 SOC 储量的 2~10 倍^[8-9]。黄土高原地处中国干旱半干旱地区,该地区覆盖面积大、土层深厚,并且土壤富含碳酸盐^[10],是研究 SIC 循环的理想区域。秦小光等^[11]应用生物地球化学模型估算黄土高原地区的 SIC 储量为 850 Pg,认为中国黄土是大气 CO₂ 的“汇”。因此,黄土高原在全国乃至全球碳循环中有着重要的贡献。贾宇平等^[12]研究结果表明,地形部位的不同,SIC 含量分布有所不同,表现为梁峁顶部 SIC 含量最高,沟坝地 SIC 含量最低。同样的,土地利用对 SIC 分布也有影响,不同土地利用方式下土壤 CaCO₃ 含量表现为耕地>林地>草地^[13]。本文以陕西省安塞县纸坊沟流域为研究对象,分析不同地形和土地利用方式下 SIC 的差异,在流域尺度上探讨地形、土地利用以及二者的交互作用对黄土丘陵沟壑区 SIC 空间分布特征的影响,以期为黄土高原地区制定合理的土地管理措施、充分发挥干旱半干旱地区的土壤无机碳库效应提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县纸坊沟流域,是黄土高原典型丘陵沟壑区(36°51'N,109°19'E)。流域面积 8.27 km²,海拔 1 010~1 431 m,土壤类型主要为黄绵土,土地利用类型主要为林地、灌木林地、草地和农田^[14]。该区年均气温约 8.8 °C,年均降水量约 490 mm,降水年内季节分布不均匀,61%的降水主要集中在 7—9 月份,≥10 °C 年积温为 2 800~3 500 °C,干燥度为 1.48,植被有旱生的天然灌木群落,如狼牙刺(*Caragana rosea*)、扁核木(*Prinsepia utilis*)、杠柳(*Periploca sepium*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,人工群落以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana microphylla*)为主,属暖温带半干旱森林草原区。

1.2 样品采集与分析方法

于 2011 年 7 月在纸坊沟流域,结合土地利用采用不规则网格法,以 200 m×200 m 间距进行采样,共 142 个样点,并用 GPS 对样点定位。每个样点 0—60 cm,60—200 cm 土层分别以 10 cm,20 cm 间距进行分层取样,共采集 1 750 个土样。每个土地利用方式的面积与样品数量列于表 1。

采集的土样部分置于铝盒,采用经典烘干法(105 °C,10 h)测定土壤含水率(质量百分比);部分土样室内风干,磨细,过 0.25 mm 筛用于气量法测定 CaCO₃ 含量(%)^[15]。SIC 含量(g/kg)=CaCO₃ 含量(%)×0.12×10,其中:0.12 为 CaCO₃ 中碳的含量。

用 SPSS 16.0 软件和 Excel 2003 软件计算各层平均 SIC 含量、标准差、标准误以及变异系数(CV/%),并进行方差分析、多重比较;用 ArcGis 9.3 和 Sigmaplot 10.0 进行相关地统计分析和图件制作。

2 结果与分析

2.1 地形对 SIC 分布的影响

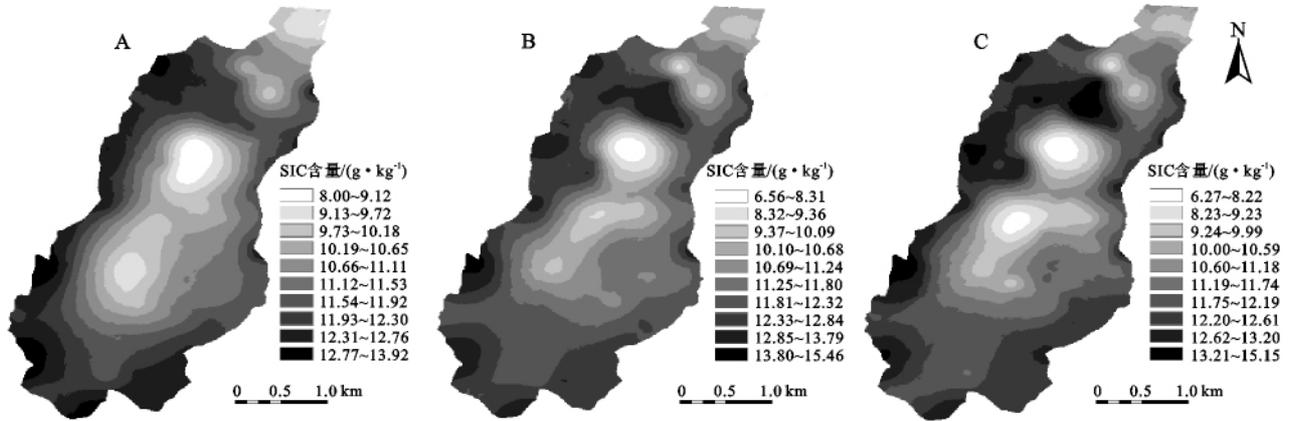
2.1.1 不同地形条件下 SIC 的空间分布特征 变异系数(CV)表明了特征参数的空间变异程度,根据 Nielsen 的划分标准,当 CV≤10%时为弱变异性;当 10%<CV<100%时为中等变异性;当 CV≥100%时为强变异性。根据纸坊沟流域不同地形条件下 SIC 含量的统计结果显示,整个小流域的 SIC 平均含量为 14.47 g/kg,变异系数为 13.85%,属中等变异。不同地形条件下,SIC 含量表现为峁顶(15.32 g/kg)>坡地(14.45 g/kg)>沟底(12.27 g/kg),方差分析表明这种差异达到显著极水平(P<0.01)。3 种地形条件下 SIC 含量的变异系数介于 10%~17%之间,均为中等变异,但峁顶的变异系数最小,表现出相对较弱的变异。

利用 ArcGis 软件的地统计模块对流域 SIC 数据进行正态分布检验,流域 SIC 数据符合或者经对数转化后近似符合正态分布。因此,可将 SIC 数据进行克里格插值。图 1 为纸坊沟流域不同土层 SIC 含量的空间分布特征。结果显示,在 0—20 cm,0—100 cm,0—200 cm 土层中 SIC 含量基本遵循峁顶>坡地>沟底的空间分布

表 1 纸坊沟流域各土地利用类型的面积与样品采集数量

土地利用类型	面积/m ²	面积比例/%	样本数	样本比例/%
草地	2571452	30.67	45	31.69
灌木林地	468011	5.58	26	18.31
林地	4061621	48.44	51	35.92
农地	1141852	13.62	20	14.08
河流	329292	0.39	—	—
居民地	690912	0.82	—	—
未利用地	39351	0.47	—	—
合计	8384306	100	142	100

特征,与前面分析结果一致。流域中 0—20 cm 土层 SIC 含量高于 11.93 g/kg 的斑块主要分布在峁顶,低于 10.18 g/kg 的斑块主要分布在沟底,在坡地上 10.19~11.92 g/kg 的斑块占主导;0—100 cm 土层 SIC 含量高于 12.82 g/kg 的斑块主要集中在峁顶,低于 11.25 g/kg 的斑块分布在沟底,在坡地上 11.26~12.81 g/kg 的斑块占主导;0—200 cm 土层,峁顶 SIC 含量高于 12.22 g/kg,而沟底 SIC 含量低于 10.62 g/kg,坡地 SIC 含量主要集中在 10.63~12.21 g/kg 之间。



注:A,B,C 分别为 0—20 cm,0—100 cm,0—200 cm 土壤无机碳空间分布特征。

图 1 纸坊沟 SIC 的空间分布特征

2.1.2 不同地形条件下 SIC 垂直变化及其差异特征 SIC 含量在垂直方向上的分布变化受降雨、蒸散、地形、土地利用等因素的影响。不同地形条件下 SIC 含量的垂直分布表现出明显变异(图 2)。峁顶、坡地 SIC 含量随土层深度增加呈先增加后减少的变化趋势,而沟底 SIC 含量随着土层深度增加表现为升高—降低—升高的变化趋势。峁地、坡地和沟底土层中均存在碳酸盐的淀积层,但淀积层的深度不同,分别为 30—60 cm,40—60 cm,50—80 cm。

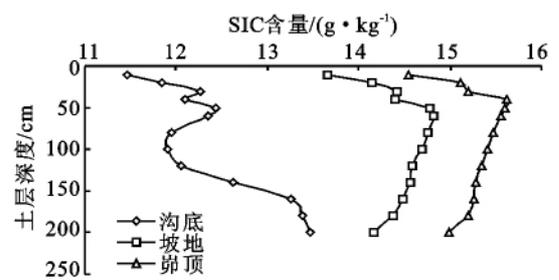


图 2 不同地形土壤无机碳垂直分布特征

2.2 不同土地利用方式对 SIC 分布的影响

2.2.1 不同土地利用方式下 SIC 垂直变化及其差异特征 从不同土地利用方式下 SIC 含量的垂直变化趋势(表 2)可见,农地、草地、林地、灌木地土壤剖面中存在碳酸盐淀积层,但淀积深度不同。农地、草地、林地碳酸盐的淀积深度分别为 80—140 cm,20—60 cm,20—60 cm。林地的淀积深度为 20—40 cm,但当深度达到 140 cm 以后,SIC 含量逐渐增加。

表 2 不同土地利用方式下土层 SIC 含量

土层深度/cm	农地			草地			林地			灌木地		
	样本数	含量/(g·kg ⁻¹)	CV/%									
0—10	20	12.75±1.74	13.67	45	13.87±1.81	13.08	51	13.86±1.80	12.97	26	13.30±2.77	21.75
10—20	20	13.18±1.67	12.68	45	14.22±2.08	14.59	51	14.26±1.72	12.07	26	14.25±2.45	18.63
20—30	20	13.26±2.03	15.28	45	14.23±3.03	21.29	51	14.60±1.86	12.75	26	14.80±2.76	20.84
30—40	20	13.42±2.09	15.57	45	14.50±2.95	20.37	51	14.58±1.86	12.75	26	14.82±3.14	23.43
40—50	19	13.69±1.91	13.97	43	14.81±2.18	14.72	51	14.70±1.58	10.74	25	15.26±1.67	12.17
50—60	19	13.86±1.94	13.96	43	14.72±2.27	15.45	51	14.73±1.71	11.59	25	15.19±1.59	11.46
60—80	18	13.68±1.80	13.19	43	14.64±2.05	14.03	50	14.67±1.75	11.91	25	15.09±1.91	13.97
80—100	17	13.74±2.14	15.55	42	14.66±1.71	11.65	50	14.50±1.84	12.69	24	15.33±1.87	13.61
100—120	17	13.42±2.06	15.34	42	14.65±1.83	12.5	50	14.46±1.57	10.84	24	15.31±2.13	15.85
120—140	16	13.34±2.23	16.72	39	14.97±1.28	8.54	49	14.46±1.67	11.57	24	15.36±1.84	13.82
140—160	15	13.64±2.06	15.08	39	15.01±1.36	9.05	48	14.37±1.76	12.27	24	15.35±1.73	12.70
160—180	15	13.62±2.01	14.74	39	14.98±1.54	10.26	48	14.26±2.04	14.29	23	15.39±1.54	11.30
180—200	15	14.03±1.60	11.39	39	14.37±2.23	15.49	48	14.10±2.58	18.33	23	15.43±1.62	11.54

2.2.2 不同土地利用方式下 SIC 空间分布特征 研究结果显示,纸坊沟流域不同土地利用方式下 SIC 含量表现为灌木地(14.98 g/kg) > 草地(14.59 g/kg) > 林地(14.43 g/kg) > 农地(13.49 g/kg)的分布规律。将不同土地利用方式 SIC 含量的平均值进行方差分析,结果表明,土地利用方式对 SIC 含量与分布有极显著影响($P < 0.01$)。其中,灌木地 SIC 极显著高于林地、草地、农地,林地和草地极显著高于农地,而林地与草地 SIC 含量无显著性差异。

2.3 地形和土地利用交互作用对 SIC 空间分布的影响

同一地形条件下,不同土地利用方式对 SIC 含量与分布的影响存在显著差异(表 3)。峁顶 SIC 含量表现为草地(15.45 g/kg) > 灌木地 > 林地(15.39 g/kg) > 灌木地(15.32 g/kg) > 农地(14.47 g/kg)的变化趋势;草地、林地和灌木地 SIC 含量差异不显著,但均极显著高于农地($P < 0.01$)。坡地 SIC 含量表现为灌木地(15.08 g/kg) > 林地(14.27 g/kg) > 草地(14.19 g/kg) > 农地(13.94 g/kg)的变化趋势;草地、林地和农地 SIC 含量差异不显著,但均极显著低于灌木地($P < 0.01$)。沟底 SIC 含量分布规律表现为农地(12.71 g/kg) > 草地(12.46 g/kg) > 灌木地(11.70 g/kg) > 林地(10.87 g/kg);农地和草地 SIC 含量极显著高于林地、显著高于农地。

同一土地利用方式下,不同地形对 SIC 含量与分布的影响存在显著差异(表 4)。在林地、草地 SIC 含量空间上呈峁顶(15.39 g/kg) > 坡地(14.27 g/kg) > 沟底(10.87 g/kg)的变化趋势;峁顶 SIC 含量极显著高于坡地、沟底,坡地 SIC 含量极显著高于沟底($P < 0.01$)。灌木地 SIC 含量空间上呈峁顶(15.32 g/kg) > 坡地(15.08 g/kg) > 沟底(11.70 g/kg)。

农地 SIC 含量空间分布特征与灌木地相一致,即峁顶(14.49 g/kg) > 坡地(13.94 g/kg) > 沟底(12.54 g/kg)。灌木地、农地的利用方式下,峁顶和坡地 SIC 含量差异不显著,但均极显著高于沟底($P < 0.01$)。

3 讨论

本研究区的土壤母质为较均一的风尘黄土,具有均匀的碳酸盐背景值。干旱半干旱地区,碱性富钙的地球化学环境下,通过大气-植被-土壤-水-沉淀作用的碳转移系统是碳循环的主要机理和途径^[16,17]。纸坊沟流域 SIC 含量在空间上表现为峁顶 > 坡地 > 沟底的分布特征。这可能与流域地形引起的土壤水分和有机碳矿化速率的空间差异有关。一般黄土高原丘陵沟壑区流域的地下水埋藏较深,土壤水分主要来自大气降水。土壤水中溶解的 CO₂ 与 CaCO₃ 形成可溶性的 Ca(HCO₃)₂,并随降水入渗向下淋溶,当土壤水分减少、CO₂ 分压降低时,Ca(HCO₃)₂ 转变成 CaCO₃ 淀积于深层土壤中。不同地形接受的太阳辐射、降雨再分配和风速不同,最终引起土壤含水率不同。纸坊沟流域土壤含水率表现为峁顶(8.25%) < 坡地(8.37%) < 沟底(8.73%)。峁顶土壤水分主要来自降雨,峁顶太阳辐射强、风速大,蒸散量比其他地形强烈^[18];同时,峁顶蒸散、空气的流动等促进了 SOC 的矿化,有利于土壤中 SOC → CO₂ → HCO₃⁻ → CaCO₃ 的转化。因此,峁顶土壤含水率最低,SIC 剖面含量最高、淋溶迁移量最小。地表径流和壤中流会带走坡地土壤中的部分碳酸盐,因此坡地的 SIC 含量比峁顶的低。流域峁顶和坡地表层低 SIC 含量的土层被剥蚀,随径流迁移沉积于沟底。因此,沟底浅层土壤的 SIC 含量较深层土壤的低。另外,沟底长期接受坡面径流的补给,土壤含水率显著高于坡地和峁顶,沟底 SIC 淋溶作用相对较强。所以,沟底 SIC 含量随剖面深度的增加呈先增加后减少再增加的波动。

纸坊沟流域不同土地利用方式下土壤含水率表现为农地(13.26%) > 草地(9.06%) > 林地(7.30%) > 灌木地(5.96%)。根据前面的分析可知,农地 SIC 的淋溶迁移量大于草地、林地和灌木地。与表 2 的分析结果一致,即灌木地 SIC 含量极显著高于林地、草地、农地,林地和草地极显著高于农地,而林地与草地 SIC 含量无显

表 3 同一地形不同土地利用方式土层 SIC 含量

地形	土地利用	SIC 含量/(g · kg ⁻¹)
峁顶	林地	15.39 ± 1.48B
	灌木地	15.32 ± 1.26B
	草地	15.45 ± 2.32B
	农地	14.47 ± 1.52A
坡地	林地	14.27 ± 1.56B
	灌木地	15.08 ± 2.46A
	草地	14.19 ± 2.12B
	农地	13.94 ± 1.85B
沟底	林地	10.87 ± 1.43Bc
	灌木地	11.70 ± 1.44ABbc
	草地	12.46 ± 2.51Aab
	农地	12.71 ± 1.84Aa

注:不同大写字母表示在 0.01 水平显著,不同小写字母表示在 0.05 水平显著。下同。

表 4 同一地利用方式下不同地形部位对 SIC 含量的影响

土地利用方式	地形部位	样本数	含量/(g · kg ⁻¹)	CV/%	土地利用方式	地形部位	样本数	含量/(g · kg ⁻¹)	CV/%
林地	峁顶	15	15.39A	9.62	草地	峁顶	15	15.62A	13.30
	坡地	32	14.27B	10.94		坡地	25	14.31B	12.18
	沟底	4	10.87C	13.15		沟底	5	11.86C	20.08
	总计	51	14.43	12.74		总计	45	14.55	15.11
灌木地	峁顶	9	15.32A	8.19	农地	峁顶	6	14.49A	10.33
	坡地	15	15.08A	16.31		坡地	3	13.94A	13.31
	沟底	2	11.70B	12.27		沟底	11	12.54B	17.35
	总计	26	14.98	14.68		总计	20	13.43	15.74

著差异。地形通过对光照、温度、水分的空间再分配来影响植被类型分布和土壤养分迁移,从而影响土地利用结构的变化,土地利用结构的调整反过来又会影响 SIC 的分布。土地利用与地形交互作用直接影响 SIC 含量的变化。根据方差分析知,土地利用和地形对纸坊沟流域 SIC 的空间分布有极显著影响($P < 0.01$),二者的交互作用对流域 SIC 空间分布的影响也达到了极显著水平($P < 0.01$)。相同土地利用方式下,SIC 均呈峁顶 > 坡地 > 沟底。而相同地形、不同土地利用方式下 SIC 含量的变化规律不同。结果显示,坡地的农地主要以梯田为主,改变了原始地形,具有坡面汇流的作用,增加了降雨入渗量,进而增强 SIC 的淋溶迁移,因而农地 SIC 含量最低。沟底 SIC 含量以农地最高,灌木地最低。造成这种现象可能与草地、农地管理方式有关:农地每年都有深翻耕作,一方面促进了土壤有机碳矿化,使得 $\text{SOC} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3$ 过程顺利实现;另一方面,土壤矿物风化作用增强,土壤中较多的含钙矿物的钙在矿物发生分解时分离出来。与农地相比,林地、草地、灌木地土壤受人为扰动少,土壤中有机质周转慢,矿物风化作用弱,因此林地、草地、灌木地 SIC 含量比耕地少。由此可见,地形条件和土地利用方式对 SIC 的分布格局具有重要影响,单一考虑地形或土地利用对 SIC 的影响,均不能全面认识流域 SIC 空间变异规律。因此,在黄土高原丘陵区植被建设、土地利用结构优化、生态恢复过程中,可结合不同土地利用方式和地形条件下 SIC 的影响因素及其空间变异规律,考虑土地利用和地形的交互作用,以充分发挥土壤无机碳库的环境效应。

4 结论

(1)地形对流域 SIC 空间分布有极显著的影响($P < 0.01$),表现为峁顶(15.32 g/kg) > 坡地(14.45 g/kg) > 沟底(12.27 g/kg)的变化趋势。

(2)不同土地利用方式下,SIC 含量呈灌木地 > 草地 > 林地 > 农地。其中,灌木地 SIC 含量(14.98 g/kg)极显著高于草地(14.59 g/kg)、林地(14.43 g/kg)、农地(13.49 g/kg),林地和草地 SIC 含量极显著高于农地,而林地与草地 SIC 含量无显著差异。

(3)地形与土地利用交互作用对 SIC 空间分布影响达到极显著差异($P < 0.01$)。地形条件和土地利用方式导致土壤含水率和有机碳矿化速率的空间差异可能是导致纸坊沟流域内 SIC 空间变异的原因。

参考文献:

- [1] Eswaran H. Organic carbon in soils of the world[J]. Soil Science, 1993, 57: 192-194.
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163.
- [3] Mielenick P, Dugas W, Mitchell K, et al. Long-term measurements of CO_2 flux and evapotranspiration in a Chihuahuan desert grassland[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 60(3): 423-436.
- [4] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440: 165-173.
- [5] Lal R J, Kimble J M. Pedogenic carbonates and the global carbon cycle, in global change and pedogenic carbonate[M] Boca Raton: CRC, 2000: 1-14.
- [6] 翁金桃. 碳酸盐岩在全球碳循环过程中的作用[J]. 地球科学进展, 1995, 10(2): 154-158.
- [7] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China[J]. Bull. Sci. Technol., 1999, 15: 330-332.
- [8] Eswaran H, Reich P F, Kimble J M. Global carbon stocks[M]. Boca Raton: CRC, 2000.
- [9] Schlesinger W H. Carbon storage in the caliche of arid soils: A case of study from Arizona[J]. Soil Science, 1982, 133: 247-255.
- [10] 文启忠. 中国黄土地球化学学[M]. 北京: 中国科学出版社, 1989.
- [11] 秦小光, 李长生, 蔡炳贵. 气候变化对黄土碳库效应影响的敏感性研究[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 153-161.
- [12] 贾宇平, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤碳酸盐碳的空间分布特征[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 166-171.
- [13] 贾宇平, 段建南. 土地利用方式对黄土丘陵土壤 CaCO_3 含量及分布的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 319-321.
- [14] 程积民, 万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 潘根兴, 曹建华, 周运超. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 325-334.
- [17] 陈拓, 马健, 冯虎元, 等. 阜康典型荒漠 C_3 植物稳定碳同位素值的环境分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(4): 342-345.
- [18] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6-9.