

# 黄土高原小流域土壤总碳分布与储量研究

贾宇平, 马义娟

(太原师范学院城市与旅游学院, 山西 太原 030012)

**摘要:** 以位于黄土高原典型沟壑区的砖窑沟流域为研究区, 通过对流域内土壤分层取样分析, 运用地统计学方法探讨了流域土壤总碳的空间分布特征, 并在运用 Kriging 插值法生成流域土壤总碳含量空间分布图的基础上, 通过构建土壤碳储量估算模型, 估算出流域土壤总碳储量。结果表明, 砖窑沟流域土壤总碳含量总体上随着深度增加而减少, 同一深度层内土壤总碳含量沿梁峁顶部→梁峁坡→沟坝地依次减少; 流域内 0—100 cm 深度内土壤总碳储量占 0—200 cm 深度内土壤总碳储量的 51.8%。100—200 cm 深度的土壤碳储量在 0—200 cm 总碳储量中仍占较大比重。因此, 在研究黄土高原土壤碳储量时, 100 cm 深度以下的土壤碳储量不容忽视。

**关键词:** 黄土高原; 小流域; 土壤总碳分布; 土壤总碳储量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)05-0017-03

中图分类号: S153.61

## Spatial Distribution and Reserve of Soil Total Carbon in Small Watershed in Loess Plateau

JIA Yǔ-ping, MA Yì-juan

(School of Urbanism and Tourism, Taiyuan Normal University, Taiyuan, Shanxi 030012, China)

**Abstract:** According to the data of observed points in Zhuanyaogou watershed in the typical gully region of the loess plateau, spatial distribution characteristics of soil total carbon (STC) content were discussed by geo-statistical approach. The reserve of STC was calculated by modeling on the base of the spatial distribution maps of STC in the watershed made by Kriging. The results indicated that the STC content decreased with the increase of depth. At the same depth, the STC contents were highest on the tops of the hills and were lowest in the gullies. The reserve of STC in the range of 0—100 cm was 51.8% of that in the range 0—200 cm depth in the watershed. The STC storage in the depth of 100—200 cm is important for predicting the total STC reserve in the area of Loess Plateau.

**Keywords:** the loess plateau; small watershed; spatial distribution of soil total carbon content; reserve of soil total carbon

随着全球环境变化研究的深入, 陆地生态系统碳循环日益引起科学界的关注。土壤是陆地生态系统的核心, 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。自 20 世纪 50 年代, 国内外许多学者开始对全球土壤碳库进行研究, 已取得许多成果。但长期以来土壤碳库的研究集中在土壤有机碳, 对碳酸盐形式存在的土壤无机碳和土壤总碳库研究相对较少。即便是对土壤有机碳的研究, 由于研究区域范围过大、采用的土壤剖面密度过小, 导致土壤有机碳的估计值差异较大<sup>[1-5]</sup>。黄土高原是个重要的土壤碳库, 但有关这一碳库的研究报道尚不多见。笔者就曾

位于典型黄土高原沟壑区的砖窑沟流域土壤有机碳和无机碳的空间变异作过探讨<sup>[6-7]</sup>, 试图开展小尺度范围内土壤空间变化的研究。本文正是在已有研究成果基础上, 通过加密土壤剖面密度, 展开对小流域土壤总碳空间分布与储量估算的研究, 以期在研究方法上做些探索, 并力求能为黄土高原乃至中国的土壤碳库精确估算提供基础数据资料。

### 1 研究区概况与研究方法

砖窑沟流域是黄河的一级支流, 位于山西省河曲县中西部, 流域面积约 28.7 km<sup>2</sup>。气候属暖温带大陆性季风气候; 地貌以峁状黄土丘陵为主, 沟壑纵横; 土壤以栗褐土为主, 土层深厚, 质地多轻壤; 植被为暖

温带半干旱森林草原, 植被稀疏, 地表覆盖率低, 水土流失严重; 受气候和地下水影响, 流域内基本上为雨养旱作农业。

按地貌部位不同, 采用非等间距不规则网格布点法, 在砖窑沟流域内钻孔取样共 62 个样点, 每个样点取土分 9 层: 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—130, 130—160, 160—200 cm, 各层为层内混合样。各样点每层土壤总碳含量由有机碳和碳酸盐碳含量相加而得, 土壤有机碳含量用重铬酸钾氧化—外加热法测定, 碳酸盐碳含量用气量法测定, 土壤容重用环刀法测定。

本研究采用地统计学方法揭示各层土壤总碳的空间分布特征, 有关地统计学方法原理参见文献 [8] 和 [9]。然后以利用 Kriging 插值法所绘制的土壤总碳空间分布等值线图为依据, 构建土壤碳的分层储量和总储量估算模型, 从而获得流域土壤碳的分层储量和总储量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤总碳含量空间分布特征

在地统计学中, 半方差函数是研究空间变异性的关键函数。其一般表达式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$$

式中:  $\gamma(h)$  —— 半方差函数;  $N(h)$  —— 以  $h$  为间距的所有观测点的成对数目;  $Z(X_i), Z(X_i + h)$  —— 空间间距为  $h$  的两个取样点的土壤碳含量实测值。本文首先利用采样分析所获得的数据计算得到每层土壤总碳的试验半方差函数。然后通过对试验半方差函数的拟合, 求得半方差函数的理论模型 (表 1)。最后以各层半方差函数的理论模型为基础, 采用 Kriging 插值法, 对未测点进行估值, 绘制出了砖窑沟流域土壤总碳空间分布图 (图 1)。

表 1 砖窑沟流域土壤总碳含量理论模型

深度/ cm	理论 模型	模型表达式	
		$h = 0$	$h > 0$
0—10	指数	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 0.31 + 2.27 \times (1 - e^{-1.32h})$
10—20	球状	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 0.73 + 1.52 \times (1.85h - 0.95h^3)$
20—40	球状	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 0.81 + 1.18 \times (1.54h - 0.54h^3)$
40—60	球状	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 0.01 + 0.01 \times (1.61h - 0.62h^3)$
60—80	高斯	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 0.01 + 0.04 \times (1 - e^{-0.01h^2})$
80—100	高斯	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 1.51 + 13.6 \times (1 - e^{-0.01h^2})$
100—130	高斯	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 1.03 + 0.97 \times (1 - e^{-1.30h^2})$
130—160	球状	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 0.64 + 1.21 \times (1.19h - 0.25h^3)$
160—200	指数	$\gamma(h) = 0$	$\gamma(h) = 0.30 + 2.17 \times (1 - e^{-2.49h})$

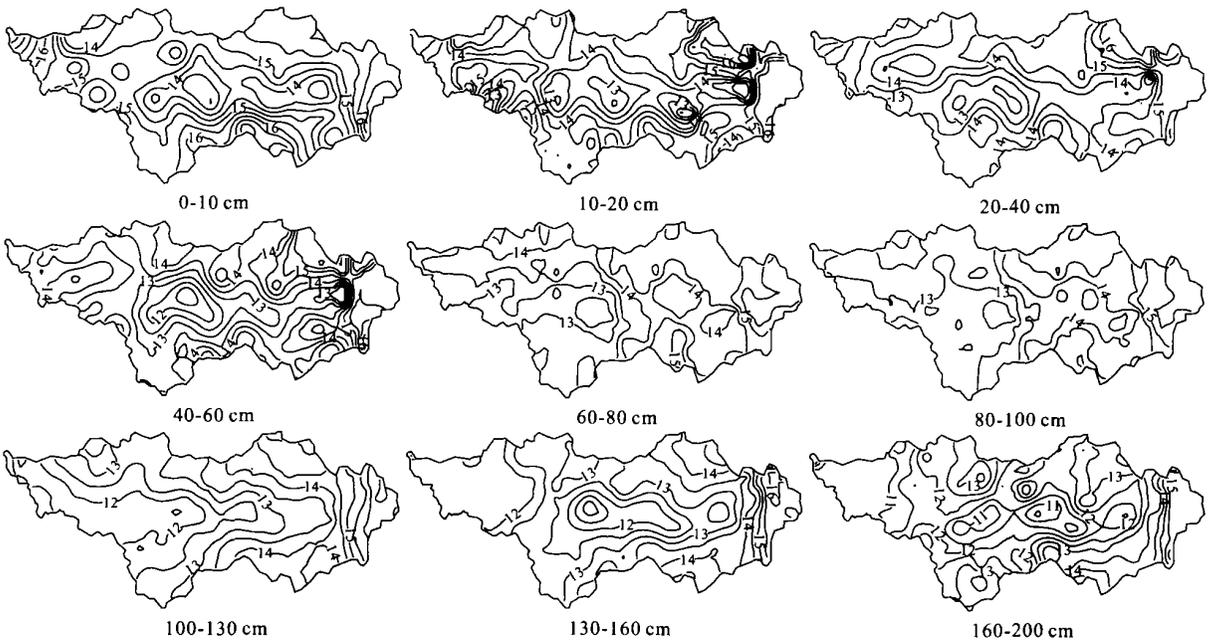


图 1 砖窑沟流域土壤总碳含量空间分布图

2.1.1 垂直方向土壤总碳含量分布特征 由图 1 可见, 流域内土壤总碳含量总体上随着深度加深而减少, 但在 0—80 cm 内土壤总碳含量减少明显, 在 80

cm 以下变化不大。上部总碳含量变化幅度大与降水的淋溶作用和人类活动的双重影响有关。碳酸盐碳会随着降水的淋溶向下迁移, 在达到降水最大入渗深

度时淀积下来,在土壤剖面上部碳酸盐碳有随深度加深而增多的变化;而有机碳含量则较多地受到人类活动的影响,随深度增加而降低。有关碳酸盐碳和有机碳含量在空间上的变化问题,笔者在文献[6-7]中已做过详细分析。这里要指出的是,在土壤剖面上部,随深度加深有机碳含量减少的幅度比碳酸盐碳含量增加的幅度要快得多,因此,在土壤剖面上部,随深度增加土壤总碳含量明显减少。而在土壤剖面下部,受降水和人类活动的影响都很小,土壤碳空间变化主要受土壤母质碳含量影响。因为该流域土壤母质是相对均质的黄土母质,母质中碳酸盐碳和有机碳含量变化都较小,所以总碳含量在土壤深处变化也较小。

2.1.2 同深度层内土壤总碳含量分布特征 图1显示,总体上流域内各层次土壤总碳含量沿梁峁顶部→梁峁坡→沟坝地依次减少,梁峁顶部和沟坝地总碳含量变化缓慢,梁峁坡地总碳含量变化迅速。土壤总碳含量在水平方向的这种分布格局与文献[7]中的土壤碳酸盐碳的分布十分相似,而与文献[6]中的土壤有机碳的分布差别较大。根据本项研究的取样分析结果,流域内土壤碳酸盐碳含量一般在8.16~15.48 g/kg,个别点的碳酸盐碳含量低于8 g/kg;而有机碳含量多数仅有0.74~5.93 g/kg,只有分布于沟坝地的极少数点有机碳含量超过了6 g/kg,表明该流域内土壤碳酸盐碳含量明显高于有机碳含量。这与秦小光等<sup>[10]</sup>得出的“黄土高原土壤碳以无机碳为主”的结论相一致。显然,土壤总碳含量主要是受碳酸盐碳空间分布格局的影响。

同时可以看到,在土壤剖面上部0—40 cm各层内,流域出口处出现了一个土壤总碳含量高值区,这是因为该处是整个流域土壤最肥沃的地方,土壤有机碳含量最高达到了8.03 g/kg,明显比流域内其它地方高,造成该处总碳含量增高也是显而易见的。

## 2.2 土壤总碳储量估算

2.2.1 土壤总碳储量估算模型构建 目前估算土壤碳库储量的方法通常是以土壤类型或植被类型为单元进行的<sup>[1,3-4]</sup>,其中所使用的土壤碳含量是各个土种或植被群落的少量剖面的平均碳含量,而各个土种或植被群落的碳含量值是间断的,各土种或植被群落

之间缺乏过渡性。事实上,土壤碳在空间上是一种连续渐变的现象,对土壤碳库储量的估算应采用具有连续性和过渡性的碳含量值,这种土壤碳含量值可以从能反映连续分布现象数量特征空间分布的土壤碳含量分布等值线图获得。由于地统计学所使用的Kriging插值是一种最优无偏估计,从土壤碳含量分布等值线图上读取的碳含量数据也是真实碳含量的无偏估计量,所读取的相应面积反映了各含量值的真实分布范围大小,以这样的数据为基础作出的估算更接近真实值。

土壤容重是一种相对稳定且空间变异较小的土壤属性。本项研究取样分析结果表明,砖窑沟流域在0—200 cm深度内的土壤容重在1.29~1.32 g/cm<sup>3</sup>之间,而且同一深度层次内土壤容重变化极小,在估算流域土壤总碳储量时土壤容重可采用分层平均值。由于所取土壤样品中>2 mm的石砾含量极少,故忽略不计。为此,构建了下列估算模型:

$$c_i = \sum_{j=1}^n (c_{ij} \times 10^{-3} \times s_j \times 10^{10} \times h_i \times \rho), c = \sum_{i=1}^m c_i$$

式中:  $c_i$ ——第*i*层土壤总碳储量(g);  $n$ ——第*i*层图斑总块数;  $c_{ij}$ ——第*i*层第*j*块图斑土壤总碳含量(g/kg);  $10^{-3}$ ——将碳含量由以g/kg作单位换算为以g/g作单位时的因子系数;  $s_j$ ——第*i*层第*j*块图斑的面积(km<sup>2</sup>);  $\sum_{j=1}^n s_{ij} = 28.7 \text{ km}^2$ ;  $10^{10}$ ——将图斑面积由km<sup>2</sup>作单位换算为cm<sup>2</sup>作单位时的因子系数;  $h_i$ ——第*i*层土壤厚度(cm);  $\rho$ ——第*i*层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);  $c$ ——流域土壤总碳储量(g);  $m$ ——计算流域土壤总碳储量所用总土壤层次数。

2.2.2 土壤总碳储量估算结果讨论 据上述估算模型计算得到砖窑沟流域各层土壤总碳储量(表2)。由表2可知,该流域0—200 cm深度内土壤总碳储量为 $1.02 \times 10^{12}$  g。若按国际上通用的0—100 cm深度计算砖窑沟流域土壤总碳储量,则其土壤总碳储量为 $5.27 \times 10^{11}$  g。可见,0—100 cm深度内土壤总碳储量仅占0—200 cm深度土壤总碳储量的51.8%,说明100—200 cm深度以内土壤碳库储量在0—200 cm深总碳库储量中仍占较大比重,若忽略这一深度的土壤碳储量,则不能对全流域土壤碳库作出合理估算。

表2 砖窑沟流域土壤总碳储量

土层深度/cm	0—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—130	130—160	160—200
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.29	1.29	1.30	1.30	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
储量/10 <sup>10</sup> g	5.53	5.34	10.58	10.29	10.71	10.26	15.21	14.89	18.93

表 1 杨家沟年均水量变化定量分析

时段	实测均值	理论均值	综合减沙		降雨影响		人类活动影响	
			增加量/m <sup>3</sup>	比例/%	增加量/m <sup>3</sup>	比例/%	增加量/m <sup>3</sup>	比例/%
I	5711.88	5711.88	—	—	—	—	—	—
II	5946.33	3225.36	234.46	4.10	-2486.51	-43.53	2720.97	47.64
III	5593.00	2928.08	-118.88	-2.08	-2783.80	-48.74	2664.92	46.66
II + III	5769.67	3076.72	57.79	1.01	-2635.16	-46.13	2692.95	47.15

表 2 杨家沟年均沙量变化定量分析

时段	实测均值	理论均值	综合减沙		降雨影响		人类活动影响	
			减少量/t	比例/%	减少量/t	比例/%	减少量/t	比例/%
I	1004.95	1004.95	—	—	—	—	—	—
II	776.33	933.99	228.61	22.75	70.96	7.06	157.65	15.69
III	851.89	906.53	153.06	15.23	98.42	9.79	54.64	5.44
II + III	814.11	923.65	190.84	18.99	81.30	8.09	109.54	10.90

## 5 结论

通过分析, 人类活动因素对杨家沟小流域径流量和输沙量的影响较大, 在治理期间, 受人类活动因素影响而增加的水量占未治理前的 46.13%; 减少的年均输沙量占未治理前的 10.9%。1981 年以来, 流域内的人类活动使年均径流量比治理前有所增加, 年均输沙量比治理前大幅度减少。因此, 加快黄土高原沟壑区水土保持措施对于保水减沙具有明显的效益, 有利于黄土高原生态环境建设和农业可持续发展。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 卢宗凡. 水土保持科学研究的基本思路[J]. 水土保持通报, 1994, 1(1): 7—11.

[2] 高荣乐. 黄土高原地区的水土保持与区域经济发展[J]. 水土保持通报, 1995, 15(5): 1—5.

[3] 高军侠. 黄土高原南部裸露坡耕地产流产沙试验研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 138—140.

[4] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素(三)[J]. 水土保持通报, 1982, 1(4): 25—30.

[5] 王国庆. 黄土丘陵沟壑区小流域水土保持措施的水文效应[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 87—89.

(上接第 19 页)

可见, 国际上惯用的以 0—100 cm 深度作为估算土壤碳库标准, 在研究覆盖巨厚黄土的黄土高原地区土壤碳库时值得商榷。

## 3 结 语

本文运用地统计学方法, 研究了该流域土壤总碳的空间分布特征, 并构建了采用连续土壤碳含量数据分层估算土壤碳储量的模型, 估算了全流域土壤总碳储量。结果表明, 砖窑沟流域土壤总碳含量总体上随着深度增加而减少, 同一深度层内土壤总碳含量沿梁峁顶部→梁峁坡→沟坝地依次减少。在研究黄土高原土壤碳储量时, 是否采用国际上通用的 0—100 cm 深度标准值得进一步探讨。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] Post W M, Tsung-Hung peng, Emanuel W R. The global carbon cycle[J]. American Scientist, 1990, 78: 310—326.

[2] King A W, Emanuel W R, Wullschlegel S D, et al. A

search of the missing carbon sink: a model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. Tellus, 1995, 47B: 501—519.

[3] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. 科技通报, 1999, 15(5): 330—332.

[4] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533—544.

[5] 段争虎, 刘新明, 屈建军. 中国土地沙漠化对大气 CO<sub>2</sub> 含量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(2): 89—94.

[6] 贾宇平, 苏志珠, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 31—34.

[7] 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(2): 166—170.

[8] 侯景儒, 尹镇南, 李维明, 等. 实用地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[9] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[10] 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.