

# 黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究

贾松伟

(河南科技大学 经济与管理学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**通过野外径流小区观测与采样分析,研究了自然降雨条件下坡度对土壤有机碳流失的影响。结果表明:在黄土丘陵区,随着坡度增加( $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ),其侵蚀强度( $A$ )变化趋势为: $A_{20^{\circ}} > A_{30^{\circ}} > A_{15^{\circ}} > A_{10^{\circ}} > A_{25^{\circ}}$ ,表明在  $20^{\circ}$  和  $25^{\circ}$  之间存在着临界坡度;土壤有机碳流失的变化趋势与侵蚀强度一致,可见有机碳流失主要受侵蚀强度的影响。土壤侵蚀造成了泥沙中有机碳的富集,其平均富集比为  $2.27 \sim 3.74$ ,且富集比随着侵蚀强度和坡度增大而减小。土壤有机碳流失程度与降雨特征值  $PI_{30}$  呈幂函数关系。减少地表径流和土壤侵蚀是降低土壤有机碳流失的关键。

**关键词:**土壤侵蚀;土壤有机碳流失;坡度;碳循环

中图分类号:S157;S153.61

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)02-0030-04

## Soil Organic Carbon Loss Under Different Slope Gradients in Loess Hilly Region

JIA Song-wei

(Institute of Economic and Management, He 'nan University of Science and Technology, Luoyang, He 'nan 471003, China)

**Abstract:** Based on field runoff plots observation and sample analysis, the effect of slope gradient on soil organic carbon loss was studied under natural rainfall conditions in loess hilly region. The results showed that with slope gradient increasing (from  $10^{\circ}$  to  $30^{\circ}$ ), the changing trend of soil erosion intensity ( $A$ ) was  $A_{20^{\circ}} > A_{30^{\circ}} > A_{15^{\circ}} > A_{10^{\circ}} > A_{25^{\circ}}$ , suggesting that slope gradient between  $20^{\circ}$  and  $25^{\circ}$  was a critical degree range to exist. Soil organic carbon loss was mainly influenced by soil erosion intensity, appearing the same trend as did soil erosion intensity with increasing slope gradient. Soil erosion results in organic carbon enrichment in sediment. Average enrichment ratios of five runoff plots varied from 2.27 to 3.74, and decreased with increasing erosion intensity and slope gradient. Soil organic carbon loss was a power function with rainfall erosiveness index ( $PI_{30}$ ). The decrease of surface runoff and soil erosion is the key to reduce soil organic carbon loss.

**Key words:** soil erosion; soil organic carbon loss; slope gradient; carbon cycle

土壤有机碳是地球表层系统中最大且最具有活动性的生态系统碳库之一<sup>[1]</sup>。全球土壤有机碳储量为  $1\ 555\ \text{Pg}^{[2]}$ , 大约为大气中碳储量的 2 倍, 且主要分布在上层 1 m 深度以内; 我国陆地生态系统土壤有机碳总量大约为  $92.42\ \text{Pg}^{[3]}$ 。根据 IPCC (国际碳循环计划) 的最新估计, 土壤有机碳损失对全球大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的贡献率为  $30\% \sim 50\%$ <sup>[4]</sup>。损失的土壤有机碳大约 50% 是由于土壤侵蚀造成的<sup>[5]</sup>。Anderson 等<sup>[6]</sup>研究也表明, 在侵蚀严重的坡面上, 土壤有机碳流失达到了 70%。可见土壤侵蚀对陆

地生态系统和大气之间的碳交换有着很大的影响, 对平衡全球大气中  $\text{CO}_2$  浓度具有重大作用<sup>[7]</sup>。

黄土高原特别是黄土丘陵区土壤侵蚀严重, 是黄河泥沙的主要来源区。研究表明: 黄土丘陵区的土壤侵蚀模数平均为  $15\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})^{[8]}$ , 相当于每年流失掉表土  $1.2\ \text{cm}^{[9]}$ 。大量的水土流失导致养分流失, 土壤质量和土地生产力下降, 生态环境恶化。利用野外径流小区观测结果和采样分析, 对不同坡度下的土壤有机碳流失特征进行了研究, 为防止坡地土壤有机碳的流失提供依据。

\* 收稿日期: 2008-10-08

基金项目: 河南科技大学博士启动基金(09001255); 国家自然科学基金(90502007)

作者简介: 贾松伟(1979-), 男, 河南新密市人, 博士, 主要从事土壤侵蚀方面研究。E-mail: jiasongwei@21cn.com

1 采样与分析方法

野外观测试验在中国科学院安塞水土保持综合试验站山地试验场内完成。地理位置为东经 109°19′,北纬 36°51′,属典型梁峁状丘陵沟壑区。其土壤类型为黄绵土。气候属暖温带半干旱气候,多年平均降水量为 497.0 mm。试验选取了 5 个不同坡度的径流小区,坡度分别为 10°、15°、20°、25°、30°,每个小区为 20 m×5 m。小区下方与径流桶相连收集径流、泥沙。

汛期来临前(5 月)采集样品,作为基础土样,每个小区按“S”型线路采集表层 0 - 15 cm 土壤混合样品,风干带回实验室。并于每次产生径流后,测量径流桶中泥水样体积。混匀泥水,采集泥水样过滤,泥沙样低温烘干(45℃烘干 12 h)称重,计算径流中泥沙浓度,烘干的泥沙样品供室内分析用。

土壤和泥沙中有机碳含量采用重铬酸钾外加热氧化法测定<sup>[10]</sup>。降雨量(P)和 30 min 最大降雨强度(I<sub>30</sub>)根据虹吸自记雨量计记录结果算出。

2 试验结果与分析

2.1 不同坡度条件下的土壤侵蚀状况

坡度是影响坡面侵蚀的重要因素之一。在同样降雨条件下,因坡度不一样,形成的坡面流存在差别,土壤侵蚀程度也就不同。表 1 给出了 5 次暴雨的径流量(Q)和侵蚀强度(A),从表中可以看出,2002

2.2 坡度对土壤有机碳流失的影响

土壤有机碳流失导致土地生产力严重下降。在侵蚀条件下,土壤有机碳主要通过两种途径流失,一是土壤有机碳随着土壤流失而流失,另外一个途径是土壤中的可溶性有机碳以溶解质的形式随径流流失。表 2 列出了各小区的土壤有机碳流失程度。从表中可以看出,坡度对土壤有机碳流失程度的影响很明显,从 10°~15°有机碳流失程度增加了 1 倍;从 10°~20°其流失程度增加了 7.27 倍。土壤有机碳流失总量的变化趋势与侵蚀强度变化趋势一致,可见土壤有机碳流失主要受侵蚀强度的影响。

年径流主要发生在 6、7 月份,与每月降雨量分布相吻合(图 1)。

比较不同小区的径流量(表 1),可以发现随着坡度增加(10°~30°),径流量变化趋势为:Q<sub>20°</sub>>Q<sub>30°</sub>>Q<sub>15°</sub>>Q<sub>10°</sub>>Q<sub>25°</sub>,坡度为 20°时是径流量变化的转折点。出现这种现象的原因是,随着坡度增大,降雨与地面作用面积相应减少,导致单位面积小区所接受的降雨量降低,同时各小区的下渗状况也不同。但从每次降雨来看,从 10°~30°,随着降雨次数增加,径流量变化趋势逐渐保持一致。较高的雨强或降雨量都可引起产流量增加。从侵蚀强度看,其变化趋势与径流量保持一致,即:A<sub>20°</sub>>A<sub>30°</sub>>A<sub>15°</sub>>A<sub>10°</sub>>A<sub>25°</sub>。可以看出,除 6 月 21 号和 28 号降雨外,其余几次降雨都是 20°的侵蚀强度比 15°和 25°的侵蚀强度都大。因此,侵蚀强度的临界坡度应该在 20°和 25°之间。靳长兴<sup>[11]</sup>从坡面流的能量理论出发,研究了临界坡度的范围在 24°~29°之间。

图 1 研究区 2002 年月降雨量分布

王百群等<sup>[12]</sup>根据实际观测数据,对土壤养分流失程度与坡度进行了统计回归分析,建立了二者之间的回归模型如式(1)。

式中: N<sub>s</sub>——土壤养分流失强度(kg/km<sup>2</sup>); a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>——回归系数, s——坡度(°)。

据实际观测数据,利用该模型研究土壤有机碳流失程度和坡度之间的关系,并对模型进行验证。由于 20°是侵蚀强度突然下降的转折点,坡度为 25°时土壤有机碳流失程度明显降低,所以采用 20°的 3 个坡度的数据进行模拟比较合理。结果如表 3。

表 2 各小区土壤有机碳流失程度

降雨日期	降雨量/ mm	$I_{30}/$ (mm · min <sup>-1</sup> )	有机碳流失程度/(kg · km <sup>-2</sup> )				
			10 °	15 °	20 °	25 °	30 °
2002-06-21	24.2	0.12	149	71	144	45	99
2002-06-28	19.2	0.45	371	103	171	41	105
2002-07-05	35.9	0.21	247	793	3576	143	253
2002-07-30	12.2	0.82	232	728	3553	619	4321
2002-08-11	22.4	0.37	231	705	1498	232	968
总 量	113.9	1.97	1230	2400	8942	1080	5746

表 3 不同  $I_{30}$  条件下土壤有机碳流失程度与坡度的统计分析结果

$I_{30}/$ (mm · min <sup>-1</sup> )	$a_1$	$b_1$	$r$
0.21	61.485	1.3350	0.9973
0.82	55.073	1.3643	0.9956
0.37	96.090	0.9359	0.9937

从表 3 可以看出,对于 20 的坡度,土壤有机碳流失程度与坡度呈明显的指数函数关系,在不同的  $I_{30}$  条件下,相关系数  $r$  均达到了 0.99 以上。

2.3 有机碳在泥沙中的富集

土壤侵蚀过程中,由于径流的筛选作用,径流中泥沙颗粒要细于土壤颗粒,造成泥沙养分含量一般高于土壤中养分含量,呈现出明显的富集现象。富集比是指泥沙中与土壤中养分含量之比。唐克利等<sup>[13]</sup>通过对河流泥沙中养分与坡耕地养分的对比分析,表明泥沙中有机质、全氮等土壤养分具有明显的富集现象。张兴昌等<sup>[14]</sup>研究了坡度对泥沙中有机质富集比的影响,表明坡度愈小,富集比愈大。

表 4 不同坡度对泥沙中有机碳富集比的影响

小区坡度	侵蚀强度/ (t · km <sup>-2</sup> )	有机碳含量/(g · kg <sup>-1</sup> )		富集比
		土壤	泥沙	
10 °	175.1	2.23	8.34	3.74
15 °	600.1	2.32	7.22	3.11
20 °	2165.0	2.55	6.72	2.64
25 °	256.7	2.58	7.80	3.02
30 °	1846.0	2.32	5.26	2.27

注:泥沙中有机碳含量为多次降雨产流的平均值。

从表 4 中可以看出,泥沙中有机碳含量明显比土壤有机碳含量高,其富集比最小为 2.27,最大达到 3.74;并且,有机碳富集比随着侵蚀强度和坡度的增大均有减小的趋势。这主要是因为侵蚀强度大的时候,土壤中的粗颗粒容易流失,而细颗粒中养分含量一般要高于粗颗粒,这样就导致泥沙中有机碳含量降低,富集比下降。

2.4 降雨侵蚀力对土壤有机碳流失的影响

降雨是土壤侵蚀过程中起主导作用的一个气候因素。降雨对土壤侵蚀的影响决定于降雨侵蚀力。

降雨侵蚀力是降雨量、降雨强度和雨滴动能的函数。自美国学者 W. H. Wischmeier 提出用降雨的雨滴动能  $E$  与 30 min 最大降雨强度  $I_{30}$  的乘积  $EI_{30}$  作为降雨侵蚀力的指标后,已在世界很多国家应用。鉴于  $E$  值取值的困难,在黄土丘陵沟壑区,采用降雨量  $P$  与  $I_{30}$  的乘积  $PI_{30}$  代替  $EI_{30}$ ,也能很好地反映降雨侵蚀特征<sup>[15]</sup>。本文采用降雨量  $P$  与  $I_{30}$  的乘积  $PI_{30}$  来表示降雨特征值。

根据实际观测数据,对降雨特征值  $PI_{30}$  与土壤有机碳流失程度作数学统计分析,表明有机碳流失程度  $L$  与降雨特征值  $PI_{30}$  呈幂函数关系,即

$$L = a(PI_{30})^b \tag{2}$$

式中: $L$ ——土壤有机碳流失强度(kg/km<sup>2</sup>); $a_1$ ,  $b_1$ ——回归系数; $PI_{30}$ ——降雨特征值(mm<sup>2</sup>/min)。

回归参数见表 5。从表中可看出,除 10 和 30 ° 小区相关性没有达到显著相关外,其余小区都达到了显著相关,且 15 ° 小区已经达到了极显著相关。

表 5 不同小区有机碳流失程度与  $PI_{30}$  的统计结果 ( $n=4$ )

坡度	$a$	$b$	$r$
10 °	75.906	0.6190	0.8617
15 °	8.6032	2.0627	0.9712 **
20 °	9.5835	2.6116	0.9514 *
25 °	5.6724	1.8266	0.9284 *
30 °	15.589	1.6856	0.8548

注: \* 表示显著相关, \*\* 表示极显著相关。

3 结 论

黄土高原地区是我国水土流失最为严重的区域。黄河多年平均输沙量达 16.3 亿 t<sup>[16]</sup>。从表 4 可以看出,泥沙中有机碳含量为 5.26 ~ 8.34 g/kg,若按平均值 7.07 g/kg 计算,则每年由黄河输出的有机碳量大约为 1.15 × 10<sup>17</sup> t。若假定泥沙在进入水体的过程中,有 20 % 的碳被释放<sup>[17]</sup>,则每年大约有 2.3 × 10<sup>16</sup> t 碳进入大气中。方华军等<sup>[18]</sup>对黑龙江和吉林两省的黑土中有机碳的流失量也进行了估算,发现黑龙江省和吉林省每年输出碳为 0.3 ~

2.42 Tg和 0.04 ~ 0.42 Tg。可见,土壤侵蚀对土壤有机碳流失以及 CO<sub>2</sub> 释放具有很大的影响,在全球碳循环研究中是不可忽略的一部分。若加强水土保持措施建设,可以降低土壤有机碳的流失。主要结论如下:

(1) 随着坡度增加,其侵蚀强度变化趋势为:  $A_{20^\circ} > A_{30^\circ} > A_{15^\circ} > A_{10^\circ} > A_{25^\circ}$ ,侵蚀强度的临界坡度在 20 和 25 之间。

(2) 土壤有机碳流失的变化趋势与侵蚀强度一致,可见有机碳流失程度主要受侵蚀强度的影响。对于 20 的坡度,土壤有机碳流失程度与坡度呈明显的指数函数关系,相关系数达到了 0.99 以上。

(3) 土壤侵蚀造成了泥沙中有机碳的富集。5 次产生径流的平均富集比为 2.27 ~ 3.74,且富集比随着侵蚀强度和坡度增大而减小。土壤有机碳流失程度与降雨特征值  $PI_{30}$  呈幂函数关系。

#### 参考文献:

- [1] 潘根兴,李恋卿,张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题:兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议[J]. 南京农业大学学报,2002,25(3):100-109.
- [2] Eswaran H, van den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1993,57:192-194.
- [3] 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.
- [4] IPCC report. Climate Change[M]. Working Group 1, Cambridge Univ. Press, U. K. 1995.
- [5] De Jong E, Kachanoski R G. The importance of erosion in the carbon balance of prairie soils[J]. Can. J. Soil Sci., 1988,68:111-119.
- [6] Anderson D W, De Jong E, Verity G E, et al. The effects of cultivation on the organic matter of soils of the Canadian prairies[M]// Trans. XIII Cong. Int. Soc. Soil Sci. Hamburg vol. 7, International Society of Soil Science, Hamburg, 1986:1344-1345.
- [7] Liu S, Bliss N, Sundquist E, Huntington T G. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition[J]. Global Biogeochem. Cycles, 2003,17(2):1074.
- [8] Chen Y Z, Luk S H. Sediment sources and recent changes in the sediment load of Yellow River, China[M]// Rindwanich S. Land Conservation for Future Generations. Ministry of Agriculture, Bangkok, 1989:313-323.
- [9] Messing I, Chen L D, Hessel R. Soil conditions in a small catchment on the Loess Plateau in China[J]. Catena, 2003,54:45-58.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [11] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[J]. 地理学报,1995,50(3):234-239.
- [12] 王百群,刘国彬. 黄土丘陵区地形对坡地土壤养分流失的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(2):18-22.
- [13] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等. 黄土高原水土流失与土壤退化研究初报[J]. 环境科学,1984,5(6):5-9.
- [14] 张兴昌,邵明安. 侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究[J]. 应用生态学报,2001,12(4):541-544.
- [15] 江忠善,贾志伟,刘志. 降雨和地形因素与坡地水土流失关系的研究[M]// 黄土高原小流域综合治理与发展,北京:科学技术文献出版社,1992:300-309.
- [16] 马程远. 从黄河河道迁徙看下游平原地貌的发育[J]. 河南大学学报:自然科学版,1981,1:90-97.
- [17] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. Environment International, 2003,29:437-450.
- [18] 方华军,杨学明,张晓平. 东北黑土有机碳储量及其对大气 CO<sub>2</sub> 的贡献[J]. 水土保持学报,2003,17(3):9-12.