

# 利用<sup>7</sup>Be 研究侵蚀性降雨前后坡面土壤侵蚀空间分布特征

丁晋利<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 张信宝<sup>2,3</sup>, 贺秀斌<sup>2,3</sup>

(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. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国科学院水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 结合野外调查方法, 利用<sup>7</sup>Be 示踪法研究了直形坡侵蚀性降雨发生前后坡面土壤侵蚀空间分布特征。结果表明, 侵蚀性降雨发生前, 在 20 m 坡长范围内, <sup>7</sup>Be 在坡面不同部位分布的差异性不显著; 而全年侵蚀性降雨结束后, <sup>7</sup>Be 在坡面不同部位分布有显著差异。侵蚀性降雨发生后表层土壤中<sup>7</sup>Be 含量及其侵蚀性降雨发生前后表层土壤<sup>7</sup>Be 含量的差值皆随坡长的增加而减少, 表明坡面土壤侵蚀随坡长增加呈增加趋势。坡面不同部位发生剥蚀或沉积过程有较大的差异, 坡面上部距分水岭 0~5 m 坡长范围内主要发生沉积现象; 而在 8~15 m 坡长范围内, 土壤侵蚀以剥蚀过程为主, 且土壤侵蚀最严重。

**关键词:** <sup>7</sup>Be; 侵蚀性降雨; 土壤侵蚀; 空间分布

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)02-0016-04

中图分类号: S157.1; P595

## Application of <sup>7</sup>Be to Study Spatial Distributed Characteristics of Soil Erosion on Hillslopes Before and After Erosive Rainfall Occurrence

DING Jin-li<sup>1,2</sup>, ZHENG Fen-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin-bao<sup>2,3</sup>, HE Xiu-bin<sup>2,3</sup>

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation CAS and MWR, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS and MWR, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

**Abstract:** The spatial distributed characteristics of soil erosion on straight hillslopes before and after erosive rainfall are studied with <sup>7</sup>Be trace method and field investigation. The results showed that within 20 m of slope length, <sup>7</sup>Be inventory at 0~2 cm depth of soil profile in different sloping locations was not significant before occurrence of erosive rainfall, but after occurrence of erosive rainfall in 2004, <sup>7</sup>Be inventory in different sloping locations was great significant. <sup>7</sup>Be inventory at 0~2 cm deep after occurrence of erosive rainfall and difference values of <sup>7</sup>Be inventory before and after erosive rainfall occurrence decreased as slope length increased with 20 m slope length. This indicated that soil erosion increased generally as the increase of slope length. There are great differences in detachment or deposition process at different sloping locations. At 0~5 m slope length of the upper slope, deposition process was dominant; but at 8~15 m of slope length, detachment was dominant, where soil erosion was very severe.

**Key words:** <sup>7</sup>Be; erosive rainfall; soil erosion; the spatial distribution

利用<sup>7</sup>Be 示踪法研究侵蚀性降雨前后坡面土壤侵蚀的空间分布特征对合理进行坡面水土保持规划有重要意义。

在土壤侵蚀研究中, 通常沿用的野外调查法能反映坡面不同部位侵蚀强弱, 但不能反映坡面剥蚀—搬运—沉积过程的空间分布, 且费时费力。常规的径流小区法, 能估算坡面总侵蚀产沙量, 但不能说明坡面

土壤侵蚀的空间分布。<sup>7</sup>Be 是一种天然放射性核素, 半衰期 53.3 d, 主要通过湿沉降到达地表, 在表层土 0—2 cm 分布<sup>[1]</sup>, 这种分布特征决定了它对表层土壤发生运移的敏感性。

本文利用<sup>7</sup>Be 示踪方法并结合野外调查, 研究雨季前后坡面土壤侵蚀空间分布特征, 以为坡面水土保持措施配置提供科学依据。

收稿日期: 2005-02-28

资助项目: 国家自然科学基金西部重大研究计划项目(90302001); 中国科学院知识创新重要方向项目(K2CX3-SW-422)

作者简介: 丁晋利(1978—), 女(汉族), 山西晋城人, 硕士研究生, 研究方向为坡面土壤侵蚀过程与机理。电话:(029) 87011469, E-mail: jin5689@sohu.com。

## 1 试验方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于子午岭林区的富县境内,地貌类型属于黄土覆盖的梁状丘陵,海拔高度 920~1 683 m,相对高差 100~150 m。年平均气温 9℃,年平均降水量 576.7 mm,主要集中在 7—9 月,期间降水量占全年降水量的 70%以上。

### 1.2 材料与方法

选子午岭土壤侵蚀与生态环境观测站布设的 11 号径流小区为研究坡面。11 号径流小区为直形坡,径流小区顶部位于分水岭处。小区水平投影长 20 m,宽 5 m,坡度为 22°,地面为翻耕裸露休闲。该径流小区 1990 年前为林地,林分组成以辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 为主,散生有杜梨 (*Pyrus betulaefolia* Bge.)、山杏 (*Armeniaca sibirica*)、山桃 (*Daridiana*) 等,林下草灌多为虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*)、绣线菊 (*Spiraea* sp.) 和四季青 (*Carex lenceolata*)。1990 年 5 月模拟人为破坏植被过程,将林地开垦裸露休闲。人为破坏植被开垦导致土壤侵蚀加剧,侵蚀模数由林地开垦破坏前的 10 t/(km<sup>2</sup>·a) 增加到 10 000 t/(km<sup>2</sup>·a),其结果使土壤质量严重退化。目前土壤性状与黄绵土类似,土壤干容重 1.10 g/cm<sup>3</sup>。

分别于 2004 年 6 月 23 日(侵蚀性降雨发生前)和 9 月 3 日(侵蚀性降雨结束)在径流小区利用 30 cm ×50 cm 网格法布设采样点,采集表层 0—2 cm 土壤样品;同时在分水岭 5 m<sup>2</sup> 范围内采集表层 0—2 cm 土样,作为测试<sup>7</sup>Be 浓度参考样(背景值)。另外,2004 年 9 月 3 日在分水岭和坡长 5 m 处采集土壤剖面样,分析<sup>7</sup>Be 在坡面不同部位土壤剖面的分布特征。具体采样方法为在 30 cm ×50 cm 的取样网格内,用土铲分别在剖面 0—1,1—2,2—5,5—10,10—20 cm 分层取样。所采集的土壤样品全部风干、研磨、过筛(1 mm)、称重后供测试用。

土壤样品测定在中国科学院北京高能物理研究所进行。仪器采用美国 ORTEC 公司生产的配有 4 096 道分析仪的高纯锗 γ 能谱仪,<sup>7</sup>Be 特征峰能量为 477.6 keV。由于<sup>7</sup>Be 没有标准源,采用从低能段到高能段的 10 种标准源标定,得到仪器的探测效率曲线,根据曲线拟合方程从而得到仪器对<sup>7</sup>Be 的探测效率。由于<sup>7</sup>Be 的半衰期短(53.3 d),每组样品中每个样品<sup>7</sup>Be 的测定日期不同,所以将每组土壤样品中的<sup>7</sup>Be 含量校正到同一时刻土壤中的<sup>7</sup>Be 含量。测定结果为单位土壤重量的<sup>7</sup>Be 含量(Bq/kg),根据土壤干容重,计算<sup>7</sup>Be 的面积浓度。

### 1.3 细沟的测量

2004 年 9 月 3 日,全年侵蚀性降雨结束后,在径流小区 6~8 m 和 13~15 m 坡长范围内分别选取 2 m ×2 m 的样方,测量每条细沟的长、宽、深(表 2)。测量每条细沟时,每隔 0.5 m 测量细沟的宽和深,根据每条细沟宽和细沟深的平均值,采用容积法计算细沟侵蚀量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 侵蚀性降雨特征与侵蚀量

侵蚀性降雨是由侵蚀性降雨底值来描述的,所谓侵蚀性降雨底值是指引起土壤侵蚀的最小降雨强度和在该强度范围内的降雨量<sup>[2]</sup>。研究资料表明侵蚀性降雨底值标准为: $I_{10} = 0.4 \text{ mm/min}$ , $I_{30} = 0.25 \text{ mm/min}$ ,次降雨雨量  $P > 10 \text{ mm}$ <sup>[2]</sup>。根据上述标准从 2004 年 6 月到 9 月,11 号径流小区发生侵蚀性降雨如表 1 所示。总降雨量为 208.1 mm,总侵蚀量为 6 140 t/km<sup>2</sup>。

表 1 2004 年全年侵蚀性降雨特征

时间	雨量/ mm	历时/ min	$I_{10}/$ (mm min <sup>-1</sup> )	$I_{30}/$ (mm min <sup>-1</sup> )	侵蚀量/ (t·km <sup>-2</sup> )
20040706	9.6	21	0.70	0.32	590
20040712	14.1	20	0.71	0.36	3 200
20040715	32.5	584	0.42	0.34	260
20040720	17.2	60	0.63	0.43	1 080
20040721	3.4	16	0.24	0.11	10
20040726	28.9	423	0.53	0.41	930
20040727	16.2	165	0.40	0.35	470
20040803	41.9	195	1.00	0.93	1 140
20040812	33.5	163	0.90	0.90	1 850
20040819	10.8	210	0.18	0.15	10

子午岭土壤侵蚀与生态环境观测站布设的 11 号径流小区细沟侵蚀量为 5 290 t/(km<sup>2</sup>·a),占总侵蚀量的 86%(表 2)。由于该坡面无浅沟侵蚀发生,因此,其片蚀量为 850 t/(km<sup>2</sup>·a),占总侵蚀量的 14%。这与本文作者在黄土丘陵区的研究结果基本一致<sup>[2]</sup>。

### 2.2 <sup>7</sup>Be 沿坡长的分布特征

研究<sup>7</sup>Be 在坡面上的分布特征是利用其示踪表层土壤发生侵蚀沉积的基础。由于<sup>7</sup>Be 是天然产生的放射性核素,主要通过湿沉降到达地表。因此,在发生侵蚀性降雨之前,从理论上讲,<sup>7</sup>Be 在坡面上分布是均一的。由图 1 可以看出<sup>7</sup>Be 在坡面上分布差异不显著,最大值 275 Bq/m<sup>2</sup>,最小值 223 Bq/m<sup>2</sup>,平均值 252.6 Bq/m<sup>2</sup>,变异系数 10%(表 3)。

表 2 细沟侵蚀调查小区概况

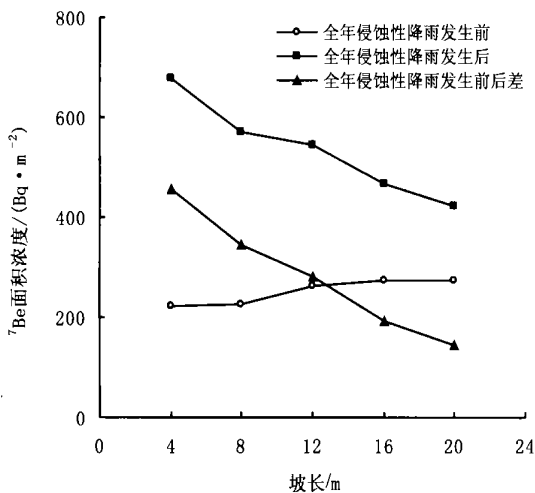
距分水岭 距离/m	条数	平均宽/ cm	平均深/ cm
7	4	6.0	7.0
		7.0	5.0
		7.7	7.0
		4.0	3.5
14	3	9.6	7.5
		8.0	6.0
		5.8	4.0

注:样方长 200 cm

表 3 全年侵蚀性降雨发生前后<sup>7</sup>Be 面积浓度

侵蚀性降雨	最大值/ (Bq·m <sup>-2</sup> )	最小值/ (Bq·m <sup>-2</sup> )	平均/ (Bq·m <sup>-2</sup> )	变异系 数/ %
发生前	275.0	223	252.6	10
发生后	678.6	421	536.7	32

发生侵蚀性降雨后,<sup>7</sup>Be 在坡面上的分布与侵蚀性降雨前相比发生了显著变化(图 1),其变异系数由侵蚀性降雨发生前的 10% 增加降雨发生后的 32%,说明在坡面不同部位<sup>7</sup>Be 含量发生了显著变化。资料分析表明,2004 年全年侵蚀性降雨结束后,坡面<sup>7</sup>Be 含量随坡长的增加而减少(图 1)。

图 1 <sup>7</sup>Be 沿坡长分布特征

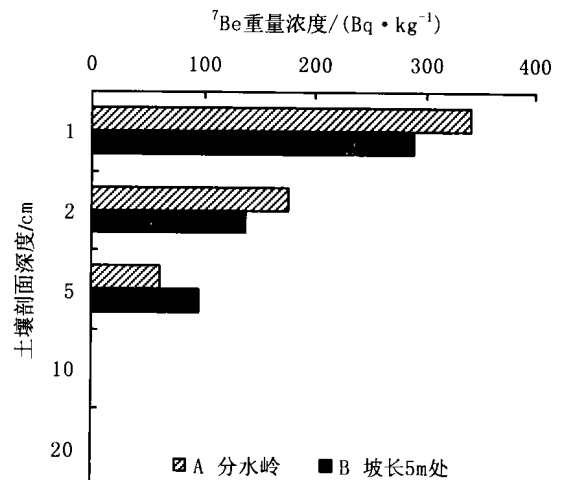
当坡面产流时,坡面上部距离分水岭较近,主要以非均匀薄层水流方式对表层土壤进行分散搬运,侵蚀作用不明显。由于地面凹凸不平对径流的分配和土壤的抗侵蚀力的空间分异,径流在坡面上呈不均匀分布,在坡面上形成径流相对集中的小沟股状水流。随着坡长的增加,小沟股状水流不断汇集,侵蚀搬运能力不断加强。当细沟形成时,坡面径流向细沟集

中,径流冲刷力增强,同时细沟间水流不断地横向溢流到细沟内,使细沟侵蚀不断加强。因此,随着坡长的增加,<sup>7</sup>Be 含量逐渐减少。细沟侵蚀调查结果也表明随坡长的增加,细沟侵蚀不断加强(表 1)。

### 2.3 <sup>7</sup>Be 剖面分布特征

澳大利亚的 Wallbrink P J<sup>[3]</sup>,英国的 Walling D E<sup>[4]</sup>及我国的白占国先生<sup>[1]</sup>研究的<sup>7</sup>Be 剖面分布规律是,<sup>7</sup>Be 主要分布在土壤表层 0—2 cm 的范围内,<sup>7</sup>Be 的质量浓度随土壤深度的增加呈减少趋势。但是由于不同部位土壤发生剥蚀—搬运—沉积过程不同,所以<sup>7</sup>Be 在坡面不同部位土壤剖面分布也有比较大的差异(图 2)。

图 2 表明,在 0—1 cm 和 1—2 cm 深度范围内,坡长 5 m 处 B 点比分水岭 A 点<sup>7</sup>Be 重量浓度较低,说明 E 点表层土壤发生了运移,而在 2—5 cm 深度范围内,B 点比 A 点<sup>7</sup>Be 重量浓度高,这是由于<sup>7</sup>Be 随降雨径流经沿程入渗作用,导致<sup>7</sup>Be 在剖面分布的深度加深。作者在研究雨水中<sup>7</sup>Be 随土壤颗粒和渗透液再分配规律的试验中也证明了这一点。

图 2 <sup>7</sup>Be 在土壤剖面中的分布

### 2.4 坡面土壤侵蚀的空间分布

Walling 模型<sup>[4]</sup>假设侵蚀作用使土壤表层一定厚度的整个薄层土壤损失掉。设  $h$  (kg/m<sup>2</sup>) 为土壤侵蚀的厚度,且  $x = h = R_{Be}$ ,土壤侵蚀速率  $R_{Be}$  (kg/m<sup>2</sup>) 可由下式求得:

$$R_{Be} = h = h_0 \ln \frac{A_{Be,inf}}{A_{Be}}$$

如果采样点的<sup>7</sup>Be 总活度高于基准值,则说明该点发生了净沉积。沉积速率  $R_{Be}$  (kg/m<sup>2</sup>) 的大小与该点<sup>7</sup>Be 活度高于基准值的幅度和沉积土壤的<sup>7</sup>Be 浓度

$C_{Be,d}$  ( $Bq/m^2$ ) 有关。由于本技术适用于短期特定事件导致的土壤再分配作用的示踪,加之衰减作用使得沉积土壤<sup>7</sup>Be 含量的长期变化可以忽略,因此土壤沉积速率  $R_{Be}$  可用下式表示:

$$R_{Be} = (A_{Be} - A_{Be,ref}) / C_{Be,d}$$

式中:  $A_{Be,ref}$  ——土壤<sup>7</sup>Be 基准值;  $A_{Be}$  ——为  $x$  深度以下<sup>7</sup>Be 总活度;  $C_{Be,d}$  ——为沉积土壤<sup>7</sup>Be 浓度。

运用该模型将整个坡面采样点的<sup>7</sup>Be 含量转化为表层土壤的侵蚀或沉积量可以说明坡面土壤侵蚀的空间分布特征。结果表明,坡面上部 0—5 m 以沉积为主;坡面中部 8—15 m 局部区域侵蚀严重;随着坡长的增加,坡面下部土壤侵蚀整体呈加强趋势,但在坡角处发生沉积(图 3)。坡面不同部位土壤侵蚀量最大值为  $5920 t/km^2$ ,最小值为  $80 t/km^2$ ,平均土壤侵蚀量为  $1100 t/km^2$ ,远低于野外测量的总侵蚀量。<sup>7</sup>Be 作为示踪剂可以定量分析土壤侵蚀量,但由于 Walling 模型只适用于历次特定侵蚀事件间隔大约 5 个月以上的条件,并未考虑侵蚀事件的时间分布,因此其计算误差较大。

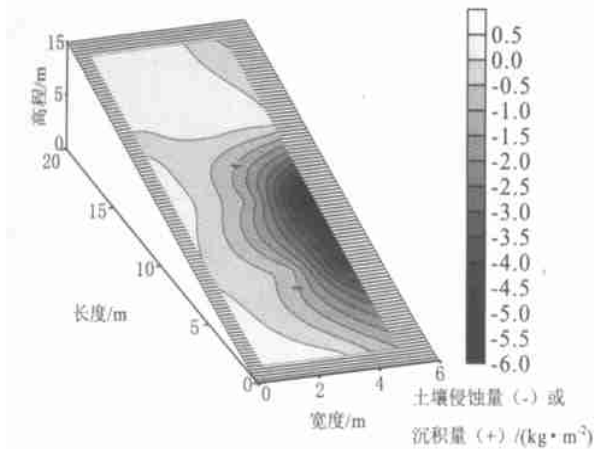


图 3 土壤侵蚀强度空间分布

### 3 结 论

利用<sup>7</sup>Be 示踪方法,并结合野外调查方法,研究了直型坡侵蚀性降雨发生前后坡面土壤侵蚀空间分布特征。

(1) 侵蚀性降雨发生前,<sup>7</sup>Be 在坡面不同部位分布的差异性不显著,变异系数为 10%;侵蚀性降雨结束后,<sup>7</sup>Be 含量在坡面上的分布较侵蚀性降雨发生前有显著变化,变异系数达 32%。侵蚀性降雨结束后,<sup>7</sup>Be 含量随着坡长增加而减少;侵蚀性降雨发生前后<sup>7</sup>Be 含量的差值也随坡长增加而减少。表明侵蚀强度随着坡长增加整体上呈增加趋势;细沟侵蚀调查结果也表明细沟侵蚀强度随坡长的增加而增大。

(2) <sup>7</sup>Be 主要分布在土壤表层 0—2 cm 范围,其质量浓度随土壤深度的增加呈减少趋势。但由于不同部位土壤发生的剥蚀—搬运—沉积过程不同,所以<sup>7</sup>Be 在坡面不同部位土壤剖面中的分布也有差异。坡面上部距离分水岭 0—5 m 范围以沉积为主,侵蚀作用不明显,坡长 8—15 m 范围内侵蚀最为严重。

(3) <sup>7</sup>Be 作为示踪元素可以定量分析土壤侵蚀量。但由于 Walling 模型只适用于历次特定侵蚀事件间隔大约 5 个月以上的条件,并未考虑侵蚀事件的时间分布,因此其计算误差较大。

(4) <sup>7</sup>Be 在全年侵蚀性降雨发生后的面积浓度远高于侵蚀性降雨发生前,充分验证了<sup>7</sup>Be 主要通过降水沉降到达地表。但由于雨水中的少部分<sup>7</sup>Be 随降雨径流沿程入渗作用进行了再分配过程。因此,全年侵蚀性降雨发生前后侵蚀速率或沉积速率是在<sup>7</sup>Be 不断衰变富集的动态平衡中得到的相对特征值,反应了侵蚀或沉积的相对强度。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 白占国,万国江. 宇宙线散落核素<sup>7</sup>Be 在山区表土层中的分布特征及侵蚀示踪原理[J]. 土壤学报,1998,35(2): 266—274.
- [2] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报,2004,14(4):6—11.
- [3] Wallbrink P J, Muruay A S. Distribution and Variability of <sup>7</sup>Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution processes [J]. Water Resources Research, 1996,32:467—476.
- [4] Walling D E, He Q P, Blake W. Use of Be-7 and Cs-137 measurement to document short and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land [J]. Water Resource Res, 1999,35(2):3865—3874.