

文章编号: 1008-2786-(2013)1-71-06

紫色土坡地侵蚀产沙过程的 ^7Be 法初探

史忠林^{1,2}, 文安邦^{1*}, 严冬春¹, 巨莉^{1,2}, 郭进^{1,2}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 利用环境放射性核素示踪技术研究土壤侵蚀是传统土壤侵蚀监测技术的重要补充手段。宇宙成因核素 ^7Be 具有半衰期短和在表土分布浅等特点, 能够用于指示短时间尺度的坡面侵蚀堆积过程。采用 ^7Be 技术与泥沙颗粒分析相结合, 定量判读了模拟降雨下紫色土坡面侵蚀过程演变。结果表明, 对于 20° 坡面, ^7Be 法指示的坡面侵蚀方式转折点与侵蚀泥沙颗粒变化得到的结果基本一致。 ^7Be 在表征侵蚀过程演变时具有独特的优势, 可以将坡面片蚀发育过程随降雨时间的变化明显地识别出来。这对防治坡面侵蚀, 特别是细沟侵蚀的发生具有重要意义。

关键词: 放射性核素; ^7Be ; 紫色土; 侵蚀; 三峡库区

中图分类号: S124+.2

文献标志码: A

坡面侵蚀产沙过程一直是土壤侵蚀研究的热点。20 世纪 40 年代, 土壤侵蚀过程研究经历了从定性描述到定量研究的重大转变^[1]; 到 90 年代, 以 WEPP 为代表的一系列侵蚀过程模型相继问世, 侵蚀过程及机理研究进入一个新阶段^[2]。然而坡面侵蚀产沙是一个受多种因素共同作用的复杂过程, 坡面侵蚀过程演变一直是该领域研究的难点。环境放射性核素示踪技术以其简单、快速、可靠的优势被成功地应用于侵蚀泥沙的定量研究, 极大地弥补了传统土壤侵蚀监测方法的诸多不足, 如监测周期长、代表性差以及耗费财力等^[3]。2002 年, 在国际原子能机构合作研究项目(IAEA CRP D1-50.08)支持下, 来自 16 个国家的 19 位科学家进行了为期 5 a 的探索研究, 先后召开 4 次国际研讨会, 在核示踪技术应用于不同时空尺度的侵蚀产沙研究方面取得了一系列重要成果^[4]。

^7Be 是地球大气中高能宇宙射线轰击氮、氧原子核而生成的放射性核素, 半衰期仅为 53.3 d。 ^7Be 产生后, 很快形成 BeO 或 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 吸附在亚微米尺度的气溶胶颗粒表面, 一方面通过 γ 衰变产生 ^7Li 损失, 另一方面通过连续的干湿沉降到达地表^[5]。散落于地表的 ^7Be 一经与土壤颗粒接触即被其迅速、紧密固定, 其后伴随土壤颗粒的搬运而运移。由于 ^7Be 半衰期很短, 不可能在土壤中长期累存, 因此向下迁移的深度非常有限, 大部分 ^7Be 只分布在表土几毫米范围内^[3]。我们前期在三峡库区的研究表明, 对于平坦、无扰动的紫色土剖面, ^7Be 在 2 mm 的最表层含量最高, 1.5 cm 深度以下比活度低于探测限^[6]。 ^7Be 的这一特点使其成为研究短期降雨侵蚀和坡面泥沙来源以及侵蚀产沙过程的重要工具。1988 年, Burch 等初步提出可以利用 ^{137}Cs 和 ^7Be 在土壤中渗透深度的差异研究坡面泥沙来源, 并以此

收稿日期(Received date): 2012-07-01; 改回日期(Accepted): 2012-11-20。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划项目课题(No. 2011BAD31B03), 中国科学院西部行动计划项目(No. KZCX2-XB3-09)。

[National Key Technology R & D Program (No. 2011BAD31B03) and Action-Plan Program for Western Development of CAS (No. KZCX2-XB3-09).]

作者简介(Biography): 史忠林(1984-), 男, 山西柳林人, 博士, 主要从事土壤侵蚀研究。[Shi Zhonglin (1984-), male, born in Liulin, Shanxi Province, Ph D, mainly engaged in soil erosion research.] E-mail: zhonglinshi@sina.com

* 通讯作者(Author for correspondence): 文安邦(1964-), 男, 重庆忠县人, 研究员, 从事土壤侵蚀与水土保持研究。[Wen Anbang (1964-), male, born in Zhongxian, Chongqing Municipality, professor, mainly engaged in soil and water conservation research.] E-mail: wangbang@imde.ac.cn

推断侵蚀过程^[7]。此后,Wallbrink 和 Murray 通过¹³⁷Cs、⁷Be 与²¹⁰Pb_{ex}联合示踪研究了坡面片蚀向细沟侵蚀的转变过程,进一步证实了⁷Be 可以用于指示浅层表土来源^[8]。2001 年,Whiting 等提出了基于片蚀和细沟侵蚀过程中泥沙和多核素质量平衡的 SIRSEM (Simultaneous Interpretation of Rill - and Sheet - Erosion Mechanisms) 模型,定量区分了单次暴雨引起的片蚀和细沟侵蚀量^[9],但该模型相对复杂,应用不多。此项研究在国内开展较少,杨明义等根据¹³⁷Cs 和⁷Be 土壤剖面分布差异,将片蚀和细沟侵蚀随时间的演变过程定量区分开来^[10]。

前人将⁷Be 法用于坡面泥沙来源或侵蚀过程演变的研究多采用与其他核素复合示踪的方法。本文以人工模拟降雨为手段,采用⁷Be 单核素示踪技术与泥沙颗粒分析相结合的方法,对比降雨过程中产流产沙变化,定量判读坡面不同侵蚀方式动态演变过程,以期对紫色土坡面侵蚀研究及其防治提供一定依据。

1 材料与方 法

1.1 降雨试验与样品采集

试验在三峡库区忠县水土流失与面源污染观测站(108°10'25" E, 30°24'53" N) 人工模拟降雨试验场进行。研究区位于四川盆地东部平行岭谷区,侏罗系中统沙溪庙组(J₂s)砂岩、粉砂岩和泥岩广泛出露,浅丘地貌,呈西北高东南低地势。受亚热带季风影响,区内气候温和,年均气温 19.2 °C,无霜期 320 d 左右,年降水量 1 150 mm^[11]。土壤为中性紫色土^[12],容重 1.37 g/cm³,颗粒组成为砂粒占 52.24%、粉粒占 29.62%、粘粒占 18.14%。试验用径流小区长 8 m,宽 2 m,坡度分别为 15°和 20°,底部布设有径流泥沙收集口。2011-01-13,将小区表层 20 cm 左右深度土壤翻松,土块打碎,平整坡面后用简易围栏围护,以确保无人或动物踩踏、扰动。

为保证大气沉降⁷Be 在试验之前的小区坡面上均匀分布^[13],小区土壤在接收⁷Be 天然沉降 5 个月于 2011-06-24—25 开展模拟降雨试验。降雨设备为中国科学院水土保持研究所研制的侧喷式降雨器。试验时,水流从降雨器的喷头中喷出,通过碎流板分散成雨滴,当喷头安装达到一定高度时即可获得雨滴下落时所需要的终点速度,从而保证雨滴

对地面的打击能量。为获得试验所需雨强和降雨面积,本试验采用两组共 4 个喷头对喷。喷头距地面高度为 6 m,喷出的水流沿抛物线爬高 1.5 m,水滴下落高度达到 7.5 m,这一高度获得的雨滴终速基本接近于天然降雨的雨滴终速。

降雨开始前对降雨均匀度和雨强进行率定。用塑料雨布覆盖小区坡面,将直径 15 cm,高 25 cm 的雨量筒沿小区两边等间距放置,测定单位时间降雨量。本研究两个试验小区雨强、降雨均匀度及降雨前期土壤含水量见表 1。降雨试验开始后观测并记录坡面开始产流时间,用体积为 6 L 的采样桶连续收集水沙样品,并用秒表记录每次样品采集所需时间。采集的样品全部带回实验室。

表 1 试验雨强、降雨均匀度和土壤含水率

Table 1 Rainfall intensity and uniformity and water content of soil

试验小区	雨强/(mm/h)	降雨均匀度/%	土壤含水率/%
15°小区	50	71.4	35.2
20°小区	50	66.9	26.3

1.2 样品处理与测试

⁷Be 衰变较快需尽快测试。为加快泥沙沉淀,往收集的样品中加入少许明矾,快速搅拌后静置 12 h 以上进行水沙分离,测定径流体积,泥沙样品烘干称重。烘干后的泥沙样品在研磨、过筛后送交四川省疾病预防控制中心测试⁷Be 含量。测试采用美国 ORTEC 公司生产的 n 型高纯锗探头(LOAX HPGe)低能量、低本底多道 γ 能谱仪,在 477.6 keV 能谱峰下测定⁷Be 比活度,测定时间 8 × 10⁴ s 以上,用全峰面积法(TPA)求算⁷Be 比活度,测定结果校正至采样日。谱仪稳定性好,测试过程中无道漂,测试误差为 ± 5 % (95 % 信度)。

泥沙样品在过筛后,取少量用蒸馏水浸泡 12 h,加入 0.5 N 草酸钠溶液 5 mL,摇匀。用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定颗粒组成。测试时加入样品量以遮光度为 10% ~ 20% 为宜,超声波分散 1 min,结果取平均值。颗粒级配划分采用中国制土壤质地分类标准,即粘粒(< 0.002 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)和砂粒(0.05 ~ 1 mm)。

传统的描述颗粒物理性质的方法是利用不同粒径的颗粒含量占总颗粒的百分比,该方法比较繁琐。土壤是一种由不同粒径和形状的颗粒及孔隙构成的

系统,具有分形特征。分形理论在土壤学中的应用主要集中在描述土壤物理特征、建立土壤物理过程模型和定量分析土壤空间变异性等三个方面^[14]。分形理论的应用实现了用单个参数来定量表征土壤颗粒组成,这个参数即分维数。本研究中分维数的计算采用王国梁等的方法^[15]。三维空间的土壤颗粒体积分维模型可表示为

$$V(r > R) = C_V [1 - (\frac{R}{\lambda_V})]^{3-D} \quad (1)$$

式中 V 为颗粒体积, r 为测定的尺度, R 为某一特定粒径, C_V 和 λ_V 为描述形状和尺度的常量, D 为分形维数。

土壤颗粒的总体积可表示为

$$V_T = V(r > 0) = C_V [1 - (\frac{0}{\lambda_V})]^{3-D} = C_V \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得到

$$\frac{V(r > R)}{V_T} = 1 - (\frac{R}{\lambda_V})^{3-D} \quad (3)$$

对常量 λ_V 的估计只需取土壤粒径分级中最大的粒径值(用 R_L 表示)。当 $R = R_L$ 时, $V(r > R) = 0$, 因此 $\frac{V(r > R)}{V_T} = 0$ 。此时 λ_V 在数值上等于 R_L 。将 $r > R$ 的形式转化为 $r < R$, 得到

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = (\frac{R}{\lambda_V})^{3-D} \quad (4)$$

选择每一粒径分级区间上下限的算术平均值作为该区间的代表粒径;作各区间代表粒径的累计体积图,并将之转化为对数形式;根据对数图可得到拟合直线,该直线的斜率即为 $3 - D$,从而可求得分形维数 D 值。

2 结果与讨论

2.1 坡面产流产沙变化

降雨过程中不同坡度坡面产流速率随时间的变化如图1(a)所示, 15° 坡面产流时间先于 20° 坡面,这可能是由于 15° 坡面土壤前期含水率高于 20° 坡面(表1)。坡面产流速率在降雨初期迅速增加,随着降雨历时的延长,增速变缓。

图1(b)为降雨过程中径流含沙率随降雨历时的变化趋势。可以看出,降雨初期径流含沙率较低,这显然是由于在地面径流形成的初期处于较为分散均匀的流动状态,这一时期径流流速缓慢,挟沙力较小所致;随着降雨过程的发展,坡面水流进一步集中,流量不断增加,流速及其冲力显著增加,导致径流含沙率迅速增加;当径流含沙率达到一定值时不再继续增加,而是呈现不同程度的波动,尤其以 20° 坡面最为明显,这可能是由于在这一降雨强度下,坡面可起动泥沙已全部起动,泥沙来源得不到进一步补给。现场观测发现,降雨后坡面出现不同程度的跌坎,但跌坎尚未完全贯通,因此降雨并未引起明显的细沟侵蚀。

2.2 侵蚀过程中泥沙颗粒组成变化

不同坡度小区侵蚀泥沙的体积分维数与泥沙中粘粒、粉粒和砂粒体积百分含量之间的关系如图2所示。可以看出,侵蚀过程中不同坡度小区泥沙颗粒体积分维数与粘粒和粉粒含量均呈正相关,而与砂粒含量呈负相关。这表明泥沙粒径越粗,体积分维数越小,侵蚀过程中泥沙颗粒体积分维数的变化能

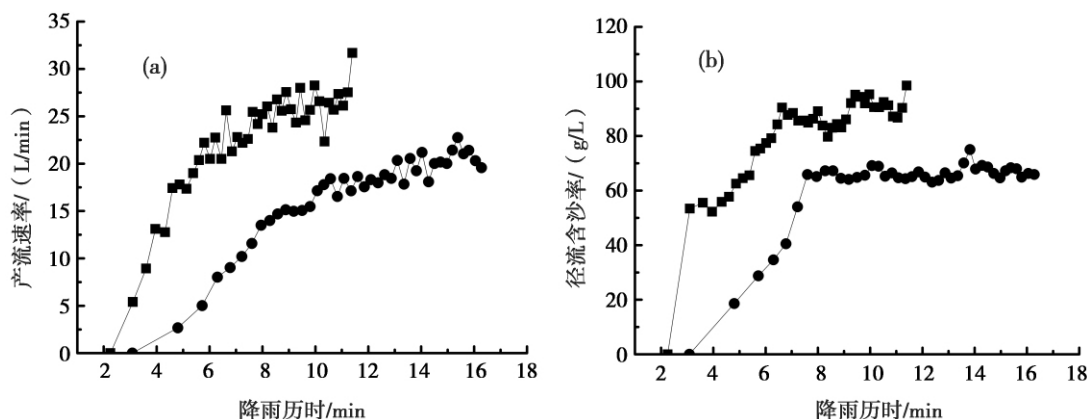


图1 降雨过程中产流速率(a)与径流含沙率(b)变化(■— 15° 小区; ●— 20° 小区)

Fig. 1 Variation of runoff yield rate and sediment concentration during the simulated rainfall (■— 15° plot; ●— 20° plot)

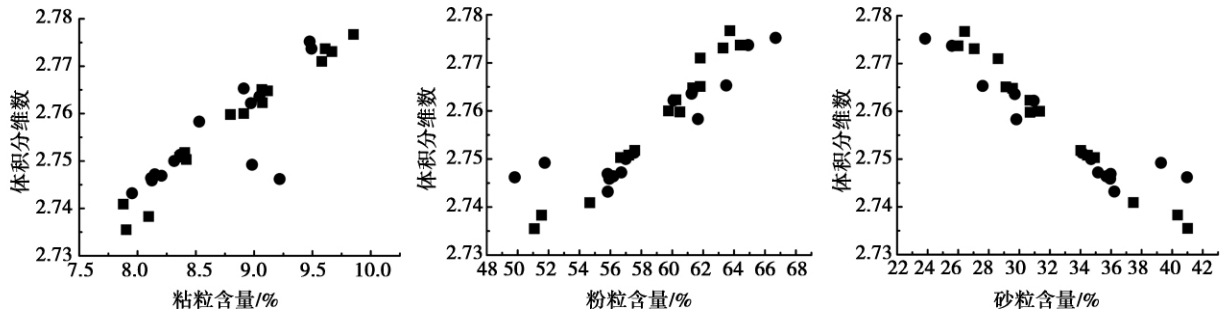


图2 不同粒级泥沙颗粒体积百分含量与分维数的关系(■—15°小区;●—20°小区)

Fig. 2 Relationship between volume percentage content of different grain size and volume fractal dimension of sediment particles

(■—15° plot; ●—20° plot)

够简单明了地反映泥沙颗粒组成的变化。

从泥沙颗粒组成变化(图3)分析,随降雨历时的增加,15°小区泥沙颗粒体积分维数波动较大,但总体上减小。对于20°小区,降雨初期泥沙颗粒体积分维数减小明显,其后随降雨历时增加在7 min后开始出现波动。从体积分维数的物理意义可知,分维数越小,颗粒组成越粗。本研究降雨初期坡面侵蚀以片蚀为主,径流侵蚀力小,径流携带的泥沙中细颗粒含量较多,因此颗粒体积分维数较大;随着降雨过程的持续,跌坎开始出现并逐渐发育,侵蚀方式不再由片蚀主导,此时径流不断汇集,侵蚀力增大,泥沙中粗颗粒逐渐增多,致使体积分维数减小并呈现波动。

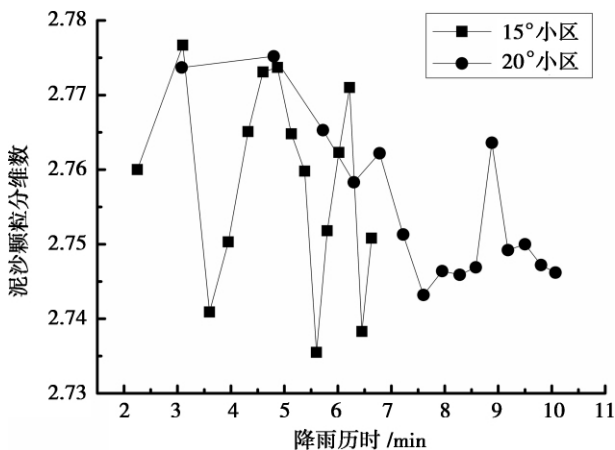


图3 降雨过程泥沙颗粒体积分维数变化

Fig. 3 Variation of volume fractal dimension of sediment particles during the rainfall event

2.3 侵蚀过程⁷Be示踪识别

从侵蚀泥沙中⁷Be含量变化(图4)可以看出,降雨初期不同坡度小区泥沙中⁷Be含量迅速减小;

随着降雨历时的增加,泥沙中⁷Be含量出现波动。这是由土壤中⁷Be深度分布特征决定的。降雨初期坡面径流呈分散状态,侵蚀力弱,此时的坡面侵蚀方式以片蚀为主,泥沙主要来源于最表层土壤,⁷Be含量最高;随着降雨过程的发展,富含⁷Be的表层土壤被逐渐侵蚀,导致泥沙中⁷Be含量迅速减小;受降雨侵蚀和坡面微地貌共同作用,坡面中下段开始出现跌坎,此时侵蚀方式不再由片蚀占主导地位,因此泥沙中⁷Be含量出现一定程度的波动,这一变化以20°坡面较为明显。

以20°坡面泥沙中⁷Be比活度变化(图4)为例,从降雨第7 min开始泥沙⁷Be含量出现波动,表明此时跌坎发育,片蚀不再是坡面侵蚀的主要形式,这与前人在黄土高原的研究结果相似^[16-17]。尽管由于不同研究中设计雨强、坡度、土壤和降雨历时等条件不同,侵蚀方式转变的时间各异;从泥沙颗粒体积分维数变化(图3)看,几乎从同一时刻(第7 min)开始,颗粒分维数呈现波动,⁷Be示踪的结果与之吻合。

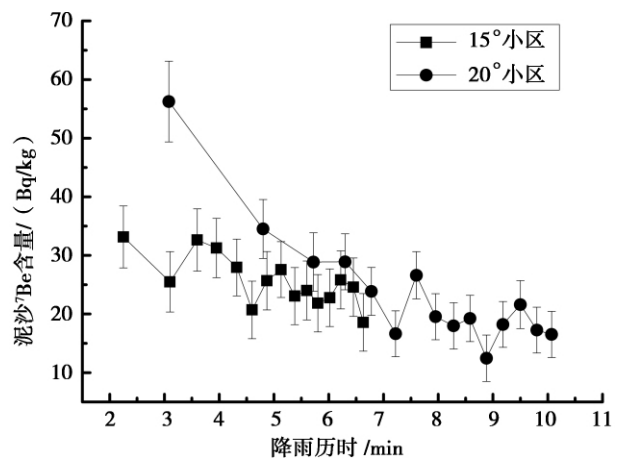


图4 降雨过程中泥沙⁷Be含量变化

Fig. 4 Variation of ⁷Be concentration in sediment during the rainfall event

试验中 15° 坡面处理并未像 20° 坡面一样出现明显的转折点(波动), 我们认为主要原因有二: 其一, 该试验坡度较缓, 在设计雨强 (50 mm/h) 下坡面侵蚀方式的转变缓慢; 其二, ^7Be 半衰期较短, 采样后需尽快测试, 受测试条件所限, 降雨持续时间稍短, 因此未获得更多的测试数据。然而总体上看, 15° 坡面泥沙颗粒体积分维数(图3)和泥沙 ^7Be 含量(图4)均随降雨历时的增加而减小, 这一趋势与 20° 坡面转折点出现之前的变化一致, 但较 20° 坡面减小的速率慢。

3 结论

放射性核素 ^7Be 在土壤剖面中分布较浅, 且随深度增加呈指数减少, 对坡面侵蚀方式的变化非常敏感。通过模拟降雨试验, 以 ^7Be 单核素示踪为主要手段, 结合侵蚀过程中泥沙颗粒变化, 定量判读紫色土坡面不同侵蚀方式的动态演变过程。结果表明, 对于 20° 坡面处理, ^7Be 指示的坡面侵蚀方式转折点与侵蚀泥沙颗粒变化得到的结果基本一致。 ^7Be 在表征侵蚀过程演变时具有独特的优势, 可以将坡面片蚀发育过程随降雨时间的变化明显地识别出来。这对防治坡面侵蚀, 特别是细沟侵蚀的发生具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] Zheng Fenli, Gao Xuetian. Research progresses in hillslope soil erosion processes [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(2): 230–235 [郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[J]. *地理科学*, 2003, 23(2): 230–235]
- [2] Zheng Fenli, Yang Qinke, Wang Zhanli. Water Erosion Prediction Model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 13–24 [郑粉莉, 杨勤科, 王占礼. 水蚀预报模型研究[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 13–24]
- [3] Mabit L, Benmansour M, Walling D E. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be for assessing soil erosion and sedimentation [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99: 1799–1807
- [4] IAEA. Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality [C]// IAEA – TECDOC – 1665, 2011
- [5] Kaste J M, Norton S A, Hess C T. Environmental chemistry of Beryllium – 7, Beryllium: mineralogy, petrology and geochemistry [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2002, 50: 271–289
- [6] Shi Zhonglin, Wen Anbang, Yan Dongchun, et al. Depth distribution and seasonal variability of ^7Be in purple soils at Three Gorges Reservoir region [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(6): 674–679 [史忠林, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区紫色土 ^7Be 剖面分布及季节变化[J]. *山地学报*, 2010, 28(6): 674–679]
- [7] Burch G J, Barnes C J, Moore I D, et al. Detection and prediction of sediment sources in catchments: Use of ^7Be and ^{137}Cs [G]//Hydrology and Water Resources Symposium. Institute of Engineers Australia National Conference Publication, 1988, 88: 146–151
- [8] Wallbrink P J, Murray A S. Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes [J]. *Hydrological Processes*, 1993, 7: 297–304
- [9] Whiting P J, Bonniwell E C, Matisoff G. Depth and areal extent of sheet and rill erosion based on radionuclides in soils and suspended sediment [J]. *Geology*, 2001, 29: 1131–1134
- [10] Yang M Y, Walling D E, Tian J L, et al. Partitioning the contribution of sheet and rill erosion using beryllium – 7 and cesium – 137 [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1579–1590
- [11] Li Hao, Zhang Xinbao, Wen Anbang, et al. Erosion rates of purple soil on a cultivated slope in the Three Gorges Reservoir region using ^{137}Cs technique [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5): 1–6 [李豪, 张信宝, 文安邦, 等. 三峡库区紫色土坡耕地土壤侵蚀的 ^{137}Cs 示踪研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 1–6]
- [12] He Yurong, et al. Purple soils in China (2) [M]. Beijing: Science Press, 2003: 1–406 [何毓蓉, 等. 中国紫色土(下篇)[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1–406]
- [13] Schuller P, Iroumé A, Walling D E, et al. Use of beryllium – 7 to document soil redistribution following forest harvest operations [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35: 1756–1763
- [14] Perfect E, Kay B D. Application of fractal in soil and tillage research: A review [J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 36: 1–20
- [15] Wang Guoliang, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545–550 [王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 545–550]
- [16] Yang Mingyi, Liu Puling, Tian Junliang. Soil erosion processes on cultivated slope on Loess Plateau using ^7Be tracer [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 28–30, 104 [杨明义, 刘普灵, 田均良. 黄土高原农耕地坡面侵蚀过程的 ^7Be 示踪试验研究[J]. *水土保持学报*, 17(3): 28–30, 104]
- [17] Liu Gang, Yang Mingyi, Liu Puling, et al. Interrill and rill erosion tracing on cultivated slopes using ^7Be during individual rainfall event [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 47–53 [刘刚, 杨明义, 刘普灵, 等. ^7Be 示踪坡耕地次降雨细沟与细沟间侵蚀[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 47–53]

Indicating Erosion and Sediment Yielding Processes on Purple Soil Slopes Using ^7Be Measurements

SHI Zhonglin^{1,2}, WEN Anbang¹, YAN Dongchun¹, JU Li^{1,2}, GUO Jin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Fallout radionuclides tracing techniques have been proven to be an important complementally means to conventional soil erosion monitoring methods. Due to its short half-time and shallow distribution in soil profile, the cosmogenic radionuclide ^7Be serves as a useful tool for indicating short-term erosion and sedimentation processes. Based on the combined use of ^7Be measurements and sediment grain size analysis, this paper investigated the erosion and sediment yielding processes using simulated rainfall experiments undertaken on purple soil slopes. The results shown that the turning point of erosion forms estimated from ^7Be measurements was similar to that of the sediment grain size analysis, especially for 20° slope. ^7Be approach has unique advantages when indicating the development of erosion processes and the sheet erosion can be clearly identified. This information has great significance in soil erosion prevention, especially rill erosion.

Key words: radionuclide; ^7Be ; purple soil; erosion; Three Gorges Reservoir region

《山地学报》获“2012 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

2012 年 12 月 26 日,《中国学术期刊影响因子年报(2012 版)》、《中国学术期刊国际引证报告(2012 版)》发布会在北京国家会议中心举行。会上发布了中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国科技文献计量评价研究中心和清华大学图书馆首次对中国(大陆)正式出版的 5 000 余种学术期刊在 2011 年度影响力进行的评估,评出“2012 中国最具国际影响力学术期刊”209 种,“2012 中国国际影响力优秀学术期刊”209 种。《山地学报》获得“2012 中国国际影响力优秀学术期刊”证书。

《山地学报》编辑部