

坡面土壤侵蚀垂直分布定量分析研究

武春龙 刘普灵 郑世清 吴普特 周佩华

(中国科学院 水土保持研究所 陕西杨陵 712100)
(水利部)

摘要 通过野外侵蚀小区实验,进一步证明了稀土元素示踪法^[1]在土壤侵蚀垂直分布研究中的可应用性。在一个侵蚀小区上,实验揭示出产沙强度随坡长存在三种变化模式,增长型,增长—递减型和波动型,其形成机理可能与径流过程有关。利用稀土元素在坡面的再分布,初步建立了估算坡面沟蚀率的关系式。稀土元素点穴施放法尚存在问题,有待深入研究。

关键词 土壤侵蚀垂直分布 稀土元素示踪法 沟蚀率估算

Study on Vertical Distribution of Soil Erosion on Loess Slope

Wu Chunlong Liu Puling ZhengShiqing Wu Pute Zhou Peihua

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Resources Yangling Shaanxi 712100)

Abstract Vertical variability is a basic component of soil erosion on loess slope. Experiments of field erosion plot were conducted and further support the availability of rare earth elements (REE) tracer method to study the vertical distribution of soil erosion. Experiments on a erosion plot have firstly revealed that vertical distribution pattern of sediment yield have three types that are continued-increasing type, increase-decreasing type and wave type. We have primarily constructed method estimating ratio of rill erosion according to redistribution of REE on loess slope.

Key words vertical distribution of soil erosion tracer method of rare earth elements estimation of rill erosion ratio

土壤侵蚀沿垂直方向的发展变化非常复杂,它主要决定于地面径流的形成与汇集,土体被破坏剥蚀、泥沙输移与沉积等复杂过程,并受降雨、地形、土质等多种因素的影响。由于黄土高原侵蚀垂直分布特性直接关系到水土保持综合治理的决策和方针制定,引起众多科学家的关注。早在50年代,朱显谟等^[1,2]从土壤侵蚀发生演变的观点,对土壤侵蚀垂直分布给予了概念性的开创研究,此后承继成、陈永宗、赵诚信^[3]根据侵蚀类型及其形态特征进行了土壤侵蚀垂直分带性研究,与此同时,黄委各水保站等单位,根据不同坡长径流小区的产沙量来分析坡长、

降雨等因素对土壤侵蚀的影响。由于问题的复杂性并涉及较多的影响因素,至今仍存在认识上的分歧。我们的研究工作主要是充分利用 REE 示踪法的优越性,同时利用多种 REE 示踪,全面观测分析次暴雨坡面各坡段的产沙情况、沉积情况以及细沟侵蚀的形态变化等,为进一步深入分析土壤侵蚀垂直分布规律探索新径。

1 野外径流小区设计及观测项目

为了进一步验证稀土元素施放方法的有效性,扩大研究坡面的空间尺度,1992 年春季我们在中国科学院水土保持研究所安塞水土保持综合试验站建立了两个径流小区,裸地梁峁坡全坡长径流小区和林地径流小区。小区基本情况见表 1。

表 1 径流侵蚀小区基本情况

小区类型	坡长(m) (水平投影)	坡宽 (m)	坡向	坡型	平均 坡度	地貌 部位	土壤	植被
全坡长 小区	100	5	东	直	28°	沟间地	耕地黄 绵土	裸地
林地 小区	20	5	西	直	15°	沟间地	林地黄 绵土	18 年人工刺槐 林覆盖度 95%

全坡长小区的布设目的是用于研究整个梁峁坡的土壤侵蚀变化及泥沙在坡面的输移和沉积过程模式,并进一步验证 REE 条带施放法的精度。林地径流小区用于研究对比条带施放法点穴法的精度以及 REE 施放后可能对植物生态系统和水资源环境的影响。全坡长小区长(水平投影)100m,宽 5m,坡向东,位于冲沟沟头上的沟间地地貌部位,基本上为直型坡,仅小区顶部 0~20m 范围内坡度为 20°,基余坡段坡度变化于 27~30°之间,土壤为黄绵土,由于修建小区时个别坡段有人为扰动作用,可以认为全坡长小区土壤为扰动耕作黄绵土。土壤中有有机质贫乏,纯“黄土性”显著,成壤作用微弱,其干容重约为 1.1g/cm³,土壤疏松抗冲性差。室内人工模拟降雨试验研究表明,在坡面的某一坡段内下方约 2/3 处的土壤侵蚀强度,可代表此坡段的平均土壤侵蚀强度。把全坡长小区在斜面方向上分为 6 个坡段,最上两个坡段斜坡长分别为 23m 和 20m。其它 4 个坡段斜坡长皆为 17.5m,因此 6 个坡段 REE 的施放位置分别在斜坡长的 16m,37m,54.5m,72m,89.5 和 107m 处,根据条带法示踪元素施放浓度计算公式,经过对比分析和计算确定了各带施放元素的种类和浓度(图 1)。全坡长小区自上而下 REE 施放的种类分别为 La、Ce、Nd、Sm、Eu 和 Dy。La 的施放宽度为 0.24m,深度为 20cm,Ce 的施放宽度为 0.2m,施放

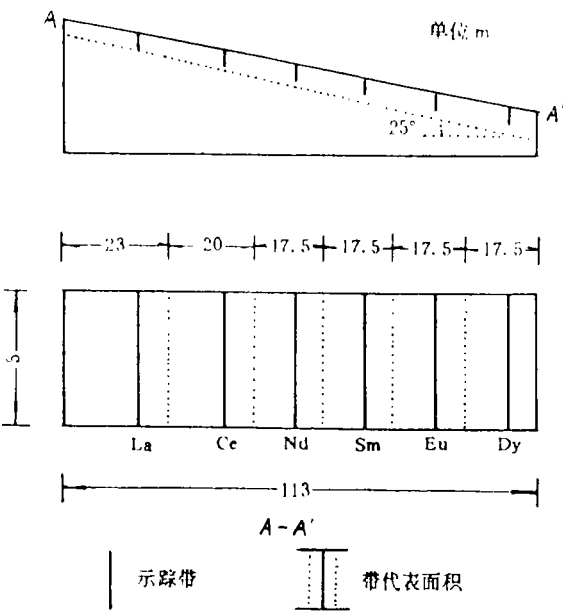


图 1 全坡长小区 REE 布设示意图

La 的施放宽度为 0.24m,深度为 20cm,Ce 的施放宽度为 0.2m,施放

深度为 0.3m,其余 REE 施放宽度均为 0.2m,深度均为 0.3m。

林地径流侵蚀小区选择在 70 年代人工种植的郁闭度良好的刺槐林内,植被覆盖度为 0.95。林下枯枝落叶层保育完好,无人为铲草皮清扫枯枝落叶层的现象,有时可见农民挖草药,产生轻微的土壤侵蚀现象。枯枝落叶层平均厚度为 5cm 左右,林下生长着密布的旱生草类植物,建群种为铁杆蒿,长茅草和达乌里胡枝子。枯枝落叶层下、成壤作用轻微,有微弱的腐殖质化过程,比耕种黄绵土有机质含量略高,0~10cm 表层土壤呈灰黑色。林地径流小区坡长(水平投影)20m,宽 5m,坡向西,坡度为 15°,直型坡,位于冲沟沟侧上的沟间地地貌部位。REE 布设方法采用条带法和点穴法,本实验小区的主要目的是对比检查条带法和点穴法的精度,以便能使点穴法在更大尺度空间(如浅沟集水区,切沟集水区等)的土壤侵蚀空间变异研究中得以推广应用。林地径流小区 REE 布设种类及其位置见图 2。

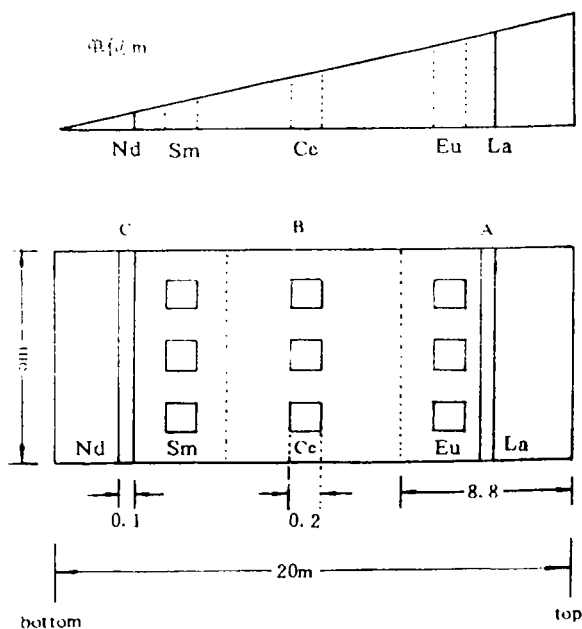


图 2 林地小区 REE 布设示意图

两个野外径流小区在 1993~1995 年正式运行观测,主要观测了降雨状况、径流量和产沙量,坡面表层土壤沉积情况,坡面细沟侵蚀分布测量等项目。降雨测量采用雨量筒(有一般雨量筒和自记雨量筒)。沿全坡长小区纵断面共布置 6 个雨量筒,记录测量了每次降雨沿坡面的分布情况。每次暴雨的产沙量和产流量用集流池全部收集,可通过测量计算得知。每次降雨结束后,泥沙沉积在集流池底部,放掉上层清水并取水样,用以评价施放 REE 后对水资源环境的影响,清水放完后对集流池中的淤泥沙均匀布设 20 个采样点,每个采样点的面积为 50cm²,20 个采样点总面积为 0.1m²,占池面积的 1%,取出每个采样点的泥沙样,风干称重,装袋编号,送回实验室测量稀土元素含量。

为了研究全坡长小区内各坡段内被径流剥离后在坡面的输移和沉积模式,每次降雨径流侵蚀后,在每个 REE 施放条带的上方和下方各 5m 处(第一条带上方 5m 除外),分别用环刀采集坡面表层土样,分析土样的 REE 含量,全坡长小区每次降雨后采 11 个土样。测量细沟的方法是沿斜坡方向每隔 1m,用钢卷尺测量小区横断面方向上细沟条数及其深度和宽度。根据室外测量数据可绘出细沟平面分布图,计算细沟侵蚀强度沿坡面的变化趋势。

2 土壤侵蚀垂直分带性定量分析

1993~1995 年 3 年观测全坡长径流侵蚀小区共有产沙 15 次,林地径流侵蚀小区仅一次。土壤侵蚀垂直分带各坡段相对土壤侵蚀量的计算采用下列公式给以评价^[4]:

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{C_i} K_i \quad (1)$$

式中: C_i ——第 i 带稀土元素的施放浓度; R_i ——第 i 带稀土元素在泥沙池中的浓度; K_i ——第 i 带代表面积与条带面积之比; n ——全坡长划分的坡段。

理论上讲 $\delta = 1$ 。全坡长小区 3 年 15 次降雨侵蚀计算精度见表 2。

表 2 全坡长小区土壤侵蚀垂直分布计算精度

降雨时间	1993. 7. 10	1993. 7. 26	1993. 7. 29	1993. 7. 31	1993. 8. 3	1994. 7. 2	1994. 7. 7	1994. 7. 19
计算精度	0. 956	0. 755	0. 986	1. 141	0. 956	0. 957	0. 582	0. 412
降雨时间	1994. 8. 3	1994. 8. 5	1994. 8. 10	1994. 8. 31	1995. 6. 1	1995. 7. 14	1995. 8. 5	
计算精度	0. 542	0. 578	0. 990	0. 362	0. 518	0. 742	0. 589	

由上表可知全坡长小区建造后第一年土壤侵蚀垂直分布计算精度达到 75% 以上,但相对第二年和第三年的计算精度比较差为 50% 左右,为什么土壤侵蚀垂直分布的计算精度随时间变化而递减呢? 对此问题我们初步认为可能与施放条带的 REE 浓度变化,或有可能与坡面细沟侵蚀的不均匀发育有关,或由于各条带施放元素间的再沉积的影响,这样我们就有必要重新评估上式中各坡段相对侵蚀量的计算方法,对其机理有待深入研究。全坡长小区开始几场暴雨侵蚀的计算精度比较好,我们认为其计算结果仍能说明沿坡长土壤侵蚀的变化趋势,对研究土壤侵蚀垂直分布确能提供重要的数据。

根据各条带的 REE 施放浓度和集流池中淤泥的 REE 含量,可分别计算出各 REE 施放条带所代表的坡段的产沙量占全坡长小区总沙量的相对比例。我们选择了 6 次观测精度较高的暴雨侵蚀,分别计算各坡段的相对侵蚀量(见表 3)。

表 3 野外全坡长小区各坡段的相对侵蚀量

坡段 (m)	相对侵蚀量(%)					
	1993. 7. 10	1993. 7. 26	1993. 7. 29	1993. 7. 31	1993. 8. 3	1994. 8. 10
0~20	5. 09	9. 02	5. 09	9. 32	4. 47	2. 99
20~38	14. 58	14. 66	14. 58	6. 30	38. 44	11. 10
38~54	8. 64	7. 69	8. 64	4. 91	8. 64	22. 56
54~69	8. 52	6. 56	8. 62	3. 42	8. 62	17. 37
69~85	39. 65	16. 25	39. 65	21. 39	39. 65	32. 25
85~100	22. 06	21. 33	22. 06	68. 73	22. 06	12. 78
总和	98. 65	75. 50	98. 06	114. 07	98. 60	99. 0

表 4 全坡长小区各坡段产沙强度(kg/m²)

水平坡段(m)	坡度	1993. 7. 10	1993. 7. 26	1993. 7. 29	1993. 7. 31	1993. 8. 3	1994. 8. 10
0~20	20°	1. 51	1. 91	0. 18	0. 46	2. 09	0. 14
20~38	28°	4. 99	3. 59	0. 59	0. 35	20. 62	0. 61
38~54	31°	2. 37	2. 14	0. 49	0. 32	2. 39	1. 41
54~69	29°	3. 33	1. 83	0. 40	0. 22	6. 40	1. 09
69~85	29°	15. 49	4. 50	1. 83	1. 37	15. 93	2. 02
85~100	29°	8. 62	5. 94	1. 02	4. 41	15. 55	0. 80

由上表可知独立计算的各段相对侵蚀量之和变化于 75. 50%~114. 7% 之间,其最大误差为 25%,且相对侵蚀量变化趋势和幅度每次降雨情况下不尽相同,由于各坡段水平投影的差异,为了比较它们的侵蚀强度变化,我们分别计算各坡段的产沙强度(kg/m²),产沙强度定义为,每次降雨单位水平面积内的产沙量,表 4 和图 3 可说明产沙强度随坡长的变化模式。

分析得知产沙强度随坡长变化可能存在三种模式,这三种模式前人已在小区研究中都已

提出并有观测数据证明。第一种模式为增长型,随着坡长增大,产沙强度持续增强,如 1993 年 7 月 31 日降雨基本上显示了这种趋势。第 2 种模式为增长递减型,随着坡长增大,开始产沙强度增大,其后出现递减趋势,如 1994 年 8 月 10 日和 1993 年 7 月 29 日降雨出现了这种趋势。第三种模式为波动型,存在两次增长和两次减小过程,如 1993 年 7 月 10 日和 1993 年 8 月 3 日的暴雨侵蚀表现了这种变化趋势。为了分析产沙强度随坡长变化的原因,如表 5 列出了全坡长小区的侵蚀动力条件。

我们认为随着次暴雨径流深的增大,土壤侵蚀表现出明显的复杂性,当次暴雨径流深小于 3mm 时,产沙强度垂直分布模式为增长型和增长递减型;当次暴雨径流深大于 3mm 时,产沙强度垂直分布模

式为波动型,波动型的形成机理可能与水流挟沙的自动调整有关。无论对于不同坡段,只要次暴雨径流深度大,其产沙强度就高,这与以前的小区观测资料分析结果一致。由于本次试验观测资料数量有限,使我们不能分析不同降雨条件,不同坡度和土壤及土地利用变化下,土壤侵蚀垂直分布的表现形式,这有待于以后工作的深入。

表 5 全坡长小区侵蚀及其动力条件

降雨时间	降雨量(mm)	径流深(mm)	径流系数	产沙量(kg)	侵蚀模数(t/km ²)
1993.7.10	27.4	10.28	0.375	3025	6050
1993.7.26	10.8	3.74	0.346	2154	4308
1993.7.29	4.3	0.93	0.216	358	716
1993.7.31	6.5	0.5	0.077	497	994
1993.8.3	80.7	9.05	0.112	4745	9490
1994.8.10	39.5	1.53	0.039	486	972

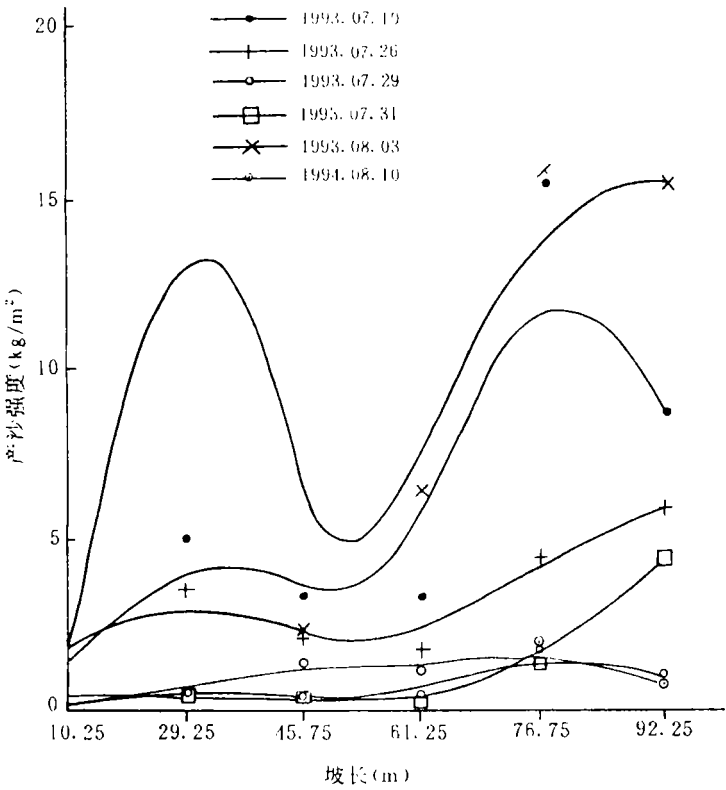


图 3 产沙强度与坡长的关系

3 REE 条带施放法和点穴法的精度

林地小区设计的目的是对比 REE 条带施放法和点穴法的精度。林地小区 3 年观测仅产流一次,时间为 1993 年 7 月 10 日的降雨。计算得知第一条带(La)的产沙量贡献率为 0.3%,第

二条带(Nd)的产沙量贡献率为0.6%。林地径流侵蚀小区下部侵蚀量大于上部。两条施放条带占林地小区的面积各为0.5%,两条施放条带面积之和占总面积的1%,而两条施放条带的计算侵蚀量贡献率之和为0.9%。因此,可以认为林地小区条带施放法具有良好的精度。根据点穴法计算的产沙量贡献皆为零,因此对于点穴法在大尺度土壤侵蚀变异研究的应用,应该进一步确定其实施途径。

对比林地小区和裸地全坡长小区可知,林地有明显的保持水土功能。全坡长小区产流15次,林地小区仅一次。1993年全坡长径流小区侵蚀模数为21558t/km²,而林地小区土壤侵蚀轻微,几乎为零。

4 利用REE的沉积浓度估算细沟侵蚀率

全坡长小区布设后共观测了3年,利用第一年资料可以估算坡面不同坡段的相对土壤侵蚀量,且精度较好。第二年资料在估算坡段相对土壤侵蚀量时精度较低,分析其原因主要可能是坡面沉积了REE所引起的。因此有必要对全部数据作进一步的分析研究,坡面上沉积主要发生在细沟间侵蚀部位,在细沟中观测的沉积量几乎为零。细沟间侵蚀部位沉积的形成机制主要与雨滴击溅和泥沙在输移过程中径流入渗关系的调整有关。由于坡面沉积主要在细沟间部位,因此可用其上的REE作为细沟间侵蚀的示踪物质,细沟侵蚀量可由条带施放的稀土元素来推算。

全坡长小区共分6个坡段,设自上到下第*i*个坡段的沟蚀率(沟蚀量占总侵蚀量的比率)为 α_i ;第*i*个坡段坡面第*j*种REE沉

$j=1$,REE为La; $j=2$,REE为Ce

$j=3$,REE为Nd; $j=4$,REE为Sm

$j=5$,REE为Eu; $j=6$,REE为Dy

设第*i*个坡段相对土壤侵蚀量为 X_i ,径流池中泥沙的REE浓度为 C_j ($j=1,2,3,\dots,6$)第*i*坡段第*j*种REE的施放浓度为 R_{ij}

事实上,当 $i=j$ 时 $R_{ij} > 0$

当 $i \neq j$ 时 $R_{ij} = 0$

根据质量守恒原理得:

$$\sum_{i=1}^6 [R_{ij} \cdot \alpha_i \cdot X_i + \alpha_{ij}(1 - \alpha_i)X_i] = C_j, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^6 X_i = 1 \quad (2)$$

又设6个坡段上沟蚀率相等,即:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \alpha \quad (3)$$

则式(1)变为:

$$\sum_{i=1}^6 [R_{ij} \cdot \alpha \cdot X_i + \alpha_{ij}(1 - \alpha)X_i] = C_j, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

上式中 R_{ij} , α_j , C_j 为已知实测REE浓度。

采用试错法,对于一个 α ,可解出一组 X_i ($i=1-6$)。最后,可找出一个 α ,满足方程(2),我们初步认为可用 α 代表整个坡面的沟蚀率。

根据上面的基本原理,我们试算了1994年5场降雨侵蚀,结果见表6。

表 6 次暴雨坡面沟蚀率推算结果

降雨时间 (年、月、日)	沟蚀率	$\sum x_i$	降雨量 (mm)	侵蚀量 (kg)
1994. 7. 7	0. 55	0. 9980	24	412. 7
1994. 7. 19	0. 30	1. 0083	10. 7	249. 4
1994. 8. 3	0. 40	1. 0507	8. 5	158. 1
1994. 8. 5	0. 7	1. 0874	20. 1	557. 7
1994. 8. 10	0. 95	1. 0627	39. 5	485. 6

由计算结果可知,不同降雨条件下沟蚀率不同,随着降雨量的增加,沟蚀率在增大,土壤侵蚀在增强。

因此在土壤侵蚀垂直分布研究中 REE 示踪法不仅能推算不同坡段的相对侵蚀量,同时还能推算细沟侵蚀率。但利用 REE 示踪法计算沟蚀率在方法上和结论上还需要进一步研究。

5 结 论

(1) 利用稀土元素条带施放法,根据元素平衡原理,可定量分析黄土坡面不同坡段的相对土壤侵蚀量,并具有较好的精度,但稀土元素施放后,随着降雨次数的增加,各坡段的相对侵蚀量的计算精度在递减,研究认为可能与坡面沉积过程对所施稀土元素的再分布有关。

(2) 黄土坡面随坡长的增大,产沙强度可能存在三种模式,增长型、增长—递减型和波动型,其形成机理与径流强度有关。

(3) 稀土元素条带施放法和点穴法对比实验表明,条带施放法优于点穴法。因此,点穴法在大尺度泥沙来源研究中的应用,还需深入研究,以寻求其最佳的实施途径。

(4) 利用坡面稀土元素的再分布过程可定量计算全坡面的沟蚀率。计算结果表明次降雨的沟蚀率变化较大,初步认为随着降雨量的增大,沟蚀过程在增强。

参考文献

1 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类. 土壤学报, 1956, 4(2), 99~115
2 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷地的地貌类型. 地理学报, 1956, 22(3), 201~222
3 承继成, 赵诚信, 陈永宗. 陕北黄土区坡地分带性及泥沙来源分区. 1963
4 田均良, 周佩华, 刘普灵等. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报. 水土保持学报, 1992, 6(4), 23~27