

黄土高原土壤侵蚀与稀土元素示踪研究*

周佩华 田均良 刘普灵 郑世清

吴普特 武春龙 李雅琦

(中国科学院 水土保持研究所 陕西杨陵 712100)
水利部

摘要 提出了一种研究土壤侵蚀的新方法——稀土元素示踪法。该法通过多种稀土元素示踪,可以观测任一给定坡段次暴雨的侵蚀量和沉积量,因而在土壤侵蚀垂直分布定量分析、特殊地形部位的土壤侵蚀以及小流域泥沙来源等研究领域有广阔应用前景。

关键词 稀土元素 示踪法 土壤侵蚀分布 沉积

Studies of Soil Erosion and REE Tracer Method on the Loess Plateau*

Zhou Peihua, Tian Junliang, Liu Puling, Zheng Shiqing

Wu Pute, Wu Chunlong, Li Yaqi

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

Abstract REE tracer method, as a new method for studies of soil erosion, has been proposed and adopted in this study. Because of multi-REE tracers employed, the erosion and sedimentation amount of any definite slope section can be observed conveniently in each rainfall. Therefore, the REE tracer method has a broad applied future for scientists to study the vertical distribution quantitative analysis of soil erosion, the soil erosion of specific topographic parts as well as the sources of sediment in a small watershed.

Key words rare earth element tracer method soil erosion distribution sediment

稀土元素(Rare Earth Elements)简称REE,有La、Ce、Nd、Sm、Eu、Yb、Lu、Dy等10余种,这些元素因具有在土壤中含量甚微、植物富集有限、对生态环境无危害、难溶于水、能够被土壤颗粒强烈吸附等特点,且中子活化对其检测灵敏度高($\mu\text{g}/\text{kg} \sim \text{mg}/\text{kg}$),为较理想的示踪元素。稀土元素示踪法的基本原理,是将不同的稀土元素分别与土壤均匀混合后,布设在需要观测的各地形部位,使其在整个土壤侵蚀过程中随泥沙一起运移,通过采样分析泥沙样品中示踪元素的浓度,便可计算出不同部位的相对侵蚀量。目前,黄土高原还有一些土壤侵蚀的关键问题尚

① 收稿日期:1996-09-10 * 本研究属中国科学院“八五”重点项目。

未得出明确结论,在这种情况下,稀土元素示踪法的提出,对研究黄土高原复杂的土壤侵蚀问题具有重要科学意义。

1 黄土高原土壤侵蚀的特点

黄土高原的土壤侵蚀情况非常复杂,在同一地区,各种不同的侵蚀类型同时出现,交错分布。从分水岭到沟谷底,土壤侵蚀的类型和强度都有明显差异。这主要是由于黄土高原特殊的侵蚀环境所决定的。

黄土高原的地貌特点是沟深坡陡、地形破碎。土地类型更是复杂多样,仅根据微地貌的不同,就可将土地划分为峁、圪、塬、塬、圪塬、湾……等^[1]。各种地块的形状和坡形极不规则。黄土的渗透性好,一般的小雨不会产生地表径流,因而黄土高原的年径流深并不大,坡面径流则更小。根据各水土保持站径流小区观测资料,年平均径流深一般不超过 30mm,个别大雨可达 50mm。这有限的径流为什么能引起如此严重的土壤侵蚀呢?其原因是在地形破碎的情况下,这些径流不可能沿坡面均匀下泄,而是汇集成侵蚀力较强的股流顺坡而下,加之黄土的抗冲性弱,在径流流过的局部地方引起强烈土壤侵蚀。所以,不同的土地类型、径流流动情况、土壤侵蚀类型和强度都不相同。当地群众把径流流动情况不同的土地很形象地概括为“走水地”、“过水地”、“滚水地”等。总的来说,黄土高原的土壤侵蚀非常严重,但不同地形部位土壤侵蚀的类型和强度却有显著差异,这是黄土高原土壤侵蚀的主要特点之一。山西省水土保持所研究结果:在同样降雨情况下,梁坡 6 年平均年冲刷量为峁顶的 7.52 倍;邻近沟边地为梁坡地 5.20 倍,为峁顶的 39.20 倍^[2]。在一般情况下,径流的作用强度从分水岭向下沿坡长逐渐增强。但在不同降雨情况下,径流的汇集变化不完全相同。在沟谷坡情况更加复杂,除径流引起的侵蚀之外,往往还诱发重力侵蚀。

在地形相对完整的条件下,以径流小区观测的土壤侵蚀结果精度最高^[3]。在黄土高原,径流小区仍然是一种研究土壤侵蚀的重要手段而被广泛应用。多年来各水土保持站积累了许多宝贵资料,在说明黄土高原土壤侵蚀基本情况、在论证降雨、坡度、植被、耕作等因素对土壤侵蚀影响等方面,起了非常重要的作用。但由于黄土高原地形复杂,特别是黄土丘陵区径流小区的应用还有一定局限性。一般在径流小区下方修集流池,小区两侧和上方修界墙,以防小区之外的径流进入小区,但同时也把小区上方的来水来沙拦在小区之外,所以,径流小区观测的结果偏小,实际上只代表分水岭附近坡面比较平整的“走水地”的土壤侵蚀量,很难观测到“过水地”和“滚水地”的土壤侵蚀情况。

早在 1966 年,蒋德麒先生等利用各水土保持站径流小区和小流域实测成果研究小流域泥沙来源时,就已经发现径流小区的局限性问题。他们的具体作法是根据径流小区观测结果和典型调查资料,初步订出各种土地类型泥沙来源单项指标,乘以各相应土地类型的面积,求得各土地类型的产沙量,然后按全流域产沙总量进行平衡计算。结果各小流域由径流小区观测指标所计算的产沙总量与沟口实测输沙量不符,丘陵区的小流域为绥德韭园沟、离石王家沟、天水吕二沟等一般比沟口实测值小 30%~40%;在黄土塬区,由于塬面相对平整,并且坡长一般都比径流小区的 20m 长,经常有淤积发生,所以径流小区的观测结果偏大,如西峰南小河沟由径流小区观测指标所计算的产沙总量较沟口实测值约大 10%^[4]。

针对上述问题,各水土保持站又先后增设了坡面自然集流区径流小区、浅沟侵蚀径流小区、不同坡长径流小区……等。径流小区的面积扩大了,并且包括了各种地块,有所前进。但所观测

的只是径流小区的平均侵蚀量,而对小区内不同部位土壤侵蚀的差异仍然无法测出。所以对不同地形部位的土壤侵蚀仍然停留在定性描述阶段。

黄土高原土壤侵蚀垂直分布定量分析一直是重大技术难点。特别是不同地形部位的侵蚀量,至今尚无理想的观测方法。既要维持不同地形部位坡面径流情况不变,又要观测不同地形部位土壤侵蚀量的差异,确实是一个难题。

1963年,山西省水土保持研究所在土壤侵蚀垂直分布定量研究中,跨出了重要的一步。他们把全沟坡划分为峁顶、梁峁坡上部、梁峁坡下部和沟坡,并布设了一组不同坡长的径流小区。除半沟坡小区外,其余4个径流小区的上端都布设在梁峁顶部分分水岭,如图1。坡长最短的是峁顶小区,为40m;最长的是全沟坡小区,185m。除峁顶的侵蚀量可直接由坡长最短的径流小区观测外,其余坡段的侵蚀量由两个不同坡长小区的侵蚀量相减经过面积修正而得。此法成功之处在于巧妙地解决了上方来水来沙对土壤侵蚀影响的观测问题,能比较真实地观测出各坡段的平均侵蚀量,其不足之处是只粗略地将全沟划分为4个坡段(可能是由于工作量太大,不容细分),并且两个不同坡长小区由于修建和土壤性质微域分异的影响,短坡长小区的侵蚀模数与长坡长小区上部的侵蚀模数不可能完全相同,影响推算精度。

1980年以来,中国科学院水利部水土保持研究所曾用大比例尺(1/200)地面立体摄影测量法,监测不同地形部位土壤侵蚀演变过程,并推算各地形部位的侵蚀量^[5]。此法对陡坡地的浅沟侵蚀、切沟侵蚀以及重力侵蚀等的形态变化过程监测,在当前来说还不失为一种较好的方法,所推算的侵蚀量也有较高精度。但对坡面侵蚀量的推算则精度较差,并且工作量大,不可能在每次暴雨后都进行照像测量,只能观测年平均侵蚀量。

本世纪80年代后期,张信宝等开始利用核爆沉降物¹³⁷Cs示踪法研究小流域泥沙来源^[6],并取得初步成效。该法简单易行,根据土壤¹³⁷Cs含量的分异情况,即可推求该地区土壤侵蚀和沉积分布情况,并且可以在固定地点定期采样分析,监测土壤侵蚀和沉积的动态变化过程,但这种方法适用于大时间尺度的侵蚀量宏观估算。另外,该法采用表层土壤含量比较法,使其测量精度及应用范围均受到多种因子限制而仍有不足之处。如黄土高原大多数地区习惯于轮荒轮种,土地利用情况经常变化,给土壤侵蚀量的测算带来许多困难。在黄土高原广为分布的陡坡和沟坡侵蚀严重地段,含¹³⁷Cs土层多已被冲光等,都限制了该法的应用。

2 土壤侵蚀 REE 示踪法研究

1989年,美国 Knaus, R. M. 等人利用 REE 示踪和中子活化分析技术,成功地测定了沼泽地的沉积速率^[7]。我们借鉴 Knaus 等人的研究方法,在国内首次把 REE 示踪法用于黄土高原土壤侵蚀垂直分布和小流域泥沙来源研究,并初步获得成功。由于黄土高原土壤侵蚀情况非常复杂,为了满足研究工作的需要,我们在 Knaus 工作的基础上,增加了示踪元素种类和施放部位,开拓了研究内容。5年来,开展了以下几方面的研究工作:

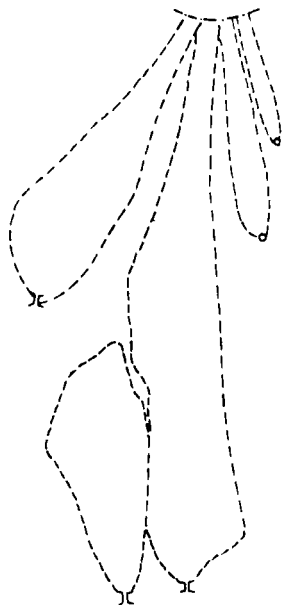


图1 综合径流场布设示意图

2.1 REE 示踪法操作技术研究

目前,有关 REE 示踪法操作技术方面的参考资料很少,在研究工作中,我们充分发挥每个课题组成员的专长,探索前进。逐步总结出一套 REE 示踪的具体操作方法,并提出一些计算公式,其中大部分是国内首次提出。室内外试验研究证明,这些操作方法和公式正确可行,有推广应用价值。

2.1.1 示踪元素选择 从分析精度、实验成本和推广应用前景等方面综合考虑,所选用的 REE 应具有土壤背景值低,实验时施加量少,并且容易识别和探测,根据上述标准,首批选用 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Dy、Yb 等 7 种 REE 示踪元素。

2.1.2 REE 施加量的计算方法 包括两方面的内容:

(1)对被研究的区域划分为不同类型区,每个类型区布设一种 REE 示踪元素,这是示踪研究的关键步骤。各类型区主要根据土地类型和侵蚀特征来划分,类型区的划分是否正确,直接关系到不同地形部位侵蚀量的观测问题。在划分类型区时应注意在满足试验要求的前提下,尽量减少分区数,以减少试验投资;另外要使各类型区的侵蚀量尽量接近,因为我们是根据分析泥沙总量中各类型区所施放 REE 的含量来确定各类型区的相对侵蚀量。如某类型区的侵蚀量在泥沙总量中所占比重很小,要准确检测该类型区所施放 REE 的含量,必须加大该种 REE 的施放浓度,势必增加试验成本。

(2)REE 施加量的计算方法和公式。首先确定各类型区最大可能的侵蚀深度(简称侵蚀深度),根据侵蚀深度确定施放 REE 土层之厚度,该值应稍大于侵蚀深度并尽量与之接近。过大将造成浪费;如果小于侵蚀深度则影响试验精度。最大可能的侵蚀深度主要根据已有的试验和调查资料,按经验确定。施放 REE 土层厚度确定后,根据所需要的施放浓度计算 REE 施放量。为了保证测量值在统计学上的显著性,泥沙中示踪元素含量应与其土壤背景值差异显著,综合考虑上述因素,提出 REE 示踪元素施放浓度估算公式^[8]:

$$C_j = \frac{KB_j 10^{-3}}{y_i} (\text{g/kg}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: n —— 划分类型区数; C_j —— 第 j 类型区 REE 施放浓度; B_j —— 第 j 种 REE 的土壤背景值; y_i —— 第 i 类型区相对侵蚀量最小期望值; K —— 考虑其他因素的综合保证系数。

2.1.3 REE 的施放方法 提出了段面法、条带法、点状法三种施放法,对比分析了三种施放方法的优缺点和适用范围。段面法是将 REE 和被示踪土体全部均匀混合后,按所确定施放 REE 土层厚度,施放于所代表类型区的表面。该法精度高,但工作量大,适用于室内模拟试验。条带法的原理是假设在每一类型区总能找出一条有限宽度的带,其土壤侵蚀强度等于或接近该类型区的平均侵蚀强度,将 REE 均匀布设于此条带即可。该法工作量较小,试验精度较高,可行性强,适于野外试验。点状法的原理和条带法一样,如能找到能代表该类型区平均侵蚀强度的点,即可把 REE 布设于该点,可大大减少工作量,但点的位置较难选定,该法的试验精度较差。

为使 REE 能和土壤颗粒均匀紧密结合,示踪载体必须风干后过筛。REE 与示踪载体的混合采用稀释法,逐步稀释逼近施放浓度。

2.1.4 中子活化分析方法及质量控制 将所采泥沙样风干磨碎,过 100 目筛,然后称取 50~100mg 封装在约 1cm×1cm 的铝箔小袋内,供 INAA 分析使用。为了保证分析精度,在每

批分析样品中均加入国际通用的标准参考物质(SRMS)作为质控样品,并提出了样品处理、封装、辐照与计数、分析质量控制等具体操作程序。

2.1.5 提出了根据侵蚀泥沙中各种REE浓度计算相应类型区相对侵蚀率的公式

$$R_j = \frac{\text{侵蚀泥沙中第 } j \text{ 种REE 的浓度}}{\text{该元素的施放浓度}} \quad (2)$$

式中: R_j ——第 j 个类型区相对侵蚀率。

2.2 模拟降雨试验

利用模拟降雨能严格控制降雨特性以及试验周期短的优点,首先进行了模拟降雨试验,以便进一步验证REE示踪法测定土壤侵蚀量的可行性及其精度,并为野外试验布设及实施提供技术依据。

2.2.1 径流小区模拟试验 试验在中国科学院水土保持研究所模拟降雨实验室进行。小区长6.5m,宽2m。为了研究小区内不同部位的相对侵蚀量,沿小区坡长自上而下等份划分为A、B、C三段,用段面法布设Eu、Sm、Ce三种REE(每段一种)。在试验过程中,当产生径流以后,每隔3~5min取一浑水径流样,用以测定各种REE含量。通过对径流泥沙样品中REE含量的分析结果,可以计算出各坡段不同时间的相对侵蚀量,如图2。由图2可知,REE示踪法可精确测定各坡段相对侵蚀量及其变化趋势。试验结果表明,REE示踪法有较高精度。试验误差可用式(3)计算。

$$\sigma = \frac{\sum_{j=1}^n W_j}{W} - 1 \quad (3)$$

式中: n ——类型区数; W_j ——第 j 种类型区计算侵蚀量; W ——试区总侵蚀量观测值。

在室内共进行三次模拟降雨试验。其 σ 值分别为0.6%,6.5%,14.0%。

为了探索REE示踪法在野外土壤侵蚀研究中的应用途径,简化REE施放方法,在小区的三个坡段又分别布设了3个20cm宽的横向条带,依次布设了Yb、Nd、La三种REE。每个条带布设于相应坡段的几何中部。试验结果表明,用条带法所观测的侵蚀量偏小, σ 值为-19.06%。其原因是坡段中部的侵蚀强度小于该坡段的平均侵蚀强度。如果条带布设位置合理,将有满意的试验精度。因该法简便易行,能有效降低试验成本,因而具有更大实用价值可望用于野外土壤侵蚀示踪研究工作。

2.2.2 坡面与沟坡连续体模拟试验 为了探索沟坡施放稀土元素的方法问题,并分析坡面来水对沟坡侵蚀的影响,在水土保持研究所试验场作沟与坡的模拟试验。共修建两个宽0.5m水平投影长3m的小区,小区上半部(水平投影长1.5m)坡度为20°,代表坡面;下半部(水平投影长1.5m)坡度为50°,代表沟坡,小区下方各修集流池1个。沟与坡均用条带与点状

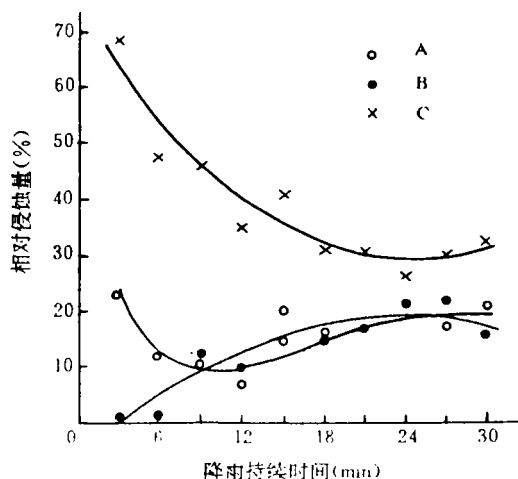


图2 坡面不同部位相对侵蚀量变化趋势

两种方法施放 REE,如图 3。点的直径约 5cm,用土钻打孔,然后填入一定浓度的 REE。试验结果表明,用土钻打孔施放 REE 的方法适用于沟坡或陡坡地,点状法虽然操作简单,但观测结果仅代表点所在位置的侵蚀量,用它来代表陡坡某一面积的平均侵蚀量则可靠性较差。

2.3 野外土壤侵蚀垂直分布定量分析研究

1992 年春,在安塞生态站建立了水平投影长 100m(斜坡长 113m)的全坡长径流小区,小区宽 5m,坡度约 27°。将小区顺坡长划分为 6 个坡段,自上而下用条带法布设 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Dy 6 种 REE(每坡段布设一种 REE)。条带位于相应坡段的中间偏下部位(该坡段长的 2/3 处)。在小区下方修建集流池,收集径流泥沙,4 年来利用该小区进行了以下观测研究工作:

(1)观测次暴雨的雨量、雨强、总径流量、总侵蚀量;并取泥沙样分析各种 REE 的含量,推算各坡段的侵蚀量。观测计算结果表明,全坡长小区平均侵蚀强度与该小区下方 2/3 坡长处的侵蚀强度接近,进一步证实各坡段条带布设位置是正确的,并为条带最佳布设位置选取找到依据。通过不同坡段侵蚀强度对比发现,不同降雨情况下,坡长与土壤侵蚀强度之间的关系不同,随着坡长增加,土壤侵蚀强度有增长、增长后递减和波动三种模式。

(2)每次产流降雨之后,沿坡长自上而下布设 11 个采样点,采表层土样,检测分析各种 REE 的含量,推算各采样点来自不同坡段泥沙的沉积量。采样点的布设如图 4 所示。假设以全坡长径流小区的左下角为原点建立坐标系,每次采样时,各采样点的的纵坐标固定不变,横坐标则距上次采样点向右移 0.1m 左右,以避免在同一点重复采样。采样所用环刀直径为 6.2cm、高 4.9cm、体积为 147.93cm³,每次采样后,将采样点填平。

根据观测结果,一般在长历时低强度的降雨中,泥沙的沉积量较大,可占到侵蚀量的 20%~30%,一般降雨为 10%左右。一般在小区上部沉积发生的频数和强度较高,并且沿径流方向沉积量急剧减少。在此之前,对土壤侵蚀过程中的沉积尚无法观测,影响土壤侵蚀研究的进一步深入发展。本研究解决了侵蚀过程中沉积的观测难题,填补了空白,并拓宽了土壤侵蚀学科的研究领域。

(3)在全坡长小区产流时,由专人冒雨上山,守在小区旁,定时收取径流泥沙过程样。根据不同时段泥沙中各种 REE 的含量,可推算出该时段各坡段的侵蚀量。根据这些资料,可以深入探测各坡段侵蚀强度及其在总侵蚀量中所占比重的动态变化过程,并且可以更加深入地分析各种因素对土壤侵蚀的影响。但在现有条件下,这种过程样很难取得,4 年来我们只观测到一次过程样,在这方面还需要加强工作,有待深入研究。

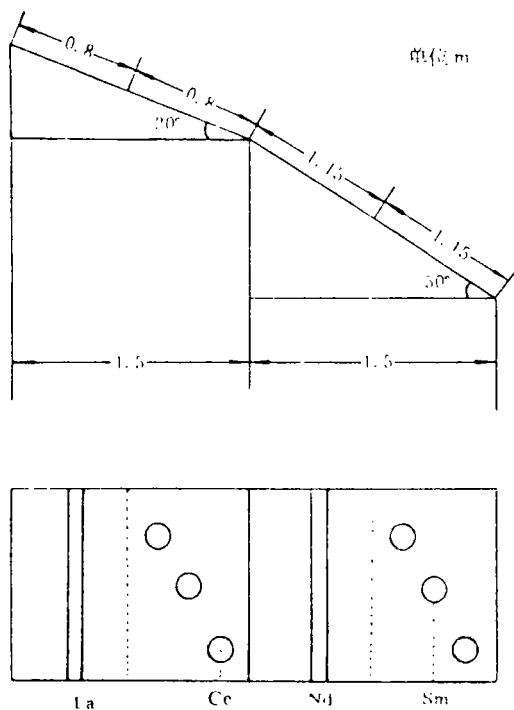


图3 坡与沟试验布设示意图

2.4 小流域泥沙来源模拟试验研究

在所内土壤侵蚀模拟实验室建小流域模型一座,进行模拟降雨试验。小流域原型为安塞试区纸坊沟内的小范家沟,流域面积 0.184km^2 。采用模型比例尺为 $1/75$,考虑几何相似,并将小流域模型划分为上、中、下游三个区,每区又分为坡面与沟坡两个小区,再加上侵蚀最活跃的溯源侵蚀区,共7个区,除一个区留作空白外,其余6个区每区布设一种REE,共6种REE。试验时将总侵蚀量减去REE标记部分的侵蚀量即为空白区的侵蚀量。

本研究采用多种REE示踪,可以比较细微地研究小流域各种地形部位侵蚀过程和产沙特征,能反映出小流域泥沙来源的时空变化情况。试验结果表明,小流域的主要产沙区随沟道的发育而不断变化,最初以沟道下切为主,随后溯源侵蚀和坡面侵蚀所占比重逐渐增大。虽然这一研究工作还存在一些亟待研究解决的问题,但可以比较满意的定性说明小流域泥沙来源的一些问题,同时为在野外开展小流域泥沙来源研究提供了方法准备。

2.5 外源REE对土壤环境影响的试验研究

(1)每次产流后,采集全坡长小区径流池中清水样,通过对其REE的含量分析,研究REE示踪法对地下水和地表水水质的影响。

(2)在布设全坡长径流小区的同时,还布设了一个林地径流小区,林地小区水平投影长20m,宽5m,地面坡度 15° ,小区由上至下均匀地划分为三段,分别布设La、Nd(条带法)和Ce、Sm、Eu(点状法)5种REE。每年8月前后,分别在小区的条带上、条带间以及远离小区生长的同种植物,分别测定其根、茎、叶中REE的含量。

分析结果表明:无论室内模拟试验还是野外试验,各次降雨径流水样中的含盐量均小于 0.6g/L ,远小于国家规定标准 1.5g/L 。生长在小区内的植物不同器官REE含量,与对照样相比,均在同一数量级内,未见大的变化。证明在黄土高原氧化环境弱碱性土壤介质中,示踪REE的生物地球化学行为较为稳定,不易被植物吸收,也不会因水迁移而影响地下水和地表水的水质,因而REE示踪法对生态环境不会形成不利影响。

3 结 论

经过5年来的试验研究,可以得出以下结论:

(1)黄土高原的土壤侵蚀情况远较一些欧美国家复杂。国外的一些先进经验可以借鉴,但有些科研成果直接应用还有一定困难。如著名的通用土壤流失方程,仅坡度坡长即可概括地形

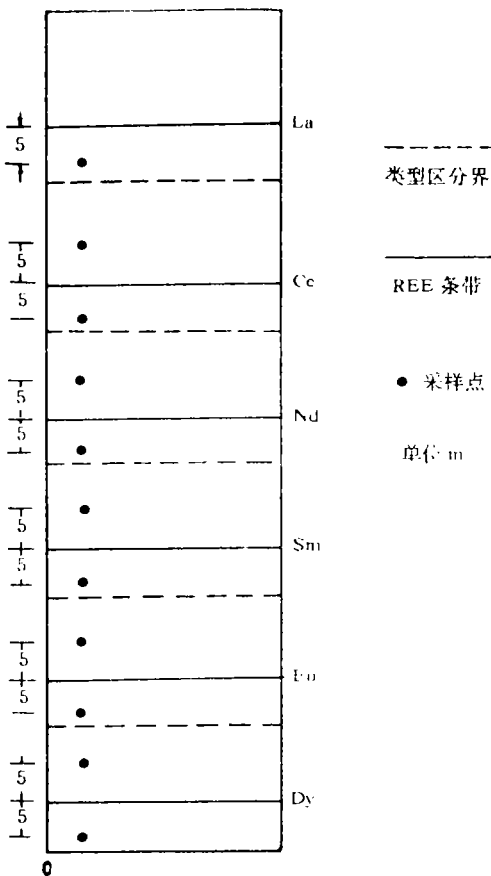


图4 采样点布设示意图

对土壤侵蚀的影响,在黄土高原地形条件复杂的情况下不适用(黄土塬区除外)。因此我们应针对黄土高原的特点,创造性地研究黄土高原的特殊问题,建立具有中国特色的土壤侵蚀学科。

(2)REE 示踪法解决了不同地形部位土壤侵蚀的观测方法问题,特别是初步解决了侵蚀过程中泥沙沉积的观测方法问题,填补了空白,并拓宽了土壤侵蚀学科的研究领域,为建立具有中国特色的土壤侵蚀学科创造了条件。

(3)实践证明,我们所提出的 REE 示踪法研究土壤侵蚀操作技术(包括示踪元素的选择、REE 施放量的计算、REE 的施放方法、泥沙样品的采集和处理、中子活化分析质量控制及精度计算等)是正确可行的。

(4)随着次暴雨径流深的变化,土壤侵蚀垂直分布表现出明显的复杂性。土壤侵蚀强度随坡长的变化可能存在增长型、增长后递减和波动型三种模式。

(5)在坡面上部以片蚀和轻微的细沟侵蚀为主,径流汇集不明显,因而沉积相对显著,坡面中下部则沉积相对较弱。降雨历时直接影响沉积量,在长历时低强度的降雨中,沉积量可达坡面侵蚀量的 20%~30%,一般降雨为 10%左右。

(6)在黄土高原氧化环境弱碱性土壤介质中,示踪 REE 的生物地球化学行为较为稳定,不易被植物吸收,也不会因水迁移而影响地下水和地表水的水质,因而 REE 示踪法对生态环境不会形成不利影响。

参考文献

- 1 朱显谟主编. 陕西土地资源及其合理利用. 陕西科学技术出版社, 1981 年
- 2 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区水土流失规律及治理效益. 人民黄河, 1980, (2)
- 3 N. W. 哈德逊著. 窦葆璋译. 土壤保持. 北京: 科学出版社, 1975 年
- 4 蒋德麒等. 黄河中游小流域泥沙来源初步分析. 地理学报, 1966, 32(4)
- 5 周佩华等. 黄土高原的侵蚀沟及其摄影测量方法. 水土保持通报, 1984, 4(5)
- 6 张信宝等. 黄土高原小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 法研究. 科学通报, 1989, 3
- 7 Knaus, R. M. et al. , Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland. ■ A new soil horizon marker method for measuring recent accretion. Estuaries, 1989, 12(4)
- 8 田均良等. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报. 水土保持学报, 1992, 6(4)