

# 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布

朱元骏<sup>①②</sup>, 邵明安<sup>①\*</sup>

① 中国科学院水利部, 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨陵 712100;

② 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

\* 联系人, E-mail: [masho@ms.iswc.ac.cn](mailto:masho@ms.iswc.ac.cn)

收稿日期: 2007-10-16; 接受日期: 2008-01-15

教育部创新团队发展计划(编号: IRT0749)和国家自然科学基金项目(批准号: 50479063)资助

**摘要** 利用数码照相和处理技术, 对黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石覆盖度和粒径分布进行了研究. 实验结果表明: 在陡坡坡面上, 坡面中部砾石覆盖度最大; 在缓坡坡面上, 砾石覆盖度沿坡面呈总体降低趋势. 砾石覆盖度与坡度之间存在正相关关系, 砾石粒径沿坡面有总体降低的趋势, 砾石粒径随坡度增加而降低. 坡面砾石平均粒径介于 6~20 mm 之间, 粒径>50 mm 的砾石在坡面的数量很少. 砾石在坡面不同部位的覆盖度与粒径<40 mm 砾石数量显著相关, 2~50 mm 砾石面积占砾石总面积的 60%以上, 该粒径的砾石决定了坡面的砾石分布.

## 关键词

黄土高原水蚀风蚀交错带  
小流域  
坡面  
表土砾石  
覆盖度和粒径

很多类型的土壤中含有一定量的砾石(粒径>20 mm)<sup>[1~3]</sup>. 长久以来, 土壤中的砾石被看作是土壤退化的标志. 在大多数耕作实践中, 砾石还会增加耕作难度, 需要将其移出农田<sup>[4]</sup>. 然而, 已有一些研究表明土壤中的砾石尤其是表土砾石对地表水文过程有着重要影响, 例如增加入渗、消减地表流、降低雨滴击溅对地表结构的破坏<sup>[5~7]</sup>. 上述影响导致在砾石含量较高的地区, 砾石是水文过程研究中不可忽略的因素. 此外, 砾石在坡面的分布反映了过去的侵蚀和沉积情况<sup>[1]</sup>. 了解土壤中砾石尤其是表土砾石的空间分布状况, 是水文过程、土壤侵蚀及相关研究中一项重要而基础的工作.

过去的几十年内, 已有不少学者对砾石的分布进行了研究, 发现表土砾石覆盖度<sup>[8~10]</sup>和粒径<sup>[11~14]</sup>与地形之间存在一定的关系. Simanton等<sup>[10]</sup>和 Simanton和Toy<sup>[15]</sup>在亚利桑那半干旱草原的研究显示

在第四纪冲积层中砾石含量随坡度呈指数增加趋势. Poesen等<sup>[3]</sup>在西班牙南部研究发现, 砾石覆盖和粒径的空间变异很大程度上受坡度的控制, 粒径>5 mm 的砾石覆盖度与坡度存在凸形曲线的关系, 而且其粒径随坡度线性增加. 不仅自然侵蚀会导致砾石露出地表, 人为侵蚀也会产生同样的作用. Nyssen等<sup>[16]</sup>对埃塞俄比亚北部地区耕作土壤中砾石空间分布进行了研究, 结果表明对于玄武岩系的砾石, 坡度在 3.4°~22.6°间, 粒径 5~20 mm 砾石含量均很高, 且与坡度无关; 砾石的水平方向的运动主要受踩踏、耕作和集中流的影响; 垂直方向上主要是受选择性侵蚀和耕作动力筛选等因素的影响, 砾石分布是水平和垂直方向上运动的综合结果. Poesen等<sup>[17]</sup>发现砾石覆盖与总的地形曲率之间存在线形关系, 在测定区内, 耕作侵蚀是导致表土砾石分布格局的主要因素. 由于砾石在土壤中分布的非均匀性以及地表结构和形

态的复杂性, 以上研究结果限制在各自的特定条件下, 并不具有普适的规律性。

黄土高原水蚀风蚀交错带是世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一 [18]。强烈的土壤侵蚀和高频度的人类活动使得该地区土层中的砾石很容易露出地表。一方面, 表土出现砾石是土壤和生态系统恶化的一个标志, 另一方面表土砾石可以促进入渗、减少侵蚀、增加土壤水分储量, 这对于该地区的植被恢复和农业生产具有重要意义。此外, 表土砾石不仅是土壤侵蚀的结果, 其反过来会对侵蚀产生一定的影响。对表土砾石空间分布进行研究有利于深入理解侵蚀-砾石分布的相互关系, 并有助于特定地区和土壤类型下水文和侵蚀过程的研究。然而, 长期以来该地区的水文、土壤和生态系统研究中砾石常常被忽略。为此, 本实验利用数码照相和处理技术对黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面砾石空间分布及其与地形的关系进行了初步研究, 以期对上述地区水土过程研究及水土资源的合理利用提供参考。

## 1 研究区概况

实验在黄土高原水蚀风蚀交错带神木六道沟小流域进行(图 1)。水蚀风蚀交错带位于黄土高原从东北向西南方向伸展的一条带状区域, 该区域受土壤水蚀和风蚀的双重影响, 是中国土壤侵蚀发生最为强烈的地区, 尤其是水蚀风蚀交错带北部的晋陕蒙地区, 其侵蚀模数在  $1 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  以上。

六道沟小流域 ( $110^\circ 21' \sim 110^\circ 23' \text{E}$ ,  $38^\circ 46' \sim$

$38^\circ 51' \text{N}$ ), 海拔 1081.0~1273.9 m, 面积 6.89  $\text{km}^2$ , 年均气温  $8.4^\circ \text{C}$ , 年均降水量 408.5 mm, 其中 6~9 月降水量占到全年的 80% 以上; 流域土壤侵蚀强烈, 地形破碎, 水土流失面积占流域总面积的 79.28%, 大于 100 m 的沟道密度  $6.45 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ , 沟谷面积占流域面积的 32.7%; 强烈的土壤侵蚀以及高频度的人类活动, 导致表土砾石在流域内广泛分布。

## 2 研究方法

实验采用数码照相分析技术, 通过对坡面地表砾石覆盖度和粒径的分析, 来研究坡面表土砾石空间分布规律。

实验布设在六道沟小流域具代表性的地段上(图 1 中的黑框区域)。在该地段上, 共选取 3 个坡面(图 2 中的虚框)。研究区内土壤中砾石的平均含量(质量含量百分比)在 3%~13% 之间变化, 表层土壤中砾石含量在 3%~50% 的范围内变化。坡面土壤类型为风沙土, 土壤颗粒组成为: 砂粒 45.4%~50.9%, 粉粒 30.1%~44.5%, 黏粒 11.2%~14.3%。

地表图像获取方法为: 在实验区域内, 选择形态比较一致且起伏较小的坡面, 沿坡面中线以 5 m 间距取样。获取样点图像时, 将数码相机固定在离地面 1.5 m 的高度上, 保持与地面垂直。

获取样点的数码图像后, 以取样点为中心, 截取面积为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的图像作为分析用图像, 用 ImageJ 软件对图像进行处理(图 3 中 1→2→3→4), 得到样点的砾石覆盖度和粒径分布数据。由于是近距离获取

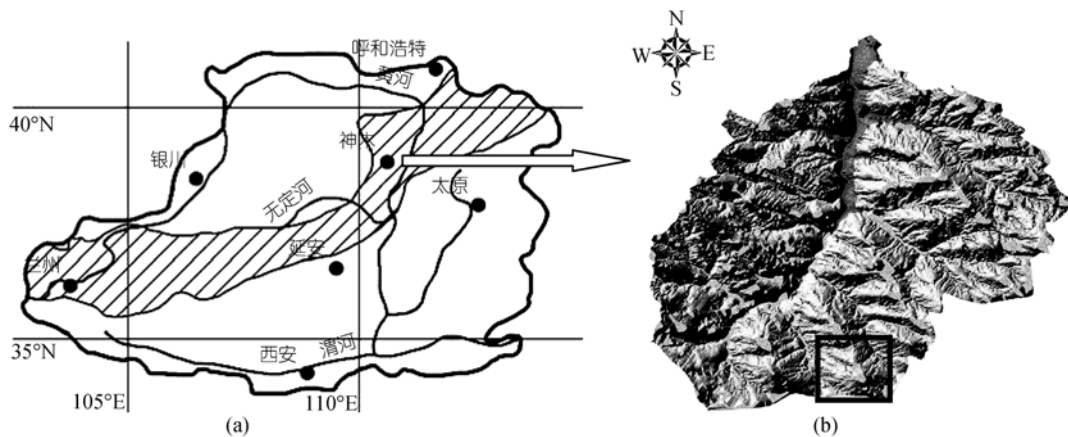


图 1 黄土高原水蚀风蚀交错带及六道沟小流域示意图

(a) 斜线阴影为水蚀风蚀交错带; (b) 六道沟小流域, 图中的黑框为采样区位置

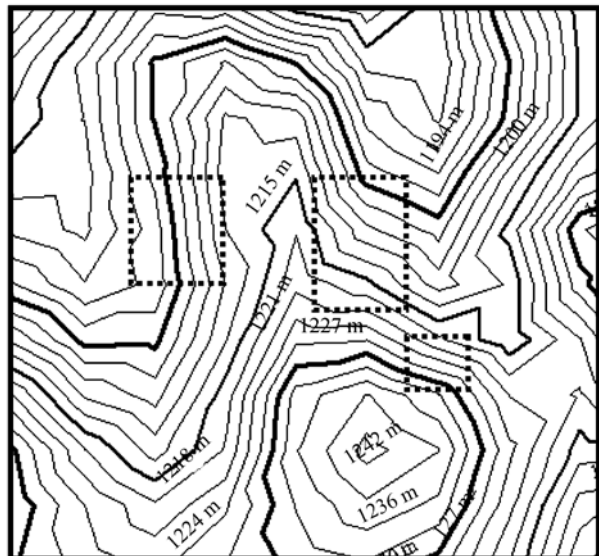


图 2 采样区布设示意图

地表影像, 图像不可避免的存在一定畸变, 为此实验对图像的误差进行了计算, 方法为: 离地面 1.5 m, 获取地面 1 m<sup>2</sup> 的影像, 将用 ImageJ 软件计算的面积与实际面积(1 m<sup>2</sup>)进行比较. 计算结果表明该方法的相对误差为 0.7%±0.8%, 能够满足实验要求. 样点坡度用罗盘获取.

### 3 结果与分析

#### 3.1 表土砾石形成原因及分布概况

流域内砾石为钙的结核, 其形成原因在于: 黄土富含钙质, 在降雨丰沛的年份, 钙质容易随雨水发生淋溶; 而在干旱的年份, 随水淋溶的钙质在土壤深层发生淀积, 形成一层钙积层. 当表层土壤被侵蚀掉之后, 钙积层就会露出地表, 并在各种外力的作用下发生崩解, 形成表土砾石. 因沉积年代和气候条件的不同, 这些钙积层发育程度不等. 流域内砾石主要发育和形成于较为古老的午城黄土和离石黄土上 [19]. 这是由于历史上黄土高原气候比现在要湿润, 曾有森林植被发育 [20-22]; 在较晚的马兰黄土上, 很少有钙结核的发育.

侵蚀是导致表土出现砾石的最主要因素. 该地区降雨稀少、多大暴雨 [18], 加之黄土结构疏松、抗侵蚀性弱以及植被和地表下垫面的破坏, 导致表层土壤颗粒(<2 mm)被大量带走, 使得砾石在表土集中出现(砾石粒径大于土壤颗粒, 在相同的条件下, 具有较强的抗侵蚀能力). 在流域内范围, 坡面中上部及沟谷的边缘, 砾石含量明显高于其他位置; 植被覆盖较好的地段, 因植被的保护性作用, 砾石很少露出地表.

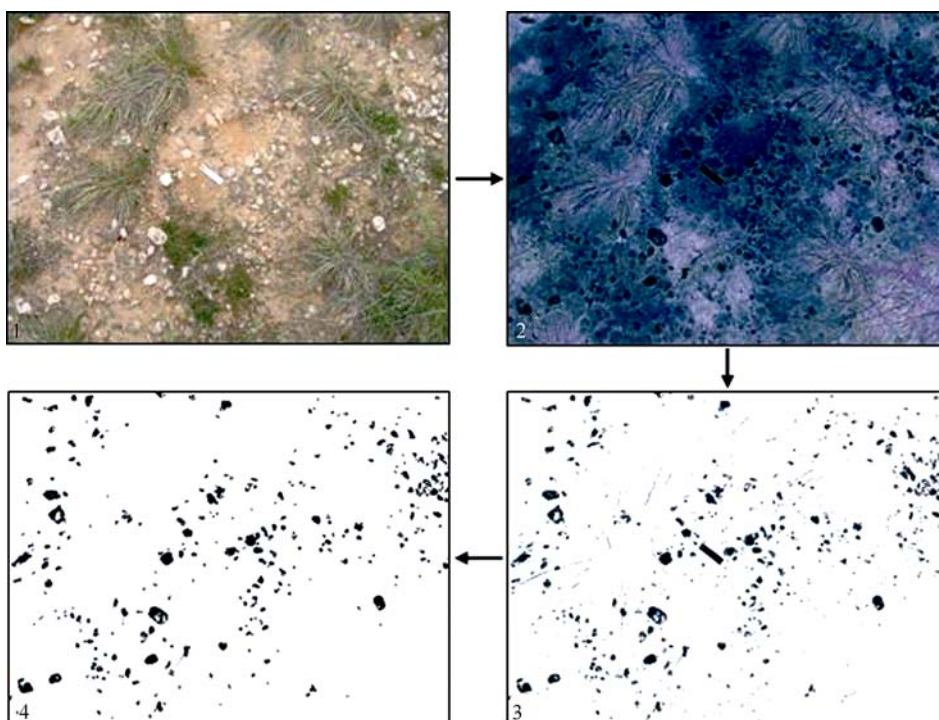


图 3 图像处理过程



另外, 人类活动对砾石分布也有影响. 在坡耕地上, 砾石很容易露出地表. 这是由于耕作一方面对不同粒径的颗粒具有筛选作用, 导致大的颗粒向上运动以及小的颗粒向下运动 [16]; 另一方面耕作侵蚀使得表层土壤颗粒被径流带走. 这两方面原因加速了砾石在表土的分布过程. 在道路上, 机具以及畜类踩踏, 使得一部分土壤被压实一部分土壤被翻松. 在干湿交替作用下, 土壤易发生膨胀和收缩, 导致土壤结构遭到破坏, 形成道路侵蚀, 砾石常富集在道路侵蚀形成的侵蚀沟中.

### 3.2 陡坡坡面砾石分布

由于侵蚀与坡度因子之间具有临界关系 [23,24], 综合其他学者研究结果, 本研究根据平均坡度的大小, 将坡面分为陡坡(>20°)和缓坡(<20°), 分别对陡坡和缓坡坡面砾石分布进行描述和分析.

从前面对流域内砾石分布概况的描述中, 可以得知在研究区范围内, 独特的成土过程导致土壤中钙结核(钙积层)的形成. 当表层土壤颗粒被侵蚀掉之后, 土壤中的钙积层露出地表, 在风化和其他外力的作用下发生崩解形成表土砾石. 可见坡面出现砾石是侵蚀直接作用的结果. 然而, 侵蚀作用又与地形以及地表状况有关, 最终的坡面砾石分布则是侵蚀和地形因子叠加作用的结果. 通过对采样点表土砾石覆盖度的测定和计算发现: 在研究区范围内, 陡坡中部具有最大的砾石覆盖度, 中部向上和向下 2 个方向上砾石覆盖度逐渐降低(图 4). 这表明陡坡坡面中部是砾石部集中分布的区域, 顶部和底部砾石分布较少.

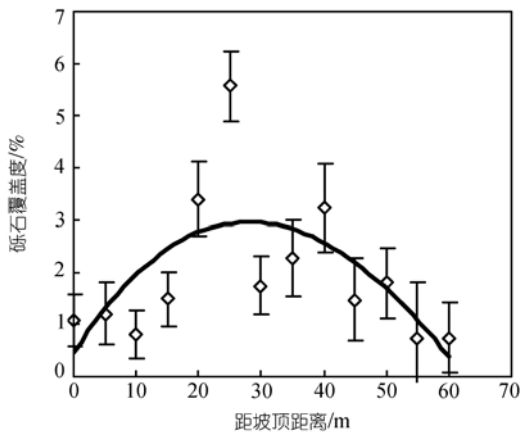


图 4 砾石覆盖度沿坡面的变化

为了获得坡面砾石覆盖度与地形的关系, 实验对坡面样点的坡度进行了测定, 发现坡面中部坡度最大, 坡顶和坡底较为平缓, 坡面形态为反“S”形. 坡度与砾石覆盖度之间的回归分析发现陡坡坡面砾石覆盖度与坡度之间存在显著正相关关系( $R^2=0.6013$ ,  $P<0.05$ , 图 5). 坡面中部坡度最大, 该处的地表曲率也相应较大, 坡面形态呈反“S”形, 这种坡面形态造成坡中部侵蚀发生剧烈, 土壤颗粒(<2 mm)被径流大量带走, 粒径大于土壤颗粒的砾石则留在原地, 形成砾石在该处的聚集和富集. 这表明研究区坡面砾石覆盖度分布规律与坡面形态及其导致的侵蚀分异有关.

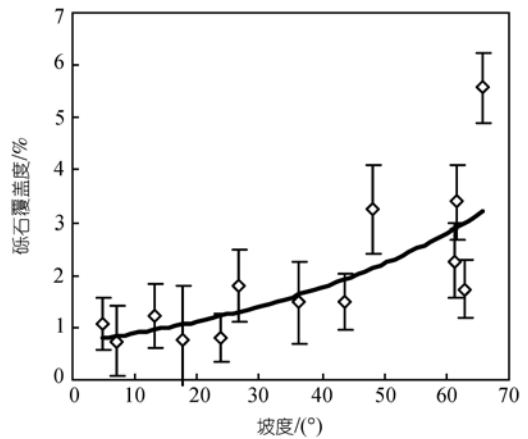


图 5 砾石覆盖度与坡度的关系

以上对砾石覆盖度沿坡面的分布进行了描述, 然而侵蚀不仅影响坡面砾石分布, 还会影响砾石的粒径. 为此, 实验对砾石粒径(为测定点处砾石的平均粒径, 用等效直径来表示, 等效直径= $2 \times (\text{area} / \pi)^{1/2}$ )沿坡面的变化以及砾石粒径与坡度的关系进行了图示分析. 从图 6 中可以看出, 从坡顶到距离坡顶 45 m 的范围内, 砾石粒径逐渐减小, 此后砾石粒径有所增加. 坡面砾石平均粒径都介于 6~20 mm 内, 对于大于 20 mm 的砾石, 坡面径流很难将其带走; 对于小于 6 mm 的砾石, 坡面径流很容易将其带到坡的底部甚至沟谷. 砾石的平均粒径分析结果表明, 在通常的情况下侵蚀主要作用于 6~20 mm 的砾石. 坡面 0~45 m 的距离内砾石粒径沿坡面逐渐降低, 来自于两个方面的原因: (1) 地表径流沿坡面发生汇集作用, 使得径流冲刷能力增强, 导致该处大粒径的砾石被带到坡面更低的部位或者坡底; (2) 坡顶粒径较小的砾石被

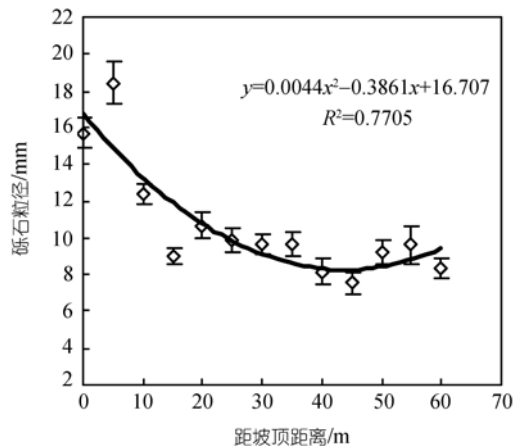


图 6 砾石粒径沿坡面的变化

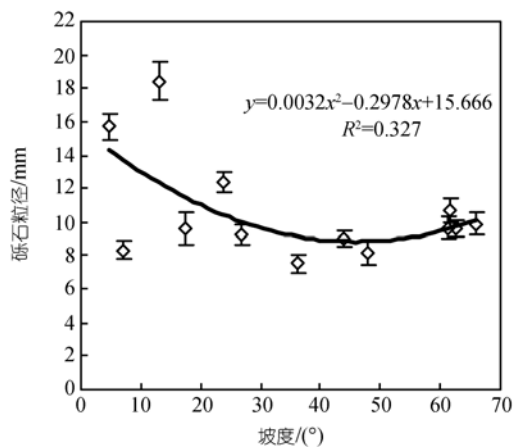


图 7 砾石粒径与坡度的关系

径流带到坡面的中下部, 且携带距离与粒径成反比。坡面底部(>45 m), 由于砾石对径流的消减作用, 加之坡度减缓, 径流动能降低, 携带能力下降, 因而砾石粒径在此处反而有增大的趋势。

图 7 为砾石粒径与坡度的关系, 该图表明砾石粒径随坡度增加呈总体降低的趋势。从前面的分析中可以知道, 坡面中部坡度较其他部位大, 侵蚀发生剧烈, 导致尽管坡面中部砾石粒径较小但其覆盖度却最大(原因见本节(1)和(2))。

实验还利用图像分析和处理软件, 对坡面 2~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60 mm 和 >60 mm 等不同粒径的砾石数量进行了统计, 结果见表 1。

从统计结果来看, 坡面绝大部分砾石粒径在 2~20 mm 之间(占整个砾石数量的 69.2%~96.0%); 粒径 >50 mm 的砾石在坡面不同部位的数量很少且基本

保持不变, 不同粒径的砾石在坡面的分布都是坡面中部数量最多, 在中部向上和向下的方向上, 砾石数量逐渐减少。对砾石覆盖度与 2~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60 和 >60 mm 的砾石数量进行相关性分析, 发现除了 >40 mm 的砾石外, 砾石覆盖度与其他粒径砾石数量呈显著线性正相关(表 2)。

这表明砾石在坡面不同部位的分布可以用 <40 mm 的砾石数量来表征。为了说明不同粒径砾石在坡面的分布状况以及决定坡面砾石覆盖度的砾石粒径, 实验对 2~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60 以及 >60 mm 等不同粒径砾石面积占砾石总面积的比例进行了计算, 结果见图 8。从图中可以看出, 坡面 2~50 mm 砾石面积占到总面积的 60% 或者以上。坡面很少有 >60 mm 的砾石出现, 决定坡面砾石分布和数量的砾石粒径分布在 2~50 mm 的范围内, 该粒径范围是决定坡面砾石分布和覆盖度大小的主要砾石组分。

表 1 坡面不同粒径砾石数量分布

距离/m	总数量	2~10 mm	10~20 mm	20~30 mm	30~40 mm	40~50 mm	50~60 mm	>60 mm
0	39	9	18	9	2	1	0	0
5	48	5	31	7	3	0	1	1
10	50	15	30	4	1	0	0	0
15	190	137	46	5	2	0	0	0
20	417	270	111	25	6	4	0	1
25	735	507	181	28	11	4	2	1
30	190	128	49	11	2	0	0	0
35	189	135	44	6	1	2	1	0
40	306	220	61	21	2	1	1	0
45	163	118	34	10	1	0	0	0
50	162	114	35	10	3	0	0	0
55	46	33	10	0	2	0	0	1
60	101	79	18	3	1	0	0	0

表 2 砾石覆盖度与不同粒径砾石数量的关系

	2~10 mm	10~20 mm	20~30 mm	30~40 mm	40~50 mm	50~60 mm	>60 mm
$E_q^{a)}$	$y=35.93x-20.43$	$y=47.09x-5.26$	$y=26.97x-4.07$	$y=16.83x-8.41$	$y=14.77x-9.12$	$y=8.64x-7.62$	$y=3.96x+1.87$
$R^2^{b)}$	0.931	0.9091	0.8203	0.7457	0.4577	0.5297	0.1068

a) 砾石覆盖度与砾石数量之间的回归关系, b) 相关系数

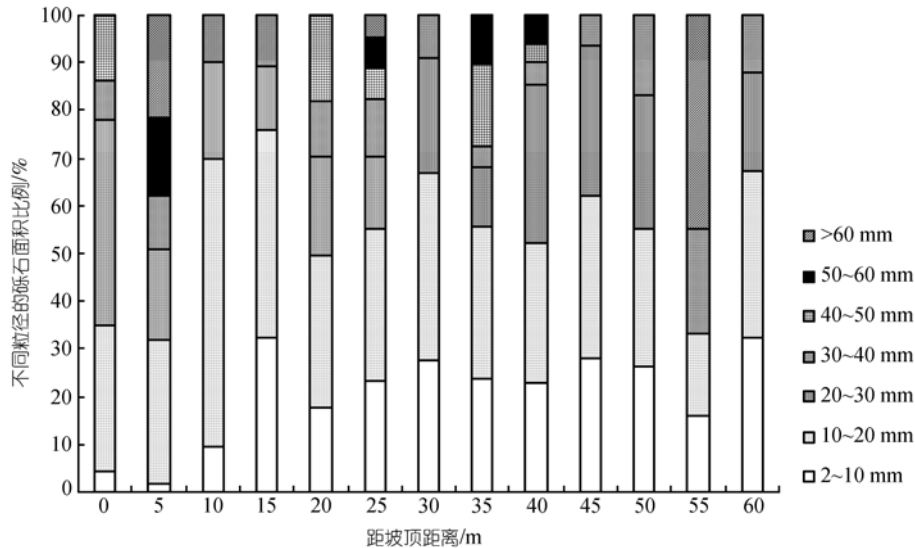


图 8 不同粒径砾石的相对面积比例

### 3.3 缓坡坡面砾石分布

实验还对缓坡坡面砾石覆盖度和粒径的分布进行了初步的定量研究. 图 9 为砾石覆盖度沿坡面的变化趋势. 从图 9 中可以看出, 砾石覆盖度沿坡面呈“W”型分布, 在坡面距离坡顶 40 m 范围内, 砾石覆盖度先降低后又增加; 当距坡顶距离 >40 m 之后, 砾石覆盖度又有一个先降低后增加的趋势. 总体来说, 砾石覆盖度沿坡面是降低的. 缓坡上砾石覆盖度的这种分布情况与陡坡不同. 为此, 实验对缓坡测点坡度进行了测定, 发现测定点坡度在坡面的分布也呈“W”型(图 10). 这表明砾石覆盖度在坡面的这种分布趋势与坡面测定点的坡度有关. 为了进一步研究, 我们对缓坡坡面砾石覆盖度与坡度进行回归分析, 发现覆盖度和坡度间存在如下关系:

$$Y=0.3946 \cdot e^{0.1086 x}$$

$R^2=0.4296$ ,  $Y$  为砾石覆盖度,  $x$  为坡度.

以上分析表明, 在缓坡坡面上决定坡面砾石覆盖度的因素与陡坡一样主要是坡度. 坡度主要是通过影响侵蚀强度来影响砾石在坡面的分布. 此外, 实验还对缓坡坡面的砾石粒径分布进行了初步研究,

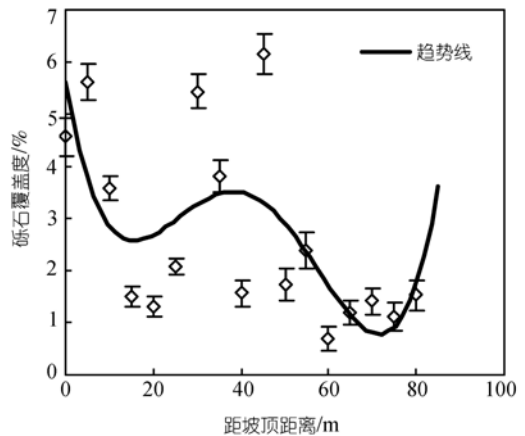


图 9 砾石覆盖度沿坡面的变化

结果见图 11 和 12. 缓坡坡面砾石粒径在坡面的分布与陡坡坡面的分布类似, 都是在沿坡面向下的方向上有降低的趋势, 接近坡面底部砾石粒径保持不变(图 11). 砾石粒径与坡度的关系与陡坡基本类似, 也是随坡度增加砾石粒径逐渐降低, 但当坡度增加到  $20^\circ$  以后, 砾石粒径有所增大(图 12). 由于缓坡坡面上的坡度分布在陡坡坡度的范围内, 也就是说陡

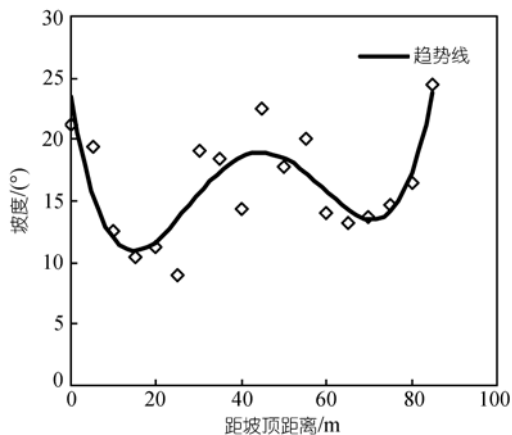


图 10 坡度沿坡面的变化

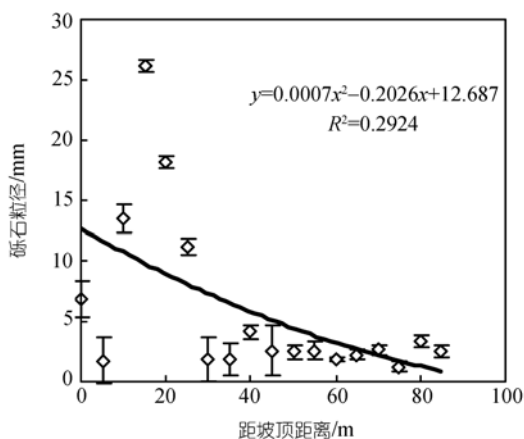


图 11 砾石粒径沿坡面的变化

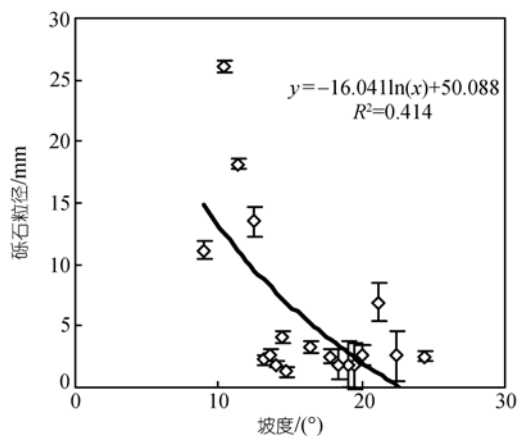


图 12 砾石粒径与坡度的关系

坡的坡度含盖了缓坡的坡度. 因此缓坡坡面砾石粒径分布与陡坡坡面较小坡度范围内砾石粒径分布一致.

## 4 讨论

实验利用数码图像分析和处理软件, 对黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石分布进行了研究. 通过对砾石覆盖度及粒径与坡度因子进行分析, 初步得出了砾石分布与地形之间的关系.

### 4.1 坡面砾石分布的成因

实验发现: 陡坡中部砾石覆盖度最大, 沿坡面向上和向下方向上砾石覆盖度均呈现降低趋势; 缓坡坡面上, 砾石覆盖度沿坡面呈“W”型总体下降趋势. 砾石覆盖度与坡度之间存在正相关关系; 砾石粒径与坡度之间的关系则正好相反. 以上结果表明, 坡面砾石覆盖度和粒径分布与坡面形态及其导致的侵蚀分异有关. 坡度越大, 侵蚀发生越剧烈, 砾石在该处发生侵蚀性富集, 覆盖度也就越大; 砾石粒径分布规律与此正好相反, 其原因详见 3.2 中(1)和(2)的分析.

### 4.2 决定坡面砾石分布的砾石粒径范围

通过对陡坡坡面不同粒径砾石数量的统计发现, 坡面粒径 2~20 mm 的砾石数量占整个砾石数量的 69.2%~96.0%; 粒径>50 mm 的砾石在坡面不同部位的数量很少. 砾石在坡面不同部位的分布状况可以用<40 mm 的砾石数量来表征. 坡面 2~50 mm 砾石面积占到总面积的 60%以上. 由此可见, 在坡面上, 侵蚀主要作用于 2~50 mm 的砾石, 该粒径范围决定了坡面砾石的分布和数量.

本实验所得出的坡面砾石覆盖度与坡度的关系与 Yair 和 Lavee<sup>[8]</sup>, Abrahams 等<sup>[12]</sup>, Parsons 和 Abrahams<sup>[13]</sup>, Simanton 等<sup>[10]</sup>以及 Simanton 和 Toy<sup>[15]</sup>等的结论类似, 而砾石粒径与坡度的关系与之有所不同, 即砾石粒径随坡度的增加而降低. 这可能与该地区砾石类型有关. 黄土高原水蚀风蚀交错带的砾石多为钙的结核, 而国外同类型的研究中所涉及的砾石是形状规则的硬质卵石(形成于玄武岩之上), 这导致后者密度大于前者, 而渗透性小于前者, 具有较强的抗侵蚀能力, 坡面径流很难将其从坡面较高的部位带到低处. 此外, 黄土高原水蚀风蚀交错带的砾石密度与土壤密度相当, 且容易在外界作用下发生崩解, 形成较小的砾石颗粒. 这些小的砾石很容易被径流带走, 导致砾石粒径表现出随坡度增加而降低的

趋势.

## 5 结论

当前国内还很少有人针对黄土高原水蚀风蚀交错带坡面砾石分布进行研究. 根据实验结果和分析, 得出以下主要结论:

(1) 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域范围内, 坡度导致的侵蚀分异是决定坡面砾石分布的主导因素. 砾石覆盖度与坡度存在正相关关系, 砾石粒径则随坡度增加而降低.

(2) 坡面绝大部分砾石粒径介于 2~50 mm 之间, 该粒径的砾石面积占到砾石总面积的 60%以上, 该粒径范围是决定坡面砾石分布和覆盖度大小的主要砾石组分.

黄土高原水蚀风蚀交错带坡面砾石分布是侵蚀和地形(主要是坡度)叠加作用的结果, 砾石的分布可以用侵蚀和坡度的相互作用关系来解释, 而且这种解释与以往的研究以及实地调查结果相符合. 今后还需要展开坡面径流的水动力学模拟研究, 以对砾石分布与侵蚀相互作用关系进行更加深入的分析.

**致谢** 感谢黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室神木侵蚀与环境试验站为本研究提供实验和生活条件.

## 参考文献

- 1 Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: signification and processes. *Catena*, 1994, 23: 1—28[DOI]
- 2 Valentin C. Surface sealing as affected by various rock fragment covers in West Africa. *Catena*, 1994, 23: 87—97[DOI]
- 3 Poesen J, van Wesemael B, Bunte K, et al. Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: a case-study from southeast Spain. *Geomorphology*, 1998, 23: 323—335[DOI]
- 4 Poesen J, van Wesemael B, Govers G, et al. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion. *Geomorphology*, 1997, 18: 183—197[DOI]
- 5 Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration. *Catena*, 1994, 23: 99—110[DOI]
- 6 Cousin I, Nicoulaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 2003, 53: 97—114[DOI]
- 7 Li X Y, Shi P J, Liu L Y, et al. Influence of pebble size and cover on rainfall interception by gravel mulch. *J Hydr*, 2005, 312: 70—78[DOI]
- 8 Yair A, Lavee H. Runoff generative process and runoff yield from arid talus mantles slopes. *Earth Surf Proc*, 1976, 1: 235—247[DOI]
- 9 Abrahams A D, Parsons J. Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces. In: Poesen J, Lavee H, eds. *Rock Fragments in Soil: Surface Dynamics*. *Catena*, 1994, 23: 111—140[DOI]
- 10 Simanton J R, Renard K G, Christiansen C M, et al. Spatial distribution of surface rock fragments along catenas in semiarid Arizona and Nevada, USA. In: Poesen J, Lavee H, eds. *Rock Fragments in Soil: Surface Dynamics*. *Catena*, 1994, 23: 29—42[DOI]
- 11 Carson M A, Kirkby M J. *Hillslope Form and Process*. Cambridge: Cambridge University Press, 1972
- 12 Abrahams A D, Parsons A J, Hirsch P J. Hillslope gradient-particle size relations: evidence for the formation of debris slopes by hydraulic processes in the Mojave Desert. *J Geol*, 1985, 93: 347—357
- 13 Parsons A J, Abrahams A D. Gradient-particle size relations on quartz monzonite debris slopes in the Mojave Desert. *J Geol*, 1987, 95: 423—432
- 14 Le Roux J S, Vrahimis S. The relationship between gradient and the size of rock fragments on debris slopes on dolerite-capped inselbergs in the southern Orange Free State. *S Afr Geogr J*, 1987, 69: 157—164
- 15 Simanton J R, Toy T J. The relation between surface rock fragment cover and semiarid hillslope profile morphology. *Catena*, 1994, 23: 213—225[DOI]
- 16 Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, et al. Spatial distribution of rock fragments in cultivated soils in northern Ethiopia as affected by



- lateral and vertical displacement processes. *Geomorphology*, 2002, 43: 1—16[DOI]
- 17 Poesen J, van Vesemael B, Govers G, et al. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion. *Geomorphology*, 1997, 18(3-4): 183—197[DOI]
- 18 唐克丽, 侯庆春, 王斌科, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方法. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993, 18: 2—15
- 19 贾恒义, 雍少萍, 王富乾. 神木试区的土壤资源. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993, 18: 36—46
- 20 吕厚远, 刘东生, 郭正堂. 黄土高原地质历史时期古植被研究状况. *科学通报*, 2003, 48(1): 2—7
- 21 唐克丽, 贺秀斌. 黄土高原全新世黄土-古土壤演替及气候演变的再研讨. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 129—139
- 22 刘卫国, 宁有丰, 安芷生, 等. 黄土高原现代土壤和古土壤有机碳同位素对植被的响应. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(10): 830—836
- 23 唐克丽. *中国水土保持*. 北京: 科学出版社, 2004. 845
- 24 陈永宗, 景可, 蔡强国, 等. *黄土高原现代侵蚀与治理*. 北京: 科学出版社, 1988. 194