

# 坡耕地紫色土养分空间变异对土壤侵蚀的响应

葛方龙<sup>1</sup>, 张建辉<sup>1,\*</sup>, 苏正安<sup>1,2</sup>, 聂小军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 坡耕地土壤侵蚀导致土壤质量降低, 并因此造成对作物产量的不利影响。利用土壤侵蚀测定的<sup>137</sup>Cs 示踪技术, 结合土壤理化分析, 研究了川中丘陵区紫色土坡耕地土壤侵蚀所引起的土壤再分配对养分空间变异性的影响。结果表明, 川中丘陵区坡耕地土壤侵蚀是水蚀和耕作侵蚀共同作用的结果, 强烈的耕作导致坡上部发生最为严重的土壤侵蚀。土壤侵蚀对土壤特性的空间变异性产生深刻影响, 坡上部土壤有机质和养分贫瘠, 而在坡下部相对富集, 土壤有机质、全 N、碱解 N、有效 P、K 以及土壤粘粒含量在不同坡位之间出现显著差异。反映净余土壤再分配速率的<sup>137</sup>Cs 面积浓度与这些土壤理化特性均有密切的相关性。因此, <sup>137</sup>Cs 面积浓度可以作为表征侵蚀坡地土壤综合质量的指标。

**关键词** <sup>137</sup>Cs 示踪, 土壤侵蚀, 土壤养分, 坡耕地, 紫色土

文章编号: 1000-0933 (2007) 02-0459-06 中图分类号: P941.74 Q14 文献标识码: A

## Response of changes in soil nutrients to soil erosion on a purple soil of cultivated sloping land

GE Fang-Long<sup>1</sup>, ZHANG Jian-Hui<sup>1,\*</sup>, SU Zheng-An<sup>1,2</sup>, NIE Xiao-Jun<sup>1,2</sup>

1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

*Acta Ecologica Sinica* 2007 27 (2) 0459 ~ 0464.

**Abstract** : Severe soil erosion on cultivated sloping land in hilly areas of Sichuan has resulted in deterioration of soil quality, and therefore has an adverse impact on crop production. We selected a hillslope of 110 m in length with a slope steepness of 10.12% where the soils were classified as Regosols. Soil samples for the determination of <sup>137</sup>Cs, soil organic matter (SOM), total N, P, K, available N, P, K and particle size fraction were collected at 10 m intervals along a transect of the hillslope. Effects of soil erosion on soil nutrient loss were studied by using <sup>137</sup>Cs technique, and the relationships between <sup>137</sup>Cs-derived soil redistribution rates and soil nutrients were established over the cultivated sloping land in hilly areas of Sichuan, China (30°26'N, 104°28'E). SOM, total N, available N, P, K and the <0.002mm soil particle size fraction were smaller at upper and middle slope positions where lower <sup>137</sup>Cs concentrations were present (i.e. soil erosion rates were greater) than at downslope positions where <sup>137</sup>Cs concentrations were higher (i.e. soil erosion rates were less). The lowest <sup>137</sup>Cs concentrations were found in the hilltop, showing that besides water erosion, tillage erosion also contributed to soil losses, and intensive tillage was mostly responsible for severe erosion at upper slope positions. There were significant differences in soil OM, total N, available N, P, K and the <0.002mm soil particle size fraction between different slope segments, and these properties were significantly correlated with slope length. These soil properties were also significantly

基金项目 国家重点基础研究发展规划 (973) 资助项目 (2003CB415202, 2006CB403204)

收稿日期 2006-01-16; 修订日期 2006-10-09

作者简介 葛方龙 (1980 ~ ) 男, 硕士, 湖南岳阳人, 主要从事土壤侵蚀与土壤质量研究. E-mail: gfangl@126.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zjh@imde.ac.cn

**Foundation item** The project was financially supported by National Basic Research Program (973 Program No. 2003CB415202 and 2006CB403204)

**Received date** 2006-01-16; **Accepted date** 2006-10-09

**Biography** GE Fang-Long, Master, mainly engaged in soil erosion and soil quality. E-mail: gfangl@126.com

correlated with  $^{137}\text{Cs}$  concentration, indicating that both  $^{137}\text{Cs}$  and nutrient concentrations varied with topographical changes. The variation in soil properties was strongly influenced by erosion-induced soil redistribution, and therefore  $^{137}\text{Cs}$  concentrations mirroring soil redistribution rates would be considered as an integrated indicator of soil quality.

**Key Words:**  $^{137}\text{Cs}$  technique; soil erosion; soil nutrient; purple soil; cultivated sloping land

坡地土壤养分空间变异性影响作物产量已是不争的事实,然而,空间变异性发生机理却并不完全清楚。土壤养分的空间变异是土壤本身特性和农业生产活动的共同作用结果,只有认识其发生机理,才能通过调节田间管理措施克服空间变异对生产造成的不利影响。川中丘陵区是长江上游侵蚀最严重的区域之一。该区耕垦指数较高,坡耕地面积占耕地面积的60%以上,水土流失问题主要集中在坡耕地上,其侵蚀速率在 $3000 \sim 5000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上,坡耕地侵蚀量占该区总的土壤侵蚀量60%~80%以上。土壤侵蚀导致土壤退化已成共识,同时,坡耕地土壤侵蚀所产生的土壤再分配对土壤质量空间变异性的影响正引起国内外学者的重视。国外学者对坡面土壤侵蚀与土壤性质变化之间关系的研究结果显示,景观内凸坡位置发生土壤侵蚀,土壤质量降低,凹坡位置发生土壤沉积,但土壤质量并未因此而提高<sup>[1~3]</sup>。在我国黄土高原的研究也表明坡耕地土壤侵蚀影响土壤性质<sup>[4~6]</sup>。20世纪80年代以来,长江上游地区开展了一些坡耕地土壤侵蚀的实验研究,指出了土壤侵蚀的严重性<sup>[7~9]</sup>,同时在川中丘陵区的研究发现了坡耕地紫色土特性的空间变异性<sup>[10,11]</sup>,但是对两者关系的研究却鲜有报导。因此,本文利用 $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术,定量研究川中丘陵区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质、氮、磷、钾等土壤肥力因子的影响,阐明侵蚀引起的土壤再分配与土壤质量空间变异性的关系。通过对土壤特性空间变异性及其动因的研究,为提高农业生产的经济效益和实现环境友好的持续农业生产提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样区概况

采样区位于四川省简阳市(东经 $104^{\circ}28'\text{E}$ ,北纬 $30^{\circ}26'\text{N}$ ),该区地貌为浅丘,海拔454~489m。气候类型属于亚热带湿润气候,四季分明,年平均气温 $17^{\circ}\text{C}$ ,极端最高温度 $38.7^{\circ}\text{C}$ ,最低温度 $-5.4^{\circ}\text{C}$ , $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 $5421^{\circ}\text{C}$ 。多年平均降雨量约为872.2mm,且90%以上的降雨量集中在5~10月期间。土壤母质为侏罗系紫色砂泥岩,按照我国现有土壤系统分类标准<sup>[12]</sup>,土壤被划分为石灰紫色正常新成土。由于水蚀的分选作用,土壤质地坡体中上部为粉(砂)壤土,坡下部为粉(砂)质粘壤土。研究区土壤耕作方式为顺坡,土层在坡顶较浅,一般厚约20cm,顺坡向下,土层逐渐加深,可达40~50cm。土地利用基本为农地,种植结构以小麦-玉米-红薯为主。

### 1.2 土壤采样与分析

2004年在研究区选择一个坡度为10.12%,坡长为110m的丘坡。该坡总体上中上部较陡,坡脚较平缓,坡脚下方邻接堰塘。在坡面布设取样剖面线,沿纵断面线从坡顶至坡脚,每隔10m布设一个 $^{137}\text{Cs}$ 样品及农化分析样采集点,每个样品两次重复。利用直径6.8cm的取样筒进行 $^{137}\text{Cs}$ 及农化分析样品的采集。将取样筒垂直打入地面取剖面全样,取样深度依土层厚度而定。实验室常规分析方法<sup>[13]</sup>分析土壤理化特性。其分析项目与方法为:土壤机械组成采用吸管法,有机质采用重铬酸钾法,土壤全N采用凯氏法,土壤速效N采用碱解扩散法,土壤全P采用高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法,速效P采用碳酸氢钠浸提比色法,速效K采用火焰分光光度计法。

$^{137}\text{Cs}$ 土样经风干、研磨、过筛(孔径2.0mm),剔除大颗粒及植物根系,称重后待测。 $^{137}\text{Cs}$ 样品测定利用美国堪培拉(CANBERRA)公司生产的高纯锗(HPGe)探头多道 $\gamma$ 能谱仪。每个样品测试重量不小于350g,测试时间为50000s,测试结果相对误差 $<5\%$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $^{137}\text{Cs}$ 浓度与土壤侵蚀速率

单位面积的 $^{137}\text{Cs}$ 含量,即 $^{137}\text{Cs}$ 面积浓度反映了该地区不同地点的 $^{137}\text{Cs}$ 含量差异。理论上说,由于 $^{137}\text{Cs}$

随大气环流并随降雨分布于地表,因此,在一定地区内,如不发生土壤的侵蚀、搬运或堆积等物理过程,<sup>137</sup>Cs 分布值应大体相等<sup>[14,15]</sup>。在耕地中,由于耕作扰动使<sup>137</sup>Cs 均匀分布在耕层,土壤剖面<sup>137</sup>Cs 残存总量随土壤流失而减少,据此前提,可根据无侵蚀与侵蚀土壤之间<sup>137</sup>Cs 含量的差异对土壤侵蚀速率进行定量计算。研究业已证明,土壤<sup>137</sup>Cs 含量是反映土壤侵蚀与沉积速率的可靠指标<sup>[14,15]</sup>。为避免在土壤<sup>137</sup>Cs 含量与土壤侵蚀模数的转换中因一些假设引起的土壤侵蚀模数的估计误差,本研究直接采用<sup>137</sup>Cs 含量表示侵蚀引起的净余土壤再分配速率。

纵断面顺坡各点的<sup>137</sup>Cs 面积浓度值如图 1。从图中可以看出,在坡面不同位置各样点间<sup>137</sup>Cs 浓度变化较大。总体而言,整个坡面都存在不同程度的土壤侵蚀,但是在坡上部<sup>137</sup>Cs 浓度最低,土壤侵蚀最为严重(0m 处);顺坡向下,在坡中部(距坡顶 20~90m 处),侵蚀逐渐减缓。坡脚下方邻接堰塘,因而在坡脚仍有土壤侵蚀,但侵蚀强度最弱。土壤侵蚀模数的变化与在实地测量时观察到的顺坡向下耕层土壤逐渐加深的变化规律一致,说明随着径流侵蚀和农耕活动,坡上部土壤会顺坡下移,在坡下部相对积累,土壤侵蚀模数降低。同时,侵蚀强度顺坡逐渐递减趋于稳定。坡上部(0~10m 处)<sup>137</sup>Cs 面积浓度理论上应该高于坡中部才符合“标准”水蚀模式,但实测的土壤再分配格局不符合这样的模式(图 1),耕作侵蚀是导致坡上部<sup>137</sup>Cs 面积浓度低于坡中部的原因<sup>[16~18]</sup>。因此,坡面的土壤侵蚀是水蚀和耕作侵蚀的共同结果。从图 1 中可以看出,全坡面各样点位置的<sup>137</sup>Cs 浓度并未出现达到或超过川中丘陵区本区域的<sup>137</sup>Cs 本底值 1746 Bq m<sup>-2</sup> (基于 2000 年的 1870 Bq m<sup>-2</sup><sup>[19]</sup>实测值计算)的情况,即在坡面无净堆积发生。

2.2 土壤侵蚀与土壤化学变异的关系

2.2.1 土壤有机质及养分含量在坡面的变异性 土壤有机质、全 N、碱解 N、有效 P、K 含量与顺坡距离呈极显著正相关( $R^2$ 分别为 0.50、0.72、0.77、0.45、0.71,  $P < 0.01$ ),表明顺坡向下,有机质、全 N 及有效养分含量逐渐增加,在坡上、中部损失,在坡脚相对积累(图 2~3),而全 P 以及全 K 含量与其所在坡面位置无明显关系( $R^2$ 分别为 0.07 和 0.01,  $P > 0.1$ ),其含量在全坡面差异不大。方差分析结果(表 1)表明,土壤有机质及养分含量在不同坡段位置之间存在显著差异。全 N、碱解 N、有效 P 和 K 含量在坡顶(0~10m 2 个采样点)、坡腰(20~90m 8 个采样点)、坡脚(100~110m 2 个采样点)之间差异达极显著水平( $P \leq 0.01$ );有机质和全 K 含量在坡顶、坡腰、坡脚之间差异达显著水平( $P < 0.05$ );而全 P 含量在 3 个坡段间无显著差异( $P > 0.05$ )。

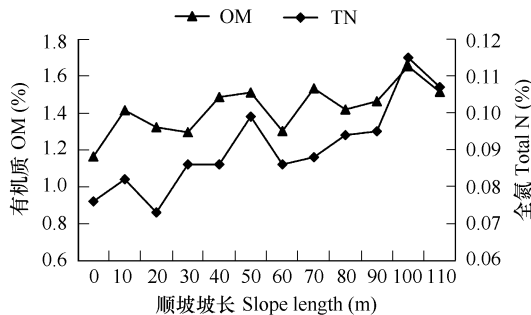


图2 顺坡各点土壤有机质及全 N 含量变化

Fig. 2 Distribution of SOM content and total N along the hillslope

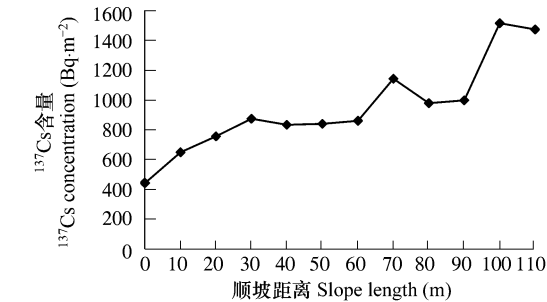


图1 顺坡各样点的<sup>137</sup>Cs 浓度分布

Fig. 1 <sup>137</sup>Cs redistribution in different landscape positions

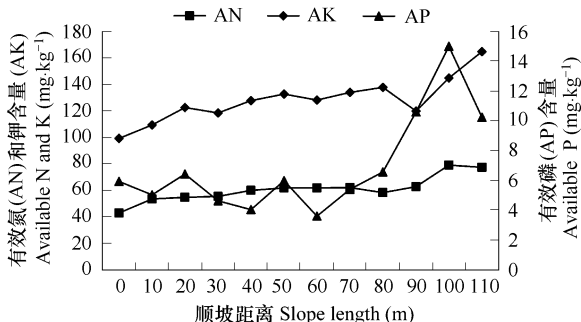


图3 顺坡土壤有效养分含量变化

Fig. 3 Distribution of soil available nutrients along the hillslope

表 1 坡顶、坡腰、坡脚之间化学特性\* 差异方差分析

Table1 Analysis of variance for differences in chemical properties between the upper , middle and lower slope

项目 Item	有机质 OM	全 N Total N	全 P Total P	全 K Total K	碱解 N Available N	有效 P Available P	速效 K Available K
F 值 F value	4.47	25.41	3.92	4.70	32.63	7.65	13.65
显著性 Sig.	0.0445	0.0002	0.0596	0.0400	<0.0001	0.0114	0.0019

\* 下面 the same below

2.2.2 <sup>137</sup>Cs 浓度与土壤化学性质

从<sup>137</sup>Cs 面积浓度分布 (图 1)可知 ,坡上部侵蚀最为强烈 ,相应的有机质含量最低 (图 2) ,只有 1.163%。随着侵蚀程度的减轻 ,从坡顶至坡脚有机质含量基本呈逐步上升趋势 ,在坡脚处有机质含量达到高值 1.653% ,较坡顶高出 42.13%。由此可以看出 ,坡面土壤侵蚀的变化是造成土壤有机质含量变化的主要原因之一。

顺坡各样点有机质含量与<sup>137</sup>Cs 面积浓度呈极显著正相关 ( $R^2 = 0.62$  , $P = 0.0024$ ) ,二者之间有很好的线性关系 (图 4) 。这一结果与草地利用下的侵蚀坡地的研究结果一致<sup>[20]</sup>。全 N 的变化趋势与有机质基本相同 (图 2) ,从坡上部到坡中部 ,全 N 含量逐渐增加 ,在坡脚达到最高值 ,其含量变化与<sup>137</sup>Cs 面积浓度变化同样呈极显著正相关 ( $R^2 = 0.75$  , $P = 0.0003$ ) (图 5) 。与有机质和全 N 类似 ,土壤碱解 N、有效 P 和 K 含量顺坡向下呈增大趋势 (图 3) ,碱解 N、有效 P 和 K 含量与<sup>137</sup>Cs 浓度的相关均已达极显著水平 ( $R^2$  分别为 0.91、0.53 和 0.79 , $P < 0.01$ ) (图 6 ~ 图 8) 。坡面土壤化学特性的变化对土壤侵蚀响应的线性关系是地形、坡面曲率以及人为耕作对土壤再分配综合影响的结果。

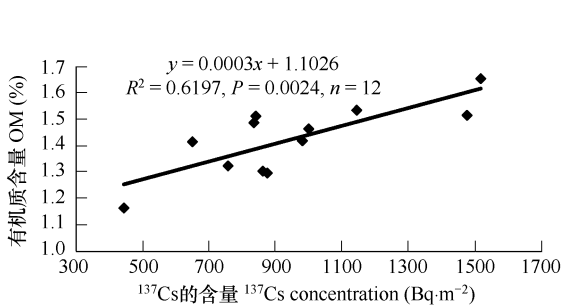


图 4 有机质含量与<sup>137</sup>Cs 浓度的关系

Fig. 4 Relationship of SOM content to <sup>137</sup>Cs inventories on the hillslope

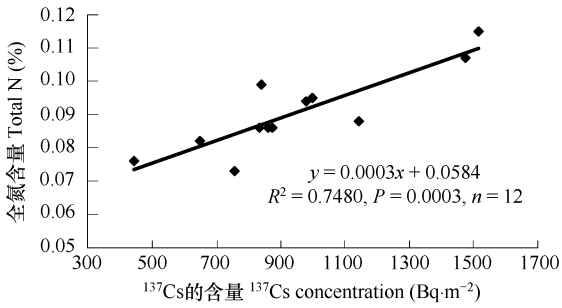


图 5 全 N 含量与<sup>137</sup>Cs 浓度的关系

Fig. 5 Relationship of total N content to <sup>137</sup>Cs inventories on the hillslope

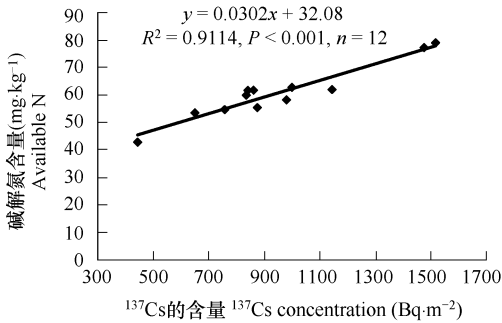


图 6 碱解 N 含量与<sup>137</sup>Cs 浓度的关系

Fig. 6 Relationship of available N content to <sup>137</sup>Cs inventories on the hillslope

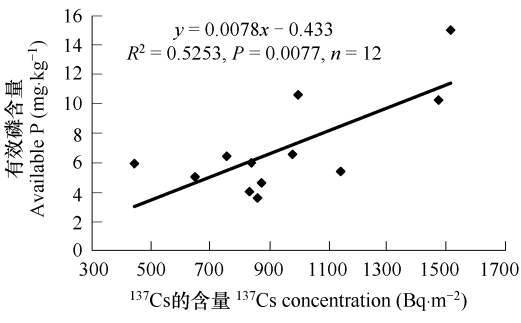


图 7 有效 P 含量与<sup>137</sup>Cs 浓度的关系

Fig. 7 Relationship of available P content to <sup>137</sup>Cs inventories on the hillslope

全 P、全 K 含量在整个坡面变化不大,这是由这两种元素自身特性所决定的。P 素在土壤中迁移很小,很少随径流而损失,而全 K 主要继承紫色土母岩特性,侵蚀部位全 K 含量仍然保持较高水平,因此全坡面全 P、全 K 含量无显著变异。

引起土壤侵蚀的动力因素并非只有降雨所产生的径流,该区农事耕作所导致的土壤位移也是不可忽略的。张建辉等在该区所做耕作侵蚀实验研究表明,耕作侵蚀是坡耕地总土壤侵蚀的主要贡献因子之一<sup>[16~18]</sup>。当地农民传统利用锄头耕地,为省力和方便起见,农民通常向下坡耕作,因而耕过的疏松土壤便发生向下坡方向的移动。这种耕作方式会造成丘顶土层浅薄,而将坡上部松散的耕层土壤带到坡下部,因此,坡面中下部土层厚度往往高于坡面的中上部<sup>[17]</sup>。相应地有机质及各养分含量在坡上部损失,坡下部相对积累。

2.2.3 土壤颗粒与<sup>137</sup>Cs 浓度及土壤养分的关系

土壤细颗粒(即 0.002~0.02mm 粉粒与<0.002mm 粘粒)在坡上部分布较少,顺坡向下其含量逐渐增加,在坡下部富集。<sup>137</sup>Cs 面积浓度与土壤<0.02mm 颗粒和<0.002mm 粘粒含量均呈极显著正相关( $R^2$ 分别为 0.77 和 0.72,  $P<0.01$ )。据有关研究<sup>[20]</sup>指出,坡耕地径流对泥沙的分选作用十分明显,即侵蚀水流携带的泥沙主要以<0.02mm 细颗粒为主,这些细颗粒随着坡下部坡度的降低而逐步沉积,因此土壤<0.02mm 颗粒和<0.002mm 粘粒分布规律呈现顺坡增加的趋势。由于土壤细颗粒易在径流中传输,使得易于被细颗粒所吸附的化学元素呈现与土壤细颗粒类似的空间分布格局。分析结果表明,除<0.002mm 粘粒与有效 P 含量无显著相关性外,<0.02mm 颗粒和<0.002mm 粘粒含量与全 N、碱解 N、有效 P 和 K 含量均呈极显著正相关,而与土壤有机质含量呈显著正相关(表 2)。这个结果反映了有效养分中,有效 P 更倾向分布于较粗颗粒内。

3 结论

川中丘陵区坡耕地总体上土壤侵蚀严重,在坡上部<sup>137</sup>Cs 浓度最低,土壤侵蚀最为严重,坡中部侵蚀逐渐减缓,坡脚仍有土壤侵蚀,但侵蚀强度最弱。除了水蚀的作用外,耕作侵蚀也是川中丘陵区坡耕地不可忽视的侵蚀形式,强烈的人为耕作活动导致坡上部发生最为严重的侵蚀。土壤侵蚀对土壤特性的空间变异性产生深刻影响,土壤细粒在坡上部流失,而在坡下部沉积,<sup>137</sup>Cs 面积浓度与土壤<0.02mm 颗粒和<0.002mm 粘粒含量均呈极显著正相关。同时,水蚀和耕作侵蚀的共同作用造成坡上部土壤养分贫瘠,顺坡向下,土壤侵蚀强度逐步减轻,土壤有机质和养分在坡下部相对积累。土壤有机质、全 N、碱解 N、有效 P、有效 K 在不同坡位之间出现显著差异并且与顺坡距离呈极显著正相关。反映净余土壤再分配速率的<sup>137</sup>Cs 面积浓度与这些土壤理化特性均有密切的相关性。因此,<sup>137</sup>Cs 面积浓度可以作为表征侵蚀坡地土壤综合质量的指标。

References :

[1] Cihacek L J. Effects of erosion on soil chemical properties in the north central region of the United States. Journal of Soil and Water Conservation , 1994 , 49 ( 3 ) : 256 - 265 .

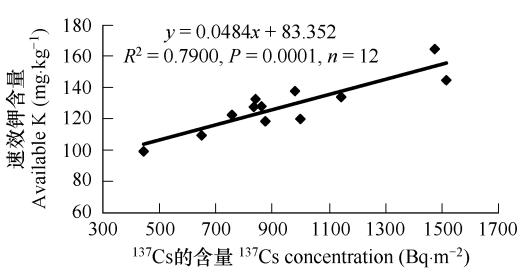


图 8 有效 K 含量与<sup>137</sup>Cs 浓度的关系

Fig. 8 Relationship of available K content to <sup>137</sup>Cs inventories on the hillslope

表 2 土壤颗粒组成与土壤化学性质的相关性

Table 2 Correlations between soil particle size fraction and soil properties

项目 Item	<0.02mm 颗粒	<0.002mm 粘粒	0.002~0.02mm 粉粒
有机质 OM	0.642 *	0.679 *	-0.313
全氮 TN	0.837 **	0.789 **	-0.258
全磷 TP	0.394	0.116	0.278
全钾 TK	0.205	-0.320	0.739 **
碱解氮 AN	0.858 **	0.854 **	-0.335
有效磷 AP	0.785 **	0.478	0.168
速效钾 AK	0.719 **	0.839 **	-0.474

\*  $P<0.05$  ; \* \*  $P<0.01$

[2] Quine T A ,Zhang Y. An investigation of spatial variation in soil erosion ,soil properties ,and crop production within an agricultural field in Devon , United Kingdom. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2002 ,57 :55 –65.

[3] Heckrath G ,Djurhuus J ,Quine T A ,*et al.* Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark ,*Journal of Environmental Quality* ,2005 ,34 :312 –323.

[4] Quine T A ,Walling D E ,Zhang X B. Tillage erosion ,water erosion and soil quality on cultivated terraces near Xifeng in the Loess Plateau , China. *Land Degradation and Development* ,1999 ,10 :251 –274.

[5] Wang Z L ,Shao M A. Effects of tillage erosion on soil nutrients in Loess sloping land of China. *Transactions of the CSAE* ,2002 ,6 :63 –67.

[6] Li Y ,Lindstrom M J ,Zhang J H ,*et al.* Spatial variability of soil quality on hillslopes in the Chinese Loess Plateau ,*Acta Geologica Hispanica* , 2000 ,35 :261 –270.

[7] Wen A B ,Zhang X B ,Wang Y K. A Study on soil erosion rates of the purple slope cultivated land using caesium-137 technique in the Upper Yangtze River Basin. *Journal of Mountain Science* ,2001 ,19 (supplement ) :56 –59.

[8] Zhang J H ,Liu G C ,Ni S J ,*et al.* Anti-scouribility of purple soil on hillslopes with different land uses. *Sciences in China Ser. E.* ,2003 ,46 (Supp. ) :133 –141.

[9] Zhang J H ,Liu G C ,Ni S J ,*et al.* Anti-scouribility of purple soil on hillslopes with different land uses. *Sciences in China Ser. E.* ,2003 ,33 (Supp. ) :61 –68.

[10] Zhang J H ,He Y R ,Tang S J. Spatial variability of soil moisture in the Sichuan Basin. *Chinese Journal of Soil Science* ,1996 ,27 ( 2 ) :61 –63.

[11] Zhang J H ,Li Y. Spatial variability of soil moisture on the Hillslopes ,Southwestern China. *Archives of Agronomy and Soil Science* ,2002 ,48 ( 4 ) :357 –362.

[12] Gong Z T. *Soil Taxonomy in China Theory Method Practice*. Beijing :Academic Press ,1999.

[13] Liu G S ,Jiang N H ,Zhang L D ,*et al.* *Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles*. Chinese Standard Press , Beijing. 1996.

[14] Higgitt D L. The development and application of caesium-137 measurements in erosion investigation. In :Foster I D L ,Gumell A M ,Webb B Weds eds. *Sediment and Water Quality in River Catchments*. Chichester Wiley ,1995 ,287 –305.

[15] Walling D E ,He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from137-Cesium measurements. *Journal of Environment Quality* ,1999 ,28 ( 2 ) :611 –622.

[16] Zhang J H ,Li Y ,Lobb D A ,*et al.* Quantifying tillage translocation and tillage erosion in hilly areas of Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2001 ,15 ( 4 ) :1 –4.

[17] Zhang J H ,Frielinghaus M ,Tian G ,*et al.* Ridge and contour tillage effects on soil erosion from steep hillslopes in the Sichuan Basin ,China. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2004 ,59 ( 6 ) :277 –284.

[18] Zhang J H ,Lobb D A ,Li Y ,*et al.* Assessment for tillage translocation and tillage erosion by hoeing on the steep land in hilly areas of Sichuan , China. *Soil Tillage and Research* ,2004 ,75 :99 –107.

[19] Li M ,Li Z B ,Liu P L ,*et al.* Sediment source identification by using <sup>137</sup>Cs radionuclides in a small catchment of the Sichuan hilly areas. In :Li Zhanbin and Zhang Pingcang ( eds. ) ,*Soil erosion and river silt calamities and their countermeasures of prevention and control*. Henan :Yellow River Water Conservancy Press ,2004. 438 –442.

[20] Zhang J H ,Liu S Z ,Zhong X H. Distribution of soil organic carbon and phosphorus on an eroded hillslope of the rangeland in the northern Tibet Plateau ,China. *European Journal of Soil Science* ,2006 ,57 :365 –371.

[21] Huang L ,Zhang W Y ,Ding S W ,*et al.* Study on soil particle losses of eroded purple field. *Journal of Soil and Water Conservation* ,1999 ,5 ( 1 ) : 35 –39.

参考文献：

[5] 王占礼 邵明安. 黄土坡地耕作侵蚀对土壤养分影响的研究. *农业工程学报* ,2002 ,18 ( 6 ) :63 ~67.

[7] 王安邦 张信宝 王玉宽 等. 长江上游紫色土坡耕地土壤侵蚀<sup>137</sup>Cs 示踪法研究. *山地学报* 2001 ,19 (增) 56 ~59.

[9] 张建辉 刘刚才 倪师军 等. 紫色土不同土地利用条件下的土壤抗冲性研究. *中国科学 E 辑* 2003 ,33 (增刊) 61 ~68.

[10] 张建辉 何毓蓉 唐时嘉. 四川丘陵区土壤湿度的空间变异分析 *土壤通报* ,1996 27 ( 2 ) 61 ~63.

[12] 龚子同. *中国土壤系统分类. 理论·方法·实践*. 北京 :科学出版社 ,1999.

[13] 刘光松 蒋能慧 张连第 等. *土壤理化分析与剖面描述*. 北京 :中国标准出版社 ,1996.

[16] 张建辉 李勇 ,Lobb D A ,等. 我国南方丘陵区土壤耕作侵蚀的定量研究. *水土保持学报* 2001 ,15 ( 2 ) :1 ~4.

[19] 李勉 李占斌 刘普灵 等. 紫色丘陵区小流域侵蚀产沙空间分布的<sup>137</sup>Cs 示踪研究. 见 :李占斌 张平仓主编. *水土流失与江河泥沙灾害及其防治对策*. 河南 :黄河水利出版社 ,2004. 438 ~442.

[21] 黄丽 张光远 丁树文 等. 侵蚀紫色土土壤颗粒流失的研究. *土壤侵蚀与水土保持学报* ,1999 5 ( 1 ) 35 ~39.