

\*\*\*\*\*  
试  
验  
研  
究  
\*\*\*\*\*

# 黄土丘陵区典型峁坡土壤侵蚀空间分异特征

刘佳鑫<sup>1</sup>, 刘普灵<sup>1,2</sup>, 刘 栋<sup>3</sup>, 张宁宁<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所  
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160)

**摘 要:** 选择黄土高原丘陵沟壑区典型峁坡, 采用<sup>137</sup>Cs 示踪技术, 通过对不同坡向和坡位土样<sup>137</sup>Cs 含量的测定, 分析了峁坡<sup>137</sup>Cs 空间分布特征及土壤侵蚀的空间分异。结果表明, 不同坡向峁坡侵蚀差异明显, 各坡向平均侵蚀速率大小依次为: 北坡>西南坡>东北坡>西坡>西北坡>南坡>东南坡>东坡, 各坡向侵蚀强度均表现为强度侵蚀; 峁坡各坡向不同坡位的侵蚀差异也非常明显, 坡下部侵蚀量最大, 坡面中上部次之。侵蚀速率顺坡呈波动变化趋势, 且侵蚀强度表现为中度、强度以及极强度侵蚀, 以强度侵蚀为主。

**关键词:** 黄土峁坡; <sup>137</sup>Cs 示踪; 坡向; 坡位; 土壤侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0001-04

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.015

## Spatial Differentiation of Soil Erosion on Typical Loess Hill Slope in Loess Hilly and Gully Region

LIU Jia-xin<sup>1</sup>, LIU Pu-ling<sup>1,2</sup>, LIU Dong<sup>1,3</sup>, ZHANG Ning-ning<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China)

**Abstract:** The spatial distribution of <sup>137</sup>Cs and the spatial differentiation of soil erosion on typical loess hill slope in the loess hilly and gully region was analyzed by using <sup>137</sup>Cs tracer technique to determine the content of <sup>137</sup>Cs in different slope aspect positions. The results showed that there were obvious differences of erosion between different slope aspects. The order of the average erosion rate was as follows: north slope>southwest slope>northeast slope>west slope>northwest slope>south slope>southeast slope>east slope and all the slopes were characterized by strong erosion. Moreover, the erosion rates in different slope positions of the same slope aspect showed significant differences, the erosion amount in lower part of the slope was the maximum and less in the upper slope. Overall, the erosion rate showed a trend of fluctuations along the slope, and the erosion intensity was mainly characterized by medium, strong and extremely strong and most of them was strong.

**Keywords:** loess hill slope; <sup>137</sup>Cs tracer technique; aspect; slope positions; soil erosion

一般而言,在黄土高原丘陵沟壑区,峁坡不同坡向的土壤特性<sup>[1]</sup>、水分蒸发量和太阳辐射量都存在较大差异,并由此导致各坡面的土壤侵蚀强度和类型也表现出很大差异<sup>[2]</sup>。但在水风蚀交错带,由于地理特征的不同以及风蚀水蚀的叠加作用,峁坡土壤侵蚀的坡向差异更为复杂<sup>[3]</sup>。由于<sup>137</sup>Cs 示踪技术方法应用已经比较成熟,且简便、快速,可以定量评价 20 世纪 60 年代以来的平均土壤侵蚀速率。其原理是利用 20 世纪 50—70 年代大气层核试验所产生<sup>137</sup>Cs 人工同位素在土壤剖面中的残存量,推算自核爆炸以来坡面

土壤侵蚀或沉积量<sup>[4-5]</sup>。因此,通过比较各采样点土壤剖面中<sup>137</sup>Cs 的含量以及流失量,可以对各坡向峁坡不同坡位采样点的土壤流失强度作出对比分析及定量评价,对于防治黄土峁坡土壤侵蚀,合理配置水土保持措施具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市靖边县,地处毛乌素沙地南缘,属于半干旱内陆性季风气候,四季变化明显,

收稿日期:2013-03-26

修回日期:2014-04-09

资助项目:国家自然科学基金项目“黄土丘陵区近十年来典型流域侵蚀环境演变的泥沙响应”(41371281)

作者简介:刘佳鑫(1991—),男(汉族),河北省石家庄市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与土壤侵蚀。E-mail:skzn@foxmail.com。

通信作者:刘普灵(1954—),男(汉族),陕西省蒲城县人,研究员,博士生导师,主要从事核素示踪技术在水土保持与土壤侵蚀等领域的应用研究。E-mail: pliu@ms. iswc. ac. cn。

年平均气温 7.8℃,无霜期 130 d,年平均降水量 395 mm,主要集中在 7—9 月份,冬春季节盛行偏北风,在夏季则以南风、东南风为主,海拔介于 1 123~1 823 m 之间,土质以黄棉土为主,该区域的土壤侵蚀方式主要是水力侵蚀和风力侵蚀。研究对象是位于靖边县天赐湾乡黑疙瘩的典型卯坡,该区以水力侵蚀为主,近 50 a 年的土地利用以耕种为主,2000 年实施了大规模退耕还林还草,现均为退耕地。

## 1.2 样品采集

### 1.2.1 背景值样品的采集

$^{137}\text{Cs}$  示踪技术法研究土壤侵蚀首先要确定  $^{137}\text{Cs}$  的背景值,这直接关系到计算土壤侵蚀速率的准确与否<sup>[6]</sup>。 $^{137}\text{Cs}$  背景值样点选取原则:(1) 无人为的干扰,且地势较平坦,有 40~50 a 未受到沉积或侵蚀的梯田、草地、林地、坟地或者大面积平坦山顶;(2) 各层土壤的比活度不能因为土壤的物理变化过程而发生变化;(3) 要与待测定的侵蚀土壤处于同一区域,并且该区域应该具有相同的土壤因素、地形和降雨量。本研究选择未受扰动的农耕地和离研究区很近的老坟地上进行剖面样的采集,剖面样采用直径 9 cm 的土钻,每隔 5 cm 取一个样,取样深度为 30 cm,总共采集 8 个剖面样作为土壤  $^{137}\text{Cs}$  背景值研究样点。

### 1.2.2 卯坡样点布设及采集

在卯顶正中选取一点为中心,分别以西北到东南、东北到西南为两条坐标轴,从选取的卯顶中心到沟缘线以上以间隔 20 m 的距离,采用网格法进行采样,采样半径为 100 m,每个样点采用直径为 9 cm 土钻垂直打入土中,分 3 层每隔 10 cm 采集一个土样,总的采样深度为 30 cm,卯坡总采集 80 个样点,共计 240 个土样。

## 1.3 样品处理

采集的土壤样品带回实验室后,除去根系、石块以及大颗粒等杂物,剩余土样经阴干(在自然状态下风干)、研磨、过 0.25 mm 筛备用。

## 1.4 样品中 $^{137}\text{Cs}$ 含量的测定

称取约 400 g 待测样品装入  $^{137}\text{Cs}$  样品盒中,并称量样品净重量,然后采用美国 ORTEC 公司生产的 8192 道低本底  $\gamma$  能谱分析仪,测定在 661.6 keV 处  $^{137}\text{Cs}$  全峰面积,全部样品测量时间都为 8 h(28 800 s)。

## 1.5 数据的处理与分析

运用全峰面积法计算  $^{137}\text{Cs}$  浓度值,采用标准样对比法计算样品  $^{137}\text{Cs}$  含量,选取张信宝等的模型<sup>[7]</sup>计算土壤侵蚀速率。所得到的数据,采用 SPSS 进行显著性检验,采用 SAS 进行相关性分析、拟合及回归分析,采用 Excel 进行整理计算和各类图形的绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 卯坡不同坡向 $^{137}\text{Cs}$ 及侵蚀强度的空间变化特征

研究区土壤  $^{137}\text{Cs}$  含量的背景值为 1 567.42 Bq/m<sup>2</sup>,卯坡各坡向不同坡位  $^{137}\text{Cs}$  含量的空间分布如图 1 所示,各坡向不同坡位侵蚀强度的空间分布如图 2 所示。

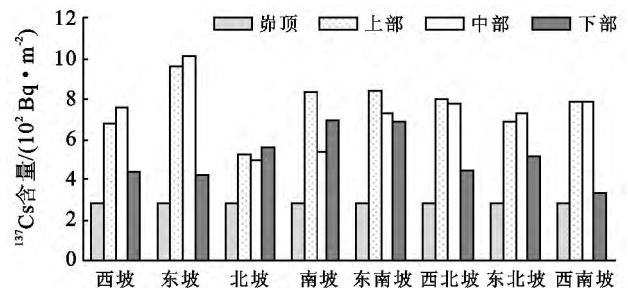


图 1 研究区各坡向不同坡位  $^{137}\text{Cs}$  含量的空间变化

#### 2.1.1 各坡向不同坡位 $^{137}\text{Cs}$ 空间分布特征

将采样点按不同坡向归类统计分析。从表 1 可以看出,在不同坡向上土壤中的  $^{137}\text{Cs}$  含量发生了明显变异,其中各坡向  $^{137}\text{Cs}$  含量变异系数大小依次为:东坡>西南坡>西坡>南坡>西北坡>东北坡>东南坡>北坡。

表 1 研究区不同坡向  $^{137}\text{Cs}$  含量统计特征值

坡向	西坡	东坡	南坡	北坡	东南坡	西北坡	东北坡	西南坡
样点数	4	4	4	4	6	5	6	6
最小值/(Bq·m <sup>-2</sup> )	282.27	282.27	282.27	282.27	282.27	282.27	282.27	282.27
最大值/(Bq·m <sup>-2</sup> )	761.12	1 009.26	831.77	564.29	893.70	812.72	894.56	929.76
全距	478.85	726.99	549.50	282.02	611.43	530.44	612.29	647.49
标准差	221.26	371.01	235.94	126.47	210.77	239.55	219.45	268.97
变异系数/%	40.94	55.37	40.12	27.04	30.83	38.89	36.22	42.86

由图 1 可以看出,土壤中  $^{137}\text{Cs}$  面积活度值与其坡向密切相关,因此坡向的不同对侵蚀程度有较大的

影响。在卯坡各坡向上全部样点  $^{137}\text{Cs}$  面积活度最大值为 1 009.26 Bq/m<sup>2</sup>,最小值为 282.27 Bq/m<sup>2</sup>,平均

为 653.40 Bq/m<sup>2</sup>, 变异系数为 28.89%。显著性检验显示 <sup>137</sup>Cs 面积活度在不同坡向差异显著 ( $p < 0.05$ )。从图 1 中可以明显看出各坡向 <sup>137</sup>Cs 含量总体呈现由坡顶向坡下部先增加后减小的趋势, 北坡和南坡则表现为增—减—增的波动趋势。分析认为各坡向 <sup>137</sup>Cs 的含量产生这种变化特征主要是受到退耕前耕作方式和当地气候因素共同作用的结果。退耕前, 以犁耕为主的耕作措施将坡面上部的土壤向下运移, 各坡向 <sup>137</sup>Cs 面积浓度呈顺坡增加的趋势, 加以当地不同雨型、雨强以及季节盛行风向的不同, 导致不同坡向坡面 <sup>137</sup>Cs 也发生了不同的运移过程, 除此之外, 时有土壤被运移出坡面, 综上所述造成了各坡向不同坡位 <sup>137</sup>Cs 面积浓度呈现出现有的空间分布特征。

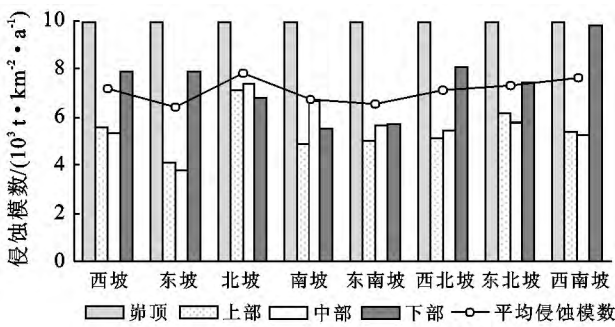


图 2 研究区各坡向不同坡位侵蚀强度的空间变化

2.1.2 坡面侵蚀强度空间变化特征 坡地近 50 a 的土地利用情况以耕地为主, 直到 2000 年才实施了大规模退耕还林还草, 因此选取张信宝等的模型<sup>[7]</sup>计算土壤侵蚀速率, 估算各坡向坡面不同采样点的土壤净流失强度。由图 2 可见, 北坡与南坡从卯顶到坡下

部表现为强—减弱—增强—再减弱的波动趋势, 其余各坡向均表现为强—减弱—增强的趋势, 各坡面侵蚀强度具有不均一性。卯顶侵蚀最为剧烈, 这与其所处位置受风力侵蚀、水力侵蚀以及人为耕作因素有关, 而各个坡面的波动性除与人为耕作措施(犁耕)有关外<sup>[8]</sup>, 一方面可能与径流挟沙能力的变化有关, 当坡面径流含沙量趋于饱和时, 其挟沙能力下降, 导致泥沙沉积, 而当径流泥沙量减少到一定程度时其挟沙能力又会增加, 导致泥沙的搬运, 尤其是在坡长较长时这种波动变化会更加明显, 另一方面与研究区域所处地带的季节性风向差异有关, 各坡向所受风力的影响不同, 坡面发生的侵蚀、搬运、沉积、和输移也不同, 此外也可能与降雨类型、坡面坡度以及坡长有关。我国有不少学者的研究都证实了坡面侵蚀强度具有波动性的变化特点<sup>[9-11]</sup>。

2.2 卯坡土壤侵蚀的坡向变化及坡位差异

2.2.1 土壤侵蚀的坡向变化 对 8 个坡向土壤中 <sup>137</sup>Cs 含量进行了方差分析(表 2)。由表 2 可知, 其概率值  $p = 0.0124 < 0.05$ , 因此, 不同坡向土壤中 <sup>137</sup>Cs 含量值呈现显著差异。

各坡向土壤平均侵蚀速率变化趋势与 <sup>137</sup>Cs 平均流失量一致。由表 3 可知, 其中平均侵蚀速率最大的是北坡, 达到 7 804 t/(km<sup>2</sup> · a), 最小的是东坡, 为 6 396 t/(km<sup>2</sup> · a), 各坡向均表现为强度侵蚀。

表 2 不同坡向土壤中 <sup>137</sup>Cs 含量方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	概率值 P
坡向	141 398.24	7	20 199.748 9	21.57	0.012 4

表 3 各坡向 <sup>137</sup>Cs 流失率及土壤侵蚀速率

坡向	坡度/(°)	坡长/m	土地类型	<sup>137</sup> Cs 平均流失率/%	平均侵蚀速率/(t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	侵蚀强度级别
西坡	8~12	90	退耕地	75.98	7 173.6	强度侵蚀
东坡	10~15	90	退耕地	70.22	6 396.4	强度侵蚀
北坡	8~14	90	退耕地	79.21	7 804.0	强度侵蚀
南坡	6~10	90	退耕地	73.86	6 734.6	强度侵蚀
东南坡	8~12	100	退耕地	71.82	6 562.2	强度侵蚀
西北坡	9~15	100	退耕地	74.43	7 115.2	强度侵蚀
东北坡	8~15	100	退耕地	75.35	7 307.5	强度侵蚀
西南坡	8~10	100	退耕地	75.68	7 604.0	强度侵蚀

北坡 <sup>137</sup>Cs 平均流失量比南坡大 5.35%, 平均侵蚀速率比南坡大 15.9%, 南北坡的这种差异与黄土丘陵区其它地区刚好相反<sup>[12]</sup>, 分析认为除了南北坡坡面差异的影响外, 主要是因为冬春季节风蚀的坡向差异所致。此研究区域在冬春季节盛行偏北风, 各坡面地表干燥且作物覆盖少, 北坡前方为开阔地, 使得

北风长驱直入, 因此北坡风蚀严重, 而南坡处于背风坡, 风蚀较轻微, 偶有少量风沙的沉积; 在夏季, 大风天气多为雨前阵风, 持续时间短, 且该季节土壤含水量较高, 因此风蚀不是十分严重。同时, 南北坡面均为退耕地, 虽坡度与坡面状况有所差异, 但差异较小, 加上该区域相对高差较小, 地形对降雨量的分布影响

不会很大, 综上所述认为, 南北坡水力侵蚀强度差距不大。据此可以推断该研究区域侵蚀强度的差异主要来源于冬春季节风蚀的影响。

西北坡<sup>137</sup>Cs 平均流失量比东南坡大 3.15%, 平均侵蚀速率比东南坡大 8.4%, 这种差异与研究区内南北坡差异具有相同的因素, 即本研究区各坡面侵蚀中风蚀占据了一定比例。

东坡<sup>137</sup>Cs 平均流失速率及平均侵蚀速率均最小, 这是由于东坡上布设有鱼鳞坑, 并栽种了人工林, 有效地防止了雨滴击溅侵蚀与地表径流的侵蚀, 因而东坡在各个坡向中所受到的侵蚀强度最小。

2.2.2 土壤侵蚀的坡位差异 分析可知, 不同坡向的土壤侵蚀速率存在显著差异, 由表 4 可以看出, 即使是同一坡向的坡顶、上中下不同坡位, 其侵蚀速率差异非常显著( $p < 0.01$ )。

由图 3 可以看出, 各坡向不同坡位<sup>137</sup>Cs 流失率, 坡顶值最高, 可达 87.5%, 侵蚀速率也达到最大 9 914 t/(km<sup>2</sup>·a), 这与坡顶所处地形受风蚀、水蚀以及人为活动影响严重有关; 在相同坡位不同坡向上, 坡坡的上中下各部之间<sup>137</sup>Cs 流失量也存在较大差异。从坡向上来看, 西坡、东坡、东北坡、西南坡断面<sup>137</sup>Cs 流失量呈先减少后增加的趋势; 东南坡和西北坡则是增长型; 北坡和南坡是先增加后减小的趋势。西坡、东坡、西北坡、东北坡、西南坡下部侵蚀明显大于中上部; 北坡与东南坡全坡面侵蚀非常严重, 坡位差异不太明显; 南坡坡中部<sup>137</sup>Cs 流失量大于下部和上部, 且下部略大于上部。总之, 各坡向上除坡顶外, 坡中下部侵蚀量较大, 中上部次之。分析认为形成这种空间差异的原因是由于在水蚀情况下, 一定的坡长范围内随着从坡顶到坡脚径流水深逐渐的增加, 侵蚀量呈现为波动式的增加趋势<sup>[13-15]</sup>, 有国内学者<sup>[16]</sup>研究表明, 对于雨强  $I_{30} \geq 25$  mm 的降雨, 在小于 100 m 坡长上侵蚀量、径流量均较大, 所以各坡向都表现为下部的侵蚀程度最为严重。北坡全坡面均侵蚀严重是因为除受到水蚀作用外, 还受到冬春季节强烈的风蚀影响; 西坡、东坡、西北坡、西南坡、东北坡下部侵蚀量大于中上部, 是因为退耕以后地表覆盖度较低, 而使坡面的径流侵蚀动能, 在一定的坡长范围内沿坡长呈现逐渐增加的趋势, 从而导致坡面底部侵蚀量和侵蚀动能最大; 南坡中部侵蚀量大于下部和上部, 且坡面下部略大于上部是因为其中部筑有地埂, 从而阻断且拦蓄坡面的部分泥沙和径流, 对水蚀的发生和发展起到了减缓、抑制的作用, 并且冬春季南坡处于背风坡有少量风沙发生沉积。

表 4 不同坡位土壤侵蚀速率方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	概率值 P
坡位	1 193 966.3	3	397 988.757	26.88	<0.000 1

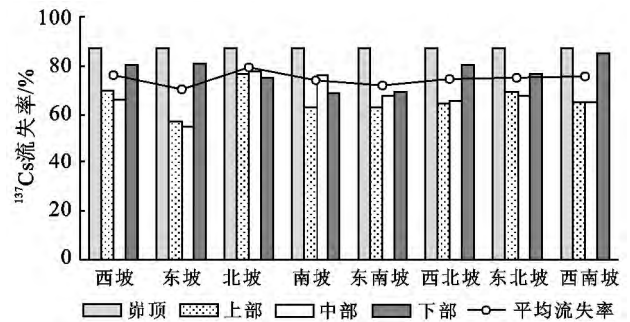


图 3 研究区各坡向不同坡位<sup>137</sup>Cs 流失率的变化

### 3 结论

(1) 所选各坡向的侵蚀强度差异明显, 各坡向平均侵蚀量大小依次为: 北坡 > 西南坡 > 东北坡 > 西坡 > 西北坡 > 南坡 > 东南坡 > 东坡, 北坡侵蚀强度是东坡侵蚀强度的 1.2 倍, 且各坡向侵蚀强度均表现为强度侵蚀。南北坡侵蚀差异与黄土丘陵区其他地区相反, 与该区域风蚀、水蚀叠加的特殊侵蚀外营力有关。坡坡各坡向不同坡位的侵蚀差异也非常明显, 坡下部侵蚀量最大, 坡面中上部次之, 侵蚀速率顺坡呈波动变化趋势。

(2) 不同坡面相同部位侵蚀强度的比较规律性较差。各坡向的上、中部, 北坡的侵蚀强度最大, 东坡的侵蚀强度最小, 底部西南坡的侵蚀强度最大, 南坡侵蚀强度最小。其原因有待进一步深入研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张超, 王会肖. 黄土高原丘陵沟壑区土壤水分变化规律的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 47-50.
- [2] 林超, 李昌文. 阴阳坡在山地地理研究中的意义[J]. 地理学报, 1985, 40(1): 20-28.
- [3] 王占礼, 邵明安. 黄土高原典型地区土壤侵蚀共性与特点[J]. 山地学报, 2001, 19(1): 87-91.
- [4] 齐孟文, 王琳. 土壤侵蚀<sup>137</sup>Cs 法原理及其常用模型[J]. 中国水土保持, 2004(7): 16-18.
- [5] Ritchie J C, Spraberry J A, Mc Henry J R. Estimating soil erosion from the redistribution of fallout <sup>137</sup>Cs[J]. Soil Science Soc. Am. Proc. [J]. 1974, 38(1): 137-139.
- [6] 刘志强, 杨明义, 刘普灵, 等. 确定<sup>137</sup>Cs 背景值所需的采样点数与采样面积[J]. 核农学报, 2009, 23(3): 482-486.
- [7] 张信宝, 李少龙, Quine T A, 等. 犁耕作用对<sup>137</sup>Cs 法测算农耕地土壤侵蚀量的影响[J]. 科学通报, 1993, 38(22): 2072-2076.

(下转第 10 页)

- ron Earth Sci., 2010, 60(6):1179-1187.
- [9] Ali B. Estimation of soil losses by USLE model using GIS at Mashhad plain, Northeast of Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2012, 15(11):47-57.
- [10] Jinchi Z, Donald D A, Jiayao Z. Theory and Practice of Soil Loss Control in Eastern China [M]. New York: Springer, 2011:101-113.
- [11] Pavel Y G, Sergiy V I. Regional Aspects of Climate-Terrestrial-Hydrologic Interactions in Non-boreal Eastern Europe [M]. Netherlands: Springer, 2009: 191-199.
- [12] 王海燕, 雷相东, 张会儒, 等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 11-16.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010:14-110.
- [14] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool, theoretical documentation [M]. College Station: Texas Water Resources Institute, 2000.
- [15] 高敏. 三峡库区紫色土小流域土壤可蚀性  $K$  值研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [16] 王礼先. 林业生态工程学[M]. 北京, 中国林业出版社, 2000.
- [17] 邵方丽, 余新晓, 杨志坚, 等. 北京山区典型森林土壤的养分空间变异与环境因子的关系[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4):581-590.
- [18] 朱立安, 李定强, 魏秀国, 等. 广东省土壤可蚀性现状及影响因素分析[J]. 亚热带水土保持, 2007, 19(4):4-7.
- [19] 岑奕, 丁文峰, 张平仓. 华中地区土壤可蚀性因子研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10):66-68.
- [20] 张明礼, 杨浩, 邹军, 等. 北方土石山区土壤侵蚀对土壤质量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):218-221.
- [21] 金雁海, 柴建华, 朱智红. 内蒙古黄土丘陵区次降雨条件下坡面土壤侵蚀影响因子研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6):192-194.
- [22] 朱明勇, 谭淑端, 顾胜, 等. 湖北丹江口水库库区小流域土壤可蚀性特征[J]. 土壤通报, 2010, 41(2):434-436.
- [23] 周璟, 张旭东, 何丹, 等. 小流域土壤可蚀性的空间变异及其在不同土地类型下的比较[J]. 土壤通报, 2011, 42(3):715-720.
- [24] 刘玲, 王海燕, 杨晓娟, 等. 不同密度长白落叶松天然林土壤有机碳及养分特征[J]. 东北林业大学, 2013, 41(2):51-55.
- [25] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [26] 刘旦旦, 王健, 尹武君. 天然降雨对黄土坡地土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 节水灌溉, 2011(8):17-24.
- [27] 贾宏文. 降雨与土壤养分流失关系分析[J]. 水土保持应用技术, 2007(1):21-23.
- [28] 张燕, 张洪, 彭补拙, 等. 不同土地利用方式下农地土壤侵蚀与养分流失[J]. 水土保持通报, 2003, 23(2):23-26.

(上接第 4 页)

- [8] Martz L W, De Jong E. Using Caesium-137 and landform classification to develop a net soil erosion budget for a small Canadian prairie watershed [J]. Catena, 1991, 8(1):289-308.
- [9] 武春龙, 刘普灵, 郑世清, 等. 坡面土壤侵蚀垂直分布定量分析研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2):34-40.
- [10] 李勇, 张建辉, 杨俊诚, 等. 陕北黄土高原陡坡耕地土壤侵蚀变异的格局[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 17-21.
- [11] 杨明义, 田均良, 刘普灵, 等.  $^{137}\text{Cs}$  测定法研究不同坡面土壤侵蚀空间的分布特征[J]. 核农学报, 1999, 13(6):368-372.
- [12] 陈浩, 方海燕, 蔡国强, 等. 黄土丘陵沟壑区沟谷侵蚀演化的坡向差异: 以晋西王家沟小流域为例[J]. 资源科学, 2006, 28(5):176-184.
- [13] 华绍祖. 黄河中游实验小流域的土壤侵蚀及水土保持效益[C]//国际土壤学术讨论会论文集. 北京:1982.
- [14] 刘普灵, 武春龙, 琚彤军, 等. 稀土元素示踪法在坡面土壤侵蚀垂直分布研究中的应用[J]. 水科学进展, 2001, 12(3):331-335.
- [15] 庄舜尧, 吴春艳, 杨浩, 等. 红壤侵蚀沉积点 $^{137}\text{Cs}$ 垂直剖面分布特征[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2):65-67.
- [16] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.