

# 沂蒙山区不同抽样密度对土壤侵蚀因子估算精度的影响

齐斐<sup>1</sup>, 苏新宇<sup>1</sup>, 黎家作<sup>2</sup>, 胡续礼<sup>3</sup>, 刘霞<sup>1</sup>, 张春强<sup>2</sup>, 邢先双<sup>4</sup>, 丁鸣鸣<sup>5</sup>

(1. 江苏省水土保持与生态修复重点实验室/南方现代林业协同创新中心/南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037; 2. 淮河水利委员会淮河流域水土保持监测中心站, 安徽 蚌埠 233001; 3. 水利部淮河水利委员会水土保持处, 安徽 蚌埠 233001; 4. 山东省水文局, 山东 济南 250012; 5. 南京市水务局, 江苏 南京 210036)

**摘要:** [目的] 探讨分层系统抽样方法下不同抽样密度对土壤侵蚀因子估算精度的影响, 为区域水土流失动态监测抽样方法和抽样密度的选取提供数据支撑。[方法] 以沂蒙山泰山国家级重点治理区蒙阴县为对象, 基于 2013 年 SPOT5 遥感影像和 1:1 万地形图, 采用人机交互解译、野外调查、统计分析等方法, 以全县土壤侵蚀因子为基准值, 对 1% 和 4% 密度土壤侵蚀因子进行精度评价。[结果] ① 1% 抽样密度下,  $S, E, K$  因子相对误差较大, 分别为 33.48%, 23.46%, 20.64%, 主要受坡度、土地利用和土壤类型影响;  $L, B, T$  相对误差均小于 11%; 六者平均 14.44%。② 4% 抽样密度下,  $E, K, B$  相对误差较大, 分别为 15.07%, 13.94% 和 10.69%, 主要受土地利用和土壤类型影响;  $L, S, T$  相对误差均小于 10%; 六者平均 7.89%。③ 以栅格计算法结果为基准值, 采用单元插值外推法推算全县水土流失面积, 1% 密度下水土流失面积比偏高 19.73%, 4% 密度下水土流失面积比偏高 11.77%。[结论] 蒙阴县 1% 和 4% 密度各因子均有不同程度的精度损失, 并对水土流失估算结果造成一定影响, 在区域水土流失动态监测过程中可根据需求选取合适的抽样密度。

**关键词:** 抽样密度; 精度损失; 相对误差; CSLE 模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)02-0179-05

中图分类号: S157

**文献参数:** 齐斐, 苏新宇, 黎家作, 等. 沂蒙山区不同抽样密度对土壤侵蚀因子估算精度的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 179-183. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.029; Qi Fei, Su Xinyu, Li Jiazuo, et al. Effects of sampling densities on estimation precision of soil erosion factors in Yimeng mountain area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 179-183.

## Effects of Sampling Densities on Estimation Precision of Soil Erosion Factors in Yimeng Mountain Area

Qi Fei<sup>1</sup>, Su Xinyu<sup>1</sup>, Li Jiazuo<sup>2</sup>, Hu Xuli<sup>3</sup>,

Liu Xia<sup>1</sup>, Zhang Chunqiang<sup>2</sup>, Xing Xianshuang<sup>4</sup>, Ding Mingming<sup>5</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration,

Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Forestry College of Nanjing

Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. Monitoring Center Station of Soil and Water Conservation,

Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu, Anhui 233001, China; 3. Soil and Water Conservation Division of Huaihe River Commission of Water Resources Ministry, Bengbu, Anhui 233001, China; 4. Hydrographic Office of Shandong Province, Ji'nan, Shandong 250002, China; 5. Nanjing Water Bureau, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

**Abstract:** [Objective] In order to provide data support for sampling method and sampling density selection in regional dynamic monitoring of soil erosion, the influence of sampling densities on estimation precision of soil erosion factors was studied. [Methods] The paper took Mengyin County, in the Yimeng and Tai Mountains national key control areas, as the research object to calculate the precision loss of soil erosion factors estimation under 1% and 4% sampling densities. The precision loss of soil erosion factors estimation under 1% and 4% sampling densities, compared to the soil erosion factors of the county was evaluated by human-computer interaction interpretation, field investigation and statistical analysis, based on the SPOT5 remote sensing

收稿日期: 2018-07-07

修回日期: 2018-10-14

资助项目: 全国水土流失动态监测与公告项目“淮河流域国家级重点防治区水土流失动态监测”(HWSBJ201302), “山东省省级重点治理区水土流失动态监测项目”(SWJ201601); 国家自然科学基金项目(31070627); 江苏省高校优势学科建设工程项目

第一作者: 齐斐(1989—), 女(汉族), 山东省淄博市人, 博士研究生, 研究方向为水土保持监测与评价。E-mail: qiyuyao@163.com。

通讯作者: 刘霞(1971—), 女(蒙古族), 山东省菏泽市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持监测与评价方面的研究。E-mail: liuxia@njfu.edu.cn。

images in 2013 and 1 : 10 000 topographic maps. [Results] ① Under the 1% sampling density, the relative errors of *S*, *E* and *K* factors were 33.48%, 23.46% and 20.64% respectively, which are mainly influenced by slope, land use and soil types, while the relative errors of *L*, *B* and *T* factors were less than 11%. The average relative error of soil erosion factors was 14.44% in the field investigation units. ② Under the 4% sampling density, the relative errors of *E*, *K* and *B* factors were 15.07%, 13.94% and 10.69% respectively, which were mainly affected by land use and soil types, while the relative errors of *L*, *S* and *T* factors were less than 10%. The average relative error of soil erosion factors in the field survey units was 7.89%. ③ The results calculated by the element interpolation extrapolation method under the two sampling densities were higher than that of the grid calculation method. The area of soil erosion under the 1% sampling density was 19.73% higher than that of the grid calculation method, and under the 4% sampling density, it was 11.77% higher. [Conclusion] The 1% and 4% density factors of Mengyin County had different degree of precision loss, which had a certain influence on the results of soil erosion estimation. In the process of dynamic monitoring of regional soil erosion, the appropriate sampling density can be selected according to the demand.

**Keywords: sampling densities; precision loss; relative error; CSLE model**

土壤侵蚀调查是分析影响土壤侵蚀发生发展过程的自然和人为因素,确定土壤侵蚀现状与治理状况的重要基础工作,为综合评价土壤侵蚀发生的强度、分布及其影响因子提供数据支撑,并为开展土壤侵蚀防治提供依据<sup>[1-2]</sup>。目前,区域土壤侵蚀调查常用的方法有抽样调查法、经验模型法、综合评判法等<sup>[3-7]</sup>。在第一次全国水利普查水土保持普查中,我国首次采用分层系统抽样调查与 CSLE 模型相结合的方法,开展水土流失调查,在确定抽样密度和布设野外单元的基础上,对土地利用、植被覆盖、水土保持措施等因素开展调查,为 CSLE 模型计算提供数据支撑<sup>[8-12]</sup>。为研究不同抽样密度对土壤侵蚀因子的影响,赵维军等<sup>[13]</sup>以陕北黄土区吴起县为例,对比分析了 4%, 1%, 0.25%, 0.062 5% 调查数据和全县数据在土地利用、坡度及坡长因子等方面的精度损失,认为采用 1% 和 4% 各因子分布相似度均在 95% 以上;而邹丛荣、张洪达等<sup>[14-15]</sup>则分别在沂蒙山区蒙阴县和沂水县对不同抽样密度对土壤侵蚀估算结果的影响进行研究,发现采用单元外推法估算,1% 和 4% 密度下水土流失面积有较大差异。由此可知,受土地利用、地形地貌、人为活动等实际生产条件状况影响,在不同区域,抽样密度差异会影响土壤侵蚀因子精度损失特征,进而影响区域水土流失动态监测成果精度。因此,开展区域不同抽样密度下土壤侵蚀因子的精度损失,对区域水土流失动态监测抽样密度和抽样方法的选取具有十分重要的意义。本文以沂蒙山区蒙阴县为对象,进一步探讨 1%, 4% 抽样密度下水土流失影响因子和 CSLE 模型因子估算的精度损失,从而为区域水土流失动态监测野外抽样密度和抽样方法的选取提供数据支撑,为探索高效率、高精度、高信息化的野外调查方法提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

蒙阴县位于山东省中南部、沂蒙山区北部,面积 1 590.42 km<sup>2</sup>,属典型的北方土石山区。境内海拔 131~1 105 m,主要为低山丘陵,山丘区占 97.77%;岩石多为石灰岩和页岩,土壤主要有粗骨土、棕壤、褐土、红黏土;属暖温带季风大陆性气候,多年平均气温 12.8 ℃,多年平均降水量 700 mm,降水主要集中在 6—8 月;属淮河流域沂河水系,有梓河、东汶河、蒙河等三条较大的河流,以及山东省第二大水库云蒙湖;植被属暖温带落叶阔叶林区,现多为人工植被,防护林树种主要有侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*),经济林树种主要有桃(*Amygdalus persica*)、苹果(*Malus pumila*)、核桃(*Juglans regia*)等,自然灌木与草本植物主要有黄荆(*Vitex negundo*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据源与处理 遥感影像采用 SPOT 6 影像,1.5 m,2013 年 4 月,通过人机交互解译获取土地利用数据<sup>[14]</sup>;地形数据资料采用 1 : 1 万地形图,生成 10 m 栅格 DEM;降雨数据采用沂蒙山区 88 个雨量站点,1980—2010 年日降雨资料,筛选 12 mm 侵蚀性降雨;土壤数据采用山东省 1 : 50 万土壤图,裁剪获取蒙阴县土壤类型分布。

1.2.2 野外调查单元布设与数据采集 以第一次全国水利普查水土保持普查布设的 1% 抽样密度即 14 个野外调查单元为基础,采用分层系统抽样方法<sup>[9-11]</sup>,将山丘区(97.77%)的抽样密度增加至 4%,共布设野外调查单元 62 个。调查单元空间分布如图 1 所示。基于 ArcGIS,叠加 Spot 6 影像、调查单元边

界、1:1 万地形图等基础数据,获得野外调查单元底图,勾绘地块边界并编号。野外调查时按地块顺序采集土地利用、郁闭度、盖度、工程措施及质量、生物措施、耕作措施等数据信息<sup>[9-11]</sup>。



注:4%抽样单元包含1%抽样单元。

图 1 蒙阴县野外调查单元分布

1.2.3 因子计算与土壤侵蚀估算 土壤侵蚀估算采用 CSLE 模型<sup>[16]</sup>:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: $A$ ——土壤流失量 $[(t)/(hm^2 \cdot a)]$ ;  $R$ ——降雨侵蚀力 $[(MJ)/(hm^2 \cdot mm \cdot h \cdot a)]$ ,基于 1980—2010 年沂蒙山区 88 个雨量点日降雨数据,采用逐日雨量公式法通过普通 Kriging 插值获取<sup>[17-18]</sup>;  $K$ ——土壤可蚀性 $[(t \cdot hm^2)/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm \cdot h)]$ ,通过野外采集土壤样品,采用 Williams 模型计算,并根据沂蒙山区径流小区数据修正<sup>[18]</sup>;  $L, S$ ——坡长因子(无量纲)和坡度因子(无量纲),利用 1:1 万地形图,采用刘宝元修正算法计算<sup>[18]</sup>;  $B, E, T$ ——水土保持措施因子(无量纲),分别指生物措施、工程措施、耕作措施,参考第一次全国水利普查水土保持情况普查措施因子值,采用径流小区数据修正<sup>[18]</sup>。

县域土壤侵蚀估算分别采用单元插值外推法、栅格算法<sup>[14-15]</sup>。为更好地进行比较分析,故以最接近县域情况的栅格算法结果为基准值。单元插值外推法是根据单元内 CSLE 因子图层计算土壤侵蚀状况,分别对 1%和 4%抽样密度下轻度及其以上各级土壤侵蚀强度面积比和水土流失面积比,采用普通 Kriging 插值,获取县域土壤侵蚀状况。栅格算法则以县域土地利用图层为基础,进行  $B, E, T$  因子赋值并转成 10 m 栅格,结合县域  $R, K, L, S$  因子图层,计算土壤侵蚀状况。

### 1.3 精度损失分析与评价

采用测量学绝对误差和相对误差的概念,以全县  $K, L, S, B, E, T$  均值、土壤类型、坡度、土地利用类型、水土流失面积比等数据为基准值,将 1%,4%抽样密度数据与基准值进行比较,从而得到两种抽样密度下各因子数据的精度损失及差异程度。其计算公式为:

$$\Delta_{ij} = A_{ij} - A_{i0} \quad (2)$$

$$\delta_{ij} = \Delta_{ij} / A_{i0} \times 100\% \quad (3)$$

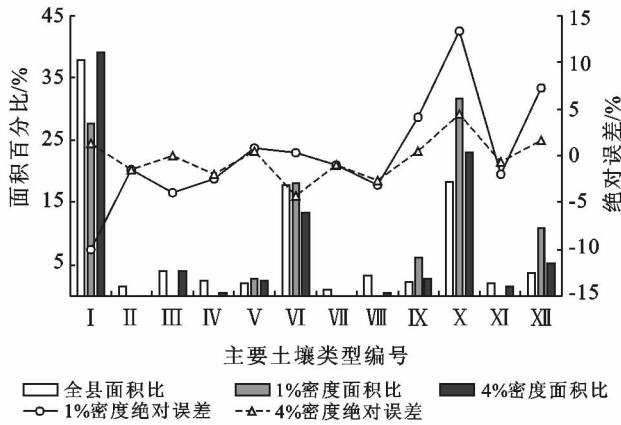
式中: $\Delta_{ij}$ ——不同密度下某因子绝对误差,即精度损失值; $\delta_{ij}$ ——相对误差(%)代表不同密度下某因子与全县基准值差异程度; $A_{ij}$ ——不同抽样密度下某因子均值; $A_{i0}$ ——全县某因子均值,作为基准值; $i=1,2,3,\dots$ ,分别代表各模型因子、土壤类型、坡度、土地利用类型面积等数据; $j=1,2$ ,分别代表 1%和 4%抽样密度。

其中,以各因子栅格数据为基础,采用面积加权平均法统计其均值。根据已有研究<sup>[18]</sup>,采用野外复核验证和专家经验法对土地利用、林草植被覆盖度和土壤侵蚀强度进行精度验证,土地利用总体精度为 91%,植被覆盖度提取精度为 87%,土壤侵蚀强度符合度为 86%。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤可蚀性因子 $K$ 估算精度损失

蒙阴县土壤类型有 22 种,以酸性粗骨土(I)为主,其次为红黏土(VI)和石灰岩钙质粗骨土(X);1%抽样密度涉及 7 种土壤类型,以酸性粗骨土和石灰岩钙质粗骨土为主,其次为红黏土和洪冲积潮棕壤(XII);4%抽样密度涉及 14 种土壤类型,以酸性粗骨土为主,其次为石灰岩钙质粗骨土和红黏土。全县主要土壤类型数量特征如图 2 所示,由左往右  $K$  值逐渐升高。1%抽样密度下精度损失最高达 13.80%,为  $K$  较高的石灰岩钙质粗骨土,其次为  $K$  较低的酸性粗骨土(-10.08%)和  $K$  较高的洪冲积潮棕壤(7.19%),其余各种土壤类型精度损失均小于 5%;4%抽样密度下,各种土壤类型精度损失均小于 5%,其中石灰岩钙质粗骨土精度损失最大(4.53%)。受调查单元土壤类型的影响,以蒙阴县  $K$  均值为基准 $[0.0113(t \cdot hm^2)/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm \cdot h)]$ ,1%密度下  $K$  均值  $0.0136(t \cdot hm^2)/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm \cdot h)$ ,相对误差 20.64%;4%抽样密度下  $K$  均值为  $0.0129(t \cdot hm^2)/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm \cdot h)$ ,相对误差 13.94%。因此,与全县基准值相比,虽然两种抽样密度下主要土壤类型基本保持一致,但涵盖土壤类型数量有明显差别,且对  $K$  造成了重要影响。



注: I 酸性粗骨土; II 基性岩类中性粗骨土; III 砂质非灰性河潮土; IV 棕壤; V 麻砂棕壤性土; VI 红黏土; VII 灰质褐土性土; VIII 灰质淋溶褐土; IX 黏质中层灰质淋溶褐土; X 石灰岩钙质粗骨土; XI 红土; XII 洪冲积棕壤。

图2 蒙阴县主要土壤类型估算精度损失

## 2.2 坡度因子(S)、坡长因子(L)估算精度损失

蒙阴县  $L$  均值为 1.082, 而 1% 和 4% 抽样密度下  $L$  均值为 1.111, 相对误差仅 2.67%, 与全县基本保持一致。由图 3 可知, 从坡度来看, 全县以平缓坡为主, 其次为斜坡、中等坡和陡坡, 平均坡度  $8.86^\circ$ ; 1% 抽样密度以平缓坡、斜坡和陡坡为主, 其次为中等坡, 平均坡度  $12.06^\circ$ ; 4% 抽样密度以平缓坡和斜坡为主, 其次为中等坡和陡坡, 平均坡度  $9.66^\circ$ 。1% 抽样密度下, 平均坡度相对误差 36.57%, 平缓坡和陡坡的精度损失较大, 分别为  $-16.82\%$  和  $11.53\%$ ; 4% 抽样密度下, 平均坡度相对误差 11.74%, 平缓坡精度损失最大, 为  $-9.33\%$ , 其余均小于 5%。从坡度因子来看, 蒙阴县  $S$  均值 3.031, 1% 抽样密度  $S$  均值为 4.046, 相对误差 33.48%; 4% 抽样密度  $S$  均值为 3.274, 相对误差 8.03%。因此, 1% 和 4% 抽样密度  $S$  均偏高, 但 4% 密度精度损失相对较小。

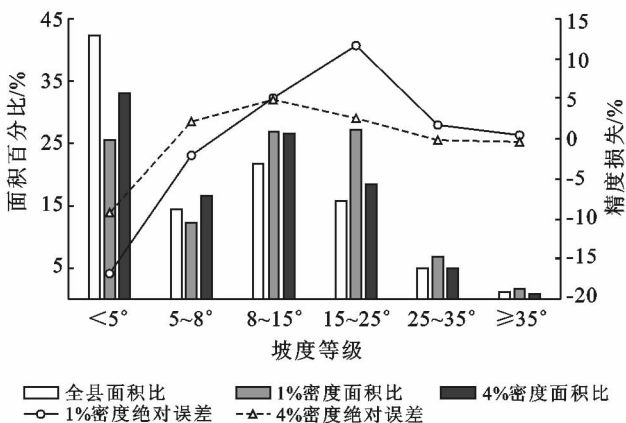
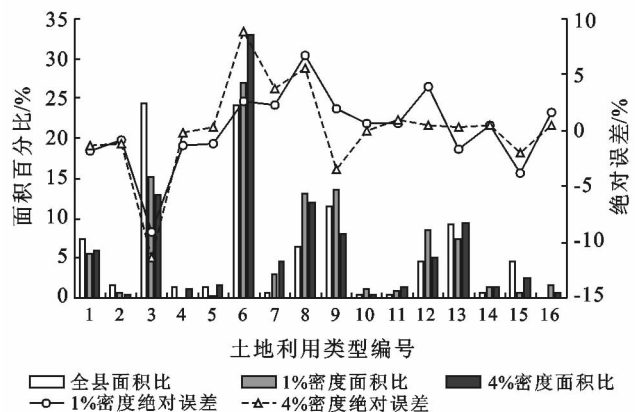


图3 蒙阴县坡度估算精度损失

## 2.3 生物、工程及耕作措施因子(B,E,T)精度损失

$B, E, T$  与土地利用类型和水土保持措施状况有密切关系。由图 4 可知, 从土地利用类型来看, 蒙阴县土地利用以旱梯田、梯田果园为主, 其次为防护林。1% 抽样密度下, 以梯田果园为主, 其次为旱梯田、用材林和防护林; 各土地利用类型精度损失均小于 10%, 旱梯田精度损失最大, 为  $-9.04\%$ , 其次为用材林损失  $6.79\%$ , 其余各土地利用类型精度损失均小于 5%。4% 抽样密度下, 以梯田果园为主, 其次为旱梯田和用材林; 其中旱梯田精度损失最大为  $-11.46\%$ , 其次为梯田果园和用材林, 分别为  $8.81\%$  和  $5.57\%$ 。从工程措施来看, 以梯田为主, 分为土坎和石坎两种。通过野外调查发现, 在 1% 和 4% 抽样密度下, 梯田类型均是以土坎梯田为主, 梯田质量均是以中等质量为主, 但在 4% 抽样密度下梯田质量为好和中等的比例略高, 梯田质量差的比例略低。常见的带有梯田措施的土地利用类型为旱梯田和梯田果园, 占蒙阴县的 48.54%, 而在 1% 密度中占 42.17%, 在 4% 密度中占 45.89%。剔除水域及水利设施用地、居民点及工矿用地、交通运输用地及其他土地等不易侵蚀土地利用类型, 蒙阴县  $B$  均值 0.084 9, 1% 密度 0.091 8, 相对误差 8.18%, 4% 密度 0.094 0, 相对误差 10.69%; 全县  $E$  均值 0.486 5, 1% 密度 0.600 7, 相对误差 23.46%, 4% 密度 0.559 8, 相对误差 15.07%; 蒙阴县  $T$  均值 0.817 8, 1% 密度 0.907 2, 相对误差 10.94%, 4% 密度 0.851 2, 相对误差 4.08%。



注: 1 水浇地; 2 坡耕地; 3 旱梯田; 4 旱平地; 5 坡地果园; 6 梯田果园; 7 平地果园; 8 用材林; 9 防护林; 10 灌木林地; 11 其它林地; 12 草地; 13 居民点及工矿; 14 交通运输用地; 15 水域及水利设施用地; 16 其他土地。

图4 蒙阴县土地利用估算精度损失统计

## 2.4 两种抽样密度对土壤侵蚀估算精度的影响

采用栅格算法计算, 蒙阴县水土流失面积比 33.90% (基准值), 以轻度侵蚀为主。通过对各抽样

单元土壤侵蚀状况统计,1%密度各抽样单元水土流失面积比 2.00%~86.77%,平均 51.47%,中位数 52.42%,其中 10 个抽样单元水土流失面积比高于基准值,占总单元数的 71.43%;4%密度下各单元水土流失面积比 2.00%~91.06%,平均 45.36%,中位数 47.43%,其中 40 个抽样单元水土流失面积比高于基准值,占总单元数的 64.52%。

采用基于野外调查单元的单元插值外推法进行估算全县土壤侵蚀时,1%密度下水土流失面积比 53.63%,比全县高 19.73%;4%抽样密度下水土流失面积比 45.67%,比全县水土流失面积比高 11.77%。由于野外调查单元内土壤侵蚀因子偏高,对单元插值外推法推算的土壤侵蚀结果影响较大。

### 3 讨论

(1) 赵维军等<sup>[13]</sup>在陕北吴起县研究发现 1%和 4%抽样密度土地利用、坡度和坡长因子精度损失均小于 5%,按照 1%抽样密度调查土壤侵蚀因子既能保持精度又能减少工作量。但是本研究中 1%和 4%抽样密度土壤侵蚀因子都有不同程度的损失,精度损失最大值分别为 -16.82%(平缓坡)和 -11.46%(旱梯田),CSLE 模型因子相对误差最大值分别为 33.48%(S)和 15.07%(E),4%抽样密度精度损失相对较少。这可能与两个研究区域地形地貌、土地利用、土壤类型等土壤侵蚀影响因子空间异质性有关。吴起县属黄土高原梁状丘陵沟壑区,土壤以黄土性土为主,人口密度小(仅 37 人/km<sup>2</sup>),下垫面均质化;而蒙阴县位于鲁中南山地丘陵区,土壤类型以粗骨土为主,人口密度大(344 人/km<sup>2</sup>),土地利用破碎。因此,二者在土壤侵蚀影响因子空间异质性特点有明显不同,会造吴起县 1%和 4%土壤侵蚀因子差异小,而蒙阴县两种密度部分因子差异较大。

(2) 在本研究中,野外调查单元布设采用分层系统抽样方法,简便易行,调查单元分布均匀,可以摸清县域整体情况,为土壤侵蚀计算提供基础数据。但是在低山丘陵区土地利用破碎、人为活动干扰强烈的复杂区域,因土地利用、地形、土壤等土壤侵蚀影响因子空间异质性强,可能会导致调查单元缺少典型性和代表性,造成土壤侵蚀因子精度损失较大,从而影响土壤侵蚀推算结果。而且当县域内出现水土保持重点工程等短时剧烈变化时,分层系统抽样方法难以具体反映。而典型抽样是选取一部分具有代表性的对象进行调查,选取结果不易出现偏差。因此,当县域基础数据逐步完善之后,能否在此基础上用典型抽样代

替分层系统抽样,或者二者有效结合的方法进行调查,有待于进一步研究。

### 4 结论

(1) 1%抽样密度 CSLE 模型因子估算精度损失大,相对误差 2.67%~33.48%,S 最高,其次为 K 和 E。S 相对误差高主要受平缓坡和陡坡等影响,K 主要受洪冲积潮棕壤、石灰岩钙质粗骨土和酸性粗骨土等土壤类型影响,E 主要受旱梯田影响。

(2) 4%抽样密度下 CSLE 模型因子估算精度损失较小,相对误差 2.67%~15.07%式中:E 最高,其次为 K 和 B,E,B 主要受梯田果园影响,K 主要受红黏土和石灰岩钙质粗骨土影响。

(3) 受模型因子估算精度影响,两种密度下水土流失面积均偏高,其中 1%密度偏高 19.73%,4%密度偏高 11.77%。因此,可根据精度需求和工作量确定合理的抽样密度。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郭索彦,李智广.我国水土保持监测的发展历程和成就[J].中国水土保持科学,2009,7(5):19-24.
- [2] 章文波,刘宝元.基于 GIS 的中国土壤侵蚀预报信息系统[J].水土保持学报,2003,17(2):89-92.
- [3] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.
- [4] 郭索彦.土壤侵蚀调查与评价[M].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [5] 杨勤科,李锐,曹明明.区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J].地球科学进展,2006,21(8):849-856.
- [6] 程琳,杨勤科,谢红霞,等.基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J].水土保持学报,2009,23(5):61-66.
- [7] 中华人民共和国水利部.SL190-96 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,1997.
- [8] 刘震.我国水土保持情况普查及成果运用[J].中国水土保持科学,2013,11(2):1-5.
- [9] 李智广,刘宪春,刘建祥,等.第一次全国水利普查水土保持普查方案[J].水土保持通报,2010,30(3):87-91.
- [10] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室.第一次全国水利普查培训教材之六:水土保持情况普查[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [11] 李智广,符素华,刘宝元.我国水力侵蚀抽样调查方法[J].中国水土保持科学,2012,10(1):77-81.
- [12] 刘淑珍,刘斌涛,苏正安,等.对我国水土流失调查评价方法若干问题的思考[J].山地学报,2014,32(2):150-153.
- [13] 赵维军,朱清科,马欢,等.不同抽样比例的土壤侵蚀因子调查精度比较[J].西北林学院学报,2012,28(3):168-171.

对 DEM 精度的影响越大。其中分形维数对 HydroSHEDS DEM 精度影响最大,对 SRTM DEM 精度影响最小。

### [参 考 文 献]

- [1] Belz J E, Rodriguez E, Morris C S. A global assessment of the SRTM performance[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015,72(3):249-260.
- [2] Shortridge A, Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(6):1576-1587.
- [3] Braun A, Fotopoulos G. Assessment of SRTM, ICESat, and survey control monument elevations in Canada [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007,73(12):1333-1342.
- [4] Hirt C, Filmer M S, Featherstone W E. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver 4. 1 and GEODATA DEM-9 S ver 3 digital elevation models over Australia[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 2010,57(3):337-347.
- [5] EnBle F, Heinzl J, Koch B. Accuracy of vegetation height and terrain elevation derived from ICESat/GLAS in forested areas[J]. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 2014, 31(1): 37-44.
- [6] Yue Linwei, Shen Huanfeng, Zhang, Liangpei, et al. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017,123:20-34.
- [7] Liu Jun, Tong Xiaohua, Liu Shijie, et al. Glacier mass change evaluation in Lambert-Amery area from 2002 to 2012 using ASTER stereo images and ICESat GLAS laser altimetry[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014,17(1):1-5.
- [8] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Kang Shichang, et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data(2003—2009)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(7):1733-1742.
- [9] 王雪梅,李新,马明国,等. 青藏高原科研文献地理信息空间分析研究[J]. *地球科学进展*. 2012,27(11):1288-1294.
- [10] 陈博. 中国冻土的时空变化特征[C]//中国气象学会,中国气象学会 2006 年年会“气候变化及其机理和模拟”分会场论文集. 2006.
- [11] 万杰,廖静娟,许涛,等. 基于 ICESat/GLAS 高度计数据的 SRTM 数据精度评估:以青藏高原地区为例[J]. *国土资源遥感*,2015,27(1):100-105.
- [12] 陈国栋. 利用 ICESat 数据确定北极冰雪消融方法的研究[D]. 湖北 武汉:武汉大学,2015.
- [13] 杜小平,郭华东,范湘涛,等. 基于 ICESat/GLAS 数据的中国典型区域 SRTM 与 ASTER GDEM 高程精度评价[J]. *地球科学:中国地质大学学报*,2013,38(4):887-897.
- [14] Clarke K C. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method[J]. *Computers & Geosciences*, 1986,12(5):713-722.
- [15] Xie Heping, Wang Jin-an, Stein E. Direct fractal measurement and multifractal properties of fracture surfaces[J]. *Physics Letters A*, 1998, 242(1/2): 41-50.
- [16] 周银军,陈立,刘欣桐,等. 河床表面分形特征及其分形维数计算方法[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2009,2009(3):170-178.
- [17] 周宏伟,谢和平, KWASNIEWSKIMA. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. *摩擦学学报*,2000,20(6): 455-459.
- [18] Zhang Quan, Yang Qinke, Wang Chunmei. SRTM error distribution and its associations with landscapes across China[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2016,82(2):135-148.
- ~~~~~
- (上接第 183 页)
- [14] 邹丛荣,齐斐,张庆红,等. CSLE 模型应用中不同抽样密度和推算方法的比较[J]. *中国水土保持科学*,2016, 14(3):130-138.
- [15] Zhang Hongda, Zhang Ronghua, Qi Fei, et al. The CSLE model based soil erosion prediction: Comparisons of sampling density and extrapolation method at the county level [J]. *Catena*, 2018,165:465-472.
- [16] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation[C]// *Proceedings-Process of soil erosion and its environment effect*, 12th international soil conservation organization conference, Beijing, Tsinghua University Press, 2002.
- [17] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*,2002,22(6):705-711.
- [18] 杨韶洋. 基于 CSLE 模型的沂蒙山国家级重点治理区土壤侵蚀格局分析[D]. 山东 泰安:山东农业大学, 2014.