
特
约
专
稿

应用¹³⁷Cs 示踪技术估算土壤侵蚀的若干问题探讨

张 勋 昌

(美国农业部农业研究局 牧草地实验室, 美国 俄克拉何马州 厄尔雷诺 73036)

摘 要: [目的] 探讨用¹³⁷Cs 示踪技术估算土壤侵蚀量方法(以下简称“¹³⁷Cs 示踪方法”)所存在的几个关键问题,促进该方法的标准化和系统化。[方法] 对大量已发表的相关文献进行分析,根据作者的研究经验,归纳出¹³⁷Cs 示踪方法在实践应用中所存在的核心问题。[结果] ¹³⁷Cs 示踪方法中关于¹³⁷Cs 在空间是均匀分布的假设存在不合理性,不能直接用于定量估算单钻点取样的土壤侵蚀量。¹³⁷Cs 活度的空间变化存在随机性的成分。敏感度和不确定性分析结果证明¹³⁷Cs 活度的空间随机变化量是¹³⁷Cs 示踪方法不确定性的最大来源。[结论] 可以用多钻点样本平均值来减少¹³⁷Cs 随机变化量所引起的侵蚀估算误差。以统计学为基础的试验设计和采取独立样本的办法可以消除该误差。虽然¹³⁷Cs 模型已被广泛应用,但由于缺乏长期观测资料诸多模型还处在理论研究阶段,没有得到严格的验证和评判。因为不同模型估算的侵蚀量差别甚大,模型验证和筛选对该方法的成功运用至关重要。

关键词: 土壤侵蚀; ¹³⁷Cs 示踪; 空间随机变化; 独立样本

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)05-0342-05

中图分类号: P629, S157

文献参数: 张勋昌. 应用¹³⁷Cs 示踪技术估算土壤侵蚀的若干问题探讨[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 342-346. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.058; Xunchang (John) ZHANG. Several Key Issues on Using ¹³⁷Cs Method for Soil Erosion Estimation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 342-346. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.058

Several Key Issues on Using ¹³⁷Cs Method for Soil Erosion Estimation

Xunchang (John) ZHANG

(1. Grazinglands Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, El Reno, Oklahoma 73036, USA)

Abstract: [Objective] This work was to examine several key issues of using the ¹³⁷Cs method to estimate soil erosion rates in order to improve and standardize the method. [Methods] Based on the comprehensive review and synthesis of a large body of published literature and extensive long-term research experience, several key issues in the application of the ¹³⁷Cs method were generalized. [Results] The core assumption that spatial distribution of ¹³⁷Cs inventories is uniform is invalid, and that the ¹³⁷Cs method cannot be used to estimate quantitative soil erosion rates using a single soil core sample. The author emphasized that there existed a random component in ¹³⁷Cs spatial variation, and showed that this spatial random component was the largest uncertainty contributor of the ¹³⁷Cs method using the previous results from a sensitivity and uncertainty analysis. [Conclusion] The erosion estimation error resulting from spatial random variation can be filtered out by using a mean ¹³⁷Cs inventory of multiple independent soil cores or samples. The spatial random component can be removed using appropriate sampling designs for taking independent samples based on geostatistical properties. Although the ¹³⁷Cs erosion models have been widely used in the literature, none of them has been vigorously tested and validated due to the lack of measured long-term soil loss data, and most models still remain theoretical. Because extremely large differences exist between model estimates, model validation and evaluation are utterly important for successful application and acceptance of the ¹³⁷Cs method.

Keywords: soil erosion; ¹³⁷Cs tracer; spatial random variation; independent soil samples

收稿日期: 2017-10-16

修回日期: 2017-10-23

资助项目: 国家重点研发计划项目“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(项目编号 2016YFE0202900); 国家自然科学基金项目“黑土区多种外营力相互作用的坡面侵蚀过程与机理”(41571263)

第一作者: 张勋昌(1960—), 男(汉族), 陕西省韩城市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水文学研究。E-mail: john.zhang@ars.usda.gov.

土壤侵蚀是引起土地生产力下降和生态环境退化的主要原因之一,关于土壤侵蚀机理的研究对生态环境修复和提高土地生产力及人民生活水平意义重大^[1-6]。土壤侵蚀的空间分布对深入研究土壤侵蚀机理、标定和检验分布式的土壤侵蚀物理模型及布设精准水土保持措施都是必不可少的。传统的流域或小区把口站的侵蚀观测方法仅提供流失总量数据,这种黑箱化的观测资料对深入研究土壤侵蚀过程和泥沙搬运机理的意义不大。泥沙示踪可将侵蚀观测白箱化,为获取空间侵蚀分布资料提供更方便、快捷、有效的新方法。泥沙示踪方法的成熟与完善将为土壤侵蚀过程和机理研究的突破带来新的契机。近几十年来,侵蚀示踪研究成果丰硕,尤以放射性同位素和稀土元素为代表,取得了长足的发展。但纵观放射性元素(比如¹³⁷Cs,外来²¹⁰Pb,⁷B)示踪的历史与现状,该方法中有些关键性的假设和问题仍需进一步探讨,以促进该方法的进一步完善和标准化。

¹³⁷Cs(铯-137)是原子弹爆炸试验时所释放出来的放射性同位素,起始于1954年,到1963达到高峰。到目前为止,¹³⁷Cs示踪技术(以下亦称为¹³⁷Cs示踪方法)已被广泛用于估算土壤侵蚀量的时空变化^[7-8]。网上搜索发现,到目前为止已有大约5000篇与¹³⁷Cs有关的文章发表,充分体现了该方法已被土壤侵蚀界广泛接受。然而近几年来,有些科学工作者对此方法提出质疑,直接怀疑¹³⁷Cs在空间是均匀分布的核心假设^[9]。他们认为该假设的基本条件是不成立的,进而得出结论:该方法不能用于定量估算土壤侵蚀速率。Boardman等^[10]在评估欧洲土壤侵蚀的报告中,未提及有关¹³⁷Cs的研究成果。科技界对该方法的不同看法主要来源于以下几个方面:①¹³⁷Cs在大气沉降过程中是否在空间上是均匀分布的;②将¹³⁷Cs的总量转换成侵蚀量的模型较多,且转换的侵蚀量差异甚大;③缺乏长期的侵蚀观测资料对转换模型进行严格的定量评估;④没有足够重视¹³⁷Cs空间变异的随机性和所需的相应统计处理;⑤试验设计没有充分考虑统计分析原理,采样方法缺乏标准化。

1 关于¹³⁷Cs空间均匀分布假设的问题

用¹³⁷Cs估算土壤侵蚀方法的核心假设是¹³⁷Cs沉降到土壤表面的分布是均匀的。基于¹³⁷Cs在地面均匀分布的假设,任何一点的侵蚀量或堆积量可以通过比较该点的¹³⁷Cs总量和参照区¹³⁷Cs背景值来估算。均匀分布的假设简化了该方法的应用程序,但也严重影响了该方法的精度。Parsons等^[9]提出了¹³⁷Cs

均匀分布必须满足的两个条件:其一是¹³⁷Cs随雨水沉降的空间分布是均匀的;其二是¹³⁷Cs阳离子被土壤颗粒吸附的过程在空间上的分布是均匀的,且在吸附过程中没有自由¹³⁷Cs阳离子的再分配。显而易见,¹³⁷Cs随降雨的空间均匀沉降分布在小尺度范围内是可以接受的。¹³⁷Cs主要沉降期大约超过20a,在一个不大的区域内,20a的平均降雨量应是相对均匀的。但由于受到植物地上部分截流和对雨水再分配的影响,达到地面的雨量在“微观上”是不均匀的,况且受地面糙度和微地形的影响,所产生的径流会蓄渗填洼发生再次分配,其结果必然导致¹³⁷Cs的分布在微观尺度上的不均匀。雨水在地表的再分配使得第二个条件难以得到满足。正是因为这种小尺度上的不均匀分布,使得仅用打一个土钻取样来估算该点土壤侵蚀量的方法出现误差。

2 关于¹³⁷Cs的空间随机分布问题

事实上¹³⁷Cs在参照样地的不均匀分布已被广泛报道,许多研究者在他们的文章中都报道了¹³⁷Cs的空间变化特征。比如Sutherland^[11]分析了40篇文章中所报道的¹³⁷Cs在参照样地上的空间变化特征。他发现¹³⁷Cs的中位数变差系数(C_v)是19%左右,而95%的置信域在13%和23%之间。也就是说,要让所估算的¹³⁷Cs均值的相对误差在90%的信度水平上不超过10%,最少需要11个样本。这个结果充分说明了在既没有侵蚀又没有堆积的参照样地上,¹³⁷Cs在空间分布上的不均匀性。也充分证明¹³⁷Cs在空间上是均匀分布的假设是不成立的。虽然关于¹³⁷Cs的空间分异在文献中有广泛的报道,但是许多学者对此没有引起足够的重视,进而没有努力去改进该方法,以提高其精度。

在没有侵蚀和堆积的参照样地上(r),¹³⁷Cs的空间分布变异主要是由¹³⁷Cs的空间随机变化引起的^[12]。任意一个样本 i 在参照样地的¹³⁷Cs总量(A_i^r)可由下式计算^[13]:

$$A_i^r = A_{\text{mean}}^r + A_{\text{random}}^r \quad (1)$$

式中: A_{mean}^r ——¹³⁷Cs的平均背景值; A_{random}^r ——随机变量部分,由¹³⁷Cs空间随机变量、¹³⁷Cs测量随机误差和采样随机误差组成。同理,在侵蚀样地内(s),任意一点 i 的¹³⁷Cs的量(A_i^s)可表达为:

$$A_i^s = A_{\text{mean}}^r + A_{\text{random}}^s + A_{\text{system}}^s \quad (2a)$$

$$A_i^s - A_{\text{mean}}^r = A_{\text{random}}^s + A_{\text{system}}^s \quad (2b)$$

与参照区相同, A_{random}^s 是随机变量部分。 A_{system}^s 是系统误差部分,是真正由土壤侵蚀引起的¹³⁷Cs的变化量。由公式(2b)可以看出,通常用 A_{mean}^s 和 A_{mean}^r 之

差(等式左边值)来估算侵蚀量的传统方法并不准确。因为其差值并非全由侵蚀引起,它将 ^{137}Cs 的随机变量部分误认为是由侵蚀引起的变化。对公式(2b)求其期望值得得:

$$A_{\text{mean}}^s - A_{\text{mean}}^r = A_{\text{system}}^s \quad (3)$$

由公式(3)可以看出,真正由侵蚀引起的 ^{137}Cs 变化量只能用多样本的均值求得,求均值可消除随机变量误差。故只打一个土钻不可以用来准确估算该点的侵蚀量。

3 关于用样本均值估算侵蚀量的问题

如前所述,传统的 ^{137}Cs 示踪方法忽视了 ^{137}Cs 的空间随机变化,这种方法将 ^{137}Cs 的空间随机变化量误认为是土壤侵蚀引起的变化,故直接降低了土壤侵蚀估算精度。去掉随机变量误差的最好方法是采用多样本平均,即取多钻点的均值。接下来的科学问题就是确定取多少点,如何选点才能使所计算的均值具有较好的代表性。从统计学角度讲,样本之间必须是相互独立的。若样本间存在空间相关,那么这些样本就不是独立样本,而只是一个样本的子样本。要有一个符合统计学的采样设计,就必须做前期试验,找到最大空间相关距离或半方差函数(semi-variogram)的最大区间(range)。在最大相关距离外采样就能保证样本间的独立性即均值的代表性。目前关于 ^{137}Cs 空间分布相关性方面的研究甚少,在发表的文献中没有看到有关 10 m 以内的空间相关资料。这些信息对合理有效地采样设计至关重要,亟需开展这方面的研究工作,以填补知识空白,为进一步完善 ^{137}Cs 方法,促进该方法的标准化和系统化提供科学依据。

根据最大相关距离原理,可采用随机或固定的采样设计,后者包括栅格或剖面线法。在估算坡面土壤侵蚀分布时,沿等高线采样的剖面线法较为方便,所采样的均值可代表该坡位或坡长的平均侵蚀量。至于样本的数量则随样本的方差而变。方差越大(空间差异越大),所需样本数量越大。一般来讲,5~15 个样本即可得到较为满意的结果。在估算流域或大区域尺度上的土壤侵蚀分布时,可根据侵蚀量相对均匀的地貌单元采样,以求该地貌单元的平均侵蚀量,进而根据各地貌单元的空间分布,计算出区域的总侵蚀量。

4 关于 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型验证问题

虽然自 20 世纪 70 年代以来, ^{137}Cs 示踪方法得到了广泛的应用,已有十几个侵蚀转化模型在不同的假设条件下被开发出来。但这些模型大多数是理论

模型,没有得到严格的验证^[14]。其主要原因是土壤侵蚀观测资料大多较短,不能完全与 ^{137}Cs 示踪方法估算的平均侵蚀量的时段匹配。一般来讲, ^{137}Cs 示踪方法所估算的侵蚀量是 1954 年以来的平均侵蚀量,但很难找到有如此长时段的实测土壤侵蚀量。由于长时段侵蚀观测资料的短缺,在科技文献中可看到仅用数年的观测资料来验证 ^{137}Cs 示踪方法估算的长期平均侵蚀量^[14-18]。这种验证对模型的评估仅有参考意义,难以得到肯定的结论。Zhang 等^[19]用 1978 年以来的观测资料,较详细地评估了 4 个最常用的转换模型^[20]。初步结果表明最简单的线性比例模型(proportional model)效果较好。虽然该工作用了 30 a 多的实测资料,但没有涉及沉降过程中 ^{137}Cs 的流失过程。到目前为止, ^{137}Cs 示踪方法的研究最需要的工作是用 1954 年以来的侵蚀观测数据对 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型进行全面严格地验证和评价,为 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型(以下简称“ ^{137}Cs 模型”)的应用提供科学依据。

在文献中可以找到 10 多个 ^{137}Cs 示踪侵蚀转换模型,每个模型的假设条件不同,且对侵蚀过程的概化各异,故计算出的土壤侵蚀量差异甚大。Walling 等^[21]曾指出在同一个地方对相同的 ^{137}Cs 的流失量,用不同模型所计算出的侵蚀量可相差两个数量级以上。如此大的差异充分说明了对模型验证和评估的重要性和必要性。

另外,除侵蚀模型验证不足之外,到目前为止,还未在文献中看到一篇有关验证 ^{137}Cs 示踪堆积模型的文章。在一个坡面或流域里,侵蚀和堆积会同时在不同部位发生,如果堆积计算不准的话,必然会影响该研究区域里所估算的平均侵蚀量和泥沙输移比。

5 关于 ^{137}Cs 模型参数的不确定性问题

模型的敏感度(sensitivity)和不确定性(uncertainty)分析对了解模型的行为和表现意义重大,也对更好地使用模型有很好的指导意义。模型敏感度分析可反映不同参数或输入变量对模型输出的影响程度,亦即可以反映不同参数的不确定性对模型总输出的不确定性贡献比例。因此,在估计参数值时,一定要注意较敏感的参数,尽量减小这些参数的估计误差。模型不确定性分析主要是量化模型输出结果的不确定性以及描述不确定性从模型输入到输出的传递过程。在模型应用时,要尽量减小对模型不确定性贡献较大的参数或输入变量的估计误差,以提高模型的预测精度和可信度。在文献中,用 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型估计侵蚀量的文章非常多,但包含敏感度和不确定

定性分析结果的文章甚少。用较简单的敏感性分析法, Walling 等^[22]发现 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型对耕作深度和粒径修正系数相对较为敏感。Li 等^[23]发现 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型对 ^{137}Cs 的背景值、耕作深度和粒径修正系数较为敏感。Zhang 等^[24]对常用的 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型的敏感性和不确定进行了较全面详细地分析, 其内容不仅包括了主要的模型参数, 还包括了由 ^{137}Cs 空间随机变化所引起的背景值的不确定性和采样地 ^{137}Cs 活度的不确定性。分析结果表明, 用 ^{137}Cs 示踪技术估算的土壤侵蚀量对 ^{137}Cs 背景值和样本活度的不确定性非常敏感, 对土壤容重、耕作深度和粒径修正系数的敏感度相似且相对较低。 ^{137}Cs 在参照区和采样区的空间变异是 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型预报侵蚀量最主要的不确定性的来源, 其次是粒径修正系数。结果表明, 在应用 ^{137}Cs 示踪侵蚀模型时, 减少由空间变异所引起的背景值的估计误差和采样地的 ^{137}Cs 活度的估计误差对提高侵蚀预报的精度至关重要, 也就是说在参照区和采样区独立样本的数量将直接决定侵蚀估计值的精度。另外, 关于粒径修正系数的估计也应给予适当的重视, 尽量使用实测的粒径修正系数。

6 讨论与结论

综上所述, 由于 ^{137}Cs 含量具有一定的空间随机变异性, 故并非一个钻点样本的数值可被用来估算侵蚀量。要得到一个可靠的 ^{137}Cs 活度均值, 合理地统计采样设计和足够数量的样本是非常重要的。应该尽量避免使用不依概率分布为基础的随意采样方法, 最好使用栅格或剖面线的固定采样设计。固定取样法可减少主观性, 以得到代表性较好的均值。

样本数量是由 ^{137}Cs 空间变化大小决定的, 变差系数越大, 所要求的样本数量就越多。一般来讲, 在参照区大概需要 20~30 个独立样本来估算背景值, 在侵蚀区或单元一般也需要 5 个以上(10~15 个较好)的独立样本来减少 ^{137}Cs 活度的估计误差。为减少测量费用和测量时间, 代表某一个侵蚀点或单元的独立样本可以合并。另外, 所需样本的数量可能也同土钻大小有关, 文献中常用的土钻直径在 5~15 cm。一般认为土钻面积越大, 样本方差就愈小, 满足一定相对误差所需的样本数量就愈小。但在目前的文献中, 还没有看到任何土钻大小和方差关系的报道, 也没有土钻大小和所需样本数量关系的报道。这些基础资料对于采样设计和 ^{137}Cs 示踪方法的标准化和系统化甚为主要, 因此亟需这方面的基础研究。

每种方法都有其局限性, 不可盲目乱用。要根据

每种方法的基本假设和其固有的优点, 扬长避短, 有选择地运用。比如在一个研究区域里找不到理想的参照地时(未扰动的平坦草地最好), ^{137}Cs 示踪方法就不适合在该区运用。但是如果研究目的是估算侵蚀量的相对变化而非绝对侵蚀量, ^{137}Cs 示踪方法仍可使用。虽然 ^{137}Cs 示踪侵蚀的方法已在国内外广泛运用^[7-8, 12, 20-27], 但进一步完善和标准化该方法将对其被广泛接受和成功应用具有重要意义。



[参 考 文 献]

- [1] 郭兵, 姜琳. 基于多源地空耦合数据的青藏高原冻融侵蚀强度评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 12-19.
- [2] 石万里, 王守俊, 张富. 甘肃省黄土高原典型小流域侵蚀沟道特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 236-241.
- [3] 左继超, 胡建民, 王凌云, 等. 侵蚀程度对红壤团聚体分布及养分含量的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 112-117.
- [4] 梁志权, 张思毅, 卓慕宁, 等. 不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 1-6.
- [5] 王晶, 韩霖昌, 张扬, 等. 砒砂岩与沙复配土壤的冻融特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 51-55.
- [6] 张涛, 金德钢, 佟光臣, 等. 基于 RUSLE 的线状开发建设项目区土壤侵蚀动态监测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 131-135.
- [7] Zapata F. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides[M]. Kluwer Academic, Dordrecht, the Netherlands, 2010.
- [8] Mabit L, Meusburger K, Fulajtar E, et al. The usefulness of ^{137}Cs as a tracer for soil erosion assessment: A critical reply to Parsons and Foster (2011)[J]. Earth Science Reviews, 2013, 127: 300-307.
- [9] Parsons A J, Foster I D L. What can we learn about soil erosion from the use of ^{137}Cs ? [J] Earth Science Reviews, 2011, 108(1/2): 101-113.
- [10] Boardman J, Poesen J. Soil Erosion in Europe[M]. Wiley, Chichester, 2006.
- [11] Sutherland R A. Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference samples: literature survey [J]. Hydrological Processes, 1996, 10: 34-54.
- [12] Owens P N, Walling D E. Spatial variability of caesium-137 inventories at reference sites: An example from two contrasting sites in England and Zimbabwe [J]. Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1996,

- 47(7): 699-707.
- [13] Zhang X C. New insights on using fallout radionuclides to estimate soil redistribution rates[J]. Soil Science Society of American Journal, 2014,79:1-8.
- [14] Porto P, Walling D E. Using plot experiments to test the validity of mass balance models employed to estimate soil redistribution rates ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements[J]. Journal of Applied Radiation and Isotopes, 2012,70:2451-2459.
- [15] Porto P, Walling D E, Ferro V, et al. Validating erosion rate estimates provided by caesium-137 measurements for two small forested catchments in Calabria, Southern Italy[J]. Land Degradation and Development, 2003,14:389-408.
- [16] Porto P, Walling D E. Validating the use of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements to estimate rates of soil loss from cultivated land in Southern Italy[J]. Environmental Radioactivity Journal, 2012,106:47-57.
- [17] Porto P, Walling D E, Callegari E, et al. Using caesium-137 and unsupported lead-210 measurements to explore the relationship between sediment mobilization, sediment delivery and sediment yield for a Calabrian catchment [J]. Marine and Freshwater Research, 2009,60:680-689.
- [18] Wakiyama Y, Onda Y, Mizugaki S, et al. Soil erosion rates on forested mountain hillslopes estimated using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ [J]. Geoderma, 2010,159:39-52.
- [19] Zhang X C, Zhang G H, Wei X, et al. Evaluation of ^{137}Cs conversion models and parameter sensitivity for erosion estimation [J]. Journal of Environmental Quality, 2015,44:789-802.
- [20] Walling D E, Zhang Y, He Q. Models for deriving estimates of erosion and deposition rates from fallout radionuclide (caesium-137, excess lead-210, and beryllium-7) measurements and the development of user friendly software for model implementation[C]// Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality. IAEATECDOC-1665. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011:11-33.
- [21] Walling D E, Quine T A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data [J]. Land Degradation and Rehabilitation, 1990,2: 161-175.
- [22] Walling D E, He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements[J]. Journal of Environmental Quality, 1999,28:611-622.
- [23] Li S, Lobb D A, Tiessen H D, et al. Selecting and applying cesium-137 conversion models to estimate soil erosion rates in cultivated fields[J]. Journal of Environmental Quality, 2010,39:204-219.
- [24] Zhang X C, Zhang G H, Wei X. How to make ^{137}Cs erosion estimation more useful: An uncertainty perspective[J]. Geoderma, 2015,239/240:186-194.
- [25] 方华军,杨学明,张晓平,等. ^{137}Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征[J]. 生态学报,2015,25(6): 1376-1382.
- [26] 李俊杰,李勇,王仰,等. 三江源区东西样带土壤侵蚀的 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪研究[J]. 环境科学研究,2009,22(12):1452-1459.
- [27] 唐翔宇,杨浩,赵其国,等. ^{137}Cs 示踪技术在土壤侵蚀估算中的应用研究进展[J]. 地球科学进展,2000,15(5):576-582.

(上接第 341 页)

[参 考 文 献]

- [1] 王勇,鄢铁平,刘岩松. GIS 在水土保持规划设计中的应用[J]. 中国水土保持,2005(10):39-40.
- [2] 王继军,谢永生,赵昭侠,等. 水土保持规划设计系统初论[J]. 水土保持通报,1996,16(1):23-27.
- [3] 胡恒,王臻. 关于“精准水土保持”的实践与思考[J]. 中国水土保持,2016(2):30-32.
- [4] 汪沛,罗锡文,周志艳,等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报,2014,30(18): 1-12.
- [5] 张雅文,许文盛,沈盛彧,等. 无人机遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用:方法构建[J]. 中国水土保持科学,2017,15(1):134-140.
- [6] 李志学,颜紫科,张曦. 无人机测绘数据处理关键技术及应用探究[J]. 测绘通报,2017(S1):36-40.
- [7] 彭大雷,许强,董秀军,等. 无人机低空摄影测量在黄土滑坡调查评估中的应用[J]. 地球科学进展,2017,32(3):319-330.
- [8] 宋月君,周春波,廖凯涛. 无人机遥测系统在水保监测中的需求分析与引进探讨[J]. 水土保持应用技术,2016(5):24-27.
- [9] 冯晓东. 试论无人机遥感在水土保持中的应用[C]// 中国水土保持学会预防监督专业委员会. 中国水土保持学会预防监督专业委员会第九次会议暨学术研讨会论文集. 2015.
- [10] 王志良,付贵增,韦立伟,等. 无人机低空遥感技术在线状工程水土保持监测中的应用探讨:以新建重庆至万州铁路为例[J]. 中国水土保持科学,2015,13(4):109-113.
- [11] 王利勇. 无人机低空遥感数字影像自动拼接与快速定位技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2011.
- [12] 自由路,金继运,杨俐苹,等. 低空遥感技术及其在精准农业中的应用[J]. 土壤肥料,2004(1):3-6.