

# $^{137}\text{Cs}$ 在耕作土壤中的均一性分布研究<sup>①</sup>

王小雷<sup>1</sup>, 杨浩<sup>1\*</sup>, 桑利娟<sup>1</sup>, 刘晓海<sup>2</sup>, 赵其国<sup>1,3</sup>

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2 云南省环境科学研究院, 昆明 650034;

3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要:** 选择一块面积为 35 m×30 m 较为平坦的农耕地作为研究对象, 采集 68 个样点, 共计 112 个样品, 对  $^{137}\text{Cs}$  在土壤中的垂直分布和水平分布进行了探讨。结果表明,  $^{137}\text{Cs}$  在耕作土壤剖面中分布主要集中在耕层以内, 且各个层的质量活度介于 2.92~4.01 Bq/kg 之间, 在土壤表层中水平面上质量活度介于 28.77~30.98 Bq/kg 之间, 该核素在土壤剖面和地表水平面上都呈现均一性分布特征。

**关键词:**  $^{137}\text{Cs}$  沉降; 耕作土; 均一性分布

**中图分类号:** S157.1

$^{137}\text{Cs}$  是 20 世纪中叶全球大气核试验的产物, 为人工放射性元素, 其半衰期为 30.17 年, 1956 年至 1965 年是核尘埃的主要产出期, 其中以签订禁止大气核试验条约的 1963 年的浓度最大<sup>[1-2]</sup>, 70 年代后产出甚微。由于  $^{137}\text{Cs}$  随大气环流在全球分布, 与纬度变化及当地的降雨密切相关, 经沉降到达地表后就迅速被黏土矿物和有机质紧密吸附, 其地表空间运移主要由土壤侵蚀, 土壤颗粒的迁移和土壤沉积颗粒的淀积等过程造成, 而且  $^{137}\text{Cs}$  的地表损失量和累积量与土壤的侵蚀量和沉积量有一定的相关关系。由此可以认为  $^{137}\text{Cs}$  是一种研究土壤侵蚀与沉积的良好示踪元素<sup>[3-5]</sup>。其示踪的基本方法是通过测定取样点土壤  $^{137}\text{Cs}$  的含量相对于背景值的变化, 并将这种变化与土壤的运移量相联系, 以实现土壤侵蚀量的测定。该方法可用于中长时间、小流域尺度上土壤侵蚀的研究, 已在世界范围内多种生态环境条件下进行了成功的运用。

在土壤侵蚀研究方面,  $^{137}\text{Cs}$  法自 20 世纪 70 年代引入以来<sup>[6]</sup>, 已经得到广泛应用, 国内外研究者利用  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术建立了各种土壤侵蚀定量模型, 对于这些模型已有详细论述<sup>[7]</sup>, 在这些模型中, 质量平衡模型是比较完善的一种。杨浩等<sup>[8]</sup>建立的质量平衡模型综合考虑了  $^{137}\text{Cs}$  的土壤剖面分布特征及年富集作用等因素, 因而更具有可靠性。

在应用  $^{137}\text{Cs}$  进行土壤侵蚀示踪的同时, 其随大气干、湿沉降到达地表后, 在较小的区域范围内,  $^{137}\text{Cs}$

是否在土壤剖面分布和地表水平分布上呈现均一性分布特征, 前人都是假设该核素在区域内沉降后是均匀分布的。为了验证此假设的可行性, 本文做了这方面的研究。选取了云南省滇池流域关山水库附近的一块较为平坦的农耕地作为研究对象, 对  $^{137}\text{Cs}$  沉降于地表后用两种不同的方式采样, 并对其在土壤剖面分布和地表水平分布的情况进行了对比, 结果表明, 在较小的区域范围内,  $^{137}\text{Cs}$  随大气干、湿沉降于地表后, 在土壤中呈现均一性分布特征, 在一定程度上, 对  $^{137}\text{Cs}$  的性质进行了有益的补充, 为以后更好地应用  $^{137}\text{Cs}$  法示踪土壤侵蚀与沉积提供了理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

采样区位于云南省滇池流域的关山水库附近, 属亚热带湿润季风气候, 年日照数 2200 h, 无霜期 285 天, 年平均降雨量 1006.5 mm, 降水集中, 雨季降雨量占全年降雨量的 80% 以上。海拔 1800~2000 m 左右, 辖区内多为丘陵、河谷、山地。成土母岩为玄武岩、石灰岩、砂岩和页岩, 形成的土壤以红壤、紫色土和水稻土为主<sup>[9]</sup>。自然植被由滇青冈、高山栲等常绿阔叶林、云南松、滇油松等针叶林及灌丛草地、旱田植被、水田植被、水生植被组成, 植被覆盖率 22.9%<sup>[10]</sup>。

### 1.2 样品的采集

①基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(2007105SBJ0150)资助。

\* 通讯作者(yanghao@njnu.edu.cn)

作者简介: 王小雷(1982—), 男, 山西翼城人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀和环境影响研究。E-mail: wxl\_365@163.com

内选择了一块较为平坦的农耕地（中心点地理坐标为  $24^{\circ}49'11.3''\text{N}$ ,  $102^{\circ}50'10.7''\text{E}$ ，海拔 1921 m）作为研究对象，该地上世纪五六十年代已开始耕作，近几年主要种植马铃薯、油菜等作物，采样时种植的马铃薯已经收割完毕，现处于农歇期。

试验田形状呈长方形，长为 35 m，宽为 30 m，按照预先布设的行  $8 \times$  列 8 的网格状进行采样，其中行间距为 4.28 m，列间距为 5 m，共采集了 68 个样点，为了表述方便，将所有样点用矩阵形式表示，其示意图如图 1 所示。

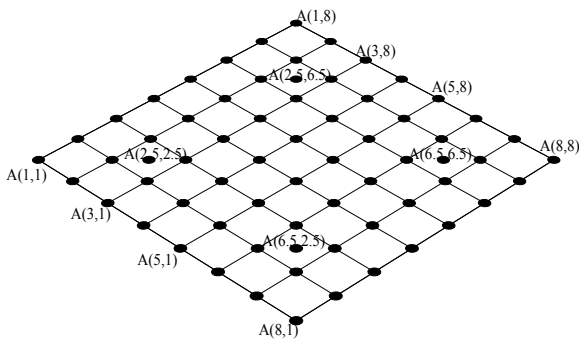


图 1 采样点的空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites

为了能充分地反映土壤中  $^{137}\text{Cs}$  的分布特征，采集土壤样品分为土壤剖面全样和分层样两种。全样用内径为 6 cm 的取样钻垂直打入土层，深度均为 35 cm，取出完整土样，即为土壤全样，获得 64 个样品。分层样选择了图 1 中 (A(2.5,2.5)、A(2.5,6.5)、A(6.5,2.5)、A(6.5,6.5)) 4 个样点，在  $10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  的面积上，用小铲刀自上向下，每 3 cm 为间距取层样，采样深度至 36 cm，获得 48 个样品。此采样共计样点 68 个，取得样品 112 个。

土壤体积质量（容重）的测定，在 4 个分层样点和试验田中心全样点附近用高度为 2 cm 的环刀采集土样 5 盒，取其平均值获得该土壤样品的密度。

### 1.3 样品的处理和测试

土壤样品在实验室内，经自然风干，剔除杂草和小石子，经过研磨过筛（20 目），然后放入  $105^{\circ}\text{C}$  左右的烘箱中烘至恒重，冷却后用 0.001 g 精度的天平称取 300 g 放在同一规格的塑料容器中，摇匀，使土壤样品表层在容器中较为平整，然后放在高纯锗探测器及多通道分析仪所组成的  $\gamma$  谱仪（对  $\text{Co1.33 MeV}$  的能量分辨率为 2.25 MeV，峰康比大于 60:1）中测试。该仪器具有良好的稳定性（道漂小于 1 道/月），

相对探测效率为 62%，样品测量时间为 28800 s（实时）， $^{137}\text{Cs}$  的质量活度根据 661.6 KeV 射线的全峰面积求得。

### 1.4 样品 $^{137}\text{Cs}$ 含量的计算

对于分层样，经测试得到样品的  $^{137}\text{Cs}$  质量活度，应用以下公式计算出相应样点的  $^{137}\text{Cs}$  含量 [4,11]：

$$CPI = \sum_{i=1}^n C_i \cdot Bd_i \cdot D_i \cdot 10^3 \quad (1)$$

式中，CPI 表示样点的  $^{137}\text{Cs}$  含量 ( $\text{Bq/m}^2$ )， $I$  为采样层序号， $n$  为采样层数， $C_i$  为采样层的  $^{137}\text{Cs}$  质量活度 ( $\text{Bq/kg}$ )， $Bd_i$  为  $i$  采样层的土壤体积质量 ( $\text{g/cm}^3$ )， $D_i$  为  $i$  采样层的深度 (m)。

对于全样，应用以下公式求其  $^{137}\text{Cs}$  含量 [4]：

$$CPI = C_i \cdot W_y / S \quad (2)$$

式中，CPI 表示样点的  $^{137}\text{Cs}$  含量 ( $\text{Bq/m}^2$ )， $C_i$  为全样的  $^{137}\text{Cs}$  质量活度 ( $\text{Bq/kg}$ )， $W_y$  为过筛后全样的重量 (kg)， $S$  为取样器的横截面积 ( $\text{m}^2$ )。

## 2 结果分析

### 2.1 $^{137}\text{Cs}$ 在土壤垂直剖面中的分布

对本试验田中 4 个分层样点 (A(2.5,2.5)、A(2.5,6.5)、A(6.5,2.5)、A(6.5,6.5)) 的样品进行测试计算，获得  $^{137}\text{Cs}$  的质量活度在各个分层样中的剖面分布特征 (图 2)。

从图 2 可知，4 个分层样点  $^{137}\text{Cs}$  的含量分别为 779.23、801.14、787.11 和 772.86  $\text{Bq/m}^2$ ，个体之间的值相差不大。各个分层样品中每一层的  $^{137}\text{Cs}$  质量活度介于 2.92 ~ 4.01  $\text{Bq/kg}$  之间，其平均值为 3.57  $\text{Bq/kg}$ 。将 4 个分层样品进行比较，不难发现每个样点自地表向下各层之间  $^{137}\text{Cs}$  的质量活度以及不同样品之间相同层的  $^{137}\text{Cs}$  质量活度相差不大，基本维持在平均值左右，且 4 个分层样点  $^{137}\text{Cs}$  含量值也差别不大，由此可以说明  $^{137}\text{Cs}$  在土壤剖面中分布是比较稳定的，呈均匀状分布模式。

在图 2 A(2.5,2.5) 和图 2 A(6.5,6.5) 中  $^{137}\text{Cs}$  的质量活度分布在距土壤表层 24 cm 范围内，在图 2 A(2.5,6.5) 和图 2 A(6.5,2.5) 中在 24 ~ 27 cm 处可以检测到  $^{137}\text{Cs}$  的存在，二者的质量活度分别为 0.51  $\text{Bq/kg}$  和 0.66  $\text{Bq/kg}$ 。在此界限值以下， $^{137}\text{Cs}$  质量活度相对较低，几乎检测不到  $^{137}\text{Cs}$  的存在，此结果也进一步证实了前人得出的结论 [12]，即在耕作土中，由于受到人类耕作活动的影响， $^{137}\text{Cs}$  在土壤剖面中的分布已不再呈现规则的指数分布模式（非耕作土中），而是在犁层的范围

内（大约距土壤表层 25 cm 内）呈均匀状分布。

### 2.2 栅格状采样方式下<sup>137</sup>Cs 的水平分布

对试验田 64 个全样点进行了栅格状采样分析，测

试得出这些全样点<sup>137</sup>Cs 的质量活度及含量分布见 图 3。

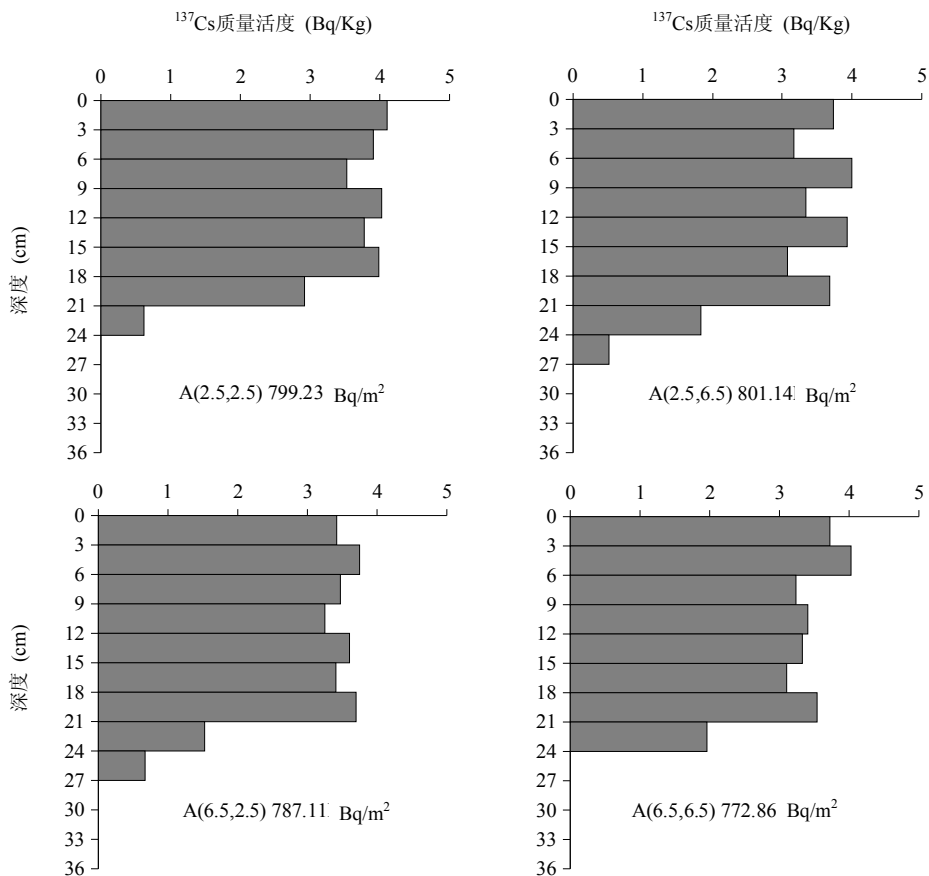


图 2 <sup>137</sup>Cs 在 4 个分层样中的深度分布特征

Fig. 2 Distributions of <sup>137</sup>Cs in four stratified samples

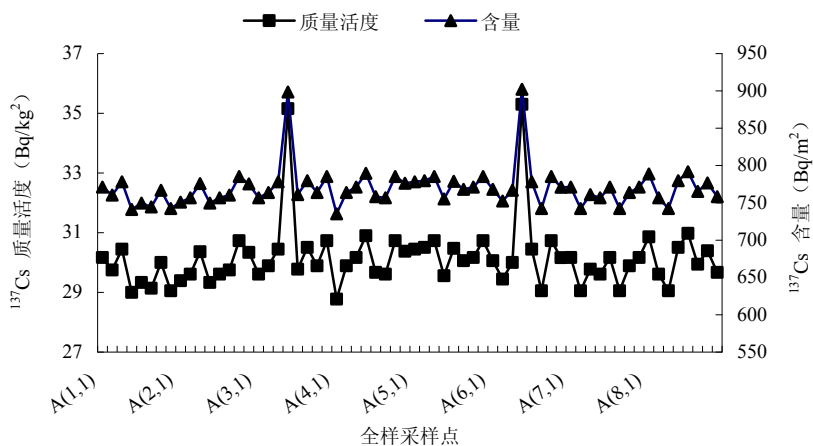


图 3 <sup>137</sup>Cs 在各个全样点的分布特征

Fig. 3 Distributions of <sup>137</sup>Cs in all whole samples

在所有样点中存在 A(3,4) 和 A(6,4) 两个样点<sup>137</sup>Cs 的质量活度相对较大, 分别为 35.16 Bq/kg 和 35.31 Bq/kg, 相对应的<sup>137</sup>Cs 含量为 898.48 Bq/m<sup>2</sup> 和 902.20 Bq/m<sup>2</sup>。之所以出现两个较大值, 分析原因可能有两个: ①耕作过程中使用农家肥产生的。在耕作前将农家肥堆积在一起, 直到农歇期完开始耕种时才将其播撒开来, 这样致使原堆放肥料的土壤中农家肥含量高, 其它土壤中的农家肥含量低, 由于农家肥中含有大量的有机质, 且有机质可以强烈地吸附和固定<sup>137</sup>Cs, 在采集过程中, 正好采集到农家肥含量高的土壤样品, 致使<sup>137</sup>Cs 的质量活度相对偏高。②犁耕层深度分布的不均匀性。人工或农机化粗放式的耕作时, 由于原来存在于耕地中的垄沟被翻耕的土壤颗粒填埋, 造成个别地方犁耕层的深度较大, 在采集样品时, 所取出的全样品均来自犁耕层内的土壤, 由于<sup>137</sup>Cs 集中存在于犁耕层内, 因此造成<sup>137</sup>Cs 的质量活度偏大。

对剩余的 62 个全样点的结果进行分析, <sup>137</sup>Cs 的质量活度介于 28.77 ~ 30.98 Bq/kg 之间, 平均值为 29.97 Bq/kg, 求其方差为 0.31 Bq/kg, 根据方差的数学意义, 在整个样本容量中, 表示个体之间波动的大小, 方差越小, 其样本越稳定, 个体之间差异越小。此试验求出的方差值相对于各个采样点的值来说较小, 反映了在该试验田中, <sup>137</sup>Cs 沉降以后分布比较稳定, 在地表水平面上呈均一性分布, 没有出现较大的波动。由此得出, 在较小的区域范围内, <sup>137</sup>Cs 随大气沉降到达地表后, 在地表水平上分布亦呈现均一性特征。

应用公式 (2) 得出全样品中<sup>137</sup>Cs 的含量值 (图 3), 这些值介于 735.34 ~ 791.74 Bq/m<sup>2</sup> 之间 (A(3,4) 和 A(6,4) 两个样点除外), 结合上述的 4 个分层样的<sup>137</sup>Cs 含量值, 将<sup>137</sup>Cs 含量值与本课题组成员张燕等<sup>[13]</sup>2002 年研究云南地区滇池流域<sup>137</sup>Cs 的背景值为 906 Bq/m<sup>2</sup>, 按照现有研究结论, 将该值校正至采样年份 2007 年, 获得背景值约为 835 Bq/m<sup>2</sup> 进行比较, 不难发现此农耕地的<sup>137</sup>Cs 含量值偏低一些。根据<sup>137</sup>Cs 示踪原理: 采样点<sup>137</sup>Cs 的含量与附近的未被扰动的或固定的背景值位置的含量比较减少的样点表示发生土壤侵蚀, 增加的样点表示发生土壤沉积, 通过定量模型将<sup>137</sup>Cs 减少或增加的百分比进一步换算成土壤侵蚀或沉积量。由此可以说明作为本研究的试验田, 由于长期人类活动的干扰, 在一定程度上发生了土壤侵蚀。

### 3 结论与讨论

根据<sup>137</sup>Cs 在土壤环境中具有的特殊理化性质, 利用两种不同的采样方式, 对云南省滇池流域关山水库

附近的典型农耕地中<sup>137</sup>Cs 进行测试分析, 得出以下几点结论:

(1) 通过分析<sup>137</sup>Cs 的剖面分布特征, 结果发现在耕作土中, 由于人类耕作活动的影响, <sup>137</sup>Cs 主要分布在犁层的范围内 (大约距地表 25 cm 左右), 且呈均匀状分布, 自耕层以下, <sup>137</sup>Cs 的质量活度相对较低, 有时甚至检测不到其存在, 与前人得出的结论一致。

(2) 选择典型的农耕地作为试验田, 采集<sup>137</sup>Cs 分层样和全样, 并对其进行测试计算, 得出分层样品各个层的<sup>137</sup>Cs 质量活度介于 2.92 ~ 4.01 Bq/kg 之间, 不存在较大的波动性, 呈稳定性分布状态; 全样品中<sup>137</sup>Cs 的质量活度介于 28.77 ~ 30.98 Bq/kg 之间。对<sup>137</sup>Cs 的分布来说, 其在土壤剖面中和地表水平面上均呈现相对均一化的分布特征。

(3) 通过计算<sup>137</sup>Cs 的含量值, 并与本课题组研究滇池流域的<sup>137</sup>Cs 背景值相比较, 得出该农耕地的<sup>137</sup>Cs 含量偏低, 根据<sup>137</sup>Cs 示踪原理, 说明本区域在一定程度上发生了土壤侵蚀现象, 借助于<sup>137</sup>Cs 示踪技术对当地的土壤侵蚀速率进行有效估算将是今后试验研究工作的重点。

### 参考文献:

- [1] Ritchie JC, McHenry JR. Application of radioactive caesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review. *J. Environ. Qual.*, 1990, (19): 215-233
- [2] Walling DE, Quine TA. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1990, 2: 161-175
- [3] Higgitt DL. The development and application of caesium-137 measurement in erosion investigation // Foster IDL, Gurnell AM, Webb BW. *Sediment and Water Quality in River Catchments*. Chichester, Wiley, 1995: 287-305
- [4] Sutherland RA, de Jong E. Estimation of sediment redistribution within agricultural fields using caesium-137. *Crystal Springs*. Saskatchewan, Canada, *Applied Geography*, 1990, (10): 205-221
- [5] 张信宝, 李少龙, 王成华, 谭万沛, 赵庆昌, 张一云, 严美琼, 刘亚伦, 蒋锦江, 肖举乐, 周杰. 黄土高原小流域泥沙来源的<sup>137</sup>Cs 法研究. *科学通报*, 1989, 34(3): 210-213
- [6] Ritchie JC, Spraberry JA, McHenry JR. Estimating soil erosion from the redistribution of fallout <sup>137</sup>Cs. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1974, 38: 137-139
- [7] 唐翔宇, 杨浩, 赵其国, 李仁英, 朱振华, 濮励杰. <sup>137</sup>Cs 示踪技术在土壤侵蚀估算中的应用研究进展. *地球科学进展*, 2000, 15(5): 576-582

- [8] 杨浩, 杜明远, 赵其国, 阳捷行, 八田珠郎. 基于<sup>137</sup>Cs地表富集作用的土壤侵蚀速率的定量模型. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 42-48
- [9] 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 壮族地质研究所, 南京地质古生物研究所. 云南断陷湖泊环境与沉积. 北京: 科学出版社, 1989: 9, 128-130, 322, 488
- [10] 王红. 防护林建设对滇池流域生态环境的有利影响. 云南环境科学, 1997, 16(3): 56-58
- [11] 濮励杰, 包浩生, 彭补拙, Higgitt DL. <sup>137</sup>Cs应用于我国西部风蚀地区土地退化的初步研究——以新疆库尔勒地区为例. 土壤学报, 1998, 35(4): 441-449
- [12] de Jong E, Begg CBM, Kachanoski RG. Estimates of soil erosion and deposition for some Saskatchewan soils. Canadian Journal of Soil Science, 1983, 63: 607-617
- [13] 张燕, 彭补拙, 陈捷. <sup>137</sup>Cs示踪法估算滇池流域土壤侵蚀. 核农学报, 2005, 19(2): 125-128

## Study on Homogeneity Distribution of <sup>137</sup>Cs in Agricultural Soils

WANG Xiao-lei<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>, SANG Li-juan<sup>1</sup>, LIU Xiao-hai<sup>2</sup>, ZHAO Qi-guo<sup>1,3</sup>

(1 School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2 Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China; 3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Selected a relatively flat farmland with the area of 35 m × 30 m, located 68 sites and collected 112 samples in total, vertical distribution and horizontal distribution of <sup>137</sup>Cs in the agricultural soil were analyzed. The results indicated that the activity of <sup>137</sup>Cs concentrated in the topsoil of the agricultural soil, and ranged from 2.92 to 4.01 Bq/kg for every stratified sample and from 28.77 to 30.98 Bq/kg for all whole samples, which proved the characteristic of homogeneity in the vertical and horizontal distribution on soil surface.

**Key words:** <sup>137</sup>Cs settlement, Agricultural soil, Homogeneous distribution