

内蒙古中东部地区 ^{137}Cs 背景值的确定

胡云锋, 刘纪远, 巴图娜存, 甄 霖

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 在 ^{137}Cs 环境示踪研究中, 区域 ^{137}Cs 背景值 (CRI) 的获取存在许多困难和不确定性。在总结传统 ^{137}Cs 区域背景值获取方法基础上, 本文提出了适用于大尺度区域和长距离路线考察的区域 ^{137}Cs 背景值获取技术路线, 即在参考有关地理背景信息和长时间序列遥感信息、科学划分子区基础上, 根据理论模型计算得到区域 ^{137}Cs 背景值潜在值域, 并开展基于 ^{137}Cs 土壤剖面分布形态特征的蚀积过程分析, 最终确定 ^{137}Cs 区域背景样地和区域背景值。以上述技术流程为指导, 本文作者在内蒙古高平原中东部地区开展案例研究, 结果表明: 兴安盟东部、南部暗栗钙土研究区的 CRI 为 $2447 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, 通辽市中部、南部和赤峰市东部风沙土研究区的 CRI 为 $2430 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, 赤峰市西北部黑钙土研究区的 CRI 为 $2384 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, 锡林郭勒盟南部栗钙土研究区的 CRI 为 $2368 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

关键词: 大尺度区域; 同位素示踪; ^{137}Cs 背景值; 采样方法; 内蒙古

DOI: 10.11821/dlxb201403006

1 引言

自然界土壤中放射性同位素 ^{137}Cs 主要来源于20世纪50-70年代的大气核爆炸。核爆形成的 ^{137}Cs 粒子从大气中沉降后与地表土壤细颗粒物紧密结合, 基本不因植物吸收或土壤淋滤而损失, 其迁移只受土壤颗粒的机械运动影响, 这使得 ^{137}Cs 成为良好的环境示踪剂^[1-3]。自1960年代以来, 基于 ^{137}Cs 环境示踪特性的方法、模型和技术日渐成熟, 它在土壤侵蚀和泥沙沉积定量研究中应用日益广泛^[4-8]。

^{137}Cs 环境示踪研究中, 科学准确确定区域 ^{137}Cs 背景点、厘定区域 ^{137}Cs 背景值 (CRI: ^{137}Cs Reference Inventory), 这是应用 ^{137}Cs 示踪技术开展土壤侵蚀/沉积定量测量的前提^[9-10]。然而受大气环流、区域气候、地形地貌、土壤性状及土地利用等时空异质要素影响, 自然界中 ^{137}Cs 的空间分布并不均匀, ^{137}Cs 背景值存在明显的空间分异^[3, 10-11]; 再加上受到差异化的采样测量技术影响, 要获取可靠的CRI样地及准确的CRI值存在许多困难和不确定性^[12-16]。

当前, 主要有2种获取 ^{137}Cs 区域背景值的方法, 一是利用 ^{137}Cs 全球空间分布估算模型计算得到, 二是通过现场踏勘采样及实验室测量得到, 两种方法在应用中各有其优缺点。如何结合两种方法的优点, 合理准确地确定CRI样地和CRI值, 这是应用 ^{137}Cs 示踪技术开展土壤侵蚀/沉积定量研究的关键^[11, 17]。本文在总结CRI样地和CRI值获取方法的基础上, 提出适用于大尺度区域和长距离路线考察的CRI样地和CRI值获取的技术路线, 进而以该技术路线为指导, 在内蒙古开展案例研究, 最终确定研究区内各个子区的 ^{137}Cs 背景值。

收稿日期: 2013-07-16; 修订日期: 2013-12-27

基金项目: 国家973计划 (2010CB950904); 国家自然科学基金 (40971223); 中国科学院知识创新方向性项目 (KZCX2-EW-306) [Foundation: National Key Basic Research Program of China (973 Program), No.2010CB950904; National Natural Science Foundation of China, No.40971223; Knowledge Innovation Project of CAS, No.KZCX2-EW-306]

作者简介: 胡云锋 (1974-), 副研究员, 中国地理学会会员 (S110008243M), 主要从事蒙古高原资源环境监测评估研究。
E-mail: huyf@lreis.ac.cn

2 CRI的确定方法

2.1 存在问题

一方面,由 Walling 和 He 等研发、用于估算全球任意地点 CRI 值的 ^{137}Cs 空间分布理论模型^[10]没有得到足够重视和有效应用。一般认为,该模型内嵌有 ^{137}Cs 扩散物理机制,模拟结果可大致反映 CRI 在区域上的分异规律,并作为现场实测值的参考。对中国境内 66 个实测 CRI 值验证分析表明,有 10.6% 样点其理论模型模拟值与实测值基本吻合,18.2% 的样点其理论模型模拟值相比于实测值偏高,71.2% 的样点其理论模型模拟值较实测值偏低^[11]。在毗邻内蒙古的黄土高原地区,现场实测值一般为理论模型模拟值的 120%~155%,平均为 140%。鉴于此,在无法通过采样实测方法获取 CRI 值情况下,可以将 ^{137}Cs 空间分布理论模型模拟值作为 CRI 值使用,刘纪远等在蒙古高原塔里亚特—锡林浩特样带上在这方面应用的成功案例^[18]。

另一方面,研究人员过于相信实测 CRI 值,但又没有对实测 CRI 值做充分的可靠性检验。事实上,不同研究团队在踏勘选点、采样测试、事后遴选等过程中存在差别,同时也普遍存在采样流程不规范、采样数量不足、未深入分析 ^{137}Cs 土壤剖面分布形态、未作统计变异分析等问题。Sutherland 等对国外文献的梳理表明,仅有 11% 的研究人员事先就布点采样方案做过统计分析^[15];刘宇等对国内文献的整理也表明,绝大部分研究中的区域背景样地采样数量过少,38% 的文献中区域背景值的采样数仅为 1 个^[17]。并且,很少有研究人员会针对区域背景点中 ^{137}Cs 土壤剖面的分布进行描述,更很少有结合土地覆被和土地利用变化历史开展蚀积过程的分析。这些问题对实测 CRI 样地和 CRI 值的可靠程度带来很大的不确定性。

此外,在大尺度区域和长距离路线考察中,CRI 样地和 CRI 值的获取又有其特殊性。传统的 ^{137}Cs 环境示踪研究主要在中国南方丘陵山区和西北黄土沟壑区开展。这些地区地形复杂,区域 CRI 空间分异及土壤侵蚀强度的空间分异非常剧烈,研究多依托地貌单元直接确定研究区。由于研究区面积较小、坡面长度较短,因此野外踏勘、反复遴选样地的时间成本不高,采集和测试少量 ^{137}Cs 样品的经济成本也较低。但是,在内蒙古高原、青藏高原、东北平原等高平原地区,由于区域地形辽阔平坦、地表景观单调,区域 CRI 值和风力侵蚀强度存在较明显的梯度变化规律。为适应上述特点,研究多采用路线调查方式进行,时间约束性较强。一般采用沿途顺序采样,不允许在一个地点长期逗留、反复踏勘;在区域上大量采集和测试样品的 ^{137}Cs 活度,其经济成本极高。

因此,在大尺度区域(如面积在 100 km² 以上)和长距离路线(如路线长在 100 km 以上)调查环境中,如何通过一次路线考察和有限数量的样地采样,最终快速、可靠地遴选出 CRI 样地、确定 CRI 值,这是在中国北方高平原、风力侵蚀区推广应用 ^{137}Cs 示踪技术的一个关键问题。

2.2 方法流程

在大尺度区域和长距离路线调查中,本文提出如下方案,即:借助长时间序列遥感信息确定样地土地利用与土地覆被历史,结合 ^{137}Cs 空间分布理论模型模拟成果和野外调研实测数据,围绕蚀积过程、 ^{137}Cs 活度总量空间变异及毗邻区对比等综合分析,科学合理确定 CRI 样地和 CRI 值。具体流程为:

(1) 划分研究子区:考虑影响 ^{137}Cs 沉降、迁移的主要因子,参考土壤类型图、植被类型图、土地利用区划图、气候(降水)分布图等,将大尺度研究区划分为若干个面积更小的研究子区,从而减小各个研究子区内部 ^{137}Cs 活度总量(CPI: ^{137}Cs Point Inventory)的空间变异程度,提高区域 CRI 的代表性。

(2) 预选目标样地:鉴于长距离路线考察中时间约束性较强、详细的踏勘对比工作难

以开展这一特点,可基于长时间序列的遥感对地观测信息和其它历史土地利用信息,结合地形地貌等数据,在室内预先确定区域¹³⁷Cs背景点目标样地。一般应选择1950年代以来未受或少受侵蚀/沉积过程、人类干扰过程的草地,如长期围封禁牧的高盖度草地(如打草场)、坡顶的荒草地(如老坟地);特殊情况下,也可以使用侵蚀/堆积过程极为微弱的其它类型样地,如峁顶的旱作耕地(黄土高原区)、坡顶老旧水稻田(南方丘陵区)等^[19-23]。

(3) 样品采集及CPI计算:在目标样地开展土壤分层样、土壤全样及土壤环刀样的采集。一般来说,至少应采集1个环刀样、1组分层样点(单层厚度以3~6 cm为宜;在中国北方草原地区,采样深度一般应至30 cm),在分层样附近按梅花形布置3~8个全样。将样品交分析室,测量环刀样土壤容重,测量层样、全样的单位质量¹³⁷Cs活度,最终计算得到各个样点的¹³⁷Cs面积活度CPI。

(4) CRI值域计算:根据各分区经度、纬度和年降水量信息,利用Walling和He研发的¹³⁷Cs空间分布模型,估算得到区域¹³⁷Cs背景理论值(T-CRI: Theoretical CRI)。根据文献对比,确定T-CRI的缩放系数(如在蒙古高原,T-CRI的缩放系数为120%~155%)^[11],由此计算得到CRI潜在值域(PR-CRI: Potential Range of CRI)。继而比较PR-CRI和实测样点的CPI值,将处于PR-CRI值域的实测样点作为区域¹³⁷Cs候选背景样地;

(5) CRI样地的确定:基于前述候选背景样地中的分层样数据,制作¹³⁷Cs土壤垂直剖面空间分布图,开展蚀积过程分析,最终遴选确立CRI样地。典型的CRI样地,其¹³⁷Cs剖面分布形态为典型负指数分布或小型单峰+负指数分布;特殊情况下,呈上下均匀分布形态的老梯田样点也可以作为CRI样地。对于不在前述候选背景样地的其它数据点,也可以制作¹³⁷Cs土壤垂直剖面空间分布图以备后续分析。

(6) CRI值的确定:针对上一步主要依据分层样¹³⁷Cs剖面分布形态特征而确立的CRI样地,进一步结合该样点周围的其它全样样点的CPI信息,开展统计学分析,计算该样地中全部样点CPI的变异系数。当CPI的变异程度满足预设的置信水平时,依照统计学原理,以全部CPI的均值作为区域¹³⁷Cs背景值(CRI),同时计算得到CRI的标准差。

(7) 毗邻地区比较分析:将前述CRI样地、CRI值与毗邻地区相关研究成果进行比较。比较前,应首先利用¹³⁷Cs衰变系数将不同年份的CPI数值校正到同一基准年份,而后针对这些校正值的空间展布规律进行分析。分析不同结果之间是否接近或存在巨大变异?结果在空间上的分布格局是否符合理论规律?特别是要重点评估CRI数据的空间展布格局与降雨分布之间的联系。

3 应用案例

3.1 研究区概况

内蒙古中东部地处蒙古高原东南缘、中国北方农牧交错带核心区。本区大致包括内蒙古自治区兴安盟、通辽市、赤峰市和锡林郭勒盟等4个盟市,地域范围为111°8'47"E~124°21'42"E、41°18'27"N~47°39'19"N(图1)。从生态景观上看,本区以典型草原、农田和沙地为主,同时有少量森林和湿地。内蒙古中东部是我国北方风力侵蚀、水力侵蚀及风水两相侵蚀较为严重的地区^[14],土壤风蚀导致的沙尘天气是中国华北、东北乃至整个东亚地区突出的环境问题^[24-27]。

据中国科学院南京土壤研究所制作、地理科学与资源研究所数字化形成的1:400万中国土壤类型图,本区土壤主要包括栗钙土、风沙土、黑钙土等3个土类,暗栗钙土、栗钙土、流动风沙土、半固定风沙土、固定风沙土、黑钙土亚类等6个土壤亚类,此外还有少量褐土、淋溶褐土、黑潮土、暗棕壤和暗灰色森林土亚类土壤(图1)。

野外工作是在2010年7月25日至8月5日期间进行,采用路线调查方式。考察路线总

长度约为 2600 km，西起锡林郭勒盟正镶白旗、东至兴安盟乌兰浩特市，主要沿内蒙古省际大通道 (S308、S306、G111) 延伸。

3.2 样品采集与数据预处理

样品采集与数据预处理工作包括前文所述的 (1) 划分研究子区、(2) 预选目标样地和 (3) 样品采集及 CPI 计算等 3 个步骤。

根据图 1 所示的土壤类型分布图，同时考虑土地覆被与土地利用状况，将内蒙古中东部 2 盟 2 市研究区进一步划分为 4 个研究子区，即：暗栗钙土区、风沙土区、黑钙土区和栗钙土区。

基于中国科学院地理科学与资源研究所提供 20 世纪土地利用与土地覆被时空数据平台^[28-29]及 DEM 等辅助数据，在考察前预先标注了 200 余个目标样地，包括 50 个预期背景样地及 150 个分年代开垦草地或长期耕地。预选的 50 个目标背景样地其土地覆被类型均为高盖度草地，且自 1970 年代以来土地覆被类型没有变动。

依据前述 200 余个目标样地，在路线考察中根据实际情况临时调整后共采集 91 个样地，包括 15 个预期背景样地和 76 个分年代开垦草地或长期耕地样地。这 15 个预期背景样地主要分布于长期围封草地、打草场、高覆盖草地或长期固定沙丘等地点 (图 1)。

在上述备选的样地中采集环刀样、层样。层样采集深度均为 30 cm，层样分层间隔为 6 cm。根据环刀样，可计算土壤容重。其它样品在烘干、研磨、粉碎、过筛 (<2 mm) 后，送中国地质大学 (北京) 辐射与环境实验室测定 ¹³⁷Cs。样点 ¹³⁷Cs 总量由下式计算得到：

$$CPI = \sum_{i=1}^n 1000 \cdot C_i \cdot B_i \cdot D_i$$

式中：CPI 是样点 ¹³⁷Cs 总量，i 为层序号，n 为采样层数，C_i 为第 i 采样层中 ¹³⁷Cs 的单位质量活度，B_i 为第 i 采样层的土壤容重 (mg/m³)，D_i 为第 i 采样层的厚度 (m)。

3.3 CRI 值域分析

由 Walling 和 He 研发的 ¹³⁷Cs 空间分布模型估算得到的 CRI 理论值 (T-CRI)^[10]，进一步根据文献确定了内蒙古地区 T-CRI 的缩放系数 (120%~155%)^[11]，由此得到各个地区 CRI 潜在值域 (PR-CRI)。对比表明 (表 1)，暗栗钙土区的 A3、A4 样点、黑钙土区的 S2 样点和栗钙土区的 L1、L2、L3 样点的 ¹³⁷Cs 实测总量在 PR-CRI 范围之内，可以作为候选区域背景样地作进一步考察。

3.4 CRI 样地的确定

针对 A3、A4、S2、L1、L2、L3 等 6 个样地，¹³⁷Cs 的土壤剖面分布形态如图 2 所示。A4 和 L3 样点剖面中，¹³⁷Cs 主要分布在顶部 3 层土壤中 (0~18 cm)，在 18 cm 以下未检测出 ¹³⁷Cs；土壤剖面上的 ¹³⁷Cs 活度峰值分别为 17.24 Bq·kg⁻¹ 和 21.19 Bq·kg⁻¹，均出现在顶

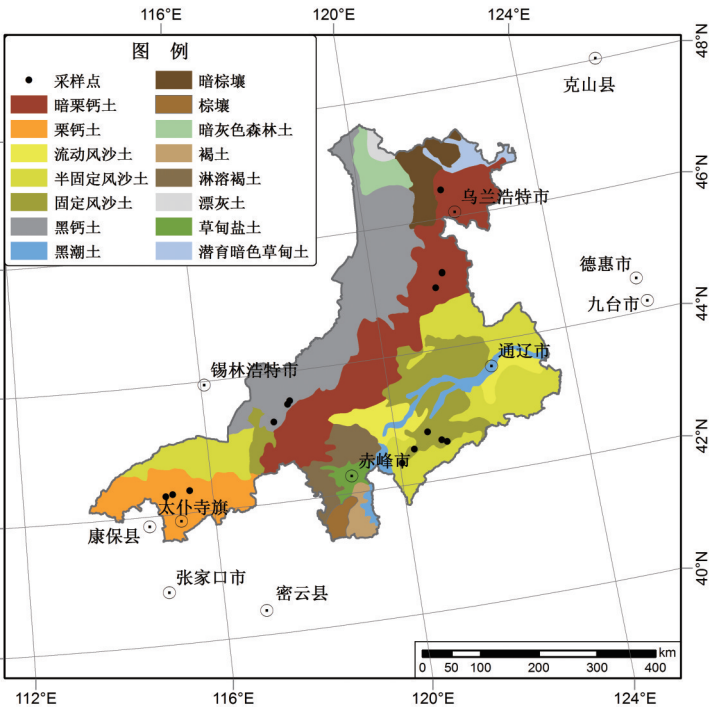


图 1 研究区位置示意图
Fig. 1 Distributions of soil types and sampling plots in the study area

表1 ¹³⁷Cs背景值的计算
Tab. 1 Calculation processes of ¹³⁷Cs Reference Inventory (CRI) in different sub-regions

研究子区	样点 编号	经度 (°E)	纬度 (°N)	年降雨量 /mm·a ⁻¹	理论值 (T-CRI)/Bq·m ⁻²	CRI值域 (PR-CRI)/Bq·m ⁻²	实测值 /Bq·m ⁻²	继续考察?
暗栗钙土区	A1	121.37	44.95	415	1812	2174~2809	1250	否
	A2	121.56	45.16				3174	否
	A3	121.56	45.17				2809	是
	A4	121.84	46.44				2084	是
	F1	120.05	42.35				1214	否
风沙土区	F2	120.36	42.54	336	1787	2144~2770	1617	否
	F3	120.69	42.77				1060	否
	F4	120.96	42.61				3420	否
	F5	121.07	42.57				1464	否
	S1	117.48	43.25				171	否
黑钙土区	S2	117.81	43.50	380	1753	2224~2872	2207	是
	S3	117.87	43.54				4111	否
	L1	115.53	42.34				2259	是
栗钙土区	L2	115.01	42.29	365	1727	2072~2677	2084	是
	L3	115.16	42.31				2477	是

部第1层(0~6 cm)。整体上看, ¹³⁷Cs的分布形态呈典型负指数分布, 属¹³⁷Cs在区域背景样地的典型分布形态^[30]。因此, 综合判断, A4和L3可作为区域CRI样地。

A3和L1样点剖面中, ¹³⁷Cs分布最深可达30 cm和24 cm, 但到最底层(24~30 cm)时, ¹³⁷Cs活度非常小或基本不可检出; 土壤剖面上的活度峰值分别为12.50 Bq·kg⁻¹和10.87 Bq·kg⁻¹, 均出现在第2层(6~12 cm)。整体上看, ¹³⁷Cs分布形态呈单峰+负指数分布, 这种分布形态一般认为是与¹³⁷Cs沉降到地表后继续向下扩散过程有关^[30]。综合判断, A3和L1可以作为区域CRI样地。

S2样点¹³⁷Cs分布深度最深可达30 cm, 并且呈现随深度加大、¹³⁷Cs活度变大的态势; 至最底层(24~30 cm)时, 土壤中¹³⁷Cs活度变得最大。进一步考虑到该样地类型为长期固定沙地, 可以推断该点由于后期风沙堆积作用导致大量的风沙土进入样地。综合判断, S2显然不是区域CRI样地。

L2样点的¹³⁷Cs分布深度较浅, ¹³⁷Cs仅分布于顶部两层(0~6 cm和6~12 cm), 与区域背景样地中¹³⁷Cs一般应分布至18 cm处的一般共识不符。进一步考虑到L1样点的CPI是L1、L2、L3三个样地CPI的最小值, 因此基本可以推测L1样地可能遭受土壤侵蚀导致样点中CPI偏小。综合判断, 将L2作为区域CRI样地使用存在一定风险。

另一方面, 针对前述样地中不符合P-CRI值域区间的其它9个土壤样点(A1、A2、F1、F2、F3、F4、F5、S1、S3)进行剖面形态分析, 可以知道:

样地F1、F5、S1中, ¹³⁷Cs的分布形态虽然呈现负指数分布, 但样地CPI值明显小于PR-CRI最小值; 并且3个样地中的¹³⁷Cs的分布深度较浅, 仅在顶部第1层或第2层有分布。这些特征指示这3个样地的表层土壤可能遭受过侵蚀, 土壤¹³⁷Cs已经流失。综合判断, F1、F5、S1不能作为区域背景样地。

样地F4和S3中, ¹³⁷Cs的分布形态复杂, 明显不符合背景¹³⁷Cs样地应有的负指数、或者单峰+负指数的分布形态; 在底部24~30 cm分层处, ¹³⁷Cs活度仍然较高; 且样地CPI显著大于PR-CRI最大值。这些特征指示这2个样地的可能经受过风沙堆积过程。综合判断, F4和S3样地不宜作为区域背景样地。

样地A1、F2、F3中, ¹³⁷Cs的分布形态复杂, 明显不符合背景¹³⁷Cs样地应有的负指数、或者单峰+负指数的分布形态; 并且样地的CPI值明显小于PR-CRI最小值。这些特征指示这3个样地的可能遭受过复杂的侵蚀—堆积过程。因此, 这3个样地同样不能作为区

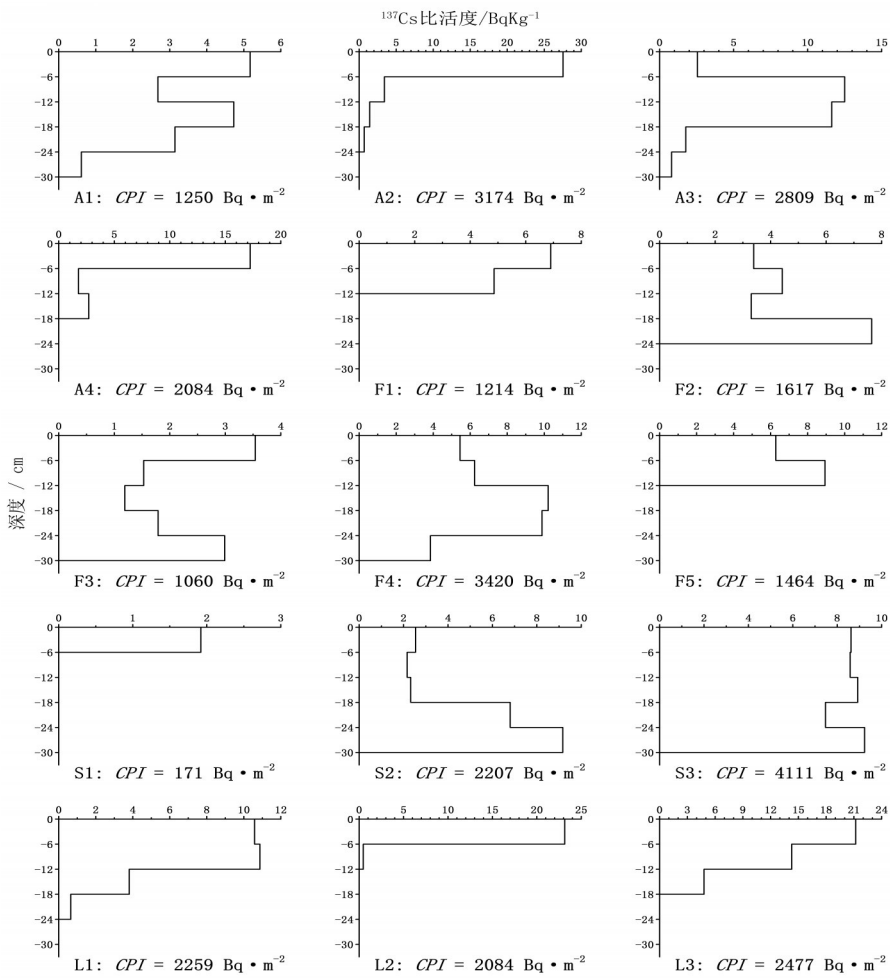


图2 ^{137}Cs 的土壤剖面分布形态和总量

Fig. 2 Distribution patterns and corresponding inventories of ^{137}Cs in different sampling plots

域背景样地。

特别地，针对A2样地，该样地CPI值 ($3174 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) 显著超过PR-CRI最大值 ($2809 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$)。虽然总体呈典型负指数分布形态，但表层 (0~6 cm)活度明显偏大，显著大于同属暗栗钙土区的A1、A3和A4的表层土壤 ^{137}Cs 活度值。因此推测A2样地可能遭受堆积作用，导致样点顶部 ^{137}Cs 活度偏高。综合判断，将A2作为区域CRI样地使用存在很大的不确定性。

3.5 CRI值的确定

根据CRI值域分析、样地 ^{137}Cs 剖面分布形态特征及蚀积过程分析，研究区内各个子区域的CRI值确认如下：

在兴安盟东部、南部的暗栗钙土区域，将A3、A4作为区域 ^{137}Cs 背景样地，背景值可取两样点 ^{137}Cs 参考值的平均值，为 $2447 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ；该背景值是模型模拟值 ($1812 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) 的135%。由于同时符合CPI总量即垂直分布形态要求的样点少于3个，因此无法做区域CRI的空间变异性分析，也无法求取CRI均值的标准差。

在锡林郭勒盟南部的栗钙土区域，将L1和L3作为区域 ^{137}Cs 背景样地，背景值可取两样点 ^{137}Cs 参考值的平均值，为 $2368 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ；该背景值是模型模拟值 ($1727 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) 的137%。由于同时符合CPI总量即垂直分布形态要求的样点少于3个，因此无法做区域CRI

的空间变异性分析、也无法求取CRI均值的标准差。

在赤峰市西部的黑钙土区中,没有同时符合PR-CRI总量控制及¹³⁷Cs土壤剖面分布形态控制的理想样点。为此,可以根据前述栗钙土区域、暗栗钙土区域实测CRI值与模型模拟值的比值关系,即前者是后者的136%左右,可以估算得到这一地区的CRI,为2384 Bq·m⁻²。

在通辽市中部、南部、赤峰市东部的风沙土区域,虽然有符合PR-CRI总量控制要求的样点,但没有符合¹³⁷Cs土壤剖面分布形态要求的理想样点。根据前述栗钙土区域、暗栗钙土区域实测CRI值与模型模拟值的比值关系,即前者是后者的136%左右,可以估算得到这一地区的CRI,为2430 Bq·m⁻²。

4 讨论

4.1 毗邻地区CRI值对比

内蒙古中东部毗邻区的¹³⁷Cs研究案例主要在内蒙古太仆寺旗和锡林浩特,河北省康保,吉林省九台、德惠,以及黑龙江克山等地区^[7, 18, 31-35]。使用λ = 0.0227的衰变系数,可以将不同研究人员在不同年份测得的CRI数据统一校正到2010年(表2)。

理论上,由于本文研究区的4个子区在空间上为上述7个毗邻区研究所包围,考虑到CRI在空间上的规律分异和连续性,本文所得的区域CRI值也应该在7个毗邻区所得的CRI值域范围内;在空间梯度变化上,与本区降水自东向西、自南向北递减的规律相对应,CRI也应有同样变化趋势^[11]。

从实际情况上看,与毗邻区CRI值相比,本文在内蒙古中东部所得结果(2368~2447 Bq/m²) 在表2所列的有关研究成果上下限之间(1777~3362 Bq/m²),与这些研究成果的均值(2434 Bq/m²)几乎完全吻合。在不考虑毗邻的内蒙古太仆寺旗、河北省康保县两个高CRI值区情况下,内蒙古中东部地区及其毗邻地区的CRI可以进一步框定为1777~2335 Bq/m²,变异系数为9.6%,这与本研究结果(2368~2447 Bq/m²,变异系数约为2%)是基本一致的。从CRI空间分布上看,本文所获取的4个研究子区的CRI值大致遵循从东到西、从南向北,随着区域年降雨量减小,CRI随之减少的规律。因此综合判断认为,本研究所所得各研究子区CRI值合理可信,支持获取该数值的¹³⁷Cs区域背景值的确定方法科学有效。

4.2 案例研究存在的问题

针对大区域尺度和长距离路线考察中的¹³⁷Cs背景值的确定问题,本文首先提出了一套相对完整的技术路线,强调将实测数据与理论模型数据相结合,在开展基于¹³⁷Cs分层样品蚀积过程分析、样地CPI统计变异分析以及毗邻区域CRI对比等综合分析基础上,达到减少CRI不确定性的目的。但在实际研究中,虽然在实际考察、采样时,在每个研究子区均有3~6个样地,但经过基于CPI总量及¹³⁷Cs垂直剖面分布形态特征的遴选后,每个子区内

表 2 毗邻地区¹³⁷Cs背景值
Tab. 2 ¹³⁷Cs Reference Inventories (CRI) in the adjacent regions

地点	经度 (°E)	纬度 (°N)	年降雨量 (mm×a ⁻¹)	文献值 (Bq×m ⁻²)	测试年份	2010年校正值 (Bq×m ⁻²)
内蒙古锡林浩特 ^[18]	116.10	43.76	350	2036	2006	1777
内蒙古太仆寺 ^[7]	115.33	41.85	391	3933	2004	3355
河北康保 ^[32]	114.60	41.85	431	3852	2005	3362
黑龙江克山 ^[35]	125.31	48.24	499	2500	2008	2335
吉林九台 ^[31]	125.97	44.10	573	2463	2003	2054
吉林德惠 ^[34]	125.86	44.72	534	2376	2004	2027
北京密云 ^[33]	117.07	40.50	661	2446	2004	2087

符合要求的样地均减少到3个以下,因此无法就各个研究子区内CRI变异特征进行深入分析。因此,考虑到本示范研究中遴选比例均在50%以下,未来研究中为了开展空间变异分析,则每个子区至少应采集6个以上的目标背景样地。此外,为开展样地CRI统计变异分析,在每个样地内除了采集1份层样外,还需要采集3~8个全样。

此外,在风沙土研究子区中,鉴于沙丘的移动性、沙土的吸附性质、沙丘蚀积过程的复杂性等特点,针对风沙土样地 ^{137}Cs 分布形态及其指示意义的分析时应特别小心,在采样时应适当增加取样深度,一般应深达50 cm以上。在本文研究中,由于前期实验设计对于风沙土区 ^{137}Cs 空间分布复杂性考虑的不足、在风沙土区实际采样样品的数量不足,本案例研究未能获得风沙土子区中可信的CRI样地,研究子区的CRI值是在理论模拟值(T-CRI)基础上、由经验关系缩放后估测后得到的。未来如能进一步针对风沙土区土壤特点,采集得到更多、更深的风沙土样品,这将有助于获得真实可靠的CRI样地及准确的CRI值。

5 结论

受 ^{137}Cs 背景值空间异质性及采样测量方法流程差异化影响, ^{137}Cs 的区域背景值(CRI)的获取一直存在许多困难和不确定性。本文针对中国南北方自然地理条件、野外作业环境、CRI空间分布规律及土壤水力侵蚀、风力侵蚀过程的差异,设计一套适应中国北方自然环境特点、适用于大尺度区域和长距离路线考察的CRI样地及CRI值的获取方法流程。这是在中国北方风蚀区推广应用 ^{137}Cs 环境示踪技术、开展土壤风力侵蚀定量研究的关键和基础。

本文提出了借助历史遥感信息,综合 ^{137}Cs 空间分布理论模型模拟成果和野外调研实测数据,围绕 ^{137}Cs 活度总量分析、基于 ^{137}Cs 土壤剖面分布形态的蚀积过程及CPI空间变异规律和毗邻区对比分析等,科学合理地确定区域CRI样地和CRI值,由此建立的方法框架共包含7个具体步骤。以上述方法为指导,作者在内蒙古中东部高平原开展案例研究,得到了暗栗钙土区、风沙土区、黑钙土区、栗钙土区中准确、可信的CRI值。

参考文献 (References)

- [1] Rogowshi A S, Tamura T. Movement of ^{137}Cs by runoff, erosion and infiltration on the alluvial captina silt loam. *Health Physics*, 1965, 11(12): 1333-3340.
- [2] Owens P N, Walling D E, He Q P. The behaviour of bomb-derived caesium-137 fallout in catchment soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1996, 32(3): 169-191.
- [3] Zapata F, Garcia-Agudo E, Ritchie J C et al. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides//Zapata F. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. Netherlands: Springer, 2002: 1-13.
- [4] Harper R J, Gilkes R J. Evaluation of the Cs-137 techniques for estimating wind erosion losses for some sandy western-australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32(6): 1369-1387.
- [5] Yan Ping, Dong Guangrong, Zhang Xinbao et al. Preliminary results of the study on wind erosion in the Qinghai-Tibet Plateau using ^{137}Cs technique. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1019-1025. [严平, 董光荣, 张信宝 等. ^{137}Cs 法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果. *科学通报*, 2000, 45(2): 199-204.]
- [6] Zhang Chunlai, Zou Xueyong. Characteristics of ^{137}Cs deposition in steppe area. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(10): 848-852. [张春来, 邹学勇. 干草原地区土壤 ^{137}Cs 沉积特征. *科学通报*, 2002, 47(3): 221-225.]
- [7] Hu Yunfeng, Liu Jiyuan, Zhuang Dafang et al. Distribution characteristics of ^{137}Cs in wind-eroded soil profile and its use in estimating wind erosion modulus. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(11): 1155-1159. [胡云锋, 刘纪远, 庄大方 等. 风蚀土壤剖面 ^{137}Cs 的分布及侵蚀速率的估算. *科学通报*, 2005, 50(9): 933-937.]
- [8] Van Pelt R S, Zobeck T M, Ritchie J C et al. Validating the use of Cs-137 measurements to estimate rates of soil redistribution by wind. *Catena*, 2007, 70(3): 455-464.
- [9] Ritchie J C, McHenry J R. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil-erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19(2): 215-233.

- [10] Walling D E, Quine T A. Use of caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: Handbook for the application of the caesium-137 technique [D]. Exeter: Department of Geography, University of Exeter, 1993: 15-34.
- [11] Qi Yongqing, Zhang Xinbao, He Xiubin. ^{137}Cs reference inventories distribution pattern in China. Nuclear Techniques, 2006, 29(1): 42-50. [齐永青, 张信宝, 贺秀斌. 中国 ^{137}Cs 本底值区域分布研究. 核技术, 2006, 29(1): 42-50.]
- [12] Tang X Y, Yang H. Identification of ^{137}Cs reference sites in southeastern China. Pedosphere, 2006, 16(4): 468-476.
- [13] Li R Y, Yang H, Tang X Y et al. Distribution of Cs-137 and organic carbon in particle size fractions in an alumi-haplic Acrisol of Southern China. Soil Science, 2004, 169(5): 374-384.
- [14] Zhang X B, Zhang Y Y, Wen A B et al. Assessment of soil losses on cultivated land by using the Cs-137 technique in the upper Yangtze River Basin of China. Soil & Tillage Research, 2003, 69(1/2): 99-106.
- [15] Sutherland R A. Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: A literature survey. Hydrological Processes, 1996, 10(1): 43-53.
- [16] 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. Applied Radiation and Isotopes, 1996, 47(7): 699-707.
- [17] Liu Yu, Lv Yihe, Fu Bojie et al. Reference value of ^{137}Cs tracing technique in soil loss estimation: A spatial variation analysis. Geographical Research, 2010, 29(7): 1171-1181. [刘宇, 吕一河, 傅伯杰 等. ^{137}Cs 示踪法土壤侵蚀量估算的本底值问题. 地理研究, 2010, 29(7): 1171-1181.]
- [18] Liu Jiyuan, Qi Yongqing, Shi Huading et al. Estimation of wind erosion rates by using Cs-137 tracing technique: A case study in Tariat-Xilin Gol transect, Mongolian Plateau. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(5): 751-758. [刘纪远, 齐永青, 师华定 等. 蒙古高原塔里亚特—锡林郭勒样带土壤风蚀速率的 ^{137}Cs 示踪分析. 科学通报, 2007, 52(23): 2785-2791.]
- [19] Zhang Xinbao, Li Shaolong, Wang Chenghua et al. Research about the sand source in a small watershed of the Loess Plateau. Chinese Science Bulletin, 1989, 44(3): 210-213. [张信宝, 李少龙, 王成华 等. 黄土高原小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究. 科学通报, 1989, 44(3): 210-213.]
- [20] Zhang Xinbao, Li Shaolong, Wang Chenghua et al. An Initial approach to measure soil loss amount of farmland on weir and mound using ^{137}Cs method. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1988, (5): 18-22, 29. [张信宝, 李少龙, 王成华 等. ^{137}Cs 法测算梁峁坡农耕地土壤侵蚀量的初探. 水土保持通报, 1988, (5): 18-22, 29.]
- [21] Yang Mingyi, Tian Junliang, Liu Puling. Soil erosion spatial distribution patterns of different slopes by using ^{137}Cs tracer. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1999, 13(6): 368-372. [杨明义, 田均良, 刘普灵. ^{137}Cs 测定法研究不同坡面土壤侵蚀空间的分布特征. 核农学报, 1999, 13(6): 368-372.]
- [22] Wu Yonghong, Kou Quan. The method of ^{137}Cs to study soil erosion in the loess gully area of east Gansu province. Bulletin of soil and water conservation, 1997, 17(5): 7-10. [吴永红, 寇权. 陇东黄土高原沟壑区土壤侵蚀的 ^{137}Cs 法研究. 水土保持通报, 1997, 17(5): 7-10.]
- [23] Tang Xiangyu, Yang Hao, Cao Hui et al. Preliminary estimate of soil erosion rate in haplic red soil in southern China using ^{137}Cs technique. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(3): 4-7, 11. [唐翔宇, 杨浩, 曹慧 等. ^{137}Cs 法估算南方红壤地区土壤侵蚀作用的初步研究. 水土保持学报, 2001, 15(3): 4-7, 11.]
- [24] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. Geophysical Research Letters, 2003, 30(24).
- [25] Uno I, Wang Z, Chiba M et al. Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2006, 111(D12).
- [26] Husar R B, Tratt D M, Schichtel B A et al. Asian dust events of April 1998. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2001, 106(D16): 18317-18330.
- [27] Natsagdorj L, Jugder D, Chung Y S. Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937-1999. Atmospheric Environment, 2003, 37(9/10): 1401-1411.
- [28] Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000. Science in China: Series D, 2003, 46(4): 373-384. [刘纪远, 刘明亮, 庄大方 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学: D辑, 2002, 45(12): 1031-1040.]
- [29] Liu Jiyuan, Zhuang Dafang, Zhang Zengxiang et al. The establishment of land-use spatial-temporal database and its relative studies in China. Geo-Information Science, 2002, 4(3): 3-7. [刘纪远, 庄大方, 张增祥 等. 中国土地利用时空数据平台建设及其支持下的相关研究. 地球信息科学, 2002, 4(3): 3-7.]
- [30] Zhang X B, Quine T A, Walling D E et al. Application of the Cesium-137 technique in a study of soil-erosion on gully slopes in a Yuan area of the Loess Plateau near Xifeng, Gansu Province, China. Geografiska Annaler Series A-Physical Geography, 1994, 76(1/2): 103-120.
- [31] Yan Baixing. Study on reference cesium-137 inventory of black soil in Northeast China. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4): 33-36. [阎百兴. 东北黑土中 ^{137}Cs 背景值研究. 水土保持学报, 2004, 18(4): 33-36.]
- [32] Pan Xinghui, Zhang Chunlai, Wang Shengtang et al. Influence of land use/cover change on soil surface erosion/

- deposition process: Evidence from ^{137}Cs as a tracer. 2007, 27(6): 994-999. [潘星慧, 张春来, 王升堂 等. 土地利用/覆被变化对地表蚀积过程的影响. 中国沙漠, 2007, 27(6): 994-999.]
- [33] Hua Luo, Zhang Zhigang, Li Junbo et al. soil erosion and organic matter loss by using fallout ^{137}Cs as tracer in Miyun reservoir valley. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2005, 19(3): 208-213. [华珞, 张志刚, 李俊波 等. 基于土壤 ^{137}Cs 监测的土壤侵蚀与有机质流失: 以密云水库为例. 核农学报, 2005, 19(3): 208-213.]
- [34] Fang Huajun, Yang Xueming, Zhang Xiaoping et al. study on soil erosion and deposition of black soil on a sloping cultivated land using ^{137}Cs tracer method. *Acta Ecologica Sinica*, 25(6): 1376-1382. [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. 生态学报, 2005, 25(6): 1376-1382.]
- [35] Wang Yu, Yang Mingyi, Liu Puling. Contribution partition of water and wind erosion on cultivated slopes in northeast black soil region of China. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*. 2010, 24(4): 790-795. [王禹, 杨明义, 刘普灵. 东北黑土区坡耕地水蚀与风蚀速率的定量区分. 核农学报, 2010, 24(4): 790-795.]

Determination of ^{137}Cs reference inventory in the large scale region:

A case study in the central and eastern Inner Mongolia Plateau

HU Yunfeng, LIU Jiyan, Batunacun, ZHEN Lin

(*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

Abstract: In isotope ^{137}Cs tracing studies, it is a basic premise to select a suitable ^{137}Cs reference inventory (CRI) sample plot and to determine an accurate CRI value. However, there are many difficulties and uncertainties in practical studies due to the heterogeneous spatial distributions of ^{137}Cs deposition and different artificial operations in sampling and testing. In a large scale region or a long-distance field exploration, such difficulties and uncertainties become more obvious and annoying, which seriously impedes the developments of ^{137}Cs tracing technology applied in wind eroded regions, such as the Mongolia Plateau and Northeast China Plain. In this paper, studies related to the traditional CRI acquiring process were summarized at first, and then a systematic framework to get the CRI in large scale areas or long distance investigations was proposed. The framework covers 7 sub-processes and the core steps include: building sub-regions in a large area supported by geographical backgrounds and long time-serial remote sensing information, calculating the potential range of CRI according to the theoretic model which was developed by Walling D E, analyzing erosion/deposition processes based on ^{137}Cs soil profile distribution patterns, and determining the final CRI plots and CRI values. Taking the central-eastern part of Inner Mongolia Plateau as the case study region, the above steps were implemented and depicted in detail. The CRI in dark chestnut soil zone located in the east and south of Xing'an was $2447 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, the CRI in aeolian sandy soil zone stood in the south and center of Tongliao and central Chifeng was $2430 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, the CRI in sandy chernozem soil zone situated in the northwestern Chifeng was $2384 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, and the CRI in chestnut soil zone located in the southern Xilingol was $2368 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$. Compared with the relevant consequences in the adjacent areas, the above results were believed to be reliable and accurate. The CRI determination framework and key steps offered an important basis for the future ^{137}Cs tracing studies, especially in the large scale regions and long distance excursions.

Key words: large-scale region; isotope tracing; ^{137}Cs reference inventory; sampling method; Inner Mongolia