

# 中国大陆 Cs-137 背景值研究

张 威, 潘少明, 张克新, 曹立国, 赵 捷

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

**摘要:** 土壤侵蚀是关系人类生存与可持续发展的重大环境问题。20世纪60年代以来, Cs-137作为一种人工放射性示踪核素, 被广泛应用于土壤侵蚀及堆积研究。而准确估算区域Cs-137背景值(Cs-137 Reference Inventory, CRI)是应用Cs-137开展土壤侵蚀研究的前提条件, 其结果直接影响土壤侵蚀速率结果的准确性和可靠性。基于现有文献资料中获取的中国大陆102个CRI实测数据, 以及全球降水气候中心提供的降水量再分析资料(空间分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ , 1981-2010年), 在借鉴 Walling & He 模型(Walling & He Model, WHM)和 Michio Aoyama 模型(Michio Aoyama Model, MAM)的基础上, 本文建立了中国大陆 CRI 修正模型(Modified CRI Model for the Mainland of China, MCM), 并利用 Kriging/Cokriging 插值方法计算了中国大陆 CRI 的空间分布。模型评估与对比分析表明, MCM 模拟值与实测值大致吻合, 且总体高于 WHM 和 MAM 模拟值, MCM 能对中国大陆 CRI 进行较高分辨率、较高精度的模拟。模拟结果显示, 中国大陆 CRI 的范围为  $141 \sim 12123 \text{ Bq/m}^2$ , 在东北及新疆局部地区达到最大值, 最小值主要集中于  $25^{\circ}\text{N}$  以南地带。除新疆局部地区外, 中国大陆 CRI 分布整体呈现自西向东, 同纬度地区随降水量增加而增加的特点, 而纬向上主要呈现随纬度增加而增加的特点。此外, 大尺度大气流场、再悬浮过程、局部核试验等因素增加了中国大陆 CRI 分布的不均匀性。

**关键词:** Cs-137; 背景值; 修正模型; 中国大陆

DOI: 10.11821/dlxb201509010

## 1 引言

全球土壤侵蚀及其引起的土地退化、土壤酸化、土壤污染等环境问题逐渐引起关注, 成为当前各国学者竞相研究的热点<sup>[1-5]</sup>。2014年国际原子能机构报告(IAEA TECDOC SERIES 2014 Report)指出, 土地退化正影响着全球1.9亿 $\text{hm}^2$ 的农业用地, 并以每年500~700万 $\text{hm}^2$ 的速度迅速增加<sup>[6]</sup>。全球土壤退化评估调查(Global Assessment of Soil Degradation Survey)显示, 土壤侵蚀是当前最为普遍的土地退化形式, 占据84%的土地退化区域, 造成全球每年近400亿美元的社会经济损失<sup>[7-9]</sup>。随着气候变暖以及人类活动影响的加剧, 土壤侵蚀问题日益严重<sup>[10]</sup>, 如何进行更加高效的土壤评估、如何获得更加可靠的土壤空间数据、如何更加合理地计算土壤侵蚀速率成为摆在各国学者面前的重要科学问题。

Cs-137是典型的人工放射性核素, 半衰期为30.2年, 环境中的Cs-137主要来源于20世纪50-70年代的大气核试验。1963年, Yamagata等在Nature上发表了第一篇应用Cs-137示踪技术进行土壤侵蚀研究的文章<sup>[11]</sup>。随后, Cs-137示踪技术以其能够简便、高效、准

收稿日期: 2015-06-12; 修订日期: 2015-07-19

**基金项目:** 国家自然科学基金(41271289, 41166002, 41230751); 国家基础科学人才培养基金(J1103408) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41166002, No.41271289, No.41230751; National Science Fund for Fostering Talents in Basic Science, No.J1103408]

**作者简介:** 张威(1993-), 男, 主要研究方向为地球化学和气候变化。E-mail: tianxinzw@outlook.com

**通讯作者:** 潘少明(1957-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为同位素地球化学。E-mail: span@nju.edu.cn

1477-1490 页

确地获取土壤流失、沉积以及空间再分布信息的特点,被广泛应用于土壤侵蚀与泥沙沉积研究。应用Cs-137技术开展土壤侵蚀研究的前提条件是科学、准确地确定研究区域Cs-137背景值(Cs-137 Reference Inventory, CRI)。CRI可定义为在一定区域内,单位面积Cs-137大气沉降通量或未受扰动土壤Cs-137面积浓度值。CRI的测定和研究作为环境科学的一项基础工作,不仅可为土壤侵蚀研究提供基础信息,也可为区域性物质输运定量研究提供科学依据。

目前,确定CRI的方法主要有三种,一是利用Cs-137大气沉降记录进行计算,二是基于CRI全球空间分布估算模型进行模拟,三是通过现场踏勘采样及实验室测量得到。中国大陆地区缺少Cs-137大气沉降记录,并且,由于社会经济的快速发展和人类活动的加剧,理想的背景值采样区的寻找与确定愈加困难。因此,模型法或可成为中国大陆CRI研究的突破口。

1998年,Garcia利用联合国原子辐射效应科学委员会提供的Sr-90全球分布,计算了每10°纬度圈的Cs-137全球沉降<sup>[12]</sup>。在此基础上,Walling等认为降水量对Cs-137大气沉降有重要影响<sup>[13-14]</sup>,并按照10°×45°分区网格建立了全球尺度Cs-137背景值分布模型<sup>[15]</sup>。随后,齐永青等<sup>[16]</sup>尝试将该模型引入中国,虽然模拟结果普遍低于实测值,但同样具有十分重要的借鉴意义。Aoyama等<sup>[17]</sup>基于前人研究,建立了Cs-137、Sr-90等放射性核素沉降数据库,并按照10°×10°分区网格绘制了全球CRI分布图。总体而言,已有的CRI模型法研究大多立足于全球尺度的模拟,模拟的空间尺度较大的同时,也意味着其模拟精度较低,在区域性CRI研究中的应用受到限制。20多年来,中国学者一直致力于Cs-137示踪技术在土壤侵蚀与环境评价中的应用,研究区域已涉及黄土高原、四川盆地、东北黑土区、华南丘陵区、青藏高原和新疆地区等,基本能够覆盖全国,这为中国大陆CRI模拟带来了可能。

本文以中国大陆地区为研究对象,通过评估现有的CRI研究资料并开展模型优化与对比研究,计算了中国大陆CRI的分布情况及分布特征,从而为区域性CRI研究提供新方法,也可为进一步定量研究中国大陆地区土壤侵蚀和堆积,以及区域物质输移和沉积物示踪提供借鉴与参考。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据准备

**2.1.1 CRI实测数据库** 本文通过收集文献资料建立中国大陆CRI实测数据库,从而为中国大陆CRI模拟提供数据基础。自20世纪80年代以来,中国大陆地区CRI相关研究文献总计约300余篇,文献资料皆来自国内外知名学术期刊,通过剔除无实测CRI的研究文献及同一区域的重复性研究文献,在作进一步分析与评估的基础上,筛选出具有“采样设计合理、实验方法科学、数据科学可靠”等特点的CRI研究文献资料,均出自国内长期从事该方面研究的学者、单位,从而建立中国大陆CRI实测数据库。该数据库从80余篇文献或论文<sup>[18-100]</sup>中获取总计102个CRI实测数据,实测数据皆通过对研究地区未受干扰点的野外采样方法获得,数据结果科学可信。CRI采样点位及实测值可见(图1),CRI实测点位分布虽然并不均匀,且主要集中在黄土高原、四川盆地、云贵高原及内蒙古高原西南部等地,但基本能够覆盖中国大陆地区,满足进一步分析建模的基本条件。

土壤剖面中的Cs-137蓄积总量计算公式如下:

$$CPI = \sum_{i=1}^n C_i \times B_i \times D_i \quad (1)$$

式中:CPI是采样点土壤剖面的Cs-137总量(Bq/m<sup>2</sup>),背景值采样点的CPI即为背景

值;  $n$  为采样层数;  $i$  为层序号;  $C_i$  为第  $i$  采样层中 Cs-137 的比活度 (Bq/kg);  $B_i$  为第  $i$  采样层的土壤容重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $D_i$  为第  $i$  采样层的厚度 (m)。

Cs-137 衰变校正公式, 本文统一衰变校正至 2015 年 1 月 1 日:

$$CPI_N = CPI_n \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{N-n}{T}} \quad (2)$$

式中:  $CPI_N$  是衰变校正至第  $N$  年的 Cs-137 总量 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ );  $n$  是原参考文献中提供的第  $n$  年的  $CPI$  ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ );  $T$  是 Cs-137 的半衰期, 为 30.2 年。

**2.1.2 降水量数据** 本文的降水量数据资料是来自全球降水气候中心 (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC) 提供的 1981-2010 年月降水量再分析数据, 其空间分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  和  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 该数据资料集源自全球气象观测站观测数据的再分析, 并已通过质量检测 (数据来源: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/reanalysis/>)。

虽然该资料与本文的研究 (1945-2015 年) 在时间尺度上并不相同, 但是, 该资料同时具有  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  分辨率降水量数据满足研究要求; 并且, Aoyama 等<sup>[17]</sup>在建模过程中也采用了 1987-1998 年  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  分辨率的降水量数据。因此, 认为 GPCC 数据是目前最适合本研究的降水量数据集。

## 2.2 中国大陆 CRI 修正模型

本文借鉴了 Walling & He 模型 (Walling & He Model, WHM) 及 Michio Aoyama 模型 (Michio Aoyama Model, MAM), 并作修正, 从而建立了适用于中国大陆地区的 CRI 修正模型 (Modified CRI Model for the Mainland of China, MCM)。WHM 的建模方法是将全球划分为  $10^\circ \times 45^\circ$  网格, 网格沉降总量由 Garcia<sup>[12]</sup>提供的全球  $10^\circ$  纬度带 Cs-137 沉降通量计算求得, 网格内任意点 CRI 则利用其与降水量正相关关系求得<sup>[15]</sup>。WHM 的优点是

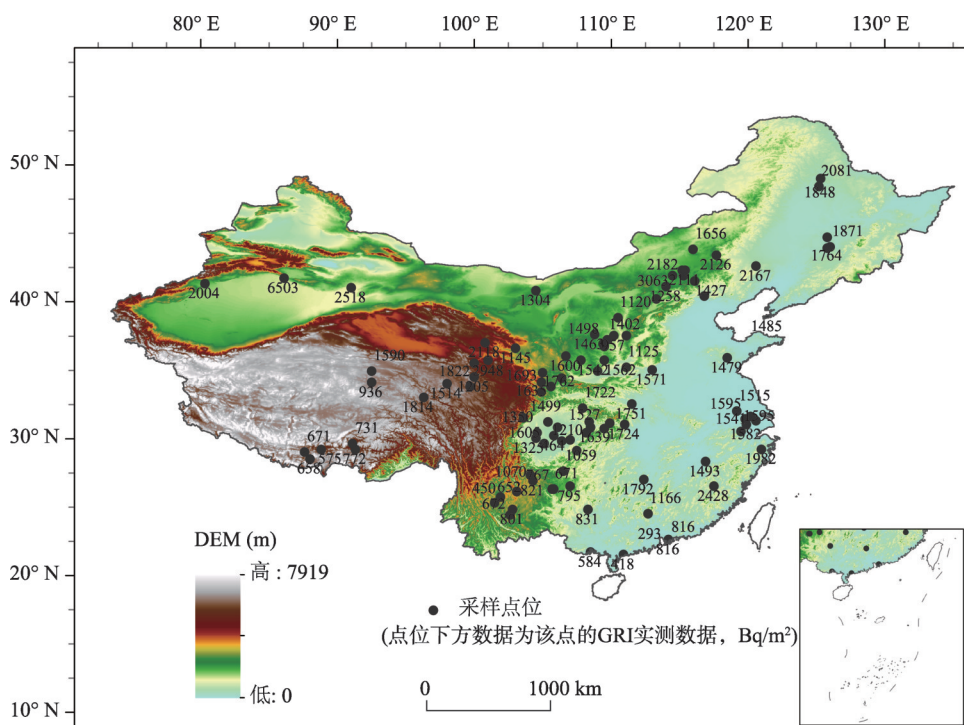


图1 中国大陆 CRI 采样点位

Fig. 1 Sampling locations of CRI in the Mainland of China

能够基于降水量的空间分布,实现全球任意点的CRI计算;而缺点是网格较大,且每个网格的沉降通量依托于模拟值。MAM基于全球713个采样点位的CRI实测数据,并将全球划分为 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 网格,假定相邻网格的CRI与降水量成正比,从而获得全球 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 网格的CRI空间分布<sup>[17]</sup>。与WHM相比,MAM网格分辨率明显提高,网格CRI计算依托于实测数据,相对准确。然而,MAM只能获得 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 网格准确的CRI数据,未能考虑网格内降水量分布情况,且网格空间尺度仍然较大,对区域性CRI模拟的精度仍然较低。

通过分析WHM和MAM,确定了MCM建模的三个基本原则:一是采用实测数据进行网格计算与模拟;二是网格内基于降水量分布计算任意点CRI;三是缩小网格空间尺度以适应区域性CRI研究。因此,MCM建模步骤如下:

第一步 建立 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 空间网格。首先将中国地区进行 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 网格化处理,中国大陆占据总计187个网格,将CRI实测数据库中的102个数据项导入,则占据52个网格。每个网格中的实测值个数范围在0~7个,平均每个网格中约有0.545个实测值,标准差系数范围在3.9%~66.8%。

第二步 假设相邻网格CRI与年均降水量正相关。众多研究表明,全球大气中Cs-137的沉降受主要受地球风带与气压带影响,相同纬度圈中Cs-137的大气沉降通量和降水量大致成正比<sup>[101-103]</sup>。假定经向相邻网格CRI与年均降水量正相关,并利用GPCC提供的1981-2010年 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 分辨率的降水量数据,计算中国大陆187个 $2.5^{\circ}$ 网格CRI。

对中国大陆任意第*i*行*j*列 $2.5^{\circ}$ 网格 $R_{i,j}$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, 17$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, 27$ 。 $C(R_{i,j})$ 记为网格 $R_{i,j}$ 处的CRI,  $P(R_{i,j})$ 记为网格 $R_{i,j}$ 处的年均降水量,则有:

$$C(R_{i,j+1}) = \frac{P(R_{i,j+1})}{P(R_{i,j})} \times C(R_{i,j}) \quad (3)$$

第三步  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格化处理。对中国大陆进一步 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格化处理,由此每个 $2.5^{\circ}$ 网格被分为25个 $0.5^{\circ}$ 网格。本文认为 $2.5^{\circ}$ 网格内CRI是随降水量分布而均匀分布, $0.5^{\circ}$ 网格的CRI可通过 $2.5^{\circ}$ 网格内25个 $0.5^{\circ}$ 网格的年均降水量关系求得。基于此,本文利用GPCC提供的1981-2010年 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 分辨率的降水量再分析数据,计算了中国地区 $0.5^{\circ}$ 网格CRI。

将每个 $R_{i,j}$ 网格的 $0.5^{\circ}$ 网格记为 $R_{i,j}r_{m,n}$ , 其中,  $m, n = 1, 2, 3, 4, 5$ 。设中国大陆任一点X经纬度坐标为 $(\varphi, \theta)$ ,  $\varphi$ 范围为 $13.75^{\circ}\sim 55.75^{\circ}\text{N}$ ,  $\theta$ 范围为 $71.25^{\circ}\sim 137.25^{\circ}\text{E}$ 。点X所在 $0.5^{\circ}$ 网格为 $R_{i,j}r_{m,n}$ , 则有:

$$C(\varphi, \theta) = C(R_{i,j}r_{m,n}) = \frac{25 \times P(R_{i,j}r_{m,n})}{\sum_{m,n} P(R_{i,j}r_{m,n})} \times C(R_{i,j}) \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} i = 17 - \text{round}\left(\frac{\varphi - \varphi_{\min}}{2.5}\right) \\ j = 1 + \text{round}\left(\frac{\theta - \theta_{\min}}{2.5}\right) \\ m = 90 - 5 \times i - \text{round}\left(\frac{\varphi - \varphi_{\min}}{0.5}\right) \\ n = 6 - 5 \times j + \text{round}\left(\frac{\theta - \theta_{\min}}{0.5}\right) \end{cases} \quad (5)$$

第四步 基于Kriging/Cokriging插值的任意点CRI计算。Kriging/Cokriging插值是地



理地质作图中常用的一种最优内插法,它首先考虑的是空间属性在空间位置上的变异分布,确定对一个待插点值有影响的距离范围,从而实现线性、无偏和最小估计方差的估计。本文基于 $0.5^\circ$ 网格CRI计算结果作进一步Kriging/Cokriging插值处理,从而实现中国大陆任意点CRI模拟。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模型分析与评估

**3.1.1 对实测点的模拟与评估** 利用MCM、WHM、MAM三个模型对102个CRI实测点位进行模拟,并与实测值作对比分析,以评估模型的模拟效果(图2)。三个模型模拟结果与实测值分布趋势大致相同,且MCM模拟结果与实测值基本吻合,同一位置MCM模拟值或实测值基本高于WHM和MAM模拟值(图3)。对实测值与模拟值作统计分析可知(表1),针对中国大陆102个实测CRI,MCM模拟结果误差在20%以内有81个,占总数的近80%,而WHM和MAM误差在20%以内所占比例皆小于40%。与WHM和MAM模拟结果相比,MCM均方根误差相对较小,仅为其38%左右,表明MCM模拟值与实测值的偏差相对较小。Pearson相关分析可知,MCM模拟值与实测值的相关系数、复相关系数分别为0.906、0.821,在0.01水平(双侧)上显著正相关,且相关性远优于WHM和MAM模拟,而MAM模拟值与实测值的复相关系数仅为0.094。

从三个模型对实测点的模拟结果来看,WHM、MAM模拟值对中国大陆地区的CRI

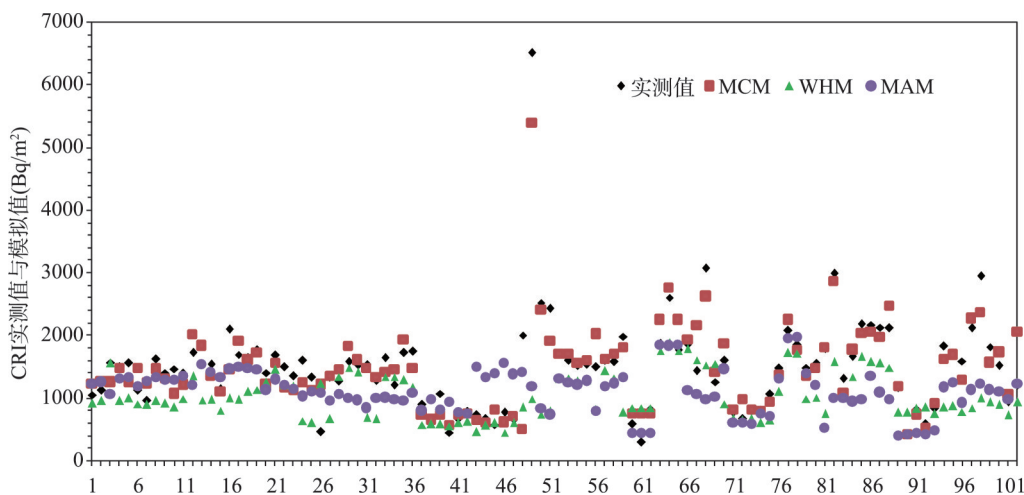


图2 模拟值与实测值对比分析

Fig. 2 Comparative analysis of simulated and observed values

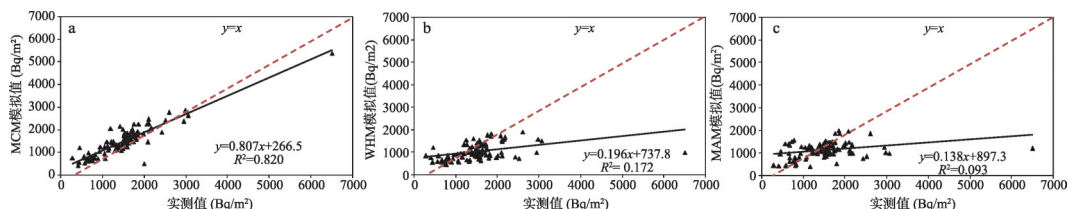


图3 模拟值与实测值拟合分析

Fig. 3 Correlation analysis of simulated and observed values

表1 模拟值与实测值统计分析  
Tab. 1 Statistical analysis of simulated and observed values

模型	误差20%内所占比例	均方根误差	Pearson相关性	复相关系数R <sup>2</sup>
MCM	79.41%	318.31	0.906**	0.821
WHM	36.28%	823.40	0.415**	0.172
MAM	38.24%	819.00	0.306**	0.094

注：\*\*. 在0.01 水平（双侧）上显著相关。

模拟整体呈现偏小的特点，其主要原因可能是：WHM基于10°纬度带的1954-1984年全球沉降，并没有考虑1985年后的沉降，1986年的切尔诺贝利核事故也可能对Cs-137局部沉降造成一定的积累。MAM则基于全球713个采样点背景值数据，对1986年后的采样数据减去了切尔诺贝利核事故的影响值，并统一衰变校正至1969年底。1986年后的全球Cs-137沉降虽然相对较少，但两个模型皆由于研究时间、采样年份等因素限制并将其未加入模拟。

**3.1.2 模型不确定性分析** 与全球尺度的CRI模型如WHM、MAM相比，MCM能对中国大陆地区进行较高分辨率、较高精度的模拟，然而，模型仍旧存在一定的误差或不足。MCM基于现有的CRI实测数据进行模拟，但对中国大陆地区而言，实测点位数据仍然较少，且点位分布不均匀，主要集中在中部如四川盆地、黄土高原等地，而东部沿海及西北内陆地区则相对较少。本文采用的降水量数据来自再分析资料，经过数据同化处理的降水量可能与实际值存在一定的误差。

模型对采样点数据进行网格化处理，假定网格内CRI随降水量均匀分布，这可能会对模拟结果产生一定误差。模型只考虑了降水量因素对CRI的影响，并未将地形及土壤条件、植被覆盖、土地利用类型等因素纳入考虑，可能造成模拟结果的偏大或偏小。此外，差值方法也可能对模型计算结果造成一定影响。

3.2 中国大陆CRI分布特征分析

基于MCM，本文计算了中国大陆CRI的分布，图4a、4b分别展示了中国大陆年均降水量和CRI空间分布情况。本文将中国大陆分为西北地区（I）、华北地区（II）、东北地区（III）、西南地区（IV）、华中地区（V）、华东地区（VI）、华南地区（VII）等七个区，由图可知，中国大陆CRI的范围为141~12123 Bq/m<sup>2</sup>，CRI最大值位于I区新疆局部地区及III区，最小值区域则集中于VII区、IV区西部及南部地带及I区南部地区。除新疆局部地区外，中国大陆CRI分布整体呈现自西向东，同纬度地区随降水量增加而增加的特点，反映了从大陆性气候到季风性气候的过渡。I区大部分地区属于温带大陆性荒漠气候，年均降水量基本在50~150 mm之间，然而却在局部地区出现CRI最大值，一些研究表明<sup>[31, 35-36]</sup>，这可能与中国地区20世纪六、七十年代在新疆罗布泊地区先后进行了一系列大气核试验有关。同时，该地区靠近乌克兰、哈萨克斯坦境内及俄罗斯北部新地岛附近的核试验点，且位于来自西北和北极地区的气团运动路径上，Cs-137干沉降或可造成区域性CRI的积累<sup>[104]</sup>。

在全球范围内，土壤Cs-137浓度的区域性变化主要是降雨量分布不均的结果<sup>[105]</sup>，而在0°~50°N范围内，Cs-137沉降量呈现随纬度增加而增加的特点<sup>[106]</sup>。图4c、4d分别展示了根据WHM和MAM计算的中国大陆CRI分布情况。WHM模拟结果显示，CRI最小值位于I区，最大值则与MCM、MAM模拟结果一致，都位于III区，体现了东北地区受风带气压带影响降水量较大而导致CRI较高，此外，Liu等研究表明东北地区沙尘暴的频率显著增加<sup>[107]</sup>，沉降于地表的Cs-137再悬浮作用也可能导致东北地区CRI的积累<sup>[108]</sup>，即当Cs-137沉降到土壤被细颗粒物吸附后，当土壤受风力作用产生沙尘，Cs-137将随风力搬运形成再悬浮，从而携带更多的Cs-137沉降。MAM模拟结果的最小值主要位于VII

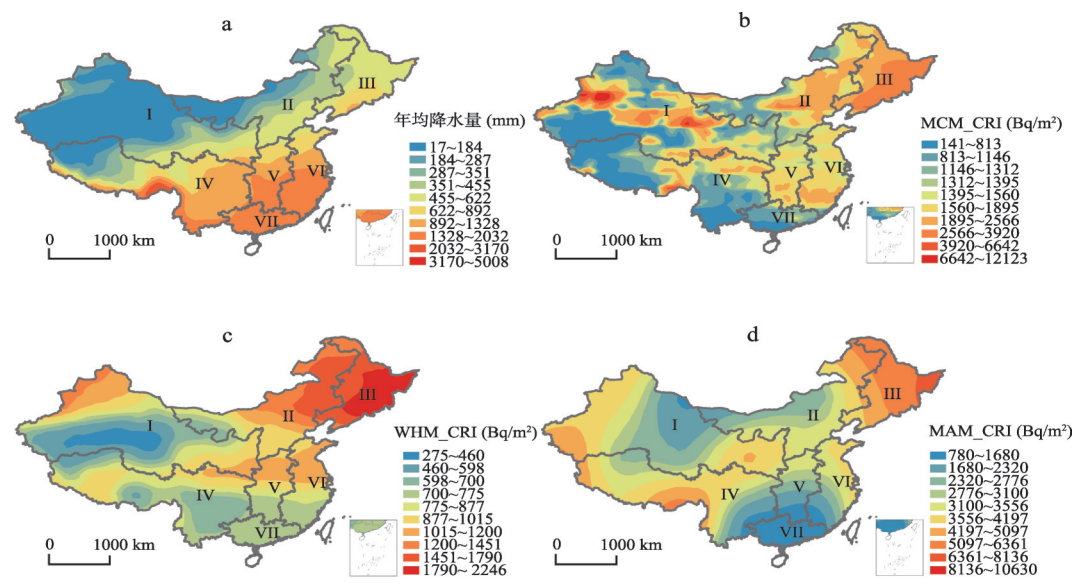


图4 中国大陆降水量分布及基于MCM、WHM、MAM的CRI分布

Fig. 4 Distributions of precipitation and CRI (based on MCM, WHM and MAM simulations) in the Mainland of China

区, 与MCM模拟结果一致, 这主要体现了纬度对Cs-137沉降量的影响。

整体而言, MCM模拟结果明显较WHM和MAM模拟结果的分辨率更高, 且CRI模拟值也相对较高。宏观尺度上, CRI分布的不均匀性主要可能为气候条件、大尺度大气流场、地形及土壤条件、局部核试验或核泄漏等因素的综合影响<sup>[104]</sup>。区域尺度上(表2, 图4), III区CRI总体高于II区, 处于东部沿海地带的VI区总体高于处于内陆地带的V区及IV区, 其可能原因是中国东部沿海地区由于海陆性质差异而形成的海陆间大气运动, 大气运动可携带更多的Cs-137尘埃。此外, 沿海地区易受台风影响<sup>[16]</sup>, 强大的台风气旋可富集其经过区域大气中的悬浮尘埃颗粒, 因此台风降水可带来更多Cs-137沉降。

表2 中国大陆七大区域CRI变化

Tab. 2 CRI variance of seven regions in the Mainland of China

分区	区域名称	MCM范围(Bq/m <sup>2</sup> )	WHM范围(Bq/m <sup>2</sup> )	MAM范围(Bq/m <sup>2</sup> )
I	西北地区	214~12123	275~1321	1695~5240
II	华北地区	727~3035	629~1821	1830~5799
III	东北地区	1665~4096	1066~2246	3455~7120
IV	西南地区	141~5663	421~1066	1314~5601
V	华中地区	1292~2119	697~1096	1112~3563
VI	华东地区	875~2382	712~1210	1081~4115
VII	华南地区	231~1721	562~782	1152~1881

4 结论

(1) 基于102个CRI实测资料, 建立了中国大陆CRI实测数据库, 并通过借鉴前人的研究模型建立适用于中国大陆地区的CRI修正模型, 从而实现了区域性CRI的模拟。本文基于实测数据及网格化建模进行区域性CRI研究的方法, 或可成为今后CRI研究的一种行之有效的手段。

(2) 运用MCM、WHM、MAM三个模型对实测点的模拟结果表明, MCM模拟值与实测值基本吻合, WHM和MAM模拟明显小于实测值和MCM模拟值, 这可能与WHM和MAM皆未考虑1985年后的Cs-137沉降有关。整体而言, MCM对中国大陆CRI模拟效果相对较好, 模拟的分辨率、精度皆有较大提高, 且对中国大陆的适用性较好。而模型的误差主要来自于采样点位分布的不均匀性与低密度特征, 今后或可通过增加均匀采样点位的方法完善模型结果。此外, 空间插值方法以及基于数据同化的降水量再分析数据对模拟的结果也可产生一定影响。

(3) 中国大陆CRI分布主要受气候条件、大尺度大气流场、地形及土壤条件、局部核试验或核泄漏等因素的综合影响。基于MCM的中国大陆CRI的范围为141~12123 Bq/m<sup>2</sup>, 除新疆局部地区外, 中国大陆CRI分布整体呈现自西向东, 同纬度地区随降水量增加而增加的特点。从纬向分布看, CRI主要呈现同等或相似降水量条件下, 随纬度增加而增加的特点。此外, 局部大气核试验、Cs-137再悬浮过程也可能对中国大陆CRI分布造成一定影响。

(4) 通过探讨中国大陆CRI及其分布特征, 一方面, 可为中国大陆地区进一步开展CRI研究提供参考与借鉴; 另一方面, 随着中国大陆地区土壤侵蚀、水土流失等环境问题的日益严重, 也可为进一步定量研究中国大陆地区土壤侵蚀和堆积, 以及区域物质输移和沉积物示踪提供科学基础。

## 参考文献(References)

- [1] Trimble S W, Crosson P. US soil erosion rates: Myth and reality. *Science*, 2000, 289(5477): 248-250.
- [2] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture Handbook* (Washington), 1997(703).
- [3] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science-AAAS-Weekly Paper Edition*, 1995, 267(5201): 1117-1122.
- [4] Shakesby R A. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 2011, 105(3): 71-100.
- [5] Le M H, Cordier S, Lucas C, et al. A faster numerical scheme for a coupled system modeling soil erosion and sediment transport. *Water Resources Research*, 2015, 51(2): 987-1005.
- [6] Mabit L, Zapata F, Dercon G, et al. Assessment of soil erosion and sedimentation: The role of fallout radionuclides. *IAEA TECDOC SERIES*, 2014.
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations. National Soil Degradation Maps, Soil Degradation Map of Austria. *FAO/AGL. GLASOD*, 2005.
- [8] Oldeman L R, Hakkeling R T A, Sombroek W G. World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note. *International Soil Reference and Information Centre*, 1990.
- [9] International Soil Reference and Information Centre. *GLASOD-SOTER Newsletter*. Wageningen, The Netherlands, 1992.
- [10] O'Hara S L, Street-Perrott F A, Burt T P. Climate change and soil erosion. *Nature*, 1993, 364(6434): 197-197.
- [11] Yamagata N, Matsuda S, Kodaira K. Run-off of caesium-137 and strontium-90 from rivers. *Nature*, 1963(200).
- [12] Garcia A E. Global distribution of <sup>137</sup>Cs inputs for soil erosion and sedimentation surveys. *International Atomic Energy Authority (IAEA). Use of <sup>137</sup>Cs in the study of soil erosion and sedimentation. IAEA-TECDOC-1028*, Vienna, 1998.
- [13] Loughran R J, Elliott G L. Rates of soil erosion in Australia determined by the caesium-137 technique: A national reconnaissance survey. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 1996 (236): 275-282.
- [14] Wright S M, Howard B J, Strand P, et al. Prediction of <sup>137</sup>Cs deposition from atmospheric nuclear weapons tests within the Arctic. *Environmental Pollution*, 1999, 104(1): 131-143.
- [15] Walling D E, He Q. The global distribution of bomb-derived <sup>137</sup>Cs reference inventories. *Final Report on IAEA Technical Contract*, 2000.
- [16] Qi Yongqing, Zhang Xinbao, He Xiubin, et al. <sup>137</sup>Cs reference inventories distribution pattern in China. *Nuclear*



- Technique, 2006, 29(1): 42-45. [齐永青, 张信宝, 贺秀斌, 等. 中国  $^{137}\text{Cs}$  本底值区域分布研究. 核技术, 2006, 29(1): 42-45.]
- [17] Aoyama M, Hirose K, Igarashi Y. Re-construction and updating our understanding on the global weapons tests  $^{137}\text{Cs}$  fallout. Journal of Environmental Monitoring, 2006, 8(4): 431-438.
- [18] Zhang Xinbao, Li Shaolong, Wang Chenghua, et al. Use of  $^{137}\text{Cs}$  method to sediment source in the Loess Plateau watershed. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(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  $^{137}\text{Cs}$  法研究. 科学通报, 1989, 34(3): 210-213.]
- [19] Zhang Xinbao, Wen Anbang, Quine T A, et al. Relation between erosion of slope farmland of Loess mound and slope length. Soil and Water Conservation in China, 1998(1): 21-22, 29, 50. [张信宝, 文安邦, Quine T A, 等. 黄土塬坡农地侵蚀与坡长的关系. 中国水土保持, 1998(1): 21-22, 29, 50.]
- [20] Wen Anbang, Zhang Xinbao, Zhang Yiyun, et al. Soil erosion and sediment transportation of the loess hilly and slope land. Mountain Research, 1995, 13(2): 85-90. [文安邦, 张信宝, 张一云, 等. 黄土塬坡耕地土壤侵蚀与泥沙输移. 山地研究, 1995, 13(2): 85-90.]
- [21] Li M, Li Z, Liu P, et al. Using Cesium-137 technique to study the characteristics of different aspect of soil erosion in the Wind-water Erosion Crisscross Region on Loess Plateau of China. Applied Radiation and Isotopes, 2005, 62(1): 109-113.
- [22] Wang Yangchun, Zhang Xinbao, Li Shaolong et al. A study on  $^{137}\text{Cs}$  method used in controlling erosion on the Loess Mao and slopes. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11(3): 34-37. [汪阳春, 张信宝, 李少龙, 等. 黄土塬坡侵蚀  $^{137}\text{Cs}$  法研究. 水土保持通报, 1991, 11(3): 34-37.]
- [23] Li Yong, Zhang Jianhui, Yang Juncheng, et al. Spatial patterns of soil erosion on steep cultivated hillslope in Loess Plateau of northern Shanxi. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 17-21. [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空间格局. 水土保持学报, 2000, 14(4): 17-21.]
- [24] Wang Xiaoyan, Li Liqing, Yang Mingyi, et al. Spatial distribution of soil erosion on different utilization soils in Yangou watershed by using  $^{137}\text{Cs}$  tracer. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 74-76, 113. [王晓燕, 李立青, 杨明义, 等. 小流域不同土地利用方式土壤侵蚀分异的  $^{137}\text{Cs}$  示踪研究. 水土保持学报, 2003, 17(2): 74-76, 113.]
- [25] Wang Yukuan, Wen Anbang, Zhang Xinbao. Study of soil erosion on cultivated slope land in severe soil loss regions of upper reaches of Yangtze River Basin using  $^{137}\text{Cs}$  technique. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 77-80. [王玉宽, 文安邦, 张信宝. 长江上游重点水土流失区坡耕地土壤侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  法研究. 水土保持学报, 2003, 17(2): 77-80.]
- [26] Wu Yonghong, Li Zhuo, Zhang Xinbao, et al. Study on  $^{137}\text{Cs}$  method used in soil erosion and sediment delivery on sloping fields in gully area on Loess Plateau. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 14(2): 22-25. [吴永红, 李倬, 张信宝, 等. 黄土高原沟壑区谷坡农地侵蚀及产沙的  $^{137}\text{Cs}$  法研究. 水土保持通报, 1994, 14(2): 22-25.]
- [27] Zhao Chunying, Guo Yue, Zhang Shulin, et al. Study of soil erosion in the sloping farmland in small watershed in central Sichuan. Soil and Water Conservation in China, 1994(9): 22-25, 61. [赵纯勇, 郭跃, 张述林, 等. 川中小流域丘坡耕地土壤侵蚀研究. 中国水土保持, 1994(9): 22-25, 61.]
- [28] Li Qingyun, Jiang Shunqing, Sun Houcai. Determination of surface erosion in purple hilly area of small watershed in the upper reaches of the Yangtze River. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1995, 12(1): 51-56. [李青云, 蒋顺清, 孙厚才. 长江上游紫色土丘陵区小流域地面侵蚀量的确定. 长江科学院院报, 1995, 12(1): 51-56.]
- [29] Wen Anbang, Zhang Xinbao, Wang Yukuan, et al. A study on soil erosion rates of the purple slope cultivated land using Caesium-137 technique in the upper of the Yangtze River. Journal of Mountain Science, 2001(S1): 56-59. [文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 长江上游紫色土坡耕地土壤侵蚀  $^{137}\text{Cs}$  示踪法研究. 山地学报, 2001(S1): 56-59.]
- [30] Lu X X, Higgitt D L. Estimating erosion rates on sloping agricultural land in the Yangtze Three Gorges, China, from caesium-137 measurements. Catena, 2000, 39(1): 33-51.
- [31] Xu Hong, Wei Jiguan, Zhou Wenliang, et al. Levels of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in soil around the nuclear test field of Xinjiang. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 1986, 6(6): 395-398. [徐红, 韦继管, 邹文良, 等. 新疆核试验场周围土壤中  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{137}\text{Cs}$  水平. 中华放射性医学与防护杂志, 1986, 6(6): 395-398.]
- [32] Zhang Xinbao, Wang Yangchun, Li Shaolong, et al. A preliminary study on the sources of fine materials of the sediment and debris flow. Soil and Water Conservation in China, 1992(2): 32-35, 66. [张信宝, 汪阳春, 李少龙, 等. 蒋家沟流域土壤侵蚀及泥石流细粒物质来源的  $^{137}\text{Cs}$  法初步研究. 中国水土保持, 1992(2): 32-35, 66.]
- [33] Yan Ping, Dong Guangrong, Zhang Xinbao, et al. Preliminary results of wind erosion in the Tibetan Plateau using  $^{137}\text{Cs}$  method. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(2): 199-204. [严平, 董光荣, 张信宝, 等.  $^{137}\text{Cs}$  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.]

- [34] Wen Anbang, Liu Shuzhen, Fan Jianrong, et al. Soil erosion rate using  $^{137}\text{Cs}$  technique in the middle Yalungtsangpo. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 47-50. [文安邦, 刘淑珍, 范建容, 等. 雅鲁藏布江中游地区土壤侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  示踪法研究. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 47-50.]
- [35] Wei Jiguan, Xu Hong, Zou Wenliang, et al. The level of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  around the nuclear testing site in Xinjiang and the residents' dose caused from them. *Arid Environmental Monitoring*, 1988(1): 10-16. [韦继管, 徐红, 邹文良, 等. 新疆核试验场周围地区主要食品中  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  水平及其所致居民剂量. *干旱环境监测*, 1988(1): 10-16.]
- [36] Pu Lijie, Bao Haosheng, Peng Buzhuo, et al. Preliminary study on the potential of using  $^{137}\text{Cs}$  to estimate soil erosion rates in wind erosion area, China: Case study on the Korla area, Xinjiang autonomous region. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 441-449. [濮励杰, 包浩生, 彭补拙, 等.  $^{137}\text{Cs}$  应用于我国西部风蚀地区土地退化的初步研究: 以新疆库车地区为例. *土壤学报*, 1998, 35(4): 441-449.]
- [37] Pu Lijie, Bao Haosheng, Higgitt D L. The application of the new methods of land degradation study: A case study on Dongxi River Basin, Western Fujian, China. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(1): 56-62. [濮励杰, 包浩生, Higgitt D L. 土地退化方法应用初步研究: 以闽西沙县东溪流域为例. *自然资源学报*, 1999, 14(1): 56-62.]
- [38] Cao Hui, Yang Hao, Tang Xiangyu, et al. Primary estimate on soil loss amounts in Yangtze Delta region using  $^{137}\text{Cs}$  technique. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 13-15. [曹慧, 杨浩, 唐翔宇, 等.  $^{137}\text{Cs}$  技术对长江三角洲丘陵区小流域土壤侵蚀初步估算. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 13-15.]
- [39] Tang Xiangyu, Yang Hao, Cao Hui, et al. Preliminary estimate of soil erosion rate in Haplic red soil in southern China using  $^{137}\text{Cs}$  technique. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(3): 4-7, 11. [唐翔宇, 杨浩, 曹慧, 等.  $^{137}\text{Cs}$  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.]
- [40] Zhang Yan, Zhang Hong, Peng Buzhuo, et al. Soil erosion and nutrient loss of various land use patterns. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(1): 23-26, 31. [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. *水土保持通报*, 2003, 23(1): 23-26, 31.]
- [41] Jin Pinghua, Pu Lijie, Wang Jinlei, et al. Preliminary study on using  $^{137}\text{Cs}$  tracer method to estimate soil erosion of typical area: A case study on Xitiaoxi drainage area at up stream of Taihu Lake Basin. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(1): 47-54. [金平华, 濮励杰, 王金磊, 等.  $^{137}\text{Cs}$  法用于典型流域土壤侵蚀的初步研究: 以太湖流域上游西苕溪流域为例. *自然资源学报*, 2004, 19(1): 47-54.]
- [42] Ruse M E, Peart M R.  $^{137}\text{Cs}$  reference site characteristics in Hong Kong: Some considerations. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 1999, 24(10): 887-891.
- [43] Yan Baixin, Yang Jie. 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, 汤洁. 东北黑土中  $^{137}\text{Cs}$  背景值研究. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 33-36.]
- [44] Pu Lijie, Zhao Yaoyang, Jin Pinghua, et al. Application of  $^{137}\text{Cs}$  as tracing method to study soil erosion on sloping lands in the hilly red soil area: A case study in Fengcheng City, Jiangxi Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(6): 562-567. [濮励杰, 赵姚阳, 金平华, 等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪红壤丘陵区坡地土壤侵蚀的研究: 以江西丰城市为例. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(6): 562-567.]
- [45] Hua Luo, Zhang Zhigang, Li Junbo, et al. Soil erosion and organic matter loss by using fallout  $^{137}\text{Cs}$  as tracer in Miyun Reservoir Valley. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2005, 19(3): 208-213. [华璐, 张志刚, 李俊波, 等. 基于土壤  $^{137}\text{Cs}$  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.]
- [46] Zhang Yan, Peng Buzhuo, Chen Jie. Evaluating soil erosion rate in the Dianchi Lake Basin using  $^{137}\text{Cs}$  tracer method. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2005, 19(2): 125-128. [张燕, 彭补拙, 陈捷.  $^{137}\text{Cs}$  示踪法估算滇池流域土壤侵蚀. *核农学报*, 2005, 19(2): 125-128.]
- [47] Hua-Jun F, Xue-Ming Y, Zhang X P, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in Northeast China. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 201-209.
- [48] Hu Y, Liu J, Zhuang D, et al. Distribution characteristics of  $^{137}\text{Cs}$  in wind-eroded soil profile and its use in estimating wind erosion modulus. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(11): 1155-1159.
- [49] He Tairong. Modern geomorphic processes of Three Gorges Reservoir Area: A case study of modern slope process in the Caotang River Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2004. [何太蓉. 三峡库区现代地貌过程研究: 以草堂河流域现代坡地过程研究为例[D]. 南京: 南京大学, 2004.]
- [50] Quine T A, Walling D E, Zhang X, et al. Investigation of soil erosion on terraced fields near Yanting, Sichuan Province, China, using caesium-137. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 1992(209): 155-168.
- [51] Hu Yunfeng, Liu Jiyan, Zhuang Dafang, et al. Distribution characteristics of  $^{137}\text{Cs}$  in wind-eroded soil profile and its use in estimating wind erosion modulus. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(11): 1155-1159.

- [52] Wang Xiaoyan, Tian Junliang, Yang Mingyi, et al. Relationship between  $^{137}\text{Cs}$  concentration and cultivated history on loessial hillslopes. *Nuclear Techniques*, 2005, 28(8): 607-612. [王晓燕, 田均良, 杨明义, 等. 黄土坡面  $^{137}\text{Cs}$  浓度与坡面耕垦历史的关系研究. 核技术, 2005, 28(8): 607-612.]
- [53] Zhao Yei, Yue Jianhua, Xu Cuihua, et al. Application of  $^{137}\text{Cs}$  tracer technique to estimate the wind erosion rate of Castanozem in Luanhe River Source Area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 562-566. [赵烨, 岳建华, 徐翠华, 等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术在滦河源区栗钙土风蚀速率估算中的应用. 环境科学学报, 2005, 25(4): 562-566.]
- [54] Gao Jun, Ouyang Zhiyun. Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in soil of natural reserve in Wolong. *Soil and Water Conservation in China*, 2006(12): 31-33. [高军, 欧阳志云.  $^{137}\text{Cs}$  在卧龙自然保护区土壤中的分布特征. 中国水土保持, 2006(12): 31-33.]
- [55] Dong Jie, Yang Dayuan, Zhou Bin, et al. Study on soil erosion rates in the Three Gorges Reservoir area using  $^{137}\text{Cs}$  tracing method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 1-5, 66. [董杰, 杨达源, 周彬, 等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪三峡库区土壤侵蚀速率研究. 水土保持学报, 2006, 20(6): 1-5, 66.]
- [56] Li Yuanshou, Wang Genxu, Wang Junde, et al.  $^{137}\text{Cs}$  trace technique to study soil erosion at alpine meadow of Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(1): 114-121. [李元寿, 王根绪, 王军德, 等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪法研究青藏高原草甸土的土壤侵蚀. 山地学报, 2007, 25(1): 114-121.]
- [57] Hou Jancai, Li Zhanbin, Li Mian, et al. Study on effect of landform positions and land use types on soil erosion and sediment yield by  $^{137}\text{Cs}$  tracer in small catchment. *Journal of soil and water conservation*, 2007, 21(2): 36-39. [侯建才, 李占斌, 李勉, 等. 小流域地貌部位和土地利用类型对侵蚀产沙影响的  $^{137}\text{Cs}$  法研究. 水土保持学报, 2007, 21(2): 36-39.]
- [58] Ma Kun, Ma Yuanyuan, Ma Bin, et al. Study on soil erosion and cesium-137 distribution of Yangwa Watershed in Loess Plateau of South Ningxia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007(4): 7-11, 24. [马琨, 马远远, 马斌, 等. 宁南黄土高原阳洼流域  $^{137}\text{Cs}$  分布及侵蚀特征研究. 水土保持学报, 2007(4): 7-11, 24.]
- [59] Zeng Yi, Zhang Xinbao, Zhou Weijian, et al. On the source of radioisotope  $^{137}\text{Cs}$  in the surface sediments of Lake Qinghai. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(5): 516-521. [曾奕, 张信宝, 周卫健, 等. 青海湖表层底泥中放射性同位素  $^{137}\text{Cs}$  的来源. 湖泊科学, 2007, 19(5): 516-521.]
- [60] Pan Xinghui, Zhang Chunlai, Wang Shengtang, et al. Influence of land use/cover change on soil surface erosion/deposition process: evidence from  $^{137}\text{Cs}$  as a tracer. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(6): 994-999. [潘星慧, 张春来, 王升堂, 等. 土地利用/覆盖变化对地表侵蚀过程的影响: 来自  $^{137}\text{Cs}$  示踪的证据. 中国沙漠, 2007, 27(6): 994-999.]
- [61] Liu J Y, Qi Y Q, Shi H D, et al. Estimation of wind erosion rates by using  $^{137}\text{Cs}$  tracing technique: A case study in Tariat-Xilin Gol transect, Mongolian Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(5): 751-758.
- [62] Zhang Suhong, Li Sen, Yan Ping, et al.  $^{137}\text{Cs}$  distribution and its reference Inventory in rocky desertification land in North Guangdong. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(6): 361-364. [张素红, 李森, 严平, 等. 粤北石漠化地区  $^{137}\text{Cs}$  分布特征与背景值研究. 水土保持研究, 2007, 14(6): 361-364.]
- [63] Zhang Zhiwei. Study on the law of soil degradation in Karst Environment [D]. Chongqing: Southwestern University, 2007. [张治伟. 岩溶环境中土壤退化规律研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.]
- [64] Zeng Haiao, Wu Jinglu, Lin Lin. Using  $^{137}\text{Cs}$  tracer technique to investigate soil erosion distribution and total erosion amount in Taihu Lake catchment. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(2): 79-85. [曾海鳌, 吴敬禄, 林琳.  $^{137}\text{Cs}$  示踪法研究太湖流域土壤侵蚀分布与总量. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(2): 79-85.]
- [65] Yang Jiudong. Study on the spatial variability of soil erosion tracer using  $^{137}\text{Cs}$  [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008. [杨九东.  $^{137}\text{Cs}$  土壤侵蚀示踪空间变异研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.]
- [66] Qi Y Q, Liu J Y, Shi H D, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  tracing technique to estimate wind erosion rates in the typical steppe region, northern Mongolian Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(9): 1423-1430.
- [67] Yan Dongchun, Wen Anbang, Bao Yuhai, et al. The distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the hilly upland soil of the Qianzhong Karst Plateau. *Earth and Environment*, 2008, 36(4): 342-347. [颜冬春, 文安邦, 鲍玉海, 等. 黔中高原岩溶丘陵坡地土壤中的  $^{137}\text{Cs}$  分布. 地球与环境, 2008, 36(4): 342-347.]
- [68] Zhang Lihua, Long Yu, Li Hui, et al. Evaluating soil erosion and organic matter loss in the Danjiangkou City using  $^{137}\text{Cs}$  tracing method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 54-57. [张利华, 龙昱, 李辉, 等. 基于  $^{137}\text{Cs}$  示踪的丹江口市农用地土壤侵蚀与有机质流失分析. 水土保持学报, 2008, 22(2): 54-57.]
- [69] Jia Hongjie, Fu Wali, Zhang Zhiwei, et al. Study of soil erosion on slope farmland in the karst area of the Zhongliang Mountains by  $^{137}\text{Cs}$  technique. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2008, 30(8): 57-61. [贾红杰, 傅瓦利, 张治伟, 等. 中梁山岩溶区坡耕地土壤侵蚀  $^{137}\text{Cs}$  法研究. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(8): 57-61.]
- [70] Liu Lei. Use of  $^{137}\text{Cs}$  to soil erosion in Chenggong region, Yunnan Province [D]. Nanjing: Nanjing Normal University,

2008. [刘磊. 云南呈贡地区土壤侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  示踪研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.]
- [71] Li Mian, Yang Jianfeng, Hou Jiancai, et al. The spatial variance of hill slope erosion in Loess Hilly Area by  $^{137}\text{Cs}$  tracing method. *Nuclear Techniques*, 2009, 32(1): 50-54. [李勉, 杨剑锋, 侯建才, 等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪法研究黄土丘陵区坡面侵蚀空间变化特征. 核技术, 2009, 32(1): 50-54.]
- [72] Li Hao, Zhang Xinbao, Wang Kelin, et al.  $^{137}\text{Cs}$  distribution characteristics at a Talus-type Karst slope in Northwestern Guangxi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 42-47. [李豪, 张信宝, 王克林, 等. 桂西北倒石堆型岩溶坡地土壤的  $^{137}\text{Cs}$  分布特点. 水土保持学报, 2009, 23(3): 42-47.]
- [73] Xu Jinying, Cai Wenqing, Chen Xiaoyan, et al. Study of the erosion features of small watersheds based on  $^{137}\text{Cs}$  tracer. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2009(5): 155-161. [徐金英, 柴文晴, 陈晓燕, 等. 基于  $^{137}\text{Cs}$  法对小流域侵蚀特征的研究. 西南大学学报(自然科学版), 2009(5): 155-161.]
- [74] Nie Guohui, Ye Yongqi, Ye Suigao, et al. Soil erosion law based on Cs-137 tracer method in typical slope, Tiantai County, Zhejiang Province. *Soils*, 2009, 41(2): 303-307. [聂国辉, 叶永棋, 叶碎高, 等. 用 Cs-137 示踪法研究浙江天台县典型坡面的土壤侵蚀规律. 土壤, 2009, 41(2): 303-307.]
- [75] Liu Zhiqiang, Yang Mingyi, Liu Puling, et al. Sampling numbers and area for the confirmation of  $^{137}\text{Cs}$  reference inventory. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(3): 482-486. [刘志强, 杨明义, 刘普灵, 等. 确定  $^{137}\text{Cs}$  背景值所需的采样点数与采样面积. 核农学报, 2009, 23(3): 482-486.]
- [76] Bai Xiaoyong, Zhang Xinbao, Wang Shijie, et al. Estimating sediment deposition rates by the Cs-137 technique in Karst depression of Chongtuo, Puding County, Guizhou Province. *Earth and Environment*, 2009(2): 142-146. [白晓永, 张信宝, 王世杰, 等. 普定冲头峰丛洼地泥沙沉积速率的  $^{137}\text{Cs}$  法测定. 地球与环境, 2009(2): 142-146.]
- [77] Wang Yafeng, Fu Bojie, Chen Liding, et al. Effects of land use change on soil erosion intensity in small watershed of Loess Hilly region: a quantitative evaluation with  $^{137}\text{Cs}$  tracer. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1571-1576. [汪亚峰, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化的土壤侵蚀效应: 基于  $^{137}\text{Cs}$  示踪的定量评价. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1571-1576.]
- [78] Zhang Mingli, Yang Hao, Wang Xiaolei, et al. Soil  $^{137}\text{Cs}$  background values in monsoon region of China. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(4): 669-675. [张明礼, 杨浩, 王小雷, 等. 中国季风区土壤  $^{137}\text{Cs}$  背景值研究. 核农学报, 2009, 23(4): 669-675.]
- [79] Li Hao, Zhang Xinbao, Wen Anbang, et al. Erosion rate of purple soil on a cultivated slope in the Three Gorges Reservoir region using  $^{137}\text{Cs}$  technique. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009(5): 1-6. [李豪, 张信宝, 文安邦, 等. 三峡库区紫色土坡耕地土壤侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  示踪研究. 水土保持通报, 2009(5): 1-6.]
- [80] Li Junjie, Li Yong, Wang Yangling, et al. Study of soil erosion on the East-West Transects in the Three-Rivers Headwaters region using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  tracing. *Research of Environmental Sciences*, 2009(12): 1452-1459. [李俊杰, 李勇, 王仰麟, 等. 三江源区东西样带土壤侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  示踪研究. 环境科学研究, 2009(12): 1452-1459.]
- [81] Wu Yuerong. Research on land degradation of Mongolia Plateau based on conventional analysis and isotopic  $^{137}\text{Cs}$  Technology [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2009. [武月荣. 基于土壤常规分析和同位素  $^{137}\text{Cs}$  技术的蒙古高原土地退化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2009.]
- [82] Wang Yu. Study on the soil erosion rate of Sloping Farmland in black soil region of Northeast China by  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  composite tracing[D]. Xianyang: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Center for Soil and Water conservation and Ecological Environment), 2010. [王禹.  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  复合示踪研究东北黑土区坡耕地土壤侵蚀速率[D]. 中国科学院研究生院(水土保持与生态环境研究中心), 2010.]
- [83] Jiang Hongtao. Soil erosion of agro pastoral zone in northern China based on  $^{137}\text{Cs}$  Technology [D]. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2010. [姜洪涛. 基于  $^{137}\text{Cs}$  技术的中国北方农牧交错带土壤侵蚀研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2010.]
- [84] Jia Y, Wang Z, Zheng X, et al. Estimation of soil erosion in the Xihanshui River Basin by using  $^{137}\text{Cs}$  technique. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27(4): 486-497.
- [85] Y Yuhong, Yan Baixing, Zhu Hui. Estimating soil erosion in Northeast China using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ . *Pedosphere*, 2011, 21(6): 706-711.
- [86] Liu Baoyuan, Yan Baixin, Shen Bo, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 1-8. [刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.]
- [87] Shao Quanqin, Xiao Tong, Liu Jiyuan, et al.  $^{137}\text{Cs}$  quantitative analysis of soil erosion in the typical alpine meadow in the Three-River Headwaters region. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(13): 1019-1025. [邵全琴, 肖桐, 刘纪远, 等. 三



- 江源区典型高寒草甸土壤侵蚀的<sup>137</sup>Cs定量分析. 科学通报, 2011, 56(13): 1019-1025.]
- [88] Shan Yongjie, Pu Lijie, Zhang Jian, et al. Analysis of soil erosion rules of typical mountain along Taihu Lake Basin using <sup>137</sup>Cs-based tracer method. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2): 29-32, 38. [陕永杰, 濮励杰, 张健, 等. 基于<sup>137</sup>Cs示踪法的太湖流域典型山地土壤侵蚀规律分析. 水土保持学报, 2011, 25(2): 29-32, 38.]
- [89] He Jian, Pan Shaoming. <sup>137</sup>Cs reference inventory and its distribution in soils along the Liaodong Bay. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 169-173. [何坚, 潘少明. 辽东湾沿岸土壤中<sup>137</sup>Cs背景值及分布特征研究. 水土保持学报, 2011, 25(3): 169-173.]
- [90] Zhang Chunlai, Zhou Xueyong, Dong Guangrong, et al. The characteristics of <sup>137</sup>Cs deposition in the dry steppe region. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(3): 221-225. [张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 干草原地区土壤<sup>137</sup>Cs沉积特征. 科学通报, 2002, 47(3): 221-225.]
- [91] Hu Y, Liu J, Zhen L. Determination of <sup>137</sup>Cs reference inventories in a large-scale region: A case study in the central-eastern Inner Mongolia Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(6): 1047-1059.
- [92] Tang Xinyi, Guan Dongsheng. <sup>137</sup>Cs inventories and soil organic carbon content in soils of three typical terrestrial ecosystems. China Environmental Science, 2012, 32(4): 710-714. [汤新艺, 管东生. 3种典型陆地生态系统土壤<sup>137</sup>Cs和有机碳含量研究. 中国环境科学, 2012, 32(4): 710-714.]
- [93] Tao Bingde, Sha Zhanjiang, Guo Lixia, et al. <sup>137</sup>Cs tracing technique to study soil erosion between upper Huangshui Basin and lower Buha River Basin. Arid Land Geography, 2013, 36(6): 997-1005. [陶炳德, 沙占江, 郭丽霞, 等. <sup>137</sup>Cs示踪法研究湟水上游和布哈河下游区域土壤侵蚀强度. 干旱区地理, 2013, 36(6): 997-1005.]
- [94] Wang Xiaoyan, Li Zhongwu, Xiu Chengxian. Study on soil erosion and its effect on different landuse types in the red soil hilly area of South China based on <sup>137</sup>Cs tracing. Research of Soil and Water Conservation, 2013(2): 1-4. [王晓燕, 李忠武, 修成贤. 基于<sup>137</sup>Cs示踪的南方红壤丘陵区不同土地利用管理方式的侵蚀效应. 水土保持研究, 2013(2): 1-4.]
- [95] Li Junjie, Wang Yanglin, Li Dingqiang, et al. Characterization and evaluation of agricultural soil erosion in Shenzhen City using environmental radionuclides. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(7): 780-786. [李俊杰, 王仰麟, 李定强, 等. 基于核示踪的深圳市农用地土壤侵蚀特征及评价. 环境科学研究, 2013, 26(7): 780-786.]
- [96] Liang Jiawei, Dai Quanhong, Zhang Xi, et al. Study on soil erosion features of small catchment of karst plateau wetland by <sup>137</sup>Cs tracing technology. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(1): 116-122. [梁家伟, 戴全厚, 张曦, 等. <sup>137</sup>Cs技术研究岩溶高原湿地小流域土壤侵蚀特征. 核农学报, 2014, 28(1): 116-122.]
- [97] Zhang Yilan, Wen Anbang, Yan Dongchun, et al. Using <sup>137</sup>Cs technique to study soil erosion in Chishui River region. Earth and Environment, 2014, 42(2): 187-192. [张一澜, 文安邦, 严冬春, 等. 赤水河流域不同土地利用类型土壤侵蚀的<sup>137</sup>Cs法研究. 地球与环境, 2014, 42(2): 187-192.]
- [98] Liu Jiaxin, Liu Puling, Liu Dong, et al. Spatial differentiation of soil erosion on typical loess hill slope loess hilly and gully region. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 1-4, 10. [刘佳鑫, 刘普灵, 刘栋, 等. 黄土丘陵区典型塬坡土壤侵蚀空间分异特征. 水土保持通报, 2014, 34(4): 1-4, 10.]
- [99] Zhang Hebing, Nie Xiaojun, Cheng Jingxia. <sup>137</sup>Cs tracing of soil erosion and its impact on soil nutrients across subsidence slope induced by coal mining. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 137-143. [张合兵, 聂小军, 程静霞. <sup>137</sup>Cs示踪采煤沉陷坡土壤侵蚀及其对土壤养分的影响. 农业工程学报, 2015, 31(4): 137-143.]
- [100] Xu Wei, Pan Shaoming, Jia Peihong, et al. <sup>137</sup>Cs Reference Inventory and its distribution in surface soil along the Fangchenggang coastal zone of Beibu Gulf. Geographical Research, 2015, 34(4): 655-665. [徐伟, 潘少明, 贾培宏, 等. 北部湾防城港沿岸土壤<sup>137</sup>Cs背景值及表层分布特征研究. 地理研究, 2015, 34(4): 655-665.]
- [101] Loughran R J, Elliott G L. Rates of soil erosion in Australia determined by the caesium-137 technique: A national reconnaissance survey. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, 1996 (236): 275-282.
- [102] Wright S M, Howard B J, Strand P, et al. Prediction of <sup>137</sup>Cs deposition from atmospheric nuclear weapons tests within the Arctic. Environmental Pollution, 1999, 104(1): 131-143.
- [103] Pálsson S E, Howard B J, Wright S M. Prediction of spatial variation in global fallout of <sup>137</sup>Cs using precipitation. Science of the Total Environment, 2006, 367(2): 745-756.
- [104] Liu Yu, Lv Yihe, Fu Bojie, et al. Reference value of <sup>137</sup>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. <sup>137</sup>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.]
- [105] Lance J C, McIntyre S C, Naney J W, et al. Measuring sediment movement at low erosion rates using cesium-137. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(5): 1303-1309.

- [106] Zheng Yongchun, Wang Shijie. Soil geochemistry characteristics of  $^{137}\text{Cs}$  and its theory of tracing soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 57-60. [郑永春, 王世杰.  $^{137}\text{Cs}$  的土壤地球化学及其侵蚀示踪意义. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 57-60.]
- [107] Liu X, Yin Z Y, Zhang X, et al. Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2004, 109(D16).
- [108] Cao Ligu, Pan Shaoming, He Jian, et al.  $^{137}\text{Cs}$  atmospheric deposition in the Liaodong Bay. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1): 480-487. [曹立国, 潘少明, 何坚, 等. 辽东湾地区  $^{137}\text{Cs}$  大气沉降研究. *环境科学学报*, 2015, 35(1): 80-86.]

## Study of the Cesium-137 Reference Inventory in the Mainland of China

ZHANG Wei, PAN Shaoming, ZHANG Kexin, CAO Ligu, ZHAO Jie

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Soil erosion is a serious environmental problem closely associated with sustainable development and ultimately the survival of mankind. Cesium-137, a unique artificial radioactive tracer, has been widely applied to the study of soil erosion and deposition since the 1960s. Furthermore, it is a basis for determining a Cesium-137 Reference Inventory (CRI) that employs cesium-137 to measure soil erosion, which can directly influence the accuracy and reliability of the soil erosion rate. This paper references 102 CRI data samples collected from over 80 documents; it also uses the monthly precipitation dataset from the Global Precipitation Climatology Centre from 1981-2010, with spatial resolutions of  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  and  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . The Modified CRI Model for the Mainland of China (MCM) that the paper established is based on incorporating and modifying two previous models, the Walling & He Model (WHM) and the Michio Aoyama Model (MAM). Then we calculate the geographical distributions of CRI by using Kriging/Cokriging interpolation. The model assessment and comparative analysis demonstrate that MCM simulated values are generally in agreement with the observed values and greater than WHM and MAM simulated values. MCM can be applied to higher resolution and higher precision CRI modeling in the Mainland of China. The results show that the range of CRI in the Mainland of China is between 141 and 12123 Bq/m<sup>2</sup>, and the maximum values are found in parts of northeast China and Xinjiang regions. The minimum values generally come from the regions south of 25°N. Except for some parts of Xinjiang, distributions of CRI in the Mainland of China indicate that CRI increases with precipitation from west to east of the same latitude, while zonal distributions of CRI indicate that CRI increases with the increase of the latitude. Besides, other factors such as large-scale atmospheric flow field, re-suspension, and local nuclear testing contribute to the heterogeneity of CRI in the Mainland of China.

**Keywords:** cesium-137; reference inventory; modified model; Mainland of China