

# 青海共和盆地降尘观测与 $^{137}\text{Cs}$ 测定的初步结果

严平<sup>1</sup>, 董光荣<sup>2</sup> (1. 北京师范大学资源科学研究所环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;  
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**通过对 1998~1999 年共和盆地的降尘观测和尘样的 $^{137}\text{Cs}$ 分析, 测定了降尘速率及其月分配; 对尘源进行了 $^{137}\text{Cs}$ 示踪, 并从理论上估算出降尘产生的 $^{137}\text{Cs}$ 再分配, 对沉积速率的计算模型进行了讨论. 作为采用 $^{137}\text{Cs}$ 法研究沙尘暴降尘的一次尝试, 这些初步结果对沙尘暴测定及其强度评估等方面研究有一定的借鉴作用.

**关键词:**降尘;  $^{137}\text{Cs}$ 法; 沉积速率; 共和盆地

**中图分类号:** X131.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2001)02-05-0064

## Dust Deposition and Its Measurement by $^{137}\text{Cs}$ in The Gonghe Basin, Qinghai Province, China

Yan Ping<sup>1</sup>, Dong Guangrong<sup>2</sup> (1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, the Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Through the dust observation at three sites in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China and  $^{137}\text{Cs}$  analysis of dust samples, the  $^{137}\text{Cs}$  technique is firstly used to study the dust deposition by storm. The rate of dust deposition and its monthly distribution were determined and the dust source traced by  $^{137}\text{Cs}$ . It is apparent that the  $^{137}\text{Cs}$  model for accumulation rate must be modified because of the  $^{137}\text{Cs}$  redistribution from dust gain. These tentative results may have some significant implications for further dust storm research.

**Keywords:** dust deposition;  $^{137}\text{Cs}$  technique; deposition rate; Gonghe Basin

我国西北地区是全球 4 大沙尘暴区之一的中亚沙尘暴区的一部分, 在地质时期和人类历史时期, 一直是沙尘暴的主要成灾地区和“雨土”的释放源地<sup>[1,2]</sup>. 由于沙尘暴的突发性强, 现场破坏力较大, 目前尚难以进行同步观测, 无法直接测定沙尘暴引起的风蚀量和降尘量. 一般以气象观测中的沙尘暴日数表示其频度, 或采用长期降尘观测方法, 以降尘速率表示沙尘暴的强度<sup>[3~6]</sup>.

$^{137}\text{Cs}$ 作为研究土壤侵蚀和泥沙沉积的一种良好的示踪源<sup>[7,8]</sup>, 近年来开始应用到土壤侵蚀所产生的悬移物测定. Zhang 等通过对洪水悬移物的 $^{137}\text{Cs}$ 测定, 分析了河流产沙过程及其差异, 建立了 $^{137}\text{Cs}$ 活度与物理性粘粒含量之间的关系<sup>[9]</sup>; Chappell 等应用粉尘沉积物的

$^{137}\text{Cs}$ 示踪, 测定出尼日尔西南部 30 年来(1963~1993 年)的降尘速率<sup>[10]</sup>. 这些尝试性的工作对于沙尘暴和粉尘沉积的研究是非常有益的借鉴. 本文通过 1998~1999 年在共和盆地的降尘观测及尘样的 $^{137}\text{Cs}$ 测定, 定量研究区域粉尘沉积及其与 $^{137}\text{Cs}$ 再分配之间的关系, 探讨应用 $^{137}\text{Cs}$ 法研究尘暴过程的可行性.

### 1 研究方法

#### 1.1 降尘观测

**基金项目:**国家自然科学基金项目(4001001); 北京师范大学“自然灾害与环境演变教育部重点实验室”访问学者基金资助项目

**作者简介:**严平(1966~), 男, 安徽宁国人, 北京师范大学资源科学研究所博士后, 主要从事土壤风蚀和干旱区环境演变等方面的研究工作.

**收稿日期:** 2000-05-30

在青海省共和盆地选择 3 个降尘观测点, 包括以下步骤<sup>[12]</sup>;  
分别是沙珠玉、共和县城和贵南县城(表 1), 采用加水集尘法测定大气自然降尘量<sup>[4,11]</sup>, 主要 (1)集尘缸设置 集尘缸为内径 15 cm、高 30cm 的圆筒形玻璃缸, 分别放置在 3 个观测

表 1 共和盆地 3 个降尘观测点概况

Table 1 Summary of three dust collection sites in the Gonghe Basin

观测点	位 置 <sup>1)</sup>	集尘缸放置点	距离地面高度/m	观测起止时间/年-月-日
沙珠玉	N36°14'57", E100°14'35", ALT2890m	青海省治沙试验站	5.0+1.2	1998-04-01~1999-04-09
共和县城	N36°16'14", E100°37'26", ALT2810m	海南州农牧区划队	9.2+1.2	1998-04-01~1999-04-08
贵南县城	N35°35'16", E100°44'46", ALT3100m	贵南县政府招待所	11.0+1.2	1998-04-01~1999-04-10

1) 依次为北纬、东经和海拔高度(m).

点的楼顶上, 距离地面高度 5~11 m, 集尘缸放置在 1.2 m 高的三角架上, 以避免地面和楼顶扬尘的影响.

(2) 尘样收集 在集尘缸中加入适量的蒸馏水(约 500 ml), 放置到三角架上, 开始集尘, 每月月底定期换集尘缸(30±3 d).

(3) 降尘总量的测定和计算 在实验室中, 将收集到的水溶尘样经过水浴蒸发至干后, 放入干燥箱中于 105℃ 烘干, 称至恒重, 即为尘样重量  $W_d(g)$ . 月降尘总量  $M_d(t \cdot hm^{-2} \cdot 月^{-1})$  按下式计算<sup>[12]</sup>:

$$M_d = 30 \cdot 10^2 \cdot W_d / (S \cdot D) \quad (1)$$

式中,  $S$  为集尘缸缸口面积(176.715 cm<sup>2</sup>),  $D$  为采样天数(d).

1.2 <sup>137</sup>Cs 尘样的采集和测定

在降尘观测点的周围, 通过扫尘的办法, 采集一定量的同期降尘样品, 在 3 个观测点各采集 1 个尘样, 代表各自观测期即 1 a 内的降尘样品. 为了剔除非降尘颗粒, 采集到的尘样经过筛处理(孔径 0.125mm), 制作成<sup>137</sup>Cs 尘样, 在四川大学物理系核物理实验室中应用  $\gamma$  谱仪进行<sup>137</sup>Cs 活度测定<sup>[13]</sup>.

2 结果分析

2.1 降尘速率及其再分配

对上述测定到的降尘量依照式 1 进行日期订正, 得到 3 个观测点的月降尘量、年降尘总量(表 2). 由表 2 看出, 共和盆地 3 个观测点的降尘速率为 1.341~2.099 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ , 平均降尘速率为 1.811  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ , 即相当于 0.121

mm $\cdot a^{-1}$ (容重以 1.5 g $\cdot cm^{-3}$ 计). 从全球平均来看, 共和盆地降尘速率基本处在一个中度偏高的水平<sup>[3,5]</sup>, 而在我国西北地区为中度偏低的水平<sup>[1]</sup>.

在降尘量的月分配上(表 2 和图 1), 3 个观测点的最大值都出现在 4 月份, 春季(3~5 月)的降尘量占年降尘总量的 36.65%~53.70%, 月平均降尘量占 15.17%; 夏秋季(6~11 月)的月平均降尘量不到 6.00%, 而沙珠玉 11 月降尘量占 10.24%, 共和 9 月占 14.77%, 则可能与局部的煤烟沉积或其它不确定的外来污染有关; 冬季虽然降尘量较小, 但到冬春交季的 2 月, 普遍出现较高值, 达到 10.31%~14.35%. 总体上, 本区降尘主要集中在 2~5 月, 降尘量与沙尘暴日数、大风日数密切相关(图 1), 呈现出大风降尘的形式<sup>[2]</sup>.

2.2 尘源的<sup>137</sup>Cs 示踪

由表 2, 3 个观测点尘样的<sup>137</sup>Cs 活度平均值为 3.48±0.21 Bq $\cdot kg^{-1}$ , 其中沙珠玉和共和尘样<sup>137</sup>Cs 含量基本相近, 均小于 3.00 Bq $\cdot kg^{-1}$ , 而贵南尘样的<sup>137</sup>Cs 含量较高, 达到 5.17±0.27 Bq $\cdot kg^{-1}$ . <sup>137</sup>Cs 含量的差异反映了尘源的不同.

共和与沙珠玉 2 个观测点仅相距 30 km, 之间无任何地形屏障, 处于相似的近地表风系影响之下, 塘格木-沙珠玉-英德尔风蚀区和流沙带<sup>[14]</sup>所产生的大量的风蚀物和降尘经盆地西北部、中部直抵黄河谷地和龙羊峡水库, 因此, 两地的降尘具有相同的物源, 而且在降尘速率上也大致相近. 尘样<sup>137</sup>Cs 含量的一致性证实了这一点, 其数值也恰好与沙丘砂及达连海中

的风沙沉积物相近<sup>[15]</sup>,表明两地的降尘主要与含<sup>137</sup>Cs 极少的风蚀地和流动沙丘有关。

表 2 共和盆地降尘观测(1998~1999 年)及其<sup>137</sup>Cs 测定结果

Table 2 Measurements of dust-fall rates at three sites during 1998~1999 and its <sup>137</sup>Cs activity

观测点	月降尘量/(t·hm <sup>-2</sup> )与所占百分比/%												年降尘总量/ t·hm <sup>-2</sup>	<sup>137</sup> Cs 活度/ Bq·kg <sup>-1</sup>
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
沙珠玉	0.328	0.232	0.181	0.040	0.057	0.136	0.141	0.215	0.085	0.198	0.277	0.209	2.099	2.48 ± 0.17
	15.63	11.05	8.63	1.89	2.70	6.47	6.74	10.24	4.04	9.43	13.21	9.97		
共 和	0.560	0.430	0.187	0.074	0.124	0.294	0.028	0.028	0.051	0.045	0.091	0.079	1.992	2.78 ± 0.19
	28.13	21.59	9.38	3.69	6.25	14.77	1.42	1.42	2.56	2.27	4.55	3.98		
贵 南	0.334	0.158	0.147	0.057	0.017	0.040	0.045	0.034	0.057	0.119	0.192	0.141	1.341	5.17 ± 0.27
	24.89	11.81	10.97	4.22	1.27	2.95	3.38	2.53	4.22	8.86	14.35	10.55		
平 均	0.407	0.274	0.172	0.057	0.066	0.157	0.072	0.092	0.064	0.121	0.187	0.143	1.811	3.48 ± 0.21
	22.50	15.10	9.48	3.12	3.65	8.65	3.96	5.10	3.54	6.67	10.31	7.92		

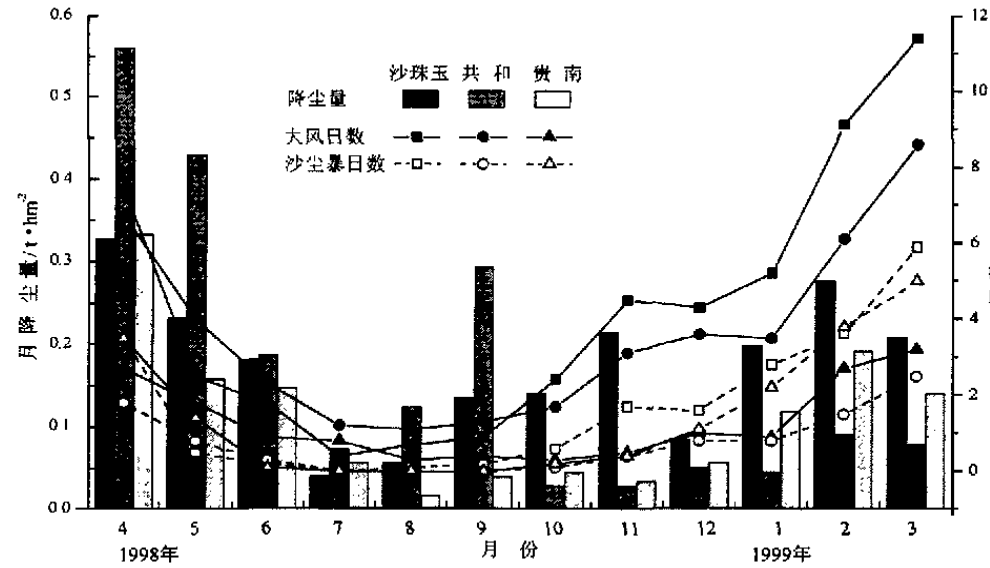


图 1 共和盆地 3 个观测点的月降尘量

Fig. 1 Monthly distribution of dust-fall at three sites of Gonghe Basin

贵南观测点偏南近 1 个纬度(表 1),与前 2 个观测点之间的直线距离超过 70~80 km,尤其重要的是,其间被高差近 300 m、宽 1~5 km 的黄河谷地(龙羊峡水库)和高大的山体所隔绝,处于完全不同的地形单元和近地表风系<sup>[14]</sup>,尘源以就地尘为主,即其上风向巴洛滩(巴仓农场)大面积的草场和旱作农田土壤风蚀所产生的粉尘,部分粉尘也可能来源于茫拉河北部的木格滩东南部沙带<sup>[14]</sup>。从尘样<sup>137</sup>Cs 含量上来看,明显高于上述 2 个观测点,基本可以排除外来粉尘的影响(即黄河北部的共和粉尘),只可能来自于富含<sup>137</sup>Cs 的尘源地。在贵南

县城以西 15.2 km 的达耳垄草场剖面中,0~30 cm 平均<sup>137</sup>Cs 活度为 12.11 ± 0.73 Bq·kg<sup>-1</sup>,<sup>137</sup>Cs 总量达到 3285.52 ± 196.01 Bq·m<sup>-2</sup>,高于区域<sup>137</sup>Cs 背景值(2691.78 ± 196.08 Bq·m<sup>-2</sup>)<sup>[15]</sup>,而在其邻近开垦了 6 a 的农田上,<sup>137</sup>Cs 活度和总量分别为 6.17 ± 0.43 Bq·kg<sup>-1</sup>和 2189.30 ± 152.34 Bq·m<sup>-2</sup>,与草场对照值相比分别减少了 49.05% 和 33.37%<sup>[15]</sup>,由此产生的风蚀物中含较高的<sup>137</sup>Cs,与贵南尘样中较高含量的<sup>137</sup>Cs 相一致。

2.3 <sup>137</sup>Cs 再分配与沉积速率

风蚀物中携带的<sup>137</sup>Cs 随着降尘颗粒沉积

表 3 降尘与<sup>137</sup>Cs 再分配和<sup>137</sup>Cs 模型<sup>[10,15,16,20]</sup>的修订

Table 3 <sup>137</sup>Cs redistribution by dust deposition and modification of <sup>137</sup>Cs model for soil erosion rate estimation<sup>[10,15,16,20]</sup>

样方 <sup>1)</sup>	样点/样品号 <sup>1)</sup>	CPR <sup>1)</sup> /%	$E_R^{2)}/t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	CPR 倍值 <sup>3)</sup>	修订 $E_R^{4)}/t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$
SAM2	21/196~198	5.13	-0.750	1.150	-1.542(2.056)
	22/199~201	11.35	-1.611	2.545	-3.413(2.119)
	平 均	8.24	-1.181	1.848	-2.478(2.098)
SAM3	5/282~283	0.81	-0.116	0.182	-0.244(2.103)
	12/299~300	14.86	-1.986	3.332	-4.468(2.250)
	16/310~311	20.03	-2.500	4.491	-6.022(2.409)
	18/314~316	11.01	-1.431	2.469	-3.310(2.313)
	35/363~372	13.91	-1.875	3.119	-4.182(2.230)
	平 均	12.12	-1.582	2.718	-3.645(2.304)
平	均	10.18	-1.381	2.283	-3.061(2.217)

1) 数据出自文献[15] 2) 风蚀速率据式 2, 负值表示沉积速率 3) 所测的 CPR 与降尘引起的理论<sup>137</sup>Cs 增加量(贵南: 4.46%)之间的比值 4) CPR 倍值与平均降尘速率(贵南: 1.341 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)之乘积, 括号内数值为修订 E<sub>R</sub> 与原 E<sub>R</sub> 的比值.

到地表, 产生了<sup>137</sup>Cs 再分配. 根据表 2, 在平均水平上, 1998~1999 年降尘产生的<sup>137</sup>Cs 再分配增加值分别为: 沙珠玉 0.521 ± 0.036 Bq·m<sup>-2</sup>、共和 0.554 ± 0.038 Bq·m<sup>-2</sup>、贵南 0.693 ± 0.036 Bq·m<sup>-2</sup>, 平均增加 0.655 ± 0.038 Bq·m<sup>-2</sup>. 如果按照这一降尘速率, 考虑到尘样中的<sup>137</sup>Cs 含量也是逐年递减的, 且遵循土壤剖面中的<sup>137</sup>Cs 理论分布曲线, 即<sup>137</sup>Cs 含量随深度的增加呈现指数骤减规律<sup>[15,16]</sup>, 可以计算出自 1963 年(<sup>137</sup>Cs 沉降峰值年<sup>[8]</sup>)以来, 由降尘引起的<sup>137</sup>Cs 理论增加量分别达到 153.62 ± 10.62 Bq·m<sup>-2</sup>、150.15 ± 10.30 Bq·m<sup>-2</sup> 和 119.97 ± 8.29 Bq·m<sup>-2</sup>, 平均增加量为 150.45 ± 7.82 Bq·m<sup>-2</sup>, 与区域<sup>137</sup>Cs 背景值相比<sup>[15]</sup>, 分别增加了 5.71%、5.58% 和 4.46%, 平均增加了 5.59%.

上述估计只是理论上的“可能”<sup>137</sup>Cs 增加量(率), 而在风蚀风积的交替过程中, 大气降尘形成的粉尘沉积物同时又成为新的尘源或风蚀物<sup>[1]</sup>, 因此, 在风蚀剖面中, 这一增加量被高的<sup>137</sup>Cs 减少量所抵消、掩盖, 而表现为净<sup>137</sup>Cs 变化率 CPR<sup>[17,18]</sup>; 而对于沉积剖面, 降尘引起的<sup>137</sup>Cs 增加量则可能保存下来. 但由于局地沉积环境的差异和不确定的人为扰动因素, 形成不同的<sup>137</sup>Cs 再分配. 例如, 在已检测到的贵南 2 个<sup>137</sup>Cs 样方 SAM2 和 SAM3 的 7 个沉积样点

中, CPR 值从 0.81% 升至 20.03%, 平均为 10.18%, 是上述贵南平均值的 2.283 倍(表 3)<sup>[15]</sup>. 这一事实表明, 在特定的地形和良好的植被等条件下, 局地的降尘速率有所增加, 超过平均值的数倍<sup>[19]</sup>. 显然, 在此条件下, 适于风蚀速率估算的<sup>137</sup>Cs 模型(式 2)<sup>[10,15,16,20]</sup>对沉积速率是不适合的, 需要进行修正:

$$E_R = -100 \cdot Bd \cdot \ln(1 + a \cdot CPR/100)/(\lambda \cdot T) \quad (2)$$

式中, E<sub>R</sub> 为年风蚀速率(t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), Bd 为土壤容重(t·m<sup>-3</sup>), CPR 为<sup>137</sup>Cs 损失率或再分配率(%), T 为时间(a), a、λ 为系数. 但由于风蚀和风积交互作用的复杂性, 其中的<sup>137</sup>Cs 再分配过程与特定取样年的测定结果之间的关系在很大程度上是不确定的<sup>[21]</sup>, 目前尚难以建立理想的修订模型. 如果假定降尘引起的 CPR 倍值(实际测定的 CPR 与理论的 CPR 之间的比值)只与降尘速率有关, 而与尘源的<sup>137</sup>Cs 活度年变化无关, 降尘速率可以初步估计为 CPR 倍值与平均降尘速率的乘积. 据此, 在 SAM2 和 SAM3 中, 最大的沉积速率达到 6.022 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 最小沉积速率为 0.244 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 平均沉积速率为 3.061 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 与采用<sup>137</sup>Cs 模型<sup>[10,15,16,20]</sup>计算结果相比, 约为 2.0~2.5 倍之间, 平均为 2.217 倍(表 3).

### 3 结论与讨论

(1) 由于受到 $^{137}\text{Cs}$ 测定精度所要求的样品量的限制,目前尚不能对微量样品进行 $^{137}\text{Cs}$ 的高精度测试,难以实现降尘的 $^{137}\text{Cs}$ 同步测定.解决这一问题的途径有2个,一是通过增大集尘面积来获得足够的尘样;二是提高仪器的测试水平.本项研究采用类似前者的办法,通过采集邻近观测点的尘样予以弥补.

(2) 3个观测点沙珠玉、共和、贵南的降尘速率为 $1.341\sim 2.099\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,平均降尘速率为 $1.811\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ .降尘主要集中在2~5月,降尘量与沙尘暴日数或大风日数密切相关,呈现出大风降尘的形式.

(3)  $^{137}\text{Cs}$ 含量的差异反映了尘源的不同,以此可以对尘源进行 $^{137}\text{Cs}$ 示踪.结果表明,沙珠玉和共和的尘样含较低的 $^{137}\text{Cs}$ ,而贵南的尘样含较高的 $^{137}\text{Cs}$ ,三地的尘源以就地尘为主,沙尘暴在尘源上的联系不大.

(4) 虽然降尘引起的 $^{137}\text{Cs}$ 再分配过程是复杂的和不确定的,但理论上可以计算出,自1963年以来,3个观测点由降尘引起的 $^{137}\text{Cs}$ 增加率平均达到5.59%.由此,对已检测到的样方SAM2和SAM3的7个沉积样点进行了沉积速率的初步修订,可以近似表达为CPR值与平均降尘速率的乘积,最大的沉积速率达到 $6.022\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,最小沉积速率为 $0.244\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,平均沉积速率为 $3.061\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,为采用式2计算结果的2.217倍.

致谢 中国科学院成都山地灾害与环境研究所张信宝研究员、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所邹学勇研究员、刘玉璋副研究员和李孝泽博士对本工作予以指导,降尘观测由杨恒华和赵雪彬(青海省治沙试验站)、陆福根高级工程师(青海省海南州农牧业区划办公室)、谭明生(青海省贵南县农林局)负责完成, $^{137}\text{Cs}$ 样品由四川大学物理系张一云教授、白立新副教授测试,在此谨表谢意.

#### 参考文献:

1 夏训诚,杨根生等.中国西北地区沙尘暴灾害及防治

- [M].北京:中国环境科学出版社,1996.1~50.
- 2 张肇二.我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J].中国科学,1983,24(3):278~288.
- 3 Goudie A S. Dust storms in space and time [J]. Progress in Physical Geography, 1983, 7: 502~530.
- 4 Livingstone I, Warren A. Aeolian geomorphology: an introduction [M]. Essex: Addison Wesley Longman Limited, 1996. 40~63.
- 5 Pye K. Aeolian dust and dust deposits [M]. London: Academic Press Inc. Ltd., 1987, 113~126.
- 6 肖洪浪,张继贤,李金贵.腾格里沙漠东南缘降尘粒度特征和沉积速率[J].中国沙漠,1997,17(2):127~132.
- 7 Wise S M. Cesium-137 and date-210: a review of the techniques and some applications in geomorphology [A]. Cullingford R A, Davidson D A, Lewin J. Timescales in geomorphology [C]. Chichester: John Wiley & Sons, 1980, 109~127.
- 8 Ritchie J C, McHenry J R. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1990, 19: 215~233.
- 9 Zhang X, Zhang Y. Using of cesium-137 to investigate sediment sources in the Hekouzheng-Longmen Basin of the middle Yellow River, China [A]. Foster I D L, Gurnell A M, Webb R W. Sediment and water quality in river catchments [C]. Chichester: John Wiley & Sons, 1995, 353~362.
- 10 Chappell A, Oliver M., Warren A. Net soil flux derived from multivariate soil property classification in the southwest Niger: a quantified approach based on  $^{137}\text{Cs}$  [A]. Buerkert B, Allison B E, Oppen M. Proceedings of the International Symposium 'Wind erosion in West Africa: the problem and its control' [C]. Weikersheim: Margraf Verlag, 1996, 69~85.
- 11 Goossens D, Offer Z I. An evaluation of the efficiency of some aeolian dust collectors [J]. Soil Technology, 1995, 7: 25~36.
- 12 大气监测检验方法科研协作组.大气监测检验方法[M].北京:人民卫生出版社,1979.125~138.
- 13 严平,董光荣,张信宝,张一云.  $^{137}\text{Cs}$ 法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果[J].科学通报,2000,45(2):199~204.
- 14 董光荣,高尚玉,金炯.青海共和盆地土地沙漠化与防治途径[M].北京:科学出版社,1993.52~53.
- 15 严平.  $^{137}\text{Cs}$ 法在土壤风蚀研究中的应用——以青海共和盆地为例(博士学位论文).兰州:中国科学院兰州沙漠研究所,1999.
- 16 Yang H, Chang Q, Du M Y, Minami K, Hatta T. Quantitative model of soil erosion rates using  $^{137}\text{Cs}$  for uncultivated soil [J]. Soil Science, 1998, 163: 248~257.
- 17 Sutherland R A, Kowalchuk T, de Jong E. Cesium-137 estimates of sediment redistribution by wind [J]. Soil Science, 1991, 151 (5): 387~396.
- 18 Walling D E, Quine T. A. Use of cesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: handbook for the application of the cesium-137 technique [M]. Exeter: Department of Geography, University of Exeter, 1993, 26~29.
- 19 Tsao H, Pye K. Dust transport and question of desert loess formation [J]. Sedimentology, 1987, 34: 139~153.
- 20 张信宝, Higgitt D L, Walling D E.  $^{137}\text{Cs}$ 法测算黄土高原土壤侵蚀速率的初步研究.地球化学,1991,3:212~218.
- 21 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.