

三江源区东西样带土壤侵蚀的 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪研究李俊杰^{1,2,3}, 李勇^{3*}, 王仰麟^{1,2}, 吴健生^{1,2}

1. 北京大学深圳研究生院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055

2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

摘要: 运用 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 联合示踪技术, 考察青藏高原三江源区东西样带 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度的背景值和变化特征, 以及东西样带土壤侵蚀速率、分布特征和主要影响因素。结果表明: ①青藏高原三江源区东西样带 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度背景值分别为453~1 714和2 612~7 377 Bq m^{-2} , ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值从西向东样带随海拔高度的变化差异明显。 ^{137}Cs (x)和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (y)面积浓度的背景值区域分布呈显著线性相关, 相关性关系式为 $y = 3.5872x + 1463.4$, $R^2 = 0.9517$ 。②长江源区沱沱河 ^{137}Cs 的示踪结果表明, 以沱沱河为中心的长江源区是典型的风蚀区, 年侵蚀速率 $2.5 \text{ t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 该区是青藏高原重要的沙尘暴源区之一。③黄河源区玛多典型坡面 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的示踪结果表明, 近40年来, 玛多畜牧业为主的人类活动造成的土壤扰动比自然因素的影响大。④玛沁东倾沟乡和军牧场的比较研究结果表明, 玛沁东倾沟乡高山草甸的水土保持效果较好, 而玛沁军牧场的畜牧业活动造成了地表土壤的强烈扰动。⑤玛沁军功镇典型水蚀地貌土壤剖面 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的结果表明, 20世纪50—60年代, 该区的极端暴雨事件导致了严重的水土流失, 土壤剖面中出现 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的空白区。植被破坏导致玛沁军功镇出现了严重水蚀, 净侵蚀速率为 $8.0 \text{ t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。⑥近40年来, 随着人类活动的加剧和全球气候变暖, 导致青藏高原三江源区出现了沙尘暴的传输源地。

关键词: 三江源区; 土壤侵蚀; ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪

中图分类号: S151.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2009)12-1452-08

Study of Soil Erosion on the East-West Transects in the Three-Rivers Headwaters Region Using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ TracingLI Jun-jie^{1,2,3}, LI Yong³, WANG Yang-lin^{1,2}, WU Jian-sheng^{1,2}

1. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

2. College of Urban and Environment Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

3. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: A combination of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tracing is applied to ascertain the background value and change characteristics of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, soil erosion rate, distribution characteristics and main influencing factors of the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region of the Tibetan Plateau. The results indicate that: (1) in the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region of the Tibetan Plateau, the background values of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ are in the range 453-1,714 and 2,612-7,377 Bq m^{-2} , respectively. With changes in elevation of the East-West transects, differences in the background values of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ are evident. The regional distribution of ^{137}Cs (x) and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (y) background values shows significant correlation; the equation of the correlation is $y = 3.5872x + 1463.4$, $R^2 = 0.9517$. (2) The ^{137}Cs tracing result in the Tuotuo River at the Changjiang headstream region indicates that the Changjiang headstream region centered by the Tuotuo River is a typical wind erosion area, with soil erosion rate of $2.5 \text{ t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. This area is one of the important sources of dust storms on the Tibetan Plateau. (3) The results of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tracing in the Maduo typical slope at the Yellow River headstream region indicate that in the last 40 years, livestock-based human activities in Maduo have caused more disturbance to the soil than the impact of natural factors. (4) Comparative study between Dongqinggou and Jiumuchang in Maqin indicates that the alpine meadow in Dongqinggou is more effective in soil and water conservation than other vegetation studied, and the animal husbandry activities in Jiumuchang have caused serious disturbance

收稿日期: 2009-03-18 修订日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671097, 40771131); 国际原子能机构项目(IAEA/RAS5043, TC CPR5015, Research Contract No. 12323)

作者简介: 李俊杰(1979-), 男, 山西忻州人, 博士, 主要从事土壤侵蚀与区域环境演变研究, lijunjie981@126.com.

* 通讯作者, 李勇(1958-), 男, 陕西蒲城人, 教授, 博导, 主要从事核示踪技术与环境科学研究, yongli32@hotmail.com.

region indicate that in the last 40 years, livestock-based human activities in Maduo have caused more disturbance to the soil than the impact of natural factors. (4) Comparative study between Dongqinggou and Jiumuchang in Maqin indicates that the alpine meadow in Dongqinggou is more effective in soil and water conservation than other vegetation studied, and the animal husbandry activities in Jiumuchang have caused serious disturbance

to the surface soil. (5) In the Jungongzhen region of Maqin, the ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ results of soil profile from a typical site with serious water erosion show that the lack of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ was caused by heavy rain during extreme weather events in the region during the 1950s to 1960s. The water erosion caused by the destruction of vegetation in the Jungongzhen region of Maqin is serious; the erosion rate is $8.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. (6) In the past 40 years, increased human activity and global warming have lead to the emergence of the sand-dust source regions in the Three-Rivers Headwaters region of the Tibetan Plateau.

Key words: Three-Rivers Headwaters region; soil erosion; ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tracing

三江源区是我国长江、黄河和澜沧江的发源地,是青藏高原的主体部分。三江源区事关整个长江和黄河流域生态环境的可持续发展,对于国家的生态安全,乃至对全球大气水量循环都有重要影响,三江源区生态环境变化一直是世人关注的焦点。三江源区海拔较高,生态环境脆弱,地形复杂,气候多变,加之近年来人类活动的影响,导致区内草地退化,土壤侵蚀沙化严重,水土流失加剧,目前已成为我国最强烈的水土流失区^[1]。

由于研究手段的限制,对于三江源区土壤侵蚀的定位监测和研究还很少。 ^{137}Cs 核示踪技术经过多年的发展完善已成为土壤侵蚀研究的主流技术之一^[2-8], ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 联合示踪是土壤侵蚀多核素示踪发展的趋势^[9-10],2种核素示踪结果可以相互验证,近年来已经应用到干旱、半干旱地区土壤侵蚀速率的研究中。笔者选取青藏高原三江源典型样带为研究区域,采集样带上典型景观类型地点的土壤样品,开展三江源区东西样带土壤侵蚀的 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 联合示踪研究。

1 研究区域概况

三江源区地理坐标为 $89^{\circ}24'E \sim 102^{\circ}41'E$, $31^{\circ}39'N \sim 36^{\circ}16'N$,地处青藏高原腹地,平均海拔4 000多m,地势高峻,地貌类型多样,地形复杂。土壤发育程度低、土层浅薄、土壤贫瘠、质地粗、多年冻土存在,易受侵蚀造成水土流失。该区属于寒冷的半湿润气候区,热量低且分布不均。年降水量80~786 mm。大部分地区年均降水量在300 mm以上。

三江源区样带起于 $34^{\circ}N, 92^{\circ}E$ 的可可西里沱沱河地区,止于 $34^{\circ}N, 100^{\circ}E$ 的玛沁军功镇地区,长度1 000多km,穿越青海高原主要的土壤侵蚀区。笔者在充分考虑了典型性、全面性、易用性等因素的基础上,选取典型高寒草原、紫花针茅草原、高寒草甸、高寒灌丛、水蚀地貌5种景观类型,其分别位于沱沱河、玛多、玛沁东倾沟乡、玛沁军牧场、玛沁军功镇。采样点分布见图1。

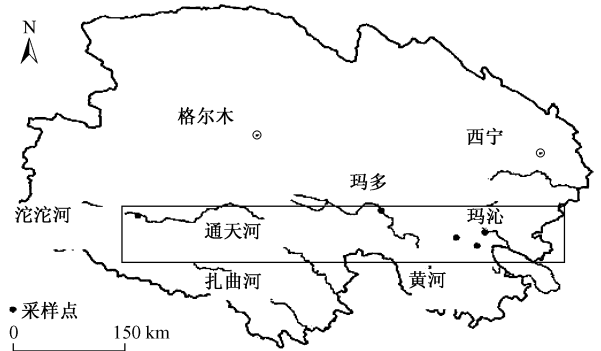


图1 三江源区东西样带采样点分布

Fig. 1 The location of the sampling sites in the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region

2 样品采集与测试

土壤样品采集于2006年8月7—27日,使用直径8 cm的土钻钻取30 cm的完整土壤作为1个土壤样品。为了解 ^{137}Cs 的土壤深度分布,在坡面下部堆积区取 ^{137}Cs 的分层样,按照 $0 \sim < 2, 2 \sim < 4, 4 \sim < 6, 6 \sim < 8, 8 \sim < 10, 10 \sim < 12, 12 \sim < 14, 14 \sim < 16, 16 \sim < 18, 18 \sim < 20, 20 \sim < 22, 22 \sim < 24, 24 \sim < 26, 26 \sim < 28, 28 \sim 30$ cm间隔进行分层采集。为获得当地的 ^{137}Cs 面积浓度背景值,选取 ^{137}Cs 多年未扰动的林地或草地分层取样,取样深度30~60 cm。参考点即背景值采样点不好选择的地区,直接在坡面顶部平坦部位采集样品,认为 ^{137}Cs 沉积以来未经过任何扰动,也未发生过土壤侵蚀,以该处 ^{137}Cs 的面积浓度作为该流域的背景值。东西样带各采样点情况见表1。

将土壤样品自然风干、研磨过2 mm筛、剔除草根、石块等杂物,称300 g供测试。 ^{137}Cs 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度用美国CANBERRA公司配备高纯锗探头的 γ 能谱仪测定, γ 能谱仪的测定范围为 $3 \sim 3 \times 10^3$ keV,相对探测效率为50.2%,能量分辨率为2.2 keV(对Co-60 1 332.5 keV的能量峰),在662 keV处求算 ^{137}Cs 比活度(Bq/kg),在46.5 keV处求算 ^{210}Pb 比活度(Bq/kg), ^{226}Ra (186.21 keV)不能直接测定,用其子体 ^{214}Pb (351 keV)和 ^{214}Bi (609 keV)替代,取两子体的

表1 三江源区东西样带采样点概况

Table 1 The situation of the sampling sites in the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region

采样点	经、纬度	海拔/m	土类	植被、地形	年降水量/mm
沱沱河 (长江第一桥附近, 长江源头)	34°12'05.2"N 92°26'49.9"E	4 557	高山草原土	紫花针茅草原, 典型高寒草原	278
玛多 (城西 10 km, 黄河源头)	34°58'14.6"N 98°06'76.9"E	4 279	高山草甸土	紫花针茅草原, 坡地	283
玛沁东倾沟乡	34°29'14.3"N 99°57'23.5"E	3 875	高山草甸土	高寒草甸, 坡地	517
玛沁军牧场	34°20'46.8"N 100°27'58.3"E	4 070	高山草甸土	高寒灌丛, 坡地	517
玛沁军功镇 (黄河入青海处)	34°39'42.2"N 100°37'22.9"E	3 390	高山草甸土	水蚀地貌, 植被稀疏, 坡地	517

加权平均值即为²²⁶Ra的比活度。²¹⁰Pb与²²⁶Ra的比活度之差即为²¹⁰Pb_{ex}比活度。测定时间为80 000 s左右, 测定误差 < 8%。

3 计算方法

实验室测得的是¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}的比活度(Bq/kg), 根据式(1)换算成¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}的面积浓度(Bq/m²), 即单位面积内测定核素的Bq数:

$$A_a = A \cdot M_T / S \quad (1)$$

式中, A_a 为采样点¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}的面积浓度, Bq/m²; A 为采样点土壤的¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}比活度, Bq/kg; M_T 为相应采样点土钻采集的土壤样品质量, kg; S 为土钻横断面积, m²。

选用¹³⁷Cs质量平衡简化模型(Mass Balance Model iv)的改进形式——非农耕地的扩散-迁移模型来计算坡耕地侵蚀量:

$$C_u(t) \approx \frac{I(t)}{H} + \int_0^{-1} \frac{I(t')e^{-R/H}}{\sqrt{D\pi(t-t')}} e^{-V^2(t-t')/(4D) - \lambda(t-t')} dt' \quad (2)$$

式中, $C_u(t)$ 为表层土壤¹³⁷Cs的比活度, Bq/kg; $I(t)$ 为¹³⁷Cs每年的沉降通量, Bq/(m²·a); H 为¹³⁷Cs在土壤剖面中开始分布的松弛质量深度, kg/m²; λ 为¹³⁷Cs的衰减系数, a⁻¹; R 为侵蚀速率, kg/(m²·a); D 为扩散系数, kg²/(m⁴·a); V 为土壤剖面中¹³⁷Cs向下迁移的速率, kg/(m²·a)。

对于侵蚀的地点来说, 测定的¹³⁷Cs面积浓度(A_u , Bq/m²)小于当地参考点的面积浓度值(A_{ref}), 侵蚀速率(R)可以由¹³⁷Cs面积浓度的减少值 $[A_{is}(t)]$ (即 $A_{ref} - A_u$)和表层土壤¹³⁷Cs的活度值 $[C_u(t')]$ 根据下式计算:

$$\int_0^1 PRC_u(t') e^{-\lambda(t-t')} dt' = A_k(t) \quad (3)$$

对于侵蚀的地点来说, 沉积速率(R')由沉积点¹³⁷Cs的活度值 $[C_d(t')]$ 和¹³⁷Cs面积浓度的增加值 $[A_{ex}(t)]$ 根据下式计算:

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_0^1 C_d(t') e^{-\lambda(t-t')} dt'} = \frac{A_u - A_{ref}}{\int_0^1 C_d(t') e^{-\lambda(t-t')} dt'} \quad (4)$$

其中, $C_d(t')$ 可根据下式计算:

$$C_d(t') = \frac{1}{\int_S R dS} \int_S P' PC_u(t') R dS \quad (5)$$

扩散-迁移模型考虑了¹³⁷Cs沉降通量的时间变化以及¹³⁷Cs随时间在土壤剖面上的再分布, 比剖面分布模型有所改进, 它适合于应用在非农耕地区^[13-15]。该研究的青藏高原样带都处于非农耕地的高寒草原地区, 所以适合应用¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}的扩散-迁移模型计算土壤侵蚀速率。

4 结果与分析

4.1 ¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}面积浓度背景值区域分布特征

确定¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}面积浓度背景值是应用¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}示踪技术求算区域土壤侵蚀速率的基础^[8, 16]。选择植被覆盖良好, 地表枯落物层完整, 处于相对独立的地貌单元, 不受其他坡的来水来沙影响, 且地势平坦, 没有强烈侵蚀或明显沉积出现的地点作为¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}面积浓度背景值的采样点。

运用WALLING等^[17]的¹³⁷Cs沉降量计算模型对各采样点¹³⁷Cs面积浓度背景值进行模拟计算, 并与实测值进行比较(见表2), 确定了¹³⁷Cs面积浓度背景值的模拟值与实测值的关系(见图2)。玛多和玛沁东倾沟乡¹³⁷Cs面积浓度实测背景值与模拟值基本一致, 沱沱河、玛沁军牧场和军功镇¹³⁷Cs面积浓度实测背景值与模拟值之间差异较大(见表2)。对

表 2 三江源区东西样带 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度背景值

Table 2 The background value of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ inventory in the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region

采样点	^{137}Cs 面积浓度 (Bq/m^2)				$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度 (Bq/m^2)			
	模拟值	实测值	标准偏差	范围	实测值	标准偏差	范围	
沱沱河	936	(453±82) a	135	317~ 588	(2 612±1 495) a	194	2 418~ 2 806	
玛多	942	(864±145) ab	—	—	(5 140±2 493) b	3 031	2 109~ 8 171	
玛沁东倾沟乡	1 181	(1 106±123) ab	139	968~ 1 245	(5 598±1 958) b	32	5 566~ 5 630	
玛沁军牧场	1 181	(1 714±133) b	335	1 379~ 2 049	(7 252±1 694) b	64	7 187~ 7 316	
玛沁军功镇	1 181	(1 623±56) b	35	1 623~ 1 689	(7 377±542) b	95	7 377~ 7 564	

注: ±后面为面积浓度的不确定度; a 和 b 表示差异显著性分析.

于荒漠、湿地和沼泽等难以采集样品的恶劣环境, 用其面积浓度模拟值作为 ^{137}Cs 面积浓度背景值^[31]. 三江源区 ^{137}Cs 面积浓度背景值为 453~ 1 714 Bq/m^2 , ^{137}Cs 面积浓度背景值实测值排序为玛沁军牧场 > 玛沁军功镇 > 玛沁东倾沟乡 > 玛多 > 沱沱河(见图 3). 差异显著性分析(0.05 显著水平的 Duncan 分析)表明, 沱沱河、玛多和玛沁东倾沟乡 ^{137}Cs 面积浓度背景值之间无显著性差异; 沱沱河与玛沁军牧场、军功镇 ^{137}Cs 面积浓度背景值有显著性差异(见表 2).

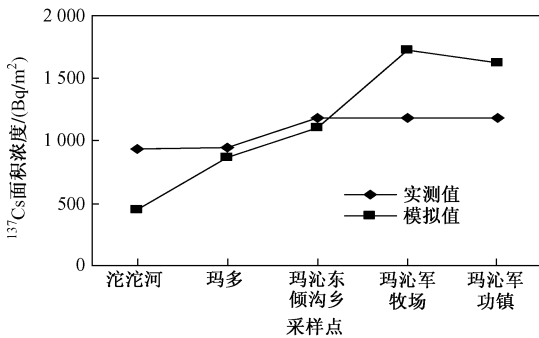


图 2 三江源区东西样带 ^{137}Cs 面积浓度背景值的模拟值与实测值的关系

Fig. 2 The relationship between the simulated values and the real values of ^{137}Cs inventory in the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region

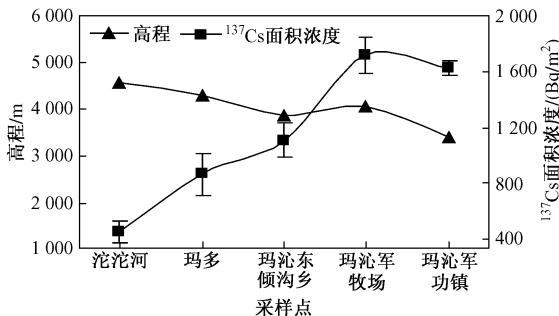


图 3 三江源区东西样带 ^{137}Cs 面积浓度背景值的变化

Fig. 3 The regional change of the ^{137}Cs inventory in the East-West transects of Three-Rivers Headwaters region

三江源区东西样带 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度背景值为 2 612~ 7 377 Bq/m^2 , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度背景值的变化趋势为玛沁军功镇 > 玛沁军牧场 > 玛沁东倾沟乡 > 玛多 > 沱沱河(见图 4). 沱沱河 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度的背景值与其他样带的背景值存在显著性差异(见表 2). 目前还没有成熟的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉降量计算模型, 用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度的实测值作为背景值来计算侵蚀速率.

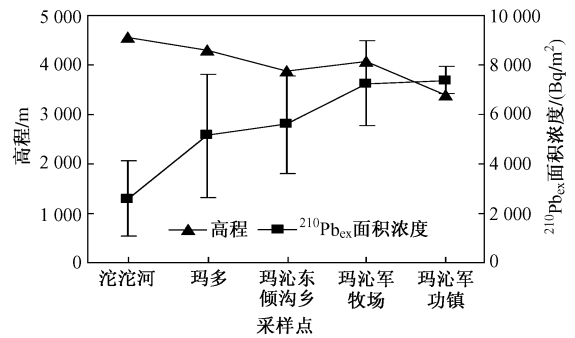


图 4 三江源区东西样带 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度背景值的变化

Fig. 4 The regional change of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ inventory in the East-West transects of Three-Rivers Headwaters region

三江源区东西样带 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度背景值呈显著的线性关系, ^{137}Cs 面积浓度背景值(x) 高的地方, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度背景值(y) 也高, 方程为 $y = 3.5872x + 1463.4$, $R^2 = 0.9517$ (见图 5). 证明 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在青藏高原地区的沉降与分布规律存在相关性, 即假定在一定区域内大气均匀沉降示踪核素, 在地面不论微地形的变化还是植被等因素的影响, ^{137}Cs 面积浓度高的地方, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度也高.

4.2 三江源区东西样带 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的剖面分布

沱沱河的土壤剖面是典型的风蚀土壤剖面^[2, 56, 20], ^{137}Cs 分布在土壤表层 0~ 4 cm, 表层 ^{137}Cs 比活度很低(见图 6). 这与沱沱河地区年大风日数较高和风速较大的气候因素有关^[18-19]. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 与 ^{137}Cs 相比, 土壤剖面分布较深, 达到 60 cm.

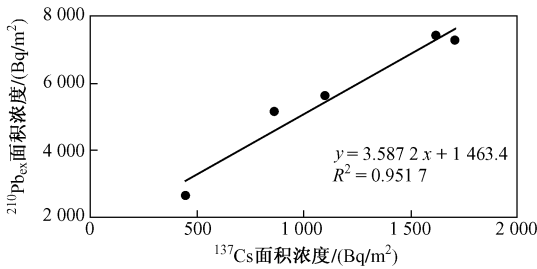


图5 三江源区东西样带¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}面积浓度背景值的相关关系

Fig. 5 The correlation between ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} inventory in the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region

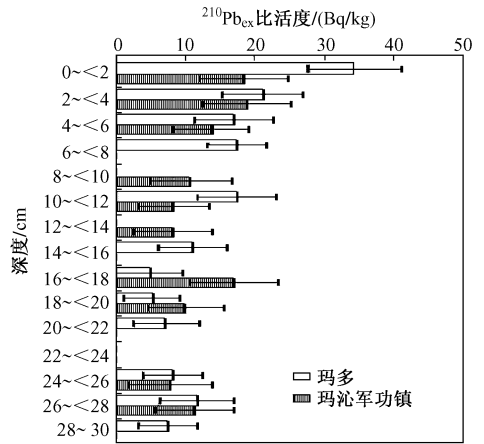


图7 三江源区东西样带典型景观²¹⁰Pb_{ex}的土壤剖面分布

Fig. 7 The soil profile distribution of ²¹⁰Pb_{ex} in the typical landscape in the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region

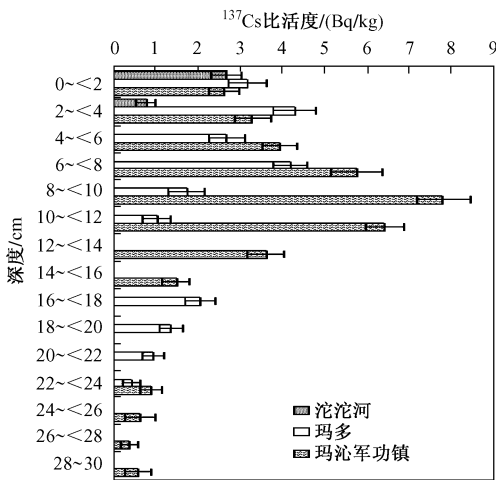


图6 三江源区东西样带典型景观¹³⁷Cs的土壤剖面分布

Fig. 6 The soil profile distribution of ¹³⁷Cs in the typical landscape in the East-West transects of the Three-Rivers Headwaters region

玛多典型坡面下部土壤剖面, ¹³⁷Cs 主要分布在土壤表层 0~ 8 cm, 在 6~ 8 cm 出现富集层, 在 12~ 16 cm 出现空白区(见图 6). ²¹⁰Pb_{ex} 主要分布在表层 0~ 8 cm, 从表层到下部呈指数递减的趋势, 在 8~ 10 cm 出现空白区, 12~ 14 cm 也几乎为空白区(见图 7). 这与土壤剖面¹³⁷Cs 空白区出现的位置接近. 这是由于 20 世纪 60 年代是青海省区域性暴雨多发时期, 曾出现了 34 次极端暴雨事件^[181], 造成了严重的水土流失.

玛沁军功镇典型水蚀地貌坡面底部的土壤剖面, 从表层到 10 cm 处, ¹³⁷Cs 比活度随土层深度加深呈指数递增趋势, 在 8~ 10 cm 处出现¹³⁷Cs 的富集峰, 在 10~ 16 cm 处¹³⁷Cs 比活度随土层深度加深呈指数递减趋势, 在 16~ 22 cm 处出现¹³⁷Cs 比活度空

白区(见图 6). 与¹³⁷Cs 比活度空白区相比, ²¹⁰Pb_{ex} 比活度空白土层出现的位置大致相同(见图 7). 进行¹³⁷Cs 的时标计年分析发现, ¹³⁷Cs 来自于大气层核试验, 全球沉降开始于 1954 年, 在 1963 和 1964 年达到沉降的最高峰, 20 世纪 70 年代后逐渐降低, 在 80 年代中期沉降最低^[21]. 从典型土壤剖面¹³⁷Cs 的分布特征来看, 在¹³⁷Cs 的富集峰和赋存的最底部之间出现空白区, 而且¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb_{ex} 比活度空白位置大致相同, 可以判断 20 世纪 50—60 年代三江源区出现了极端暴雨事件, 并引发了严重的水土流失.

玛沁东倾沟乡土壤剖面¹³⁷Cs 在土壤表层 0~ 6 cm 分布, 0~ 2 cm 高度富集, ¹³⁷Cs 比活度为 164.49 Bq/kg, 2~ 4 cm 处下降为 23.29 Bq/kg. ²¹⁰Pb_{ex} 主要分布在土壤表层 0~ 4 cm 处, 0~ 2 cm 高度富集, 2~ 4 cm 急剧降低. 该土壤剖面分布与其他土壤剖面分布有很大差异. ¹³⁷Cs 与²¹⁰Pb_{ex} 在土壤表层 0~ 2 cm 大量富集, 是由于该区降水较多, ¹³⁷Cs 与²¹⁰Pb_{ex} 的沉降通量较高, 另外土层较薄, 土壤物理性状较差, 阻碍了¹³⁷Cs 与²¹⁰Pb_{ex} 向土层下部的淋溶入渗.

4.3 典型参考点¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb_{ex} 的比活度剖面分布

玛沁军功镇参考点土壤剖面中¹³⁷Cs 主要分布在土壤表层 0~ 8 cm, 在 4~ 6 cm 处出现¹³⁷Cs 的富集峰, 其比活度为 25.78 Bq/kg, 6 cm 以下随土壤深度增加呈指数递减趋势. 在 12~ 14 cm 处为¹³⁷Cs 空白区(见图 8). 形成该¹³⁷Cs 剖面分布的原因: 1 与¹³⁷Cs 沉降历史有关, ¹³⁷Cs 从开始沉降到基本停止沉降过

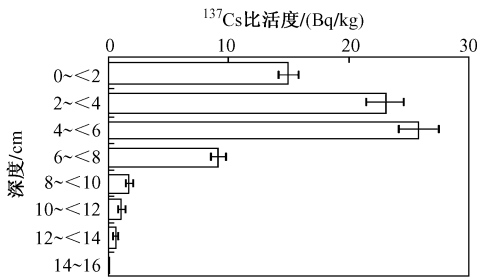


图 8 参考点 ^{137}Cs 的土壤剖面分布

Fig. 8 The soil profile distribution of ^{137}Cs in the reference site

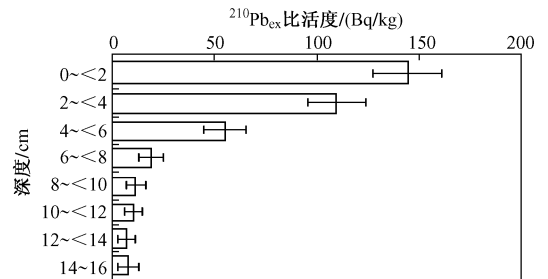


图 9 参考点 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的土壤剖面分布

Fig. 9 The soil profile distribution of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in the reference site

程中, ^{137}Cs 沉降通量随沉降时间变化基本上是一单峰曲线, 在 20 世纪 60 年代中期沉降通量最高。④ ^{137}Cs 主要吸附在土壤细粒中, 50% 的 ^{137}Cs 吸附在 $< 0.001 \text{ mm}$ 的土壤颗粒中, 而土壤细粒又容易在重力作用下和雨水的淋溶下向土壤深层迁移, 所以在富含 ^{137}Cs 的 $0 \sim 6 \text{ cm}$ 土层中, 如果从很薄的表土层向下 (6 cm 内) 有物理性黏粒的淋溶迁移, 则可导致本来就富含 ^{137}Cs 的土层变得更高, 所以出现 ^{137}Cs 的富集层。这与黄土高原的研究结果基本一致^[22-23]。玛沁军功镇参考点 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 主要分布在 $0 \sim 6 \text{ cm}$ 土层, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度占土壤剖面中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度总量的 84.87%。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面分布深度比 ^{137}Cs 的分布深 2 cm, 说明 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在土壤中的迁移能力比 ^{137}Cs 强。在 $0 \sim 16 \text{ cm}$ 土壤剖面内, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度随土层深度的增加呈指数递减的趋势。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度峰值出现在堆积剖面的表层 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 处, 其比活度为 144.54 Bq/kg , 随剖面深度增加 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度逐渐减少 (见图 9), 这主要是由于核素的放射性衰变所致。

表 3 三江源区东西样带土壤侵蚀速率(由 ^{137}Cs 模型计算得到)

Table 3 The soil erosion rate of the East-West transect of the Three-Rivers Headwaters region calculated by ^{137}Cs model

项目	沱沱河	玛多	玛沁东倾沟乡	玛沁军牧场	玛沁军功镇	
侵蚀速率 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	上部	-4.4	7.2	1.6	0	-9.9
	中部	-4.4	-2.0	8.1	1.4	-9.0
	下部	1.4	-4.3	7.1	-1.6	-7.7
净侵蚀/堆积速率 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	-2.5	0.3	4.2	-0.1	-8.0	

由 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 模型计算的结果看, 玛沁军功镇的侵蚀速率变化特征表现为上部 $>$ 中部 $>$ 下部, 净侵蚀速率为 $9.5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 泥沙输移比接近 100% (见表 4), 这与 ^{137}Cs 模型计算的结果是一致的。在玛沁东倾沟乡, 由 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 模型计算的侵蚀速率和 ^{137}Cs 模型计

4.4 三江源区东西样带侵蚀速率

采用 WALLING 等^[17] 的非农耕地 ^{137}Cs 迁移 - 扩散模型, 计算得出三江源区东西样带坡面采样点土壤净侵蚀/堆积速率 (见表 3)。由表 3 可见, 以沱沱河为中心的长江源区是典型的风蚀区, 年侵蚀速率为 $2.5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。沱沱河是青藏高原中西部地区大风日数出现的中心区, 主体年 (1971—2000 年) 平均大风日数 168 d, 最高可以达到 2 d 1 次大风天气, 长江源区的年沙尘暴和扬沙过程的总和在 30 次以上^[24], 该区是青藏高原重要的沙尘暴源区之一^[25-26]。

玛沁军功镇土壤侵蚀较严重, 从小流域和沟道冲刷下来的泥沙都输送到黄河干流中, ^{137}Cs 核素示踪的结果表明, 该地区的泥沙输移比接近 100%, 净侵蚀速率为 $8.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。玛沁军牧场土壤侵蚀较弱, 年侵蚀速率为 $0.1 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。玛多和玛沁东倾沟乡两处是堆积区, 玛沁东倾沟乡的堆积速率为 $4.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 玛多的堆积速率为 $0.3 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

算的结果较接近, 但沱沱河和玛沁军牧场 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 模型计算的结果与 ^{137}Cs 模型计算的结果相反, 玛多的计算结果差异也较大, 这反映了以畜牧业为主的人类活动对两地区的植被破坏和地表土壤扰动, 引发了较严重的土壤侵蚀^[1, 27-28]。

表4 三江源区东西样带土壤侵蚀速率(由 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 模型计算得到)Table 4 The soil erosion rate of the East-West transect of the Three-Rivers Headwaters regions calculated by $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ model

项目	沱沱河	玛多	玛沁东倾沟乡	玛沁军牧场	玛沁军功镇	
侵蚀速率 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	上部	0.2	1.7	7.2	0.6	-10.0
	中部	5.1	2.2	7.7	3.9	-9.9
	下部	10.1	4.3	6.6	3.6	-8.5
净侵蚀速率/堆积速率 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]	3.8	2.0	5.3	2.0	-9.5	

5 结论

a. 三江源区东西样带的降水量受海拔高度的影响差异很大,呈由东南向西北递减的趋势。理论上, ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 是随降水湿沉降到地表,从西向东样带随海拔降低降水量增多,势必造成 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的沉降通量增多。在采样和分析过程中,要综合考虑实际情况确定区域,以减少计算侵蚀速率的不确定性。分析结果表明,三江源区 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的面积浓度背景值从西向东样带随海拔高度的变化差异明显, ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的面积浓度背景值之间呈显著的正相关关系。

b. 应用 ^{137}Cs 核素示踪的结果表明,以沱沱河为中心的长江源区是典型的风蚀区,年侵蚀速率在 $2.5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,该区是青藏高原重要的沙尘暴源区之一。黄河环抱的玛沁军功镇水力侵蚀较严重,净侵蚀速率为 $8.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。玛多和玛沁军牧场以畜牧业为主的人类活动对地表土壤的扰动较剧烈。玛沁东倾沟乡高寒草甸的水土保持作用较好。

c. 近40年来,随着人类活动的加剧和全球气候变暖,导致青藏高原三江源区出现了沙尘暴的传输源地。如果人类活动对高原植被再进行剧烈破坏,加之气温上升导致青藏高原冰川融化和冻土加速退化,土地荒漠化加剧,青藏高原将会成为中亚大陆乃至全球最重要的沙尘暴源区,进而可能对全球气候变化产生重要影响。

参考文献(References):

[1] 孙鸿烈. 长江上游地区生态与环境问题[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 7-37.

[2] 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[J]. 科学通报, 2000, 45(2): 199-204.

[3] 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[J]. 科学通报, 2007, 52(23): 2785-2791.

[4] 冯明义, 文安邦. 中国土壤侵蚀的 ^{137}Cs 法研究进展[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 61-64.

[5] 胡云峰, 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[J]. 科学通报, 2005, 50(9): 933-937.

[6] 濮励杰, 包浩生, 彭补拙, 等. ^{137}Cs 应用于我国西部风蚀地区

土地退化的初步结果[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 441-449.

[7] CHAPPELL A. The limitations of using ^{137}Cs for estimating soil redistribution in semi-arid environments [J]. Geomorphology, 1999, 29: 135-152.

[8] ZAPATA F. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002: 2-9.

[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 [J]. J Environ Qual, 1990, 19: 215-233.

[10] WALLING D E. Use of ^{137}Cs and other fallout radionuclides in soil erosion investigations: progress, problems and prospects. In use of ^{137}Cs in the study of soil erosion and sedimentation. IAEA-TECDOC-1028 [R]. Vienna: IAEA, 1998: 39-62.

[11] 刘振静, 李路滨, 庄彩云, 等. 青藏铁路沿线土壤可培养微生物种群多样性分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 176-181.

[12] 张淑红, 侯书贵, 秦翔, 等. 青藏高原冰川雪细菌与气候环境的关系[J]. 环境科学研究, 2007, 20(5): 39-44.

[13] WALLING D E, HE Q. Models for converting ^{137}Cs measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and uncultivated soils. Report to the IAEA as a contribution to the IAEA Co-ordinated Projects on Soil Erosion and Sedimentation [R]. Exeter: Department of Geography, University of Exeter, 1997: 29-30.

[14] WALLING D E, HE Q, WHELAN P A. Using ^{137}Cs measurements to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small Devon catchments [J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69: 27-43.

[15] WALLING D E, ZHANG Y, HE Q. Models for converting radionuclide (^{137}Cs , Excess ^{210}Pb , and ^7Be) measurements to estimates of soil erosion and deposition rates: IAEA/RCA mid-term progress review meetings [M]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007: 5-16.

[16] WALLING D E, HE Q. Improved models for estimating soil erosion rates from caesium-137 measurements [J]. J Environ Qual, 1999, 28: 611-622.

[17] WALLING D E, HE Q. Final report on IAEA technical contract 1036/R-RO-RI: the global distribution of bomb-derived ^{137}Cs reference inventories [R]. Exeter: University of Exeter, 2000: 2-10.

[18] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 干草原地区土壤 ^{137}Cs 沉积特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 221-225.

[19] 王国祯. 青海气象史[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 32-36.

[20] 王江山. 青海天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 25-30.

[21] CAMBRAY R S, PLAYFORD K, LEWIS G N J, et al. Radioactive fallout in air and rain: results to the end of 1988. AERE-R-13575

- [R]. Harwell: UK Atomic Energy Authority, 1989: 5-18.
- [22] 李立青. ^7Be 和 ^{137}Cs 复合示踪坡耕地土壤侵蚀产沙的空间分布特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003: 13-14.
- [23] 李勉. 小流域侵蚀速率与产沙关系的 ^{137}Cs 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002: 30-33.
- [24] 韩永翔. 青藏高原沙尘及其气候环境意义研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2005: 5-10.
- [25] 方小敏, 韩永翔, 马金辉, 等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积: 以 2003-03-04 拉萨沙尘天气过程为例[J]. 科学通报, 2004, 49(11): 1084-1090.
- [26] 韩永翔, 奚晓霞, 宋连春, 等. 青藏高原沙尘及其可能的气候意义[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 588-592.
- [27] 杨改河, 王得祥, 冯永忠, 等. 江河源区生态环境演变与质量评价研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 286-294.
- [28] 李京荣, 王家骥, 娄安如, 等. 浅析铁路建设对生态环境的影响: 以青藏铁路格望段为例[J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 58-61.

(责任编辑: 孔 欣)