

典型喀斯特坡地¹³⁷Cs的分布与相关影响因子研究

张笑楠^{1,2,3}, 王克林^{1,2*}, 张伟^{1,2}, 陈洪松^{1,2}, 何寻阳^{1,2}, 张信宝⁴

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 通过野外考察和大量的¹³⁷Cs取样分析, 对喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs分布及相关影响因子进行了初步研究。结果表明, 喀斯特区域¹³⁷Cs剖面分布特征与非喀斯特区域相似, 林地土壤剖面¹³⁷Cs呈现指数分布模式, 耕地剖面的¹³⁷Cs呈均匀分布模式; 喀斯特区域落水洞洞口45 cm以上土层中的¹³⁷Cs比活度变幅为1.7~3.3 Bq/kg, ¹³⁷Cs分布较深, 表明洞口现存土壤多由侵蚀物质堆积形成; 2个石缝中的土壤样品¹³⁷Cs比活度分别为16.8 Bq/kg和37.6 Bq/kg, 远远高于临近土体, 表明裸岩是影响喀斯特区域¹³⁷Cs地表空间运移的一个重要因素; 随坡面海拔升高, ¹³⁷Cs的面积活度表现出波动振荡趋势, 空间异质性明显, 林地和农耕地坡面¹³⁷Cs面积活度变幅分别为299.4~1592.6 Bq/m²和115.8~1478.6 Bq/m²; 林地坡面¹³⁷Cs面积活度与坡度和海拔高度呈极显著正相关, 农耕地坡面¹³⁷Cs面积活度和坡度呈不明显的负相关, 与海拔高度呈显著负相关。地形地貌和人为干扰强度是影响坡面¹³⁷Cs空间分布规律的主要因素。

关键词: 喀斯特; ¹³⁷Cs分布; 影响因子

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3152-07

Distribution of ¹³⁷Cs and Relative Influencing Factors on Typical Karst Sloping Land

ZHANG Xiao-nan^{1,2,3}, WANG Ke-lin^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Hong-song^{1,2}, HE Xun-yang^{1,2}, ZHANG Xin-bao⁴

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang Guangxi 547100, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the field survey and the analysis of a large number of soil samples, the distribution of ¹³⁷Cs and its influencing factors were studied using ¹³⁷Cs tracer technology on typical karst sloping land. The results indicate that the distribution of ¹³⁷Cs in soil profile in karst areas show the similar characteristics as that in non-karst areas, fitted an exponential pattern in forest soils and a uniform pattern in cultivated soils. In the sinkhole points in karst areas, ¹³⁷Cs exists in deep soil layers and its specific activity vary from 1.7 to 3.3 Bq/kg in soil layers above 45 cm, suggesting the existing soil around karst sinkhole is mainly formed by the accumulation of erosion materials. The ¹³⁷Cs specific activity in the soil from two rock cracks are 16.8 Bq/kg and 37.6 Bq/kg respectively, which are much higher than that in the soil around the rock, this phenomenon indicates that bare rock is an important influencing factor for ¹³⁷Cs spatial movement. With the increment of altitude, the ¹³⁷Cs area activity exhibits an irregular fluctuation and evident spatial heterogeneity. On the forest land, the ¹³⁷Cs area activities which range from 299.4 to 1592.6 Bq/m² are highly positively correlated with the slope gradient and positively correlated with the altitude; while on the cultivated land, the ¹³⁷Cs area activities which range from 115.8 to 1478.6 Bq/m² are negatively correlated with the slope gradient but negatively correlated with the altitude. Topography, geomorphology and human disturbance intensity are the key factors influencing ¹³⁷Cs spatial distribution.

Key words: Karst; distribution of ¹³⁷Cs; influencing factors

中国西南喀斯特山区位于世界三大连片喀斯特发育区之一的东亚片区的中心, 由于地质环境特殊, 其生态环境比同纬度的其他地区都易遭受破坏, 随着近年来区内人口增多, 生存型经济发展阶段不合理的土地开发方式使该区域森林退化、土壤侵蚀状况严重。在喀斯特区域碳酸盐岩成土速率缓慢的背景下, 土壤一旦流失, 极难恢复, 会引起植被退化、基岩裸露、动植物资源退化和灭绝, 进而导致整个生态环境系统进入恶性循环, 是喀斯特区域呈现环境脆弱性的重要原因^[1,2]。国内外学者对喀斯特区域土壤侵蚀的机制进行了大量研究, 发现与非喀斯特区域不同, 由于喀斯特区域碳酸盐岩体内管道、裂隙发育广泛, 土壤短距离丢失现象普遍存在^[3], 这在一定程

度上加剧了土壤侵蚀的严重性。本文通过野外考察和大量的¹³⁷Cs取样分析, 对喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs分布及相关影响因子进行了初步研究。结果表明, 喀斯特区域¹³⁷Cs剖面分布特征与非喀斯特区域相似, 林地土壤剖面¹³⁷Cs呈现指数分布模式, 耕地剖面的¹³⁷Cs呈均匀分布模式; 喀斯特区域落水洞洞口45 cm以上土层中的¹³⁷Cs比活度变幅为1.7~3.3 Bq/kg, ¹³⁷Cs分布较深, 表明洞口现存土壤多由侵蚀物质堆积形成; 2个石缝中的土壤样品¹³⁷Cs比活度分别为16.8 Bq/kg和37.6 Bq/kg, 远远高于临近土体, 表明裸岩是影响喀斯特区域¹³⁷Cs地表空间运移的一个重要因素; 随坡面海拔升高, ¹³⁷Cs的面积活度表现出波动振荡趋势, 空间异质性明显, 林地和农耕地坡面¹³⁷Cs面积活度变幅分别为299.4~1592.6 Bq/m²和115.8~1478.6 Bq/m²; 林地坡面¹³⁷Cs面积活度与坡度和海拔高度呈极显著正相关, 农耕地坡面¹³⁷Cs面积活度和坡度呈不明显的负相关, 与海拔高度呈显著负相关。地形地貌和人为干扰强度是影响坡面¹³⁷Cs空间分布规律的主要因素。

收稿日期: 2008-12-16; 修订日期: 2009-04-13

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-08); 国家自然科学基金项目(30800162); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目

作者简介: 张笑楠(1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为区域生态环境与GIS应用, E-mail: zzzxn@163.com

* 通讯联系人, E-mail: kelin@isa.ac.cn

度上限制了传统土壤侵蚀研究方法, 如侵蚀模型、径流小区等在喀斯特区域的应用. 为了解决这个问题, 一些学者尝试运用核素示踪方法开展喀斯特区域土壤侵蚀研究, 其中以¹³⁷Cs示踪研究最为普遍.

¹³⁷Cs是20世纪50~70年代核试验产生的放射性元素, 随大气环流在全球沉降. 沉降在地表的¹³⁷Cs能迅速被土壤颗粒和有机物强烈吸附, 基本不被淋溶流失和植物吸收, 在土壤中的损失与富集主要伴随土壤侵蚀和沉积活动发生, 是土壤侵蚀研究的良好示踪元素^[4,5]. 近十多年来, 我国在黄土高原、长江上游等区域广泛开展了¹³⁷Cs示踪土壤侵蚀的研究, 获得了大量的数据^[6~9]. 然而, 由于喀斯特区域土壤侵蚀作用机制特殊, 其它区域运用¹³⁷Cs法得出的研究成果难以直接应用到喀斯特区域. 因此, 白占国、万国江等^[10,11]1995年前后在国内率先开展了喀斯特区域¹³⁷Cs分布规律研究, 随后张素红等、傅瓦利等、张治伟等学者^[12~14]也陆续运用¹³⁷Cs方法进行了喀斯特区域土壤侵蚀定量研究, 取得了一些成果. 但是, 由于对¹³⁷Cs在喀斯特区域的空间分布特征及影响因子至今没有清晰的认识, 一定程度上限制了¹³⁷Cs方法在喀斯特区域土壤侵蚀研究中的进一步推广应用. 本研究以古周移民示范区为例, 通过野外考察和¹³⁷Cs取样, 分析了¹³⁷Cs在喀斯特坡地的分布规律及其与主要环境因子的关系, 以期为进一步认识喀斯特区域土壤侵蚀机制, 防治水土流失提供科学依据.

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西省环江毛南族自治县下南乡古周村(24°54′42.6″~24°55′17.8″N, 107°56′48.1″~107°57′28.5″E), 该区为典型喀斯特峰丛洼地景观, 属亚热带季风气候区, 多年平均气温16.5~20.5℃, 多年平均降雨量为1389.1 mm, 雨季平均持续130~140 d, 主要集中在4~9月, 尤以6月中旬至7月中旬最多, 常出现涝灾; 10月~次年3月为旱季, 又常受到干旱威胁. 研究区地形起伏较大, 相对海拔高度442 m, 最低点海拔376 m, 最高点海拔816 m. 土地总面积186.7 hm², 其中耕地17.3 hm². 研究区土壤主要为碳酸盐岩发育的石灰土, 土质较粘重, 土被分布极不均匀, 平均土层深度20~40 cm, 基岩广泛出露, 特别是坡地平均裸岩率达70%以上, 植被退化较为严重, 森林覆盖率仅为13%. 由于长年水土流失, 石漠化趋势明显, 生态环境十分脆弱, 属国家移民迁出区

和西部“退耕还林还草区”^[15].

1.2 样品采集与分析方法

2007年12月在研究区采集土壤样品, 分别选取一条次生林坡面和一条农耕地坡面为研究对象, 在每条坡面布设取样线. 由于2个坡面的上坡部位坡度一般都大于60°, 且基本上都是陡峭的裸岩和石崖, 因而上坡部位无法采集土壤样品. 沿线从坡中上部至坡脚每隔30 m布设一个¹³⁷Cs样品采集. 在各个采样部位2 m×2 m的样地面积内, 随机选取5个采样点, 用内径10 cm的取样筒垂直打入地面取剖面全样, 取样深度依土层厚度而定, 取出5个样本后进行充分混匀以代表该样地¹³⁷Cs活度水平. 各样地基本情况如表1所示. 另外, 为准确了解¹³⁷Cs在土壤中的深度分布, 在两条坡线的中上部、中部、下部, 以及洼地(耕地)和落水洞(耕地)等典型地貌部位采集分层样. 分层样是在10 cm×20 cm的面积上, 用小铲刀取样. 其中次生林地土壤以3 cm的间隔取样至30 cm深度; 耕地土壤以5 cm的间距取样, 取样的最大深度一般都在50 cm左右. 采集土壤样品的同时, 详细记录各样点的土地利用方式、坡度、坡向、海拔高度、土层厚度和裸岩率(岩石出露率)等环境信息, 其中裸岩率是以AutoCAD软件由2 m×2 m样地照片绘制出岩石出露部分后, 计算得出.

¹³⁷Cs土壤样品经风干、研磨、过筛和称重后送中国科学院成都山地研究所进行¹³⁷Cs活度测试. 测试样品封闭于样品盒中20 d后, 用配备n型高纯锗探头(LOAX HPGe)的低能量、低本底γ能谱仪测定¹³⁷Cs比活度, 样品测重≥250 g, 测试时间≥50 000 s, 测试误差为±5%(95%可信度). 在实验室获得样品的¹³⁷Cs比活度后, 用式(1)、式(2)计算出相应样点的¹³⁷Cs面积活度.

分层样:

$$CPI = \sum_{i=1}^n C_i \times Bdi \times Di \times 10^3 \quad (1)$$

全样:

$$CPI = C_i \times W/S \quad (2)$$

式中, CPI为样地的¹³⁷Cs面积活度(Bq m²); C_i为i采样层的¹³⁷Cs比活度(Bq/kg); Bdi为i采样层的土壤容重(g/cm³); Di为i采样层的深度(mm); i为采样层序号; n为采样层数; W为过筛后的细粒样品重(kg); S为取样点表面积(m²). 本研究背景值选用何永彬等^[16]在距采样区6 km左右的一块地势平坦、无侵蚀沉积发生的旱稻田测定的¹³⁷Cs背景值997.7 Bq/m².

表 1 坡面取样地基本情况
Table 1 General conditions of sample plots on sloping land

样地编号	土地利用方式	恢复-利用年限/a	海拔/m	坡度/(°)	土层厚度/cm	裸岩率/%
B1	次生林	> 50	374.9	15.5	19.6	34.8
B2	次生林	> 50	396.2	31.0	9.6	62.5
B3	次生林	> 50	405.8	47.0	7.1	48.8
B4	次生林	> 50	411.8	47.0	7.7	65.0
B5	次生林	> 50	431.5	40.5	11.8	41.3
B6	次生林	> 50	437.5	54.0	24.5	5.5
B7	次生林	> 50	454.3	53.0	14.6	13.3
B8	次生林	> 50	484.4	49.0	7.8	50.0
B9	次生林	> 50	502.3	52.0	17.8	16.3
B10	次生林	> 50	541.0	54.5	10.6	22.5
E1	耕地	> 50	409.8	0.5	50.0	0.0
E2	耕地	> 50	421.5	28.0	43.4	0.0
E3	耕地	> 50	419.5	34.0	39.0	0.0
E4	耕地	> 50	433.7	24.5	50.0	0.0
E5	耕地	> 50	447.0	24.0	30.8	10.0
E6	耕地	> 50	455.5	39.5	16.3	38.8
E7	耕地	> 50	470.2	43.0	35.5	5.0
E8	耕地	> 50	493.5	24.0	50.0	0.0
E9	耕地	> 50	512.2	41.5	21.1	8.8

2 结果与分析

2.1 ¹³⁷Cs的剖面分布特征

图 1 为喀斯特峰丛洼地主要样点的¹³⁷Cs比活度的深度分布. 一般认为, 在非耕作土壤和未扰动的土壤中,¹³⁷Cs主要分布在土壤剖面的上部, 且主要富集在 0~ 5 cm 之间^[17]. 由图 1 可见, 林草地由于表土层长期未受扰动, 其土层顶部的¹³⁷Cs比活度可达 16.9 Bq/kg, 随着土层的加深, 急剧降至 7.7 Bq/kg, 至 15 cm 处已降至背景水平, 总体表现为随土层深度的增加而逐渐下降. 耕地由于受人为扰动(农耕活动) 的影响,¹³⁷Cs在耕作层内一般表现为典型的均一分布特征^[18]. 本研究中坡耕地¹³⁷Cs也表现出类似的分布特征, 主要分布在 0~ 15 cm 土层内, 15 cm 以下土层基本不含¹³⁷Cs或含很少量的¹³⁷Cs, 表明耕作层深度

大致在 15 cm, 其影响深度可能达到 20 cm. 而图 1 中耕地样点土层厚度> 50 cm, ¹³⁷Cs的垂直分布没有反映出土壤垂直渗漏的特征, 究其原因, 一方面由于喀斯特区域强烈的化学淋溶作用, 风化物中的粘粒发生垂直下移, 土层内部上下层易形成上松(上层质地轻, 孔隙度高, 渗透性强) 下粘(质地粘重, 孔隙度低, 渗透性小) 的一个物理性状不同的界面^[3], 而该样点土层相对较厚, 在耕作条件下, 下层土壤较为紧实; 另一方面, 与石灰岩地质背景条件下, 分层样检测结果难以反映土壤沿土石界面的垂直漏失也有一定关系. 洼地沉积部位的¹³⁷Cs分布与坡地明显不同, ¹³⁷Cs主要分布在 0~ 30 cm 土层, 最大分布深度达到了 45 cm, 大致呈现出随土层深度的增加逐渐下降的趋势. 从落水洞口处的剖面样点结果可以看出¹³⁷Cs在土层中的分布规律不明显, 45 cm 以上的¹³⁷Cs比活度

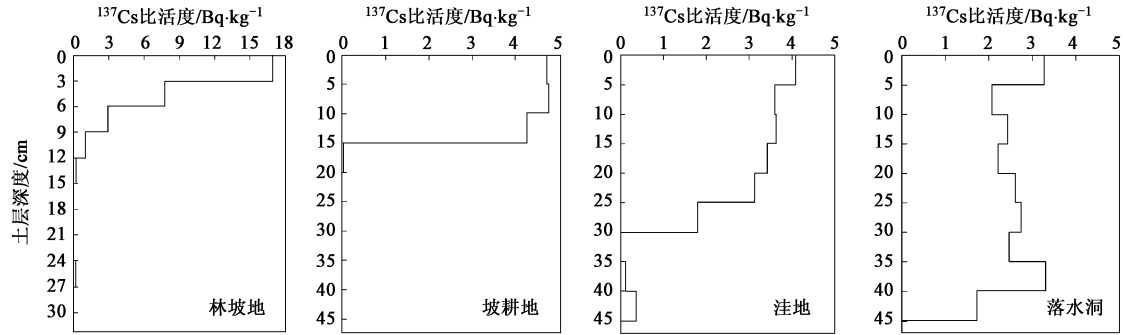


图 1 研究区主要样点的¹³⁷Cs 深度分布

Fig. 1 Depth distribution of ¹³⁷Cs in some sampling sites of karst area

在 1.7~3.3 Bq/kg 之间。另外,¹³⁷Cs 在落水洞口土层中的分布较深,在 45 cm 处的比活度仍有 1.7 Bq/kg。这一方面说明由于喀斯特地区特有的二元水文结构,部分地表松散物沿着峰丛坡面洼地落水洞迁移,进入地下系统,对喀斯特地区土壤丢失影响较大;另一方面说明落水洞是喀斯特区域较为特殊的地貌部位,洞口附近的原生土壤流失严重,现存土壤一般都是由近年来侵蚀物质堆积形成。

2.2 喀斯特坡地裸岩分布对¹³⁷Cs活度的影响

对¹³⁷Cs的分布特征进行研究是因为其在土壤环境中所表现出的特殊化学行为使其可以作为土壤侵蚀示踪剂。在非喀斯特区域,¹³⁷Cs经沉降后的地表空间运移主要由土壤颗粒的迁移、淀积等过程造成,因此¹³⁷Cs分布规律可以作为土壤侵蚀沉积状况的表征^[17]。但是核爆期间沉降到地面的¹³⁷Cs尘埃基本不被裸岩地面吸附^[9],而喀斯特区域裸岩遍布,随降雨在石面的再分布直接流失进入邻近土体的¹³⁷Cs量占¹³⁷Cs沉降量的比例远高于其他地区,因而裸岩率也是影响¹³⁷Cs地表空间运移的一个重要因素。在研究中发现,取自石缝中的 2 个土壤样品中¹³⁷Cs比活度分别为 16.8 和 37.6 Bq/kg,远远高于样地¹³⁷Cs比活度,一定程度上证实了裸岩对邻近土体¹³⁷Cs含量的影响。因此,将¹³⁷Cs作为喀斯特区域的土壤侵蚀示踪剂就应该考虑裸岩对土壤¹³⁷Cs含量的影响。在本研究中计算各样地¹³⁷Cs面积活度时,用样地 2 m × 2 m 范围内的裸岩率数据对¹³⁷Cs面积活度进行了校正,校正公式如式(3):

$$CCPI = \frac{CPI \times SA}{TA} = CPI \times (1 - BRR) \quad (3)$$

式中,CCPI 为校正后样地的¹³⁷Cs面积活度(Bq/m²); SA 为样地内的土面面积(m²); TA 为样地总面积(m²); BRR 为样地裸岩率。

非喀斯特区域的相关研究表明,土壤侵蚀是造成土壤中有机碳迁移、流失的主要原因,土壤有机碳与¹³⁷Cs的地球化学行为关系密切,两者之间存在显著的正相关关系^[20,21]。本研究将裸岩遍布的次生林地坡面各样地直接测定的¹³⁷Cs面积活度和校正后的¹³⁷Cs面积活度分别与土壤有机碳含量进行相关分析后发现,直接测定的¹³⁷Cs与土壤有机碳含量没有显著的相关性($r = 0.587$, $n = 10$),而校正后的¹³⁷Cs面积活度与土壤有机碳呈显著正相关($r^{**} = 0.734$, $n = 10$),在一定程度表明本研究中采用的校正方法能有效降低裸岩对¹³⁷Cs含量的影响,使¹³⁷Cs分布更好地反映土壤侵蚀沉积特征。

2.3 喀斯特次生林坡面土壤¹³⁷Cs分布特征及影响因素分析

次生林地坡面地形陡峭,岩石裸露率相当高,土层不连续且土深大多只有 10~20 cm。由图 2 可以看出,随着海拔高度的上升和水平距离的延伸,次生林地坡面¹³⁷Cs面积活度表现出波动振荡上升的趋势,经回归分析表明,次生林地¹³⁷Cs面积活度和海拔高度呈显著正相关,其函数关系式为:

$$y = 5.88x - 1819.3 \quad (r^{**} = 0.618, n = 10)$$

式中, x 为海拔高度(m), y 为¹³⁷Cs的面积浓度(Bq/m²)。该结果与非喀斯特区域的大多数研究不同^[7,22],一定程度上说明在没有人干扰情况下,次生林地坡面垂直方向的水分运移强烈,地表径流过程不明显,甚至可能在坡的中上部发生堆积,而在坡脚发生侵蚀。由图 2 可以看出,当海拔在 500 m 和 540 m 时,样地¹³⁷Cs面积活度远高于背景值 997.7 Bq/m²,呈现出¹³⁷Cs沉积现象,究其原因,可能主要有以下 3 个方面。

首先是受表层岩溶带对降水调蓄能力的影响,在裸岩普遍分布的地段,大气降雨首先补给表层岩溶带,通过裂隙渗流补给深层饱水带,进而进入地下河系统,只有当降水超过表层岩溶带的调蓄能力时,才形成地表坡面径流^[23]。而坡面中上部多为表层岩溶带局部微型地下水域的补给区,表层岩溶带发育较为强烈,一般降雨条件下坡面径流少有发生,土壤多随降雨通过岩溶裂隙渗漏,然而由于喀斯特次生林根系的穿窜能力极强,根系尽可能地占据岩石裂隙,一定程度上阻止了土壤渗漏的发生,产生土壤沉积。其次是由于在峰丛洼地,坡顶到坡上部多为基岩普遍出露区,地形陡峭,石崖等地貌形态发育,而坡中上部化学溶蚀作用强烈,容易形成封闭或开放性不强的石坑、石沟、石槽等微地貌形态,有土壤沉积现象发生;再者是受裸岩的影响,由于坡中上部石堆、石丛广泛分布,本研究虽然运用 2 m × 2 m 范围内的裸岩率数据对¹³⁷Cs面积活度进行了校正,较大程度上降低了裸岩分布对结果的影响,但 2 m × 2 m 样地范围内的裸岩率并不能完全代表影响样地¹³⁷Cs含量的裸岩,比如海拔高度 500 m 处的样地,紧靠该样地上方就分布着高 5 m 左右的大型石堆,其分布对样地¹³⁷Cs含量肯定存在一定影响,然而对其影响进行合理量化的科学方法还有待于进一步探索。而海拔 350 m 左右的下坡部位,¹³⁷Cs面积活度为 299.4 Bq/m²,仅为背景值的 30%,土壤侵蚀强烈。这主要是由于坡下部表层岩溶带发育程度较低,多为

表层岩溶带地下水的排泄区^[24],土壤多随降水直接冲入洼地,土壤侵蚀状况严重.

另外,需要注意的是,由于该次生林坡面石灰岩差异风化形成的微地形变化显著,大部分被侵蚀的土粒经短距离位移,在低洼部位堆积,土壤层的空间斑块分布与土壤的资源岛特性非常明显,土壤多留存于石沟、缝、槽中,空间变异较大.因而单个样地的¹³⁷Cs结果可能难以反映该坡段土壤侵蚀沉积的总体情况.野外调查中也发现,虽然样地¹³⁷Cs含量很高,有土壤沉积发生,但周围坡段石堆、石丛广布,表现出一定的潜在石漠化现象.

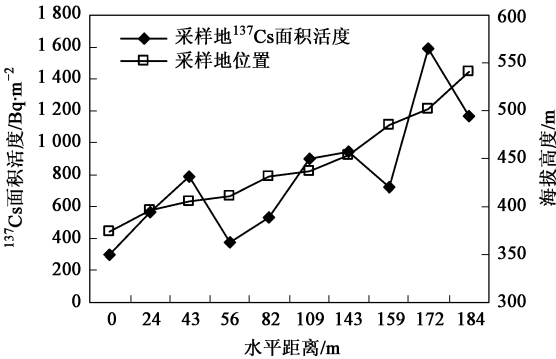


图 2 次生林坡面采样地位置及样地¹³⁷Cs 面积活度

Fig.2 Sample plot on forest sloping land and its ¹³⁷Cs area activity

坡度是对坡面土壤侵蚀影响最大的地形因素.非喀斯特区域相关研究表明,在一定坡度范围内,随坡度上升,土壤侵蚀加剧,当坡度超过某一点时,土壤侵蚀反而随坡度的上升而下降^[25,26].对古周峰丛洼地¹³⁷Cs面积活度和坡度的相关性研究表明,次生林地土壤剖面中¹³⁷Cs含量随着坡度增大而增大(图3),两者呈显著正相关:

$$y = 174.62e^{0.0315x} \quad (r^* = 0.7691, n = 10)$$

式中, x 为坡度($^{\circ}$), y 为¹³⁷Cs的面积活度(Bq/m^2).从

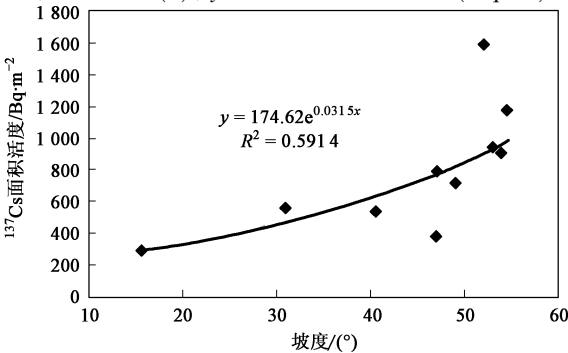


图 3 次生林地¹³⁷Cs 面积活度与坡度的关系

Fig.3 Relationship of ¹³⁷Cs area activity to slope gradient on forest land

坡面汇水过程引起土壤侵蚀的角度上考虑,¹³⁷Cs面积活度和坡度成正相关的原因可能是次生林地坡面坡度较陡,许多坡段的坡度都在 40° 以上,高于大多数研究得出的坡度临界值,水流的冲蚀能力及水流输运泥沙的速度有所下降.然而,该次生林坡面的沿坡汇水过程不十分明显,¹³⁷Cs面积活度和坡度呈正相关的主要原因还是在于陡坡地段石堆、石丛分布广泛,土壤多留存在一些封闭或开放性不强的石坑、石沟、石槽等负地形生境中,¹³⁷Cs富集.

2.4 喀斯特农耕地坡面土壤¹³⁷Cs分布特征及影响因素分析

由农耕地坡面采样地位置及各样地¹³⁷Cs面积活度研究结果(图4)可以看出,随着海拔高度的上升和水平距离的延伸,农耕地坡面¹³⁷Cs面积活度表现出先有所升高后呈波动振荡下降的趋势,经回归分析表明,农耕地¹³⁷Cs面积活度和海拔高度呈显著负相关,其函数关系式为:

$$y = 4423.03 - 8.23x \quad (r^* = 0.482, n = 10)$$

式中, x 为海拔高度(m), y 为¹³⁷Cs的面积浓度(Bq/m^2).对农耕地坡面¹³⁷Cs面积活度和坡度的相关性研究表明(图5),两者具有一定的反相关关系:

$$y = -7.41x + 992.04 \quad (r = 0.2337, n = 9)$$

式中, x 为坡度($^{\circ}$), y 为¹³⁷Cs的面积活度(Bq/m^2).总体而言,农耕地坡面的¹³⁷Cs分布特征与次生林地坡面明显不同,这可能是由于农耕地坡面坡形较缓,岩石裸露率相对较低,土层较厚,雨水降落到地面后,坡面汇水过程趋于明显,有明显的坡面径流发生;另外,耕作条件下,翻耕、踩踏等人为作用也容易导致土壤发生沿坡迁移,因此农耕地坡面¹³⁷Cs分布表现出与非喀斯特区域较为相似的特征^[7,21].

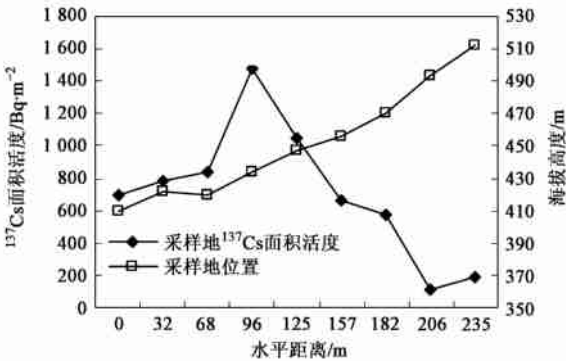


图 4 耕地坡面采样地位置及样地¹³⁷Cs 面积活度

Fig.4 Sample plot on cultivated sloping land and its ¹³⁷Cs area

由图4也可以看出,当海拔在500m左右时,¹³⁷Cs面积活度为 $115.8 Bq/m^2$,仅相当于背景值的

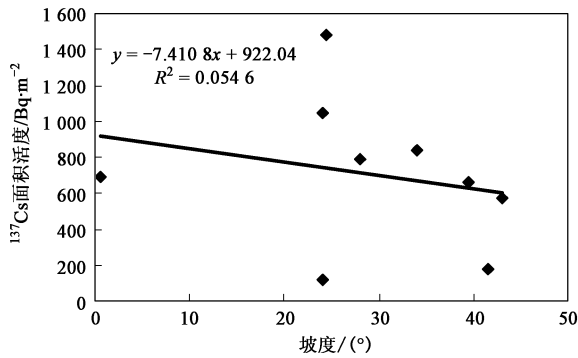


图5 农耕地¹³⁷Cs面积活度与坡度的关系

Fig.5 Relationship of ¹³⁷Cs area activity to slope gradient on cultivated land

11.6%, 有明显的土壤侵蚀发生. 而在坡中部, 海拔430 m左右, ¹³⁷Cs面积活度为1478.6 Bq/m², 有明显的土壤沉积发生. 分析原因, 可能主要是由于坡形变化, 海拔高于450 m的几个样点坡度较陡, 基本上都在40°左右, 而海拔440 m和430 m之间的坡段, 坡度仅为24°, 因此从高海拔坡面冲刷而来的土壤在坡形凹处沉积, 使得坡中部位¹³⁷Cs面积活度较高. 另外, 在喀斯特石灰岩地质背景下, 土壤在重力和水的作用下沿岩石裂隙的垂直漏失问题也在一定程度上存在, 然而, 其对农耕地坡面¹³⁷Cs空间分布的影响程度还有待于进一步研究.

3 讨论

张素红等^[12]在对粤北石漠化地区的¹³⁷Cs分布特征进行研究发现, 土壤中的¹³⁷Cs水平随石漠化程度的增加有先降低后升高的趋势, 进而得出重度石漠化阶段土壤活动由侵蚀转为沉积的推论. 本研究在一定程度上也发现了类似的现象, 但是认为造成该现象的主要原因是裸岩分布对临近土体¹³⁷Cs含量的富集作用, 而不仅仅是土壤侵蚀和沉积, 文中石缝土壤样品的¹³⁷Cs测定结果也证实了这种推论. 另外, 本研究虽然运用了裸岩率数据对¹³⁷Cs含量进行了初步校正, 但是应该在多大尺度上对影响样地¹³⁷Cs分布的裸岩进行量化, 裸岩对¹³⁷Cs分布的影响局限于土石交界面还是整个土体? 这些问题还有待于进一步研究. 因此, 可以初步认为¹³⁷Cs方法不适用于喀斯特区域土壤侵蚀定量估算, 暂时只能通过对¹³⁷Cs空间分布规律的认识来定性分析喀斯特土壤侵蚀沉积状况.

喀斯特区域的“土壤丢失”现象已经被国内外众多研究者揭示^[27,28], 2007年张信宝等^[29]进一步提出喀斯特区域土壤存在地下漏失的理论, 认为由于喀

斯特地下水溶蚀形成的孔洞和孔隙, 被上覆土壤通过蠕滑和错落等重力侵蚀方式充填, 造成坡地地面溶沟、溶槽、洼地和岩石缝隙内的土壤沉陷, 这一过程称为土壤地下漏失. 本研究得出的¹³⁷Cs空间分布规律可能在一定程度上受到土壤地下漏失的影响, 然而土壤垂直漏失对坡面¹³⁷Cs空间分布的影响程度还有待于进一步研究.

4 结论

(1) 喀斯特区域林地土壤剖面¹³⁷Cs呈现指数分布模式, 耕地剖面的¹³⁷Cs呈均匀分布模式; 洼地¹³⁷Cs分布深度明显大于坡地, 有土壤沉积发生; 落水洞洞口土层中¹³⁷Cs垂直分布规律不明显, 较深土层中的¹³⁷Cs比活度仍比较高, 说明落水洞口现存土壤多由峰丛洼地内侵蚀物质堆积形成.

(2) 由于喀斯特区域裸岩遍布, 裸岩是影响¹³⁷Cs地表空间运移的一个重要因素, 不能不考虑裸岩影响, 直接将测定的¹³⁷Cs活度转化为土壤侵蚀、沉积量. 研究用各样地2 m×2 m范围内的裸岩率数据对¹³⁷Cs面积活度进行了校正, 一定程度降低了裸岩的影响, 使¹³⁷Cs含量更好的反映喀斯特区域土壤侵蚀沉积特征.

(3) 随坡面海拔的升高, 喀斯特坡地¹³⁷Cs面积活度表现出波动振荡变化趋势, 林地和农耕地坡面¹³⁷Cs面积活度变幅分别为299.4~1592.6 Bq/m²和115.8~1478.6 Bq/m², 坡面上有不同程度土壤沉积现象发生. 由于地形、微地貌形态及人为干扰强度的不同引起坡面水分及土壤运移主导方向的差异, 喀斯特林地和农耕地坡面的¹³⁷Cs分布规律明显不同, 其中林地坡面¹³⁷Cs面积活度与坡度和海拔高度均呈显著正相关, 农耕地坡面¹³⁷Cs面积活度与坡度和海拔高度均呈负相关.

参考文献:

- [1] 苏维词. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性及其生态整治[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 547-551.
- [2] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 喀斯特峡谷区常见植物叶片δ¹³C值与环境因子的关系研究[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2885-2893.
- [3] 李阳兵, 邵景安, 王世杰, 等. 岩溶生态系统脆弱性研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 1-9.
- [4] 侯建才, 李占斌, 李勉. 紫色丘陵区小流域土壤侵蚀产沙空间分布的¹³⁷Cs法初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 46-50.
- [5] Theodoropoulos S P, Florou H, Walling D E, et al. Soil erosion and deposition rates in a cultivated catchment area in central Greece.

- estimated using the ^{137}Cs technique [J]. *Soil Tillage Research*, 2003, **69**: 153-162.
- [6] 文安邦, 张信宝. 长江上游 ^{137}Cs 法土壤侵蚀量研究[J]. *水土保持学报*, 2002, **16**(6): 1-3.
- [7] 马琨, 马远远, 马斌, 等. 宁南黄土高原土壤 ^{137}Cs 分布与相关影响因子研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(1): 52-59.
- [8] 严平, 董光荣. 青海共和盆地降尘观测与 ^{137}Cs 法定定的初步结果[J]. *环境科学*, 2001, **22**(2): 64-68.
- [9] 赵烨, 岳建华, 徐翠华, 等. ^{137}Cs 示踪技术在滦河源区栗钙土风蚀速率估算中的应用[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(4): 562-566.
- [10] 白占国, 万曦. 岩溶山区表土中 ^7Be 、 ^{137}Cs 、 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 的地球化学相分配及其侵蚀示踪意义[J]. *环境科学学报*, 1997, **17**(4): 407-411.
- [11] 万国江, 白占国, 刘东生, 等. ^{137}Cs 在滇西与黔中地区散落的差异——青藏隆起对滇西地区全球性扩散大气污染物散落屏蔽效应的推断[J]. *第四纪研究*, 2001, **21**(5): 407-415.
- [12] 张素红, 李森, 严平, 等. 粤北石漠化地区 ^{137}Cs 分布特征与背景值研究[J]. *水土保持研究*, 2007, **14**(6): 370-373.
- [13] 傅瓦利, 张治伟, 张洪, 等. 岩溶区坡面土壤侵蚀特征研究[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(5): 38-41.
- [14] 张治伟, 傅瓦利, 张洪, 等. 岩溶坡地土壤侵蚀强度的 ^{137}Cs 法研究[J]. *山地学报*, 2007, **25**(3): 302-308.
- [15] 岳跃民, 王克林, 张伟, 等. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤-环境关系研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1400-1405.
- [16] 李豪, 张信宝, 王克林, 等. 桂西北倒石碛型岩溶坡地土壤的 ^{137}Cs 分布特点[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(3): 42-47.
- [17] 李仁英, 杨浩, 唐翔宇. 土壤中 ^{137}Cs 的化学性质及其分布规律[J]. *核农学报*, 2001, **15**(6): 371-379.
- [18] 金平华, 濮励杰, 王金磊, 等. ^{137}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[J]. *自然资源学报*, 2004, **19**(1): 47-54.
- [19] 张信宝. 有关湖泊沉积 ^{137}Cs 深度分布资料解译的探讨[J]. *山地学报*, 2005, **23**(3): 294-299.
- [20] 张燕, 彭补拙, 高翔, 等. 侵蚀引起的苏南坡地土壤退化[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(1): 113-117.
- [21] Ritchie J C, McCarty G W, Venteris E R, *et al.* Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape[J]. *Geomorphology*, 2007, **89**: 163-171.
- [22] 葛方龙, 张建辉, 苏正安, 等. 坡耕地紫色土养分空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. *生态学报*, 2007, **27**(2): 459-464.
- [23] 胡进武, 王增银, 周炼, 等. 岩溶水锶元素水文地球化学特征[J]. *中国岩溶*, 2004, **23**(1): 37-42.
- [24] 劳文科, 蒋忠诚, 时坚, 等. 洛塔表层岩溶带水文地质特征及其水文地质结构类型[J]. *中国岩溶*, 2003, **22**(4): 258-266.
- [25] 靳长兴. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J]. *地理学报*, 1995, **50**(3): 234-239.
- [26] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. *Geological Society America Bulletin*, 1945, **56**(3): 275-370.
- [27] 崔之久, 李德文, 冯金良, 等. 覆盖型岩溶、风化壳与岩溶(双层)夷平面[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, **31**(6): 510-519.
- [28] Bell M, Limbrey S. Archaeological aspects of woodland ecology[J]. *BAR International Series*, 1982, **29**(5): 115-127.
- [29] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. *地球与环境*, 2007, **35**(3): 202-206.