# 利用$^{137}$Cs 示踪和孢粉分析法对喀斯特峰丛草地洼地泥沙沉积及侵蚀环境的研究

何永彬[1]，张信宝[2]，贺秀斌[2]

(1. 云南大学 云南省地理研究所，云南 昆明 650223；
2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所，四川 成都 610041)

**摘　要**：在贵州省茂兰喀斯特峰丛草地洼地联合运用$^{137}$Cs 示踪和孢粉分析的方法，对洼地沉积泥沙剖面进行了研究。草地洼地泥沙剖面的$^{137}$Cs 垂直分布显示了泥沙沉积特征，以地层孢粉为主的孢粉组成显示了洼底泥沙主要来源于由碳酸盐岩石风化成土后随水流侵蚀搬运的坡地土壤颗粒。从沉积泥沙剖面的$^{137}$Cs 含量、土壤颗粒结构、孢粉总浓度的垂直变化说明洼地土壤侵蚀经历了一个相对的轻微侵蚀—剧烈侵蚀—侵蚀显著减缓的变化过程；沉积泥沙剖面样品中的现代孢粉组成出现从蕨类、草本、乔木(松)孢粉占优势到以适应喀斯特石生环境的蕨类孢粉和草本孢粉占优势的变化，指示了洼地环境植被出现从含稀疏常绿落叶松的草丛退化为草丛的变化。喀斯特峰丛草地洼地的泥沙沉积过程与洼地植被演变和洼地侵蚀环境变化具有密切联系。

**关键词**：泥沙沉积；$^{137}$Cs；孢粉分析；土壤侵蚀环境；喀斯特峰丛草地洼地

**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-288X(2013)01-0246-05　　**中图分类号**：P515.2，Q914.2

# Sediment Deposition and Erosion Environment in a Karst Peak-Cluster Grassland Depression Studied by $^{137}$Cs Tracing Technology and Pollen Analysis

HE Yong-bin[1], ZHANG Xin-bao[2], HE Xiu-bin[2]

(1. *Yunnan University, Yunnan Institute of Geography, Kunming, Yunnan* 650223, *China*;
2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*)

**Abstract**: $^{137}$Cs tracing technology and pollen analysis were jointly used to study sediment profile in a karst peak-cluster grassland depression in Maolan, Guizhou Province. Vertical variations of $^{137}$Cs, soil particle structure and pollen composition in the profile showed that soil erosion in the grassland depression occurred in a relatively varied process from slight erosion to intensive erosion and then to rapidly decreased erosion. Those modern pollen of deposited sediment samples in the profile showed that the plant constitution dominated by fern seed, herb seed and tree seed changed to that dominated by fern seed and herb seed which adapted to the karst rocky habitation. This means that herbosa including sparse *Pinus* plants degraded to herbosa in the depression. Sediment deposition process is closely associated with plant regression and erosion environment change in the karst peak-cluster grassland depression.

**Keywords**: **sediment deposition; $^{137}$Cs; pollen analysis; soil erosion environment; karst peak-cluster grassland depression**

伴随着流域土壤侵蚀等地表生物地球化学过程和环境的发展演变，作为“汇”的河岸带、湿地、湖泊、水库、塘坝及其他有沉积发生地点的沉积泥沙，按连续的年代顺序保留了花粉孢粉颗粒、化学污染物、放射性同位素等环境变化指示剂[1]。运用孢粉、放射性同位素等示踪技术，从湖泊塘库沉积物中获得泥沙沉积纪年、环境变化、植被特征、土壤侵蚀状况等信息成为一个重要的地学研究方法[2]。

西南喀斯特山地的正向地貌以峰丘为主，负向地貌多为谷洼地，碳酸盐岩风化残余的酸不溶物或地层中非可溶性岩层风化残坡积物在重力和水的作用下，从高处向低处进行着微距离或短距离的迁移，并且在地表喀斯特的溶蚀裂隙、管穴等凹陷部位聚集形成分散的“楔状”或“囊状”土壤层，导致了喀斯特山地土壤

收稿日期：2012-02-07　　修回日期：2012-04-18
资助项目：国家重点基础研究发展计划课题“西南喀斯特山地土壤侵蚀过程与水土流失危险度评价”(2006CB403203)；国家自然科学基金项目“滇东高原喀斯特环境石芽因素对土壤侵蚀相关作用的研究”(40861016)；云南省应用基础研究重点项目“云南高原干旱河谷植被成因与河谷的资源环境效应”(2009CC003)
作者简介：何永彬(1967—)，男(汉族)，云南省宣威市人，博士，副研究员，主要研究方向为区域资源与环境。E-mail：heybware@sohu.com。

分布极不均匀、土层厚度悬殊和土被不连续发育等特点[3-4]。其中,坡地—洼地系统是重要的侵蚀—堆积场所,并且土壤侵蚀具有明显的季节性特征。峰丛洼地小流域在雨季降雨后出现坡面径流产沙,并且径流冲携泥沙在洼地底部沉降堆积,同时存在泥沙经过洼地的地下裂隙、管道和落水洞等途径的地下流失情况[5]。一般来说,在分布原始森林植被的森林洼地,乔木与灌木林对于减缓喀斯特坡地地表径流流量和冲刷力、固定土壤具有显著作用,土壤颗粒只是出现微距位移,土壤地表流失速率极低。但是在森林植被受到破坏的情况下,在洼地周边坡地会出现明显的土壤侵蚀,并且在底部产生泥沙堆积。

茂兰自然保护区是以世界上仅存的原生成片的中亚热带喀斯特常绿落叶阔叶混交林为保护主体的国家级自然保护区,位于贵州省南部荔波县,东南面与广西环江县毗邻,是黔中高原向桂西北低山丘陵的过渡地带,地理位置为东经 107°52′10″—108°05′40″,北纬 25°09′20″—25°20′50″。属于江南台隆西南部的三都—茂兰古褶皱断束中的轴缘凹陷地带,构造形态是近南北向的背斜宽、向斜窄的隔槽式中褶皱,由南北方向纵贯自然保护区的茂兰向斜是控制本地区的一级构造,区内地质构造以褶皱为主,断层次之。第四纪以来地形持续上升,喀斯特过程剧烈发育,形成了由峰丛洼地、峰丛漏斗和峰丛槽谷所组成的典型裸露锥状喀斯特[6]。茂兰自然保护区的年平均气温 15.3 ℃,年平均降水量 1 753 mm,属于中亚热带季风湿润气候。保护区面积 212.85 km$^2$,森林面积 200 km$^2$,森林覆盖率在 94%左右[7]。自然保护区内,森林植被保存很好,但保护区周边草坡地也很常见。草坡为当地农民的牧场,烧山现象比较普遍。据调查,保护区周边地区的草坡多为抗战时期、解放后"大跃进"期间和 20 世纪 80 年代扩大开荒时期中森林植被砍伐后形成。联合运用$^{137}$Cs 和孢粉方法对草地洼地泥沙沉积状况及侵蚀环境变化的分析研究,对于阐明茂兰自然保护区森林植被保护土壤、防止水土流失的作用具有重要的科学价值。本文是茂兰喀斯特典型侵蚀草地洼地的泥沙沉积状况与侵蚀环境变化的研究结果。

# 1　研究区概况与研究方法

## 1.1　采样地概况

茂兰草地洼地位于茂兰自然保护区的外围,地质构造属于形成荔波地堑构造的东侧正断层上发育的次级冲断层,断层走向是北西西方向,断层倾角 50°以上。断层带内挤压破碎现象明显,主要出露石炭纪中统上部的灰白色厚层石灰岩夹少量白云岩和燧石灰岩,以及下部的白色粗粒白云岩,厚度 182～710 m。由于邻近樟江排水基面、地下水埋深大,喀斯特作用以强烈的垂向溶蚀为主,在断裂构造线基础上受后期溶蚀作用形成了峰丛洼地地貌,并发育有竖井、落水洞。流域面积为 0.154 km$^2$,洼地底部海拔为 560～540 m,洼地四周陡坡山峰海拔为 880～920 m。洼地周边坡地的土壤类型是黄壤,土层浅薄,土壤数量少而且分散,岩石裸露多,以草本为主的植被覆盖率＜10%,已开垦的坡地在 1990 年以后实行退耕。草地洼地的洼底曾经开辟为耕地,但是存在季节内涝的洼地底部不能作为固定耕地开垦,所以洼地底部属于非农耕地。在坡面径流的冲刷作用下,坡地土壤沿冲沟和坡面被搬运至冲沟口、坡脚和洼地底部堆积,洼底周围的坡脚分布有冲积扇。洼底的堆积土层深厚且连续,土壤含石率为 10%～20%。

## 1.2　研究方法

在已经开展的喀斯特草地洼地侵蚀泥沙的采样基础上,在草地洼地的采样剖面中选择位于洼地底部的低凹平坦位置,2 cm 分层的剖面为典型代表剖面,综合运用示踪与孢粉分析的方法,对沉积泥沙和侵蚀环境的特征进行相互比照和验证。

所选取的典型代表性沉积泥沙分层剖面的采样方法为:在洼地底部挖掘立坑获得了 60 cm 深度的沉积泥沙剖面,以每 2 cm 分层在垂直泥沙剖面上用刮刀铲土分层取样,共获得 30 个土壤样品。土壤样品取出后装入样品袋。采集的样品在中科院成都山地灾害与环境研究所进行预处理。样品经风干、研磨、过筛和称重后送四川大学物理系测试。土壤样品中的$^{137}$Cs 含量测定在实验室将进行,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$^{137}$Cs 含量,样品测重≥250 g,测试时间≥50 000 s,测试误差为±5%(95%可信度),样品的$^{137}$Cs 含量根据 662 KeV 谱峰面积求算。

泥沙样品的颗粒分析在中科院成都山地灾害与环境研究所理化实验室进行分析。土壤样品中的孢粉分析在地质科学院水文地质研究所孢粉实验室进行,分析的孢粉样品剖面深度分别为 0—2,6—8,12—14,18—20,24—26,30—32,38—40,44—46,50—52,58—60 cm。

# 2　结果与分析

## 2.1　泥沙剖面$^{137}$Cs 含量深度分布

茂兰草地洼地土壤剖面$^{137}$Cs 含量深度分布见图 1a。

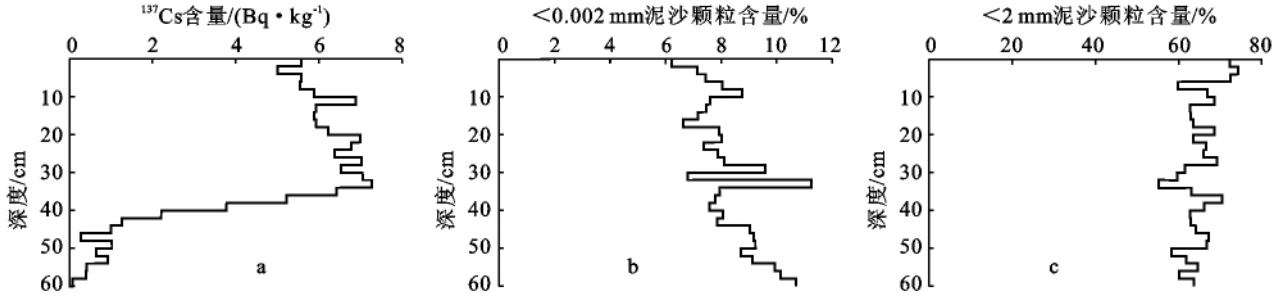



**图 1 茂兰草地洼地泥沙剖面$^{137}$Cs 含量和泥沙颗粒结构的深度分布**

茂兰草地洼地泥沙剖面是典型堆积土壤剖面。土壤剖面中高浓度$^{137}$Cs(>4 Bq/kg)的分布深度范围是 0—38 cm。表层$^{137}$Cs 浓度 5.28 Bq/kg,$^{137}$Cs 峰值浓度出现在 32—34 cm,$^{137}$Cs 峰值浓度 7.28 Bq/kg。剖面表层至$^{137}$Cs 峰值深度的范围内$^{137}$Cs 浓度变化是逐步增加的。自 34—48 cm,$^{137}$Cs 浓度呈指数急剧下降,由 6.62±0.87 Bq/kg 减少到 0.25±0.05 Bq/kg,平均下降速率为 0.455 Bq/(kg·cm)。自 48—60 cm,$^{137}$Cs浓度随深度增加而逐步平缓下降至微量。

按照全球$^{137}$Cs 沉降峰值年是在 1963 年的规律,推定沉积泥沙剖面中 32—34 cm 的峰值代表 1963 年的泥沙沉积。同时自 1963 年后,$^{137}$Cs 浓度以小幅度减少的特征说明洼地泥沙堆积保持着一个相对平稳的速率。另外,在相当于犁耕层的深度的 20—22 cm 处有一个 7.00±0.73 Bq/kg 的峰值,这对应在当地调查了解到的 20 世纪 80 年代的坡耕地开垦快速增长,致使水土流失增加的时期。

根据已经开展茂兰喀斯特峰丛草地洼地土壤侵蚀$^{137}$Cs 示踪研究的结果[8],沉积泥沙剖面中 1963 年以来的泥沙堆积厚度是 18 cm,推算 1963 年以来的草地洼地泥沙沉积的堆积速率为 16.6 t/(km·a)[8];根据沉积泥沙剖面$^{137}$Cs 分布形态的特征,推算自 1970 年以来起算,草地洼地小流域表土自然侵蚀速率是 0.005 cm/a,按土壤容重为 0.919 g/cm$^3$,茂兰草地洼地地表土自然侵蚀速率为 45.95 t/(km·a)[8]。

### 2.2 泥沙颗粒组成结构的深度分布

茂兰草地洼地沉积泥沙剖面中<0.002 mm 泥沙颗粒含量的深度分布见图 1b。<0.002 mm 泥沙颗粒含量峰值以上变化与$^{137}$Cs 峰值浓度以上的变化的趋势一致,并且出现峰值的深度都在 32～34 cm。说明$^{137}$Cs 主要吸附于<0.002 mm 的细颗粒,坡面土壤颗粒在坡面径流冲携作用或重力作用下在低洼地带沉积。

茂兰草地洼地沉积泥沙剖面中<2 mm 颗粒含量比例见图 1c。<2 mm 颗粒含量随深度增加出现小幅波动变化趋势,反映了降雨年际变化的波动性。而且<2 mm 泥沙颗粒含量变化在 55.25%～74.25%,反映了在喀斯特峰丛洼地区,降雨季节的地表径流汇水受到地下水顶托而导致落水洞排水不畅和洼地底部的季节内涝,径流冲携的泥沙颗粒经过了充分混合分选后沉积的特征。

### 2.3 泥沙剖面的孢粉组成结构

2.3.1 泥沙垂直剖面的孢粉分布 茂兰草地洼地泥沙剖面中孢粉颗粒数随着深度变化出现波动变化[9]。根据表 1 中草地洼地泥沙剖面的孢粉组成情况分析,不同深度的 10 个泥沙样品的总孢粉颗粒数与总孢粉浓度,和 10 个泥沙样品的地层孢粉颗粒数与地层孢粉浓度呈现接近于相等,而且,草地洼地土壤剖面 10 个样品中地层孢粉颗粒数在 96.1%～99%;10 个泥沙样品的现代孢粉的颗粒数和浓度值极低,10 个泥沙样品的再沉积孢粉的颗粒数与浓度基本上为 0。以地层孢粉为主的孢粉组成结构说明草地洼地内的土壤成土物源是碳酸盐岩风化物,泥沙剖面中的沉积孢粉主要来源于草地洼地流域内部的土壤搬运输移过程。

在茂兰草地洼地土壤剖面中,18—20 cm 层位的孢粉浓度最高,为 105 704 粒/g;0—2 cm 层位的孢粉浓度次高,为 3 183 粒/g;最少为 38—40 cm 层位,孢粉浓度为 1 260.55 粒/g。孢粉总浓度、地层孢粉浓度和现代孢粉总浓度,以及总孢粉数和地层孢粉颗粒数的峰值都出现在 20 cm,说明土壤剖面中的原犁耕层深度是 0—20 cm,并且受犁耕扰动混合及犁耕翻土的影响,在犁耕层底部积累了较多的孢粉。

2.3.2 现代孢粉组成 茂兰草地洼地泥沙剖面中现代孢粉特征见表 2。10 个泥沙样品中的现代孢粉浓度都较小,一般在 5～500 粒/g,但包含着草地洼地侵蚀环境变化的有关信息。现代孢粉结构以孢子居首位,其次是草本花粉,而乔木花粉极少。其中,蕨类植物中以铁线蕨、蹄盖蕨、单缝孢为主;草本以蒿科、藜科、葎草、莎草科为主;乔木孢粉偶见松科。根据茂兰地区不同海拔第四纪剖面的孢粉研究文献的分析,在森林形成之前的气候温暖,具有热带、亚热带的性

质[10]。而植物区系分析表明热带性的植物占优势[7],更新世时仍以蕨类植物生长为主,现今常绿落叶阔叶林植被可能为晚更新世以来形成[7]。结合对不同深度的泥沙样品中现代孢粉组成变化的分析,推测茂兰草地洼地环境植被出现从含稀疏常绿落叶松树的常绿草丛退化为常绿草丛的变化。而且根据实地调查和$^{137}$Cs 的时间量程等综合分析,植被退化原因主要是受到人为砍伐和放牧的影响。

**表 1　茂兰草地洼地土壤剖面孢粉组成及其垂直分布特征**

| 样品号及分布深度/cm | | $B_1$ | $B_4$ | $B_7$ | $B_{10}$ | $B_{13}$ | $B_{16}$ | $B_{20}$ | $B_{23}$ | $B_{26}$ | $B_{30}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0—2 | 6—8 | 12—14 | 18—20 | 24—26 | 30—32 | 38—40 | 44—46 | 50—52 | 58—60 |
| 孢粉总数 | 孢粉总数 | 600 | 708 | 672 | 633 | 801 | 511 | 660 | 514 | 550 | 618 |
| | 地层孢粉总数 | 585 | 696 | 651 | 627 | 783 | 495 | 651 | 494 | 540 | 606 |
| | 现代孢粉总数 | 15 | 12 | 21 | 6 | 18 | 13 | 9 | 20 | 10 | 12 |
| | 再沉积孢粉总数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 孢粉浓度/(粒·g$^{-1}$) | 孢粉总浓度 | 3 183 | 2 677 | 2 010 | 105 704 | 2 497 | 2 342 | 1 260 | 1 762 | 2 039 | 1 368 |
| | 地层孢粉总浓度 | 3 103 | 2 632 | 1 947 | 104 702 | 2 441 | 2 269 | 1 243 | 1 693 | 2 002 | 1 341 |
| | 现代孢粉总浓度 | 79 | 45 | 62 | 1001 | 56 | 59 | 17 | 68 | 37 | 26 |
| | 再沉积孢粉总浓度 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**表 2　茂兰草地洼地土壤剖面现代孢粉组成及其垂直分布特征**

| 样品号及分布深度/cm | | $B_1$ | $B_4$ | $B_7$ | $B_{10}$ | $B_{13}$ | $B_{16}$ | $B_{20}$ | $B_{23}$ | $B_{26}$ | $B_{30}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0—2 | 6—8 | 12—14 | 18—20 | 24—26 | 30—32 | 38—40 | 44—46 | 50—52 | 58—60 |
| 孢粉浓度/(粒·g$^{-1}$) | 现代乔木植物花粉浓度 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 |
| | 现代灌木植物花粉浓度 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 现代草本植物花粉浓度 | 79 | 22 | 8 | 500 | 9 | 0 | 11 | 34 | 0 | 13 |
| | 现代蕨类植物孢粉浓度 | 0 | 22 | 53 | 500 | 46 | 59 | 5 | 20 | 37 | 13 |
| 植物孢粉含量/% | 现代乔木植物花粉含量 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 |
| | 现代灌木植物花粉含量 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 现代草本植物花粉含量 | 100 | 50 | 14 | 50 | 16 | 0 | 66 | 50 | 0 | 50 |
| | 现代蕨类植物孢粉含量 | 0 | 50 | 85 | 50 | 83 | 100 | 33 | 30 | 100 | 50 |
| 主要现代植被花粉浓度/(粒·g$^{-1}$) | 松(*Pinus*) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 |
| | 蒿(*Artemisia*) | 31 | 11 | 0 | 0 | 9 | 0 | 11 | 6 | 0 | 13 |
| | 藜科(*Chenopodiaceae*) | 0 | 11 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 |
| | 葎草(*Humulus*) | 31 | 0 | 0 | 500 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 |
| | 莎草科(*Cyperaceae*) | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 铁线蕨(*Adiantum*) | 0 | 22 | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 蹄盖蕨(*Athyriopsis*) | 0 | 0 | 17 | 500 | 9 | 27 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| | 单缝孢 | 0 | 0 | 35 | 0 | 18 | 32 | 5 | 20 | 37 | 6 |

在现代孢粉的垂直剖面分布方面,在 44—46 cm 出现现代乔木孢粉并且是唯一峰值,在其他泥沙层没有出现现代乔木孢粉。现代草本孢粉和现代蕨类孢粉的浓度峰值都出现在 18—20 cm 深度,并且这两类孢粉在剖面中的其他深度都呈现小数量的波动变化。现代乔木孢粉仅在 44—46 cm 深度出现而在其他深度没有,说明曾经出现过一个乔木植被受破坏的时期。40—52 cm 现代乔木孢粉浓度最高,至 40 cm 现代乔木孢粉浓度急剧下降;32—40 cm 现代蕨类与现代草本的孢粉浓度相对较高,说明这是一个乔木植被受到破坏的时期。据调查,保护区周边地区的草坡多为抗战时期、解放后"大跃进"期间和 20 世纪 80 年代扩大开荒时期中森林植被砍伐后形成。联系考虑$^{137}$Cs 的时间量程,32—40,40—52 cm 的现代孢粉高浓度分别对应 20 世纪 60 年代和 80 年代的草坡扩大时期。

### 2.4　讨 论

2.4.1　沉积泥沙剖面中$^{137}$Cs 垂直分布和孢粉特征对土壤侵蚀的示踪意义　茂兰喀斯特峰丛草地洼地的泥沙剖面的$^{137}$Cs 垂直分布显示了泥沙沉积特征。峰丛洼地小流域在森林植被受到破坏的情况下,洼地周边坡地会出现明显的土壤侵蚀,坡面土壤颗粒在坡面径流冲携作用或重力作用下在低洼地带沉积[5]。茂兰草地洼地沉积泥沙剖面中以地层孢粉占绝对多数,再沉积孢粉和现代孢粉的数量极低,孢粉总浓度

与地层孢粉浓度一致。说明了洼地内土壤侵蚀的物源是基岩碳酸盐岩风化残余物形成的土壤。但是喀斯特峰丛洼地的坡地径流系数较小,并且坡面存在大量裂隙节理及裸岩等环境条件下,土壤颗粒由坡面向低凹地带出现了微距或短距离位移,草地洼地坡面的土壤地表流失速率较低。

根据$^{137}Cs$的纪年特征、泥沙颗粒结构和孢粉结构,推断 20 世纪 60 年代和 80 年代分别出现过土壤侵蚀显著发生的 2 个阶段,茂兰峰丛草地洼地土壤侵蚀经历了一个轻微—剧烈增加—显著减缓的变化过程。在植被遭受破坏后的短期内,表层土壤侵速率剧增。但随着大部分地表土壤流水后,表层土壤侵蚀速率急剧下降。

2.4.2 沉积泥沙剖面中孢粉组合对环境变化的指示意义 茂兰峰丛草地洼地沉积泥沙剖面样品中的现代孢粉含量甚微。总体上以现代蕨类孢粉与现代草本孢粉为主,普遍缺失现代灌木孢粉。其中,现代蕨类植被的植被孢粉以铁线蕨、蹄盖蕨、单缝孢为主;草本植被孢粉以蒿科、藜科、葎草、莎草科为主;现代乔木孢粉偶见松科。这与近期洼地植被组成以耐旱、喜钙和耐贫瘠的草本和石面苔藓植被为主的现状特征一致[10]。说明洼地现代植被出现从含稀疏常绿落叶松的常绿草丛退化为常绿草丛的变化,现代植被的数量、覆盖度和种类组成等都趋于简单,生态环境亦趋于干旱缺水、土壤薄层分散和贫瘠。

## 3 结 论

(1) 根据茂兰峰丛草地洼地沉积剖面$^{137}Cs$含量、<0.002 mm 和<2 mm 颗粒含量、沉积剖面孢粉的比较分析,说明草地洼地出现过明显的坡地土壤侵蚀,并且在洼地底部形成泥沙堆积。同时,草地洼地的侵蚀产沙过程与洼地植被演变和洼地侵蚀环境特征具有密切联系。

(2) 沉积泥沙$^{137}Cs$示踪研究方法对于中短期尺度的时间纪年具有较高精度,沉积泥沙的孢粉分析则综合反映了茂兰峰丛草地洼地流域内植被特征与土壤侵蚀状况。联合运用$^{137}Cs$和孢粉方法解译草地洼地泥沙沉积状况及侵蚀环境变化是一种重要的方法探索,并具有科学应用意义。

[ 参 考 文 献 ]

[1] Walling D E. Linking land use, erosion and sediment yields in river basins[J]. Hydrobiologia, 1999, 410: 223-240.

[2] 张信宝,Walling D E,贺秀斌,等. 黄土高原小流域植被变化和侵蚀产沙的孢粉示踪研究初探[J]. 第四纪研究, 2005,25(6):722-728.

[3] 李德文,崔之久,刘耕年,等. 岩溶风化壳形成演化及其循环意义[J]. 中国岩溶,2001,20(3):183-188.

[4] 周运超,王世杰,卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. 地球与环境,2010,38(1):1-7.

[5] 苏维词,周济祚. 贵州喀斯特山区山地石漠化灾害及其防治[J]. 长江流域资源与环境,1995,4(2):177-183.

[6] 毛志中,张波. 茂兰喀斯特森林区地质特点[C]// 茂兰喀斯特科学考察集. 贵阳:贵州科技出版社,1987:24-73.

[7] 兰开敏. 茂兰喀斯特森林区植物区系的初步研究[C]// 茂兰喀斯特科学考察集. 贵阳:贵州科技出版社, 1987: 148-161.

[8] 何永彬,李豪,严冬春,等. 贵州茂兰峰丛草地洼地侵蚀产沙的$^{137}Cs$法研究[J]. 中国岩溶,2009,28(2):87-94.

[9] 王开发,王宪曾. 孢粉学概论[M]. 北京:北京大学出版社,1983:35-41.

[10] 陈佩英. 茂兰喀斯特森林区的第四纪孢粉分析[C]// 茂兰喀斯特科学考察集. 贵阳:贵州科技出版社,1987: 125-145.