

## 喀斯特坡地土壤流失监测结果简报

彭 韬<sup>1,2,4</sup>, 杨 涛<sup>1,2,4</sup>, 王世杰<sup>1,2,\*</sup>, 张信宝<sup>2,3</sup>, 陈 波<sup>2</sup>, 汪进阳<sup>2,3</sup>

(1 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2 中国科学院地球化学研究所—贵州省科技厅普定岩溶地质与生态研究综合试验站, 普定 562100; 3 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 4 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 在贵州普定岩溶地质与生态研究综合试验站陈旗小流域内, 采用全坡面大型径流场的方法, 对6种不同土地利用条件下喀斯特坡地径流场次降雨地表径流量和土壤流失进行了监测。2007年7月到2008年12月期间的监测结果表明: 6个径流场土壤流失量均非常小, 年土壤流失量和年悬沙产沙量变化范围分别为0.05~62.25 t/km<sup>2</sup>和0.03~8.68 t/km<sup>2</sup>, 最大的为中度石漠化的稀疏灌丛径流场。喀斯特坡地土壤流失集中发生在降雨量超过60mm的降雨事件中, 不同类型坡地间次降雨土壤流失量差异显著, 最主要控制因素为地表径流量, 同时也受到降雨特征和植被状况的影响。此外, 前期降雨对坡地径流和土壤流失的影响也是客观存在的。前期降雨丰沛的条件下, 坡耕地、稀疏灌丛径流场的地表径流量、次降雨土壤流失量相对复合植被、火烧迹地、灌草和幼林径流场均出现明显增长。

**关键词:** 喀斯特坡地; 土地利用类型; 全坡面大型径流场; 土壤流失; 悬移质泥沙; 监测

**中图分类号:** P642.25; S15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2009)02-0126-05

中国科学院地球化学研究所于2007年6月在贵州普定县陈旗小流域内, 建立了6个不同土地利用条件的全坡面大型径流场(简称为径流场), 进行了降雨、产流和产沙的定位连续监测。本文报道2007年7月~2008年12月期间的观测结果。

## 1 研究区概况

陈旗小流域(北纬26°15′36″~26°15′56″, 东经105°43′30″~105°44′42″)位于贵州省安顺市普定县后寨河流域内。流域面积1.29 km<sup>2</sup>, 是贵州高原喀斯特山地区的一条典型小流域, 下伏基岩为三叠系中统关岭组灰岩和泥灰岩。陈旗小流域的地表分水岭和地下分水岭基本一致, 地表河和地下河的流域面积也大致相

当。流域内的土壤以石灰土为主, 分布不连续, 平均厚度为20~40 cm。研究区属于亚热带季风湿润气候区, 多年平均降水量为1336 mm。

在研究区内喀斯特坡地上, 根据土地利用特点和植被条件, 选择了幼林、稀疏灌丛、坡耕地、灌草

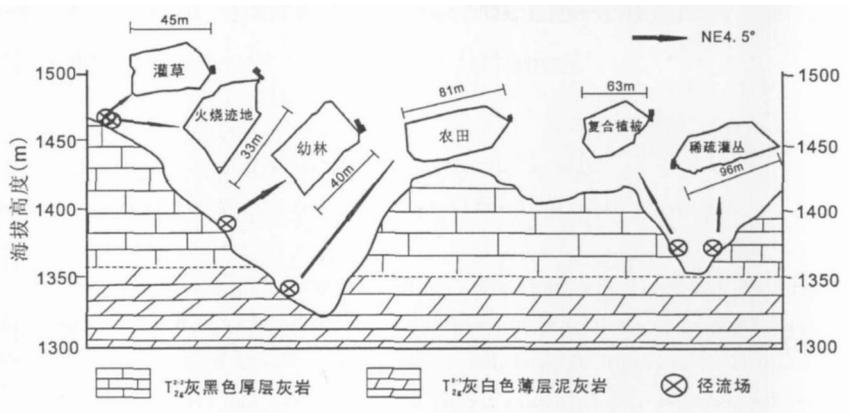


图1 研究区地质剖面与径流场位置示意图

Fig. 1 Location of runoff plots and geologic section in Chenqi catchment

收稿日期: 2009-02-06; 改回日期: 2009-04-18

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-306)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB403200)和“十一五”科技支撑计划课题(2008BAD98B07)联合资助

第一作者简介: 彭韬(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事喀斯特环境和环境地球化学研究 E-mail: pengtao@mails.gyig.ac.cn

\*通讯作者: 王世杰, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地、火烧迹地、复合植被等6种西南岩溶坡地典型土地利用类型,依山势建立了6个面积不等,坡度基本相同的全坡面大型径流场(图1,表1)。各径流场下伏基岩岩性差异不大,坡耕地径流场下伏基岩泥质含量较高,酸不溶物含量约为17%,其余径流场主要为薄层或厚层纯灰岩,酸不溶物含量在5%~8%

之间。岩层南北走向,倾角 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$ ,除幼林、火烧迹地径流场长轴方向与岩层走向呈 $40^{\circ}$ 左右外,其余径流场长轴方向基本与岩层走向一致(图1)。径流场周围用20 cm高的水泥围墙围住,每个径流场下端出口处修建了形状规则的分流池以收集每次降雨后的径流和泥沙。

表1 各径流场内基本情况

Table 1. Basic information for the runoff plots

径流场	土地利用类型	人为作用方式	坡度( $^{\circ}$ )	坡向	山体坡位	样地面积( $m^2$ )	乔木层覆盖率(%)	灌木层覆盖率(%)	地表层覆盖率(%)	基岩出露率(%)
1	灌草	火烧	37	北坡	中上部	1255.1	0	50	80	35
2	火烧迹地	2007-02~2008-03 火烧	32	西北坡	中上部	684.3	0	0	0	35
	2008-03~2008-12 恢复	40								
3	幼林	封山育林	35	西北坡	中部	1146.4	85	50	70	30
4	坡耕地	玉米-蔬菜轮作	30	北坡	中下部	2440.4	5	0	0	30
5	稀疏灌丛	过度放牧	31	南坡	中下部	2890.0	0	45	2	50
6	复合	上部 樵采	36	北坡	中下部	2439.6	90	20	90	50
	植被	下部 轻度放牧								

注:1号径流场为2007年2月火烧后,被当年5月自然成长的灌丛和蕨类覆盖;2号径流场火烧后从2007年2月到2008年3月期间人为剪除自然成长的灌丛和蕨类而保持原状,08年3月以后未进行人工干预,灌丛和蕨类自然生长;3号径流场及其周边地带从80年代开始毁林伐木,2000年左右开始封山育林;坡耕地径流场及周边70年代初期毁林开荒,85年之后基本全部成为坡耕地;5号径流场及周边从80年以前基本已经开始进行放牧、樵采等人为活动,至今过度放牧现象仍十分严重;6号径流场及周边80年以前为原生常绿落叶混交林,后经放牧、樵采等人为活动影响,径流场下部已退化成草地和稀疏灌丛,上部也逐渐退化成为灌木为主的次生林,面积各占50%;乔木层和灌木层覆盖率所占径流场面积的比例;地表层覆盖率为杂草和枯枝落叶所占径流场面积的比例;基岩出露率为基岩露头占径流场面积的比例。

## 2 监测方法

每次降雨后,量测径流池的水深,计算次降雨的径流量和径流深;搅拌沉沙池,取500 ml溶液,过滤风干后称重,求算径流的平均悬沙浓度,再根据径流量,求得次降雨的悬沙产沙量。另外,每次降雨后,收集沉沙池的全部泥沙,风干称重求算,测定了稀疏灌丛、坡耕地和复合植被3个径流场的全沙产沙量(土壤流失量)。降雨量分别由火烧迹地和稀疏灌丛径流场旁的HOBO微型气象站长期连续自动记录,通过自动记录的数据分析每次降雨的最大小时降雨量和降雨持续时间。

## 3 监测结果

### 3.1 不同土地利用类型坡地的土壤流失量

2007年7月到2008年12月,对喀斯特坡地6种土地利用类型径流场降雨量、地表径流量、土壤流失量进行了野外定位观测。2007-07~2007-12和2008-01~2008-12降雨量分别为553 mm和1367 mm,前者观测期为半年,降雨量约为多年平均降雨量的一半,后者降雨量与该区多年平均降雨量近似,

期间产生的有效地表径流分别为26次和23次。2007-07~2007-12期间各径流场土壤流失量和悬沙产沙量变化范围分别为 $0.73 \sim 13.12 t/km^2$ 和 $0.07 \sim 3.28 t/km^2$ ,2008年各径流场年土壤流失量和年悬沙产沙量变化范围分别 $0.05 \sim 62.25 t/km^2$ 和 $0.03 \sim 8.68 t/km^2$ (表2)。在降雨量非常小的旱季,如2007-10~2008-04和2008-11~2008-12,各径流场基本未见地表径流和土壤流失。

土壤流失量和悬沙产沙量与土地利用类型有关,最大的为稀疏灌丛径流场(表2)。2007-07~2007-12期间,灌草、幼林、坡耕地和复合植被径流场土壤流失量小于 $1 t/km^2$ ,火烧径流场土壤流失量为 $12.19 t/km^2$ 。2008年灌草、幼林径流场土壤流失量和悬沙产沙量变化范围不大,基本稳定。火烧径流场土壤流失量变化较大,年土壤流失量为 $3.48 t/km^2$ ,相比半年观测期(2007-07~2007-12)的土壤流失量减小约70%,这与该径流场火烧后的人工干预方式有关,详见表1的表注。说明08年3月后未对该径流场进行人工干预,灌丛和蕨类的自然生长对于减水减沙起到了十分明显的作用。稀疏灌丛、坡耕地和复合植被土壤流失量和悬沙产沙量

较前一观测期均有明显提高,一方面与观测期较长有关,另一方面与造成土壤流失时的地表径流量有

着较为紧密的联系。

表 2 各径流场年土壤流失量和次降雨土壤流失量

Table 2 Soil loss and rainfall parameters in different runoff plots

时间	灌草	火烧	幼林	坡耕地	稀疏灌丛	复合植被
土壤流失量 t/km <sup>2</sup> (悬沙产沙量 t/km <sup>2</sup> )						
2007-07~2007-12	1(0.07)	12.19(0.35)	0.73(0.04)	0.76(0.37)	13.12(3.28)	0.92(0.89)
2008-01~2008-12	0.38(0.06)	3.48(0.14)	0.05(0.03)	7.93(1.32)	62.25(8.69)	2.24(1.85)
	降雨量 mm	最大小时降雨强度	降雨持续时间 h	土壤流失量 kg(占全年土壤流失量的百分比%)		
2008-05-18	28.7	13.6	6.8	0.01(0.1)	0.01(0.0)	0.11(2.4)
2008-05-23	65.0	20.2	9.8	0.07(0.4)	0.09(0.1)	0.25(5.7)
2008-05-27	89.1	29.6	8.1	0.13(0.8)	49.93(32.4)	1.72(39.0)
2008-05-28	66.6	38.2	4.3	14.41(86.0)	43.92(28.5)	0.46(10.3)
2008-06-10	29.0	17.2	5.0	0.22(1.3)	0.20(0.1)	0.12(2.7)
2008-06-12	74.8	14.8	24.5	0.04(0.3)	0.24(0.2)	0.14(3.3)
2008-07-01	87.8	35.6	18.6	1.24(7.4)	1.02(0.7)	0.35(7.9)
2008-07-22	75.2	33.6	3.8	0.45(2.7)	33.29(21.6)	0.18(4.0)
2008-08-04	63.8	24.4	4.5	0.11(0.7)	16.13(10.5)	-
2008-08-17	51.4	21.8	6.0	0.07(0.4)	9.37(6.1)	1.09(24.7)
合计				16.76(100)	154.2(100)	4.42(100)

注:2007年7月~12月各径流池只记录期间土壤流失总量。2008年分别测定了坡耕地、稀疏灌丛和复合植被径流场的次降雨土壤流失量,由于灌草、火烧迹地和幼林径流场土壤流失总量非常小,未对次降雨土壤流失量进行测定。

### 3.2 次降雨的土壤流失量和悬沙产沙量

各径流场次降雨产生的地表径流量和土壤流失量的监测结果显示,喀斯特坡地土壤流失发生于暴雨频发的5到9月雨季,主要是几次特大暴雨,稀疏灌丛、坡耕地或复合植被径流场的次降雨地表径流深度和土壤流失量均出现了显著提高(表2),最大地表径流深度分别达到12.56mm、7.48mm和10.56mm(图2),最大次降雨土壤流失量分别达到49.93kg,14.41kg和1.72kg,分别占08年各自土壤流失总量的32.4%、86%和39.0%。08年05-27、05-28、07-22、08-04和08-17几场暴雨中,3个径流场土壤流失总量分别占到了各自全年土壤流失总量的90.5%、99%和78.1%(表2)。次降雨悬沙产沙量最大分别为2.51t/km<sup>2</sup>,1.20t/km<sup>2</sup>和0.49t/km<sup>2</sup>,其余场次降雨未见明显变化(图2)。火烧迹地、幼林和灌草径流场次降雨土壤流失量、悬沙产沙量在所有场次降雨中变化均不明显,仅在一定范围内发生波动。说明稀疏灌丛、坡耕地、复合植被三种类型坡地和火烧迹地、幼林、灌草地三种类型坡地,受土地利用方式、植被条件影响,次降雨的径流量、产沙量差别较大,尤为表现在特大暴雨的情况下。

另外,不同土地利用类型的喀斯特坡地次降雨的地表径流和土壤流失变化,受降雨特征(降雨量、雨强、降雨持续时间)及其作用下的地表径流的影响,也表现出显著性差异。从次降雨量变化情况来

看,一般只有在降雨量超过60mm条件下,才能造成稀疏灌丛、坡耕地或复合植被径流场产生较大的地表径流和土壤流失(图2,表2),这与2007年对地表径流系数的观测结果相一致(彭韬等,2007)。同时,悬沙产沙量也远远高于其他一般降雨,如07年07-30、08年的05-27、05-28、07-01和07-22、08-17的几场暴雨中,稀疏灌丛径流场次降雨悬沙产沙量分别为1.63t/km<sup>2</sup>、1.68t/km<sup>2</sup>、2.51t/km<sup>2</sup>、2.19t/km<sup>2</sup>、0.66t/km<sup>2</sup>和0.42t/km<sup>2</sup>。复合植被径流场在2007年7月30日90mm的暴雨中,悬沙产沙量相比雨量较小的降雨也有明显提升,达到了0.79t/km<sup>2</sup>(图2)。相比前三种类型的喀斯特坡地,灌草、火烧迹地和幼林径流场在所有场次降雨的地表径流量、土壤流失量和悬沙产沙量均未发生明显变化,地表径流深度变化范围仅在0.009~1.06mm之间。观测结果表明喀斯特坡地的次降雨的地表土壤流失和悬移质泥沙流失一般与地表径流量密切相关,以稀疏灌丛、坡耕地和复合植被三种类型坡地表现最为明显。

稀疏灌丛、坡耕地和复合植被径流场次降雨的土壤流失量、悬沙产沙量与地表径流量变化关系如图3所示。随着地表径流量的增加,坡耕地、稀疏灌丛和复合植被径流场次降雨悬沙产沙量均出现了明显增长(图3)。另外,3个径流场的次降雨土壤流失量多数情况下也随地表径流量增大而提高。其中,

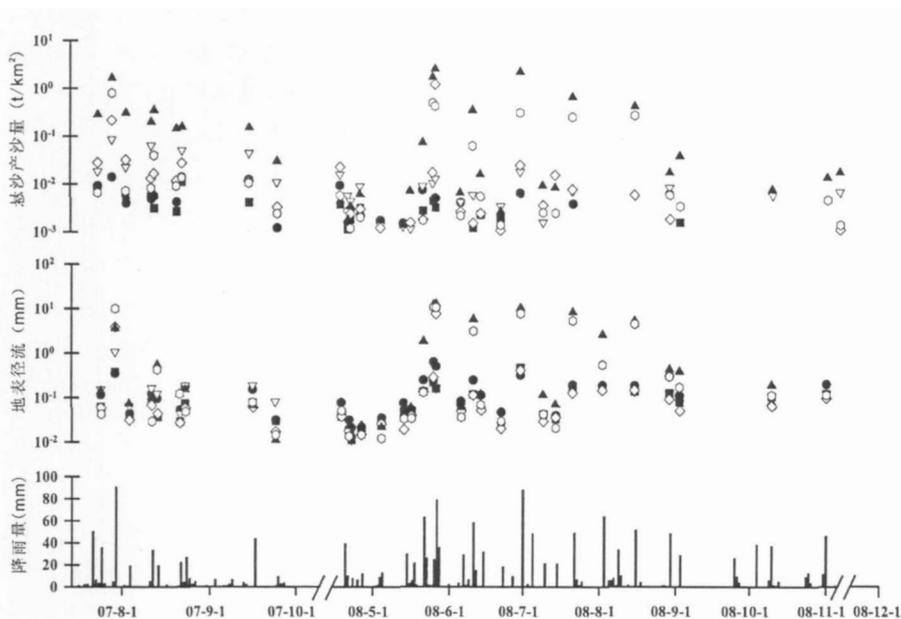


图 2 次降雨量、地表径流深度、悬沙产沙量变化

Fig. 2 Variation of Precipitation, surface runoff flow, suspended sediment loss in different runoff plots.

注: ● 灌草径流; ○ 火烧迹地径流; ■ 幼林径流; ◇ 坡耕地径流; ▲ 稀疏灌丛径流; △ 复合植被径流

发生严重土地退化的稀疏灌丛径流场, 如按照石漠化分级标准, 该样地属于中度石漠化, 次降雨土壤流失量随地表径流量增长变化最为显著, 其次为坡耕地径流场, 复合植被径流场变化较小。因此, 不同土地利用条件下喀斯特坡地土壤流失均受到了地表径流量的影响和控制。

此外, 在 08 年观测期间 06-12 和 07-01 日的两次暴雨中, 稀疏灌丛径流场也出现了地表径流量大, 但土壤流失量小的现象, 所产生的地表径流深度分别为 5.73 mm 和 10.28 mm (图 2), 产生的次降雨土壤流失量却仅为 0.24 kg 和 1.02 kg (表 2)。初步分析这可能与受到的次降雨雨量和雨强时间分布特征有着更为直接的联系。08 年 6 月 12 日降雨量为 74 mm, 从降雨量上要多于 8 月 4 日和 8 月 17 日的降雨, 但最大小时降雨强度要明显小于后两者, 且降雨持续时间也较长, 所以, 产生的地表径流虽然较多 (图 2), 但土壤流失量却非常小 (表 1)。在前期均无降雨条件下, 7 月 1 日的降雨, 降雨量和降雨强度与 5 月 27 日的降雨相似, 所产生的地表径流也相近 (图 2), 但降雨持续时间远大与后者, 因此 5 月 27 日稀疏灌丛径流场产生的土壤流失量明显高于 7 月 1 日的降雨所产生的土壤流失, 是后者的 49.5 倍 (表 2)。以上情况表明, 次降雨降雨量, 雨强及其时

间上的分布特点均会对喀斯特坡地土壤流失造成明显影响, 降雨强度大且降雨持续时间短的降雨, 在已经发生土地退化的喀斯特坡地上, 或将造成更为强烈的地表土壤流失。降雨量大, 但降雨分布时间长的降雨, 虽也能产生较多的地表径流, 但所产生土壤流失量却是很低的。

此外值得注意的是, 前期降雨这一影响因素在喀斯特地区对产流和土壤流失的作用也是客观存在且不容忽视的。以 2008 年 5 月 28 日降雨为例, 次降雨量虽仅为 66.6 mm, 但此前受到了 5 月 27 日降雨影响 (表 2), 各径流场产生的地表径流量均非常大, 稀疏灌

丛和坡耕地径流场产生的地表径流深度达到了观测期间的最高值, 分别为: 12.56 mm 和 7.48 mm (图 2)。这与 07 年对喀斯特坡地地表径流系数受前期降雨影响增大的结论相同 (彭韬等, 2007)。同时, 2 个径流场的次降雨土壤流失量也都非常高, 为 43.92 kg 和 14.41 kg, 分别占到各自全年土壤流失总量的 28.5% 和 86% (表 2)。相比前期无降雨情况下, 降雨量和降雨强度以及降雨持续时间相近的 7 月 22 日的降雨, 地表径流分别为后者的 1.53 倍

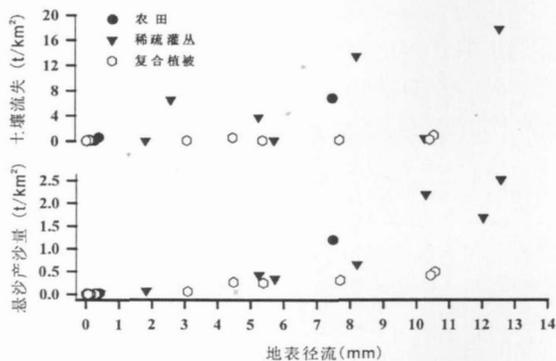


图 3 地表径流和次降雨土壤流失量及悬沙产沙量变化关系

Fig. 3 Relationship between surface runoff flow and suspended sediment loads and total soil loss.

和 57.5 倍, 土壤流失量分别为后者的 1.32 倍和 32 倍。意味着前期降雨对提高各种类型喀斯特坡地的地表径流量有明显的促进作用, 可能将增强后期降雨对坡地的土壤侵蚀能力, 加剧植被覆盖条件较差的退化土地和坡耕地的土壤流失。

## 4 结论

喀斯特地区的土壤流失相对非喀斯特地区非常小并主要受到地表径流量和产流机制的控制。一般降雨量超过 60 mm 的降雨, 才可能导致喀斯特坡地产生大量地表径流和土壤流失。暴雨的降雨特征将

造成不同土地利用类型坡地土壤流失的显著性差异, 受到土地利用方式和植被覆盖条件影响, 稀疏灌丛、坡耕地和复合植被径流场, 地表径流和悬沙产沙量变化显著。各类型坡地次降雨土壤流失也受到降雨强度和降雨时间分布上的影响, 降雨强度大, 历时短的暴雨极易致使发生土地退化现象的稀疏灌丛坡地和坡耕地产生大量土壤流失。降雨量大, 但降雨强度小, 持续时间较长的降雨虽然亦能产生较大的地表径流, 但很难造成大量的地表土壤流失。另外, 前期降雨会明显有利于地表径流的产生, 并加剧喀斯特坡地的土壤流失。

## 参 考 文 献

- [1] 彭韬, 王世杰, 张信宝等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 2008, 2: 152-157.

## Monitoring Results of Soil Loss in Karst Slopes

PENG Tao<sup>1,2,4</sup>, YANG Tao<sup>1,2,4</sup>, WANG Shi-jie<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Xin-bao<sup>2,3</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>, WANG Jin-yang<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Synthetic Experiment Station of Karst Investigation, Science and Technology Department of Guizhou Province, CAS, Puding 562100, Guizhou, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Experiments on monitoring surface runoff, suspensional sediment yield and soil loss for each rainfall event was carried out in six runoff fields with different land use types, using large slope runoff field method in Chenqi catchment, from July, 2007 to Dec, 2008. Results show that annual soil loss and suspensional sediment yield in six runoff fields vary greatly, from 0.05 to 62.25 t/km<sup>2</sup> and 0.03 ~ 8.68 t/km<sup>2</sup>, the largest one occurs in the sparse shrubs runoff field which classified as moderate rocky desertification. Soil loss in karst slopes generally occurs in heavy rainstorms when the precipitation exceeds 60mm, and the surface runoff is the dominating factor; however, the soil loss also being affected by rainfall characteristic and vegetation cover. Moreover, antecedent precipitation influence the surface runoff and soil loss significantly in karst slopes; Surface runoff, soil loss and suspensional sediment yield for each rainfall event in agriculture and sparse shrubs runoff fields, show significant increases in such case, comparing with runoff fields with complex vegetation, burned area, shrub-grass and young forest.

**Key words:** karst slope; different types of land use; large sloping runoff field; soil loss; suspensional sediment; monitoring