

文章编号:1001-8166(2004)增-0147-06

喀斯特石漠化灾害预警及其风险评估模型研究

胡宝清^{1,2}, 王世杰¹, 严志强², 覃开贤², 李玲²

(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, 贵州 贵阳 550002;

2. 广西师范学院资源与环境科学学院, 广西南宁 530001)

摘要: 喀斯特石漠化灾害是存在于喀斯特区的一种重要的地质—生态灾害。在喀斯特石漠化时空变化分析与驱动机制诊断的基础上, 进行喀斯特石漠化灾害预警风险分析, 设计喀斯特石漠化灾害预警风险决策支持系统, 构建石漠化灾害预警风险模型, 为喀斯特石漠化区的土地合理利用和防灾减灾提供科学依据。

关键词: 预警分析; 风险评估; 石漠化灾害; 决策支持系统

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

青藏高原隆升在其东北翼诱发的沙漠化和黄土区水土流失问题已引起广泛的关注, 取得了大量的研究成果, 形成了一些有效的治理方案。而在其东南翼西南喀斯特区所诱发的地质生态灾害——石漠化问题并未受到足够的重视。喀斯特石漠化是土地荒漠化的主要类型之一, 它以脆弱的生态地质环境为基础, 以强烈的人类活动为驱动力, 以土地生产力退化为本质, 以出现类似荒漠景观为标志。就其目前的扩展速度和规模而言, 对于人类生存环境的危害程度并不亚于前两者, 且其治理任务将更为艰巨^[1]。本文在诊断喀斯特石漠化发生、发展过程和驱动机制基础上, 进行喀斯特石漠化灾害预警风险分析, 设计喀斯特石漠化灾害预警风险决策支持系统, 构建石漠化灾害预警风险模型, 为喀斯特石漠化区的土地合理利用和防灾减灾提供科学依据。

1 喀斯特石漠化灾害

1.1 喀斯特石漠化

20世纪80年代末到90年代初, 部分科技工作者在我国南方湿润和半湿润地区的水土保持工作中, 特别是在砂页岩、红色岩系和石灰岩丘陵山地陡

坡开垦所引起的水土流失研究中, 提出了“石化”、“石山荒漠化”、“石质荒漠化”的概念, 并特别强调石山荒漠化是水土流失的一个突出特点。为了区别在不同岩性基底上所发育的石漠化, 有必要把岩溶地区发生的该类现象称之为喀斯特石漠化(Karst rocky desertification)。它是指在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下, 受不合理社会经济活动的干扰破坏所造成的土壤严重侵蚀, 基岩大面积出露, 土地生产力严重下降, 地表出现类似荒漠景观的土地退化过程^[2,3]。

喀斯特石漠化, 从时空尺度上说, 发生在人类活动较强时期的亚热带喀斯特地区; 从起因上看, 是在潜在的自然因素基础上叠加人类活动所致, 其发展趋势决定于人地关系协调与否; 从结果上看, 土地生物产量急剧降低, 基岩大面积裸露具类似荒漠景观; 水土流失和旱涝是石漠化的直接表现形式, 土壤侵蚀是石漠化最直接的影响因素。从本质上看, 是一种土地退化过程, 石漠化扩展意味着生存环境丧失。

1.2 喀斯特石漠化灾害

地质—生态灾害是人类与自然相互作用, 致使自然环境系统在演化变迁过程中发生某种异变行

收稿日期: 2004-04-10.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“广西喀斯特石漠化灾害风险评估模型研究”(编号: 40361002); 广西自然科学基金项目“广西喀斯特石漠化的预警系统研究”(编号: 桂科自0342001-2)资助。

作者简介: 胡宝清(1966-), 男, 博士(后), 副教授, 主要从事环境地质与石漠化问题, 土地科学与区域可持续发展研究。

E-mail: Hbq1230@gctc.edu.cn

为、而危及人类生存的现象。作为重要的地质—生态灾害,喀斯特石漠化灾害是喀斯特地质—生态环境系统内部与外部物质能量结构不匹配与不协调的结果。与其它灾害一样,喀斯特石漠化灾害具有孕灾环境、致灾因子、承灾体、灾害监测和预测、风险度评估以及防灾减灾对策等灾害属性和范畴。石漠化作为灾害未引起重视的原因可能是它对人类的直接影响相对较小,往往带来间接影响。但其危害性是严重的,引发连锁的灾害效应:水土流失→石漠化→旱涝灾害加重→生态系统崩溃,或者诱发其它自然灾害,如洪涝、干旱、水土流失等。同时,该灾害不像某些自然灾害能在短期内消减,而要坚持相当长的时间才能恢复正常状态,短的几十年,如森林的恢复,长的数百年、上千年,如土壤的恢复。

与其它自然灾害相比,石漠化有其特有的属性和形成过程。石漠化灾害具有自然和社会双重属性。从地质生态演变角度出发,石漠化灾害具有特定的地质背景、地质作用过程、生物学过程、景观特征、空间范围和时间尺度等 6 种自然属性,可以归纳为不同退化程度、不同发生时间、不同级别的地—空能量效应和不同时空表现形式 4 个方面^[1]。石漠化灾害是土地不合理利用发展到一定阶段的产物,只有人类活动与脆弱的喀斯特环境之间的不协调达到或超越临界值,才产生石漠化灾害。因此,只有不协调的土地利用达到一定的阶段,土地生产力超载达到一定的水平,石漠化及其相关的灾害链才能威胁生存环境和造成经济损失。对于石漠化灾害,可以将其控制在社会可持续发展所接受的范围内,可有限制地减少石漠化灾害带来的损失,因此石漠化灾害具有显著的社会属性。

2 喀斯特石漠化灾害预警风险分析

2.1 石漠化灾害的预警分析

2.1.1 石漠化灾害的预警分析思路

要构建一个具有操作意义的预警系统,首先要从理论上解决建模原则和方法问题。一般地说,预警系统必须具备描述、解释、评价、预测和对策等五个基本功能。针对喀斯特区实际情况,石漠化灾害的预警分析包括设计警标、明确警情、寻找警源、分析警兆和预报警度等几个方面。从喀斯特石漠化系统来看,首先选取和确定有代表性的预警指标,这主要由石漠化分级程度和石漠化驱动组成。通过监测警标,敏感地反映预警对象在运行中的异常状态,并及时反馈警情,进而加以控制。同时分析产生某种

警情的根源,是属于外生的可控性较弱的警源,还是属于内生的可控性较强的警源。由警源到产生警情是一个过程,包含着警情的孕育、发展、扩大、爆发。警情在爆发之前必有一定的征兆,分析警兆及其报警区间便可预测预报警情。如果说警源是警情产生的原因,则警兆就是警源演变成警情的外部形态表现。依据喀斯特石漠化系统运行与发展的警情区位,识别其相应的警度。通常划分为五个警区范围:无警(以绿灯表示)、轻警(蓝灯)、中警(浅蓝灯)、重警(黄灯)和巨警(红灯)。根据警兆的变动情况,联系警兆的报警区间,参照警情的警限或警情等级,运用定性方法与定量方法分析,一旦有“警”发生,通过警度预报系统分析报告“警”的大小,从而有的放矢地采取相应措施,减小警度和防止警度的扩大。

2.1.2 石漠化灾害的预警指标体系

在景观尺度上,石漠化程度直接反映在其地表现形态和生态状况。对于喀斯特石漠化而言,基岩裸露率、植被(土被)覆盖率、植被类型退化程度和土地生产力下降程度,不仅具有代表性和可操作性,而且是地面调查和遥感技术均较容易获得的信息,各级石漠化可根据上述 4 个指标的差异来确定。根据喀斯特程度指标进行石漠化强度分级,得出石漠化警情的严重程度,包括自然灾害警度和非自然灾害警度(即石漠化灾害预警)。遵循统计的完整性、波动的规律性、监测的及时性、预警的敏感性等选择标准,石漠化灾害的预警指标体系分为总体目标层(警情总指标)、状态指标层(警兆指标)、变量指数层(警源指标) 3 个等级。总体目标层表达石漠化灾害危险度。石漠化预警系统的指标框架以状态指标层为预警单位,对指标体系的石漠化程度指标层和驱动指标进行预警分析,在此基础上进行石漠化灾害危险度综合评价,为石漠化灾害风险评估提供基础,达到石漠化预警的目的。

2.2 石漠化灾害的风险评估指标体系

石漠化灾害风险评估的目的就在于评估和监测石漠化的演变状态与引起的不良环境效应,即在喀斯特石漠化预警分析的基础上,进行灾害危险性评价,结合易损性分析,进行期望损失评估。根据科学性、合理性、可操作性和易于量化等原则构建石漠化的灾害风险评估指标体系。其中,石漠化的灾害危险性评价指标包括表征喀斯特生态环境系统脆弱性,即石漠化灾害警情的诱发及其制约因素致灾因子指标,以及石漠化灾害规模、频次和密度评价指标;易损度分析指标是指在历史上石漠化灾害所造

成的社会经济损失基础上,选择物质易损度、经济易损度、环境易损度和社会易损度 4 类(表 1)。

表 1 喀斯特石漠化灾害预警分析与风险评估指标体系
Table 1 karst rocky desertification disaster early warning and risk assessment

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标
石漠化灾害危险预警指标	石漠化程度指标	地表形态 生态过程	基岩裸露率、植被(土被)覆盖率 植被类型退化程度、土地生产力降低程度
	石漠化灾害的孕灾环境与形成条件 (石漠化驱动指标)	地质—生态环境背景 人类诱发作用	岩性构造、地貌景观、水文气候、土壤植被、生态环境等 人类社会经济活动程度、土地利用强度
	历史石漠化灾害	石漠化灾害时空分布规律	石漠化灾害规模、频次和密度
承载体易损性指标	区域受威胁对象及其价值分析、综合损失及破坏损失等级	物质易损度 经济易损度 环境易损度 社会易损度	建筑物、基础设施 经济收入、国内生产总值 水、气和土地资源 人口及其结构

3 喀斯特石漠化灾害预警风险决策支持系统

各种自然灾害的形成、演变与发生是在一定的自然地理环境中,逐步发展而成的,自然驱动力与人为活动对自然灾害的发生均具有重要作用。作为地质—生态灾害,喀斯特石漠化灾害具有其固有的孕灾环境和孕灾过程,阐明其发生机理有利于喀斯特石漠化灾害预警风险决策支持系统设计目标和功能设计。

3.1 系统设计目标

喀斯特石漠化灾害是一种活跃的动态变化过程,其预测和防治研究是一项庞大的系统工程,所涉及的数据信息量是巨大的,故此,设计喀斯特石漠化灾害预警风险决策支持系统(Early Warning and Risk Decision Supporting System for Karst Rocky Desertification Hazard, KRDH. EWDS),本系统是以 GIS 技术支持、以喀斯特石漠化专业分析模型为核心,以空间数据为主要材料,解决喀斯特石漠化研究海量数据分析、查询、显示和管理等信息处理技术,以实现由“数据”向“信息”的转换过程,提供喀斯特石漠化海量数据存储、时空分析评价、监测预警、防灾减灾决策和信息管理。该系统构建的总体目标是以空间数据库为基础平台,为区域喀斯特石漠化时空变化和综合防治提供信息支持,以解决石漠化灾害信息处理及决策支持相关技术问题。在统一的集成环境下进行影像数据、矢量数据的处理和分析,结合喀斯特石漠化分析模型和空间统计模型进行石漠化时空动态分析、驱动机制诊断、石漠化预警分析和灾害风险评估等,为进一步研究喀斯特土地石漠化和喀斯特环境治理提供有力的技术支持。

3.2 系统功能设计

与一般商业性 GIS 不同的是,资源与环境信息系统(REIS)开发的两条主线是数据的组织和应用模型的建立。作为 REIS 之一,喀斯特石漠化灾害预警风险决策支持系统(KRDH. EWDS)构建的基础工作是进行各类数据的处理和分析。根据系统研制目标来规划和确定系统各组成部分以及它们之间的联系,系统功能设计。本系统分为 6 大功能模块,分别是数据操作、空间应用分析中的时空监测模块、驱动诊断模块、预警分析模块、灾害评估模块、风险决策模块,还有信息生成发布、空间信息查询检索(图 1),旨在满足应用的要求,保证系统总体目标的实现。现将系统主要功能表征如下:第一、数据操作、信息管理,主要是获取数据,保证数据库中的数据在内容和空间上的完整性、逻辑性和准确性,对图形和地图进行编辑和投影转换,以满足模型分析要求。数据输入是指把各类影像数据、矢量数据、DEM 数据和统计数据输入系统的数据库之中。影像数据、矢量数据、DEM 数据可以导入自动建立数据集,并把数据的相关属性和存储路径自动写入数据库中。第二、数据管理功能包括数据添加、删除、编辑、查询和统计分析。用户可以通过选择不同的数据表(统计数据、模拟结果和图件数据)对数据库中数据进行操作。第三、空间信息查询功能:系统提供了多种多样的统计图,可以将交通数据制作成柱状图、饼状图、散点图、线图,还能进行专题地图分析,按某一要素生成范围图、分级符号图、点密度图、独立值图等,形象直观反映喀斯特石漠化各要素的时空变化规律。系统以文图多种形式显示和查询,发布预测灾害预警支持系统,由决策者在预警指标的基础上,根据某种预警方法对石漠化时空状

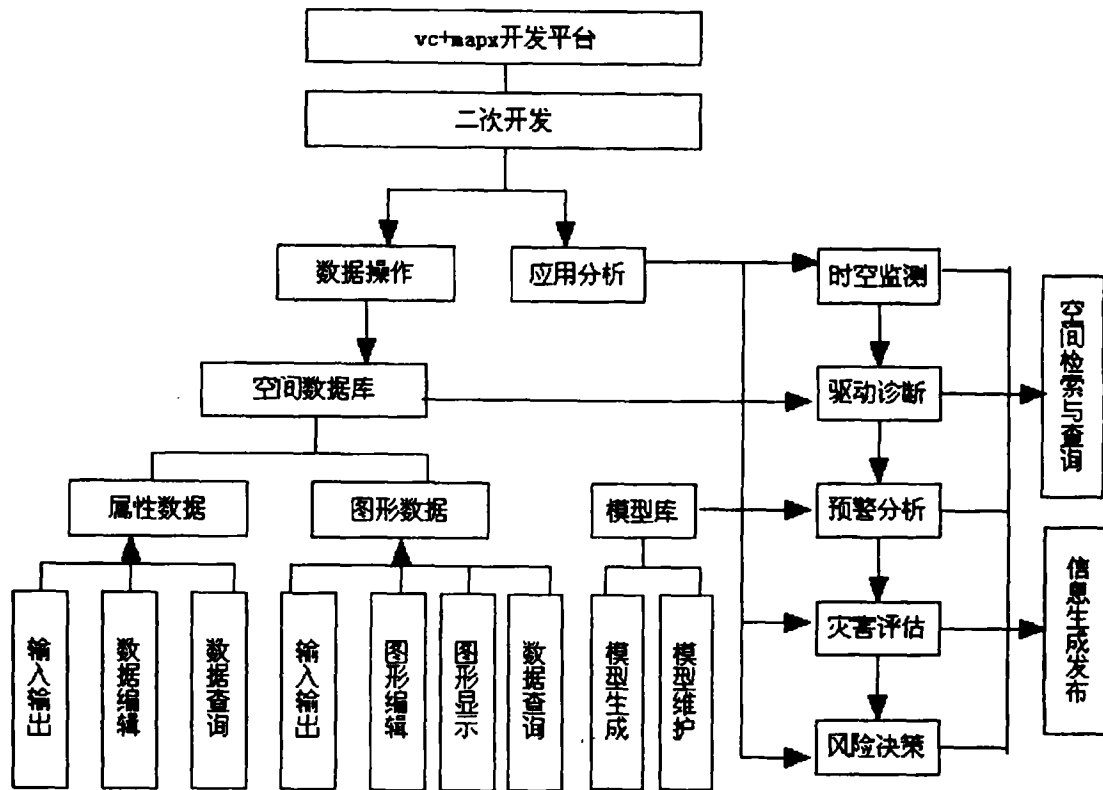


图1 喀斯特石漠化灾害预警风险决策支持系统

Fig. 1 Early warning and risk decision supporting system for karst rocky desertification hazard

况判断出预警结果,完成整个预警过程。

4 石漠化灾害预警风险模型

4.1 石漠化灾害预警分析模型

预警分析需求信息和模型两方面,其中,信息需求又可分为数据需求和非量化信息需求。为解决预警中面临的半(非)结构化决策问题,需要提供大量的非量化信息,由专业预警分析人员来综合分析、判断。建立预测、预警模型并使之程序化是开发喀斯特石漠化灾害预警风险决策支持系统的关键,采取多预测模型、多预警方法来分析、比较、预警。预警的基本流程共分为六个步骤:预警准备、模型预测、分析调整、数据转换、石漠化灾害预警和综合分析。石漠化灾害预警分析模型在石漠化强度的时空动态监测和石漠化驱动机制诊断基础上,参照广西石漠化分级值确定区间预警,采用德尔非法与模型分析进行指标预警界限的确定,在预定警度与变量指数预测基础上进行石漠化预警分析。由于警源、警兆和警情之间存在密切的因果关系和相关关系,警情指标的警度取决于警兆和警源指标的警度,采用外推预警的方法将同样先导长度的警源、警兆指标按

警度分类集合,把5种警度对应的指标个数按由多到少顺序排列,当全部或大部分警源处于无警(有警)警区时,警兆指标将处于无警(有警)警限之内。

4.2 石漠化灾害风险评估模型

灾害预警风险评估主要是定量地分析处于风险中的系统特性,阐明灾害的成因、估计灾害在规定时期内的发生概率以及研究受灾后造成的损失程度。作为一种地质—生态灾害,石漠化灾害风险评估是在在危险性分析和易损性分析的基础上,计算评价石漠化灾害的期望损失(未来一定时期内石漠化灾害可能造成的人口伤亡与经济损失的平均值、资源环境破坏程度)与损失极值。故此,石漠化灾害风险分析模型包括石漠化灾害危险性预警模型、区域综合易损性评价模型和石漠化灾害风险评估模型三方面,其中石漠化灾害危险性预警就是根据喀斯特生态环境稳定性和统计历史石漠化灾害的频次和规模,确定不同脆弱性环境风险场出现石漠化灾害的概率;其次,承灾体易损性分析,确定承灾体不同破坏程度的发生概率;第三,根据可能发生的石漠化灾害强度,确定其可能造成的承载体损失类型,进而确定不同承灾体在不同破坏程度下的损失值,最后得

到不同概率条件下的承灾体损失值(表2)。

表2 喀斯特石漠化灾害预警风险模型

Table 2 Temporal and spatial change models of karst land use/cover and land rocky desertification

模型类型	表达式或数学模型	涵义及其意义
时空监测	变化幅度 $R_d = (U_b - U_a) / U_a \times 100\%$	反映不同强度在总量上的变化
	变化速度 $R_s = (U_b - U_a) U_a / T \times 100\%$ $= (\Delta U_{in} - \Delta U_{out}) / U_a / T \times 100\%$	单一类型动态用于表达区域一定时间内某石漠化级别的数量速度的变化
	变化趋势 $P_s = R_s / R_m = (\Delta U_{in} - \Delta U_{out}) / (\Delta U_{in} + \Delta U_{out})$ $ R_s / R_m \leq 1$, 即 $-1 \geq P_s \geq 1$	反映石漠化强度趋势和状态; 当 $0 \leq P_s \leq 1$ 时, “涨势”; $0 \leq P_s \leq 1$ 时, “落势”
预警分析	警源预测 相关分析法、因子分析法	分析石漠化驱动因子变化与石漠化强度变化相关性
	危险度预警 Logistic 回归判定模型、线性概率判定模型(LPM 模型)	针对石漠化强度与驱动因子变化, 预警分析喀斯特石漠化灾害危险性
风险评估	易损性评价 $D = f(M)$	石漠化强度(M)引起的承灾体的破坏程度(D), 用历史灾情资料统计 M 与 D 的关系。
	风险评估 模糊聚类综合评价、灰色聚类综合评价以及积分值法、多因素信息模型法	对一个复杂系统的定量化分析过程, 所采用的方法属于多层次分级聚类分析

5 结 语

将石漠化预防纳入灾害预警管理系统, 把石漠化过程及其引起灾害时空特征与生态安全预警融为一体。本研究的意义在于揭示脆弱的喀斯特生态环境系统的演变过程及其引起的石漠化灾害系统的成因机理与致灾过程的基础上, 进行喀斯特生态安全预警和石漠化灾害风险分析指标体系; 依托 GIS 技术与空间统计分析和数学模型, 建立石漠化灾害风险评估模型, 在实践上为我国西南喀斯特山区土地石漠化预警和灾害防治评估与不同类型石漠化区可持续发展提供可借鉴的范例。为了能定量地评价喀斯特石漠化灾害情况, 在综合考虑石漠化灾害自然和社会属性基础上建立石漠化灾害风险评估模型。

参考文献 (References):

[1] Wang Shijie(王世杰), Li Yangbing(李阳兵), Li Ruiling(李瑞玲). Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming[J]. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2003, 23(6): 657-666(in Chinese).

[2] Wang Shijie(王世杰). Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica* (中国岩溶), 2002, 21(2): 101-105(in Chinese).

[3] Wang S J, Zhang D F. Mechanism of rocky desertification in karst mountain areas of Guizhou province, Southwest China[J]. *International Review for Environmental Strategies*, 2002, 21(2): 123-138.

[4] Guan Wenbin(关文彬), Xie Chunhua(谢春华), Li Chunping(李春平), et al. Principles and assessing methods for early warning of desertification damages[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2003, 25(3): 79-83 (in Chinese).

[5] Zhang Yongbo(张永波), Li Xiangquan(李向全), Zhang Lihong(张礼中), et al. The designing and development of geological hazard information processing and decision-making support system[J]. *Geography and Territorial Research* (地理学与国土研究), 2002, 18(4): 26-32(in Chinese).

[6] Hu Baoqing, Ren Dongming, Liao Chimei, et al. Application of map and file information visibility system (MFIVS) on the comprehensive division of natural disasters[J]. *Chinese Geographical Science*, 2001, 11(3): 326-335.

[7] Hu Baoqing(胡宝清), Liao Chimei(廖赤眉), Yan Zhiqiang(严志强), et al. Design and application of dynamic monitoring and visualization management information system of karst land rocky desertification[J]. *地理与地理信息科学*.

[8] Ren Luchuan(任鲁川). Advance in regional natural disaster risk assessment [J]. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 1999, 16(3): 242-246(in Chinese).

[9] Wu Shuren(吴树仁), Dong Cheng(董诚), Shi Jisong(石菊

- 松). On geological disaster information system[J]. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2003, 23(6): 683-691 (in Chinese).
- [10] Yuan Daoxian. Rock desertification in the subtropical karst of south China[J]. *Z. Geomorph. N. F.*, 1997, 108: 81-90.
- [11] Wang Xiaohong (王晓红), Qiao Yunfeng (乔云峰), Shen Rongkai (沈荣开), et al. Drought risk assessment model for irrigation region[J]. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2004, 15(1): 77-81 (in Chinese).
- [12] Ding Lieyun (丁烈云), Xu Zeqing (徐泽清). Design and Develop urban real estate early warning system[J]. *Capital Construction Optimizing* (基建优化), 2000, 21(6): 5-8 (in Chinese).

EARLY WARNING AND RISK ASSESSMENT MODEL FOR KARST ROCKY DESERTIFICATION HAZARD

HU Bao-qing^{1,2}, WANG Shi-jie¹, YAN Zhi-qiang², QIN Kai-xian², LI Ling²

(1. *National Laboratory of Environmental Geochemistry, Geochemistry Institute of Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China*; 2. *Faculty of Resource and Environment Sciences, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China*)

Abstract: Karst rocky desertification hazard is one important geo-ecological disaster existing in the karst area. On the basis of temporal-spatial change analysis and driving mechanism diagnosis on karst rocky desertification, this paper take early warning and risk analysis on karst Rocky Desertification hazard, design Early Warning and risk decision supporting system for karst rocky desertification hazard, make up early warning and risk models for karst Rocky Desertification hazard, and provide scientific foundation for rational land use and prevent calamity in karst area.

Key words: Early warning analysis; Risk assessment; Rocky desertification hazard; Decision supporting system.