

基于遥感与地理信息系统的分布式 斜坡稳定性定量评估模型

武 利^{1,2}, 张万昌¹, 张 东¹, 周 杰³

(1. 南京大学地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 2. 东南大学地理信息工程系,
江苏 南京 210008; 3. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘要: 文章介绍一种进行斜坡稳定性定量研究的分布式模型——SINMAP 模型。该模型以水文学理论为基础, 耦合稳定状态水文模型 TOIMODEL 与大范围斜坡稳定性模型, 在充分考虑各种影响因素的基础上, 对研究区域进行斜坡稳定性评价。选取汉江江口流域作为试验研究区, 以 DEM、遥感影像、各种专题图件及地面考察资料作为信息源, 利用 SINMAP 方法获得可视化的研究区地表稳定性指数专题图。经实际资料检验表明, 该模型可获取较高的预测精度, 尤其在流域尺度上具有极大的应用价值。

关 键 词: 遥感与 GIS; 斜坡稳定性; SINMAP; 大范围斜坡稳定性模型; 稳定性指数

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2004)04-0458-07

国际社会及中国政府高度重视灾害评估。联合国国际减灾十年(IDNDR)委员会早在 1991 年就提出把灾害评估作为 IDNDR 要具体实现的三项目标中的首要任务, 并指出:“ 各个国家应对自然灾害进行评估, 即评价灾害危险性、脆弱性、地理分布及影响程度。中国是世界上地质灾害最严重的国家之一。在中国的各种地质灾害中, 滑坡、崩塌灾害仅次于地震灾害列居第二位。除上海等个别省市、自治区外, 全国绝大多数地区均受到不同程度的危害。其破坏作用体现在多方面, 如造成人员伤亡; 破坏城镇、矿山、企业; 破坏铁路、公路、航道, 威胁交通安全; 破坏水利、水电工程; 影响资源开发, 阻碍山区经济发展等等。全国每年由于滑坡、崩塌灾害引起的直接、间接经济损失达 200 亿元, 用于滑坡治理的费用更高^[1]。同时水土流失已成为一个严重的环境问题^[2~24]。对该方面的研究国内外主要在三个尺度上进行, 即坡面、小流域和区域^[25]。滑坡与崩塌亦是造成局地水土流失的原因之一。

滑坡与崩塌的成因及属性特征相似, 崩塌是指陡峻斜坡上的岩土体在重力作用下突然脱离母体, 迅速滚动, 而后堆积在坡脚的现象; 滑坡是指岩体或土体在重力作用下沿一定的软弱结构面整体下

滑的现象。两者都是斜坡失稳所致, 属于斜坡变形灾害。所谓斜坡稳定性, 是指地表斜坡发生变形破坏的可能性程度。进行斜坡稳定性评价有助于准确地预测、有效地防治滑坡及崩塌灾害, 并为水土流失, 区域水土保持等研究提供参考。斜坡稳定性受众多因素的影响, 除斜坡自身的基础条件如地形坡度、岩土体性质、地质构造等外, 还包括许多因素, 如降雨和地表(下)水是滑坡的诱发因素, 地表植被根系增加了土壤的抗剪强度等等, 各因素之间的关系复杂, 变形机制具有地区差异性, 因此对地表稳定性进行评价是一个科学而复杂的问题^[26]。

国内外学者已提出了很多种地表稳定性空间评价预测模型^[27, 28], 每一种模型都有不同程度的局限性。例如 Montgomery and Dietrich^[29] 耦合基于等高线的稳定状态水文模型与大范围斜坡稳定性模型, 根据坡度和单位汇水面积确定斜坡稳定性分级, 该方法简单、便于应用, 但仅适用于非粘结性土壤, 它没有考虑土壤内聚力对地表稳定性的影响; Wu and Sidle^[30] 则提出一个更为详尽的模型, 该模型结合动态水文模型与大范围斜坡稳定性模型, 并且考虑了土壤内聚力和植物根系对地表稳定性的影响, 比 Montgomery and Dietrich 方法有所进步, 但形式更为复杂。本文将介绍的 SINMAP 模型兼具

收稿日期: 2003-06-10; 修订日期: 2003-10-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB309404)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-06)、海外青年学者合作研究基金(40128001)和教育部科学技术重点项目(2001)。

作者简介: 武 利(1965-), 女, 江苏南京人, 博士生, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: wuli65@sohu.com

上述两种方法的优点, 综合考虑影响地表稳定性的地形地貌、地质、土壤、植被、水文及气候等因素, 并利用空间遥感信息及地表实测数据, 在分布式大范围斜坡稳定性模型的驱动下, 力求更加准确、客观地评价地表稳定性状况并使之可视化。

1 研究区概况

本文以汉江江口流域(图1)为研究区, 江口流域地处秦岭南麓, 地理位置为 $106^{\circ}48' \sim 107^{\circ}25' E$, $33^{\circ}38' \sim 34^{\circ}11' N$, 海拔高度为 960~3 370 m, 地貌类型以侵蚀中山为主。土地利用类型有林地、疏林、灌丛、旱地、草地及裸地。土壤类型主要有棕壤、粘盘黄棕壤和山地灌丛草甸土三类。气候类型属亚热带季风区, 气候温和湿润, 年降水量 900 mm 左右, 年均气温 $14^{\circ}C$ 左右^[31]。流域内地质灾害以滑坡、崩塌为主, 流域面积 $2\,431\ km^2$ 。

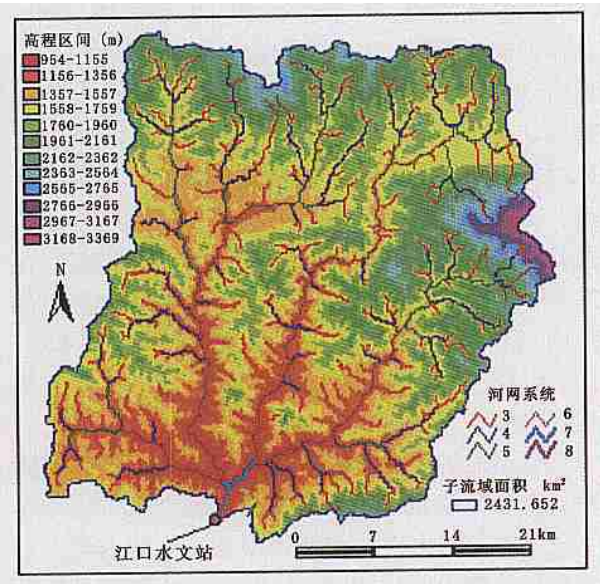


图1 江口流域地形及水文特征

Fig. 1 Topographic and hydrologic features of Jiangkou basin

2 原理与方法

SINMAP(Stability Index MAPping)模型是美国犹他州立大学在加拿大森林物产有限公司及Goodwin洪积系统咨询局的联合资助下由Robert T. Pack和David G. Tarboton等人开发的一种用于侵蚀地表稳定性评估的分布式模型。SINMAP方法与Montgomery and Dietrich方法相似, 也是耦合稳定状态水文模型与大范围斜坡稳定性模型, 但有以

下几点区别: (1) 使用基于栅格的DEM方法; (2) 在大范围斜坡稳定性模型中保留了内聚力, 从而能够像Wu and Sidle的模型一样表征土壤内聚力或由于植物根系而产生的抗剪强度, 当需要考虑土壤为非粘性情形时, 用户可以将内聚力设为0; (3) 所用参数具有可变性, 通过采用均匀概率分布以及对不确定参数确定上限与下限的方法得以体现, 这一点与Hammond的LISA概率方法^①类似。因此进行地形稳定性评价时, SINMAP方法能够真实地反映出评估参数的不确定性。

SINMAP的理论基础是大范围斜坡稳定性模型, 该模型利用根据稳定状态水文模型获取的地形湿度指数、根据栅格DEM获取的坡度、有效汇水面积等数据, 结合各种GIS专题图件及地面考察资料, 采用地理信息系统平台, 建立定量分析模型, 获得地表稳定性分级, 实现对研究区域的地表稳定性评价。SINMAP软件可以做为ArcView的一个扩展模块使用。

2.1 大范围斜坡稳定性模型

SINMAP方法以大范围斜坡稳定性模型^[29]^①为基础, 该模型在一个平行于地表面且忽略其边缘作用的软弱结构面上平衡对比使地表土层稳定的抗滑力与使之不稳定的滑动力, 两者之比就是安全系数, 用公式表示如下:

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

式中, C_r 为植物根系产生的内聚力(N/m^2); C_s 为土壤自身的内聚力(N/m^2); θ 为地形坡度; ρ_s 为湿土密度(kg/m^3); g 为重力加速度 ($9.81\ m/s^2$); D 为土壤垂直深度(m); ρ_w 为水的密度(kg/m^3); ϕ 为土壤内摩擦角; D_w 为距土层等压面的垂直深度(m)。

大范围斜坡稳定性模型的无量纲形式为:

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - wr] \tan \phi}{s \sin \phi} \quad (2)$$

式中, 地形湿度指数 $w = D_w / D = h_w / h$; 土层厚度 $h = D \cdot \cos \theta$; 水与土壤密度之比 $r = \rho_w / \rho_s$; 无量纲的内聚力因子 $C = (C_r + C_s) / (h \rho_s g)$

无量纲的内聚力因子 C 把土壤自身及植物根系产生的内聚力与土壤密度及土层厚度结合起来, 可以认为它是内聚力与土壤重量之比, 或者是内聚力对斜坡稳定性的相对贡献。公式(2)中分子之第二部分通过内摩擦角 ϕ 或内摩擦系数 $\tan \phi$ 量化了

① Hammond C, Hall D, Miller S, et al. Level I Stability Analysis (LISA) documentation for Version 2.0. General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station, 1992

土壤内摩擦力对斜坡稳定性的贡献,当土壤湿度增加时,这部分贡献随之降低,这一影响的敏感性由水与土壤密度之比 r 控制。SINMAP 模型通过计算每一栅格点的坡度和湿度来得到各栅格点的安全系数。

2.2 地形湿度指数

SINMAP 方法中所用的地形湿度指数是根据稳定状态水文模型获取的,它以 TOPMODEL^[32,33] 为基础。TOPMODEL 模型是一个用于表征由于地下水饱和而产生地表径流的分布式水文学模型,根据野外观测,较高的土壤湿度或表面饱和区域多出现在地形汇聚的凹地,而滑坡或地表侵蚀也多数发生于地形汇聚的坡地、坡脚等处。根据 TOPMODEL 的假设原理, SINMAP 做出如下假设: (1) 地下浅层侧向流沿地形坡度流动。这意味着任意一点的有效汇水面积为单位汇水面积。(2) 任一点的侧向流量与稳定状态下的回水量保持平衡。(3) 任一点的侧向流量是 $T \sin \theta$, 其中 T 为土壤传导系数,既土壤传导率与土壤厚度的积。

由假设(1)(2) 侧向流量

$$q = R \cdot a$$

式中, R 为回水量; a 为单位汇水面积,即每单位等高线长度的上坡区域面积。根据假设(3) 地形湿度指数可定义为:

$$w = \min \left[\frac{R \cdot a}{T \sin \theta}, 1 \right] \quad (3)$$

SINMAP 模型对 TOPMODEL 模型进行了部分修改。首先用垂直于斜坡面的土层厚度代替土壤垂直深度 D , 因此土壤传导系数 T 为土壤传导率乘以土壤厚度,而 TOPMODEL 模型中 T 为土壤传导率乘以土壤垂直深度。其次考虑到水沿着斜坡方向流动,因而用 $\sin \theta$ 代替 TOPMODEL 模型的 $\tan \theta$, 对于坡度较小的斜坡, $\sin \theta$ 和 $\tan \theta$ 之间的相差很小,然而对于引起滑坡现象上升的陡坡区域其差别就显得很重要了,因而 SINMAP 模型的这一修改更为合理。此外 SINMAP 模型的假设(3) 也与 TOPMODEL 模型的假设条件有所区别,假定覆盖于相对不透水基岩上的土层具有一致的土壤传导率,而 TOPMODEL 模型假设土壤传导率随深度增加而减小。模型确定地形湿度指数的最大值为 1, 认为超出量用于形成地表径流。

将公式(3)代入公式(2)得到:

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - \min \left(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r] \tan \phi}{\sin \theta} \quad (4)$$

其中, θ 、 a 可根据 DEM 计算得到, C 、 R/T 、 $\tan \phi$ 为可变参数,根据其可能取值范围分别指定 C 、 R/T 、 $\tan \phi$ 上限与下限,并假定它们在指定范围内均匀分布。利用公式(4)可以计算研究区每一像元的安全系数。当安全系数大于 1 时,斜坡处于稳定状态,数值越高,稳定程度越高;当安全系数等于 1 时,斜坡处于临界平衡状态,此时若在斜坡上施加一个小的滑动干扰力,或在大的荷载作用下,如地震、久暴雨等,斜坡就会出现滑动;当安全系数小于 1 时,斜坡将处于不稳定状态。

2.3 稳定性指数

稳定性指数(SI)的定义来自安全系数。对于某一地面点来说,当 C 、 $\tan \phi$ 取最小值, R/T 取最大值时,此时安全系数 FS 为最小,该点稳定性处于最差状态。当 C 、 $\tan \phi$ 取最大值, R/T 取最小值时,此时安全系数 FS 为最大,该点稳定性处于最佳状态。当 $FS_{\min} > 1$ 时,该点无条件稳定,此时稳定性指数 $SI = FS_{\min}$; 当 $FS_{\min} < 1$, $FS_{\max} > 1$ 时,该点存在发生不稳定的可能,此时稳定性指数 SI 定义为该地面点处于稳定状态的概率,即 $SI = \text{Prob}(FS > 1)$; 当 $FS_{\max} < 1$ 时,该点处于不稳定状态,此时稳定性指数 $SI = \text{Prob}(FS > 1) = 0$ 。

根据上述原理计算各像元的 SI 值,并依 SI 值对研究区各像元的地形稳定性分级。该方法考虑了土壤本身的内聚力和植物根系产生的内聚力对稳定性的作用,同时由于 C 、 R/T 、 $\tan \phi$ 参数具有可变性,能够真实地反映出评估参数的不确定性,因而能更加客观地对地表稳定性做出评价。比值 R/T 做为一个参数,结合了气候与水文因素,利用地形湿度指数的变化范围可以近似地实现对发生暴雨区域进行动态模拟,即考虑了气候条件对地表稳定性的影响,又不需要面对由于处理大量气象数据所带来的计算负担及由此引起的复杂化。

2.4 模型的集成方法

SINMAP 以栅格 DEM 数据为基础,在 GIS 分析软件 ARCVIEW 的平台下采用流域地形分析中常用的 D8 和 D_{∞} 算法^[34,35],首先对流域进行划分,同时计算坡度、坡向、单位汇水面积及流向等,然后耦合 TOPMODEL 的模型算法计算湿度指数,最后模型在集成遥感信息及基于野外调查获取的诸如

土壤、土地利用、植被及水文、气象等专题图件的基础上,耦合大范围斜坡稳定性模型定量评估地表稳定性,并结合野外实际斜坡稳定调查专题图件信息,对模型参数加以率定修正,最终获得可视化的研究区地表稳定性指数专题图。地表稳定性分类等级采用国际标准分类方法。

3 数据准备

SINMAP 方法要求的输入数据有研究区栅格 DEM、滑坡编目和研究区野外校准数据等。DEM 是稳定性分析的基础,利用 DEM 可获取坡度、坡向、汇水面积等稳定性评价模型所需的量化栅格数据,本文采用根据 1: 5 万地形图生成的栅格 DEM,空间分辨率为 30 m(图 2)。此外还需根据土地利用、土壤类型、地质、地貌、气候等专题数据,利用 GIS 专业软件进行空间叠合分析,划分校准区,本文将研究区划分为 5 个校准区。其中土地利用数据是根据 ETM 影像(拍摄时间: 2000- 05- 19, PASS 128, RAW36、37) 经过监督分类得到,首先细分出 14 类,然后根据研究区实际土地利用类型的变化情况,并参考中国科学院资源环境数据中心提供的 1 km 土地利用/ 覆盖栅格数据,将 14 类归并为 6 类(图 3),即阴影面茂密针阔林(47. 6%)、照射面茂密针阔林(26. 1%)、(砂砾) 草地(14. 0%)、苗圃灌木林(9. 1%)、稀疏松杨林(2. 9%)、较密松杨林(0. 3%) 6 类。土壤类型专题图件亦由中国科学院资源环境数据中心提供。

4 模拟结果

根据 SI 值对研究区内各像元的地形稳定性进行分级,分为 6 个级别(表 1)。按照此模型,前三类为无条件稳定区($FS_{min} > 1$),除非对其施加巨大的不稳定因素;第四、五两类地区存在发生不稳定的可能($FS_{min} < 1, FS_{max} > 1$),其中第四类为发生不稳定性概率小于 50% 地区,无需对其施加任何外力都有可能出现不稳定状态;第五类为发生不稳定性概率大于 50% 地区,为保持该区的稳定状态可能需要外力的保护;第六类为不稳定区($FS_{max} < 1$),对这类地区一般都已采取防护措施,此模型不适用这类地区。

图4显示了分析结果的地表稳定性指数分布

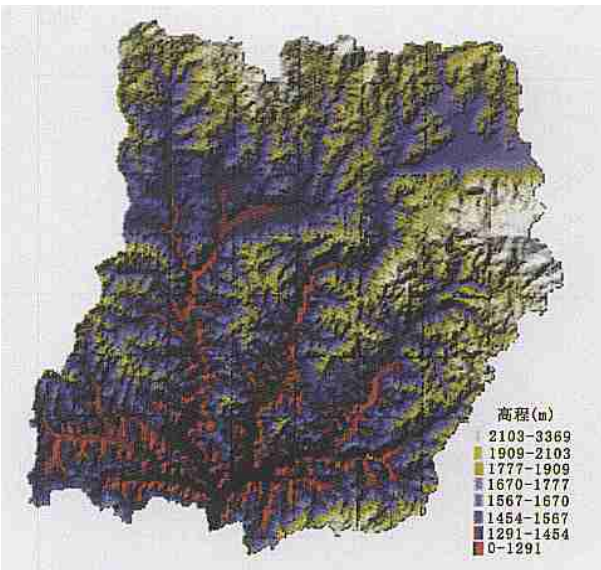


图 2 江口流域 DEM
Fig. 2 DEM of Jiangkou basin

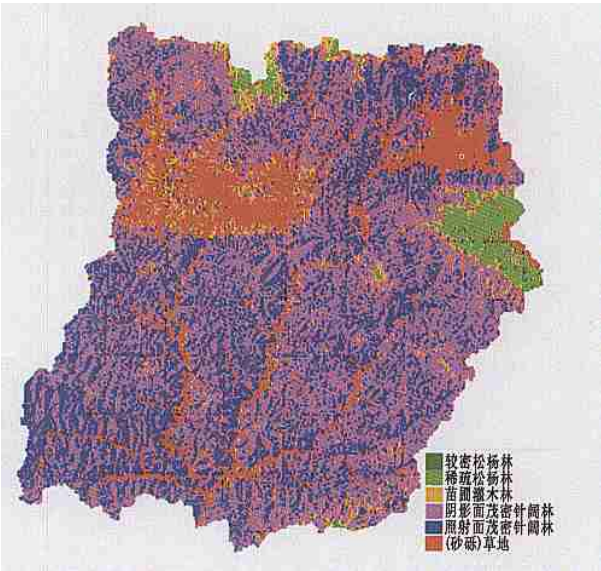


图 3 土地利用类型
Fig. 3 Land use types

图,图 5 显示了分析结果的土壤饱和指数图。表 2 列出了研究区稳定性分级统计摘要。结果表明: SI 分类级别为 upper threshold(较高临界值斜坡区)的区域包括 50 个滑坡,占全部的 42%,而研究区中该类区域面积为 251 km²,占整个研究区面积的 10. 3%,该区平均滑坡密度为 0. 2 个/ km²。SI 分类级别为 lower threshold(较低临界值斜坡区)的区域包括 41 个滑坡,占全部的 34. 5%,而研究区中该类区域面积为 388 km²,占整个研究区面积的

表 1 稳定性分级
Table 1 Stability class definitions

稳定性分级	稳定性指数	预测 状 况	
1	$SI > 1.5$	Stable slope zone	稳定斜坡区
2	$1.5 > SI > 1.25$	Moderately stable zone	中等稳定区
3	$1.25 > SI > 1.0$	Quasi stable slope zone	准稳定区
4	$1.0 > SI > 0.5$	Lower threshold slope zone	较低临界值斜坡区
5	$0.5 > SI > 0.0$	Upper threshold slope zone	较高临界值斜坡区
6	$SI = 0$	Defended slope zone	防护斜坡区

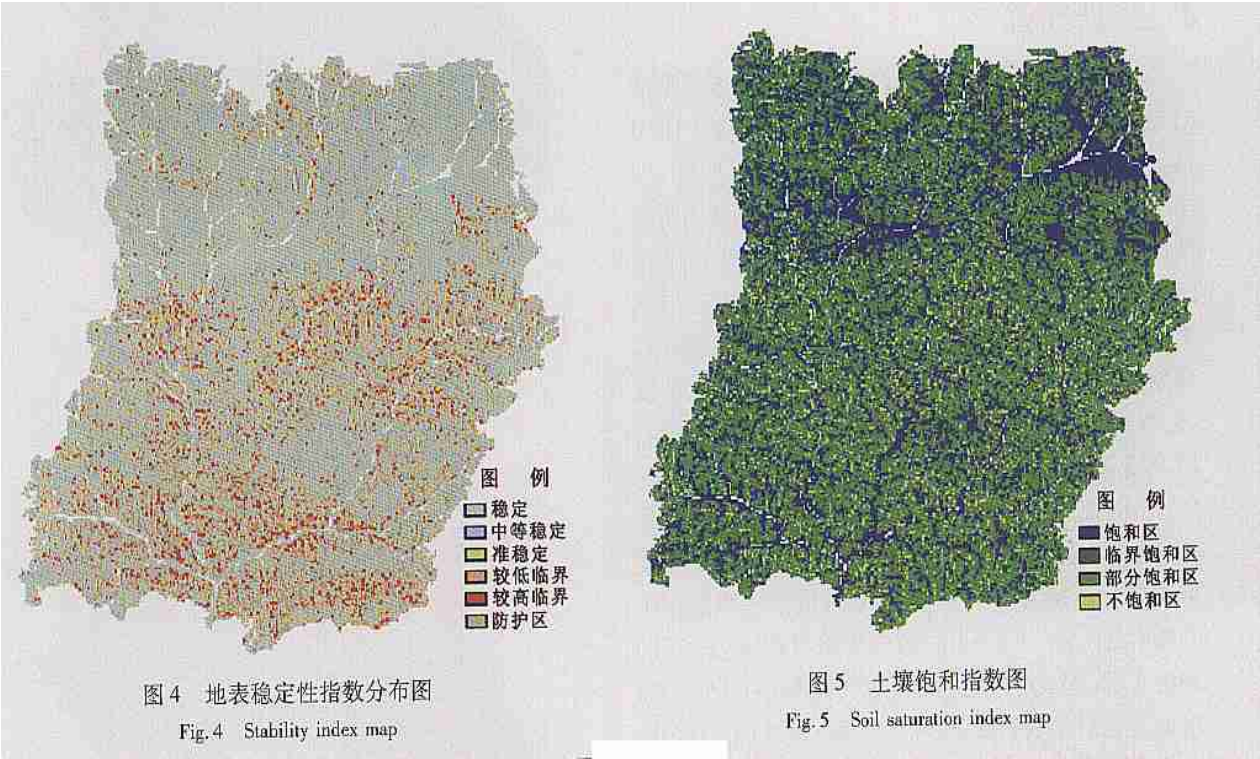


表 2 研究区域地表稳定性统计摘要

	稳定	中等稳定	准稳定	较低临界	较高临界	防护区	合计
区域面积 (km ²)	961	320	378	388	251	133	2431
所占比例 (%)	39.5	13.2	15.5	16.0	10.3	5.5	100
滑坡个数 (个)	0	2	10	41	50	16	119
占总滑坡数比例 (%)	0	1.7	8.4	34.5	42.0	13.4	100
滑坡密度 (个/km ²)	0	0.006	0.026	0.11	0.20	0.12	0.049

16%, 该区平均滑坡密度为 0.11 个/ km²。SI 分类级别为 Quasi- stable(准稳定区) 的区域包括 10 个滑坡, 占全部的 8.4%, 而研究区中该类区域面积为 378 km², 占整个研究区面积的 15.5%, 该区平均滑坡密度为 0.026 个/ km²。SI 分类中 Stable(稳定)、Moderately Stable(中等稳定) 二个类别对应的区域仅有两个滑坡发生, 这二个类别对应区域面积 1 281 km², 占研究区面积的 52.7%。

5 结果与讨论

1) 一个完整的 SINMAP 研究将建立 Slope、Flow Direction、Contributing Area、Stability Index、Saturation 等 9 个地理数据集, 它们各自以主题形式显示在 DEM Map View 中。此外还生成一个研究区域数据的 Slope - Area Plot, 以帮助数据解释及参数校准。Slope- Area Plot 中有 4 种信息, 即

正常栅格数据、滑坡点数据、稳定性指数区域分界线和饱和度区域分界线(图 6)。

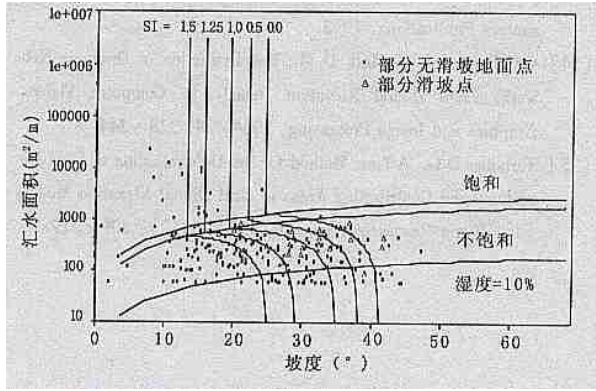


图 6 坡度-面积图表
Fig. 6 Slope area plot

2) 该方法适用于浅层地下水流汇集所引起的浅层平移滑坡现象, 它不适用于地下深部的不稳定现象, 当缺乏校准所需的野外资料时, 这种方法是不适用的。输出结果的精度主要取决于 DEM 数据的精度及已知滑坡的定位精度。输出结果(即稳定性指数)应该解释为发生滑坡的相对危险, 而不是精确的数值概念。

3) 本方法考虑了土壤质地、植被覆盖、土地利用、地质、地貌、气候条件等因素对地形稳定性的影响, 同时也考虑了由这些因素引起的参数的可变性, 因而能够比较客观地对地表稳定性做出评价。本研究使用滑坡点 119 个, 利用 SINMAP 方法做定量分析, 用落入后三类区域的滑坡数量与滑坡总数的比值做概略估价, 显示出 89.9% 的滑坡落入这三类区域, 表明根据此模型得出的预测结果是可信的。

致谢: 本文采用 Robert T. Pack 等人开发的 SINMAP 软件, 另外宫鹏教授、蒋建军博士后为本研究提供多方支持, 在此| 并表示诚挚的谢意。

参考文献:

[1] 张 梁, 张业成. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[2] Cooke R V, Doornkamp J C. Geomorphology in Environmental Management(2nd Edition) [M]. Oxford: Clarendon Press, 1990. 79-105.

[3] 陈 杰, 龚子同, 高尚玉. 干旱地区草场荒漠化及其评价[J]. 地理科学, 2000, 20(2): 176- 181.

[4] 周炳中, 包浩生, 彭补拙. 长江三角洲地区土地资源开发强度评价研究[J]. 地理科学, 2000, 20(3): 218- 221.

[5] 宋长春, 邓 伟. 吉林西部地下水特征及其与土壤盐渍化的

关系[J]. 地理科学, 2000, 20(3): 246- 250.

[6] 聂庆华, 包浩生, 王海英. 基于 GIS 农田土地质量评价与立地分析[J]. 地理科学, 2000, 20(4): 307- 313.

[7] 张科利, 张竹梅. 坡面侵蚀过程中细沟水流动力学参数估算探讨[J]. 地理科学, 2000, 20(4): 326- 330.

[8] 林年丰, 汤 洁. 中国干旱半干旱区的环境演变与荒漠化的成因[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 24- 29.

[9] 张丽萍, 朱大奎, 杨达源. 黄河中游土壤侵蚀与下游古河道三角洲演化的过程响应[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 52- 56.

[10] 张建平. 西南地区山地不同土地退化类型特征及调控途径[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 236- 241.

[11] 崔保山, 刘兴土. 黄河三角洲湿地生态特征变化及可持续性管理对策[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 250- 256.

[12] 袁建平, 蒋定生. 黄土丘陵沟壑区小流域降雨入渗产流点面转化[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 262- 266.

[13] 闫满存, 王光谦, 刘家宏. GIS 支持的澜沧江下游区泥石流爆发危险性评价[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 334- 338.

[14] 唐 川, 朱大奎. 基于 GIS 技术的泥石流风险评价研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 300- 304.

[15] 王家鼎, 惠决河. 黄土地区灌溉水诱发滑坡群的研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 305- 310.

[16] 张 燕, 彭补拙, 高 翔, 等. 人类干扰对土壤侵蚀及土壤质量的影响——以苏南宜兴低山丘陵区为例[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 335- 340.

[17] 陈国阶. 我国西部生态退化的社会经济分析——以川西为例[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 390- 396.

[18] 彭文英, 张科利, 江忠善, 等. 黄土高原坡耕地退耕还草的水沙变化特征[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 397- 402.

[19] 赵 烨, 海春兴, 刘 霄, 等. 滦河源区东沟小流域土壤风蚀特征分析[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 436- 440.

[20] 赵善伦, 尹 民, 张 伟. GIS 支持下的山东省土壤侵蚀空间特征分析[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 694- 699.

[21] 蒋忠信. 藏东南泥石流沟纵剖面演化的最小功模式[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 25- 31.

[22] 张 勃, 程国栋. 黑河绿洲坡面分异演化研究[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 193- 199.

[23] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 230- 235.

[24] 罗利芳, 张科利, 李双才. 撂荒后黄土高原坡耕地土壤透水性 and 抗冲性的变化[J]. 地理科学, 2003, 23(6): 728- 733.

[25] de Jong S M, Paracchini M L, Bertolo F, et al. Regional Assessment of Soil Erosion Using the Distributed Model SEMMED and Remotely Sensed Data[J]. Catena, 1999, 37: 291- 298.

[26] 《工程地质手册》编辑委员会: 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.

[27] Carrera A M, Cardinali M, Detti R, et al. GIS Techniques and statistical models in evaluating landslide hazard[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16: 427- 445.

[28] Dietrich W E, Wilson C J, Montgomery D R, et al. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model [J]. The Journal of Geology, 1993,

101: 259– 278.

[29] Montgomery D R, Dietrich W E. A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding[J]. Water Resources Research, 1994, 30(4): 1153– 1171.

[30] Wu W, Sidle R C. A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Watersheds[J]. Water Resources Research, 1995, 31(8): 2097– 2110.

[31] 水利部长江水利委员会. 长江流域地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1999.

[32] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing model of basin hydrology [J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24(1): 43– 69.

[33] Beven K J. Topmodel [A]. In: Singh V P. Chapter 18 in Computer Models of Watershed Hydrology [C]. Littleton : Water Resources Publications, 1995.

[34] O' Callaghan J F, Mark D M. The Extraction of Drainage Networks From Digital Elevation Data[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 328– 344.

[35] Tarboton D G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models[J]. Water Resources Research, 1997, 33(2): 309– 319.

Remote Sensing & GIS-Based Distributed Hillslope Stability:
Quantitative Evaluation Model

WU Li^{1,2}, ZHANG WarrChang¹, ZHANG Dong¹, ZHOU Jie³

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing UniversityNanjing, Jiangsu 210093; 2. Department of Geography Information Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210008; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710075)

Abstract: Natural disasters such as landslide and soil erosion are severe in China. Therefore, effective evaluation of slope stability further provides the warning for local/regional soil erosion, which is essential to the precise prediction and effective prevention of these catastrophes. Many approaches have been proposed in assessing slope stability and landslide hazards in the literature, the commonly-used approaches include (1) field inspection using a checklist to identify sites susceptible to landslides; (2) projection of future patterns of instability from analysis of landslide inventories; (3) multivariate analysis of factors characterizing observed sites of slope instability; (4) stability ranking based on criteria such as slope, lithology, landform, or geologic structure; and (5) failure probability analysis based on slope stability models with stochastic hydrologic simulations. Each of these is valuable for certain applications. None, however, takes full advantage of the fact that debris flow source areas are, in general, strongly controlled by surface topography through shallow subsurface flow convergence, increased soil saturation, increased pore pressures and shear strength reduction. In this study, a distributed modeling scheme based on digital elevation model (DEM), takes advantage of geographic information system (GIS) and remote sensing information coupling with the Infinite Slope Stability Model to quantify topographic attributes related to slope instability and landsliding so as to mapping the hillslope stability entitled as SINMAP was introduced in detail, and its application to a 2431 km² watershed in Shanxi Province was conducted and tested with the discussion of the field observations. The experimental application indicated its good applicability and operational value in quantitative evaluation of surface stabilities in basin scale areas.

Key words: remote sensing; GIS; hillslope stability; SINMAP; Infinite Slope Stability Model; Surface Stability Index