

不同时空尺度的泥石流预报技术体系

韦方强^{1,2}, 徐晶³, 江玉红^{1,2}, 张继^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

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; 3 中国气象局国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 降水诱发的泥石流是我国主要的泥石流灾害类型。降水是该类泥石流灾害预报的关键动态因子, 不同的降水监测和预报技术与方法决定了泥石流预报的不同时空尺度。分析了不同降水监测和预报技术的时空尺度和时空分辨率, 并以此为基础, 结合下垫面条件分析, 建立了不同时空尺度的泥石流预报技术体系框架: 大中区域泥石流预报(数值天气预报)—中小区域泥石流预报(多普勒天气雷达)—单沟泥石流预报(多普勒天气雷达和地面降水遥测)。具体的技术体系包括下垫面条件分析、降水监测和预报方法以及预报结果的表述与发布。

关键词: 泥石流, 预报, 技术体系, 时空尺度

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

随着我国山区经济的快速发展, 泥石流灾害造成的人员伤亡和经济损失日趋严重, 泥石流预报作为重要的减灾手段之一, 得到高度重视, 并在国家、省(市)和地区(市、州)等不同层次相继开展了泥石流灾害预报研究和服务。然而, 由于泥石流形成机理的复杂性和泥石流发生的不确定性, 使泥石流预报长期处于较低的水平, 是泥石流研究中的一大难点和热点。在国际上, 前苏联于20世纪70年代就开展了泥石流预报的研究, 不仅开始泥石流时间预报和空间预报研究, 还提出了泥石流规模和特征值的预报^[1]; 日本在泥石流监测预警的基础上于70年代后期开展了泥石流预报研究^[2,3], 美国联邦地质调查局于80年代在加利福尼亚开始开展泥石流预报的实验研究^[4]。在我国, 泥石流预报的理论研究始于20世纪90年代, 对泥石流单沟预报^[5]、区域预报^[6]和交通线路^[7,8]开展了一系列的研究, 但直至2000年以后才真正开始泥石流预报的应用研究, 并向公众提供预报服务^[9-11]。

虽然, 国内外均开展了大量的泥石流预报研究

工作, 但泥石流预报仍处于初级阶段, 在技术和方法上均不成熟, 尚未形成完整的技术体系。为了逐步建立完整的泥石流预报技术体系, 规范泥石流预报业务化程式, 提高泥石流预报水平, 本文以泥石流预报理论研究为基础, 利用降水监测和预报的现代技术, 初步建立不同时空尺度的泥石流预报技术体系, 以满足不同尺度的泥石流减灾需求。

1 泥石流及其预报类型

1.1 泥石流类型

根据不同的分类标准可以将泥石流分成不同的类型。但在泥石流形成的三大条件(能量、物质和水源)中, 能量和物质在一定时段内是相对稳定的, 只有水源条件是动态变化的, 是泥石流的激发条件, 是泥石流预报中的动态输入因子, 因此, 在泥石流预报中一般根据水源类型进行分类。根据激发泥石流形成的水源类型不同, 可以将泥石流分成降水泥石流、冰川泥石流、溃决泥石流。

收稿日期 (Received date): 2007-04-15; 改回日期 (Accepted): 2007-08-09。

基金项目 (Foundation item): 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX3-SW-352)。[This research was supported by the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (KZCX3-SW-352).]

作者简介 (Biography): 韦方强 (1968-, 山东临沭人, 博士、研究员, 主要从事山地灾害减灾理论和技术研究。[Fangqiang Wei (1968-), born in Linshu Shandong PhD, Professor Undertaking research on theory and technology of mountain hazards mitigation. Email: fqw@imde.ac.cn]

降雨泥石流是由降雨直接引发的泥石流, 广泛分布于我国除江苏、上海、澳门以外的所有省(市、自治区), 数量众多。冰川泥石流是现代冰川融水引发的泥石流, 仅分布在西藏、四川、青海、甘肃和新疆等省(区)有现代冰川发育的高山地区, 且数量较少。溃决泥石流是因自然或人工库坝溃决而形成的泥石流, 分布无规律, 数量很少。因此, 降水泥石流是我国主要的泥石流类型, 本文所探讨的就是该类型泥石流的预报。

1.2 泥石流预报类型

作者(2004)按照不同的分类方法将泥石流预报划分成不同的类型^[12]。根据泥石流减灾的不同需求和现实技术条件, 本研究以时空尺度为基础, 主要对区域泥石流预报、单沟泥石流预报进行探讨, 建立不同时空尺度的泥石流预报体系。

2 泥石流预报的时空尺度

2.1 降水监测预报技术和方法

随着计算机和遥感技术的发展, 降水监测、预报技术发展迅速。目前常用的降水监测和客观预报技术主要包括: 数值天气预报、气象卫星、多普勒天气雷达和地面雨量遥测等。

数值天气预报是在给定初始条件和边界条件的情况下, 数值求解大气运动基本方程组, 由已知的首始时刻的大气状态预报未来时刻的大气状态^[13]。数值天气预报是目前天气预报主要手段, 现在根据不同的服务要求, 可以由全球和区域数值预报模式提供大尺度和中小尺度的客观定量降水预报产品, 分别提供给国家、省(市、区)和地区(市、州)三级气象台使用。

气象卫星遥感资料既可以作为数值天气预报模式的输入资料, 通过资料同化来帮助确定更为准确的初始场, 同时, 利用气象卫星遥感资料所进行的降

水量估计, 以其较高的时空分辨率和广泛的覆盖范围, 大大弥补了常规雨量观测过于离散和单个天气雷达探测范围过小的不足^[14]。特别是静止气象卫星以其较高的时间和空间分辨率, 能够很好地反映快速变化的中尺度对流系统所产生的强降水。又可以直接制作云和降水等天气现象的短期预报^[15]。在现有的气象预报业务中, 气象卫星遥感已经成为天气预报的一种辅助手段。

多普勒天气雷达是新一代的天气雷达, 具有全天候的探测能力, 可以提供丰富的雷达产品, 为开展短时灾害性天气系统的监测和预报提供强有力的手段。由于多普勒天气雷达采用了先进的多普勒技术, 在杂波抑制能力方面有了很大的提高, 大大提高了定量估测降水的精确性和准确性^[16]。根据中国气象局《天气雷达发展规划(2001~2015年)》, 我国将在全国范围内建设158部由S波段和C波段多普勒天气雷达组成的新一代天气雷达网, 截至2006年已完成112部。该天气雷达网已成为灾害性天气监测和短时天气预报的重要手段。

地面雨量遥测是通过无线电台、移动通信网络或卫星通讯将雨量传感器探测的地面降水信息实时传输到数据接收中心的雨量实时监测技术。中国气象局已开始在全国建设自动气象站网, 除提供地面雨量实时监测外, 还提供地面气压、气温、湿度、风向、风速、雨量、地温(0~320 cm)、辐射、日照、蒸发等的实时监测。由于雨量遥测设备价格低廉, 在重点地区容易加密监测。

2.2 不同降水预报的时空尺度

由上所述, 根据天气预报技术发展和我国天气预报业务建设状况, 数值天气预报、多普勒天气雷达和地面雨量遥测可直接应用于泥石流预报中, 作为不同时空尺度降水预报的主要技术。根据这三种降水监测和预报技术的特点和业务运行情况, 它们具有不同的时空尺度, 见表1。

表 1 不同降水监测和预报方法的时空尺度
Table 1 Time-space scales of different methods of rainfall monitoring and forecast

预报方法	数值天气预报	多普勒天气雷达	地面雨量遥测
时间尺度	3~36 h	1~3 h	
时间分辨率	1 h	6 min	1 min
空间尺度	全球-区域	小区域-中区域(扫描半径230 km)	单沟
空间分辨率	60 km×60 km~5 km×5 km	1 km×1 km	不确定

当然, 这些预报方法的时空尺度是对常用预报方法综合分析的结果, 既可以保障较高的预报准确性, 又尽量能够满足泥石流预报的要求。例如, 数值天气预报方法可以提供短期至中期的天气预报, 空间分辨率从理论上可以从数米至上千千米 (例如 WRF 模式)。但是, 实际应用的数值天气预报模式在 12~ 24 h 和 15 km 平均格距的时空尺度内可以输出可供参考的定量降水预报。当然, 在实际应用

中, 可以根据需要进行内插分析。

2.3 泥石流预报的时空尺度

降水监测和预报数据是泥石流预报中动态输入的数据, 其时空尺度在一定程度上决定了泥石流预报的时空尺度。根据降水监测和预报的空间尺度, 可以将泥石流预报化分成大中区域预报、中小区域预报和单沟预报, 不同泥石流预报的时空尺度见表 2。

表 2 泥石流预报的时空尺度
Table 2 Time-space scales of debris flow forecast

预报类型	大中区域预报	中小区域预报	单沟预报
时间尺度	12~ 24 h	1~ 3 h	0.5~ 1 h
时间分辨率	12 h	1 h	10 min
空间尺度	国家 - 省 (市、区)	省 (市、区) - 地区 (市、州)	单沟
空间分辨率	3 km × 3 km (15 km × 15 km)	3 km × 3 km	0.1~ 100 km ²

其中, 中小区域泥石流预报的空间尺度是省 (市、区) - 地区 (市、州), 但在实际应用中一般为 1 部多普勒天气雷达的扫描半径区域。多普勒天气雷达的反射率探测距离为 1~ 460 km, 平均径向速度和频谱宽度的探测距离为 1~ 230 km, 但由于受山体阻挡和地球曲率的影响, 多普勒天气雷达的有效扫描半径一般小于 230 km。

区域泥石流预报的空间分辨率与降水监测预报的空间分辨率不一致, 需要进行空间分辨率的匹配。根据对云南、四川、重庆和贵州 4 省 (市) 已查明的 7 561 条泥石流沟的统计分析, 80% 以上的泥石流沟流域面积在 10 km² 以下, 李泳 (2002) 对全国泥石流沟流域面积的统计结果也是如此^[17], 因此, 3 km × 3 km 的空间分辨率对地面因素进行分析基本可以包含绝大部分泥石流沟。但是, 这一空间分辨率与数值天气预报和多普勒天气雷达的空间分辨率 (15 km × 15 km 和 1 km × 1 km) 不一致, 经过匹配后的大中区域泥石流预报的空间分辨率为 15 km × 15 km, 中小区域泥石流预报的空间分辨率为 3 km × 3 km。

3 泥石流预报的技术体系

根据目前泥石流形成的研究以及降水监测、预报的技术水平, 泥石流预报体系由大中区域泥石流

预报、中小区域预报和单沟泥石流预报构成。大中区域泥石流预报提供全国、省 (市、区) 或跨省 (市、区) 区域级的泥石流灾害短期预报, 较宏观地指导预报区域内的泥石流减灾; 中小区域泥石流预报提供地区 (州、市) 级的泥石流短时预报, 为预报区域内的泥石流减灾提供精细化指导; 单沟预报主要针对有城镇、重要交通干线、重大工程等危害对象的关键泥石流沟进行预报, 不仅要提供泥石流发生可能性的预报, 甚至还要提供灾害规模和危害范围的预报。这一泥石流预报体系可以完整地提供不同时空尺度的泥石流预报服务, 满足不同层次的泥石流减灾需要。其主要技术体系如下。

3.1 下垫面泥石流形成条件分析

下垫面泥石流形成条件分析是泥石流预报的基础。根据泥石流形成所必须的基本条件, 应对下垫面能量和物质条件进行分析。能量条件主要由地形条件决定, 包括相对高度和坡度, 为泥石流形成提供势能条件和能量转化梯度。物质条件主要指松散固体物质储量, 受多种因素的控制, 主要的控制因素有地层岩性、地质构造、地表植被和人类活动等, 其中地表植被和人类活动可以通过土地利用条件来反映。这些因素的具体分析方法和评价模型较多, 这里不作详细论述, 仅对分析所需的相关分析资料提出具体的技术要求, 见表 3。

表 3 下垫面分析资料的技术要求

Table 3 Technical requirement of the information for earth surface analysis

预报类型	大中区域预报	中小区域预报	单沟预报
地形图	≥1: 25万	≥1: 5万	≥1: 1万
地质图	≥1: 20万	≥1: 5万	≥1: 1万
土地利用图	≥1: 20万	≥1: 5万	≥1: 1万
工程地质图	\	\	≥1: 1万

3.2 降水监测与预报方法

降水的监测预报为泥石流预报提供前期降水和预报降水支持, 降水监测和预报的准确性直接影响

泥石流预报的准确性。不同层次的泥石流预报需要不同的降水监测和预报技术支持, 相关技术方法见表 4。

表 4 不同泥石流预报类型的降水监测和预报方法

Table 4 Methods of rainfall monitoring and forecast for different debris flow forecasts

预报类型	大中区域预报		中小区域预报		单沟预报	
降水监测和预报方法	地面降水监测	数值天气预报	地面降水监测	多普勒天气雷达	多普勒天气雷达	地面降水雨量遥测
监测预报时间	前期 20 d	未来 12~ 24 h	前期 20 d	未来 1~ 3 h	未来 1~ 3 h	前期 20 d+ 实时
时间分辨率	24 h	1 h	25 h	0.5 h	0.5 h	10 min
空间分辨率	可内插	≥15 km × 15 km	可内插	≥3 km × 3 km	≥3 km × 3 km	据流域而定

3.3 泥石流预报结果的表述与发布

3.3.1 区域泥石流预报结果的表述与发布

由于泥石流预报理论和方法均未成熟, 并且降水预报的准确性还有待进一步提高, 目前区域泥石流预报的准确率还处于较低水平, 预报结果仅能使用泥石流发生概率来表述。即使如此, 在现有理论和技术条件下也无法给出准确的泥石流发生概率预报, 采用模糊数学方法将泥石流发生概率概化成若干概率等级是比较实际的。如图 1 所示, 将泥石流发生概率概化成 5 个等级, 从一级至五级分别代表泥石流发生概率低、较低、中等、高、很高。若泥石流预报结果为一级或二级, 泥石流发生的概率较低, 不向公众发布; 若泥石流预报结果为三级至五级, 泥石流发生的概率较高, 应向公众发布。在预报结果发布图中, 三级用黄色表示, 代表泥石流黄色预警; 四级用橙色表示, 代表泥石流橙色预警, 五级用红色表示, 代表泥石流红色预警。这样既可以给公众以清晰的泥石流灾害预警等级, 又符合国际上灾害预警惯例。

3.3.2 沟谷泥石流预报结果的表述与发布

由于危险区有重要保护对象, 沟谷泥石流预报结果应用“发生”或“不发生”表述, 给危险区的人员以明确的预报结果, 以便决定是否撤离危险区。然

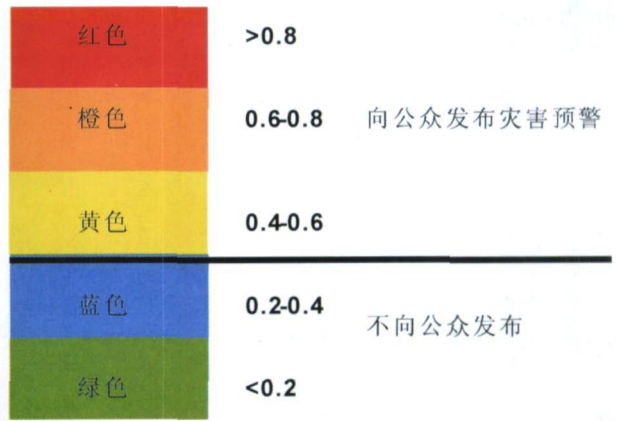


图 1 区域泥石流预报结果的表述与发布示意图

Fig 1 The result of debris flow forecast and its release

而, 泥石流漏报和空报均不可避免, 这两种错报均会造成一定的损失, 这就要求在进行泥石流预报时必须考虑漏报和空报所造成的损失, 使总平均损失达到最小^[18]。

4 结论

1 降水诱发的泥石流是我国泥石流灾害的主要类型, 泥石流灾害预报体系即为降水诱发泥石流灾

害的预报体系。

2 泥石流预报是对降水作用到下垫面上是否引发泥石流的判断,降水是泥石流预报中的关键动态因子。不同的降水监测、预报技术和方法决定了泥石流预报的不同时空尺度,构成了泥石流预报体系框架:大中区域泥石流预报(数值天气预报)——中小区域泥石流预报(多普勒天气雷达)——单沟泥石流预报(多普勒天气雷达和地面降水遥测)。

3 区域泥石流预报结果用泥石流发生的概率等级来表述,一级和二级泥石流发生概率较低,三级至五级泥石流发生概率依次增高,分别用黄色、橙色和红色向公众发布不同等级灾害预警。沟谷泥石流预报使用明确的泥石流“发生”或“不发生”向公众发布。

参考文献 (References)

- [1] Fleishman S. M. Debris flow [M]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978.
- [2] 武居有恒. 土石流灾害知に 関す研究の 現状 [J]. 新砂防, 1979, 31(4): 46~52
- [3] 武居有恒. 地すべり. 崩壊. 土石流—予測と 対策 [M]. 鹿岛出版社, 1981.
- [4] Cannon S. H., Ellen S. D. Rainfall that resulted in abundant debris-flow activity during the storm. Landslides, Floods and Marine effects of the storm of January 3–5 1982, in the San Francisco Bay Region, California [A]. In: U. S. Geological Survey Professional Paper [C] (Eds. Ellen S. E., Wicored G. F.), 1988: 1434, 27~33
- [5] Chen Jingyu. Forecast of debris flow induced by rainfall in Jiangjia Valley [A]. In: Observation and Research of debris flow in Jiangjia Valley, Yunnan [C]. Beijing: Science Press (Eds. Wu Jishan, Kang Zhicheng and Tian Lianquan), 1990: 197~213 [陈景武. 蒋家沟暴雨泥石流预报. 见: 吴积善, 康志成, 田连权等主编. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1990: 197~213]
- [6] Tan Wanpei, Wang Chenghua and Yao Lingka *et al*. Regional Forecast of Debris Flow Induced by Rainfall Storm [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994. [谭万沛, 王成华, 姚令侃, 等. 暴雨泥石流的区域预测与预报 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994]
- [7] Tan Bingyan. Results of study on the prediction of rainstorm debris flow along Mountain railway [J]. *China Railway Science*, 1994, 15(4): 67~78 [谭炳炎. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究 [J]. 中国铁道科学, 1994, 15(4): 67~78]
- [8] Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences Research and Prevention of Debris Flow [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989: 249~262 [中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989: 249~262]
- [9] Liu Chuanzheng. Method of meteorological forecast and warning of geological hazards and its application in China [J]. *Geotechnical Engineering World*, 2004, 7(7), 17~18 [刘传正. 中国地质灾害气象预警方法与应用 [J]. 岩土工程界, 2004, 7(7), 17~18]
- [10] Wei Fangqiang, Gao Kechang, Hu Kaiheng. Method of debris flow prediction based on numerical weather forecast and its application [A]. In: G. Lorenzini, C. A. Brebbia & D. E. Emmenoullidis, ed. Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows [C]. Southampton: WITpress, 2006: 37~46
- [11] Yu Shuhua, Xu Huiming and He Guangbi *et al*. Interpretation of a numerical model—the mud-rock flow landslide forecasting system of Sichuan Basin [J]. *Meteorology*, 2005, 31(6): 47~50 [郁淑华, 徐会明, 何光碧, 等. 基于数值预报模式的四川盆地泥石流滑坡预报系统 [J]. 气象, 2005, 31(6): 47~50]
- [12] Wei Fangqiang, Cui Peng, Zhong Dunlin. Classification of debris flow forecast and its present status and development in research [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(5): 10~15 [韦方强, 崔鹏, 钟敦伦. 泥石流预报分类及其研究现状和发展方向 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(5): 10~15]
- [13] Shen Tongli, Tian Yongxiang, Ge Xiaozheng *et al*. Numerical Weather Forecast [M]. Beijing: Press of Meteorology, 2003. [沈桐立, 田永祥, 葛孝贞, 等. 数值天气预报 [M]. 北京: 气象出版社, 2003]
- [14] C. Kidd. Satellite rainfall climatology: a review [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(9): 1041~1066
- [15] M. J. Bader, G. S. Forbes, J. R. Grant. Images in Weather Forecasting: A Practical Guide for Interpreting Satellite and Radar Imagery [M]. The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995
- [16] Liu Zhicheng, Li Bo and Zhai Wuquan. The System Environment and Running Management of the New Generation Weather Radar [M]. Beijing: Meteorology Press, 2002 [刘志澄, 李柏, 翟武全. 新一代天气雷达系统环境及运行管理 [M]. 北京: 气象出版社, 2002]
- [17] Li Yong, Hu Kaiheng and Cui Peng. Morphology of Basin of Debris Flow [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(1), 1~11
- [18] Wei Fangqiang, Hu Kaiheng and Cui Peng *et al*. Model of debris flow forecasting under different loss factors [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(1), 97~102 [韦方强, 胡凯衡, 崔鹏, 等. 不同损失条件下的泥石流预报模型 [J]. 山地学报, 2002, 20(1), 97~102]

The System of Debris Flow Prediction with Different Time and Space Scales

WEI Fangqiang^{1,2}, XU Jing³, JIANG Yuhong^{1,2}, ZHANG Ji^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. National Meteorology Center of Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract The debris flow induced by rainfall is the main type of debris flow in China. Rainfall is a key dynamic factor in the prediction of this kind of debris flow. And the technologies and methods of rainfall monitoring and forecast determine the time and space scales of debris flow prediction. The time and space scales of rainfall monitoring and forecast and their time and space resolutions are analyzed. Based on this analysis and combining to the analysis on the conditions of the underlying surface, the frame of debris flow prediction system is setup. Debris flow prediction for large and medium regions (numerical weather forecast)—debris flow prediction for medium and small regions—debris flow prediction for given debris flow valley. The technology system of debris flow prediction includes the analysis on the underlying surface, the technology and methods of rainfall monitoring and forecast, and the presentation and issue of debris flow prediction results.

Key words debris flow, prediction, technology system, time and space scales

《山地学报(百期光盘)》征订启事

《山地学报》系中国自然科学核心期刊、中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库源刊,被多种文摘收录,曾获全国、中国科学院、四川省优秀科技期刊奖。

《山地学报》是目前我国唯一专门报道山地科学研究理论与山区开发、环境整治、生态建设实践相结合的综合科技期刊。内容涵盖自然科学与人文科学两大门类中与山地有关的学科,重点报道山地资源开发与山地生态环境演变、山区工程建设与山地灾害防治(滑坡、泥石流、水土流失、山洪等)、山区社区发展与城镇规划、山区经济发展与产业结构调整等领域的理论文章、应用技术、研究成果和实验方法等内容。

为适应科技文化传播的发展需要,《山地学报》编辑部与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社联合编辑,由清华同方电子出版社出版《山地学报(百期光盘)》。该光盘收录了《山地学报》(原名《山地研究》)自1983年创刊至2003年中文版共100期及其间编辑出版的8期增刊,按栏目分为山地研究基础理论、山地环境、山地灾害及其防治等。

《山地学报(百期光盘)》订价78元,适合于从事上述工作的科技人员、决策者、管理干部和大专院校师生阅读、参考;适合于各级综合图书馆(室)、政府的国土资源、水利电力、农林牧等部门的资源(信息)室查阅和收藏。

凡需订购者请与本刊编辑部联系。

联系地址:610041 成都市人民南路四段9号中科院成都山地所《山地学报》编辑部 冯海燕

联系电话:(028)85223826 E-mail:hyfeng@inde.ac.cn