

# 强震区滑坡活动强度的演变及敏感性评价

陈明, 蔡英桦, 王晓迪, 杨涛, 甘伟

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

**摘要:** [目的] 探讨汶川地震强震区滑坡的活动强度演变与敏感性, 为滑坡、泥石流等地质灾害风险管理提供依据。[方法] 选取四川省都江堰市龙池镇龙溪河 12 条泥石流流域为研究区, 通过对研究区震后 4 期遥感影像的滑坡解译分析, 研究震后滑坡的活动演化特征; 同时利用概率综合判别法—层次分析法对滑坡物源进行多期敏感性评价。[结果] 地震后该区域产生了 825 个强震滑坡; 2009—2017 年, 在强震滑坡区域外新增 376 个滑坡, 至 2017 年, 仍活动的滑坡数量减少到 368 个, 占滑坡总数的 30.6%, 同时利用曲线下面积(AUC)检验多期敏感性评价结果, 准确率为 75.6%~81.4%, 评价效果较好。[结论] 强震区震后活动滑坡数量及高敏感性区域面积整体表现降低趋势, 表明震后滑坡处于逐步恢复过程, 强震区的地质灾害活动但活动强度仍远远高于震前。

**关键词:** 强震区; 滑坡活动强度; 敏感性; 演变

**文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-288X(2019)01-0239-05      **中图分类号:** P315; P642.21; P642.22

**文献参数:** 陈明, 蔡英桦, 王晓迪, 等. 强震区滑坡活动强度的演变及敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 239-243. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.038; Chen Ming, Cai Yinghua, Wang Xiaodi, et al. Evolution and susceptibility evaluation of landslide activity intensity in meizoseismal area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 239-243.

## Evolution and Susceptibility Evaluation of Landslide Activity Intensity in Meizoseismal Area

Chen Ming, Cai Yinghua, Wang Xiaodi, Yang Tao, Gan Wei

(State Key Laboratory for Geo-hazard Prevention and Geo-environment

Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the evolution and susceptibility of landslide activity intensity in meizoseismal area of Wenchuan earthquake in order to provide important practical basis for landslide and debris flow risk management. [Methods] Twelve debris flow basins were selected as study area along Longxi River in Longchi Town, Dujiangyan City, Sichuan Province. Based on the interpretation analysis of the remote sensing images after the earthquake, the evolution characteristics of the landslide after earthquake were studied. At the same time, the probability comprehensive discriminant analysis method and the analytic hierarchy process were used to analyze the susceptibility of landslide. [Results] The 825 co-seismic landslides occurred in the region after the earthquake, and the intensity of landslide activity reduced gradually. From 2009 to 2017, 376 new landslides occurred outside of the co-seismic landslide areas. In February 2017, the number of active landslides reduced to 368, accounting for 30.6% of the total landslides. The area under curve (AUC) method was used to test the multi-period evaluation results, the accuracy was 75.6% to 81.4%, and the evaluation results were satisfactory. [Conclusion] The number of active landslides after earthquakes and the area of high sensitive zone in meizoseismal area show a decreasing trend, indicating that the landslides after earthquakes are in the process of gradual recovery, but the activity intensity of geological hazards is still far higher than that before the earthquake.

**Keywords:** meizoseismal area; landslide activity intensity; susceptibility; evolution

在强震作用的影响下,震区山地区域地质环境变得更加脆弱,大量的强震滑坡被诱发,对当地居民及环境造成巨大损失。1999 年台湾集集大地震引发 26 000 个强震滑坡<sup>[1-2]</sup>,2008 年汶川地震诱发的强震滑坡多达 56 000 个<sup>[3]</sup>。地震之后,大量滑坡松散物堆积于坡体及沟道中,为次生滑坡及泥石流提供了丰富物源。据黄润秋<sup>[4]</sup>分析统计,汶川地震崩塌滑坡所形成的固体松散物总体积达  $5.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,在强降雨作用下,极易再次引发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害,例如“8·13”和“7·10”泥石流事件,震区映秀镇周边及沿岷江流域爆发了大规模群发性泥石流。地震对西南山区的影响是长期的,唐川<sup>[5]</sup>研究表明,汶川地震至少在近 10~15 a 内地震高烈度区的滑坡、泥石流活动处于高峰期,对于震后城镇周边滑坡泥石流的风险评价将成为未来地质灾害防治的重点。

目前针对滑坡动态演变及敏感性分析研究主要在遥感影像动态分析、单体滑坡崩塌敏感性分析和区域地质灾害的危险性研究<sup>[6-8]</sup>。唐川等<sup>[9]</sup>基于遥感技术和 GIS 分析功能,以北川县 8 条泥石流沟作为研究区域,对震后及暴雨后泥石流物源变化特征进行了遥感动态分析,重点分析了滑坡崩塌堆积体变化。常鸣等<sup>[10]</sup>以汶川地震高烈度区的龙池镇境内 12 条泥石流沟为研究区,利用遥感的手段,详细论述了“5·12”震前、震后、“8·13”暴雨后研究区泥石流物源的变化情况;蒋志林等<sup>[11]</sup>结合地震前、后和 8.14 泥石流发生后的 3 期遥感影像,分析了汶川地震区红椿沟泥石流形成物源量动态演化特征。目前,针对泥石流流域滑坡动态变化以及发展演变方面做了大量的研究,但主要是以滑坡面积与体积变化为主,对于滑坡的活动强度及敏感性的演变仍相对较少。本文拟以龙池地区 12 条典型泥石流沟,通过 2009 年、2011 年、2013 年、2017 年 4 期影像解译的滑坡物源面积变化数据,通过统计分析得到每期的滑坡强度分级,探讨震后泥石流流域内滑坡活动强度长期演变规律。在滑坡活动强度分级基础上,利用概率综合判别法—层次分析法对滑坡物源进行敏感性分析,得到多期敏感性评价图,以期对龙池流域及同类强震区地质灾害风险评价、预测预报和重建规划提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于四川省都江堰市区西北的龙池镇,龙溪河流域内整体地势北高南低,属构造侵蚀低—中山地貌、堆积侵蚀低山地貌及构造侵蚀溶蚀地貌,龙溪河主沟长 18 km,在平面上呈树枝状分布,两侧共发育有 48 条泥石流沟<sup>[12]</sup>。研究区属中亚热带湿润季

风气候区,降水量在时间上分配严重不均,夏季雨水丰沛,约占全年降水量的 80%,多年平均降水量 1 134.8 mm。龙溪河流域内出露的岩性主要以花岗岩、砂岩、泥岩、碳质页岩为主,安山岩、凝灰岩及安山玄武岩次之。由于龙溪河流域内有虹口—映秀断裂北支和虹口—映秀断裂南支穿过,导致流域内岩层破碎,极产生崩塌滑坡。汶川地震后,龙溪河流域发育有大量的崩塌滑坡及松散堆积物,于 2010 年 8 月 13 日,汶川震区映秀镇、都江堰市龙池镇降持续性暴雨引发龙溪河流域内泥石流群发事件,冲毁及淤埋居民建筑,对当地居民造成巨大损失。本文选取 12 条重点泥石流沟作为研究对象,研究区面积为 26.15 km<sup>2</sup>。

## 2 滑坡活动强度演变特征

本文以 20090210 的 Spot5 影像,20110426,20130731,20170226 的分辨率 0.5 m 的 Worldview-2 影像为基础数据,通过 ArcGIS 空间解译能力,对 4 期遥感影像中的滑坡进行解译。汶川地震诱发大量滑坡,新生的滑坡活动强度高,为此以震后 2009 年滑坡为基础,后三期影像解译均在上一期的基础上进行,通过滑坡活动面积变化率,将滑坡活动强度分为 5 级:第 5 级为新增滑坡,活动强度极高;第 4 级为古滑坡有大于 2/3 面积仍在活动,活动强度为高;第 3 级为古滑坡有 2/3~1/3 面积仍在活动,活动强度为中;第 2 级为古滑坡小于 1/3 面积仍在活动,活动强度为低;第 1 级为滑坡没有活动,植被恢复良好,活动强度最低。通过对每期影像解译的滑坡统计分析,获得滑坡活动强度数据(详见表 1)。为了更加直观地显示滑坡活动强度演变规律,选取较为典型的 4 期活动强度分级。综合分析表明,2009 年研究区滑坡面积大幅增加,相对于震前增加了  $3.28 \times 10^6 \text{ m}^2$ ,活动强度极高。2009—2011 年期间,由于暴雨及泥石流事件的影响,滑坡新增 326 个,面积约为  $1.43 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,滑坡活动强度较 2009 年有所降低,但仍有 57.3% 的滑坡活动强度在 3~5 级内。2013—2017 年,滑坡整体处于恢复稳定阶段,滑坡活动强度较前期普遍降低,至 2017 年 69.4% 的滑坡都处于无活动状态。

## 3 敏感性评价

以往的滑坡敏感性研究,多数只考虑岩性、坡度、高差、断裂带等外部环境影响因子,忽略了现存滑坡自身活动状态。为了准确对研究区重点 12 条泥石流沟滑坡进行敏感性评价,本文将每期影像下解译的滑坡以活动强度分类为 5 级,利用公式(1)计算每种活动强度下各评价因子分级的概率值,结合层次分析法

求得的评价因子权重值,利用 ArcGIS 加权总和功能分别得到每期影像在 5 种活动强度下的敏感性,再将每期 5 种活动强度的敏感性加权叠加计算得到研究

区当期影像的敏感性,将计算结果归一化处理,分为极高、高、中、轻微、低 5 种等级,得到滑坡敏感性分区图(附图 10)。

表 1 研究区每期影像下滑坡活动强度统计

滑坡强度	2009 年		2011 年		2013 年		2017 年	
	数量	面积/10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	数量	面积/10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	数量	面积/10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	数量	面积/10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
1 级	2	1.7	153	2.8	198	28.2	833	146.9
2 级	8	2.1	339	65.5	541	112.4	236	113.9
3 级	5	4.6	264	94.7	280	130.6	98	82.9
4 级	10	4.3	242	172.6	150	106.2	29	37.9
5 级	800	324.2	153	15.6	26	2.5	5	0.7
合计	825	336.8	1151	351.1	1195	379.9	1201	382.2

### 3.1 因子选取

本文根据龙溪河流域具体灾害分布特征及形成条件,选取坡度、距水系距离、距断裂带距离、植被覆

盖率(NDVI)、高程、坡向这 6 个因子作为评价指标,并将每个因子分为 5 级,其中坡向主要根据向阳的程度分级(详见表 2)。

表 2 研究区评价因子选取及分级标准

评价因子	坡度/(°)	水系距离/m	断裂带距离/m	植被覆盖指数	高程/m	坡向/(°)
因子分级	0—15	0~100	0~150	<0.1	800~1 100	315~45
	15—30	100~200	150~300	0.1~0.3	1 100~1 400	225~315
	30—45	200~300	300~450	0.3~0.45	1 400~1 700	45~135
	45—60	300~400	450~600	0.45~0.6	1 700~2 000	180~225
	>60	>400	>600	>0.6	>2 000	135~180

### 3.2 计算方法

3.2.1 基于概率综合判别法计算每个因子概率值  
根据统计各因子分级条件下的面积,利用数学概率的方法<sup>[13]</sup>计算出每个分级下的概率值,具体计算公式为(1)所示,各因子通过公式(1)分别计算得到每种活动强度发生在 6 个评价因子不同分级区的概率综合判别值  $P$ 。

$$P = \begin{cases} \frac{P_1 - P_2}{P_1 \times (1 - P_2)} & (P_1 \geq P_2) \\ \frac{P_1 - P_2}{P_2 \times (1 - P_1)} & (P_1 < P_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P$ ——滑坡不同级别活动强度在该因子不同分级区的概率综合判别值; $P_1$ ——该因子不同分级下各活动强度级别的滑坡面积占该因子分级下研究区面积的比例(%); $P_2$ ——评价因子不同分级区的滑坡面积占整个研究区滑坡总面积的比例(%).

3.2.2 评价权重的确定 评价因子的权重通过层次分析法来确定,层次分析法是通过网络系统理论和多目标综合评价的方法把复杂问题中的各因素划分成相关联的有序层次,使之成为多目标、多准则的决策分析方法<sup>[14]</sup>。主要步骤为,构造判别矩阵  $C$ ;根据判

别矩阵的最大特征值进行一致性检验,同时矩阵  $C$  的指标权重并归一化得矩阵  $A$ 。构造判别矩阵  $C$  后,运用 Matlab 软件运算得判别矩阵  $C$  的最大特征值及特征向量,同时运用公式(2)~(3)检验矩阵的一致性,并将特征向量归一化处理。

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$R_C = \frac{I_C}{I_R} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\max}$ ——判断矩阵的最大特征值; $n$ ——矩阵阶数; $I_C$ ——平均随机一致性指标,当  $R_C < 0.1$  时,判断矩阵则符合要求。

依照所选评价因子建立判别矩阵  $C$ (见表 3)。

表 3 研究区依照所选评价因子建立的判别矩阵  $C$

评价因子	坡度	水系	坡向	植被	高程	断裂	权重
坡度	1	3	4	3	1	2	0.296 4
水系	1/3	1	2	2	1/2	1	0.135 7
坡向	1/4	1/2	1	1	1/3	1/3	0.069 1
植被	1/3	1/2	1	1	1/3	1/2	0.138 7
高程	1	2	3	3	1	1/2	0.213 6
断裂	1/2	1	3	2	2	1	0.156 4

对判别矩阵  $C$ ,  $\lambda_{\max} = 6.2151$ ,  $R_C = 0.0341 < 0.1$  满足要求, 归一化处理得权重  $W = (0.2964, 0.1357, 0.0691, 0.1387, 0.2136, 0.1564)$ 。

针对每期滑坡依据活动强度等级建立判别矩阵  $D$ , 得每种等级下的权重值(见表 4)。

表 4 依据活动强度等级建立的龙溪河流域判别矩阵  $D$

滑坡强度	1级	2级	3级	4级	5级	权重
1级	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0.0618
2级	2	1	1/2	1/3	1/4	0.0972
3级	3	2	1	1/2	1/3	0.1600
4级	4	3	2	1	1/2	0.2625
5级	5	4	3	2	1	0.4185

对判别矩阵  $D$ ,  $\lambda_{\max} = 5.0681$ ,  $R_C = 0.015201 < 0.1$  满足要求, 归一化处理得权重  $K = (0.0618, 0.0972, 0.1600, 0.2625, 0.4185)$ 。

3.2.3 评价模型 本模型主要考虑滑坡内部表征因子与外部环境因子, 通过将先期滑坡活动强度以概率综合判别法引入评价模型, 后以层次分析法考虑环境因子, 综合加权叠加得到当期滑坡敏感性评价结果。

$$h_j = \sum_{i=1, k=1}^{i=m, k=n} X_{ik} \times P_{jik} \times W_i \quad (4)$$

$$H = \sum_{j=1}^m h_j \times K_j \quad (5)$$

式中:  $H$ ——区域总敏感值;  $h_j$ —— $j$  级活动强度下的敏感值;  $X_{ik}$ ——第  $i$  个因子的  $k$  层分级;  $P_{jik}$ ——滑坡第  $j$  级活动强度处于第  $i$  个因子的  $k$  层分级的概率值;  $W_i$ ——第  $i$  个因子的权重值。  $K_j$ ——各级活动强度对于区域的权重值。

### 3.3 敏感性结果分析及区划验证

以实际解译滑坡面积百分比累加与敏感区面积百分比累加来构建评价模型, 将敏感性评价结果按 1% 的面积间隔从高到低分为 100 等份, 分别求取这 100 个级别内的滑坡发生的百分比统计每种敏感性下的面积, 构建预测滑坡面积百分比累加与敏感区面积百分比累积曲线(图 1)。

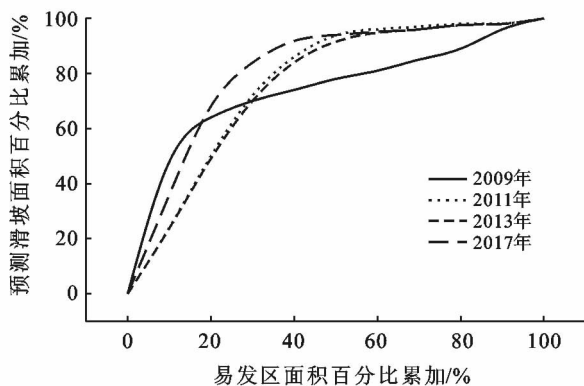


图 1 龙溪河流域滑坡敏感性评价结果

以汶川地震后的 2009 年、群发泥石流后的 2011 年为例, 2009 年敏感性评价中, 占研究区总面积 32.1% 极高敏感区与高敏感区的范围预测了 70.2% 的滑坡; 2011 年以约 1/2 的极高敏感区与高敏感区的范围预测滑坡面积高达 86.1%, 表明敏感性评价结果与实际解译滑坡对比检验效果较好。同时, 由图 1 中曲线可知, 各年曲线下的面积(AUC)在 75.6% ~ 81.4% 范围内, 与同类研究<sup>[15-16]</sup>相比, 评价结果较为准确。

敏感性分析结果如附图 10 及表 5 所示, 从 4 期评价结果可知, 由于地震导致山体破碎, 新增大量的滑坡, 2009 年研究区近 1/3 的区域敏感性处于极高和高, 后在 2010 年 8 月 13 日暴雨及泥石流群发事件后, 研究区地震所产生的滑坡开始再次活动, 2011 年的滑坡敏感性达到最高, 之后每年敏感性逐步降低, 但仍然有较高的敏感性, 且在中山区沿水系的地段的敏感性都比较高, 在防灾减灾工作中应加强防范。

表 5 龙溪河流域敏感性区域面积统计  $\text{km}^2$

项目	2009年	2011年	2013年	2017年
极高值	2.12	6.45	3.99	2.04
高值	6.28	7.67	8.45	7.18
面	8.27	4.77	6.77	7.90
中值	5.74	3.19	3.82	5.87
积	3.75	4.07	3.12	3.17
轻微值	26.15	26.15	26.15	26.15
低值				
总和值				

## 4 结论

基于龙溪河流域 4 期影像滑坡解译, 分析了研究区震后近 10 a 滑坡演变规律, 并应概率综合判别法—层次分析法, 对研究区泥石流物源敏感性作出评价, 进行敏感性区划。

(1) 在地质灾害详细调查的基础上, 结合遥感手段, 对研究区滑坡进行了 4 期解译分析, 并将滑坡活动强度分为 5 级, 分析结果显示从 2009—2017 年, 高活动率的滑坡在 2011—2017 年的数量和面积均逐渐减小, 但仍有大部分滑坡处于活动状态, 泥石流的发生可能性依然较大。

(2) 应用 AUC 方法对多期滑坡敏感性评价进行了检验, 评价结果的正确率为 75.6% ~ 81.4%, 表明实际滑坡与评价结果对应效果良好。

(3) 2008 年震后主要受地震影响, 滑坡高、极高敏感性区域主要分布于高程较大的山脊附近; 2011 年暴雨泥石流活动后, 高与极高敏感性区域经一步扩张, 沿中、高山水系分布; 从 2011—2017 年总体上呈降低趋势。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Cheng J D, Huang Y C, Wu H L, et al. Hydrometeorological and landuse attributes of debris flows and debris floods during typhoon Toraji, July 29—30, 2001 in Central Taiwan[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 306: 161-173.
- [2] 陈明,唐川,甘伟,等.震区急陡沟道型泥石流特征及动力过程研究:以汶川瓦窑沟为例[J].*云南大学学报:自然科学版*,2018,40(2):272-278.
- [3] Dai Fuchu, Xu Chong, Yao Xin, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011,40(4):883-895.
- [4] 黄润秋,李为乐.汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J].*地质灾害与环境保护*,2009,20(3):1-7.
- [5] 唐川.汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J].*山地学报*,2010,28(3):341-349.
- [6] 齐信,唐川,铁永波,等.基于 GIS 技术的汶川地震诱发地质灾害危险性评价:以四川省北川县为例[J].*成都理工大学学报:自然科学版*,2010,37(2):160-167.
- [7] 吕义清,刘鸿福,李晓聪.基于趋势面分析法的地质灾害危险性评价系统[J].*水土保持通报*,2011,31(2):155-158.
- [8] 刘洋,唐川,李为乐,等.四川省都江堰市龙池地区群发性泥石流物源敏感性分析[J].*灾害学*,2013,28(2):107-113.
- [9] 唐川,丁军,梁京涛.汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J].*工程地质学报*,2010,18(1):1-7.
- [10] 常鸣,唐川,蒋志林,等.强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演变[J].*山地学报*,2014,32(1):89-97.
- [11] 蒋志林,朱静,常鸣,等.汶川地震区红椿沟泥石流形成物源量动态演化特征[J].*山地学报*,2014,32(1):81-88.
- [12] 余斌,马煜,张健楠,等.汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J].*山地学报*,2011,29(6):738-746.
- [13] Chang Ming, Tang Chuan, Zhang Dandan, et al. Debris flow susceptibility assessment using a probabilistic approach: A case study in the Longchi area, Sichuan Province, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014,11(4):1001-1014.
- [14] 王莲芬,许树柏.层次分析法引论[M].北京:中国人民大学出版社,1990.
- [15] 许冲,戴福初,姚鑫,等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡敏感性评价[J].*岩石力学与工程学报*, 2009,28(S2):3978-3985.
- [16] Conoscenti C, Maggio C D, Rotigliano E. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy)[J]. *Geomorphology*, 2008, 94(3/4):325-339.
- [18] 张日升,贾树海,徐贵军,等.营林措施对沙地樟子松人工林土壤养分、酶活性及微生物量碳的影响[J].*土壤通报*.2011,42(1):65-69.
- [19] 侯学煜.中国植被地理及优势植物化学成分[M].北京:科学出版社,1982.
- [20] 孟祥楠,赵雨森,郑磊,等.嫩江沙地不同年龄樟子松人工林种群结构与林下物种多样性动态[J].*应用生态学报*,2012,23(9):2333-2334.
- [21] Liu Shirong, Li Xuemin, Niu Limin. The degradation of soil fertility in pure larch plantation in the northeastern part of China[J]. *Ecological Engineering*, 1998,10(1): 75-86.
- [22] Vanderschaaf C L. Estimating understory vegetation response to multi-nutrient fertilization in Douglas-fir and ponderosa pine stands[J]. *Journal of Forest Research*,2008,13(1):43-51.
- [23] 姚茂和,盛炜彤,熊有强.林下植被对杉木林地力影响的研究[J].*林业科学研究*,1991,4(3):246-252.
- [24] 盛炜彤,杨承栋.关于杉木林下植被对改良土壤性质效用的研究[J].*生态学报*.1997,17(4):377-385.
- [25] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J].*应用生态学报*.2009,20(10):2323-2331.
- [26] 宋晓东,刘桂荣,陈江燕,等.樟子松枯死原因与防治技术研究[J].*北华大学学报:自然科学版*,2003,4(2):166-169.
- [27] 苏芳莉,刘明国,韩辉.樟子松不同林型沙地土壤肥力的差异[J].*东北林业大学学报*.2006,34(6):26-28.

(上接第 238 页)