

藏东察雅县地质灾害风险评价及源头管控对策建议

田 尤, 陈 龙, 黄 海, 刘建康, 李元灵, 李洪梁

Geological hazard risk assessment and suggestions for risk control in Chaya County, eastern Xizang

TIAN You, CHEN Long, HUANG Hai, LIU Jiankang, LI Yuanling, and LI Hongliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202208033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County

曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100–109

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104–110

渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价

Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi

谭真艳, 罗晓龙, 陈怡, 周灏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 70–78

甘肃定西地区地质灾害危险性评价

Risk assessment of geological hazards in Dingxi region of Gansu Province

沈迪, 郭进京, 陈俊合 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 134–142

北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

罗守敬, 王珊珊, 付德荃 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126–133

安徽黄山市徽州区地质灾害危险性评价研究

Study on risk assessment of geological hazards in Huizhou District, Huangshan City, Anhui Province

刘乐, 杨智, 孙健, 刘钦, 彭鹏, 段俊斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 110–116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202208033

田尤, 陈龙, 黄海, 等. 藏东察雅县城地质灾害风险评价及源头管控对策建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 146-154.

TIAN You, CHEN Long, HUANG Hai, et al. Geological hazard risk assessment and suggestions for risk control in Chaya County, eastern Xizang[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 146-154.

藏东察雅县城地质灾害风险评价及源头管控对策建议

田 尤^{1,2}, 陈 龙^{1,2}, 黄 海^{1,2}, 刘建康³, 李元灵^{1,2}, 李洪梁^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734; 3. 西华大学应急学院, 四川 成都 610039)

摘要:以藏东察雅县城为研究区,选取高程、坡度、坡形、坡向、斜坡结构、地层、距断层距离共 7 个评价指标,运用证据权重法,构建了地质灾害易发性评价模型。以 4 种降雨频率(10%、5%、2%、1%)下的年最大日降雨量作为动态诱发因子,建筑、人口和交通设施作为承灾体,评价地质灾害的动态风险性。结果表明,研究区斜坡以中、低风险为主,围绕县城场镇两侧的斜坡出现少量高风险和极高风险区。随着降雨频率的降低,区内高风险区、极高风险区面积最大增长 5.34% 和 0.07%;低风险区、中风险区面积最大变化幅度分别为 28.33% 和 23.32%。基于风险评价结果,提出考虑不同降雨频率的地质灾害风险源头管控方法,具体为:针对 10%、5%、2% 和 1% 不同降雨频率下的极高风险区,建议分别采取工程治理、工程治理/专业监测、专业监测、专业监测/群专结合的管控手段;针对 1% 降雨频率下的高风险与中风险区,建议采取群专结合与群测群防。该风险管控体系考虑了不同降雨频率下斜坡的动态风险,可提高山区城镇地质灾害风险的管控精细化水平。

关键词:易发性;危险性;风险评价;源头管控;察雅县城

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)02-0146-09

Geological hazard risk assessment and suggestions for risk control in Chaya County, eastern Xizang

TIAN You^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, HUANG Hai^{1,2}, LIU Jiankang³, LI Yuanling^{1,2}, LI Hongliang^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan 611734, China;
2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan 611734, China; 3. School of Emergency Science, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China)

Abstract: Chaya County in eastern Xizang was selected as the research area for the susceptibility assessment of geological disasters. Seven evaluation indexes, including elevation, slope grade, slope form, slope direction, slope structure, stratum, and distance from fault, were selected to construct an evaluation model of geological disaster susceptibility using the evidence weight method. Using the annual maximum daily rainfall under four rainfall frequencies (10%, 5%, 2%, 1%) as the dynamic inducing factor and building population and transportation facilities as the hazard bearing body, the dynamic risk of geological hazards in the town was evaluated. The results show that except for the small slopes on both sides of the county town, which were mainly high-risk and extremely high-risk areas, other areas in the research area were mainly medium and low-risk areas. As the frequency of rainfall decreased, the areas of high-risk and extremely high-risk areas increased by a maximum of 5.34%

收稿日期: 2022-08-24; 修订日期: 2022-11-15

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20230449; DD20190644); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902)

第一作者: 田 尤(1991—), 男, 贵州岑巩人, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害调查与评价工作。E-mail: tyou@mail.cgs.gov.cn

and 0.07%, respectively, while the areas of low-risk and medium-risk areas changed by a maximum of 28.33% and 23.32%, respectively. Based on the risk assessment results, a method for controlling the source of geological hazard risk considering different rainfall frequencies was proposed. Specifically, for the extremely high-risk areas under the four rainfall frequencies of 10%, 5%, 2% and 1%, it is recommended to adopt engineering management, engineering management/professional monitoring, professional monitoring, and professional monitoring/combination of mass monitoring and professional monitoring. For the high-risk and medium-risk areas under a 1% rainfall frequency, the recommended risk control measures were the combination of mass monitoring and professional monitoring, and the combination of mass supervision and mass prevention. The risk management and control system accounted for the dynamic risks of slopes under different rainfall frequencies, which would enhance the management and control of geological hazard risks in mountainous urban areas in a refined manner.

Keywords: susceptibility; probability; risk assessment; risk control; Chaya County

0 引言

地质灾害风险评价是对风险区遭受地质灾害的可能性和后果进行定量分析与评价,以及采取相应措施来降低风险可能性的一门交叉学科^[1],主要包含易发性、危险性和易损性 3 个层次的评价内容。目前,国内外学者基于 GIS 对地质灾害风险评价进行了大量探索性研究。区域尺度上,Corominas 等^[2]系统总结了区域滑坡风险评价的方法;吴树仁等^[3]于 2009 年初步提出了定性与定量评价相结合的地质灾害风险评估技术方法,首次编写完成了中国地质灾害风险评价指南,奠定了国内地质灾害风险评估与管理的研究基础;城镇地质灾害风险评价尺度上,康婧等^[4]采用模糊数学法完成了长兴岛的灾害风险综合评价;李天华等^[5]采用层次分析法与 GIS 空间分析结合法,建立了次生地质灾害风险评估模型;罗路广等^[6]采用信息量模型和层次分析法评价“8·8”九寨沟景区地震地质灾害风险;张茂省等^[7]在调查与评价的基础上,提出了适用于山区城镇地质灾害调查与风险评价的思路与技术方法;王佳佳^[8]、吴芳^[9]、肖婷^[10]以三峡库区为研究区,对万州区滑坡灾害风险进行了评价和探索。总体上,地质灾害易发性、危险性评价是风险评价的基础,常用的方法一般有定性分析、概率统计法和确定性分析 3 种。对城镇评价尺度而言,半定量的概率统计方法使用较多^[12-14],采用的模型包括信息量模型、逻辑回归模型、证据权模型、确定性系数模型以及基于机器学习的人工神经网络模型、决策树模型等。整体而言,城镇尺度上已初步形成相对完整的地质灾害风险评价方法,以往研究多集中在震区或中低山丘陵区,针对高原、极高山区城镇的风险评价研究较少,且考虑不同降雨频率下斜坡动态风险评价及源头管控方法研究仍整体处于探索阶段。

西藏昌都市地处青藏高原东缘,地形地貌差异较

大,地质构造复杂,是西藏自治区地质灾害最易发的地区之一^[15]。察雅县城位于昌都市中部麦曲河右岸,主要受到滑坡、崩塌和泥石流灾害的威胁。基于野外详细调查与编录,形成区内较完整的环境背景资料和灾害数据集。结合评价尺度和灾害特点,选用半定量的证据权法对研究区斜坡灾害开展易发性评价,并据此考虑在不同降雨工况下斜坡的危险性。参考中国地质调查局风险评价相关技术要求,以建筑、人口和交通设施作为承灾体,开展不同降雨频率的地质灾害风险评价,并提出斜坡动态风险的源头管控对策建议。该对策建议可提高山区城镇地质灾害风险管控的精细化水平,以达到经济合理、精准管控的目的。

1 地质灾害风险评价方法

1.1 基于证据权法的地质灾害易发性评价方法

证据权法的基础为贝叶斯概率统计,它最早应用于矿产资源储量评价中。近年来,陆续应用在滑坡评价研究中^[16-18],且被验证是相对较合适的评价方法。该方法基于滑坡发生区与非滑坡发生区来计算每个滑坡影响因子的权重,其核心假设是相同区域条件下,未来滑坡发生在类似滑坡已发生的区域内。采用式(1)——(3)来计算地质灾害的证据权:

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{F|L\}}{P\{F|\bar{L}\}} \quad (1)$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{\bar{F}|L\}}{P\{\bar{F}|\bar{L}\}} \quad (2)$$

$$W_i = W_i^+ - W_i^- \quad (3)$$

式中: W_i^+ ——该影响因子级别内部发生地质灾害的正相关关系大小;

W_i^- ——该影响因子级别内部发生地质灾害的负相

关关系大小;

$P\{F|L\}/P\{F|\bar{L}\}$ ——地质灾害发生的充分率;

$P\{\bar{F}|L\}/P\{\bar{F}|\bar{L}\}$ ——地质灾害发生的必要率;

W_i ——该影响级别内发生地质灾害的权重。

1.2 考虑不同降雨频率的地质灾害危险性评价方法

地质灾害危险性评价是在地质灾害易发性评价的基础上,进一步考虑地质灾害的诱发因素,来刻画和预测地质灾害发生的可能性大小。结合野外调查情况,本文考虑以降雨为主的诱发因子,采用年最大日降雨量作为时间动态因素,对研究区地质灾害开展危险性评价,计算公式为:

$$H = S \cdot (H_{24P}/\bar{H}_{24}) \tag{4}$$

式中: H ——地质灾害危险性;

S ——地质灾害易发性;

H_{24P} —— P 降雨频率下的年最大日降雨量;

\bar{H}_{24} ——年最大日降雨量均值。

1.3 地质灾害承灾体易损性评价方法

承灾体是指遭受地质灾害危害的对象,如人类、财产、资源或生态环境^[19]。易损性是指承灾体受到一定强度的地质灾害作用时可能的损失程度。通常用 0~1 来定量表达,0 表示无损失,1 表示完全损失。结合察雅县城周边生态环境情况,将建筑、人口、交通设施作为承灾体,主要考虑威胁人口和造成经济损失 2 方面因素。同时,为方便研究,将常住人口和经济价值类似的建筑类型合并成同一类型,其要素与赋值关系详见表 1。

1.4 地质灾害风险评价方法

地质灾害风险是指在一定区域和给定时段内,地质灾害对人类生命财产和经济活动产生损失的可能性或期望值。地质灾害风险的计算公式为:

$$R = f(H, V) = H \cdot V \tag{5}$$

式中: R ——地质灾害风险性;

H ——地质灾害危险性;

V ——地质灾害易损性。

地质灾害风险性评价采用矩阵分析方法^[20],等级划分矩阵见图 1。

2 研究区地质环境条件

2.1 工程地质概况

察雅县城位于西藏自治区昌都市察雅县中西部,面积为 81.71 km²。大地构造位于青藏高原东部、三江地区北段,属构造—侵蚀、侵蚀高山地貌区。为高原温带

危险性 易损性	风险等级			
	极高	高	中	低
极高	极高	极高	高	中
高	极高	高	中	中
中	高	高	中	低
低	高	中	低	低

图 1 地质灾害风险等级划分矩阵图

Fig. 1 Risk level classification table for geological disasters

表 1 研究区承灾体易损性赋值表

Table 1 Vulnerability assessment table for hazard-bearing bodies in the study area

承灾体类型	分类	易损性	对应属性字段	对应属性
建筑及 人口类型	>1 000人	0.9	类型	密集多层居住区
		0.9	类型	医院
		0.9	类型	学校
	100~1 000人	0.8	类型	密集低矮居住区
		0.7	类型	寺庙
		0.6	类型	加油站
		0.8	类型	行政办公区
	10~100人	0.4	类型	基础设施区
		0.2	类型	一般居住区
		0.3	类型	商业设施区
	<10人	0.1	类型	临时居住区
		0.1	类型	农业区
		0.1	类型	荒地区
		0.1	类型	避难场地区
	县级公路	0.3	GB	420 301
	专用公路	0.2	GB	420 400
	其他公路	0.1	GB	420 800
交通设施	城市道路	0.2~0.3	GB	430 501、430 501
	乡村道路	0~0.1	GB	440 100、440 300

半干旱季风气候,多年平均降雨量为 488 mm/a,集中在每年 3—10 月。

研究区地处澜沧江断裂带内,褶皱和断裂构造发育。察雅断层从县城处通过(NW—SE),下盘发育多个向、背斜;出露的地层岩性以侏罗系细粒碎屑岩为主。区内河流沟谷发育,麦曲由北向南贯穿整个察雅县城,与其他支流形成地表径流网。近年来,人类工程活动强烈,主要包括道路修建、城镇化建设等。

2.2 地质灾害

主要采用精度为 1:10 000~1:2 000 的工程地质调查方法,结合无人机测量和野外实地调查,研究区内共有地质灾害 26 处(图 2),其中滑坡 16 处、崩塌 2 处、

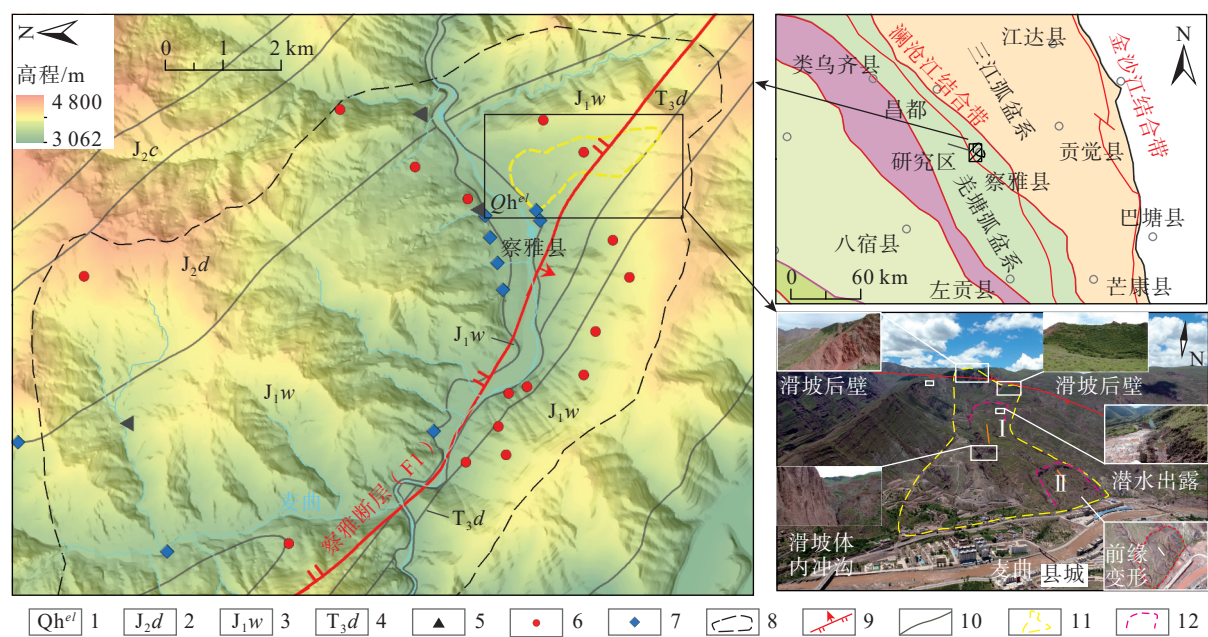


图 2 察雅县城地质灾害发育分布图

Fig. 2 Distribution map of geological hazard development in Chaya county, Xizang autonomous region, China

1—全新统冲洪积;2—中侏罗统车大桥组泥页岩;3—下侏罗统汪布组石英细砂岩;4—上三叠统夺盖拉组石英砂岩;5—崩塌;6—滑坡;
7—泥石流;8—研究范围;9—逆断层;10—地层界线;11—滑坡边界;12—变形区

泥石流 8 处。研究区地质灾害主要以滑坡为主,普遍为历史老(古)滑坡,规模多为大型—特大型。本文仅讨论研究区内斜坡地质灾害风险评价。

3 地质灾害风险评价

3.1 县城地质灾害易发性评价及精度检验

3.1.1 易发性评价

选取高程、坡度、坡形、坡向、斜坡结构、地层、距断层距离作为研究区地质灾害易发性评价指标,并对其进行相关性检验^[21-23]。将分级之后的各因子矩阵导入 SPSS 中,采用 Pearson 相关性分析方法,得到如表 2 的各指标因子相关性统计表。当相关性系数 $R \leq 0.5$ 时即可以认为各因子之间弱相关或不相关^[11],验证了本次指

标因子的选择具有合理性。

所有的影响因子专题图均以 10 m×10 m 大小的栅格存储,利用 ArcGIS 空间分析功能计算各因子内各级别的 W_i^+ 、 W_i^- 、 W_i ,详细结果见表 3。对以上各因子进行叠加分析,得到研究区斜坡地质灾害易发性评价图(图 3),易发指数范围为 -22.020 9~6.512 3,分 4 级:低易发性(-22.020 9~-5.997 6)、中易发性(-5.997 6~-1.624 1)、高易发性(-1.624 1~4.592 9)、极高易发性(4.592 9~6.512 3)。

3.1.2 易发性评价结果检验

地质灾害易发性评价过程中,常采用成功率曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)及曲线下的面积(area under curve, AUC)的值来评价结果的准确性^[24-25]。将易发性评价结果从高到低按照 1% 的面积间隔等分为 100 等分,分别求取这 100 个级别内地质灾害发生的百分比,构建易发性成功率曲线,结果见图 4。结果显示 AUC 值为 84.923%,说明该易发性评价结果较为合理。

3.2 县城地质灾害危险性评价

由昌都市 1980—2015 年降雨数值,确定研究区年最大日降雨量均值 \bar{H}_{24} 取 28.4 mm,变差系数 C_v 取 0.16。选用皮尔逊Ⅲ型分布函数对研究区进行频率分析,通过其离均系数 K_p ,计算不同降雨频率下的年最大日降雨

表 2 各指标因子间的相关性统计

Table 2 Statistical table for correlation among each index factor

	高程	坡度	坡形	坡向	斜坡结构	地层	距断层距离
高程	1						
坡度	0.020	1					
坡形	0.032	-0.001	1				
坡向	0.069	0.168	0.026	1			
斜坡结构	0.134	0.128	0.021	0.258	1		
地层	-0.316	-0.148	0.079	-0.030	-0.110	1	
距断层距离	0.343	0.080	0.023	0.114	0.016	-0.172	1

表 3 研究区各证据因子权重值表				
Table 3 Summary table of weighted values of each featured factor in the study area				
影响因子及分级		W_i^+	W_i^-	W_f
高程/m	3 000 ~ 3 500	0.248 3	-0.211 2	0.459 6
	3 500 ~ 4 000	-0.106 4	0.093 5	-0.199 9
	4 000 ~ 4 500	-0.951 4	0.068 9	-1.020 3
坡度/(°)	<10	-0.727 1	0.069 1	-0.796 2
	10 ~ 20	0.279 6	-0.075 0	0.354 6
	20 ~ 30	0.108 9	-0.061 6	0.170 5
	30 ~ 40	0.039 6	-0.014 6	0.054 2
	40 ~ 50	-0.644 9	0.037 4	-0.682 3
	50 ~ 60	-1.172 1	0.009 5	-1.181 6
	>60	-4.312 5	0.001 4	-4.313 9
坡向	平面	0.546 3	-0.079 2	0.625 6
	北	1.577 0	-0.202 2	1.779 2
	东北	1.022 0	-0.218 9	1.240 9
	东	-0.113 3	0.012 8	-0.126 0
	东南	-0.663 8	0.055 3	-0.719 2
	南	-2.308 2	0.145 0	-2.453 2
	西南	-3.303 1	0.162 4	-3.465 5
	西	-1.544 1	0.114 0	-1.658 0
	西北	0.225 0	-0.032 6	0.257 5
坡型	凹形	-0.229 0	0.049 1	-0.278 0
	凸型	0.133 7	-0.234 8	0.368 5
	直线型	-0.239 2	0.054 6	-0.293 8
斜坡结构	河谷	-7.463 4	0.052 6	-7.516 0
	顺向飘倾坡	-2.638 0	0.015 0	-2.653 0
	顺向层面坡	-0.784 8	0.008 8	-0.793 6
	顺向伏倾坡	-0.507 3	0.042 5	-0.549 8
	斜顺向坡	-0.515 9	0.057 7	-0.573 7
	横向坡	-0.286 3	0.097 6	-0.383 9
	斜逆向坡	0.373 3	-0.105 7	0.479 0
地层	逆向坡	0.542 5	-0.222 5	0.764 9
	T_3d	1.300 6	-0.135 9	1.436 6
	J_2d	-2.567 7	0.246 4	-2.814 0
	J_2c	0.000 0	0.000 7	-0.000 7
	J_1w	0.194 2	-0.573 1	0.767 3
距断层距离/m	Qh^{el}	-3.715 2	0.051 2	-3.766 4
	<200	0.529 5	-0.039 5	0.569 0
	200 ~ 500	0.850 1	-0.111 4	0.961 4
	500 ~ 1 000	0.872 2	-0.207 3	1.079 5
	1 000 ~ 2 000	0.490 9	-0.191 2	0.682 0
	>2 000	-1.641 5	0.667 2	-2.308 7

量 H_{24P} , 计算式见(8), 计算结果见表 4。

$$H_{24P} = K_P \overline{H}_{24}$$

(6)

将研究区地质灾害易发性与 4 种不同频率的年最大日降雨量叠加分析, 得到各工况下察雅县城地质灾害危险性评价图(图 5)。分为 4 级: 低危险(0 ~ 20.524 2)、中危险(20.524 2 ~ 32.462 0)、高危险(32.462 0 ~ 38.152 1)、

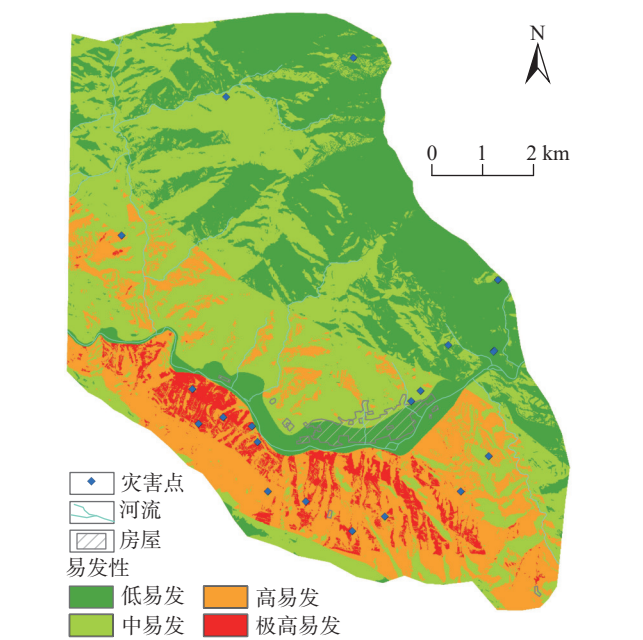


图 3 研究区地质灾害易发性评价结果

Fig. 3 Evaluation results of geological hazard susceptibility in the study area

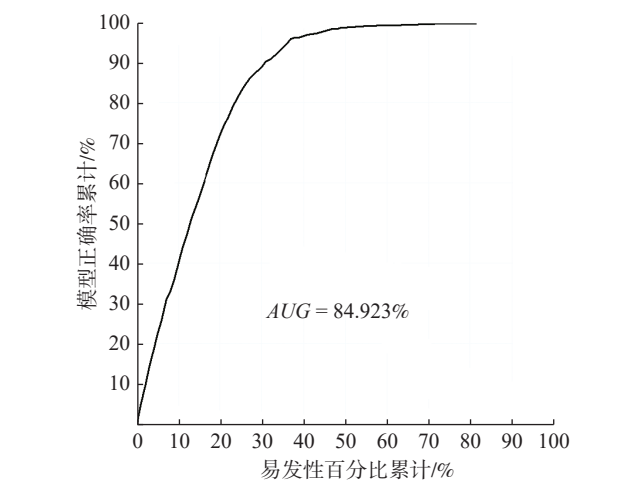


图 4 研究区易发性评价成功率检验曲线

Fig. 4 Verification curve for geohazard susceptibility evaluation between landslide accumulative frequency and prediction index

表 4 研究区不同降雨频率下的年最大日降雨量估算结果

Table 4 Estimation results of annual maximum daily rainfall under different rainfall frequencies in the study area

$P/\%$	K_P	H_{24P}/mm
1	1.436	55.14
2	1.374	52.76
5	1.286	49.38
10	1.212	46.54

极高危险(>38.1521)。

3.3 县城地质灾害承灾体易损性评价

对研究区内的不同承灾体开展遥感解译与野外调

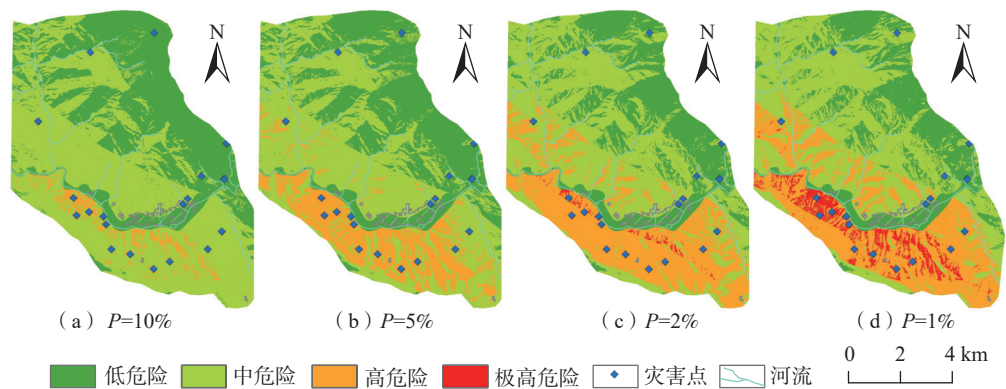


图 5 研究区地质灾害危险性评价图

Fig. 5 The probability assessment map of geological hazard risks at the study area

查,共统计县城内建筑人口包括密集多层居住区、医院、学校、寺庙、加油站、行政办公区等 14 类;共统计包括县级公路、专用公路、其他公路等 5 类道路。将各类建筑的用途、结构、人口,道路属性等作为承灾体参数,构建察雅察雅县城承灾体空间数据库。将不同类型承灾体易损性进行叠加,获得综合易损性评价图(图 6),并划分为 4 个等级:低易损性(0~0.25)、中易损性(0.25~0.5)、高易损性(0.5~0.75)、极高易损性(0.75~1.0)。

3.4 县城地质灾害风险评价

基于察雅县城地质灾害危险性和易损性评价结果,划分为低风险、中风险、高风险和极高风险 4 级(图 7)。

4 结果分析与风险管控建议

4.1 结果分析

由图 7—8 可见,研究区风险评价结果集中反映了以下特点:

(1)察雅县城整体以低风险与中风险为主,围绕县城两侧斜坡发现少量高风险与极高风险区。随着降雨

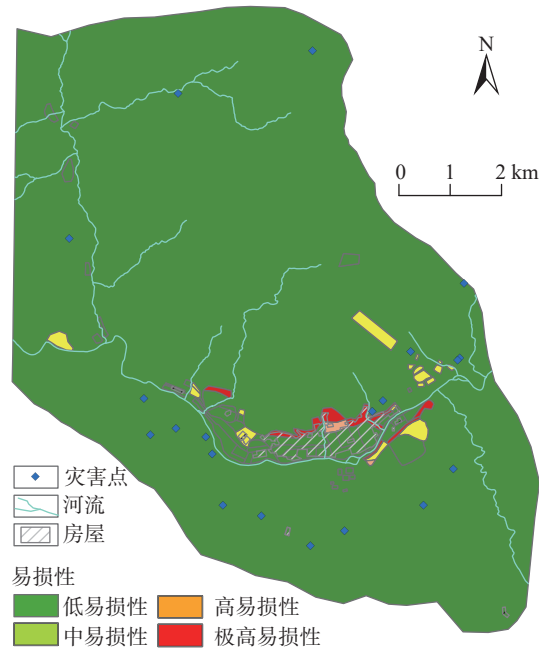


图 6 研究区易损性评价图

Fig. 6 The vulnerability assessment map of geological hazard risks at the study area

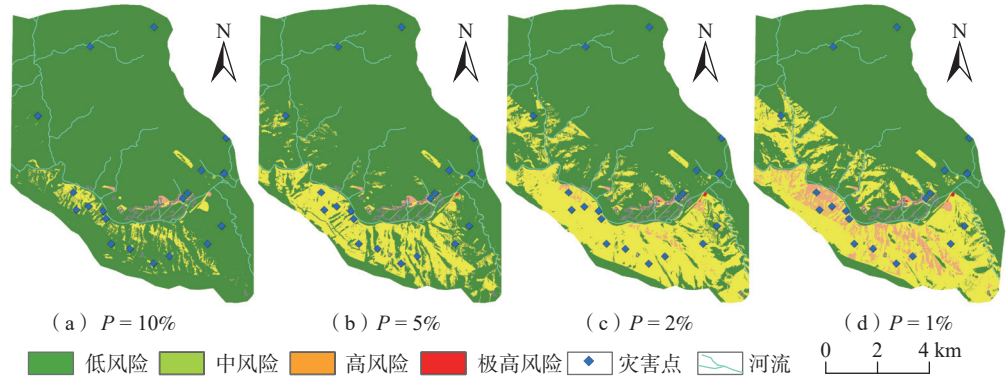


图 7 研究区地质灾害风险评价图

Fig. 7 The risk assessment map of geological hazard risks at the study area

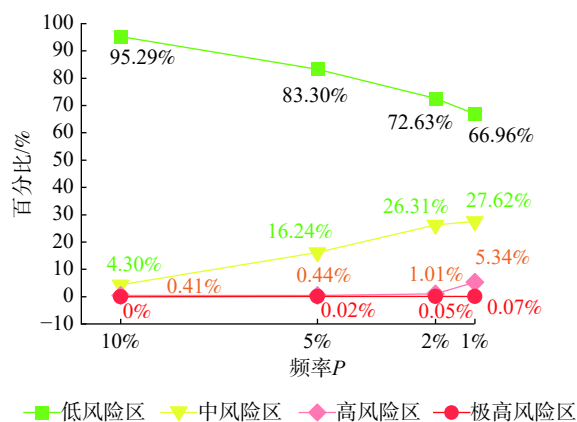


图 8 察雅县城风险区面积随降雨频率变化图

Fig. 8 Risk zone area variation with rainfall frequency in Chaya County, Xizang autonomous region, China

频率的降低,区内低风险区面积发生明显降低,最大下降幅度为 28.33%;中风险区面积呈现明显增长趋势,最大增长幅度达 23.32%。

(2)察雅县城有 0.41% 的区域始终保持高风险状态,如察雅县城北侧、察雅县城南东侧等地,亟需立即开展相关的管控措施。随着降雨频率的降低,高风险区面积比例最大增长至 5.34%,极高风险区面积比例最大增长至 0.07%,主要是因为这些区域建筑、人口财产等分布集中,且地质灾害易发程度也多为极高易发—高易发状态。

(3)随着降雨频率的降低,察雅县城城区两侧斜坡的风险等级也逐渐由中低风险为主过渡到以中高风险为主,至百年一遇降雨频率下,极高—高风险区占比为 5.41%,其发生灾害后风险较大,可能形成淹没前缘房屋、堵塞麦曲等危害。

(4)察雅县城存在 66.96% 区域始终保持低风险状态,分布在研究区北侧远离县城建筑区域,主要是因为这些区域人迹罕至且工程建设程度低。

4.2 风险管控措施体系及建议

基于风险评价结果,提出考虑不同降雨频率的察雅县城地质灾害风险源头管控方法(图 9)。其核心思想是优先判别出最受关注的极高风险区或随降雨频率改变情况下增加的极高风险区,非极高风险区再按照 10%、5%、2% 和 1% 的降雨频率逐级判别,依据不同降雨频率和风险级别大小分别采取针对的源头管控措施,以达到经济合理、精准管控的目的。管控措施主要为工程治理、专业监测、群专结合和群测群防 4 类。

(1)针对 10% 降雨频率下为极高风险的区域,由于在高频降雨条件下风险极高,建议规划设计相关防治工

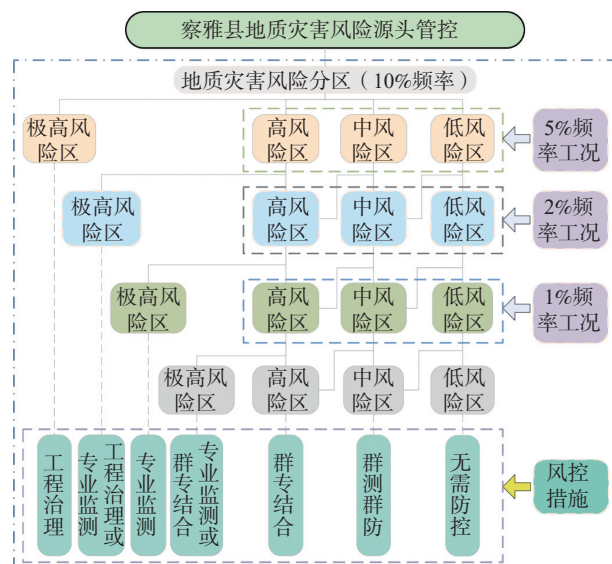


图 9 察雅县城地质灾害风险管控方法

Fig. 9 The risk management and control system of geological disaster at Chaya County, Xizang autonomous region, China

程,制定应急避险方案,降低地质灾害风险;

(2)针对 5% 降雨频率下由高风险转为极高风险的区域,如察雅县城北侧斜坡、县城东侧麦曲左岸等斜坡,由于是在中度降雨频率影响下即转化为极高风险区,建议视斜坡变形破坏程度和危害程度,适当选择工程治理或专业监测的管控措施,降低或管控地质灾害风险;

(3)针对 2% 工况下由高风险转化为极高风险的区域,如察雅县城北侧部分斜坡等,由于是受略低的降雨频次影响后才转化为极高风险区,建议按照斜坡灾害发育阶段和特征,适当选择合适的专业监测手段,管控地质灾害风险。

(4)针对 1% 工况下由高风险转化为极高风险的区域,如察雅县城北侧部分斜坡等,由于其是在低降雨频率影响后才转化为极高风险区,建议视斜坡发育特征,适当选取专业监测或群专结合手段来管控地质灾害风险。

(5)针对 1% 工况下高风险区,如察雅县城南侧斜坡等,存在下滑堵江的可能,建议根据 10%、5%、2% 降雨频率下是否为高风险区且判断是否可能产生二次灾害为依据,合理选择不同群专结合方案,管控地质灾害风险;针对 1% 工况下中风险区,由于风险等级中等,建议采取的主要风险管控措施为群测群防;针对 1% 工况下低风险区,由于其发生灾害后可能产生的损失小,建议短期内无需管控。

5 结论

(1)运用证据权方法,选取与县城地质灾害形成有

关的、相互独立的 7 个指标因子,构建了地质灾害易发性评价模型,采用成功率曲线(ROC)对评价结果进行检验,结果显示曲线下的面积(AUC)为 84.923%,反映了评价结果较为合理。

(2)选取 10%、5%、2% 和 1% 4 种降雨频率下年最大日降雨量作为动态诱发因子,建筑人口和交通设施作为承灾体,完成了动态风险性评价。结果表明,察雅县城整体以低风险与中风险为主,围绕县城两侧斜坡发现少量高风险、极高风险区。随着降雨频率的降低,察雅县城低风险区面积发生明显降低,最大下降幅度为 28.33%;随着降雨频率的降低,区内低风险区面积发生明显降低,最大下降幅度为 28.33%;中风险区面积呈现明显增长趋势,最大增长幅度为 23.32%;高风险区面积比例最大增长至 5.34%,极高风险区面积比例最大增长至 0.07%;此外,不论降雨频率如何变化,区内 0.41% 的区域始终保持高风险状态;66.96%区域始终保持低风险状态。

(3)基于风险评价结果,提出考虑不同降雨频率的察雅县城地质灾害风险源头管控方法。核心思想是优先判别出最受关注的极高风险区或随降雨频率改变情况下增加的极高风险区,非极高风险区再按照 10%、5%、2% 和 1% 的降雨频率逐级判别,依据不同降雨频率和风险级别大小分别采取针对的源头管控措施,以达到经济合理、精准管控的目的。管控措施主要为工程治理、专业监测、群专结合和群测群防 4 类。

参考文献(References):

- [1] 齐信,唐川,陈州丰,等.地质灾害风险评价研究[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(5): 33-40. [QI Xin, TANG Chuan, CHEN Zhoufeng, et al. Research of geohazards risk assessment[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(5): 33-40. (in Chinese with English abstract)]
- [2] COROMINAS J, VAN WESTEN C, FRATTINI P, et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73(2): 209-263.
- [3] 吴树仁,石菊松,张春山,等.地质灾害风险评估技术指南初论[J]. *地质通报*, 2009, 28(8): 995-1005. [WU Shuren, SHI Jusong, ZHANG Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 995-1005. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 康婧,王伟伟,程林,等.基于模糊数学方法的海岛地质灾害风险评价——以长兴岛为例[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(6): 861-867. [KANG Jing, WANG Weiwei, CHENG Lin, et al. Risk assessment of geological hazard based on fuzzy mathematics: A case study of Changxing Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(6): 861-867. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李天华,袁永博.地震重灾区诱发次生地质灾害风险评价研究[J]. *地震工程学报*, 2018, 40(1): 111-115. [LI Tianhua, YUAN Yongbo. Risk assessment of secondary geological disasters induced in an earthquake-stricken area[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2018, 40(1): 111-115. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 罗路广,裴向军,谷虎,等.基于GIS的“8·8”九寨沟地震景区地质灾害风险评价[J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(3): 193-202. [LUO Luguang, PEI Xiangjun, GU Hu, et al. Risk assessment of geohazards induced by “8·8” earthquake based on GIS in Jiuzhaigou scenic area[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(3): 193-202. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张茂省,薛强,贾俊,等.山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J]. *西北地质*, 2019, 52(2): 125-135. [ZHANG Maosheng, XUE Qiang, JIA Jun, et al. Methods and practices for the investigation and risk assessment of geo-hazards in mountainous towns[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 125-135. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王佳佳.三峡库区万州区滑坡灾害风险评估研究[D]. 武汉:中国地质大学,2015. [WANG Jiajia. Landslide risk assessment in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王芳.万州区滑坡灾害风险评价与管理研究[D]. 武汉:中国地质大学,2017. [WANG Fang. Study on risk assessment and management of landslide in Wanzhou District[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 肖婷.三峡库区万州区及重点库岸段滑坡灾害风险评价[D]. 武汉:中国地质大学,2020. [XIAO Ting. Landslide risk assessment in Wanzhou district and a key section, Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 周超,常鸣,徐璐,等.贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1782-1791. [ZHOU Chao, CHANG Ming, XU Lu, et al. Risk assessment of typical urban mine geological disasters in Guizhou Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1782-1791. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 熊小辉,汪长林,白永健,等.基于不同耦合模型的县域滑坡易发性评价对比分析——以四川普格县为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(4): 114-124. [XIONG Xiaohui, WANG Changlin, BAI Yongjian, et al. Comparison of

- landslide susceptibility assessment based on multiple hybrid models at County level: A case study for Puge County, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 114–124. (in Chinese with English abstract)
- [13] 解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 等. 崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 184–192. [XIE Mingli, JU Nengpan, LIU Yunkun, et al. A study of the risk ranking method of landslides and collapses [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 184–192. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 范强, 巨能攀, 解明礼, 等. 2017年九寨沟 $M_s7.0$ 地震前后地质灾害风险对比 [J]. *地震研究*, 2019, 42(3): 419–427. [FAN Qiang, JU Nengpan, XIE Mingli, et al. Comparison of geological hazard risks before and after Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake in 2017 [J]. *Journal of Seismological Research*, 2019, 42(3): 419–427. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 关朝阳, 李章国. 西藏昌都地质灾害特点及防治对策 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(2): 104–107. [GUAN Chaoyang, LI Zhangguo. Characteristics and prevention measures of geological hazards in Changdu City, Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(2): 104–107. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 证据权法在区域滑坡危险性评价中的应用——以贵州省为例 [J]. *工程地质学报*, 2014, 22(3): 474–481. [FAN Qiang, JU Nengpan, XIANG Xiqiong, et al. Landslides hazards assessment with weights of evidence: A case study in Guizhou, China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(3): 474–481. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 郭长宝, 唐杰, 吴瑞安, 等. 基于证据权模型的川藏铁路加查——朗县段滑坡易发性评价 [J]. *山地学报*, 2019, 37(2): 240–251. [GUO Changbao, TANG Jie, WU Ruian, et al. Landslide susceptibility assessment based on WOE model along Jiacha—Langxian County section of Sichuan—Tibet railway, China [J]. *Mountain Research*, 2019, 37(2): 240–251. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 胡燕, 李德营, 孟颂颂, 等. 基于证据权法的巴东县城滑坡灾害易发性评价 [J]. *地质科技通报*, 2020, 39(3): 187–194. [HU Yan, LI Deying, MENG Songsong, et al. Landslide susceptibility evaluation in Badong County based on weights of evidence method [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 187–194. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘传正. 崩塌滑坡灾害风险识别方法初步研究 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(1): 88–97. [LIU Chuanzheng. Analysis methods on the risk identification of landslide disasters [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 88–97. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 中国地质调查局. 地质灾害风险调查评价技术要求 (1:50000) [S]. 2020. [China Geological Survey. Technical guide for geohazard risk survey and evaluation (1:50000) [S]. 2020. (in Chinese)]
- [21] 张俊, 殷坤龙, 王佳佳, 等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 284–296. [ZHANG Jun, YIN Kunlong, WANG Jiajia, et al. Evaluation of landslide susceptibility for Wanzhou District of Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 284–296. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 汤明高, 陈浩文, 赵欢乐, 等. 青藏高原冰湖溃决灾害隐患识别、发育规律及危险性评价 [J]. *地质通报*, 2023, 42(5): 730–742. [TANG Minggao, CHEN Haowen, ZHAO Huanle, et al. Identification, development law and risk assessment of the hidden dangers of glacial lake outburst disasters on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(5): 730–742. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李彩虹, 李雪, 郭长宝, 等. 青藏高原东部鲜水河断裂带地震滑坡危险性评价 [J]. *地质通报*, 2022, 41(8): 1473–1486. [LI Caihong, LI Xue, GUO Changbao, et al. Seismic landslide hazards assessment along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(8): 1473–1486. (in Chinese with English abstract)]
- [24] CHUNG C, FABBRI A. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, 65: 1389–1400.
- [25] 袁东, 张广泽, 王栋, 等. 西部山区交通廊道泥石流发育特征及选线对策 [J]. *地质通报*, 2023, 42(5): 743–752. [YUAN Dong, ZHANG Guangze, WANG Dong, et al. Analysis on development characteristics of debris flow and route selection countermeasures along the traffic lines in mountain areas of Western China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(5): 743–752. (in Chinese with English abstract)]