

引用格式:黎昊,王钧,黄建国,罗依珍,官清华. 粤港澳大湾区开发建设与丘陵浅山区山地灾害相关性[J]. 山地学报,2022,40(3):384-395.
LI Hao, WANG Jun, HUANG Jianguo, LUO Yizhen, GONG Qinghua. Urban expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China and resulting geo-disasters in foothills [J]. Mountain Research, 2022, 40(3):384-395.

粤港澳大湾区开发建设与丘陵浅山区 山地灾害相关性

黎昊^{1,2},王钧^{2,3},黄建国¹,罗依珍^{4,5},官清华^{2,3*}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 广东省科学院广州地理研究所
广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广州 510070; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广州 511458;
4. 广东省有色矿山地质灾害防治中心, 广州 510080; 5. 广东金东建设工程有限公司, 广州 510080)

摘要: 城市扩张深刻改变了粤港澳大湾区原有地质地貌环境,不合理削山造地等工程活动增加了丘陵浅山区地质灾害的发生风险。测度丘陵浅山区山地灾害的胁迫度以及评价建设用地开发的适宜性,有利于保障土地资源持续利用和城市经济圈生态与环境安全。中国山地城市开发建设与山地灾害的关系以及两者相容性和规划等方面的研究,过去并没有关注丘陵浅山区,尤其是针对粤港澳大湾区的相关研究,还不能科学地支撑大湾区经济社会平稳健康发展。本文以粤港澳大湾区为研究区,利用 Spearman 相关系数法分析丘陵浅山区开发建设与山地灾害发生强度之间的关系;基于频率比模型与信息熵理论,研究丘陵浅山区开发建设强度对山地灾害的影响;基于均值变点法提出丘陵浅山区城市建设用地建议退让距离。结果显示:(1)丘陵浅山区开发建设区域主要分布于大湾区中部以及东南地区,包括香港、东莞、深圳、广州市白云区和花都区等;(2)开发建设强度与山地灾害的相关系数在地势起伏度低、中、较高、高的地区分别为 0.894、0.766、0.587、0.642,相关系数随地势起伏度上升先减后增;(3)山地灾害的信息熵值为 3.1~4.3,熵值高的区域主要位于开发强度高且地势起伏度中、低等的地区;(4)粤港澳大湾区城市建设用地的建议退让距离为 120 m。研究结果可为城市群建设用地布局以及国土空间规划提供科学依据。

关键词: 城市开发建设;山地灾害;丘陵浅山区;退让距离;均值变点法;粤港澳大湾区

中图分类号: P954

文献标志码: A

中国城镇化已经处于快速发展的中后期,正在转向全面提升质量的新阶段。丘陵浅山区作为平原与山地的过渡带^[1]、人与自然环境交互强烈的地区,城市建设用地的快速增长和城镇边界持续扩张^[2-3],迫使耕地、园地、林地等地类缩减^[4],“削山

造地”“爬坡”“填海”等建设模式^[5]加剧了城市开发与自然环境的冲突^[6-8],直接导致了持续增长的山地灾害风险^[9-12]。据统计^[13],广东地质灾害主要发生在中低山区和丘陵区,因削坡建房诱发滑坡、崩塌山地灾害的数量占全省的 90.3%。

收稿日期 (Received date): 2022-04-11; **改回日期** (Accepted date): 2022-06-19

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41977413; 42101084); 广东省自然科学基金 (2022A1515011898); 2022 国家公园建设项目 (2021GJGY029); 广东省科学院项目 (2020GDASYL-20200301003)。[National Natural Science Foundation of China (41977413; 42101084); Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2022A1515011898); 2022 National Park Construction Project, China (2021GJGY029); GDAS' Project of Science and Technology Development, China (2020GDASYL-20200301003)]

作者简介 (Biography): 黎昊 (1998-), 男, 宁夏石嘴山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土地利用变化与灾害防治。[LI Hao (1998-), male, born in Shizuishan, Ningxia Hui Autonomous Region, M.Sc. candidate, research on land use change and disaster prevention] E-mail: lihao_gdas@163.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 官清华 (1981-), 女, 内蒙古敖汉旗人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 地质环境演变与灾害防治。[GONG Qinghua (1981-), female, born in Ao Han Banner, Inner Mongolia Autonomous Region, Ph.D., professor, specialized in geological environment evolution and disaster prevention] E-mail: gongqh@gdas.ac.cn

1.2 基础数据

本文数据来源于:广东省地质灾害防治方案 2014—2020 年山地灾害数据 (<http://nr.gd.gov.cn/>);中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 30 m 分辨率的广东、香港、澳门 DEM 数据;中国科学院地理科学与资源研究所 (<http://www.resdc.cn/>) 以 2020 年为基准年的土地利用遥感监测数据。

1.3 研究方法

根据“中国 1:100 万地貌图制图规范”^[40]与中国陆地 1:100 万数字地貌三等六级七层的数值分类方法^[41],以地势起伏度定义地貌基本类型(表 1)。丘陵浅山区作为山区较为特殊的部分,是相对“深山区、高山区”而提出的,不同区域的研究中对浅山区界定不同,对海拔高度、相对高差的取值也大相径庭^[1,42]。粤港澳大湾区地貌以平原、丘陵、台地为主^[35],其中平原占 48.2%、丘陵台地占 51.4%、小起伏山地占 0.4%。故而本文将小起伏山地、丘陵、台地统称为丘陵浅山区。

本文基于均值变点法计算大湾区最佳地势起伏度提取单元,划分丘陵浅山区,并结合土地利用类型数据将开发建设用地与丘陵浅山区进行叠加分析;通过 Spearman 等级相关系数法分析丘陵浅山区开发强度与山地灾害数量之间的关系;引入频率比模型与信息熵理论表示各个区县的城市开发建设中山地灾害的强度;基于均值变点法计算丘陵浅山区建设用地建议退让距离。

表 1 基本地貌类型划分^[43]

Tab. 1 Classification of basic landform types

起伏度/m	地貌类型
一般 < 30	平原
一般 > 30	台地
< 200	丘陵
200 ~ 500	小起伏山地
500 ~ 1000	中起伏山地
1000 ~ 2500	大起伏山地
> 2500	极大起伏山地

1.3.1 均值变点法

数理统计方法中的均值变点法可计算一系列数据中的数值异常及突变的点,对于只有一个变点的

数据计算最为有效^[43],本文运用该方法计算地势起伏度最佳统计单元^[44-46]和城市建设用地建议退让距离。

利用 ArcGIS 邻域分析提取统计单元为 2×2 、 3×3 、 $4 \times 4 \cdots \cdots 24 \times 24$ 、 25×25 矩形窗口像元的粤港澳大湾区地势起伏度,计算各统计单元地势起伏度的平均值。已有研究表明地势起伏度提取窗口面积的变化呈现 logarithmi 曲线^[47-48],在该曲线上有且仅有一个由陡变缓的点^[46],该点对应的窗口即为最佳统计单元面积^[49-50],具体计算过程如下。

(1) 计算各统计单元下的单位地势度:

$$T_i = \frac{t_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, T_i 为单位地势度(m); t_i 为平均起伏度(m); S_i 为像元面积(m^2) ($i = 2, 3, 4 \cdots \cdots 24, 25$)。

(2) 对单位地势度 T_i 取对数,得到序列 X , X 为 $\{x_n, n = 1, 2, 3 \cdots \cdots 23, 24\}$; 令 $n = 2, 3, 4 \cdots \cdots 22, 23$, 每个 n 将样本序列分成两段 x_1, x_2, \dots, x_{n-1} 和 x_n, x_{n+1}, \dots, x_N 。

(3) 计算统计量 S 和 S_n 的值:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \quad (3)$$

$$S_n = \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{X}_{n1})^2 + \sum_{i=n}^N (x_i - \bar{X}_{n2})^2 \quad (4)$$

式中, \bar{X} 为总体样本的算术平均值; N 为样本总数; S 和 S_n 分别为总的离差平方和及两段样本的离差平方和之差; 每个 n 将样本分为两个段, \bar{X}_{n1} 和 \bar{X}_{n2} 分别为每段样本的算术平均值。

1.3.2 Spearman 等级相关系数

相关性分析是指两个或多个变量元素进行相关性检验, Spearman 等级相关系数 (Spearman rank correlation) 常用来评估两个变量之间的相关程度以及相关方向,且对数据要求较低,数据无需为连续变量且呈二元正态分布,在本文中,将每个区县内丘陵浅山区中建设用地面积和灾害点数量进行 Spearman 相关性分析,具体计算表达式为:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

式中, ρ 为 Spearman 等级相关系数,为 $-1 \sim 1$, ρ 越靠近 1 相关性越强, ρ 为负值时表示两个变量负相

关, $\rho \geq 0.6$ 表示变量之间为高度相关, $0.4 \leq \rho < 0.6$ 表示中度相关, $0.2 < \rho \leq 0.4$ 表示弱相关性, $\rho \leq 0.2$ 表示极弱相关性; d 为两个数据次序的差值; n 为数据的数量。

1.3.3 频率比模型与信息熵

为定量分析每个区县的开发建设强度对山地灾害的影响强度, 本文将频率比 (Frequency Ratio, FR) 模型与信息熵^[51] 有关理论和方法相结合, 将建设用地与丘陵浅山区重合区域做缓冲区, 并将缓冲区定性等间距划分, 分别计算每个等级内山地灾害点数量和丘陵浅山区开发建设用地的缓冲面积, 进而得出各区县的山地灾害信息熵值。熵值越大, 说明粤港澳大湾区城市开发建设对山地灾害的影响越大。具体计算步骤如下:

(1) 各等级山地灾害频率比计算

假设山地灾害为 D , 建设用地与丘陵浅山区重合区面积为山地灾害影响因素 x , x 为连续型因素, 将 x 划分为 k 个等级, 分别为影响因素 x_k ($k = 1 \dots t$), 则 x_k 对于 D 的频率比计算公式为:

$$R(x_k) = \frac{A_{Dx}/A_D}{A_{xk}/A} \tag{6}$$

式中, $R(x_k)$ 为山地灾害频率比; A_{Dx} 为 x_k 面积内分布的山地灾害 D 的面积; A_{xk} 为 x_k 所占区域面积; A_D 为山地灾害 D 所占区的面积; A 为区域总面积; 以上

面积单位均为 km^2 。

因为山地灾害覆盖范围的面积较难界定, 所以 x_k 的频率比计算采用山地灾害的次数来代替其覆盖面积, 得到下式:

$$R(x_k) = \frac{h_{xk}/h_D}{A_{xk}/A} \tag{7}$$

式中, h_{xk} 为 x_k 面积内发生的山地灾害 D 的次数; h_D 为区域内山地灾害 D 的总次数。

(2) 影响因素信息熵计算

① 将 $R(x_k)$ 进行规范化, 得:

$$F(x_k) = R(x_k) / \sum_{k=1}^t R(x_k) \tag{8}$$

式中, $F(x_k)$ 为规范化频率比。

② 根据熵值理论, 结合 x_k 的频率比即可计算出丘陵浅山区山地灾害的信息熵值:

$$H(x) = -e \sum_{k=1}^t F(x_k) \ln F(x_k) \tag{9}$$

2 结果与分析

2.1 丘陵浅山区开发建设强度特征分析

2.1.1 丘陵浅山区范围提取

利用 ArcGIS 统计不同单元地势起伏度的平均值 (表 2)。根据表 2 计算结果绘制平均起伏度与邻域面积对数模型拟合曲线 (图 2a), 得到表达式为

表 2 邻域面积与平均地势起伏度关系

Tab. 2 Relationship between statistical area and mean terrain relief

单元大小	邻域面积/(10 ⁴ m ²)	平均起伏度/m	差值/m	单元大小	邻域面积/(10 ⁴ m ²)	平均起伏度/m	差值/m
2 × 2	0.36	6.23	-	14 × 14	17.64	63.69	4.10
3 × 3	0.81	12.32	6.09	15 × 15	20.25	67.32	3.63
4 × 4	1.44	18.19	5.87	16 × 16	23.04	70.84	3.52
5 × 5	2.25	23.78	5.59	17 × 17	26.01	74.26	3.42
6 × 6	3.24	29.09	5.31	18 × 18	29.16	77.59	3.33
7 × 7	4.41	34.14	5.05	19 × 19	32.49	80.84	3.25
8 × 8	5.76	38.93	4.79	20 × 20	36.00	84.00	3.16
9 × 9	7.29	43.5	4.57	21 × 21	39.69	87.09	3.09
10 × 10	9.00	47.86	4.36	22 × 22	43.56	90.11	3.02
11 × 11	10.89	52.05	4.19	23 × 23	47.61	93.06	2.95
12 × 12	12.96	56.07	4.02	24 × 24	51.84	95.95	2.89
13 × 13	15.21	59.59	3.52	25 × 25	56.25	98.78	2.83

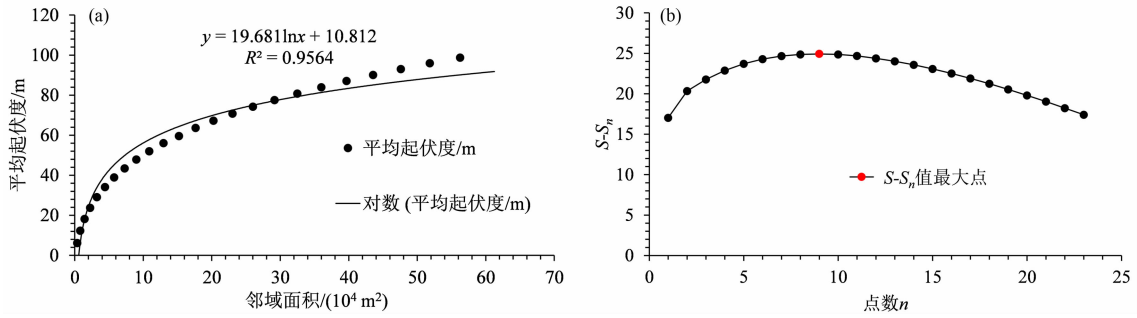


图 2 关系拟合曲线:(a)平均起伏度与邻域面积对数模型;(b) n 与 $S-S_n$ 的拟合

Fig. 2 Relationship fit curve: (a) mean terrain relief vs. logarithmic curve of neighborhood area; (b) the fitted curve of n vs. $S-S_n$

$y = 19.918 \ln x + 10.821$, 决定系数 $R^2 = 0.9564$ 。根据公式(1)~公式(4)对表 2 中的数据进行计算,得到总的离差平方和 $S = 27.71778$ 以及 S_n 随点数变化的值。绘制点数 n 与 $S-S_n$ 的拟合曲线如图 2b 所示。图中第 9 个点处的 $S-S_n$ 值最大,与之对应的 10×10 单元则是粤港澳大湾区最佳地势起伏度的提取像元。

根据粤港澳大湾区地势起伏度最佳提取像元结果,将最佳地势起伏度栅格按照 30 m 进行重分类,得到丘陵浅山区与平原的分布如图 3 所示。丘陵浅山区分布总体上呈现“中部稀少,四周广泛”的格局,主要分布于西北部、东北部、东部及深圳香港地区。面积最大的地区是肇庆市怀集县,面积为 2800.38 km^2 ;面积较少的区县是广州市越秀区、海珠区、禅城区、荔湾区,面积分别为 9.50 km^2 、 8.34 km^2 、 5.78 km^2 、 4.40 km^2 。从丘陵浅山区面积占区县总面积的比例角度来看,大湾区的西北部的肇庆市广宁县、德庆县、封开县占比都达到了 80% 以上。广州市荔湾区、佛山市顺德

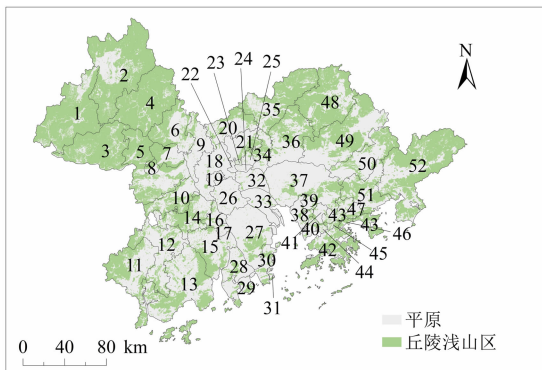


图 3 丘陵浅山区与平原分布

Fig. 3 Distribution of foothills and plains

区、禅城区丘陵浅山区占比都小于 10%,分布于大湾区中部。

2.1.2 丘陵浅山区开发建设用地分布特征

丘陵浅山区开发建设用地的分布范围如图 4 所示。丘陵浅山区的开发建设活动范围较广。其中,丘陵浅山区内开发强度较高的地区主要分布于大湾区中部以及东南部,如香港特别行政区、东莞市、深圳市龙岗区、广州市白云区、花都区、珠海市香洲区等,并且与山地灾害点密度分布有较大相似度(图 5),丘陵浅山区建设用地面积分别为 77.86 km^2 、 42.82 km^2 、 37.75 km^2 、 28.70 km^2 、 30.39 km^2 、 16.61 km^2 ,其中广州市越秀区、荔湾区、海珠区、佛山市禅城区有 50% 以上的建设用地位于丘陵浅山区(图 6)。

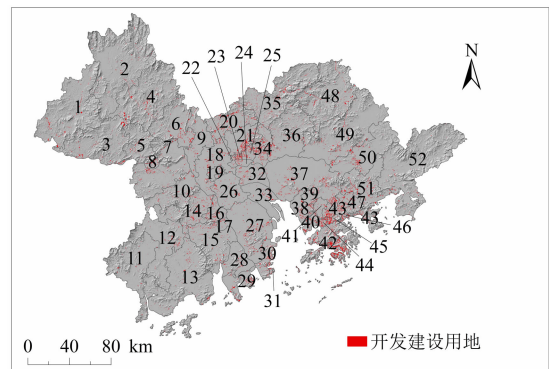


图 4 丘陵浅山区开发建设用地分布

Fig. 4 Distribution of urban expansion land in foothills

2.2 丘陵浅山区开发建设活动对山地灾害的影响

2.2.1 丘陵浅山区开发强度与山地灾害相关性分析

根据公式(5),将丘陵浅山区建设用地面积与山地灾害次数进行 Spearman 相关性分析。根据丘陵浅山区建设用地面积与灾害点数量的线性拟合(图 7),粤港澳大湾区各区县的灾害点数量随丘陵

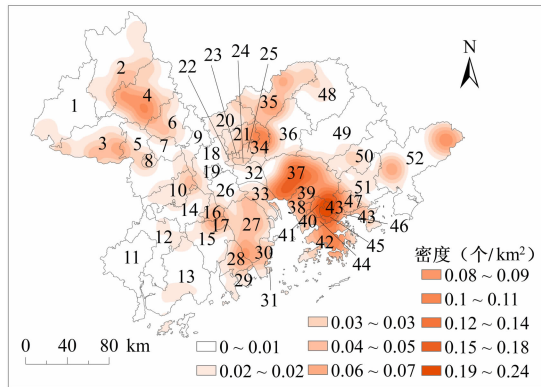


图5 山地灾害点密度

Fig. 5 Density of geo-disasters sites

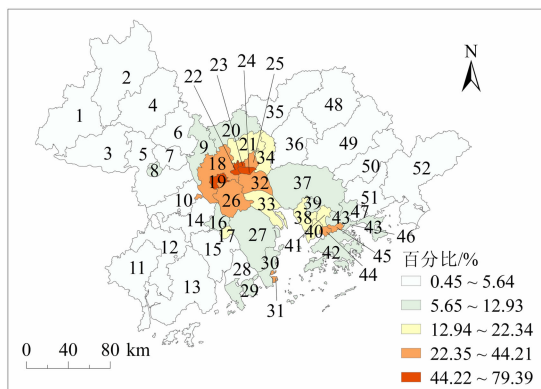


图6 丘陵浅山区建设用地占比

Fig. 6 Percentage of construction land in foothills

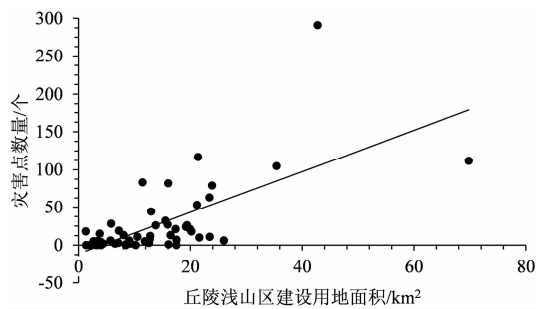


图7 山地灾害点数量与丘陵浅山区开发强度拟合

Fig. 7 Fitting the number of geo-disasters sites to the urban expansion intensity of foothills

浅山区建设用地面积的增大而增加。丘陵浅山区建设用地面积与灾害点数量呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 0.655。

为减小不同起伏度地区山地灾害触发方式的差异对研究结果的影响, 如丘陵区受地形、坡度因素影响较高等, 将研究区内地势起伏度提取结果按照自然断点分级方法分为高、较高、中、低 4 级

(图 8), 并分别计算相关性。在起伏度低和中等地区丘陵浅山区开发建设强度与山地灾害呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 在起伏度高与较高地区呈显著正相关 ($p < 0.05$) (表 3), 随着起伏度由低到高相关性呈现先减后增, 但总体来说丘陵浅山区的城市开发建设与山地灾害呈现出较强的正相关 (图 9)。

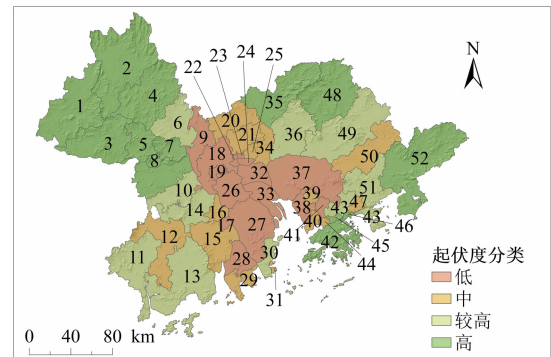


图8 地势起伏度分区

Fig. 8 Terrain relief zone

表3 丘陵浅山区开发强度与山地灾害点数量相关性

Tab. 3 Correlation between urban expansion intensity and the number of geo-hazards sites in foothills

起伏度分类	Spearman 相关性
高	0.642 *
较高	0.587 *
中	0.766 * *
低	0.894 * *

注: * * 表示极显著相关 ($p < 0.01$); * 表示显著相关 ($p < 0.05$)。

2.2.2 丘陵浅山区城市开发建设对山地灾害影响

根据统计结果, 研究区山地灾害点大多分布在距离丘陵浅山区与建设用地重合区 500 m 范围内, 占总灾害点的 65% 以上, 因此选取 500 m 缓冲区作为计算区域。将缓冲区划分为 100 m、200 m、300 m、400 m、500 m 这 5 个等级, 按照公式 (6) ~ (9) 计算得到各区县山地灾害的频率比以及信息熵值。

将计算结果按照自然段点法分为 5 级如图 10 所示。广州市花都区、白云区、黄浦区以及深圳市南山区、龙华区、龙岗区、罗湖区以及香港特别行政区城市开发建设对山地灾害影响最大, 信息熵值分别为 4.34、4.27、4.28、4.24、4.33、4.29、4.23、4.31, 这些区

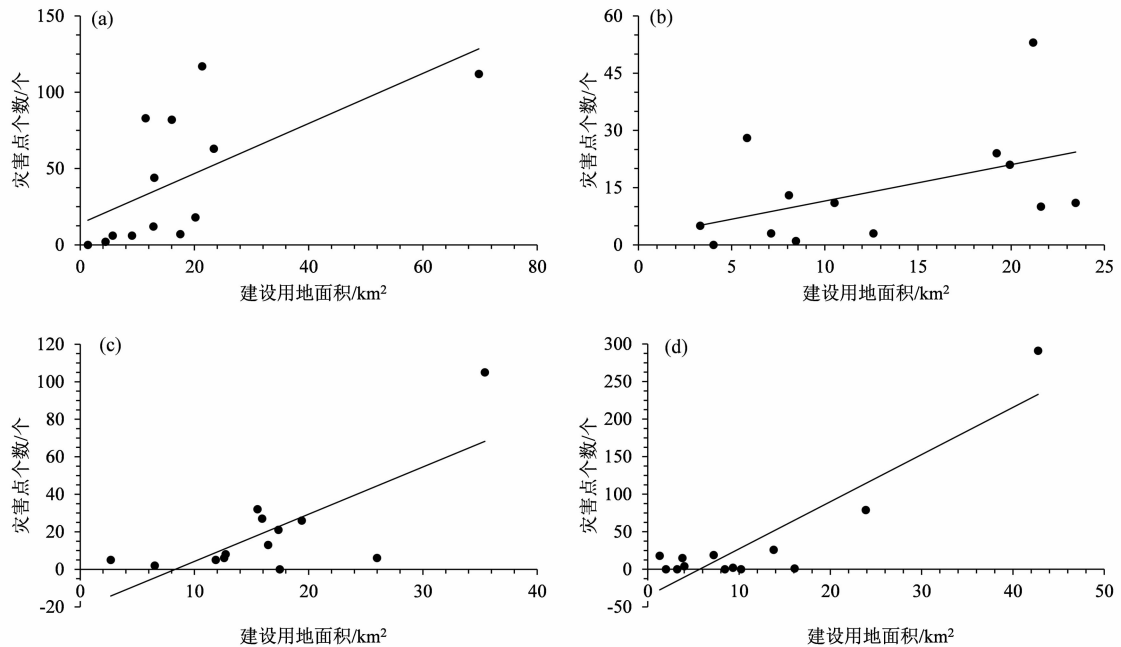


图 9 丘陵浅山区不同起伏度山地灾害数量与开发强度拟合：

(a)起伏度高;(b)起伏度较高;(c)起伏度中;(d)起伏度低

Fig. 9 Fitting the number of geo-hazards to the urban expansion intensity of foothills:

(a) high terrain relief; (b) relatively high terrain relief; (c) middle terrain relief; (d) low terrain relief

县大多以台地、丘陵地貌为主,地势起伏度为中等且丘陵浅山区建设用地面积占比大。大湾区东部、西北部影响次之,这些区县主要以丘陵地貌为主,地势起伏度高,平均在 50 m 到 80 m (以 0.09 km^2 为计算单元),山体坡度陡,山体自然承灾能力差,类似强度的人类工程活动在此区域影响被放大。大湾区中部平原地区,西南台地地貌地区影响最小,该地区地势较为平坦,起伏度在 7 m 到 40 m 之间(以 0.09 km^2 为计算单元),且丘陵浅山区开发建设强度低。

2.3 丘陵浅山区城市建设用地建议退让距离

将丘陵浅山区开发建设用地区域建立研究单元为 $0 \sim 1 \text{ km}$,间隔为 20 m 的缓冲区,统计每个缓冲区内的灾害点数量,绘制缓冲区距离与灾害点个数的拟合曲线如图 11a 所示。灾害点数量随缓冲距离呈 logarithmic 曲线,即随着缓冲距离的扩大,灾害点个数随之呈现先快速减小,经过唯一拐点之后降速明显减缓并呈现缓慢减小的过程,该曲线存在唯一“拐点”,该点的缓冲距离则是城市建设用地与丘陵浅山区最佳退让距离。利用均值变点法理论对数据进行计算,分别以 S 、 S_i 表示离差平方和及两段样本的离差平方和之差,并根据计算结果绘制缓冲区距

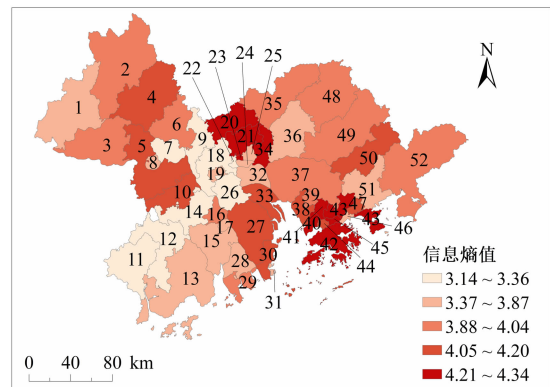


图 10 信息熵值空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of information entropy values

离与 $S-S_i$ 的拟合曲线如图 11b 所示。在距离缓冲区 120 m 处 $S-S_i$ 的值最大,该点则是图 11a 中曲线的唯一“拐点”,得出粤港澳大湾区的城市建设用地的建议退让距离为 120 m。

3 讨论

本文探究了粤港澳大湾区城市开发与建设丘陵浅山区山地灾害相关性。结合分析结果,粤港澳大

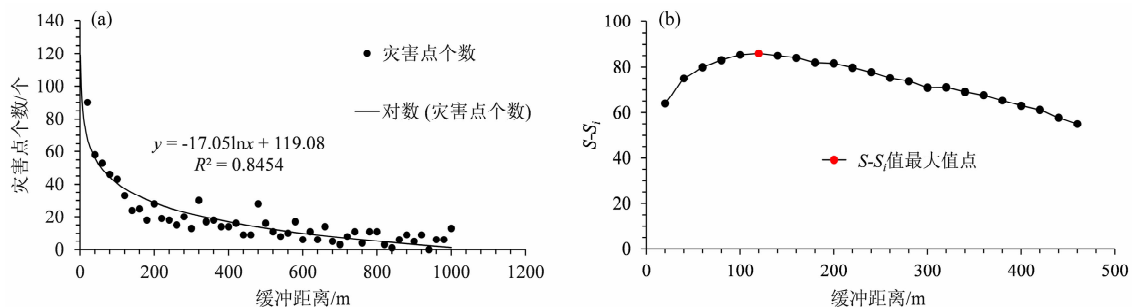


图 11 关系拟合曲线:(a)缓冲距离与灾害点拟合;(b)缓冲距离与 $S-S_i$ 关系

Fig. 11 Relationship fit curve: (a) buffer distance vs. disasters point; (b) buffer distance vs. $S-S_i$ curve

湾区城市开发与山地灾害发生强度之间具有极强的相关性,且开发建设在起伏度中等地区对山地灾害影响最大。大湾区中部、南部等地,例如广州市花都区、白云区、黄浦区以及深圳市南山区、龙华区、龙岗区、罗湖区以及香港特别行政区,这些地区的山体较小,自然状态下山体边坡稳定性较高,过快的城市扩张速度与过强的开发建设活动,对边坡稳定性破坏严重。

在丘陵浅山区的开发建设是粤港澳大湾区山地灾害发生的主要原因之一。本文基于均值变点法提出了粤港澳大湾区城市建设用地与丘陵浅山区的建议退让距离为 120 m。本研究弥补了以往研究中对城市建设用地与丘陵浅山区之间的合理退让距离研究的欠缺,提出了对于丘陵浅山区的保护范围,可在国土空间规划中作为参考。

本文在研究方法 with 数据收集方面仍然存在局限:(1)以区县作为尺度进行城市开发建设对山地灾害的影响研究,受到部分区县面积较大或行政区划方法不同的影响(例如东莞市、中山市面积较大且没有区县级别的行政区),导致研究结果被放大化、均一化,不能够准确呈现出城市开发建设对丘陵浅山区山地灾害的具体影响区域,而以地貌区划单元为尺度进行研究是本文后续较好的研究方向。(2)由于各地区山地灾害数据的统计口径存在差异,收集也较为困难,本文只用了 2014—2020 年的数据讨论了城市建设用地与丘陵浅山区山地灾害相关关系。若借助遥感影像解译的方法,进行山地灾害数据的统一收集,则可以解决数据收集口径不一以及以往数据难以获取的问题。研究可从更长的时间跨度,探索城市开发建设对丘陵浅山区山地灾害的影响及其时空分异

特征。

4 结论

快速的城市建设用地扩张和高强度的城市开发建设对山地灾害产生较大影响。本文探究了粤港澳大湾区开发与丘陵浅山区山地灾害的相关关系,主要结论如下:

(1)大湾区地势起伏度最佳统计单元为 10×10 (0.09 km^2)。丘陵浅山区总面积为 $28\,954.01 \text{ km}^2$, 占大湾区总面积的 52%。丘陵浅山区分布呈现中间少四周多的格局。

(2)丘陵浅山区建设用地主要分布于大湾区中部以及东南地区,例如香港特别行政区、东莞市、深圳市龙岗区、广州市白云区和花都区、珠海市香洲区等。

(3)丘陵浅山区开发建设强度与山地灾害的发生在地势起伏度低的地区相关性最大;中等地区次之;较高的地区最低;起伏度高的地区相对于较高的地区反而有较大提升,相关系数随地势起伏度上升先减后增。

(4)城市开发建设对丘陵浅山区山地灾害影响最大的地区主要分布于广州市花都区、白云区、黄浦区和深圳市南山区、龙华区、龙岗区、罗湖区以及香港特别行政区。

(5)大湾区的城市建设用地与丘陵浅山区的建议退让距离为 120 m。

参考文献 (References)

- [1] 俞孔坚,袁弘,李迪华,等. 北京市浅山区土地可持续利用的困境与出路[J]. 中国土地科学, 2009, 23(11): 3-8+20. [YU Kongjian, YUAN Hong, LI Dihua, et al. Difficulties and solutions

- of the sustainable land use strategy in suburban hilly area in Beijing [J]. *China Land Science*, 2009, **23**(11): 3 - 8 + 20] DOI: 10.13708/j.cnki.cn11-2640.2009.11.001
- [2] GAO Jing, O'NEILL B C. Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and shared socioeconomic pathways [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**:2302. DOI: 10.1038/s41467-020-15788-7
- [3] 柯敏. 北京浅山区土地利用潜力与利用模式研究[D]. 北京:清华大学, 2010:1-2. [KE Min. Study on the land potential and use pattern in shallow mountain area of Beijing [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010:1-2]
- [4] 陈利顶, 杨爽, 冯晓明. 土地利用变化的地形梯度特征与空间扩展——以北京市海淀区和延庆县为例[J]. *地理研究*, 2008, **27**(6):1225-1234+1481. [CHEN Liding, YANG Shuang, FENG Xiaoming. Land use change characteristics along the terrain gradient and the spatial expanding analysis: A case study of Haidian district and Yanqing county, Beijing [J]. *Geographical Research*, 2008, **27**(6):1225-1234+1481]
- [5] 彭秋志, 唐铃, 陈杰, 等. 2000—2015 年深圳市建设用地坡谱演变研究[J]. *自然资源学报*, 2018, **33**(12):2200-2212. [PENG Qiuzhi, TANG Ling, CHEN Jie, et al. Study on the evolution of construction land slope spectrum in Shenzhen during 2000—2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(12):2200-2212] DOI: 10.31497/zrzyxb.20171159
- [6] 蒋佳佳, 邵景安, 谭少军, 等. 重庆两江新区低丘缓坡开发建设生态适宜性评价[J]. *地理研究*, 2019, **38**(6):1403-1419. [JIANG Jiajia, SHAO Jing'an, TAN Shaojun, et al. Evaluation on ecological suitability for development and construction of gentle hillside in Liangjiang New Area [J]. *Geographical Research*, 2019, **38**(6):1403-1419] DOI: 10.11821/dlyj020180035
- [7] LIU Yaqun, SONG Wei, DENG Xiangzheng. Understanding the spatiotemporal variation of urban land expansion in oasis cities by integrating remote sensing and multi-dimensional DPSIR-based indicators [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **96**:23-37. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.01.029
- [8] XU Xinliang, MIN Xibi. Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in China using remote sensing data [J]. *Cities*, 2013, **35**:104-113. DOI: 10.1016/j.cities.2013.05.002
- [9] 段钊, 赵法锁, 陈新建. 陕北黄土高原区崩塌发育类型及影响因素分析——以吴起县为例[J]. *自然灾害学报*, 2012, **21**(6):142-149. [DUAN Zhao, ZHAO Fasuo, CHEN Xinjian. Types and influencing factors of collapse development in loess plateau region of north Shaanxi: A case study of Wuqi county [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, **21**(6):142-149] DOI: 10.13577/j.jnd.2012.0621
- [10] 周静静, 赵法锁, 李辉, 等. 陕西省地质灾害与影响因素相关性研究[J]. *灾害学*, 2019, **34**(2):228-234. [ZHOU Jingjing, ZHAO Fasuo, LI Hui, et al. Correlational research between geological hazards and impact factors in Shaanxi province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, **34**(2):228-234] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.041
- [11] 马云飞, 邹芳, 徐海燕. 基于地质灾害风险评价的衡东县国土空间管制研究[J]. *地理信息世界*, 2020, **27**(6):14-20. [MA Yunfei, ZOU Fang, XU Haiyan. Land space control of Hengdong county based on geological hazard risk assessment [J]. *Geomatics World*, 2020, **27**(6):14-20]
- [12] 欧阳晓, 朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J]. *地理学报*, 2020, **75**(3):571-588. [OUYANG Xiao, ZHU Xiang. Spatio-temporal characteristics of urban land expansion in Chinese urban agglomerations [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(3):571-588] DOI: 10.11821/dlxb202003010
- [13] 方朝丰. 广东省地质灾害防治现状和对策研究[J]. *西部资源*, 2018(4):112-114. [FANG Chaofeng. Research on the prevention status and countermeasures of geological disasters in Guangdong province [J]. *Western Resources*, 2018(4):112-114] DOI: 10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2018.03.052
- [14] 李晓文, 方精云, 朴世龙. 上海及周边主要城镇城市用地扩展空间特征及其比较[J]. *地理研究*, 2003, **22**(6):769-779+813-814. [LI Xiaowen, FANG Jingyun, PIAO Shilong. The comparison of spatial characteristics in urban landuse growth among the central and sub-cities in Shanghai region [J]. *Geographical Research*, 2003, **22**(6):769-779+813-814]
- [15] 叶强, 莫正玺, 许乙青. 1979—2014 年长沙市城市功能用地扩展与驱动力研究[J]. *地理研究*, 2019, **38**(5):1063-1079. [YE Qiang, MO Zhengxi, XU Yiqing. The expansion and driving forces of the functional space land: A case study of Changsha from 1979 to 2014 [J]. *Geographical Research*, 2019, **38**(5):1063-1079] DOI: 10.11821/dlyj020171193
- [16] 王雪微, 王士君, 宋飏, 等. 长春市城市建设用地演进的空间识别及影响机制研究[J]. *地理科学*, 2015, **35**(7):873-881. [WANG Xuwei, WANG Shijun, SONG Yang, et al. Space recognition and influence mechanism of urban construction land evolution of Changchun city [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, **35**(7):873-881] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.07.010
- [17] 张利, 雷军, 李雪梅, 等. 1997—2007 年中国城市用地扩张特征及其影响因素分析[J]. *地理科学进展*, 2011, **30**(5):607-614. [ZHANG Li, LEI Jun, LI Xuemei, et al. The features and influencing factors of urban expansion in China during 1997—2007 [J]. *Progress in Geography*, 2011, **30**(5):607-614]
- [18] 邓伟, 方一平, 唐伟. 我国山区城镇化的战略影响及其发展导向[J]. *中国科学院院刊*, 2013, **28**(1):66-73. [DENG Wei, FANG Yiping, TANG Wei. The strategic effect and general directions of urbanization in mountain areas of China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, **28**(1):66-73] DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2013.01.007
- [19] WANG Haijun, PENG Peihao, KONG Xiangdong, et al. Evaluating the suitability of urban expansion based on the logic

- minimum cumulative resistance model: A case study from Leshan, China [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, **8**(7):291. DOI: 10.3390/ijgi8070291
- [20] 靳焕焕, 张立亭, 朱瑕. 南昌市城市扩张适宜性分区和预测分析[J]. *江西科学*, 2020, **38**(3):341–348. [JIN Huanhuan, ZHANG Liting, ZHU Xia. Suitability zoning and prediction analysis of urban expansion in Nanchang city [J]. *Jiangxi Science*, 2020, **38**(3):341–348] DOI: 10.13990/j.issn1001–3679.2020.03.011
- [21] 易丹, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于生态敏感性评价和 CA-Markov 模拟的平原型城市开发边界划定——以南昌市为例[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(1):208–218. [YI Dan, ZHAO Xiaomin, GUO Xi, et al. Delimitation of urban development boundary based on ecological sensitivity evaluation and CA-Markov simulation in plain city: A case of Nanchang, Jiangxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(1):208–218] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202001.013
- [22] 黄靖, 第宝锋, 边静虹, 等. 凉山州山地灾害空间分布特征及人为驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2014, **21**(6):278–283. [HUANG Jing, DI Baofeng, BIAN Jinghong, et al. Analysis on the spatial distribution characteristics and human driving forces of mountain hazards in Liangshan prefecture [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21**(6):278–283] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.06.052
- [23] 曹慧. 基于 RS 与 GIS 的土地利用与地质灾害相关性分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2007:3–4. [CAO Hui. The relevancy analysis of land-use and geological hazard based on RS and GIS [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007:3–4]
- [24] CHEN Guobin. GIS method and its application for harmonious evaluation of urban construction land and geological environment [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, **12**(20):600. DOI: 10.1007/s12517–019–4761–x
- [25] 侯俊东, 金欢. 基于超 DEA-多元回归的地质灾害社会脆弱性影响因素研究[J]. *灾害学*, 2017, **32**(4):23–29. [HOU Jundong, JIN Huan. Factors influencing provincial social vulnerability of geo-disasters with supper efficiency DEA and multivariable regression models [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, **32**(4):23–29] DOI: 10.3969/j.issn.1000–811X.2017.04.005
- [26] 庆丰, 熊木齐, 赵岩, 等. 人类活动对地质灾害的影响——以甘肃省武都区为例[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2015, **51**(6):894–897. [QING Feng, XIONG Muqi, ZHAO Yan, et al. Impact of human activities on geological disasters: A case study of Wudu district, Gansu province [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2015, **51**(6):894–897] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2015.06.023
- [27] 王新胜, 滕德贵, 谢伟, 等. 山地城市滑坡灾害空间分布特征及影响因素分析[J]. *重庆大学学报*, 2020, **43**(8):87–96. [WANG Xinsheng, TENG Degui, XIE Wei, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of landslide disasters in mountain cities [J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, **43**(8):87–96] DOI: 10.118335/j.issn.1000–582X.2020.08.010
- [28] 谢洪波, 刘正疆, 文广超, 等. 四川金川—小金公路沿线滑坡、崩塌影响因素分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, **32**(1):10–17. [XIE Hongbo, LIU Zhengjiang, WEN Guangchao, et al. Influencing factors of landslides and rockfalls along the Jinchuan-Xiaojin highway in Sichuan [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, **32**(1):10–17] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003–8035.2021.01.02
- [29] 冯泉霖, 李洪涛, 赵振华, 等. 济南城市建设区外山体保护线划定探索及实践[J]. *山东国土资源*, 2020, **36**(10):58–64. [FENG Quanlin, LI Hongtao, ZHAO Zhenhua, et al. Exploration and practice of delineation of mountain protection line in Ji'nan urban construction area [J]. *Shandong Land and Resources*, 2020, **36**(10):58–64] DOI: 10.12128/j.issn.1672–6979.2020.10.010
- [30] 史晨曦. 山地城市基本生态控制线划定方法研究——以祁门县为例[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018:1–2. [SHI Chenxi. Study on the method of the basic planning of ecological control line of mountain towns-taking Qimen county as an example [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018:1–2]
- [31] 周鹏, 邓伟, 张少尧, 等. 太行山区国土空间格局演变特征及其驱动力[J]. *山地学报*, 2020, **38**(2):276–289. [ZHOU Peng, DENG Wei, ZHANG Shaoyao, et al. Evolution characteristics and its driving force of territory space pattern in the Taihang Mountain, China [J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(2):276–289] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000509
- [32] 姜广辉, 张凤荣, 孔祥斌, 等. 北京山区建设用地扩展空间分异分析[J]. *地理研究*, 2006, **25**(5):905–912. [JIANG Guanghui, ZHANG Fengrong, KONG Xiangbin, et al. The spatial differentiation of construction land expansion in Beijing mountainous area [J]. *Geographical Research*, 2006, **25**(5):905–912]
- [33] 刘志涛, 王少剑, 方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制[J]. *地理学报*, 2021, **76**(11):2797–2813. [LIU Zhitao, WANG Shaojian, FANG Chuanglin. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(11):2797–2813] DOI: 10.11821/dlxb202111014
- [34] 罗赵慧, 朱璐平, 张晓君, 等. 粤港澳大湾区植被 CUE 变化及与气候变化的关系[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(12):5793–5805. [LUO Zhaohui, ZHU Luping, ZHANG Xiaojun, et al. Spatiotemporal variation of CUE and its correlation with climate change in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(12):5793–5805] DOI:

- 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210713.001
- [35] 邓昊键,李恒凯,熊永柱,等. 近20年粤港澳大湾区城市群时空演化格局分析[J]. 世界地理研究,2020,29(6):1181-1189. [DENG Haojian, LI Hengkai, XIONG Yongzhu, et al. Temporal-spatial evolution of urban agglomeration in Guangdong-Hong-Kong-Macao Greater Bay Area in recent 20 years [J]. World Regional Studies, 2020,29(6):1181-1189] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9479.2020.06.2019493
- [36] 谢和平,杨仲康,邓建辉. 粤港澳大湾区地热资源潜力评估[J]. 工程科学与技术,2019,51(1):1-8. [XIE Heping, YANG Zhongkang, DENG Jianhui. Assessment of geothermal resource potential in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019,51(1):1-8] DOI: 10.15961/j.jsuese.201900026
- [37] 王钧,宫清华,宇岩,等. 粤港澳大湾区城市群自然灾害综合承灾能力评价[J]. 地理研究,2020,39(9):2189-2199. [WANG Jun, GONG Qinghua, YU Yan, et al. Evaluation of comprehensive disaster-bearing capacity of urban natural disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Geographical Research, 2020,39(9):2189-2199] DOI: 10.11821/dlyj020200401
- [38] 杜鹏,夏斌,杨蕾. 珠江三角洲城市自然灾害综合应对能力评价模型研究[J]. 广东农业科学,2010,37(10):176-179+196. [DU Peng, XIA Bin, YANG Lei. Research on evaluation model of urban response capacity of nature disaster in the Pearl River Delta [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010,37(10):176-179+196] DOI: 10.16768/j.issn.1004-874x.2010.10.008
- [39] 宫清华,叶玉瑶,王钧,等. 粤港澳大湾区防灾韧性空间规划策略研究[J]. 规划师,2021,37(3):22-27. [GONG Qinghua, YE Yuyao, WANG Jun, et al. Resilient disaster prevention space planning of Guangdong-Hong Kong-Macao Great Bay Area [J]. Planners, 2021,37(3):22-27]
- [40] 中国科学院地理研究所. 中国1:1000000地貌图制图规范[M]. 北京:科学出版社,1987. [Institute of Geography, Chinese Academy of Science. 1:1000000 geomorphological mapping specification [M]. Beijing: Science Press,1987]
- [41] 周成虎,程维明,钱金凯,等. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报,2009,11(6):707-724. [ZHOU Chenghu, CHENG Weiming, QIAN Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1 000 000 in China [J]. Journal of Geo-Information Science, 2009,11(6):707-724]
- [42] 李庆. 浅山区县域农业可持续发展研究——以黑龙江省尚志市为例[D]. 沈阳:东北林业大学,2007:60-62. [LI Qing. Study on sustainable agricultural development at county level in shallow mountainous areas—taking Shangzhi city of Heilongjiang province as a case [D]. Shenyang: Northeast Forestry University, 2007:60-62]
- [43] 范建容,张子瑜,李立华. 四川省山地类型界定与山区类型划分[J]. 地理研究,2015,34(1):65-73. [FAN Jianrong, ZHANG Ziyu, LI Lihua. Mountain demarcation and mountainous area divisions of Sichuan province [J]. Geographical Research, 2015,34(1):65-73] DOI: 10.11821/dlyj201501006
- [44] 陈学兄,常庆瑞,毕如田,等. 地形起伏度最佳统计单元算法的比较研究[J]. 水土保持研究,2018,25(1):52-56. [CHEN Xuexiong, CHANG Qingrui, BI Rutian, et al. Comparative study on the best statistical unit algorithm of relief amplitude [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(1):52-56] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.01.009
- [45] 张明媚,薛永安. 斜坡地质灾害敏感性评价中地势起伏度提取最佳尺度研究[J]. 太原理工大学学报,2020,51(6):881-888. [ZHANG Mingmei, XUE Yongan. Optimal scale for extracting relief amplitude in slope geological hazard sensitivity evaluation [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020,51(6):881-888] DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2020.06.015
- [46] 王让虎,张树文,蒲罗曼,等. 基于ASTER GDEM和均值变点分析的中国东北地形起伏度研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(6):49-54. [WANG Ranghu, ZHANG Shuwen, PU Luoman, et al. Analysis on the relief amplitude in northeast China based on ASTER GDEM and mean change point method [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016,30(6):49-54] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.180
- [47] 王玲,吕新. 基于DEM的新疆地势起伏度分析[J]. 测绘科学,2009,34(1):113-116. [WANG Ling, LYU Xin. Analysis of the relief amplitude in Xinjiang based on digital elevation model [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009,34(1):113-116] DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2009.01.038
- [48] 张军,李晓东,陈春艳,等. 新疆地势起伏度的分析研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2008,44(S1):10-13+19. [ZHANG Jun, LI Xiaodong, CHEN Chunyan, et al. Analysis of the relief amplitude in Xinjiang [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2008,44(S1):10-13+19] DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2008.s1.019
- [49] 涂汉明,刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. 测绘学报,1991,20(4):311-319. [TU Hanming, LIU Zhendong. Study on relief amplitude in China [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1991,20(4):311-319]
- [50] 涂汉明,刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖北大学学报(自然科学版),1990,12(3):266-271. [TU Hanming, LIU Zhendong. Demonstrating on optimum statistic unit of relief amplitude in China [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 1990,12(3):266-271]
- [51] 于秀珍,牟瑞芳. 雅康高速公路沿线地质灾害分布特征及影响因素分析[J]. 安全与环境学报,2022,22(2):876-884. [YU Xiuzhen, MOU Ruifang. Distribution characteristics and influencing factors of geological disasters along Yakang expressway [J]. Journal of Safety and Environment, 2022,22(2):876-

884] DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.1631

Urban Expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China and Resulting Geo-Disasters in Foothills

LI Hao^{1,2}, WANG Jun^{2,3}, HUANG Jianguo¹, LUO Yizhen^{4,5}, GONG Qinghua^{2,3*}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou 510070, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China;

4. Nonferrous Mine Geological Disaster Prevention Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China;

5. Guangdong Jindong Construction Engineering Co., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The original geo-environment and geomorphology is deeply changed with rapid urban expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China (abbreviated as the Bay). Unplanned excavations in foothills for construction land or reclamation, etc. bring about high risk of geo-disasters in hilly and low mountainous areas of the Bay. It is quite necessary to evaluate the potential for occurrence of geo-hazards in foothills of the Bay, and to determine the suitability of land reclamation in piedmont, which are conducive to ensuring the sustainable use of land resources and the eco-environmental safety of urban economic circles.

There were lots of research on the relationship between urban expansion through land reclamation in mountains and consequent geo-disaster events, as well as their pertinent compatibility; however, little attention was paid to the circumstances in the foothills of the Bay, which necessitates a scientific insight into the healthy development of the Bay.

In this study, the Bay was targeted as case for investigation into the dependence of geo-hazards on urbanization in foothills (defined in this paper, it included hilly region and bench terrace). Spearman's rank correlation coefficient method was introduced to evaluate the intensity of geo-hazards as a result of urbanization; Based on the frequency ratio model and information entropy theory, it investigated the impact of engineering construction intensity in foothills on the extent of geo-hazard; Then, a key index of determination of the safe retreat distance between constructions and the foot of a hillside was constructed.

The results showed that: (1) The urban expansion areas were mainly located in the central and southeastern parts of the Bay, including Hong Kong, Dongguan, Shenzhen, Baiyun District and Huadu District of Guangzhou, etc.; (2) The correlation coefficients between urban expansion intensity and geo-disasters were 0.894, 0.766, 0.587 and 0.642 respectively in areas with low, medium, relatively high, and high relief amplitude, which showed a trend of decrease in the first, followed by an increase with the increase of the relief amplitude; (3) The information entropy value of geo-disasters ranged from 3.1 to 4.3, and the areas with high entropy values were mainly those with high expansion intensity and medium or low relief amplitude; (4) The recommended retreat distance between construction lands and foothills in the Bay was 120 m. The results of this study could provide a scientific basis for planned land reclamation in city clusters and spatial regulation of land use planning.

Key words: urban expansion; geo-disasters; safe retreat distance; foothills; mean change-point method; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area