

DOI: 10.12401/j.nwg.2023074

一种基于地质灾害风险评价的山区城镇 国土空间规划优化方法

冯卫^{1,2,3}, 唐亚明^{1,2,*}, 贾俊^{1,2}, 马红娜^{1,2}, 李彦娥^{1,2}, 洪勃^{1,2}, 薛强^{1,2}, 唐卓^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119;
3. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 以山西省乡宁县城扇区扇子坪-崔家坡段为例, 将“木桶效应”理论与地质灾害风险“点面双控”体系相结合, 提出了一种基于地质灾害风险评价的国土空间规划优化方法。该方法以 1:1 万地质灾害风险评价为基础, 结合地质灾害风险“点面双控”体系, 将坡度、河流距、地质灾害风险分区以及地质灾害隐患点致灾范围作为“木桶效应”中的短板因子, 按照等级从高到低依次为严控开发区、适度开发区和优先开发区的先后顺序进行分级赋值, 将同一地块内各短板因子的最高等级值作为该地块的国土空间规划优化结果值。结果表明, 研究区内的严控开发区占比 26.67%, 适度开发区占比 54.81%, 优先开发区占比 18.52%, 从理论上说明了研究区以优先开发区和适度开发区为主, 具有较大的开发潜力。文中提出的优化方法能够便捷高效地完成大比例尺山区城镇国土空间规划, 研究成果可为类似地区开展国土空间规划提供参考依据。

关键词: 木桶效应; “点面双控”体系; 风险评价; 国土空间规划; 山区城镇

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0232-07

A Method for Optimizing Territorial Space Planning of Mountain Towns Based on Geological Hazard Risk Assessment

FENG Wei^{1,2,3}, TANG Yaming^{1,2,*}, JIA Jun^{1,2}, MA Hongna^{1,2}, LI Yan'e^{1,2}, HONG Bo^{1,2}, XUE Qiang^{1,2}, TANG Zhuo^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Taking Fanziping-Cuijiapo section of Xiangning County, Shanxi Province as an example, a method of optimizing territorial spatial planning based on geological hazard risk assessment is proposed by combining “barrel effect” theory with “double-control of point and zone” system of geological disaster risk. This method is based on 1:10,000 geological disaster risk assessment and combined with “double-control of point and zone” system of geological disaster risk, taking slope, river distance, geological disaster risk zoning and disaster range of geological disaster hidden danger point as the short board factors in the barrel effect. According to the order of strictly controlled development zone, moderate development zone and priority development

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-04-17; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“晋陕黄土高原河曲-韩城段灾害地质调查”(DD20190642), “吕梁山区城镇地质灾害调查”(DD20160276)及“黄土高原等典型地区地质灾害精细调查与风险管控”(DD20221739)联合资助。

作者简介: 冯卫(1983-), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事地质灾害风险管理研究工作。E-mail: fengwei0510@qq.com。

* 通讯作者: 唐亚明(1973-), 女, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害风险管理研究工作。E-mail: tangyaming73@sohu.com。

zone from high to low, the highest grade value of each weakness factor in the same plot is taken as the result value of optimizing territorial space planning of the plot. The results show that strictly controlled development zones in the study area account for 26.67%, moderate development zones account for 54.81%, and priority development zones account for 18.52%. Theoretically, it shows that the study area is dominated by priority development zones and moderate development zones, which has great development potential. The proposed optimization method can conveniently and effectively complete territorial space planning in large scale mountainous areas, and the research results can provide a reference for similar areas to carry out territorial space planning.

Keywords: barrel effect; system of “double-control of point and zone”; risk assessment; territorial space planning; mountain towns

近年来,中国在自然生态国土空间规划方面出台了一系列相关政策,逐渐建立健全国土空间规划体系并进一步完善国土空间用途管制制度(Wei et al., 2014; 沈悦等, 2017; 张晓玲等, 2020),特别是在城镇开发规划方面,取得了较为丰硕的研究成果。唐亚明等(2015, 2016)在开展地质灾害风险评价的同时,从全球视角探讨了城镇化进程过程中的土地利用模式。高晓路等(2019)结合福建省城镇空间规划案例,在资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价的基础上,确定了城镇适宜性评价与城镇空间、城镇开发边界划分的主要思路和技术路线;江思义等(2019)以层次分析法为基础,利用地质环境要素对岩溶地区建设用地开发适宜性进行了系统评价。郑续等(2020)利用专家打分法和三维魔方法,开展了陕西省延川县国土空间开发适宜性评价和功能分区研究。马云飞等(2020)从地质灾害风险角度构建了湖南省衡东县建设用地评价体系,完成了相应的国土空间管制。陈霆等(2022)以福州市为例,基于国土空间规划视角构建了一套城镇开发的全域多维度国土空间管控体系。但上述方法主要从定性分析的角度开展国土空间规划,且未考虑各影响因子的短板因素,存在一定的局限性,特别是对于山区城镇来说针对性相对较弱。

随着地质分析理论在国土空间规划领域的应用日益广泛,部分学者构建了基于“木桶效应”理论、风险理论和边际理论的“双评价”理论框架和技术方法,并指出应利用风险理论,进一步开展地质环境承载能力、国土空间适宜性和地质安全评价(张茂省等, 2020)。笔者针对“双评价”中的国土空间适宜性评价方法进行了积极探索,将“木桶效应”理论与自然资源部“十四五”规划中提出的地质灾害风险“点面双控”机制相结合,提出了一种基于地质灾害风险评价的国土空间规划优化方法。以山西省乡宁

县城区扇子坪-崔家坡段为例,在1:1万地质灾害风险评价的基础上,完成了该地区的国土空间规划优化,这在山区城镇国土空间规划中具有一定的指导作用。

1 研究方法

1.1 “木桶效应”

“木桶效应”又称“水桶效应”、“短板效应”。该理论来源于古典经济学,是指由数块长短不齐的木板制成的木桶,其蓄水量是由最短的那块木板决定的,其他木板再长,也无济于事(周伟等, 2003)。也就是说,事物的最终结果,往往受制于要素的最低水平。

在山区城镇开展国土空间规划优化时,地形条件、河网分布状况、地质灾害隐患分布情况等客观因素均影响着规划分区的确定,为了充分利用好每一寸土地,就需要每项因素均达到相应的限定条件。因此,筛选出限制性因素“短板”,充分利用好“木桶效应”,对高效合理地开展国土空间规划优化具有重要的指导作用。

1.2 地质灾害风险“点面双控”体系

地质灾害风险“点面双控”是指对地质灾害隐患点和地质灾害风险区分别进行风险管控(铁永波等, 2022)。

地质灾害隐患点是在地质灾害风险调查的基础上,按照滑坡、崩塌等主要地质灾害类型进行划分,详细统计地质灾害隐患点的数量、分布、规模、威胁对象等数据,并建立数据库,进而实现从“点”的角度开展风险防控。防控的具体措施包括明确隐患点管理责任人,建立“雨量监测+普适型监测+专业监测+应急监测”的多层次监测体系等。

针对单体地质灾害(这里主要指滑坡或崩塌),考虑到承灾对象距离滑塌源区的远近直接影响滑塌体

作用于其上的强度,这里引入延伸角 α (reach angle)、塌落角 ψ (source-talus angle)的概念。延伸角指滑塌源区最高点与崩落物最远点的连线与水平线之间的夹角,塌落角是滑塌源区最高点与滑塌倒锥体前缘最低点的连线与水平线之间的夹角(Hungro, 2005)。若承灾体处于 ψ 角之内,则受到滑塌的直接冲击、压塌作用强,会受到较大损害;若承灾体位于 ψ 角之外 α 角之内,会受到一定影响,但作用强度远远小于前者(唐亚明等, 2012a)(图1)。

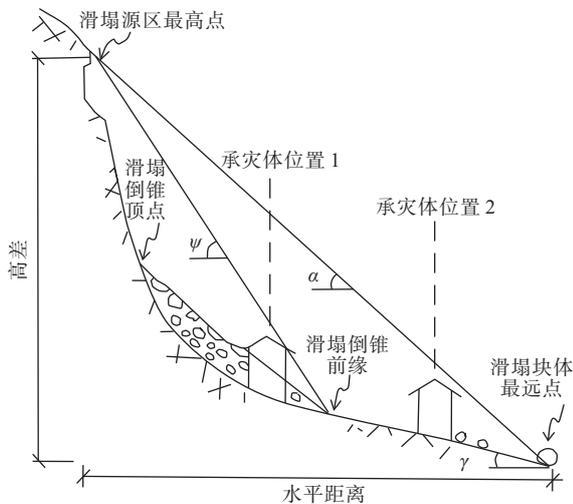


图1 承灾体与滑塌源区的距离示意图
(据 Hungro, 2005 修改)

Fig. 1 Schematic diagram of the distance between the collapse sources and the elements in risk

地质灾害风险区主要根据地质灾害风险调查评价结果进行区划而得,按照自然资源部最新分级标准,将地质灾害风险区分为极高风险区、高风险区、中风险区及低风险区4个等级,进而实现从“面”的角度开展风险防控。防控的具体措施包括构建风险区网格化管理体系,形成“网格指导员-网格长-网格员”三级管理制度,建立风险区防治协同机制和应急联动机制等。

1.3 优化体系构建

基于“木桶效应”基本原理,笔者认为国土空间规划优化体系建立得是否得当的关键在于能否筛查出合理的“短板”因子。通过调查分析,坡度是建设用地开发利用中的一项重要限制性因子,控制着用地类型和用地开发成本;河流距是建设用地开发利用过程中的另一项重要指标,紧邻水系两侧,可能受河水上涨的影响,进而变成淹没区,离河流过远,会增大居民生活供水困难;地质灾害风险分区是从“面”的角

度开展风险防控,直接决定着山区建设用地开发利用的程度;地质灾害隐患点致灾范围是从“点”的角度开展风险防控,反映了地质灾害发生后滑塌体必然或可能到达的最远范围,是建设用地开发利用中的重要界线。对于中小型山区城镇来说,上述4类因子直接影响着国土空间规划优化等级的划定。

将坡度、河流距、地质灾害风险分区以及地质灾害隐患点致灾范围等影响国土空间优化分级的要素作为“木桶效应”中的短板因子,按照等级从高到低依次为严控开发区、适度开发区和优先开发区的先后顺序进行分区赋值,将同一地块内各短板因子的最高等级值作为该地块的国土空间规划优化结果值。具体的计算公式如下:

$$IES = \text{Max}(ES_1, ES_2, ES_3, ES_4) \quad (1)$$

式中:IES为自然要素中的各类短板因子;Max为取各自然要素的最高等级值(从高到低依次为严控开发区、适度开发区和优先开发区); ES_1 为坡度分级结果; ES_2 为河流距分级结果; ES_3 为地质灾害风险分区分级结果; ES_4 为地质灾害隐患点致灾范围分级结果。

对 ES_1 进行分级时,结合各地区实际情况按坡度由大到小依次划定为严控开发区、适度开发区和优先开发区;对 ES_2 进行分级时,结合各地区实际情况按河流距的不同划定为严控开发区、适度开发区和优先开发区;对 ES_3 进行分级时,将极高和高风险区划定为严控开发区,中风险区划定为适度开发区,低风险区划定为优先开发区;对 ES_4 进行分级时,主要依据滑塌区延伸角-塌落角基本原理,将受险对象距离分为 ψ 角之内(灾害发生后滑塌体必然到达的最远区域)、 ψ 角之外 α 角之内(灾害发生后滑塌体必然到达的最远距离与灾害发生后滑塌体可能到达的最远距离之间的区域)和 α 角之外(其他区域)3个范围。将灾害发生后滑塌体必然到达的最远区域边界划定为国土空间规划红线,将灾害发生后滑塌体可能到达的最远区域边界划定为国土空间规划蓝线。规划红线以内区域设定为严控开发区,规划红线与规划蓝线之间区域设定为适度开发区,规划蓝线以外区域设定为优先开发区。

2 优化方法应用

2.1 研究区概况

山西省临汾市乡宁县城地处黄河中游东岸、吕

梁山脉以西,属于晋西黄土高原区。鄂河从县城中部横穿而过,自东向西流入黄河。县城地势东高西低,因受流水侵蚀、冲刷以及新构造运动的影响,沟壑纵横,地形破碎,海拔为 920~1 278 m,地貌可划分为剥蚀侵蚀中山地貌、梁状黄土丘陵地貌以及堆积河谷地貌。

笔者以乡宁县城区西侧的扇子坪-崔家坡段为研究区(图 2),该区面积为 4.05 km²,地层岩性以二叠系石盒子组砂岩夹泥岩、更新世黄土以及全新世河流冲洪积物为主,在降雨、人类工程活动等因素作用下,区内滑坡、崩塌等地质灾害较为发育。通过资料收集和野外实地调查,研究区内共发育各类地质灾害点 31 处,其中崩塌隐患 19 处,滑坡隐患 12 处。

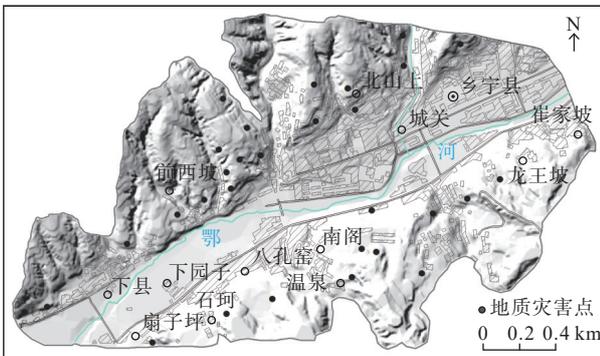


图 2 研究区地理位置图

Fig. 2 Geographical location map of the study area

2.2 地质灾害风险评价

利用 1:1 万 DEM 数据并结合水文学方法(周启鸣等, 2006; 汤国安等, 2006), 以幼年期沟谷斜坡作为评价单元, 将研究区划分为 58 个斜坡单元; 其次, 针对划分的斜坡单元, 利用地质灾害风险分级指标体系(唐亚明等, 2012a), 分别开展地质灾害危险性分析和危害性评价。结合地质灾害风险评分表(唐亚明等, 2012b), 完成基于斜坡单元的地质灾害风险评价(图 3)。结果表明, 在划分的 58 个斜坡单元中, 高风险区有 1 个, 中风险区有 20 个, 低风险区有 37 个。

2.3 优化指标选取

以 1:1 万地质灾害风险评价为基础, 结合前面构建的国土空间规划优化体系, 将坡度、河流距、地质灾害风险分区以及地质灾害隐患点致灾范围作为“木桶效应”中的短板因子, 依次设定相应的分级区间(表 1), 分别对应严控开发区、适度开发区和优先开发区。

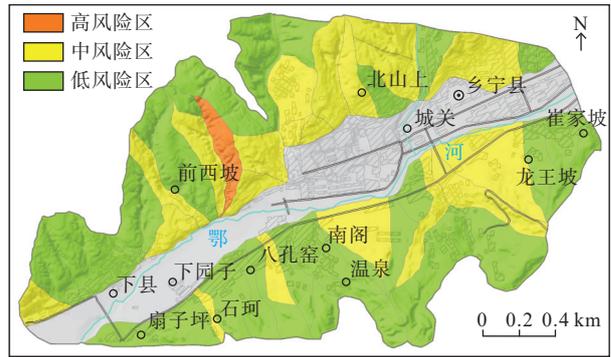


图 3 研究区地质灾害风险区划图

Fig. 3 Geological disaster risk zoning map of the study area

表 1 短板因子取值统计表

Tab. 1 Short board factors value statistical table

序号	短板因子	分级条件	优化分区
1	坡度	>35°	严控开发区
		10°~35°	适度开发区
		其他	优先开发区
2	河流距	干流缓冲区 <50 m 或 支流缓冲区 <20 m	严控开发区
		干流缓冲区 介于 50~300 m 或 支流缓冲区 介于 20~100 m	优先开发区
		其他	适度开发区
3	地质灾害 风险分区	极高、高风险区	严控开发区
		中风险区	适度开发区
		低风险区	优先开发区
4	地质灾害 隐患点致 灾范围	ψ 角之内(灾害发生后滑塌体 必然到达的最远区域)	严控开发区
		ψ 角之外 α 角之内(灾害发生后 滑塌体必然到达的最远距离 与灾害发生后滑塌体可能到 达的最远距离之间的区域)	适度开发区
		α 角之外(其他区域)	优先开发区

(1)坡度: 坡度大于 35°的区域开发利用非常困难, 将其划定为严控开发区; 坡度在 10°~35°之间的区域通过挖填方等处理方式有进一步开发利用的可能, 将其划定为适度开发区; 其余区域均划定为优先开发区(图 4)。

(2)河流距: 对于山区城镇等大比例尺国土空间规划来说, 将干流缓冲区 < 50 m 或支流缓冲区 < 20 m 的潜在淹没区划定为严控开发区, 将干流缓冲区介于 50~300 m 或支流缓冲区介于 20~100 m 的区域划定为优先开发区, 其余区域均划定为适度开发区(图 5)。

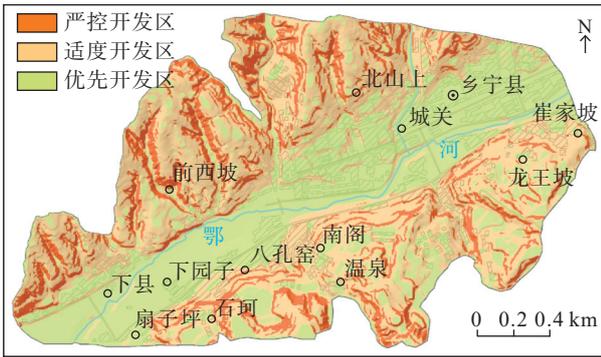


图4 研究区坡度优化分级图(单因素)
Fig. 4 Slope optimized grading map of the study area (single factor)

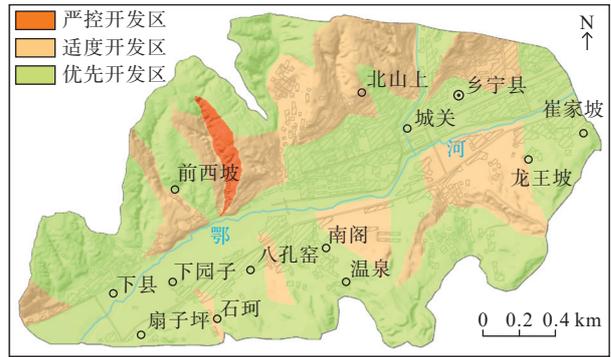


图6 研究区地质灾害风险分区优化分级图(单因素)
Fig. 6 Geological disaster risk zoning optimized grading map of the study area (single factor)

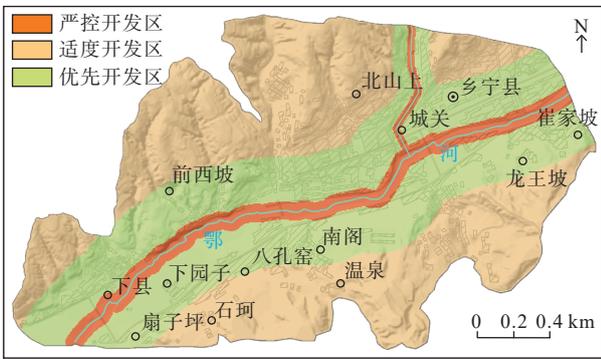


图5 研究区河流距优化分级图(单因素)
Fig. 5 River distance optimized grading map of the study area (single factor)

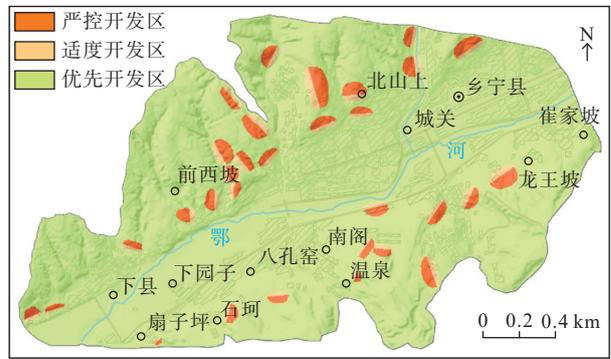


图7 研究区地质灾害隐患点致灾范围优化分级图(单因素)
Fig. 7 Disaster range of geological disaster hidden danger point optimized grading map of the study area (single factor)

(3)地质灾害风险分区: 极高和高风险区发生地质灾害的风险很大, 将其划定为严控开发区; 中风险区发生地质灾害的风险较大, 将其划定为适度开发区; 低风险区相对来说发生地质灾害的风险较小, 将其均划定为优先开发区(图6)。

(4)地质灾害隐患点致灾范围: 地质灾害隐患点致灾范围具体指的是滑坡隐患致灾范围或崩塌隐患致灾范围。研究区内现有崩塌隐患19处, 滑坡隐患12处, 将 ψ 角之内(灾害发生后滑塌体必然到达的最远区域)划定为严控开发区, ψ 角之外 α 角之内(灾害发生后滑塌体必然到达的最远距离与灾害发生后滑塌体可能到达的最远距离之间的区域)划定为适度开发区, α 角之外(其他区域)划定为优先开发区(图7)。

2.4 国土空间规划优化

基于“木桶效应”原理, 以 ArcGIS 软件为操作平台, 按照等级从高到低依次为严控开发区、适度开发区和优先开发区的先后顺序分别对各短板因子进行分区赋值(严控开发区赋值3, 适度开发区赋值2,

优先开发区赋值1), 针对同一地块区域, 比较上述4个短板因子的分级结果, 利用栅格图层取最大值功能, 将同一地块内各短板因子的最高等级值作为该地块的国土空间规划优化结果值, 进而得出研究区的国土空间规划优化图(图8)。

结果表明, 乡宁县城城区扇子坪-崔家坡段内的严

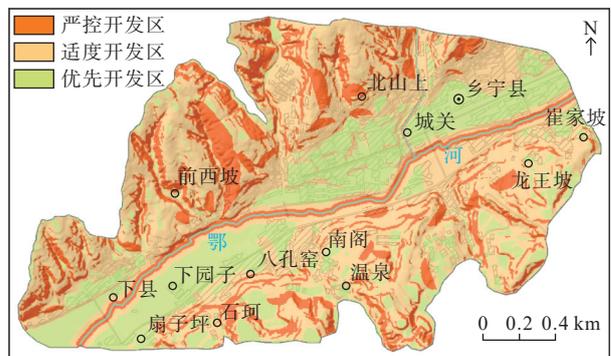


图8 研究区国土空间规划优化图(多因素综合)
Fig. 8 Optimizing territorial space planning map of the study area (multi-factor synthesis)

控开发区主要分布于县城区两侧的黄土丘陵区陡坡地带及鄂河河谷两侧,城区北坡段分布尤为集中,该区面积约为 1.08 km²,占研究区总面积的 26.67%;适度开发区分布情况与严控开发区较为一致,主要分布于严控开发区外围,特别是在鄂河河谷东南侧分布较广,该区面积约为 2.22 km²,占研究区总面积的 54.81%;优先开发区主要分布于鄂河河谷两侧的宽缓开阔地带,该区面积约为 0.75 km²,占研究区总面积的 18.52%。综合分析认为,乡宁县城区扇子坪-崔家坡段在国土空间规划优化方面,以优先开发区和适度开发区为主,这两部分面积占研究区总面积的 73.33%,具有较大的开发潜力。

3 结论

(1)提出的优化方法以 1:1 万地质灾害风险评价为基础,结合地质灾害风险“点面双控”体系,将坡度、河流距、地质灾害风险分区以及地质灾害隐患点致灾范围作为“木桶效应”中的短板因子,按照等级从高到低依次为严控开发区、适度开发区和优先开发区的先后顺序进行分级赋值,将同一地块内各短板因子的最高等级值作为该地块的国土空间规划优化结果值,最终得到相应的国土空间规划优化图。

(2)对于山西省乡宁县城区扇子坪-崔家坡段区域,利用构建的国土空间规划优化体系,探索开展了基于地质灾害风险评价的国土空间规划优化。结果表明,研究区内的严控开发区占比 26.67%,适度开发区占比 54.81%,优先开发区占比 18.52%,从理论上说明了研究区以优先开发区和适度开发区为主,具有较大的开发潜力。

(3)将“木桶效应”理论与地质灾害风险“点面双控”体系相结合,提出的基于地质灾害风险评价的国土空间规划优化方法,能够便捷高效地完成大比例尺山区城镇国土空间规划,这在国土空间规划中是一个有益的尝试,研究成果可为类似地区开展大比例尺国土空间规划提供参考依据。

参考文献(References):

陈霆,徐伟铭,吴升,等.国土空间规划视角下的城镇开发边界划定和空间管控体系构建[J].地球信息科学学报,2022,24(2):263-279.
CHEN Ting, XU Weiming, WU Sheng, et al. Delimitation of urban

development boundary and construction of space control system from the perspective of territorial spatial planning[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(2): 263-279.
高晓路,吴丹贤,周侃,等.国土空间规划中城镇空间和城镇开发边界的划定[J].地理研究,2019,38(10):2458-2472.
GAO Xiaolu, WU Danxian, ZHOU Kan, et al. The urban space and urban development boundary under the framework of territory spatial planning[J]. Geographical Research, 2019, 38(10): 2458-2472.
江思义,吴福,刘庆超,等.岩溶地区建设用地地质环境适宜性评价——以广西桂林规划中心城区为例[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(06):84-93.
JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, et al. Suitability evaluation of construction land development in karst area: taking city planning center of Guilin as an example[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(06): 84-93.
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.
沈悦,刘天科,周璞.自然生态空间用途管制理论分析及管制策略研究[J].中国土地科学,2017,31(12):17-24.
SHEN Yue, LIU Tianke, ZHOU Pu. Theoretical Analysis and Strategies of Natural Ecological Space Use Control[J]. China Land Sciences, 2017, 31(12): 17-24.
汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2006:429-445.
TANG Guo'an, YANG Xin. ArcGIS Geographic Information system spatial analysis experiment tutorial[M]. Beijing: Science Press, 2006: 429-445.
唐亚明,薛强,毕俊擎,等.陕北黄土崩塌灾害风险评价指标体系构建[J].地质通报,2012a,31(6):979-988.
TANG Yaming, XUE Qiang, BI Junbo, et al. The construction of factors for assessing the risk of collapse at loess slopes in northern Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2012a, 31(6): 979-988.
唐亚明,薛强,李清,等.黄土滑塌灾害风险分级系统研究[J].工程地质学报,2012b,20(3):378-386.
TANG Yaming, XUE Qiang, LI Qing, et al. Slope classification system for loess collapse risk assessment[J]. Journal of Engineering Geology, 2012b, 20(3): 378-386.
唐亚明,张茂省,李政国,等.国内外地质灾害风险管理对比及评述[J].西北地质,2015,48(2):238-246.
TANG Yaming, ZHANG Maosheng, LI Zhengguo, et al. Review and Comparison on Inland and Overseas Geo-hazards Risk Management[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 238-246.
唐亚明.从全球视角看城镇化进程中的土地利用模式[J].中国

- 土地, 2016, 360(1): 47-48.
- TANG Yaming. Land use patterns in the process of urbanization from a global perspective[J]. *China Land*, 2016, 360(1): 47-48.
- 铁永波, 徐伟, 向炳霖, 等. 西南地区地质灾害风险“点面双控”体系构建与思考[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 106-113.
- TIE Yongbo, XU Wei, XIANG Binglin, et al. The thoughts on construction of “double-control of point and zone” system of geological hazard risk in southwest China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 106-113.
- 张茂省, 刘江, 董英, 等. 国土空间优化中的关键地质要素分析与“双评价”方法[J]. *地学前缘*, 2020, 27(04): 311-321.
- ZHANG Maosheng, LIU Jiang, DONG Ying, et al. Analysis of key geological factors and the “dual evaluation” method for land space optimization[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(04): 311-321.
- 张晓玲, 吕晓. 国土空间用途管制的改革逻辑及其规划响应路径[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1261-1272.
- ZHANG Xiaoling, LV Xiao. Reform logic of territorial space use regulation and the response path of land spatial planning[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1261-1272.
- 郑续, 苗俊霞, 王东, 等. 黄河中上游地质灾害高发县国土空间开发适宜性评价及功能分区——以陕西省延川县为例[J]. *西北地质*, 2020, 53(02): 289-297.
- ZHENG Xu, MIAO Junxia, WANG Dong, et al. Suitability evaluation and functional division of land space development in the high-incidence area of geological hazards in the middle and upper reaches of the yellow river: a case study of Yanchuan County, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(02): 289-297.
- 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 52-70.
- ZHOU Qiming, LIU Xuejun. Digital terrain analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006: 52-70.
- 周伟, 马书红. 基于木桶理论的公路交通与经济发展适应性研究[J]. *中国公路学报*, 2003, (03): 78-83.
- ZHOU Wei, MA Shuhong. Adaptability study based on the barrel theory about highway transportation and economics[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, (03): 78-83.
- Hungr O, Corominas J, Eberhardt E. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity[A]. Hunger O, Fell R, Couture R. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management[C]. London: Taylor and Francis, 2005: 108-115.
- Wei Y D, Ye X. Urbanization, urban land expansion and environmental change in China[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2014, 28(4): 757-765.