



引文格式: 刘健康, 刘丙秋, 匡文龙, 等. 湖南省自然灾害风险可接受程度研究[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 55-63.
DOI: 10.12401/j.nwg.2023047

Citation: LIU Jiankang, LIU Bingqiu, KUANG Wenlong, et al. Study on the Acceptability of Natural Disaster Risk in Hunan Province[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 55-63. DOI: 10.12401/j.nwg.2023047

湖南省自然灾害风险可接受程度研究

刘健康^{1,2}, 刘丙秋¹, 匡文龙^{2,*}, 肖拥军², 林云志¹, 卢正新²

(1. 中化地质矿山总局湖南地质勘查院, 湖南长沙 410018; 2. 湖南科技大学, 地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要: 自然灾害是湖南省面临的主要灾害之一, 确定自然灾害风险可接受程度对该省的可持续发展意义重大。通过分析湖南省 2010~2020 年因灾死亡人数与经济损失、总人口、GDP 等数据, 参照国内外相关研究, 开展自然灾害风险可接受水平研究。取意愿系数 $\beta=0.01$, 确定个人生命可接受风险标准; 使用人均 GDP 这一指标, 量化个人可接受经济风险; 根据最低合理可行准则, 分别构建社会生命与经济风险可接受准则模型。结果表明: 个人可接受和可容忍生命风险分别为 $10^{-6}/a$ 和 $10^{-5}/a$; 个人可接受经济风险指数为 0.01, 即个人经济风险的可接受风险范围不超过人均 GDP 的 1%; 因灾死亡 100 人的概率大于 10^{-9} 、经济损失 10 亿元的概率大于 10^{-2} 都属于不可接受风险。研究结果可用于辅助湖南省自然灾害风险的评估、决策与管理, 也为其他地区相关研究提供参考。

关键词: 自然灾害; 风险; 可接受程度; $F-N$ 曲线; $F-D$ 曲线; 湖南省

中图分类号: X43;X820.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0055-09

Study on the Acceptability of Natural Disaster Risk in Hunan Province

LIU Jiankang^{1,2}, LIU Bingqiu¹, KUANG Wenlong^{2,*}, XIAO Yongjun², LIN Yunzhi¹, LU Zhengxin²

(1. Hunan Geological Exploration Institute of CCGMB, Changsha 410018, Hunan, China; 2. School of Earth Science and Spatail Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: Natural disasters are one of the main disasters faced by Hunan Province, and determining the acceptable level of natural disaster risks is of great significance to the sustainable development of the province. By analyzing the data of the number of disaster death and economic losses, total population, and GDP in Hunan Province from 2010 to 2020, and referring to relevant domestic and foreign researches, a study on the acceptable level of natural disaster risk was carried out. The willingness coefficient $\beta=0.01$ is taken to fix the acceptable risk standard for personal life; the per capita GDP is used to quantify the acceptable economic risk for indi-

收稿日期: 2022-11-10; 修回日期: 2023-02-28; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 湖南省自然科学基金项目“库岸斜坡软弱夹层泥化损伤机制及工程效应研究”(2020JJ4298), “高温矿山渗滤液条件下膨润土防水毯的渗透性能变化规律及其机理研究”(2022JJ30244), 湖南省自然资源科技计划项目“基于高分遥感影像的矿山越界开采动态监测”(2022-23)联合资助。

作者简介: 刘健康(1997-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事自然灾害及地质灾害研究。E-mail: 1666824931@qq.com。

* 通讯作者: 匡文龙(1966-), 男, 教授, 博士/博士后。主要从事自然灾害及地质灾害研究。E-mail: 64022885@qq.com。

viduals; according to the minimum reasonable and feasible criteria, models of acceptable criteria for social life and economic risk are respectively constructed. The results show that the personal acceptable and tolerable life risks are $10^{-6}/a$ and $10^{-5}/a$ respectively, that the personal acceptable economic risk index is 0.01, i.e. the acceptable risk range of personal economic risk does not exceed 1% of per capita GDP; and that the probability of 100 deaths due to the disaster greater than 10^{-9} , and the probability of economic loss of 1 billion yuan greater than 10^{-2} , are unacceptable risks. The research results can be used to assist the assessment, decision-making and management of natural disaster risks in Hunan Province.

Keywords: natural disaster; risk; acceptability; *F-N* curves; *F-D* curves; Hunan Province

中国的自然灾害种类繁多、爆发频率高、危险性大, 严重影响了国家现代化事业的进程, 对其进行风险管控迫不容缓(冯卫等, 2021; 张文居等, 2022; 吴昊宸等, 2023)。可接受程度是自然灾害风险管控方法研究中的一个重要研究领域(马红娜等, 2023)。在确定灾害对承灾体的影响程度后, 估算自然灾害风险评估结果数值, 根据可接受风险水平进行风险评价, 判断所估算的风险值能否被接受。无论是探究需治理的自然灾害类型还是探究这些灾害应治理到何种水平, 都与风险可接受程度密切相关, 可为风险管控者做出重要决策、实施风险管控措施提供参考依据。

进行灾害风险管控的目的是在考虑经济性的前提下, 尽可能的将风险降至某一合理可接受的范围。不同国家或机构提出的可接受风险定义并不相同, 参照 2009 年联合国减灾战略中心(Unisdr, 2009)的定义, 笔者提出了自然灾害可接受风险的定义: 在现有社会、经济、政治和环境条件下, 个人和社会可以接受的由自然灾害带来的潜在损失。20 世纪 60 年代, 许多国外研究人员在核能、化工与基因工程等领域开展了风险可接受性的早期研究。英国在 1974 年颁布的法律中明确了风险决策领域中的最低合理可行(ALARP)准则, 为各行业选择合理的可接受风险标准提供了理论指导(李宝岩, 2010)。Fell(1994, 1996)等总结了滑坡的可接受风险准则和可容忍风险水平的影响因素。上世纪 90 年代, 英国健康与安全委员会(HSE)(Balke-ma, 1997)给出了可接受风险的定义, 构筑了可容忍风险的总体框架。美国垦务局(USBR)(Maynard R L, 2001)强调只有当某个风险能被大众所接受时, 才是可接受风险。

国内许多学者也针对风险可接受程度开展了大量研究并做出了许多贡献。唐亚明等(2008, 2015a)归纳总结了有关滑坡风险评价与管理的国内外研究现状、方法及步骤, 进行了滑坡可接受风险研究。李红

英等(2013)为对某库区滑坡体进行风险评估, 建立了库区的经济风险可接受准则模型。庙成等(2022)基于泥石流灾害可接受风险的问卷调查和统计分析, 对比了不同地区居民对泥石流可接受程度及其影响因素的异同。肖义等(2005)应用 ALARP 准则和 *F-N* 曲线研究了不同类型风险对应的可接受风险确定方法。王丽萍等(2019)提出了融合风险矩阵的改进 *F-N* 曲线。刘莉等(2009)在统计分析的基础上, 建议了地震人员伤亡的风险值。尹衍雨等(2009)以重庆和四川为例, 开展实地调查与访谈, 得出了合理的居民旱灾可接受风险范围。陈伟(2012)和赵阳等(2022)分别进行了中国地质灾害可接受风险水平的全国性研究与区域性研究。近年来, 风险可接受标准在油气管道、全球客船、煤矿和海洋工程等领域也得到了广泛研究。

湖南省人口众多, 资源丰富, 自然灾害爆发不断, 对其进行自然灾害风险管控研究意义重大。因此, 基于 ALARP 准则、统计分析方法和 *F-N* 曲线分析方法, 结合自然灾害的爆发情况和经济发展现状, 考虑灾害风险的特点及对公民人身财产安全的影响, 开展湖南省自然灾害风险可接受程度研究, 建立自然灾害风险可接受准则模型, 为湖南省的自然灾害防治工作提供可靠依据与科学指导, 也为其他地区相关研究给予参考。

1 研究背景

1.1 区域研究背景

1.1.1 湖南省自然地理条件

湖南省位于云贵高原向江南丘陵及南岭山脉向江汉平原的过渡地带。省内河网密布, 地貌类型以山地、丘陵为主, 地形起伏较大, 海拔为 21.6~2122.35 m, 地势东、南、西三面高、北面低。经纬度为 E 108°47'~114°15', N 24°51'~30°41', 面积为 21.18

万 km²。湖南省处于扬子板块与华南褶皱带结合带的中段,地质构造复杂,地层出露较为齐全。地层岩性主要有:前震旦系板溪群变质岩;泥盆系—侏罗系的碳酸盐岩、花岗岩及砂页岩;白垩系—古近系红层;第四系松散堆积物等。经历加里东期、燕山期等多个构造变形期,形成了大量构造变形区,主要发育有 NNE、NE 向等构造。

湖南省年平均气温为 16~19℃,年降水量约为 1 200~2 100 mm,雨水一般集中于三月下旬到七月上旬,自雨季结束后直至九月底为持续高温时期,降水量不足雨季的一半,经常发生干旱。全省森林覆盖率为 59.96%。

1.1.2 湖南省自然灾害发育与风险情况

强烈的构造运动不仅容易引发地震,还会破坏地表岩土体的稳定性;集中性的高强度降水则是引发洪涝、干旱以及各类地质灾害的主要原因(图 1)。以地质灾害为例,据湖南自然资源年鉴(湖南省自然资源厅, 2021),在 2013~2020 年期间,全省爆发的各类地质灾害总数高达 20 557 起,平均每年爆发约 2 570 起,年均经济损失超过 5.27 亿元;以洪涝灾害为例,据湖南统计年鉴(湖南省统计局, 2021),2010~2020 年期间,全省平均每年因洪水造成的经济损失超过 180 亿元。在 2017 年的 6~7 月,因突遭暴雨袭击,宁乡市发生了六十多年来最大的一场洪涝灾害,因灾死亡与失联人数达 44 人,在该次事件中由暴雨引发的王家湾泥石流造成了 5 人死亡,4 人失联。

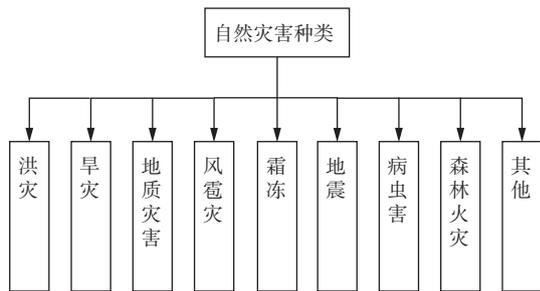


图 1 湖南省自然灾害分类图

Fig. 1 Classification of natural disasters in Hunan Province

根据湖南省应急管理厅发布的《湖南省综合防灾减灾规划(2021-2025 年)》,截至 2022 年初,湖南省有 18% 的面积属于山洪灾害重点防治区,涉及的危险区超过 2.3 万个,区内居民超过 616 万人,城镇内涝风险突出;77% 的面积处于地质灾害高中等级易发区,共有地质灾害隐患点 18 567 处,威胁户数和人数分别达到 82 万户和 71.2 万人;气象灾害复杂,极端天气事件

有变多变强的趋势;林下可燃物积累加快,森林火灾形势不容乐观;湖南省具有爆发中强地震的构造背景,省内多个地级市属于地震基本烈度 7 度抗震设防区。

1.2 风险分类

对灾害风险进行分类的深层目的是为了更加直观的表现其将带来的后果及后果所具有的特征。根据不同的标准,风险分类的结果各不相同。以灾害风险后果为标准对自然灾害风险进行分类,可分为生命、经济、生态环境和社会安全风险 4 类(刘希林等, 2013)。因研究条件所限,只统计到湖南省自然灾害造成的人员伤亡与经济损失等数据,结合本次研究的内容及特点,决定主要讨论人口死亡可接受风险水平和经济损失可接受风险水平。

1.3 ALARP 准则

ALARP 准则是目前应用最为广泛的一条可接受风险确定准则,它通过两条标准线将风险划分成 3 个不同区域,可接受风险水平标准线是 ALARP 区与广泛可接受区的分界线;可容忍风险水平标准线是不可容忍区与 ALARP 区的分界线(图 2)。

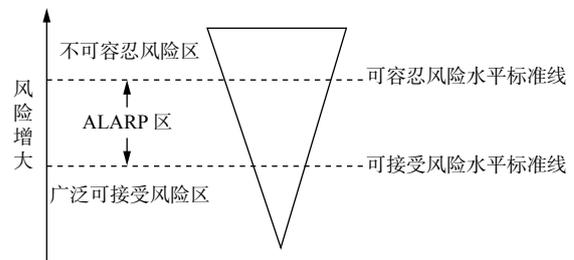


图 2 风险等级和 ALARP 准则

Fig. 2 Risk level and ALARP criteria

在确定某一灾害风险处于何种等级时,只需将其风险值与确定好分区的 ALARP 准则进行对比即可,之后便可依据所得结果进行分析与决策。若灾害风险评价位于不可容忍区域,则必须及时采取相应的措施去降低风险;若该值位于 ALARP 区域,则需依据实际情况判断是否需要采取措施降低风险以及应将风险降低至何种水平;若该值位于广泛可接受区域,则不用采取措施去减小风险。

2 生命风险可接受程度分析

2.1 湖南省自然灾害风险统计分析

统计分析方法是最重要、最直观的一种风险研究

方法,以现有数据的统计结果为依据展开分析,实现对风险进行预测的目的。笔者基于 ALARP 法则,采用统计学方法,建立湖南省自然灾害生命风险可接受准则模型。

湖南省自然灾害灾情通常伴随着降水情况而变化,洪涝灾害和各类地质灾害主要发生在暴雨天气频繁的雨季,而干旱和森林火灾等主要发生在降水较少的秋冬季节,这些灾害对湖南地区居民的人身财产安全产生了巨大的威胁。根据湖南省统计局公布的 2010~2020 年湖南省各类自然灾害致死人数(湖南省自然资源厅, 2021)及每年的总人口数据(表 1)(湖南省统计局, 2021),对湖南省自然灾害生命风险可接受程度进行研究分析,确定其可接受风险准则。

表 1 2010~2020 年湖南省自然灾害致死人数和总人口情况表

Tab. 1 Death toll and total population of natural disasters in Hunan Province from 2010 to 2020

年度	自然灾害致死人数(人)	户籍人口(万人)	死亡概率(10^{-7})
2010	80	7 089.53	11.28
2011	84	7 135.60	11.77
2012	62	7 179.87	8.64
2013	46	7 147.28	6.44
2014	67	7 202.29	9.30
2015	31	7 242.02	4.28
2016	51	7 318.81	6.97
2017	98	7 296.26	13.43
2018	27	7 326.62	3.69
2019	31	7 319.53	4.24
2020	28	7 295.58	3.84

因不同年份的自然灾害致死人数(在自然灾害中失踪的人员几乎无生还可能,故将失踪人数合并入死亡人数之中)相差较大,通过对每年的死亡概率进行计算,以降低数量级对结果的影响程度。

根据上述统计数据,能明显看出每年因自然灾害致死的人数变化较大,2018 年和 2020 年仅有 27 人与 28 人,2015 年和 2019 年也只有 31 人,但 2010、2011、2017 年都达到了 80 人以上。近年来,随着国家对自然灾害管控力度的逐渐加大,群测群防体系全面建立,人民群众的防灾意识也得到了较大程度加强,除了因 2017 年特大洪灾等极端事件的影响外,湖南地区自然灾害致死人数与死亡概率总体呈下降态势。

自然灾害的爆发具有随机性,为确保数据的平稳性,避免某一波动过大的数据对整个标准造成不利影

响,可使用中位数表示可接受风险标准的基准平均数。将统计到的 2010~2020 年死亡概率数据按大小进行排列,得中位数为 6.97×10^{-7} ,该值处于风险可接受范围,故湖南省自然灾害可接受风险线的风险值为 1×10^{-7} 。可容忍风险线的风险值通常比可接受的要小 1~2 个数量级,在参照其他国家已制定标准的基础上,考虑湖南省人口密度较大的现状,决定在本次研究中取 1 个数量级(陈伟等, 2012; 赵阳等, 2022),即为 1×10^{-6} 。

2.2 个人生命风险可接受程度分析

2.2.1 确定个人可接受生命风险的理论方法

一般认为,除了随着科技的发展,风险会有极低程度的减小外,个人死亡的风险几乎不会发生变化。统计(Jonkman et al., 2003)所得的不同活动死亡风险可被用作于建议个人可接受风险的基础和依据。荷兰水防治技术咨询委员会(TAW)根据参与风险活动的自愿程度,设定了个人可接受风险标准范围:

$$IR < \beta \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中: IR 为个人风险; β 为意愿系数($0.01 \leq \beta \leq 10$),跟随参与活动的自愿程度与获利情况而变化。不同活动的 β 值如图 3 所示。

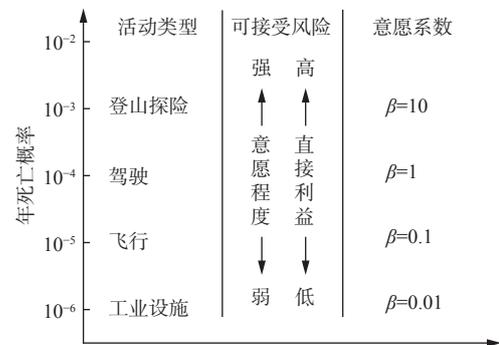


图 3 不同类型活动和主动参与程度、获取利益不同时的意愿系数

Fig. 3 Willingness coefficient of different types of activities, different degrees of active participation and different benefits

2.2.2 湖南省个人可接受生命风险

对于个人可接受生命风险的确定,专家一般是通过经验判断和模拟模型等方法考虑灾害的年死亡率来进行的,而公众则往往是以个人利益为起点,通过考虑风险的发生及其后果来进行的。不同个体对待个人生命风险可接受程度的差异较大,很难提供一个能代表绝大部分人的标准。总体来说,主观因素对于确定个人生命风险可接受性的影响巨大。

国内外许多机构和学者提出了大量关于个人可接受风险标准的建议(表 2)。HSE 统计出英国个人因雷击而死亡的风险是 $10^{-7}/a$; 美国和挪威因自然灾害而死亡的风险分别约为 $10^{-6}/a$ 和 $2 \times 10^{-6}/a$; 个人死亡风险不会超过 $10^{-6}/a$; 中国个人风险值约在 $1.89 \times 10^{-7} \sim 9.43 \times 10^{-7}/a$ (刘莉, 2010); 杜效鹄等(2010)认为中国大坝溃坝个人可容忍与可接受风险标准应分别不低于 $10^{-4}/a$ 及 $10^{-5}/a$; 庙成等(2022)认为中国农民对于泥石流灾害的可接受风险普遍小于 $1 \times 10^{-7}/a$ 。

表 2 部分研究者所提自然灾害个人可接受风险标准建议表

Tab. 2 Suggestions on personal acceptable risk standards for natural disasters proposed by some researchers

研究者	适用范围	可接受风险	可容忍风险
赵洲等(2011)	地质灾害	$10^{-6}/a$	$10^{-4}/a$
谢全敏(2004)	滑坡	$10^{-6}/a$	$10^{-5}/a$
庙成等(2022)	泥石流	$10^{-7}/a$	-
李东升等(2006)	滑坡	$10^{-5}/a$	-
刘莉等(2009)	地震	$10^{-4}/a$	$10^{-3}/a$
王健(2013)	洪涝	$10^{-6}/a$	$10^{-5}/a$

2010~2020 年湖南省自然灾害年平均致死率约为 $7.63 \times 10^{-7}/a$, 参照目前一些国家所采用的风险标准以及部分国内外学者提出的建议(谢全敏, 2004; 李东升等, 2006; 刘莉等, 2009, 2010; 杜效鹄等, 2010; 赵洲等, 2011; 王健, 2013; 庙成等, 2022), 同时考虑到个人遭受自然灾害的意愿程度和获利情况极低, 建议取意愿系数 $\beta=0.01$, 由公式(1)可确定湖南省个人可接受生命风险标准为 $10^{-6}/a$, 因而个人可容忍生命风险标准为 $10^{-5}/a$ 。

2.3 社会生命风险可接受程度分析

从人员伤亡率的角度考虑社会可接受的自然灾害风险, 根据的是 ALARP 准则方法; 而从年死亡人数的期望值 $E(N)$ 考虑, 则是基于 $F-N$ 曲线方法。

2.3.1 $F-N$ 曲线方法

$F-N$ 曲线具有直观方便的优点, 只需对曲线中的参数进行确定, 便可建立起 $F-N$ 曲线模型, 看出风险的区间范围。 $F-N$ 曲线可接受标准的限制线表达式为:

$$P_f(x) = 1 - F_N(x) \leq \frac{C}{x^n} \quad (2)$$

式中: $P_f(x)$ 表示死亡人数超过 x 的年概率; $F_N(x)$ 是年死亡人数为 N 及以上的概率分布函数; n 为厌恶因子, 决定限制线的倾斜度; C 为决定限制线位置的

常数。

C 可理解为风险水平线的截距, 自然灾害的平均年爆发概率是其取值的主要参考。自然灾害的爆发基本不受人为控制, 只有研究灾害爆发的基本规律, 才能确定其基础风险概率。

若取 $n = 1$, 风险接受准则为中立型风险, 意味着社会对风险的要求较低, 事故造成的后果较为轻微, 伤亡人数在可接受范围内的自然灾害数量较多, 政府的财政支出也较少; 若取 $n = 1.5$ 或 $n = 2$, 此时风险接受准则为厌恶型风险, 在这种情况下, 风险更受社会重视, 事故造成的后果比较严重, 但会增加政府的财政支出, 相应的可接受的风险概率也较小。 C 和 n 的参数情况见表 3 和表 4(李宝岩, 2010; 陈伟等, 2012)。

表 3 社会风险的厌恶因子取值

Tab. 3 Value of aversion factor of social risk

风险类型	厌恶因子 n	公众对可接受风险的要求	与小事故相比社会对重大事故后果关注度
中立型	1	一般	一致
厌恶型	1.5	较高	比较突出
	2	很高	显著突出

表 4 不同国家和地区的 $F-N$ 曲线参数

Tab. 4 $F-N$ curve parameters in different countries and regions

国家或地区	n	C
英国(HSC)	1	10^{-2}
中国香港	1	10^{-3}
丹麦	2	10^{-3}
荷兰(VROM)	2	10^{-4}

注: VORM为荷兰住宅、空间计划与环境部。

在厌恶因子 n 的取值上, 大多数学者在研究地质灾害(陈伟等, 2012; 赵阳等, 2022)、重大岩土工程(于汐等, 2018)和建筑运维阶段(张子墨等, 2022)等生命风险可接受风险时, 会取 $n = 1$; 研究大型水库坝溃决(李宗坤等, 2015)、煤矿(段正肖等, 2021)及化工行业(谭钦文等, 2017)的可接受风险时, 会取 $n = 2$ 。

C 和 n 的实际取值需要依据不同地区的自然环境、经济情况、技术条件以及对个人生命的重视程度等来确定, 这样才能合理的选择适合本地区的风险标准, 以确定合理的自然灾害社会可接受风险标准。

2.3.2 湖南省社会可接受生命风险($F-N$ 曲线模型)

在分析一个地区某种风险的风险值能否被接受时, 首先需确定好 ALARP 准则中的可接受风险线与

可容忍风险线。

自然灾害风险是一种被动接受风险,对自然灾害进行防治的相关投入通常不会产生经济效益。由于 n 的取值越大,则社会风险控制成本越高,风险标准实际应用难度也会提高,一般中国东部发达地区社会厌恶因子取 $n=2$,西部落后地区取 $n=1$ (宋敬衡等, 2008)。湖南省的自然灾害具有覆盖面广、破坏性强、损失巨大等特点,为应对自然灾害,该省相关政府部门积极采取各类预防与治理措施,公众对可接受风险的要求较高,故本研究拟采用厌恶型风险,结合其处于中部地区的地理位置及社会经济发展水平等的实际情况(赵阳等, 2022),决定厌恶因子取 $n=1.5$ 。

由此,可得到 $F-N$ 曲线下限线(可接受风险线的风险值)为:

$$P_f(x) = 1 - F_N(x) \leq \frac{10^{-7}}{x^{1.5}} \quad (3)$$

$F-N$ 曲线上限线(可容忍风险线的风险值)为:

$$P_f(x) = 1 - F_N(x) \leq \frac{10^{-6}}{x^{1.5}} \quad (4)$$

一般当某一重大自然灾害事件的致死人数超过某一特定值时,风险将难以被接受。对于湖南省自然灾害的 $F-N$ 曲线,采用1作为横坐标的起点,参照中国香港地区(唐亚明等, 2015b; ERM-Hong Kong, 1998)在其滑坡灾害 $F-N$ 曲线中的设定,以死亡1000人作为风险的后果限制线(图4)。

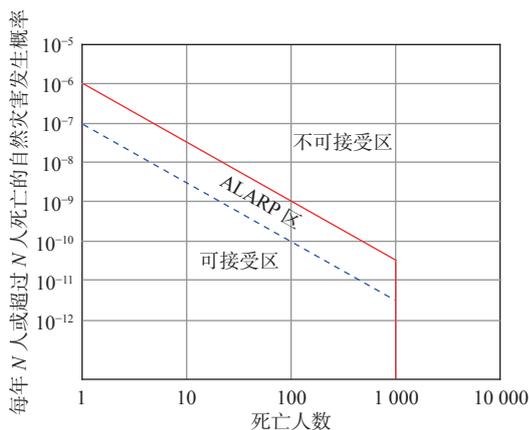


图4 湖南省自然灾害社会生命风险可接受准则模型

Fig. 4 Model of acceptable criteria for social life risk of natural disasters in Hunan Province

3 经济风险可接受程度分析

经济风险的可接受程度随着经济发展以及物价

水平的变化而变化,截至目前为止,自然灾害领域内还未形成一个较为一致的经济风险可接受标准。与生命风险类似,同样可以依据ALAPR准则从个人和社会两个角度出发,分析并确定可接受经济风险,以 $F-D$ 曲线表达社会经济可接受风险水平。后期可使用投资效益分析与风险决策等方法判断所得出的风险标准是否“合理可行”。

3.1 个人经济风险可接受程度分析

为了更好的研究和表述个人经济可接受风险,引入人均GDP这一指标对其进行计算。判定个人经济风险的计算公式为:

$$I_D = \frac{P_{ER}}{P_{GDP}} \quad (5)$$

$$P_{ER} = \frac{E_R}{R_P} \quad (6)$$

式中: I_D 为个人可接受经济风险指数; P_{GDP} 为本地区人均GDP; P_{ER} 为人均经济风险; E_R 为总经济风险; R_P 为总风险人口数。

对于个人来说,通过对收集到的2010~2020年的经济损失与GDP数据进行分析,发现湖南省因自然灾害造成的人均经济损失约为333元/a,人均自然灾害损失与人均GDP的比值如图5所示。可以看出,随着经济发展与社会进步,这一比值总体呈下降态势,在2010~2020年期间,该比值每年都低于0.02,中位数为0.008。

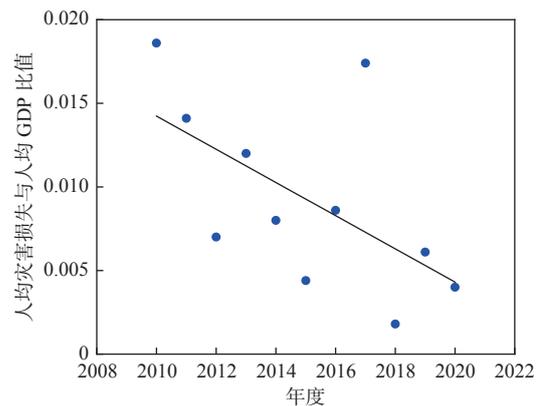


图5 湖南省2010~2020年人均灾害损失与人均GDP比值关系图

Fig. 5 The ratio of per capita disaster losses to per capita GDP in Hunan Province from 2010 to 2020

采用“十三五”收官之年(2020年)的数据,计算湖南省自然灾害个人经济可接受风险,可用于指导“十四五”期间(2021~2025年)的自然灾害风险评估工作。因湖南省自然灾害的覆盖面十分广阔,全省几乎每个个体都会受到一类或多类自然灾害的威胁,

故本研究中总风险人口数取当年全省总人口数。计算公式如下:

$$I_D = \frac{P_{ER}}{P_{GDP}} = \frac{166\ 337\ 3}{62\ 900 \times 7\ 295.58} = 0.003\ 6 \quad (7)$$

计算所得值 $I_D=0.003\ 6$ 处在可接受风险范围内, 故对湖南省自然灾害个人经济可接受风险水平的取值为: 当 $0 < I_D \leq 0.01$ 时, 属于可接受风险; 当 $0.01 < I_D \leq 0.02$ 时, 属于可容忍风险; 当 $I_D > 0.02$ 时, 属于不可接受风险。

3.2 社会经济风险可接受程度分析

使用 $F-D$ 曲线对社会经济可接受风险水平进行表达, 依据 ALARP 准则判断是否需要降低经济风险。 $F-D$ 曲线可接受标准的限制线表达式为:

$$1 - F_D(x) = P(D > x) = \int_x^{\infty} f_D(x) \leq \frac{C}{x^n} \quad (8)$$

式中: $F_D(x)$ 为经济损失 x 的概率分布函数, 表示

年经济损失 x 的概率; $P(D > x)$ 为年经济损失 D 不小于 x 的概率; $f_D(x)$ 是年经济损失的概率密度函数; n 为厌恶因子, 决定限制线的倾斜度, $n = 1$ 是中立型风险, $n = 2$ 是厌恶型风险; C 为决定限制线位置的常数。

在查阅相关资料的基础上, 综合考虑湖南省自然灾害发育情况、治理难度以及社会经济发展水平(于汐等, 2018), 对 $F-D$ 曲线中的 C 和 n 进行了初步的确定。因湖南省的经济发展水平与发达地区相比较为落后, 同时中国社会对财产安全的重视程度要小于公民生命安全, 类比前文 $F-N$ 曲线参数的取值, 以及国内相关领域学者在该方向的研究成果(于汐等, 2018; 赵阳等, 2022), 决定在本研究中自然灾害社会可接受风险类型采用中立型, 厌恶因子取 $n = 1$ 。为减小异常数据对研究结果的影响, 使用中位数表示经济损失可接受风险标准的基准平均数。据表 5 所示统计数据, 中位数为 7.98×10^{-3} , 建议可接受风险线的风险值取 1×10^{-3} 。

表 5 2010~2020 年湖南省自然灾害经济损失与 GDP 统计表

Tab. 5 Economic loss and GDP of natural disasters in Hunan Province from 2010 to 2020

年度	自然灾害 经济损失(万元)	全省年度 生产总值(亿元)	人均GDP (元)	人均灾害 损失(元)	自然灾害经济 损失占比(10^{-3})
2010	2 890 006	15 574.32	24 005	407.64	18.56
2011	2 670 254	18 914.96	28 766	372.22	14.12
2012	1 491 346	21 207.23	32 203	207.71	7.03
2013	2 831 947	23 545.24	35 702	396.23	12.03
2014	2 064 575	25 881.28	39 181	286.66	7.98
2015	1 268 488	28 538.60	43 155	175.16	4.44
2016	2 656 197	30 853.45	46 606	362.93	8.61
2017	5 879 514	33 828.11	51 030	805.83	17.38
2018	650 917	36 329.68	54 763	88.84	1.79
2019	2 435 550	39 894.14	60 104	332.75	6.11
2020	1 663 373	41 781.49	62 900	228	3.98

注: 数据引自湖南自然资源年鉴与湖南统计年鉴。

根据湖南省的实际情况, 将纵坐标的最小值设置为无限接近于 0 的数, 意味着风险事故不会发生, 最大值设置为 1, 此时风险事故的发生概率为 100%。2010~2020 年湖南省自然灾害造成的经济损失范围在每年 65~588 亿之间, 中位数为 243.56 亿, 除 2018 年以外, 其他各年度自然灾害造成的经济损失都在百亿级别。鉴于自然灾害具有的损失巨大这一特殊性, 建议将损失 1 000 亿作为社会经济风险的后果限制线, 这一数值约为当前湖南省年度 GDP 的 2%, 较为科学合理。由此得到了 $F-D$ 曲线模型, 如图 6 所示。

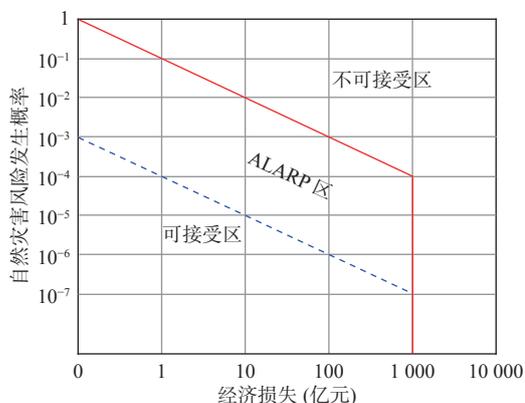


图 6 湖南省自然灾害社会经济风险可接受准则模型

Fig. 6 Model of acceptability criteria for social and economic risks of natural disasters in Hunan Province

4 结论

(1)综合考虑年死亡率、个人遭遇自然灾害的意愿度及国内外有关个人可接受风险标准的建议,取意愿系数 $\beta=0.01$,可确定湖南省自然灾害个人可接受和可容忍生命风险标准分别为 $10^{-6}/a$ 和 $10^{-5}/a$ 。

(2)建立了湖南省自然灾害社会生命风险可接受准则模型($F-N$ 曲线)。可接受和可容忍风险限制线的截距分别取 $1 \times 10^{-7}/a$ 和 $1 \times 10^{-6}/a$,斜率取 -1.5 ,意味着自然灾害造成的年度死亡人数超过100的概率小于 10^{-10} ,可被接受,若大于 10^{-9} ,则不能被接受,此时应采取控制措施降低风险。设置后果限制线,死亡人数超过1000人时,任何概率都不可接受。

(3)通过人均GDP这一指标,量化个人经济风险可接受水平,得出经济风险指数 $I_D=0.01$,即湖南省个人所能接受的由自然灾害造成的人均经济损失不能多于人均GDP的1%。

(4)可接受风险限制线的截距为 $10^{-3}/a$,斜率取 -1 ,意味着自然灾害造成的年度经济损失超过10亿元的概率大于 10^{-2} 就不可被接受,低于100亿元的概率小于 10^{-6} ,便可以接受。设置后果限制线,当经济损失超过1000亿元时,任何概率都不可接受。

(5)自然灾害风险可接受程度应随灾害风险分析与评价的实际情况而进行动态调整,对于省级标准的自然灾害风险可接受程度可随国家发展的五年计划进行更新制定,以确保可接受准则的时效性与合理性,提高其指导作用。

参考文献(References):

陈伟,许强.地质灾害可接受风险水平研究[J].灾害学,2012,27(1):23-27.

CHEN Wei, XU Qiang. Study on the level of acceptable risk level of geohazards[J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(1): 23-27.

杜效鹄,杨健.我国水电站大坝溃坝生命风险标准讨论[J].水力发电,2010,36(5):68-70.

DU Xiaohu, YANG Jian. Discussion on life risk criteria for dam break of hydropower stations in China[J]. Water Power, 2010, 36(5): 68-70.

段正肖,谭钦文,鲁昆仑,等.可接受风险理论在煤矿安全领域中的应用[J].煤矿安全,2021,52(3):246-251.

DUAN Zhengxiao, TAN Qinwen, LU Kunlun, et al. Application of acceptable risk theory in the field of coal mine safety[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(3): 246-251.

冯卫,唐亚明,马红娜,等.基于层次分析法的咸阳市多灾种自然灾害综合风险评价[J].西北地质,2021,54(2):282-288.

FENG Wei, TANG Yaming, MA Hongna, et al. Comprehensive Risk Assessment of Multi-hazard Natural Disasters in Xianyang City Based on AHP[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(2): 282-288.

湖南统计年鉴-2021[M].北京:中国统计出版社,2021:279.

湖南自然资源年鉴-2021[M].长沙:湖南地图出版社,2021:434.

李宝岩.可接受风险标准研究[D].镇江:江苏大学,2010.

LI Baoyan. Study on criteria of acceptablerisk[D]. Zhenjiang: Ji-angsu University, 2010.

李红英,谭跃虎.滑坡灾害风险可接受准则计算模型研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(S2):2047-2052.

LI Hongying, TAN Yuehu. Study on the computational model of risk acceptance criteria for landslide disaster[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S2): 2047-2052.

李东升.基于可靠度理论的边坡风险评价研究[D].重庆:重庆大学,2006.

LI Dongsheng. Study on slope risk assessment based on reliability theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

李宗坤,葛巍,王娟,等.中国水库大坝风险标准与应用研究[J].水利学报,2015,46(5):567-573+583.

LI Zongkun, GE Wei, WANG Juan, et al. Risk criteria and application on reservoir dams in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 567-573+583.

刘莉,谢礼立,葛红.城市防震减灾能力评价中的可接受风险研究[J].世界地震工程,2009,25(1):82-87.

LIU Li, XIE Lili, GE Hong. Study on the acceptable risk in the evaluation of urban earthquake preparedness and disaster reduction capability[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(1): 82-87.

刘希林,尚志海.中国自然灾害风险综合分类体系构建[J].自然灾害学报,2013,22(6):1-7.

LIU Xilin, SHANG Zhihai. Construction of comprehensive classification system for natural disaster risk in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(6): 1-7.

刘莉,谢礼立,胡进军.城市地震的可接受死亡风险研究[J].自然灾害学报,2010,19(4):1-7.

LIU Li, XIE Lili, HU Jinjun. Study on acceptable death risk of urban earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(4): 1-7.

庙成,刘希林.山区农民泥石流灾害风险感知和可接受风险研究[J].灾害学,2022,37(1):158-164+170.

MIAO Cheng, LIU Xilin. Study on Farmers' risk perception and acceptable risk of debris flow disaster in Mountainous Areas[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 158-164+170.

马红娜,刘江,冯卫,等.地质灾害风险评估在国土空间规划中的应用以陕北榆林高西沟为例[J].西北地质,2023,56(3):223-231.

MA Hongna, LIU Jiang, FENG Wei, et al. Application of Geological Hazard Risk Assessment in Territorial Space Planning: A Case Study of Gaoxigou Village in Yulin City of Northern Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 223-231.

宋敬衡,何鲜峰.我国溃坝生命风险分析方法探讨[J].河海大学学报(自然科学版),2008,(5):628-633.

SONG Jingxiang, HE Xianfeng. Discussion on dam break life risk

- analysis method in China[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2008, (5): 628–633.
- 谭钦文, 段正肖, 董勇, 等. 基于事故数据分析推导的全国及化工行业可接受风险标准基准值研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(9): 185–192.
- TAN Qinwen, DUAN Zhengxiao, DONG Yong, et al. Study on the standard reference values of acceptable risk criteria for nation and chemical industry based on accident date analysis and derivation[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(9): 185–192.
- 唐亚明, 张茂省, 薛强. 陕西延安市虎头岭滑坡社会风险评价[J]. *地质通报*, 2008, 27(11): 1782–1786.
- TANG Yaming, ZHANG Maosheng, XUE Qiang. Social risk assessments of the Hutoumao landslide in yan'an City, Shanxi, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(11): 1782–1786.
- 唐亚明, 冯卫, 李政国, 等. 滑坡风险管理综述[J]. *灾害学*, 2015a, 30(1): 141–149.
- TANG Yaming, FENG Wei, LI Zhengguo, et al. An overview of landslide risk management[J]. *Journal of Catastrophology*, 2015a, 30(1): 141–149.
- 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*, 2015b, 48(02): 238–24.
- TANG Yaming, ZHANG Maosheng, LI Zhengguo, et al. Review and comparison on Inland and overseas geohazards risk management[J]. *Northwestern Geology*, 2015b, 48(02): 238–24.
- 王丽萍, 李宁宁, 马皓宇, 等. 大坝可接受风险水平确定方法研究[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(4): 136–145.
- WANG Liping, LI Ningning, MA Haoyu, et al. Study on determination method of dam acceptable risk level[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(4): 136–145.
- 王健. 自然灾害社会可接受风险初步研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2013.
- WANG Jian. Preliminary study on social acceptable risk of natural disasters[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2013.
- 吴昊宸, 王运生, 罗永红, 等. 芦山 Ms 6.1 级地震山地灾害异常区灾害生成机制[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(1): 111–121.
- WU Haochen, WANG Yunsheng, LUO Yonghong, et al. Genetic mechanism analysis of abnormal secondary mountain disasters caused by Lushan Ms 6.1 earthquake, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50(1): 111–121.
- 肖义, 郭生练, 熊立华, 等. 大坝安全评价的可接受风险研究与评述[J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(3): 90–94.
- XIAO Yi, GUO Shenglian, XIONG Lihua, et al. Research review on acceptable risk level for dam safety assessment[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(3): 90–94.
- 谢全敏. 滑坡灾害风险评价及其治理决策方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, (24): 4260.
- XIE Quanmin. Study on landslide hazard risk assessment and its control decision method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, (24): 4260.
- 尹衍雨, 苏筠, 叶琳. 公众灾害风险可接受性与避灾意愿的初探—以川渝地区旱灾风险为例[J]. *灾害学*, 2009, 24(4): 118–124.
- YIN Yanyu, SU Jun, YE Lin. A preliminary study on the public's acceptability of disaster risk and willingness to avoid disaster: a case study of drought risk in Sichuan and Chongqing[J]. *Journal of Catastrophology*, 2009, 24(4): 118–124.
- 于汐, 薄景山, 唐彦东. 重大岩土工程可接受风险标准研究[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(3): 56–67.
- YU Xi, BO Jingshan, TANG Yandong. Study on risk acceptance criteria of major geotechnical project[J]. *of Natural Disasters*, 2018, 27(3): 56–67.
- 赵阳, 倪化勇, 张泰丽, 等. 浙江丽水地区地质灾害风险可接受程度[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(3): 953–959.
- ZHAO Yang, NI Huayong, ZHANG Taili, et al. Acceptability of geological hazard risk in Lishui, Zhejiang Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(3): 953–959.
- 赵洲, 侯恩科. 中国地质灾害生命可接受风险标准研究[J]. *科技导报*, 2011, 29(36): 17–22.
- ZHAO Zhou, HOU Enke. The life risk acceptability criteria for the geo-hazards in China[J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(36): 17–22.
- 张子墨, 陈思佳, 张辉. 建筑运维阶段可接受风险标准及基于 LQI 的最优安全投资方案研究[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(1): 117–126.
- ZHANG Zimo, CHEN Sijia, ZHANG Hui. Research on acceptable risk standard and optimal safety investment scheme based on LQI in construction operation and maintenance stage[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(1): 117–126.
- 张文居, 孟陆波, 李磊, 等. 汶马高速公路斜坡地质灾害分布规律及演化模式[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(2): 196–203.
- ZHANG Wenjun, MENG Lubo, LI Lei, et al. Distribution law and evolution model of geological hazards on the slope of Wenchuan-Maerkang expressway, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(2): 196–203.
- ERM-Hong Kong. Landslides and boulder falls from natural terrain: Interim risk guidelines[R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 1998: 1–15.
- Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31: 261–272.
- Fell R, Finlay P J, Mostyn G R. Framework for assessing the probability of sliding of cut slopes[C]. *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides*. Trondheim: ISROM, 1996: 201–208.
- Balkema. IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment. Quantitative risk assessment for slopes and landslides[C]. *Landslide Risk Assessment*, 1997: 3–12.
- Jonkman S N, Van Gelder P HAJ M, Vrijling J K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage[J]. *Journal of hazardous Material*, 2003, 99(1): 1–30.
- Maynard R L. Acceptable risk of environmental air pollution[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2001, 204(2): 203–206.
- Unisdr. Terminology on Disaster Risk Reduction[R]. Geneva, Switzerland: UNISDR, 2009.