

文小兰, 李赞, 奉莉军, 等. 未来土地利用变化情景下海南暴雨灾害的社会经济暴露度分析[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 225-234. [WEN Xiaolan, LI Zan, FENG Lijun, et al. Analysis of socio-economic exposure to rainstorm in Hainan under scenarios of changing future land use[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 225-234. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.034.]

未来土地利用变化情景下海南暴雨灾害的 社会经济暴露度分析^{*}

文小兰¹, 李 赞¹, 奉莉军¹, 郭 浩¹, 方伟华^{2,3,4}

1. 浙江师范大学 地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004;
2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;
3. 北京师范大学 地理科学学部灾害风险科学研究院, 北京 100875;
4. 应急管理部——教育部 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘 要: 基于历史气象数据和耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)8个全球气候模式的未来气象模拟结果分析海南地区在不同重现期和不同排放情景下暴雨灾害危险性,并结合未来经济、人口、土地利用数据,进行暴露度研究,为研究区未来建设提供防灾减灾思路和参考。结果表明:①台风对历史暴雨频次的影响明显,贡献率约为26.15%。未来暴雨频次在RCP4.5浓度路径下呈上升趋势,增长速率约为0.16次/10年。20年一遇时,暴雨频次均值约为11次,100年一遇时,均值约为12次;以海口市、琼海市、儋州市、保亭市为高值中心。②在惯性、生态、高速三种社会发展情景下,建设用地分别保持约29.91 km²/年、6.85 km²/年、31.72 km²/年的增速。在生态保护发展情景下,林地、草地、水域分别保持2.69 km²/年、0.25 km²/年、2.91 km²/年的增速,而在另外两种情景中都呈减少趋势。未来土地暴露量林地最大,耕地次之。③未来人口和经济暴露度空间分布上表现出一定的共性,呈点状分布,多集中在市区的城镇中心。随着时间的推移,暴露量高值区明显扩大,海口市变化最为明显。经济效应的贡献率达到90%以上,人口效应的占85%以上,气候效应占比小。④综合暴露度的高值区主要分布在海口市、三亚市等经济发达、人口密集、建设用地占比高的区域,次高值主要分布在沿海地区,内陆地区受人文因素等影响小,暴露度低。

关键词: 暴雨灾害; 土地利用变化; 暴露度; 贡献率; 海南省

中图分类号: K903; X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)04-0225-10

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.034

目前国内外针对暴雨灾害风险评价开展较多,风险评估技术也相对成熟。关于暴雨灾害危险性研究方法主要有历史灾情数据法、模型模拟法和危险性指标法评估法等^[1-3]。其中危险性指标评估法应用更加广泛,常见的暴雨危险性指标有暴雨频次、暴雨强度^[4]、暴雨日数、暴雨雨量等。由于暴雨灾害危险性的分析受到各类指标影响较大且没有统一的标准,有学者提出信息扩散理论,利用概率分析方法对灾害进行危险性评估^[5]。暴露是指某种灾害危险地区的人口、财产或物品,反映在一定强度致险因子影响下,可能遭受损失的承灾体总量^[2]。暴露度是动态的,为时空尺度而异,并取决于经济、社会、人口、文化、体制和管理等因素^[6]。对于风险而言,暴露度越大其

灾害风险也就越大^[7-8]。关于暴露度方面的研究多围绕着人口暴露度、经济暴露度(GDP、土地利用、农作物)、社会资产暴露度(建筑、基础设施)等方面^[9-11],如王豫燕等人选取暴露于暴雨洪涝灾害下的各县(市、区)的面积、受灾人口数和受灾的农作物面积分别作为灾害暴露范围指标、人口暴露度指标和农作物暴露度指标^[12];SHI Y等人关注城市范围内各类老旧建筑物对其暴露度评估^[13],但暴露度的研究大多数基于现有的承灾体进行分析,缺乏未来的预估及相关情景的构建。

土地利用变化一定程度上反映了其经济、人口等社会因素和自然因素的变化,能够更好的补充人口、经济承灾体动态性和分布不均匀等方面的不足,同时能够更好的分析未来暴雨灾害暴露

^{*} 收稿日期: 2022-06-01 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家重点研发计划“多灾种重大自然灾害综合风险评估与防范技术研究”项目“多灾种重大自然灾害情景构建与动态模拟技术”课题(2018YFC1508803)

第一作者简介: 文小兰(1998-),女,汉族,甘肃陇西人,硕士研究生,主要从事灾害风险评估等研究。E-mail: fatiaoxu@gmail.com

通信作者: 方伟华(1973-),男,汉族,湖北嘉鱼人,教授,主要从事自然灾害风险评估研究。E-mail: weihua.fang@bnu.edu.cn

度变化。而土地利用变换是一种复杂的受到多种外在和内在因素共同影响的动态系统,具有变换不连续、景观镶嵌、类别混合、变换不可逆等特性^[14]。模型模拟是研究未来土地利用变化的重要工具之一。其中,由学者提出的基于神经网络和GIS的CA模型能够解决多种土地利用变化模拟和难题,同时有效简化CA模型的结构,在未来土地利用预测方面已相当成熟^[15-20]。综上所述,本文以海南岛地区为例,基于暴雨频次致灾因子,分析未来土地利用、人口和经济承灾体分布,构建多种发展情景,探究未来各类承灾体在不同致灾强度下的暴露度分布特征,建立暴雨综合暴露度评价模型。期望为海南岛地区在应对未来气候变化、降低灾害暴露度、提高风险防范水平等方面提供科学参考。

1 数据和研究方法

1.1 研究区概况

海南岛地处热带北缘,为热带季风海洋性气候,有明显的多雨季和少雨季。多雨季一般出现在5—10月,多雨季受夏季台风影响大,降水量占到全年70%~90%,容易发生暴雨现象。总体海拔较低,西南部海拔较高(图1)。一般情况下,研究区入汛时间最迟、汛期时间最长,长达6个月。根据海南省应急管理厅^[21]统计,秋季暴雨近40年内共出现了172次,其中日降水量达到特大暴雨级别的有22次,达到大暴雨级别的有57次。

社会经济发展方面,根据海南省统计年鉴数据,2020年总人口达到945.29万人,生产总值达到55 298 689万元。人口的大范围聚集和经济的快速发展相当程度上增加了该地区面对暴雨灾害的危险性。据海南省防汛防风防旱总指挥部办公室统计,近40年内秋汛暴雨造成的经济损失总数高达两百多亿。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 气象数据

历史气象数据来自国家气象信息中心发布的中国地面气候资料日值数据集逐日降水量数据。包括海南地区12个国家基本站和7个一般站1977—2014年的逐日降水量数据。

未来降水数据来自于世界气候研究计划组织

(World Climate Research Programme, WCRP, <https://www.wcrp-climate.org/>)提供的耦合模式比较计划第5阶段(CMIP5)多气候模式不同排放情景下的逐日降水数据。综合了8个模式的未来降水数据进行未来暴雨危险性分析,包括:BCC-CSM1-1、BNU-ESM、CanESM2、CCSM4、GFDL-ESM2M、INM-CM4、IPSL-CM5A-MR、MIROC5。

1.2.2 人口、经济数据

历史人口、经济统计数据来源于以县级行政区为单位的海南省统计年鉴。未来人口数据来源于清华大学,该数据考虑了中国近年来实施的促进生育政策和特大城市人口上限限制,基于SSP情景和中国人口普查,建立的未来栅格数据及省级统计数据^[22]。在本研究中提取了SSP2(中等发展路径,中等生育能力,中等死亡,中等移民,中等教育,有效的二孩政策)与SSP5(不均衡发展路径,低生育能力,低死亡,高移民,高教育,无效的生育政策)两种共享社会经济途径下未来2030年和2050年人口数据。

未来经济数据是由研究区县域单元1990—2018年历史GDP数据线性拟合出一个以年份为自变量,GDP为因变量的预测函数,得到所需未来2030年与2050年县域GDP值。并在其基础上利用ArcGIS中的栅格空间计算工具将未来GDP数据按实际权重降尺度到网格单元,实现其空间化^[23]。计算公式为:

$$GDP_{ij} = GDP \times \alpha \quad (1)$$

式中: GDP_{ij} 为栅格单元值, GDP 为该栅格单元所在行政区的GDP值; α 为该栅格单元GDP占行政区单元总GDP值的比例。

基于2015年海南地区各县域GDP栅格数据与各县域GDP总值,计算出每个栅格的值,根据公式将2030年和2050年的预测GDP值进行栅格空间,每个栅格代表该栅格范围(1km²)内的GDP总值(万元/km²)。

1.2.3 土地利用数据

土地利用基准数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。其中土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型。此外,研究还使用了来自地理空间数据云的高程数据,中国科学院资源环境科学与数据中心的城镇分布、公路和铁路分布数据等。

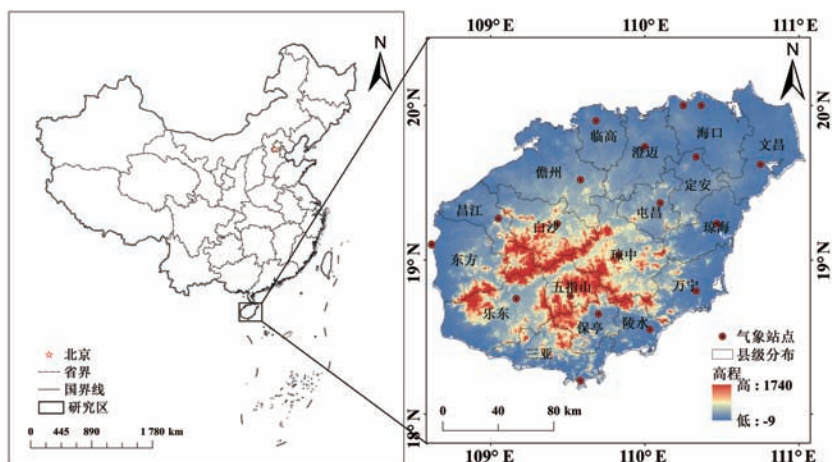


图1 研究区概况(审图号:GS(2020)4619号,底图未修改,下同)

1.3 研究方法

1.3.1 致灾因子危险性

在本研究中选用暴雨频次表示暴雨灾害的致灾因子。参考国家气象局对暴雨的定义^[24], 日降水 ≥ 50 mm 被定义为暴雨, 其中连续性多天日降水量 ≥ 50 mm 同样被认为是一次暴雨事件, 一年的暴雨事件的次数被定义为暴雨频次。

重现期是指在一定数据记录统计时段内, 大于或等于此水文要素在较长时期内重复出现的平均时间间隔, 常以多少年一遇表示^[25]。本研究使用信息扩散方法计算海南地区暴雨频次的重现期^[26]。信息扩散理论是一种为了解决信息不足而利用样本模糊信息对样本进行集值化处理的模糊数学处理法, 即将一个分明值样本点, 变成一个模糊集合。

已知灾害指数论域 U :

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}. \quad (2)$$

通过公式(2), 一个单值观测样本点所携带的信息被扩散到 U 中的全部样本点。

$$f_i(u_j) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-u_j)^2}{2h^2}}. \quad (3)$$

式中: h 称为扩散系数。其值由样本中最大值 b 与最小值 a 以及样本点总数 n 共同确定。

令

$$C_i = \sum_{j=1}^m f_i(u_j). \quad (4)$$

则对应模糊子集的隶属函数为:

$$\mu_{x_i}(u_j) = \frac{f_i(u_j)}{C_i}. \quad (5)$$

式中: 称 $\mu_{x_i}(u_j)$ 为样本点 x_i 归一化信息分布。对 $\mu_{x_i}(u_j)$ 进行处理, 可获得较为理想的风险评估结果。

令

$$q(u_j) = \sum_{i=1}^n \mu_{x_i}(u_j). \quad (6)$$

由经信息扩散可推断, 如果灾害观测值只能取 u_1, u_2, \dots, u_m 中一个, 将 x_i 均看作是样本点代表时, 则 u_j 样本点个数 $q(u_j)$ 为观测值。一般而言 $q(u_j)$ 不是一个整数, 但一定是个不小于零的数, 再令

$$Q = \sum_{j=1}^m q(u_j). \quad (7)$$

上式表明 Q 为各 u_j 点上样本点个数总和。就理论而言, 应有 $Q = n$, 但实际计算中由于四舍五入等问题带来的误差, 导致 Q 和 n 在数值上略有区别。

$$p(u_j) = \frac{q(u_j)}{Q}. \quad (8)$$

可将样本点落在 u_j 上的频率视为概率的估值。超越 u_j 的概率值是:

$$P(u_j) = \sum_{k=j}^m p(u_k). \quad (9)$$

式中: $P(u_j)$ 就是暴雨超越概率估计值。最后利用反距离加权插值法 (IDW) 对研究区各气象站点不同重现期的暴雨频次分布进行插值, 得到研究区暴雨危险性空间分布情况^[27]:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{D_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^p}}. \quad (10)$$

式中: Z 为相邻点估计值; Z_i 为第 i 个样本的数值; D_i 为距离; p 为距离的幂 (最小平均绝对误差)。

1.3.2 基于 FLUS 模型的未来土地利用预测

FLUS 模型可以模拟多种类型土地利用的长期空间演变轨迹, 通过自上而下的系统动力学及元胞自动机之间的相互耦合, 在 CA 模型中建立了一种自适应的惯性和竞争机制, 从而提高了模拟和预测的能力^[28]。

本文基于地理模拟与优化系统 (GEOSOS - FLUS) 设计三个不同社会发展路径: 惯性发展情景、经济优先发展情景、生态优先发展情景。参考海南地区历史土地利用统计数据, 在 2018—2020 年间, 6 种土地利用类型中建设用地总量呈现增加态势, 而其他 5 种土地利用类型均有所减少, 其中林地减少最多, 耕地次之。基于该土地利用类型变化情况, 利用 ArcGIS 工具建立惯性发展情景的土地利用转移矩阵, 再次基础上根据海南省生态保护发展规划, 海南省“十三五规划”等, 分别设计经济优先发展情景和生态保护优先发展情景下的土地利用类型转移矩阵。在未来土地预测过程中需确定各类土地利用类型的邻域因子参数, 其参数大小反应了土地利用面积变化的扩张能力大小^[29]。在本研究中邻域因子参数值参考式(11)由 2018—2020 年土地利用面积变化量经无量纲化处理而来, 具体参数大小参考表 1。

$$X^* = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}. \quad (11)$$

式中: X^* 表示离差标准化值, X_{\max} 、 X_{\min} 分别为数据中的最大值和最小值。

表 1 土地利用类型邻域因子参数值

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
权重	0.21	0.00	0.31	0.24	1.00	0.34

1.3.3 贡献率计算

本研究分析了未来人口、经济、致灾因子等要素对于灾害暴露度的贡献率^[30-31]。

$$\Delta E_1 = G_1 \times \Delta C + C_1 \times \Delta G + \Delta C \times \Delta G; \quad (12)$$

$$\Delta E_2 = P_1 \times \Delta C + C_1 \times \Delta P + \Delta C \times \Delta P. \quad (13)$$

式中: ΔE_1 、 ΔE_2 是暴露的总变化。 G_1 、 P_1 、 C_1 是历史时期的经济、人口和暴雨频次, ΔG 、 ΔP 、 ΔC 是未来相对于历史时期的经济、人口和暴雨频次的变化。 $G_1 \times \Delta C$ 、 $P_1 \times \Delta C$ 称为气候效应, $C_1 \times \Delta G$ 为经济效应, $C_1 \times \Delta P$ 为人口效应, $\Delta C \times \Delta G$ 、 $\Delta C \times \Delta P$ 为相互作用效应。将方程的两侧分别除以 E_1 、 E_2 , 则可以计算出每个指标的百分比变化估计值。

$$\frac{\Delta E_1}{E_1} = \frac{G_1 \times \Delta C + C_1 \times \Delta G + \Delta C \times \Delta G}{C_1 \times G_1} = \frac{\Delta C}{C_1} + \frac{\Delta G}{G_1} + \frac{\Delta C}{C_1} \times \frac{\Delta G}{G_1}; \quad (14)$$

$$\frac{\Delta E_2}{E_2} = \frac{P_1 \times \Delta C + C_1 \times \Delta P + \Delta C \times \Delta P}{C_1 \times P_1} = \frac{\Delta C}{C_1} + \frac{\Delta P}{P_1} + \frac{\Delta C}{C_1} \times \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (15)$$

式中: E_1 、 E_2 是基准期暴露量, 式(14)和式(15)用来计算气候效应、人口效应、经济效应、相互作用效应和暴露度总变化各自的百分比变化, 在此基础上对暴露度总变化百分比进行归一化处理, 并分别计算出以上四种效应在总变化中的占比, 即贡献率。

1.3.4 暴露度计算

利用 ArcGIS 技术, 将人口暴露度、经济暴露度与土地利用暴露度采用数学模型进行评估, 在空间上进行表达, 获得暴露度空间分布图。对极端降水人口暴露定义为平均每单位单元的致灾危险性与单位单元内人口总数的乘积, 表达式为:

$$E_{POP} = R \times POP。 \quad (16)$$

式中: E_{POP} 是单位单元(1 km × 1 km)的人口暴露度(人口均值: 人·次/年); R 是单位单元暴雨频次(次/年); POP (人) 指居住在单位单元中的人口数。经济暴露度与土地利用同理, 其中土地暴露度的计算要分别考虑每种土地利用类型。

综合暴露度的计算要同时考虑人口、经济和土地利用三者的权重关系。可根据各指标间的重要程度和内在联系运用层次分析法^[11]对其分别赋值。以人口、经济、土地利用为一级指标构建判断矩阵, 计算矩阵的特征向量与特征值, 进行一致性检验:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n + 1)。 \quad (17)$$

式中: CI 为一致性指标; λ_{\max} 为最大特征值; n 为指标个数。

$$CR = CI / RI。 \quad (18)$$

式中: RI 为随机一致性指标。若 $CR < 0.1$, 说明该矩阵符合一致性检验, 否则需对此矩阵做相应调整, 直至通过检验。

通过层次分析法分别确定以下 6 种一级指标权重赋值方案(表 2)

表 2 6 种权重赋值方案

方案	人口	经济	土地利用	CR 值
1	0.089	0.587	0.324	0.009
2	0.581	0.309	0.110	0.004
3	0.608	0.272	0.120	0.071
4	0.104	0.665	0.231	0.084
5	0.548	0.211	0.241	0.018
6	0.685	0.221	0.093	0.052

利用泛系观控^[11] 计算公式得到 6 个方案的约束信息量 BI 值为:

$$BI = \log_2 n + \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, (i = 1, 2, \cdots, n); \quad (19)$$

$$P_i = \frac{D_{ij}}{\sum D_{ij}}, i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m。 \quad (20)$$

式中: P_i 为第 i 个观控对象所对应的概率; n 为观控指标数; m 为方案数。

如表 3 所示, 分别算出 6 个方案的约束信息

量, 表中 BI 值越小, 代表不确定性更小, 风险更低, 由此选择方案 5 为最佳赋值方案。基于上述方法求出的一级指标, 综合未来人口、经济、土地利用各类承灾体及未来不同重现期下的致灾危险性进行叠加分析, 为保证三类承灾体量纲一致, 对其进行归一化处理。其中计算出各类土地利用类型各自对应年份经济密度以代替土地利用数据。

表 3 6 种不同权重赋值方案的约束信息量

方案	CR	BI
1	0.009	0.306
2	0.004	0.108
3	0.071	0.121
4	0.084	0.278
5	0.018	0.098
6	0.052	0.243

具体公式如下:

$$E_j = (A_p \times POP + A_g \times GDP + A_l \times LAND) \times D。 \quad (21)$$

式中: E_j 表示 j 地区的综合暴露度; A_p 、 A_g 、 A_l 分别表示人口、经济、土地利用数据一级指标权重; POP 、 GDP 、 $LAND$ 分别表示研究地区未来人口、经济、各类土地利用类型所对应经济密度; D 为 20 年一遇和 100 年一遇重现期下致灾危险性, 即暴雨频次。

2 结果与分析

2.1 海南暴雨危险性分析

综合历史气象数据和 8 个模式(2015—2060 年)暴雨频次均值分布, 对比分析逐年暴雨频次的变化。如图 2 所示, 海南地区历史暴雨频次总体呈上升趋势, 但年际变化波动较大, 受台风影响明显, 贡献率在 26.15% 左右。未来不同排放浓度路径下预测数据有阶段性的差别, RCP8.5 浓度路径下的暴雨频次总体呈下降趋势, RCP4.5 浓度路径下呈上升趋势, 增长速率约为 0.16 次/10 年; 以 2040 年左右作为时间节点, 前期 RCP8.5 浓度路径暴雨频次更高, 后期 RCP4.5 浓度路径更高, 分析推测在 RCP8.5 浓度路径后期, 由于全球气温升高至一定限度, 导致全球气温差异变小, 海洋和陆地温差减小影响到我国夏季风的强度, 导致暴雨发生次数出现下降趋势。

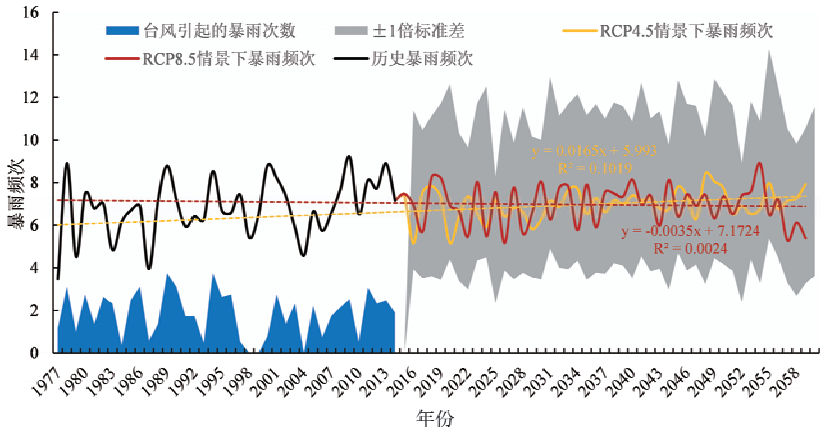


图 2 海南地区逐年暴雨频次变化图
(其中: 2014 年前为历史数据, 后为模型预测数据)

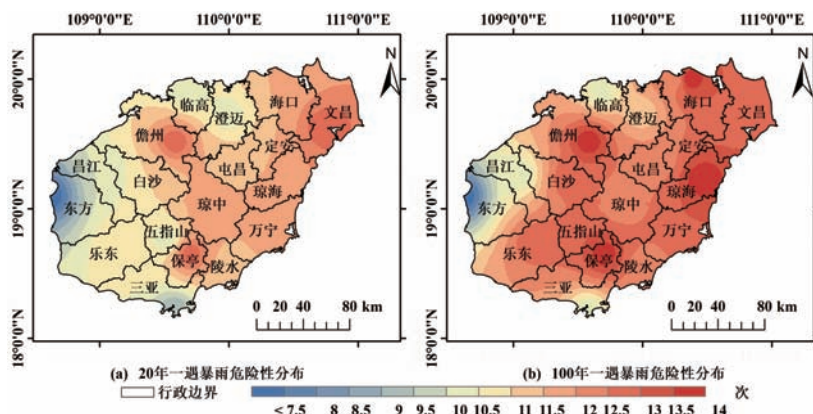


图3 不同重现期暴雨危险性分布(单位: 次)

如图3所示,随着重现期的增加,海南地区的暴雨危险性的程度和空间范围呈现出不同程度地加深和扩大。从空间差异来看,结合海南地区地形分布及夏季风的影响,暴雨发生频次低值区出现在西部,高值区分布范围广,以海口市、琼海市、儋州市、保亭市为高值中心。20年一遇时,暴雨危险性高值约为13次,低值约为7次,平均值约为11次;100年一遇时,暴雨危险性有所增加,高值达到14次,平均值约为12次,低值保持稳定。

2.2 未来不同社会经济情景下土地利用变化及暴露度分析

基于FLUS模型选择满足精度要求的9类驱动因素,地形因子包括高程数据(DEM)以及由高程数据计算得到的坡度;社会因子,包括人口和国民生产总值经济数据;区位因子为到城镇中心的距离,交通因子为距普通公路、高速公路、乡间道路和铁路的距离;除此之外,还包括城市适宜性图层,用于生态优先发展情景下对建设用地的限制。对以上9类驱动因子和限制性图层进行重采样、归一化等预处理,消除量纲影响。以2018年数据为基准,预测2020年的土地利用情况,与2020年真实土地利用数据进行对比分析,验证在三种发展情景下转移矩阵的科学性,最终得到表4。Kappa系数均大于0.960, Kappa系数值越大表明精度越高,满足精度要求,同时, Fom 系数均不大于0.020,根据 Fom 系数要求,每模拟年数增加一年, Fom 指数增加不大于0.010为标准水平,在该研究中,模拟年份跨度为2年,因此满足 Fom 指数要求,三种发展情景下的精度都符合要求,验证了转移矩阵的可行性。

表4 不同发展情景下土地利用模拟精度

情景	Kappa 系数	Fom 精度值
惯性发展情景	0.964	0.017
生态优先情景	0.972	0.020
经济优先情景	0.980	0.007

如图4、表5所示,相较于历史土地利用数据,三种情景下耕地占有量变化没有显著差异,从2018—2050年均降低了约0.58%;林地、草地、水域土地类型的占有量在生态保护发展情景下有所提高,平均增速分别约为2.69km²/年、0.25km²/年、2.91km²/年,其余两种情景出现不

同程度的下降;而受人类活动影响最大的建设用地在惯性发展和经济高速发展情景下增加显著,其中,在惯性发展情景下平均增速约为29.91km²/年,经济优先发展情景下约为31.72 km²/年,而生态保护发展情景下只有6.85 km²/年。总体来说,在生态保护发展情景下,建设用地增速放缓,其发展受到一定程度的限制,而林地、草地、水域等自然用地较其他两种情景都有所增加;惯性发展情景和经济高速发展情景中建设用地快速扩张;作为满足人类最基础生产生活的耕地、林地资源保持相对稳定。空间分布上表现出明显的差异,建设用地分布更为密集,主要分布在北部、东部、南部的沿海地区,以三亚市、海口市最为典型,并有向内部地区延伸的走势,中部地区分布较分散,呈点状分布,面积较小,其中生态保护发展情景下,建设用地面积明显缩小;中部地区大部分分布自然用地。

将三种不同社会发展情景下未来2030年与2050年土地利用分布数据按土地类型分别提取,并结合未来RCP4.5和RCP8.5各浓度路径下对应年份的暴雨危险性——暴雨频次图,综合分析未来各类土地利用暴露量变化情况(图5)。暴雨危险性的变化影响到土地暴露度的情况,相对比RCP4.5和RCP8.5浓度路径下暴雨危险性情况,2030年,RCP4.5与RCP8.5浓度路径的暴雨频次高值分别为10.7次、11次,RCP8.5浓度路径下危险性相对较大;2050年分别为10.8次、10.5次,RCP8.5路径下危险性有所降低;从空间上来看,暴雨危险性高值区都较为统一,主要集中在海南地区的中部地区。总体来看,2030年由于暴雨危险性的程度差异,导致RCP8.5路径下的各土地类型暴露量要高于RCP4.5情景;而在2050年耕地和林地土地利用类型的暴露量在RCP4.5路径下更大,此时三种情景平均暴露量分别为65 637.96 km²·次、171 088.2 km²·次,其他土地利用类型暴露量差别较小,两种路径下差值均小于640 km²·次,进一步分析发现有可能是受到各类土地利用类型的分布地区及暴雨危险性的空间分布,导致耕地和林地资源的暴露量出现较大的差异。同时,在RCP4.5路径下,林地三种情景平均暴露量为171 088.2 km²·次,在RCP8.5路径下,平均暴露量为163 875.6 km²·次,受海南地区土地利用情况影响,林地的暴露量始终最大。

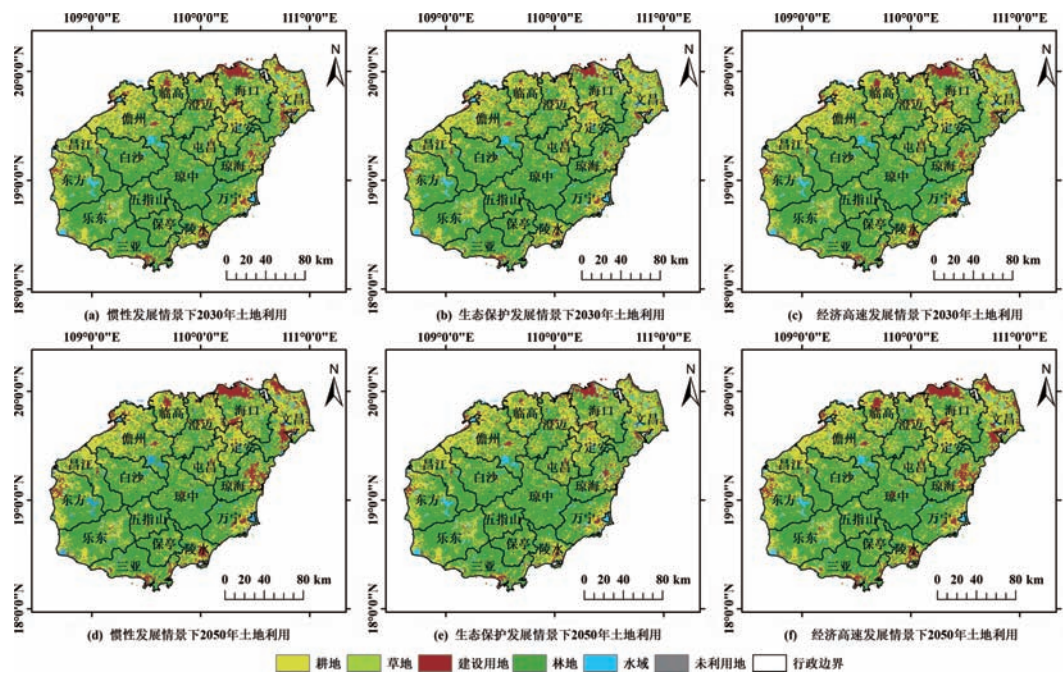


图 4 不同社会发展情景下未来土地利用分布

表 5 不同社会发展情景下土地类型变化 km²

情景	年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
历史年份	2018	8 606	21 413	1 177	1 373	1 292	86
	2020	8 587	21 356	1 170	1 365	1 387	83
惯性发展情景	2030	8 544	21 222	1 151	1 358	1 861	87
	2050	8 476	20 920	1 125	1 367	2 249	86
生态发展情景	2030	8 544	21 499	1 185	1 460	1 450	85
	2050	8 476	21 499	1 185	1 466	1 511	86
经济优先发展	2030	8 544	21 222	1 151	1 356	1 869	81
	2050	8 476	20 920	1 125	1 326	2 307	69

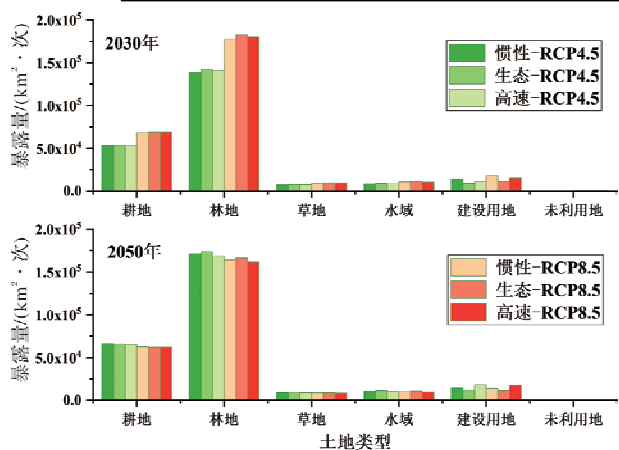


图 5 三种社会发展情景土地利用暴露度变化

2.3 未来人口、经济暴露度特征

2.3.1 未来人口暴露度

人口承灾体在中等发展路径下密度整体要大于不均衡发展路径，但空间分布差异不大，主要集中在海口、三亚为主的经济发达的地区。分析发现人口暴露度分布和人口密度分布呈现出较为相似的特点(图 6)。以海口市与三亚市为例，2030 年

SSP2 路径下海口市人口密度为 1 651.48 人/ km²，人口暴露度均值为 11 282.17 人·次，最大值可达 1 336 776.75 人·次；而三亚市人口密度为 513.50 人/ km²，人口暴露度均值为 3 446.92 人·次，最大值为 343 033 人·次。发现人口分布密度大，最终导致受暴雨危险性所影响的暴露度也呈现高值。除上述地区之外，其他高值区分布分散且面积较小，由经纬度确定其主要分布在各市县中心，人口分布较多。除此之外，在 RCP8.5 - SSP5 下，由于承灾体的变化 2050 年人口暴露度出现降低趋势。

2.3.2 未来经济暴露度

如图 7 所示，未来 2030 年与 2050 年经济暴露度空间分布上极高值存在相似特征，主要分布在海口市和三亚市，不同情景下 2030 年和 2050 年最大值均大于 100 万·次，其中 2050 年极高值范围出现明显扩大。次高值与中值区在分布上 2030 年与 2050 年有极为明显的差别。2030 年，暴露度分布较低的地区主要包括儋州市、琼海县、万宁市，约为 1~3 万元·次，西部地区暴露度低。到 2050 年，次高值区范围出现明显扩大，从 2030 年分布面积小、严重程度低逐渐演变为分布面积广泛，

扩展到 7 个沿海城市, 严重程度明显增加, 约为 3~6 万元·次, 西部地区暴露度也逐渐增加至中等程度。在不同排放路径暴雨危险性下, 经济暴露度也出现差别。在 2030 年, RCP8.5 浓度路径下的暴露度明显要高于 RCP4.5 路径, 而在 2050 年, RCP8.5 路径下的暴露度相较于 RCP4.5 路径下差

别不大。总体来看, 随着海南岛地区经济的快速发展, 未来经济暴露度将持续增加, 且高值区空间分布主要集中在以海口市、三亚市等为代表的经济发达地区。中部地区危险性虽较高, 但由于经济相对落后, 导致经济暴露度低。同时相较于人口暴露度来说, 经济暴露度分布更加明显。

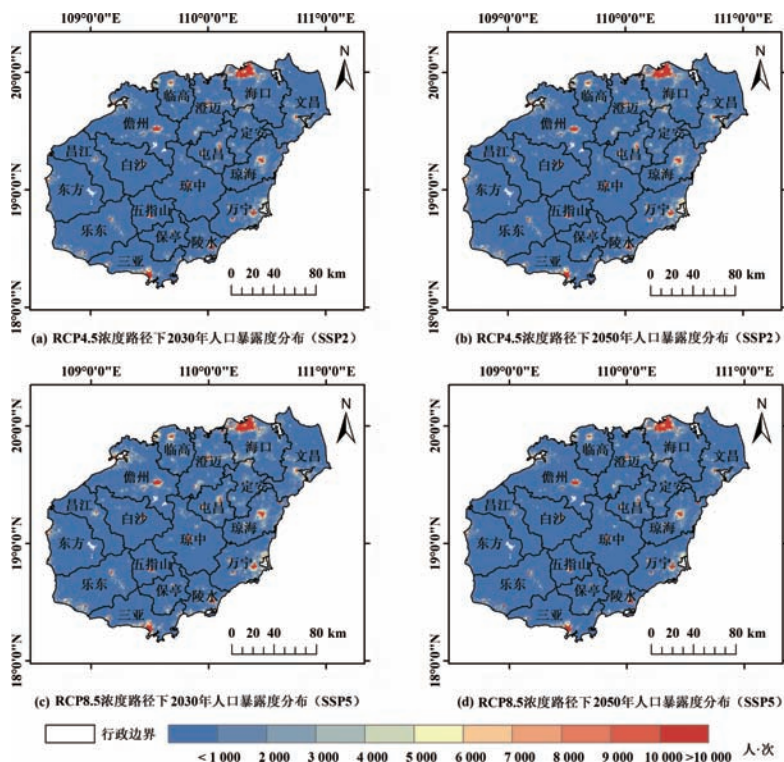


图6 海南地区未来人口暴露度分布(单位: 人·次)

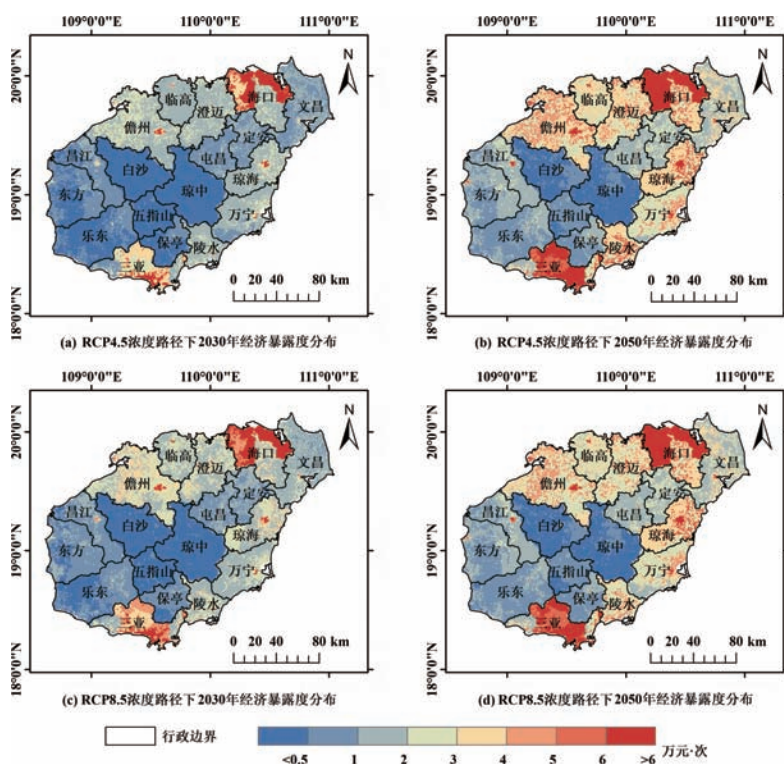


图7 海南地区未来经济暴露度分布(单位: 万元·次)

2.3.3 贡献率分析

综上研究分析发现,未来人口和经济暴露度与人口、经济分布呈现出较好的一致性,为了更好的解释海南地区未来人口、经济暴露度分布的成因,以2022—2050年为未来时期,1986—2014为历史时期,利用式(12—15)分别计算经济与气候、人口与气候的贡献率关系(图8)。将经济同气候结合分析发现,在RCP4.5和RCP8.5浓度路径下,经济效应的贡献明显高于气候效应和相互作用效应,但在2046年后,气候效应的变化曲线与暴露总变化的曲线表现出相似性;将人口同气候结合时,人口效应和气候效应的贡献率差距明显缩小,但还是人口效应占主要。对于人口效应而言,RCP4.5-SSP2和RCP8.5-SSP5两种路径下后期都出现了下降趋势。在得出各类效应百分比变化基础上,进行归一化,求出各贡献率占比。经济效应的贡献率始终占较高,达到90%以上,人口效应的占到85%以上,气候效应的占比

都较小,但又决定了暴露总变化的基本走向。综上,在海南地区,暴雨灾害暴露度的原因主要侧重于人文因素,经济效应的贡献最大,人口效应次之,而气候效应的贡献率保持在较低的层次,但气候效应的贡献比随着不同浓度路径的变化出现差异,在RCP4.5路径下贡献率较低,RCP8.5路径下贡献率上升,说明未来假设人类对于全球气候变暖问题没有做出良好的举措,导致空气中温室气体浓度维持在高水平,会导致海南地区出现更大的暴雨危险性。

2.4 综合暴露等级分布

基于综合暴露度评估模型式(21)分析海南地区未来暴露度情况,以自然断点法将其分别划分为高、较高、中等、较低、低五个等级区域,按照三种不同社会发展路径下的土地利用,综合分析得到三组暴露度等级分布图,以惯性发展情景下的土地利用为例说明海南地区不同重现期下的未来综合暴露度情况(图9)。

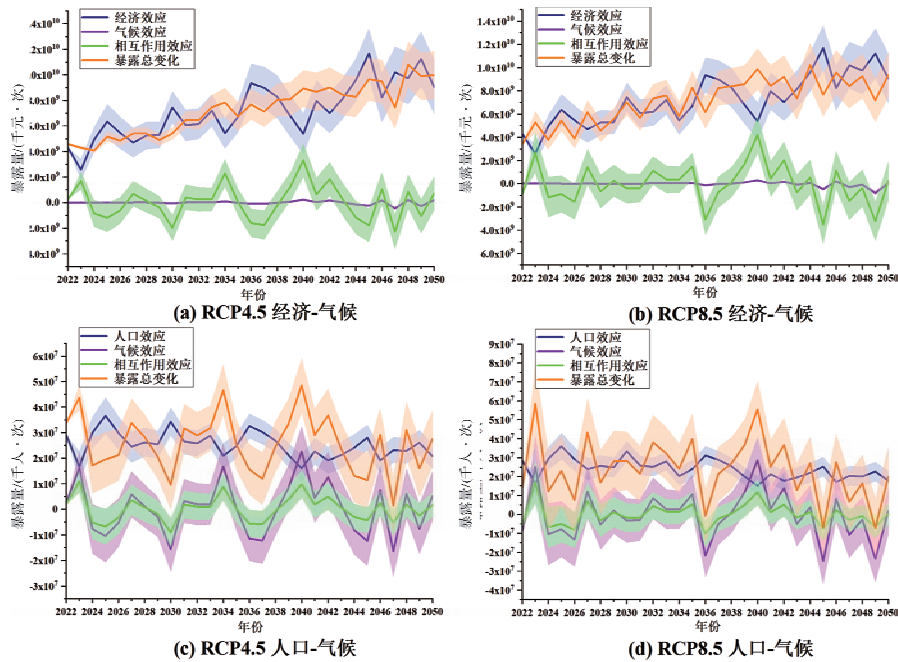


图8 海南地区暴雨危险性暴露量变化

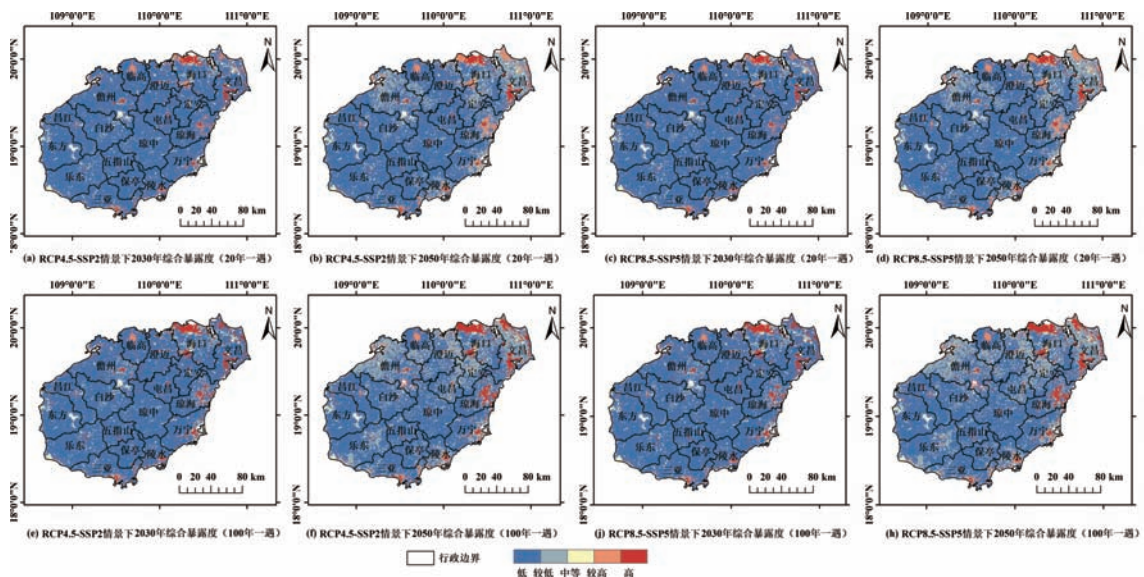


图9 海南地区2030年综合暴露度等级分布(以惯性发展土地利用情景为例)

总体来说,在不同浓度路径和两个重现期下综合暴露度高值区集中分布在以海口市、三亚市为典型代表的经济发达、人口密集、建设用地分布高的市县,次高值主要分布在沿海地区,如儋州市、临高县、琼海市、万宁县等地,受地形、交通、气候、经济等因素的影响,沿海地区承灾体——人口密度、经济密度分布较大,导致暴露度等级分布较高。从暴雨危险性的角度来看,中等暴露等级以上地区与致灾暴雨危险性分布没有表现出较好的一致性;同时随着承灾体的变化,暴露度分布出现扩大趋势,其中以海口市最为典型。

3 结论与讨论

(1)海南地区历史暴雨频次总体呈上升趋势,但年际变化波动较大,受台风影响明显,台风对暴雨频次的贡献率在 26.15% 左右;RCP4.5 浓度路径下呈上升趋势,增长速率约为 0.16 次/10 年;;随着重现期的增加,暴雨危险性的程度和空间范围呈现出不同程度地加深和扩大;发生频次低值区出现在西部,高值区分布范围广。

(2)以建设用地为例,在生态保护情景下扩张速度为 6.85 km²/年,而另外两种情景扩张速度均在 30 km²/年左右,环境保护一定程度上减轻了城市化带来的消极影响。在惯性、生态、高速三种情景中,林地的面积始终最大,以 2050 年为例,分别为 20 920、21 499、20 920 km²,受其分布情况制约暴露量最大。在三种情景中建设用地在生态保护情景下暴露度最小。

(3)承灾体的暴雨灾害暴露量受到危险性和承灾体的双重影响。未来人口暴露度方面,空间分布上表现出一定的共性,呈点状分布,高值多集中在市区的城镇中心;经济暴露度高值在空间分布上主要集中在海口市、三亚市等经济发达的区域,其余主要分布在沿海地区的市中心,呈分散点状分布。分析各个因素对海南地区暴雨灾害暴露度的贡献情况,经济效应的贡献率达到 90% 以上,人口效应为 85% 以上,气候效应的占比小。

(4)综合暴露度等级分布方面,高值区主要分布在海口市、三亚市等经济发达、人口密集、建设用地占比高的区域,次高值主要分布在沿海地区,内陆地区受人文因素等影响小,暴露度低。

未来研究可从以下三个方面进一步深入:①本研究设定了三种未来社会经济发展情景,但影响区域发展的因素是多样的、偶然的,不仅受地区资源禀赋影响,同时受国家战略政策和规划的影响程度更深,因此,未来需建立政策影响下的社会经济发展动态模拟模型,能在预测模拟过程中充分耦合区域历史特征、资源条件及政策影响等综合要素。②本研究使用暴雨频次作为致灾因子危险性分析的要素,衡量暴雨强度的指标由多

种,但各指标的侧重点不同。本研究重点考虑了暴雨的年际差异,因此选择了暴雨频次作为危险性指标,未来可进一步丰富暴雨危险性指标,提高暴雨强度分析的准确性。③在暴露度研究中多关注人口和经济承灾体,但其二者并不能完全代表社会发展状况,如城市化发展/人口的迁移等等导致承灾体变化更为复杂,而土地利用格局能够好的综合反映社会经济的情况,未来将会在研究过程中尝试将更多的承灾体综合应用。

参考文献:

- [1] 刘家福,张柏.暴雨洪灾风险评估研究进展[J].地理科学,2015,35(3):346-351.
- [2] 王艳君,高超,王安乾,等.中国暴雨洪涝灾害的暴露度与脆弱性时空变化特征[J].气候变化研究进展,2014,10(6):391-398.
- [3] 蒋新宇,范久波,张继权,等.基于GIS的松花江干流暴雨洪涝灾害风险评估[J].灾害学,2009,24(3):51-56.
- [4] 樊高峰,何月,顾骏强.基于GIS的浙江省暴雨灾害及其危险性评价[J].中国农学通报,2012,28(32):293-299.
- [5] 黄崇福.自然灾害风险评价:理论与实践[M].北京:科学出版社,2005.
- [6] 郑菲,孙诚,李建平.从气候变化的新视角理解灾害风险、暴露度、脆弱性和恢复力[J].气候变化研究进展,2012,8(2):79-83.
- [7] 黄红铸,崔玉娟,叶瑜,等.江浙沪地区历史重大洪涝灾害情景下的人口和GDP物理暴露量分析[J].长江流域资源与环境,2013,22(6):801-807.
- [8] 龙鑫,成升魁,甄霖,等.水资源对旱涝灾害的承险脆弱性研究方法探讨[J].资源科学,2010,32(5):1000-1005.
- [9] 景丞,姜彤,王艳君,等.中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究[J].气象学报,2016,74(4):572-582.
- [10] 黄大鹏,张蕾,高歌.未来情景下中国高温的人口暴露度变化及影响因素研究[J].地理学报,2016,71(7):1189-1200.
- [11] 高超,汪丽,陈财,等.海平面上升风险中国大陆沿海地区人口与经济暴露度[J].地理学报,2019,74(8):1590-1604.
- [12] 王豫燕,王艳君,姜彤.江苏省暴雨洪涝灾害的暴露度和脆弱性时空演变特征[J].长江科学院院报,2016,33(4):27-32,45.
- [13] SHI Y, SHI C, XU S Y, et al. Exposure assessment of rainstorm waterlogging on old-style residences in Shanghai based on scenario simulation[J]. Natural Hazards, 2010, 53(2): 259-272.
- [14] 黎夏,叶嘉安.基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J].地理研究,2005,24(1):19-27.
- [15] 何春阳,史培军,陈晋,等.基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J].中国科学(D辑):地球科学,2005(5):464-473.
- [16] 邱炳文,陈崇成.基于多目标决策和CA模型的土地利用变化预测模型及其应用[J].地理学报,2008,63(2):165-174.
- [17] LI Y C, HE C Y. Scenario simulation and forecast of land use/cover in northern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(9): 1401-1412.
- [18] AL-SHALABI M, BILLA L, PRADHAN B, et al. Modelling urban growth evolution and land-use changes using GIS based cellular automata and SLEUTH models: the case of Sana'a metropolitan city, Yemen[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(1): 425-437.
- [19] ZHAO L Y, PENG Z R. LandSys II: Agent-based land use forecast model with artificial neural networks and multiagent model[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2015, 141

- (4): 04014045.
- [20] 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟: 以大连经济技术开发区为例[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 461–475.
- [21] 海南秋汛期暴雨来袭, 一张图告诉你背后的原理 [EB/OL]. (2021-10-08) [2021-11-11]. <https://www.163.com/dy/article/GMJ178BH053469JX.html>.
- [22] CHEN Y, GUO F, WANG J, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1–13.
- [23] 易玲, 熊利亚, 杨小唤. 基于 GIS 技术的 GDP 空间化处理方法[J]. 甘肃科学学报, 2006, 18(2): 54–58.
- [24] 朱乾根, 林锦瑞, 寿邵文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992.
- [25] 张正涛, 高超, 刘青, 等. 不同重现期下淮河流域暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1361–1372.
- [26] 杜晓燕, 黄岁樑, 赵庆香. 基于信息扩散理论的天津旱涝灾害危险性评估[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 22–25.
- [27] 庄立伟, 王石立. 东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 605–615.
- [28] 王蒙. 基于 FLUS 模型的土地利用变化模拟与预测方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(1): 161–166.
- [29] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置: 以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4284–4298.
- [30] LIU Z, ANDERSON B, YAN K, et al. Global and regional changes in exposure to extreme heat and the relative contributions of climate and population change[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1–9.
- [31] 韩钦梅, 吕建军, 史培军. 湖北省暴雨人口暴露时空特征与贡献率研究[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 191–196.

Analysis of Socio – economic Exposure to Rainstorm in Hainan under Scenarios of Changing Future Land Use

WEN Xiaolan¹, LI Zan¹, FENG Lijun¹, GUO Hao¹, FANG Weihua^{2,3,4}

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal

University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Disaster Risk Science, Faculty of Geographical Science,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Academy of Disaster Reduction and Emergency

Management Ministry of Emergency Management and Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on historical meteorological data and future meteorological simulation results of 8 global climate models from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), we analyze rainstorm hazard in Hainan with different return periods and different RCP scenarios. The exposure is assessed combined with future economy, population, and land use, and provide disaster prevention and mitigation ideas and methods for future construction in the study area. The results show that: 1) Typhoons have an obvious impact on the frequency of historical rainstorms, with a contribution rate of about 26.15%. The frequency in the future will show an upward trend under the RCP4.5 concentration path, with an increase rate of about 0.16 times/10a. The average frequency is about 11 times when it occurs once in 20 years, and about 12 times when it occurs once in 100 years; Haikou, Qionghai, Danzhou, and Baoting are the high-value centers. 2) Under the three social development scenarios of inertia, ecology and high speed, the construction land maintains a growth rate of about 29.91 km²/year, 6.85 km²/year and 31.72 km²/year respectively. Under the ecological protection development scenario, the forest land, grassland, and water area maintained a growth rate of 2.69 km²/year, 0.25 km²/year, and 2.91 km²/year, while in the other two scenarios, there is a decreasing trend. In the future, the amount of forest land exposure will be the largest, followed by cultivated land. 3) The spatial distribution of population and economic exposure in the future shows certain commonalities, with a point-like distribution, mostly concentrated in the urban center of the urban area. With the passage of time, the high-value area of exposure has expanded significantly, with the most obvious change in Haikou City. The contribution rate of the economic effect is over 90%, the population effect is over 85%, and the climate effect is small. 4) The high-level exposure areas are mainly distributed in Haikou, Sanya and other areas with developed economy, dense population, and a high proportion of construction land. The sub high-level exposure is mainly distributed in coastal areas, and the interior areas have low exposure.

Keywords: rainstorm disaster; land use change; exposure; contribution rate; Hainan province