三峡地区资源环境生态研究

DOI:10.11721/cqnuj20250105

未来土地利用变化情景下重庆市高温灾害的暴露度分析*

张　静，牟凤云，楚昌全
(重庆交通大学 智慧城市学院，重庆 400074)

摘要:明确重庆市在 SSP2-4.5、SSP5-8.5 等 2 种升温情景和惯性发展优先、经济发展优先、可持续发展优先等 3 种发展情景下的高温暴露度，为当地城市规划和灾害风险管理提供决策支持。基于 2020 年的重庆市土地利用数据，运用 PLUS 模型预测了 2030 年重庆市土地利用状况，并结合重庆市未来人口和日最高气温数据构建了综合暴露度模型。结果表明：1) SSP2-4.5 情景下 2030 年重庆市主城都市区及渝东北三峡库区城镇群的南部高温致灾危险性较高；而 SSP5-8.5 情景下高温致灾危险性程度不同的区域从西到东呈带状分布，所对应的高温致灾危险性指数先减小后增大，其中高温致灾危险性较高区域的分布与在 SSP2-4.5 情景下的分布相似；2) 2 种升温情景下 2030 年重庆市耕地与林地的暴露度高于灌木、草地、水域、裸地和建设用地的暴露度；3) 2 种升温情景下 2030 年重庆市人口暴露度的空间分布具有一致性；4) 2030 年重庆市综合暴露度较高的区域主要集中分布在人口密集、经济相对发达地区以及以林地为主的区域。上述结果可为重庆市在未来城市建设发展中对土地利用的合理规划和针对易发生高温灾害的地区制定长期有效的防护措施提供参考。

关键词:土地利用变化；高温灾害；暴露度；情景模拟；重庆市
中图分类号:X43　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-6693(2025)01-0083-14

在全球变暖的背景下，近些年来世界各地高温灾害频发，进而对全球公共卫生、经济发展与生态环境造成了严重影响。联合国政府间气候变化专门委员会第 6 次气候评估报告[1]与世界气象组织发布的《2020 年全球气候状况》[2]指出 2011—2020 年全球表面平均温度比 1850—1900 年升高了 1.09 ℃ (0.95～1.20 ℃)。大量预估研究表明，随着全球气候的持续变化，高温灾害发生频率将会增加、影响范围将会更广、持续时间将会更久，并给全球人类带来更加严重的负面影响。土地利用变化能够影响气温变化，并且在一定程度上反映出经济、人口等社会因素和自然因素的变化，在相关研究中能够更好地弥补人口、经济承灾体动态性和分布不均匀等方面的不足。研究高温灾害与人口、土地利用类型之间的暴露度关系，可为防灾减灾提供更加有力的理论支撑。

随着当前城市化进程的逐步推进，土地利用变化引起的下垫面属性变化加剧了城市的热岛效应，使高温灾害暴露风险增加。针对高温暴露度的影响，过去学者们大多关注高温的时空分布及以及高温对疾病的影响[3-5]。随着相关研究的深入，学者们逐渐重视有关社会因素如何受高温影响的研究，但已有研究主要在县域尺度上探究人口以及耕地在高温下的暴露度，并未在高温暴露度精细化表达方面做出有益探索[6-7]。同时，目前大多数关于高温暴露度的研究都是使用过去的社会经济数据以及气温数据，对于未来气候和社会经济情景下高温暴露度变化情况的预测性研究仍不够充分。随着未来经济社会的不断发展，人类将会面临更大的气候风险，因此充分研究并预测未来气候变化对未来社会经济的影响十分必要。有学者在 2010 年典型浓度路径的基础上构建了一种共享社会经济路径来描述社会经济的发展新情景[8-10]，还有学者通过历史高温观测数据、全球气候模式的情景数据和社会经济情景数据探究高温历史和未来的预估变化，并实现了不同重现期下的高温风险评估[11-14]，还利用未来情景数据考察了人口、经济在不同强度高温暴露度下的动态变化[15-17]。在预测未来土地利用方面，目前主要使用 CA-Markov[18]、CLUE-S[19]、FLUS[20]等土地利用模拟模型，但它们都缺乏一个灵活处理多类土地利用

* **收稿日期**:2024-05-07　**修回日期**:2024-09-19　**网络出版时间**:2025-03-14T12:10
资助项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(No. T2261129473)；2024 年度教育部人文社会科学研究规划基金项目(No. 24YJAZH107)；重庆市教委科学技术研究计划重点项目 (No. KJZD-K202300707)；重庆市研究生导师团队建设项目(No. JDDSTD2022002)；重庆交通大学研究生科研创新项目(No. 2024S0160)
第一作者简介:张静，女，研究方向为城市公共安全，E-mail:1579336220@qq.com；**通信作者**:牟凤云，女，教授，博士，E-mail:mfysd@cqjtu.edu.cn
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250313.1605.008

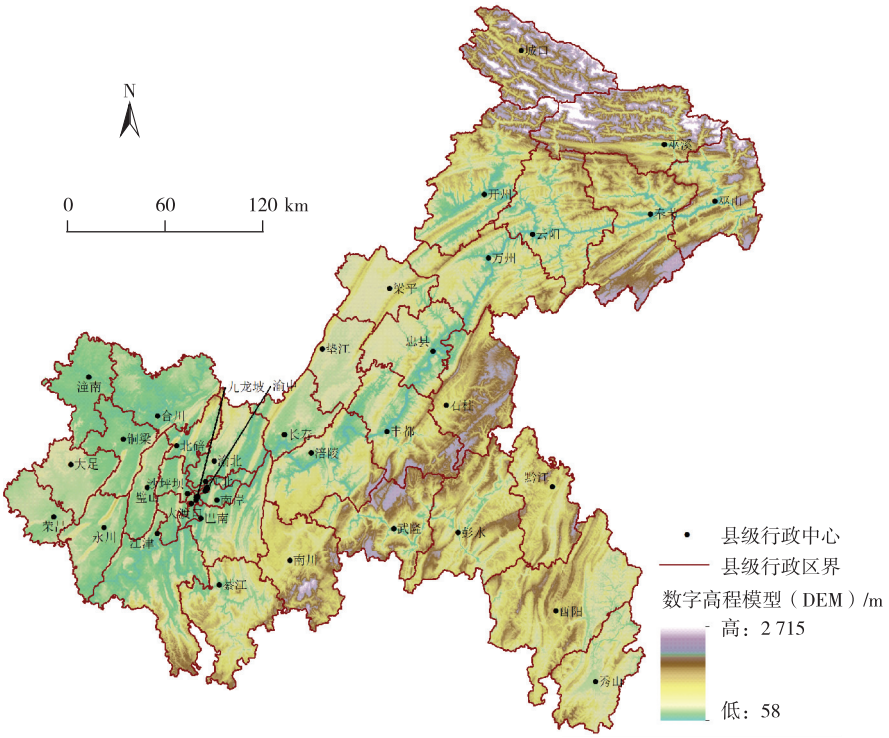
斑块变化的机制,难以实现精细尺度的模拟;而PLUS模型[21]则可以解决此类问题,并能更好地挖掘土地利用变化的驱动机制和在斑块级别上模拟土地利用变化,因而具有较好的空间解释能力。此外,目前相关研究在预测土地利用变化的基础上多将注意力集中在生态系统服务评估以及生态风险预测等方面,在暴露度研究方面则主要依靠于不同气候模式的情景数据探究未来情景下不同人口或经济的暴露度;也有许多学者探究在未来土地利用变化情景下暴雨灾害的暴露度、脆弱性以及风险评估分析[22-26];但极少有学者研究未来土地利用变化情景下不同土地利用类型的高温暴露度。

基于上述研究背景,本研究利用气温数据、土地利用数据、未来人口数据等多种类型的数据分析了2030年重庆市高温时空变化、土地利用暴露度及人口暴露度,通过构建3种发展情景来探究未来重庆市人口和不同土地利用类型在不同致灾强度下的暴露度分布特征,并建立高温灾害综合暴露度评价模型,从而为重庆市加强区域防灾减灾建设、合理规划城市发展、完善相应应急救援机制、保障人口和社会生产安全等提供理论和案例支撑。

1 研究区概况及数据介绍

1.1 研究区概况

重庆市位于长江上游地区,处于青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,总面积约为82 400 km^2。重庆市境内地貌组合地区分异明显,其中华蓥山至巴岳山以西以丘陵地貌为主,华蓥山至方斗山之间为川东平行岭谷区,东部、东南部及南部以山区为主(图1)。重庆市气候属亚热带季风气候,夏季炎热多伏旱,且全年降水不均匀;此外受四面高山的影响,大气中聚集的水汽和热量很难通过大气的垂直或者水平流动进行疏散,因而区域内易出现极端高温现象。2022年,重庆市平均气温较往常偏高约3.6 ℃,多地发生干旱和森林火灾,农作物受灾面积达332 200 hm^2,其中绝收面积达66 200 hm^2,直接经济损失为39.63亿元,受害森林面积约201.57 hm^2[27]。



注:底图源于重庆市标准地图服务网站(https://yuditu.com/bzdt/),审图号:渝S(2024)058号,下同。

图1 重庆市高程图

Fig. 1 Elevation map of Chongqing Municipality

1.2 数据介绍

本研究主要采用的数据基本信息如表1所示。

表 1　数据介绍

Tab. 1　Data introduction

数据类型	空间分辨率	数据来源(网址)
2020 年历史人口数据	100 m	https://www.worldpop.org/
2030 年未来人口数据[28]	1 000 m	https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.4605713.v1
2000—2020 年土地利用分类数据	30 m	https://cds.climate.copernicus.eu/
2020 年人均 GDP 数据	1 000 m	http://www.resdc.cn/DOI
2020 年 DEM 数据	30 m	http://www.gscloud.cn
2020 年归一化植被指数(NDVI)数据	1 000 m	https://modis.gsfc.nasa.gov/
2020 年 NPP-VIIRS 夜间灯光数据	500 m	https://www.resdc.cn/DOI/
2020 年降水数据[29]	1 000 m	https://doi.org/10.5281/zenodo.3185722
2020 年气温数据[30]	1 000 m	https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.270961
2000—2030 年未来气温数据[31]	0.1°	https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.07718

2　研究方法

本研究通过 PLUS 模型，利用 2010 年的土地利用数据模拟 2020 年的土地利用现状，并结合已有的 2020 年土地利用数据进行模型训练与验证[32]。然后利用已有的 2020 年土地利用数据对 2030 年土地利用现状进行预测，结合致灾因子构建未来不同情景下的土地利用暴露度模型以及人口暴露度模型，进行高温灾害下的暴露度分析。

2.1　高温致灾危险性

本研究选取 SSP2-4.5 以及 SSP5-8.5 这 2 种升温情景来模拟重庆市的日最高气温，并参考文献[33]，选取高温日数和高温强度作为高温致灾危险性的评价指标。将 2000—2030 年的日最高气温从低到高进行排列，位于第 90 百分位数的温度作为阈值；计算大于阈值的累计日数作为高温日数，将大于阈值且连续 3 日超过阈值的日最高气温平均值作为高温强度，并通过 Kriging 插值得到栅格数据。将得到的高温日数和高温强度进行量纲归一化处理，再通过加权综合法叠加得到高温致灾危险性分布图。高温致灾危险性指数的具体计算方法如下：

$$T=\sum_{i,j=1}^{n}W_jI_i,$$

其中：T 为高温致灾危险性指数，W_j 为第 j 个指标的权重，I_i 为第 i 个高温指标的标准化值，n 为指标总个数。

2.2　基于 PLUS 模型的土地利用预测

在 PLUS 模型中，首先需要在软件中将土地利用数据转换格式，并利用土地扩张分析策略挖掘土地扩张驱动因素，再利用基于多类型随机种子的元胞自动机模型自动生成模拟的斑块，得到未来土地利用与覆被模拟图。本研究结合文献[34-35]、重庆市发展状况以及《重庆市土地利用总体规划(2006—2020 年)》《重庆市自然资源保护和利用“十四五”规划(2021—2025 年)》设定了惯性发展优先、经济发展优先、可持续发展发展优先等 3 种发展情景，其中：1) 惯性发展优先为研究区以当前发展趋势进行发展，土地利用变化遵循 2010—2020 年的演变趋势，由此直接通过 Markov 链预测模型得到 2030 年研究区的各土地利用类型的像元个数；2) 经济发展优先为研究区在经济优先发展情景下，实现不同土地利用类型的经济效益最大化，林地、灌木、耕地、草地等土地利用类型转移为建设用地的概率提高 30%[36-37]，林地转为耕地的概率提高 20%；3) 可持续发展优先为研究区兼顾生态保护和经济发展，实现不同土地利用类型的经济效益和生态效益最大化，灌木、耕地、草地等土地利用类型转移为建设用地的概率降低 50%[38]，林地转移为灌木、耕地和草地的概率降低 30%[39]。

2.3　高温暴露度计算

参考文献[25]，本研究将高温暴露度定义为格点上对应的土地利用面积(或人口数)与平均每单位单元的高温致灾危险性指数的乘积，有关计算方法如下：1) 将高温致灾危险性指数与土地利用面积数据相乘，分别计算 2030 年研究区土地利用的 3 种发展情景在 SSP2-4.5 以及 SSP5-8.5 这 2 种情景下的土地利用暴露度，即：

$$E_{L,k}=TS_k,$$

其中:$E_{L,k}$ 和 S_k 分别为第 k 个土地利用类型的暴露度和不同土地利用类型的面积。2) 人口暴露度为2030年研究区的人口数量与高温致灾危险性指数的乘积,即:

$$E_P = TN_P,$$

其中:E_P 和 N_P 分别为人口暴露度和人口数量。3) 为消除量纲的影响,在计算综合暴露度前,对土地利用暴露度和人口暴露度进行量纲归一化处理,然后按下式进行计算:

$$E = A_L\left(\sum_{k=1}^{m} E_{L,k} w_k\right) E_L + A_P E_P,$$

其中:E 表示综合暴露度,w_k 表示不同土地利用类型的面积占比,m 为土地利用类型总个数,A_L 和 A_P 分别为人口暴露度以及土地利用暴露度的权重。

3 结果与分析

3.1 不同发展情景下土地利用变化分析

土地利用变化是各种土地利用类型的理化条件与自然环境、社会、经济等内外因素共同作用的结果[40]。本研究参考EES(ecological-economic-social)概念模型选择了3种地形因子、1种社会因子、3种交通因子、1种自然因子以及2种气候因子。以水域作为限制因素,认为当前是水域的地区在预测时不发生改变。地形因子包括高程以及由该数据计算得到的坡度以及坡向;社会因子以夜间灯光数据表示;交通因子为距普通公路、铁路的距离和距水域的距离;自然因子为利用NDVI计算得到的植被覆盖度;气候因子包括年平均降水数据以及年平均气温数据。采用100 m分辨率进行土地利用变化模拟。邻域因子能够反映出不同土地利用类型中间以及邻域范围内的相互作用[41],它的数值范围为0~1,且该数值大小与对应的土地利用类型扩展能力成正比。本研究根据2010—2020年重庆市土地利用类型的扩张面积占总土地扩张的比率来确定每种土地利用类型的邻域因子数值[34,42],结果显示耕地、林地、灌木、草地、水域、裸地和建设用地的邻域因子数值分别为0.39、0.49、0.01、0.01、0.01、0.000 1和0.09。

以2010年重庆市的有关数据为基准,预测2020年的土地利用情况;再与2020年重庆市真实土地利用数据进行对比分析,验证预测模型的精度。通过混淆矩阵计算后得到Kappa系数为0.787,总体精度为0.887。

参照文献[35]的设定各发展情景的成本矩阵(表2)以及土地利用类型变化趋势,通过Markov链模型预测2030年重庆市的土地利用变化,并进一步计算不同发展情景下的土地利用转移矩阵。为反映不同发展情景下的区域土地利用发展空间格局,需要将土地利用类型之间的变化转化为二值图像;在表2中,0表示2个土地利用类型之间不会发生转化,1表示2个土地利用类型会发生转化。在直接运用Markov链模型预测得到惯性发展优先情景下的土地利用转移概率的基础上,通过调整设定的土地利用转移概率计算得到其余2种发展情景下的土地利用转移概率,并利用2020年的重庆市土地利用像元个数计算其余2种发展情景下的土地利用转移矩阵,具体如表3~5所示。

表2 各发展情景的成本矩阵

Tab. 2 Cost matrix for each development scenario

土地利用类型	惯性发展优先							经济发展优先							可持续发展优先						
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
Ⅰ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ⅱ	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ⅲ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ⅳ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ⅴ	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
Ⅵ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ⅶ	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1

注:Ⅰ~Ⅶ分别表示耕地、林地、灌木、草地、水域、裸地和建设用地。

表 3　惯性发展优先情景下土地利用转移矩阵

Tab. 3　Land use transfer matrix under inertial development priority scenarios

2020 年土地利用类型	2020—2030 年土地利用转移像元个数							
	耕地	林地	灌木	草地	水域	裸地	建设用地	合计
耕地	3 023 818.00	362 417.80	1 714.23	2 158.41	7 373.97	76.34	72 546.02	3 470 104.77
林地	323 277.00	4 133 799.00	9 915.07	996.87	116.23	0.00	2 172.56	4 470 276.73
灌木	6 810.90	15 491.45	3 833.27	94.49	0.00	0.00	2.88	26 232.99
草地	2 173.49	1 254.65	103.32	2 375.71	30.99	8.86	833.97	6 780.99
水域	5 503.23	159.00	0.00	4.16	102 689.60	0.98	1 075.06	109 432.03
裸地	0.00	0.00	0.00	0.00	6.56	85.31	13.13	105.00
建设用地	387.84	0.00	0.00	0.00	4 114.78	0.00	162 812.40	167 315.02
总计	3 361 970.46	4 513 121.90	15 565.89	5 629.64	114 332.13	171.49	239 456.02	8 250 247.53

表 4　经济发展优先情景下土地利用转移矩阵

Tab. 4　Land use transfer matrix under economic development priority scenarios

2020 年土地利用类型	2020—2030 年土地利用转移像元个数							
	耕地	林地	灌木	草地	水域	裸地	建设用地	合计
耕地	3 004 448.54	360 096.22	1 703.25	2 144.58	7 326.74	75.85	94 309.82	3 470 105.00
林地	387 932.43	4 068 666.80	9 758.85	981.16	114.40	0.00	2 824.32	4 470 277.96
灌木	6 810.68	15 490.94	3 833.14	94.49	0.00	0.00	3.75	26 233.00
草地	2 082.05	1 201.86	98.98	2 275.76	29.69	8.48	1 084.17	6 780.00
水域	5 503.23	159.00	0.00	4.16	102 689.70	0.98	1 075.06	109 432.13
裸地	0.00	0.00	0.00	0.00	6.56	85.31	13.13	105.00
建设用地	387.84	0.00	0.00	0.00	4 114.78	0.00	162 812.00	167 315.62
总计	3 407 164.77	4 445 614.82	15 394.22	5 500.15	114 282.87	171.62	262 123.25	8 250 248.70

表 5　可持续发展优先情景下土地利用转移矩阵

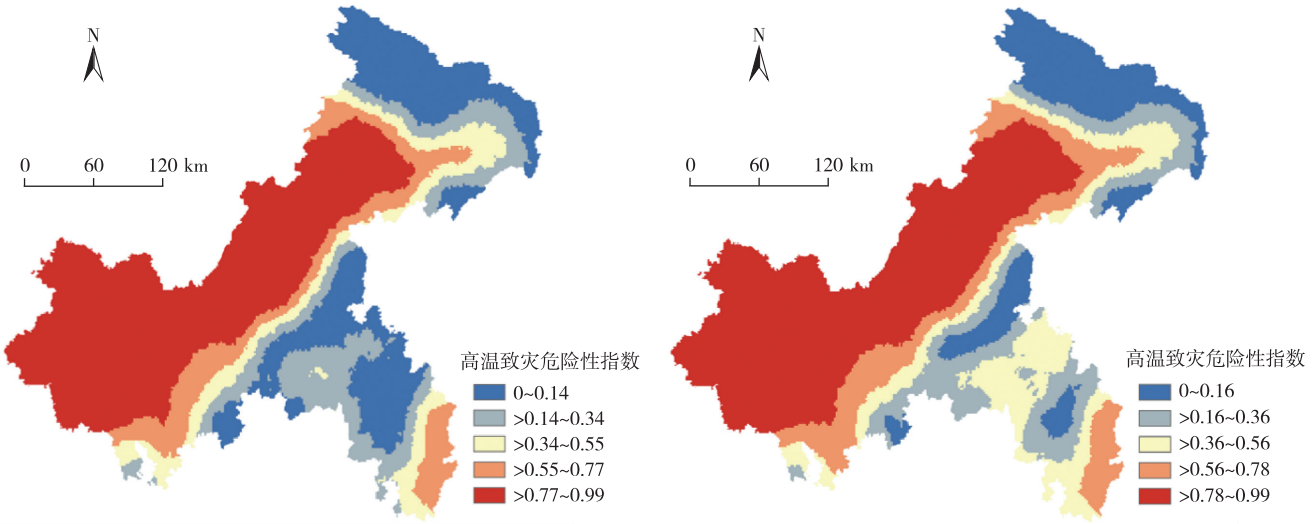
Tab. 5　Land use transfer matrix under sustainable development priority scenarios

2020 年土地利用类型	2020—2030 年土地利用转移像元个数							
	耕地	林地	灌木	草地	水域	裸地	建设用地	总计
耕地	3 056 101.00	366 287.00	1 732.53	2 181.45	7 452.69	77.16	36 273.01	3 470 104.84
林地	226 293.90	4 235 139.00	6 940.55	697.81	119.08	0.00	1 086.28	4 470 276.62
灌木	6 811.28	15 492.30	3 833.48	94.49	0.00	0.00	1.44	26 232.99
草地	2 325.89	1 342.62	110.57	2 542.29	33.17	9.48	416.99	6 781.01
水域	5 503.23	159.00	0.00	4.16	102 689.60	0.98	1 075.06	109 432.02
裸地	0.00	0.00	0.00	0.00	6.56	85.31	13.13	105.00
建设用地	387.84	0.00	0.00	0.00	4 114.78	0.00	162 812.40	167 315.00
总计	3 297 423.14	4 618 419.92	12 617.13	5 520.20	114 415.88	174.00	201 678.31	8 250 247.51

表3显示:惯性发展优先情景下2020—2030年重庆市内耕地主要流向林地和灌木,林地则主要转为耕地和灌木,灌木与林地、耕地之间存在双向转换;与2020年时的情形相比,耕地、灌木及草地面积(即像元个数)呈减少趋势,而林地、水域、裸地及建设用地面积则呈现增加趋势。与表3结果类似,在表4中经济发展优先情景下2020—2030年重庆市内耕地、林地、灌木及草地面积均有所减少,但水域、裸地及建设用地面积则明显增加;与惯性发展优先情景相比,经济发展优先情景下2020—2030年重庆市建设用地面积的增加更为明显,而耕地面积的减少量则相对较少。可持续发展优先情景下2020—2030年重庆市土地利用的转化模式与前2种发展情景下的结果有所不同:耕地主要转为林地,林地与耕地之间存在明显的双向转换,灌木主要流向林地,草地则主要转为耕地,水域主要转为耕地和建设用地,裸地主要转为耕地,而建设用地也部分转为耕地;与2020年时的情形相比,耕地、灌木及草地面积有所减少,而林地、水域、裸地及建设用地面积则有所增加(表5)。此外,与同期其他2种发展情景相比,可持续发展优先情景下2030年重庆市的林地面积更大,而裸地、水域及草地面积的变化在3种发展情景下差异不大。总体来看,经济发展优先情景下重庆市耕地和建设用地面积最大,可持续发展优先情景则更有利于重庆市林地面积的增长,而3种发展情景下2020—2030年重庆市在裸地、水域及草地面积的变化上则展现出相对的一致性。

3.2 高温致灾危险性分布

统计SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下2030年重庆市的高温日数以及高温强度,并通过普通Kriging插值为栅格,并进行量纲归一化后构建高温致灾危险性空间分布图(图2)。SSP2-4.5情景下高温致灾危险性较高的区域主要集中分布在重庆市主城都市区以及渝东北三峡库区城镇群的开州、云阳、梁平、垫江、丰都、万州等地,城口、巫溪、黔江、酉阳等地的高温致灾危险性最低。SSP5-8.5情景下高温致灾危险性程度不同的区域由西到东呈带状分布,所对应的高温致灾危险性指数先减小后增大,其中高温致灾危险性较高的区域主要分布与SSP2-4.5情景下的结果相似;2种升温情景下的结果差异主要是黔江、武隆、彭水等地在SSP5-8.5情景下的高温致灾危险性更高,城口、巫溪等地的部分区域高温致灾危险性最低。



a SSP2-4.5情景 b SSP5-8.5情景

图2 高温致灾危险性分布

Fig. 2 Distribution of high temperature disaster hazard

3.3 未来情景下土地利用暴露度

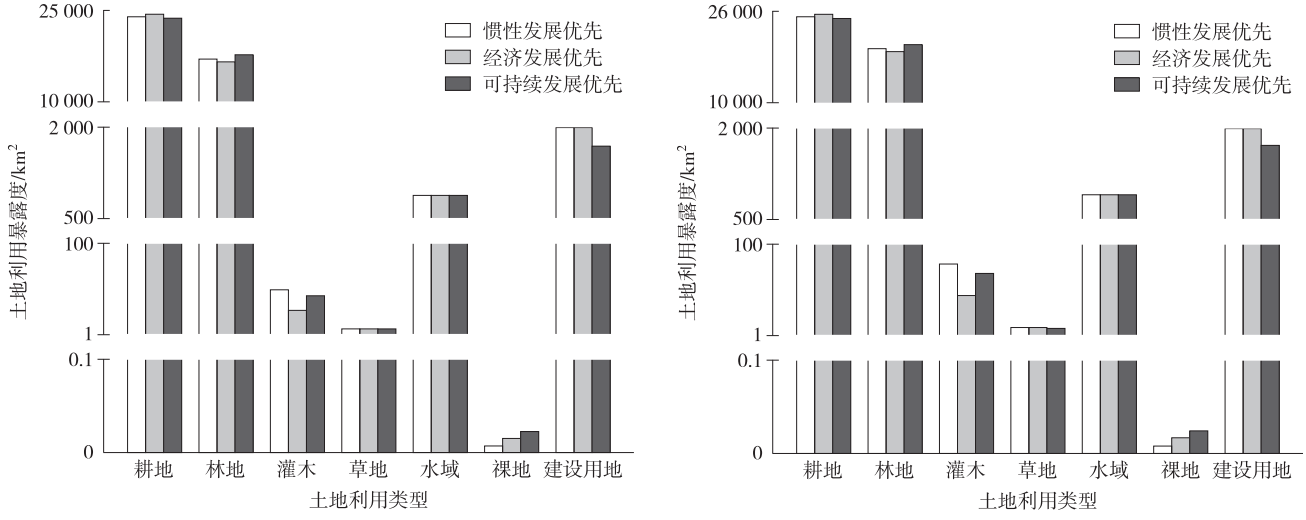
将3种不同发展情景下2030年重庆市的土地利用分布数据按土地利用类型分别提取,并利用SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下的日最高气温数据,综合分析2030年重庆市各类土地利用暴露度,并计算它们占各自土地利用类型总面积的比例,结果分别见图3和图4。

图3a显示了SSP2-4.5情景结合3种发展情景下2030年重庆市不同土地利用类型暴露度之间的差异,其中:惯性发展优先情景下耕地暴露度最大,为24 019.50 km^2,林地、建设用地、水域的暴露度次之,灌木、草地与

裸地的暴露度则相对较小。经济发展优先、可持续发展优先情景下不同土地利用类型暴露度之间的差异与惯性发展优先情景下的结果高度一致，但也有不同之处——经济发展优先情景下建设用地暴露度最大，为 2 120.20 km^2；可持续发展优先情景下虽然建设用地暴露度最小，仅为 1 676.78 km^2，但该情景下的林地暴露度却大于其他 2 种发展情景下的林地暴露度。3 种发展情景下水域暴露度则基本保持一致。

图 3b 为 SSP5-8.5 情景结合 3 种发展情景下 2030 年重庆市不同土地利用类型暴露度之间的差异，可以看出与 SSP2-4.5 情景结合 3 种发展情景下的结果相似，但在具体数值上有所增长。其中：惯性发展优先情景下耕地暴露度增加至 25 091.40 km^2，林地、建设用地与水域的暴露度依次小于耕地暴露度，灌木、草地与裸地的暴露度依然最小。经济发展优先情景下建设用地暴露度最大；可持续发展优先情景下的建设用地暴露度最小，但此情景下林地暴露度依然高于其他 2 种发展情景下的林地暴露度。同样地，3 种发展情景下水域暴露度也基本保持一致。

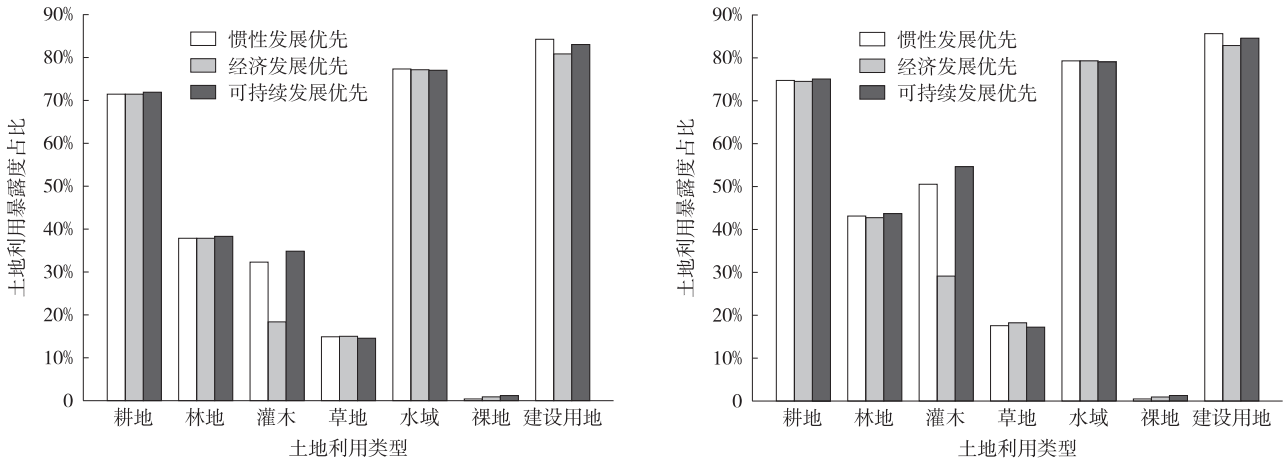
综上所述，SSP5-8.5 情景下 2030 年重庆市内耕地暴露度相较于 SSP2-4.5 情景下的耕地暴露度有所扩大，表明在更高排放和社会经济发展路径下，耕地的暴露风险增加。可持续发展优先情景在减少耕地暴露度方面表现最佳，而经济发展优先情景则导致建设用地暴露度最大，同时该情景下林地暴露度也相对较大；这一结果反映了经济发展与生态保护之间的权衡关系。



a　SSP2-4.5 情景　　b　SSP5-8.5 情景

图 3　土地利用暴露度

Fig. 3　Land use exposure



a　SSP2-4.5 情景　　b　SSP5-8.5 情景

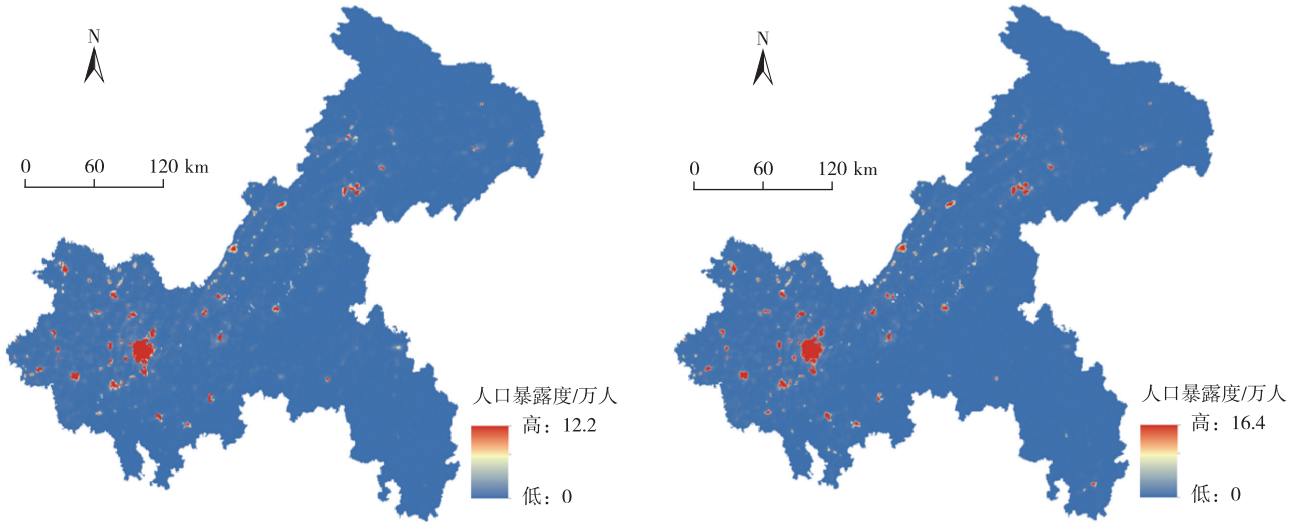
图 4　土地利用暴露度占比

Fig. 4　The proportion of land use exposure to total area

从图4可知:2种升温情景结合3种发展情景下2030年重庆市内建设用地暴露度占比均为最高,裸地暴露度占比均为最低。SSP2-4.5情景结合惯性发展优先情景下2030年重庆市内建设用地暴露度占比与SSP5-8.5情景结合惯性发展优先情景下的结果差异较小,但林地、耕地以及灌木的暴露度占比低于SSP5-8.5结合惯性发展优先情景下的结果。2种升温情景结合其余2种发展情景下2030年重庆市内不同土地利用类型的暴露度占比差异与2种升温情景结合惯性发展优先情景下的结果相似;再结合图3进一步分析可知,上述模式下耕地和林地的暴露度最大,但它们的暴露度占比低于建设用地暴露度占比,水域的暴露度较小而占比较高,这与重庆市的地形有密切联系——作为典型的山地城市,重庆市土地利用类型主要以耕地与林地为主。从总体上来看,2030年重庆市建设用地和水体的暴露度占比较高,因此应注重城市高温预防。

3.4 未来情景下人口暴露度

利用未来SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下高温致灾危险性与相对应的模式下模拟得到的2030年重庆市人口数量,计算得到2030年重庆市在不同升温情景下的人口暴露度。图5a显示:SSP2-4.5情景下2030年重庆市人口暴露度最大值为12.2万人,人口暴露度较大的区域主要位于重庆市中西部经济相对发达地区以及重庆市中心城区的高密度人口区。相较之下,渝东南和东北部地区的人口暴露度较小,且其中大部分区域的人口暴露度不超过0.421万人。图5b则显示:SSP5-8.5情景下2030年重庆市人口暴露度较在SSP2-4.5情景下的人口暴露度有所增加,特别是人口暴露度相对较高的区域;此情景下人口暴露度最大值为16.4万人,且人口暴露度的空间分布与SSP2-4.5情景下的结果具有一致性。从整体上看,随着高温事件的增多及人口数量的持续增长,未来重庆市人口的暴露风险整体呈上升趋势。



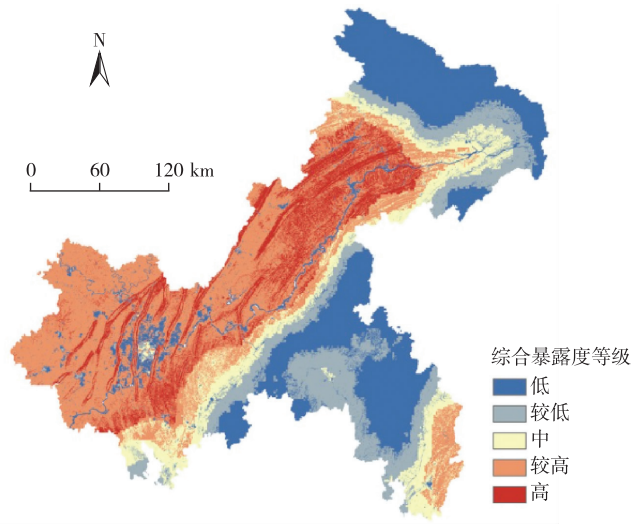
a SSP2-4.5情景 b SSP5-8.5情景

图5 未来人口暴露度分布

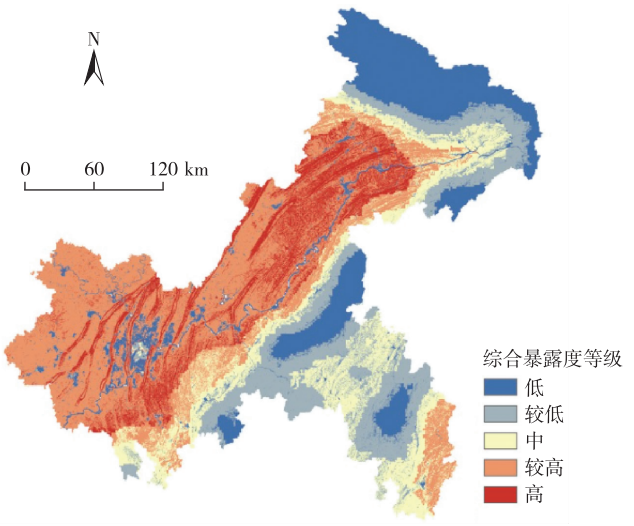
Fig. 5 Distribution of future population exposure

3.5 未来情景下综合暴露度

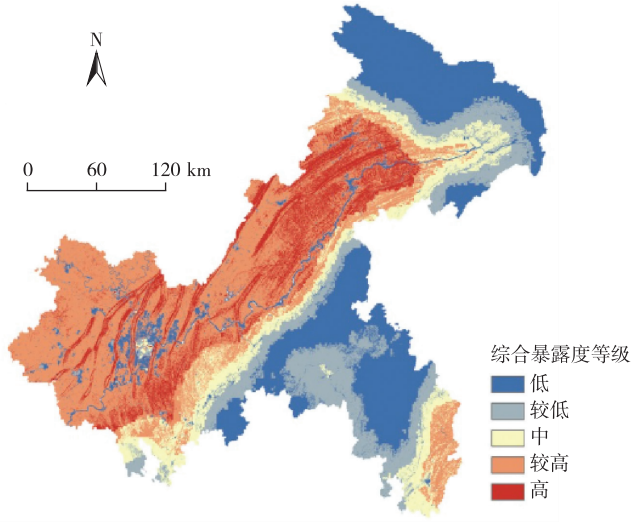
对2030年重庆市的人口暴露度和3种发展情景下土地利用暴露度进行量纲归一化处理后计算综合暴露度指数,并利用自然断点法将其划分为5个等级,分别为低、较低、中、较高和高,从而得到不同升温情景下2030年重庆市综合暴露度空间分布图(图6),其中:2种升温情景结合3种发展情景下的2030年重庆市综合暴露度空间分布格局基本一致,低等级综合暴露度区域主要位于人口密度较为稀疏、经济相对欠发达的渝东南和渝东北区域,如城口、巫溪、巫山等海拔较高的地区;较低等级综合暴露度区域位于彭水、黔江、酉阳等地;中等级综合暴露度区域位于綦江、南川、江津、秀山等地;较高和高等级综合暴露度区域主要位于以林地为主的区域以及人口密集、经济相对发达地区。中等级综合暴露度区域在2种升温情景下的空间分布变化较为明显,其中差异最明显的区域在黔江、彭水、酉阳等地。



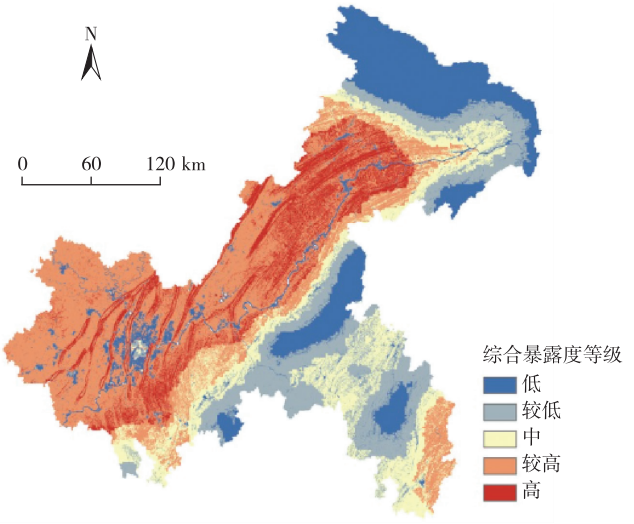
a　惯性发展优先(SSP2-4.5 情景)



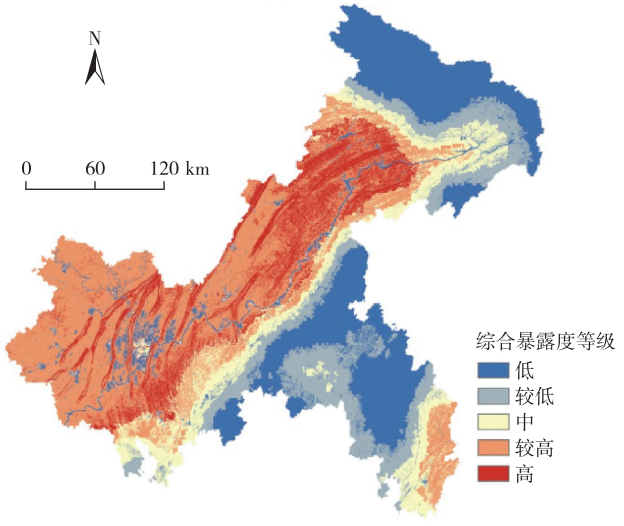
b　惯性发展优先(SSP5-8.5 情景)



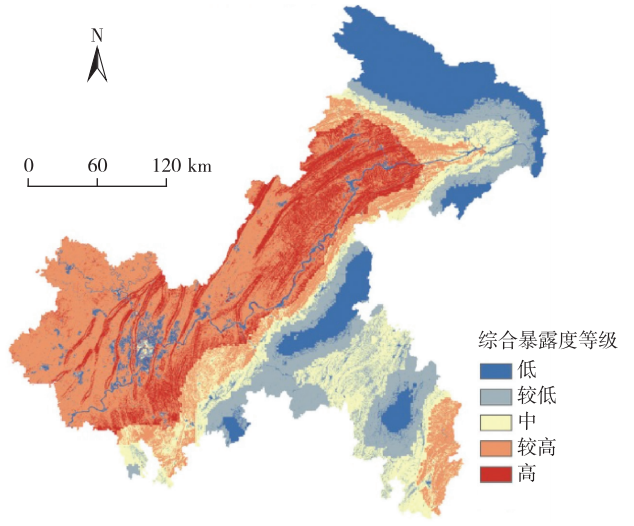
c　经济发展优先(SSP2-4.5 情景)



d　经济发展优先(SSP5-8.5 情景)



e　可持续发展优先(SSP2-4.5 情景)



f　可持续发展优先(SSP5-8.5 情景)

图 6　未来综合暴露度分布

Fig. 6　Distribution of future comprehensive exposure

从表6可以看出,2种升温情景下较高等级综合暴露度区域的面积占比最高。SSP2-4.5情景结合3种发展情景下2030年重庆市各等级综合暴露度区域的面积占比差异较小。与其他2种发展情景相比,可持续发展优先情景下高、中等级综合暴露度区域的面积占比更高,但低等级综合暴露度区域的面积占比更低。与SSP2-4.5情景相比,SSP5-8.5情景下较低、中等级综合暴露区域的面积占比都略高,但2种升温情景下高、较高等级综合暴露区域的面积占比差异较小。此外,低等级综合暴露度区域面积占比在SSP5-8.5情景下要低于在SSP2-4.5情景下。

表6 不同情景下不同等级综合暴露度区域的面积占比

Tab.6 Area percentage of comprehensive exposure zones at different levels under various scenarios

升温情景	暴露等级	惯性发展优先	经济发展优先	可持续发展优先
SSP2-4.5	低	20.34%	20.63%	18.76%
	较低	16.62%	16.56%	16.23%
	中	12.93%	13.21%	14.47%
	较高	37.89%	37.77%	36.90%
	高	12.22%	11.83%	13.64%
SSP5-8.5	低	14.37%	14.76%	13.28%
	较低	18.67%	18.80%	18.30%
	中	16.84%	16.53%	16.65%
	较高	37.90%	38.34%	38.38%
	高	12.22%	11.57%	13.39%

4 结束语

本研究通过PLUS模型模拟2030年不同发展情景下重庆市土地利用的变化情况,结合SSP2-4.5和SSP5-8.5情景模拟2030年重庆市日最高气温数据和人口数据,计算土地利用暴露度与人口暴露度,并构建综合暴露度模型,最终得出以下主要结果:1) SSP2-4.5情景下2030年高温致灾危险性高的区域主要集中分布在重庆市主城都市区以及渝东北三峡库区城镇群的南部,SSP5-8.5情景下高温致灾危险性程度不同的区域从西到东呈带状分布,所对应的高温致灾危险性指数先减小后增大,其中高温致灾危险性较高区域的分布与在SSP2-4.5情景下的分布相似;2) 2种升温情景下2030年重庆市耕地与林地的暴露度高于其余5种土地利用类型的暴露度,但建设用地、耕地和水体的暴露度占各自土地利用类型总面积的比例均超过70%;3) 2种升温情景下2030年重庆市人口暴露度的空间分布具有一致性,而SSP5-8.5情景下的人口暴露度较在SSP2-4.5情景下的人口暴露度有所增加;4) 2030年重庆市综合暴露度较高的区域主要集中分布在人口密集、经济相对发达地区以及以林地为主的区域,2种升温情景下较高等级综合暴露度区域的面积占比最高,可持续发展优先情景下高等级综合暴露度区域面积占比比其他2种发展背景下的这类区域的面积占比更高。

当前,成渝地区双城经济圈建设工作正在稳步持续推进,而近些年来重庆市高温事件又频频发生,这对重庆市土地利用规划与区域发展提出了更高要求。传统的历史土地利用分析方法在揭示土地利用演变机制及综合考虑多目标导向方面存在局限性,且难以充分评估高温对土地利用的潜在影响。而多情景土地利用模拟作为现状分析的补充,能面向经济优先、耕地保护、生态文明等目标来预测未来土地利用结构,为区域规划决策提供了多元视角。本研究的有关结果可为重庆市在未来城市建设发展中对土地利用的合理规划提供参考。建议合理规划城市空间布局、提高建设用地区域内植被覆盖度、重视在综合暴露度较高的区域内的高温灾害防范工作。此外,也要注重对水体高温和森林高温的预防,在水域周围应适当种植树木以及其他植物,建立水体保护区,限制水体的过度开发,并定期检测水体温度以及其他环境参数;定期监控森林状况,制定科学合理的森林高温灾害处理应急预案。本研究仍存在一些不足,例如在综合的土地利用模型构建方面,用土地利用类型的面积占比作

为权重，从而导致林地和耕地的暴露度较高，而利用熵权法计算权重时又存在灌木、草地等土地利用类型的权重存在负值的情况，因此在后续研究中需继续探寻更合适的权重分配方法。此外在影响因素探究方面，本研究主要探讨了 2 种升温情景结合 3 种发展情景下的高温暴露度变化情况，并未对土地利用类型对高温暴露度的影响进行探究，这也是值得在今后进一步深入研究的方向。

参考文献：

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021：the physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge：Cambridge University Press，2021.

[2] World Meteorological Organization. State of the global climate 2020[R]. Geneva：WMO，2021.

[3] LOU J N，BAN J，ZHANG T，et al. An intervention study of the rural elderly for improving exposure，risk perception and behavioral responses under high temperature[J]. Environmental Research Letters，2021，16(5)：055029.

[4] MUSHORE T D，MUTANGA O，ODINDI J，et al. Determining extreme heat vulnerability of Harare Metropolitan City using multispectral remote sensing and socio-economic data[J]. Journal of Spatial Science，2018，63(1)：173-191.

[5] 谢盼，王仰麟，刘炎序，等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价[J]. 地理学报，2015，70(7)：1041-1051.
XIE P，WANG Y L，LIU Y X，et al. Evaluation of population health risks from high-temperature disasters in China based on social vulnerability[J]. Acta Geographica Sinica，2015，70(7)：1041-1051.

[6] 郑殿元，黄晓军. 中国县域高温人口暴露风险及其影响因素研究[J]. 地域研究与开发，2022，41(4)：143-149.
ZHENG D Y，HUANG X J. Population exposure risk of heat wave and its influencing factors at county level in China[J]. Areal Research and Development，2022，41(4)：143-149.

[7] 董弟文，陶辉，丁刚，等. 新疆高温热浪的人口与耕地暴露度研究[J]. 农业工程学报，2022，38(5)：288-295.
DONG D W，TAO H，DING G，et al. Historical population and cropland exposure to heatwaves in Xinjiang，China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2022，38(5)：288-295.

[8] Van VUUREN D P，EDMONDS J，KAINUMA M，et al. The representative concentration pathways：an overview[J]. Climatic Change，2011，109(1/2)：5-31.

[9] KRIEGLER E，O'NEILL B C，HALLEGATTE S，et al. The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis：a new approach based on shared socio-economic pathways[J]. Global Environmental Change，2012，22(4)：807-822.

[10] O'NEILL B C，KRIEGLER E，RIAHI K，et al. A new scenario framework for climate change research：the concept of shared socioeconomic pathways[J]. Climatic Change，2014，122(3)：387-400.

[11] 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)：43909.

[12] 舒章康，李文鑫，张建云，等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. 中国工程科学，2022，24(5)：116-125.
SHU Z K，LI W X，ZHANG J Y，et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineerng，2022，24(5)：116-125.

[13] YIN Z E，YIN J，ZHANG X W. Multi-scenario-based hazard analysis of high temperature extremes experienced in China during 1951—2010[J]. Journal of Geographical Sciences，2013，23(3)：436-446.

[14] 董思言，徐影，周波涛，等. 基于 CMIP5 模式的中国地区未来高温灾害风险预估[J]. 气候变化研究进展，2014，10(5)：365-369.
DONG S Y，XU Y，ZHOU B T，et al. Projected risk of extreme heat in China based on CMIP5 models[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis，2014，10(5)：365-369.

[15] 李柔珂，韩振宇，徐影，等. 高分辨率区域气候变化降尺度数据对京津冀地区高温 GDP 和人口暴露度的集合预估[J]. 气候变化研究进展，2020，16(4)：491-504.
LI R K，HAN Z Y，XU Y，et al. An ensemble projection of GDP and population exposure to high temperature events over Jing-Jin-Ji district based on high resolution combined dynamical and statistical downscaling datasets[J]. Climate Change Research，2020，16(4)：491-504.

[16] 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.
HUANG D P，ZHANG L，GAO G. Changes in population exposure to high temperature under a future scenario in China and its influencing factors[J]. Acta Geographica Sinica，2016，71(7)：1189-1200.

[17] 安洁，付博，李玮，等. 东亚地区典型极端气候指标未来预估及高温下人口暴露度研究[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2020，56(5)：884-892.

AN J,FU B,LI W,et al. Future prediction of typical extreme climate indices and population exposure to high temperature in East Asia[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2020,56(5):884-892.

[18] 许珊珊,张亚丽,黎树式,等.广西北部湾入海流域土地利用的变化及模拟:基于CA-Markov模型[J].北部湾大学学报,2023,38(6):1-9.
XU S S,ZHANG Y L,LI S S,et al. Land use change and simulation in Beibu Gulf Estuary Basin of Guangxi based on CA-Markov model[J]. Journal of Beibu Gulf University,2023,38(6):1-9.

[19] 施云霞,王范霞,毋兆鹏.基于CLUE-S模型的精河流域绿洲土地利用空间格局多情景模拟[J].国土资源遥感,2016,28(2):154-160.
SHI Y X,WANG F X,WU Z P. Multi-simulation of spatial distribution of land use based on CLUE-S in Jinhe Watershed[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2016,28(2):154-160.

[20] 林伊琳,赵俊三,张萌,等.基于FLUS模型的昆明市建设用地扩张模拟及景观效应分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(6):716-725.
LIN Y L,ZHAO J S,ZHANG M,et al. Spatial simulation and landscape effect analysis of construction land expansion of Kunming City based on the FLUS model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences),2019,55(6):716-725.

[21] 邓晓辉,王琳,欧彩虹,等.基于PLUS模型的长株潭都市圈景观生态风险动态分析[J].地理与地理信息科学,2024,40(1):47-54.
DENG X H,WANG L,OU C H,et al. Dynamic analysis of landscape ecological risk in the Changsha,Zhuzhou and Xiangtan Metropolitan Area based on PLUS model[J]. Geography and Geo-Information Science,2024,40(1):47-54.

[22] 陈崇贤,方言,闫倩倩,等.应对海平面上升问题的城市土地利用格局脆弱性多情景模拟评估及应对策略[J].中国园林,2023,39(3):27-33.
CHEN C X,FANG Y,YAN Q Q,et al. Multi-scenario simulation assessment of in land use pattern vulnerability and coping strategies in response to sea level rise[J]. Chinese Landscape Architecture,2023,39(3):27-33.

[23] 彭建,魏海,武文欢等.基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估:以深圳市茅洲河流域为例[J].生态学报,2018,38(11):3741-3755.
PENG J,WEI H,WU W H,et al. Storm flood disaster risk assessment in urban area based on the simulation of land use scenarios:a case of Maozhou Watershed in Shenzhen City[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3741-3755.

[24] 姜丽,於家,温家洪,等.土地利用变化情景下杭州湾北岸极端洪灾风险评估[J].地理科学进展,2021,40(8):1355-1370.
JIANG L,YU J,WEN J H,et al. Risk assessment of extreme flood in the north bank of the Hangzhou Bay under land use change scenarios[J]. Progress in Geography,2021,40(8):1355-1370.

[25] 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 X L,LI Z,FENG L J,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.

[26] 奉莉军.未来不同社会经济发展情景下暴雨灾害暴露度研究:以钱塘江流域为例[D].金华:浙江师范大学,2022.
FENG L J. Research on the exposure of rainstorm disasters under different social and economic development scenarios in the future:case in Qiantang River Basin[D]. Jinhua:Zhejiang Normal University,2022.

[27] 重庆市应急管理局.2022年全市自然灾害情况通报[EB/OL].(2023-03-02)[2024-05-07].https://yjj.cq.gov.cn/zwgk_230/fdzdgknr/tjxx/202303/t20230302_11694248.html.
Bureau of Emergency Management of Chongqing. Circular on the natural disaster situation in Chongqing Municipality in 2022 [EB/OL].(2023-03-02)[2024-03-05].https://yjj.cq.gov.cn/zwgk_230/fdzdgknr/tjxx/202303/t20230302_11694248.html.

[28] CHEN Y D,GUO F,WANG J C,et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100.[EB/OL].(2023-03-09)[2024-05-07].https://www.nature.com/articles/s41597-020-0421-y.

[29] 彭守璋.中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2023)[DS/OL].[2024-09-19].https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194.
PENG S Z. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901—2023)[DS/OL].[2024-09-19].https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194.

[30] 彭守璋.中国1km分辨率逐月平均气温数据集(1901—2023).[DS/OL].[2024-09-19].https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.270961.

PENG S Z. 1-km monthly mean temperature dataset for china (1901—2023)[DS/OL]. [2024-09-19]. https://doi. org/10. 11888/Meteoro. tpdc. 270961.

[31] LIN H, TANG J P, WANG S G, et al. Deep learning downscaled CMIP6 high-resolution (0. 1°) daily near surface meteorological datasets over East Asia (ensemble mean)[EB/OL]. (2023-08-15)[2024-05-07]. https://www. nature. com/articles/s41597-023-02805-9.

[32] 张廷，胡玉柱，胡海辉，等. 基于 PLUS-InVEST 模型的哈尔滨市土地利用及生境质量预测[J]. 环境科学，2024，45(8)：4709-4721.
ZHANG T, HU Y Z, HU H H, et al. Prediction of land use and habitat quality in Harbin City based on the PLUS-InVEST model[J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4709-4721.

[33] 郭春华，朱秀芳，张世喆，等. 基于 CMIP6 的中国未来高温危险性变化评估[J]. 地球信息科学学报，2022，24(7)：1391-1405.
GUO C H, ZHU X F, ZHANG S Z, et al. Hazard changes assessment of future high temperature in China based on CMIP6[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(7): 1391-1405.

[34] 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.
WANG B S, LIAO J F, ZHU W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: a case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4284-4298.

[35] 陈理庭，蔡海生，张婷，等. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报，2022，42(10)：3947-3958.
CHEN L T, CAI H S, ZHANG T, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3947-3958.

[36] 席梅竹，赵中秋，赵颖丽. 基于 PLUS 模型的 2030 年滹沱河流域山区段生态承载力时空格局多情景预测[J]. 农业资源与环境学报，2024，41(3)：518-529.
XI M Z, ZHAO Z Q, ZHAO Y L. Multi-scenario prediction of the spatio and temporal patterns of ecological carrying capacity in the mountain section of Hutuo River Basin in 2030 based on the PLUS model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(3): 518-529.

[37] 杨朔，苏昊，赵国平. 基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟：以汉中市为例[J]. 干旱区资源与环境，2022，36(10)：86-95.
YANG S, SU H, ZHAO G P. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: a case study of Hanzhong City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 86-95.

[38] 谢向东，林孝松，王莹，等. 基于 PLUS 模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J]. 长江科学院院报，2023，40(6)：86-92.
XIE X D, LIN X S, WANG Y, et al. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan District of Chongqing based on PLUS model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 86-92.

[39] 庄子薛，谢梦晴，张文萍，等. 基于 FLUS-InVEST 模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测：以成德眉资地区为例[J]. 风景园林，2022，29(5)：38-44.
ZHUANG Z X, XIE M Q, ZHANG W P, et al. Temporal and spatial changes and multi-scenario simulation prediction of carbon storage based on FLUS-InVEST model: a case study of Chengdu-Deyang-Meishan-Ziyang Area[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(5): 38-44.

[40] 苏迎庆，刘庚，赵景波，等. 基于 FLUS 模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. 干旱区研究，2021，38(4)：1152-1161.
SU Y Q, LIU G, ZHAO J B, et al. Multi-scenario simulation prediction of ecological space in the Fenhe River Basin using the FLUS model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1152-1161.

[41] 王明常，郭鑫，王凤艳，等. 基于 FLUS 的长春市土地利用动态变化与预测分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2019，49(6)：1795-1804.
WANG M C, GUO X, WANG F Y, et al. Dynamic change and predictive analysis of land use types in Changchun City based on FLUS model[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(6): 1795-1804.

[42] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Analysis of Exposure to Heat Hazards in Chongqing Municipality under Future Land Use Change Scenarios

ZHANG Jing, MU Fengyun, CHU Changquan

(Smart City College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The high-temperature exposure of Chongqing Municipality under warming scenarios such as SSP2-4.5 and SSP5-8.5, and different land-use development scenarios such as inertial development priority, economic development priority, and sustainable development priority, provides decision-making support for local urban planning and disaster risk management. Based on the land use data of Chongqing Municipality in 2020, the PLUS model was applied to predict the land use status of Chongqing Municipality in 2030, and a comprehensive exposure model was constructed by combining the future population of Chongqing Municipality and the daily maximum temperature data. The results show that: 1) Under the SSP2-4.5 scenario, the southern parts of the main urban area of Chongqing and the urban agglomeration in the Three Gorges Reservoir area in northeast Chongqing show higher high-temperature disaster risk in 2030; whereas the areas with different degrees of high-temperature hazard under the SSP5-8.5 scenario show a banded distribution from west to east, with the corresponding high-temperature hazard index decreasing and then increasing, with the distribution of the areas of high-temperature hazard similar to that under the SSP2-4.5 scenario, and the distribution of the areas of high-temperature hazard under the SSP2-4.5 scenario is similar to that under the SSP2-4.5 scenario, and the distribution of the areas of high-temperature hazard is similar to that under the SSP2-4.5 scenario. 2) Under both warming scenarios, the exposure indices for arable land and forested areas in Chongqing by 2030 surpass those for shrublands, grasslands, aquatic zones, barren lands, and urbanized areas. 3) The spatial distribution of population exposure in Chongqing by 2030 demonstrates consistency across both warming scenarios. 4) Regions with heightened comprehensive exposure in Chongqing by 2030 are predominantly concentrated in densely populated, economically advanced areas, as well as regions predominantly covered by forested land. These insights provide valuable references for formulating strategic land use plans for Chongqing's future urban expansion and devising sustainable protective measures in regions prone to high-temperature disasters.

Keywords: land use change; heat hazards; exposure level; scenario modeling; Chongqing Muncipality

(责任编辑 方 兴)