

城口县降雨径流空间模拟研究^{*}

涂荣誉^{1,5}, 林孝松², 李宏伟³, 张吉祥¹, 谢向东¹, 程宏莉⁴

(1. 重庆交通大学 智慧城市学院; 2. 重庆交通大学 建筑与规划学院, 重庆 400074;
3. 重庆市城口县气象局, 重庆 城口 405900; 4. 重庆市云阳县气象局, 重庆 云阳 404500;
5. 重庆交通职业学院 路桥与建筑学院, 重庆 402247)

摘要:探究重庆市城口县强降雨情景下径流空间分布,为当地防灾减灾提供参考;通过改进的 SCS 模型,耦合土壤类型、土地利用等数据,模拟计算 24 h 降雨量(P_{24h})为 50、75、100、150、200 和 250 mm 共 6 种降雨情景下的径流量,对比分析 2010、2020 年城口县土地利用变化下各乡(镇、街道)径流量分布,选取 4 场次代表性强降雨进行径流量空间模拟。结果显示:城口县降雨径流增加倍数(以 $P_{24h}=50$ mm 为基准)与对应的降雨量呈正比;随着模拟降雨量增加,径流量呈非线性阶梯增加,径流曲线数值较大区域,径流量增加较快,洪涝灾害风险增加;在相同降雨强度下,径流量较高区域主要分布在城口县西南部乡镇;降雨径流变化与土地利用变化密切相关,土地利用变化通过改变径流曲线数值大小影响降雨径流量;4 场次实际降雨模拟结果表明城口县双河、周溪、明通、葛城、修齐、河鱼、东安等乡(镇、街道)是暴雨洪灾重点防范区。上述研究成果可为城口县暴雨洪水灾害预报预警提供支撑。

关键词:降雨径流;SCS 模型;空间模拟;土地利用变化;城口县

中图分类号:P333

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)05-0063-11

中国的山地丘陵面积在国土总面积中的占比较大,加上夏季短历时强降水频繁,因此发生在中国的山洪灾害灾情较为严重。据《中国水旱灾害公报 2018》^[1]和《中国水旱灾害防御公报 2023》^[2]中公布的数据可知,发生在中国的山洪灾害每年造成的直接经济损失超过 1 000 亿元。降水的时空分布影响着径流产生、土壤含水量变化等水文过程^[3]。水文过程与地表系统自然地理要素在时空分布上均存在密切关系,其中土地利用及它的变化对水文过程具有明显的影响^[4]。

SCS(soil conservation service)模型是美国农业部研发的小流域和坡地径流模型,被广泛用于估计特定地区降雨事件的直接径流量,它只需径流曲线数(CN)这 1 个综合参数。CN 值与土地利用、坡度、土壤类型、前期土壤湿度等因素有关^[5]。目前有关 SCS 模型的研究主要集中在径流量估算、模型结构改进、参数率定^[6]等方面。学者们分别从初损系数^[7-8]、土壤潜在蓄水能力与 CN 关系^[9]、CN 值与坡度关系^[10-14]等方面改进模型结构,以贴近研究区域径流特征作修正参数,从而准确模拟研究区域洪水过程。此外,还有学者耦合多个相关模型以提高模拟精度,例如:白天等人^[15]利用 0.09 m 无人机高分辨率影像耦合 SCS 模型与 SWMM 模型反演雨洪格局特征和趋势;Srivastava 等人^[16]耦合 SCS 模型与 USLE 模型估算了印度 Hazaribagh 地区流域径流和泥沙产流;李常斌等人^[17]集成 SCS 和 Clark 方法,将黄土高原组厉河流域模拟断面流量精度提高至 0.8 以上;张涛等人^[18]利用改进 SCS 模型模拟历史山洪,预警精度得以提高。上述研究将物理水文法与系统水文法相结合,构建基于过程的分布式水文水资源模型,因而模拟精度均有一定程度提高;但综合来看,模拟精度的好坏一定程度上受到 CN 值的影响,而且以往大多数研究仅用 1 场强降雨来进行模拟验证,因此模拟结果与实际情况不可避免地存在一定偏差。

本研究基于重庆市城口县数字高程模型(DEM)、土壤类型、土地利用和气象站点实测降雨量数据,利用土地

^{*} 收稿日期:2023-08-30 修回日期:2024-02-15 网络出版时间:2024-11-14T08:39

资助项目:国家重点研发计划项目(No. 2019YFB2102502, No. 2019YFB2102503);重庆市气象部门业务技术攻关项目(No. YWJS GG-202218)

第一作者简介:涂荣誉,男,研究方向为资源与环境研究,E-mail:1052883545@qq.com;通信作者:林孝松,男,教授,博士,E-mail:lxsgis@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20241113.1512.005

定实际地表径流深与可能最大径流深的比值等于实际入渗量与土壤潜在蓄水能力之比,雨水初损是土壤潜在蓄水能力的一部分,从而估算出流域径流量,它的具体计算公式如下:

$$P=I_a+F+Q,$$

其中: P 为降雨量(单位:mm); I_a 为雨水初损(单位:mm),包括植被截留量、地表蒸发量、土壤渗漏量等; F 为后损值即实际入渗量(单位:mm); Q 为地表实际径流深(单位:mm)

土壤入渗能力由研究区水文土壤组决定。在应用 SCS 模型时,可根据前 5 d 的降雨总量将土壤湿润程度划分为干旱(AMC I)、平均(AMC II)、湿润(AMC III)等 3 种状态,且它们之间可采用公式进行转换^[19]。

2.2 SCS 模型 CN 值确定及优化

CN 值是综合研究区地形坡度、土壤类型、水文条件和前期土壤湿度的量纲为 1 的综合指标,取值范围为 0~100,依据研究区实际入渗量与实际径流深之比等于降雨潜在入渗量与潜在径流之比进行计算,具体计算公式为:

$$Q=(P-I_a)^2/(P-I_a+S),$$
$$S=5[P+2Q-(4Q^2+5PQ)^{1/2}],$$
$$V_{CN}=25\ 400/(254+S),$$

其中: V_{CN} 为 CN 值, S 为土壤潜在蓄水能力。

本研究根据城口县实际情况设定前期土壤湿程度为 AMC II,并根据最小下渗率和土壤质地将水文土壤组划分为 A(透水)、B(较透水)、C(较不透水)、D(接近不透水)等 4 种类型^[20],各土地利用类型在这 4 种类型水文土壤下的 CN 值如表 1 所示。

表 1 城口县 AMC II 状态不同土地利用类型 CN 值
Tab. 1 CN values of different landuse types in AMC II status in Chengkou County

土地利用类型	不同水文土壤的 CN 值			
	A(透水)	B(较透水)	C(较不透水)	D(接近不透水)
耕地	58	75	84	85
林地	36	60	73	79
草地	35	56	70	79
水域	98	98	98	98
未利用地	50	65	75	80
建设用地	77	85	90	92

2.2.1 Woodward 优化

影响 CN 值的初损比例值常取 0.2,但不同研究区因环境差异而对应的初损比例取值也有所不同。应用 Woodward 法^[21],参考三峡地区改进的 I_a/S 将该值调整为 0.05^[22],由此可利用以下公式进行转化:

$$V_{CN(0.05)}=100/[1.879(100/V_{CN(0.2)}-1)^{1.15}+1],$$
$$S_{0.05}=1.33S_{0.2}^{1.15},$$

其中: $V_{CN(0.05)}$ 、 $V_{CN(0.2)}$ 分别为初损比例取值为 0.05 和 0.2 时的 CN 值, $S_{0.05}$ 和 $S_{0.2}$ 分别为初损比例取值为 0.05 和 0.2 时的土壤潜在蓄水能力。

2.2.2 Huang 坡度修正

初损比例修正后,可进一步考虑研究区坡度对 CN 值影响^[13],利用坡度修正公式^[23]对初损比例修正后的 CN 值进行逐一修正,计算公式为:

$$V_{CN(\alpha)}=[V_{CN}(322.79+15.69\alpha)]/(\alpha+323.52),$$

其中: $V_{CN(\alpha)}$ 为坡度修正后的 CN 值; α 为坡度。

在确定水文土壤组、土地利用等信息基础上,综合利用研究区地形坡度、土地利用类型、土壤类型和土壤湿度状况获得城口县最终修正 CN 值。由图 2 可知,该值介于 56~99 之间,且高值区域主要集中分布在城口县西

南部和各乡(镇、街道)的建成区。

3 结果与分析

3.1 不同降雨情景径流模拟结果

根据城口县历史强降雨情况设置 $P_{24\text{ h}}$ 为 50、75、100、150、200 和 250 mm 共 6 种降雨情景,基于 ArcGIS 软件叠加 2020 年城口县土地利用和土壤数据,模拟得到城口县相应情景的径流量空间分布,并统计得到该县各乡(镇、街道)降雨径流总量(图 3)。采用等间隔法依据径流量值划分为Ⅰ级(径流量不高于 50 mm)、Ⅱ级(径流量为 50~100 mm)、Ⅲ级(径流量为 >100~150 mm)、Ⅳ级(径流量为 >150~200 mm)和Ⅴ级(径流量高于 200 mm)共 5 个径流量等级(图 4)。

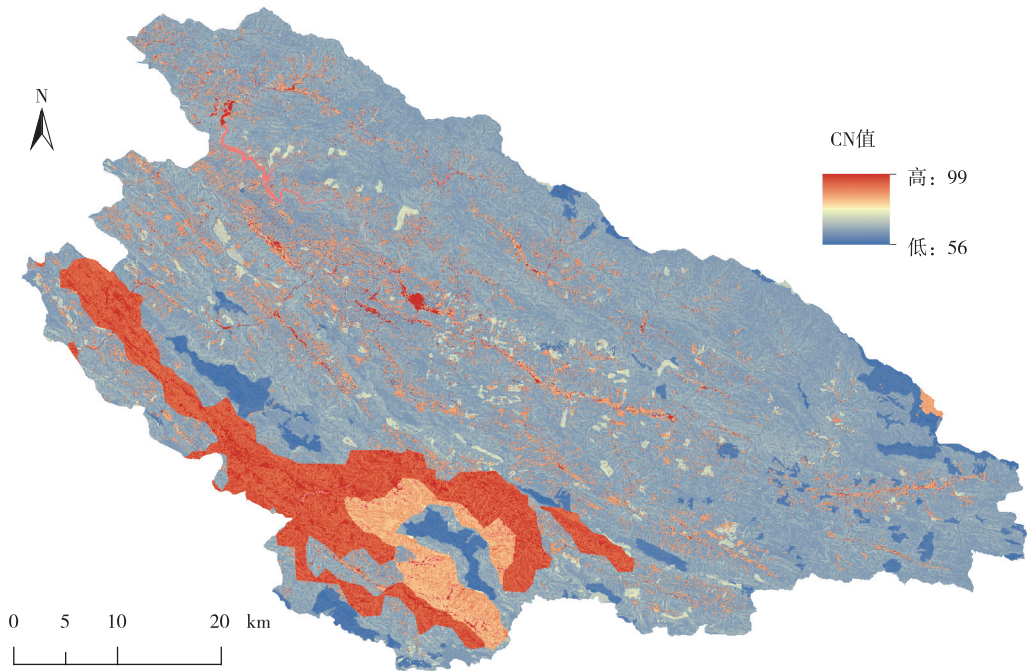


图 2 城口县修正 CN 值图
Fig. 2 Revised CN value map of Chengkou County

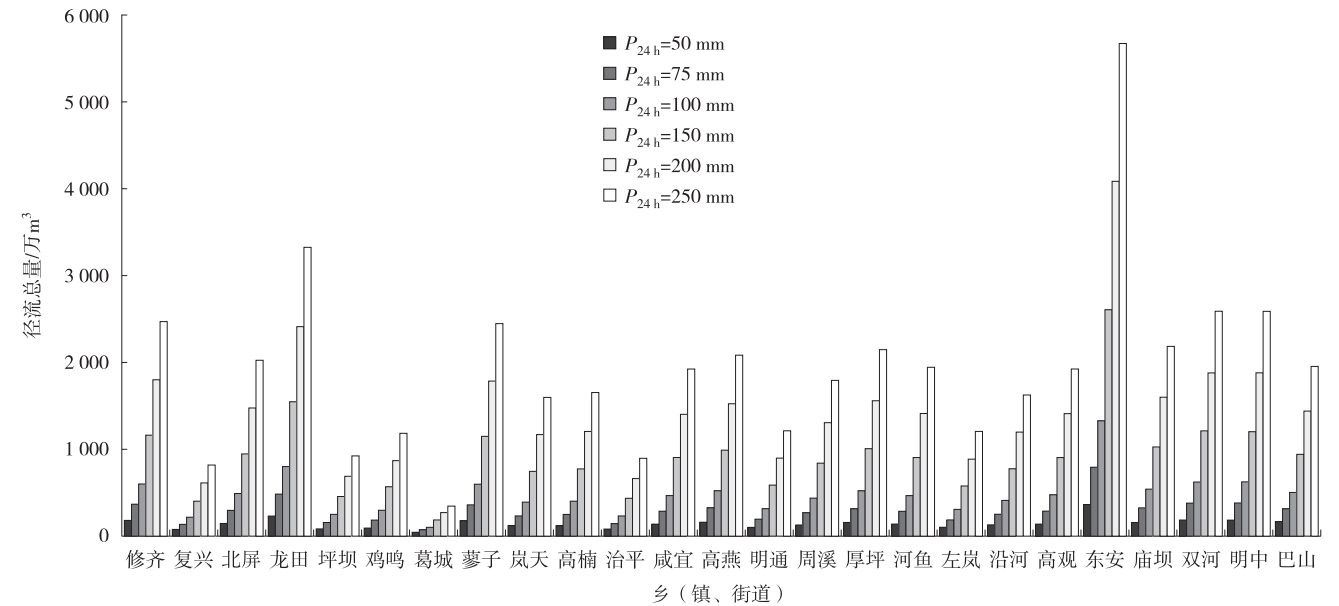


图 3 城口县空间降雨径流统计图
Fig. 3 Statistical chart of spatial rainfall runoff in Chengkou County

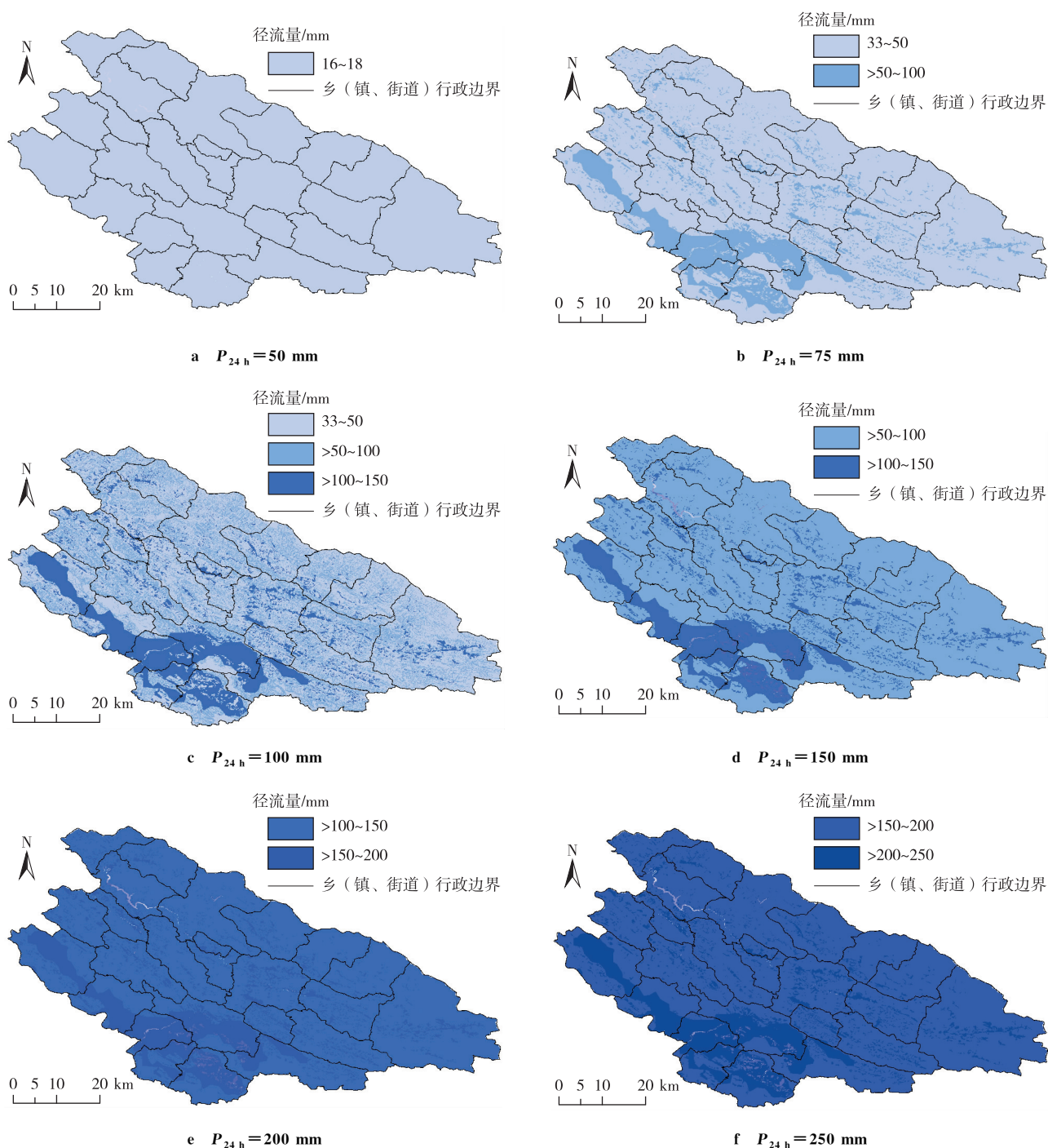


图4 城口县空间降雨径流模拟图

Fig. 4 Simulation map of spatial rainfall and runoff in Chengkou County

从不同模拟情景来看,当 $P_{24h} = 50$ mm时,城口县径流量均处于Ⅰ等级,且径流量仅为16~18 mm,但需注意防范该县西北部巴山镇、南部咸宜乡等极少数区域的洪水(图4a、图1)。当 $P_{24h} = 75$ mm时,城口县径流变化为0.7%,径流等级为Ⅰ级和Ⅱ级,但以Ⅰ级为主;Ⅰ级对应区域的面积占比为97.2%,需重点关注蓼子乡和明中乡沿河区域(图4b、图1)。当 $P_{24h} = 100$ mm时,城口县径流变化达10.7%,径流等级为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级,但仍以Ⅰ级为主;Ⅰ级对应区域的面积占比为78.6%,需重点关注的区域扩展到双河、周溪、明通、鸡鸣、咸宜等乡(镇)以及任河、前河等沿河一线区域(图4c、图1)。当 $P_{24h} = 150$ mm时,城口县径流变化达79.6%,径流等级为Ⅱ级和Ⅲ级,并以Ⅱ级为主,需重点关注的区域扩展到几乎整个城口县(图4d)。当 $P_{24h} = 200$ mm时,城口县径流变化达84%,径流等级为Ⅲ级和Ⅳ级,且以Ⅲ级为主,Ⅲ级对应区域的面积占比为84.1%(图4e)。当 $P_{24h} =$

250 mm 时,城口县径流变化达 75.2%,径流等级为Ⅳ级和Ⅴ级,且以Ⅳ级为主,Ⅳ级对应区域的面积占比为 88.5%(图 4f)。综合来看,不同降雨情景下的城口县径流变化结果说明了产流量较高的前河流域土壤在承载降雨强度方面较城口县的其他地区土壤更小;另外这一结果与城口县西南部地形有关:该区域地形起伏较大,且前河为雨洪式河流,降雨量的增加使得前河流域地区更容易形成洪水。

综合图 1、图 3 和图 4 还可以发现:随着降雨量增加,城口县降雨径流量呈非线性阶梯增加;相同降雨量条件下产流量较高区域主要集中在城口县西南部的明通、蓼子、鸡鸣和周溪等乡(镇),这些区域 P_{24h} 的面积占比从 $P_{24h}=75$ mm 时的 2.7% 增至 $P_{24h}=250$ mm 时的 11.5%。模拟 P_{24h} 由 50 mm 依次增加到 250 mm,计算得到的城口县径流总量依次增加了 1.12、2.47、5.63、9.16、10.35 倍,径流总量最高约为 4.13 亿 m^3 。由此可见,随着 CN 值增加,降雨径流量明显增加;在 P_{24h} 从 50 mm 向 250 mm 增加的过程中,CN 值与降雨径流的关系越加紧密,趋势线斜率也越来越大; P_{24h} 和 CN 值较大的区域发生洪涝灾害的风险也更高。

3.2 土地利用变化对径流量影响分析

采用基于转移矩阵的土地利用变化强度分析框架^[24],从转换趋势及对土地利用类型影响角度分析土地利用变化对径流量的影响,构建得到城口县土地利用强度图谱。由图 5 可知:耕地与林地之间的相互转化具有绝对倾向性特征;建设用地、自然保留地和水域向草地及耕地转化、耕地向草地转化、水域向建设用地及自然保留地转化具有相对倾向性特征;草地向林地转化具有系统倾向性转化特征;草地向耕地、建设用地、自然保留地及水域转化具有系统抑制性转化特征。

基于行政单元的洪水预警能够更好地组织和协调当地资源,提高应急响应能力。将 2010 和 2020 年的城口县土地利用类型与土壤数据进行叠加,结合前述 6 种降雨情景,采用改进的 SCS 模型对城口县降雨径流进行空间模拟,以乡(镇、街道)为单元统计得到它们的平均径流量和径流总量(图 6)。

由图 6a 和图 1 可知:2010 年城口县各乡(镇、街道)径流总量介于 400.00 万 m^3 到 590.11 万 m^3 之间,以明通镇为中心,由西南向东北依次减少。当 P_{24h} 由 50 mm 增加到 250 mm 时,由数据统计得到城口县乡(镇、街道)平均径流量由 12.33 mm 增加到 162.57 mm,城口县各乡(镇、街道)平均径流量与径流总量均呈上升趋势,以东安、蓼子、明中、龙田、双河等乡(镇)尤为明显。由图 6b 和图 1 可知:2020 年城口县各乡镇径流总量介于 359.59 万 m^3 到 523.64 万 m^3 之间,以明通镇为中心,由西南向东北依次递减。当 P_{24h} 从 50 mm 增加至 250 mm 时,统计城口县乡(镇、街道)平均径流量由 11.56 mm 增加到 128.74 mm。

结合城口县土地利用类型的变化情况可知,建设用地、自然保留地、水域、耕地向草地相对倾向性的转化(图 5)使得 2020 年城口县的乡(镇、街道)总径流量和平均径流量比 2010 发生不同程度的减少。具体到乡(镇、街道)尺度,鸡鸣、蓼子、咸宜、明中等地的耕地和林地向草地转化使得当地降雨径流量部分由Ⅳ级降为Ⅲ级。明通镇耕地面积减少、林地面积增加,周溪乡耕地面积变化不大、林地面积减少、草地面积增加,双河乡耕地面积增加、林地面积减少、草地面积增加,这些土地利用变化同样也使得当地降雨径流量等级降低。另外,坪坝镇未利用地面积增加、草地面积变化不大,当地降雨径流量等级未发生变化。由此可见,城口县降雨径流量与土地利用变化密切相关;土地利用类型直接影响 CN 值,城口县水域 CN 值最大,其次是城乡居民用地、耕地、林地的 CN 值,草地的 CN 值最小。土地利用类型直接影响地表植被覆盖度的物理特性,改变能量、物质交换,继而影响植被截留和土壤入渗;地表植被覆盖度越低,径流量就越大,相应的 CN 值越大,反之 CN 值则越小。建设用地面积增加使得 CN 值增加进而使得径流量等级升高,草地面积增加使 CN 值降低进而使径流量等级下降,未利用地面积增加对径流量等级的影响不明显。从乡镇尺度来看,随着土地利用变化,城口县洪涝灾害高风险乡镇数量大为减少;该县西南部的大部分乡镇洪涝灾害风险降低,仅有明通镇和蓼子乡这 2 个乡(镇)依然有较高的洪涝灾害风险。

3.3 实际强降雨径流空间模拟

前文所述的径流空间模拟是在整个县域各站点降雨量相同的假设基础上进行的,然而实际降雨过程中,并不会出现整个县域内各地降雨量完全相同的情况。为探究实际降雨对城口县地表径流的影响,根据城口县 60 个气象站点 2017—2020 年降雨资料,从降雨历时、 P_{24h} 和场次降雨总量这 3 个方面遴选出较有特征的 4 场次降雨,即 20170904、20180617、20190913 和 20200610 场次降雨,它们的持续时长分别为 44、19、68 和 31 h;利用泰森多边形插值法得到面降雨量,汇总计算出在上述场次降雨中城口县平均降雨量依次分别为 67.3、43.3、57.9 和

76.9 mm。利用 2020 年城口县土地利用、土壤类型、坡度和上述 4 场次降雨中各气象站实测降雨数据模拟得到城口县径流量,并以 20、30、40 和 50 为阈值将径流量划分为 5 个等级。

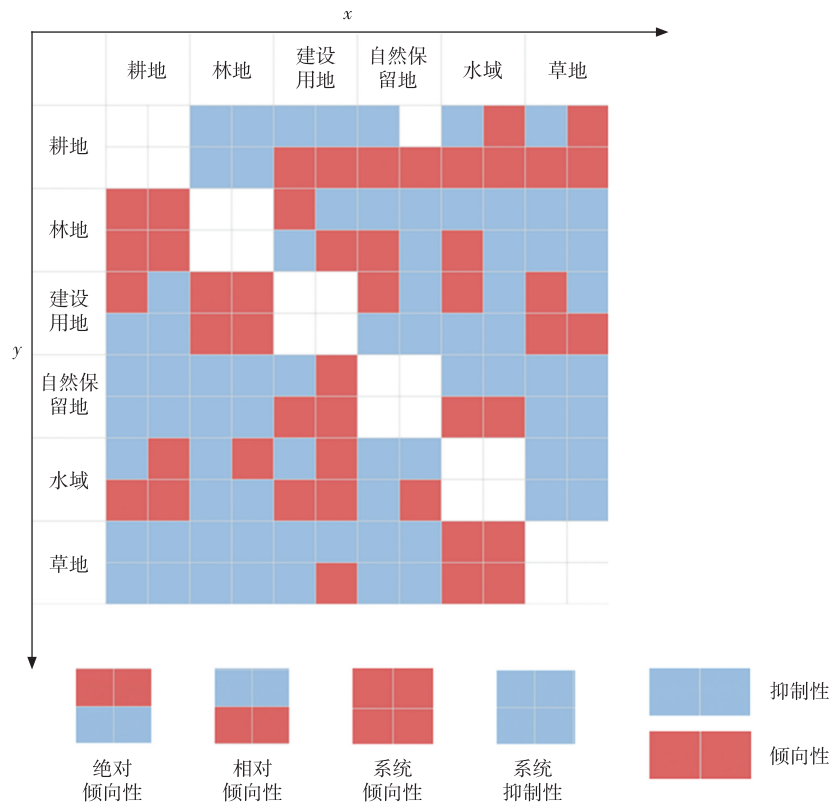
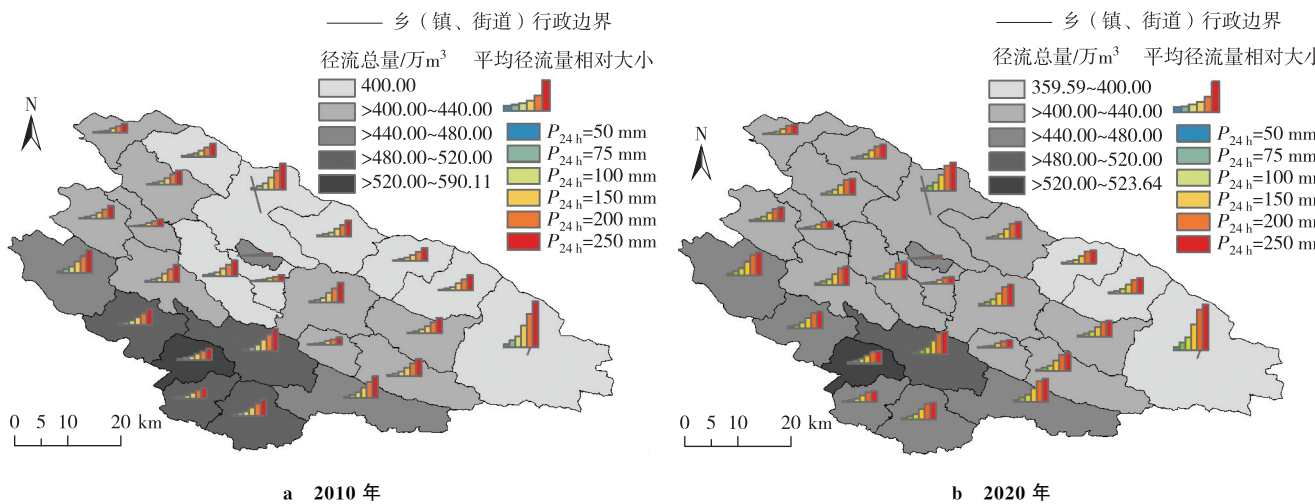


图 5 城口县土地利用强度图谱

Fig. 5 Landuse intensity map of Chengkou County



注:2010、2020 年城口县各乡(镇、街道)平均径流量范围分别为 12.33~162.57 mm、11.56~128.74 m。

图 6 2010、2020 年城口县各乡(镇、街道)降雨径流总量空间模拟

Fig. 6 Spatial simulation of total rainfall and runoff in each township of Chengkou County in 2010 and 2020

结合图 7a 和图 1 可知:20170904 场次降雨平均降雨量为 67.3 mm,主要径流量等级为 20~30 mm,对应区域的面积占比 41.87%;径流量大于 50 mm 的区域面积占比为 8.14%,主要分布在城口县南部以及西部的双河乡、北部的高楠乡。20180617 场次降雨平均降雨量为 43.3 mm,主要径流量等级为为 >20~30 mm,对应区域的面积占比为 43.08%;径流量大于 50 mm 的区域面积占比仅为 2.7%,且集中分布在修齐、双河、周溪、明通、蓼子

等乡(镇)(图 7b、图 1)。20190913 场次降雨平均降雨量为 57.9 mm,主要径流量等级为 $>20\sim30$ mm,对应区域的面积占比为 61.87%;径流量大于 50 mm 的区域占全县总面积的 1.8%,主要分布在南部乡(镇)以及西部的双河乡(图 7c、图 1)。20200610 场次降雨平均降雨量为 76.9 mm,主要径流量等级为 $>30\sim40$ mm,对应区域的面积占比为 53.27%;径流量大于 50 mm 的区域占全县总面积的 12.21%,主要集中在西部的双河、周溪以及西南部的明通、鸡鸣、咸宜、蓼子、明中等乡(镇)(图 7d、图 1)。

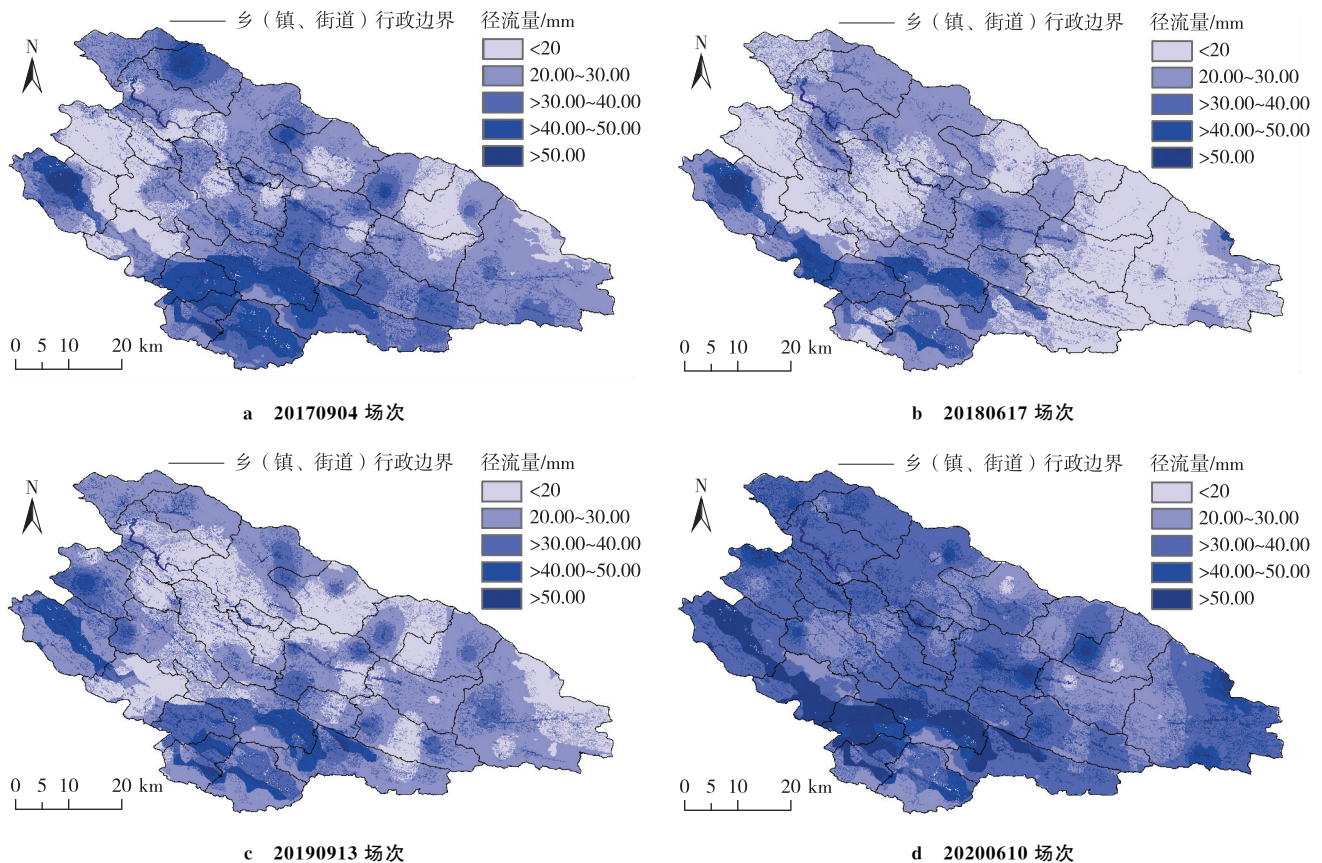


图 7 城口县 4 场次代表性降雨径流空间模拟图

Fig. 7 Spatial simulation map of four representative rainfall runoff events in Chengkou County

总体上看,降雨径流等级较高的双河、周溪、明通、鸡鸣、咸宜、明中、蓼子等乡(镇)土壤类型主要为筒育高活性强酸土,且这些区域的北部、南部地势较高,加上受海拔高度、坡向以及夏季西南季风影响,故这些区域降雨较多;此外由于山坡和谷地地形差异,降雨局部差异明显,加上城口县地势整体上由北向南逐渐降低,径流在地势较低处汇集,导致当地径流量等级较高,更容易发生洪涝灾害。20170904 和 20200610 场次降雨径流量较高汇集区域主要集中在葛城、坪坝、修齐等 3 镇(街道)中部以及高楠、巴山等 2 乡(镇)北部,这些区域城镇化进程较快,土地利用变化表现为建设用地增加,不透水面增加导致相同降雨情况下径流系数增加,并增大了城镇排水系统的负担。而修齐镇中部、河鱼乡西部和东安乡东部区域在降雨强度大且集中时会出现径流量高的情况。20190913 场次降雨的持续时间较长,使得该次降雨径流量等级较高区域比 20180617 场次径流量较高等级区域的分布更为广阔。

3.4 实际强降雨与情景径流模拟结果对比分析

从城口县乡(镇、街道)平均径流量以及该县 2 500 个随机点降雨径流量这 2 个层面分别对 20200610 场次降雨和 76.9 mm 降雨量情景模拟结果进行对比,以探讨情景模拟结果与实际降雨模拟结果在降雨径流及山洪监测中的应用效果。从乡(镇、街道)平均径流量层面来看,最大的降雨径流误差出现在左岚乡,为 6.58 mm,整个城口县的降雨径流平均误差为 1.18 mm,实际降雨模拟径流量较情景模拟降雨径流量更大,其中原因是根据站点获取的降雨量插值与模拟降雨存在一定差异。而从随机提取的 2 500 个点降雨径流量来看,实际降雨的径流

量与模拟降雨的径流量总体上相对吻合,差异不大,但径流量主体分布存在差异,用实际降雨数据能得到降雨径流量的细微差异且与实际降雨更吻合,通过对比可得到降雨状态的最佳估计,能捕捉挖掘更多降雨细节,因而可有效研判山洪灾害风险分布并及时发布预警通知。

4 结束语

本研究通过改进的 SCS 模型,结合城口县的地形地貌、土壤类型、土地利用和气象数据模拟了不同降雨情景下的径流量,并分析了土地利用变化对径流量的影响,得到如下主要结果:

1) 随着模拟降雨量增加,城口县降雨径流总量从 3 643.34 万 m^3 增加到 41 346.58 万 m^3 ,增加了 10.35 倍。以 $P_{24\text{h}}=50\text{ mm}$ 为基准,分别计算出 $P_{24\text{h}}$ 为 75、100、150、200 和 250 mm 时径流量比 $P_{24\text{h}}$ 为 50 mm 时增加了 1.12、2.47、5.63、9.16、10.35 倍,增加倍数与对应的降雨量成正比。降雨量相同时,城口县西部的双河、周溪和西南部的明通、鸡鸣、咸宜、蓼子、明中等乡(镇)的径流量等级高于其他乡(镇)的径流量等级。

2) 随着模拟降雨量增加,城口县径流量呈非线性阶梯增加,降雨量相同时径流量较高区域集中在城口县西南部的明通、蓼子、鸡鸣、周溪等乡(镇)。CN 值较大区域,径流量增加较快,洪涝灾害风险也相对较大。

3) 城口县降雨径流量变化与土地利用变化密切相关:建设用地面积的增加使 CN 值增加,进而导致径流量等级上升;草地面积减少使 CN 值降低进而使径流量等级下降;未利用地面积变化对径流等级影响不明显。

4) 实际降雨模拟结果表明径流量汇集区集中在城口县中部的双河、周溪、明通、蓼子、明中等乡(镇),葛城、坪坝、修齐等 3 镇(街道)中部,高楠、巴山 2 乡(镇)北部,河鱼乡西部和东安乡东部在面临强降雨时易发生溪河洪水、滑坡、泥石流等灾害,属于上述灾害的重点防护区域。

5) 降雨强度、降雨历时、地形、土壤类型和土地利用类型是影响城口县降雨径流量的 5 个重要影响因素。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 2018[M]. 北京:中国水利水电出版社,2019.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China flood and draught disaster bulletin 2018[M]. Beijing: China Water & Power Press,2019.
- [2] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害防御公报 2023[M]. 北京:中国水利水电出版社,2024.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China flood and draught disaster prevention bulletin 2023[M]. Beijing:China Water & Power Press,2024.
- [3] 张弛,滑申冰,朱德华,等. 卫星与地面观测融合降雨产品精度与径流模拟评估[J]. 人民长江,2019,50(9):70-76.
ZHANG C, HUA S B, ZHU D H, et al. Accuracy and runoff simulation appraisal of merged satellite-station rainfall product[J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 70-76.
- [4] 邓睿,张治意,陈亚. 嘉陵江流域下游地表径流对土地利用变化的响应[J]. 水土保持研究,2019,26(3):141-147.
DENG R, ZHANG Z Y, CHEN Y. Responses of runoff to land use changes in lower Jialing River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 141-147.
- [5] 胡晓静,吴敬东,张耀方,等. 北京山区 SCS 模型参数研究[J]. 中国给水排水,2018,34(3):125-128.
HU X J, WU J D, ZHANG Y F, et al. Study on parameters of SCS model in Beijing mountainous area[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(3): 125-128.
- [6] 唐中楠,杨国丽,李军,等. 基于文献计量学的中国流域 SCS 模型研究现状分析[J]. 人民长江,2021,52(10):95-100.
TANG Z N, YANG G L, LI J, et al. Research progress of SCS hydrology model of watersheds in China based on bibliometrics[J]. Yangtze River, 2021, 52(10): 95-100.
- [7] 张珂健,黄诚,张晓祥,等. 利用改进的 SCS 水文预警模型提升山洪灾害风险应急制图时效性:以长江经济带为例[J]. 地球信息科学学报,2023,25(3):546-559.
ZHANG K J, HUANG C, ZHANG X X, et al. Using the improved SCS hydrological early warning model to improve the timeliness of flash flood disaster risk emergency mapping: a case study of Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(3): 546-559.
- [8] 张兴奇,徐鹏程,顾璟冉. SCS 模型在贵州省毕节市石桥小流域坡面产流模拟中的应用[J]. 水土保持通报,2017,37(3):321-328.

- ZHANG X Q, XU P C, GU J R. Application of SCS model to simulate runoff in slope field at Shiqiao small watershed in Bijie City of Guizhou Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 321-328.
- [9] 卜慧, 邵骏, 欧阳硕, 等. 改进 SCS 模型在老挝南乌河流域中的应用[J]. 人民长江, 2018, 49(22): 88-92.
- BU H, SHAO J, OUYANG S, et al. Application of modified SCS model in runoff calculation in Nam Ou Basin, Laos[J]. Yangtze River, 2018, 49(22): 88-92.
- [10] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 等. 模拟降雨条件下黄土区 SCS 模型的参数率定[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 205-210.
- DENG J S, GAO P, MU X M, et al. Study on calibrating parameters of SCS model in Loess Area under simulated rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 205-210.
- [11] 赵武成, 买小虎, 王琦, 等. 基于 SCS-CN 模型的黄土高原丘陵区坡地微型集雨垄垄面径流量预测[J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 199-208.
- ZHAO W C, MAI X H, WANG Q, et al. Ridge surface runoff estimation for micro-rainwater-harvesting-ridges on slopping land in the hilly areas of the Loess Plateau based on SCS-CN model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(1): 199-208.
- [12] 刘宁. 基于 SCS-CN 模型的山地城市典型区域地表径流预测[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- LIU N. Prediction of surface runoff in typical areas of mountainous cities based on SCS-CN model[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [13] 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 等. 基于 SCS-CN 模型在山地海绵城市不同下垫面径流预测的优化及应用[J]. 中国农村水利水电, 2021(11): 49-52.
- LEI X L, QIU L N, WEI Z J, et al. Optimization and application of SCS-CN model for runoff prediction of different underlying surfaces in mountain sponge cities[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(11): 49-52.
- [14] 马丽君, 王涛涛, 王雯军, 等. 基于 SCS-CN 模型的郑州市区域产流特征研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 203-209.
- MA L J, WANG C T, WANG W J, et al. Regional runoff characteristics in Zhengzhou city based on SCS-CN model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 203-209.
- [15] 白天, 吴雅文, 金牧青, 等. 漯河市规划区雨洪格局空间分布特征综合量化研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 269-274.
- BAI T, WU Y W, JIN M Q, et al. A quantitative study on spatial distribution of rain flood pattern in Luohe planning area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 269-274.
- [16] SRIVASTAVA R K, IMTIYAZ M. Testing of coupled SCS curve number model for estimating runoff and sediment yield for eleven watersheds[J]. Journal of the Geological Society of India, 2016, 88(5): 627-636.
- [17] 李常斌, 李文艳, 杨文瑾, 等. 黄土高原祖厉河流域日降雨-径流过程模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(4): 20-26.
- LI C B, LI W Y, YANG W J, et al. Daily rainfall runoff simulation across the Zuli River Basin in the Loess Plateau[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2012, 48(4): 20-26.
- [18] 张涛, 訾丽, 杨文发, 等. SCS 模型在山区小流域山洪灾害预报预警中的适用性分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 71-76.
- ZHANG T, ZI L, YANG W F, et al. Applicability of SCS model in flash flood forecasting and early warning[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(9): 71-76.
- [19] 张珂健, 黄诚, 张晓祥, 等. 利用改进的 SCS 水文预警模型提升山洪灾害风险应急制图的时效性: 以长江经济带为例[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(3): 546-559.
- ZHANG K J, HUANG C, ZHANG X X, et al. Using the improved SCS hydrological early warning model to improve the timeliness of flash flood disaster risk emergency mapping: a case study of Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(3): 546-559.
- [20] 郭晓楠, 王秀茹, 刘兰妹. 清水河上游流域可收集雨水资源量估算与检验[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 208-212.
- GUO X N, WANG X R, LIU L M. Estimating and testing on collectable rainwater in watersheds of upper stream of Qingshui River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5): 208-212.
- [21] WOODWARD D E, HAWKINS R H, JIANG R Y, et al. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio[C]//World Water & Environmental Resources Congress 2003, Reston: American Society of Civil Engineers, 2003: 1-10.
- [22] 吕明权, 吴胜军, 温兆飞, 等. 基于 SCS-CN 与 MUSLE 模型的三峡库区小流域侵蚀产沙模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 860-867.
- LÜ M Q, WU S J, WEN Z F, et al. Modelling soil erosion and sediment yield in a small watershed of Three Gorges Reservoir Area based on SCS-CN and MUSLE model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 860-867.
- [23] 雷晓玲, 卫娇, 魏泽军, 等. 重庆市典型下垫面 SCS-CN 模型基于坡度修正的径流曲线数优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 215-221.

- LEI X L, WEI J, WEI Z J, et al. Optimization of the curve numbers based on slope correction of the SCS-CN model on the typical underlying surface in Chongqing [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(2): 215-221.
- [24] 李帅呈, 龚健, 杨建新, 等. 兰西城市群土地利用/覆被变化模式特征: 基于强度分析框架[J]. 资源科学, 2023, 45(3): 480-493.
- LI S C, GONG J, YANG J X, et al. Characteristics of LUCC patterns of the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration: based on an intensity analysis framework[J]. Resource Science, 2023, 45(3): 480-493.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Spatial Simulation Study of Rainfall Runoff in Chengkou County

TU Rongyu^{1,5}, LIN Xiaosong², LI Hongwei³, ZHANG Jixiang¹, XIE Xiangdong¹, CHENG Hongli⁴

(1. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University;

2. School of Architecture and Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

3. Meteorological Bureau of Chengkou County, Chengkou Chongqing 405900;

4. Meteorological Bureau of Yunyang County, Yunyang Chongqing 404500;

5. School of Road, Bridge and Construction, Chongqing Transportation Vocational College, Chongqing 402247, China)

Abstract: To investigate the spatial distribution of runoff under heavy rainfall scenarios in Chengkou County, Chongqing Municipality, and to provide reference for local disaster prevention and mitigation. To simulate the runoff volume under six rainfall scenarios with 24-h rainfall amounts of 50, 75, 100, 150, 200, and 250 mm through the improved SCS model, coupled with data on soil type and land use, and to analyze the distribution of runoff volume in each township of Chongqing Municipality. To select four representative heavy rainfall scenarios for runoff volume spatial simulation in 2010 and 2020. The results show that: rainfall runoff in Chengkou County is statistically positively correlated with rainfall; with the increase of simulated rainfall, the runoff volume increases in a non-linear step, and in the area with larger CN value, the runoff volume increases faster, and the risk of flooding increases; in the same rainfall intensity, the higher runoff volume area is mainly distributed in the southwestern townships of Chengkou County; the changes in rainfall runoff are closely related to the changes in land use. Land use changes affect the rainfall runoff volume by changing the size of the CN value; the simulation results of four actual rainfall events show that Shuanghe, Zhouxi, Mingtong, Gecheng, Xiuqi, Heyu, Dong'an, and other townships in Chengkou County are the key preventive areas for heavy rainfall and flooding. The above research results can provide support for heavy rainfall and flood disaster forecasting and warning in Chengkou County.

Keywords: rainfall runoff; SCS model; spatial simulation; land use change; Chengkou County

(责任编辑 方 兴)