

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.047.

闫思嘉, 晁云舒, 潘辉, 等. 基于“源—汇”景观的永春县雨洪过程动态分析与风险评估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 286-292.

YAN Sijia, CHAO Yunshu, PAN Hui, et al. Process Dynamic Analysis and Risk Assessment of Rainfall and flood in Yongchun County Based on the Source-Sink Landscape[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 286-292.

基于“源—汇”景观的永春县雨洪过程 动态分析与风险评估

闫思嘉^{1,2}, 晁云舒^{1,2}, 潘辉^{1,2}, 赵佳文^{1,2}, 巫丽芸^{1,2}

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 福建省南方森林资源与环境工程技术研究中心, 福州 350002)

摘要: [目的] 探究雨洪过程中不同降雨重现期下“源—汇”景观的时空动态演变特征, 并生成雨洪灾害分布格局, 从而为“源—汇”景观单元规划与区域雨洪灾害预防提供科学参考。[方法] 以永春县景观因子指标数据为基础, 引入可反映格局与过程关系的景观“源—汇”理论, 基于最小累积阻力模型从景观因子阻力与径流动力平衡关系的角度重新划分“源”“汇”景观。[结果] 永春县初始“源”景观空间分布整体特征为“中部最高、西高东低”, 且集中在戴云山脉附近, 易成为山体径流的源头。永春县在自然排水状态下, 易转化为“源”景观的土地利用类型排序为: 草地 > 耕地 > 建设用地 > 林地 > 未利用地。草地一直具有较强的“源”作用, 耕地在降雨重现期大于 10 年后“源”作用增强, 建设用地与林地降雨重现期小于 20 年时吸收雨水的能力较好, 超过 20 年后建设用地的“源”作用偏强, 林地的“汇”作用偏强, 未利用地的“源”作用几乎无变化, 其吸收雨水的能力有待后续的验证。当降雨重现期为 100 年时, 永春西北部雨洪灾害风险较大, 高风险区多集中在都镇、桂洋镇、东关镇, 需重点防患。[结论] 永春县雨洪灾害受到西北部山体径流影响, 未来应从降低“源”景观、增加“汇”景观的角度深入研究。

关键词: 雨洪过程; “源—汇”景观; 最小累积阻力模型; 永春县

中图分类号: X443

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0286-07

Process Dynamic Analysis and Risk Assessment of Rainfall and Flood in Yongchun County Based on the Source-Sink Landscape

YAN Sijia^{1,2}, CHAO Yunshu^{1,2}, PAN Hui^{1,2}, ZHAO Jiawen^{1,2}, WU liyun^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Southern Forest Resources and Environmental Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal dynamic evolution characteristics of the source-sink landscape under different rainfall return periods in the process of rainfall and flood was explored, and the distribution pattern of rainfall and flood disasters was generated, so as to provide scientific reference for the source-sink landscape unit planning and regional rainfall and flood disaster prevention. [Methods] Based on the landscape factor index data of Yongchun County, the landscape source-sink theory that can reflect the relationship between pattern and process was introduced. Based on the minimum cumulative resistance model, the source sink landscape was redefined from the perspective of the balance between landscape factor resistance and runoff dynamics. [Results] The overall characteristics of the initial source landscape space of Yongchun County were the highest in the central region, high in the west, low in the east, which concentrated near the Dai yun Mountains, and was easy to become the source of the runoff of the mountain. Under the state of natural drainage, Yongchun County was easily converted into the source landscape land use type sorting:

收稿日期: 2022-08-15

修回日期: 2022-09-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(31200365); 福建农林大学林学高峰学科建设项目(72202200205)

第一作者: 闫思嘉(1997—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向: 区域分析与规划。E-mail: yansj2022@163.com

通信作者: 巫丽芸(1977—), 女, 福建光泽人, 副教授, 研究方向: 景观生态学。E-mail: lywu2001@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

grassland>cultivated land>construction land>forest land>unused land; grassland always had a strong source effect. The source effect of cultivated land was enhanced after the rainfall return period was greater than 10 years. The construction land and forest land had better ability to absorb rainwater when the rainfall return period was less than 20 years. After 20 years, the source function of the construction land was stronger, while the sink function of the forest land was stronger. The source function of the unused land was almost unchanged, and its ability to absorb rainwater needs to be verified later. When the return period of rainfall is 100 years, the risk of rain and flood disasters in the northwest of Yongchun was relatively high. High risk areas mainly concentrated in Yidu Town, Guiyang Town and Dongguan Town, which need to focus on disaster prevention. [Conclusion] The rain flood disaster in Yongchun County is affected by the mountain runoff in the northwest. In the future, it should be further studied from the perspective of reducing the source landscape and increasing the sink landscape.

Keywords: rain flood process; source-sink landscape; minimum cumulative resistance model; Yongchun County

随着气候和环境的不断恶化,人类面临着日益严峻的雨洪灾害挑战^[1]。雨洪灾害是中国多数城市发展和管理所面临的难题^[2],因此我国在借鉴国际雨洪管理经验的基础上^[3],力求探索适合我国发展阶段与地方实际的雨洪管理策略^[4]。目前,国内外的雨洪灾害风险评价方法多集中于历史灾情数据统计^[5]、构建指标体系^[6]以及不确定性分析^[7-8],但是这些方法很难体现出雨洪过程中各影响因子之间的联系,无法模拟复杂灾害系统的动态演变特征^[9]。且国内在雨洪管理策略的探索中过于注重管理政策与技术的引用,忽略了对雨洪过程动态性^[10]、整体性^[11]的探究。因此引入可反映格局与过程关系的“源—汇”景观理论^[12]。陈利顶等在景观格局与生态过程的研究中提出“源—汇”理论^[13],该理论的提出能较好地将动态的过程融入静态的格局之中^[14]。目前“源—汇”理论多应用在非点源污染^[15]、土壤侵蚀^[16]、景观格局规划^[17]、城市热效应等领域^[18],常有研究将雨洪过程作为土壤侵蚀的影响因子,但是雨洪径流过程本身却很少与“源—汇”景观理论结合分析^[19]。此外“源”“汇”景观的区分关键在于判断景观类型在生态过程演变中所起的促进或阻碍作用^[12],但目前很多研究中凭借主观经验定义,直接将景观类型划分为“源”景观与“汇”景观。许申来等在土壤侵蚀过程中通过比较流域中的某一景观单元在某一时刻的侵蚀力和阻力的大小关系来判断景观“源—汇”格局,弥补了从前景观“源”“汇”类型主观判定的不足,同时使“源”“汇”景观具有动态性特性^[20]。因此将“源—汇”景观理论有效引入雨洪过程的动态评价成为当前的重点,而在探究雨洪“源—汇”景观时空演变的基础上进行雨洪灾害风险评价,不仅可体现评价过程的动态性,且对于灾害的预测预报与科学合理的规划具有重要意义。

鉴于此,本文通过借助最小累积阻力模型实现雨洪

过程的模拟,比较雨洪过程中各景观类型在不同降雨强度下的雨洪动力与景观阻力,从而确定各土地利用类型“源—汇”景观的分布与动态转化,探究该过程中不同时间与空间的“源—汇”景观演变规律。在此基础上探寻雨洪灾害发生的内因并划分雨洪灾害风险分布格局,为更合理的“源—汇”景观单元规划提供指导意见,并为应对区域雨洪灾害的预防规划提供科学参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

永春县地处福建省东南部,泉州市西北部戴云山脉东南麓,位于 $25^{\circ}13'—25^{\circ}33'N$, $117^{\circ}41'—118^{\circ}31'E$ 之间,全县呈长带形,面积为 $1\,456.87\text{ km}^2$ 。永春县境内山多地少,地势呈西北高东南低^[21],地貌以中、低山为主,盆地、河谷交错,且各地海拔存在差异,气候水文条件迥异。主要河流有桃溪、一都溪、湖洋溪和坑仔口溪,多属晋江水系^[22]。永春县是福建省暴雨中心县之一,洪水灾害主要集中在4—5月梅雨季节和6—9月的台风季节,具有“猛涨急落”的特点,其中北部位于戴云山东坡,为多雨中心,年降水量在 $1\,900\text{ mm}$ 以上,是晋江流域的次高径流区^[23]。

1.2 数据源及预处理

本研究所有数据均采用统一的地理坐标和投影坐标,空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。数据类型包括:(1)永春县高程数据。来源于中国科学院地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>);(2)永春县行政区划数据与土壤数据。来源于福建省地质测绘院遥感中心;(3)气象数据。选择永春县2010—2020年逐日降雨量观测文本数据,来源于福建省永春县气象局;(4)植被数据。选择永春县2010—2020年的遥感图像,利用ENVI软件与ArcGIS软件计算归一化指数NDVI的年平均值,来源于福建省地质测绘院遥感中

心;(5) 土地利用数据。来源于福建省地质测绘院遥感中心 2015 年数据,将土地利用类型划分为建设用地、林地、耕地、草地、未利用地、水域 6 大类。

2 研究方法

2.1 “源”、“汇”景观的界定

在雨洪过程中,“源”景观是指促进径流流动的景观单元;“汇”景观是延缓径流流动的景观单元。通常是直接将建设用地划分为“源”景观,非建设用地划分为“汇”景观,但是由于“源—汇”景观在概念上是相对的,因此应结合具体的生态过程进行“源”“汇”景观单元的界定与分析^[24]。为更直观地反映雨洪过程中“源”“汇”景观的动态转变,通过计算和比较径流动力因子值与景观阻力因子值的方式进行“源”“汇”景观单元的界定:即某种景观单元在某一时刻的降雨强度下,雨洪径流动力值>地表景观阻力值,则该景观单元在这一时刻被定义“源”景观;反之若雨洪径流动力值<地表景观阻力值,这种景观在这一时刻则定义为“汇”景观。

2.2 雨洪过程中“源—汇”景观空间演变

2.2.1 最小累积阻力模型 最小累积阻力模型(minimal cumulative resistance model, MCR)是用来反映物种或者能量从源到目的地运动过程中所需耗费的最小代价^[25],可以用来定量分析研究对象在空间上移动的难度和扩张趋势^[26]。该模型重点在于源地、距离和阻力基面 3 个要素,数学表达式为:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \cdot R_i)$$

表 1 景观因子指标选取

指标		指标说明与获取
径流动力因子	高程	在径流过程中会受到高程的影响,反映了降雨产生的径流对各景观的重力作用。因此高程越大,径流移动做功越大,径流动力越大。该数据来自福建省地质测绘院遥感中心
	坡度	表示栅格单元的坡度数据,坡度与地表径流呈现正相关,坡度越大,径流动力越大。利用永春县 DEM 数据提取该数据
	降雨强度	依据《福建省城市及部分县城暴雨强度公式》中的永春县暴雨强度公式为: $q = 1974.454(1 + 0.541 \lg T_e) / (t + 5.990)^{0.636}$ 其中 q 为降雨强度; T_e 为降雨重现期; t 为降雨时长。根据该公式计算不同降雨重现期的暴雨强度及日降雨量
景观阻力因子	植被覆盖率	植被覆盖率反映了径流过程中地面的植被情况,植被覆盖率越大,径流阻力越大。解译永春县范围内 2010—2020 年的遥感影像获得归一化植被指数,并计算植被覆盖率
	地表粗糙度	地表粗糙度可以反映地表凹凸不平的形态或起伏状态,地表粗糙度越大,径流阻力越大。利用永春县 DEM 数据和 ArcGIS 软件计算地表粗糙度 M
	土壤类型	不同土壤类型对应不同的土壤可蚀性 K ,土壤可蚀性反映了土壤受到地表径流的侵蚀速度 ^[28] 。土壤可蚀性 K 值越大,对应的土壤的抗水蚀能力越差,径流阻力就越小。将永春县土壤类型分为红壤、水稻土、石质土、赤红壤、水域、黄壤 6 类,对 K 值排序,确定土壤可蚀性

式中:MCR 为最小累积阻力值; i 为景观单元; j 为源地; D_{ij} 表示两者间的空间距离; R_i 表示景观单元 i 的阻力系数; \min 表示所研究的景观对于不同源的阻力取最小值; f 表示最小累积阻力与景观基面特征正相关的未知函数^[27]。该模型可通过 ArcGIS 软件中的成本距离模块实现。对于雨洪径流过程,可以理解为降雨发生并落到地面后形成的径流克服相应的景观阻力移动的过程。对径流移动过程中的动力因子与阻力因子建立相应的阻力面,则可反映出雨洪径流在空间上的运动趋势。

2.2.2 提取初始“源”景观 在雨洪过程中,最容易产生径流的“源”景观应是最先到达地面的降雨,且流动过程中下渗、吸收最小的部分,即初始“源”景观存在于降雨量大、坡度大、植被覆盖率小、土壤透水性低的地区。因此,本文选取降雨、坡度、植被覆盖率、土壤 4 个因子,在 ArcGIS 中进行归一化处理后,对其栅格数据进行等级划分与赋值,在空间叠加后,得到容易产生径流的“源”景观空间数值分布图,其中值越大,“源”景观效应越明显,因此提取“源”景观空间数值的高值作为初始“源”景观。

2.2.3 雨洪过程中景观因子指标选取 雨水径流移动过程中被众多环境因子所影响。参考相关资料中环境因子对雨洪过程的影响程度,选取 6 个关键的因子指标,分别为高程、坡度、植被覆盖率、地表粗糙度、土壤类型、降雨强度,各指标说明与数据来源见表 1。其中,高程、坡度、降雨强度可促进径流过程,因此作为径流动力因子。相反,植被覆盖率、土壤类型、地表粗糙度对径流具有延缓作用,作为景观阻力因子。

2.2.4 评价指标权重确定与阻力面的构建 在 ArcGIS 软件中将各评价指标的栅格离散值划分 6 个等级,并赋予阻力系数。由于阻力值是一个相对值,用来反映不同阻力因子间的差距即可,因此在本文中设定阻力系数范围是 1 到 100。在对所选指标设定阻力系数后(表 2),通过专家打分法确定相应的指标权重。然后,利用最小累积模型分别构建永春县雨洪径流过程中径流动力因子阻力面和景观阻力因子阻力面,最后通过 ArcGIS 中的成本距离模块确定永春县内代表雨洪径流动力空间分布的最小累积值

$MCR_{动力}$ 与代表景观阻力空间分布的最小累积值 $MCR_{阻力}$ 。将两者进行比较,其中 $MCR_{动力} > MCR_{阻力}$ 的景观单元,为“源”景观;反之 $MCR_{动力} < MCR_{阻力}$ 的景观单元,则为“汇”景观,由此判别空间上的“源—汇”景观变化。

在上述过程中,高程、坡度、植被覆盖率、土壤类型、地表粗糙度均为恒定值或平均值,但是降雨强度会随着降雨重现期的改变而发生变化。因此,本文中设定了降雨重现期 $P=2,5,10,20,50,100$ 时 6 种不同的降雨强度,由此得到时间上“源—汇”景观的动态变化。

表 2 因子阻力评分表

	降雨重现期	计算日	阻力	坡度/(°)	阻力	高程/m	阻力
	P/a	降雨量/mm	系数		系数		系数
径流动力因子阻力系数	2	59.37	40	<7.29	1	<284	1
	5	90.45	55	7.29~12.66	20	284~444	20
	10	139.78	65	12.66~17.85	40	444~591	40
	20	190.11	75	17.85~23.45	60	591~734	60
	50	228.18	90	23.45~30.45	80	734~908	80
	100	266.25	100	30.45~86.76	100	908~1355	100
	降雨重现期	地表	阻力	土壤	阻力	植被	阻力
	P/a	粗糙度	系数	类型	系数	覆盖率/%	系数
景观阻力因子阻力系数	2	<1.03	1	水域	20	<35	1
	5	1.03~1.07	20	水稻土	35	35~54	20
	10	1.07~1.13	40	赤红壤	50	54~69	40
	20	1.13~1.23	60	石质土	65	69~82	60
	50	1.23~4.47	80	黄壤	80	82~94	80
	100	4.47~17.71	100	红壤	100	94~100	100

2.3 与永春土地利用图叠加分析并划分雨洪风险分布格局

本研究的目的在于分析易产生径流的“源”景观在时间与空间上的变化趋势,判断不同降雨强度下,“源”景观所占比例与所处位置。因此将“源”景观的分布图与永春土地利用图进行叠加,这样不仅可以对雨洪生态过程与现有景观格局分布进行分析,而且可对各类型景观在雨洪过程中动态演变的原因进行探究。

“源—汇”雨洪风险分布基于上文最小累积阻力模型构建的正向与负向因子阻力面,雨洪风险的大小取决于“源”“汇”景观作用的强弱,即最小累积阻力值 $MCR_{动力}$ 与 $MCR_{阻力}$ 差值的大小,其中“源”作用强则风险大,“汇”作用强则风险小。为更直观地分析雨洪风险,通过自然断点法划分“源—汇”雨洪风险等级,包括低风险区与高风险区。高风险区域的洪涝风险高;低风险区,则说明区域内的自然环境因子可以延缓地表径流的产生,相比较高风险区造成洪涝的风险低。

3 结果与分析

3.1 初始“源”景观分布

永春县初始“源”景观空间分布整体特征为“中部最高,西高东低”(图 1)。在“源”景观空间分布的低值区中,“源”景观分布值最低,其次为相邻的五里街镇、桃城镇、东平镇以及西部的一都镇、横口乡,低值区属于低山丘陵区同时也是永春县人口密集区。初始“源”景观空间分布的高值区主要位于苏坑镇、锦斗镇、呈祥乡、仙夹镇、玉斗镇东部、蓬壶镇、达埔镇以及石鼓镇西部,该地区为戴云山脉的主体部分,整体地势较高,降雨量较大。因此,最容易形成初始“源”景观的区域集中在戴云山脉附近以及永春中部。结合地理形势判断,永春县雨洪径流几乎是由西向东的过程。

3.2 “源—汇”景观时间演变探究

由模拟可得表 3 统计的不同用地类型“源”景观比例动态变化,由于水域一直属于“源”景观,因此不考虑其动态变化,其余不同用地类型的“源”景观比例

随着降雨重现期的增大而增加。其中建设用地由 5.46% 升至 29.93%，林地由 5.05% 升至 25.76%，两者的“源”景观比例在不同的降雨重现期下变化相似，均在 P 小于 10 a 时增长缓慢，大于 20 a 后涨幅增加；耕地由 6.70% 升至 31.23%，在 $P=100$ a 时，有 30% 以上的耕地成为会产生径流的“源”景观；草地在 $P=2$ a 时，“源”景观比例就达到 7.69%，随着降雨强度的增大最终增至 36.19%，为所有用地类型中涨幅最大；未利用地的涨幅十分缓慢，由 0.13% 涨至 4.45%，在 $P<20$ a 时，“源”景观占比甚至不及 1%；由此可判断建设用地、林地、耕地在降雨重现期小于 5 a 的情况下，易形成洪涝的景观单元数量不超过 10%，吸纳雨水效果较好。

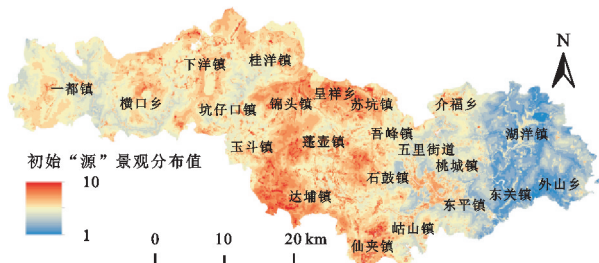


图1 初始“源”景观空间分布

结合永春县地形、土壤、植被类型等因素对不同用地类型“源”景观比例动态变化的原因进行探究。可得，在 $P=2$ a 至 $P=100$ a 的过程中，未利用地的“源”景观比例始终保持在最低且不超过 5%，这与其他 4 种土地利用类型结果相差甚大，初步判断是因为永春县未利用地的数量过少，且受到其他因素的叠加影响，因此未利用地吸收雨水的能力有待进一步试验与验证；从 $P=2$ a 起，草地成为“源”景观占比第一的用地类型，草地主要分布在永春县中西部山地，由此判断：随着降雨强度的增强，山体径流逐渐增强，永春县灌草丛的截留作用难以抵消山体径流过程；建设用地的“源”景观比例先缓慢上升，在 P 大于 20 a 后上升变快，主要是建设用地中不透水面的比例过高，植被覆盖率较低，不利于径流的吸收；耕地“源”景观比例动态变化趋势与建设用地相似，但是比例略高，这是因为永春县的耕地类型多为水田，在暴雨强度下不容易吸纳雨水；林地的“源”景观比例次低，永春县具有牛姆林省级自然保护区等大面积的天然阔叶林以及生态公益林和水土保持林，由此可判断其对山体径流具有较强的消解作用。

永春县在不同降雨重现期下“源—汇”景观动态变化结果见图 2。总体上看，永春县的“源”景观比例随着降雨重现期的增大而增加，“汇”景观比例则随降

雨重现期的增大而减小，但两者占比总和保持不变。当重现期 P 为 2 a 与 5 a 时，“源”景观占比较低。 P 大于 5 a 后，“源”景观转化率持续稳定增长，到重现期 $P=10$ a 及 $P=20$ a 时，转化率分别为 11.79% 与 14.96%。超过 50 a 后，“源—汇”景观转换的趋势明显增大，“源”景观单元数量增加，应结合“源”景观单元的空间位置，防控容易形成径流的景观单元。

表3 不同用地类型“源”景观比例动态变化 %

降雨 重现期 P/a	建设 用地	林地	耕地	草地	未利 用地
2	5.46	5.05	6.70	7.69	0.13
5	8.42	8.04	9.81	12.19	0.26
10	10.40	10.37	12.15	15.72	0.53
20	13.10	13.35	14.91	19.85	0.74
50	19.25	19.65	21.49	27.21	2.30
100	29.93	25.76	31.23	36.19	4.45

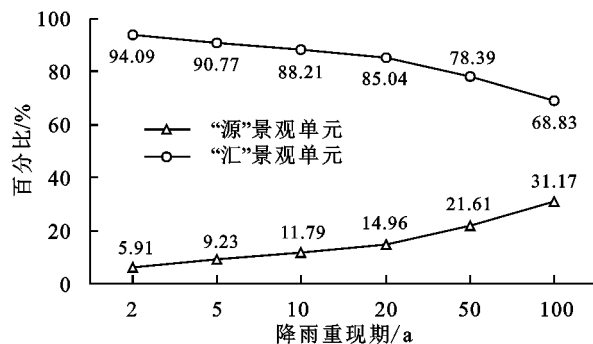


图2 不同降雨重现期下“源—汇”景观动态变化

3.3 “源—汇”景观空间演变探究

本文重点在于研究“源”景观的动态变化，即在不同降雨条件下易发生洪涝的景观单元。因此将模拟结果与永春县乡镇行政区图叠加进行空间分析可得图 3。图中随着降雨强度的增强，“汇”景观逐渐转化为“源”景观，永春县中西部所有乡镇的“源”景观面积都在增加，但是增长的幅度各有不同，其中锦斗镇、苏坑镇、呈祥乡 3 个乡镇在不同的降雨重现期下“源”景观比例始终保持在前 3。“源”景观分布最终会达到“西北高，东部低，多分散”的局面。

具体演变规律如下：(1) 当 $P=2$ a 时，永春县中西部乡镇均出现“源”景观分布。其中永春县北部高海拔的苏坑镇与锦斗镇的“源”景观首先呈现小范围聚集。(2) $P=5$ a 时，“源”景观面积在初始“源”景观的基础上小幅度提高，并开始永春西北部的桂洋镇、苏坑镇出现大面积片状扩散。(3) 当 $P=10$ a，随着降雨强度的增加，“源”景观在原有转化的基础上向中西部乡镇持续条状或者片状的扩散。(4) $P=20$ a 时，锦斗镇、苏坑镇、桂洋镇大部分“汇”景观转化

为“源”景观,“源”景观占比涨幅增大。(5) $P=50$ a 时,此时“源”景观已经大范围在永春县的西北部以及中部的所有乡镇出现。(6) $P=100$ a 的降雨强度下,“源”景观扩张幅度相对减小,桃城镇南部以及东平镇与东关镇部分区域首次出现“源”景观。

总体来看,“源”景观最先出现在永春县的西北

部,并随着降雨强度的增大向永春中部扩散。当降雨重现期 $P=2.5,10,20$ a 时,各乡镇“源”景观比例缓慢、稳定的增长,此时“源”景观单元数量相对较少,情况可控。当 $P=50,100$ a 时,随着降雨强度增大各乡镇“源”景观比例快速增长,“源”景观单元数量随之激增,此时有极大概率发生洪涝灾害。

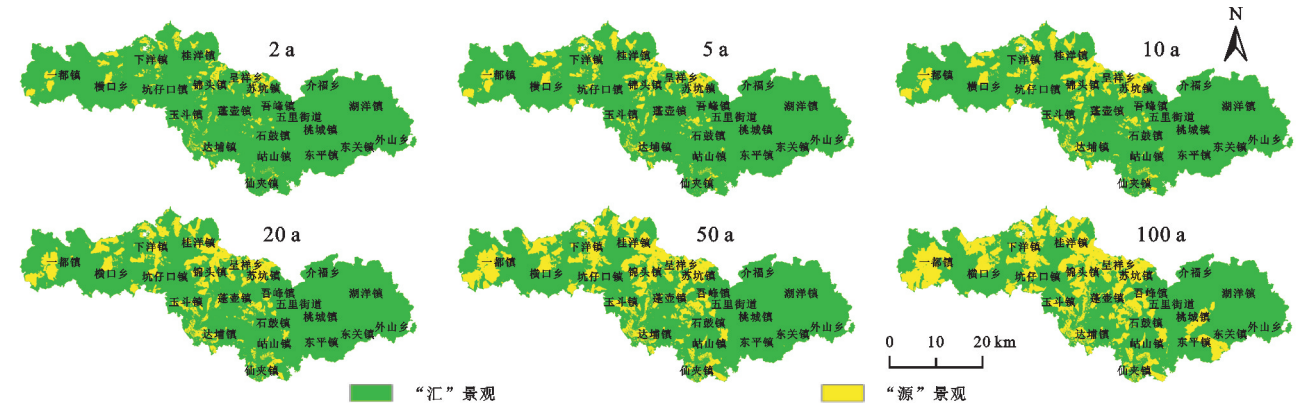


图 3 不同降雨重现期下“源—汇”景观空间分布

3.4 雨洪灾害风险分布

由于目前永春县防洪工程的标准已提升至 20~50 年一遇,因此在考虑极端强降雨的情况下,对降雨重现期 $P=100$ a 的雨洪灾害风险分布进行分析。图 4 可得 $P=100$ a 时,西北部地区的危险性等级处于较高水平,雨洪灾害风险分布整体呈现由一都镇、桂洋镇、东关镇的高风险区向四周逐渐递减的特点,具体表现为山地风险等级突出,桃溪沿岸地区的风险要高于其他地区,耕地区域的风险等级要高于林草区域。其中一都镇与桂洋镇地形多为高山、丘陵,地势较高,易出现山体径流;东关镇地势相对较低,用地类型多为建设用地与水田,不容易吸纳雨水,且位于桃溪下游,上游水流汇和的速度大,容易在低洼处形成积水,发生洪涝灾害的风险比较大。

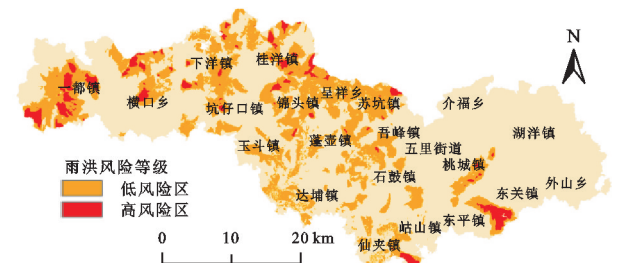


图 4 雨洪灾害风险分布

4 结 论

(1) 永春县初始“源”景观空间分布值的整体特征为“中部最高、西高东低”,表示该县的中部与西部比东部更容易形成“源”景观,这与模拟中不同重现期下“源”景观的空间分布规律基本吻合。其主要原因

是受到戴云山脉的影响,永春县中西部属于降雨量大且山体海拔高的地带,因此容易造成山体径流。

(2) 在“源”景观的时间演变中,随着降雨重现期的增大,“源”景观单元所占的百分比逐渐增大,“汇”景观单元比例逐渐减少,但两者占比总和保持不变。这是由于降雨强度增强,径流动力大于地表阻力的景观单元数量增多造成。当降雨重现期大于等于 50 a 时“源”景观比例上升幅度较大,易发生洪涝灾害的“源”景观单元数量大幅度增加。根据吴汉美等的研究^[29],当“源”景观占比过大时,重大洪涝灾害发生概率极高,要对其进行有预测、组织的防御,对可能遭受洪水与自然灾害威胁的居民群众进行有依据、有准备的保护。

(3) 在“源”景观的空间演变中,随着降雨重现期的增大,“源”景观逐渐扩散并最终达到“西北多、东部少、多分散”的局面。其主要是由于永春县西北部山多坡大,土壤类型中水稻土所占的比例较大,因此在暴雨的状态下,雨水下渗的能力弱,地表径流形成的速度快。由于永春县年平均降水量地理分布特征是为“北多南少、西多东少”^[21],因此径流过程随降雨强度的增大,以由西向东、由北向南的趋势扩散。由 $P=100$ a 的雨洪灾害风险分布可得风险区集中在永春县西北部,高风险区出现在一都镇、桂洋镇、东关镇。

综上所述,永春县雨洪灾害的发生不仅与台风暴雨有关,并且可能受到其西北部山体径流的影响。为了最大程度上确保人民群众的生命财产安全,并保障永春的经济、社会稳定的可持续发展,后续永春县生态景观格局发展的过程中可以从增加“汇”景观,降低、稳固“源”景

观以及控“源”提效的角度进行深入研究。

需强调的是,考虑到研究区空间尺度的影响,阻力面构建时景观因子的选择与赋值具有主观性,会产生不同的“源—汇”景观格局,因此今后可对指标的选择、赋值以及权重确定进行延伸分析。对于复杂与多样的雨洪过程,本文的研究仅可为该地区提供一定的雨洪风险的评估和径流模拟,不能得到准确的洪涝过程变化,在后续研究中可以结合现有的排水系统,对该模拟进行验证与完善。

参考文献:

- [1] 魏依柯,曹丹,徐若萱,等.韧性视角下雨洪管理体系建设的国际经验[C]//面向高质量发展的空间治理:2020中国城市规划年会论文集(01 城市安全与防灾规划).成都:中国城市规划学会、成都市人民政府,2021.144-156.
- [2] 吴海瑾,翟国方.我国城市雨洪管理及资源化利用研究[J].现代城市研究,2012,27(1):23-28.
- [3] Liu Qianhui, Cui Wenhui, Tian Zhan, et al. Stormwater management modeling in “Sponge City” construction: current state and future directions[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022,9:1-16.
- [4] 林小如,曹韵.我国城市雨洪管理困境解析与行动应对[J].现代城市研究,2014,29(7):14-18.
- [5] Seiler R A, Hayes M, Bressan L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring[J]. *International Journal of Climatology*, 2002,22(11):1365-1376.
- [6] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等.城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J].水资源保护,2020,36(6):1-6,17.
- [7] 刘东海,张双双.基于熵 AHP 和 D 数理论的洪涝灾害风险评估[J].统计与决策,2017,33(20):52-55.
- [8] 王倩雯,曾坚,辛儒鸿.基于 GIS 多准则评价与 BP 神经网络的暴雨洪涝灾害风险辨识:以闽三角地区为例[J].灾害学,2021,36(1):192-200.
- [9] 李超超,田军仓,申若竹.洪涝灾害风险评估研究进展[J].灾害学,2020,35(3):131-136.
- [10] Liu S, Crossman N D, Nolan M, et al. Bringing ecosystem services into integrated water resources management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013,129:92-102.
- [11] Gober P. Getting outside the water box: the need for new approaches to water planning and policy[J]. *Water Resources Management*, 2013,27(4):955-957.
- [12] 陈利顶,傅伯杰,赵文武.“源”“汇”景观理论及其生态学意义[J].生态学报,2006,26(5):1444-1449.
- [13] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,等.基于“源—汇”生态过程的景观格局识别方法:景观空间负荷对比指数[J].生态学报,2003,23(11):2406-2413.
- [14] 田仁伟,赵翠薇,贺中华,等.“源—汇”景观理论的研究综述[J].贵州科学,2019,37(3):24-29.
- [15] 黄宁,王红映,吝涛,等.基于“源—汇”理论的流域非点源污染控制景观格局调控框架:以厦门市马銮湾流域为例[J].应用生态学报,2016,27(10):3325-3334.
- [16] 王金亮,谢德体,倪九派,等.基于源汇景观单元的流域土壤侵蚀风险格局识别[J].生态学报,2017,37(24):8216-8226.
- [17] Mouquet N, Loreau M. Community patterns in source-sink metacommunities[J]. *the American Naturalist*, 2003,162(5):544-557.
- [18] 李丽光,许申来,王宏博,等.基于源汇指数的沈阳热岛效应[J].应用生态学报,2013,24(12):3446-3452.
- [19] 王志芳,程可欣.北运河流域雨洪“源—汇”景观时空演变[J].生态学报,2019,39(16):5922-5931.
- [20] 许申来,周昊.景观“源、汇”的动态特性及其量化方法[J].水土保持研究,2008,15(6):64-67,71.
- [21] 徐才华,刘德和,朱艺,等.基于精细化观测的永春县降水分布特征研究[J].海峡科学,2018,34(8):46-50.
- [22] 黄超,唐南奇,张黎明,等.基于 CA-Markov 模型的永春县景观格局动态模拟[J].福建农林大学学报:自然科学版,2011,40(5):535-539.
- [23] 刘晨.基于 GIS 的晋江流域洪灾风险评估研究[D].福州:福建师范大学,2010.
- [24] 严秋怡,张凯云.基于“源—汇”模型理论的城市雨洪管理研究[J].城市建筑,2019,16(12):67-69.
- [25] 谭华清,张金亭,周希胜.基于最小累计阻力模型的南京市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2020,40(3):282-288,296.
- [26] 洪步庭,任平.基于最小累积阻力模型的农村居民点用地生态适宜性评价:以都江堰市为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1386-1396.
- [27] 刘帆.基于最小累计模型耕地地面源污染源—汇风险格局分析[D].重庆:西南大学,2018.
- [28] 韩旭,田培,黄建武,等.基于 2009—2018 年径流小区观测数据的武汉市土壤侵蚀因子定量评价[J].生态学报,2021,41(10):3878-3890.
- [29] 吴汉美,段国凡,李春娥.洪涝灾害后城镇景观长距离输水系统水文风险评估[J].灾害学,2021,36(2):43-46,78.