综合研究

漓江流域洪涝灾害风险评价

姚月锋[1,2]，何 文[1,2]，曾丹娟[1,2]

(1.广西壮族自治区 中国科学院 广西植物研究所，广西 桂林 541006；
2.广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室，广西 桂林 541006)

摘 要：[目的] 探讨漓江流域发生洪涝灾害的可能及其空间分布范围，以期从流域生态水文功能的角度为区域洪涝灾害风险评价研究提供理论基础。[方法] 通过基于表层土壤(0—10 cm)最大、最小持水量和流域多年平均降雨量，采用地统计学和空间叠加分析的方法分析漓江流域地表土壤排水能力和年降雨量空间变异格局。[结果] 漓江流域表层土壤排水能力的变异系数相比流域多年平均降雨量大，受外界随机性因素影响大，空间结构比降低。桂林市城区、临桂新区与灵川县城区 3 区交界范围为极易发生洪涝区域，而漓江流域中上游的 3 个保护区(猫儿山国家级自然保护区、海洋山和青狮潭水源林保护区)为不易发生洪涝灾害区域。[结论] 考虑流域下垫面生态水文过程和气候(降雨)变化相结合的方法，能够预测和划分流域洪涝发生风险可能及其空间分布格局。其中，桂林市区与灵川县城交界范围为极易发生洪涝区域。

关键词：洪涝风险；气候变化；排水能力；克里格插值

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)02-0122-05 **中图分类号**：P954，P429，X43

文献参数：姚月锋，何文，曾丹娟. 漓江流域洪涝灾害风险评价[J]. 水土保持通报，2018，38(2)：122-126. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.020. Yao Yuefeng，He Wen，Zeng Danjuan. Assessment of flood risk in Lijiang River watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(2)：122-126.

Assessment of Flood Risk in Lijiang River Watershed

YAO Yuefeng[1,2]，HE Wen[1,2]，ZENG Danjuan[1,2]

(1. *Guangxi Institute of Botany，Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences，Guilin，Guangxi* 541006，*China*；2. *Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain，Guilin，Guangxi* 541006，*China*)

Abstract：[Objective] The probability of flood occurrence and its risk distribution in Lijiang River watershed were mapped to provide some references for regional flood risk assessment from the aspects of watershed eco-hydrological function. [Methods] The maximum and minimum water holding capacities in surface soil(0—10 cm) and annual rainfall were analyzed using geostatistics and spatial overlay analysis. [Results] The surface soil drain ability(difference between maximum and minimum water holding capacity) and annual rainfall displayed a strong spatial autocorrelation(spatial autocorrelation coefficient>0.88). But the spatial autocorrelation of surface soil drain ability was controlled by random factors rather than by autocorrelation factors，which resulted to its lower spatial structure in comparison with the one of annual rainfall. The tri-junction area of Guilin urban area，New Lingui District and Lingchuan County has the highest risk of flooding；whereas three nature conservation areas，namely Maoershan National Nature Reserve，Haiyangshan and Qingshitan Water Conservation areas have the lowest risk of flooding. [Conclusion] Considering both the eco-hydrological function of watershed and climate change(mainly referred to rainfall) in this study，we can predict the probability of flood occurrence and map the flood risk distribution in Lijiang River watershed. The junction are of Guilin urban area and Lingchuan County is the flood-prone region. This study hopes to provide a scientific knowledge

收稿日期：2017-09-01 **修回日期**：2017-10-12

资助项目：国家自然科学基金项目“漓江上游流域森林景观格局对土壤水分空间异质性的影响”(41401211)；中科院“西部之光”人才培养计划项目(中科院厅局文件人字[2014]91 号)；广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139088)

第一作者：姚月锋(1981—)，男(汉族)，广西壮族自治区灵山县人，博士，副研究员，主要从事流域资源定量评价的研究。E-mail：yf.yao@gxib.cn。

for regional flood disaster prediction and evaluation, also for prevention and mitigation of flood disaster.

Keywords: flood risk; climate change; soil drainability; Kriging interpolation

洪涝灾害是造成中国损失最严重的一种自然灾害[1]。由于影响洪涝灾害发生的因子众多、关系错综复杂,导致其发生的风险往往具有偶然性和不确定性[2],这给洪涝灾害发生的准确预测和模拟提高了难度。目前,国内外对洪涝灾害风险评价研究已取得了较大进展[3],但在研究方法上只针对降雨量的大小对洪涝灾害进行分析以及分区[4],如刘福洲等[5]对桂林漓江致洪暴雨分析中把降雨量大于等于 100 mm 或连续 2 d 以上日降雨量大于等于 50 mm 作为漓江极易发生洪涝灾害的标准;或同时考虑河网密度、地形等环境因子及社会经济指标等因素的影响[6-7]以及洪涝发生后的灾害评价等[8],很少从流域生态水文功能角度来考虑流域下垫面本身对降雨缓冲及水源涵养等生态水文过程对洪涝发生风险的影响,在一定程度上高估了洪涝灾害风险的发生。因此,本研究以作为西南喀斯特脆弱生态环境下典型旅游区和具有国际意义的陆地生物多样性关键地区之一的漓江流域为例,基于流域表层土壤最大、最小持水量估算整个流域表层土壤排水能力的大小及其空间分布范围,并与多年平均降雨量的空间变异进行叠加分析,探讨漓江流域发生洪涝风险的可能及其分布格局,以期从流域生态水文功能的角度为区域洪涝灾害风险评价研究提供理论基础。

1　研究区概况

研究区选择地处桂林市内的漓江流域,其地理坐标为 110°5′—110°44′E,24°38′—25°56′N[10]。研究区内属于中亚热带季风气候区,年降雨量为 1 367.5～1 932.9 mm;年均气温约为 19 ℃。受中亚热带季风气候活动的影响,年内雨季和旱季明显;其中,雨季一般为每年的 3—8 月,而旱季为每年的 9 月至次年 2 月。研究区内土壤类型主要以红壤为主;植被属于中亚热带常绿阔叶林,随着人类活动干扰,大部分地区逐渐被松、杉、竹等人工林及灌木林代替。

2　数据采集与处理

2.1　数据采集

根据 WGS84 的地理坐标系,将漓江流域划分为 2′×2′的经纬网格,通过 GPS 导航到每一个经纬网格内,在网格内采用 GPS 测定该网格的经纬度,并记录该网格内的土地利用类型情况,具体网格设定方法可参考已发表的文献[10]。在网格内随机选择均一的样地,并在样地内随机设定 3 个采样点,采用直径 50.46 mm×高 50.00 mm,容积为 100 cm^3 规格的环刀对表层(0—10 cm)原状土样进行采集,将采集原状土的环刀带回实验室进行土壤最大和最小持水量的测定[9]。土壤样品采集时间为 2014 年 11 月 19 日至 2015 年 1 月 15 日。为确保土样采集所处干湿条件的一致性,本研究在采样前 5 d 内没有降雨情况下进行采样[11]。流域表层土壤排水能力为土壤最大持水量与最小持水量的差值[9]。土壤年排水能力为实测计算的土壤排水能力乘以一年的天数,本研究按 365 d/a 来计算。本文降雨量数据主要为桂林市内各气象站的 1961—2010 年的逐年降雨量,数据主要来自于国家水文年鉴和国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/)。

2.2　数据处理

采用单样本的 Kolomogorov-Smirov 检验对数据进行正态分布检验,将不服从正态分布的数据进行数据转化使其服从正态分布。本研究中数据都服从正态分布检验,无需进行数据转化。

地统计学分析采用半方差函数[12]:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2n(h)}\sum_{i=1}^{n(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \tag{1}$$

式中:$\gamma(h)$——半方差函数值;$n(h)$——取样尺度为 h 时的样本对总数;$Z(x_i)$,$Z(x_i+h)$——区域化变量 $Z(x)$在空间位置 x_i 和 x_i+h 上的实测数值。对测定的函数值构建半方差函数曲线,并进行理论模型的模拟。

流域表层土壤排水能力拟合的理论模型为指数模型:

$$\gamma(h)=c_0+c_1\left[1-\exp\left(-\frac{h}{a}\right)\right] \tag{2}$$

式中:c_0——块金值;c_1——结构方差;a——相关距离。

而流域年降雨量拟合则为高斯模型:

$$\gamma(h)=c_0+c_1\left(1-e^{-\frac{h^2}{a^2}}\right) \tag{3}$$

此外,采用克里格(Kriging)方法对表层土壤排水能力和年降雨量进行空间插值分析,最后采用 Map Algebra 的 Raster Calculator[13] 对流域表层土壤排水能力和降雨量进行叠加分析。

3　结果与分析

漓江流域 1961—2010 年平均年降雨量为 1 671.50±71.14 mm,变异系数为 0.13,表现较小的中等变异(表 1)。而流域表层土壤年总排水能力为 2 285.61

±38.24 mm，变异系数为 0.35，其变异程度相比多年平均降雨量大，受外界随机因素影响较大。

通过半方差函数理论模型对流域多年平均降雨量和表层土壤年排水能力进行模拟表明，指数理论模型可以模拟流域表层土壤排水能力的空间差异，而高斯理论模型更适合描述流域多年平均降雨量的空间变异程度。较大的块金值和基台值表明，流域表层土壤年排水能力空间异质性由随机性引起的变异和总变异程度较高。空间结构比表示空间自相关部分引起的空间变异程度，当空间结构比＞0.75 时，系统具有高度的空间相关性[14]。而分维数与半方差函数对数曲线的曲率有关，随着曲率的增加而减少[15]。高的空间结构比(0.99)和低的分维数(1.06)说明漓江流域多年平均降雨量的空间变异主要由空间自相关部分引起，而流域地表年排水能力受随机性因素影响较大，空间依赖性降低。

表 1 漓江流域年均降雨量和年排水能力的描述性分析和地统计学分析

指标参数	均值/mm	标准误	模型	块金值	基台值	空间结构比	分维数	变程/km	决定系数
年排水能力	2 285.61	38.24	指数	79 000	635 700	0.88	1.95	3.22	0.87
年均降雨量	1 671.50	71.14	高斯	100	51 300	0.99	1.06	61.05	0.87

3.1 流域表层土壤排水能力和降雨量空间分布

采用克里格插值方法对流域表层土壤排水能力和多年平均降雨量进行插值如图 1 所示。

由图 1 可以看出，土壤排水能力具有明显的空间格局。其排水能力低值区域主要集中漓江上游桂林市城区、灵川县及兴安县城区，此外，阳朔县兴坪镇附近也出现低值分布。而排水能力较强的区域则为漓江流域东部海洋山水源林保护区、漓江上游的猫儿山国家级自然保护区和青狮潭水源林保护区以及下游的阳朔县金宝乡附近。流域多年平均降雨量呈现辐射分布，由桂林城区与灵川县区交界至兴安县城范围为强降雨中心，向西北和东南对向辐射，最低值出现在流域下游的阳朔县南部地区。降雨空间分布与流域表层土壤排水能力空间格局的不对称性，势必会使流域地表形成不同程度的降雨径流，引发不同程度的洪涝风险。

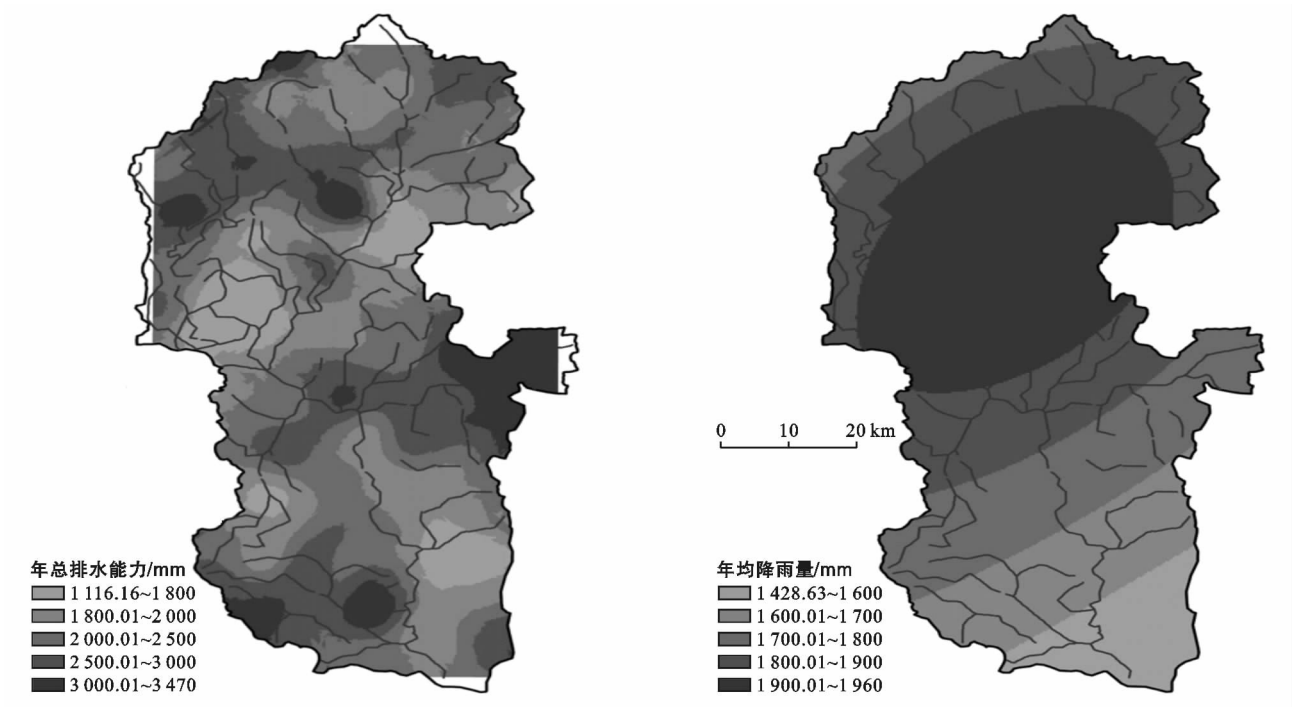


图 1 研究流域年排水能力和年均降雨量的空间分布

3.2 流域洪涝灾害发生风险评价

通过对流域表层土壤单日排水能力和多年日平均降雨量的叠加分析发现(图 2)，单日排水能力小于多年日平均降雨量的区域主要为漓江上游的桂林城区、临桂新区和灵川县城区 3 区交界范围、兴安县城区与榕江镇交接范围，其中以桂林城区、临桂新区与灵川县城区 3 区交界范围最为明显，而该地区则为多年平均降雨量最大的区域。在连续降雨及降雨强度

过大时,由于该地区表层土壤排水能力最弱,为极易发生洪涝风险区域。

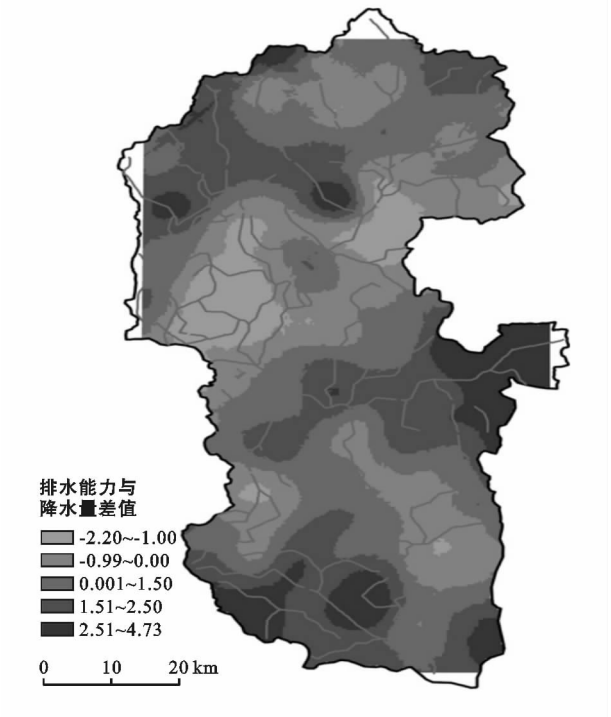


图 2　研究区易发生洪涝灾害风险分布

本研究中,极易发生洪涝灾害的区域主要分布在以建设用地为主的城(镇)区(附图 2)。通过增加如道路、公园等不透水层的城镇扩张,降低了原有区域景观对洪涝的调节能力[16]。不透水层的增加,减少了表层土壤的下渗能力、增加地表径流从而增加了洪涝发生的风险[17]。因此,加上强降雨和不透水层的作用,漓江上游的桂林城区、临桂新区和灵川县城区 3 区交界范围为极易发生洪涝风险区域。

4　讨 论

桂林城区 2017 年 7 月 2 日监测的降雨量为 81.7 mm,根据 Peng 等[18]研究中国大陆蒸散发而推荐适用的蒸散发估算公式估算当日桂林城区附近的蒸散发能力为 2.9 mm。有效降雨量(78.8 mm)远大于漓江上游桂林城区和灵川县城区交界范围的表层土壤单日排水能力(≤6 mm)。所以,加上前期连续的降雨以及 7 月 2 日的强降雨,导致包括桂林市区、兴安、阳朔以及龙胜和资源在内的多个县城区出现洪涝灾害。

本研究基于流域表层土壤最大最小持水量的差值与降雨量的叠加分析探讨漓江流域洪涝灾害发生的空间分布,考虑了流域的下垫面特征以及气候变化(降雨)相互作用的影响。流域下垫面尤其森林植被的作用,可以减少因暴雨而产生的地表径流,增加地下水[19-20],从而减缓洪涝灾害的发生。因此,只针对降雨的形成而没有考虑流域下垫面对降雨的缓冲作用等生态功能影响往往会高估洪涝灾害的发生。

本研究只考虑了流域表层的土壤排水能力和洪涝发生的关系,没有考虑整个土壤层的水源涵养能力、土壤前后储水变化以及其他流域生态水文功能等对洪涝灾害的影响。流域土壤的下渗形成地下水以及壤中流,在一定程度上也减缓地表径流的产生。此外,不同土地利用类型的空间组成结构和分布格局,都会在一定程度上影响流域的生态水文过程[21]。如建设用地的不透水层增加了地表径流的产生从而加速了洪涝灾害风险的发生[22]。因此,在以后的洪涝风险评价时,应结合整个流域系统的生态水文过程与涵养水源功能探讨全球变化下区域洪涝灾害发生的预警和防范,并量化引起流域洪涝灾害风险发生的降雨量大小。针对洪涝灾害的发生,地方政府也在易发生洪涝灾害上游地区,修建了或正在修建水库,如 1958 年开始动工而建成的青狮潭水库、2014 年完成的川江水库、2015 年投入使用的小榕江水库以及在正建设的斧子口水库,期望在一定程度上会减缓该地区的洪涝灾害发生并补给下游旱季生态需水量。

5　结 论

(1) 基于最大最小持水量的表层土壤排水能力其空间变异程度相比流域多年平均降雨量大,易受外界随机性因素影响,空间依赖性降低。

(2) 桂林市区与灵川县城区交界范围为极易发生洪涝区域,而漓江流域中上游的猫儿山国家级自然保护区、海洋山和青狮潭水源林保护区为不易发生洪涝区域。

(3) 考虑流域下垫面生态水文过程和气候(降雨)变化相结合的方法可以用来预测和划分流域洪涝灾害发生可能及其空间分布格局。

[参 考 文 献]

[1] 陈莹,尹义星,陈兴伟. 19 世纪末以来中国洪涝灾害变化及影响因素研究[J]. 自然资源学报,2011,26(12):2110-2120.

[2] 段光耀,赵文吉,宫辉力. 基于遥感数据的区域洪涝风险评估改进模型[J]. 自然灾害学报,2012,21(4):57-61.

[3] Kellens W, Terpstra T, De Maeyer P. Perception and communication of flood risks: A systematic review of empirical research [J]. Risk Analysis, 2013, 33(1): 24-49.

[4] Yan Hongxiang, Moradkhani H. Toward more robust extreme flood prediction by Bayesian hierarchical and multimodeling [J]. Natural Hazards, 2016, 81(1): 203-225.

[5] 刘福州,白先达.桂林漓江致洪暴雨分析[J].安徽农业科学,2011,39(15):9090-9092.

[6] Schumann G J P, Andreadis K M. A method to assess localized impact of better floodplain topography on flood risk prediction [J]. Advances in Meteorology, 2016, DOI:10.1155/2016/6408319.

[7] Arnell N W, Gosling S N. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale [J]. Climatic Change, 2016,134(3):387-401.

[8] Zhou Qianqian, Leng Guoyong, Feng Leyang. Predictability of state-level flood damage in the conterminous United States: The role of hazard, exposure and vulnerability [J]. Scientific Reports, 2017,7: DOI:10.1038/s41598-017-05773-4.

[9] 国家林业局. LY/T1210-1275-1999 森林土壤分析法:中华人民共和国林业行业标准[S].北京:中国标准出版社,1999.

[10] 姚月锋,曾丹娟,黄玉清,等.漓江流域表层土壤水分物理性质空间异质性[J].水科学进展,2016,27(5):696-704.

[11] Lin Shyi-duan, Wood E F, Troch P A, et al. Comparisons of remotely sensed and model-simulated soil moisture over a heterogeneous watershed [J]. Remote Sensing of Environment, 1994,48(2):159-171.

[12] Korres W, Reichenau T G, Fiener P, et al. Spatio-temporal soil moisture patterns: A meta-analysis using plot to catchment scale data [J]. Journal of Hydrology, 2015, 520: https: // doi. org/10. 1016/j. jhydrol. 2014.11.042.

[13] 汤国安,杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析试验教程[M].北京:科学出版社,2006.

[14] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Fieldscale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,58(5):1501-1511.

[15] 李元寿,王根绪,丁永建,等.青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J].水科学进展,2008,19(1):61-67.

[16] Gilroy K L, McCuen R H. A nonstationary flood frequency analysis method to adjust for future climate change and urbanization [J]. Journal of Hydrology, 2012,414/415(2):40-48.

[17] Du S, Van Rompaey A, Shi P, et al. A dual effect of urban expansion on flood risk in the Pearl River Delta (China) revealed by land-use scenarios and direct runoff simulation [J]. Natural Hazards, 2015, 77(1): 111-128.

[18] Peng Lingling, Li Yi, Feng Hao. The best alternative for estimating reference crop evapotranspiratin in different sub-regions of mainland China [J]. Scientific Reports, 2017,7:DOI:10.1038/s41598-017-05660-y.

[19] Sheridan J, Lowrance R, Bosch D. Management effects on runoff and sediment transport in riparian forest buffers [J]. American Society of Agricultural Engineers, 1999,42(1):55-64.

[20] Matteo M, Randhir T, Bloniarz D. Watershed-scale impacts of forest buffers on water quality and runoff in urbanizing environment [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006,132(3): 144-152.

[21] Blöschl G, Ardoin-Bardin S, Bonell M, et al. At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? [J]. Hydrological Processes, 2007,21(9):1241-1247.

[22] Shuster W, Bonta J, Thurston H, et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review [J]. Urban Water Journal, 2005,2(4):263-275.