

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0146

吴泽宁, 申言霞, 王慧亮. 基于能值理论的洪涝灾害脆弱性评估[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 09-14, 32. WU Z N, SHEN Y X, WANG H L. Assessment of vulnerability to flood disasters based on emergy theory[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 09-14, 32. (in Chinese)

基于能值理论的洪涝灾害脆弱性评估

吴泽宁, 申言霞, 王慧亮

(郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 在搜集整理 2015 年郑州市暴雨洪涝资料的基础上, 从生态学的角度, 运用能值分析方法评估区域洪涝灾害脆弱性。进而使用能值作为统一的度量尺度, 以能值评价的结果和表征区域洪涝灾害脆弱性的能值指标为基础, 借助地理信息系统(GIS)对郑州市洪涝灾害的脆弱性进行空间差异分析。结果表明郑州市洪涝灾害脆弱性的空间分布差异明显, 大致呈现从中部向四周递减的趋势。新密市的脆弱性最高, 其次是市区, 脆弱性最低的是新郑市。结论表明, 在暴露度相同的条件下, 有效提高系统的适应能力是降低脆弱性的关键。

关键词: 洪涝灾害; 脆弱性; 能值分析; GIS; 郑州市

中图分类号: TV4 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Assessment of vulnerability to flood disasters based on emergy theory

WU Zening, SHEN Yanxia, WANG Hui liang

(School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: On the basis of the rainstorm and flood data of Zhengzhou in 2015, we applied the emergy analysis method to evaluate the regional vulnerability to flood disasters from the ecological perspective. The emergy was then considered as a normalized basis. Based on the results of emergy evaluation and the emergy index representing the regional vulnerability to flood disasters, we used the geographic information system (GIS) to analyze the spatial difference of vulnerability to flood disasters in Zhengzhou. Results showed that there were obvious differences in the spatial distribution of vulnerability to flood disasters. The vulnerability of Xinmi was the highest and that of Xinzheng was the lowest. In a whole, the vulnerability to flood disasters in Zhengzhou City tended to decrease from the middle to the periphery. Improving the adaptability of the system effectively is the key to reducing the vulnerability.

Key words: flood disaster; vulnerability; emergy analysis; GIS; Zhengzhou City

洪涝灾害是常见的灾害之一, 影响范围广, 造成损失大。受季风气候的影响, 我国降雨较为集中, 洪涝灾害历来是一个十分严重的问题^[1]。近年来, 洪涝灾害脆弱性评价成为城市水文学和灾害学研讨的重点。剖析洪涝灾害脆弱性的时空分布特征是灾害

风险评估及管理的重要内容, 评价脆弱性能够为灾害预报预警、防洪减灾工作提供参考。目前国内外学者大多采用指标法评估脆弱性^[2]。Szafsztein 和 Sterr^[3]提出了脆弱性综合指数(CVI), 涉及自然和社会经济条件 16 个变量; Ozcan 和 Musaoglu^[4]应

收稿日期: 2018-08-10 修回日期: 2018-09-27 网络出版时间: 2018-10-22
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181018.1516.006.html>
基金项目: 国家自然科学基金重点基金(51739009)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51739009)

作者简介: 吴泽宁(1963-), 男, 河南光山人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zeningwu@zzu.edu.cn

通讯作者: 王慧亮(1982-), 男, 河南安阳人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: wanghui liang@126.com

用层次分析法(AHP)确定DTM、坡度、相位等属性的权重,从而得到易遭受灾害的地区分布图;Ouma和Tateishi^[5]也采用层次分析法确定决策参数(如降雨、海拔、土地利用等)的权重,以构建洪涝灾害脆弱性分布图;姜蓝齐等^[6]应用层次分析法确定各指标的权重,并采用加权综合法得到综合评价指数,最后借助GIS的空间分析功能实现洪涝风险区划;李畅等^[7]使用熵权法赋予各指标权重,建立脆弱性评估模型,得到荆州市的洪涝灾害脆弱性评价结果。

这些研究通常假定各指标是相互独立的,并按重要性确定权重,得到脆弱性评估指数,却忽略了指标间的潜在关系,割裂了脆弱性各组成部分之间的联系,无法准确地评估洪涝灾害风险。此外,在以往的研究中,表征脆弱性的指标体系不一致,无法对不同性质的指标进行比较。为弥补以往研究的缺陷,拟采用生态经济学中的能值理论和分析方法^[8]评估洪涝灾害脆弱性。该法将不同类别、不可比较的能量转换成同一标准能值进行比较,从而定量分析自然系统和人类社会经济系统、资源与环境的切实价值以及相互之间的关系^[9]。本文在能值概念分析的基础上,建立了一个系统的脆弱性评估框架,基于能值理论分析脆弱性的组成因子,并应用能值指标评估区域洪涝灾害脆弱性,最后借助GIS对洪涝灾害的脆弱性进行空间差异分析。将该分析框架应用于郑州市,评估其洪涝灾害脆弱性,进而确定研究区中易遭受洪涝灾害损失的区域,为防洪减灾提供参考。

1 洪涝灾害脆弱性评估的能值框架

1.1 脆弱性评估的能值基础

20世纪80年代,美国著名生态学家Odum提出了能值理论与方法,为生态和经济系统的定量分析开辟了新的研究方向^[8]。能值指一种流动或储存的能量中所含另一种类别能量的数量,不同品质的能量之间存在一个转换关系——能值转换率,即形成每单位物质或能量所含有的另一种能量的量^[10]。由于各种能量均直接或间接来自太阳能,因此能值分析以太阳能为基准,将系统中不同类别、不可比较的能量经太阳能转换率转换成同一标准的太阳能值,转换公式为^[9]:

$$E = \tau \times B \quad (1)$$

式中: E 为能值(sej); τ 为能值转换率(sej/J或sej/g); B 为能量或物质的量(J/g)。

由自然-农业系统和城市系统组成的洪涝灾害脆弱性的能量系统图^[11]是脆弱性各组成要素之间因果关系的基础,表明了生态系统和经济系统之间

的能量和物质流的差异,见图1。当降雨发生时,雨水中储存的能量(J1)可能使该地区处于危险中。降雨量扣除植物截留、蒸发、下渗、填洼等损失后,形成地表径流(J2),累积地表径流储存的能量表示该区的暴露度。J3代表暴露强度,是径流量(J2)和降雨量(J1)储存的能值比。J4和J5分别表示当极端天气事件发生时自然-农业系统和城市系统损失的能量,两者损失的总能量用J6表示。系统中储存的资产越多,发生洪涝灾害的可能性越大。极端天气事件对周边环境产生影响,环境的改变使区域受到一定程度的影响,用潜在影响(J7)表示,其与暴露强度(J3)和敏感性(J6)有关。影响脆弱性的因素除了自然因素还包括社会经济因素(J9)和人口因素(J8),它们共同反映系统的适应能力(J10),表述地区对灾害的应对能力。利用适应能力和潜在影响可以评估洪涝灾害的脆弱性(J11)。能量流符号的具体释义见表1。

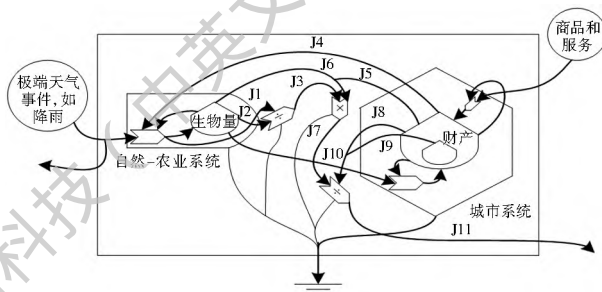


图 1 洪涝灾害脆弱性的能量系统

Fig. 1 The energy system of vulnerability to flood disasters

表 1 洪涝灾害脆弱性的能流释义

Tab. 1 The energy flow interpretation of vulnerability to flood disasters

能量流	名称	释义
J1	潜在暴露度	降雨量
J2	暴露度	径流量
J3	暴露强度	J2/ J1
J4	自然-农业系统的敏感性	由于发生极端天气事件所造成的自然-农业系统的财产损失
J5	城市系统的敏感性	由于极端天气事件所造成的城市系统的财产损失
J6	敏感性	J4+ J5
J7	潜在影响	J6 × J3
J8	人口指标	代表人口因素的能量流
J9	社会和经济指标	代表社会和经济因素的能量流
J10	适应能力	J8+ J9
J11	脆弱性	J7/ J10

1.2 脆弱性评估的模型

脆弱性指系统受到不利影响的程度,通常由暴露度、敏感性和适应能力组成^[12]。分析脆弱性的组成因子,了解各组成要素之间的关系,并以此为基础

提出表征洪涝灾害脆弱性的能值指标,准确评估区域洪涝灾害的脆弱性。

1.2.1 暴露度、敏感性和适应能力评估

(1) 暴露度(L)。

暴露度指区域与灾害(如洪水、飓风)接触的程度^[11]。以洪水为例,将累积径流的总能值视为一个地区的暴露度。在一次洪水事件中,易涝地区的暴露度较高。暴露度还受研究区植被覆盖和土壤水文特性的影响。显然,与非城市化地区相比,城市化区域的不透水面积多,雨水下渗量少,导致径流量增加^[13]。基于此,拟采用径流曲线数模型(SCS-CN)计算径流量^[14]。该模型能客观反映土壤类型、土地利用方式及前期土壤含水量对降雨径流的影响,且模型结构简单、输入参数少,在水土保持与防洪、城市水文及无资料地区的多种水文问题中得到广泛应用,并取得了较好的效果^[15-17]。累积径流量与相应能值转换率的乘积即为区域的暴露度。

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2)$$

其中

$$S = \left[\frac{1000}{C} - 10 \right] \times 25.4 \quad (3)$$

$$L = Q \times \tau \quad (4)$$

式中:Q为径流深(mm);P为降雨量(mm);S为潜在蓄水能力(mm);C为径流曲线数;L为暴露度(sej);其余符号及意义同前。

(2) 敏感性(M)。

敏感性指系统受到极端天气事件影响的程度,

通常用受灾区的累积资产量来表示^[18]。将敏感性视为系统对极端天气事件的响应,因此在一次暴雨洪涝灾害中,区域的敏感性不仅取决于洪水的大小,而且与受灾区域的特征有关。

在生态系统中,能量流具有层次结构,即不同系统产生的能量具有不同的层次^[19]。以生态系统的能量层次为基础,Odum和Brown等^[20]将受灾地区划分不同的能量层次,评估洪涝灾害脆弱性。不同土地利用类型所属的能量层次不同,受洪水影响的程度也有差异,因此根据土地的能值功率密度^[9]进行敏感性分析。经济活动越密集,土地的能值功率密度越高,如城市规划区的商业和住宅用地,往往具有更高的能值功率密度^[21]。在此基础上,用不同土地利用类型的所含的能量和表示该区的敏感性。

$$M = \rho \times A \quad (5)$$

式中:M为区域的敏感性(sej);ρ为不同土地利用类型的能值功率密度(sej/m²);A为不同土地利用类型的面积(m²)。

(3) 适应能力(N)。

系统的脆弱性除与暴露度有关外,很大程度上取决于系统的适应性影响。适应性指变化环境下所采取的不断学习与调整的系统过程,该过程可以充分利用有益事件,减轻灾害损失^[22]。适应性是对于特定环境而言的,不同地区和群体的适应性有差别,例如城市地区的适应性高于农村地区,成年人的适应性高于老人和小孩^[23]。从社会、经济和人口三方面因素评估适应能力,具体解释见表2。

表2 影响适应能力的因素

Tab.2 Factors affecting adaptability

影响因素	具体分类	释义
社会因素	万人拥有医疗人员	医护人员/(地区总人数/10000),反映当地的医疗卫生水平
	万人拥有在校大学生数	在校大学生人数/(地区总人数/10000),反映人口的整体素质
经济因素	地均GDP	区域国民生产总值/区域面积,表征该地区的经济效益水平,与适应能力呈正相关
	社会固定资产投资总额	反映城市的固定资产投资情况,与适应性呈正相关
人口因素	人口密度	年末常住人口/区域面积,人口分布越稠密,适应性越差
	14岁以下和65岁以上人口所占的比重	14岁以下和65岁以上人口/常住人口,该部分人口为敏感群体,对自然灾害的适应性较差

1.2.2 能值指标

为了解脆弱性各组成要素之间的联系,准确评估区域洪涝灾害脆弱性,以暴露度、敏感性和适应能力为基础,提出了表征洪涝灾害脆弱性的能值指标,具体解释如下。

(1) 潜在影响指数(I)。

潜在影响表示当发生极端天气事件时,系统可能受到的影响^[24]。较高的潜在影响会增加洪涝灾害的脆弱性。潜在影响指数与受灾区域的暴露强度

和敏感性有关,暴露强度是径流量和降雨量所储存的能值比。

$$I = i \times M \quad (6)$$

$$i = \frac{L}{q} \quad (7)$$

式中:I为潜在影响指数(sej);i为暴露强度,常量;q为潜在暴露度(sej);其余符号及意义同前。

(2) 脆弱性指数(V)。

脆弱性指数是潜在影响和适应能力的比值,它

反映了发生极端天气事件时,系统所遭受的损失^[25]。脆弱性与系统的潜在影响呈正相关,与适应能力呈负相关。

$$V = \frac{I}{N} \quad (8)$$

式中: V 为脆弱性指数, 常量; 其余符号及意义同前。

2 实例应用

2.1 研究区域概况与数据来源

郑州是河南省省会, 位于东经 $112^{\circ}42' - 114^{\circ}14'$, 北纬 $34^{\circ}16' - 34^{\circ}58'$, 地处河南省中部偏北。该区为温带大陆性气候, 年平均降水量 625.9 mm, 降水年内分配不均, 夏季降水多, 冬季降水少。作为河南省的政治、经济、文化中心, 郑州市辖 7 个县、市(见图 2), 总面积约为 $7\,297.48\text{ km}^2$, 是河南省人口最稠密的地区。据统计资料, 2015 年末总人口约为 956.9 万人, 其中城市人口 666.9 万人, 农村人口 290 万人, 城镇化水平达 70%。该市北临黄河, 历史上黄河多次决堤, 在黄河泥沙的冲积下, 形成了黄河冲积平原。由于地势平坦, 高差小, 加上季风活动异常, 使得郑州市成为洪灾潜在的高风险区, 是全国的重点防洪城镇之一。统计显示郑州市近十年来每年因遭受暴雨洪涝灾害而产生的损失超过 2 亿元, 暴雨洪涝灾害对郑州市经济发展影响较大, 已成为制约郑州市经济进一步发展的重要原因。

本研究所使用的降雨径流数据均来自《郑州市 2015 年水资源公报》, 土地利用数据源于郑州市土地利用总体规划; 由《郑州市统计年鉴 2015》可得到各区县的社会、经济和人口数据; 根据文献

[9, 26] 可获得郑州市 2015 年能值转换率及能值货币比率数据。



图 2 郑州市行政区划

Fig.2 The administrative divisions of Zhengzhou

2.2 结果分析

根据所收集的资料, 按照第 1.2.1 节所述方法计算暴露度、敏感性及适应能力, 计算结果见表 3 至表 5。

根据上述计算结果可得到以下结论。

(1) 暴露度与累积径流有关, 累积径流储存的能值越大, 暴露度越高。从表 3 中可以看出: 巩义市的暴露度较高, 原因是该市的年降雨量多, 产生的累积径流量大; 其次是登封市; 而累积径流量较少的市区暴露度最低。

(2) 利用能量层次的概念分析研究区对洪水的敏感性, 以土地利用的能值功率密度为基础, 计算郑州市各区不同土地利用类型的能值含量。能值较高的区域(如住宅区、商业区)敏感性较高, 遭受洪涝灾害的风险较大。从表 4 中可以看出: 与其他 6 个地区相比, 市区的商业区和住宅区所占比重较大, 敏感性较高, 易受到洪涝灾害的威胁; 而自然-农业用地较多的地区(如巩义市)的敏感性较低。

表 3 暴露度计算结果

Tab.3 Exposure calculation results

指标	市区	中牟县	巩义市	荥阳市	新密市	新郑市	登封市
累积径流/亿 m^3	5.87	6.45	7.45	4.93	6.16	4.77	6.85
暴露度/ 10^{20} sej	2.67	3.67	4.23	2.80	3.50	2.71	3.89

表 4 敏感性计算结果

Tab.4 Sensitivity calculation results

区域	耕地 /万 m^2	能值 / 10^6 sej	林地 /万 m^2	能值 / 10^5 sej	工矿用地 /万 m^2	能值 / 10^9 sej	居民用 地/万 m^2	能值 / 10^{10} sej	交通 /万 m^2	能值 / 10^9 sej	水域 /万 m^2	能值 / 10^8 sej	敏感性 / 10^{26} sej
市区	20 335.09	2.50	6 393.45	3.86	39 882.16	7.25	12 013.52	1.35	6 746.45	1.91	4 815.10	1.30	2.27
中牟县	73 605.24	9.05	16 437.6	9.93	11 598.49	2.11	11 598.79	1.31	5 663.30	1.61	7 805.80	2.11	1.68
巩义市	39 895.21	4.91	17 803.11	10.76	8 368.10	1.52	10 978.25	1.24	2 048.34	0.58	4 108.09	1.11	1.45
荥阳市	47 306.36	5.82	8 539.04	5.16	10 290.45	1.87	10 245.15	1.16	3 906.39	1.11	6 665.97	1.80	1.46
新密市	45 838.56	5.64	11 442.24	6.92	7 063.19	1.29	17 979.57	2.03	2 114.29	0.60	368.72	0.10	2.22
新郑市	50 542.18	6.22	5 890.72	3.57	9 629.03	1.75	11 006.63	1.24	4 277.54	1.21	1 500.25	0.41	1.54
登封市	45 956.01	0.57	23 457.28	14.17	5 806.00	1.05	13 501.69	1.53	3 545.09	1.01	1 386.51	0.37	1.73

(3) 对适应能力的评估的目的是了解受灾区域对洪水的能力。表 5 给出了郑州市不同区域的适应能力。市区经济发达, 医疗设施齐全, 人口受教育程度高, 具有较强的适应能力; 其次是中牟县; 而经济水平

相对落后的地区, 如登封市, 对洪水的适应能力较弱。

以暴露度、敏感性和适应能力的计算结果为基础, 根据第 1.2.2 节所述方法计算表征洪涝灾害脆弱性的能值指标, 见表 6。

表 5 适应能力计算结果
Tab. 5 Calculation results of adaptability

区域	万人拥有医护人员/人	能值 / 10 ²² sej	万人拥有在校学生/人	能值 / 10 ²² sej	固定资产投资/亿元	能值 / 10 ²² sej	地均 GDP	能值 / 10 ²² sej	适应能力 / 10 ²² sej
市区	148	1.98	1 586.38	3.71	1 179.2	7.57	23 410.04	1.50	2.95
中牟县	52	0.70	2 516.6	5.88	247.31	1.59	3 891.13	0.25	2.91
巩义市	50.99	0.68	1 064.68	2.498	364.06	2.34	5 583.32	0.36	2.48
荥阳市	45.24	0.61	1 165.19	2.72	357.21	2.29	5 514.92	0.35	2.46
新密市	46.26	0.62	1 419.76	3.32	345.2	2.212	5 592.72	0.36	2.58
新郑市	45.45	0.61	1 557.6	3.64	344.6	2.21	6 837.3	0.44	2.69
登封市	48.48	0.65	1 464.72	3.42	310.13	1.99	3 705.33	0.24	2.46

表 6 郑州市各区县脆弱性评估结果
Tab. 6 Vulnerability assessment results of the districts in Zhengzhou

指标	市区	中某县	巩义市	荥阳市	新密市	新郑市	登封市
潜在影响/ 10 ²⁶ sej	1.82	1.32	1.15	0.86	1.30	0.75	1.03
脆弱性/ 10 ²	7.71	5.78	5.85	5.92	8.60	5.72	7.05

根据表 6 的计算结果, 借助 GIS 工具将郑州市各区县的脆弱性评估结果展示出来。

(1) 潜在影响与暴露度和敏感性有关, 它表示当发生极端天气事件时, 系统可能遭受的损失。图 3 展示了洪水对郑州市各区县的潜在影响。由于市区的人口较为密集, 经济发展速度快, 累积资产较多, 当发生洪水时受到的潜在影响高于其他地区; 而经济发展速度缓慢, 人口分布相对稀疏的地区, 如新郑市, 其潜在影响指数相对较低。

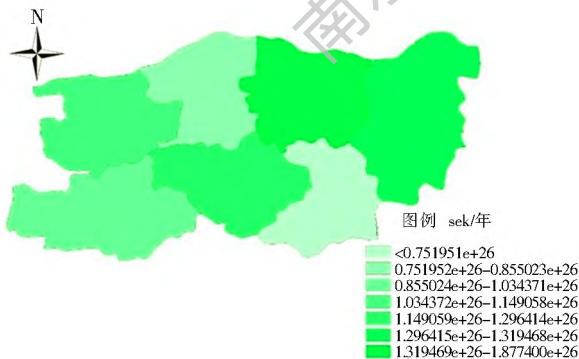


图 3 潜在影响评估结果

Fig. 3 Potential impact assessment results

(2) 系统的脆弱性能值越大, 脆弱性越高, 即在暴雨洪涝灾害相同的条件下, 所受到的影响越严重。由图 4 可以看出, 新密市的脆弱性指数最高, 其次是市区, 脆弱性指数最低的是新郑市。2015 年郑州市暴雨洪涝灾害的脆弱性从中部向周边呈递减趋势。

新密市脆弱性较高的原因是: 与其他地区相比, 该市经济发展速度较快, 防灾系统不稳定; 而源源不断的人口向市区融入是造成郑州市区脆弱性较高的主要原因。郑州市作为洪灾潜在的高风险区, 已有大量研究对其进行脆弱性评估, 虽然这些方法存在不完善的地方, 但也能为本文的脆弱性评估结果提供一定的借鉴意义。如刘梦贞^[2]在其硕士论文中采用模糊综合评价法分别评估郑州市 1999 年、2007 年和 2013 年的洪涝灾害脆弱性, 结果表明市区始终具有高脆弱度指数, 但随着经济发展, 适应能力增强, 脆弱性有所降低, 这与本文得到的结果一致。

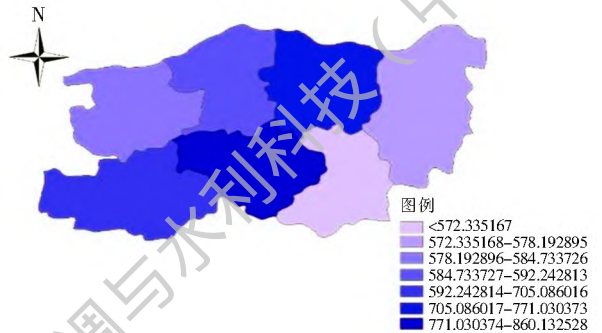


图 4 脆弱性评估结果

Fig. 4 Vulnerability assessment results

3 结语

从生态学的角度出发, 利用统一的能值单位评

估洪涝灾害的脆弱性,为不同区域的脆弱性研究提供了可比较的依据。将该方法应用于郑州市,结果显示市区经济发达,累积资产多,具有较高的潜在影响,但由于其适应性指数高,脆弱性评估结果比预期低。然而,具有高潜在影响指数且经济发展迅速的地区(如新密市),脆弱性指数较高。而潜在影响指数低,适应能力较强的地区(如新郑市)具有较低的脆弱性指数。通过研究发现,提高系统的适应能力能够有效降低洪涝灾害的脆弱性。能值理论在郑州市的成功试验为其他地区的脆弱性评估提供了一定的借鉴意义。

运用生态经济学中的能值理论评估洪涝灾害脆弱性是一个新的探索,目前还停留在方法层面上,在实际应用中还存在很多不足之处。如由于经济社会发展情况、气象水文和自然环境随时间不断演变,脆弱性指标会发生变化,只评估 2015 年的洪涝灾害脆弱性存在不确定性。此外,以郑州市各个行政区为单元进行评估,所得到的结果较为单一,获取细分分辨率、多时空尺度的数据进行洪涝灾害脆弱性评估将是本课题今后工作的重点。

参考文献(References):

- [1] 胡俊锋,杨月巧.基于气象水文要素的洪涝灾害损失评估[J].南水北调与水利科技,2014,12(1):26-31.(HU J F, YANG Y Q. Damage assessment of flood and waterlogging disaster based on meteorological and hydrological factors[J]. South or North Water Transfers and water science & Technology, 2014, 12(1): 26-31. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01026.
- [2] 刘梦贞.城市暴雨洪涝灾害脆弱性模糊综合评价研究[D].郑州:河南大学,2016.(LIU M Z. Vulnerability assessment of storm flood disasters based on fuzzy comprehensive evaluation method [D]. Zhengzhou: Henan University, 2016. (in Chinese))
- [3] SZLAFSZTEIN C, STERR H. A GIS based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Par , Brazil[J]. Journal of Coastal Conservation, 2007, 11(1): 53-66. DOI: 10.1007/S11852-007-0003-6.
- [4] OZCAN O, MUSA OGLU N. Vulnerability analysis of floods in urban areas using remote sensing and GIS[C]. In Proceedings of the 30th EARSeL symposium: Remote sensing for science education and culture, 2010: 379-386.
- [5] OUM A Y O, TATEISHI R. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multiparametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment[J]. Water, 2014, 6(6): 1515-1545. DOI: 10.3390/W6061515.
- [6] 姜蓝齐,马艳敏,张丽娟,等.基于GIS的黑龙江市洪涝灾害风险评估与区划[J].自然灾害学报,2013,22(5):22-24.(JIANG L Q, MA Y M, ZHANG L J, et al. Assessment and zoning of flood disaster in Heilongjiang Province based on GIS[J]. Journal of natural disasters, 2013, 22(5): 22-24. (in Chinese))
- [7] 李畅,马滔,石倩,等.洪灾社会脆弱性熵权法评价及其时间序列分析—以2001-2002年荆州市为例[J].灾害学,2015,30(3):110-117.(LI C, MA T, SHI Q, et al. Flood social vulnerability assessment based on entropy method and its time series analysis: a case of jingzhou city from 2001 to 2012[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 110-117. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.03.021.
- [8] ODU M H T. Environmental accounting emery and environmental decision making[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [9] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳,等.生态经济系统能值分析[M].北京:化学工业出版社,2002:167-174.(LAN S F, QIN P, LU H F, et al. Emery analysis of eco economic system [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2002: 167-174. (in Chinese))
- [10] HUANG S L, CHANG L F, YEH C T. How vulnerable is the landscape when the typhoon comes? An emery approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 100(4): 415-417. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.01.019.
- [11] ADGER, W N. Vulnerability [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 268-281. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.
- [12] CHANG L F, HUANG S L. Assessing urban flooding vulnerability with an emery approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 143: 11-24. DOI: 10.1016/J.landurbplan.2015.06.004.
- [13] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战(Ⅱ)城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):594-605.(ZHANG J Y, SONG X M, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment Ⅱ: Hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.04.020.
- [14] 王冬,李丽,王加虎,等.径流曲线数(SCS-CN)模型在洪水预报中的应用研究[J].中国农村水利水电,2017(8):108-112.(WANG D, LI L, WANG J H, et al. Application of SCS-CN model in flood forecasting [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(8): 108-112. (in Chinese))
- [15] 王敏,许彦刚,房海军,等.基于改进的SCS模型的城市径流预测系统研究[J].水电能源科学,2012,30(3):20-22.(WANG M, XU Y G, FANG H J, et al. Urban runoff forecasting system based on improved SCS model[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3): 20-22. (in Chinese))
- [16] 符素华,王红叶,王向亮,等.北京地区径流曲线数模型中的径流曲线数[J].地理研究,2013,32(5):797-807.(FU S H, WANG H Y, WANG X L, et al. The runoff number of SCS-CN method in Beijing [J]. Geographical Research, 2013, 32(5): 797-807. (in Chinese))
- [17] MISHRA S K, SINGH V P. Special issue on soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology introduction [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(11): 1157-1157. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000694.

(下转第 32 页)

- 征分析及其与 ENSO 的关系[J]. 地理学报, 2018, 73(1). (SHAN L J, ZHANG L P, ZHANG Y J, et al. Characteristics of dry wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and their relationship with ENSO[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1). (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlx201801003.
- [11] WU Z W, LI J P, HE J H, et al. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid and lower reaches of the Yangtze River[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(5): 1-1.
- [12] WU Z W, LI J P, HE J H, et al. Large scale atmospheric singularities and summer long cycle droughts floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 2027-2034.
- [13] 何慧, 廖雪萍. 华南地区 1961-2014 年夏季长周期旱涝急转特征[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 130-141. (HE H, LIAO X P. Features of long cycle drought flood abrupt alternation in South China during summer in 1961-2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 130-141. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlx201601010.
- [14] 张水锋, 张金池, 等. 基于径流分析的淮河流域汛期旱涝急转研究[J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 679-686. (ZHANG S F, ZHANG J C. Drought flood abrupt alternation based on runoff in the Huaihe River Basin during rainy season[J]. Journal of Lake Science, 2012, 24(5): 679-686. (in Chinese))
- [15] 中国气象数据网[DB/OL]. http://data.cma.cn/site/index.html, 2017-11. (China Meteorological Data Network[DB/OL]. http://data.cma.cn/site/index.html, 2017-11. (in Chinese))
- [16] 王景才, 徐蛟, 蒋陈娟, 等. 1960-2014 年淮河上中游流域年降水和主汛期降水的时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 51-58. (WANG J C, XU J, JIANG C J, et al. Temporal and spatial characteristics of annual and main flood season precipitation in upper and middle reaches of Huaihe River Basin between 1960 and 2014[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 51-58. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.008.
- [17] 李红梅, 周天军, 宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 358-370. (LI H M, ZHOU T Y, YU R C. Analysis of July-August daily precipitation characteristics variation in eastern China during 1958-2000. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 358-370. (in Chinese))

(上接第 14 页)

- [18] USDA (United States Department of Agriculture). Urban hydrology for small watersheds[M]. 2nd ed. United States: Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, 1986.
- [19] HUANG S L, LAI H Y, LEE C L. Energy hierarchy and urban landscape system[J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 53, (1): 145-161. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00150-X.
- [20] ODOM H T, BROWN M T, WHITEFIELD L S, et al. Zonal organization of cities and environment: A study of energy systems basis for urban society [C]. A report to the Chiang Ching-Kuo Foundation for International Scholarly Exchange. Gainesville, FL: Center for Environmental Policy, 1995.
- [21] HUANG S L. Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis [J]. Journal of Environmental Management, 1998, 52(52): 39-51. DOI: 10.1006/jema.1997.0157.
- [22] 夏军, 石卫, 洪思, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 279-286. (XIA J, SHI W, HONG S, et al. Revisions on water resources vulnerability and adaption measures under climate change [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 279-286. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.019.
- [23] 左其亨. 水资源适应性利用理论及其在治水实践中的应用前景[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 18-24. (ZUO Q T. Theory of adaptive utilization of water resources and its application prospect in water control practice[J]. South to North Water Transfers and water science & Technology, 2017, 15(1): 18-24. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.01.004.
- [24] SMIT B, WANDEL J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability [J]. Global Environmental Change, 2006: 16(3): 282-292. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008.
- [25] LIN Y C, HUANG S L, BUDD W W. Assessing the environmental impacts of high altitude agriculture in Taiwan: A Driver-Pressure-State Impact Response (DPSIR) framework and spatial energy synthesis[J]. Ecological Indicators, 2013, 32(43): 4250. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.03.009.
- [26] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009. (LV C M. Research on ecological economic value of regional water resources based on energy theory [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2009. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1643958.