

岩溶山区分布式降雨入渗系数获取方法研究

——以丹水流域为例

冯琦

武汉智博创享科技股份有限公司

DOI:10.32629/eeep.v9i4.3167

[摘要] 降雨入渗系数是地下水资源评价与水循环研究中的关键参数,但在岩溶山区普遍存在资料匮乏的问题,传统方法难以有效获取其空间分布特征。针对该问题,本文以鄂西丹水流域为研究区,综合遥感(RS)与地理信息系统(GIS)技术,结合模糊综合评价方法与BP神经网络模型,构建了一种基于下垫面因子的分布式降雨入渗系数获取方法。首先提取土壤、岩性、坡度、降雨量、土地利用、植被覆盖及构造等关键影响因子,并建立模糊综合评价模型,获取流域降雨入渗综合影响因子;随后利用典型泉域监测数据计算集总式入渗系数,并进行空间分配,得到训练样本;最终通过BP神经网络实现对无资料区入渗系数的预测。结果表明,该方法能够有效反映降雨入渗的空间差异性,综合评价因子范围为0.5119–0.9671,模型预测精度较高。研究成果为岩溶山区地下水资源评价提供了新的技术路径。

[关键词] 降雨入渗系数; 遥感; GIS; 模糊综合评价; BP神经网络; 岩溶山区

中图分类号: P23 文献标识码: A

Research on the Method of Obtaining Distributed Rainfall Infiltration Coefficient in Karst Mountainous Areas: A Case Study of Danshui River Basin

Qi Feng

Wuhan Zhibo Chuangxiang Technology Co., Ltd

[Abstract] Rainfall infiltration coefficient is a key parameter in groundwater resource evaluation and water cycle research. However, there is a common problem of data scarcity in karst mountainous areas, and traditional methods are difficult to effectively obtain its spatial distribution characteristics. In response to this issue, this article takes the Dan River Basin in western Hubei Province as the research area, integrates remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) technologies, combines fuzzy comprehensive evaluation method and BP neural network model, and constructs a distributed rainfall infiltration coefficient acquisition method based on underlying surface factors. Firstly, key influencing factors such as soil, lithology, slope, rainfall, land use, vegetation cover, and structure are extracted, and a fuzzy comprehensive evaluation model is established to obtain the comprehensive influencing factors of rainfall infiltration in the watershed; Subsequently, using typical spring monitoring data, the lumped infiltration coefficient is calculated and spatially allocated to obtain training samples; Finally, the BP neural network was used to predict the infiltration coefficient of the data free area. The results indicate that this method can effectively reflect the spatial differences in rainfall infiltration, with a comprehensive evaluation factor range of 0.5119–0.9671, and the model has high prediction accuracy. The research results provide a new technical path for the evaluation of groundwater resources in karst mountainous areas.

[Key words] rainfall infiltration coefficient; Remote sensing; GIS; Fuzzy comprehensive evaluation; BP neural network; karst mountain area

1 引言

水循环推动物质与能量交换,降雨入渗是连接地表水与地

下水的关键环节,降雨入渗系数是水资源计算和水文模拟的关键参数。但在岩溶山区,因地形复杂、地质多变且监测站点少,

传统方法难以应用,入渗系数获取精度低。近年来,RS与GIS技术发展使大范围地表信息提取成为现实,下垫面因子对降雨入渗影响显著,基于多源数据的空间分析方法成为研究热点。BP神经网络适用于描述复杂水文过程中的多变量关系。基于此,本文提出融合RS、GIS、模糊综合评价与BP神经网络的方法获取岩溶山区分布式降雨入渗系数,并在丹水流域验证。

2 研究区概况

丹水流域位于湖北省西部,是清江一级支流,流域面积约503 km²。该区域交通便捷,有高速和铁路贯穿。研究区域地形起伏大,海拔100–2000 m,西高东低,以岩溶侵蚀地貌为主,含中山峡谷、沟谷及低山地貌等,复杂地形影响降雨入渗。研究区域碳酸盐岩广布,约占流域面积70%,岩溶发育强烈。主要地层为震旦系至第四系,寒武系和奥陶系碳酸盐岩是主要含水层。地下水有松散层孔隙水、岩溶水及基岩裂隙水,岩溶水占主导。岩溶裂隙和溶洞为降雨入渗提供通道,使入渗过程复杂且空间差异明显。

3 研究方法与数据

3.1 技术路线

本文技术路线如图所示。首先通过遥感与GIS提取下垫面因子;其次建立模糊综合评价模型获取入渗影响因子;再结合监测数据计算入渗系数并进行空间分配;最后利用BP神经网络进行预测,实现全流域分布式计算。

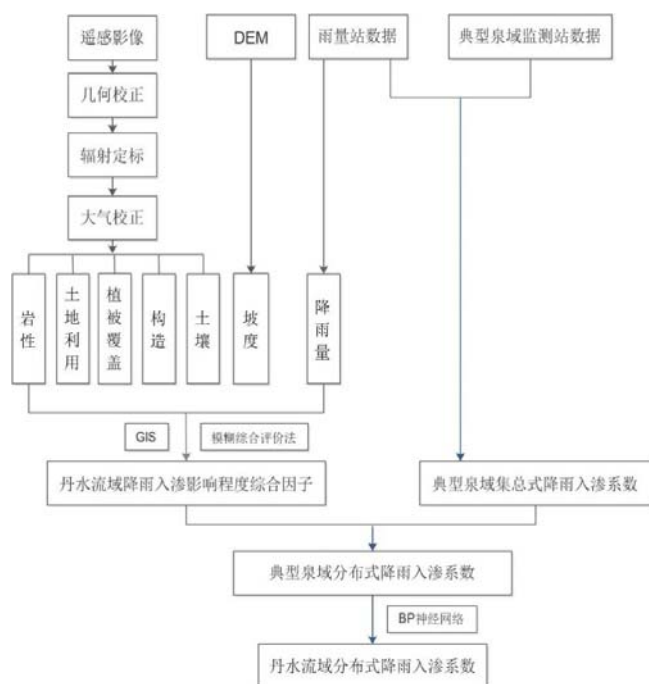


图1 技术路线图

3.2 下垫面因子提取与处理

基于DEM与遥感影像数据,提取坡度、土地利用、植被覆盖等信息。岩性与构造信息则通过地质图与空间分析获取。各因子均进行栅格化处理,以统一空间尺度。

3.3 模糊综合评价模型构建

模糊综合评价法通过构建评价指标体系,实现对多因素影响的量化分析。本研究用层次分析法(AHP)确定各因子权重,构建模糊隶属函数,对标准化处理后的各因子加权叠加,得到降雨入渗综合影响因子。通过AHP构建判断矩阵,经一致性检验确定权重,结果显示土壤与岩性权重最高、构造权重最低,与岩溶区水文地质规律相符。针对不同类型因子构建隶属函数,正向因子(如降雨量、砂粒占比)用线性递增函数,负向因子(如坡度、植被覆盖度)用线性递减函数。最后利用GIS平台加权叠加功能计算综合影响因子,生成流域尺度降雨入渗影响程度分布图。

3.4 BP神经网络模型构建

人工神经网络可模拟人类大脑处理复杂映射关系,应用广泛。BP神经网络能通过训练构建输入输出映射关系。本研究以有资料区分布式下垫面因子和降雨入渗系数为样本训练BP神经网络模型,预测降雨入渗系数,获取丹水全流域分布式降雨入渗系数。构建三层BP神经网络,输入层设7个下垫面因子,隐含层经试验确定最优节点数,输出层为降雨入渗系数。选取流域内典型泉域(酒甌子、五爪泉)作为训练样本,根据两泉口监测站流量和降雨量数据计算,得出酒甌子与五爪泉泉域集总式降雨入渗系数。

表1 酒甌子、五爪泉集总式降雨入渗系数计算表

	入渗量	降雨量	面积	总降雨量	降雨入渗系数
单位	(10 ⁴ m ³ /s)	(mm)	(km ²)	(m ³)	无
酒甌子	331.13	165	59.66	984.43	0.3364
五爪泉	200.10	189	42.36	800.58	0.2499

同时根据两个泉域的综合影响因子的平均值以及每个栅格的综合影响因子值按以下公式进行降雨入渗系数的分配,得到两个泉域内的分布式降雨入渗系数。

$$a/t=a1/t1$$

a: 栅格的入渗系数

t: 对应栅格的影响因子

a1: 泉域的平均影响因子

t1: 泉域的集总式降雨入渗系数

最后将两个泉域内的每个栅格的影响因子值作为输入,对应的入渗系数作为输出得到了可用于BP神经网络的训练样本,并构建BP神经网络模型。

4 降雨入渗影响程度模糊综合评价

4.1 指标体系建立

岩溶山区降雨入渗过程受多因素共同影响。在借鉴前人实验研究成果及对岩溶山区的降雨入渗过程分析的基础上,结合丹水流域实际情况,选取影响丹水流域降雨入渗过程的下垫面因子,并基于遥感数据、数字高程模型(DEM)数据等,利用GIS工具对丹水流域内各指标因子进行提取。各指标权重如下图所示:

表2 指标权重

指标	构造	植被	土地利用	坡度	降雨	岩性	土壤
权重	0.0269	0.0479	0.0819	0.1109	0.1558	0.2537	0.3228

分析表明,丹水流域降雨入渗主要受土壤与岩性影响,构造和植被覆盖影响权重较低。本文将入渗影响程度分为 I 级(强)、II 级(中强)、III 级(一般)、IV 级(差)四类,阈值确定遵循三项原则:一是采用国家或国际标准临界值;二是参考前人研究的分级数值;三是在无相关标准或前人研究时,结合丹水流域实际情况与GIS空间分析确定。据此,对各指标阈值进行了分析与确定。

表3 各指标分级阈值

指标层	指标体现	I (强)	II (中强)	III (一般)	IV (差)
降雨量	日降雨量	>50	24.9-49.9	10-24.9	<10
地层岩性	岩性	灰岩	白云岩	碎屑岩	砂砾岩
地质构造	构造线欧氏距离	<700	700-1500	1500-2700	>2700
地形坡度	坡度	<15	15~35	35~55	>55
植被覆盖	植被覆盖程度(VFC)	<0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	>0.75
土地利用	土地利用类型	林地、灌木林地	水体	耕地	建筑用地
土壤	砂粒含量/粘粒含量	>2	1.5-2	1-1.5	<1

4.2模糊综合评价结果分析

针对丹水流域降雨入渗影响程度的模糊综合评价采用 ArcGIS 软件,首先,运用叠加分析中的模糊隶属度工具,分别测算七个影响因子对于四个评语集的隶属度;其次,结合各因子的权重,依据最大隶属度准则,借助模糊叠加工具获取综合影响因子。综合影响因子的值越大,表明降雨入渗能力越强,降雨入渗系数亦越大。

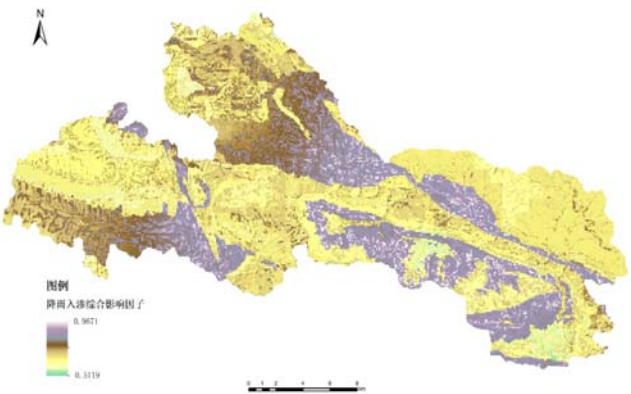


图2 丹水流域降雨入渗影响程度综合因子

从图2分析可知:丹水流域降雨入渗综合影响因子范围为 0.5119-0.9671,均值约为0.74,标准差约为0.09,变异系数约为 0.12。说明流域整体入渗条件较好,空间差异中等但具有明显分区特征。

将流域内综合影响因子根据自然断点法划分为三类,如下表,从统计结果可知:高入渗区占比超过75%,符合岩溶流域特征。通过叠加分析发现:高入渗区中87%以上区域同时满足“灰

岩+低坡度”;低入渗区中约76%区域为“高坡度+碎屑岩”组合。说明入渗过程具有显著的因子协同控制特征,而非单因子主导。

表4 综合影响因子分类

等级	范围	面积占比
高入渗区	>0.80	≈28%
中入渗区	0.65-0.80	≈49%
低入渗区	<0.65	≈23%

5 分布式降雨入渗系数结果分析

5.1系数获取及分析

将提取到的所有下垫面因子以及酒甑子、五爪泉泉域内的分布式降雨入渗系数在Arcgis中进行处理后,将影响因子作为输入,对应的入渗系数作为输出,即得到了可用于BP神经网络的训练样本,将这些样本在MATLAB的自带的BP神经网络的工具箱中进行训练,构建BP神经网络模型。

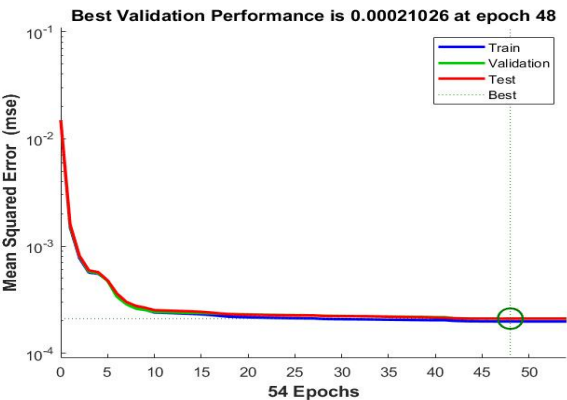


图3 均方差-迭代过程图

从图中可以看出,第一次迭代时均方差即降至 10^{-2} 以下,20次后趋于平稳,第54次迭代终止,保存第48次迭代的神经网络模型。此时训练集与测试集的均方差约为0.0002,表明模型准确性较高,基于下垫面因子获取降雨入渗系数的方法可行。将丹水流域无资料区域的下垫面因子输入该模型,得到相应区域的分布式降雨入渗系数,再与酒甑子、五爪泉的系数镶嵌,最终获得整个丹水流域的降雨入渗系数。

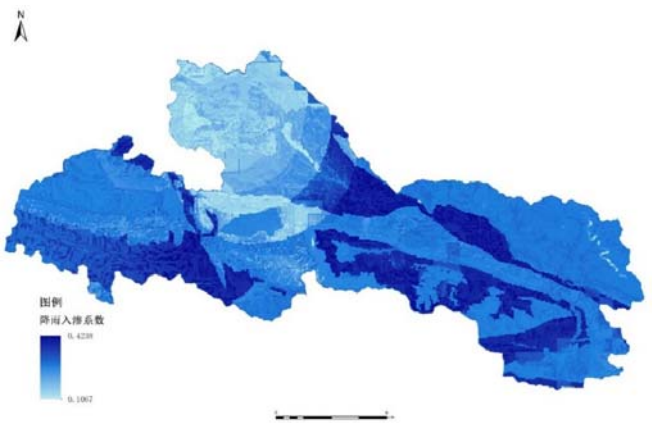


图4 丹水流域降雨入渗系数分布图

丹水流域降雨入渗系数在0.1067-0.4238之间。入渗较大的区域,岩性以灰岩、白云岩为主,降雨量偏大,土地利用主要为林地和灌木林地。植被与构造因其权重较低,对入渗影响不大。流域内土壤砂粒/粘粒比空间差异不明显,因此在图中表现不突出。

5.2资源量验证

将丹水流域降雨入渗系数与降雨量栅格数据计算后得到降雨入渗量,并与水文站数据验证。因下游水量被水利设施引走,选用上中游高家堰站数据。

表5 入渗量与基流量验证表

反算入渗量(10 ⁴ m ³)	基流量(10 ⁴ m ³)	误差
1632.93	1662.52	0.0178

对站数据进行基流分割后,计算所得上游入渗量为1632.93×10⁴ m³,基流分割所得为1662.52×10⁴ m³,误差0.0178。结果表明入渗系数准确性较高,证明基于RS与GIS技术获取该系数的方法可行。

6 结论

本文提出了一种基于RS与GIS技术的分布式降雨入渗系数获取方法,并在丹水流域进行了验证。研究表明:该方法能够有

效整合多源数据,实现无资料区入渗系数的估算;模糊综合评价能够合理反映多因素影响;BP神经网络在非线性预测中表现良好。整体方法具有较强的实用性和推广价值。

未来研究可进一步结合更高分辨率数据及深度学习方法,提高模型精度,并拓展至更大尺度区域应用。

[参考文献]

[1]薛明霞,孙明.灰岩山区降雨入渗补给系数取值研究[J].山西水利科技,2020(02):1-8+36.
[2]纪轶群,王树芳,韩征,等.北京岩溶水系统降水入渗系数研究[J].人民黄河,2020,42(02):38-41+47.
[3]李金柱.降水入渗补给系数综合分析[J].水文地质工程地质,2009,36(02):29-33.
[4]沈婧,樊贵盛.基于改进BP神经网络的水分入渗参数预测模型[J].人民黄河,2017,39(8):6.
[5]尹德超,罗明明,张亮,等.基于流量衰减分析的次降水入渗补给系数计算方法[J].水文地质工程地质,2016,43(03):11-16.

作者简介:

冯琦(1997-),男,汉族,黑龙江大庆人,硕士研究生,助理工程师,研究方向:水文地质与GIS。