基于 Dempster－Shafer 证据理论的流域不透水表面扩张特性研究

王桂林[1,2]，王保云[2,3]，杨 昆[2,3]，刘 涛[1,2]，杨玉莲[2,3]，苏 飞[1,2]

（1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院，云南 昆明 650500；2. 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心，云南 昆明 650500；3. 云南师范大学 信息学院，云南 昆明 650500）

摘 要：[目的] 揭示驱动盘龙江流域不透水表面扩张的影响因子，以及影响因子各属性值对不透水表面扩张的影响程度，并在分析驱动机制的基础上，模拟预测盘龙江流域的扩张趋势，为流域生态建设合理规划提供依据。[方法] 采用 Dempster—Shafer(D—S)证据理论来描述和融合多种空间数据，在已有的不透水表面(impervious surfaces, IS)信息与多种空间数据的量关系的基础上，采用数据驱动方法分配基本概率函数(basic probability assignment, BPA)。经过定义多种空间数据的 BPA 函数，然后采用 D—S 证据理论的融合规则融合多个 BPA 函数以获取研究区域 IS 的信任函数、不信任函数、不确定函数、似真函数。[结果] 距道路距离，距居民点距离，距水系距离，人口密度，GDP，IS 邻域单元数，坡度，高程驱动因子对盘龙江流域不透水表面的扩张影响比较大，而坡向对不透水表面扩张的影响程度变化不明显。不透水表面扩张模拟的精度达到 78.04%。[结论] 采用 D—S 证据理论方法来描述空间数据和融合多种空间数据具有比传统逻辑回归模型更好的分析和预测功能。

关键词：D—S 证据理论；不透水表面；GIS；盘龙江流域

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2015)04-0111-06 **中图分类号**：TU984.11，P237，X171.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.022

A Study of Expansion Features of River Basin's Impervious Surface Based on Dempster－Shafer Evidence Theory

WANG Guilin[1,2], WANG Baoyun[2,3], YANG Kun[2,3], LIU Tao[1,2], YANG Yulian[2,3], SU Fei[1,2]

(1. *School of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan* 650500, *China*; 2. *The Engineering Research Center of GIS Technology in Western China of Ministry of Education of China, Kunming, Yunnan* 650500, *China*; 3. *School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan* 650500, *China*)

Abstract: [Objective] This paper aimed to reveal the driving factors of impervious surface(IS) expansion in Panlong River basin, and to quantize the expansive responses of IS to the values of these factors. Upon these, a simulation of the expansion in the Panlong River basin was conducted to provide some bases for ecological improvement scheme. [Methods] Dempster—Shafer(D—S) evidence theory was used to described the spatial data and to integrate it into the basic probability assignment function based on the quantitive relationship between the existing IS information and the multiple spatial data by data-driven way. With the basic probability assignment functions, the belief, disbelief, ignorance, plausibility functions were obtained by merging multiple spatial data. [Results] Panlongjiang River basin was taken as an example to verify the validity with D—S evidence theory for the research on IS expansion properties, and the simulation accuracy reached 78.04%. [Conclusion] In predicting IS expansion, the D—S evidence theory to describe and integrate multiple spatial data was better than the traditional logistic regression model.

Keywords: **Dempster－Shafer(D－S) evidence theory; impervious surface; GIS; Panlong River basin**

Dempster—Shafer(D—S)[1]证据理论是 Dempster 在贝叶斯理论的基础上提出来，并由他的学生 Shafer[2]规范成一个完整的描述事件不确定性的理论体系。该理论用基本概率分配函数描述数据信息，并提供融合多种空间数据的工具。与传统概率论不同，证据理论能够通过信任函数和似真函数之间的概率间隔

收稿日期：2014-05-29 **修回日期**：2014-07-12

资助项目：云南省科技计划项目“基于多学科高技术的云南‘城镇上山’研究与典型示范”(2012CA024)

第一作者：王桂林(1986—)，女(汉族)，江西省上饶市人，博士研究生，研究方向为资源环境信息系统。E-mail：kawgl@126.com。

通信作者：杨昆(1963—)，男(汉族)，云南省会泽县人，教授，博士生导师，主要从事地理信息系统方面的研究。E-mail：kmdcynu@163.com。

来描述目标假设的不确定性。Carranaza 和 Hale[3] 提出基于证据理论的数据驱动来挖掘矿石分布。No—wook Park[4] 采用 D—S 证据理论分析山体滑坡敏感性。Ran 和 LI[5] 等用 D—S 证据理论进行多传感器遥感数据的土地利用与覆盖分类。刘晓光[6] 等提出一种基于 D—S 证据理论的灾害决策支持方法，推导分析成灾规模基本概率分配。程珍珍[7] 提出 D—S 证据理论和 BP 神经网络融合算法，把多传感器数据融合技术应用于煤矿水害预防与预测。尽管 D—S 证据理论具有强大的融合空间数据的能力，但是把 D—S 证据理论应用于 GIS 中的例子很少，其主要困难是如何用数据驱动的方法来定义基本概率分配函数。本研究将 D—S 证据理论应用于不透水表面扩张特性研究中，在基本概率分配函数与数据融合的基础上，通过数据驱动方法分析不透水表面扩张特性。不透水表面上指一种由不透水性材料构造的人为地表面，主要包括建筑物屋面系统和交通运输系统，如房顶、广场、道路、停车场等[8-9]。不透水表面对流域生态系统、水文循环、地形地貌、动植物栖息地和水质等都有着显著的影响，已经成为监测流域城市非点源污染的重要指标。城市化成为城市流域生态系统退化的重要驱动力，也是城市流域生态恢复的限制因素，模拟预测流域城市扩张时空过程，得出城市扩张是流域污染的主要因素[10-11]。GIS 商业软件能够系统地处理分析各种空间数据，主要致力于数据构建和操作功能，而缺乏严密、精确的数据融合功能。因此，用方法论来高效准确地融合各种基于 GIS 的空间数据显得非常重要。

1 研究区概况

滇池是云贵高原上最大的淡水湖泊，盘龙江作为滇池流域九大河流之一，是穿越昆明主城南北向的最主要的河道。盘龙江的主源为牧羊河(又称小河)，支源冷水河源头在龙马箐，两河在小河乡岔河嘴汇为一水后，始称盘龙江。本研究所涉及的盘龙江流域范围北起松华坝水库大坝，沿盘龙江水系南下直至滇池入湖口，全长 26.3 km，面积约 183 km^2。地理位置东经 102°40′46″—102°50′34″，北纬 25°12′11″—24°56′13″。作为城市景观河流，盘龙江主要补给水为昆明市第 2，第 4，第 5 污水处理厂的出水，以及松华坝水库的汛期弃水及城市暴雨径流。

2 研究区空间图层

不透水表面扩张主要是由于经济增长和人口增多，城市现代化步伐加快。本研究分析城市用地扩张的主要影响因子包括距离变量驱动因子、社会经济和自然驱动因子，驱动因子选取与描述详见表 1。不透水表面分类图提取于 Landsat ETM^+ (2013)影像数据；坡度、坡向、高程数据来源于 1∶5 万 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数据；人口、GDP 数据源于 2013 年云南省统计年鉴；河流、道路、居民点源于云南省 1∶25万矢量地图。数据处理后的空间数据和 2013 年不透水表面分类图如图 1 所示。

表 1 驱动因子选取与描述

影响因子	驱动因子	获取方法	原始数据值范围	驱动因子描述
距离变量	距居民点距离(X_1)	ArcGIS 空间分析	0～4 707.44 m	量算栅格单元到居民点的距离
	距道路距离(X_2)	模块中的 Distance	0～3 671.51 m	量算栅格单元到最近主干道的距离量算栅
	距水系距离(X_3)	模 块	0～4 440.72 m	格单元到最近主河流的距离
自然属性	坡度(X_4)	Slope	0°～29.723°	量算每个像元点的切平面与水平地面的夹角的倾斜度
	高程(X_5)	Elevtion	1 783～2 798 m	采用黄海高程面
	坡向(X_6)	Aspect	0°～359.89°	量算每个像元点的切平面法线在水平面上的投影与正北方向的夹角
社会属性	人口密度(X_7)	云南省统计年鉴	250.039～1 320.997	万人/km^2
	GDP(X_8)	云南省统计年鉴	3 702.82～28 125.73	万元/km^2
	邻域不透水表面的单元数量(X_9)	functions of ARC/INFO Grid	0～37	量算每个栅格邻域范围内的不透水表面单元栅格

3 驱动因子分析:证据理论

诸多学者定性地分析了驱动不透水表面扩张的影响因子，而很少能定量地分析影响因子对不透水表面扩张的影响。王婷[12] 认为驱动不透水表面扩张的主要因素主要包括经济发展、人口增长、规划政策和道路交通等，但没有量化分析这些因素对城市用地扩张的影响程度。王金亮[13] 等分析了三江并流少数民族社区土地利用变化的驱动力因子，认为人口增加、技术进步、政策变动、认知水平提高、市场经济发展等因素相互作用是社区土地利用变化主要驱动力，也缺乏定量的分析。通过证据理论原理对上述用于分析不透水表面扩张的空间数据进行运算，根据计算公式进行不透水表面信任函数的基本概率分配(matlab 实现)，即每个栅格是不透水表面的概率；进行不透水表面不信任函数的基本概率分配，即每个栅格单元是透水表面的概率分配；计算不透水表面不确定性的基本概率分配函数。距离变量基本概率分配函数详见表 2，自然因子的空间数据基本概率分配函数详见表 3，社会因子的空间数据基本概率分配函数详见表 4。

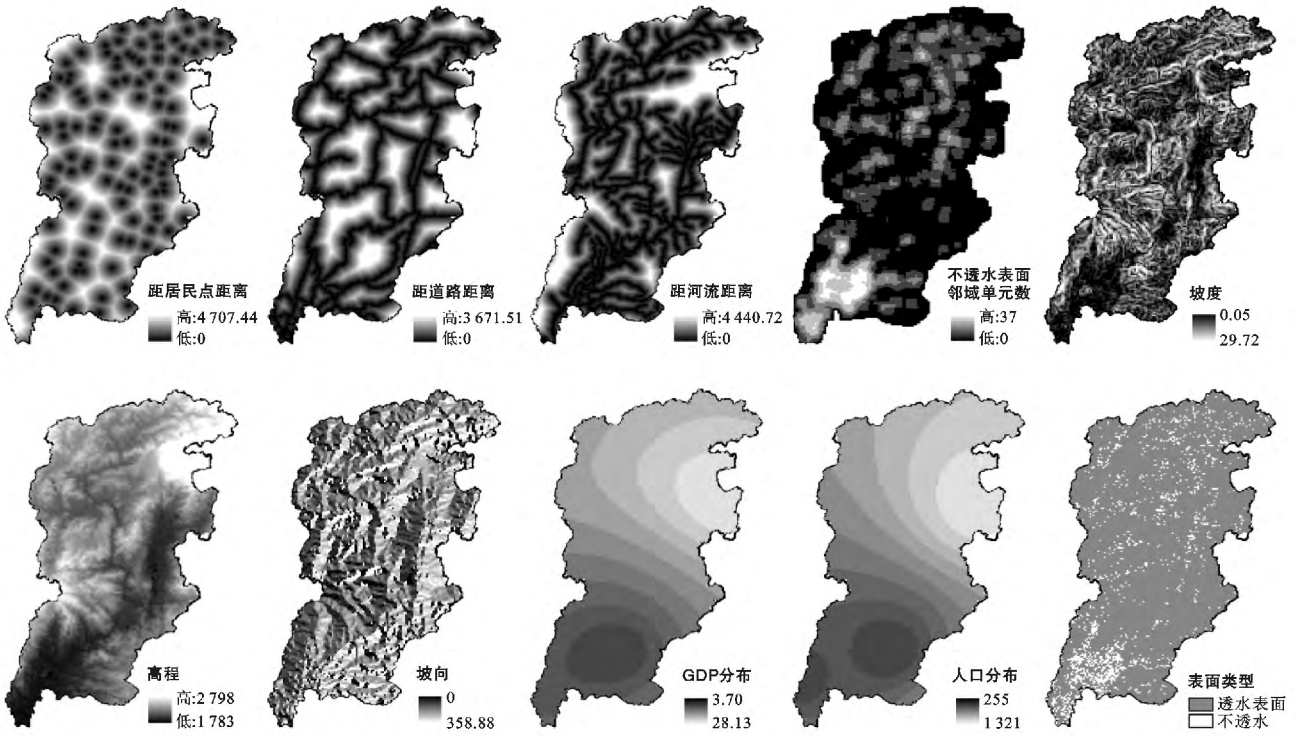


图 1　研究区空间变量和 2013 年不透水表面分类图

表 2　距离变量基本概率分配函数

影响因子/m	数据图层	总栅格数	不透水表面栅格数	信任函数 $m(T_p)$	不信任函数 $m(\bar{T}_p)$	不确定函数 $m(\theta)$
距道路距离	0～370	5 770	792	0.272	0.113	0.615
	370～740	4 760	384	0.150	0.110	0.740
	740～1 110	2 890	159	0.099	0.104	0.797
	1 110～1 480	2 127	86	0.072	0.101	0.827
	1 480～1 850	1 221	30	0.043	0.098	0.859
	1 850～2 220	520	11	0.037	0.096	0.867
	2 220～2 590	165	1	0.010	0.095	0.895
	2 590～2 960	74	4	0.098	0.095	0.807
	2 960～3 330	44	5	0.219	0.094	0.687
	3 330～3 672	13	0	0	0.094	0.906
距离居民点	0～480	2 339	336	0.264	0.101	0.635
	480～960	4 596	436	0.165	0.109	0.726
	960～1 440	5 240	353	0.114	0.112	0.774
	1 440～1 920	3 220	202	0.105	0.105	0.790
	1 920～2 400	1 392	95	0.115	0.099	0.786
	2 400～2 880	580	42	0.123	0.096	0.781
	2 880～3 360	118	8	0.114	0.095	0.791
	3 360～3 840	51	0	0	0.095	0.905
	3 840～4 320	36	0	0	0.094	0.906
	4 320～4 708	12	0	0	0.094	0.906
距水系距离	0～450	10 269	974	0.176	0.134	0.690
	450～900	3 809	216	0.101	0.106	0.793
	900～1 350	1 714	135	0.144	0.099	0.757
	1 350～1 800	892	81	0.168	0.096	0.736
	1 800～2 250	553	49	0.163	0.095	0.742
	2 250～2 700	170	14	0.151	0.094	0.755
	2 700～3 150	56	1	0.031	0.094	0.876
	3 150～3 600	54	1	0.032	0.094	0.874
	3 600～4 050	49	1	0.035	0.094	0.871
	4 050～4 450	18	0	0	0.094	0.906

从距道路距离的基本概率分配中得出，距道路距离越近其不透水表面概率越大，表明道路是分析不透水表面扩张特性的有力证据，道路对城市用地的扩张起到推动作用。从距居民点的距离图可知，距离居民点越近其不透水表面信度概率越高，符合云南省居民聚居的特性。从距水系距离的基本概率分配函数来定量地分析水系对不透水表面扩张的影响程度。得出距水系距离为 0～450 m 时不透水表面信任概率较大，当过了 450 m 之后，距离水系的距离大小对不透水表面信任概率的影响程度变化不明显。距水系距离并不是距离越大，影响越小，颠覆了常规的思维方式，而是当距离水系的距离达到一定值之后，其对不透水表面扩张的影响作用不明显。因为距河流、湖泊、水库等水系的距离达到一定距离后，水环境所带来的生态效益、景观效益、经济效应不明显，因此减弱了其对不透水表面扩张的推动作用。

表 3 自然因子变量基本概率分配

影响因子	数据图层	栅格总数	不透水表面栅格单元数	信任函数 $m(T_p)$	不信任函数 $m(\bar{T}_p)$	不确定函数 $m(\theta)$
坡度/(°)	0～4	392 8	628	0.463	0.130	0.407
	4～8	581 4	548	0.253	0.140	0.607
	8～12	432 0	214	0.127	0.134	0.739
	12～16	232 5	62	0.067	0.125	0.808
	16～20	906	14	0.038	0.120	0.842
	20～24	279	6	0.054	0.117	0.829
	24～28	32	0	0	1	0
	28～30	2	0	0	1	0
坡向/(°)	0～46	1 523	113	0.111	0.122	0.767
	46～92	1 924	120	0.092	0.124	0.784
	92～138	2 655	237	0.136	0.127	0.737
	138～184	2 500	215	0.131	0.126	0.743
	184～230	2 453	227	0.141	0.126	0.733
	230～276	2 457	222	0.138	0.126	0.736
	276～322	2 367	191	0.122	0.126	0.752
	322～360	1 727	147	0.129	0.123	0.748
高程/m	1 783～1 888	106	42	0.472	0.095	0.433
	1 888～1993	2 518	600	0.225	0.101	0.674
	1 993～2 098	3 059	201	0.051	0.104	0.845
	2 098～2 203	4 877	297	0.047	0.111	0.842
	2 203～2 308	4 024	171	0.032	0.108	0.860
	2 308～2 413	1 583	79	0.038	0.099	0.863
	2 413～2 518	659	28	0.032	0.096	0.872
	2 518～2 623	443	42	0.075	0.096	0.829
	2 623～2 728	301	12	0.030	0.095	0.875
	2 728～2 798	36	0	0	0.095	0.905

从坡度的角度来分析影响不透水表面信任概率，发现坡度在 0°～4°之间的不透水表面概率高达 1/2 以上，而在 4°～12°之间急剧下降，到了 24°之后的几乎不存在不透水表面。从坡度概率分布图发现了传统方法论所发现不了的定量影响规律。从坡向的 BPA 来分析，坡向对不透水表面信任概率影响程度相差不大，即坡向对不透水表面扩张驱动作用不明显，因此在空间数据融合过程中，不融合坡向数据。高程的 BPA 表明，高程为 1 783～1 888 m 时，不透水表面概率值最大，几乎占了 1/2 的概率值，当高程到了 1 888～1 993 m 时，其概率急剧下降，当高程高于 1 993 m 时，不透水表面信任概率几乎接近于 0，说明高程对不透水表面扩张具有很大的驱动作用，高程是分析不透水表面扩张特性的一个重要证据。

表 4　社会因子变量基本概率分配函数

影响因子	数据图层	总栅格数	不透水表面栅格数	信任函数 $m(T_p)$	不信任函数 $m(\overline{T}_p)$	不确定函数 $m(\theta)$
人口密度/（万人·km^{-2}）	250～500	5 132	387	0.169	0.211	0.620
	500～750	4 496	236	0.115	0.207	0.678
	750～1 000	2 974	126	0.092	0.197	0.711
	1 000～1 250	4 215	637	0.369	0.202	0.429
	1 250～1 321	794	87	0.255	0.183	0.562
GDP/（万人·km^{-2}）	3 700～7 400	1 773	102	0.086	0.139	0.775
	7 400～11 110	4 904	365	0.113	0.155	0.732
	1 110～14 800	3 370	189	0.084	0.147	0.769
	14 800～18 500	1 870	68	0.053	0.140	0.807
	18 500～22 200	1 541	49	0.046	0.139	0.815
	22 200～25 900	3 404	557	0.275	0.145	0.580
	25 900～28 126	722	142	0.344	0.134	0.522
不透水表面邻域/个	0～5	15 262	323	0.002	0.215	0.783
	5～10	3 441	454	0.015	0.122	0.863
	10～15	873	248	0.039	0.112	0.849
	15～20	424	144	0.051	0.111	0.838
	20～25	352	177	0.100	0.111	0.789
	25～30	144	82	0.130	0.110	0.760
	30～35	56	41	0.269	0.110	0.621
	35～37	5	4	0.394	0.110	0.496

从人口密度的基本概率分配函数得出当人口密度在 1 000～1 250 万人/km^2 这个阶段时，其不透水表面信任概率最高，但发现不是人口密度越高，其不透水表面概率信任值越大，而是当人口密度达到一个阈值后，其不透水表面信任概率不再增长，这表明人口密度在一定的范围内对不透水表面扩张是起到驱动的作用，但是当人口密度达到阈值后，不透水表面扩张达到饱和状态，当人口再增大时，不透水表面信任概率不会相应的增加，与实际相符。

从 GDP 基本概率分配函数可得 GDP 越高，其不透水表面概率越大，符合 GDP 越高的地方越是城镇中心，其不透水表面覆盖率高的实际相符。从不透水表面邻域单元数的概率分配可得，邻域不透水表面单元数越大，其越影响不透水表面扩张，与城市用地规划中建筑用地开发紧凑性要求相吻合。

4　讨论与结论

（1）通过 D—S 证据理论来分析各个空间变量对不透水表面扩张的影响，得到了定量的结论。距道路距离、距居民点距离、距水系距离、人口密度、GDP，IS 邻域单元数、坡度、高程驱动因子对不透水表面的扩张影响比较大，而坡向对不透水表面扩张的影响程度变化不明显。因此，融合空间数据时不考虑坡向，与传统逻辑回归模型不同的是主要考虑对不透水表面扩张影响较大的因子，而不是笼统地把各种空间数据都做分析。另外，驱动因子对不透水表面扩张的影响程度不再是个黑箱。

（2）根据基本概率分配函数，融合多种空间数据来获得研究区域不透水表面信任函数、不信任函数、不确定函数、似真函数。根据融合规则融合多种空间数据，盘龙江流域不透水表面的信任函数、不信任函数、不确定函数、似真函数的结果如图 2 所示。对比信任函数和似真函数，似真函数的概率值大于等于信任函数，似真函数是区域发展为不透水表面最大可能的概率分布，存在一种格局与未来的某个时间点的不透水表面结构相吻合，因此似真函数具有预测的作用，其反映出区域不透水表面最潜在扩张趋势。经过反复验证与试验，选定概率阈值为 0.73，通过盘龙江流域不透水表面信任函数可以获得流域不透水表面分布图，根据似真函数，可以得到最大情况下的不透水表面分布图，对比分析 2 个不透水表面结构图，可以发现不透水表面扩张情况如图 3 所示。

（3）最后采用点对点精度验证方法，对比 2013 年盘龙江不透水表面分类图与信任函数获取的不透水表面分布图，得到点对点精度为 78.04%。验证分析似真函数获取的不透水表面分布图与真实数据，得到精度为 76.89%。根据 D—S 证据理论的原理，盘龙江流域不透水表面的分布图必定在信任函数获

得的不透水表面分布图与似真函数获得的不透水表面分布图之间，在这个区域范围内存在一个与真实不透水表面数据吻合度非常高的不透水表面空间结构图。

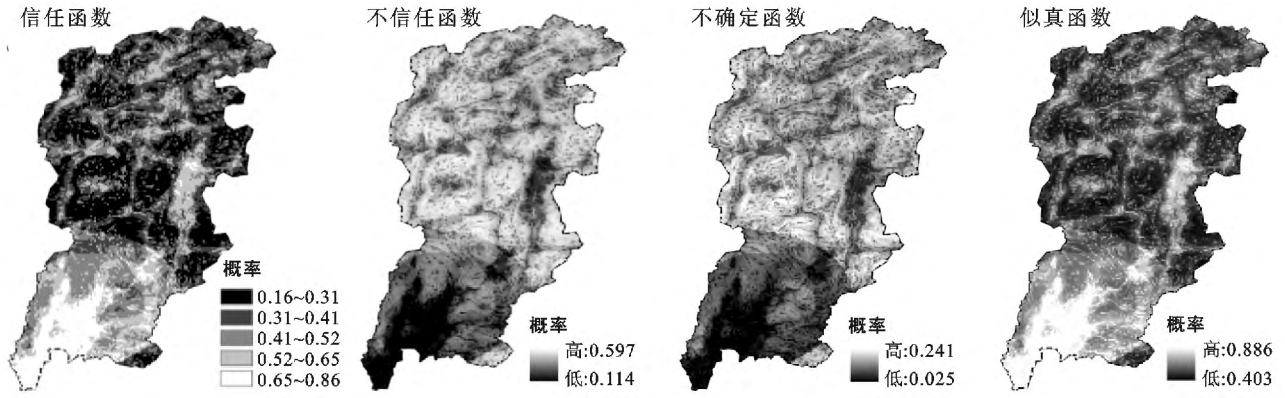


图 2 研究区融合结果：信任函数、不信任函数、不确定函数、似真函数

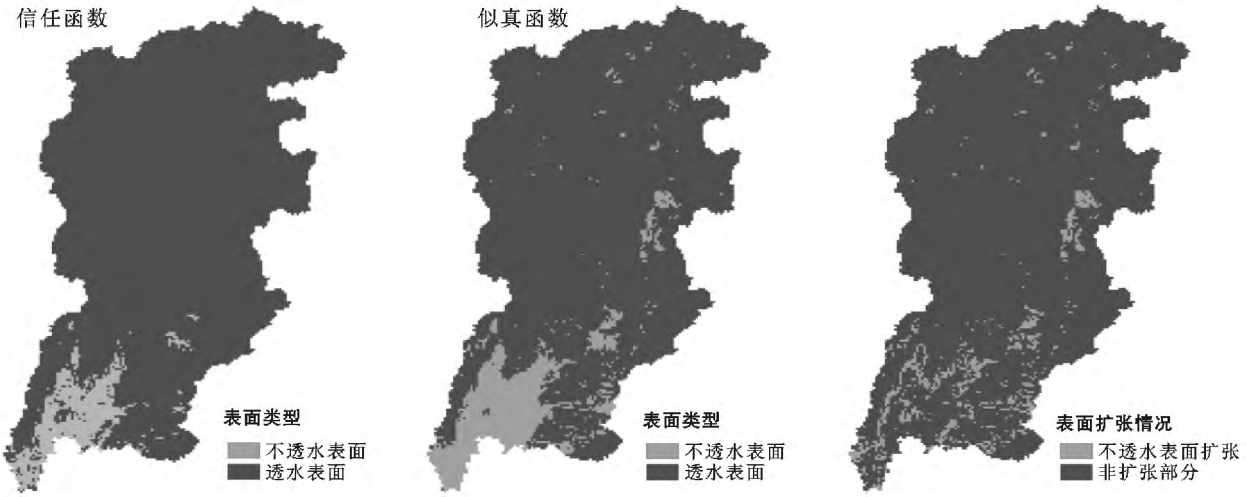


图 3 研究区不透水表面扩张预测分析

[参 考 文 献]

[1] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1967,38(2): 325-339.

[2] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.

[3] Carranza E J M, Hale M. Evidential belief functions for data-driven geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines[J]. Ore Geology Reviews, 2003, 22(1): 117-132.

[4] Park N W. Application of Dempster-Shafer theory of evidence to GIS-based landslide susceptibility analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(2): 367-376.

[5] Ran Youhua, Li Xiong, Lu Liang, et al. Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2012, 26(1): 169-191.

[6] 刘晓光，胡学钢. D—S 证据理论在决策支持系统中的应用[J]. 计算机系统应用，2010，19(10)：112-116.

[7] 程珍珍. 多传感器数据融合技术在煤矿水害预防中的应用[D]. 山西 太原：太原理工大学，2009.

[8] Espey Jr W H, Morgan C W, Masch F D. A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed[R]. Texas: Water Development Board, 1966.

[9] Stankowski S J. Population density as an indirect indicator of urban and suburban land-surface modifications[J]. US Geological Survey Professional Paper, 1972, 800(2): 219-224.

[10] 王秀英，王东胜，梁洪华. 城市河流生态恢复能力评价指标[J]. 武汉大学学报：工学版，2011，44(6)：691-696.

[11] 王桂林，杨昆. 基于蚁群算法的多智能体模拟城市用地扩张[J]. 科学技术与程，2013，13(6)：1638-1642.

[12] 王婷. 基于不透水表面信息遥感提取的城市扩展研究：以兰州市建成区为例[D]. 甘肃 兰州：兰州大学，2013.

[13] 王金亮，将连芳，马剑，等. 三江并流区少数民族社区土地利用变化驱动力分析[J]. 地域研究与开发. 2000，19(4)：62-64.