

基于分形理论的农村居民点空间分布特征定量研究

代雍楣, 师学义, 段文杰

(中国地质大学 土地科学技术学院, 北京 100083)

摘 要:农村居民点分形特征作为农村居民点自主演化研究的重要内容,可以很好地反映其发育情况及空间占据能力。以晋城市长河流域为例,通过对农村居民点空间分布主要影响因素的分形分析,探讨了农村居民点分维与其之间的关系,并引入证据权模型量化了各因素的影响程度,在此基础上对该区农村居民点空间分布特征进行了定量评价。结果表明:(1) 晋城市长河流域农村居民点分维数值随着高程和坡度的增加总体呈降低趋势,农村居民点分维数值显著高于交通维数与水系维数,长远来看,农村居民点与交通维数将会升高,而在采煤的影响下,水系维数则会降低;(2) 社会经济因素中的农村人均居民点用地面积与农民人均纯收入可以直接影响居民点维数值,且与居民点维数变化趋势一致;(3) 用证据权模型计算出的各指标影响程度排序为:坡度>道路>高程>水系>农民人均纯收入>人均居民点占地面积,研究结果与分形理论研究得出的结论具有一致性。该研究可为丘陵山区农村居民点土地整理与空间布局优化提供参考。

关键词:农村居民点; 证据权; 黄土丘陵山区; 分形特征

中图分类号:F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0278-06

A Quantitative Study on Spatial Structure and Form of Rural Residential Area Based on Fractal Theory

DAI Yongmei, SHI Xueyi, DUAN Wenjie

(School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: As an important part of the study in the evolution of self-organization theory on rural residential areas, the spatial distribution and variation of them can be well presented by the fractal characteristics. Changhe River Basin in Jincheng was taken as a study area. The relationships were showed between influencing factors of location changes and fractal dimension values in rural residential areas. The weight of evidence model, which is driven by both knowledge and data, was employed to quantified the impact of each factor. The results show that: (1) the fractal dimension value of rural residential areas in Changhe River Basin in Jincheng decreases with increase of elevation and slope, the fractal dimension value of rural residential areas is obviously higher than traffic dimension and water dimension, the fractal dimension of the rural settlement will increase in a long period as the development of economy and society, and the water dimension will decrease under the underground mining coal influence; (2) the rural per capita residential area and per capita annual net income of farmers directly affect the fractal dimension of the rural settlement, and the change is consistent with it; (3) according to the results calculated by the weight of evidence model, the rank of the indexes was in the order: slope>transportation>elevation>drainage system>per capita annual net income of farmers>per capita residential area. This is consistent with the conclusions obtained from the fractal theory. The findings in this study can facilitate the practical applications in rural residential consolidation and layout planning in the similar regions.

Keywords: rural residential land; weight of evidence model; loess hilly and mountainous areas; fractal dimension

农村居民点是农村居民进行聚居活动的核心与载体,核心表现农村人地关系^[1],其空间布局是农村

居民聚居区的内部功能及其规模序列结构长期以来在区域内形成的空间组合形式^[2]。合理的农村居民

收稿日期:2016-05-12

修回日期:2016-05-23

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项“北方村庄压煤山丘区土地综合整治技术研究”(201411007)

第一作者:代雍楣(1992—),女,安徽亳州人,硕士生,研究方向为土地资源评价与利用规划。E-mail:dymliyyz@163.com

通信作者:师学义(1960—),男,山西祁县人,教授,博士,研究方向为土地利用规划与土地利用工程。E-mail:shixueyi60@163.com

点空间布局规模与形式关系到一定区域内土地资源的合理配置以及农村社会经济的健康有序发展。近年来,伴随着城镇化的快速发展,我国实行的农村居民点土地整理、规划与集约利用等相关政策,都从客观上亟需细致研究农村居民点的形成与发展的内在规律与外在表征。

农村居民点的选址是在当地自然地理、经济、社会与文化的综合影响下^[3],农村居民对居住区位不断做出选择的结果,使得农村居民点的空间布局呈现明显的点状分布和沿轴线发展特征,在空间上则表现出一定的地域差异性和和区域相似性^[4]。农村居民点作为一个复杂、开放的系统,各组成要素之间依托系统中的物质、信息与能量的相互交流而导致的协同作用,形成了其随机扩展、空间分布和规模分布特征,具有不规则性、不稳定性以及高度复杂性,表现出统计分形特征^[5]。而目前,研究农村居民点的分形特征并不多,研究主要以农村居民点空间演变的形状属性为基础探讨农村居民点布局变化的影响因子与其分维之间的关系^[6-7],且空间尺度以行政单元为主^[8-9],对流域尺度的农村居民点分形特征研究则更少。本文通过对晋城市长河流域农村居民点空间分布分形特征的定量研究,并结合证据权模型对流域内农村居民点空间分布特征变化影响因子影响程度进行排序,以期对流域农村居民点土地整理与空间布局优化提供依据。

1 研究区概况

研究区位于山西省晋城市长河流域,涉及泽州县三个乡镇的 47 个行政村,其中包括下村镇的 7 个行政村,大东沟镇的 23 个行政村以及川底乡的 17 个行政村,总面积 108 km²。根据泽州县第六次人口普查统计数据,到 2009 年底研究区总人口为 52 868 人,其中下村镇 9 459 人,劳动年龄人口(18~60 岁)约占 65%。大东沟镇 26 046 人,劳动年龄人口约占 63.3%;川底乡 17 363 人,劳动年龄人口约占 63.0%。长河流域交通比较发达,现今已初步形成了以公路、铁路为主干线的交通路网体系。研究区内 47 个行政村基本均已实现“村村通”。根据泽州县 2010 年统计年鉴,全区 2009 年全年实现总收入 14.5 亿元,其中,三大产业收入分别占总收入的 5%,64%,31%,第二产业中工业收入是建筑业收入的六倍,可见,工矿仍然是长河流域经济发展的重要产业。此外,研究区内农村居民点分散压占着大量的煤炭及其他矿产资源,由于长期受到采煤过程的影响,耕地损毁、房屋塌陷、地下水枯竭等生态环境问题日益突出,严重影响了人居环境。

2 数据与方法

2.1 数据准备

本研究基于以下数据:(1)泽州县 1:1 万土地利用现状图,从中提取晋城市长河流域农村居民点、水域、道路、行政界线数据,并依据《第二次全国土地调查成果数据缩编技术指标规范》,按照 1:1 万比例尺制图规范进行检验处理,以此构建长河流域农村居民点属性数据库;(2)长河流域 1:5 万 DEM 数据,从中提取研究区高程与坡度信息;(3)2010 年泽州县统计年鉴、全国第六次人口普查提供研究所需社会经济数据及各村人口数据。

2.2 研究方法

分形维数值的计算主要有三种方法,分别基于面积—半径标度关系(回转半径法)、几何测度关系^[10](周长面积法)以及网格计数法^[11]。不同的分维数值算法可以从不同的角度刻画农村居民点的空间形态与布局特征,以此揭示农村居民点形成与发展过程中蕴含的规律。其中,半径维数用以反映农村居民点的空间分布格局和向心聚集程度;周长面积法通过描述农村居民点斑块边界的曲折性,反映其形成的规则性及其空间渗透复杂程度,网格法即盒计数法,反映农村居民点的空间分布均衡性,且其均衡性在一定程度上随网格维数值的增大而加强,此时的农村居民点布局较为集中^[12]。农村居民点这一分形体具有明显的非均衡性^[5],因此本文采用网格计数法,计算农村居民点体系的网格维数,用以反映农村居民点体系发育的有序状态及其空间分布的均衡程度,表征农村居民点占据空间的能力。计算公式为:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(r)} P_i(r) \ln P_i(r)}{\ln r}$$

式中: D 为信息维数; r 为覆盖研究区农村居民点的矩形网格宽度; $N(r)$ 为宽度为 r 的矩形网格非空覆盖网格数量; $P_i(r)$ 为农村居民点图层的点落入第 i 个盒子的概率。实际运用中,通过对 $N(r)$ 与 r 的点対进行有限取值,利用双对数线性回归分析对数坐标系中呈对数关系的点对,其斜率的绝对值即为所求的分形维数 D 。

研究表明 D 值的理论值范围为 $1 \sim 2$ ^[13], D 值越大,说明农村居民点体系发育越好,农村居民点空间分布较为均衡集中,空间占据能力越强; D 值越小,则说明农村居民点体系发育越弱,农村居民点空间分布则较为奇异分散,空间占据能力越弱^[14-15]。

3 研究过程

3.1 影响因子选择

区域农村居民点是一个复杂的开放性系统,研究表明农村居民点空间分布发展由于受到当地自然、经济、社会因素的共同影响,其斑块周长、面积、区域人口等很多属性的分布变化均呈指数分布^[16],而非高斯分布。自然因素中高程变化和坡度坡向极大地影响农村居民点的选址和建设难易程度,水资源影响农村居民生产生活的便利程度。社会经济因素包括交通、人口、农民人均纯收入等,交通因素影响着农村居民点的通达度,是农民与外界交流的媒介,而农村人口的增加引起农村居民点内部住房面积的刚性需求,必然促使农村居民点扩张外建。农民人均纯收入是农村经济指标的直接反映,人均收入高的区域,农民改善生产生活环境的经济条件趋于成熟,居民点空间分布将随之产生变化,人口也将更为密集。人均居民点用地区域内农村居民点面积与区域土地总面积的比值,可以用来反映区域内农村居民点用地的发展状况,影响农村居民点的发展布局,可以较好地反映该区域农村居民点的宜居性。综合以往的相关研究成果^[17-18]及研究区实际情况,本文选取高程变化、坡度、水系分布、交通、农民人均纯收入以及农村人均居民点用地面积作为影响因子。

3.2 农村居民点分布分形特征定量研究

农村居民点的分布是自然条件与社会经济共同作用的结果,运用分形模型分别计算研究区农村居民点、水系、交通的盒维数值,并利用双对数回归分析验证,判定分形存在,依据为:拟合曲线 R^2 大于 0.95^[19]。本研究基于 ArcGIS 10.1 软件平台将归并处理后的农村居民点斑块构建其包括面积、周长等属性的数据库,以及高程坡度数据库,并分别将居民点数据、水系分布数据、交通路网数据、高程变化以及坡度数据二值化后导出各指标数据的 ASC II 码,并代入 Matlab 软件中,利用其中的盒计数法信息维数值计算程序,计算出各指标的信息维数值。

3.2.1 高程变化与坡度对农村居民点分维的影响 利用ArcGIS 10.1 软件中的分类区统计工具将研究区各斑块的高差(H-Range)和平均坡度值(S-Mean)赋值给相应的农村居民点图斑^[20]。研究区的高程分布范围为海拔 711~1 160 m,为了便于后续数据分析,利用等间隔分类方法将高程划分为 5 类;坡度分类参考全国第二次土地调查坡度分级标准,结合研究区实际情况分为 4 类。利用分类得到的高程、坡度数据与居民点数据叠加分别进行分形分析,结果见表 1。

表 1 高程变化、坡度与农村居民点分维关系

指标	值	范围	分维数值	居民点个数 所占比例/%
高程	1	711.0~800.8 m	1.268	38.46
	2	800.8~890.6 m	1.228	46.89
	3	890.6~980.4 m	1.252	13.19
	4	980.4~1070.2 m	1.200	1.47
	5	1070.2~1160.0 m	—	0
坡度	1	0°~2°	1.216	50.11
	2	2°~6°	1.170	12.86
	3	6°~15°	1.203	36.00
	4	>15°	1.104	1.03

表中数据显示,分维数值最高的是高程处于 800 m 以下的农村居民点(1.268),其居民点数量仅为整个研究区的38.46%;最低的是 980~1 070 m 的农村居民点(1.200),其居民点个数为整个研究区的 1.47%;处于 1 070 m 以上的农村居民点,受自然条件限制数量过少,未呈现统计特征。由此可以看出,随着高程的增加,农村居民点的分维总体呈下降趋势,居民点的规模越来越小,空间分布较为分散,说明山区农村居民点多分布于海拔相对较低的位置,与山区沟谷位置宜居性好的实际情况相符,居民点选址受高程影响较为明显。

就坡度来看,农村居民点分维数值在 0°~2°坡度范围内最大(1.216),其居民点数量占到整个研究区的 50.11%;最低的是>15°的农村居民点(1.104),其居民点个数为整个研究区的 1.03%。长河流域属黄土丘陵山区,地势较为复杂,地势低缓平坦区域地质稳定,施工建造难度小,出行方便,适于建造房屋等居民地设,因此农村居民点分布较为密集。山区宜耕土地资源稀少,而在 2°~6°坡度级地区地势相对平坦,便于进行农业活动,土地利用方式以农地为主,这是农村居民点选址与生存环境条件不断协调的表现,这种现象在丘陵山区尤为突出,而 15°以上的区域,自然条件限制性较大,农村居民点不宜建设,且成本较高,空间占据能量差,所以居民点的数量过少(图 1)。

3.2.2 水系交通对农村居民点分维的影响

(1) 居民点与道路叠加分析。提取研究区道路图层,以 100 m 为间距分别作 100 m,200 m 以及 300 m 缓冲区分析,并利用 MapGIS 中的空间分析功能与道路沿线居民点进行空间位置叠加统计分析。其中,分布在道路 100 m,200 m 以及 300 m 缓冲区范围内的居民点数量分别占居民点总数的 64.47%,71.43%以及 77.23%,说明道路是居民点分布的重要指标。居民点密集的区域道路分布复杂,道路的分布主要位于居民点之间。

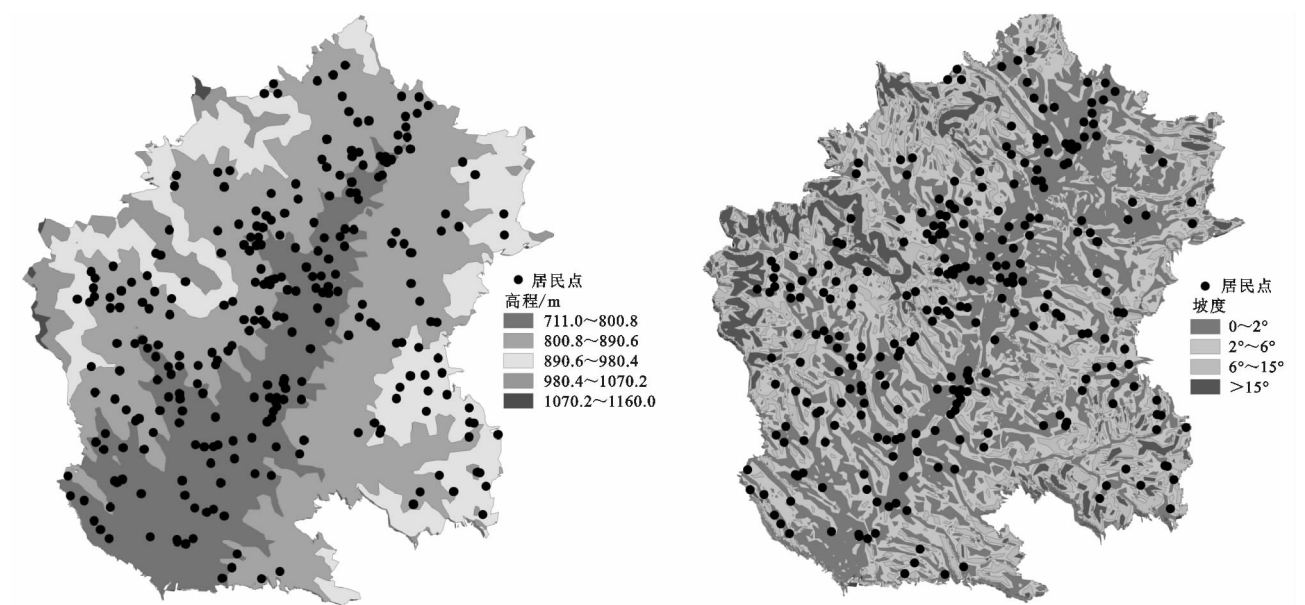


图 1 高程变化、坡度变化与居民点分布关系

道路等密度是指单位面积内道路数量的直观指示。利用 MORPAS 软件对研究区道路等密度进行分析,将等密度分析结果划分为 8 个等级(表 2),对比每个等级内的居民点数量可知,位于 0~160 区间居民点数量最多,达到 44 个,占总分析结果的 40.37%。

(2) 居民点与水系叠加分析。将研究区的水系分别以 300 m、500 m、700 m、1 000 m 为半径作缓冲区分析,与道路沿线居民点进行空间位置叠加统计分析。其中,分布在道路 300 m、500 m 以及 700 m、1 000 m 缓冲区范围内的居民点数量分别占居民点总数的 34.07%、47.25%、59.34%以及 74.36%,说明水系是居民点分布的重要指标。水系发达的区域农村居民点较为密集,居民点的分布围绕水系整体呈放射状分布。

表 2 道路等密度与居民点分布关系

等密度区间	居民点数	占总数百分比/%
(0,160]	44	40.37
(160,320]	28	25.69
(320,480]	21	19.27
(480,640]	6	5.50
(640,800]	4	3.67
(800,960]	4	3.67
(960,1120]	1	0.92
(1120,1280]	1	0.92

(3) 水系交通对农村居民点分维的影响。以行政区为计算单元,分别计算各区域农村居民点、水系、交通的信息维数值,结果见表 3。

从全区来看,整个研究区及各乡镇农村居民点分维数值均明显高于交通维数值和水系维数值,全区的水系维数高于交通维数,总体上农村居民点分维数值>水系分维数值>交通分维数值。而研究区 2009 年

农村居民点面积现状为 1 275.3 hm²,交通面积为 17.70 hm²,水域面积为 134.84 hm²,明显有农村居民点面积>水域面积>交通面积,可见分维数值变化与农村居民点、水系、交通分布情况基本一致。而且,研究区内农村居民点的空间占据能力远高于交通水系,这种现象是农村居民点体系发育过程中与自然环境相协调的结果。与居民点和水系相比,交通分维数值最低,说明研究区交通的发育程度最低,从客观上反映了研究区的交通条件尚不能完全满足区域内农村居民的生活需求这一现实。下村镇交通分维数最高,道路最为完善,川底乡最低,与其相对较低的社会经济发展水平相符,表明交通发展受到经济发展水平的限制。而从水系维数来看,大东沟镇最高,川底乡最低,与研究区实际相符,大东沟镇的水系相对发达,川底乡地表水系分布则较少。

表 3 水系、交通与居民点分维关系

行政区	居民点分维数	交通分维数	水系分维数
川底乡	1.310	1.200	1.168
大东沟镇	1.325	1.228	1.253
下村镇	1.217	1.232	1.199
全区	1.304	1.206	1.229

将分维数值对应到空间上来看,交通和水系通过影响农村居民点的建设选址影响着农村居民点的空间分布变化,且农村居民点分维数值的变化趋势与交通、水系的变化趋势具有一致性,这是农村居民点体系发育时不断进行空间选择的结果,使得区域内农村居民点分维数高于交通维数和水系维数,这种选择的盲目性加重了水系维持人类生活的负担,自然环境遭到破坏的程度逐步加深,需要人类给予干涉以降低危害。

3.2.3 社会经济因素对农村居民点分维的影响 社

会经济因素包括农村人均居民点用地面积和农民人均纯收入,本研究根据研究区社会经济指标统计计算

结果将人均居民点用地、农民人均纯收入依据等间隔分级方法,分为 5 类,计算结果见表 4。

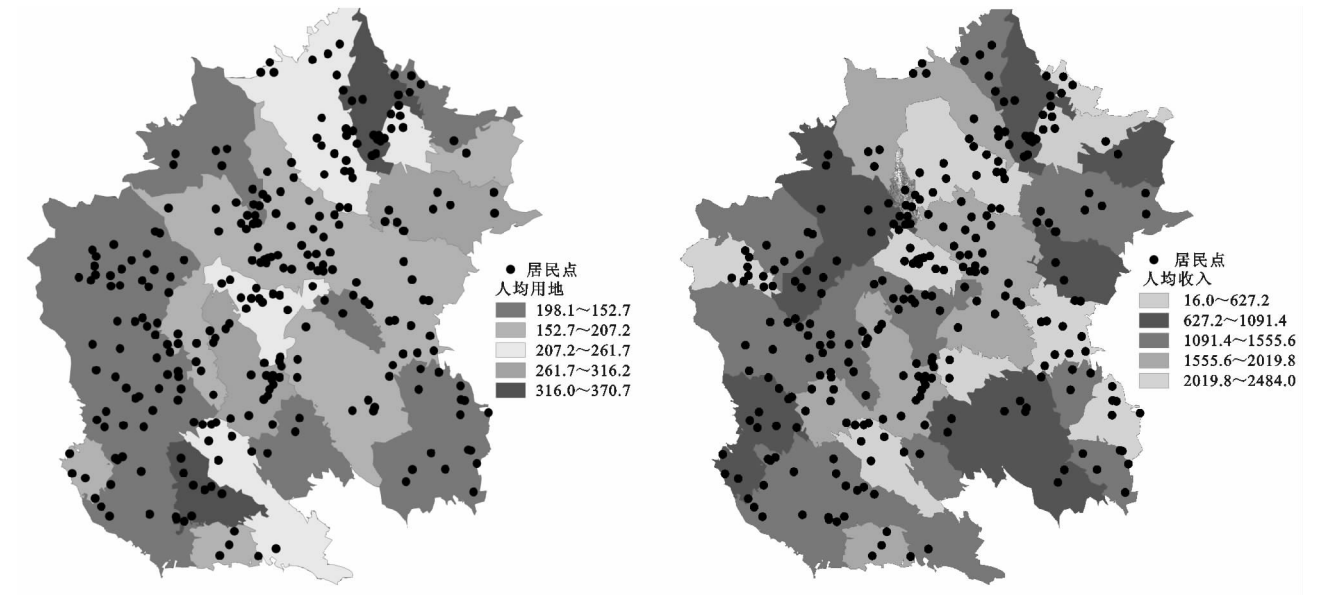


图 2 人均居民点用地面积、农民人均纯收入分级与居民点关系

表 4 社会经济因素与居民点分维关系

指标	分级	指标值 范围	分维 数值	居民点个数 所占比例/%
人均居民点 用地面积	1	98.1~152.7	1.199	4.76
	2	152.7~207.2	1.234	19.41
	3	207.2~261.7	1.223	28.94
	4	261.7~316.2	1.259	23.08
	5	316~370.7	1.268	23.81
农民人均 纯收入	1	163~627.2	1.268	35.53
	2	627.2~1091.4	1.226	29.67
	3	1091.4~1555.6	1.286	18.32
	4	1555.6~2019.8	1.197	9.52
	5	2019.8~2484	1.211	6.96

由表 4 可以看出,人均居民点用地面积、农民人均纯收入与农村居民点分维值具有明显的趋势相关性。人均占地面积大、农民纯收入高的地区,农村居民点分维数值大,农村居民点的发育更具有组织性,

这说明随着社会经济的不断发展,农村居民点整理活动的不断推进,社会经济因素对农村居民点布局的影响力会逐渐增强,农村居民点空间占据能力逐渐加强,也就是说,农村居民点的布局对周边自然环境的依赖性减弱,对社会环境的依附性加强,这与姜广辉等^[21]用 Logistic 回归模型分析的社会经济因素对北京山区农村居民点变化的影响一致。但是,研究区农民人均纯收入处于 163~627 区间内的居民点数量最多,属于较为贫困地区。此外,研究区内人均居民点用地面积水平差异较大,最少为 98,最大 370,处于 207~261 区间内的居民点数量最多。

3.3 基于证据权法的农村居民点空间分布特征定量研究

根据上述分形分析可以得出长河流域农村居民点空间分布特征影响因子特征变量与特征值,见表 5。

表 5 长河流域农村居民点空间分布特征影响因子综合特征

预测对象	影响因素	影响因子	特征变量	特征值
农村居民点	自然条件	高程	宜居高程范围	711~800
				800~890
		坡度	宜居坡度分布	0~2
	社会经济	水系	水系缓冲区	300 m 缓冲区
		农民人均纯收入	人均收入分布	163~627
		人均居民点占地面积	人均占地分布	207~261
		道路	道路缓冲区	100 m 缓冲区
			道路等密度分析	区间[0,160]

运用证据权法,在 MORPAS 软件平台下分别计算各证据层与居民点发生的相关程度及证据权值,结果见表 6。

对上述 8 个证据层进行独立性检验,在显著性水平为 0.05 的情况下,上述证据因子较好地满足条件独立性。由表 6 可知,研究区内各证据层对长河流域

农村居民点分布特征影响大小依次为: $L_5, L_1, L_2, L_3, L_4, L_8, L_6, L_7$ 。各因素与居民点发生均呈正相关性, 说明农村居民点的分布与这些因素关系密切。

表 6 长河流域农村居民点空间分布证据因子权重

序号	证据因子名称	W^+	W^-	C
L_1	道路证据权	1.061214	-1.451572	2.512785
L_2	等密度证据权	1.247917	-0.672522	1.926845
L_3	高程证据权 1	1.078918	-0.447929	1.526845
L_4	高程证据权 2	0.650709	-0.599223	1.249932
L_5	坡度证据权	0.711773	-3.287165	3.998936
L_6	人均收入证据权	0.459223	-0.228560	0.687783
L_7	人均占地证据权	0.478040	-0.209249	0.687287
L_8	水系证据权	0.842606	-0.134299	0.976904

4 结论与讨论

(1) 长河流域农村居民点体系具有分形特征, 其形成受自然和社会经济因素综合影响, 边界曲折而复杂, 分形模型可以有效地描述居民点发育体系的这种曲折性和不规则性。本文结合前人研究成果与黄土丘陵山区的实际情况分析了高程、交通、水系、农村人口密度、农民纯收入等影响因子, 对居民点体系分形特征的影响, 研究结果显示农村居民点分维数值随着高程和坡度的增加总体呈降低趋势, 地势平坦低缓地区农村居民点较为集中。

(2) 交通布局、水系分布通过影响农村居民点的选址影响其体系的分形特征, 长河流域农村居民点分维数值显著高于交通维数与水系维数, 说明研究区农村居民点的空间占据能力高于交通、水系。随着城乡一体化与新农村建设的推进, 农村居民点将更加集中, 形状更为规则, 相应的信息维数也将升高, 同时, 交通维数也必然升高, 而研究区水资源匮乏, 随着采煤活动的持续进行, 水系维数则将会降低。这与车明亮^[6]、李玉华^[22]等研究得出的居民点分形维数在区位条件好、分布集中连片的区域其值更高, 这一结论一致。但是, 居民点维数与交通维数、水系维数变化趋势存在的某种联系如何在理论上得以论证, 仍需进一步的研究。

(3) 通过分析社会经济因素中人均居民点用地面积、农民人均纯收入对居民点体系分形特征的影响, 结果表明社会经济因素可以直接影响其分维数。研究区农村人均居民点用地面积与农民人均纯收入与居民点维数变化趋势一致。长远来看, 在我国城乡统筹发展与新农村建设的持续推进下, 国家政策的干涉使得社会经济因素对农村居民点体系分形特征的影响愈加明显, 农村居民点的形状越来越规则有序,

相应的分形维数也将会随之升高。

(4) 引入证据权模型定量研究农村居民点空间分布特征, 可对研究区农村居民点影响因素得出进一步认识: 所选因素中, 对于长河流域农村居民点分布的各影响因素影响程度排序为: 坡度>道路>高程>水系>农民人均纯收入>人均居民点占地面积, 且各因素与居民点发生均呈正相关性, 说明农村居民点的分布与这些因素关系密切。地势平坦、坡度低缓的区域稳定性高, 适宜进行房屋等建筑施工建造; 道路系统复杂的地区, 便于农村居民出行与外界交流, 交通路网形成的等密度值越高, 居民点越密集; 在特定高程范围内, 海拔过高不利于居民的生活, 相对低缓的位置宜居性较好。这与分形理论研究得出的结论一致。

参考文献:

[1] 孙华生, 黄敬峰, 金艳, 等. 基于 GIS 技术的县域居民点空间分布特征分析及其优化布局[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2007, 33(3): 348-354.

[2] 姜广辉, 张凤荣, 颜国强等. 科学发展观指导下的农村居民点布局调整和整理[J]. 国土资源科技管理, 2005, 22(4): 60-65.

[3] 廖荣华, 喻光明, 刘美文. 城乡一体化过程中聚落选址和布局的演变[J]. 人文地理, 1997(4): 35-38.

[4] 徐雪仁, 万庆. 洪泛平原农村居民地空间分布特征定量研究及应用探讨[J]. 地理研究, 1997, 16(3): 47-54.

[5] 陈涛, 刘继生. 城市体系分形特征的初步研究[J]. 人文地理, 1994, 9(1): 25-30.

[6] 车明亮, 聂宜民, 姜曙千等. 平邑山区农村居民点分形特征及影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 360-365.

[7] 宋志军, 关小克, 朱战强. 北京农村居民点的空间分形特征及复杂性[J]. 地理科学, 2013, 33(1): 52-60.

[8] 李让恩, 杨朝现, 蒋霞等. 村级尺度下的农村居民点优化布局分析[J]. 国土资源科技管理, 2011, 28(6): 93-98.

[9] 徐亮, 胡海霞, 郑黎. 元通镇居民点规模布局的分形研究与规划[J]. 经济地理, 2001, 21(S1): 150-153.

[10] 陈彦光, 刘继生. 城市形态分维测算和分析的若干问题[J]. 人文地理, 2007(3): 98-103.

[11] De Keersmaecker M L, Frankhauser P, Thomas I. Using fractal dimensions for characterizing intra-urban diversity: the example of Brussels[J]. Geographical Analysis, 2003, 35(4): 310-328.

[12] 赵辉, 王东明, 谭许伟. 沈阳城市形态与空间结构的分形特征研究[J]. 规划师, 2007, 23(2): 81-83.

[13] 王锐, 郑新奇. 分形理论在土地利用类型研究中的应用[J]. 海南师范学院学报: 自然科学版, 2005, 18(4): 377-380.

[14] 冯健. 杭州城市形态和土地利用结构的时空演化[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 343-353.

- [3] 刘春成,李毅,任鑫,等.四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J].农业工程学报,2011,27(5):62-67.
- [4] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [5] 袁建平,张素丽,张春燕,蒋定生.黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J].土壤学报,2001,38(4):579-583.
- [6] 郭素珍.土壤物理学[M].呼和浩特:内蒙古文化出版社,1998.
- [7] 王全九,来剑斌.Green-Ampt模型与Philip入渗模型的对比分析[J].农业工程学报,2002,18(2):13-16.
- [8] 刘祥宏.生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D].陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2013.
- [9] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
- [10] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. Organic Geochemistry, 2000,31(7):669-678.
- [11] 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等.生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J].水土保持学报,2013,27(2):101-104.
- [12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(5):1719-1730.
- [13] 田丹,屈忠义,李波,等.生物炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J].灌溉排水学报,2013,32(3):135-137.
- [14] 杜斌,屈忠义,于健,等.内蒙古河套灌区大田作物膜下滴灌作物系数试验研究[J].灌溉排水学报,2014,33(4):16-20.
- [15] 李琲.内蒙古河套灌区参与式灌溉管理运行机制与绩效研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [16] 范严伟,赵文举,王昱.入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J].兰州理工大学学报,2015,2,41(4):65-70.
- [17] 任宗萍,张光辉,王兵,等.双环直径对土壤入渗速率的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):95-103.
- [18] 解文艳,樊贵盛.土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(3):272-275.
- [19] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.
- [20] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993,57(4):1071-1076.
- [21] 钟继洪,唐淑英,谭军.广东红壤类土壤结构特征及其影响因素[J].土壤与环境,2002,11(1):61-65.
- [22] 万彤,孟冠华,刘宝河,等.混凝—活性炭吸附处理印染废水的试验研究[J].广东化工,2012(12):101-102,109.
- [23] 齐瑞鹏,张磊,颜永毫,等.定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J].应用生态学报,2014,28(8):2281-2288.
- [24] 高海英,何绪生,耿增超,等.生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J].中国农学通报,2011,27(24):207-213.
- [25] 张文玲,李桂花,高卫东.生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J].中国农学通报,2009,25(17):153-157.
- [26] Piccolo A, Nardi S, Concheri G. Macromolecular changes of humic substances induced by interaction with organic acids[J]. European Journal of Soil Science, 1996,47(3):319-328.
- [27] Tryon E H. Effect of Charcoal on Certain Physical, Chemical, and Biological Properties of Forest Soils[J]. Ecological Monographs, 1948,18(1):81-115.
- [28] 董玉云,费良军,穆红文.膜孔肥液单向交汇入渗特性及数学模型研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):81-84.

~~~~~

(上接第283页)

- [15] 庄至凤,姜广辉,何新等.基于分形理论的农村居民点空间特征研究:以北京市平谷区为例[J].自然资源学报,2015,30(9):1534-1546.
- [16] 郗瑞卿,刘富民.基于分形理论的土地利用景观格局变化研究:以镇赉县镇赉镇为例[J].水土保持研究,2013,20(2):217-222.
- [17] 秦占飞,常庆瑞.土地利用类型分维数及稳定性研究:以陕西省蒲城县为例[J].水土保持通报,2012,32(1):115-118.
- [18] 李君,李小建.综合区域环境影响下的农村居民点空间分布变化及影响因素分析:以河南巩义市为例[J].资源科学,2009,31(7):1195-1204.
- [19] 聂笃宪,曾文曲,文有为.分形维数计算方法的研究[J].微机发展,2004,14(9):17-19,22.
- [20] 葛美玲,蔺启忠.基于遥感图像的城市形态分维计算网格法的实现[J].北京大学学报:自然科学版,2007,43(4):517-522.
- [21] 姜广辉,张凤荣,陈军伟等.基于 Logistic 回归模型的北京山区农村居民点变化的驱动力分析[J].农业工程学报,2007,23(5):81-87.
- [22] 李玉华,高明,吕焯等.重庆市农村居民点分形特征及影响因素分析[J].农业工程学报,2014,30(12):225-232.