

强 森,于 慧. 基于分形理论的川西南山区河流与农村居民点分布关系研究[J]. 江苏农业科学,2019,47(2):337-341.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.02.080

基于分形理论的川西南山区河流与农村居民点分布关系研究

强 森^{1,2}, 于 慧¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,四川成都 610041; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:河流的分形特征反映其复杂程度,农村居民点的分形特征反映其占据空间能力的大小。基于分形理论,利用四川省西南攀西地区 2010 年 TM 影像数据及数字高程模型(DEM)数据分析攀西地区河流与农村居民点的分维值,并探析农村居民点分维值在不同临水范围内的变化。结果表明,在不同流域内河流的分维值均大于农村居民点的分维值,在河流尚处于发育阶段时,流域内水资源可被农村居民有效利用;研究区内农村居民点具有靠河分布的现象;农村居民点的最大分维值出现在不同的临水范围内,当流域内河流主干化明显时农村居民点有靠河扩展的趋势,而当水系发育程度增强后,农村居民点扩展趋势的河流导向性将变小。

关键词:分形理论;山区河流;临水性;农村居民点

中图分类号: F323.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)02-0337-05

分形是指在较大尺度内,无特征尺度却有自放射性和自相似性的一种现象。分形是一种复杂的几何体,但只有具备自相似结构的几何体才是分形。分形理论是在分形概念上升华和发展起来的,它主要用于揭示和研究复杂的自然现象和社会现象中所隐藏的规律性、层次性和标度不变性^[1]。流域水系中主河道与支河道之间就呈现出这样的一种分形结构,其分维数越大则流域内水系结构越复杂。车明亮等通过研究城市和农村居民点地理特征,发现农村居民点的空间分布具

有无标度性和自相似性,其分形维数体现了农村居民点的空间占据能力和集聚性的强弱^[2-3]。观察聚落的分布,无论是城市还是乡村,其发展都必然依托某种水源^[4]。在其演进过程中,河流都发挥着直接或间接的作用。目前河流对聚落分布的影响研究集中在城市体系上,如 Cronon 等认为,河流、河口是城市聚落生长的第一自然优势区位^[5-6]。陈彦光等在探讨河流-城市的对称关系时发现,城市的等级体系与水系分形结构的相似性实则是自然-人文系统的对称性^[4];另外,刘继生等在探讨河南省城镇体系空间结构的多分形特征与河流分布关系时,发现城市体系的分形发育与水系的分形结构具有一定的数理关系^[7]。刘沁萍等对 655 个建制城市的分布与自然环境的关系进行研究,发现城市对水的依赖程度最高,且城市等级越高,其依赖程度越强^[8]。迄今为止,关于农村居民点分形特征的研究并不多见,而在已有的研究中,李玉华等发现居民点的选址具有一定的盲目性,当其分维值大于同一区域的水系分维值时会增加河流的承载压力,且周围自然

收稿日期:2017-09-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:41671529);中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所青年百人团队计划(编号:SDSQB-2015-01)。

作者简介:强 森(1993—),女,四川都江堰人,硕士研究生,主要从事山区发展与规划研究。E-mail:qmemily@163.com。

通信作者:于 慧,博士,副研究员,主要从事山区发展与规划研究。

Tel: (028)85225828; E-mail: yuhui@imde.ac.cn。

参考文献:

- [1] 黄桂红,贾仁安. 基于动态反馈分析的农产品供应链整合实证研究[J]. 系统工程,2008,26(8):17-21.
- [2] 姜天瑞,张一豪,刘永悦,等. 农产品供应链中农民合作社的助农增收效应——以黑龙江省 240 个农户为例[J]. 江苏农业科学,2017,45(3):258-262.
- [3] 刘 旭. 陕西省猕猴桃产业发展战略研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [4] 冷志杰. 基于农产品供应链集成机制的大豆供应链集成对策研究[J]. 复旦学报(自然科学版),2007,46(4):481-488.
- [5] 庄晋财,黄群峰. 供应链视角下我国农产品流通体系建设的政策导向与实现模式[J]. 农业经济问题,2009(6):98-103.
- [6] 杨金海,刘纯阳,向林峰. 农产品供应链失调与政府调控[J]. 农村经济与科技,2007(1):77-78.

- [7] 曹武军,邢晓飞,陈志斐. 基于两部收费制的生鲜农产品三级供应链协调[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):259-264.
- [8] 孙 亮,王晓原,于少伟,等. 不确定市场环境下农产品供应链建模与仿真分析[J]. 农机化研究,2011(9):27-31.
- [9] 陈化飞. 低碳经济下绿色农产品供应链主体博弈[J]. 江苏农业科学,2017,45(14):293-296.
- [10] 白世贞,丁小洲. 双渠道下农资供应链协调的 Stackelberg 博弈研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(3):254-257.
- [11] 孙文清. 农产品供应链参数对牛鞭效应和成本影响的仿真[J]. 统计与决策,2017(13):52-55.
- [12] 徐升华,徐生菊. 农产品供应链知识共享系统的动力学建模与仿真[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2013,36(11):1381-1387.
- [13] 林燕燕,王维新. C-D 生产函数在农业机械对农业生产贡献率测算中的应用[J]. 农机化研究,2005(4):207-208.

环境遭到破坏的程度也会加深^[9]。车明亮等在平邑山区农村居民点的分形特征研究中,发现交通和河流是影响其分形特征的主要因素^[2]。宋志军等通过分析北京市农村居民点的分形特征,发现在地形单一、主要从事农业生产的平原地区具有较强的分形特征^[3]。目前尚未有基于分形理论从河流这一自然要素角度去分析农村居民点分布特征的研究,而对于山区来说,水源对聚落的控制应该更重要。因此,本研究基于分形理论,分析河流分形特征、农村居民点的分形特征以及它们之间的关系,并探讨在不同临水范围内居民点分形特征的变化,以期为未来山区农村的建设和发展提供参考依据。

1 研究区概况及数据来源

攀西地区位于四川省西南部,横断山系东缘,是青藏高原、云贵高原通往四川盆地的过渡带,其中包括攀枝花市和凉山彝族自治州。该区域地势由西北向东南倾斜,高差悬殊大,最大高差达 5 144 m^[10],河流的山区性特征明显,多是深切峡谷。过境客水比重较大,占该区水资源比重的 73.5%^[11]。为了获取较多农村居民点的数据并保证流域的完整性,剔除包含农村居民点较少的流域,并选取攀西地区的 7 个不同流域(图 1),分别为安宁河流域、雅砻江流域、盐源流域及所属金沙江的 4 个不同子流域(本研究命名为金沙江流域 1、金沙江流域 2、金沙江流域 3、金沙江流域 4)。7 个不同流域具有河谷、盆地及山地等不同的地形特点,并分布着攀西地区 91% 的农村居民点。

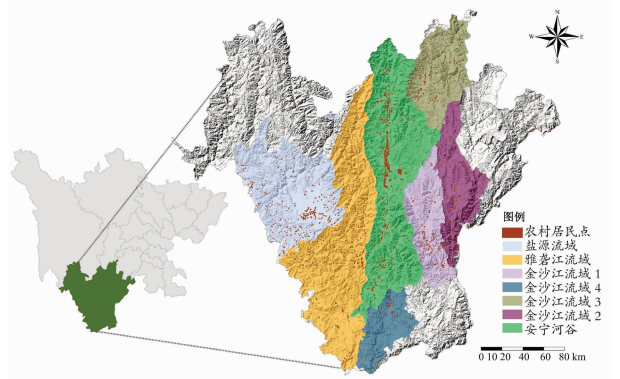


图1 研究区示意

本研究利用国家基础地理信息数据 1 : 400 万数据、2010 年攀西地区 TM 遥感影像、1 : 50 000 攀西地区数字高程模型 (DEM) 数据进行分析。先利用 Arcgis 的水文分析模块对 DEM 数据进行水文分析和流域分析,并确定安宁河流域、雅砻江流域、盐源流域、所属金沙江的 4 个小水流域。

2 研究方法

2.1 流域水系分维数计算

本研究采用计盒维数的方法对流域水系的分维值进行测定,其原理为取边长为 r 的小盒子覆盖分形体,并数出非空盒子的数量 $N(r)$,随着盒子边长的减小,可以得到一系列增大的 $N(r)$,最后当 $r \rightarrow 0$ 时,可以得到分维值 (D)^[12]。

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln(r)}。$$
 (1)

但在实际中,只能取到有限的 r 和对应的 $N(r)$,可以由

双对数坐标中直线的斜率求得分维值。

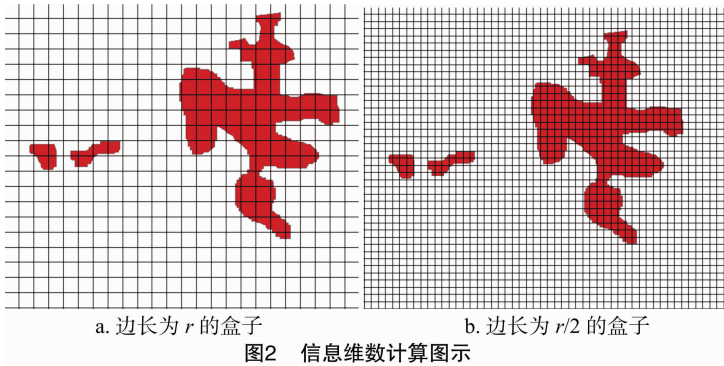
利用 ArcGIS 10.1 水文分析模块对 DEM 数据进行水系提取,依据相关研究^[13],设置不同的集水阈值会对生成的栅格数产生影响,集水阈值越小,该局地水系就越详细、越复杂,且水系阈值越小,水系的分维值就越大,集水阈值和分维值的关联性就越好。因此,本研究设置不同的集水阈值 (100, 500, 1 000, …, 500 000),并在矢量图转化成栅格的过程中设置不同的栅格尺寸 r ,如 20、50、100、500、1 000 等(表 1),最后统计栅格数量 $N(r)$ 。

表 1 攀西地区河流分维值

集水阈值 (m)	r (m)	$N(r)$	$\ln(r)$	$\ln N(r)$
100	20	11 954 798	3.00	16.30
	50	4 064 535	3.91	15.22
	100	1 835 970	4.61	14.42
	500	255 505	6.21	12.45
	1 000	77 917	6.91	11.26
500	20	5 008 880	3.00	15.43
	50	1 865 678	3.91	14.44
	100	892 758	4.61	13.70
	500	153 420	6.21	11.94
	1 000	63 638	6.91	11.06
1 000	20	2 870 971	3.00	14.87
	50	1 129 999	3.91	13.94
	100	556 853	4.61	13.23
	500	101 534	6.21	11.53
	1 000	45 060	6.91	10.72
5 000	20	1 341 235	3.00	14.11
	50	533 286	3.91	13.19
	100	264 779	4.61	12.49
	500	50 486	6.21	10.83
	1 000	23 969	6.91	10.08
10 000	20	974 070	3.00	13.79
	50	387 999	3.91	12.87
	100	192 721	4.61	12.17
	500	37 115	6.21	10.52
	1 000	17 840	6.91	9.79
50 000	20	444 764	3.00	13.01
	50	177 389	3.91	12.09
	100	88 397	4.61	11.39
	500	17 292	6.21	9.76
	1 000	8 496	6.91	9.05
100 000	20	321 504	3.00	12.68
	50	128 497	3.91	11.76
	100	63 906	4.61	11.07
	500	12 549	6.21	9.44
	1 000	6 164	6.91	8.73
500 000	20	173 859	3.00	12.07
	50	69 445	3.91	11.15
	100	34 650	4.61	10.45
	500	6 914	6.21	8.84
	1 000	3 442	6.91	8.14

2.2 农村居民点信息维数计算

由于农村居民点分布不均匀性,本研究采用信息维数的方法来测量居民点的分维值,信息维数是盒维数的推广,即用边长为 r 的小盒子覆盖分形体,将每个小盒子编号,并将分形中部分落入第 i 个小盒子的概率记为 P_i (图 2),那么用尺度 r



的小盒子所测算的平均信息量为

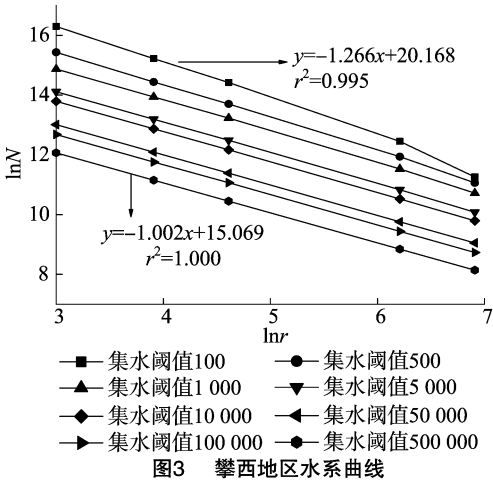
$$I = - \sum_{i=1}^{N(r)} P_i \ln P_i \quad (2)$$

若用 I 取代公式(1)中的小盒子数量 $N(r)$, 就可以得到信息维数 $D_i^{[1]}$ 。

3 结果与分析

3.1 河流分形特征

利用河流的分形计算方法得到攀西地区水系计盒分形分维 $\ln(r) - \ln(N)$ 曲线(图 3), 点列坐标具有无标度性, 并没有坐标点明显偏离曲线, 因此所选的不同尺寸均在无标度区以内。在集水阈值为 100 时, 河流的分维值最大; 当集水阈值为 500 000 时, 河流的分维值最小(表 1), 由于当水系集水阈值越小时, 与分维值的关联性越好, 因此取 1.266 为攀西地区的水系分维值。另外, 当河流分维值大于 1.6 时, 河流发育成熟^[14], 而攀西地区河流的分维值均小于 1.6(图 3), 说明整个攀西地区河流还处于幼年期, 水系尚未充分发育。



3.2 居民点分形特征

利用 ArcGIS 10.1 中 Create Fishnet 生成边长为 50、100、500、1 000 的格网, 并用叠加工具将其与农村居民点的面积数据求交集, 得到落入每个格网中的居民点的面积大小, 以此来计算居民点落入第 i 个小盒子的概率, 并得到攀西地区农村居民点不同边长网格所对应的 $\ln r$ 和 $\ln I$ 值(表 2)。攀西地区农村居民点双对数坐标图中点列坐标具有无标度性, 且并没有坐标点明显偏离曲线, 因此所选的不同大小的格网均在无标度区以内(图 4), 并根据斜率得出整个攀西地区农村居

表 2 攀西地区农村居民点双对数值

网格尺寸 r (m)	$\ln r$	$\ln I$
50	3.91	9.43
100	4.61	8.57
500	6.21	6.77
1 000	6.91	5.85

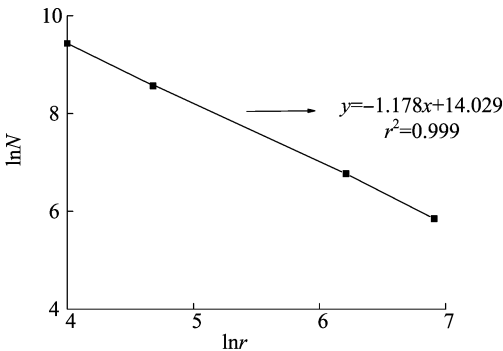


图 4 攀西地区农村居民点曲线

民点的分维值为 1.178 2, 小于攀西地区水系的分维值。

3.3 居民点分形特征与河流分形特征关系

在分析攀西地区 7 个流域的河流分维值及农村居民点的分维值后, 经过双对数回归分析验证, r^2 均大于 0.99^[15], 7 个研究区对应的水系分维值均大于农村居民点分维值(表 3)。人文地理系统的发展应与水系等自然环境保持协调, 水系分维值大于农村居民点的分维值, 说明从形态上看, 河流比农村居民点更复杂, 水系包围农村聚落, 使流域内农村居民的生活生产用水尚且充足, 这与刘继生等的研究结论^[7]一致。

表 3 研究区水系分维值及农村居民点分维值

研究区	河流		居民点	
	分维值	r^2	分维值	r^2
安宁河流域	1.940	0.999	1.152	0.999
雅砻江流域	1.970	0.999	1.130	0.998
盐源流域	1.170	0.993	1.146	0.997
金沙江流域 1	1.210	0.994	1.031	0.999
金沙江流域 2	1.220	0.994	1.201	0.998
金沙江流域 3	1.270	0.997	1.250	0.997
金沙江流域 4	1.200	0.997	1.251	0.997

由表 3 可知, 除了安宁河流域、雅砻江流域以外, 其他流域河流的分维值均小于 1.600^[14], 说明这些流域河流还处于幼年期, 水系尚未充分发育, 河流的蓄水能力较弱。随着时间的推移, 河流还会继续发育, 水系结构会变得更加复杂, 同时

农村居民点的空间分布也会产生变化。某种情况下,人类活动会对水系结构产生一定的影响^[16],因此,在农村居民点的空间变化过程中应注意与河流协调发展,避免造成区域内自然环境的破坏。

3.4 农村居民点分形特征与河流距离关系分析

为了更细致地探析河流对农村居民点分形特征的影响,本研究以 400 m 为步长设置不同临水范围,将临水 0 ~ 400 m 范围设为等级 1;401 ~ 800 m 范围设为等级 2;801 ~ 1 200 m 范围设为等级 3;1 201 ~ 1 600 m 范围设为等级 4;1 601 ~ 2 000 m 范围设为等级 5。

3.4.1 不同临水等级下农村居民点面积分布特点 本研究农村居民点面积比例是指在某一临水等级范围内,农村居民点面积占流域内所有农村居民点面积的比例。通过分析不同临水范围内农村居民点的面积比例,发现在距离河岸 0 ~ 400 m 范围内的农村居民点所占面积均大于 50% (表 4),有

靠河分布的特点。这种逐水而居的特点体现了河流对山区农村居民生活、生产具有重要意义。

3.4.2 不同临水等级下农村居民点分形特征 从分形特征角度来分析农村居民点分布特征,其分维值表示形态上的复杂性,也代表了其占据空间的能力。在所设的不同临水等级下,不同流域农村居民点的最大分维值出现在不同的等级中(表 5)。安宁河流域、雅砻江流域和盐源流域 2010 年出现的最大分维值均在距河 1 200 ~ 1 600 m (临水等级 4) 范围内;金沙江流域 1 和金沙江流域 2 最大分维值出现在距河 800 ~ 1 200 m (临水等级 3) 范围内;金沙江流域 3 和金沙江流域 4 最大分维值出现在距离河流 0 ~ 400 m (临水等级 1) 范围内(表 5)。农村居民点的最大空间占据能力出现在不同的临水范围内,说明居民选址过程中在考虑保障供水和回避河水威胁的同时,还受到其他因素的影响,而这些因素在不同的流域内的影响程度不同。

表 4 2010 年不同临水水等级下农村居民点面积比例

近水等级	各农村居民点的面积比例(%)						
	安宁河流域	雅砻江流域	盐源流域	金沙江流域 1	金沙江流域 2	金沙江流域 3	金沙江流域 4
1	59.32	65.93	65.93	55.13	57.73	61.45	80.10
2	28.30	16.50	16.50	15.70	9.58	27.50	12.46
3	2.38	6.50	6.50	18.04	13.72	6.29	3.94
4	5.85	6.37	6.37	6.26	10.64	0.36	3.50
5	4.14	4.69	4.69	4.87	8.33	8.33	—

注:“—”表示在该距离下没有居民点。表 5 同。

表 5 2010 年不同临水等级下农村居民点的分维值

近水等级	各农村居民点的分维值						
	安宁河流域	雅砻江流域	盐源流域	金沙江流域 1	金沙江流域 2	金沙江流域 3	金沙江流域 4
1	1.15	1.17	1.16	1.19	1.20	1.39	1.31
2	1.20	1.30	1.14	1.38	1.12	1.10	1.11
3	1.26	1.52	1.13	1.68	1.66	1.03	1.04
4	1.39	1.58	1.63	1.11	1.39	1.01	0.98
5	1.02	1.07	1.07	1.04	1.13	1.00	—

为进一步分析农村居民点分形特征与河流距离的关系,本研究借鉴水系结构参数,从水系结构本身的角度去分析。其中,水系结构参数包括流域切割密度和河网发育系数。流域切割密度表示流域内水系的总长度与流域面积之比,流域河网密度越大,表示水系分割强度越大,对流域水量的调蓄能

力就越强。河网发育系数是支流长度与流域主干河流长度之比,其值越小,表示流域河流主干化越明显。利用研究区内河流结构系数及河流、农村居民点的分维值和出现农村居民点最大分维值的临水等级数据(表 6)对各参数进行相关性分析(表 7)。

表 6 水系结构参数、河流与居民点分维值及出现最大居民点分维值的范围等级

区域	河流切割密度	河流发育系数	河流分维值	2010 年居民点分维值	出现居民点最大分维值的临水等级
金沙江流域 1	0.23	7.17	1.21	1.03	3
金沙江流域 2	0.22	7.07	1.22	1.20	3
金沙江流域 3	0.24	6.13	1.27	1.25	1
金沙江流域 4	0.25	6.63	1.20	1.25	1
安宁河流域	0.30	15.76	1.94	1.15	5
雅砻江流域	0.29	12.50	1.97	1.13	5
盐源流域	0.26	13.95	1.17	1.15	5

河流切割密度与河流发育系数及河流分维值在置信区间为 0.95 水平下,相关性分别为 0.849、0.874 (表 7),具有良好的相关性,与张晨等的结论^[17]一致,而河流切割密度与农村居民点的分维值和出现最大分维值的等级相关性不强。河流发育系数与出现农村居民点最大分维值的临水等级在置信区

间为 0.99 水平下,相关性为 0.897,二者具有极显著相关性。从河流发育系数的含义可知,其大小表示河流主干化程度的大小。当居民点最大分维值出现在距河 0 ~ 400 m (距河等级 1) 范围内时,河网发育系数相对较小,河流主干化现象明显,流域内农村居民点触及河水的概率小,因此农村居民点的空

表 7 水系结构参数与河流、农村居民点分维值及出现最大分维值临水等级的相关性分析

参数	指标	河流切割密度	河流发育系数	河流分维值	农村居民点 2010 年分维值	出现最大分维值等级
河流切割密度	<i>r</i> 值	1.000	0.849 *	0.874 *	-0.111	0.646
	<i>P</i> 值	—	0.016	0.010	0.813	0.117
河流发育系数	<i>r</i> 值	1.000	0.670	-0.305	0.897 **	
	<i>P</i> 值	—	0.100	0.506	0.006	
河流分维值	<i>r</i> 值		1.000	-0.199	0.605	
	<i>P</i> 值		—	0.668	0.150	
农村居民点 2010 年分维值	<i>r</i> 值			1.000	-0.567	
	<i>P</i> 值			—	0.184	
出现最大分维值等级	<i>r</i> 值				1.000	
	<i>P</i> 值				—	

注:“—”表示没有数据。*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平(双侧)上显著相关。

间占据能力具有河流指向性;当居民点最大分维值出现在距河 800 ~ 1 200 m(距河等级 3)及 1 200 ~ 1 600 m(距河等级 4)范围内时,河网发育系数变大,河流主干化现象减弱,由于此时流域局地供水充足,农村居民点空间占据能力的河流指向性较小。因此也反映出农村居民点占据空间的能力会受到水资源供给的影响。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于分形理论测算研究区内河流与农村居民点的分维值,拟合得到双对数坐标图均在无标度区内,因此研究区内的河流及农村居民点均具有分形特征。且各流域内农村居民点的分维值均小于河流分维值,从形态上看,河流包围着聚落,农村居民的生活生产用水较充足。通过分析农村居民点在不同临水范围内的面积比例,发现农村居民点具有逐水而居的分布现象。另外,从分形特征角度和水系本身结构角度分析,发现在不同流域内,农村居民点的最大占据能力并不出现在相同的临水范围内;农村居民点的空间占据能力受到流域内河流及其他因素的影响。当流域内河流主干化明显时,农村居民点有靠河扩展的趋势,而当河流发育系数变大后,农村居民点的扩展趋势河流指向性将变小。

4.2 讨论

本研究主要从河流与农村居民点分形特征、临水等级的角度探讨河流这一自然要素对农村居民点分布的影响。其中,河流对农村居民点的分形特征影响主要源于农村居民生产环境对水资源的依赖性。可见,在山区河流对农村居民点分布的影响较大,而如何突破这种水资源的限制是未来农村公共服务发展的重要议题之一。本研究基于分形理论,探析河流对农村居民点分布的影响可为其提供一定的参考依据。另外,整个研究区都处在一个自然环境较特殊的区域,因此与经济相对发达、地势较平坦的农村居民点相比,该区域农村聚落的形成受自然环境的影响更大。尽管本研究主要分析河流这一自然要素与农村居民点分形特征之间的联系,但除了河流这一自然要素会对农村居民点的分形特征产生影响以外,其他自然因素,如地形地貌、气候条件、山地灾害等也同样会对农村居民点的分布特征造成一定的影响。

本研究从河流结构系数角度探讨河流与农村居民点的关系时,尽管通过分析得到它们之间的相关性大小,但其中具体存在怎样的数学关系还有待进一步研究。另外,如果能从较

大时间尺度来分析水系与农村居民点时空上的演进关系,则更能深入地挖掘河流对农村居民点选址的影响程度。

参考文献:

[1]徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2012.

[2]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(增刊 2):360-365.

[3]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.

[4]陈彦光,刘继生. 中心地体系与水系分形结构的相似性分析——关于人-地对称关系的一个理论探讨[J]. 地理科学进展,2001,20(1):81-88.

[5]Cronon W. Nature's metropolis:chicago and the great west[M]. New York:Norton,1991.

[6]Berziant M,Konishi H. The endogenous formation of a city:population agglomeration and marketplaces in a location-specific production economy[J]. Regional Science and Urban Economies,2000,30(3):289-324.

[7]刘继生,陈彦光. 河南省城镇体系空间结构的多分形特征及其与水系分布的关系探讨[J]. 地理科学,2003,23(6):713-720.

[8]刘沁萍,田洪阵,杨永春. 基于 GIS 和遥感的中国城市分布与自然环境关系的定量研究[J]. 地理科学,2012,32(6):686-693.

[9]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.

[10]莫婷. 基于流域的攀西地区泥石流灾害危险性评价[D]. 南京:南京信息工程大学,2015.

[11]罗怀良,冉茂玉. 攀西地区水资源及可持续利用探讨[J]. 自然资源学报,2001,16(6):552-556.

[12]肯尼思·法乐科内. 分形几何——数学基础及其应用[M]. 曾文曲,刘世耀,译. 沈阳:东北工学院出版社,1991.

[13]黄晶晶,张卫华,魏朝富. 基于 ARCGIS 的丘陵山区局地水系提取及分维值估算[J]. 中国农村水利水电,2012(11):1-3,8.

[14]何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学,1996,16(2):124-128.

[15]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.

[16]徐光来. 太湖平原水系结构与连通变化及其对水文过程影响研究[D]. 南京:南京大学,2012.

[17]张晨,陈剑平,王清,等. 基于分形理论和流域水系分布特征的泥石流研究[J]. 水利学报,2011,42(3):351-356.