

黄土丘陵沟壑区沟道特征及分异规律研究

张恒¹, 韩玲¹, 赵永华¹, 张庭瑜¹, 张阳¹, 韩霁昌²

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710064; 2. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075)

摘要: 为了更清楚地认识黄土丘陵沟壑区沟道特征及其分异规律, 以延安市碾庄沟流域为研究区, 采用基于 GIS 的水文分析方法和空间分析方法计算了沟道级别、长度、高差和比降特征, 并从沟道尺度和流域尺度分别分析了沟道特征及其分异规律。结果表明: 在沟道尺度下, 沟道级别、沟道长度、沟道高差和沟道比降 4 种特征具有明显的空间分异规律, 沟道级别越高, 沟道数量越少, 沟道长度越大, 沟道比降也越小, 而沟道级别与沟道高差无相关性; 在小流域尺度下, 不同流域的最大沟道级别、平均沟道长度、平均沟道高差和平均沟道比降具有空间分异性, 但空间自相关性不显著。

关键词: 沟道; 沟道特征; 空间分异; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: P931.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-00104-05

Study on channel characteristics and differentiation laws of loess hilly and gullied region

ZHANG Heng¹, HAN Ling¹, ZHAO Yonghua¹, ZHANG Tingyu¹, ZHANG Yang¹, HAN Jichang²

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural Resources, Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710064, China; 2. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to understand the channel characteristics and differentiation laws of the loess hilly and gullied region more clearly, the Nianzhuanggou Watershed in Yan'an City was taken as the research area, and the GIS-based hydrological and spatial analysis methods were used to calculate the grade, length, dispersion and the gradient characteristics of the channels, and the channel characteristics and their differentiation laws were analyzed at the channel scale and the watershed scale. The results show that the grade, length, dispersion and gradient of the channel characterized with obvious spatial differentiation laws at the channel scale. The higher the channel grade is, the smaller the channel number is, and the larger the channel length is, the smaller the channel gradient is. The channel grade and channel dispersion has no correlation. At the small watershed scale, the maximum channel grade, average channel length, average channel dispersion and average channel gradient of different watersheds have spatial differentiation, but spatial autocorrelation is not obvious.

Key words: channel; channel characteristics; spatial differentiation; loess hilly and gullied area

1 研究背景

沟道是黄土丘陵沟壑区的地貌骨架, 是在地表流水作用的不断切割、侵蚀下形成的不同级别、不同规模的系统^[1]。作为流域的中枢骨架网络, 沟道是连接流域坡面和流域河道的桥梁。沟道也是流域中

最活跃的要素^[2], 流域侵蚀物质的产生、搬运和堆积过程均在沟道中进行, 因此成为水土流失防治和流域综合治理的重要部位。同时, 沟道也是流域重要的水文特征^[3], 沟道特征集中反映了流域内的综合水文过程。因此, 研究沟道特征对于揭示黄土丘陵沟壑区地貌发育规律、水沙运移规律、综合水文特

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-10-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504700)

作者简介: 张恒(1995-), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向: 土地信息与土地工程。

通讯作者: 韩玲(1964-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感地质与摄影测量研究工作。

征等具有重要的理论和现实意义。

目前关于沟道系统特征的研究主要从不同地貌类型尺度上进行分析^[4],已有的研究结果^[5]表明,从整个陕北黄土高原尺度来看,陕北地区自北向南地貌类型分异具有明显的层次性,不同地貌类型单元的內部地貌形态呈现有序组合。例如,曹建军等^[6]从整个陕北黄土丘陵沟壑区尺度出发,将陕北黄土丘陵沟壑区自北向南划分为黄土峁状丘陵沟壑、黄土梁状丘陵沟壑和黄土塬等7种地貌类型。在同一地貌类型区域内部,海拔、坡度、粗糙度和沟壑密度等沟道特征具有一定的空间同质性;在不同地貌类型区域之间,沟道特征具有空间分异性。已有相关研究主要从较大尺度对沟道特征进行了较多探索,但从更小尺度下,如流域尺度和沟道尺度,对沟道特征分异规律的研究却不多见。

随着3S技术的不断发展,基于DEM数据的数字地形分析和水文分析技术成为了沟道系统相关研究的有力工具^[7]。在GIS平台的支持下,沟道系统的自动提取、沟道网络分级分类、沟道基本特征计算已经可以更快速、更准确、更详细地实现。为了更清楚地理解黄土丘陵沟壑区沟道地貌特征,本文基于GIS技术以延安市宝塔区碾庄沟流域为研究区,从流域尺度和沟道尺度两种尺度下,对沟道特征及其分异规律进行研究。

2 研究区概况

研究区位于延安市宝塔区,地理坐标北纬 $36^{\circ}39'13''\sim 36^{\circ}44'11''$,东经 $109^{\circ}27'51''\sim 109^{\circ}35'26''$,属于延河流域的一级子流域(图1),流域总面积为 53.9 km^2 ,覆盖21个小流域。碾庄沟流域平均海拔高度为 $1\,123.4\text{ m}$,全流域沟壑密度为 2.17 km/km^2 ,地表被千沟万壑割裂,属于较为典型的黄土高原黄土丘陵沟壑地貌类型。据统计,区域多年平均降水量为 535 mm ,7-9月多集中较高强度降水^[8],区域主要气候类型属于半干旱大陆性季风气候。本研究使用的数字地表模型数据为ALOS World 3D 30m (AW3D30)数据^[9],该数据由陆地观测卫星ALOS上搭载的PRISM立体传感器于2014年对地观测获得,由日本JAXA机构发布并开放使用,其栅格分辨率为 30 m ,高程精度为 5 m (角度 $1'$)^[10]。

3 研究方法

3.1 基于DEM的沟道提取方法

DEM是按照规则镶嵌数据模型建立的地面高程矩阵,用以形成数字地面^[11],其基于DEM的坡面

流模拟方法,由于方法简单、算法稳定性高等优点,在黄土沟道提取中得到普遍应用。该方法的基本思想是:根据地表水文分析基本原理,坡面径流总是沿着坡面坡度最大的方向从高处流向低处,并在下游不断地汇集,因此山谷的汇水量是最多的。通过水文分析方法进行地面填注,形成流向栅格^[12],进一步可以得到每个栅格单元的汇流累积量,通过设置一定汇流累积量阈值条件,就可以得到初步的沟道提取结果^[13]。

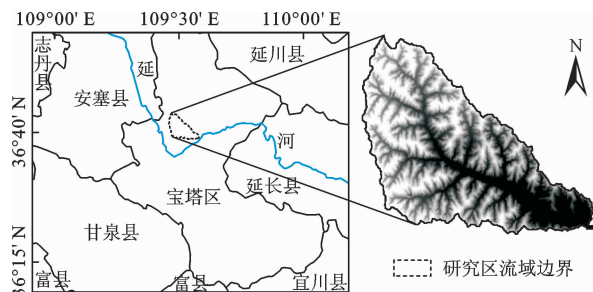


图1 延安市宝塔区碾庄沟流域位置示意图

3.2 沟道系统分级方法

目前已有的沟道分级方法有斯特拉勒法、霍顿分级法和施里夫分级法等。斯特拉勒分级主要思想是:流域内无分支的最小沟谷为一级沟谷,二级沟谷由两个一级沟谷汇流得到,三级沟谷由两个二级沟谷汇流得到,以此类推,直至流域内所有的沟谷均已分级^[14];霍顿分级的主要思想是:流域中不可再分的沟谷为一级沟谷,仅接纳一级沟谷的沟谷属于二级沟谷,仅接纳二级沟谷的沟谷属于三级沟谷,以此类推;而施里夫分级的沟谷级别则是上游沟谷级别的叠加,在施里夫分级中,1条一级沟谷与1条二级沟谷汇成1条三级沟谷,1条二级沟谷与1条三级沟谷汇成1条四级沟谷,1条三级沟谷与1条四级沟谷汇成1条五级沟谷。综合考虑各种分级方法的优缺点,本研究最终选用斯特拉勒法对研究区沟道进行分级。

3.3 沟道特征计算

沟道是黄土丘陵沟壑区的基本地貌形态,而沟道侵蚀促进着沟道在水平和垂直方向上不断扩展和延伸^[15],不同的沟道特征正是不同的沟道发育过程的最终结果,沟道级别、沟长、比降和高差分别从不同角度反映了沟道的发育过程。

本研究将沟道抽象为线状地物,并在不同级别沟道交汇的节点处打断为独立要素,选择了沟道级别、沟长、沟道比降、沟道高差4个基本特征进行分析。沟道级别与沟道的形成发育过程密切相关,能够体现沟道网络的系统性和结构性,并且与沟道发

育程度具有一定的相关性。一般而言,沟道级别越高,沟道发育越成熟,主沟形成了沟道网络结构的主要骨架。沟长则是沟道在水平方向延伸的直观反映,与沟壑面积和沟壑密度密切相关。沟道高差和比降则可以反映垂直方向上沟道侵蚀的剧烈程度,其中沟道高差是指一条沟道中最大高程与最小高程的差值,可以反映沟道的地势特征。沟道比降是描述沟道下降快慢的量,反映了沟道的平缓程度^[16]。

3.4 流域沟道特征空间自相关分析

为分析流域尺度下的空间全局自相关性,本研究引入莫兰指数(Moran's I)。Moran's I 指数反映整个研究区域上邻近或邻接的空间对象的相似程度、分布模式及显著性^[17]。Moran's I 指数的计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: n 为样本单元总数; x_i 为第 i 个单元上的观测属性值; W_{ij} 为量化空间要素之间拓扑关系的空间结构权重矩阵。Moran's I 指数可以反映空间要素的空间自相关性的强弱,当 Moran's I 的绝对值越接近 1 时,表明空间要素观测值之间的空间自相关性越强烈,其中, Moran's I 大于 0 时,表明空间要素的观测值之间可能存在全局空间正相关性,反之则存在全局空间负

相关性;而当 Moran's I 的绝对值越接近 0 时,空间要素的全局空间自相关程度越弱^[18]。为对莫兰指数进行显著性检验,引入 Z 值, Z 的计算公式为:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (2)$$

式中: $E(I)$ 为所有样本单元 Moran's I 的期望值; $\text{VAR}(I)$ 为所有样本单元 Moran's I 的方差^[19]。

4 结果与分析

地学现象普遍具有尺度效应^[20],在不同的空间尺度下,地理现象表现出不同的规律和特征,沟道特征的分异规律同样如此。本研究从两个不同的尺度分析 4 个沟道特征的分异规律。一是沟道尺度,分析各沟道特征在不同级别沟道的分异规律;二是流域尺度,分析各沟道特征在不同小流域的空间分异性。

4.1 沟道尺度下的沟道特征分异规律

为探析 4 种沟道特征在沟道尺度下的分异规律,首先基于沟道尺度下,在获取每条沟道特征值(级别、沟长、比降、高差)的基础上,对沟道特征值进行描述性统计分析,分别统计每种沟道特征在不同沟道级别的平均值和标准差,以分析特征值在不同沟道级别的分布情况,统计结果见表 1。最终沟道分级、沟道比降、沟道高差的计算结果分别见图 2~4,沟长则可以通过图上直接看出。

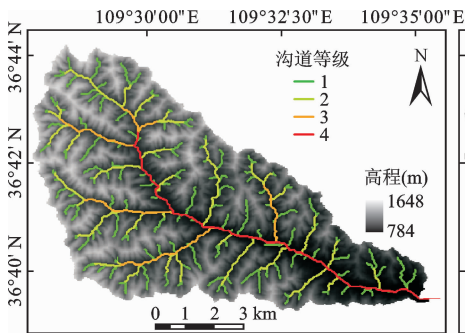


图2 研究区沟道分级图

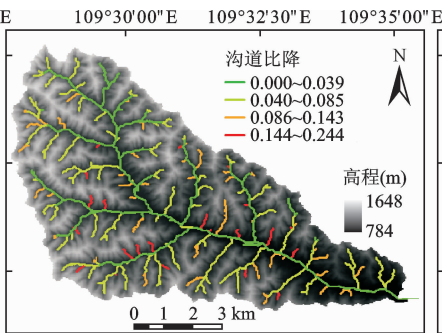


图3 研究区沟道比降分布

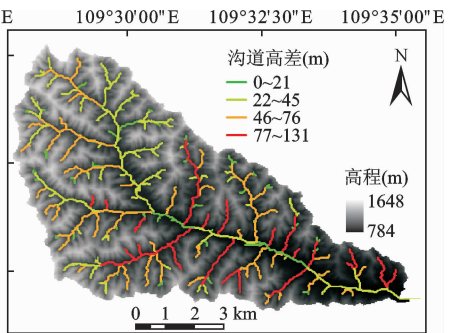


图4 研究区沟道高差分布

表1 沟道特征值描述性统计

沟道 级别	数量	沟长/m		高差/m		比降	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
1	131	432	331	32	28	0.081	0.063
2	30	1175	809	25	21	0.030	0.028
3	5	2547	569	26	17	0.010	0.005
4	1	12430	0	9	0	0.001	0.000

总体来看,不同级别沟道的数量差异较大,不同级别沟道的沟长、高差和比降 3 种特征具有明显的

分异性,但随着沟道级别的增加,沟道数量、沟长、比降的变化呈现出一定的变化规律:沟道级别越高,沟道数量越少,沟长越长,比降越小,高差则没有明显的变化规律。也就是说,越靠近下游,沟谷的地形越趋于平缓。这种规律经过地图可视化后在地图上表现地更为明显,这与黄土沟谷、河谷系统的形成及演化过程及沟谷地面的组成物质有关。

为进一步验证沟道特征分异规律的科学性,本研究对沟道的 4 个特征进行相关性分析,通过计算

Pearson 相关系数分析沟道特征之间的相关性,计算结果见表 2。

表 2 沟道特征值相关性分析				
特征值	沟道级别	沟长	高差	比降
沟道级别	1	0.684**	-0.111	-0.362**
沟长	0.684**	1	0.081	-0.276**
高差	-0.111	0.081	1	0.516**
比降	-0.362**	-0.276**	0.516**	1

注: ** 表示 0.01 双侧显著性水平。

相关性分析结果表明:沟道级别与沟长 Pearson 相关系数为 0.684,具有较强的正相关性,沟道级别

与比降之间的 Pearson 相关系数为 -0.362,具有较弱的负相关性,沟道级别与高差相关系数为 -0.111,无明显相关性。沟长与比降相关系数为 -0.276,具有较弱的负相关性,高差与比降相关系数为 0.516,具有中等程度正相关性。该结果与前述规律具有一致性。

4.2 流域尺度下的沟道特征分异规律

为进一步探析 4 种沟道特征在流域尺度下的分异规律,将整个流域划分为 21 个小流域,并且以每个小流域为区域统计单元,统计每个小流域单元内所有沟道的沟道最大级别、沟道平均沟长、沟道平均高差和沟道平均比降,结果如图 5 所示。

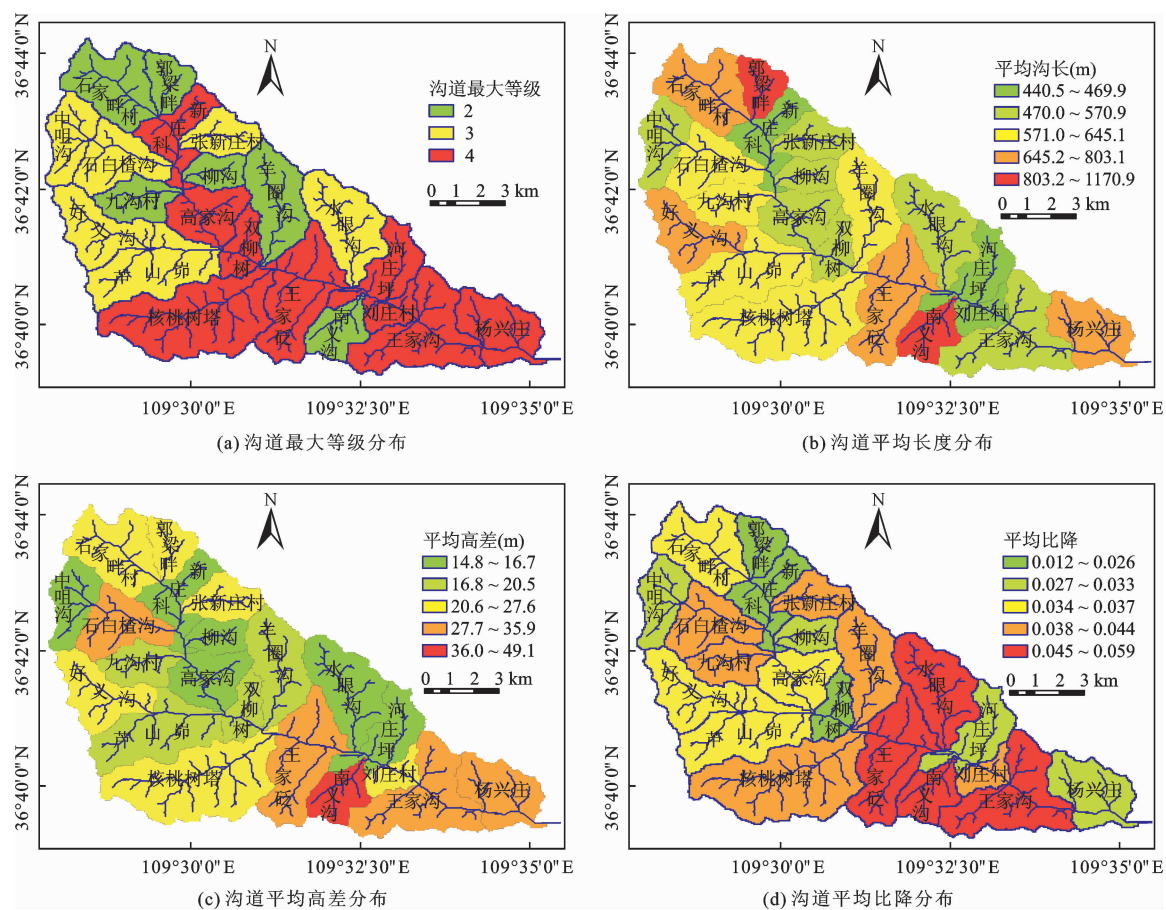


图 5 流域内沟道最大级别、沟道平均长度、沟道平均高差和沟道平均比降分布

由图 5 可以看出,在小流域单元尺度下,不同流域之间沟道最大级别、沟道平均长度、沟道平均高差、沟道平均比降均具有明显的空间分异性。而从距离延河的距离远近来看,流域间沟道特征的变化规律与距离延河的距离并没有明显关系。为进一步分析流域间沟道特征是否具有空间自相关性,分别计算了各沟道特征的莫兰指数,计算结果见表 3。

表 3 流域尺度下沟道特征值空间自相关分析				
空间自相关特征值	最大沟道级别	沟道平均长度	平均高差	平均比降
Moran's I	-0.068	0.068	0.276	0.155
Z 得分	-0.094	0.691	1.822	1.104
P 值	0.925	0.490	0.068	0.270

全局空间自相关分析结果表明:流域之间的 4

种沟道特征的莫兰指数绝对值均较小,并且 P 值均大于 0.05,说明在小流域尺度下,流域之间沟道级别、沟道长度、沟道高差和沟道比降 4 种沟道特征的空间自相关性不显著。

5 结 论

本研究以延河流域一级子流域碾庄沟流域为研究区,分别从沟道尺度和流域尺度下,选取了沟道级别、沟道长度、沟道高差和沟道比降 4 种特征,采用了基于 DEM 的沟道提取及分级方法、Pearson 相关分析法和空间自相关分析多种方法,分析了沟道特征及其分异规律,研究得出的基本结论如下:

(1)在沟道尺度下,沟道级别、沟道长度、沟道高差和沟道比降 4 种特征具有明显的空间分异规律,沟道级别与沟道长度、沟道比降之间具有较强的相关性,沟道级别越高,沟道数量越少,沟道长度越大,沟道比降也越小,而沟道高差则没有明显的变化规律。沟长与比降具有较弱的负相关性,高差与比降具有中等程度的正相关性。

(2)在小流域尺度下,不同流域的最大沟道级别、平均沟道长度、平均沟道高差和平均沟道比降具有空间分异性,但没有明显的空间分异规律,空间自相关性不显著。

参考文献:

- [1] 马乃喜. 黄土地貌演化与土壤侵蚀关系的分析[J]. 水土保持通报, 1996,18(2):6-10.
- [2] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵小流域沟坡水热条件及其生态修复初探[J]. 自然资源学报, 2004,19(2):183-189.
- [3] 叶芝菡,化相国,路炳军,等. 北京山区小流域主沟道水文地貌特征调查与分析研究[J]. 中国水利, 2013(21):52-53+56.
- [4] 吴良超. 基于 DEM 的黄土高原沟壑特征及其空间分异规律研究[D]. 西安:西北大学, 2005.
- [5] 李俊,汤国安,张婷,等. 利用 DEM 提取陕北黄土高原沟谷网络的汇流阈值研究[J]. 水土保持通报, 2007,27(2):75-78.
- [6] 曹建军,方炫,那嘉明,等. 基于多重分形的黄土高原不同地貌类型区沟沿线起伏特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2017,33(4):55-60.
- [7] 江岭. 基于 DEM 的流域地形分析并行算法关键技术研究[D]. 南京:南京师范大学, 2014.
- [8] 卞鸿雁. 黄土高原南部地区土地利用变化与生态效应时空动态测评[D]. 西安:陕西师范大学, 2011.
- [9] 袁小棋,李国元,高小明,等. AW3D 30 m DSM 数据质量分析及部分典型区域精度验证[J]. 测绘与空间地理信息, 2018,41(4):98-101.
- [10] JAIN A O, THAKER T, CHAURASIA A, et al. Vertical accuracy evaluation of SRTM - GL1, GDEM - V2, AW3D30 and CartoDEM - V3.1 of 30 - m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi Basin India[J]. Geocarto International, 2018,33(11):1237-1256.
- [11] 王勇,邹时林. 基于反地形 DEM 的山顶点提取与分析[J]. 江西测绘, 2017(2):5-7+13.
- [12] 过一凤. 基于 DEM 分析的全省大流域划分及边界修正方法探讨[J]. 城市地理, 2016(20):13-14.
- [13] 张建强,邹强,苏凤环,等. 动态窗口邻域统计的高差计算方法[J]. 测绘科学, 2017,42(6):36-40.
- [14] 王丽洁,李永明,陈瑾. 定西市黄土丘陵沟壑区第 V 副区侵蚀沟道分级分类研究[J]. 中国水土保持, 2015(3):43-45.
- [15] 程根伟,肖飞鹏,范继辉. 山区小流域坡面和沟道侵蚀的数学模式探讨[J]. 山地学报, 2010,28(3):327-332.
- [16] 李彩侠,马煜. 地形因子对白水河流域泥石流易发性的影响[J]. 中国科技论文, 2018,13(9):73-77.
- [17] 甘茂林,吕王勇,符璐. 基于改进 Moran's I 指数的成都市 PM(2.5)的空间统计分析[J]. 环境科学与技术, 2016,39(9):187-193.
- [18] 金锐,杨前进. 基于 ESDA - GIS 的重庆市第三产业地区差异分析[J]. 宁夏师范学院学报, 2018,39(4):79-83.
- [19] 罗小锋,李兆亮,李容容,等. 中国林业生产效率的时空差异及其影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017,31(3):95-100.
- [20] 谭诗腾. 基于斑块形态的类别栅格数据聚合尺度效应模型构建[D]. 成都:西南交通大学, 2018.