

典型黄土地貌高程空间变异性研究

徐 双^{1,2}, 李飞雪^{1,2}, 刘爱利³, 李满春^{1,2}

(1. 南京大学 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210046;

2. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210046; 3. 南京信息工程大学 遥感学院, 南京 210044)

摘 要:黄土高原地形与地貌自南向北有序变化, 构成其独特的地理景观。为了研究不同黄土地貌之间高程的空间变异特征, 选择 7 个典型黄土地貌样区, 以其 30 m 分辨率 DEM 数据为数据源, 使用变异函数模型特征参数定量地反映样区地貌的个体特征与空间分布特征。研究表明: 4 000 m 为最能突出高程空间变异规律的窗口, 并在此尺度下分析得出不同样区高程空间分布规律: 地貌越复杂、破碎, 高程空间自相关性范围越小; 高程的空间变化幅度随地貌的发育不断减小; 高程具有较强的空间相关性, 其变化为各向异性。5 个指标按样区顺序从淳化向北到神木, 按大一—小—大或小—大—小的顺序变化, 与黄土高原由南到北的地形复杂程度变化相吻合。

关键词:黄土高原; 空间变异; 变异函数; 高程

中图分类号: P931.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)05-0001-06

Research on Spatial Variability of Elevation in Typical Loess Landform

XU Shuang^{1,2}, LI Fei-xue^{1,2}, LIU Ai-li³, LI Man-chun^{1,2}

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University,

Nanjing 210046, China; 2. Department of Geographical Information Science, Nanjing University, Nanjing 210046,

China; 3. Institute of Remote Scensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The topography in the Loess Plateau changes orderly from south to north and this constructs the unique landscape of the Loess Plateau. Aiming to explore the spatial variations of the elevation among various loess landforms, we selected seven typical loess landforms as cases and applied variogram model to the loess landform analysis. DEM datasets with 30 meters resolution were used, and 5 quantified indices were calculated and analyzed to study the spatial distribution characteristics and individual features of the loess landform. Furthermore, we found that the best window size is 4 000 m for highlighting the spatial variation characteristics of the elevation based on the scale effects. We addressed that the elevation distributions in different sample areas were as follows: (1) the more complicated and fragmented the landform is, the lower the range of the autocorrelation tends to be; (2) the spatial change range tends to decline coupled with the evolution of landform; (3) the elevation in the research areas has strong autocorrelation with an anisotropic change; (4) five characteristic parameters of the variogram model change in the order big—small—large or small—big—small within the loess landforms from Chunhua to Shenmu, which is identical to the change of the loess landform from south to north.

Key words: Loess Plateau; spatial variability; variogram; elevation

黄土高原位于我国大陆的中北部, 是世界上厚度最大、发育最完整和大面积连片的黄土覆盖区^[1-2]。由于黄土高原水热条件组成在由南到北的方向上有

十分明显的分异规律, 造成其各种自然景观都呈现出由南向北的逐渐分异, 其中包括地貌类型的空间分异, 黄土颗粒大小的空间分布, 侵蚀强度, 地貌复杂度

收稿日期: 2013-10-12

修回日期: 2014-01-09

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“基于主体学习的城市空间增长微动力模拟模型研究”(40901184); 教育部博士点基金项目“城市空间增长微动力模拟中的个体学习建模研究”(20090091120028)

作者简介: 徐双(1989—), 女, 湖南湘阴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 GIS 应用和土地利用规划。E-mail: xushuang0914@163.com

通信作者: 李飞雪(1983—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 副教授, 主要研究方向为遥感和 GIS 应用。E-mail: njulifeixue@163.com

等的地域分异等^[2-4]。黄土高原作为我们国家华北自然地理区的重要组成部分,成为了许多地学工作者进行科学研究的重点地区。数理统计法是定量描述流域地貌形态特征的主要方法^[5-7],该方法对于揭示各地貌形态要素间相互关系具有重要意义。张丽萍等^[6]建立了沟壑密度随切割深度变化的理论极值模型和相应地貌演化阶段的函数关系,并利用沟壑密度与切割深度的关系来推断流域地貌的演化阶段。张婷^[7]利用多元统计分析、灰色关联度分析等方法,研究了基本地形因子与其它地形因子的关联特性,并分析其形成机理。数理统计及相关分析方法对揭示各地貌形态要素间的相互关系具有重要意义,但对流域地貌形态空间特征的刻画还明显不够。而且传统的统计分析虽然涉及多个变量的影响,但大多数的方法都没有考虑和利用到研究资料中空间位置所包含的信息。而地形变化在空间上是相互关联的,这种空间连续性作为许多地理现象的重要特性需要给予考虑。对于此类问题的解决,地统计学方法^[8-9]能克服一般统计学的缺点,而且提供了更严谨的理论和方法描述变量的空间连续性,使得研究过程更科学,切合实际,研究结果更可靠。Herzfeld等证实了在不同地形条件下,计算得到的变异函数形态和大小各不相同^[10-12];赵龙山等^[13]利用半方差函数方法分析黄土高原不同耕作措施下坡面的相对高程空间变异结构特征。黄土高原地形地貌空间分异的复杂性、规律性与有序性,使之成为基于DEM数字地形利用地统计原理进行分析的极佳研究区域,可以将相应地貌类型地形因子值看作一个区域化变量,深入地研究黄土高原地貌及地形空间分异的成因与发展态势,可望在当前黄土高原地形地貌研究已达到较高水平的基础上^[13-16],取得更好和更新的研究成果。本文基于地统计学中的变异函数,分析区域化变量空间结构特征,以高程的球状变异函数模型特征参数为切入点,分析黄土高原高程的空间变异性,试图揭示黄土高原地形的空间分异与其地貌发育、地形复杂程度的关系,为建立完善的自动化黄土高原地形分类系统提供依据,对地形单元的划分具有一定的参考价值。

1 研究区概况

黄土高原的地貌类型主要有塬、梁、峁及各类沟谷。在黄土塬部分区域,因塬面平坦,侵蚀较弱,流向沟谷的水流比较集中。峁状丘陵具有坡度大、坡长大、临空面也大的特点。这种形态不但有利于水流侵蚀,也能够促使重力侵蚀的发展,所以黄土高原侵蚀最强的地区多出现在黄土峁丘陵区。在风沙黄土过

渡区,风力侵蚀较为严重,地势起伏逐渐平缓^[5,17-18]。

陕西黄土高原包含了大部分次级黄土地貌形态组合类型,既可以反映整个黄土高原的次级地貌单元的地形特点,也能够揭示黄土次级地貌单元的地域分异情况^[17]。在参照大量相关研究的基础上^[4-5,7,15,17],从黄土塬、黄土梁、黄土峁和风沙黄土过渡区等地貌单元的典型区域中^[17],自南至北选择淳化、长武、宜君、甘泉、延川、绥德和神木7个有代表性样区作为研究区域。7样区自南向北依次分布,地理位置介于34.83°—38.92°N,109.31°—110.38°E,每个样区的面积约为81 km²,其基本地理状况(如高程、坡度)各有不同(表1和图1)。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源与预处理

研究数据来自国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn/>)的ARSTER GDEM全球30 m分辨率数字高程数据产品(UTM/WGS_1984)。在全球范围内垂直精度为20 m,水平精度为30 m,置信度95%。此数据边界堆叠会导致数据显示异常的几何形状,且不能用来提取水体分布信息。文中研究的典型黄土地貌样区(7个样区)面积较小,没有出现边界堆叠问题,且不需要提取水体信息,可用于高程分析。对高程数据分析前,进行投影转化、异常值剔除、正态分布转化等预处理,经过预处理后提取7个研究样区的DEM。

2.2 研究方法

利用探索性空间分析方法对研究样区数据进行初步分析:包括数据正态分布检查与转换、数据全局趋势分析与剔除。首先对数据进行正态分布检查,若样区高程数据不是正态分布,则克里格插值不是最优,因此需要将不是正态分布的高程数据进行处理,转换成正态分布;其次是全局趋势分析与剔除,先确定样区数据的全局趋势,在计算变异函数球状模型特征参数时,剔除相应趋势,便于分析数据的空间自相关性。探索性空间数据分析后,计算高程变量的球状模型特征参数值,在不同尺度窗口下统计变异函数球状模型参数值,分析不同样区高程的空间变异规律,在此基础上选定一个最佳分析窗口,比较不同样区在此窗口范围内,各特征参数值的变化情况,进而研究不同实验样区高程的空间分异规律。

2.2.1 探索性空间数据分析 通过Normal QQPlot分布综合比较分析,各样区数据都比较接近正态分布,不需要进行转换。通常一个区域化变量表面由趋势和短程变异组成,在分析时剔除全局趋势,可模拟

随机短程变异,即可以分析局部有波动表现出的变异,便于分析数据的空间自相关性,利用趋势分析工具来确定数据的全局趋势,除长武的趋势面为一次曲线外,其余样区趋势面均为二次曲线。

表 1 研究样区地理状况^[17]

样区	平均高程/m	相对高差/m	平均坡度/(°)	地貌类型	地貌特征
淳化	1043.11	397	11.25	黄土塬区	位于淳化县城西北部泾河中游地区,残塬为主要地貌类型,被大沟深切割裂
长武	1112.51	334	7.47	黄土残塬区	位于长武县城及其以北的泽河中游地区,属于黄土高原丘陵沟壑区,塬面较宽阔
宜君	976.24	378	11.43	黄土长梁残塬沟壑区	位于宜君县城东北部洛河中下游地区,沟谷溯源侵蚀强烈,重力侵蚀活跃
甘泉	1294.31	371	15.68	黄土梁状丘陵沟壑区	位于甘泉县城东南部洛河中游地区,梁坡上面侵蚀;梁地间冲沟、河沟下切强烈
延川	1086.35	307	16.68	黄土梁状丘陵沟壑区	位于延川县城西南部延河中游,梁状坡面细沟、浅沟发育
绥德	976.15	330	12.19	黄土峁状丘陵沟壑区	位于绥德县无定河中游,区内丘陵起伏,沟壑纵横,土壤侵蚀极为剧烈
神木	1188.45	257	5.40	风沙黄土过渡区	位于神木县城西北部野窑河中游支流,有连片的低丘分布,其上覆盖有薄层片沙和低缓沙丘

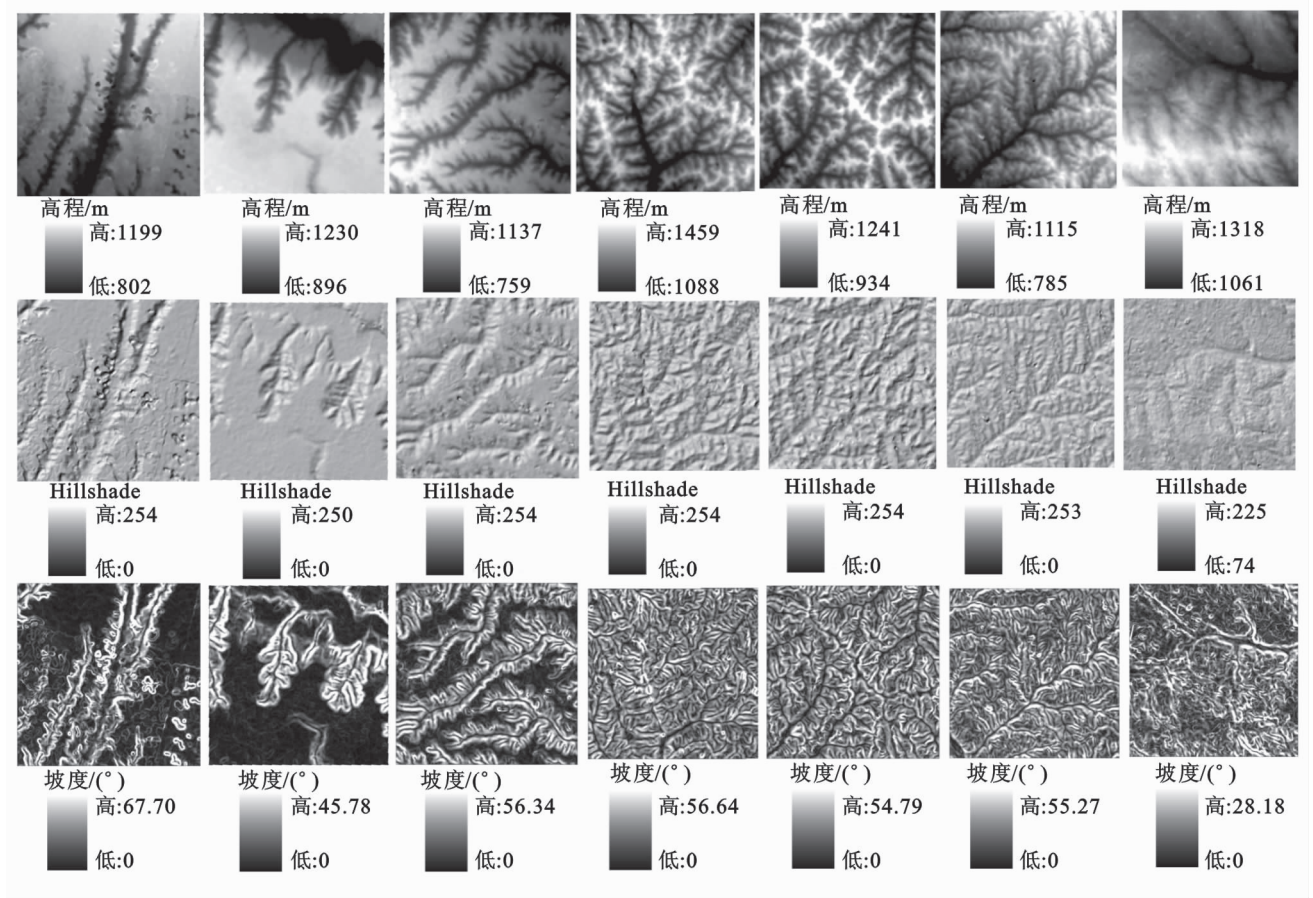


图 1 样区(淳化、长武、宜君、甘泉、延川、绥德、神木)DEM、地貌晕渲图及坡度图

2.2.2 变异函数表面建模 根据探索性空间数据分析的结果,对数据进行转换和全局趋势剔除后,采用克里格插值方法对实验变异函数进行表面建模,并计算各个样区高程变异函数球状模型特征参数值。通过平均误差、均方根误差、平均标准误差等统计指标^[17]对不同的模型比较,可从中选出最优模型。观察实验变异函数云图中的变异函数曲线,参考模型检验结果的平均(Mean)预测误差等误差的大小,综合考虑后调整各个参数使曲线能最好地表现样点对的变化趋势,并使各个误差最小,尽可能达到最优模型。当模型精度较好时,球状各个参数有一定的可靠性,可用于后续空间变异分析。利用不同尺度的分析窗口分别计算各

个样区高程变异函数球状模型特征参数值(表2)。可变窗口间距过小不利于体现变异函数的变异性,间距过大会导致变异函数的一些变化规律被忽视,不能

体现细节变化。考虑7个样区面积的大小和数据的分辨率,以200 m作为窗口间距,获取样区高程在不同尺度范围下的变异函数球状模型特征参数值。

表2 球状模型特征参数^[19-22]

特征参数	描述
变程/a	变程是变异函数达到基台值时的间隔距离,是区域化变量在各个方向上自相关平均影响范围的定量指标
结构性尺度($R \cdot C/(C_0+C)$)	结构性尺度反映了由结构因素决定的数据的空间自相关范围。结构性尺度越大,表明由结构因素决定的数据空间自相关范围越广,反之亦然
基台值(C_0+C)	基台值表示了系统内总的变异,是系统或系统属性中的最大变异
块金效应($C_0/(C_0+C)$)	块金值/基台值称为块金效应,表示空间变异程度,该比值高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大,相反则由结构性因素引起的空间变异性程度较大
各项异性比(长轴变程/短轴变程)	各向异性比大于1时,空间变量具有各向异性,否则为各向同性

3 结果与分析

利用统计样区在不同尺度范围下的变异函数球状模型特征参数值,分析同一样区不同尺度高程空间变异性。图2中典型黄土地貌样区变程先随着窗口的增大而增大,当窗口尺寸接近4 000 m时趋于稳定,稍有波动,空间自相关性范围稳定;当分析窗口小于4 000 m时,基台值随着窗口的增大按照幂函数关系迅速增大,高程的最大变异不断增大,在窗口为4 000 m时达到平稳,高程空间变化稳定;在窗口尺寸小于8 000 m的范围内,样区的块金效应小于25%,

表示在此尺度范围内上高程具有较强的空间相关性。分析典型黄土地貌样区不同尺度变程、基台值和块金效应变化可知,样区在窗口尺寸为4 000 m时:变程在一个较稳定的趋势变化中,说明变量空间自相关范围比较稳定;此时基台值也比较稳定,说明变量空间变化幅度差异稳定;块金效应较小,趋近于0,说明由随机部分引起的空间变异性程度较小,由结构性因素引起的空间变异性程度较大,此时高程具有较强的空间相关性。综合特征参数的变化特征,可以选取可变窗口尺寸为4 000 m时的特征参数值来分析同一样区高程空间变异性。

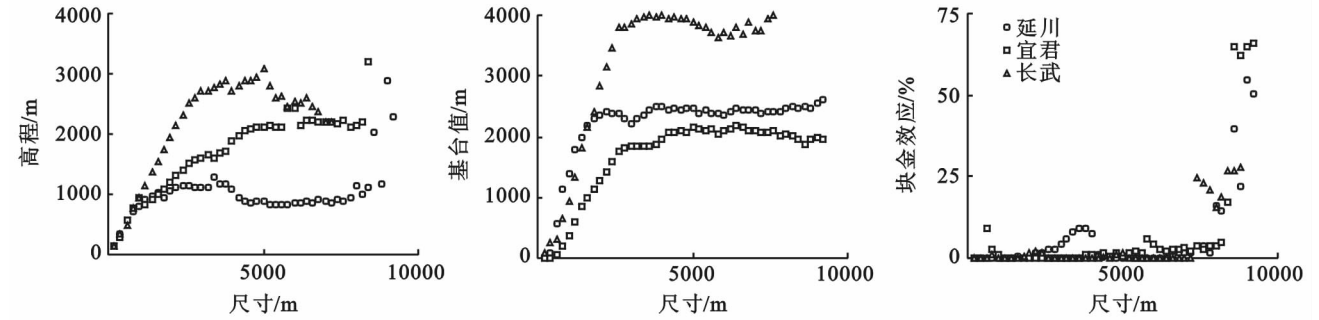


图2 不同窗口尺寸下样区变程、基台值和块金效应统计值

3.1 变程和结构性尺度演变特征分析

从南到北,陕北黄土高原海拔高度不断增大^[18],沟壑发育程度不断提高,到绥德和延川一带沟壑发育达到成熟,沟壑纵横,土壤侵蚀强烈,到神木一带则演进到风沙黄土过渡地貌,地势起伏逐渐平缓^[5]。黄土塬—黄土梁—黄土峁,地形愈加破碎,地貌复杂度逐渐增大,但到了风力侵蚀较为严重的黄土风沙过渡区,地形复杂度却逐渐减小。由南到北,样区变程和结构性尺度由大变小再增大(图3),说明地貌越复杂、破碎,高程空间自相关范围越小,由随机部分引起的空间变异性程度越大,高程受确定因素的影响越弱,受随机因素的影响越强,反之地貌越简单,高程空间自相关范围越大,由结构性因素引起的空间变异性程度越大,高程的变化受确定因素的影响越强,受随

机因素的影响越弱。黄土塬—黄土梁—黄土峁,变程和结构性尺度不断减小,随着沟壑发育程度不断提高,高程空间自相关范围不断变小。变程和结构性尺度对地貌形态的变化比较敏感,能表现样区所在地区地形的发育和破碎程度,间接反映了样区所属的地貌类型。

3.2 基台值演变特征分析

黄土塬—黄土梁—黄土峁,基台值不断减小(图4),沟壑发育越成熟,系统内的最大变异程度越小,样区总的空间异质性程度越低。基台值变化趋势与7个样区相对高差变化相吻合。样区相对高差越大,基台值越大,高程的空间变化幅度较大;相对高差越小,高程的最大变异程度越小。研究样区中淳化的相对高差最大,高程的空间变化幅度最大,空间异质性程度最高。反之神木的相对高差最小,基台值也是最小。

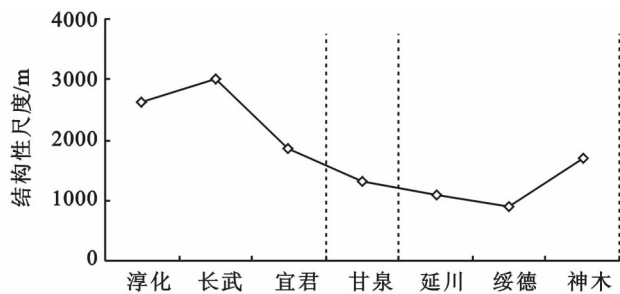
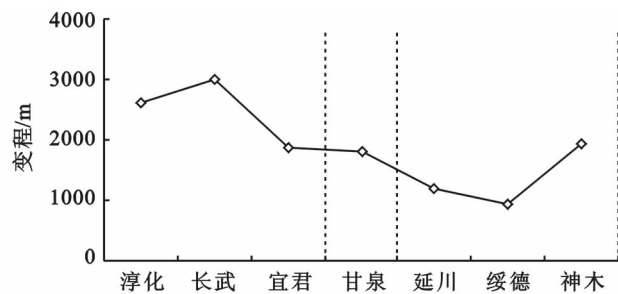


图3 不同样区变程、结构性尺度变化

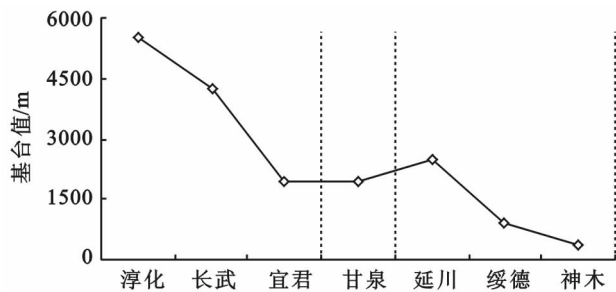
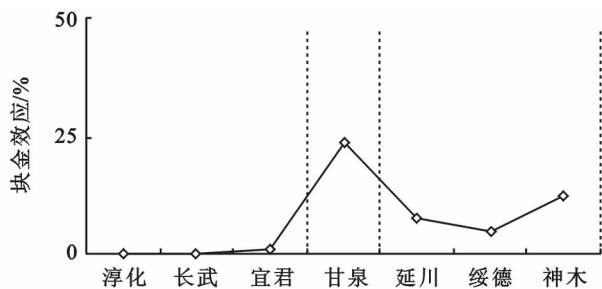


图4 不同样区基台值变化



3.3 块金效应和各项异性比演变特征分析

研究样区块金效应自南至北先增大再减小(图5),均小于25%,且各向异性比都大于1,说明变量具有较强的空间相关性,且各样区高程数据空间异质性均为各向异性。同种地貌类型的块金效应和各项异性比较接近:淳化、长武和宜君是黄土塬的实验样区,三者块金效应小于2%,各项异性比在2.1~2.3之间,样区特征参数变化趋势接近;绥德和延川属于黄土峁,块金效应和各项异性比值相近,说明同一种黄土地貌高程的空间异质性相似。

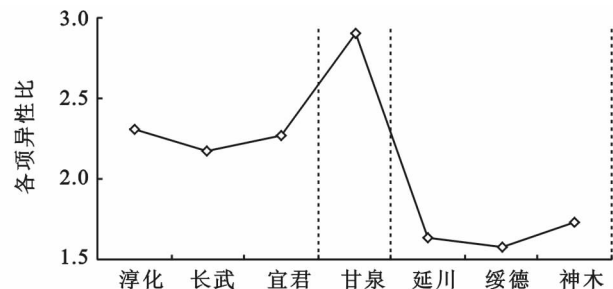


图5 不同样区块金效应、各项异性比变化

综上所述,变程、结构性尺度和基台值是与黄土高原沟壑发育状况和地形复杂程度相吻合的。淳化、长武、宜君一带属于黄土残塬区,地表侵蚀相对较轻,沟壑发育不成熟,整个区域地貌以塬为主,平坦区域面积较广,地形复杂度较小,变程、结构性尺度和基台值较大,空间自相关范围较大,高程受确定因素的影响较强。绥德和延川一带属于黄土峁状丘陵沟壑区,沟壑发育程度高,地表侵蚀严重,地貌破碎,平坦区域极少,地形复杂度较大,变程、结构性尺度和基台值较小,高程空间自相关范围小,受随机因素的影响较强,高程的最大变异程度较大。到神木一带进入到风沙黄土过渡区,地势起伏逐渐平缓,地貌类型发生变化,地形复杂度变小,变程和结构性尺度逐渐增大,高程空间自相关范围增大。

4 结论

本研究以地统计学中变异函数知识为理论基础,基于数字地形分析的原理与方法,应用地统计和数理

统计等方法,通过理论分析与实验验证相结合,来研究黄土高原高程的空间变异性。采用变程、结构性尺度、基台值、块金效应和各项异性比5个不同的定量指标,从不同侧面研究了黄土地貌的个体特征与空间分布特征。不同黄土地貌特征参数的变化反映了高程在对应地貌类型的空间变异的规律。

(1) 利用不同尺度的分析窗口计算特征参数,分析同样区不同尺度高程的空间变异性。大部分样区在窗口尺寸为4 000 m时,变程在一个较稳定的趋势变化中,基台值趋于稳定,变化较小,块金效应都小于25%,说明在此尺度下高程空间自相关范围比较稳定、空间变化幅度差异稳定,结构性因素引起的空间变异性程度较大,高程具有较强的空间相关性。

(2) 相同地貌类型的实验样区特征参数的变化规律较为相似:如宜君、长武和淳化都是黄土塬区,三者的变程、结构性尺度、块金效应和各项异性参数的变化规律十分相似;绥德和延川属于黄土峁,各个特征参数变化规律相近。

(3) 从不同样区高程空间变异性规律可以得出,特征参数变化和沟壑发育状况与地形复杂程度关系密切:由南至北,变程和结构性尺度由大变小再增大,地貌越复杂、破碎,高程空间自相关范围越小,由结构因素决定的数据空间自相关范围越小,高程的变化受确定因素的影响越弱,受随机因素的影响越强。变程和结构性尺度对地貌形态的变化比较敏感,能表现样区所在地区地形的发育和破碎程度,间接反映了样区所属的地貌类型;基台值随地貌的发育不断减小,高程的空间变异幅度不断变小;高程都具有较强的空间相关性,高程变化均为各向异性。

特征参数按研究样区顺序从淳化向北到神木,按大一—小一大或小—大一—小的顺序变化,这种变化是与陕北黄土高原地区由南到北地形地貌的空间变化区域特征相吻合的。同时,这些指标清晰且量化地反映了陕北黄土高原地区地貌的侵蚀状况、沟谷的发育程度及其区域分布特征。

参考文献:

- [1] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J]. 地理学报, 1956, 22(3): 201-222.
- [2] 罗枢运, 孙逊, 陈永宗. 黄土高原自然条件研究[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1988.
- [3] 刘源鑫, 焦峰. 黄土高原丘陵区景观特征与景观指数粒度效应研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 23-27.
- [4] 赵牡丹, 汤国安, 陈正江, 等. 黄土丘陵沟壑区不同坡度分级系统及地面坡谱对比[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 33-36.
- [5] 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.
- [6] 张丽萍, 马志正. 流域地貌演化的不同阶段沟壑密度与切割深度关系研究[J]. 地理研究, 1998, 17(3): 273-278.
- [7] 张婷. 基于 DEM 的陕北黄土高原多地形因子空间关联特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2005.
- [8] 郭怀成, 周丰, 刀谓. 地统计方法学研究进展[J]. 地理研究, 2008, 27(5): 1191-1202.
- [9] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] Herzfeld U C. A method for seafloor classification using directional variograms, demonstrated for data from the western flank of the Mid-Atlantic Ridge [J]. Mathematical Geology, 1993, 25(7): 901-924.
- [11] Herzfeld U C, Higginson C A. Automated geostatistical seafloor classification-principles, parameters, feature vectors, and discrimination criteria [J]. Computers and Geosciences, 1996, 22(1): 35-52.
- [12] Herzfeld U C. Master of the obscure-automated geostatistical classification in presence of complex geophysical processes [J]. Math Geosci., 2008, 40(5): 587-618.
- [13] 赵龙山, 宋向阳, 张青峰, 等. 黄土坡耕地地表微地形空间变异性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 146-150.
- [14] Brown D G, Plusch D, Duda K A. Supervised classification of types of glaciated landscapes using digital elevation data[J]. Geomorphology, 1998, 21(3): 233-250.
- [15] 易红伟. 基于 DEM 的黄土高原沟壑信息挖掘研究[D]. 西安: 西北大学, 2004.
- [16] 周啸. 基于地统计学变异函数理论的海底地形分类研究[D]. 山东青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2011.
- [17] 龙毅, 周侗, 汤国安, 等. 典型黄土地貌类型区的地形复杂度分形研究[J]. 山地学报, 2007, 25(04): 385-392.
- [18] 赵景波, 朱显谟. 黄土高原的形成与发展[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 333-337.
- [19] 万丽. 基于变异函数的空间异质性定量分析[J]. 统计与决策, 2006, 208(4): 26-27.
- [20] 张瑞, 曹华, 王云强, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 52-58.
- [21] 张慧, 付强, 赵映慧. 松嫩平原北部土壤重金属空间分异特征及生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 165-169.
- [22] 李立, 魏晓妹, 韩业珍. 基于地统计学的作物需水量空间变异性分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 241-242.