

# 黄土丘陵山区土地利用空间自相关格局及其 影响因素分析

——以晋城市长河流域为例

朱静静, 师学义

(中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘要:**为揭示黄土丘陵山区土地利用空间自相关格局与自然和人文因素的耦合关系,以晋城市长河流域为研究区,分析流域土地利用全局和局部空间自相关格局,利用 GIS、灰色系统关联分析软件定量了各类用地与高程、坡度、坡向、有效土层厚度、与水域距离、人口密度、路网密度、距居民点距离的关联度及相关性。结果表明:距离权重为 0.5 km 时,流域内各土地利用类型整体呈现空间聚集性特征,表现出全局空间正自相关特性;空间正自相关性随着距离的增加而逐渐减弱。耕地、草地的用地分布呈明显的 H—H、L—L 聚集趋势,林地、水域和建设用地的空间分布呈明显的 H—H 聚集趋势。各格网耕地占比与有效土层厚度因子之间的关联排序最高;各格网林地占比与距居民点距离因子之间的关联排序最高;各格网草地占比与距水系距离因子之间的关联排序最高;各格网水域占比与距居民点的距离因子之间的关联排序最高;各格网建设用地占比与人口密度因子之间的关联排序最高。

**关键词:**土地利用;空间自相关;灰色关联度;影响因素

中图分类号:F301.2;P967

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0234-08

## Analysis of Spatial Autocorrelation Patterns of Land Use and Influence Factors in Loess Hilly Region

—A Case Study of Changhe Basin of Jincheng City

ZHU Jingjing, SHI Xueyi

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

**Abstract:** In order to reveal the coupling relationship between the spatial autocorrelation of land use and the natural and human factors in loess hilly and mountainous regions, we carried out a case study on Changhe Basin of Jincheng City, and analyzed the land use of the basin and the local spatial autocorrelation pattern, and used GIS and gray system correlation analysis software to quantify the correlation and relation of various types of land and elevation, slope, aspect, effective soil thickness, distance to water area, population density, road network density, distance from residential areas. The results show that; when the weight is 0.5 km, the land use types in the basin show the characteristics of spatial aggregation as a whole spatial autocorrelation; the positive spatial autocorrelation decreases gradually with the increase of the distance; the distribution of cultivated land and grassland show the significant trend of H—H and L—L accumulation; the spatial distribution of forestland, water area and construction land show the significant trend of H—H accumulation. The relationship between the proportion of arable land in each grid and the thickness factor of effective soil layer is the highest. The relationship between the proportion of forestland and the residential area distance factor is the highest. The correlation between the proportion of grassland in each grid and the distance factor of water system is the highest. The highest correlation was found between the proportions of

the grid waters and the distance factors from the settlements. The correlation between the proportion of the construction land for each grid and the population density factor is the highest.

**Keywords:** land use; spatial autocorrelation; gray relational degree; influencing factors

土地资源是人类赖以生存和发展的重要物质基础,由于区域自然和社会经济等条件的差异性以及人们对其利用目的和方式不同,便形成了不同的土地利用空间格局<sup>[1]</sup>。空间自相关是指空间中具有一定客观规律的空间变量在空间上的分布特征及对邻域的影响程度,反映了研究对象在空间位置中的聚集程度<sup>[2]</sup>。土地利用在区域空间连续分布,具有显著性空间自相关的区域往往表现为地理对象的局部空间聚集。2003年 Overmars 等<sup>[3]</sup>首次对土地利用进行空间自相关分析,同时引入了空间自回归模型。国内学者段增强等<sup>[4]</sup>对北京海淀区的土地利用邻域间的聚集特征进行了分析;邱炳文等<sup>[5]</sup>从多尺度角度对福建省土地利用变化的空间自相关特征;韦素琼等<sup>[6]</sup>对闽台地区城镇建设用地整体和局部聚集特征进行了研究;焦利民等<sup>[7]</sup>分析了湖北省区域的城镇地价所表现的空间局部聚集特征;谢正峰等<sup>[8]</sup>对广州市土地利用结构的变化和土地利用程度的空间自相关特征进行了分析;王千等<sup>[9]</sup>对河北省耕地生态安全与空间聚集特征做了科学评价;卞鸿雁等<sup>[10]</sup>分析了关中天水地区土地承载力的空间集聚特征;谷建立等<sup>[11]</sup>在分析谷城县土地利用空间自相关格局的基础上,基于DEM数据统计分析了地形因子对土地利用空间局部聚集特征的影响;宋文等<sup>[12]</sup>以临夏县北塬地区的农村居民点用地为研究对象对空间自相关分析中选择的观测变量和衡量指标进行对比分析;付金霞等<sup>[13]</sup>以小理河流域为研究区分析土地利用空间自相关格局与自然社会经济因素的关系。土地利用空间格局的形成和演变受自然环境和人类社会经济活动等多因素影响,地形地貌、水文、土壤和气候等自然环境因子是土地利用方式及其空间格局形成的必要基础,GDP、人口密度、路网密度、居民地分布、工农业生产技术等社会经济因子则影响着土地利用空间的分异格局转变<sup>[14]</sup>。目前土地利用空间自相关的研究中,多聚焦于空间局部集聚特征分析,对其形成原因及其驱动因子定量研究相对较少,因此土地利用空间自相关格局与其影响因子的关系亟待加强研究。

长河流域是典型的黄土丘陵山区,土地生态系统脆弱。利用 ArcGIS 软件,基于土地利用现状数据、数字高程模型(DEM)、土壤数据和社会经济数据,探讨长河流域土地利用空间自相关格局特征,并根据流域的特点,

选取平均高程、坡度、坡向、有效土层厚度、与水域距离、人口密度、路网密度、距居民点距离等因子,通过灰色关联度分析这些因子和流域土地利用空间格局关联度和相关性,明确各因子对土地利用格局的影响程度,并分析土地利用格局与各因子过程相互作用的关系,以期为晋城市长河流域土地综合整治提供一定的参考。

## 1 研究区概况

长河流域位于山西省晋城市西北部,北与下村镇相接,南与周村镇相连,西与沁水县相邻,东与南村镇、城区西上庄街道相依。地理坐标处于东经 112.40°—112.46°,北纬 35.3°—35.7°,全区东西宽约 13 km,南北长约 15 km,总面积 108 km<sup>2</sup>。长河为全区唯一过境河流,发源于晋城市泽州县下村镇武圣山南麓,由南向北依次流经李寨乡、周村镇、川底乡、大东沟镇与下村镇这 5 个乡镇后汇入沁河。全长约 20 km,落差 867 m,属季节性河流,年流量约为 2 460 万 m<sup>3</sup>。流域地处温带大陆性季风气候区,四季分明,冬长夏短。地形复杂,呈两山夹一沟之势,地势西高东低,东部与西部为山地、丘陵区,中间为由长河冲积而成的河川谷地,地势平坦,相对高差为 450 m 左右,平均海拔为 857 m。土壤隶属于褐土地带,土层深厚,土壤熟化度较高,土质较黏,土壤肥力较低,土壤有机质氮磷含量中等较低。

## 2 数据来源和研究方法

### 2.1 数据来源和处理

本研究采用的数据有 2015 年长河流域土地利用现状图(图 1),2014 年长河流域 DEM(图 2),2015 年长河流域 SPOT 影像、长河流域土壤调查数据、晋城市泽州县统计年鉴等。根据长河流域主要土地利用类型,将研究流域土地利用类型进行归并处理,最终得到耕地、林地、草地、水域和建设用地共 5 种土地利用类型。基于 ArcGIS 中的鱼网划分方法,根据长河流域面积大小并借鉴相关研究划定方法<sup>[13]</sup>和依据,将研究区划分成 500 m×500 m 网格单元,将各地类与网格单元进行叠置分析,统计出每个网格单元内各类用地的面积比例,并将其作为自相关分析的分析变量。根据长河流域的自然人文特征,选取平均高程、坡度、坡向、有效土层厚度、与水域距离、人口密度、路网密度、距居民点距离等作为流域土地利用空间自相

关格局形成的驱动因子。为获得各驱动因子的空间量化图,利用 ArcGIS 中空间分析功能,基于 DEM 提取流域平均高程、坡度、坡向 3 个地形因子;提取分析工具得到有效土层厚度空间分布图;通过测定距离功能获得与水域、居民点的距离空间分布图;利用叠加分析工具和计算公式得到道路密度空间分布图;为较准确地实现人口密度空间化,建立人口密度与各土地利用类型面积百分比数据的回归模型<sup>[14]</sup>,统计各格网内的人口密度,实现人口密度的空间化。在此基础上分析土地利用空间自相关格局和各驱动因子的耦合关系。

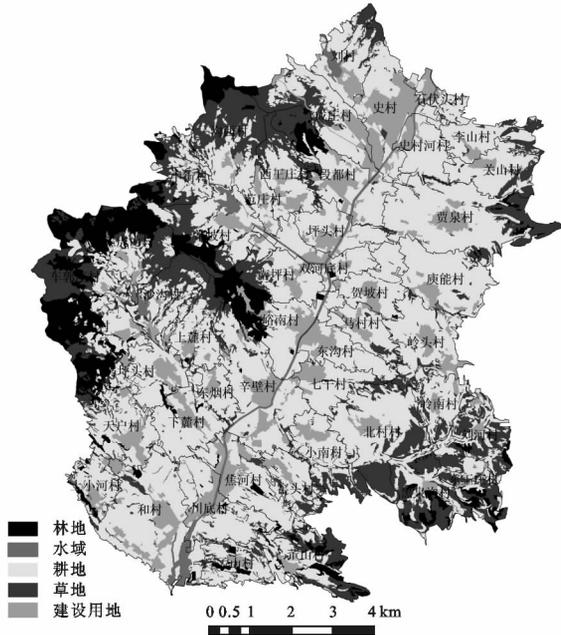


图 1 长河流域土地利用现状图

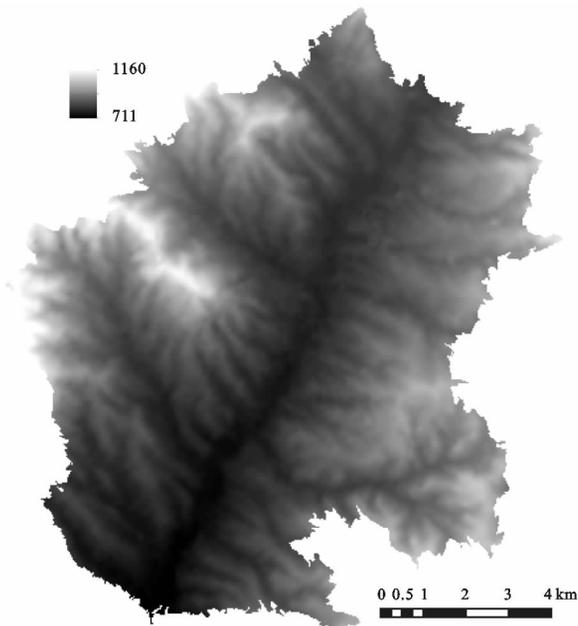


图 2 长河流域 DEM

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 空间自相关分析 通过空间自回归模型,运用

全局 Moran's  $I$ 、空间关联局域指标(LISA)和 Moran 散点图,从全局、局部两个层次对土地利用格局进行空间自相关性分析。

(1) 全局空间自相关。全局空间自相关是对地理要素属性值在整个区域空间特征的描述<sup>[14]</sup>。常用全局 Moran's  $I$  作为全局自相关统计量,计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

式中: $n$  为样本总数; $X_i$  为样本  $i$  所在位置的属性值; $X_j$  为样本  $j$  所在位置的属性值; $\bar{X}$  为样本均值; $W_{ij}$  为空间权重。空间邻接分为 rook's 标准和 queen's 标准。本研究在全局空间自相关分析中基于距离构建空间权重数据,其距离值分别选择为 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 km。Moran's  $I$  计算结果采用  $z$  检验<sup>[15]</sup>,当  $|z| > 1.96$ ,说明通过  $p < 0.05$  显著性检验。

(2) 局部空间自相关。全局 Moran's  $I$  不能确切指出聚集或异常发生的具体空间位置,为弥补不足,需要用局部自相关方法进一步分析,包括空间关联局域指标<sup>[16]</sup>和 Moran 散点图<sup>[17]</sup>。Moran 散点图是反映空间位置属性局部自相关性的统计图方法,利用数据( $X, WX$ )绘制散点图,其中横轴对应描述变量  $X$ ,纵轴对应空间滞后向量  $WX$ 。该图分为 4 个象限,分别识别一个地区及其邻近地区的局域关系,即 HH 聚集(第一象限)和 LL 聚集(第三象限),暗示了观测值的相似性;HL 异常(第二象限)和 LH 异常(第四象限),暗示了观测值的异常性。因此,采用 Moran 散点图可以直观看出区域内存在几种聚集或异常特征。

空间关联局域指标(local indicators of spatial association, LISA)用来衡量观测单元属性值与周边单元属性值的相近(正相关)或差异(负相关)程度<sup>[17]</sup>。该指标可以用局部 Moran's  $I$  统计量进行度量,公式为:

$$I_i = X'_i \sum_{j=1}^n W_{ij} X'_j$$

式中: $X'_i$  为样本  $i$  标准化的单元观测值; $X'_j$  为样本  $j$  标准化的单元观测值。利用 GeoDa<sup>[16]</sup> 绘制 Moran 散点图;基于 ArcGIS 空间统计工具中的 Anselin local Moran's  $I$ ,绘制 LISA 分布图,用以可视化描述各空间单元中变量的聚集和异常状况。在 Moran 散点图和 Anselin local Moran's  $I$  分析中构建基于 K-nearest neighbors 的距离空间权重矩阵。

2.2.2 灰色关联度分析 灰色关联度分析是灰色系统分析方法中的一种,根据因素之间发展趋势的相似

或相异程度作为衡量因素间关联程度,对一个系统内各影响变量之间的量化提供了度量标准。计算关联度是灰色关联度分析的核心内容<sup>[14]</sup>。具体计算步骤如下:(1)确定分析数列。确定反映系统行为特征的参考数列和影响系统行为的比较数列。反映系统行为特征的数据序列,称为参考数列。影响系统行为的因素组成的数据序列,称为比较数列。

设参考数列为  $Y = \{Y(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ ; 比较数列  $X_i = \{X_i(k) | k=1, 2, \dots, n\}, i=1, 2, \dots, m$ 。

(2) 变量无量纲化。由于原始数据之间存在量纲和数量级上的差异,因此需要对原始数据进行无量纲归一化处理。并以参照数列为基准数据,将各要素数据处理成介于 0 至 1 之间的数据,本研究采用均值化方法将变量无量纲化。

(3) 计算关联系数:

$$\delta_i(k) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta o_i(k) + \rho \Delta \max}$$

式中: $\rho$  为分辨系数,  $0 < \rho < 1$ , 削弱因  $\Delta \max$  过大而使关联系数准确度不高的影响,可以提高关联系数之间的差异显著性。 $\Delta \min$  为各数列与参考数列值的差的最小值,  $\Delta \max$  为各数列与参考数列值的差的最大值,  $\Delta o_i(k)$  为各数列与参考数列值的差(绝对值)。

(4) 计算关联度。通过计算比较数列与参考数列在各个时期的关联系数的平均值来定量衡量这两个数列的关联程度,其计算公式为:  $r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta_i(k)$

式中: $r_i$  为第  $i$  个比较数列与参考数列的关联度。

(5) 排关联序。用关联度的大小次序描述因素间的关联程度,而不仅是关联度的大小。将  $m$  个子序列对同一母序列的关联度按其大小顺序排列起来即关联序,它反映了对于参考序列来说各子序列的“优劣”关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 长河流域土地利用结构空间自相关特征分析

3.1.1 土地利用全局空间自相关分析 以  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  网格单元中各类土地的用地比例作为观测变量,分别基于 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 km 不同距离的空间权重,计算各土地利用类型的全局 Moran's  $I$ , 并对其进行显著性检验(表 1),在此基础上分析各土地利用类型的全局自相关特征以及 Moran's  $I$  随距离变化的规律(图 3)。

由表 1 和图 3 可知,当距离权重为 0.5 km 时,各类用地全局 Moran's  $I$  结果均为正值,即整个流域内各土地利用类型的空间分布不是随机的,整体上呈现

出空间聚集性特征,表现出空间正自相关特性。但空间正自相关性随着距离的增加而逐渐减弱,当权重距离增加到 6 km 时,其整体空间正自相关性已经极弱。在 6 km 以内,随着距离的延伸,不同土地利用类型自相关程度的空间衰减强度不同,其中水域和林地的空间聚集性衰减迅速,而耕地和草地的空间聚集性随距离衰减最慢。当权重距离为最小距离 0.5 km 时,各土地利用类型全局 Moran's  $I$  由大到小依次为:林地、草地、耕地、水域和建设用地;当权重距离增加 1 km 时,建设用地的 Moran's  $I$  开始大于水域;当权重距离增加 2 km 时,水域的 Moran's  $I$  小于 0.1;当权重距离增加到 3 km 时,耕地的 Moran's  $I$  开始大于草地,建设用地的 Moran's  $I$  也小于 0.1;当权重距离增加到 6 km 时,耕地和草地的 Moran's  $I$  小于 0.1,表明两者的空间正自相关性已很弱,林地的 Moran's  $I$  接近 0.1,空间聚集性比较弱。当距离权重增加到 8 km 时,耕地、草地和建设用地的全局 Moran's  $I$  结果呈现为负值,已呈现不出整体空间相关性。上述现象是由长河流域各地类斑块数量、面积与相距距离差异造成的。

表 1 各类土地在 0.5 km 处全局空间自相关显著性检验

参数	耕地	林地	草地	水域	建设用地
Moran's $I$	0.608138	0.693598	0.665867	0.4662	0.451072
$z$	18.1803	20.2722	19.6812	15.3533	13.2967
$p$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: $z$  是检验统计量; $p$  表示概率; $z$  与  $p$  相关联, $z < -1.96$  或  $z > 1.96$  时,  $p < 0.05$ , 即置信度大于 95%。

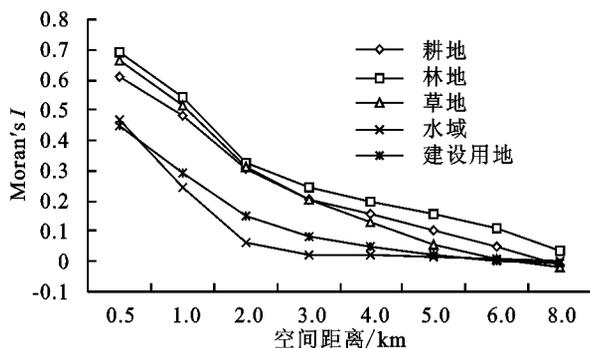


图 3 长河流域各类土地的全局 Moran's  $I$  随距离变化的趋势

### 3.1.2 土地利用局部空间自相关分析

(1) 局部空间自相关 Moran 散点图。基于用地比例数据和空间权重矩阵绘制 Moran 散点图,结果见图 4。图中斜线表示两者的线性相关关系,斜率即 Moran's  $I$ ;4 个象限分别指示了地类单位和相邻地类单位在流域局部存在的 4 种关联形式,即 High—High(高值—高值)、Low—Low(低值—低值)聚集或 High—Low(高值—低值)、Low—High(低值—高值)异常。

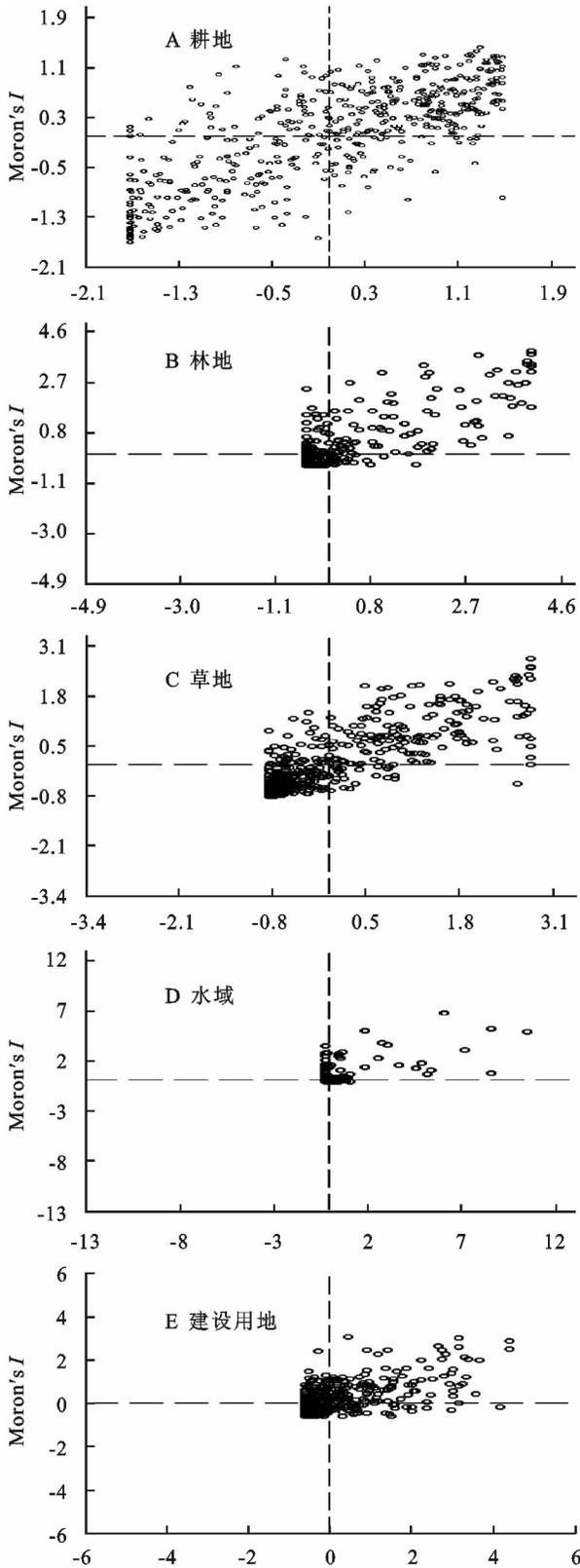


图4 长河流域各土地利用类型的 Moran 散点图

从图4可看出,各土地利用类型 Moran 散点图中斜率均为正值,整体表现为正相关。研究区长河流域耕地、草地的 Moran 散点图(图4A,4C),绝大多数点落在第1,3象限,表明耕地、草地的用地分布呈明显的High—High,Low—Low聚集趋势,即耕地用

地比例和草地用地比例高值空间单元与周边的高值单元发生空间聚集现象,低值空间单元与周边的低值空间单元发生聚集现象;而落在第2,4象限的点数较少,即耕地和草地较少出现用地比例高值区格网与低值区格网集中布局的异常情况。林地、水域和建设用地的 Moran 散点图(图4B,4D,4E)表明,林地、水域和建设用地的空间分布呈明显的 High—High聚集趋势。

(2) 局部空间自相关 LISA 分布图。Moran 散点图表达了各土地利用类型空间分布的聚集和异常特征,LISA 分布图可进一步确定局部空间聚集或异常的具体位置。在得到基于网格单元的各土地利用类型 LISA 分布图后,将聚集或异常特征值赋值到原始土地利用图斑上,得到各土地利用类型的 LISA 分布图,见图5。

由图5可知,耕地在空间结构上出现了 HH 聚集、LL 聚集、HL 异常、LH 异常 4 种类型,草地在空间结构上出现了 HH 聚集、LL 聚集、LH 异常 3 种类型,水域和建设用地在空间结构上出现了 HH 聚集、HL 异常、LH 异常 3 种类型,林地在空间结构上出现了 HH 聚集、LH 异常 2 种类型。耕地、草地的空间分布呈显著的 HH,LL 聚集趋势,而林地、水域和建设用地呈显著的 HH 聚集趋势。

耕地 HH 聚集区、LL 聚集区面积分别为 11.59 km<sup>2</sup>,1.64 km<sup>2</sup>,占耕地总面积的 17.88%和 2.52%;HH 聚集区主要分布在长河以东地区和流域西南地区平原地区,地势相对较平坦,水源相对充足,耕地面积大且成片分布;LL 聚集区主要出现在流域的西部和东南部的低山和丘陵地区,海拔较高,沟壑纵横,耕作相对困难,耕地小范围聚集分布;HL 异常区、LH 异常区面积很少,零星地分散在流域内部,分别占耕地总面积的 0.25%和 0.74%。草地 HH 聚集区、LL 聚集区面积分别为 6.98 km<sup>2</sup>,0.4 km<sup>2</sup>,占草地总面积的 31.08%和 1.79%;草地空间聚集及异常的格局与耕地刚好相反,草地空间 HH 聚集区是耕地空间 LL 聚集区,两者空间聚集类型对应关系明显;草地 LH 异常区面积较少,占草地总面积的 0.49%。林地、水域和建设用地呈现出显著的 HH 空间聚集态势。林地 HH 聚集区面积为 4.75 km<sup>2</sup>,占林地总面积的 50.76%,集中在流域的西部山区,主要分布在王虎山、原庄、沟西村和峪南村等地区;林地 LH 异常区面积较少,占草地总面积的 0.65%。水域 HH 聚集区面积为 0.56 km<sup>2</sup>,占水域总面积的 41.64%,分布在长河地区和流域内水库及其周边内陆滩涂地区;HL 异常区、LH 异常区面积很少,分别占水域总面积的 1.59%和 0.31%。建设用地 HH

聚集区面积为 4.25 km<sup>2</sup>,占建设用地总面积的 27.83%,也主要分布在沿长河分布的周边村庄;HL

异常区、LH 异常区面积很少,分别占建设用地总面积的 0.31%和 0.03%。



图 5 长河流域各土地利用类型的 LISA 图

### 3.2 长河流域土地利用空间自相关影响因素分析

3.2.1 耕地利用格局影响因素分析 对于耕地景观与各环境因子之间的关联性分析,选取各格网中耕地占比参考变量,与其他比较序列进行对比,并进行各因素间的相关性分析,结果见表 2。

表 2 耕地景观影响因素灰色关联度与相关性计算结果

影响因素	关联度	关联序	相关系数	双向检验
人口密度	0.786001	4	0.256**	0
路网密度	0.778767	5	0.202**	0
距居民点距离	0.657165	8	-0.467**	0
距水系距离	0.740407	7	-0.254**	0
平均高程	0.820511	2	-0.539**	0
坡度	0.763486	6	-0.412**	0
坡向	0.801206	3	0.122**	0.005
有效土层厚度	0.832075	1	0.239**	0

注:\*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

通过耕地景观与各影响因素的灰色关联及相关性分析统计结果中可以看出,各格网中耕地占比与有效土层厚度因子之间的关联排序最高,其次是平均高程、坡向、人口密度、路网密度、坡度、距水系的距离、距居民点的距离。格网耕地占比同距居民点的距离,距水系距离、平均高程、坡度等呈负相关关系。这是因为耕地主要分布在海拔相对较低而且较平缓的地区,为了有利于人类生产活动的开展及方便灌溉,耕地多分布在距离农村居民点较近的地区以及水系周围。同时格网耕地占比同有效土层厚度呈正相关,这是因为有效土层厚度大的地区土壤都比较肥沃,人们为了生产,这些地区大都种植农作物。格网耕地占比同人口密度,路网密度等呈正相关,说明为了满足人类对粮食需求,耕地多分布在人口相对密集区域,这些地区一般地势较为平坦,土壤和水热条件较好,路网发达,有利于人们发展农业生产活动。

3.2.2 林地利用格局影响因素分析 对于林地景观与各环境因子之间的关联性分析,选取各格网中林地占比作为参考变量,与其他比较序列进行对比,并进行各因素间的相关性分析,结果见表 3。

表 3 林地景观影响因素灰色关联度与相关性计算结果

影响因素	关联度	关联序	相关系数	双向检验
人口密度	0.777	8	-0.403**	0
路网密度	0.798	7	-0.215**	0
距居民点距离	0.865	1	0.425**	0
距水系距离	0.831	3	0.082	0.058
平均高程	0.816	4	0.482**	0
坡度	0.834	2	0.454**	0
坡向	0.803	6	-0.167**	0
有效土层厚度	0.806	5	-0.109*	0.012

注:\*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

通过林地景观与各影响因素的灰色关联及相关性分析统计结果可以看出,各格网中林地占比与距居民点距离因子之间的关联排序最高,其次是坡度、距水系距离、平均高程、有效土层厚度、坡向、路网密度、人口密度。说明随着距居民点距离的增加和坡度上升,林地面积不断增加。这是因为研究区林地主要分布在西部和东南部低山区,距离居民点和长河水系相对较远,较中部平原地区坡度和平均高程相对较大。格网林地占比同有效土层厚度和坡向呈负相关关系,通过这两个因子的格网图发现,有效土层厚度呈中部向西递减趋势,流域西部地区坡向普遍低于东部地区,而林地大部分分布在流域西北部。格网林地占比同路网密度、人口密度呈负相关,随着路网密度和人口密度的增加,林地面积减少。这是因为人口密集,道路发达地区经济发展快,这些地区土地利用程度高,多为建设用地等,不利于大面积林地分布。

3.2.3 草地利用格局影响因素分析 对于草地景观与各环境因子之间的关联性分析,选取各格网中草地

占比作为参考变量,与其他比较序列进行对比,并进行各因素间的相关性分析,结果见表 4。

表 4 草地景观影响因素灰色关联度与相关性计算结果

影响因素	关联度	关联序	相关系数	双向检验
人口密度	0.580153	8	-0.653**	0
路网密度	0.622473	7	-0.293**	0
距居民点距离	0.73602	2	0.440**	0
距水系距离	0.737433	1	0.472**	0
平均高程	0.684878	4	0.529**	0
坡度	0.720528	3	0.369**	0
坡向	0.666017	5	-0.044	0.315
有效土层厚度	0.644075	6	-0.369**	0

注:\*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

通过草地景观与各影响因素的灰色关联及相关性分析统计结果可以看出,各格网中草地占比与距水系距离因子之间的关联排序最高,其次是距居民点距离、坡度、平均高程、坡向、有效土层厚度、路网密度、人口密度。说明随着距水系距离和距居民点距离的增加,坡度的上升,草地面积呈明显增加趋势。这是因为研究区草地相对集中分布在距离长河水系和居民点相对较远的西部和东南部低山区,流域中部地区坡度相对平缓,距离居民点和水系比较近,这些地区草地分布比较零散,面积比例小。格网草地占比同有效土层厚度、路网密度和人口密度呈负相关。说明草地多分布在有效土层厚度较低的区域,随着路网密度和人口密度的增加,草地面积减少。这是因为人口密集区域,路网发达,这些地区的地形和土壤水热条件较好,便于耕作和生活,所以耕地和建设用地上占大多数,草地只能零星分布。

3.2.4 水域利用格局影响因素分析 对于水域景观与各环境因子之间的关联性分析,选取各格网中草地占比作为参考变量,与其他比较序列进行对比,并进行各因素间的相关性分析,结果见表 5。

通过水域景观与各影响因素的灰色关联及相关性分析统计结果可以看出,各格网中水域占比与距居民点的距离因子之间的关联排序最高,其次是路网密度、人口密度、坡向、有效土层厚度、坡度、平均高程、距水系距离。格网水域占比同距居民点的距离,平均高程,坡度等呈负相关关系,即随着距居民点距离增加,海拔高度上升和坡度的增加,水域面积呈下降趋势,说明水系分布在海拔比较低,地势平坦的居民点周围。格网水域占比同人口密度、路网密度呈正相关关系,即随人口密度和路网密度增加,水域面积增大,

说明研究区水域分布在人口聚集路网发达的地区,居民点和道路多沿水系分布。

表 5 水域景观影响因素灰色关联度与相关性计算结果

影响因素	关联度	关联序	相关系数	双向检验
人口密度	0.731185	3	0.166**	0
路网密度	0.747964	2	0.024	0.573
距居民点距离	0.751639	1	-0.046	0.286
距水系距离	0.678402	8	-0.241**	0
平均高程	0.68173	7	-0.229**	0
坡度	0.687529	6	-0.174**	0
坡向	0.702673	4	-0.052	0.23
有效土层厚度	0.700902	5	0.046	0.288

注:\*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.2.5 建设用地利用格局影响因素分析 对于建设用地景观与各环境因子之间的关联性分析,选取各格网中草地占比作为参考变量,与其他比较序列进行对比,并进行各因素间的相关性分析,结果见表 6。

表 6 建设用地景观影响因素灰色关联度与相关性计算结果

影响因素	关联度	关联序	相关系数	双向检验
人口密度	0.843962	1	0.910**	0
路网密度	0.789977	2	0.323**	0
距居民点距离	0.667574	8	-0.338**	0
距水系距离	0.705789	7	-0.276**	0
平均高程	0.731771	5	-0.359**	0
坡度	0.717503	6	-0.322**	0
坡向	0.741730	4	0.071	0.1
有效土层厚度	0.751254	3	0.245**	0

注:\*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

通过建设用地景观与各影响因素的灰色关联及相关性分析统计结果可以看出,各格网中建设用地占比与人口密度因子之间的关联排序最高,其次是路网密度、有效土层厚度、坡向、平均高程、坡度、距水系距离、距居民点距离。说明建设用地多分布在人口密度和路网密度大的地区,而且格网建设用地占比同人口密度和路网密度呈正相关关系,格网建设用地占比同坡度、平均高程呈负相关关系,即建设用地面积随人口密度和路网密度增加而增加,建设用地面积随高程和坡度增加而减少,因为这些人口密集路网发达的地区一般都比较平坦,自然条件优越,有利于生活和生产需要,有利于居民点和工业用地等建设用地的布置。

## 4 结论

(1) 当距离权重为 0.5 km 时,长河流域各类用地

全局 Moran's  $I$  结果均为正值,流域内各土地利用类型的空间分布整体上呈现出空间聚集性特征,表现出空间正自相关特性;空间正自相关性随着距离的增加而逐渐减弱,在 6 km 以内,随着距离的延伸,不同土地利用类型自相关程度的空间衰减强度不同,其中水域和林地的空间聚集性衰减迅速,而耕地和草地的空间聚集性随距离衰减最慢。耕地、林地和草地空间自相关强度较大,水域和建设用地空间自相关强度较小。

(2) 长河流域土地利用类型存在不同的局部 HH、LL 聚集或 HL、LH 异常特征。耕地在空间结构上出现了 HH 聚集、LL 聚集、HL 异常、LH 异常 4 种类型,草地在空间结构上出现了 HH 聚集、LL 聚集、LH 异常 3 种类型,水域和建设用地在空间结构上出现了 HH 聚集、HL 异常、LH 异常 3 种类型,林地在空间结构上出现了 HH 聚集、LH 异常 2 种类型。耕地、草地的空间分布呈明显的 HH、LL 聚集趋势,而林地、水域和建设用地的空间分布呈明显的 HH 聚集趋势。耕地 HH 聚集区主要分布在长河以东地区和流域西南地区平原地区;LL 聚集区主要出现在流域的西部和东南部的低山和丘陵地区。草地空间聚集及异常的格局与耕地刚好相反,草地空间 HH 聚集区是耕地空间 LL 聚集区。林地 HH 聚集区集中在流域的西部山区。水域 HH 聚集区分布在长河地区和流域内水库及其周边内陆滩涂地区。建设用地 HH 聚集区主要分布在沿长河分布的周边村庄。

(3) 各格网耕地占比与有效土层厚度因子之间的关联排序最高,其次是平均高程、坡向、人口密度、路网密度、坡度、距水系的距离、距居民点的距离。各格网林地占比与距居民点距离因子之间的关联排序最高,其次是坡度、距水系距离、平均高程、有效土层厚度、坡向、路网密度、人口密度。各格网草地占比与距水系距离因子之间的关联排序最高,其次是距居民点距离,坡度、平均高程、坡向、有效土层厚度、路网密度、人口密度。各格网水域占比与距居民点的距离因子之间的关联排序最高,其次是路网密度、人口密度、坡向、有效土层厚度、坡度、平均高程、距水系距离。各格网建设用地占比与人口密度因子之间的关联排序最高,其次是路网密度、有效土层厚度、坡向、平均高程、坡度、距水系距离、距居民点距离。

#### 参考文献:

- [1] 高凯,周志翔,杨玉萍.长江流域土地利用结构及其空间自相关分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(S1):13-20.
- [2] Cliff A D, Ord J K. Spatial autocorrelation[M]. London: Pion, 1973.
- [3] Overmars K P, de Koning G H J, Veldkamp A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models[J]. Ecological Modelling, 2003,164(2/3):257-270.
- [4] 段增强,张凤荣,苗利梅.基于邻域因子的土地利用空间格局分析:以北京市海淀区为例[J].农业工程学报,2006(6):71-76,234.
- [5] 邱炳文,王钦敏,陈崇成,等.福建省土地利用多尺度空间自相关分析[J].自然资源学报,2007(2):311-321.
- [6] 韦素琼,张金前,陈健飞.基于空间自相关的闽台城镇建设用地分布研究[J].地理科学进展,2007(3):11-17,127.
- [7] 焦利民,刘耀林,刘艳芳.区域城镇基准地价水平的空间自相关格局分析[J].武汉大学学报:信息科学版,2009,34(7):873-877.
- [8] 谢正峰,王倩.广州市土地利用程度的空间自相关分析[J].热带地理,2009,29(2):129-133.
- [9] 王千,金晓斌,周寅康.河北省耕地生态安全及空间聚集格局[J].农业工程学报,2011,27(8):338-344.
- [10] 卞鸿雁,任志远.关中一天水地区土地承载力空间自相关研究[J].宁夏师范学院学报,2011,32(3):56-59.
- [11] 谷建立,张海涛,陈家赢,等.基于DEM的县域土地利用空间自相关格局分析[J].农业工程学报,2012,28(23):216-224.
- [12] 宋文,陈英.土地利用空间自相关分析中观测变量和衡量指标的选择研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):37-42.
- [13] 付金霞,郑粉莉,李媛媛.小理河流域土地利用空间自相关格局与影响因素分析[J].农业机械学报,2017,48(1):128-138.
- [14] 谢圣.湖北省土地利用景观格局及其影响因素分析[D].武汉:华中师范大学,2013.
- [15] 孟斌,王劲峰,张文忠,等.基于空间分析方法的中国区域差异研究[J].地理科学,2005,25(4):393-400.
- [16] Anselin L, Syabri I, Kho Y. GeoDa: an introduction to spatial data analysis[J]. Geographical Analysis, 2006, 38(1):5-22.
- [17] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA [J]. Geographical Analysis, 1995,27(2):93-115.