

小理河流域土地利用空间自相关格局与影响因素分析

付金霞¹ 郑粉莉^{1,2} 李媛媛¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与干旱农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为揭示土地利用空间自相关格局与自然社会经济因素的耦合关系,以黄土丘陵沟壑区的小理河流域为研究区,基于全局 Moran's *I*、Moran 散点图和 Anselin local Moran's *I* 分析了 500 m × 500 m 格网尺度上流域土地利用全局和局部空间自相关格局,利用 GIS 技术研究各类用地在 $p < 0.05$ 显著性水平下局部聚集区与高程、坡度、坡向、与水域距离、与道路距离、与居民点距离的关系。结果表明,各土地利用类型都表现出全局空间正自相关特性,但空间正自相关性随着距离的增加而逐渐减弱,且在 32 km 以内不同土地利用类型自相关程度的空间衰减强度不同。耕地、草地的空间分布呈显著的 HH(高值-高值)、LL(低值-低值)聚集趋势,而园地、林地、建设用地和未利用地呈显著的 HH 聚集趋势。草地 HH 聚集区主要分布在流域中、上游的丘陵或山地区,林地 HH 聚集区主要分布在流域下游沟壑区和上游山地区,其他地类 HH 聚集区集中分布在流域下游宽阔黄土梁或开阔河谷区。随高程和坡度增加,各地类 HH、LL 聚集区面积总体呈先增加后减小的趋势。在 1 000 ~ 1 300 m 高程区、15° ~ 25° 的坡度区以及正阳向和正阴向区域,是各地类 HH 聚集分布最多样、面积最集中的区域。建设用地和林地 HH 聚集区主要分布在 1 000 ~ 1 100 m 高程区,耕地、园地和未利用地 HH 聚集区主要分布在 1 100 ~ 1 200 m 高程区,草地 HH 聚集区主要分布在 1 200 ~ 1 300 m 高程区。各地类 HH 聚集区按平均坡度由小到大依次为:建设用地、耕地、园地、林地、未利用地、草地。建设用地、园地和耕地 HH 聚集区主要分布在正阳向和半阳向区域(正阳向面积最多),林地和草地 HH 聚集区主要分布在正阴向和正阳向区域(正阴向面积最多)。距水域和道路越远,除未利用地外,各地类 HH 聚集区面积呈不断减小的趋势;距居民点越远,草地 HH 聚集区面积呈先增加后减小趋势,而其他地类 HH 聚集区面积呈不断减小的趋势。各地类 HH、LL 聚集区集中分布在距水域、道路 1.5 km 范围内和距居民点 3 km 范围内。距水域、道路和居民点越近,建设用地、园地和耕地的 HH 聚集区面积迅速增加。相比 HH 聚集区,耕地 LL 聚集区主要分布在 1 200 m 以上高程区,平均坡度增大,正阳向面积略大于其他坡向面积,与水域和居民点的距离较远且面积呈先增后减的趋势;草地 LL 聚集区主要分布在 1 000 ~ 1 200 m 高程区、15° ~ 35° 坡度区,各坡向上分布面积相差不大,与水域、道路和居民点的距离较近且面积呈不断减小趋势。

关键词: 土地利用; 空间自相关; 影响因素; 黄土丘陵沟壑区; 小理河流域; GIS

中图分类号: P9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0128-11

Analysis of Land Use Spatial Autocorrelation Patterns and Influence Factors of Xiaolihe Watershed

FU Jinxia¹ ZHENG Fenli^{1,2} LI Yuanyuan¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to reveal the coupling relationship between land use spatial autocorrelation patterns and natural – social – economic factors of Xiaolihe watershed located in loess hilly-gully region, the global and local spatial autocorrelation patterns of land use types were analyzed by the methods of Moran's *I*, Moran scatter plot and Anselin local Moran's *I* in the 500 m × 500 m grid scale, meanwhile, the relationships between local cluster zones and the selected environmental factors were analyzed at the $p < 0.05$

收稿日期: 2016-06-18 修回日期: 2016-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571263)

作者简介: 付金霞(1978—),女,讲师,博士生,主要从事土地利用变化、气候变化与土壤侵蚀研究,E-mail: fujinxia405@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 郑粉莉(1960—),女,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

significant level based on GIS technology. The selected environmental factors included elevation, slope, aspect, water, roads and residential areas. The results showed that all land use types showed positive global spatial autocorrelation, but it was gradually decreased with the increase of distance. Within the distance of 32 km, spatial attenuation intensity of autocorrelation of each land use type was different from the extension of distance. The spatial distribution of cultivated land and grassland showed significant HH (high value – high value) and LL (low value – low value) cluster trends, and that of garden land, forest land, construction land and unused land showed significant HH cluster trend. The HH cluster zones of grassland were mainly distributed in hills or mountains of the midstream and upstream watershed, the HH cluster zones of forest land were mainly distributed in gullies of the downstream watershed and mountains of the upstream watershed, and those of others were mainly distributed in wide loess ridges and wide river valleys of the downstream watershed. With the increase of elevation and slope, the areas of HH and LL cluster zones of each land use type were increased firstly and then decreased. The region, which was located in the elevation area of 1 000 ~ 1 300 m, the slope area of $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$, the sunny area and shady slope area, was the most diverse and concentrated area of HH cluster distribution of land use types. The HH cluster zones of construction land and forest land were mainly distributed in the elevation area of 1 000 ~ 1 100 m, the HH cluster zones of cultivated land, garden land and unused land were mainly distributed in the elevation area of 1 100 ~ 1 200 m, and those of grassland were mainly distributed in the elevation area of 1 200 ~ 1 300 m. According to the average slope of HH cluster zones of each land use type in ascending order, the order was as follows: construction land, cultivated land, garden land, forest land, unused land and grassland. The HH cluster zones of construction land, garden land and cultivated land were mainly distributed in sunny area and semi-sunny area, in which the distribution area in sunny area was larger. The HH cluster zones of forest land and garden land were mainly distributed in shady slope area and sunny area, in which the distribution area in shady slope area was larger. With the increase of distance from water and roads, the areas of HH cluster zones of each land use type showed a declining trend except for unused land. With the increase of distance from residential areas, the areas of HH cluster zones of grassland were increased firstly and then decreased, and those of others showed a declining trend. The HH and LL cluster zones of each land use type were mainly distributed within the distance of 1.5 km from water and roads as well as within the distance of 3 km from residential areas. The areas of HH cluster zones of construction land, garden land and cultivated land were increased rapidly with the decrease of distance to water, roads and residential areas. Compared with HH cluster zones, the LL cluster zones of cultivated land were mainly distributed in the elevation area of greater than 1 200 m, and the average slope of the LL cluster zones was increased. The distribution area of the LL cluster zones of cultivated land in the sunny area was slightly larger than those in other aspects. The LL cluster zones of cultivated land were farther away from water and residential areas, and the areas of which were firstly increased and then decreased. While the LL cluster zones of grassland were mainly distributed in the elevation area of 1 000 ~ 1 200 m and the slope area of $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$, and the distribution area of the LL cluster zones in each aspect was similar. The LL cluster zones of grassland were closer to water, roads and residential area, and the areas of which showed a declining trend.

Key words: land use; spatial autocorrelation; influence factors; loess hilly-gully region; Xiaolihe watershed; GIS

引言

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, 可用来反映研究对象在空间位置中的聚集程度^[1]。在土地利用/土地覆被变化(LUCC)研究中, 越来越多的学者开始关注区域土地利用格局的空间自相关特性。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。OVERMARS 等^[2]首次对土地利用进行空间自相关分析, 并引入了空间自回归模型。国内学者先后对北京市、内蒙古翁牛特旗和宁城县、福建省、

闽台地区、广州市、湖北省、长江流域、珠江三角洲、贵州山区、河北省等不同区域的不同土地利用类型的空间自相关特征进行了分析^[3-14]。但在此类研究中, 关于土地利用空间自相关格局的形成原因及其驱动因素定量化的研究较少。谷建立等^[14]在研究湖北省谷城县土地利用空间自相关格局的基础上, 统计分析了地形因子(高程、坡度、坡向、地形起伏度及地表粗糙度)对土地利用空间局部聚集特征的影响。然而, 土地利用空间格局的形成和演变受人类活动和自然环境等多因素影响^[15-17]。自然环境因素(如地形地貌、气候、水文、土壤等)是土地利用方式及其空间格局形成的必要基础, 社会经济因

素(如人口密度、居民地空间分布、GDP、道路网密度、工农业生产技术等)则影响着土地利用空间的分异格局与演化的方向和速率。因此,土地利用空间自相关格局与其主导驱动因素的关系亟待研究。

本文针对相关研究缺乏的黄土丘陵沟壑区,利用 GIS 技术,基于数字高程模型(DEM)和土地利用数据,以小理河流域为研究对象,探讨黄土丘陵沟壑区流域土地利用空间自相关格局特征,并根据流域面积及其自然社会经济环境特征,选取高程、坡度、坡向、与水域距离、与道路距离、与居民点距离等相对稳定的自然社会经济因素作为主导驱动因素,分析这些因素对流域土地利用空间自相关格局形成的影响。以期了解流域内各类土地利用的空间结构特征,并揭示土地利用空间自相关格局与自然社会经济因素的耦合关系,从而为流域土地利用规划、结构调整、政策制定、水土流失治理和土地利用空间建模等提供重要参考和决策支持。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

小理河是陕西省北部无定河水系大理河的一条主要支流,位于东经 109°16′~109°51′、北纬 37°36′~37°49′之间。其发源于陕西省榆林市横山县艾好峁村,在榆林市子洲县殿市镇李家河村汇入大理河,属山溪性河流,河长 63.7 km,流域面积 807 km²。流域气候属大陆性季风气候,冬春干寒、雨量稀少,夏季炎热、雨量较多^[18]。流域地处黄土丘陵沟壑区,基岩为中生代砂页岩,其上为更新世黄土层覆盖,土层厚 50~100 m,沟壑密度 4.0~6.0 km/km²^[18]。地势西南高、东北低,由西南向东北倾斜,海拔高度在 940~1 467 m 之间。地形地貌特征为梁峁起伏、沟壑纵横。流域土地利用类型以草地、耕地、林地为主,三者分布面积分别占流域总面积的 53.95%、36.41% 和 6.55%。流域土壤类型主要为黄土和风沙土,其面积分别占总面积的 96.07% 和 2.32%。

1.2 数据来源与预处理

采用的数据资料包括比例尺为 1:50 000 的横山县和子洲县地形图、2009 年 1:50 000 两县土地利用现状图。基于数字化等高线数据生成两县区域的 DEM(栅格分辨率为 25 m×25 m),并利用 ArcGIS 的水文分析工具,提取小理河流域边界。两县 DEM 和土地利用现状图经小理河流域边界裁剪,得到研究流域的 DEM 和土地利用现状图。将研究流域土地利用类型进行归并处理,最终得到耕地、园地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地共 7 种土地利用类型,但由于水域在研究流域内所占面积很小,斑

块数不足以进行自相关分析,所以本研究对水域不做研究。运用网格化处理方法,根据流域面积、土地斑块数量和斑块面积以及最优样方尺寸计算方法^[19-20](样方尺寸应当是平均每个点所占面积的 2 倍),将研究区划分为 500 m×500 m 网格单元,共计 3 510 个单元;将各地类与网格单元进行叠置分析,计算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。根据流域面积及其自然社会经济环境特征,选取高程、坡度、坡向、与水域距离、与道路距离、与居民点(城镇中心和农村居民点)距离作为流域土地利用空间自相关格局形成的主导驱动因素。为获得各驱动因子的空间量化图,在 ArcGIS 中基于 DEM 提取流域的高程、坡度、坡向 3 个地形因子,通过测定距离功能获得与水域、道路、居民点的距离空间分布图,在此基础上分析各驱动因子对土地利用空间自相关格局的影响。

1.3 研究方法

通过空间自回归模型,运用全局 Moran's I、空间关联局域指标(Local indicators of spatial association, LISA)以及 Moran 散点图,从全局和局部 2 个层次对土地利用格局进行空间自相关性研究。

1.3.1 全局空间自相关分析

全局 Moran's I 能够方便探测空间要素或其属性值在区域整体的空间自相关性,并用以识别研究区域整体的空间分布模式^[21-22]。Moran's I 统计量^[1,14]计算公式为

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{1}$$

其中
$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \tag{2}$$

式中 n ——样本总数
 x_i ——样本 i 所在位置的属性值
 x_j ——样本 j 所在位置的属性值
 $\bar{x}$ ——样本均值 w_{ij} ——空间权重

常见的构建空间权重方法有基于邻接关系的权重和基于距离的权重。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、6、8、10、12、16、24、32 km。Moran's I 计算结果采用 z 检验^[23],当 $|z| > 1.96$,说明通过 $p < 0.05$ 显著性检验。

1.3.2 局部空间自相关分析

为了弥补全局 Moran's I 不能确切指出聚集或异常发生的具体空间位置的缺陷,运用 Moran 散点图^[24]和空间关联局域指标(LISA)^[25]分析土地利用

局部空间自相关格局。

Moran 散点图是用散点图描述变量与其空间滞后(即该观测值周围邻居的加权平均)向量之间的相关关系。横轴对应描述变量,纵轴对应空间滞后向量。该图分为4个象限,分别识别研究单元及其邻近单元的关系,即HH(高值-高值)聚集(第1象限)和LL(低值-低值)聚集(第3象限),暗示了观测值的相似性,表现为空间正相关;HL(高值-低值)异常(第2象限)和LH(低值-高值)异常(第4象限),暗示了观测值的异常性,表现为空间负相关。如果观测值均匀地分布在4个象限,则表示地区之间不存在空间自相关性。因此,通过Moran散点图可以直观地看出流域内存在几种聚集或异常特征。

空间关联局域指标(LISA)用来衡量空间单元变量值与周边单元变量值的相近(正相关)或差异(负相关)程度,并可用于识别“热点区域”以及数据的异质检验^[23]。该指标可以用局部Moran's I统计量^[14]进行度量,计算式为

$$I_i = x'_i \sum_{j=1}^n w_{ij} x'_j \tag{3}$$

式中 x'_i ——样本*i*标准化的单元观测值
 x'_j ——样本*j*标准化的单元观测值

利用GeoDa^[24]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。

1.3.3 GIS空间分析

在ArcGIS中基于DEM提取流域的高程、坡度、坡向3个地形因子,通过测定距离功能获得与水域、道路、居民点的距离空间分布图。将各因子空间化值进行分类或分级:①根据流域地形特点和高程分级间隔数据相等的基本原则,将高程划分为940~1000 m、1000~1100 m、1100~1200 m、1200~1300 m和大于1300 m 5个区间。②在参照国际地理学会地貌调查和制图委员会对坡度分级规定以及中国农业区划委员会对耕地坡度分级技术规定的基础上,结合黄土丘陵沟壑区生产实践对土地自然坡度的研究成果,将坡度划分为0°~6°、6°~15°、15°~25°、25°~35°和大于35° 5级。③根据坡向界定原理,将坡向分类为正阳向(157.5°~247.5°)、半阳向(112.5°~157.5°、247.5°~292.5°)、半阴向(67.5°~112.5°、292.5°~337.5°)和正阴向(337.5°~360°、0°~67.5°) 4个方向。④通过比较计算各地类与水域、道路、居民点不同距离下的面积

比重,并根据分级间隔数据相等的基本原则,将与水域或道路距离以0.5 km为间隔划分为0~0.5 km、0.5~1.0 km、1.0~1.5 km、1.5~2.0 km和大于2.0 km 5级,与居民点距离以1 km为间隔划分为0~1 km、1~2 km、2~3 km、3~4 km和大于4 km 5级。利用ArcGIS区域分析工具,通过分别叠加各驱动因子分级图与土地利用空间局部聚集图,分别计算各因子值每个分级带内的各地类聚集面积,从而定量分析各地类空间聚集区与各驱动因子之间的关系,找出特定土地利用类型在流域发生显著性聚集的原因。

2 结果与分析

2.1 小理河流域土地利用空间自相关特征

2.1.1 土地利用全局空间自相关

以500 m×500 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、6、8、10、12、16、24、32 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1)。

表1 各类土地在0.5 km处全局空间自相关显著性检验
Tab.1 Significance test for global Moran's I of each land use type in 0.5 km

参数	耕地	园地	林地	草地	建设用地	未利用地
Moran's I	0.412 1	0.342 3	0.576 7	0.563 9	0.283 4	0.494 4
z	30.243 9	25.336 4	42.384 1	41.378 0	20.881 5	36.633 6
p	<0.001	<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%。

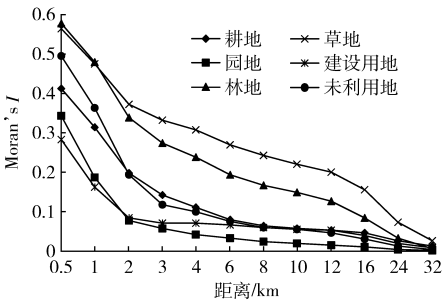


图1 各类土地的全局Moran's I随距离变化的趋势
Fig.1 Changing trends of global Moran's I of each land use type with distance

由表1和图1可知,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32 km时,

其整体空间正自相关性已经极弱。在 32 km 以内,随着距离的延伸,不同土地利用类型的自相关程度的空间衰减强度不同,其中园地和建设用地的空间聚集性衰减迅速,而林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、未利用地、耕地、园地和建设用地;当权重距离增加到 2 km 时,草地的 Moran's I 开始大于林地,果园和建设用地的 Moran's I 小于 0.1;当权重距离增加到 6 km 时,耕地和未利用地的 Moran's I 也小于 0.1;当权重距离增加到 24 km 时,林地和草

地的 Moran's I 小于 0.1,表明二者的空间正自相关性已很弱。上述现象是由小理河流域各地类斑块数量、面积与相距距离差异造成的。

2.1.2 土地利用局部空间自相关

(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,结果如图 2 所示。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 HH(高值-高值)、LL(低值-低值)聚集或 HL(高值-低值)、LH(低值-高值)异常。

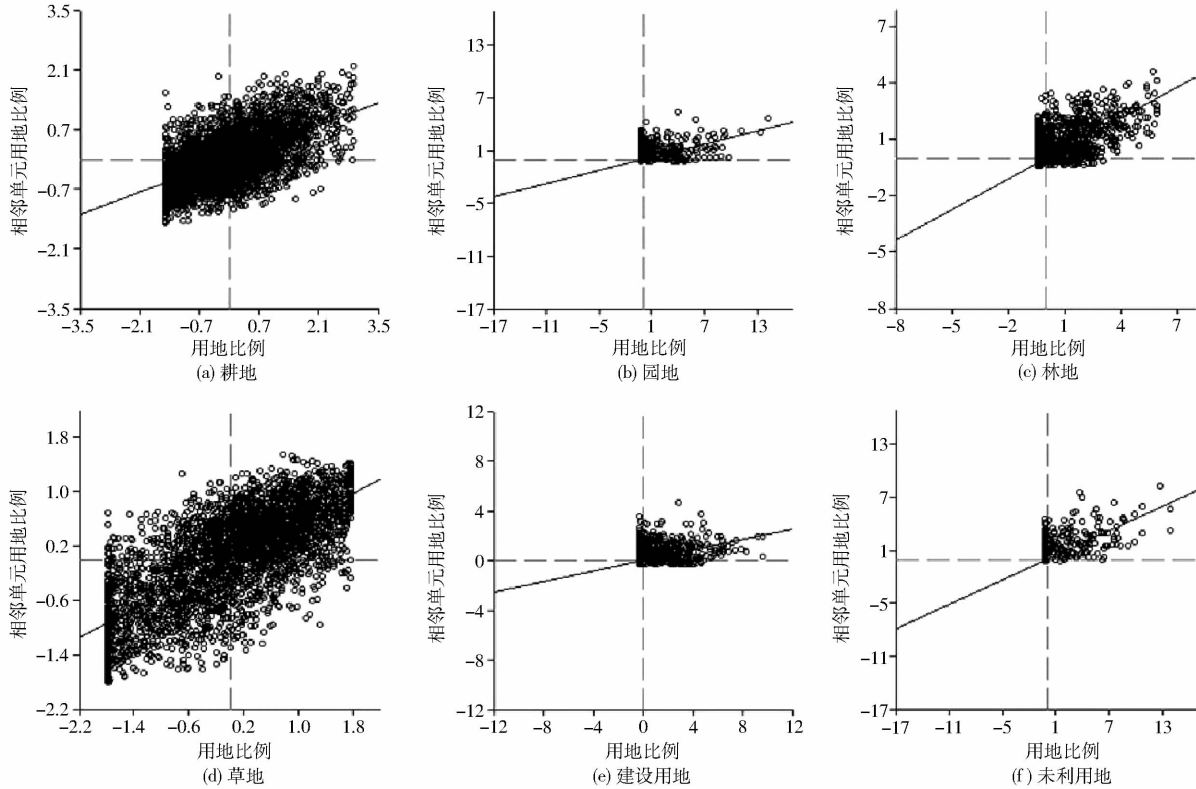


图 2 小理河流域各土地利用类型的 Moran 散点图

Fig. 2 Moran scatter plots of land use types in Xiaolihe watershed

从图 2 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。流域耕地和草地的 Moran 散点图(图 2a、2d)表明,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 HH、LL 聚集趋势,即耕地、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,低值单元与周边的低值单元发生聚集现象;而落在第 2、4 象限的点数较少,即耕地、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。园地、林地、建设用地和未利用地的 Moran 散点图(图 2b、2c、2e、2f)表明,园地、林地、建设用地和未利用地的空间分布呈明显的 HH 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,如图 3 所示。

由图 3 可知,耕地和草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,园地和未利用地只出现了 HH 聚集类型,林地出现了 HH 聚集、LH 异常 2 种类型,建设用地出现了 HH 聚集、HL 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,而园地、林地、建设用地和未利用地呈显著的 HH 聚集趋势。耕地 HH、LL 聚集区面积分别为 118.86 km² 和 15.49 km²,占耕地总面积的 39.75% 和 5.18%;HH 聚集区主要分布在流

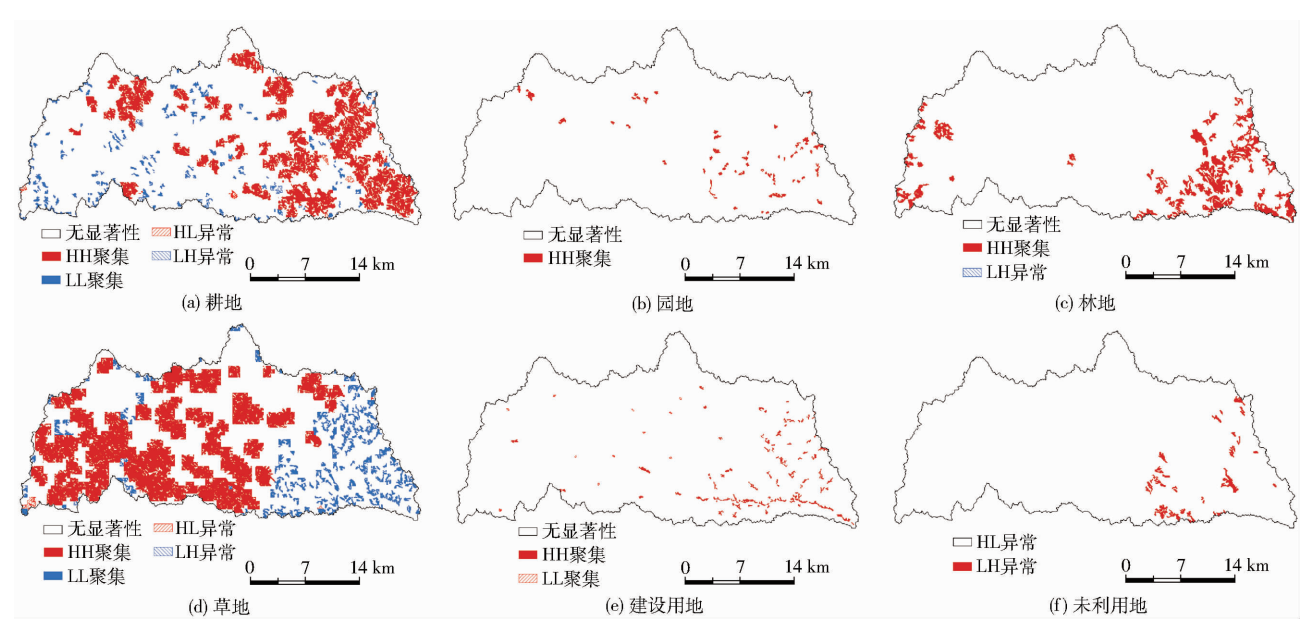


图 3 小理河流域土地利用类型的 LISA 图

Fig. 3 LISA maps of land use types in Xiaolihe watershed

域东部下游的宽阔黄土梁或者开阔河谷区,地势较平坦,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中部和上游地区,海拔较高,梁岭起伏、沟壑纵横,耕作困难,耕地小范围聚集分布;HL、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 1.04% 和 2.79%。草地 HH、LL 聚集区面积分别为 209.45、39.02 km²,占草地总面积的 47.26% 和 10.66%;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 HL、LH 异常区空间布局较少,其面积比例均小于 1%。园地、未利用地 HH 聚集区面积分别占其总面积的 82.77% 和 94.48%,主要集中在流域的东部下游地区。林地呈现出显著的 HH 空间聚集态势,HH 聚集区面积占林地总面积的 83.02%,集中分布在流域下游沟壑区和上游山地区;仅有 0.33% 的林地 LH 异常区出现在流域下游。建设用地 HH 聚集区面积占建设用地总面积的 69.94%,也主要分布在流域的东部下游地区;上中游地区出现少量 HL 异常区,面积比例为 4.66%。

2.2 土地利用空间自相关格局与影响因素的关系

通过将小理河流域各土地利用类型的 LISA 分布图(图 3)与高程、坡度、坡向、与水域距离、与道路距离、与居民点距离图叠加,分别计算各因子每个分级带内的各地类聚集面积,从而定量分析土地利用空间自相关格局与各因子的关系。由于流域土地利用类型空间分布呈显著的 HH 或 LL 聚集态势,且异常区面积很少,因此本研究分析各土地利用类型聚集区与各因子的关系。

2.2.1 土地利用空间自相关格局与高程的关系

由图 4a 可知,随高程的增加,耕地、园地、草地、建设用地和未利用地 HH 聚集区面积呈先增加后减小的趋势,而林地 HH 聚集区面积呈先增加后减小再略有增加的变化趋势。耕地、园地 HH 聚集区主要分布在高程为 1 000 ~ 1 300 m 的区域,此区域的 HH 聚集区面积分别占其 HH 聚集区总面积的 94.21% 和 85.57%;其中,在 1 100 ~ 1 200 m 的高程区分布比例最高,面积比例分别为 45.61% 和 37.28%。林地 HH 聚集区主要分布在 1 000 ~ 1 200 m 的高程区,其 HH 聚集区面积比例为 77.01%;其中,在 1 000 ~ 1 100 m 的高程区分布比例最高,面积比例为 43.16%。建设用地和未利用地 HH 聚集区集中分布在 1 200 m 以下高程区,其 HH 聚集区面积比例分别为 93.56% 和 95.35%;其中,建设用地 HH 聚集区在 1 000 ~ 1 100 m 的高程区分布比例最高,面积比例为 50.34%。草地 HH 聚集区集中分布在 1 100 m 以上高程区,其 HH 聚集区面积比例为 95.73%;其中,1 200 ~ 1 300 m 高程区分布比例达到最高,面积比例为 44.68%;同时,草地在 1 000 m 以下高程区无 HH 聚集区。

各土地利用类型中,仅耕地和草地存在 LL 聚集格局。耕地 LL 聚集区(面积 15.49 km²)主要分布在高程 1 200 m 以上的区域,其 LL 聚集区面积比例为 66.06%。草地 LL 聚集区(面积 39.02 km²)集中分布在高程 1 000 ~ 1 200 m 的区域,其 LL 聚集区面积比例高达 77.54%(图 4b)。

2.2.2 土地利用空间自相关格局与坡度的关系

由图 5a 可知,各地类 HH 聚集区均呈现出随坡

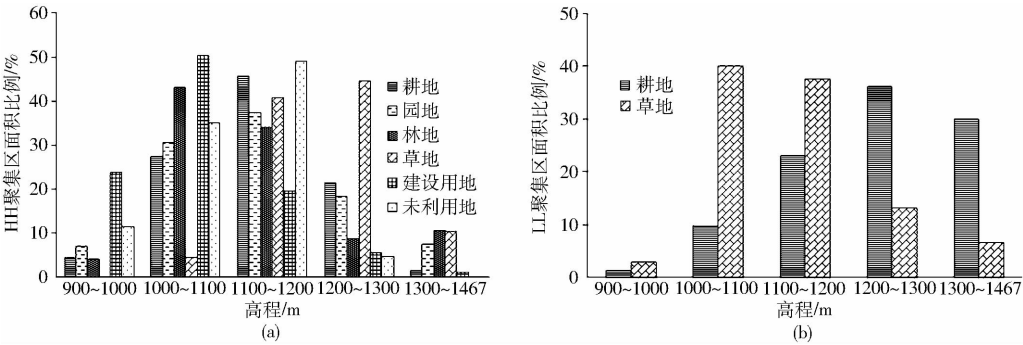


图 4 小理河流域土地利用显著性聚集区与高程的关系

Fig. 4 Relationships between significant cluster zones of land use types and elevation in Xiaolihe watershed

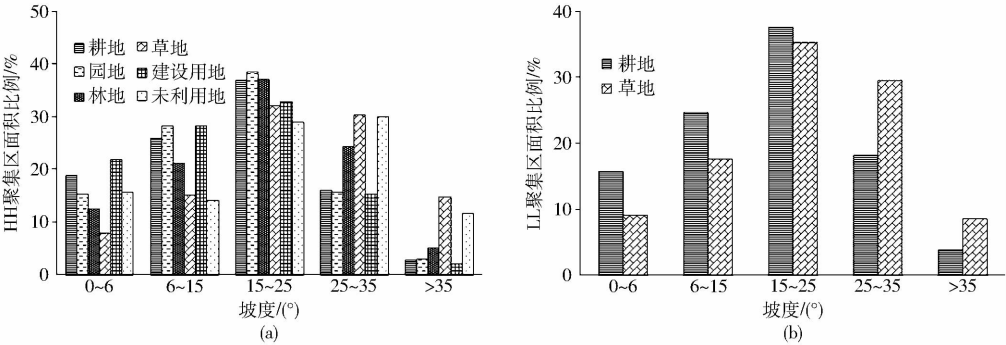


图 5 小理河流域土地利用显著性聚集区与坡度的关系

Fig. 5 Relationships between significant cluster zones of land use types and slope in Xiaolihe watershed

度增大面积先增后减的趋势,其中在 15°~25°的坡度区,是各地类 HH 聚集分布最多样、面积最集中的区域,其间分布着 36.86% 的耕地 HH 聚集区、38.34% 的园地 HH 聚集区、37.01% 的林地 HH 聚集区、32.07% 的草地 HH 聚集区、32.72% 的建设用地 HH 聚集区和 28.89% 的未利用地 HH 聚集区。耕地、园地和建设用地的 HH 聚集区主要分布在坡度小于 25°的区域,其 HH 聚集区面积比例分别为 81.45%、81.62% 和 82.72%。草地和未利用地的 HH 聚集区主要分布在坡度大于 15°的区域,其 HH 聚集区面积比例分别为 77.05% 和 70.37%。林地 HH 聚集区集中分布在坡度为 6°~35°的区域,其面积比例为 82.40%。各地类 HH 聚集区按平均坡度由小到大依次为:建设用地、耕地、园地、林地、未利用地、草地,其坡度分别为 15.09°、16.10°、16.56°、19.06°、20.97°和 23.12°。

由图 5b 可知,耕地和草地 LL 聚集区也呈现出随坡度增大面积先增后减的趋势,其中在 15°~25°的坡度区分布面积最多,其 LL 聚集区面积比例分别为 37.52% 和 35.29%。耕地 LL 聚集区平均坡度增大(平均坡度 17.23°),主要分布在坡度 6°~25°的区域,面积比例为 62.17%。草地 LL 聚集区平均坡度减小(平均坡度 21.18°),主要分布在坡度为 15°~35°的区域,面积比例为 64.72%。

2.2.3 土地利用空间自相关格局与坡向的关系

由图 6a 可知,总体而言,各地类 HH 聚集区主要集中在流域的正阳向和正阴向。建设用地、园地和耕地 HH 聚集区主要分布在正阳向和半阳向,其 HH 聚集区面积比例分别为 86.96%、64.8% 和 60.3%;其中正阳向面积最大,耕地和园地 HH 聚集区在正阳向面积比例超过 40%,建设用地 HH 聚集区在正阳向面积比例高达 57.23%。草地和林地 HH 聚集区主要分布在正阴向和正阳向,其 HH 聚集区面积比例分别为 56.75% 和 56.53%;其中正阴向面积最大,面积比例分别为 28.41% 和 28.55%。未利用地 HH 聚集区也主要分布在正阳向和正阴向,但正阳向面积最大。

由图 6b 可知,耕地 LL 聚集区主要分布在正阳向,其 LL 聚集区面积比例为 35.25%;半阳向、正阴向和半阴向的面积比例基本一致,介于 21.04%~22.68% 之间。草地 LL 聚集区在各坡向的面积比例相差不大,其中正阳向和正阴向面积略大于半阳向和半阴向。

2.2.4 土地利用空间自相关格局与水域的关系

距水域越远,除未利用地 HH 聚集区面积呈先增后减趋势外,耕地、园地、林地、草地、建设用地 HH 聚集区面积呈不断减小趋势(图 7a)。各地类 HH 聚集区集中分布在距水域 1.5 km 范围内,其中,建设用地和耕地 HH 聚集区的面积比例最高,面

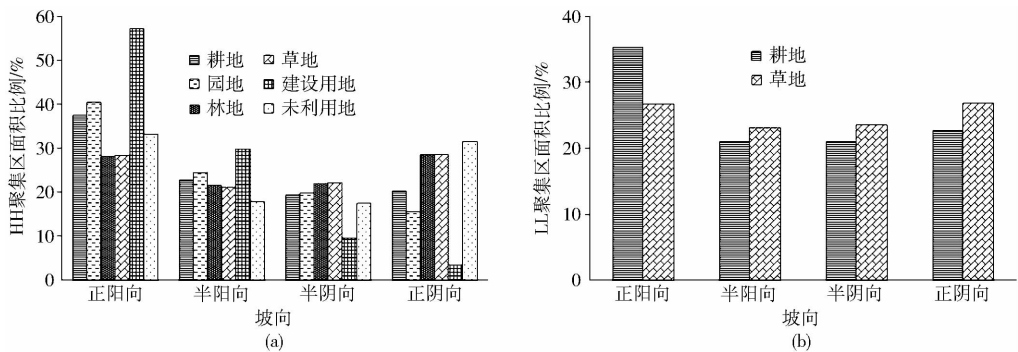


图 6 小理河流域土地利用显著性聚集区与坡向的关系

Fig. 6 Relationships between significant cluster zones of land use types and aspect in Xiaolihe watershed

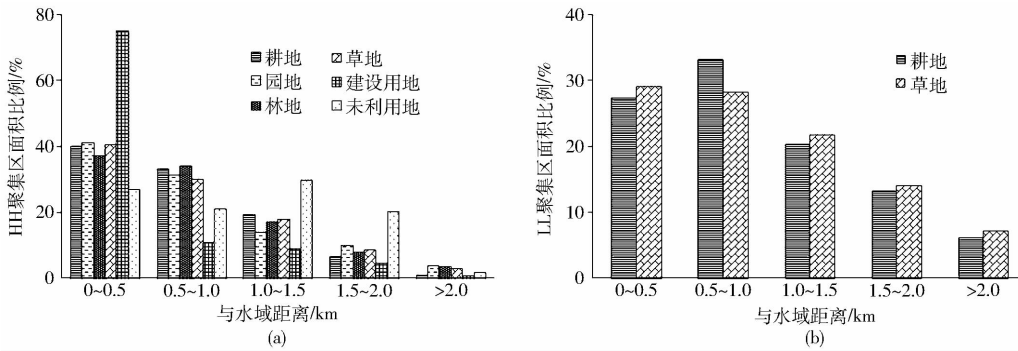


图 7 小理河流域土地利用显著性聚集区与水域的关系

Fig. 7 Relationships between significant cluster zones of land use types and water in Xiaolihe watershed

积比例分别为 94. 88% 和 92. 44% ,且建设用地聚集区在距水域 1.0 km 范围内的面积比例高达 85. 92% ;园地、林地和草地 HH 聚集区在 1. 5 km 范围内的面积比例基本相同,介于 86. 49% ~88. 39% 之间;78. 06% 的未利用地 HH 聚集区分布在此范围内。距水域越近,建设用地 HH 聚集区面积迅速增加。

由图 7b 可知,距水域越远,耕地和草地 LL 聚集区呈现出面积不断减小趋势。耕地 LL 聚集区集中在距水域 1. 5 km 范围内,其 LL 聚集区面积比例为 80. 68% ,其中在距水域 0. 5 ~1. 0 km 范围内面积最大,面积比例为 33. 14% 。78. 94% 的草地 LL 聚集区也集中分布在距水域 1. 5 km 范围内。

2. 2. 5 土地利用空间自相关格局与道路的关系

距道路越远,各地类 HH 聚集区面积总体呈不

断减小趋势,其中园地 HH 聚集区面积在不同地段出现小范围波动(图 8a)。各地类 HH 聚集区集中在距道路 1. 5 km 范围内,面积比例均超过 93%。建设用地、园地和耕地 HH 聚集区距道路较近,在距道路 1. 0 km 范围内,面积比例均超过 90% ,建设用地和园地 HH 聚集区面积比例甚至高达 99. 88% 和 92. 42%。在距道路 1. 5 km 以外,无建设用地 HH 聚集区;距道路 2. 0 km 以外,无园地 HH 聚集区。草地、林地和未利用地 HH 聚集区距道路较远,在距道路 1. 0 km 范围内,面积比例分别为 73. 94%、78. 11% 和 86. 68%。距道路越近,建设用地、园地和耕地的 HH 聚集区面积迅速增加。

由图 8b 可知,距道路越远,耕地和草地 LL 聚集区的面积都不断减小。耕地 LL 聚集区集中分布在

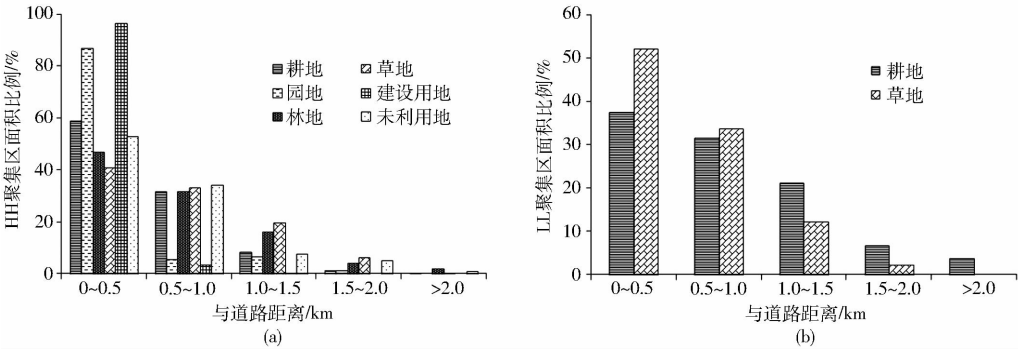


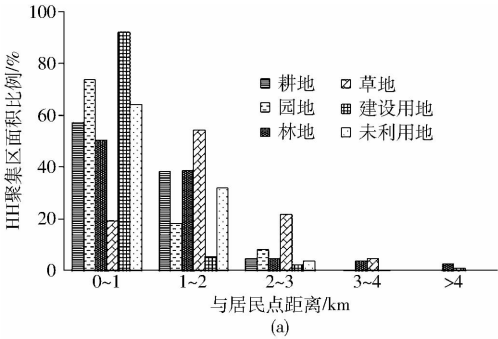
图 8 小理河流域土地利用显著性聚集区与道路的关系

Fig. 8 Relationships between significant cluster zones of land use types and roads in Xiaolihe watershed

距道路 1.5 km 范围内,其 LL 聚集区面积比例为 89.79%,其中在距道路 0.5 km 范围内面积最大,面积比例为 37.38%。草地 LL 聚集区集中分布在距道路 1.0 km 范围内,其 LL 聚集区面积比例为 85.65%,其中在距道路 0.5 km 范围内面积最大,面积比例达到 52.06%。

2.2.6 土地利用空间自相关格局与居民点的关系

离居民点越远,耕地、园地、林地、建设用地和未利用地的 HH 聚集区面积呈不断减小趋势,而草地 HH 聚集区面积呈先增加后减小趋势(图 9a)。除



草地外,各地类 HH 聚集区集中分布在距居民点 2 km 范围内,面积比例均超过 90%。建设用地和园地 HH 聚集区距居民点最近,在距居民点 1 km 范围内,面积比例分别达到 91.99% 和 73.58%。草地 HH 聚集区集中分布在距居民点 3 km 范围内,面积占该类用地总面积的 94.73%,其中 1~2 km 的面积比例最高,达到 54.09%。在距居民点 3 km 以外,无耕地和未利用地聚集区;距居民点 4 km 以外,无建设用地和园地聚集区。距居民点越近,建设用地、园地、未利用地和耕地的 HH 聚集区面积迅速增加。

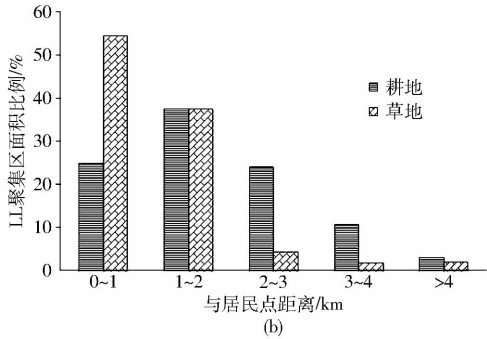


图 9 小理河流域土地利用显著性聚集区与居民点的关系

Fig. 9 Relationships between significant cluster zones of land use types and residential areas in Xiaolihe watershed

由图 9b 可知,耕地 LL 聚集区集中分布在距居民点 3 km 范围内,其 LL 聚集区面积比例为 86.28%,其中,距居民点 1~2 km 范围内面积最大,面积比例为 37.44%;1 km 以内和 2~3 km 范围内,面积比例基本相同,分别为 24.90% 和 23.94%。91.90% 的草地 LL 聚集区分布在距居民点 2 km 范围内,随与居民点距离的增加,其面积不断减小。

3 结论

(1)各土地利用类型都表现出全局空间正自相关特性,但空间正自相关性随着距离的增加而逐渐减弱。在 32 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,其中园地和建设用地的空间聚集性衰减迅速,而林地和草地的空间聚集性随距离衰减最慢。各土地利用类型中,空间自相关强度较大的为林地和草地,较小的为园地和建设用地。

(2)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。耕地和草地出现了 HH、LL、HL 和 LH 4 种格局类型,建设用地出现 HH、HL 2 种格局类型,林地出现 HH、LH 2 种格局类型,园地和未利用地仅出现 HH 类型。耕地、草地的空间分布呈显著的 HH、LL 聚集趋势,而园地、林地、建设用地和未利用地呈显著的 HH 聚集趋势。草地 HH 聚集区主要分布在流域中、上游的丘陵或山地区,林地 HH 聚集区主要分布在下游沟壑区和上游山地

区,其他地类 HH 聚集区集中分布在下游宽阔黄土梁或开阔河谷区。

(3)丘陵沟壑为主导的地形特征影响了土地利用局部空间集聚分布。随着高程和坡度增加,各地类 HH、LL 聚集区面积总体呈先增加后减小的趋势。在 1 000~1 300 m 高程区、15°~25°的坡度区以及正阳向和正阴向区域,是各地类 HH 聚集分布最多样、面积最集中的区域。建设用地和林地 HH 聚集区主要分布在 1 000~1 100 m 高程区,耕地、园地和未利用地 HH 聚集区主要分布在 1 100~1 200 m 高程区,草地 HH 聚集区主要分布在 1 200~1 300 m 高程区。各地类 HH 聚集区按平均坡度由小到大依次为:建设用地、耕地、园地、林地、未利用地、草地。建设用地、园地和耕地 HH 聚集区主要分布在正阳向和半阳向区域(正阳向面积最多),林地和草地 HH 聚集区主要分布在正阴向和正阳向区域(正阴向面积最多)。相比 HH 聚集区,耕地 LL 聚集区主要分布在 1 200 m 以上高程区,平均坡度增大,正阳向面积略大于其他坡向面积;草地 LL 聚集区主要分布在 1 000~1 200 m 高程区、15°~35°坡度区,各坡向上分布面积相差不大。

(4)距水域和道路越远,除未利用地外,各地类 HH 聚集区面积呈不断减小的趋势;距居民点越远,草地 HH 聚集区面积呈先增加后减小趋势,而其他地类 HH 聚集区面积呈不断减小的趋势。各地类 HH、LL 聚集区集中分布在距水域、道路 1.5 km 范

围内和距居民点 3 km 范围内。距水域、道路和居民点越近,建设用地、园地和耕地的 HH 聚集区面积迅速增加。相比 HH 聚集区,耕地 LL 聚集区与水域和居民点的距离较远且面积呈先增后减的趋势,草地 LL 聚集区与水域、道路和居民点的距离较近且面积呈不断减小趋势。

参 考 文 献

1 CLIFF A D, ORD J K. Spatial autocorrelation [M]. London: Pion, 1973.

2 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.

3 张峰, 张新时. 基于 TM 影像的景观空间自相关分析——以北京昌平区为例 [J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2853-2858. ZHANG Feng, ZHANG Xinshi. Landscape spatial autocorrelation analysis of TM remote sensing data: a case study of Changping District, Beijing, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2853-2858. (in Chinese)

4 谢花林, 刘黎明, 李波, 等. 土地利用变化的多尺度空间自相关分析——以内蒙古翁牛特旗为例 [J]. 地理学报, 2006, 61(4): 389-400. XIE Hualin, LIU Liming, LI Bo, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land-use changes: a case study in Ongniud Banner, Inner Mongolia [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(4): 389-400. (in Chinese)

5 杨永侠, 王旭, 孟丹, 等. 基于空间自相关的耕地等别指数检验方法研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 328-335. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160545&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.045. YANG Yongxia, WANG Xu, MENG Dan, et al. Test method of cultivated land grading index based on spatial autocorrelation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 328-335. (in Chinese)

6 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, 22(2): 311-320. QIU Bingwen, WANG Qinmin, CHEN Chongcheng, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use in Fujian Province [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 311-320. (in Chinese)

7 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, 26(3): 11-17. WEI Suqiong, ZHANG Jinqian, CHEN Jianfei. Study on construction land distribution in Fujian and Taiwan provinces based on spatial autocorrelation analysis [J]. Progress in Geography, 2007, 26(3): 11-17. (in Chinese)

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. XIE Zhengfeng, WANG Qian. Spatial autocorrelation analysis of land use intensity in Guangzhou city [J]. Tropical Geography, 2009, 29(2): 129-133. (in Chinese)

9 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. JIAO Limin, LIU Yaolin, LIU Yanfang. Spatial autocorrelation patterns of datum land prices of cities in a region [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(7): 873-877. (in Chinese)

10 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(增刊 1): 13-20. GAO Kai, ZHOU Zhixiang, YANG Yuping. Land use structure and its spatial autocorrelation analysis in the Yangtze River basin [J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(Supp. 1): 13-20. (in Chinese)

11 李慧, 王云鹏, 李岩, 等. 珠江三角洲土地利用变化空间自相关分析 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1879-1885. LI Hui, WANG Yunpeng, LI Yan, et al. A spatial autocorrelation analysis of land use change in Pearl River Delta [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(12): 1879-1885. (in Chinese)

12 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. WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang. Cultivated land ecological security and spatial aggregation pattern in Hebei province [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 338-344. (in Chinese)

13 刘敏, 赵翠薇, 施明辉. 贵州山区土地利用变化多尺度空间自相关分析 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 239-246. LIU Min, ZHAO Cuiwei, SHI Minghui. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use change at mountainous areas in Guizhou province [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 239-246. (in Chinese)

14 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(3): 216-224. GU Jianli, ZHANG Haitao, CHEN Jiaying, et al. Analysis of land use spatial autocorrelation patterns based on DEM data [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 216-224. (in Chinese)

15 摆万奇, 赵士洞. 土地利用变化驱动力系统分析 [J]. 资源科学, 2001, 23(3): 39-41. BAI Wanqi, ZHAO Shidong. An analysis on driving force system of land use changes [J]. Resource Science, 2001, 23(3): 39-41. (in Chinese)

16 徐霞, 王静爱, 贾海坤, 等. 内蒙中部地区不同生态区土地利用格局分布特征 [J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 44-49. XU Xia, WANG Jing'ai, JIA Haikun, et al. The spatial pattern of land use under the different ecoregion in the middle of Inner

- Mongolia [J]. Progress in Geography, 2005, 24(3): 44–49. (in Chinese)
- 17 张毅, 谢圣. 湖北省土地利用格局影响因素研究 [J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2015, 49(5): 792–796.
ZHANG Yi, XIE Sheng. Study on influence factors of land use patterns in Hubei province [J]. Journal of Central China Normal University: Natural Sciences, 2015, 49(5): 792–796. (in Chinese)
 - 18 王跃奎, 张乐天, 陈润, 等. 小理河流域土壤流失环境因子研究 [J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 163–164.
WANG Yuekui, ZHANG Letian, CHEN Run, et al. A study on soil erosion environmental factors in Xiaolihe watershed [J]. Yellow River, 2010, 32(12): 163–164. (in Chinese)
 - 19 王远飞, 何洪林. 空间数据分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
 - 20 宁秀红, 郭龙, 张海涛. 基于空间自回归和地理加权回归模型的不同尺度下土地利用程度研究 [J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(4): 48–54.
NING Xiuhong, GUO Long, ZHANG Haitao. Comprehensive degree of land-use at different scales based on spatial autocorrelation regression and geographically weighted regression models [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(4): 48–54. (in Chinese)
 - 21 ANSELIN L. SpaceStat tutorial [M]. Morgantown, West Virginia: Regional Research Institute, West Virginia University, 1992.
 - 22 GETIS A, ORD J K. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(4): 286–306.
 - 23 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的区域差异研究 [J]. 地理科学, 2005, 25(4): 393–400.
MENG Bin, WANG Jinfeng, ZHANG Wenzhong, et al. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 393–400. (in Chinese)
 - 24 ANSELIN L, SYABRI I, KHO Y. GeoDa: an introduction to spatial data analysis [J]. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 5–22.
 - 25 ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93–115.

(上接第 118 页)

- 20 张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 等. 流域分布式侵蚀学坡长的估算方法研究 [J/OL]. 水利学报, 2012, 43(4): 437–444. http://jhe.ches.org.cn/jhe/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=201204009&flag=1. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.04.010.
ZHANG Hongming, YANG Qinke, LI Rui, et al. Research on the estimation of slope length in distributed watershed erosion [J/OL]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 437–444. (in Chinese)
- 21 张宏鸣, 杨勤科, 刘晴蕊, 等. 基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法 [J/OL]. 计算机工程, 2010, 36(9): 246–248. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121025&journal_id=nygxcb. DOI: 10.3969/j.issn.1002–6819.2012.10.025.
ZHANG Hongming, YANG Qinke, LIU Qingrui, et al. Regional slope length and slope steepness factor extraction algorithm based on GIS [J/OL]. Computer Engineering, 2010, 36(9): 246–248. (in Chinese)
- 22 杨勤科, 郭伟玲, 张宏鸣, 等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报 [J/OL]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 203–206. http://stbctb.alljournal.com.cn/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20100243&flag=1&journal_id=stbctb&year_id=2010. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2010.02.035.
YANG Qinke, GUO Weiling, ZHANG Hongming, et al. Method of extracting LS factor at watershed scale based on DEM [J/OL]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 203–206. (in Chinese)
- 23 WANG C, YANG Q, GUO W, et al. Influence of resolution on slope in areas with different topographic characteristics [J/OL]. Computers & Geosciences, 2012, 41: 156–168. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300411003633>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.028>.
- 24 ZHANG H, YANG Q, LI R, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor [J/OL]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 177–188. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412003378>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.027>.
- 25 MALLAT S, YU G. Super-resolution with sparse mixing estimators [J/OL]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(11): 2889–2900. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5460916/>. DOI: 10.1109/TIP.2010.2049927.
- 26 WANG C, YANG Q, JIA D, et al. Modeling change of topographic spatial structures with DEM resolution using semi-variogram analysis and filter bank [J/OL]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, 5(7): 107. <http://www.mdpi.com/2220-9964/5/7/107>. DOI: 10.3390/ijgi5070107.
- 27 唐克丽. 中国水土保持 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.