

豫中典型样区土地利用多样性的空间分异及关联分析

屈永慧, 张学雷*, 段金龙

(郑州大学水利与环境学院, 郑州大学自然资源与生态环境研究所, 郑州 450001)

摘要: 选取河南省中部典型样区为研究对象, 运用 GIS 和 RS 技术提取并分析了研究区 2001 年到 2007 年各土地利用类型面积变化及土地利用变化的转移矩阵。利用仙农熵变形公式计算了研究区的土地利用构成组分多样性和 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 、 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 两种网格尺度下的空间分布多样性指数, 并运用灰色理论, 探讨了土地利用面积与其空间分布特征之间的关联性。研究表明: 研究区内农用地和交通运输用地变化趋势最为显著, 其中农用地减少的面积最多, 高达 131 km^2 , 相比 2001 年减少了 1.5%, 交通运输用地增加的最多, 比 2001 年增加了 81.3%, 土地利用类型之间的转化反映了研究区城市化进程在不断发展; 研究区农用地的空间分布多样性指数趋近 1.0, 表明其空间分布非常均匀; 交通运输用地的空间分布多样性指数为 0.85, 其空间分布离散程度相对较高; 各土地利用类型的面积与其空间分布多样性之间存在着正相关关系。

关键词: 土地利用变化; 仙农熵; 空间分布多样性; 关联分析

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2014)02-0000-00

Spatial variation of land use diversity patterns and its correlative analysis for the case areas in the central Henan province

QU Yonghui, ZHANG Xuelei, DUAN Jinlong

(Institute of Natural Resources and Eco-environment, School of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

Abstract: The land use type and the transformation matrix were analyzed for the selected case areas from 2001 to 2007 in the central Henan province by using RS and GIS tools. The modified Shannon entropy formulate was used to calculate the composition distribution diversity of land use and the land use spatial distribution diversity index in different grid scales of $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ and $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ for the researched areas before exploring the relationship between areas of land use type and land use spatial distribution diversity using the Grey Theory. Results showed that the most highly significant kind of land use change trend was the agricultural land which showed a significant decreasing trend (reduced 131 km^2 at 1.5% from 2001 to 2007) and transportation land which was a significant increasing trend(81.3%) reflecting the high urbanization development; the spatial distribution diversity index of the agricultural land was almost close to 1.0 that meant a uniform spatial distribution patterns, while the spatial distribution diversity index of transportation land was 0.83; and there was a positive relationship between the area of land use and land use spatial distribution diversity of the related case areas.

Key words: land use change; Shannon entropy; spatial distribution diversity; correlative analysis

目前, 区域土地利用变化的研究已成为“国际地圈-生物圈计划 (IGBP)”和“全球环境变化的人文因素计划(HDP)”的重要组成部分^[1], 土地利用的变化是短期内人类活动对自然环境资源施加影响的显著表现形式, 土地利用变化研究已成为目前全球变

化研究的热点之一^[2-5]。随着社会经济的发展, 人类与土地利用之间的矛盾日益尖锐。因此, 运用“3S 技术”^[6-8]开展土地利用变化研究以及利用 CLUE 模型、马尔科夫链等预测土地利用动态变化, 掌握土地空间分布格局, 对于加强土地利用规划和管理、

收稿日期: 2013-09-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171177) 资助。

作者简介: 屈永慧, 硕士研究生。E-mail: 1051419273@qq.com

* 通信作者: 张学雷, 教授, 博士生导师。E-mail: xzlzsu@zzu.edu.cn

改善生态环境、合理有效地利用有限土地具有重要意义。

20 世纪 90 年代 Ibáñez 等将广泛应用于生物物种数量的计量和分析等生态学研究中的多样性的概念与方法引入到土壤空间变异或空间可变性的研究中,使得定量化描述土壤空间分布格局问题成为可能^[9-10]。此后,土壤多样性的概念和研究方法逐渐为人所知并被各国的土壤学家所使用。在不同尺度下,各国学者基于各地数据进行了土壤多样性相关研究,在研究中结合了诸如土地利用方式、嵌套性分析、河流阶地、土壤发育等不同要素^[11-15],从而使多样性在土壤、土地等自然资源的研究视野变得更为开阔。段金龙等^[16-17]利用仙农熵公式评价了土壤多样性和土地利用多样性之间的关系,讨论了土地利用多样性与土壤多样性之间的内在联系。将多样性理论与方法引入到土地利用的分析与评价中,研究对于在城市化进程不断加快的时代背景下土地资源的可持续利用具有指导意义。

本研究基于仙农熵变形公式探索并评价了河南省中南部样区的土地利用空间分布特征,运用 GIS 和 RS 技术手段获取了研究区的土地利用变化趋势,并结合灰色理论探讨各类型土地利用面积与其空间分布多样性之间的关系。以期为区域社会经济发展、生态环境保护与土地资源可持续利用提供决策支持。

1 研究区与技术方法

1.1 研究区概况

本研究选取的研究区位于河南中部偏南(图 1),北纬 31°23'~36°22',东经 110°21'~116°39' 之间,属于亚热带季风气候,包括漯河市、平顶山市、许昌市。研究区总面积为 10517.19 km²。在研究区内,少量为山地,其余都是平原地区,是小麦、棉花、油料、烟叶等农产品生产基地,同时也是重要的食品生产基地。另外,平顶山市是河南省煤矿主要产地之一,含有丰富的矿产资源,境内有沙河、汝河、澧河、甘江河等 31 条河流,大中型水库 175 座,库容 28 亿 m³,年平均降水量在 620 mm 以上。许昌市北临万里黄河,西依伏牛山脉、中岳嵩山,东、南接黄淮海大平原,年平均降水量 640.9 mm。漯河市年平均降水量 786 mm,境内有沙颍河、沙河、澧河等河流。

1.2 数据源及数据处理过程

研究所用遥感数据均为美国地球资源卫星(Landsat)的 TM 影像数据(表 1),其他相关数据

有漯河市、平顶山市、许昌市的行政区划矢量数据和研究区统计年鉴等。



1.禹州市; 2.长葛市; 3.汝州市; 4.许昌县; 5.郟县; 6.许昌市; 7.襄城县; 8.临颖县; 9.宝丰县; 10.平顶山; 11.叶县; 12.舞阳县
1.Yuzhou city; 2.Changge city; 3.Ruzhou city; 4.Xuchang county; 5.Jiaxian; 6.Xuchang city; 7.Xiangcheng county; 8.Linyin county; 9.Baofeng county; 10. Pingding mountain; 11.Yexian; 12.Wuyang county

图 1 典型样区在河南省的分布
Figure 1 Distribution of the case areas in Henan Province

利用遥感软件 ENVI 4.5 对研究区两时期 TM 影像进行土地利用分类处理,首先取 TM5、4、3 波段合成假彩色图像,然后对遥感图像进行图像增强、几何校正、监督分类等处理。并参考 Google Earth 高分辨率影像对研究区各土地利用类型进行精细校正,运用以目视解译为主、计算机自动解译为辅的方法对研究区 2001 年和 2007 年两个年份的遥感影像进行解译,根据《中国资源环境遥感宏观调查与动态研究》^[18]的土地资源分类系统,将研究区土地利用分为水域及水利设施用地、城镇建筑用地、农用地、工矿仓储用地、交通运输用地、自然绿地六大类型。其中城镇建筑用地包括城市辖区和面积较大的乡镇,其余农村村落均划入农用地范畴。

1.3 技术方法

1.3.1 多样性方法 为更好地表征研究对象分布的均匀程度和空间离散度,使用如下仙农熵变形公式:

$$Y_h = \frac{-\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i}{\ln S} \tag{1}$$

式中, S 和 Y_h 定义如下:

在土地利用的构成组分多样性里, S 表示研究区土地利用类型总数目,表示研究区土地利用类型的相对多度,其中 P_i=n_i/N (n_i 为被第 i 类土地利用

类型所覆盖的面积, N 为研究区总面积)。在此前提下, 多样性指数 Y_h 表示研究区内土地利用在组成分布上的多样性特征, 即所有分类单元在组成分布上的均匀程度。此时也指 Pielou 指数(即均匀度指数), S 指土地利用的丰富度指数。

在土地利用的空间分布多样性里, S 表示研究区空间网格的总数目, P_i 表示第 i 个空间网格里某类土地利用类型的面积占研究区土地利用总面积比例。多样性指数表征研究区内某一土地利用类型分布的离散性程度, 即为空间分布的多样性格局问题。

表 1 遥感数据年份统计

Table 1 Statistics of remote sensing data

研究区域 Studied area	具体研究区域范围 Detail range of the studied area	时期① Period 1	时期② Period 2
漯河市	临颖县、舞阳县	2001-05-10	2007-05-19
平顶山市	汝州市、郟县、宝丰县、平顶山市市辖区、叶县	2001-05-10	2007-05-19
许昌市	禹州市、长葛市、许昌县、许昌市市辖区、襄城县	2001-05-10	2007-05-19

以上两种情况, 多样性指数取值区间为 $[0, 1]$, 在土地利用的构成组分多样性里, 取值越大, 说明研究区的每种土地利用类别分布越均匀。如果趋于 0, 说明研究区的土地利用类别分布不均衡, 即某一类或少数几类土地利用占据了研究区的总面积。

在土地利用的空间分布多样性里, 当单个土地利用类别的相对丰度分布极度不均匀, 即对象集中分布在研究区少数几个网格时, Y_h 取值趋于 0; 当对象在研究区网格中均匀分布时, Y_h 取值等于 1。此方法涉及到空间网格的概念, 为土地利用变化及土地利用类型的分布提供了空间格局的研究视角。能为决策者对于一个地区的土地利用规划提供有力的决策支持。

1.3.2 灰色关联分析方法 灰色系统理论^[19]是利用已知信息来确定系统的未知信息, 使系统由“灰”变“白”。其中灰色系统理论应用最广泛的是灰色关联度分析, 它本质上是一种相对性的排序分析, 基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密, 曲线越接近, 相应序列之间的关联度就越大, 反之越小。

广义绝对关联度公式^[20]:

$$r_i = \frac{1 + |S_0| + |S_i|}{1 + |S_0| + |S_i| + |S_i - S_0|} \quad (2)$$

$$\text{其中: } |S_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_0^0(k) + \frac{1}{2} x_0^0(n) \right|;$$

$$|S_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_i^0(k) + \frac{1}{2} x_i^0(n) \right|$$

$$|S_i - S_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (x_i^0(k) - x_0^0(k)) + \frac{1}{2} (x_i^0(n) - x_0^0(n)) \right| \text{ 参}$$

考序列: $X_0 = \{X_0(k) | k=1, 2, 3, \dots, n\}$, $X_0(k)$ 代表各种土地利用面积

比较序列: $X_i = \{X_i(k) | k=1, 2, 3, \dots, n\}$, $i=1, 2, 3, \dots, m$, $X_i(k)$ 表示各土地利用类型的空间分布多样性指数 X_0^0 , X_i^0 分别为参考序列和比较序列的始点零化像。

该广义绝对关联度指数 r_i 取值区间为 $[0, 1]$, 取值越大, 表明该因子对被影响因子的影响越大; 反之亦然。广义绝对关联分析过程中对数据进行了无量纲化和始点零化像处理。本研究利用公式 (2) 以及 SPSS19.0 的回归分析工具探索土地利用类型面积与土地利用空间分布多样性之间的相关性。即面积的增加或减少是否会导致空间分布多样性的增强或减弱。通过探讨分析两者的关系, 可以为决策者提供平面和空间的规划指导。可为土地利用变化的研究引入新的研究角度。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

区域土地利用变化幅度指土地利用类型在研究时期内面积的变化幅度, 通过分析土地利用类型面积的总量变化, 可反映区域土地利用变化总态势和土地利用结构变化信息^[21-22]。其表达式为:

$$\Delta U = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times 100\% \quad (3)$$

式中, ΔU 为研究区某时段内某种土地利用类型的变化幅度; U_a 和 U_b 分别为区域研究初期和研究末期某种土地利用类型的面积。

利用 ArcGIS10.0 对研究区两期土地利用分类结果图进行叠加分析, 输出转移矩阵属性表(见表 2)。转移矩阵可以全面而又具体地刻画研究区的土地利用变化的结构特征, 以及各用地类型间转化的方向。

利用公式 (3) 计算研究区 2001 年—2007 年的土地利用变化幅度(见表 3)并结合研究区两时期

的遥感影像,分析发现研究区的土地利用变化特征主要表现在:(1)研究区土地利用面积增加的是水域及水利设施用地、城镇建筑用地、交通运输用地和自然绿地,其中交通运输用地增幅最大(达到87.44%),增加面积高达87.2 km²,由此可以推断,区域经济发展带动了交通设施的大规模建设,推进

了研究区的城市化进程。(2)农用地面积减少量最大(达到131.0 km²),从表2的土地利用转移矩阵中可以推断,城市化的发展造成大量的农用地转化为城镇建设用地和交通运输用地。(3)水体、工矿仓储用地和自然绿地的面积变化不大,基本保持不变。

表2 2001~2007年研究区土地利用变化的转移矩阵

Table 2 The transformation matrix of land use change from 2001 to 2007

2001年	水域 Water area	城镇 Town	农用地 Farmland	工矿仓储 Industry land	交通运输 Transportation	自然绿地 Nature green land	总计 Total
水域	126.46	2.51	92.08	0.76	0.32	5.58	227.71
城镇	2.89	198.75	87.97	4.92	7.67	0.93	303.13
农用地	71.29	73.44	8391.58	38.77	59.50	89.56	8724.14
工矿仓储	0.36	2.43	36.21	58.86	1.49	3.75	103.10
交通运输	1.51	11.94	139.04	3.26	37.61	1.60	194.96
自然绿地	2.39	0.06	108.29	4.71	0.72	844.30	960.47
总计	204.90	289.13	8855.17	111.28	107.31	945.72	10513.51

表3 2001~2007年土地利用面积变化

Table 3 The change of land use areas from 2001 to 2007

土地利用类型 Type of land use	2001年面积/km ² Areas in 2001	2007年面积/km ² Areas in 2007	2001~2007年变化幅度/% Change range between 2001 and 2007
水域及水利设施 Water area and water conservancy facilities	204.9	227.7	11.1
城镇建筑 Building in city and town	289.1	303.1	4.8
农用地 Farmland	8855.1	8724.1	-1.5
工矿用地 Industry land	111.3	103.3	-7.2
交通运输 Transportation	107.3	194.5	81.3
自然绿地 Natural green land	945.8	960.8	1.6

2.2 不同网格尺度下的土地利用空间分布多样性变化分析

图2是人为构造的一个空间网格,模拟了某土地利用类型X在空间网格下的分布特征,该例中X的空间分布多样性指数 $Y_h=0.693$ 。

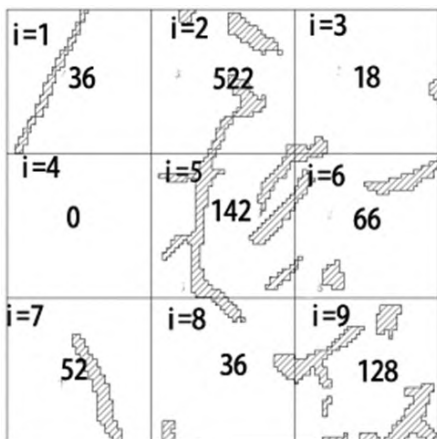


图2 土地利用类型X空间分布图

Figure 2 Spatial distribution of land use type X

图2分9个网格,网格内数字表示第*i*个网格内土地利用类型X的斑块面积,X总面积为1000 m²。

依照图2的方法计算了研究区在1 km×1 km和2 km×2 km网格尺度下的土地利用空间分布多样性指数及其两者的平均值(见表4)。

由表4可见,在不同网格尺度下土地利用类型的空间分布多样性指数不同,而同一种土地利用类型在不同网格尺度下具有相似的分异规律,如在两个时期,城镇、农用地、自然绿地在2 km网格尺度下的多样性指数比在1 km网格尺度下的稍低,而水域和交通运输用地的两种尺度下的多样性指数恰好相反。从景观生态学的角度可以推断,因为景观类型不同,其空间分布规律有差异,网状景观(水体、交通运输用地)空间连接性高,随着网格尺度的增大,空间离散性也增高。而基底景观(农用地)和散布状景观(城镇、自然绿地),随着网格尺度的增

大, 其空间离散性降低。

表 4 统计了研究区 2001 年和 2007 年的土地利用空间分布多样性。农用地的空间分布多样性指数在两个时期均取最大值, 2001 年是 0.984, 2007 年是 0.982, 说明研究区的土地利用类型是以农用地为主, 且分布均匀。也反映了位于河南省中部偏南以平原为主的研究区的土地多用于农业生产。两时期不同网格尺度下的, 水体的空间分布多样性指数接

近于 0.8, 说明研究区水资源空间分布离散性较高, 即分布相对比较均匀, 相对丰富的水资源比较有利于农业生产。另外, 研究区交通运输用地的空间分布多样性指数由 2001 年的 0.85 增加到 2007 年的 0.86, 表明该研究区交通道路分布比较均匀, 而作为城市化进程的主要衡量因子, 交通运输用地分布范围逐年增加, 可以推断研究区的城市化进程在迅速发展。

表 4 土地利用空间分布多样性统计
Table 4 Statistics of land use spatial distribution diversity

年份 Year	土地利用类型 Land-use type	总面积/km ² Total area	面积比例/% Area proportion	1 km 网格 Grid of 1 km	2 km 网格 Grid of 2 km	2 种网格均值 Average of two kinds of grids
2001	水域	204.9	1.95%	0.778	0.795	0.787
	城镇	289.1	2.75%	0.666	0.638	0.652
	农用地	8855.1	84.23%	0.985	0.982	0.984
	工矿仓储	111.3	1.06%	0.627	0.632	0.629
	交通运输	107.3	1.02%	0.831	0.868	0.850
	自然绿地	945.8	9.00%	0.764	0.739	0.751
2007	水域	227.7	2.17%	0.774	0.791	0.782
	城镇	303.1	2.88%	0.660	0.629	0.644
	农用地	8724.1	82.98%	0.983	0.981	0.982
	工矿仓储	103.3	0.98%	0.601	0.607	0.604
	交通运输	194.5	1.85%	0.842	0.878	0.860
	自然绿地	960.8	9.14%	0.764	0.738	0.751

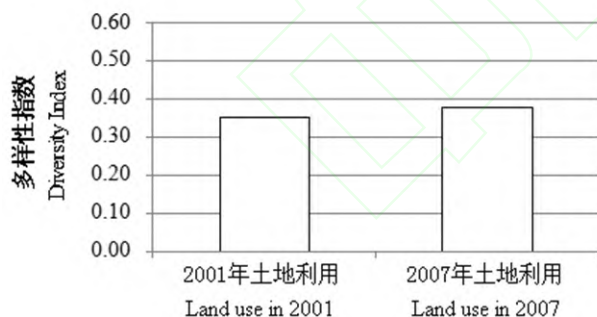


图 3 土地利用构成组分多样性

Figure 3 Composition distribution diversity of the land use

2.3 土地利用组成分布多样性

利用公式 (1) 计算了研究区在两个时期的土地利用构成组分多样性。图 3 表明, 2001 年研究区的土地利用构成组分多样性为 0.353, 而随着时间的推移到 2007 年该指数增加到 0.378。综合研究区在 2001 年—2007 年的土地利用分类结果和表 2 中土地利用变化的转移矩阵以及研究区的自然、社会经济等实际情况, 可以推断导致土地利用构成组分多样性增加的主要原因是占土地利用主导地位农用地

不断减少, 并大量转变为城镇建筑用地、工矿仓储用地、交通运输用地。使得研究区的土地利用组成分布更为均匀, 即均匀度指数增加, 从侧面反映了研究区经济的快速发展。

2.4 土地利用及其多样性变化的关联性分析

为探索土地利用的空间分布特征与土地利用面积之间的关联性, 利用公式 (2) 计算了 2 种网格尺度下空间分布多样性指数的平均值与土地利用面积之间的灰色关联度, 两者的关联度如表 5 所示。

通过对表 5 灰色关联度的分析可知: 土地利用面积与其多样性指数的关联度相对较高, 2001 年为 0.672, 2007 年为 0.713。表明了土地利用面积与土地利用空间分布多样性之间具有明显的相关性。另外, 2007 年的关联度比 2001 年的高, 2.3 中论述了随着时间的变化, 研究区土地利用分布更为均匀。可以推断土地利用分布越均匀, 两者关联系数越高。

综上所述, 运用灰色理论探究了各土地利用面积与其空间分布多样性之间具有明显的相关性, 为进一步探索两者之间的关系, 用 SPSS19.0 对 2001 年和 2007 年的土地利用面积和土地利用空间分布

多样性指数进行一元线性回归分析，分析结果如图 4 和图 5 所示。

表 5 土地利用面积与土地利用多样性指数的灰色关联度
Table 5 The grey correlation degree of land use area and land use diversity

年份 Year	参考指标 Reference index	比较指标 Comparative index	关联度 Relevancy
2001	土地利用类型面积	土地利用多样性指数	0.672
2007	土地利用类型面积	土地利用多样性指数	0.713

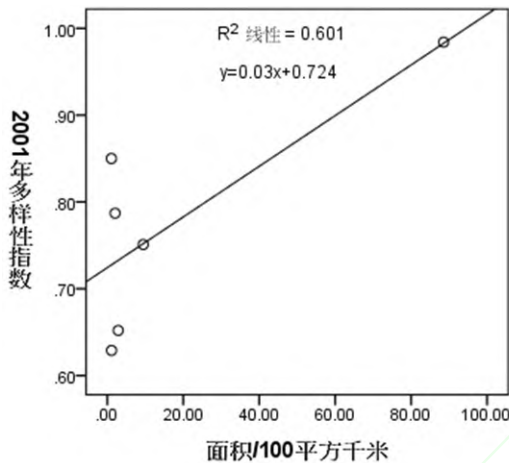


图 4 2001 年土地利用面积与其空间分布多样性关系
Figure 4 Relationship between the area of land-use type and spatial distribution diversity of 2001

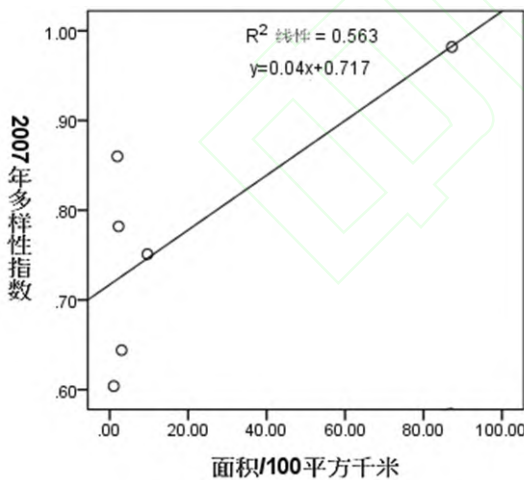


图 5 2007 年土地利用面积与其空间分布多样性关系
Figure 5 Relationship between the area of land use type and spatial distribution diversity of 2007

2001 年的一元线性回归方程： $y=0.03x+0.724$ ， $R^2=0.601$ ；2007 年的一元线性回归方程： $y=0.04x+0.717$ ， $R^2=0.563$ 。

土地利用面积与其空间分布多样性之间具有一定的正相关关系。研究区 2007 年的交通运输用地、城镇建筑用地、水域、自然绿地较 2001 年有所增加。

因此可推断，随着各土地利用类型面积的增加或减少，其空间分布多样性指数升高或者降低，即两者具有相同的变化趋势。面积的变化仅能直观反映出研究区内土地利用的总量变化，不能反映出空间的变化情况，而空间分布多样性指数则可以明确反映出研究区每种土地利用类型空间分布的离散程度。这种从平面上的直观变化到空间上的定量分析两种方法的综合，为传统宏观上研究土地利用面积的变化、土地利用类型的空间分布格局提供了新的研究角度和数据补充。多样性的理论与方法引入到土地相关研究中，对于评价、规划指导区域土地利用具有实际意义。

3 结论

将多样性理论与方法应用到土地利用空间分布离散性评价中，结合相关资料，采用定量分析与定性分析、理论研究和实证分析相结合的方法评价了研究区的土地利用构成组分多样性及其空间分布特征，得出以下结论：

研究区内土地利用变化趋势最为显著的是农用地和交通运输用地，其中农用地减少的面积最多，高达 131 km²，相比 2001 年减少了 1.5%，交通运输用地增加了 87.2 km²，比 2001 年增加了 81.3%，交通作为衡量一个地区经济发展的主要因子，反映了研究区城市化进程在迅速推进。(2) 研究区的土地利用构成组分多样性指数由 2001 年的 0.353 增加为 2007 年的 0.378，随着时间的变化，研究区的土地利用类型均匀程度在不断增加。研究区农用地的空间分布多样性指数几乎接近于 1.0，表明研究区中存在大量农用地且呈均匀分布。作为衡量区域经济发展主要因素的交通运输用地，其空间分布离散程度相对较高，表明了研究区城市化进程在不断推进，区域经济发展迅速。(3) 各土地利用类型的面积与其空间分布多样性之间存在着一定的正相关关系，相关系数 2001 年为 0.601，2007 年为 0.563。各土地利用类型面积的增加或减少往往造成其空间分布格局离散性的增强或减弱，即两者具有相同的变化

趋势。

多样性理论结合 GIS 相关技术方法来研究地物的空间分异, 不仅可以定性了解地物的空间分布, 还可以定量分析其变化规律。多样性的引入为传统土地利用类型的空间分布研究提供了新的思路和研究视角, 将其空间分布离散性量化, 为政策导向、土地利用规划提供更多理论依据。为土地资源的可持续利用提供科学依据。

参考文献:

- [1] Turner II B L, Skole D, Sanderson S. Land use and Land Cover Change: Science/Research Plan[R]// IGBP Report No. 35 and HDP Report No.7 : Stockholm: Royal Swedish Academy of Sciences, 1995.
- [2] 刘黎明. 土地资源学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 290-292.
- [3] Boyd J S. Sensor selection via convex optimization[J]. *EEE Trans on Signal Processing*, 2009, 57(2): 451-462.
- [4] Ricketts T H, Regetz J, Steffan-Dewenter I. Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns [J]. *Ecology Letters*, 2008,5 (11): 499- 515.
- [5] Wu N E. Loop closure for enhanced win percentage in an air operation[C]// Proc of the American Control Conference, 2007: 1097-1102.
- [6] 杜自强, 王建, 陈正华, 等. 基于 RS 和 GIS 的区域土地利用动态变化及演变趋势分析[J]. *旱区资源与环境*, 2007, 21(1): 115-119.
- [7] 孙倩, 塔西甫拉提·特衣拜, 张飞, 等. 渭干河-库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究[J]. *生态学报*, 2012, 32 (10): 3252-3264.
- [8] 刘序, 陈美球, 陈文波, 等. 鄱阳湖地区 1985-2000 年土地利用格局变化及其社会经济驱动力研究.土地利用格局空间变化分析[J]. *安徽农业大学学报*, 2006, 33(1): 117-122.
- [9] Ibáñez J J, Arnold R W, Ahrens R J. The fractal mind of pedologists(soil taxonomists and soil surveyors)[J]. *Ecological Complexity*, 2009, 6(3): 286-293.
- [10] Ibáñez J J, DeAlba S. On the concept of pedodiversity and its measurement. A reply[J]. *Geoderma*, 1999, 93: 339-344.
- [11] Yabuki T, Matsumura Y, Nakatani Y. Evaluation of pedodiversity and land use diversity in terms of the Shannon entropy [DB/OL]. <http://cdsweb.cern.ch/record/1178038>.
- [12] 段金龙, 张学雷. 基于仙农熵的土壤多样性和土地利用多样性关联评价[J]. *土壤学报*, 2011,48(5): 893-903.
- [13] 王辉, 张学雷, 张薇, 等. 南京市土壤集合组成及其嵌套性分析[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 220-227.
- [14] 王辉, 张学雷, 张薇, 等. 基于嵌套子集方法对南京市城镇化用地时空变化分析[J]. *土壤*, 2007, 39(3): 421-427.
- [15] Zhang X L, Wang H, Xiao G P, et al. Nestedness analysis of land use change on pedodiversity under the intensive urbanization process [C]//Robert J Gilkes and Nattaporn-Prakongkep.19th World Congress of Soil Science Proceedings, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australia, 2010: 24-27.
- [16] 段金龙, 张学雷. 中国中、东部典型样区土壤和水体多样性关联分析[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 635-641.
- [17] 张学雷, 陈杰, 龚子同. 土壤多样性理论在欧美的实践及在我国土壤景观研究中的应用前景[J]. *生态学报*, 2004, 24(5):1063-1072.
- [18] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 10.
- [19] 邓聚龙. 灰色系统理论简介[J]. *内蒙古电力*, 1993(3): 51-52.
- [20] 虞亚平, 王冠中, 李大治. 广义灰色关联度的简便计算方法[J]. *南通大学学报: 自然科学版*, 2008, 7(2): 85-90.
- [21] 段金龙, 张学雷, 张凯. 基于遥感的郑州市农用地变化及驱动力分析[J]. *河南农业科学*, 2012, 41(3): 75-78.
- [22] 张健. 安徽东部地区土地利用变化的生态环境效应评价[J]. *安徽农业大学学报*, 2008, 35(3): 352-358.