

DOI: 10.5846/stxb202109182627

高建, 李彤, 贾宝全, 张秋梦, 刘文瑞. 生态用地空间稳定性及其格局分析——以咸阳市为例. 生态学报, 2022, 42(23): 9843-9856.

Gao J, Li T, Jia B Q, Zhang Q M, Liu W R. Ecological land and its spatial stability analysis-Taking Xianyang City as an example. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9843-9856.

# 生态用地空间稳定性及其格局分析 ——以咸阳市为例

高 建<sup>1</sup>, 李 彤<sup>2</sup>, 贾宝全<sup>2,\*</sup>, 张秋梦<sup>2</sup>, 刘文瑞<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 咸阳市林业科学研究所, 咸阳 712000

<sup>2</sup> 中国林业科学研究院林业研究所/国家林业和草原局林木培育重点实验室/国家林业和草原局城市森林研究中心, 北京 100091

**摘要:**生态用地是生态空间规划与生态保护的最核心土地利用类型集合。利用生态用地指数及空间统计学方法,对陕西省咸阳市 2000—2010 和 2010—2020 两个时段的生态用地空间稳定性的数量与格局特点进行了分析。结果表明:(1)稳定性生态用地的空间分布呈现了北部数量多、中部数量少、南部关中平原极少的空间格局;在 2000—2010 和 2010—2020 两个时段,其面积从 266935.14hm<sup>2</sup>增加到了 275851.17hm<sup>2</sup>。(2)在 2000—2010 和 2010—2020 两个时间段内,全市的生态用地稳定性指数基本上都维持在 26%—28%之间,其中以黄土丘陵沟壑区最高,在 43%—45%之间,黄土台塬在 14%—15%,关中平原区都在 0.2% 以下。(3)从生态稳定性指数的动态来看,20 年间全市平均增幅为 0.87 个百分点,其中以黄土丘陵沟壑区增幅最大,后 10 年比前 10 年增加了 1.61 个百分点,关中平原区增加了 0.02 个百分点,只有黄土台塬区降低了 0.15 个百分点;生态用地稳定性指数的分级结果表明,其总体呈现低稳定等级区域在减少,而中、高稳定等级区域在扩大。(4)生态用地稳定性指数的局部空间自相关分析表明,整个市域以高-高聚集区和低-低聚集区为主,其市域面积占比区间分别为 48%—49%和 47%—48%。前者主要分布在北部的黄土丘陵沟壑区,后者主要分布在南部的关中平原区和中部的黄土台塬区。热点分析结果表明,具有统计意义的冷点空间主要分布在南部的关中平原区和中部黄土台塬区,而热点空间则以北部的黄土丘陵沟壑区为主,仅在该区域的东南角有极小部分属于冷点区域。

**关键词:**生态用地;空间稳定性指数;空间格局;热点分析;咸阳市

## Ecological land and its spatial stability analysis-Taking Xianyang City as an example

GAO Jian<sup>1</sup>, LI Tong<sup>2</sup>, JIA Baoquan<sup>2,\*</sup>, ZHANG Qiumeng<sup>2</sup>, LIU Wenrui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Xianyang Forestry Research Institute, Xianyang 712000, China

<sup>2</sup> Research Center of Urban Forestry, National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

**Abstract:** Ecological land is the core set of several land use types in ecological space planning and ecological protection. In this paper, the stability index was put forward as a tool to measure the spatial stability of ecological land. Based on the village-level ecological land stability index from 2000 to 2010 and from 2010 to 2020 in Xianyang City, Shaanxi Province, the quantity and pattern characteristics of the stability of ecological land use were revealed, using transition probability matrix and spatial correlation statistics method. The results showed that: (1) according to land cover in 2000, 2010 and 2020, ecological land was mainly distributed in the northern Loess Plateau Hilly and Gully Region and the northern part of

**基金项目:**中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2020ZB008);地方项目“咸阳市森林城市建设成效评估”

**收稿日期:**2021-09-18; **网络出版日期:**2022-07-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiabaoquan2006@163.com。

the central Loess Tableland, the southern Guanzhong Plain region was the most scarce. In the past 20 years, the total area of ecological land decreased by 4509.81hm<sup>2</sup>, and in the last 10 years, the area of ecological land decreased by 3058.92hm<sup>2</sup>, which was 2.11 times that of the previous 10 years. (2) The spatial distribution of stable ecological land presented the same as that of ecological land, and its area increased from 266935.14hm<sup>2</sup> in 2000—2010 to 275851.17hm<sup>2</sup> in 2010—2020. (3) In 2000—2010 and 2010—2020, the ecological land stability index of the whole city maintained 26%—28%, among which the Loess Hilly and Gully Region basically kept 43%—45%, Loess Tableland was 14%—15%, and Guanzhong Plain area was below 0.2%. From 2000—2010 to 2010—2020, the ecological land stability index increased by 0.87% in the whole city, in which the Loess Hilly and Gully Region increased by 1.61%, the Guanzhong Plain Region increased by 0.02%, and the Loess Tableland Region decreased by 0.15%. The classification results of ecological land stability index indicated that the areas with low stability grade were decreasing, while the areas with medium and high stability grade were expanding. (4) From the analysis of the spatial pattern of ecological land use stability, the local spatial autocorrelation analysis of ecological land stability index showed that, the whole city was dominated by high-high agglomerations and low-low agglomerations, accounting for 48%—49% and 47%—48% of the whole city area, respectively. The high-high agglomerations were mainly distributed in the Loess Hilly and Gully Region, while the low-low agglomerations were mainly distributed in the Guanzhong Plain Region, and the Loess Tableland region. Hot spot analysis showed that, cold spots region with statistical significance (on behalf of the low stability of ecological land) was mainly concentrated in the Guanzhong Plain and the Loess Tableland Region. The hot region (on behalf of the high stability of ecological land) was mainly concentrated in the loess Hilly and Gully Region.

**Key Words:** ecological land; spatial stability index; spatial pattern; hot spot analysis; Xianyang City

土地利用/土地覆盖变化是全球环境变化研究的重要内容,社会经济发展和城市扩张等人类活动导致的土地利用/土地覆盖变化给生态系统带来了很大压力<sup>[1]</sup>。作为土地利用类型重要组成部分的生态用地,既是区域生态系统服务和区域生态承载力的重要保障与载体,也是区域生态系统的稳定性和安全性的重要基石<sup>[2]</sup>,更是衡量一个地区国土生态环境质量的晴雨表<sup>[3]</sup>,对于完善区域生态安全格局、促进经济社会和生态环境协调发展具有重要意义,在维护生态平衡、保障国土生态安全、应对全球气候变化中具有特殊地位<sup>[4]</sup>。

生态用地是以发挥生态功能或生态效应为主的土地利用类型<sup>[5]</sup>。正是由于其与区域生态安全和社会的可持续发展的重要联系,该概念一经提出<sup>[6]</sup>,便迅即引起了广大学者的关注,并成为国内土地利用/土地覆盖领域最重要的研究议题之一。在目前愈演愈烈的快速城镇化背景下,生态用地研究一直是学界关注的焦点,相关学者从不同学科、不同视角开展了大量的研究工作。从研究内容看,多集中在生态用地的内涵与分类<sup>[7—11]</sup>、生态系统服务价值评估<sup>[12—15]</sup>、生态用地安全格局构建与空间识别<sup>[16—20]</sup>、生态用地规划<sup>[2, 17, 21—23]</sup>、生态用地景观格局变化<sup>[24—27]</sup>、生态用地时空演变及其驱动因素<sup>[28—32]</sup>、生态用地模拟研究<sup>[33—38]</sup>和生态用地布局优化<sup>[39—42]</sup>等方面;从研究区域看,主要集中于地级市域单元与县域单元等宏观尺度上,从而衍生出城市生态用地与区域生态用地的概念差异;从研究的数据支撑来看,主要是以中尺度 Landsat 系列遥感数据的解译为基础,并逐渐由单期数据的生态用地总量及其空间分异向多期乃至最新动态的时空格局变化方向扩展;研究的重心始终以时空动态变化为核心,力图揭示生态用地的时空格局变化的过程、动因以及探索减缓这种变化的实践措施。

就区域管理而言,生态用地在时、空上的稳定才是其有效发挥生态效益、支撑经济社会发展最大化、维持并提升区域可持续发展的核心基础,然而目前的相关研究工作对此极少触及,仅有一些实现可视化工作的相关文献<sup>[43—45]</sup>,从而导致了区域生态保护与国土空间规划针对性与有效性的相对不足。为此,本文以生态用地的空间稳定性为核心,选择咸阳市域为研究区域,利用多时相遥感影像解译数据,借助土地利用转移矩阵方法,通过构建的类型稳定性和区域稳定性指数,系统地探索生态用地稳定性的时空演化特征,一方面丰富生态

用地的研究内容,另一方面为生态用地的保护和高效利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

咸阳市位于陕西省中、西部,市域总面积达 10192.05 km<sup>2</sup>,地势北高南低,北部是黄土丘陵沟壑区,中部是黄土台塬区,南部为关中平原(图 1)。全市地处暖温带,属大陆性季风气候,四季冷热干湿分明,多年平均降水量为 567.9 mm,年平均温度 9.0—13.2℃,全年太阳辐射  $4.61 \times 10^9$ — $4.99 \times 10^9$  J/m<sup>2</sup>。累计年平均光照时数为 2017.2—2346.9 h,主要灾害性天气有干旱、连阴雨、暴雨、冰雹、霜冻、干热风、大风等。咸阳市属暖温带半湿润落叶阔叶林,处粘黑垆土、褐色土地带,区域内共分 10 个土类,23 个亚类,38 个土属,147 个土种。其中黄绵土分布最广,约占总土地面积的 35.9%;其次是娄土,约占总土地面积的 24.7%;第三是黑垆土,约占总土地面积的 15.4%;第四是褐色土,约占总土地面积的 5.8%。

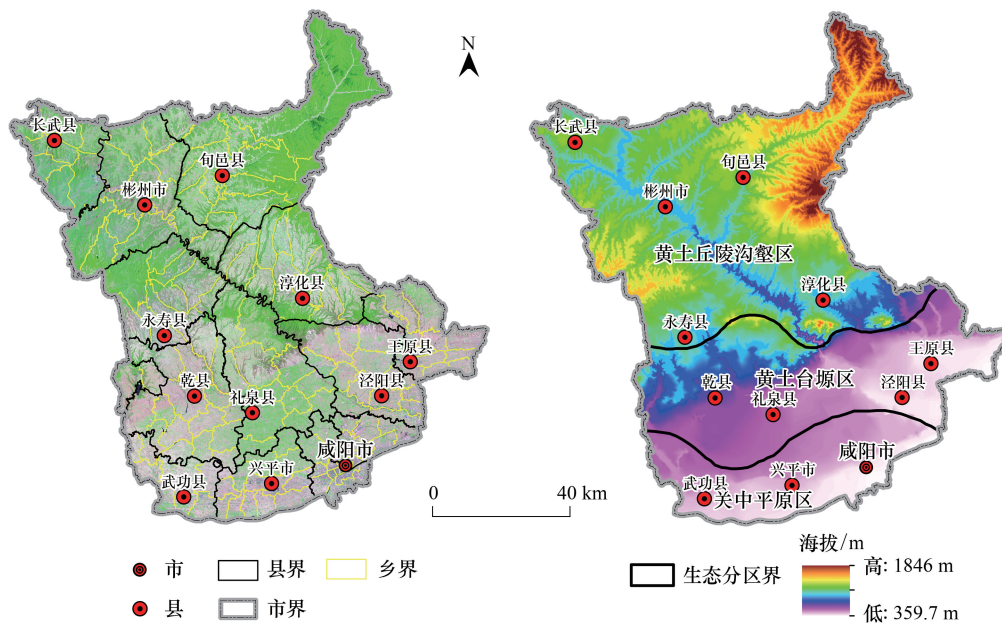


图 1 咸阳市地理区位与区划图

Fig.1 Geographical location and eco-regionalization map of Xianyang City

咸阳市现辖 9 县 2 区 2 市(图 1),全市常住人口  $395.98 \times 10^4$  人,人口密度约为 384 人/km<sup>2</sup>,2020 年全年地区生产总值  $2204.81 \times 10^8$  元,城镇居民人均可支配收入 37975 元,农村居民人均可支配收入 12879 元。

### 1.2 数据来源

研究所用数据来源于 GlobeLand30(<http://www.globallandcover.com/>),GlobeLand30 是国家基础地理信息中心研制的 2000、2010 和 2020 年高分辨率全球地表覆盖产品,具有空间分辨率高(30m)、总体分类精度高(>80%)、数据质量在空间和时间上一致性强的特性,被广泛应用于土地利用/覆盖变化研究中<sup>[46—47]</sup>。该数据集包含耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪共 10 大类地表覆盖信息。鉴于元数据分类中已经将湿地和水体作为两个独立的地类析出,这一点有别于过去主流的土地覆盖分类体系,从而突出了湿地作为水陆过渡带生态功能的重要性,同时根据非生产性、非建设性、以发挥生态功能、稳定区域生态平衡为主等生态用地特点<sup>[5]</sup>,因此本文研究区域的生态用地中只包括了该 10 类土地覆盖类别中的森林、草地、灌木地和湿地 4 种类型。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 生态用地稳定性指数

景观稳定性是景观生态学中的核心研究议题之一<sup>[48]</sup>,目前的景观稳定性概念大多借用了生态系统稳定性概念<sup>[49]</sup>,尚没有一个可为学界普遍接受的、内涵与外延均很明确的概念。景观的稳定性应该是指在一定区域内不同景观要素占据空间在时间尺度上保持其本质属性不变的特性,这些属性不随时间变化的生态用地组合也可称之为稳定性生态用地。从土地覆盖/土地利用的角度来看,稳定性可以用一定区域内各类土地覆盖/土地利用类型面积随时间保持不变的比例来衡量<sup>[50]</sup>。为此,借用转移概率矩阵方法的结果,我们认为:生态用地空间稳定性就是指在两个不同的时间点之间,生态用地在区域空间内保持其地类属性不变的特征。我们尝试提出生态用地稳定性指数作为定量刻画生态用地空间稳定性的参考工具,具体的计算方法为:

$$PSI = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \times 100\% \quad (1)$$

式中,PSI 表示生态用地稳定性指数, $A_i$ 表示在研究的时间段内研究区域中生态用地覆盖  $i$  类型保持覆盖性质不变的面积,这里  $i$  分别代表森林、草地、灌木地和湿地,  $A$  表示研究区域内各类土地覆盖的面积总和,研究区域可以使不同级别的行政区划单元,也可以是不同尺度的地理网格单元,文中为行政村的总面积; $n$  代表生态用地覆盖类型的总数。就同一区域的不同时间段或不同区域同一时间段的比较而言,PSI 值越大,表明区域生态稳定性越高;反之,稳定度则越低。

#### 1.3.2 空间自相关分析

空间自相关分析是研究某一区域属性时空格局演进的常用方法,通常采用 Moran 指数来进行测度,包括全局空间自相关和局部空间自相关两部分<sup>[51-52]</sup>。

##### (1) 全局空间自相关分析

该分析用于描述某一属性在总体空间内是否存在集聚性状态,计算公式为:

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

式中, $I$  为全局 Moran 指数, $n$  为区域个数,文中指研究区行政村(街道)的数量,共计 2878 个, $x_i$  和  $x_j$  分别为区域地理单元  $i$  和  $j$  的属性值,这里为行政村  $i$  和  $j$  的生态用地稳定性指数, $\bar{x}$  为各区域属性值的平均值; $w_{ij}$  为空间关系权重矩阵,这里采用空间反距离法生成。

##### (2) 局部空间自相关分析

该分析可以将全局空间自相关的 Moran 指数分解到各个组成单元,用以检验局部地区是否存在空间集聚区,计算公式为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

式中, $I_i$  为局部 Moran 指数, $I_i$  为正,说明区域单元周围呈现高-高或低-低的相似值空间集聚区; $I_i$  为负,说明区域单元周围呈现高-低或低-高的相似值空间集聚区, $n$  为研究对象的空间区域数量,文中指咸阳市的行政村(街道)数量, $x_i$  和  $x_j$  分别为区域  $i$  和  $j$  地理单元的属性值, $\bar{x}$  为各区域属性值的平均值, $S$  为全市村级生态稳定性指数的方差, $w_{ij}$  为空间关系权重矩阵。

##### (3) 热点分析

热点分析用于探究不同属性特征值分布聚集的高低程度,热点区域要求高值聚集,冷点区域则要求低值聚集。在空间统计中,通常采用 Getis 和 Ord 提出的  $G_i^*$  数,它是一种基于距离全矩阵的局部空间自相关指标,以探查各项要素高值或者低值在空间上发生聚类的位置<sup>[53-54]</sup>。计算公式如下:



$$G_i^* = \frac{\sum_j^n w_{ij}x_j}{\sum_j^n x_j} \quad (4)$$

式中,  $w_{ij}$  为斑块  $i$  与斑块  $j$  之间的空间权重矩阵,  $x_j$  为斑块  $j$  的属性值, 这里为村级稳定性指数,  $n$  是总的斑块数, 文中指咸阳市的行政村数量。

所有空间自相关分析研究均借助 ArcGIS 10.8 软件平台完成, 利用空间统计中的相关工具实现。

## 2 结果分析

### 2.1 生态用地变化过程

#### 2.1.1 生态用地总体变化过程

2000、2010 和 2020 年咸阳市域土地利用数据变化表明, 在过去的 20 年间, 咸阳市的生态用地总体呈现不断缩小的趋势(表 1), 2000—2010 年间, 总体减少了 1450.89hm<sup>2</sup>, 2010—2020 年间持续减少了 3058.92hm<sup>2</sup>, 呈现出加速缩减的变化特点。其中草地和湿地均呈现了连续减少变化趋势, 而森林与灌木地则呈现出前期增加、后期减少的变化过程。从非生态用地的变化来看, 耕地和人造地表都呈现出了远超生态用地变化幅度的连续变化过程, 其中耕地分别在 2000—2010 年和 2010—2020 年两个时间段内减少了 11944.26hm<sup>2</sup> 和 6091.56hm<sup>2</sup>, 人造地表分别增加了 13383hm<sup>2</sup> 和 9133.11hm<sup>2</sup>。

表 1 咸阳市域 2000、2010 和 2020 年土地利用总体变化/hm<sup>2</sup>

Table 1 Overall change of land use in Xianyang city in 2000, 2010 and 2020

| 地类 Land types                |      | 2000      | 2010      | 2020      | 增 Increase(+) 减 Decrease(-) |           |
|------------------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|
|                              |      |           |           |           | 2000—2010                   | 2010—2020 |
| 生态用地<br>Ecological land      | 森林   | 212321.16 | 233896.41 | 232920.99 | 21575.25                    | -975.42   |
|                              | 草地   | 100953.36 | 69702.12  | 67960.08  | -31251.24                   | -1742.04  |
|                              | 灌木地  | 2052      | 11565.54  | 11288.7   | 9513.54                     | -276.84   |
|                              | 湿地   | 1396.89   | 108.45    | 43.83     | -1288.44                    | -64.62    |
|                              | 合计   | 316723.41 | 315272.52 | 312213.6  | -1450.89                    | -3058.92  |
| 非生态用地<br>Non-ecological land | 耕地   | 630025.38 | 618081.12 | 611989.56 | -11944.26                   | -6091.56  |
|                              | 水体   | 3549.6    | 3561.75   | 3579.12   | 12.15                       | 17.37     |
|                              | 人造地表 | 70487.58  | 83870.58  | 93003.69  | 13383                       | 9133.11   |
|                              | 合计   | 704062.56 | 705513.45 | 708572.37 | 1450.89                     | 3058.92   |

#### 2.1.2 稳定性生态用地总体变化

从稳定性生态用地的空间分布来看(图 2), 2000—2010 年和 2010—2020 年两个时段的分布格局大同小异, 其主要分布在市域的中、北部区域, 其中以黄土丘陵沟壑区域的分布最为集中, 而关中平原区域以及黄土台塬的南部区域稳定性生态用地仅在个别地点呈现散点状格局分布。

从稳定性生态用地的统计结果来看(表 2), 森林类型的占比最大, 在 2000—2010 和 2010—2020 两个时段内其面积占比分别达到了 77.09% 和 78.49%, 其次为草地, 面积占比分别达到了 22.16% 和 18.96%; 从其变化来看, 稳定性生态用地呈现了不断增加的变化趋势, 总量由 2000—2010 时段的 266935.14hm<sup>2</sup> 增加到了 2010—2020 时段的 275851.17hm<sup>2</sup>, 其中以森林的增量最大, 2010—2020 时段比 2000—2010 时段净增 10730.79hm<sup>2</sup>, 其次为灌木地, 净增 5030.01hm<sup>2</sup>, 稳定性草地的减幅最大, 净减 6838.2hm<sup>2</sup>, 同时稳定性生态用地面积在生态用地总量中的占比却在逐步提升, 2000—2010 时段内的稳定性生态用地分别在 2000 年和 2010 年生态用地总量的 84.28% 和 84.67%, 而 2010—2020 时段内稳定性生态用地占 2010 年和 2020 年度总生态用地的比重分别提升到 87.5% 和 88.35%。从稳定性生态用地的空间分异情况来, 均以北部黄土丘陵沟壑区的面积占比最大, 2000—2010 和 2010—2020 两个时段, 其区域面积占比分别达到了 96.41% 和 91.81%, 而中部黄

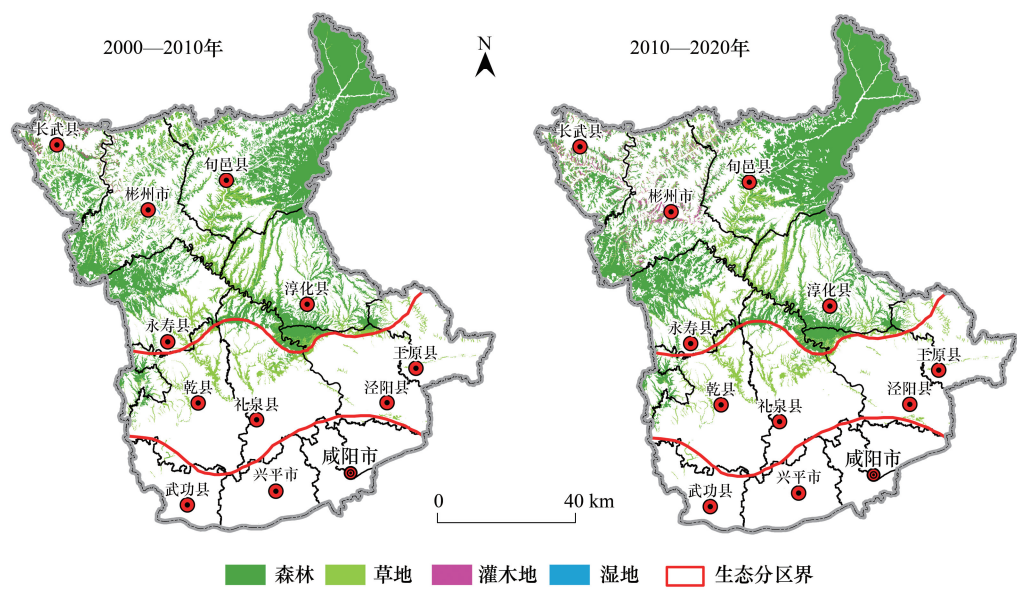


图 2 稳定性生态用地空间分布  
Fig.2 The spatial distribution of stable ecological land in Xianyang city

土台塬区稳定性生态用地的面积占比分别只有 8.4% 和 8.04%, 南部的关中平原区面积占比仅有 0.13% 和 0.15%。

从稳定性生态用地的类型构成来看,北部黄土丘陵沟壑区在两个时段均以森林类型为绝对优势,面积占比分别占区域稳定生态用地总量的 81.13% 和 82.36%,草地类型次之,但面积占比大幅度降低,分别只有 18.05% 和 14.89%,湿地类型出现了从有到无的变化;中部黄土台塬区在两个时段均以草地类型为主,森林次之,面积占比分别为 65.99% 和 64.39%、34.01% 和 35.61%,灌木地和湿地类型近乎绝迹;到了南部的关中平原区域,虽然其呈现了与中部黄土台塬区相似的构成特点,但森林类型的面积占比分别只有 17.99% 和 11.95%,同时稳定性湿地面积占比也从 0.01% 提高到了 8.69%。

表 2 稳定性生态用地组成及其变化

| Table 2 The composition and its change of stable ecological land use |                    |                    |       |                    |       |                    |      |                    |      |                                  |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|------|--------------------|------|----------------------------------|
| 时段<br>Period                                                         | 生态分区<br>Eco-region | 森林 Forest          |       | 草地 Grassland       |       | 灌木地 Shrubland      |      | 湿地 Wetland         |      | 合计/hm <sup>2</sup><br>Total area |
|                                                                      |                    | 面积/hm <sup>2</sup> | 比例/%  | 面积/hm <sup>2</sup> | 比例/%  | 面积/hm <sup>2</sup> | 比例/% | 面积/hm <sup>2</sup> | 比例/% |                                  |
| 2000—2010                                                            | 黄土丘陵沟壑区            | 198095.94          | 81.13 | 44077.59           | 18.05 | 1957.32            | 0.80 | 35.01              | 0.01 | 244165.86                        |
|                                                                      | 黄土台塬区              | 7622.19            | 34.01 | 14791.86           | 65.99 | 0.00               | 0.00 | 0.00               | 0.00 | 22414.05                         |
|                                                                      | 关中平原区              | 63.90              | 17.99 | 283.05             | 79.68 | 0.00               | 0.00 | 8.28               | 2.33 | 355.23                           |
|                                                                      | 合计                 | 205782.03          | 77.09 | 59152.50           | 22.16 | 1957.32            | 0.73 | 43.29              | 0.02 | 266935.14                        |
| 2010—2020                                                            | 黄土丘陵沟壑区            | 208564.29          | 82.36 | 37697.94           | 14.89 | 6986.79            | 2.76 | 0.00               | 0.00 | 253249.02                        |
|                                                                      | 黄土台塬区              | 7898.04            | 35.61 | 14281.20           | 64.39 | 0.54               | 0.00 | 0.00               | 0.00 | 22179.78                         |
|                                                                      | 关中平原区              | 50.49              | 11.95 | 335.16             | 79.35 | 0.00               | 0.00 | 36.72              | 8.69 | 422.37                           |
|                                                                      | 合计                 | 216512.82          | 78.49 | 52314.30           | 18.96 | 6987.33            | 2.53 | 36.72              | 0.01 | 275851.17                        |

2.2 生态用地稳定性指数动态

2.2.1 生态用地稳定性指数总体变化

根据公式(1)计算的全市与不同生态区的稳定性指数结果表明(图 3),全市的生态用地稳定性指数在 2000—2010 和 2010—2020 两个时间段内,其基本上都维持在 26%—28% 之间,但不同生态区域间差别很大,其中以黄土丘陵沟壑区最高,在两个时间段内,其基本上都维持在 43%—45% 之间,黄土台塬区次之,两个时

间段内也维持在了 14%—15% 之间,关中平原区生态稳定性指数最低,两个时段都在 0.2% 以下。

从其变化情况来看,其基本上都呈现了随时间增加的变化趋势,但增幅有限,全市平均增幅为 0.87 个百分点,其中以黄土丘陵沟壑区增幅最大,后 10 年比前 10 年增加了 1.61 个百分点,关中平原区也增加了 0.02 个百分点,只有黄土台塬区呈现了降低的变化过程,后 10 年与前 10 年相比,生态用地稳定性指数降低了 0.15 个百分点。

### 2.2.2 生态用地稳定性指数的分级变化

以行政村为单元,采用自然断点法进行的稳定性生态用地占比分级结果见图 4。从中可以看出,2000—2010 和 2010—2020 两个时段的稳定生态用地分级格局基本相同,高稳定分级区域主要呈“岛状”分布在黄土丘陵沟壑区海拔较高的丘陵沟壑区区域的旬邑县东北、永寿县的西北角区域和彬州市的西南角区域,以及礼泉、泾阳和淳化三县交汇区域。中稳定分级区也分布在北部的黄土丘陵沟壑区以及黄土台塬区的西北部区域,与该区域的低稳定等级呈交错分布;而最大、最连片的低稳定等级生态用地主要分布在中部的黄土台塬区与南部的关中平原区。

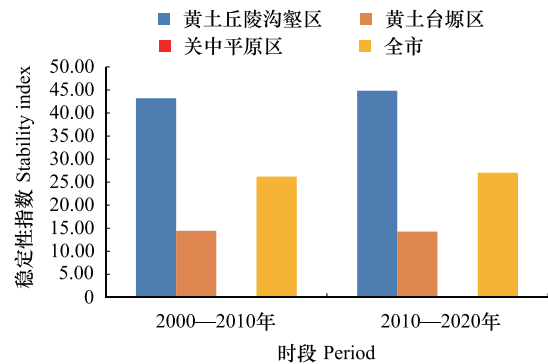


图3 生态用地稳定性指数及其变化

Fig.3 Ecological land stability index and its change in different period

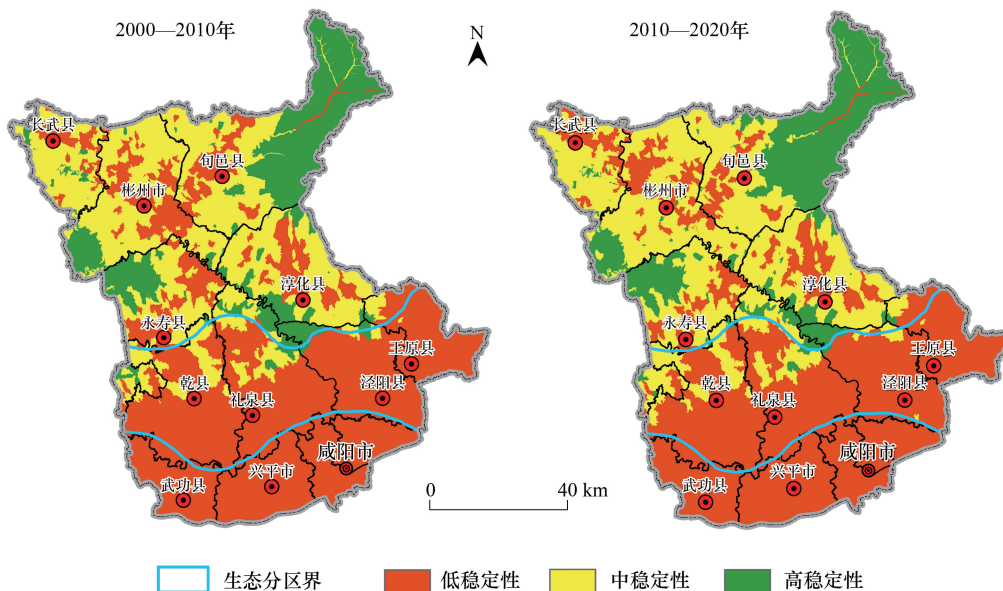


图4 以村为单位的生态用地稳定性指数分级

Fig.4 Classification of ecological land stability index

从分级统计结果来看(表3),咸阳全市以低稳定性等级区域占优势,从2000—2010和2010—2020两个时段的分布情况来看,低稳定性等级区域的面积占比分别达到了52.03%和50.21%,但在时间演化上,后一时段相较于前一时段而言,低稳定性分级的区域面积减少了18569.61hm<sup>2</sup>;中稳定性和高稳定性分级区域的面积在两个时段均始终保持在30%和15%以上,且均呈现了面积增加的变化特点,后一时段较前一时段分别增加了12756.69hm<sup>2</sup>和5812.92hm<sup>2</sup>。

从不同生态分区的情况来看,黄土丘陵沟壑区总体的变化趋势呈现了与全市域相一致的变化趋势:低稳定区域的面积在减少,而中稳定和高稳定区域面积在增加;但占优势的分级类型已经变成中稳定类型,在

2000—2010 到 2010—2020 两个时段,该类型的面积比例分别达到了 51.45%和 52.69%。黄土台塬区的分级面积构成也是以低稳定性类型面积占优势,但其面积占比较全市水平更高,两个时段内分别达到了 85.09%和 83.93%,在时段变化上,其呈现了低稳定类型和高稳定类型同步减少,而中稳定类型面积增加的变化过程。在关中平原区,高稳定区域完全消失,而低稳定性类型面积占比呈现出一枝独秀的特点,两个时段的面积占比分别高达 100%和 99.99%。

表 3 稳定性指数的区域分级统计  
Table 3 The regional statistics of stability index classification

| 区域<br>Region                            | 时段<br>Period | 低稳定性区域<br>Low stability region |        | 中稳定性区域<br>Medium stability region |       | 高稳定性区域<br>High stability region |       |
|-----------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------|-----------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
|                                         |              | 面积/hm <sup>2</sup>             | 比例/%   | 面积/hm <sup>2</sup>                | 比例/%  | 面积/hm <sup>2</sup>              | 比例/%  |
| 全市<br>The whole Xianyang                | 2000—2010    | 530267.58                      | 52.03  | 329032.17                         | 32.28 | 159909.57                       | 15.69 |
|                                         | 2010—2020    | 511697.97                      | 50.21  | 341788.86                         | 33.53 | 165722.49                       | 16.26 |
|                                         | 增(+)减(-)     | -18569.61                      | -1.82  | 12756.69                          | 1.25  | 5812.92                         | 0.57  |
| 黄土丘陵沟壑区<br>Loess Hilly and Gully Region | 2000—2010    | 120584.16                      | 21.34  | 290654.82                         | 51.45 | 153714.24                       | 27.21 |
|                                         | 2010—2020    | 105502.50                      | 18.67  | 297666.99                         | 52.69 | 161783.73                       | 28.64 |
|                                         | 增(+)减(-)     | -15081.66                      | -2.67  | 7012.17                           | 1.24  | 8069.49                         | 1.428 |
| 黄土台塬区<br>Loess Tableland Region         | 2000—2010    | 254343.78                      | 85.09  | 38377.35                          | 12.84 | 6195.33                         | 2.073 |
|                                         | 2010—2020    | 250870.41                      | 83.93  | 44107.29                          | 14.76 | 3938.76                         | 1.318 |
|                                         | 增(+)减(-)     | -3473.37                       | -1.16  | 5729.94                           | 1.92  | -2256.57                        | -0.75 |
| 关中平原区<br>Guanzhong Plain Region         | 2000—2010    | 155322.90                      | 100.00 | 0.00                              | 0.00  | 0.00                            | 0     |
|                                         | 2010—2020    | 155308.32                      | 99.99  | 14.58                             | 0.01  | 0.00                            | 0     |
|                                         | 增(+)减(-)     | -14.58                         | -0.01  | 14.58                             | 0.01  | 0.00                            | 0     |

2.3 稳定性生态用地空间格局分析

2.3.1 生态用地稳定性指数的局部空间自相关分析

依托 ArcGIS 平台,以 2000—2010 和 2010—2020 两个时段生态用地稳定指数为基础,在明确最佳空间邻域距离(61900m)条件下的 Moran's I 指数见表 4。表中数据表明,咸阳市两个时段的生态用地稳定性指数均存在显著的空间聚集分布特征。

表 4 2000—2010 和 2010—2020 时段内生态用地稳定性指数的全局统计  
Table 4 The global spatial autocorrelation statistics (Moran's I) during 2000—2010 and 2010—2020 period

| 时段<br>Period | 莫兰指数<br>Moran's I index | Z 值<br>Z value | P 值<br>P value | 聚集模式<br>Distribution type |
|--------------|-------------------------|----------------|----------------|---------------------------|
| 2000—2010    | 0.321368                | 370.618801     | 0.000000       | 聚集                        |
| 2010—2020    | 0.336248                | 387.816609     | 0.000000       | 聚集                        |

在 0.01 置信水平下,各时段 Moran's I 指数的 Z 值得分均大于临界值 2.58,符合显著性水平检验要求

生态用地稳定性指数的进一步局部空间自相关分析表明(图 5),生态稳定性指数的高-高值聚集区主要集中在北部的黄土丘陵沟壑区,低-低值聚集区集中在北部的黄土丘陵沟壑区南缘西半段以及全部的关中平原与中部黄土台塬区域;高-低值异值区和统计不显著区域呈窄带状沿黄土丘陵沟壑区与黄土台塬区交错区域分布;低-高值异值区则呈“散片”状分布在北部的黄土丘陵沟壑区的高-高值聚集区背景基质中。

从聚集类型的统计看(表 5),在 2000—2010 和 2010—2020 两个变化时段内,高-高值聚集区和高-低值异值区的面积与包含的村庄数量出现了同步增加的变化趋势,后 10 年时段分别比前 10 年时段增加了 3905.90hm<sup>2</sup>、8594.08hm<sup>2</sup>和 10 个、2 个;低-低值聚集区和低-高值异值区在两个时段则呈现了面积与村庄数量同步减少的变化趋势,后一时段较前一时段分别减少了 1307.92hm<sup>2</sup>、3648.33hm<sup>2</sup>和 6 个、12 个;统计不显著区域的面积在后一时段较前一时段减少 7543.73hm<sup>2</sup>,包含的村庄数量则增加了 6 个。

2.3.2 生态用地稳定性指数的空间热点分析

虽然聚集分析可以明确不同聚集类型大致的空间分布,但无法给出具有空间统计意义准确结果。局部空



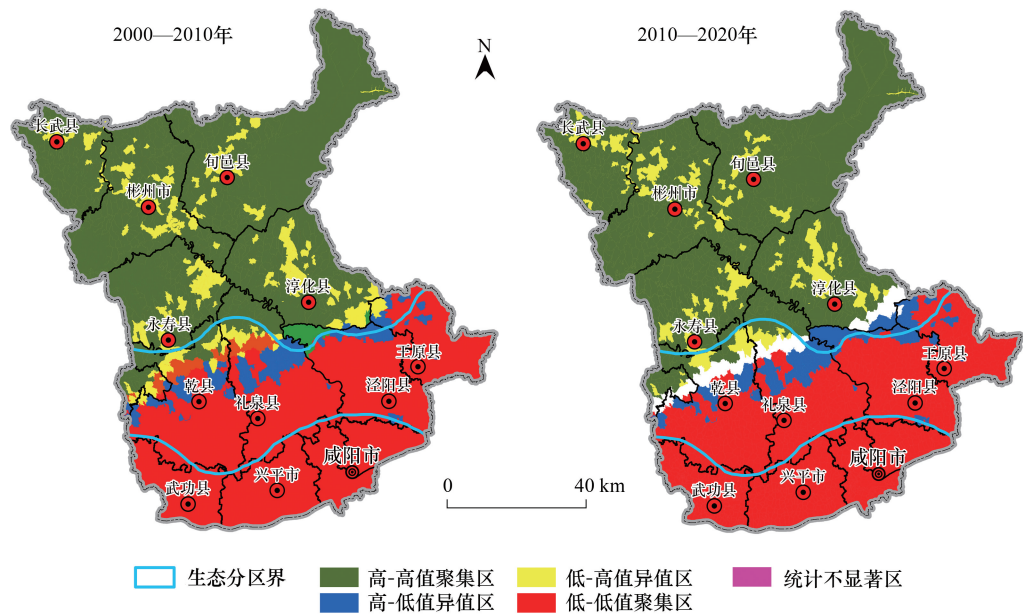


图 5 咸阳市生态用地稳定性局部聚集分析图

Fig.5 Local spatial autocorrelation of ecological land stability index in Xianyang city

间聚类分析基础上的,对 2000—2010 和 2010—2020 时间段内的生态用地稳定性指数的进一步热点分析表明(图 6),沿中部的统计不显著窄带,在 99%置信度下的热点和冷点区域分别分布于该带北南两侧,其他置信度区间下的热点和冷点区域分别呈小斑块状紧邻于统计不显著区域两边,这表明具有空间统计意义的生态稳定性指数的高值区主要分布于北部的黄土丘陵沟壑区,而生态稳定性指数的低值区主要分布在中部的黄土台塬和南部的关中平原区域。

表 5 不同时段生态稳定性空间聚集类型统计

Table 5 Statistics of spatial aggregation types in different periods

| 聚集类型<br>Aggregate type    | 2000—2010   |                    | 2010—2020   |                    | 增 Increase(+) 减 Decrease(-) |                    |
|---------------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
|                           | 行政村(街道)数量/个 | 面积/hm <sup>2</sup> | 行政村(街道)数量/个 | 面积/hm <sup>2</sup> | 行政村(街道)数量/个                 | 面积/hm <sup>2</sup> |
| 高-高值聚集区 High-High cluster | 891         | 491784.56          | 901         | 495690.45          | 10                          | 3905.90            |
| 高-低值异值区 High-Low outlier  | 89          | 41096.83           | 91          | 49690.90           | 2                           | 8594.08            |
| 低-高值异值区 Low-High outlier  | 251         | 71728.92           | 239         | 68080.60           | -12                         | -3648.33           |
| 低-低值聚集区 Low-Low oluster   | 1577        | 380358.76          | 1571        | 379050.84          | -6                          | -1307.92           |
| 统计不显著区 Not significant    | 70          | 34235.46           | 76          | 26691.73           | 6                           | -7543.73           |

从热点图与聚集类型图的 GIS 列联表分析结果来看(表 6),2000—2010 和 2010—2020 两个变化时段内,热点区面积增加7450.11hm<sup>2</sup>,冷点区面积减少了8154.36hm<sup>2</sup>,这表明在 2000—2020 年的这 20 年间,咸阳市域的生态用地稳定性一直处于缓慢的增长变化过程中。从其内部构成来看,热点区与冷点区都以 99%置信度区间控制面积为主,其占市域总面积的比例在两个时间段内分别都在 47%以上,而 95%和 90%置信度区间控制面积占市域面积的比例均在 0.75%以下,统计不显著区域占市域面积的比例基本保持在 2%—3%之间。从冷热点的空间聚集类型分布来看,热点区分布于高-高值聚集区和低-高值异值区,其中分布高-高值聚集区的面积占比在两个变化年度中分别为 87.85%和 89.05%;而冷点区的分布相对较为分散,但均以低-低值聚集区占比最高,两个年度的占比分别达到了 76.48%和 77.49%,其次为高-低值异值区区域,占比分别为8.26%和 10.16%;热点分析中的统计不显著区,主要分布在高-高值聚集区,占比分别为 69.08%和 67.80%,其次为低-高

值异值区和基于聚集度分析的统计不显著区,占比分别为 10.16 和 17.98%、20.76%和 14.22%。

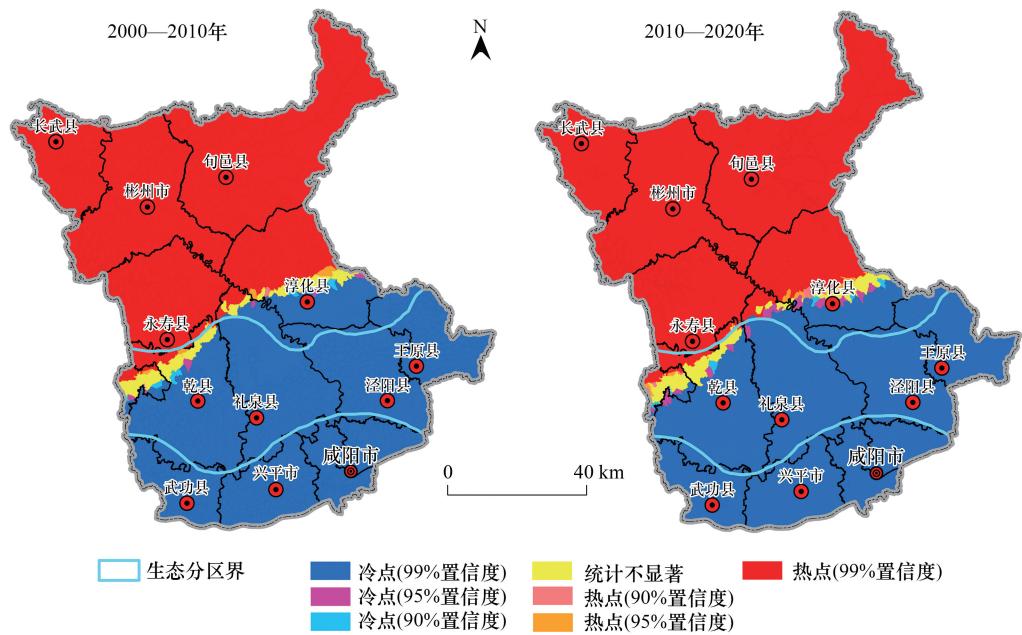


图 6 咸阳市生态用地稳定性热点分析

Fig.6 The hot spot analysis of ecological land use stability in Xianyang city

表 6 热点图与聚集类型图的列联表分析统计

| Table 6 Tabulate area statistics between the hot spot and spatial aggregation types in different periods |            |             |             |             |             |                           |                                                                                            |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 时段<br>Peoriod                                                                                            | 类型<br>Type | 低-低值<br>聚集区 | 高-高值<br>聚集区 | 低-高值<br>异值区 | 高-低值<br>异值区 | 统计不显著区<br>Not significant | 不同热点类型合计<br>及其占市域面积比例<br>Total of the different<br>hot spot types and<br>ratio on Xianyang |       |
|                                                                                                          |            | 比例/%        | 比例/%        | 比例/%        | 比例/%        | 比例/%                      | 面积/hm <sup>2</sup>                                                                         | 比例/%  |
| 2000—2010                                                                                                | 冷点(99%置信度) | 77.30       | 7.17        | 1.64        | 8.35        | 5.54                      | 492055.65                                                                                  | 48.28 |
|                                                                                                          | 冷点(95%置信度) | 0.00        | 52.91       | 0.00        | 0.00        | 47.09                     | 2708.37                                                                                    | 0.27  |
|                                                                                                          | 冷点(90%置信度) | 0.00        | 23.01       | 25.30       | 0.00        | 51.69                     | 2584.62                                                                                    | 0.25  |
|                                                                                                          | 冷点合计       | 76.48       | 7.50        | 1.76        | 8.26        | 6.01                      | 497348.64                                                                                  | 48.80 |
|                                                                                                          | 热点(90%置信度) | 0.00        | 100.00      | 0.00        | 0.00        | 0.00                      | 349.47                                                                                     | 0.03  |
|                                                                                                          | 热点(95%置信度) | 0.00        | 71.98       | 28.02       | 0.00        | 0.00                      | 2613.69                                                                                    | 0.26  |
|                                                                                                          | 热点(99%置信度) | 0.00        | 87.92       | 12.08       | 0.00        | 0.00                      | 497860.11                                                                                  | 48.85 |
|                                                                                                          | 热点合计       | 0.00        | 87.85       | 12.15       | 0.00        | 0.00                      | 500823.27                                                                                  | 49.14 |
|                                                                                                          | 统计不显著区     | 0.00        | 69.08       | 10.16       | 0.00        | 20.76                     | 21037.41                                                                                   | 2.06  |
| 2010—2020                                                                                                | 冷点(99%置信度) | 79.11       | 4.91        | 1.36        | 10.37       | 4.26                      | 479183.22                                                                                  | 47.02 |
|                                                                                                          | 冷点(95%置信度) | 0.00        | 48.88       | 25.70       | 0.00        | 25.42                     | 7673.76                                                                                    | 0.75  |
|                                                                                                          | 冷点(90%置信度) | 0.00        | 46.40       | 0.00        | 0.00        | 53.60                     | 2337.30                                                                                    | 0.23  |
|                                                                                                          | 冷点合计       | 77.49       | 5.80        | 1.74        | 10.16       | 4.82                      | 489194.28                                                                                  | 48.00 |
|                                                                                                          | 热点(90%置信度) | 0.00        | 74.71       | 25.29       | 0.00        | 0.00                      | 1884.33                                                                                    | 0.18  |
|                                                                                                          | 热点(95%置信度) | 0.00        | 100.00      | 0.00        | 0.00        | 0.00                      | 2625.21                                                                                    | 0.26  |
|                                                                                                          | 热点(99%置信度) | 0.00        | 89.04       | 10.96       | 0.00        | 0.00                      | 503763.84                                                                                  | 49.43 |
|                                                                                                          | 热点合计       | 0.00        | 89.05       | 10.95       | 0.00        | 0.00                      | 508273.38                                                                                  | 49.87 |
|                                                                                                          | 统计不显著区     | 0.00        | 67.80       | 17.98       | 0.00        | 14.22                     | 21741.66                                                                                   | 2.13  |

### 3 讨论

#### 3.1 生态用地稳定性及其格局是区域生态建设格局稳定性的核心基础

随着时间的变化,受各种自然与人为活动因素的影响,各类土地利用类型在不同时间段之间都存在一定的双向变化,从咸阳市 2000—2020 年的土地覆盖变化情况看(表 7),20 年间耕地、水体和人造地表分别有 17144.01、513.81、331.83hm<sup>2</sup>流向了各类生态用地,与此同时又有 22518.9hm<sup>2</sup>的各类生态用地分别流向了耕地(20847.51hm<sup>2</sup>)、水体(632.97hm<sup>2</sup>)和人造地表(1038.42hm<sup>2</sup>)。这种双向变化说明,咸阳市域的生态格局尚存在一定程度的不稳定性。这种不稳定性既会影响生态用地功能的充分发挥,又在一定程度上会屏蔽掉对相关问题的及时关注,并影响到解决策略的提出与实施。作为区域生态安全格局的最重要架构,生态用地相关研究对其数量变动与总量增加给予了极大的关注,但其空间稳定性问题一直没有得到足够重视。生态用地是维持区域生态过程与社会经济可持续发展的最重要基础条件,只有同时满足数量足够与空间稳定这两个条件,才能保证生态用地功能的不断增强与可持续发挥。在目前各地深入开展并落实国土空间规划与生态红线的新形势下,必须对生态用地的稳定性有所重视,将其置于与生态用地的数量需求同等重要的地位,并在目前的各类空间规划(尤其是“三生”空间中生态空间)制定与实施中予以考虑,以有效减少乃至避免生态建设过程中的盲目性与生态布局不合理等问题。

表 7 咸阳市土地覆盖 2000—2020 年间转移概率矩阵/hm<sup>2</sup>

Table 7 Land cover probability matrix of Xianyang City from 2000 to 2020

| 地类<br>Land Types         | 森林<br>Forest | 草地<br>Grassland | 灌木地<br>Shrubland | 湿地<br>Wetland | 耕地<br>Cultivated<br>Land | 水体<br>Water | 人造地表<br>Artificial<br>surfaces |
|--------------------------|--------------|-----------------|------------------|---------------|--------------------------|-------------|--------------------------------|
| 森林 Forest                | 196434.09    | 6658.11         | 2171.61          | 1.35          | 6455.61                  | 288.90      | 163.44                         |
| 草地 Grassland             | 26595.99     | 53370.54        | 6788.70          | 1.35          | 13064.94                 | 318.96      | 775.89                         |
| 灌木地 Shrubland            | 466.47       | 232.47          | 1231.02          | 0.00          | 110.70                   | 0.18        | 8.19                           |
| 湿地 Wetland               | 25.56        | 28.35           | 2.52             | 7.65          | 1216.26                  | 24.93       | 90.9                           |
| 耕地 Cultivated land       | 8954.19      | 7085.07         | 1087.20          | 17.55         | 571763.97                | 1524.15     | 39362.13                       |
| 水体                       | 249.39       | 245.16          | 3.33             | 15.93         | 1567.17                  | 1392.57     | 69.75                          |
| 人造地表 Artificial surfaces | 24.93        | 305.55          | 1.35             | 0.00          | 17612.64                 | 23.58       | 52516.17                       |

另外,从本次的研究结果看,虽然 2000—2010 和 2010—2020 两个时间段内,咸阳市域的生态用地面积呈现了不断加速的面积减少变化过程,但从生态用地的稳定性来看,其稳定性生态用地总面积从 266935.14hm<sup>2</sup>增加到了 275851.17hm<sup>2</sup>,而且低稳定性区域减少了 18569.61hm<sup>2</sup>、中稳定与高稳定性区域分别增加了 12765.69hm<sup>2</sup>和 5812.92hm<sup>2</sup>。这表明,稳定性面积的增加通过既有生态功能的保持与可持续发挥作用,在一定程度上减缓了总量减少对区域生态安全的冲击,同时也从侧面说明了生态用地稳定性研究的意义所在。

#### 3.2 地貌条件是影响生态用地空间分布及其稳定性的最重要因素

有关研究指出,气候和地貌格局是影响景观形成和演化的最重要自然条件,在气候相对一致的区域内,地貌条件便成为了景观演化最重要的自然驱动力<sup>[49]</sup>。咸阳市的情况也再次印证了该论断的科学性。从咸阳市的情况来看,无论是生态用地总量(表 8)还是稳定性生态用地(图 1、图 2)分布,都主要分布在黄土丘陵沟壑区,尤其是该区域的海拔愈高的地方分布愈密集。从地类统计来看,2000、2010 和 2020 三个年度内,生态用地面积占市域的比例基本上都维持在 27.5%—28.5%之间,而非生态用地的面积比例也基本上都维持在 27%左右;而到了黄土台塬区,由于地形相对平坦、农田与村庄广布,因此生态用地面积只占到市域总面积的 2.5%—2.8%,而非生态用地市域占比则达到了 26%—28%之间,与黄土丘陵沟壑区占比不相上下;而在关中平原区,这里地形更为平坦,是咸阳市城市发展集中区,也是全市工农业最发达的区域,受城市化与工农业发展占地影响,生态用地占市域面积的比例在 3 个年度均不到 0.1%。

表 8 不同生态分区中生态用地与非生态用地统计

Table 8 Statistics of ecological land use and non-ecological land use in different ecological zones

| 年限<br>Year | 分区<br>Region | 生态用地 Ecological land |        |        | 非生态用地 Non-ecological land |        |        |
|------------|--------------|----------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|
|            |              | 面积/hm <sup>2</sup>   | 分区占比/% | 市域占比/% | 面积/hm <sup>2</sup>        | 分区占比/% | 市域占比/% |
| 2000       | 黄土丘陵沟壑区      | 287715.01            | 50.93  | 28.23  | 277175.28                 | 49.07  | 27.20  |
|            | 黄土台塬区        | 27680.90             | 9.26   | 2.72   | 271291.30                 | 90.74  | 26.62  |
|            | 关中平原区        | 841.74               | 0.54   | 0.08   | 154500.31                 | 99.46  | 15.16  |
| 2010       | 黄土丘陵沟壑区      | 286877.23            | 50.78  | 28.15  | 278013.06                 | 49.22  | 27.28  |
|            | 黄土台塬区        | 27278.79             | 9.12   | 2.68   | 271693.41                 | 90.88  | 26.66  |
|            | 关中平原区        | 633.70               | 0.41   | 0.06   | 154708.34                 | 99.59  | 15.18  |
| 2020       | 黄土丘陵沟壑区      | 285114.21            | 50.47  | 27.97  | 279776.07                 | 49.53  | 27.45  |
|            | 黄土台塬区        | 25987.14             | 8.69   | 2.55   | 272985.06                 | 91.31  | 26.78  |
|            | 关中平原区        | 632.71               | 0.41   | 0.06   | 154709.34                 | 99.59  | 15.18  |

3.3 冷点区域是今后咸阳市生态建设的最重点区域

从前面的热、冷点分析可以看出(表 6),2000—2010 和 2010—2020 两个时段的冷点面积及其市域占比分别达到了 497348.64hm<sup>2</sup>和 48.8%与 489194.28hm<sup>2</sup>和 48%,这表明咸阳市市域差不多有一半的国土空间处于生态用地稳定性指数极低的状态下,且占据了中部黄土台塬区的绝大部分区域以及南部关中平原区的全部(图 6),冷点区域生态用地不仅稳定性低,而且整体上生态用地也极度匮乏(表 8)。从区域生态安全格局构建和环境的可持续性建设两方面来看,冷点区域都应该是咸阳市今后生态建设补齐短板的重点区域。具体来看,黄土台塬区在“三生”空间优化的过程中,生态用地空间还有一定的提升潜力,应该在现有生态用地质量提升与未来数量适当扩增两方面下功夫,同时加强村镇人居林与乡村产业林建设,以弹性的方式扩大生态用地覆盖。南部的关中平原,鉴于其极高的非生态用地比例现状与尖锐的生产空间-生活空间矛盾和生产空间-城市扩张空间矛盾,大范围提升生态空间的可能性极小,因此,应该同步加强乡村人居林与城市森林的建设步伐,并通过绿道建设,以满足城乡居民的绿色生态需求愿望,增强城乡居民的幸福感与获得感,同时依托平原水网,大力开展湿地生态建设,通过点、线结合的方式,最大限度的从生态格局优化上下功夫。而北部的黄土丘陵沟壑区,这是咸阳市最重要的水源涵养区域,目前的生态用地比例占区域面积的 50%以上,咸阳市仅有的三个自然保护区(石门山省级自然保护区、永寿翠屏山自然保护区、淳化县爷台山市级自然保护区)也都位于该区域,因此该区域的后续建设主要内容重点着眼于生态用地的保护与质量提升。

4 结论

本研究以 GlobeLand30 数据为基础,从咸阳市域与不同生态分区两个尺度,分析了咸阳市生态用地、生态用地稳定性指数的变化情况;并利用空间统计学中的局域空间自相关和热点分析技术,对生态用地稳定性指数的空间格局进行了分析。主要结论如下:

(1)2000—2020 年的 20 年间,咸阳市生态用地面积减少了 4509.81hm<sup>2</sup>,以 2010 年为界其中后 10 年的减少面积是前 10 年减少面积的 2.11 倍;但稳定性生态用地却从前 10 年时段的 266935.14hm<sup>2</sup>增加到了后 10 年时段 275851.17hm<sup>2</sup>;生态用地稳定性指数也增加了 0.87 个百分点;生态用地稳定性指数的分级总体上也揭示了低稳定等级区域在减少,而中、高稳定等级区域在扩大的事实。这一方面说明,过去单纯以面积指标探讨生态用地问题的片面性,也凸显了生态用地稳定性研究对传统探究的补充意义,另外稳定性指数的增加也说明,咸阳市在生态用地面积有所减少的情况下,其区域生态安全格局与生态系统功能还是基本保持稳定的这一事实。

(2)生态稳定性指数的局部空间自相关分析显示,市域的生态用地稳定性格局以高-高聚集区和低-低聚集区为主,两个聚集区范围占市域面积比例在 2000—2010 和 2010—2020 两个时间段,分别达到了 48%—49%和 47%—48%;具有统计意义的冷点空间(代表低生态用地稳定性)主要分布在南部的关中平原区和中部的



黄土台塬区,而热点空间(代表高生态用地稳定性)则以北部的黄土丘陵沟壑区为主。无论是聚集区的空间分布还是热点与冷点的空间分布格局,都与稳定性生态用地分布和生态地貌区划呈现了极好的空间关联性。

(3) 相较于传统的生态用地年度总量变化指标而言,生态用地稳定性指数可以从时间和空间两个方面,结合生态用地上的植被类型、植被结构、植被格局、植被质量等更多的侧面反映生态用地对区域生态环境可持续性的支撑程度,在未来的生态用地的空间质量评价和生态空间保护与规划等领域上具有一定的应用前景,对于指导未来的空间生态建设也具有极强的针对性和可操作性。

#### 参考文献(References):

- [1] Wang C D, Wang Y T, Wang R Q, Zheng P M. Modeling and evaluating land-use/land-cover change for urban planning and sustainability: a case study of Dongying City, China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 1529-1534.
- [2] 荣冰凌, 李栋, 谢映霞. 中小尺度生态用地规划方法. *生态学报*, 2011, 31(18): 5351-5357.
- [3] 喻锋, 李晓波, 张丽君, 徐卫华, 符蓉, 王宏. 中国生态用地研究: 内涵、分类与时空格局. *生态学报*, 2015, 35(14): 4931-4943.
- [4] 管青春, 郝晋琨, 石雪洁, 高阳, 王宏亮, 李牧. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 195-207.
- [5] 周朕, 蒙古军, 齐杨, 彭福利. 中国生态用地重要性及其格局优化研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(1): 218-225.
- [6] 董雅文, 周雯, 周岚, 周慧. 城市化地区生态防护研究——以江苏省南京市为例. *现代城市研究*, 1999, 14(2): 6-8, 10.
- [7] 岳健, 张雪梅. 关于我国土地利用分类问题的讨论. *干旱区地理*, 2003, 26(1): 78-88.
- [8] 张红旗, 王立新, 贾宝全. 西北干旱区生态用地概念及其功能分类研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 5-8.
- [9] 邓红兵, 陈春娣, 刘昕, 吴钢. 区域生态用地的概念及分类. *生态学报*, 2009, 29(3): 1519-1524.
- [10] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 王静, 刘爱霞. 生态用地分类初步研究. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 1-7.
- [11] 费建波, 夏建国, 欧定华, 舒向阳, 胡佳. 乡村生态用地综合识别与分类. *生态学杂志*, 2020, 39(3): 1045-1055.
- [12] 李锋, 叶亚平, 宋博文, 王如松. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例. *生态学报*, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [13] 张骞, 高明, 杨乐, 陈成龙, 孙宇, 王金柱. 1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化. *生态学报*, 2017, 37(2): 566-575.
- [14] 武爱彬, 赵艳霞. 坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 283-290.
- [15] 戴云哲, 李江凤. 洞庭湖区生态用地生态服务价值时空演化的地形梯度效应. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 197-204.
- [16] 俞孔坚, 乔青, 李迪华, 袁弘, 王思思. 基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1932-1939.
- [17] 李晖, 易娜, 姚文璟, 王思琪, 李志英, 杨树华. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. *生态学报*, 2011, 31(20): 5928-5936.
- [18] 文博, 朱高立, 夏敏, 张开亮, 刘友兆, 王伟. 基于景观安全格局理论的宜兴市生态用地分类保护. *生态学报*, 2017, 37(11): 3881-3891.
- [19] 郑子豪, 陈颖彪, 林志峰, 胡应龙. 基于多源遥感的城市生态用地识别及生态风险评价. *城市观察*, 2017(3): 19-30.
- [20] 朱敏, 谢跟踪, 邱彭华. 海口市生态用地变化与安全格局构建. *生态学报*, 2018, 38(9): 3281-3290.
- [21] 欧阳志云, 李小马, 徐卫华, 李煜珊, 郑华, 王效科. 北京市生态用地规划与管理对策. *生态学报*, 2015, 35(11): 3778-3787.
- [22] 张继平, 乔青, 刘春兰, 王海华, 裴厦. 基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究. *生态学报*, 2017, 37(19): 6313-6321.
- [23] 刘枝军, 王宏卫, 杨胜天, 王媛媛, 王盼, 李根生. 极端干旱区绿洲生态用地规划. *生态学报*, 2018, 38(22): 7950-7959.
- [24] 苏伟忠, 杨桂山, 甄峰. 长江三角洲生态用地破碎度及其城市化关联. *地理学报*, 2007, 62(12): 1309-1317.
- [25] 吴健生, 刘洪萌, 黄秀兰, 冯喆. 深圳市生态用地景观连通性动态评价. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2543-2549.
- [26] 李时雨, 刘艳芳, 孔雪松, 陈奕云, 刘格格. 武汉市生态用地景观格局的时空演化特征分析. *测绘地理信息*, 2016, 41(3): 68-73.
- [27] 石善球, 柴燕妮. 基于地表覆盖数据的生态用地景观格局分析. *地理空间信息*, 2021, 19(2): 5-8, 63, 6.
- [28] 谢花林. 基于 Logistic 回归模型的区域生态用地演变影响因素分析——以京津冀地区为例. *资源科学*, 2011, 33(11): 2063-2070.
- [29] 郑涛, 陈爽, 张童. 城市滨江地区生态用地演变及驱动因素分析——以长江南京段为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1049-1058.
- [30] 黄隆杨, 刘胜华, 李健. 城市生态用地时空动态及其相关驱动力——以武汉市为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1059-1069.
- [31] 尹娟, 资本飞, 阳利永, 陈婧祎. 抚仙湖流域生态用地时空演变及其驱动因素. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 228-235, 331.
- [32] 刘彦文, 刘成武, 何宗宜, 周霞, 韩冰华, 郝汉舟. 基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 987-998.
- [33] 张林波, 李伟涛, 王维, 熊严军. 基于 GIS 的城市最小生态用地空间分析模型研究——以深圳市为例. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 69-78.
- [34] 于强, 岳德鹏, Di Yang, 张启斌, 马欢, 李宇彤. 基于 EnKF-MCRP 模型的生态用地扩张模拟研究. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 285-293.

- [35] 王海鹰, 秦奋, 张新长, 张传才, 李培君. 基于蚁群优化算法的城市生态用地空间规划模型. 地理科学, 2017, 37(3): 426-436.
- [36] 曾碧柯, 刘友兆, 周文丹. 基于 CLUE-S 和 Markov 模型的生态用地模拟研究. 农业科学研究, 2018, 39(4): 52-57, 63.
- [37] 刘建华, 张启斌, YANG Di, 岳德鹏, 于强, 杨澜. 基于 MCR-ANN-CA 模型的包头市生态用地演变模拟. 农业机械学报, 2019, 50(2): 187-194.
- [38] 朱寿红, 孙玉杰, 舒帮荣, 王胜利, 梁迅. 规划政策影响下区域生态用地演变模拟研究—以南京市溧水区为例. 地理与地理信息科学, 2019, 35(4): 83-90.
- [39] 李晓丽, 曾光明, 石林, 梁婕, 蔡青. 长沙市城市生态用地的定量分析及优化. 应用生态学报, 2010, 21(2): 415-421.
- [40] 关小克, 张凤荣, 王秀丽, 赵华甫, 姜广辉. 北京市生态用地空间演变与布局优化研究. 地域研究与开发, 2013, 32(3): 119-124.
- [41] 程迎轩, 王红梅, 刘光盛, 郑标, 王海云, 刘翠霞. 基于最小累计阻力模型的生态用地空间布局优化. 农业工程学报, 2016, 32(16): 248-257, 315.
- [42] 李国煜, 林丽群, 罗栋荣, 王强. 福州市生态用地保护格局的优化途径. 水土保持通报, 2019, 39(2): 234-241.
- [43] 贾宝全, 王成, 邱尔发. 南京市景观时空动态变化及其驱动力. 生态学报, 2013, 33(18): 5848-5857.
- [44] 贾宝全, 刘秀萍. 北京市第一道绿化隔离区树冠覆盖特征与景观生态变化. 林业科学, 2017, 53(9): 1-10.
- [45] 贾宝全, 仇宽彪. 北京市第二道绿化隔离区林木树冠覆盖特征与景观格局变化. 林业科学, 2019, 55(2): 13-21.
- [46] 陈军, 陈晋. GlobeLand30 遥感制图创新与大数据分析. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(10): 1391-1392.
- [47] Chen J, Chen L J, Chen F, Ban Y F, Li S N, Han G, Tong X H, Liu C, Stamenova V, Stamenov S. Collaborative validation of GlobeLand30: Methodology and practices. Geo-Spatial Information Science, 2021, 24(1): 134-144.
- [48] Griffiths G H. Land mosaics: The ecology of landscapes and regions. Applied Geography, 1998, 18(1): 98-99.
- [49] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 景观生态学原理及应用. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [50] 贾宝全, 仇宽彪, 马杰, 李晓婷, 刘秀萍, 宋宜昊. 北京城市森林结构特征及林木树冠覆盖动态变化研究. 北京: 中国环境出版集团, 2019 年, p57-58.
- [51] 王勇, 李海英, 俞海. 中国省域绿色发展的空间格局及其演变特征. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 96-104.
- [52] 夏四友, 赵媛, 许昕, 文琦, 宋永永, 崔盼盼. 1997—2016 年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素. 生态学报, 2019, 39(21): 7854-7865.
- [53] 刘愿理, 廖和平, 张茜茜, 李靖, 蔡进. 西南喀斯特区贫困空间剥夺的识别及空间格局分析. 农业工程学报, 2019, 35(15): 284-294.
- [54] 王志杰, 柳书俊, 苏嫒. 喀斯特高原山地贵阳市 2008—2018 年土壤侵蚀时空特征与侵蚀热点变化分析. 水土保持学报, 2020, 34(5): 94-102,