

# 基于变化轨迹分析方法的生态用地流失空间关联研究

刘金雅<sup>1</sup>,汪东川<sup>1,2</sup>,孙然好<sup>3</sup>,汪翡翠<sup>1</sup>,胡炳旭<sup>1</sup>,陈俊合<sup>1</sup>,孙志超<sup>1</sup>

(1. 天津城建大学地质与测绘学院,天津 300384;2. 天津城建大学,天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室,天津 300384;3. 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085)

**摘要:** 针对现有研究割裂了生态用地流失这一基本变化过程的不足,本文基于变化轨迹分析方法,从过程完整性角度探求了京津冀城市群地区生态用地流失的空间关联特征。结果表明:① 京津冀城市群地区土地利用变化主要表现为林地、草地、水域和耕地的流失,流失面积的40%转为人工表面;② 林地、草地和水域流失的空间自相关性随空间尺度增大而增强,7 km×7 km空间尺度上3种生态用地流失空间正相关性较强,且随距离阈值增加而降低;③ 距离阈值为10 km时,林地、草地流失高发区集中分布在京津冀西北部地区,水域流失高发区集中分布在东部渤海湾附近,生态环境保护应从京津冀协同发展角度,打破区域发展不均衡,促进京津冀城市群全面发展。

**关键词:** 变化轨迹分析;空间自相关分析;生态用地流失;京津冀协同发展

DOI: 10.11821/dlyj020181021

## 1 引言

随着中国工业化、城镇化进程的持续推进,土地利用强度不断加大,大量重要生态用地被强制开发占用,这不但降低了土地的生态系统服务功能,而且破坏了土地生态系统的平衡,严重威胁着区域的生态安全<sup>[1-3]</sup>。十九大报告中,将生态文明建设提升为中华民族永续发展的千年大计,提出“人与自然是生命共同体,人类必须尊重自然、顺应自然、保护自然”的发展理念。为协调好经济发展、环境保护和生态文明建设之间的矛盾,必须对现有生态用地流失问题进行科学合理研究,这不仅是实现土地资源合理配置和生态环境保护的基础和前提,还有助于实现人与自然和谐共生和全球生态安全<sup>[4]</sup>。

生态用地主要是指以提供生态系统服务功能为主的土地利用类型,如林地、草地、湿地等,其能够通过提供气候调节、维持生物多样性等方式,直接或间接地改良区域或全球的生态环境和人地关系<sup>[5,6]</sup>,由于其庞大的生态系统服务功能支撑着全球的生命系统,而一直都是国内外研究的热点问题<sup>[7]</sup>。国内外学者纷纷针对不同区域<sup>[8,9]</sup>、不同尺度<sup>[10,11]</sup>、不同类型<sup>[12,13]</sup>的生态用地开展了研究,研究内容涉及生态用地的概念及分类<sup>[14]</sup>、提取与识别<sup>[15]</sup>、评价与优化<sup>[16]</sup>、需求量测算<sup>[17]</sup>和景观安全格局构建<sup>[18]</sup>等多个方面。特别的,随着近年来人们对美好生活的需要以及社会对良好生存质量的日益关注,识别和保护生态用地脆弱区已成为生态环境保护的关键环节<sup>[19,20]</sup>。然而,现有生态用地脆弱区的识别研究较多

收稿日期: 2018-09-25; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590843)

作者简介: 刘金雅(1993-),女,天津市人,硕士,主要从事土地利用变化监测和景观格局动态模拟。

E-mail: 307374284@qq.com

通讯作者: 孙然好(1981-),男,山东临沂人,博士,副研究员,主要从事景观格局与过程模型研究。

E-mail: rhsun@rcees.ac.cn

关注其生态系统服务功能的强弱,如水源涵养功能、生物多样性维持功能和灾害防护功能等<sup>[21]</sup>,缺少对某一时间序列内生态用地流失高发区的识别与关注。而要想对生态用地进行有效保护而达到土地资源的合理利用、人与自然的可持续发展的目的,不仅要关注生态用地的利用现状,还要注重其从过去到现在的变化,也就是生态用地流失的高发区,从而有针对性的提出保护措施,这样才能更加全面的对生态用地脆弱区进行识别,并提出合理的保护措施。

现有生态用地流失研究中,大都根据不同时期的土地利用数据来分析生态用地的面积变化情况<sup>[22,23]</sup>,这样就割裂了生态用地流失这个基本的变化过程,也没有将其与具体的变化位置相结合,因而缺少连续性和方向性。变化轨迹分析方法是从过程的完整性角度探求变化规律,通过将变化过程与具体的变化位置相结合,可以定量研究土地利用变化与生态过程之间的关系,以识别其时空动态演变规律<sup>[24,25]</sup>。地理学第一定律认为:地球上的一切事物都是相互关联的,距离越近相关性就越强<sup>[26]</sup>。空间自相关分析是研究某一空间单元与周围单元之间的某种属性值在空间上的相关程度<sup>[27]</sup>,被广泛应用于生态学<sup>[28]</sup>、经济学<sup>[29]</sup>和流行病<sup>[30]</sup>等方面。大量研究表明土地利用空间数据符合地理学第一定律,空间自相关分析是衡量土地利用变化的有效方法<sup>[31,32]</sup>。同样,生态用地流失作为土地利用变化的一种表现方式,流失过程也不是孤立存在,而具有空间依赖性 or 空间自相关特性,可以利用空间自相关分析探究其在空间上的分布模式。空间自相关分析分为全局空间自相关和局部空间自相关,全局空间自相关分析可以判断生态用地流失在空间域中是否存在聚集特征,局部空间自相关分析可以识别生态用地流失现象在空间域中聚集的热点区和空间变化趋势,以此找出生态用地流失高发区,有针对性的对土地资源进行合理配置,最终达到提高土地利用效率和保护环境的目的<sup>[33]</sup>。

改革开放以来的40年时间里,京津冀城市群地区经济保持快速发展,但是巨大的资源需求导致该地区的生态环境恶化,生态用地流失严重,土地资源严重制约着京津冀城市群地区的进一步发展<sup>[34]</sup>。2015年4月30日,中央政治局会议审议通过的《京津冀协同发展规划纲要》中明确指出,要将京津冀协同发展、打造京津冀世界级城市群上升为重大国家战略。因此,对京津冀生态用地流失情况进行识别与评价,并从京津冀生态环境一体化角度有针对性的提出生态用地保护措施,将有助于京津冀城市群的生态环境建设与保护。

鉴于此,本文选取京津冀城市群地区的林地、草地和水域3种重要生态用地作为研究对象,基于变化轨迹分析方法识别了京津冀城市群地区土地利用变化的时空动态演变规律,并利用空间自相关分析探讨不同尺度上3种重要生态用地流失的空间自相关格局,找出生态用地流失的高发区,并从京津冀城市群生态环境一体化角度提出针对性的保护建议,以期对京津冀城市群土地资源的合理配置、可持续利用以及城市之间的协同发展提供依据。

## 2 研究区概况与数据处理

### 2.1 研究区概况

京津冀城市群(113°34'E~120°05'E, 36°00'N~42°40'N)位于中国华北地区,由北京、天津和河北省内的石家庄、保定、沧州、承德、邯郸、衡水、廊坊、秦皇岛、唐山、邢台和张家口共计13个地市构成,总面积将近22万km<sup>2</sup>。京津冀城市群地区东临渤海湾,西倚太行山,南面华北平原,北接燕山山脉,区域地形呈现由西北向东南逐级下

降的带状分布特点, 气候以温带大陆性气候为主, 一年四季气温变化明显。改革开放以来的40年时间里, 京津冀城市群的经济快速发展, 不仅成为中国重要的政治中心、文化中心, 还是中国北方规模最大、发展程度最高的经济核心区。

## 2.2 研究数据

本文以下载于地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 的京津冀城市群1984年、2000年和2015年的MSS数据、Landsat ETM数据和Landsat8 OLI数据作为主要数据源, 在软件ArcGIS 10.2的支持下, 结合野外调查数据和相关历史数据, 分别进行人工目视解译, 生成研究区3个时期的土地利用分类数据, 最后经过矢栅转化, 得到京津冀城市群1984年、2000年和2015年的土地利用栅格数据(栅格大小为30 m×30 m)。解译出的土地利用类型包括林地、草地、水域、耕地、人工表面和未利用地共6类。

## 3 研究方法

### 3.1 变化轨迹分析方法

变化轨迹分析方法是一种可以用来分析时序内某一属性动态变化的方法, 能够提供连续现象与非连续现象的估算。时间序列过程中涉及的变化轨迹可以利用轨迹代码来表示, 如111, AAB等, 表现形式多样, 每个轨迹代码中的数字或字母, 代表每一个时期土地利用分类图中相应栅格对应的土地利用类型。因此, 轨迹代码可以表示成对应地点在研究时序内各个时间节点上的土地利用类型变化<sup>[24,25]</sup>, 用公式表示为:

$$CT = 10^{n-1}P_1 + 10^{n-2}P_2 + \dots + 10^{n-i}P_i + \dots + P_n \quad (1)$$

式中:  $CT$ 表示研究时序内各栅格上对应的变化轨迹代码;  $n$ 表示研究时序内的时间节点数( $n > 1$ );  $P_i$ 表示第*i*个时间节点的土地利用栅格数据。

### 3.2 空间自相关分析

**3.2.1 全局Moran's I指数** 度量空间自相关的指标和方法有很多, Moran's I指数是最常用的基础指标之一, 可以全面表征区域内各个单元的特定变量或属性在空间上的平均相关程度、空间分布模式以及显著性, 用公式表达为<sup>[35]</sup>:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{X})(x_j - \bar{X})}{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

式中:  $x_i$ 和 $x_j$ 表示单元*i*、单元*j*所在的空间位置, 且*i*≠*j*;  $\bar{X}$ 表示*n*个位置单元对应属性值的平均值;  $W_{ij}$ 表示空间权重矩阵;  $n$ 表示单元的个数。空间自相关的显著性通过服从正态分布的统计量*Z*进行检验<sup>[33]</sup>。Moran's I指数值分布在±1之间, 绝对值大小表示变量空间相关性的强弱, 正、负号分别表示变量在区域内呈正、负相关; 趋于0表示不相关, 呈随机分布。

由于比重值经过各单位面积的标准化, 相对于绝对数值更能反映各土地利用类型分布特征的空间自相关特性<sup>[32]</sup>。在此, 将各栅格单元的属性值确定为单元内各生态用地流失的面积与单元总面积的比值, 以保持数据的一致性。空间权重矩阵的确定采用基于距离阈值的方法, 距离阈值直接决定了空间单元的邻近对象, 不同距离阈值对应不同的空间权重矩阵, 可以比较出生态用地流失的全局Moran's I指数随间隔距离的变化情况。

**3.2.2 局部热点分析** 全局Moran's I指数可以判断区域内某一属性值的整体关联程度, 但无法明确发生聚集的具体位置, 由于空间异质性的存在, 研究区各位置的空间自相关

程度可以不同,由此进行局部 Getis-Ord  $G_i^*$  热点分析,以定位到生态用地流失的空间聚集具体位置。热点分析是用于识别具有统计显著性的高值聚集区和低值聚集区,即热点和冷点区,用公式表达为<sup>[35]</sup>:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij} - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij}\right)^2}{n-1}}} \quad (3)$$

式中:  $S$  为  $n$  个单元对应属性的标准差;其他同公式 (2)。为便于比较和研究,对  $G_i^*$  进行标准化处理,用公式表达为:

$$Z(G_i^*) = \frac{1 - E(G_i^*)}{\sqrt{VAR(G_i^*)}} \quad (4)$$

式中:  $E(G_i^*)$  为局部 Getis-Ord  $G_i^*$  指数的期望值;  $VAR(G_i^*)$  为局部 Getis-Ord  $G_i^*$  指数的方差。若  $Z(G_i^*) > 1.96$  表示为显著的热点区,  $1.65 < Z(G_i^*) < 1.96$  表示较显著的热点区,  $-1.65 < Z(G_i^*) < 1.65$  表示聚集不显著的区域,  $-1.96 < Z(G_i^*) < -1.65$  表示较显著的冷点区,  $Z(G_i^*) < -1.96$  表示显著的冷点区域。

## 4 结果与分析

### 4.1 生态用地流失的变化轨迹分析

基于京津冀城市群 1984 年、2000 年和 2015 年 3 期土地利用栅格数据,运用软件 ArcGIS 10.2 中的 Raster Calculator 工具对其进行土地利用变化轨迹分析。

时间序列中包含 1984 年、2000 年和 2015 年 3 个时间节点,理论上共存在  $6^3=216$  种变化轨迹代码,结合经验分析与现场调查结果,去除没有发生变化、不合理和面积小无意义的轨迹代码,对剩下的代码按照栅格数由大到小进行排序,发现前 20 种轨迹代码的总面积占所有变化轨迹代码总面积的 84.69%,基本能够代表研究区在研究时序内土地利用变化的主要轨迹类型,由此确定其为京津冀城市群在研究时序内的主要变化轨迹代码,在京津冀城市群地区分布的具体位置如图 1 所示,各轨迹代码对应的栅格数和面积比例如表 1 所示。

以上分析可知,京津冀城市群地区在 1984—2015 年土地利用变化主要表现为林地、草地、水域 3 种重要生态用地的流失以及耕地的流失。其中,林地流失对应的 4 种轨迹代码中,面积比例较大的是代码“144”(林地-耕

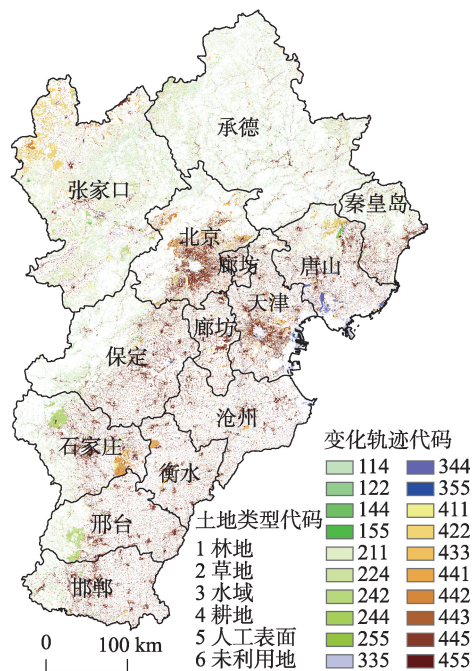


图 1 1984—2015 年京津冀城市群土地利用变化主要轨迹代码空间分布

Fig. 1 Land use change of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 1984 to 2015

表1 1984—2015年京津冀城市群土地利用变化主要轨迹代码面积比例统计

Tab. 1 Land use change trajectory area ratio statistics for Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 1984 to 2015

轨迹代码	栅格数	比例 (%)	轨迹代码	栅格数	比例 (%)
114	645665	1.78	344	911547	2.52
122	2038990	5.63	355	299913	0.83
144	2396898	6.62	411	3218452	8.88
155	418372	1.15	422	2849433	7.86
211	2092896	5.78	433	1191275	3.29
224	468436	1.29	441	1217504	3.36
242	959649	2.65	442	591870	1.63
244	1238493	3.42	443	297908	0.82
255	278592	0.77	445	6569197	18.13
335	568222	1.57	455	7979362	22.02

地-耕地)和“122”(林地-草地-草地)所对应的变化轨迹,分别代表林地在2000年转为耕地和草地,占前20种主要轨迹代码总面积的6.62%和5.63%,空间中对应的变化位置主要分布在城市群地区西北部的承德市、张家口市和北京市等,处于太行山脉和燕山山脉处。草地流失对应的轨迹代码中,除了“255”(草地-人工表面-人工表面)代表的一少部分草地在2000年转为人工表面,面积比例为0.77%外,其余大部分草地表现为与林地、耕地的转换,空间变化位置主要分布在张家口市、石家庄市和邢台市等,同林地流失类似集中分布在京津冀的西北部地区。由于地理位置的限制,京津冀城市群内水域分布面积较少,水域流失主要集中在渤海湾处的天津市和秦皇岛市,以围填海活动为主,水域主要转为人工表面。值得一提的是,由于水域面积较小且围填海活动侵占的海域面积也较小,在此将两者统一归为水域进行讨论。另外,由于京津冀城市群南部地区存在大面积的耕地,耕地流失问题同样不容忽视。自1984年至今,京津冀城市群地区工业化、城镇化进程不断加快,耕地资源不断被占用,除转为林地、草地和水域的少部分面积外,大部分耕地转为了人工表面,用于城市建设和经济发展,面积比例超过总变化面积的40.00%,集中分布在城市群南部地区。

由上述分析可知,京津冀城市群地区土地利用的主要变化为林地、草地、水域3种重要生态用地以及耕地的流失,除了一部分流失面积用于与其他生态用地以及耕地的转换外,流失面积的40%转为人工表面而用于城市建设。

## 4.2 生态用地流失的空间自相关分析

### 4.2.1 不同空间尺度上生态用地流失的全局Moran's $I$ 指数

地理学所研究的对象格局与过程的发生、时空分布、相互耦合等特性都是尺度依存的,会随研究尺度的变化而变化<sup>[36]</sup>。考虑到土地利用类型30 m×30 m的基础栅格大小和京津冀城市群的总面积,在此,探讨了1 km×1 km, 3 km×3 km、5 km×5 km、7 km×7 km和9 km×9 km共5种空间尺度上生态用地流失的空间自相关格局<sup>[37]</sup>。运用软件ArcGIS 10.2空间统计模块中的Moran's  $I$ 工具,计算京津冀城市群林地、草地和水域3种重要生态用地流失的全局Moran's  $I$ 指数(图2)。

从1 km×1 km, 3 km×3 km、5 km×5 km、7 km×7 km和9 km×9 km共5种空间尺度上京津冀城市群生态用地流失的全局Moran's  $I$ 指数图中可以看出,林地流失、草地流失和水域流失的空间自相关性随着空间尺度的增大呈现逐渐增强的趋势。一方面原因是

随着空间聚合尺度由低到高,数据得到平滑处理使得噪声降低,而呈现高尺度特征,另一方面原因就是Moran's  $I$ 指数对距离的非线性特征造成的。不同空间尺度对土地利用空间自相关性的影响可能增强也可能减弱,该结论也已在其他研究中得到验证<sup>[38]</sup>。

由于林地流失、草地流失和水域流失的空间自相关性会随着空间尺度的变化而变化,通过比较不同空间尺度下3种重要生态用地流失的全局Moran's  $I$ 指数发现,7 km×7 km的空间尺度下,3种重要生态用地流失的全局Moran's  $I$ 指数都相对较大。特别地,对于草地流失,9 km×9 km空间尺度下的空间自相关性低于7 km×7 km的空间尺度。因此,选取7 km×7 km的空间尺度作为下文空间自相关分析的基本空间尺度。

**4.2.2 基本空间尺度(7 km×7 km)上生态用地流失的全局Moran's  $I$ 指数** 在7 km×7 km的空间尺度上,分别以10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110和120 km为距离阈值构造用于空间自相关分析的空间权重矩阵,京津冀城市群林地流失、草地流失和水域流失的空间自相关性随距离阈值增加的变化趋势如图3所示。

由全局Moran's  $I$ 指数图可知,京津冀城市群林地流失、草地流失和水域流失的空间自相关性随距离阈值的增加逐渐降低。距离阈值在70 km之内,空间正相关性由高到低依次为水域流失、草地流失和林地流失;距离阈值在70 km之外,林地流失的空间正相关性强于草地流失和水域流失。另外在不同的距离阈值内,3种重要生态用地对应的全局Moran's  $I$ 指数均为正值,且对全局Moran's  $I$ 进行Z检验的结果也均显著,说明京津冀城市群3种重要生态用地流失的空间分布并非随机发生,而是存在较强空间正相关性。

**4.2.3 生态用地流失的局部Getis-OrdGi\*热点分析** 为更好认识京津冀城市群内林地流失、草地流失和水域流失的局部空间聚集特征,利用软件ArcGIS 10.2空间统计模块中局部Getis-OrdGi\*热点分析方法,探索其空间分布的热点与冷点区域,即生态用地流失的高发区。考虑到不同距离阈值对空间相关性的影响,依据全局Moran's  $I$ 指数较大原则,选择距离阈值为10 km时对应的空间权重矩阵,来计算3种重要生态用地流失的局部Getis-OrdGi\*统计值(图4)。

局部Getis-OrdGi\*热点分析结果显示,京津冀城市群3种重要生态用地流失在空间中存在高值聚集的热点区域,即生态用地流失高发区,而不存在低值聚集的冷点区域。

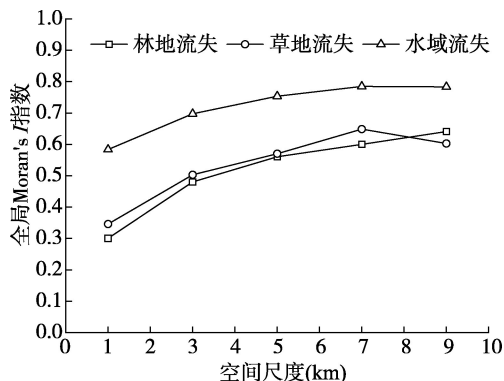


图2 不同空间尺度上京津冀城市群生态用地流失的全局Moran's  $I$ 指数分布

Fig. 2 The global Moran's  $I$  index of the loss of ecological land in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration on different spatial scales

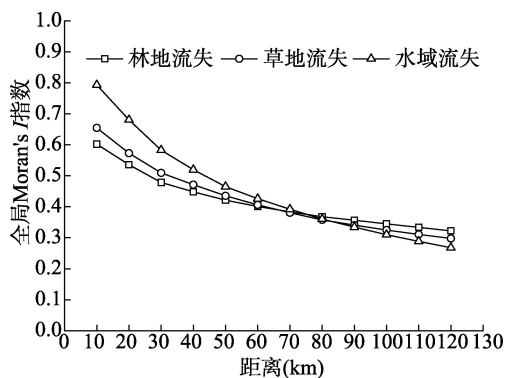


图3 7 km×7 km空间尺度上京津冀城市群生态用地流失的全局Moran's  $I$ 指数分布

Fig. 3 The global Moran's  $I$  index of the loss of ecological land in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration on a 7 km×7 km spatial scale

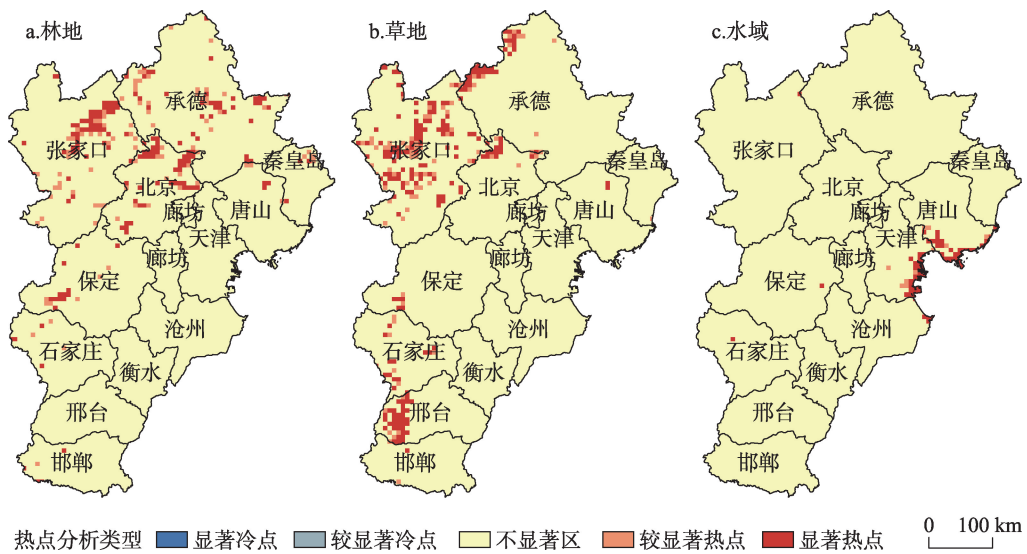


图4 京津冀城市群生态用地流失的局部Getis-OrdGi\*热点分析

Fig. 4 The local hotspot analysis (Getis-OrdGi\*) of ecological land loss in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

对于林地流失, 其高发区主要分布在京津冀北部地区的承德、张家口、北京、保定和秦皇岛, 这些地市内林地流失的空间分布呈现显著和较显著的聚集状态, 石家庄市、邯郸市和唐山市内显著区域面积相对较小, 而在东南部大部分地市林地流失总体上呈现不显著的空间分布特征。草地流失的高发区一部分集中分布在京津冀北部的张家口市及其与北京市的交界处、承德市北部的一小部分地区, 另一部分集中分布在石家庄市和邢台市。与林地流失类似, 草地流失在京津冀东南部地区的空间聚集性并不显著。从林地流失和草地流失的局部Getis-OrdGi\*热点分析结果中可以看出, 林地流失和草地流失的热点区域集中分布在京津冀西北部地区的燕山山脉和太行山脉处, 体现出明显的地形特征。结合土地利用可知, 在1984年京津冀西北部地区的林地资源和草地资源丰富, 但是随着经济建设、资源的开发利用, 西部地区的林草资源不断被占用转为人工表面或其他土地利用类型, 因而在空间呈现为流失的高发区。对于水域流失, 其热点分析结果表明水域流失的高发区集中分布在渤海湾附近, 以天津市和唐山市为主, 这主要是由于改革开放以来的几十年中, 随着对海洋资源的不断认知, 人们开始对海洋资源进行开发利用, 一系列的围填海活动使得大面积海域转为了人工表面, 使之成为了京津冀城市群地区水域流失的高发区。

从对林地流失、草地流失和水域流失高发区的识别结果中可知, 京津冀城市群西北部地区是林地流失和草地流失的高发区, 东部渤海湾附近地区是水域流失的高发区, 而对于南部平原区, 3种生态用地流失并不显著。

## 5 讨论

作为人类社会经济活动的空间载体, 土地所反映出来的问题归根结底是该地区社会经济的问题。针对生态用地流失空间热点分析所表现出来的京津冀城市群地区经济发展的不均衡问题, 同样可以通过土地利用管控来进行缓解<sup>[39,40]</sup>。为贯彻落实京津冀协同发展

的重大国家战略,还需要结合区域生态环境一体化,提出有针对性的保护建议,为消除现阶段中国人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分发展之间的矛盾、实现区域土地资源的合理配置、可持续利用以及城市之间的协同发展做出贡献。

相对于京津冀城市群南部的几个地市,北部地区的承德、张家口、北京、秦皇岛、保定、石家庄和邢台市内林地、草地资源丰富,生态环境保护应该从林草资源入手,降低林草资源的破碎化、零散化程度,努力提高林地、草地的覆盖程度与覆盖质量。可以整合区域内现有自然、人文等资源,因地制宜地通过建立特色生态公园等方式充分发挥区域自身优势,以发展旅游业带动区域的经济增长,并以该方式带动区域生态环境保护工作。对于区域内的水域资源采取重点保护的措施,以保证区域内城市的水资源供给稳定。特别是对于首都北京市来讲,既要保证用于城市建设的土地资源的利用效率,又要充分发挥有限林地、草地和水域资源的改善人居环境、提供重要生态系统服务功能的能力,做好生态用地的保护工作对于区域经济发展至关重要。对于京津冀城市群东部的天津市和唐山市,水域资源相对丰富,更应该提高水域资源的利用效率,不仅要保证市内水域资源的稳定,更应该从区域生态环境一体化的角度缓解区域内其他地市水域资源紧缺的问题,以实现区域协同发展。值得一提的是,围填海活动虽然可以增加可利用土地的面积,但是从土地资源可持续发展角度,首先应该充分认识围填海活动的利与弊,避免出现破坏土地系统稳定的情况发生。对位处京津冀城市群南部平原区的几个地市,地理条件限制了该地区有限的生态用地资源,土地利用类型以耕地为主。因此,在保护现有生态用地资源的基础上,进行中低产的耕地改造,实行高标准的基本农田建设,发展现代农业,提高耕地资源利用效率,以充分发挥耕地资源的生态系统服务功能而填补地区生态用地资源的不足。

京津冀城市群的生态环境协同保护作为京津冀城市群协同发展的突破口之一,应从土地资源的合理配置入手,遵循地区土地利用规律,因地制宜充分挖掘其他价值,在保证城市自身需要的同时,更应该从区域协同发展角度出发,创造平等的发展机会,实现发展成果共享,努力构建城市群地区平等发展的空间格局,打破城市群内区域发展差距,促进京津冀城市群地区经济的全面发展<sup>[41]</sup>。同时,针对各种生态环境问题,在京津冀城市群的各个城市之间应该努力实现协同联防治理、互相配合,合力提升京津冀生态环境保护的效果,从而构建良好的生态环境,为京津冀协同发展做出贡献。

## 6 结论

本文基于1984年、2000年和2015年京津冀城市群地区的土地利用数据,利用变化轨迹分析方法识别了京津冀城市群地区土地利用变化的时空动态演变规律,在此基础上利用空间自相关分析探讨了不同尺度上林地流失、草地流失和水域流失的空间自相关格局,找出生态用地流失的高发区,并从京津冀城市群生态环境一体化角度提出针对性的保护建议,得到如下结论:

(1) 京津冀城市群地区土地利用的主要变化为林地、草地、水域3种重要生态用地以及耕地的流失,流失面积的40%转为人工表面而用于城市建设。

(2) 京津冀城市群地区林地、草地和水域流失的空间自相关性随空间尺度增大而增强。7 km×7 km的基本空间尺度上,林地、草地和水域流失的空间正相关性较强,且随距离阈值的增加逐渐降低。



(3) 林地、草地流失的高发区集中分布在京津冀西北部地区的燕山山脉和太行山脉处, 水域流失的高发区集中分布在渤海湾附近。京津冀城市群的生态环境协同保护应从土地资源的合理配置入手, 打破城市群内区域发展的不均衡, 促进京津冀城市群地区经济的全面发展。

### 参考文献(References)

- [1] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态用地分类初步研究. 生态环境学报, 2015, 24(1): 1-7. [Long Hualou, Liu Yongqiang, Li Tingting, et al. A primary study on ecological land use classification. Ecology & Environmental Sciences, 2015, 24(1): 1-7.]
- [2] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究. 经济地理, 2014, 34(5): 1-8. [Long Hualou, Liu Yongqiang, Li Tingting, et al. Spatial interlinking of land use planning and environmental protection planning from the perspective of ecological civilization construction. Economic Geography, 2014, 34(5): 1-8.]
- [3] Liu Z, Yao Z, Huang H, et al. Land use and climate changes and their impacts on runoff in the Yarlung Zangbo River Basin, China. Land Degradation & Development, 2014, 25(3): 203-215.
- [4] 刘金雅, 汪东川, 张利辉, 等. 基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算. 生态学报, 2018, 38(12): 4192-4204. [Liu Jinya, Wang Dongchuan, Zhang Lihui, et al. Estimation of the ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on multi-boundary improvement. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4192-4204.]
- [5] 周朕, 蒙吉军, 齐杨, 等. 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. [Zhou Zhen, Meng Jijun, Qi Yang, et al. Importance of ecological lands and their pattern optimization in China: A review. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 218-225.]
- [6] 张骞, 高明, 杨乐, 等. 1988-2013年重庆市主城区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. [Zhang Qian, Gao Ming, Yang Le, et al. Changes in the spatial structure of ecological land and ecosystem service values in nine key districts of Chongqing City over the past 25 years. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 566-575.]
- [7] Grondin P, Gauthier S, Borcard D, et al. A new approach to ecological land classification for the Canadian boreal forest that integrates disturbances. Landscape Ecology, 2014, 29(1): 1-16.
- [8] Chen L, Tang L, Ren Y, et al. Ecological land classification: A quantitative classification and ordination of forest communities adjacent to a rapidly expanding urban area in southeast coastal China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 46-51.
- [9] 戴云哲, 李江风. 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. [Dai Yunzhe, Li Jiangfeng. Terrain gradient effect of spatiotemporal evolution of ecological land and ecosystem service value in Dongting Lake area. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 197-204.]
- [10] Blasi C, Frondoni R. Modern perspectives for plant sociology: The case of ecological land classification and the ecoregions of Italy. Giornale Botanico Italiano, 2011, 145(sup1): 30-37.
- [11] Xie H L, He Y F, Xie X. Exploring the factors influencing ecological land change for China's Beijing-Tianjin-Hebei Region using big data. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(2): 677-687.
- [12] Lemus-Lauzon I, Bhiry N, Woollett J. Assessing the effects of climate change and land use on northern Labrador forest stands based on paleoecological data. Quaternary Research, 2016, 86(3): 260-270.
- [13] Yan D H, Wang G, Wang H, et al. Assessing ecological land use and water demand of river systems: A case study in Luanhe River, North China. Hydrology & Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2469-2483.
- [14] 王静, 王雯, 祁元, 等. 中国生态用地分类体系及其1996-2012年时空分布. 地理研究, 2017, 36(3): 453-470. [Wang Jing, Wang Wen, Qi Yuan, et al. Classification system and spatio-temporal distribution of ecological land in China in the period of 1996-2012. Geographical Research, 2017, 36(3): 453-470.]
- [15] 刘芳, 张红旗. 塔里木盆地生态用地分类及其时空变化研究. 资源科学, 2016, 38(5): 825-836. [Liu Fang, Zhang Hongqi. Ecological land use mapping and spatio-temporal dynamics in the Tarim Basin. Resources Science, 2016, 38(5): 825-836.]
- [16] Liu S H, Wang D Y, Li H, et al. Ecological land fragmentation evaluation and dynamic change of a typical black soil farming area in Northeast China. Sustainability, 2017, 9(2): 300.

- [17] Li F, Ye Y P, Song B W, et al. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: A case study from Changzhou, China. *Ecological Modelling*, 2015, 318(1): 194-203.
- [18] 周锐, 苏海龙, 钱欣, 等. 城市生态用地的安全格局规划探索. *城市发展研究*, 2014, 21(6): 21-27. [Zhou Rui, Su Hailong, Qian Xin, et al. Exploration of urban ecological land planning method based on ecological security pattern. *Urban Development Studies*, 2014, 21(6): 21-27.]
- [19] 张继平, 乔青, 刘春兰, 等. 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. [Zhang Jiping, Qiao Qing, Liu Chunlan, et al. Ecological land use planning for Beijing city based on the minimum cumulative resistance model. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6313-6321.]
- [20] 李益敏, 管成文, 朱军, 等. 基于加权叠加模型的高原湖泊流域重要生态用地识别: 以星云湖流域为例. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(8): 1251-1259. [Li Yimin, Guan Chengwen, Zhu Jun, et al. WSM based identification of important ecological land use in plateau lake basin: A case study of xingyun lake basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(8): 1251-1259.]
- [21] 陈端吕, 陈哲夫, 彭保发. 土地利用生态服务价值与经济协调及空间分异: 以西洞庭湖区为例. *地理研究*, 2018, 37(9): 1692-1703. [Chen Ruilv, Chen Zhefu, Peng Baofa. Spatial differentiation and coupling effect between land ecosystem services value and economic development: A case study of West Dongting Lake area. *Geographical Research*, 2018, 37(9): 1692-1703.]
- [22] 张艳娇, 贾宝全, 马明娟, 等. 山东省安丘市生态用地动态变化. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1874-1881. [Zhang Yanjiao, Jia Baoquan, Ma Mingjuan, et al. Spatiotemporal variations of ecologically used land in Anqiu city, Shandong province, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1874-1881.]
- [23] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 等. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析: 以湖南省为例. *地理研究*, 2015, 34(4): 691-700. [Liu Yongqiang, Liao Liuwen, Long Hualou, et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: A case study of Hunan province. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 691-700.]
- [24] 黄勇, 王凤友, 蔡体久, 等. 环渤海地区景观格局动态变化轨迹分析. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 314-319. [Huang Yong, Wang Fengyou, Cai Tijiu, et al. Landscape pattern dynamic analysis based on change trajectory method in Bohai Rim Area. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2015, 29(2): 314-319.]
- [25] Wang D C, Gong J H, Chen L D, et al. Spatio-temporal pattern analysis of land use/cover change trajectories in Xihe watershed. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 2012, 14(1): 12-21.
- [26] Tobler W R. A Computer movie simulating urban growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 1970, 46(sup1): 234-240.
- [27] 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. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(10): 37-42. [Song Wen, Chen Ying. Selection of observed variables and measuring indicators for the land use spatial autocorrelation analysis. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2015, 29(10): 37-42.]
- [28] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 791-799. [Pan Jinghu, Liu Xiao. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule river basin. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 791-799.]
- [29] 吕韬, 曹有挥. “时空接近”空间自相关模型构建及其应用: 以长三角区域经济差异分析为例. *地理研究*, 2010, 29(2): 351-360. [Lv Tao, Cao Youhui. Construction of spatial autocorrelation method of spatial-temporal proximity and its application: Taking regional economic disparity in the Yangtze River Delta as a case study. *Geographical Research*, 2010, 29(2): 351-360.]
- [30] 姜庆五, 赵飞. 空间自相关分析方法在流行病学中的应用. *中华流行病学杂志*, 2011, 32(6): 539-546. [Jiang Qingwu, Zhao Fei. Application of spatial autocorrelation method in epidemiology. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2011, 32(6): 539-546.]
- [31] 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. *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. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(20): 239-246.]
- [32] 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. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(Sup1): 13-20. [Gao Kai, Zhou Zhixiang, Yang Yuping. Land use structure and its spatial autocorrelation analysis in the Yangtze River Basin. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(Sup1): 13-20.]
- [33] 张孝宇, 张安录. 武汉市耕地非农化的空间自相关分析. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 781-788. [Zhang Xiaoyu,

- Zhang Anlu. Small-scale spatial patterns of farmland conversion based on autocorrelation analysis in wuhan city. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(5): 781-788.]
- [34] 任宇飞, 方创琳. 京津冀城市群县域尺度生态效率评价及空间格局分析. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 87-98. [Ren Yufei, Fang Chuanglin. Spatial pattern and evaluation of eco-efficiency in counties of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Progress in Geography*, 2017, 36(1): 87-98.]
- [35] 李文博, 王冬艳, 李红, 等. 城市土地利用类型与行业单位空间布局关系研究: 以吉林省通化市中心城区为例. *资源科学*, 2016, 38(1): 41-49. [Li Wenbo, Wang Dongyan, Li Hong, et al. The distribution relationship between urban land-use type and industry units in the central urban area of Tonghuacity. *Resources Science*, 2016, 38(1): 41-49.]
- [36] Li S C, Zhao Z Q, Xie M M, et al. Investigating spatial non-stationary and scale-dependent relationships between urban surface temperature and environmental factors using geographically weighted regression. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(12): 1789-1800.
- [37] 李鹏山, 吕雅慧, 张超, 等. 基于核密度估计的京津冀地区耕地破碎化分析. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 281-287. [Li Pengshan, Lv Yahui, Zhang Chao, et al. Analysis of cultivated land fragmentation in Beijing-Tianjin-Hebei region based on kernel density estimation. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 281-287.]
- [38] 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. *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. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(4): 389-400.]
- [39] 龙花楼, 屠爽爽. 土地利用转型与乡村振兴. *中国土地科学*, 2018, 32(7): 1-6. [Long Hualou, Tu Shuangshuang. Land use transition and rural vitalization. *China Land Science*, 2018, 32(7): 1-6.]
- [40] 龙花楼. 论土地利用转型与土地资源管理. *地理研究*, 2015, 34(9): 1607-1618. [Long Hualou. Land use transition and land management. *Geographical Research*, 2015, 34(9): 1607-1618.]
- [41] 龙花楼, 张英男, 屠爽爽. 论土地整治与乡村振兴. *地理学报*, 2018, 73(10): 1837-1849. [Long Hualou, Zhang Yingnan, Tu Shuangshuang. Land consolidation and rural vitalization. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 1837-1849.]

## Study on spatial relevance of ecological-land loss based on change trajectory analysis method

LIU Jinya<sup>1</sup>, WANG Dongchuan<sup>1,2</sup>, SUN Ranhao<sup>3</sup>, WANG Feicui<sup>1</sup>, HU Bingxu<sup>1</sup>,  
CHEN Junhe<sup>1</sup>, SUN Zhichao<sup>1</sup>

(1.School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2.Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center of Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China)

**Abstract:** In view of the shortcomings of the existing research which has split the basic change process of ecological land loss. Based on the land use data of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 1984, 2000 and 2015, the trajectory analysis method was used in this paper to identify the temporal and spatial dynamics of land use change in the study area. In other words, the spatial correlation characteristic of ecological land loss in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration was explored from the perspective of process integrity. On this basis, the spatial autocorrelation analysis method was used to explore the spatial autocorrelation pattern of forest loss, grassland loss and water loss at different scales, and find out the high-incidence area of ecological land loss in this region. At the same time, from the perspective of the integration of the eco- environment of the urban agglomeration, the exploratory suggestions or countermeasures against the loss of ecological land use was proposed. The results showed that (1) From 1984 to 2015, the main changes in land use of the study area were the loss of forest, grassland, water and farmland, and 40% of the lost area turned into artificial surface. (2) The spatial autocorrelation of forest loss, grass loss, and water loss increased with increasing spatial scale. In the 7 km × 7 km spatial scale, There was a strong spatial positive correlation between the three types of ecological land loss, and the spatial positive correlation gradually decreased with the increase of the distance threshold. (3) Under the distance threshold of 10 km, the high incidence areas of forest loss and grassland loss were concentrated in the northwestern part of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, and the high incidence areas of water loss were concentrated near the eastern Bohai Bay. From the perspective of coordinated development of the study area, the eco-environmental protection should resolve differences and unbalanced development and promote the integrated development of this urban agglomeration.

**Keywords:** the change trajectory analysis; spatial autocorrelation analysis; ecological land loss; coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration