

# 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理

陈万旭<sup>1,2</sup>, 李江风<sup>1,2</sup>, 曾杰<sup>1</sup>, 冉端<sup>1,2</sup>, 杨斌<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074;

2. 国土资源部法律评价工程重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 中国复杂的自然要素、社会经济要素、区域发展战略和政策调控形成了当前中国不均衡的经济发展空间格局、土地利用空间格局和生态环境质量空间格局。厘清中国生态环境质量的空间格局及形成机理对中国土地资源的可持续利用和生态环境的有效保护具有重要的实践意义和价值。以往研究缺乏对中国县域尺度土地利用/土地覆被变化生态环境效应的空间分异性及形成机理的相关研究,本研究基于1995—2015年间中国土地利用现状遥感监测数据,尝试采用生态环境质量指数方法测度中国土地利用变化的生态环境效应,并且综合运用重心分析、热点分析工具(Geity-Ord  $G_i^*$ )和地理探测器等研究方法,分析1995—2015年中国生态环境质量时空演变特征及形成机理。研究结果如下:① 东部季风区生态环境质量指数高于青藏高寒区和西北干旱区,东部季风区生态环境质量低值区主要分布在人口和经济集聚的城市群以及省会城市周边地区。研究期间中国生态环境质量重心持续向西北方向迁移;② 1995—2015年间中国生态环境质量变化的热点区域主要分布在西藏地区、新疆、重庆、贵州以及位于黄土高原的省份(青海、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西以及河南)境内,冷点区域主要分布在长江经济带沿线地区省份以及东南部沿海地区省份;③ 土地利用程度对于生态环境质量影响力显著强于其他因子,东部季风区的社会经济和交通区位因子对生态环境质量影响力强于青藏高寒区、西北干旱区和生态大区过渡带;④ 影响因子之间相互作用主要包括非线性增强作用和双因子增强作用两种类型,以非线性增强作用为主。

**关键词:** 生态环境质量;空间分异性;重心分析;热点分析;地理探测器;形成机理;中国

DOI: 10.11821/dlyj020180659

## 1 引言

生态环境问题是当前人类面临的全球性重要问题之一,全球变暖、森林资源锐减、生物多样性丧失等全球性重大生态环境问题严重威胁着人类的生存和发展,全球变化科学逐渐成为了学术界与相关政府部门关注的焦点问题<sup>[1,2]</sup>。20世纪90年代以来中国经济发展取得了巨大成就,同时引发了土地利用的深刻转型,带来了一系列严重的生态环境问题<sup>[3]</sup>。土地利用/土地覆盖变化(Land use/land cover change, LULCC)是地表系统最突出的景观之一,并被广泛认为是全球生态环境变化的主要原因之一<sup>[4]</sup>。当前中国社会正处于制度

收稿日期: 2018-07-02; 修订日期: 2018-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(41701629); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUG160819); 国土资源部法律评价工程重点实验室开放基金项目(CUGFP-1704, CUGFP-1811)

作者简介: 陈万旭(1989-),男,河南信阳人,博士研究生,研究方向为资源环境、区域经济。

E-mail: cugcw@ sina.com

通讯作者: 李江风(1957-),男,湖北武汉人,教授,博士生导师,研究方向为土地利用规划、国土资源调查评价及地质公园规划。E-mail: jfli0524@163.com

2173-2187 页

的深度转型和结构的深刻变迁时期以及城镇化和工业化的加速阶段,社会经济不平衡、土地利用问题与生态环境问题日益严峻。正确评估中国LULCC带来的生态环境效应现状问题及其动态演变规律,准确把握中国生态环境质量区域差异及形成机制,是生态文明制度建设的基础,也是国土空间规划的重要依据。

土地利用/土地覆被变化研究计划是由国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)和全球环境变化的人类因素计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)在1995年共同提出<sup>[5]</sup>。以往LULCC相关研究主要集中在LULCC的时空格局和过程<sup>[6]</sup>,LULCC的驱动力和驱动机制<sup>[7]</sup>,LULCC的模拟和可持续利用<sup>[8]</sup>以及LULCC的生态环境效应研究<sup>[3]</sup>。其中前三者研究相对较为成熟,而LULCC的生态环境效应和形成机理研究受到了越来越多的关注<sup>[5,9]</sup>。LULCC主要通过能量交换、水分循环、土壤侵蚀与堆积、作物生产等主要生态过程对陆地表层土壤、气候、水文以及生物多样性等自然要素的结构和功能产生影响,最终造成生态系统与生态环境发生正向或负向的变化<sup>[7,10-12]</sup>。准确把握区域LULCC的生态环境效应和生态过程以及形成机理是解决生态环境恶化的重要途径<sup>[3]</sup>。随着卫星遥感技术的快速发展以及3S等空间可视化技术手段的创新和发展,土地利用生态环境效应的测度指标和方法有了新的突破,其中一些新的生态环境指标被用于衡量区域生态环境质量的变化。如利用植被覆盖度指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)<sup>[13]</sup>、增强的植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)<sup>[14]</sup>和植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)<sup>[15]</sup>等指标通过监测生物量来测度区域生态环境质量变化。而另外生态系统服务价值模型(Ecosystem Services Value, ESV)<sup>[16]</sup>、新型生态环境质量评价指数(Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI)<sup>[17]</sup>和生态环境质量指数(Eco-environmental Quality Index, EQI)<sup>[18]</sup>等基于遥感解译的LULCC数据的生态环境测度方法已成为学术界测度区域生态环境质量的主要方法。遥感影像数据的解译往往着眼于一定的生态环境视角,即土地利用类型的划分在一定程度上反映不同生态环境的特征<sup>[19]</sup>,可以体现不同生态环境质量的差异。高分辨率遥感影像数据,为科学确定不同土地利用类型的生态差异提供了可能。以往研究主要是对一级土地利用类型进行专家生态赋值<sup>[16]</sup>,而EQI方法是基于二级土地利用覆被类型进行专家生态赋值,可以更加精确地刻画区域LULCC的生态环境效应的空间演化特征<sup>[3,20,21]</sup>。生态环境质量指数方法构建了LULCC与生态环境质量的关联,通过追踪LULCC的结构、数量和空间变化,来定量的刻画中国生态环境质量时空演变特征。因此,本文采用李晓文等提出的生态环境质量指数方法来测度中国LULCC的生态环境效应,该方法自提出后得到了广泛的应用<sup>[34]</sup>。就研究尺度而言,以往学者使用该方法进行了多研究尺度的尝试<sup>[3,22]</sup>,但是鲜有研究使用该方法对全国县域以及不同生态分区的研究。以往研究采用3S技术、空间计量和数理统计等方法对于生态环境的驱动因素进行了多方面的探索和实践,主要从影响区域生态环境的土地利用变化<sup>[23]</sup>、造林项目<sup>[3]</sup>、森林砍伐<sup>[24]</sup>和土地复垦<sup>[25]</sup>等直接因素以及城市化水平<sup>[3]</sup>、经济增长<sup>[2]</sup>、人口迁移<sup>[26]</sup>、交通道路<sup>[27]</sup>、技术发展<sup>[28]</sup>和政策制度<sup>[29]</sup>等间接因素两个大的方面来研究人类活动对生态环境的影响。综述以往研究,对于LULCC的生态环境效应影响因素指标的选择相对较为简单,缺乏对自然因子、社会经济因子和政策调整等多方面的全面综合考虑。就研究方法而言,以往研究鲜有采用重心分析方法、热点分析工具(Getis-Ord  $G_i^*$ )和地理探测器来探索LULCC的生态环境效应的演化特征和形成机理。

长时间序列的中国土地利用现状遥感监测数据为研究中国长时间序列LULCC的生态环境效应提供了可能。本文在前人的研究基础上采用全国1995年、2000年、2005年、

2010年和2015年五个时间点的LULCC数据,结合生态环境质量指数测度方法分析了1995—2015年间中国县域尺度生态环境效应时空演化特征,采用重心分析方法揭示中国生态环境质量空间格局的演变趋势,结合热点分析工具(Getis-Ord  $G_i^*$ )分析中国生态环境质量变化的热点和冷点分布,并借助地理探测器模型探测了中国生态环境质量的影响因素以及空间格局形成机理,以期为缓解中国生态环境质量恶化局面提供科学参考。

## 2 数据来源

研究涉及1995年、2000年、2005年、2010年和2015年LULCC数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),分辨率是1000×1000 m,是目前中国精度最高的土地利用遥感监测数据产品。土地利用类型包括6个一级类型以及25个二级类型<sup>[30,31]</sup>。由于中国县区行政单元变更频繁,县域行政单元人口和GDP数据获取较为困难,本文基于中国科学院资源环境科学数据中心1 km分辨率人口和GDP空间分布公里网格数据集获取1995年、2000年、2005年、2010年和2015年中国县域人口密度和地均GDP。中国人口和GDP空间分布公里网格数据集是在全国分县人口和GDP统计数据的基础上,结合土地利用数据、夜间灯光数据、居民点分布数据与GDP和人口的空间互动规律实现空间化,并得到了广泛的使用<sup>[32,33]</sup>。行政边界数据源于国家基础地理信息中心(NGCC)(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。其他地理探测器因子集数据来源以及计算方法见表1。为更深入刻画中国LULCC的生态环境效应时空格局演化特征,根据自然地理条件,包括地形地貌、地质构造、水热组合和土壤植被特征等自然要素,把中国划分为三个生态大区:东部季风区、青藏高寒区和西北干旱区(<http://www.ecosystem.csdb.cn/>)(图1,见第2177页)。并且本文选取三个生态大区沿交界线100 km内的县域样带,进一步揭示中国三大生态区过渡带生态环境质量形成机理的地域差异性。由于港澳台地区数据缺失,本研究不包括香港、澳门和台湾三个地区。

## 3 研究方法

研究通过评估中国长时间序列LULCC的生态环境效应,定量刻画中国县域和三大生态区以及过渡带生态环境质量时空演化特征。借助重心分析方法和ArcGIS 10.3软件中热点分析工具(Getis-Ord  $G_i^*$ ),识别1995—2015年中国生态环境质量演化过程中的高值和低值在空间上的集聚特征。采用地理探测器模型,综合考虑自然环境、社会经济和政策调控等影响因素,深入探测中国县域和三大生态区以及过渡带的生态环境质量空间分布格局的决定因素。

### 3.1 生态环境质量指数测度

生态环境质量指数方法通过构建LULCC与生态环境质量之间的定量关系,来表征区域内生态环境质量的总体特征<sup>[3,34]</sup>。公式如下:

$$EQI_t = \left( \sum_{i=1}^n LUA_{i,t} \times EV_{i,t} \right) / \sum_{i=1}^n LUA_{i,t} \quad (1)$$

$$C = [(EQI_{t_2} - EQI_{t_1}) / EQI_{t_1}] \times [1 / (t_2 - t_1)] \times 100\% \quad (2)$$

式中: $EQI_t$ 、 $EQI_{t_1}$ 和 $EQI_{t_2}$ 分别代表 $t$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 时生态环境质量指数; $EV_{i,t}$ 代表 $i$ 类土地利用类型 $t$ 时对应的生态环境质量背景值(表2,见第2177页,背景值参考文献[34]); $LUA_{i,t}$ 代

表1 地理探测指标体系

Tab. 1 The index system of geographic detector analysis

一级指标	二级指标	具体指标 (变量)	数据来源	计算方法
自然环境	地形因子	地形起伏度 (X1)	DEM数据源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 ( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )	通过填注处理后的DEM在ArcGIS10.3中使用Block Statistics工具提取
		平均海拔 (X2)	DEM数据中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 ( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )	通过填注处理后的DEM在ArcGIS10.3中使用Zonal Statistic工具提取
	气候因子	年平均降水量 (X3)	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )	通过ArcGIS10.3的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics工具提取
		年平均气温 (X4)	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )	通过ArcGIS10.3的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics工具提取
	土地利用	土地利用强度 (X5)	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )	借鉴庄大方, 刘纪远等 (1997年) 提出的土地利用程度测度模型, 测度中国土地系统在社会因素影响下自然平衡保持状态 <sup>[42]</sup>
		土地利用多样性 (X6)	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )	借鉴Shannon-Wiener指数, 测度中国土地利用的丰富程度, 复杂程度和有序程度 <sup>[43]</sup>
社会经济	人口与经济	人口密度 (X7)	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )	通过ArcGIS10.3的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics工具提取
		地均GDP (X8)	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )	通过ArcGIS10.3的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics工具提取
	交通区位	高等级道路密度 (X9)	2015年交通数据源于国家基础地理信息中心 (NGCC) ( <a href="http://ngcc.sbsm.gov.cn/">http://ngcc.sbsm.gov.cn/</a> ), 1995年、2000年、2005年、和2010年份交通数据通过最新版交通数据矢量化获取	铁路、高速公路和国道密度 (线路长度/面积)
		距地级城市距离 (X10)	地级市中心点数据来源于国家基础地理信息中心 (NGCC) ( <a href="http://ngcc.sbsm.gov.cn/">http://ngcc.sbsm.gov.cn/</a> )	通过ArcGIS10.3的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Distance计算到最近的地级城市距离
政策调控	生态工程	林业工程 (X11)	林业工程项目主要包括重点防护林建设、天然林保护和退耕还林项目	参考Li等确定中国林业工程的空间分布数据 <sup>[56]</sup>

表*t*类土地利用类型*t*时的面积; *n*表示区域土地利用类型数量; *C*代表*t*1到*t*2之间生态环境质量指数变化率。

### 3.2 生态环境质量重心分析

本文引入物理学中的重心概念来揭示生态环境质量的空间演变特征, 生态环境质量在恶化和改善的过程中, 中国生态环境质量重心不断发生变动, 生态环境质量重心的移动反映了中国生态环境质量演化的空间轨迹<sup>[35]</sup>。公式如下:

$$X_t = \frac{\sum_{j=1}^n EQI_{tj} X_j}{\sum_{j=1}^n EQI_{tj}} \quad (3)$$

$$Y_t = \frac{\sum_{j=1}^n EQI_{tj} Y_j}{\sum_{j=1}^n EQI_{tj}} \quad (4)$$

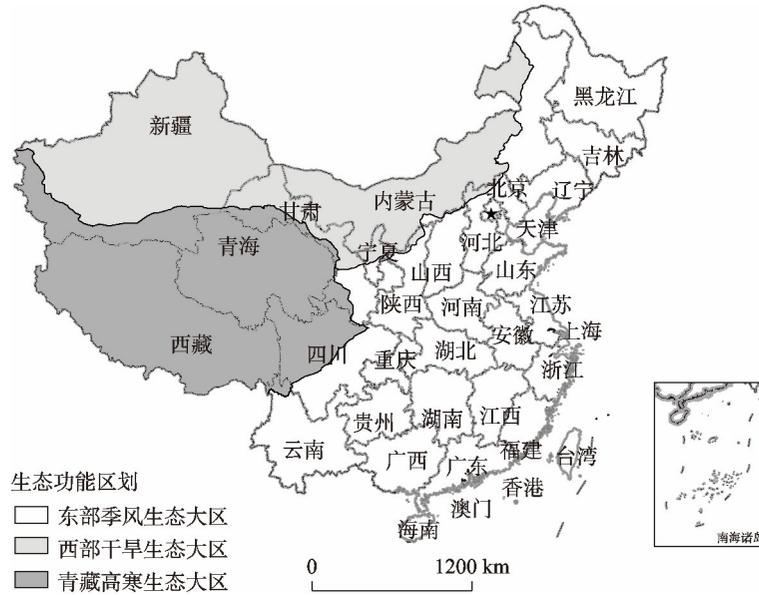


图1 中国生态大区空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of domains in China

注: 此图根据国家测绘地理信息局标准地图(审图号: GS(2016)1569号)绘制, 底图无修改。

表2 土地利用分类及其生态环境质量背景指数

Tab. 2 Land use classification and eco-environmental quality values of different land-use types

一级地类	代码	二级地类	生态环境质量指数	一级地类	代码	二级地类	生态环境质量指数
耕地	11	水田	0.30	水体	45	滩涂	0.45
	12	旱地	0.25		46	滩地	0.55
林地	21	有林地	0.95	建设用地	51	城镇用地	0.20
	22	灌木林	0.65		52	农村居民点	0.20
	23	疏林地	0.45		53	其他建设用地	0.15
	24	其他林地	0.40	未利用地	61	沙地	0.01
草地	31	高覆盖度草地	0.75		62	戈壁	0.01
	32	中覆盖度草地	0.45		63	盐碱地	0.05
	33	低覆盖度草地	0.20		64	沼泽地	0.65
水体	41	河渠	0.55	65	裸土地	0.05	
	42	湖泊	0.75	66	裸岩石砾地	0.01	
	43	水库坑塘	0.55				
	44	永久性冰川雪地	0.90				

式中:  $EQI_{jt}$ 表示j单元t时生态环境质量指数;  $X_j$ 和 $Y_j$ 表示j单元的地理中心坐标;  $X_t$ 和 $Y_t$ 为t时中国的生态环境质量的重心坐标。

### 3.3 生态环境质量变化热点分析

热点分析广泛应用于社会经济和生态环境分析中, 热点和冷点分别代表统计上显著的高值空间聚集和低值空间聚集。本文采用(Getis-Ord  $G_i^*$ )指数测度中国生态环境质量变化中统计显著的热点和冷点空间分布<sup>[36,37]</sup>。具体利用ArcGIS 10.3中空间统计工具(Spa-

tial Statistics Tools) 中热点分析 (Getis-Ord  $G_i^*$ ) 可以得到表示概率的 P 值和标准差的倍数的 Z 得分。0.01, 0.05 和 0.1 是典型概率, Z 得分对应的典型置信区间 90%, 95% 和 99% 的值分别在  $<-1.65$  或  $>1.65$ ,  $<-1.96$  或  $>1.96$  和  $<-2.58$  或  $>2.58$  之间。如果 Z 得分为正值且显著, 表明位置  $i$  单元与临近单元的生态环境质量增加值都相对较高 (高于均值), 属生态环境质量改善集聚区 (热点区); 相反, 如果 Z 得分为负值且显著, 则表明  $i$  单元与临近单元的生态环境质量降低显著 (低于均值), 属生态环境质量恶化集聚区 (冷点区)。

### 3.4 地理探测器模型

地理探测器模型 (<http://www.geodetector.org/>) 由王劲峰团队提出<sup>[38]</sup>, 可以用来探测地理要素空间分异性, 是揭示地理要素背后驱动因子的一种新的统计学方法。该模型主要是通过分析地理空间各类型区之间的整体差异性来定量地测度自变量相对于因变量的重要程度, 该模型自提出后在社会经济和生态环境领域得到了广泛的应用<sup>[37,39,40]</sup>。本文采用地理探测器模型对中国县域及不同分区影响生态环境质量的自然因子、社会因子以及政策因子的影响力进行探测。公式如下:

$$P_{D,H} = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (5)$$

式中:  $P_{D,H}$  为生态环境质量空间分异影响因素探测力指标;  $N_h$  为次一级区域样本单元数;  $N$  为整个区域样本单元数;  $L$  为次级区域个数;  $\sigma^2$  为整个区域生态环境质量的方差;  $\sigma_h^2$  为次一级区域的方差。 $P_{D,H}$  的取值区间为  $[0, 1]$ ,  $P_{D,H}=0$  时, 表明生态环境质量是随机分布的, 不存在空间异质性;  $P_{D,H}=1$  时, 表明生态环境质量空间分异质性最强。

交互探测器的主要目的是探测各自变量在解释应变量时是独立产生影响, 还是相互作用后产生增强或者减弱解释能力<sup>[38]</sup>。两个因子相互作用后会出现如下五种情况:

- (1)  $P(x \cap y) < \min(P(x), P(y))$ , 说明因子  $x$  和  $y$  交互后非线性减弱;
- (2)  $\min(P(x), P(y)) < P(x \cap y) < \max(P(x), P(y))$ , 说明因子  $x$  和  $y$  交互后单因子非线性减弱;
- (3)  $P(x \cap y) > \max(P(x), P(y))$ , 说明因子  $x$  和  $y$  交互后双因子加强;
- (4)  $P(x \cap y) > P(x) + P(y)$ , 说明因子  $x$  和  $y$  交互后非线性加强;
- (5)  $P(x \cap y) = P(x) + P(y)$ , 说明因子  $x$  和  $y$  相互独立。

中国生态环境质量空间格局是在多种因素的综合作用下形成。本文从自然要素、社会经济要素和政策调控等三方面选择了 11 个因子来探测中国生态环境质量空间格局形成机理 (表 1)。其中自然要素是中国生态环境质量空间格局形成的本底, 本研究主要从地形因子、气候因子和土地利用三方面选择了 6 个因子。其中地形的发育过程是比较缓慢的, 但是地形因子是生态环境质量时空分布格局形成的决定性因子, 本文选择了地形起伏度 ( $X_1$ ) 和平均海拔 ( $X_2$ ) 来探测地形因子对生态环境质量空间分布格局的影响力。气候因子是区域生态环境质量演变中最直接也是最敏感的因子, 气候因子可以在任何时空尺度上影响区域生态环境质量演变, 在区域生态环境质量演变过程中起着决定性的作用<sup>[41]</sup>。历史时期地质构造等地质事件决定着生态环境质量的演变过程和趋势, 而在短时期内人类活动和部分气候因素如年平均降水量 ( $X_3$ ) 和年平均气温 ( $X_4$ ) 等是生态环境质量演变的主要驱动因素。土地利用/土地覆被变化是地球表层系统最突出的景观标志, 因此本研究选择土地利用强度 ( $X_5$ ) 和土地利用多样性 ( $X_6$ ) 表征人类活动对土地利用的干扰程度。社会经济活动因素是影响生态环境演变中最具活力的因素, 本文选择人口密度 ( $X_7$ ) 和地均 GDP ( $X_8$ ) 来反映社会经济活动。交通区位因素同样是生态环境质量演化的重要影响因素, 本研究选择高等级道路密度 ( $X_9$ ) 和距地级城市距离 ( $X_{10}$ ) 来表征区位因素。同时生态环境质量的演变也受到政策调控的影响, 中国实施的一系列生

态保护工程对于生态环境质量改善具有积极作用<sup>[36]</sup>。为了深入探索生态环境质量演变机理,本研究结合中国政府实施的一系列国家生态保护工程(X11),包括重点防护林建设项目(Key Shelterbelt Construction Program, KSCP),天然林保护项目(Natural Forest Conservation Program, NFCP)和退耕还林项目(Grain to Green Program, GTGP)等<sup>[36]</sup>,对生态环境质量演化机理进行分析。其中KSCP项目始于1978年,NFCP项目始于1998年,GTGP项目始于1999年。本研究所有数据都通过ArcGIS10.3的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics工具处理,通过Join功能把处理结果Excel数据导入县域矢量数据,构建了中国县域单元生态环境质量评价和影响因子指标数据库,实现自然因素、社会经济因素和政策调控因素的定量化和空间化。

## 4 结果与分析

### 4.1 1995—2015年中国生态环境质量时空分布

1995—2015年间中国生态环境质量指数测度结果表明,期间中国生态环境质量总体保持稳定,主要是由于一定时期内中国生态环境质量同时发生着好转和恶化两种相反趋势相互综合造成的结果。1995—2000年间中国生态环境质量指数有显著提升,由1995年的0.404增加到2000年的0.420。这与中国这一时期实施的包括重点防护林建设项目(Key Shelterbelt Construction Program, KSCP),天然林保护项目(Natural Forest Conservation Program, NFCP)和退耕还林项目(Grain to Green Program, GTGP)不无关系。2000—2015年间中国生态环境质量指数持续降低,由2000年的0.420降低到2015年的0.418。主要是由于21世纪以来,中国在城市化和工业化等方面取得了巨大成就,对城市建设用地需求也随之增加,工业用地和交通用地面积迅速增加占用了大量耕地资源,导致耕地资源日趋紧张,日益严重的人地矛盾引发了毁林开荒、围湖造田等一系列严重的生态环境破坏的土地利用活动。从生态环境质量空间分布来看,研究期间中国生态环境质量空间格局基本保持稳定(图2)。东部季风区南部生态环境质量总体强于北部地区,具体来说东部季风区南部地区生态环境质量低值区主要分布在城市群地区(珠三角城市群、长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群)和大城市的周边地区,东部季风区北部地区生态环境质量低值区同样主要分布在城市群地区(京津冀城市群以及东北地区沿哈大线由南向北分布的辽宁沿海经济带、辽中南城市群、沈阳经济区和哈长城市群地区)以及位于华

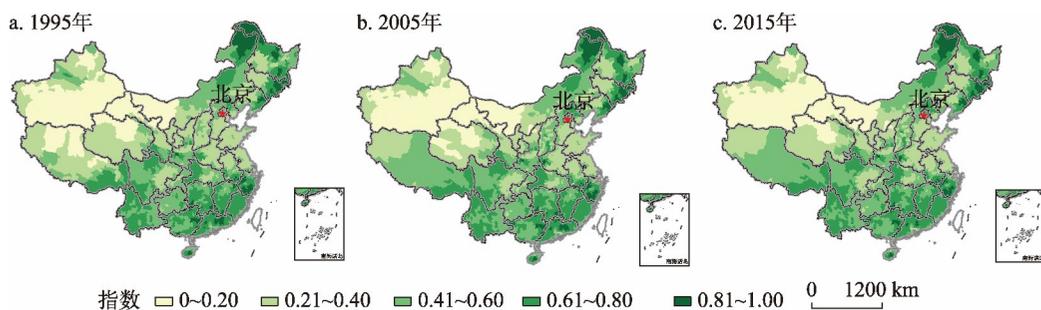


图2 1995年、2005年和2015年中国生态环境质量指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of China's eco-environmental quality index in 1995, 2005, and 2015

注:此图根据国家测绘地理信息局标准地图(审图号:GS(2016)1569号)绘制,底图无修改。

北平原的省份。这些地区基本位于中国第一阶梯，是中国人口和经济集聚区，交通便利，经济聚集效应强，社会经济的发展和人口的集聚是导致这些地区生态环境质量偏低的主要原因。青藏高寒区和西北干旱区是中国生态环境质量的低值区，这些地区主要位于中国的第二三阶梯，海拔高，自然条件复杂，平均气温低，降水稀少，气候干燥，植被覆盖度低，塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠等大沙漠广泛分布，这些地区均具有生态环境脆弱以及生态环境承载力低下的特征。这些地区除了青海省西宁市和新疆乌鲁木齐地区等省会城市以及周边地区以外，绝大部分地区是人口稀疏区和经济发展落后区，恶劣的自然条件是这些区域生态环境质量较低的主要原因。从三大生态分区来看（图3），东部季风区生态环境质量指数最高，1995—2000年间略有增加，2000—2015年间持续降低；西北干旱区生态环境质量指数最低，1995—2005年间西北干旱区生态环境质量持续降低，随后十年间有所改善。

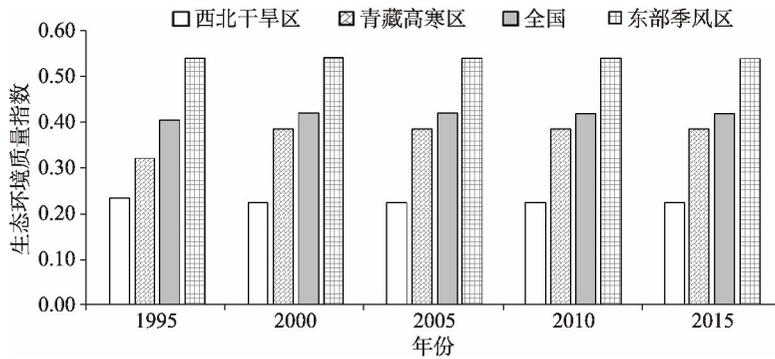


图3 1995—2015年中国三大生态区生态环境质量指数  
Fig. 3 Eco-environmental quality index of the Three domains in China from 1995 to 2015

#### 4.2 1995—2015年中国生态环境质量重心轨迹

根据公式（3）和公式（4）计算中国生态环境质量重心，可以看出1995—2015年间中国生态环境质量重心基本保持稳定（图4）。1995—2015年间中国生态环境质量重心分布在湖北省襄阳市的襄州区，并持续向中国西北方向迁移。其中1995—2000年间向西北方向迁移了16.444 km，其他年份迁移距离不大，说明1995—2000年间中国西北地区生态环境质量有明显的改善，而东南地区生态环境质量有显著的恶化。2000—2015年间西北地区的生态环境质量改善和东南地区生态环境质量恶化的趋势仍在持续，但是变化不显著。从三大自然地带生态环境质量变化也可以看出，东部季风区生态环境质量在总体降低，而西北干旱区和青藏高寒区总体在改善。结合土地利用变化来说东部季风区是中国的人口和经济的集聚区，同时也是中国城镇化的领先区域，大量的建设用地增加带来了生态环境质量的恶化；西北干旱区和青藏高寒区未利用地



图4 1995—2015年中国生态环境质量指数重心演变轨迹  
Fig. 4 The movement trace of eco-environmental quality index center of gravity in China from 1995 to 2015

面积广泛分布,西部开发导致大量的低生态环境质量背景指数未利用地转为其他高生态环境质量背景指数土地利用类型,进而改善了区域生态环境质量。

### 4.3 1995—2015年中国生态环境质量变化冷热点格局演化特征

为了深入的探测 1995—2015 年间中国生态环境质量空间演化特征,本文采用 ArcGIS 10.3 中全局空间自相关 (Global Moran's I) 工具对中国生态环境质量变化空间格局进行分析,1995—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年以及 2010—2015 年间中国生态环境质量变化 Moran's I 指数分别为 0.612、0.181、0.234 和 0.257, Z 得分分别为 53.890、17.461、20.818 和 23.067,  $P=0.001$ 。说明中国生态环境质量变化具有较强的空间集聚性。再运用 ArcGIS 10.3 热点分析工具,进行局部空间自相关分析,结果如图 5。1995—2000 年间中国生态环境质量改善区主要集中在两个较大的热点区域和一个小的热点区,较大的热点区域位于西藏地区和青海省的三江源地区以及以山西省为核心的位于黄土高原的省份,较小的热点区域位于甘肃省的西部;期间中国生态环境质量恶化区主要集中在两个较大的冷点区和若干较小的冷点区,其中内蒙古内陆地区和长江经济带沿线省份是两个主要的冷点区域,其他较小的冷点区域分布中国东北地区。2000—2005 年间中国生态环境质量改善区主要分布在三个热点区,分布位于以陕西省为核心的黄土高原的省份、内蒙古和甘肃的西北地区以及新疆的北部地区;冷点区域主要集中在京津冀地区和东南沿海省份。2005—2010 年间中国生态环境质量变化冷点区域主要分布在中国

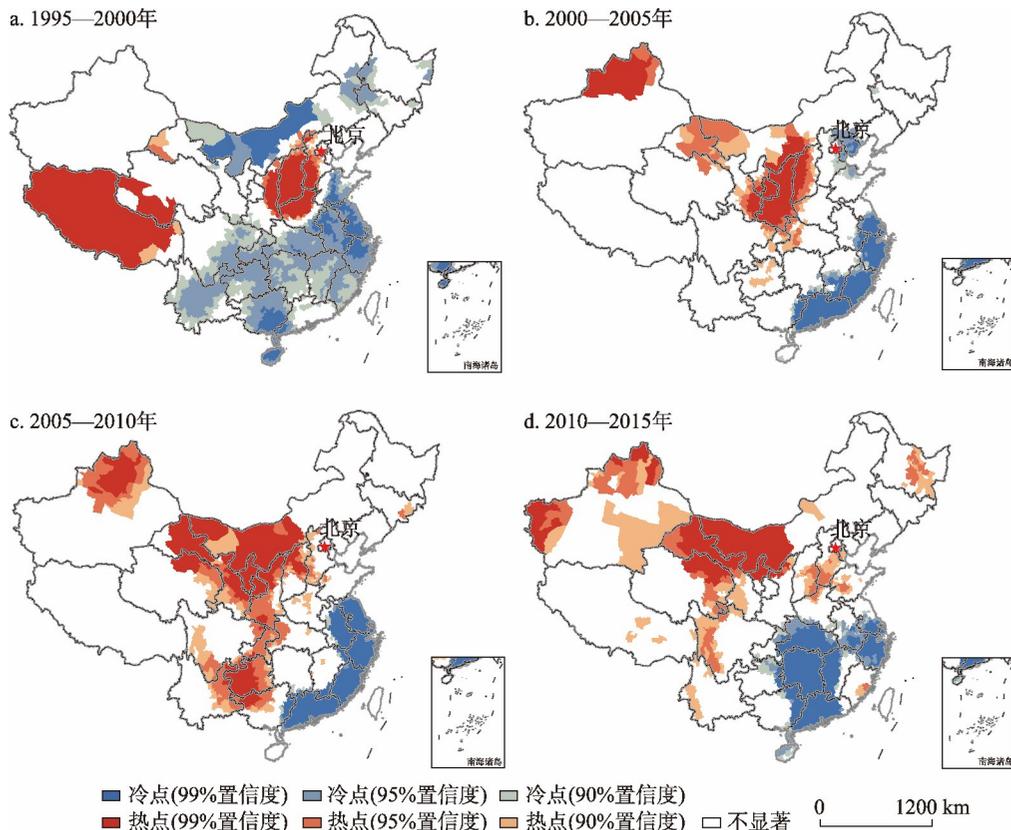


图5 1995—2015年中国生态环境质量变化热点和冷点空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of hot spots and cold spots of eco-environmental quality changes in China from 1995 to 2015

注: 此图根据国家测绘地理信息局标准地图(审图号: GS(2016)1569号)绘制,底图无修改。

东南部沿海省份,包括江苏、上海、浙江、福建、广东和安徽的大部分地区;热点区域转移到新疆的北部地区和内蒙古中部地区-甘肃-宁夏-陕西-重庆-贵州一线。2010—2015年间中国生态环境质量变化冷点区域主要集中在长江中游的湖北、湖南和江西以及长三角和珠三角周边省份;热点区域主要分布在内蒙古和甘肃的大部分地区以及新疆的西部和北部地区。1995—2015年间中国生态环境质量变化的冷热点空间变化和中国的区域开发战略以及三北防护林体系建设工程、太行山绿化工程和黄河中游防护林体系建设工程等生态保护工程的实施有密切关系。

#### 4.4 1995—2015年中国生态环境质量空间分异性成因探测

**4.4.1 影响因子探测及其分析** 根据模型5,对中国土地利用变化生态环境效应的空间格局形成机理进行探测。研究结果表明中国生态环境质量受到多种自然因子、社会经济因子和政策调控的综合影响,不同影响因子对生态环境质量的影响具有显著差异。总体可以发现,土地利用程度对于生态环境质量指数影响力显著强于其他因子,东部季风区社会经济和交通区位因子对生态环境质量影响力强于青藏高寒区、西北干旱区和生态大区过渡带,不同分区又有显著区别(图6)。具体来说,研究期间全国范围内以及三大生态区和生态大区过渡带地形起伏度对生态环境质量的影响持续增加,东部季风区和全国县域增加尤为显著。而1995—2000年间青藏高寒区和西北干旱区平均海拔对生态环境质量的影响有降低趋势,随后又持续缓慢增加。从全国范围来看年平均降水量对生态环境质量的影响强于年平均气温,对于青藏高寒区则年平均气温对生态环境质量的影响强于年

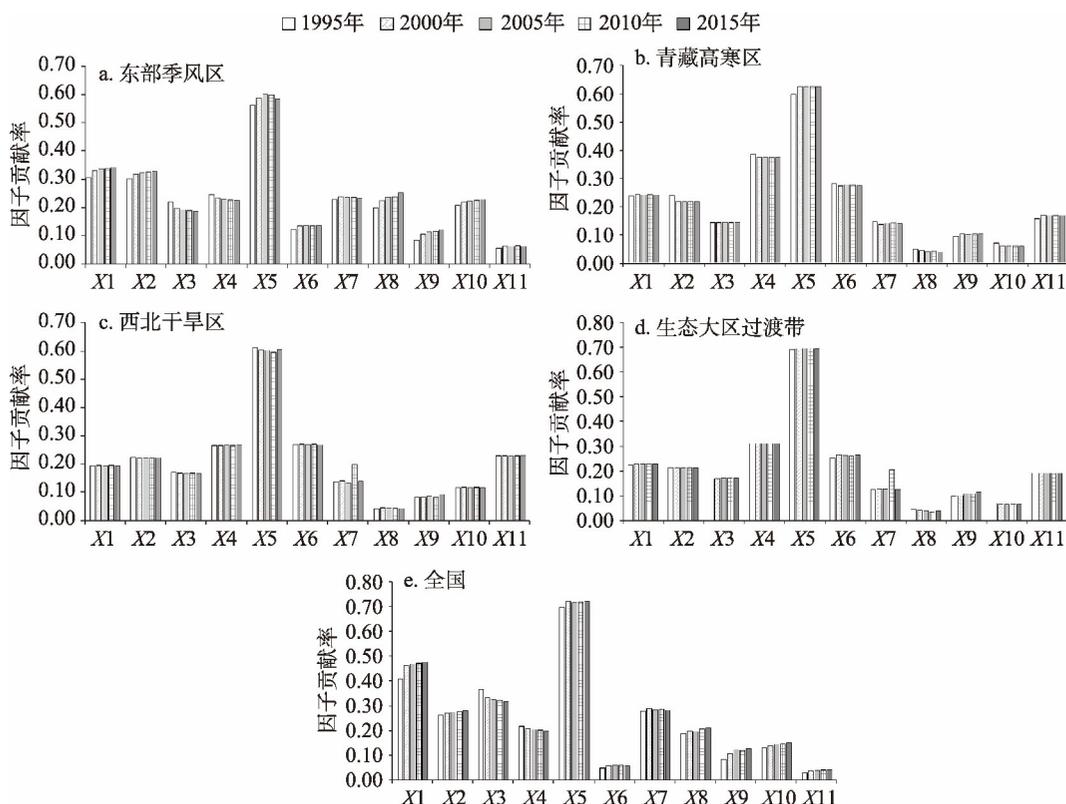


图6 1995—2015年影响因子贡献率

Fig. 6 Contribution rates of influence factors from 1995 to 2015

注: 图中变量X1—X11的解释见表2。

平均降水量。东部季风区年平均气温和年平均降水量对生态环境质量的影响逐渐降低, 其他分区则变化不明显。土地利用因子中土地利用强度对生态环境质量的影响显著高于土地利用多样性, 并且生态大区过渡带土地利用程度对生态环境的影响显著高于其他区域, 表明生态大区过渡带容易受到土地利用程度的干扰。东部季风区社会经济和交通区位因子对生态环境质量影响力强于青藏高寒区、西北干旱区和生态大区过渡带。主要是由于东部季风区是中国人口和经济集中区, 交通便利, 社会经济发展和交通区位对生态环境造成巨大压力。1995—2015年间东部季风区地均GDP、高等级道路密度和距地级城市距离对生态环境质量的影响逐渐增强, 而其他区域则有所降低, 这也是中国东部地区生态环境质量降低, 西北地区生态环境质量改善的主要原因。林业工程对于西北干旱区的影响力显著高于其他地区, 说明中国三北防护林体系建设工程对于缓解中国西北地区生态环境质量恶化起到了一定的作用。1995—2015年间林业工程对于中国生态环境质量的影响力在全国范围以及各个分区都有逐渐增强的趋势, 说明中国实施的一系列生态保护工程为中国生态环境质量的提高持续发挥作用。

**4.4.2 演化机制分析** 基于地理探测器交互探测分析结果, 可以发现1995—2015年间影响因子对于生态环境质量的影响并不是单独发生作用, 而是呈现协同增强的作用效果, 主要包括非线性增强作用和双因子增强作用这两种作用方式, 但前者作用明显强于后者(见表3, 本文仅列出了部分因子交互作用值)。研究期间, 全国范围内以及各分区内土地利用强度和其他因子之间交互作用强度强于其他因子之间的交互作用, 自然要素和社会经济要素之间的交互作用强于因子内部的交互作用。土地利用程度反映了社会经济因素对土地自然综合体的干扰程度, 因此各影响因子和土地利用程度之间的作用程度最为复杂。自然要素是中国生态环境空间格局的重要基础, 对于生态环境质量具有重要影响, 但是自然要素和社会经济要素协同增强对生态环境质量产生影响。中国疆域最辽阔, 地形条件复杂, 气候类型多样形成了独特的土地利用格局和经济发展格局, 不同分

表3 主要交互因子及其变化

Tab. 3 The main interaction factors and associated changes

	全国	东部季风区	青藏高寒区	西北干旱区	生态大区过渡带
1995年	X2∩X5 (0.846)	X2∩X5 (0.870)	X1∩X5 (0.813)	X1∩X5 (0.825)	X1∩X5 (0.859)
	X3∩X5 (0.890)	X4∩X5 (0.785)	X4∩X5 (0.806)	X6∩X5 (0.799)	X6∩X5 (0.860)
	X4∩X5 (0.844)	X6∩X5 (0.800)	X6∩X5 (0.834)	X7∩X5 (0.798)	X7∩X5 (0.837)
	X6∩X5 (0.846)	X10∩X5 (0.823)	X7∩X5 (0.797)	X10∩X5 (0.805)	X8∩X5 (0.825)
	X2∩X5 (0.859)	X2∩X5 (0.883)	X1∩X5 (0.827)	X1∩X5 (0.823)	X1∩X5 (0.857)
2000年	X3∩X5 (0.901)	X3∩X5 (0.794)	X4∩X5 (0.805)	X7∩X5 (0.790)	X6∩X5 (0.860)
	X4∩X5 (0.851)	X8∩X5 (0.838)	X8∩X5 (0.806)	X10∩X5 (0.807)	X7∩X5 (0.840)
	X6∩X5 (0.858)	X10∩X5 (0.842)	X9∩X5 (0.846)	X11∩X5 (0.786)	X8∩X5 (0.828)
	X2∩X5 (0.859)	X2∩X5 (0.877)	X1∩X5 (0.826)	X1∩X5 (0.823)	X1∩X5 (0.858)
	X3∩X5 (0.900)	X3∩X5 (0.811)	X6∩X5 (0.844)	X6∩X5 (0.803)	X6∩X5 (0.866)
2005年	X4∩X5 (0.848)	X8∩X5 (0.831)	X7∩X5 (0.805)	X10∩X5 (0.806)	X7∩X5 (0.841)
	X6∩X5 (0.853)	X10∩X5 (0.847)	X8∩X5 (0.806)	X11∩X5 (0.787)	X8∩X5 (0.828)
	X2∩X5 (0.860)	X2∩X5 (0.878)	X1∩X5 (0.826)	X1∩X5 (0.825)	X1∩X5 (0.857)
	X3∩X5 (0.901)	X3∩X5 (0.812)	X4∩X5 (0.805)	X6∩X5 (0.791)	X6∩X5 (0.863)
	X4∩X5 (0.849)	X8∩X5 (0.832)	X6∩X5 (0.843)	X7∩X5 (0.825)	X8∩X5 (0.831)
2010年	X6∩X5 (0.857)	X10∩X5 (0.849)	X8∩X5 (0.807)	X10∩X5 (0.806)	X7∩X5 (0.866)
	X2∩X5 (0.862)	X2∩X5 (0.878)	X1∩X5 (0.824)	X1∩X5 (0.828)	X1∩X5 (0.856)
	X3∩X5 (0.903)	X3∩X5 (0.801)	X6∩X5 (0.851)	X6∩X5 (0.803)	X6∩X5 (0.868)
	X4∩X5 (0.851)	X8∩X5 (0.835)	X7∩X5 (0.805)	X10∩X5 (0.807)	X8∩X5 (0.832)
	X6∩X5 (0.862)	X10∩X5 (0.843)	X8∩X5 (0.811)	X11∩X5 (0.788)	X7∩X5 (0.841)

区的因子之间形成了独特的相互作用模式。具体来说,各个分区因子之间都表现出显著的非线性增强效应,自然要素、社会经济和政策调控因素共同作用影响区域生态环境质量空间格局的形成。东部季风区社会经济发展活跃,各要素之间的相互作用较为复杂,各要素共同作用下形成了当前东部季风区生态环境质量格局。生态大区过渡带具有特殊的地理要素特征,但是社会经济要素增强了自然要素对生态环境质量的影响。西北干旱区林业工程和其他因子作用较为强烈,表明西北干旱区政策调控和其他因子之间协同增强影响西北干旱区生态环境质量。

## 5 结论与讨论

本文基于1995—2015年LULCC数据以及生态环境质量指数测度方法测度了中国生态环境质量时空分布格局特征,借助重心分析以及热点分析工具(Getis-Ord  $G_i^*$ )分析了中国生态环境质量空间演变特征,并结合地理探测器模型选择自然因子、社会经济因子和政策调控因子对中国生态环境质量空间分异形成机理进行探索分析,有效的揭示了中国县域以及不同自然地理分区生态环境质量空间分布格局及其形成机理。具体研究结果如下:

(1) 中国生态环境质量指数总体在降低,东部季风区生态环境质量指数高于青藏高寒区和西北干旱区。东部季风区生态环境质量低值区主要是由于社会经济发展所致,青藏高寒区和西北干旱区主要是由于自然条件恶劣所致。研究期间中国东部季风区生态环境质量有所降低,而西北干旱区和青藏高寒区生态环境质量有所改善,中国生态环境质量重心持续向西北方向迁移。西部大开发等区域发展战略以及生态保护工程的实施促进了西北地区土地利用类型由低生态环境质量背景类型向高生态环境质量背景转型,带来了生态环境质量的改善。东部季风区是中国的人口和经济的集聚区,城镇化和工业化加速了土地利用类型由高生态环境质量背景类型向低生态环境质量背景转型,国土空间有序开发是缓解生态环境恶化的主要途径。

(2) 热点分析结果表明研究期间热点区域主要分布在西藏、新疆、重庆、贵州以及位于黄土高原的省份(青海、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西以及河南)境内。冷点区域主要分布在长江经济带沿线地区省份、东南部沿海省份。中国生态环境质量变化的冷热点空间演变和中国的区域发展战略以及生态保护工程的实施有密切关系。

(3) 土地利用程度对于生态环境质量指数影响力显著高于其他因子,东部季风区社会经济和交通区位因子对生态环境质量影响力强于青藏高寒区、西北干旱区和生态大区过渡带。林业工程对于西北干旱区的影响强于其他区域,而且中国林业工程对中国生态环境质量的改善发挥着持续的作用。影响因子之间以非线性增强作用和双因子增强作用为主,但前者明显作用大于后者。

本文基于中国长时间序列土地利用现状遥感监测数据测度了中国土地利用变化的生态环境效应,揭示了土地利用过程中土地结构与功能的变化所带来的生态环境影响,在一定程度上为中国土地资源可持续利用提供了科学参考。土地利用变化是生态系统结构和功能变化的直接原因,国土空间的有序开发,可以在一定程度上缓解生态系统退化。本文尝试用地理探测器模型探测了中国县域以及不同分区生态环境质量空间格局形成机理,不同分区内显著的自然要素、社会经济要素和政策调控的差异性形成了不同的协同作用模式,在一定程度上揭示了中国生态环境质量格局形成机制。本文探测了自然要素、社会经济要素和政策调控等方面因子对生态环境质量的影响,但是仍然缺乏对土地利用隐性形态(土壤质量、产权、价格、管理方式、投入和产出等方面)以及土地利用

政策等方面的综合考虑。未来的研究需要综合考虑土地显性形态变化、隐性形态变化以及自然要素、社会经济要素和政策调控对生态环境质量的影响。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Rind D. Complexity and climate. *Science*, 1999, 284(5411): 105-107.
- [ 2 ] Arrow K, Bolin B, Costanza R, et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Science*, 1995, 268(5210): 520-521.
- [ 3 ] Liu Y, Huang X, Yang H, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China Karst area: A case study of Guiyang. *Habitat International*, 2014, 44: 339-348.
- [ 4 ] Vitousek P M. Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology*, 1994, 75(7): 1861-1876.
- [ 5 ] 后立胜, 蔡运龙. 土地利用/覆被变化研究的实质分析与进展评述. *地理科学进展*, 2004, 26(6): 96-104. [Hou Lisheng, Cai Yunlong. An essential analysis and review on land use/cover change research. *Progress in Geography*, 2004, 23(6): 96-104.]
- [ 6 ] Dewan A M, Yamaguchi Y. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography*, 2009, 29(3): 390-401.
- [ 7 ] Lambin E F, Turner B L, Geist H J, et al. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2001, 11(4): 261-269.
- [ 8 ] Tan R, Liu Y, Zhou K, et al. A game-theory based agent-cellular model for use in urban growth simulation: A case study of the rapidly urbanizing Wuhan area of central China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, 49: 15-29.
- [ 9 ] Du X, Huang Z. Ecological and environmental effects of land use change in rapid urbanization: The case of Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 243-251.
- [10] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The US carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285(5427): 574-578.
- [11] Chase T N, Pielke Sr R A, Kittel T G F, et al. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics*, 2000, 16(2): 93-105.
- [12] Sala O E, Chapin F S, Armesto J J, et al. Biodiversity-global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [13] Li Y, Cao Z, Long H, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 697-715.
- [14] Matsushita B, Yang W, Chen J, et al. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest. *Sensors (Basel)*, 2007, 7(11): 2636-2651.
- [15] Plutzer C, Kroisleitner C, Haberl H, et al. Changes in the spatial patterns of human appropriation of net primary production (HANPP) in Europe 1990-2006. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(5): 1225-1238.
- [16] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [17] 王士远, 张学霞, 朱彤, 等. 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价. *地理科学进展*, 2016, 35(10): 1269-1278. [Wang Shiyuan, Zhang Xuexia, Zhu Tong, et al. Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology. *Progress in Geography*, 2016, 35(10): 1269- 1278.]
- [18] Song W, Deng X. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. *Science of The Total Environment*, 2017, 576: 705-719.
- [19] 董智新, 刘新平. 新疆土地利用的生态环境效应分析. *资源开发与市场*, 2009, 25(4): 301-303. [Dong Zhixin, Liu Xinping. Land-use and assessment of its eco-environment effects in Xinjiang. *Resource Development & Market*, 2009, 25(4): 301-303.]
- [20] Yi L, Zhang Z, Zhao X, et al. Have changes to unused land in China improved or exacerbated its environmental quality in the past three decades? *Sustainability*, 2016, 8(2): 184.
- [21] Lv L, Li Y, Yan S. The Spatio-temporal pattern of regional land use change and eco-environmental responses in Jiangsu, China. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(3): 268-276.
- [22] Zhang H, Xu E, Zhu H. Ecological-living-productive land classification system in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(2): 121-128.
- [23] 宋戈, 李娜, 李静, 等. 建三江垦区土地利用/覆盖变化与生态环境效应作用机理研究. *经济地理*, 2011, 31(5): 816-

821. [Song Ge, Li Na, Li Jing, et al. The land use/land cover change and its environmental effects the interaction mechanism in Jian Sanjiang. *Economic Geography*, 2011, 31(5): 816-821.]
- [24] Stern D I, Common M S, Barbier E B. Economic growth and environmental degradation: The environmental kuznets curve and sustainable development. *World Development*, 1996, 24(7): 1151-1160.
- [25] Miao Z, Marrs R. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi Province, China. *Journal of Environmental Management*, 2000, 59(3): 205-215.
- [26] John P. Holdren P R E. Human population and the global environment: Population growth, rising per capita material consumption, and disruptive technologies have made civilization a global ecological force. *American Scientist*, 1974, 62(3): 282-292.
- [27] Cuperus R, Bakermans M M G J, Haes H A U D, et al. Ecological compensation in Dutch Highway planning. *Environmental Management*, 2001, 27(1): 75-89.
- [28] Rennings K. Redefining innovation — eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, 2000, 32(2): 319-332.
- [29] Macdonald D, Crabtree J R, Wiesinger G, et al. Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response. *Journal of Environmental Management*, 2000, 59(1): 47-69.
- [30] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. *地理研究*, 2003, 22(1): 1-12. [Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang, et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 1-12.]
- [31] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析. *地理学报*, 2009, 64(12): 1411-1420. [Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1411-1420.]
- [32] Zhang Y, Liu Y, Zhang Y, et al. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: A case study in Wuhan, China. *Science of The Total Environment*, 2018, 637-638: 780-790.
- [33] Peng J, Tian L, Liu Y, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. *Science of The Total Environment*, 2017, 607-608: 706-714.
- [34] 李晓文, 方创琳, 黄金川, 等. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应: 以甘肃河西地区为例. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 280-290. [Li Xiaowen, Fang Chuanglin, Huang Jinchuan, et al. The urban land use transformations and associated effects on eco-environment in northwest China arid region: A case study in Hexi region, Gansu Province. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 280-290.]
- [35] 杨振, 雷军, 段祖亮, 等. 新疆人口的空间分布特征. *地理研究*, 2016, 35(12): 2333-2346. [Yang Zhen, Lei Jun, Duan Zuliang, et al. Spatial distribution of population in Xinjiang. *Geographical Research*, 2016, 35(12): 2333-2346.]
- [36] Li G, Fang C, Wang S. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China. *Science of the Total Environment*, 2016, 545-546: 609-620.
- [37] 武鹏, 李同昇, 李卫民. 县域农村贫困化空间分异及其影响因素: 以陕西山阳县为例. *地理研究*, 2018, 37(3): 593-606. [Wu Peng, Li Tongsheng, Li Weimin. Spatial differentiation and influencing factors analysis of rural poverty at county scale: A case study of Shanyang county in Shaanxi province, China. *Geographical Research*, 2018, 37(3): 593-606.]
- [38] Wang J, Zhang T, Fu B. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016,(67): 250-256.
- [39] 刘春芳, 王川, 刘立程. 三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制: 以榆中县为例. *地理研究*, 2018, 37(2): 419-432. [Liu Chunfang, Wang Chuan, Liu Licheng. Spatio-temporal variation on habitat quality and its mechanism within the transitional area of the Three Natural Zones: A case study in Yuzhong county. *Geographical Research*, 2018, 37(2): 419-432.]
- [40] 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 等. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析. *地理研究*, 2018, 37(1): 171-182. [Ye Yanjun, Qi Qingwen, Jiang Lili, et al. Impact factors of grain output from farms in Heilongjiang reclamation area based on geographical detector. *Geographical Research*, 2018, 37(1): 171-182.]
- [41] 杨改河, 王得洋, 冯永忠. 江河源区生态环境演变与质量评价研究. 北京: 科学出版社, 2008: 302-332. [Yang Gaihe, Wang Deyang, Feng Yongzhong. Study on the Evolution and Quality Evaluation of Ecological Environment in the Source Region of the Yangtze and Yellow Rivers. Beijing: Science Press, 2008: 302-332.]
- [42] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 10-16. [Zhuang Dafang, Liu Jiyuan. Study on regional differentiation model of land use level in China. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 10-16.]
- [43] Trincsi K, Pham T, Turner S. Mapping mountain diversity: Ethnic minorities and land use land cover change in Vietnam's borderlands. *Land Use Policy*, 2014, 41: 484-497.

## Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China

CHEN Wanxu<sup>1,2</sup>, LI Jiangfeng<sup>1,2</sup>, ZENG Jie<sup>1</sup>, RAN Duan<sup>1,2</sup>, YANG Bin<sup>1,2</sup>

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Legal Assessment Project, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The complex physical elements, socioeconomic elements, regional development strategies, and policy adjustments have formed China's current unbalanced spatial economic development pattern, spatial land use pattern, and spatial eco-environmental quality pattern. The unclear eco-environmental quality formation mechanism would limit the sustainable land use and the effective conservation of the ecological environment in China. Few studies have examined the spatial heterogeneity and the formation mechanism of China's eco-environmental quality at the national scale. This paper uses the eco-environmental quality index method to measure the eco-environmental effects of land use/land cover change (LULCC) to provide an overall review of eco-environmental quality index under complex physical and socioeconomic circumstances in China. We analyze the spatiotemporal evolution features and formation mechanism of eco-environmental quality from 1995 to 2015 with the gravity center analysis method, hot-spots analysis tool (Getis-Ord  $G_i^*$ ), and Geo-detectors tool. The results are as follows: (1) The eco-environmental quality of the eastern monsoon region is higher than that of the alpine region of the Qinghai-Tibet Plateau and the arid region of northwest China. The low-value regions of the eastern monsoon region are mainly distributed in urban areas with dense population and economic agglomeration. The gravity center of eco-environmental quality during the study period moves toward the northwest of China continuously; (2) The hot-spots areas of eco-environmental quality change during 1995-2015 are mainly distributed in Tibet, Xinjiang, Chongqing, Guizhou, and the provinces located in the Loess Plateau (Qinghai, Gansu, Ningxia, Inner Mongolia, Shanxi, Shaanxi, and Henan). The cold-spots areas are mainly distributed in the provinces along the Yangtze River Economic Belt and the coastal regions in the southeast of China. The cold-spots and hot-spots changes in China's eco-environmental quality are closely related to the regional development strategies and the implementation of ecological conservation projects in China; (3) Land use intensity has a stronger effect on the eco-environmental quality than other factors, and the impacts of socioeconomy, traffic road, geographic location in the eastern monsoon region are stronger than those in the alpine region of the Qinghai-Tibet Plateau and the arid region of northwest China; (4) The interactions between physical elements and socioeconomic elements are stronger than the interactions within individual indicators. The interactions between the influencing factors mainly include nonlinear enhancement and bi-factor enhancement, and nonlinear enhancement is the dominant interaction mode.

**Keywords:** eco-environmental quality; spatial heterogeneity; center of gravity analysis; hotspots analysis; Geo-detector; formation mechanism; China