# 面向国土空间规划的流域景观时空分异特征及驱动因子研究

张舒瑾[1]，余珮珩[1]，白少云[2]，顾世祥[2]，潘佳威[1]，Shailaja Fennell[3]，陈奕云[1,3,4]

（1. 武汉大学 资源与环境科学学院，湖北 武汉 430079；
2. 云南省水利水电勘测设计研究院，云南 昆明 650021；
3. 剑桥大学发展研究中心，英国 剑桥 CB3 9DT；
4. 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室，湖北 武汉 430079）

**摘要**：景观格局的时空分异是国土空间结构和功能演变的重要表征，揭示景观时空分异特征及其驱动因子是构建人地关系和谐的国土空间规划格局的基础。研究以云南省杞麓湖流域为例，基于2002年、2010年和2018年三期遥感影像进行土地利用变化分析，采用景观格局指数揭示流域景观的时空分异特征，构建景观破碎化综合指数，结合实地调研成果与地理探测器剖析景观破碎化与自然和人文因子间的耦合关系。结果表明：2002—2018年，杞麓湖流域林地、水体和其他用地面积总量减少，耕地略有增加，建设用地显著增加；流域景观整体呈破碎化发展趋势，且在乡镇水平上时空分异明显；高程、人类活动强度、土地利用类型、坡向和坡度因子对流域内景观破碎化空间分异的解释差异显著，其中高程因子的解释能力最强；此外，驱动因子间的交互作用加剧了景观破碎化的空间分异。

**关键词**：国土空间规划；时空分层异质性；地理探测器；景观格局；驱动因子；杞麓湖流域
**中图分类号**：P901　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1671-4407(2020)10-219-09

## Study on the Spatio-Temporal Stratified Heterogeneity and Driving Factors of Watershed Landscape for National Spatial Planning

ZHANG Shujin[1], YU Peiheng[1], BAI Shaoyun[2], GU Shixiang[2], PAN Jiawei[1], Shailaja Fennell[3], CHEN Yiyun[1,3,4]

(1. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China;
2. Yunnan Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Kunming Yunnan 650021, China;
3. Centre of Development Studies, University of Cambridge, Cambridge CB3 9DT, UK;
4. Key Laboratory for National Geography State Monitoring (National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation), Wuhan Hubei 430079, China)

**Abstract:** The spatio-temporal stratified heterogeneity of landscape pattern is an important representation of the spatial structure and functional evolution of the land. Revealing the characteristics and driving factors of spatio-temporal differentiation of landscape is the basis for constructing a harmonious national spatial planning. Taking Qilu Lake Watershed in Yunnan Province as an example, the land use change was quantitatively analyzed based on remote sensing images in 2002, 2010 and 2018. The landscape pattern indices were selected to characterize the spatio-temporal heterogeneity of landscape fragmentation. A comprehensive index describing landscape fragmentation was then constructed. We further investigated the relationship between landscape fragmentation and multiple natural and human factors with combined field surveys and geodetectors. The results show that all types of land have undergone varying degrees of change, the total area of forest land, water, and other land decreased during the period 2002 to 2018. An increase and slight increase were found for construction land and farmland respectively. The landscape of Qilu Lake watershed was developing towards fragmentation. This trend displayed a certain spatial-temporal differentiation characteristic in different districts. In general, the factor with the strongest explanatory power for landscape fragmentation was elevation, followed by human activity intensity, land use type, aspect, and slope. The interaction between driving factors aggravated the spatial stratification of landscape fragmentation.

**Key words:** national spatial planning; spatio-temporal heterogeneity; geodetectors; landscape pattern; driving factors; Qilu Lake watershed

---

**基金项目**：国家自然科学基金项目“面向精细土壤碳制图的平原地区农田土壤有机碳空间分异机理研究”（41771440）；国家高分辨率对地观测系统重大科技专项“云南省产业化推广体系建设及示范应用”（NO.89-Y40-G19-9001-18/20-03）；云南省院士工作站建设专项“云南高原湖泊区农业节水与农田面源污染治理模式与示范”（NO.2015IC013）

**第一作者简介**：张舒瑾，硕士研究生，研究方向为土地变化科学与可持续发展。E-mail: ZhangShujin@whu.edu.cn
**通讯作者简介**：陈奕云，博士，副教授，研究方向为地理信息科学与可持续发展。E-mail: chenyy@whu.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 0 引言

现行国土空间规划的编制坚持生态优先和绿色发展原则，重视不同尺度的土地景观格局与各生态过程之间的关系。2019 年 5 月，中共中央、国务院印发了《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》，明确了国土空间规划应加强整体性、协调性，统筹各类规划管控，平衡开发与保护的关系。在原有的城乡规划和土地规划中，景观生态规划仅是一项从属性质且地位较低的专项规划，通常受制于城市规划，未能体现横向平行的关系 [1]。当前城市化的快速发展和人类活动的不断增强使得地表景观格局处于持续的动态变化之中，局域景观由连续完整的整体转变为破碎、异质的斑块，进而影响整个地区的景观生态安全 [2-3]。因此，提升对景观生态规划重要性的认识，秉承生态空间价值理念 [4]，揭示时空分异及变化规律特征，开展景观格局与过程分析对国土空间规划具有重要意义。

景观空间格局和景观功能是景观生态学研究的核心内容 [5-6]，而对景观格局进行定量分析则是研究格局与过程相互关系的基础 [7]。此外，景观格局分析在物种多样性保护和资源分配等方面也起着重要作用 [8-9]。近年来，关于景观格局的研究涵盖了流域、省域、城市等不同尺度，研究方法大多采用回归模型或相关分析法 [10-12]，传统的统计模型的假设要求和条件较多，研究中难以满足 [13]。土地利用及景观格局变化受到自然与人文等驱动因子的影响 [14]。国内多以定性描述方式对某一研究区的驱动因子、驱动机制进行罗列总结和简单的定量分析，解释力不强 [15-17]。国外研究进一步将驱动因子分为五类，即社会经济、政策、科技、文化和自然因子 [18-20]，并且倾向于比较分析，如城市与农村、保护区与非保护区、同一驱动因子下不同地区景观差异的对比等 [21-23]。驱动因子并非是单独作用于景观格局的，而是存在一个相互依赖、相互作用、反馈循环的复杂系统，在时空维度上主导景观格局变化的驱动因子亦各不相同。因此，面向新时代国土空间规划要求，以时空分层异质性为切入点，研究景观格局及其驱动因子，有助于制定与国土空间规划相协调的景观生态规划 [24-25]。

促进空间的集约高效利用是流域发展亟待解决的瓶颈问题，而规划作为解决问题、协调人地关系的手段，可以全面推进可持续发展。杞麓湖流域作为典型的高原湖泊流域，强烈的人类活动与脆弱的生态环境矛盾突出 [26]，特别是近年来经济的迅速发展和城镇化进程的加快，杞麓湖流域围湖造田、破坏森林植被等问题日益

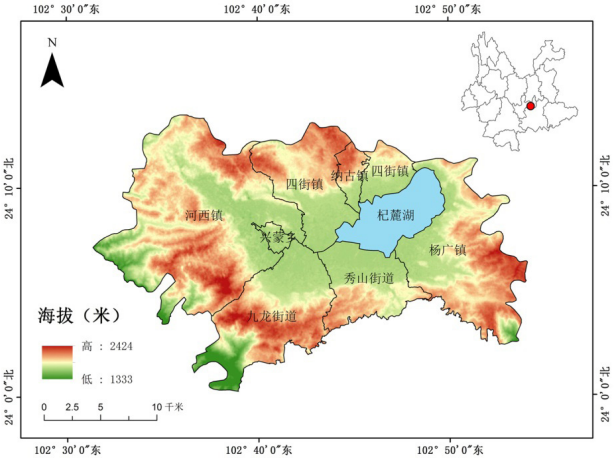


图1 杞麓湖流域区位图

突出。因此，以杞麓湖流域为研究区，本文旨在国土空间规划的背景下，基于景观格局分析法、地理探测器和统计分析等方法，对杞麓湖流域景观格局的时空分异及其驱动因子进行探讨，以期为杞麓湖流域生态、经济、社会的可持续发展提供理论依据，从而更好地编制景观生态规划，保障生态系统服务功能，增强流域内的居民福祉。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 研究区概况

如图 1 所示，杞麓湖流域地处云南省玉溪市通海县境内，地形四周高、中部低，属于亚热带半湿润夏凉季风气候。下辖秀山街道、四街镇、纳古镇、九龙街道、河西镇、杨广镇及兴蒙乡，共 279 个自然村。截至 2016 年年底，流域总人口达 26.8 万人，耕地面积总计 14.9 万亩（1 亩 =1/15 公顷），全年蔬菜播种面积 22 万亩，是通海县社会经济发展的主体。其中杞麓湖呈东西向，周围为平坦坝区，是蔬菜主产区，坝的外围分布着中、低山。整个流域呈封闭状，自然生态在空间上以环形分布 [27]。

### 1.2 数据来源及处理

本研究采用 2002 年、2010 年、2018 年的三期遥感影像，分别来源于 Landsat 7 ETM、Landsat 5 TM 及 Landsat 8 OIL，空间分辨率为 30 m，时相均为 2 月。运用 ENVI 对影像进行辐射定标、大气校正、增强等预处理，并通过杞麓湖流域范围矢量图裁剪遥感影像；结合《土地利用现状分类》（GB/T 21010-2007），以杞麓湖流域的土地利用现状、影像精度为参照，应用监督分类法将研究区土地分为耕地、林地、水体、建设用地、其他用地五类。经分类后结果检验，数据的整体精度在 85% 以上，Kappa 系数均大于 0.75，满足研究要求。

高程是分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM V1 数

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

据，来源于地理空间数据云平台，坡度、坡向基于网格 DEM 提取；人类活动强度利用耕地面积、道路密度、植被覆盖度及居民点 4 个因子计算 [28-29]，其中对居民点和道路的不同级别分别赋值，无量纲化处理后进行空间插值，依据层次分析法确定各指标的权重，最后通过栅格叠加得到杞麓湖流域人类活动强度。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 景观格局分析法

景观方法的核心是强调空间异质性，考虑不同尺度下景观要素形成的土地利用和景观格局与社会、经济和生态过程的相互关系 [30]。本文依据景观格局指数的生态意义及杞麓湖流域景观类型现状，在景观要素特征方面，选取斑块密度(PD)和最大斑块指数(LPI)定量描述斑块的基本特征；在景观异质性方面，选取香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)和蔓延度指数(CONTAG)反映景观组分在时间和空间上的动态变化特征。

#### 1.3.2 地理探测器

地理探测器 [31] 是探测地理要素的分层异质性及揭示其背后驱动力的一组统计学方法，目前主要应用于土地利用 [32]、疾病地理学 [33]、环境污染 [34-35]、经济发展 [36] 领域。地理探测器分为因子探测器、交互探测器、风险探测器和生态探测器。

(1)因子探测器：用来检测某种地理因素是否是形成某一地理特征空间分异的原因，以及其所能解释的力度，$q$ 值的大小可以代表驱动因子对因变量的解释力，其表达式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (1)$$

式中：$L$ 为驱动因子 $X$ 的分层(类)；$N_h$ 和 $N$ 分别为层 $h$ 和全区的单元数；$\sigma_h^2$ 和 $\sigma^2$ 分别是层 $h$ 和全区的 $Y$ 值的方差。$q$ 值在 0 ～ 1 之间，值越大表明该驱动因子对景观破碎化的解释力越强。

(2)交互探测器：能够计算两因子叠加后的 $q$ 值，通过与单因子的 $q$ 值相比，可以判断两因子是否具有交互作用和作用的强弱等。

(3)风险探测器：揭示不同驱动因子内部分层的差异。

(4)生态探测器：比较驱动因子对因变量 $Y$ 的空间分布的影响是否存在显著差异。

地理探测器的自变量要求为类型量，用 ArcGIS 中的自然断点分级法将高程、人类活动强度、坡度、坡向离散化，分为不同的类别(表 1)。之后通过渔网点功能将各属性赋值给随机点，共计 1 203 个点，作为地理探测器的输入变量。

表1 地理探测器自变量的分类

| 自变量 | 类别数量 | 类别说明 |
|---|---|---|
| 高程 /m | 5 | [1 200, 1 500)；[1 500, 1 800)；[1 800, 2 100)；[2 100, 2 400)；[2 400, 2 700) |
| 人类活动强度 | 5 | [0.003, 0.110)；[0.110, 0.170)；[0.170, 0.230)；[0.230, 0.310)；[0.310, 0.670) |
| 坡度 /° | 9 | [0, 5)；[5, 10)；[10, 15)；[15, 20)；[20, 25)；[25, 30)；[30, 35)；[35, 40)；[40, 65) |
| 坡向 | 9 | 无；北；东北；东；东南；南；西南；西；西北 |
| 土地利用类型 | 5 | 水体；建设用地；其他用地；林地；耕地 |

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 土地利用时空分异特征

通过对遥感影像的处理、分类，得到杞麓湖流域 2002 年、2010 年和 2018 年的土地利用现状图(图 2)。借助 ArcGIS 计算出各类用地的面积如表 2 所示，

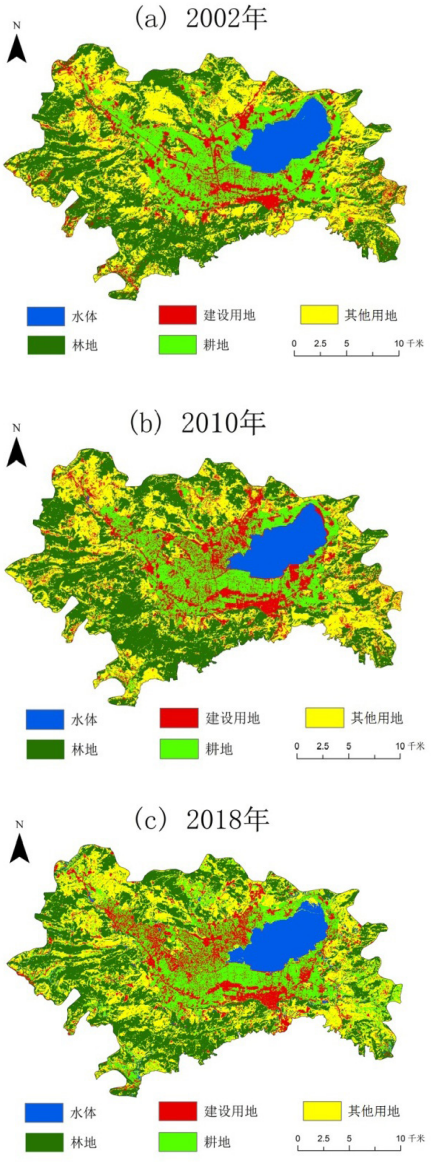


图2 2002—2018年杞麓湖流域土地利用分类图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2002—2018 年，杞麓湖流域各类土地面积都发生了程度不一的变化，水体、林地、其他用地总量都有所减少，建设用地和耕地面积有所增加。2002 年，水体、建设用地、其他用地、林地和耕地分别占总面积的 6.49%、11.52%、30.64%、34.15%、17.20%，而在 2018 年，它们分别占总面积的 5.55%、17.25%、28.64%、30.30%、18.26%。

表2 2002年、2010年、2018年杞麓湖流域地类面积统计

| 土地利用类型 | 2002 年 | | 2010 年 | | 2018 年 | | 面积变化 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 面积 / $km^2$ | 比例 /% | 面积 / $km^2$ | 比例 /% | 面积 / $km^2$ | 比例 /% | 2002—2010 年 /$km^2$ | 2010—2018 年 /$km^2$ |
| 水体 | 35.23 | 6.49 | 31.23 | 5.76 | 30.12 | 5.55 | −4.00 | −1.11 |
| 建设用地 | 62.48 | 11.52 | 77.81 | 14.34 | 93.58 | 17.25 | 15.33 | 15.77 |
| 其他用地 | 166.25 | 30.64 | 152.90 | 28.18 | 155.37 | 28.64 | −13.35 | 2.47 |
| 林地 | 185.28 | 34.15 | 193.83 | 35.72 | 164.38 | 30.30 | 8.55 | −29.45 |
| 耕地 | 93.33 | 17.20 | 86.81 | 16.00 | 99.11 | 18.26 | −6.52 | 12.30 |

其中，2002—2010 年，建设用地面积从 62.48 $km^2$ 增加到 77.81 $km^2$，年均增长率为 1.92 $km^2$/ 年，之后 8 年面积增加到 93.58 $km^2$，呈持续增长趋势；耕地面积先减后增，在 16 年里净增加了 5.78 $km^2$；由于围湖造田、人口聚集等原因，水体面积大幅缩减，从 2002 年的 35.23 $km^2$ 降至 2018 年的 30.12 $km^2$；林地是杞麓湖流域分布最广的地类，16 年间共计减少 20.9 $km^2$。

土地利用转移分析主要由土地利用转移矩阵来表示，它主要用来描述各种土地利用类型间的转化情况。结合 2002 年、2010 年、2018 年的土地利用分类图，通过 ArcGIS 软件的 Spatial Analyst 工具，获得杞麓湖流域 16 年来的土地利用转移矩阵，相互转化的情况如图 3 所示。

研究时段内，杞麓湖流域的耕地和其他用地是新增建设用地的主要来源，建设用地为主要转入类型，而耕地主要转变成了建设用地和其他用地，其他用地为主要转出类型。2002—2010 年，建设用地面积的扩张较为明显，8 年增加了 27.84 $km^2$，年均增长达 3.48%，其增加的面积大部分由耕地和其他用地转化而来，这与杞麓湖流域人口快速增长密不可分；其他用地与林地面积的增减主要表现在相互空间上的位置转移。由于 2010 年云南省发生特大干旱，土地利用方式发生剧烈变化。2010—2018 年，除已有水体外，有 1.09 $km^2$ 的耕地转为水体；其他用地主要转向了耕地和建设用地，流转面积分别为 19.23 $km^2$、21.75 $km^2$，它的转入类型以林地为主；林地有 35.69 $km^2$ 转向了其他用地；建设用地和耕地作为人类活动最密集的地类，它们之间的转移关系十分密切。在 2002—2018 年，建设用地的净变化量最大，其次为林地，转移程度最小的为水体，其他用地的双向转移主要表现为其他用地与林地、耕地、建设用地之间，有相当一部分的耕地被建设用地所占用，这些土地利用的变化严重

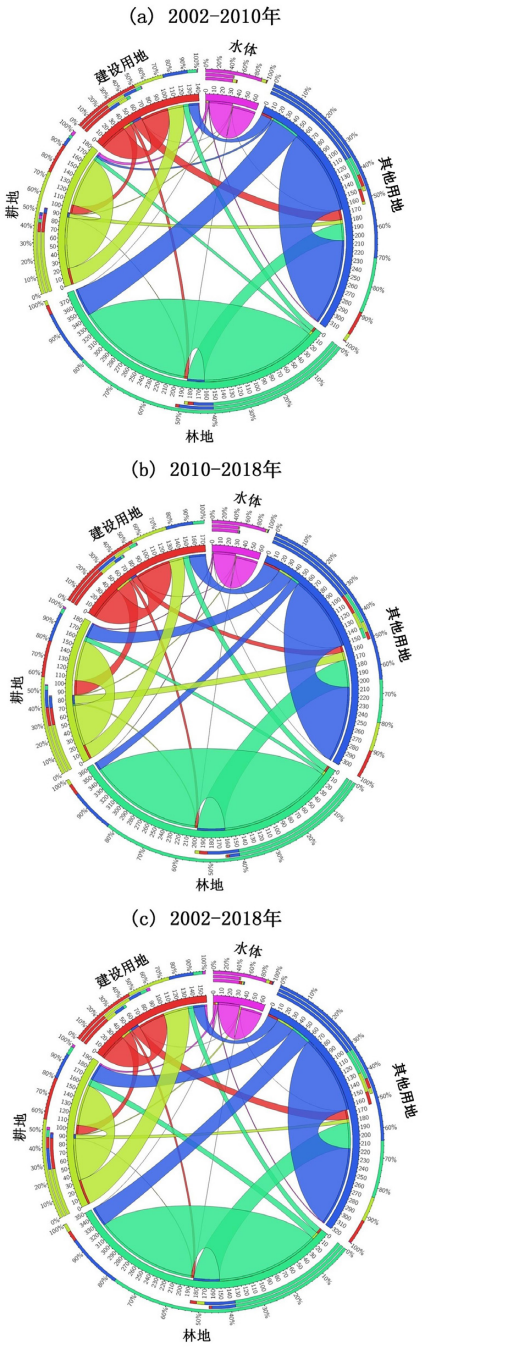


图3 2002—2010年、2010—2018年、2002—2018年杞麓湖流域土地类型转移弦图

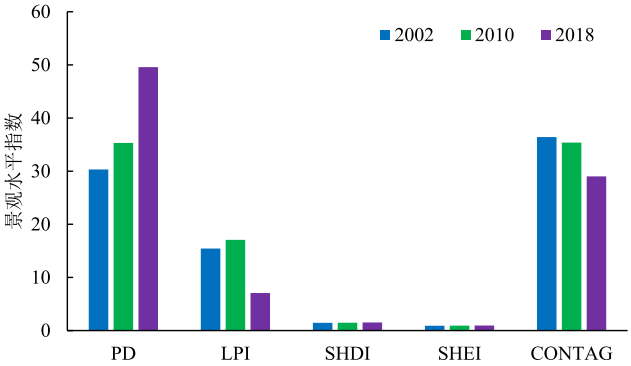


图4 2002—2018年杞麓湖流域景观水平指数

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

影响了流域植被覆盖度的时空特征以及景观格局。

### 2.2 景观格局时空演变特征

基于景观尺度的格局指数可以体现整个研究区总体的景观变化特征。通过 Fragstats 软件提取杞麓湖流域 2002 年、2010 年、2018 年的景观格局信息（图 4），结果显示，杞麓湖流域景观的 PD、SHDI、SHEI 在 2002—2018 年处于增长趋势，LPI 呈现先增加后减少的趋势，而 CONTAG 持续减少。PD 由 2002 年的 30.32 增至 2018 年的 49.59，斑块密度的大大增加说明景观破碎化的增强；SHDI 和 SHEI 的增加是由于各景观类型的比例差减少所致；研究区内占主导的土地利用类型为林地，LPI 的变化表明这类土地的最大斑块面积在 2010 年缓慢增长后，到 2018 年大幅度下降；从 CONTAG 的持续降低可见，研究区的景观连接性不高，存在较多小斑块。总体而言，杞麓湖流域的土地利用景观整体上向着破碎化方向发展，受人类活动影响较大。

由图 5 可见，杞麓湖流域各街镇的景观指数都有所变化，空间异质性和复杂性较高。2002—2010 年，PD 都有所增加；LPI 在河西镇、九龙街道、兴蒙乡增加，其余四街镇减少；SHDI、SHEI 除了在兴蒙乡、秀山街道有略微下降外，其余街镇均增加；兴蒙乡的 CONTAG 增加了 6.84%，其他街镇均呈不同程度的下降。总结发现，2002—2010 年兴蒙乡的景观破碎化有所降低。

2010—2018 年，PD 在各街镇均增加。杨广镇的 LPI 增加了 0.28%，其他街镇减少；四街镇和秀山街道的 SHDI、SHEI 有所下降，其他街镇均增加，河西镇增幅最大；CONTAG 在整个流域都发生了下降，河西镇、九龙街道的降幅高于其他街镇。总结可得，2010—2018 年河西镇的景观破碎化显著增加，从上述土地利用分类图也可以看出，由于河西镇距杞麓湖较远，土壤保水性相对较差，耕地并不是主要用地，且 8 年间林地显著减少，建设用地在空间中呈不同幅度的增加，这种土地利用方式的改变使河西镇内景观破碎化加剧。

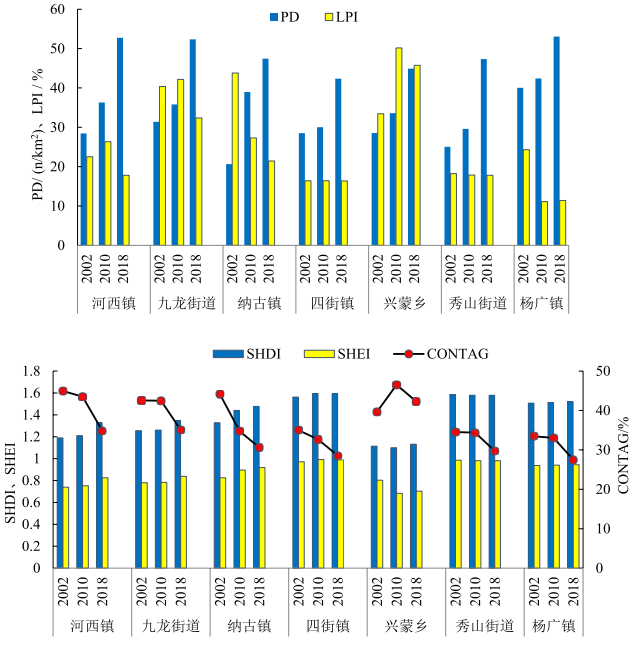


图5 杞麓湖流域各分区的景观指数

### 2.3 景观破碎化的驱动因子分析

#### 2.3.1 因变量的获取

由于各景观指数对景观破碎化的解释具有一定的重叠性，存在信息冗余的问题，因此进一步采用主成分分析法，将 PD、LPI、SHDI、SHEI 和 CONTAG 综合成一个变量，并将该变量作为景观破碎化的代理因变量 $Y$，输入到地理探测器中。

2002 年、2010 年、2018 年流域景观指数的主成分分析结果如表 3 所示。在主成分分析前，使用 Kaiser-Meyer-Olkin（KMO）和 Bartlett 检验来评估变量间的关系强度及对主成分分析的适用性。KMO 指数取值范围为 0 ～ 1，值越接近 1，越适合作主成分分析；如果 Bartlett 检验的显著性水平低于 0.05，则拒绝零假设，表明变量适合主成分分析 [37-39]。综合 KMO 值和 Bartlett 检验，采用 2018 年的景观指数对杞麓湖流域景观破碎化现状及驱动因子做进一步研究，经主成分分析后，第一主成分解释的方差为 80.46%，解释了原有变量的大部分信息，而且第一主成分上 PD、SHDI、SHEI 的载荷系数均大于 0.9，LPI、CONTAG 的载荷系数也在 0.8 以上，因此最终得到景观破碎化的综合变量 $Y=0.45Z_1-0.42Z_2+0.47Z_3+0.46Z_4-0.40Z_5$，$Z_1$、$Z_2$、$Z_3$、$Z_4$ 和 $Z_5$ 分别为 PD、LPI、SHDI、SHEI 和 CONTAG 标准化后的数值。

表3 2002年、2010年、2018年杞麓湖流域景观指数的主成分分析结果

| 年份 | KMO | Bartlett 检验（sig） | 景观指数 | 公因子方差 | | 成分 | 初始特征值 | | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 初始 | 提取 | | 合计 | 方差的 % | |
| 2002 | 0.754 | 0.000 | PD | 1.000 | 0.581 | 1 | 3.376 | 67.511 | 0.762 |
| | | | LPI | 1.000 | 0.623 | 2 | 0.791 | 15.828 | 0.789 |
| | | | SHDI | 1.000 | 0.856 | 3 | 0.526 | 10.523 | 0.925 |
| | | | SHEI | 1.000 | 0.872 | 4 | 0.283 | 5.651 | 0.934 |
| | | | CONTAG | 1.000 | 0.443 | 5 | 0.024 | 0.487 | 0.666 |
| 2010 | 0.729 | 0.000 | PD | 1.000 | 0.543 | 1 | 3.422 | 68.430 | 0.737 |
| | | | LPI | 1.000 | 0.626 | 2 | 0.815 | 16.304 | 0.791 |
| | | | SHDI | 1.000 | 0.845 | 3 | 0.482 | 9.646 | 0.919 |
| | | | SHEI | 1.000 | 0.837 | 4 | 0.249 | 4.985 | 0.915 |
| | | | CONTAG | 1.000 | 0.570 | 5 | 0.032 | 0.635 | 0.755 |
| 2018 | 0.788 | 0.000 | PD | 1.000 | 0.831 | 1 | 4.023 | 80.460 | 0.903 |
| | | | LPI | 1.000 | 0.737 | 2 | 0.426 | 8.525 | 0.851 |
| | | | SHDI | 1.000 | 0.899 | 3 | 0.319 | 6.379 | 0.943 |
| | | | SHEI | 1.000 | 0.878 | 4 | 0.188 | 3.760 | 0.932 |
| | | | CONTAG | 1.000 | 0.688 | 5 | 0.044 | 0.876 | 0.804 |

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3.2 驱动因子分析

分层异质性反映了地理要素的本质，对其时间和空间属性进行探索可以揭示其演变过程及潜在的形成机制[40]。借助地理探测器，对造成杞麓湖流域景观破碎化空间分异的驱动因子进行分析。

风险探测器。风险探测器揭示了各驱动因子内部分级间的差异，本文选取了高程、人类活动强度、坡度、坡向、土地利用类型 5 个因子，其空间分布如图 6 所示。在地理探测器中将这 5 类数据分别采样，作为自变量 $X_1 \sim X_5$，景观破碎化作为 $Y$，以（$Y$, $X$）形式输入到 GeoDetector 中得到各驱动因子的探测结果。结果表明，各驱动因子内部均存在差异，对景观破碎化空间分层异质性的解释能力不同。

因子探测器。表 4 展现了各驱动因子对景观破碎化的解释力度，可以看出，杞麓湖流域景观破碎化空间分异现象解释力排名依次为：$X_1$（高程：0.172）、$X_2$（人类活动强度：0.155）、$X_5$（土地利用类型：0.152）、$X_4$（坡向：0.107）、$X_3$（坡度：0.098）。说明除了高程本身对景观破碎化空间分异的影响最大外，人类活动干扰程度也对其有显著影响，而坡向、坡度的解释力一般。

表4 驱动因子解释力探测结果

| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $q$ | 0.172 | 0.155 | 0.098 | 0.107 | 0.152 |
| $p$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

交互探测器。交互探测器可以评估驱动因子之间共同作用是否会增加或减少对因变量的解释力，根据表 5，可以得到景观格局的变化是由自然因子和人文因子综合作用的结果：$X_1$（高程）∩ $X_5$（土地利用类型）两因子交互时解释力最大；其次是 $X_1$（高程）∩ $X_2$（人类活动强度），即人类的活动会增强自然因子对景观破碎化空间分异的解释力。此外，任意两因子的交互都会以一种非线性方式增强对杞麓湖流域景观破碎化的解释，$X_3$（坡度）、$X_4$（坡向）本身解释力较弱的因子交互时甚至大于具有最强解释力的 $X_1$（高程）。

表5 驱动因子相互作用探测结果

| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 0.172 | | | | |
| $X_2$ | 0.346 | 0.155 | | | |
| $X_3$ | 0.275 | 0.294 | 0.098 | | |
| $X_4$ | 0.320 | 0.296 | 0.246 | 0.107 | |
| $X_5$ | 0.348 | 0.314 | 0.306 | 0.275 | 0.152 |

生态探测器。通过表 6 可以比较驱动因子对景观破碎空间分异的影响是否存在显著差异，差异显著记为 Y，否则记为 N。探测结果发现，$X_3$（坡度）与 $X_4$（坡向）两因子间无显著性差异，$X_1$（高程）、$X_2$（人类活动强度）和 $X_5$（土地利用类型）间也无显著性差异，但它们分别与 $X_3$（坡度）、$X_4$（坡向）存在显著差异，这也与因子探测得出的结果相对应。

## 2.4 景观破碎化空间分异与驱动因子内在联系分析

时空分层异质性影响着景观的结构与功能，并影响其他要素的空间格局。随着城镇化进程和社会经济的快速发展，出现大量占用农业用地、林地的现象，由此引发了一系列诸如水土流失和流域生态功能大幅下降的生态环境问题，进而使得景观格局在时空上发生明显的变化。

结合实地调研和半结构式访谈成果进一步揭示流域景观破碎化空间分异与驱动因子的内在联系。首先，杞麓湖受围湖造田、修坝等人类活动的影响，水域面积不断减少，流域的土壤性质、植被覆盖、水文生态过程受到不同程度的干扰和破坏。杞麓湖流域海拔较高，几乎没有过境河流，流域内可依靠的水源仅有杞麓湖，水葫芦的滋长在短期内遮盖水面，出现了“有湖不见水”、水体污染和水体富营养化等现象，严重影响流域农业、养殖业的可持续发展。其次，城镇化的快速推进和人类活动的加强，使得建设用地趋向分散。流域内的纳古镇以回族聚居为主，具有浓郁的地方和民族特色，随着旅游业的发展，公共服务设施和住房用地的需求日益凸显，土地景观的斑块密度持续增大，同一地块类型的延展趋势减弱，蔓延度指数降低。另外在杞麓湖南部、东部等人口密集区域，建设用地的开发和利用不够集约节约，用地规模超出生态承载力。最后，部分企业和居民因追求个体利益最大化而私自转换土地用途，侵占湖岸违章建构筑物，在河道两岸和库区非法种植等一系列行为也致使林地和其他用地被占用，进一步加剧流域整体景观格局的破碎化。

## 2.5 政策启示

针对城镇化发展中遇到的上述问题，应当严格执行土地用途管制制度，优化土地利用结构、改良土地利用方式；划定生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界等空间管控边界，强化底线约束；此外还要在控制好农业面源污染的同时禁止盲目重复建设旅游设施，禁止破坏自然景观，从而在政策上为杞麓湖流域的可持续发展奠定基础。

从国土空间规划角度来看，对于景观破碎化相对严重的河西镇等区域，在景观生态规划和设计中需要给予足够的重视，形成以目标为导向的政策。具体的规划中应当从以下几个方面考虑：首先，完善法律规范。目前流域景观对土地政策、经济等宏观因素的敏感性较高，

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

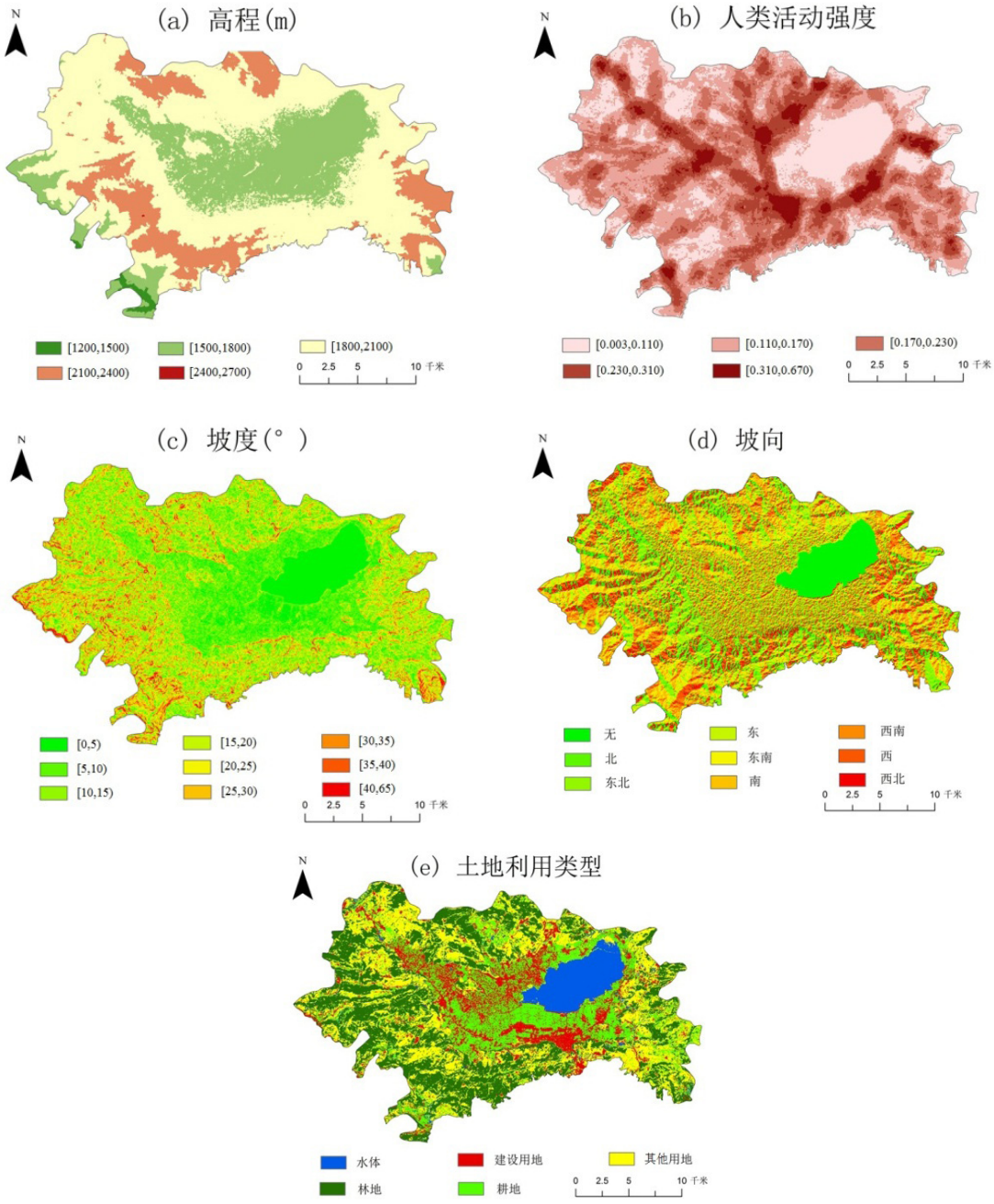


图6 高程、人类活动强度、坡度、坡向、土地利用类型等驱动因子空间分布图

表6 驱动因子生态探测结果

| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | | | | | |
| $X_2$ | N | | | | |
| $X_3$ | Y | Y | | | |
| $X_4$ | Y | Y | N | | |
| $X_5$ | N | N | Y | Y | |

而缺乏一套规范的流域景观生态规划作为规划实践的标准，随着对环境和自然保护的关注，从农业生产到综合性土地利用的转变也对规划方式提出了新的要求，因此亟须加快此方面的工作，从而推动流域景观的健康、可持续发展。其次，鼓励民众参与。进行景观生态规划时，可以通过问卷调查、深入访谈、模拟建设成果等方式，加强与民众的沟通交流，充分表达出对规划的意愿和需求，提高居民对家园的认同感，激发其对改善流域景观的热情以及对保护流域的责任感。最后，因地制宜合理规划。借鉴国内外优秀景观生成的科学方法和思路，将流域作为一个整体，综合自然环境、资源、民俗、艺术等，利用流域特色景观制定系统理性、景观内涵和功能定位明确的规划，使资源得到最大化开发和利用的同时，科学、传承地域历史文化，探索出一条流域特色规划建设路径。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 3 结论与展望

了解景观格局的时空动态特征有助于以景观生态规划为基础的空间规划的制定，推进流域生态保护与经济社会的协调发展。景观格局的时空分异性是由多个驱动因子共同作用的结果，其格局与过程及驱动因子存在尺度依存性。本文基于 2002 年、2010 年、2018 年的遥感影像数据，运用景观格局分析和地理探测器等方法，对杞麓湖流域景观格局的时空分异特征及驱动因子进行研究和探讨。主要结论如下：

（1）从土地利用景观来看，杞麓湖流域各地类变化明显，其中，建设用地面积大幅增加，林地、其他用地面积明显减少。对土地利用转移分析可得，其他用地为主要转出项，它主要转变成了林地、耕地和建设用地，建设用地为主要转入项，城镇化的发展和人口的聚集对土地利用景观格局产生了显著的影响。

（2）2002—2018 年，杞麓湖流域的斑块密度（PD）、香农多样性指数（SHDI）及香农均匀度指数（SHEI）一直增长，蔓延度（CONTAG）逐渐降低，土地利用景观整体向破碎化趋势发展。各街镇的景观指数存在不同的差异，2002—2010 年，兴蒙乡的景观破碎化程度明显降低；2010—2018 年，河西镇的景观破碎化程度显著提升。

地理探测器结果显示，各驱动因子内部对景观破碎化的解释存在差异。整个流域解释力最大的因子为高程，其他依次为人类活动强度、土地利用类型、坡向、坡度，而且任意两因子交互作用时都增强了景观破碎化的空间分异，高程与土地利用类型交互作用的解释力最强，这说明景观破碎化不是由单一的影响因素造成的，而是多因素共同作用的结果。对于景观破碎化的空间分异，在 0.05 的显著性水平下，坡度与坡向、高程与人类活动强度、高程与土地利用、人类活动强度与土地利用的解释无显著差异，其他因子两两间存在显著差异。

总体来说，本文较为系统地分析了杞麓湖流域景观格局的时空分异特征及其驱动因子，但关于长时间序列的动态变化情况和各驱动因子更细化的定量分析方面略显不足。在今后的研究中，除进一步对不同时间、空间尺度上驱动因子的探索外，还可以结合各分区的政策、文化因子特征加以差异性的分析与讨论。

**参考文献：**

[1]李志明. 转型期我国景观规划体系的建立[J]. 沈阳建筑大学学报（社会科学版），2011（2）：142-145.

[2]Albert C, Von Haaren C, Vargas-Moreno J C, et al. Teaching scenario-based planning for sustainable landscape development: An evaluation of learning effects in the Cagliari studio workshop [J]. Sustainability, 2015, 28(5): 6872-6892.

[3]余珮珩，冯明雪，刘斌，等. 顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究——以云南杞麓湖流域为例[J]. 湖泊科学，2020（32）：89-99.

[4]顾朝林，曹根榕. 论新时代国土空间规划技术创新[J]. 北京规划建设，2019（4）：64-70.

[5]Wiens J A. Landscape ecology: The science and the action [J]. Landscape Ecology, 1999, 14: 103.

[6]Chen W B, Xiao D L, Xiu Z. The characteristics and contents of landscape spatial analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 1135-1142.

[7]Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently [J]. Landscape Ecology, 2001, 16(3): 235-254.

[8]邱廉，陶婷婷，韩善锐，等. 宏生态尺度上景观破碎化对物种丰富度的影响[J]. 生态学报，2017（22）：7595-7603.

[9]覃凤飞，安树青，卓元，等. 景观破碎化对植物种群的影响[J]. 生态学杂志，2003（3）：43-48.

[10]刘世梁，刘琦，王聪，等. 基于地理加权回归的漫湾库区景观破碎化及影响因子分析[J]. 地理科学，2014（7）：856-862.

[11]王芳，陈芝聪，谢小平. 太湖流域建设用地与耕地景观时空演变及驱动力[J]. 生态学报，2018（9）：3300-3310.

[12]李灿，张凤荣，朱泰峰，等. 大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例[J]. 生态学报，2013（17）：5363-5374.

[13]任国平，刘黎明，卓东. 都市郊区景观生态质量空间差异及影响因素分析[J]. 农业工程学报，2016（21）：252-263.

[14]傅伯杰，陈利顶，马克明，等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京：科学出版社，2001：99-106.

[15]李传哲，于福亮，刘佳. 分水后黑河干流中游地区景观动态变化及驱动力[J]. 生态学报，2009（11）：5832-5842.

[16]王千，金晓斌，周寅康. 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制[J]. 生态学报，2011（20）：5903-5909.

[17]蒋超亮，吴玲，安静. 1998—2016年古尔班通古特沙漠南缘景观格局变化及驱动力[J]. 生态学杂志，2018（12）：3729-3735.

[18]Hersperger A M, Bürgi M. Driving forces of landscape change in the urbanizing Limmat Valley, Switzerland [J]. Modelling Land-Use Change, 2007, 90(3): 45-60.

[19]Bürgi M, Hersperger A M, Schneeberger N. Driving forces of landscape change: Current and new directions [J]. Landscape Ecology, 2004, 19(8): 857-868.

[20]Koomen E, Bakeman A, Still-well J, et al. Land-use changes and their environmental impact in rural areas in Europe [M]. Paris: UNESCO, 1999: 81-102.

[21]Berger U, Rivera-Monroy V H, Doyle T W, et al. Advances and limitations of individual-based models to analyze and predict dynamics of mangrove forests: A review [J]. Aquatic Botany, 2008, 89(2): 260-274.

[22]Hasselmann F, Csaplovics E, Falconer I, et al. Technological driving forces of LUCC: conceptualization, quantification, and the example of urban power distribution networks [J]. Land Use Policy, 2010, 27(2): 628-637.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[23]Pan D Y, Domon G, de Blois S, et al. Temporal (1958-1993) and spatial patterns of land use changes in Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes [J]. Landscape Ecology, 1999, 14(1): 35-52.
[24]Herlin I S. New challenges in the field of spatial planning: Landscapes [J]. Landscape Research, 2004, 29(4): 399-411.
[25]Lafortezza R, Corry R C, Sanesi G, et al. Quantitative approaches to landscape spatial planning: Clues from landscape ecology [J]. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2005, 84: 239-250.
[26]刘斌，白少云，余珮珩，等. 结合高分遥感和多源数据的高原湖泊流域土地利用分析[J]. 测绘通报，2019（12）：77-82.
[27]董云仙，刘宇，李荫玺，等. 云南杞麓湖生态脆弱因素分析[J]. 环境科学导刊，2011（5）：24-29.
[28]郑文武，邹君，田亚平，等. 基于RS和GIS的区域人类活动强度空间模拟[J]. 热带地理，2011（1）：77-81.
[29]徐勇，孙晓一，汤青. 陆地表层人类活动强度：概念、方法及应用[J]. 地理学报，2015（7）：1068-1079.
[30]Termorshuizen J W, Opdam P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development [J]. Landscape Ecology, 2009, 24(8): 1037-1052.
[31]王劲峰，徐成东. 地理探测器：原理与展望[J]. 地理学报，2017（1）：116-134.
[32]赵小风，李娅娅，赵雲泰，等. 基于地理探测器的土地开发度时空差异及其驱动因素[J]. 长江流域资源与环境，2018（11）：2425-2433.
[33]Xu C D, Li Y Y, Wang J F, et al. Spatial-temporal detection of risk factors for bacillary dysentery in Beijing, Tianjin and Hebei, China [J]. BMC Public Health, 2017, 17(1): 743.
[34]Shrestha A, LuoW. An assessment of groundwater contamination in central valley aquifer, California using geodetector method [J]. Annals of GIS, 2017, 23(3): 149-166.
[35]周亮，周成虎，杨帆，等. 2000—2011年中国$PM_{2.5}$时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报，2017（11）：2079-2092.
[36]丁悦，蔡建明，任周鹏，等. 基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素[J]. 地理科学进展，2014（5）：657-666.
[37]Williams B, Brown T, Onsman A. Exploratory factor analysis: A five-step guide for novices [J]. Australasian Journal of Paramedicine, 2010, 8(3): 1-13.
[38]Beavers A S, Lounsbury J W, Richards J K, et al. Practical considerations for using exploratory factor analysis in educational research [J]. Practical Assessment Research & Evaluation, 2013, 18(6): 1-13.
[39]Dyer P, Gursoy D, Sharma B, et al. Structural modeling of resident perceptions of tourism and associated development on the Sunshine Coast, Australia [J]. Tourism Management, 2007, 28(2): 409-422.
[40]Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.

（责任编辑：保文秀）

（上接218页）

[11]国务院. 国务院关于印发全国主体功能区规划的通知[EB/OL].（2011-06-08）. http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-06/08/content_1441.htm.
[12]Vogt W. Road to survival [M]. New York: William Sloan, 1948: 54.
[13]Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. World Environment, 1997, 387(6630): 253-260.
[14]Daly H E. Beyond growth the economics of sustainable development [M]. Boston: Beacon Press, 1996: 25-76.
[15][美]戴利，[美]法利. 生态经济学：原理和应用（第2版）[M]. 金志农，等，译. 北京：中国人民大学出版社，2013：107.
[16]范金，周忠民，包振强. 生态资本研究综述[J]. 预测，2000（5）：30-35.
[17]朱洪革，蒋敏元. 国外自然资本研究综述[J]. 外国经济与管理，2006（2）：1-6，14.
[18]穆治辊. 增进生态资本：可持续发展的基本要求[J]. 科技导报，2004（1）：55-57.
[19]殷阿娜，李素峰，邓思远. 我国生态资本存量影响因素实证研究——基于动态面板模型[J]. 科技管理研究，2018（22）：254-259.
[20]王海滨，邱化蛟，程序，等. 实现生态服务价值的新视角（一）——生态服务的资本属性与生态资本概念[J]. 生态经济，2008（6）：44-48.
[21]严立冬，屈志光，方时姣. 水资源生态资本化运营探讨[J]. 中国人口·资源与环境，2011（12）：81-84.
[22]高吉喜，李慧敏，田美荣. 生态资产资本化概念及意义解析[J]. 生态与农村环境学报，2016（1）：41-46.
[23]马克思. 资本论（第三卷）[M]. 北京：人民出版社，2004：922.
[24]中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局. 马克思恩格斯文集（第五卷）[M]. 北京：人民出版社，2009：54.
[25]严立冬，刘加林，陈光炬. 生态资本运营价值问题研究[J]. 中国人口·资源与环境，2011（1）：141-147.
[26]王浦劬. 政府向社会力量购买公共服务的改革意蕴论析[J]. 吉林大学社会科学学报，2015（4）：78-89，250.

（责任编辑：冯胜军）

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net