

# 半干旱区县域景观格局变化轨迹识别 ——以宁夏盐池县为例

程琳琳<sup>1</sup>, 刘 华<sup>1</sup>, 刘焱序<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 北京师范大学  
地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 细致的景观格局时空刻画可以为格局与过程耦合机制分析奠定坚实的数据基础。以半干旱区县域景观格局变化轨迹识别为目标, 基于 Landsat 影像构建了宁夏盐池县 1988-2017 年景观格局序列, 识别景观组分、构型的演化轨迹。研究表明: (1) 盐池县研究时段内植被整体增加, 显著增加的景观占比为 33.53%; 裸土整体减少, 显著减少的景观占比为 35.78%。(2) 四项景观构型指数显示, 近年来盐池县景观斑块的边缘复杂程度有所加强, 除植被的集聚程度不断增加外, 其他景观类型的集聚程度相对稳定。(3) 盐池县 35.08% 的像元发生变化, 其中变化 1 次和 2 次的像元分别占比 54.63% 和 28.60%, 首末变化年份间隔为三年的像元占比 12.39%。基于连续年份的半干旱区景观变化轨迹判定, 可为生态恢复长期监测提供有力的方法支持。

**关键词:** 景观格局; 土地覆被; 构型指数; 变化轨迹; 盐池县

在全球陆地表层系统快速演化的背景下, 如何刻画景观格局的时空动态已经成为景观生态学研究的一项核心内容<sup>[1]</sup>。景观格局变化是指构成生态系统或土地利用/覆被类型的形状、数目及空间分布与配置的变化, 该变化具有典型的区域异质性, 可以有效揭示区域生态状况的空间变异特征<sup>[2-3]</sup>。以土地利用/覆被的遥感图像解译为途径, 识别区域景观格局变化, 揭示区域生态系统的变化趋势及其内在影响因素, 将为景观可持续管理提供参考依据<sup>[4]</sup>。而如何更为细致地刻画景观格局的动态变化, 是当前景观格局研究亟待解决的问题<sup>[5-6]</sup>。

近年来, 景观格局变化分析方法主要包括土地利用/覆被转移矩阵、景观格局指数空间统计、马尔科夫链和元胞自动机模拟等<sup>[7]</sup>。但由于传统的分析方法多是基于 3~5 期遥感影像识别景观格局, 对景观格局演变的连续性刻画不足, 从而使景观格局演变时空规律分析存在很大的不确定性<sup>[8]</sup>。目前, 遥感技术的蓬勃发展不仅给景观格局演变分析提供了大量的数据来源, 也为基于多源遥感图像的景观格局识别提供了强大的计量手段。例如: Cao 等<sup>[9]</sup>基于 2001-2016 年 16 天合成 MODIS NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 时间序列, 在滤波中集成 NDVI 时空动态信息, 用于提高植被指数时序的质量; Nguyen 等<sup>[10]</sup>基于 1987-2016 年 Landsat 遥感影像, 利用两阶分类法分析澳大利亚维多利亚

收稿日期: 2018-12-07; 修订日期: 2019-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41861134038); 中国博士后科学基金项目 (2018T110066, 2017M620029); 中央高校基本科研业务费

作者简介: 程琳琳 (1977-), 女, 山东泰安人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用、生态补偿、土地评价等研究。  
Email: chll@cumtb.edu.cn

通讯作者: 刘焱序 (1988-), 男, 陕西西安人, 博士, 主要从事综合自然地理与景观生态研究。  
E-mail: yanxuli@bnu.edu.cn

森林时空动态; Bonney等<sup>[11]</sup>基于1984-2016年Landsat NDVI对加拿大亚北极寒带森林到苔原的过渡区景观变化进行监测; Xu等<sup>[12]</sup>基于后分类方法,使用1984-2016年Landsat遥感影像数据识别了非洲典型区域耕地年际变化的轨迹。总体而言,基于多时相、连续性遥感影像数据,景观格局演变分析已开始由多时相格局描述向连续时相格局刻画的方向发展。

干旱半干旱地区作为对全球气候和人类活动变化响应最明显的区域,大部分地区干旱少雨,植被稀少,景观格局易于受外界扰动而变化<sup>[13]</sup>。亟需通过开展干旱半干旱地区景观格局时空动态分析,识别景观格局变化规律,从而为制定合理的区域生态环境保护措施提供参考依据<sup>[14]</sup>。基于此,本文以半干旱区宁夏盐池县为例,基于机器学习算法自动解译遥感影像,构建近30年连续时间土地覆被序列,分别探究景观组分和构型的长时间序列演化轨迹,更精确地判定变化时点,从而为动态刻画景观格局提供方法支撑。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部,是中国西部典型的农牧交错带(图1)。盐池县北接毛乌素沙漠,属鄂尔多斯台地;南靠黄土高原,与陕西、内蒙古接壤。县境由东南至西北为广阔的干草原和荒漠草原,县城北、东、西南分布着大小20余个天然盐湖,因此得名“盐池”。气温冬冷夏热,平均气温22.4℃,冬夏平均温差达28℃左右。土地利用类型以草地为主,耕地超过100万亩,是优质小杂粮集中产地。矿产资源相对丰富,已探明石油储量为4500万t,煤炭储量81亿t。盐池县下辖4镇4乡,总人口约17万人。

### 1.2 数据来源

采用的数据主要为连续的1987-2017年25期Landsat遥感产品,数据源自美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),主要包括Landsat 5及Landsat 8数据,为保证影像数据质量和指数计算的精度,选取5-9月份生长季云量小于20%的影像,空间分辨率为30 m(表1)。净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据来自MODIS MOD17A3H,该数据集的时空分辨率为500 m和1年;蒸散量(Evapotranspiration, ET)数据来自MODIS MOD16A3数据集,该数据集的时空分辨率为500 m和1年,两者均源自美国国家航空航天局(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地覆被类型解译

不同于土地利用分类,土地覆被更加强调景观的地表自然特征<sup>[15-17]</sup>。例如耕

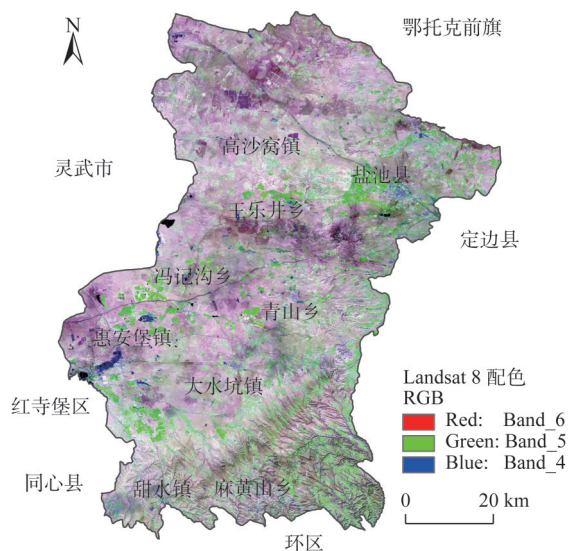


图1 研究区位置(2017年夏季Landsat 8假彩色合成影像)

Fig. 1 Location of the study area (the false color composite of Landsat 8 image in summer of 2017)

表1 影像采集日期及卫星

Table 1 The date of the image obtained and the name of satellite

日期	卫星	日期	卫星	日期	卫星
1988-05-01	Landsat 5	2000-08-22	Landsat 5	2010-07-17	Landsat 5
1989-08-24	Landsat 5	2001-08-09	Landsat 5	2011-06-18	Landsat 5
1990-06-08	Landsat 5	2002-06-24	Landsat 5	2013-06-07	Landsat 8
1991-08-30	Landsat 5	2003-08-15	Landsat 5	2014-07-28	Landsat 8
1992-08-16	Landsat 5	2005-06-01	Landsat 5	2015-09-01	Landsat 8
1993-06-16	Landsat 5	2006-08-07	Landsat 5	2016-05-30	Landsat 8
1995-06-22	Landsat 5	2007-06-23	Landsat 5	2017-09-06	Landsat 8
1997-10-01	Landsat 5	2008-06-25	Landsat 5		
1999-06-17	Landsat 5	2009-06-28	Landsat 5		

地作为土地利用分类，其土地覆被情况既可能为有植被也可能为裸露土壤。由于半干旱地区地表特征在年际、季节间变异幅度大，在某一时点没有植被覆盖的草地、耕地很难与荒漠等未利用地进行有效区分，因而采用土地覆被的描述方式可以更精确地表述景观的类型特征。基于此，将研究区土地覆被类型分为水体、植被、裸土、建成区四类。

随机森林方法已被广泛用于遥感图像处理之中<sup>[18-19]</sup>。采用随机森林方法初步确定研究区1988-2017年土地覆被类型，其中重点在于如何定义每年输入的训练样本。四项遥感生物物理指数因此被引入，包括 *NDVI*、*NDBI* (Normalized Difference Build-up Index)、*NDWI* (Normalized Difference water Index) 以及三项指数的组合，命名为干旱增强建筑指数 *AEBI* (Arid enhanced Build-up Index)。其中，*NDVI*、*NDBI*、*NDWI*等指数已在前人研究中被大量使用<sup>[20-21]</sup>。由于半干旱区裸土较多，*NDBI*最高值往往并不代表城市，城市仅是 *NDBI* 较高值。考虑到城市的水分和植被信息相对强于裸土，因而有必要将 *NDVI* 和 *NDWI* 信息融入指数，弱化 *NDBI* 高值。经人工反复调试，当采用如下系数组合时，结果能反映研究区多数时期主要建成区覆被类型，排除较多的裸土信息（式中 percentile 为百分位）：

$$AEBI=0.5\times(1-|NDBI-percentile(NDBI,70)|)+0.3\times(1-|NDVI-percentile(NDVI,40)|)+0.7\times(1-|NDWI-percentile(NDWI,60)|)\tag{1}$$

在随机森林使用中，在 Matlab 中随机生成4类，每类30000个样本点，20000个做训练，10000个做验证，并满足以下规则：在植被训练中，若 *NDVI*>0.2 或 *NDVI* 位于99百分位以上，被初步界定为植被；若 *NDBI* 位于95百分位以上，被初步界定为裸土；若 *NDWI* 位于99.5百分位以上，被初步界定为水体；若 *AEBI* 位于99.5百分位以上，被初步界定为建成区。对分类模型的自身验证精度在所有年份均超过99%，说明随机森林模型在训练与模拟中具有良好的性能。

由于以上验证仅针对分类模型的模拟，并不代表真实地物，因而仍需进一步进行时空去噪。空间去噪方法针对水体和建成区进行，二者一般属于连续地物，因而在8邻域遍历中，将孤点部分赋值为8邻域中的众数。时间去噪针对所有覆被类型，假如第 *n* 期的像元不等于 *n-1* 期类型，也不等于 *n+1* 期类型，但 *n-1* 期类型像元等于 *n+1* 期类型，则认为该像元为不稳定变化，赋值为前后2期的属性。由此，得到研究区1988-2017年土地覆

被类型图。

### 1.3.2 景观组分变化识别

景观组分即一定范围内景观的组成成分, 采用景观内土地覆被类型的占比进行表征, 并将空间范围设置为 1 km<sup>2</sup> 格网。鉴于研究时段相对长, 且可能存在少量异常值, 采用 Theil-Sen (TS) 中位数斜率与 Mann-Kendall (MK) 单调性检验识别景观组分变化趋势<sup>[22-23]</sup>:

$$\text{slope} = \text{Median}\left(\frac{c_j - c_i}{t_j - t_i}\right), S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(c_i - c_j), \text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

$$\text{sign}(c_i - c_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } c_i - c_j < 0 \\ 0 & \text{if } c_i - c_j = 0 \\ -1 & \text{if } c_i - c_j > 0 \end{cases}, Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{for } S > 0 \\ 0 & \text{for } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{for } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\text{slope} > 0$  表示组分增加;  $\text{slope} < 0$  表示组分减少;  $t_i$ 、 $t_j$  为年份;  $c_i$ 、 $c_j$  为第  $i$  和  $j$  年的景观组分占比;  $n$  为时间长度; 基于  $S$  指数判定, 若  $|Z| > 1.64$  则趋势是显著的。

### 1.3.3 景观构型指数计算

景观构型指数是研究景观格局特征最常用的定量分析方法, 可以细致地反映景观结构组成、空间配置等信息。本研究为更加细致地刻画盐池县景观构型变化, 从景观类型水平上选用四项与斑块面积大小相关程度相对较低的景观构型指数, 包括集聚度  $AI$ 、斑块密度  $PD$ 、景观形状指数  $LSI$ 、边缘密度  $ED$ <sup>[24]</sup>, 用于表征景观的空间形态。其中,  $AI$  为景观斑块与同类斑块邻接的数量与最大可能数量的比值, 可以表征景观要素的聚集和蔓延程度;  $PD$  为斑块数量除以该类景观总面积 (100 hm<sup>2</sup>), 可以描述景观的基本特征;  $LSI$  是所有景观斑块边缘之和除以该类景观总面积 (m<sup>2</sup>) 的开方,  $ED$  则直接为该类景观总面积 (hm<sup>2</sup>) 内的所有景观斑块边缘之和,  $LSI$  和  $ED$  均可以反映该类景观的形状复杂程度, 且  $ED$  与景观面积的关系更小。此外, 为了避免与景观组分指标重复, 本研究未选用最大斑块指数、分离度等与斑块面积高度相关的指标。

### 1.3.4 景观变化轨迹判定

为充分发挥连续时间景观序列的优势, 本研究通过间断点的时期识别, 判断景观变化的时空轨迹。若第  $n$  期像元类型不等于第  $n-1$  期类型, 同时满足第  $n$  期开始连续后三期像元类型相同, 而第  $n-1$  期开始连续前三期像元类型相同, 则认为景观很可能发生实质性改变, 而非季节误差。分析变化的统计指标包括景观首次变化年份、末次变化年份、首末变化年份差、变化次数 4 项。

## 2 结果分析

### 2.1 土地覆被类型变化

在 2017 年土地覆被图中生成 600 个随机点, 包括水体 100 个、植被 200 个、裸土 200 个、建成区 100 个, 对照 Google Earth 得到 2017 年总体解译精度为 74.83%, Kappa 系数为 0.64, 其中植被的生产者精度和用户解译精度分别为 81.86% 和 88.00%。考虑到全部解译步骤为自动处理, 误差主要存在于较难以区分的建成区与裸土之间, 因而解译结果尚



可接受。

如图2所示，盐池县土地覆被总体以裸土为主，西部与南部部分区域在一些年份有大面积植被分布。盐池县年际中研究区植被分布的频次总体呈现南部高于北部、东部高于西部的特征。西南部的太阳山开发区和东北部的盐池县城有建成区集聚，但需要承认

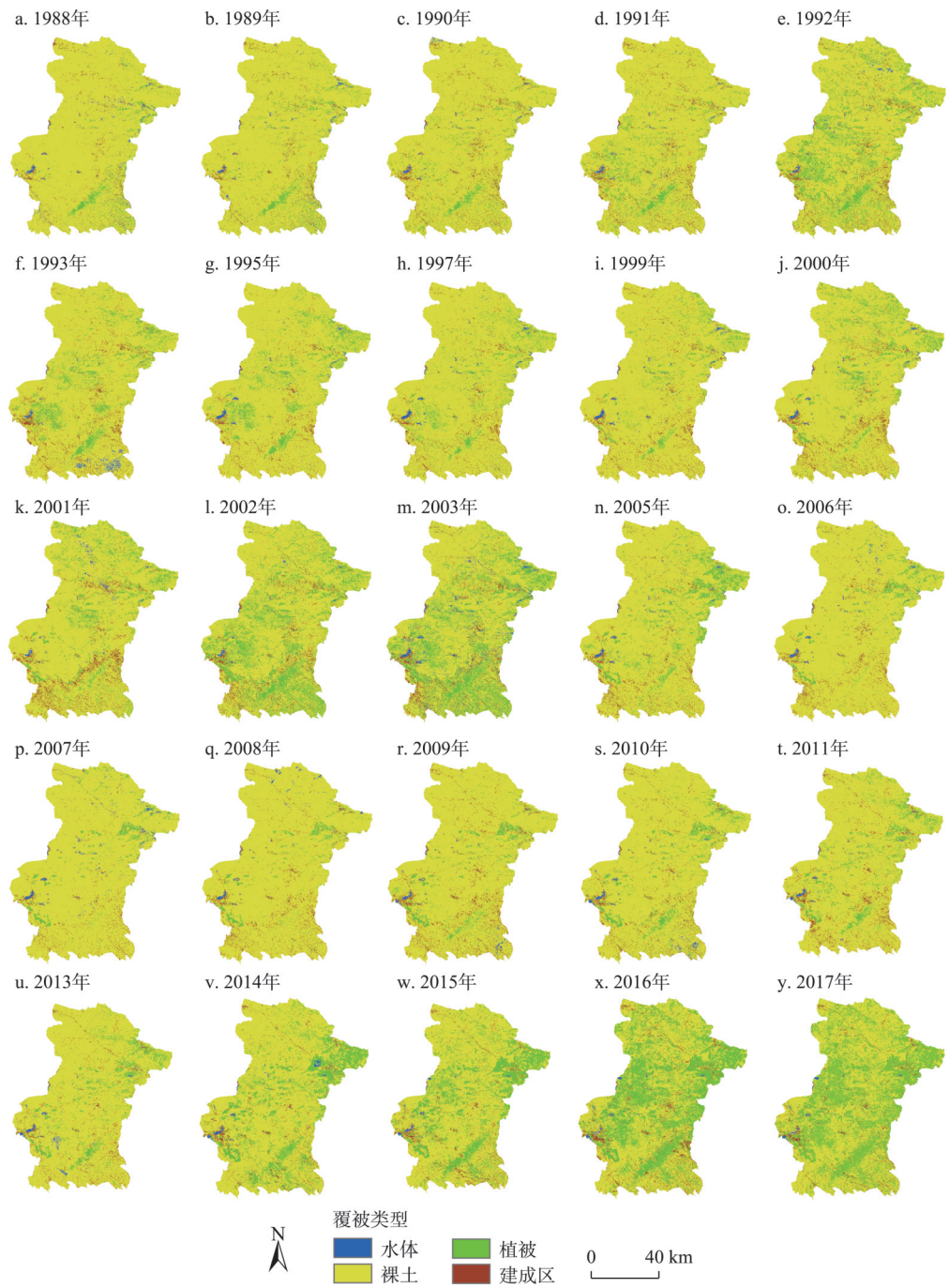


图2 1988-2017年土地覆被类型变化  
Fig. 2 The change of land cover types during 1988-2017

某些年份的建成区解译结果可能包含了山体阴影。值得注意的是，建成区和水体的遥感解译面积各自不足区域面积的5%，研究区土地覆被类型的转化主要为植被和裸土间的相互转化。

盐池县乡镇植被覆被变化有明显差异，县城周边在2013年以前主要以裸地覆被为主，2014年开始植被覆盖面积大幅增加。高沙窝镇年际植被变化较为稳定，植被增加也是趋于零散的小部分改善，而没有集中连片的增加。冯记沟乡在盐池县占地面积较小，在1992-2005年和2002-2003年两个时间段内植被有增加趋势，直到2015-2017年植被明显增加。作为占地面积最大的大水坑镇，植被年际变化明显，尤其从2016年开始，植被连片增加。县城周边和王乐井乡是植被显著增加、裸地显著减少的变化范围最大区域，而其建成区和水体也有一定变化。高沙窝镇、冯记沟乡、大水坑镇等乡镇水体基本保持不变，仅少部分区域植被呈现增加和显著增加的趋势，裸土以减少或显著减少为主。

## 2.2 景观组分变化趋势

景观组分趋势分析结果良好地体现了研究区以植被恢复为主的景观变化态势(图3)。具体而言。植被显著增加的像元占比为33.53%，非显著增加的像元占比

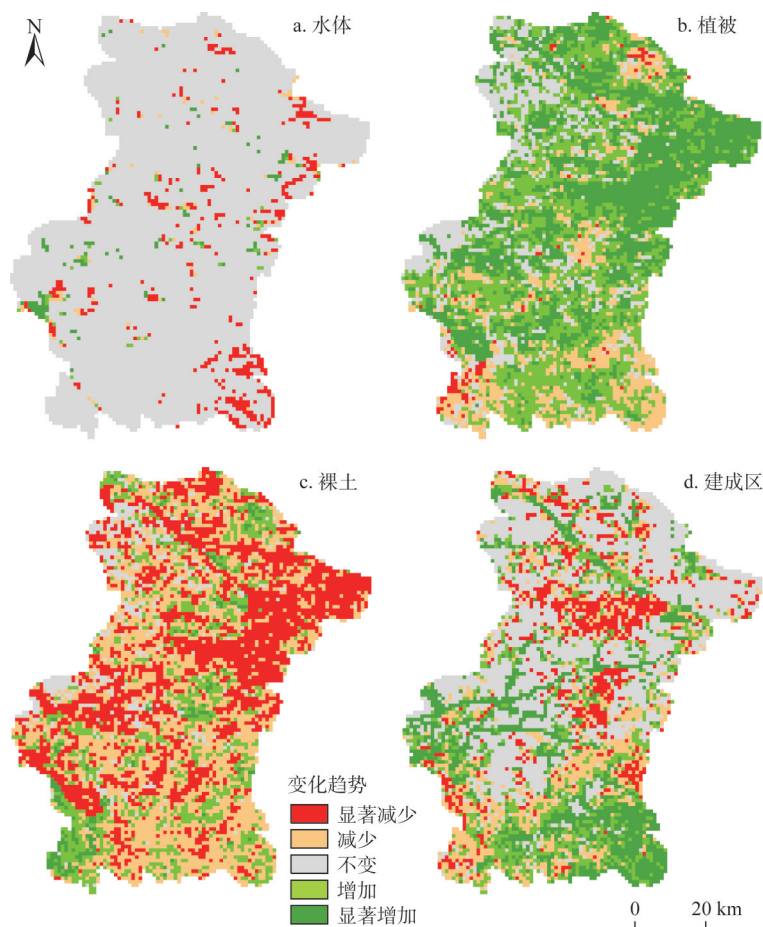


图3 1988-2017年景观组分变化趋势

Fig. 3 The change tendency of landscape composition during 1988-2017

34.72%；裸土显著减少的像元占比为35.78%，非显著减少的像元占比为37.52%。此外，研究区水体呈现显著减少，可能与灌溉用水和生态用水增加有关。建成区呈现中部显著减少、西部和东南部显著增加的态势，建成区的显著减少可能与矿区修复有关，也可能由遥感解译不确定性所致；而公路沿线的建设区显著增加，证明景观组分变化趋势能够反映区域人类活动对地表景观的改变。相比土地利用或覆被类型转移矩阵只能表征不同位置景观的离散数值改变，以景观组分为对象的趋势分析方法实现了对土地覆被序列数据的进一步信息挖掘。

由图3可知，盐池县中北部是景观组分变化最为集中连片的区域。该片区地处哈巴湖国家级自然保护区周边。为强化保护区的水源涵养功能、保护荒漠湿地生态系统，哈巴湖管理局近十年来进行了一系列造林绿化工程，在原先的荒草地中以3 m×3 m或3 m×4 m为间隔种植樟子松，并取得了较高的成活率。同时，2003年以来宁夏回族自治区全境禁牧，在哈巴湖周边流域中，长期禁牧下灌木长势良好、沙丘基本固定，从而在景观组分变化图中体现为植被的显著增加和裸土的显著减少。可以认为，人类生态管理措施的加强是盐池县景观组分出现集中连片显著变化的重要因素。

2.3 景观构型变化趋势

分别在景观水平和类型水平上统计4项景观构型指数的变化趋势，发现景观构型的变化规律与景观组分变化存在明显的差异性。如图4所示，植被和水体的AI变化相对剧烈，PD中景观整体和植被变化幅度较大，植被、裸土和景观整体的ED变化大致趋同且植被的取值较小，而LSI虽然反映了类似轨迹但植被的取值最大。总体上，植被和裸土的空间形态变化幅度大于水体和建成区，且植被和裸土构型指数之间往往同步增减，而

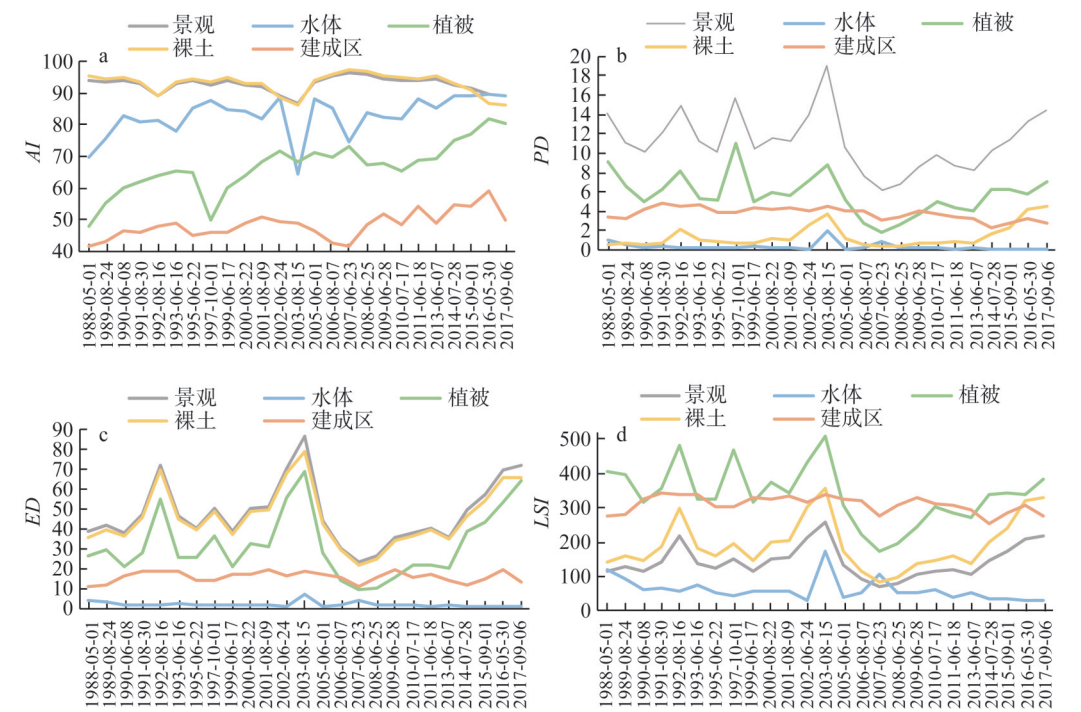


图4 1988-2017年形状类景观格局指数变化

Fig. 4 The change of shape formed landscape pattern indices during 1988-2017



非如同景观组分有此消彼长的规律性。这一现象证实景观格局研究中有必要并列刻画景观组分和构型变化,仅依托土地覆被类型面积的计算并不能反映景观空间形态的复杂演变特征。

总体而言,近年来景观斑块的边缘复杂程度有所加强,但并未超过历史峰值。植被集聚程度不断增加,其他景观类型的集聚程度相对稳定。由于裸土在土地覆被类型中占主导地位,景观整体 *AI* 和 *ED* 均与裸土指标基本同步;但由于景观整体的斑块数远高于各类型,景观整体 *PD* 值最高,震荡也最剧烈。建成区4项指数虽然取值不一,但在年际变化中均保持稳定;相反,处于高值的水体 *AI* 其震荡幅度相应增大。植被 *ED* 和 *LSI* 虽然总体规律相近,但在变化细节上 *LSI* 的幅度小于 *ED*,这是由于面积因素在 *ED* 中相比 *LSI* 被强化,面积小而周长较长的斑块在 *ED* 计量中被凸显。对照植被 *PD* 可知,很高的植被 *ED* 并不代表斑块极为破碎;对照植被 *AI* 可知,植被 *ED* 和 *LSI* 的高低也并不代表斑块集聚的强弱。这种不一致的规律进一步说明各项表征空间形态的景观指数有必要组合使用。

在植被恢复的总体背景下,近30年盐池县植被景观的空间构型变化也体现出多种特征。随着1999年以来天然林保护、退牧还林等一系列生态工程的实施,盐池县植被 *AI* 持续上升,说明生态工程中的人为景观管理导致植被分布更加集聚。在2003年自治区全域禁牧政策实施后,盐池县植被 *PD* 快速下降,说明草地的恢复使牧场与天然草地交错的破碎格局在减弱。盐池县植被 *ED* 和 *LSI* 的下降时点与 *PD* 同步,而2014年后植被斑块边缘复杂化可能与近年来农牧产业发展有关,耕地中的人工牧草种植有别于天然草地生长方式,从而使植被与裸土的对比更加鲜明,识别出的小斑块更多,从而导致了边缘密度和形状指数的提升。

## 2.4 景观变化轨迹

根据判定规则,制成景观变化轨迹如图5所示。研究区发生变化的像元占总像元数的35.08%。在发生变化的像元中,变化1次的像元占比54.63%,变化2次的像元占比28.60%,变化3次的像元占比13.16%,变化3~6次的像元占比总计仅3.31%;在发生变化的像元中,除去首末变化年份相同的、占比54.63%的变化1次的像元,首末变化年份间隔为3年的像元占比12.39%,间隔为4年的像元占比4.69%,其他间隔年份像元占比均小于2.50%,间隔年份在10~19年的像元总计18.38%。此外,在发生变化的像元末次变化年份中,2015年占比14.18%,2014年占比13.28%,1993年占比11.22%,其他年份各自占比均小于8%。可见,研究区景观变化以近年变化为主;在较为严格的数据判定条件下,景观发生多次转变的可能性并不高。但是考虑到本研究中景观发生多次转变时,不少样本的首末变化年份间隔相对较短,这种低于5年间隔的多次景观变化往往会在基于时间断点的土地利用转移矩阵信息中被忽视。因此,面向连续年份的半干旱区景观变化轨迹判定是有必要的。

通过景观变化轨迹分析发现,盐池县景观变化高频区主要集中在4个区域,即县城东北部哈巴湖保护区,盐池县中部哈巴湖林场,盐池县西南部惠安堡镇灌区,以及盐池县南部麻黄山北麓。其中,哈巴湖保护区的东北部接壤毛乌素沙地,通过灌木植被修复,得到良好的风沙治理效果;中部哈巴湖林场在近年来种植大量樟子松,为保护区提供水源涵养功能;惠安堡镇虽无大型河流,但地处扬黄灌区,近年来节水农业取得快速发展;麻黄山北麓则在近期开展了大型风电场建设,引致了地表景观的快速变化。总而



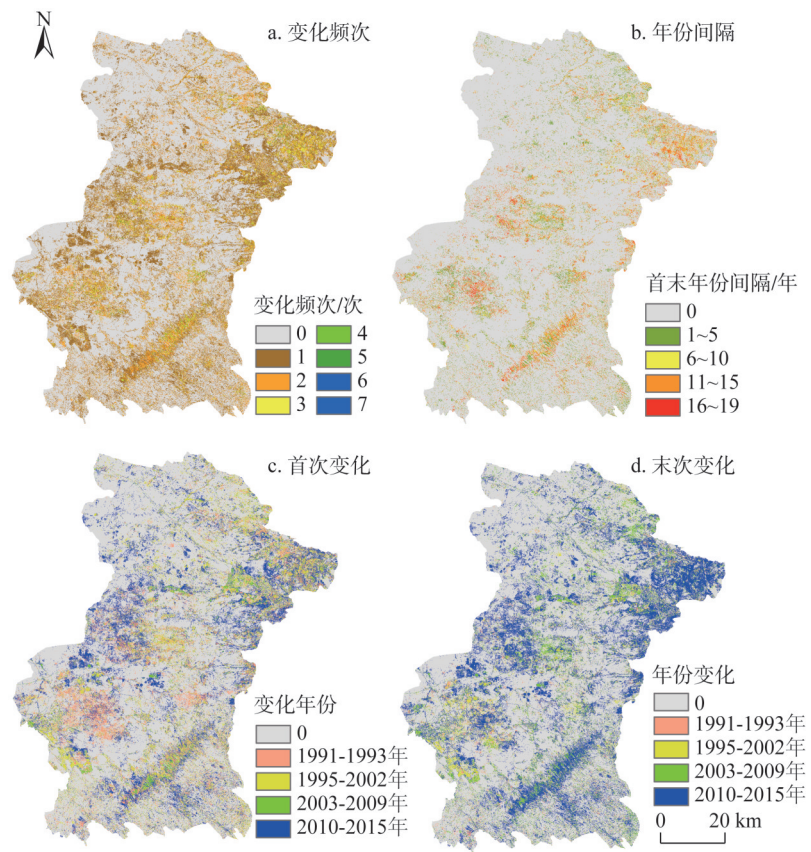


图5 1988-2017年景观变化轨迹

Fig. 5 The change trajectory of landscape during 1988-2017

言之，空间集中的景观变化轨迹体现了人类活动对盐池县不同时间景观变化的重要影响。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

区域景观类型与格局的变化，是干旱与半干旱区生态环境演变的具体表现，如何在这一演变中使自然生态系统与人类生态系统实现持续协调，是干旱与半干旱区可持续发展研究始终需要解决的问题<sup>[25]</sup>。本研究基于景观组分、构型的一系列指标对盐池县景观格局进行细致刻画，结果显示了明显的植被变化态势。回顾以往众多学者针对半干旱区景观演化与生态监测、区域生态风险评价、景观生态预警与生态安全格局等开展的大量研究，也显示出相似的景观格局对植被变化的明显响应，此类研究结果为半干旱区景观可持续管理提供了科学指引<sup>[26-30]</sup>。例如：对黄土高原不同时段不同时期的研究表明，植被覆盖度的变化严重影响相应时期内景观格局的变化<sup>[31]</sup>；对毛乌素的研究结果显示，流动沙丘的减少、植被的增加使得毛乌素景观结构趋于复杂，表现为景观破碎化的态势<sup>[32]</sup>；对兰州秦王川地区的研究结果则印证，随着植被类型的复杂化，景观多样性和破碎度快速增加<sup>[33]</sup>。以上研究揭示出土地利用/覆被类型变化在各个空间尺度上的整体特征，为干

旱区生态建设提供定量化支撑。而本研究基于景观组分、构型等一系列指标，构建了近30年连续时间土地覆被序列；分别探究景观组分和构型的长时间序列演化轨迹，识别变化的显著性，并更精确地判定变化时点，从而对盐池县进行景观格局年际变化动态进行刻画，研究结果更加细致，也更具说服力。

针对干旱半干旱区的生态环境演变，以宁夏盐池为例，从景观组分和构型变化轨迹分析，进行景观格局的细致刻画，结果显示了相对剧烈的景观变化情况。鉴于植被生长季提取月份的不一致会对土地覆被解译结果产生影响，需要第三方数据对结果的规律进行验证。本文采用MODIS传感 $ET$ 和 $NPP$ 两套产品表征县域整体的生态过程，从而探讨景观格局变化是否引起县域生态过程的年际差异，结果如图6所示。虽然 $ET$ 和 $NPP$ 都直接与植被生长相关联，但2001-2015年两套数据的平均值体现出不一致的变化规律。2002/2003年植被的高覆盖可以由 $ET$ 取值得到直观体现，但2009年 $ET$ 的高值并不反映高覆盖植被。尽管 $NPP$ 前期变化趋势与植被面积的对应效果不佳，但2013年之后 $NPP$ 一直处于高值，同期植被覆盖面积也开始逐步增加。因此，虽然 $ET$ 和 $NPP$ 作为生态过程无法在演化规律上与景观格局完全一致，但不同遥感产品所得到的景观格局与生态过程间的确具有部分对应关系，证明了本文的景观格局变化轨迹相对可信。未来研究中，在土地覆被类型解译中更多考虑与其他产品交互验证，可能有助于进一步增加景观格局的识别精度。

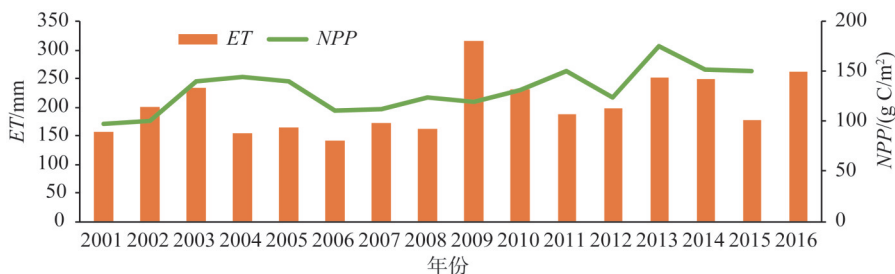


图6 2001-2016年平均 $NPP$ 与 $ET$ 变化

Fig. 6 The changes of mean  $NPP$  and  $ET$  during 2001-2016

本文针对半干旱区县域景观格局变化轨迹识别的科学命题，构建了宁夏盐池县1988-2017年景观格局序列，析取景观组分、构型等演化轨迹，得到两点主要结论；

(1) 研究区植被整体增加，显著增加的景观占比为33.53%；裸土整体减少，显著减少的景观占比为35.78%。景观组分变化整体表现为植被恢复态势，且主要体现在近5年间的植被面积快速扩大。近年来景观斑块的边缘复杂程度有所加强，但并未超过历史峰值；植被的集聚程度不断增加，其他景观类型的集聚程度相对稳定。研究区35.08%的像元发生变化，其中变化1次和2次的像元分别占比54.63%和28.60%，首末变化年份间隔为3年的像元占比12.39%。

(2) 景观格局分析从多时相格局描述发展到连续时相格局刻画，在时间尺度上有助于更精细地将景观格局与生态系统年际变化过程相结合。面对干旱区生态系统较短的变化年份间隔，基于连续年份的半干旱区景观变化轨迹判定具有充分的必要性。本研究结果可以证实，基于连续年份的半干旱区景观格局长时间序列演化轨迹识别，有助于更精确的判定景观变化时点，从而为生态恢复长期监测提供有力的方法支持。

## 参考文献(References):

- [1] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 等. 国际景观生态学研究新进展. 生态学报, 2008, 28(2): 798-804. [FU B J, LYU Y H, CHEN L D, et al. The latest progress of landscape ecology in the world. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 798-804.]
- [2] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. 地理科学进展, 2007, 26(3): 1-10. [LYU Y H, CHEN L D, FU B J. Analysis of the integrating approach on landscape pattern and ecological processes. *Progress in Geography*, 2007, 26(3): 1-10.]
- [3] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospects on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [4] 宁立新, 周云凯, 白秀玲, 等. 鄱阳湖区景观格局季相变化及其优化调控研究. 自然资源学报, 2018, 33(3): 439-453. [NING L X, ZHOU Y K, BAI X L, et al. Research on the seasonal variations and optimization of landscape pattern in Poyang Lake region, China. *Journal of Nature Resources*, 2018, 33(3): 439-453.]
- [5] 陈立顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050. [CHEN L D, SUN R H, LIU H L. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: Progresses, problems, and perspectives. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1042-1050.]
- [6] 冯舒, 赵文武, 陈利顶, 等. 2010年来黄土高原景观生态研究进展. 生态学报, 2017, 37(12): 3957-3966. [FENG S, ZHAO W W, CHEN L D, et al. Advances in landscape ecology research on the Loess Plateau since 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 3957-3966.]
- [7] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题. 地理科学, 2003, 23(3): 264-270. [ZHANG Q J, FU B J, CHEN L D. Several questions about the evolution of landscape pattern. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(3): 264-270.]
- [8] 吴健生, 王政, 张理卿, 等. 景观格局变化驱动力研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1739-1746. [WU J S, WANG Z, ZHANG L Q, et al. Research progress on the driving force of landscape pattern change. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1739-1746.]
- [9] CAO R, CHEN Y, SHEN M G, et al. A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 244-257.
- [10] NGUYEN T H, SIMON D J, MARIELA S B, et al. A spatial and temporal analysis of forest dynamics using Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 461-475.
- [11] BONNEY M T, DANBY R K, TREITZ P K, et al. Landscape variability of vegetation change across the forest to tundra transition of central Canada. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 18-29.
- [12] XU Y D, YU L, ZHAO F R, et al. Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series Landsat images with a change-detection and post-classification approach: Experiments from three sites in Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 218: 13-31.
- [13] 周华荣, 肖笃宁, 周可法. 干旱区景观格局空间过程变化的廊道效应: 以塔里木河中下游河流廊道区域为例. 科学通报, 2006, 51(S1): 66-72. [ZHOU H R, XIAO D N, ZHOU K F. Corridor effect of spatial process changes in landscape patterns in arid areas: A case study of river corridor areas in the middle and lower reaches of the Tarim River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(S1): 66-72.]
- [14] 陈建军, 张树文, 郑冬梅. 景观格局定量分析中的不确定性. 干旱区研究, 2005, 22(1): 63-67. [CHEN J J, ZHANG S W, ZHENG D M. Uncertainty of the quantitative analysis on landscape patterns. *Arid Zone Research*, 2005, 22(1): 63-67.]
- [15] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 20世纪90年代以来中国西南地区土地覆被变化. 生态学报, 2016, 36(23): 7858-7869. [ZHENG C J, ZENG Y, ZHAO Y J, et al. Land cover change in Southwest China since the 1990s. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7858-7869.]
- [16] 石培基, 王祖静, 刘春芳. 石羊河流域土地覆被空间演化及驱动机制. 生态学报, 2014, 34(15): 4361-4371. [SHI P J, WANG Z J, LIU C F. Spatial evolution and driving mechanism of land cover in Shiyang River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4361-4371.]



- [17] 苏伟, 李京, 陈云浩, 等. 基于多尺度影像分割的面向对象城市土地覆被分类研究: 以马来西亚吉隆坡城市中心区为例. 遥感学报, 2007, 11(4): 521-530. [SU W, LI J, CHEN Y H, et al. Classification of object-oriented urban land cover based on multiscale image segmentation: A case study of the city center of Kuala Lumpur, Malaysia. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 521-530.]
- [18] 陈妍, 宋豫秦, 王伟. 基于随机森林回归的草场植被盖度反演模型研究: 以新疆阿勒泰地区布尔津县为例. 生态学报, 2018, 38(7): 2384-2394. [CHEN Y, SONG Y Q, WANG W. A Study on the inversion model of vegetation cover based on random forest regression: A case study of Burqin county in Altay region, Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2384-2394.]
- [19] 王娜, 李强子, 杜鑫, 等. 单变量特征选择的苏北地区主要农作物遥感识别. 遥感学报, 2017, 21(4): 519-530. [WANG N, LI Q Z, DU X, et al. Remote sensing identification of main crops in Northern Jiangsu based on univariate feature selection. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 519-530.]
- [20] 徐涵秋. 一种基于指数的新型遥感建筑用地指数及其生态环境意义. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 301-308. [XU H Q. A new type of remote sensing building land index based on index and its ecological environment significance. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(3): 301-308.]
- [21] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. [XU H Q. Study on extracting water body information using improved Normalized Difference Water Index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595.]
- [22] 刘宪锋, 胡宝怡, 任志远. 黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素. 中国农业科学, 2018, 51(2): 302-314. [LIU X F, HU B Y, REN Z Y. Temporal and spatial variations of water use efficiency and driving factors of vegetation ecosystem in the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(2): 302-314.]
- [23] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960-2013年秦岭—淮河南北极端降水时空变化特征及其影响因素. 地理科学进展, 2015, 34(3): 354-363. [LI S S, YANG S N, LIU X F. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation and its influencing factors in the arctic end of the Qinling-Huaihe River from 1960 to 2013. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 354-363.]
- [24] LIU Y X, PENG J, WANG Y L. Application of partial least squares regression in detecting the important landscape indicators determining urban land surface temperature variation. *Landscape Ecology*, 2018, 33: 1133-1145.
- [25] 程国栋, 肖笃宁, 王根绪. 论干旱区景观生态特征与景观生态建设. 地球科学进展, 1999, 14(1): 13-17. [CHENG G D, XIAO D N, WANG G X. On landscape ecological characteristics and landscape ecological construction in arid areas. *Advance in Earth Science*, 1999, 14(1): 13-17.]
- [26] 徐兰, 罗维, 周宝同. 基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价: 以洋河为例. 自然资源学报, 2015, 30(4): 580-590. [XU L, LUO W, ZHOU B T. Landscape ecological risk assessment of farming-pastoral ecozone based on land use change: A case study of the Yanghe Watershed, China. *Journal of Nature Resources*, 2015, 30(4): 580-590.]
- [27] 王朗, 徐延大, 傅伯杰, 等. 半干旱区景观格局于生态水文过程研究进展. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1238-1243. [WANG L, XU Y D, FU B J, et al. Landscape pattern and eco-hydrological process. *Advance in Earth Science*, 2009, 24(11): 1238-1243.]
- [28] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 等. 冀西北间山盆地地区景观格局变化及优化研究: 以河北省怀来县为例. 自然资源学报, 2016, 31(4): 556-569. [CHEN Y, HA K, HE W L, et al. Study on the change and optimization of landscape pattern in the basin of Northwest Hebei Mountains: A case study of Huailai county, Hebei province. *Journal of Nature Resources*, 2016, 31(4): 556-569.]
- [30] 李国强, 马克明, 傅伯杰. 区域植被恢复对生态安全的影响预测: 以岷江上游干旱河谷为例. 生态学报, 2006, 26(12): 4127-4134. [LI G Q, MA K M, FU B J. Impacts prediction of regional vegetation restoration on ecological security. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4127-4134.]
- [31] 张建香, 张勃, 尹海霞, 等. 2000-2011年黄土高原植被景观格局变化. 生态学报, 2013, 32(2): 452-458. [ZHANG J X, ZHANG B, YIN H X, et al. Landscape pattern change of vegetation coverage in Loess Plateau of Northwest China in 2000-2011. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 452-458.]
- [32] 刘娟, 刘华民, 卓义, 等. 毛乌素沙地1990-2014年景观格局变化及驱动力. 草业科学, 2017, 34(2): 255-263. [LIU J, LIU H M, ZHUO Y, et al. Dynamics and driving forces of landscape patterns in Mu Su Sandy Land, from 1990 to 2014.]

Pratacultural Science, 2017, 34(2): 255-263.]

- [33] 刘梦莹, 江帆, 刘勇. 过去20年兰州新区秦王川地区土地利用景观格局变化. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 111-116. [LIU M Y, JIANG F, LIU Y. Land use pattern changes over the last two decades in Qinwangchuan Area Lanzhou, China. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(11): 111-116.]

## Track the county level landscape pattern change in semiarid region: A case study in Yanchi county, Ningxia, Northwest China

CHENG Lin-lin<sup>1</sup>, LIU Hua<sup>1</sup>, LIU Yan-xu<sup>2</sup>

(1. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The detailed spatiotemporal dynamic description of landscape pattern can lay a solid foundation for the data analysis of the coupling mechanism between landscape pattern and ecological process. The current analysis of landscape pattern is in urgent need of developing from the description of static pattern to the quantification of dynamic pattern, so as to link the landscape pattern and ecological process more precisely in detailed time scale. In this study, we regard the change of landscape pattern tracking in the semi-arid region of China as the scientific objective. As the Landsat time series data can capture the detailed information of land use/cover, we constructed the landscape pattern sequence of Yanchi county from 1988 to 2017, defined the rule of landscape pattern change, and explicated the evolution of landscape compositions and configurations based on the Landsat time series remote images in this study. The results show that: (1) Landscape experienced a significant increase of 33.53% in vegetation during the research period, and a significant decrease of 35.78% in bare soil; (2) The four landscape configuration indexes showed that the edge complexity of the landscape patches has been strengthened in recent years, and the agglomeration degree of other landscape types is relatively stable except for the increasing agglomeration degree of vegetation; (3) 35.08% of he pixel changed, among which the pixel changes once or twice accounted for 54.63% and 28.60%, respectively, and the pixel with a three-year interval between the first and last changes accounted for 12.39%. The determination of landscape change trajectories in the semi-arid region over continuous years can improve a powerful support for the long-term monitoring of ecological restoration.

**Keywords:** landscape pattern; land cover; configuration index; change trajectory; Yanchi county