

DOI: 10.5846/stxb201506051136

李帅, 马文超, 顾艳文, 魏虹, 彭月, 李昌晓. 宁夏黄河流域景观破碎化时空变化特征分析. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Li S., Ma W. C., Gu Y. W., Wei H., Peng Y., Li C. X. Analysis of spatial-temporal changes in landscape fragmentation in the Ningxia Yellow River Valley. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

宁夏黄河流域景观破碎化时空变化特征分析

李 帅^{1,2}, 马文超¹, 顾艳文¹, 魏 虹¹, 彭 月³, 李昌晓¹

1 三峡库区生态环境教育部重点实验室 西南大学生命科学学院, 重庆 400715

2 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 磴口 015200

3 重庆市林业科学研究院, 重庆 400036

摘要: 基于 RS 和 GIS 技术, 以土地利用数据为基础, 采用有效粒度尺寸对宁夏黄河流域 1985 年和 2010 年的景观破碎化进行时空变化分析。结果显示: 流域整体的有效粒度尺寸从 1985 年的 6326.62 km² 下降到 2010 年的 2974.32 km², 破碎化程度呈显著的加剧变化; 从流域内部来看, 景观破碎化程度最大的是黄左区间, 破碎化程度最小的是苦水河和红柳沟; 除引黄区间外, 其余分区景观破碎化程度在 25 年间均有所加剧。特征尺度分析结果显示研究区景观破碎化空间变异分析的合适尺度为 4500 m; 景观破碎化指数的空间变异结果表明破碎化程度较大的区域面积明显多于破碎化程度弱的区域, 景观破碎化空间异质性在 25 年间表现出明显的上升趋势。在海拔背景条件下, 2400 m 以下区域的景观破碎化程度较高, 2400 m 以上区域破碎化程度较低, 且随海拔升高有降低的趋势; 流域景观破碎化受人为干扰影响强烈, 在人为干扰较强的 1000—1500 m 区段的景观破碎化程度最大; 景观破碎化在时间上的变化受人为干扰影响产生的变化最为显著, 由自然条件改变产生的影响有限。研究结果可为西北地区景观格局及景观破碎化的研究提供参考, 并为区域景观格局优化和土地的有效管理提供依据。

关键词: 有效粒度尺寸; 景观破碎化; 宁夏黄河流域; 空间异质性

Analysis of spatial-temporal changes in landscape fragmentation in the Ningxia Yellow River Valley

LI Shuai^{1, 2}, MA Wenchao¹, GU Yanwen¹, WEI Hong¹, PENG Yue³, LI Changxiao¹

1 Key Laboratory for Eco-Environment of the Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education, College of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Desert Forestry Experimental Center, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China

3 Chongqing Forestry Research Institute, Chongqing 400036, China

Abstract: Landscape fragmentation is the result of the transformation of large habitat patches into smaller and more isolated fragments. Fragmentation greatly affects the structure and function of the landscape ecosystem. It is necessary to quantify the degree of landscape fragmentation to optimize regional development planning and decision-making in an ecological manner. Effective mesh size (m_{eff}), which is based on the probability that two points chosen randomly in a region are connected (i. e., located in the same patch), can be used to quantify landscape fragmentation. The Ningxia Yellow River Valley, located in arid and semi-arid regions, accounts for most of the Ningxia Hui Autonomous Region, and its fragmentation may have great significance to the eco-environmental safety of Northwest China. We investigated landscape fragmentation based on Remote Sensing and Geographic Information System techniques using m_{eff} and multi-temporal land use data. Quantitative analysis revealed that the degree of landscape fragmentation of the entire Ningxia Yellow River Valley was higher in 2010

基金项目: 国家国际科技合作专项 (2015DFA90900)

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-11-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weihong@swu.edu.cn

than in 1985, corresponding to a decline in the m_{eff} from 6,326.62 km² in 1985 to 2,974.32 km² in 2010. The m_{eff} of seven sub-basins in the Ningxia Yellow River Valley indicated that the Huangzuo area had the highest degree of fragmentation in both 1985 and 2010. Furthermore, the degree of landscape fragmentation in all sub-basins increased from 1985 to 2010, except in the Yellow River Water Irrigation Area. The expansion of the built-up areas and farmland in the Yellow River Water Irrigation Area simplified the landscape in contrast with the more complex landscapes in other sub-basins. Based on the semi-variable function and moving window method, the characteristic scale for analyzing landscape fragmentation heterogeneity in the Ningxia Yellow River Valley was 4500 m. The spatial heterogeneity of landscape fragmentation indicated that the area with high fragmentation values was larger than the area with low fragmentation values both in 1985 and 2010. The area with high landscape fragmentation values was mostly distributed in the south and mid-east of the Ningxia Yellow River Valley. The spatial variation of highly fragmented areas was higher in scope and degree in 2010 than in 1985, and spatial heterogeneity exhibited a similar change. In terms of elevation, landscape fragmentation below 2400 m was greater than that of areas higher than 2400 m above sea level. Moreover, the degree of landscape fragmentation decreased with increase in elevation above 2400 m. In addition, landscape fragmentation heterogeneity was related to anthropogenic disturbance—the zone 1000—1500 m away from buildings had the highest degree of fragmentation. The change in landscape fragmentation from 1985 to 2010 was mostly affected by human activities. The results provide valuable guidance for further studies on landscape pattern optimization and efficient management of land use in Northwest China.

Key Words: effective mesh size; landscape fragmentation; Ningxia Yellow River Valley; spatial heterogeneity

近年来,以流域为单元的生态学研究已经成为人与自然相互关系研究领域的热点。结构与功能完善的流域生态系统能有效释放生产潜力并放大系统的生态经济效益,对改善地方生态环境、促进当地经济建设至关重要。但在自然和社会因素的双重影响下,流域多呈现出不同程度的景观破碎化现象^[1-2],进而导致其生态功能减弱并逐步退化。景观破碎化是描述景观格局的重要参数,直接影响着景观的结构、功能及其内部的生态功能的变化^[3-4],对其进行研究对深入理解景观格局的形成与变化机制具有重要意义。

大尺度上景观破碎化的研究主要是基于土地利用展开,而土地利用类型的组合可以有不同的景观空间格局,因此,在进行景观破碎化研究时更需强调空间格局与生态过程的关系^[5]。当前国内外对景观破碎化的研究大多还是使用多个景观指数来综合描述景观破碎化的过程^[6-8],而对定量的测度景观破碎化的程度及对景观破碎化的空间变异特征的研究相对较少^[9-11],定量测度和空间变异结合的研究也鲜有报道。

宁夏黄河流域位于我国西北内陆,属典型的脆弱内陆流域生态系统。由于流域气候整体呈现暖干化变化,使地表水资源减少,而人口和经济增长导致了土地利用的快速转变和地下水资源持续减少,流域原有景观格局发生改变,呈现出不同程度的景观破碎化,使原本脆弱的生态环境进一步恶化。本文选取有效粒度尺寸 (effective mesh size, m_{eff})^[12]来定量分析宁夏黄河流域的景观破碎化水平,并以地统计学的方法确定流域景观破碎化的特征尺度,对流域景观破碎化空间异质性进行分析,以此揭示流域生态状况及空间变异特征,为流域土地利用管理、景观稳定及可持续发展提供科学依据。

1 研究区域概况

黄河自宁夏北部穿境而过,境内全长 397 km,有清水河、苦水河等支流注入,形成了以黄河主干及其支流组成的北部宁夏黄河流域。流域范围介于 35°50′—39°23′N, 104°17′—107°12′E 之间,面积约为 4.16 万 km²,占宁夏总面积的 81%。流域内地形复杂多样,南部为黄土丘陵区、中部为山间平原、北部为宁夏平原,三者形成了流域内面积最大的三级地势阶梯,其余地区山地、丘陵、平原和沙漠等交错分布。气候属于典型的大陆性气候,年平均气温 11.5—14℃,日照时数 2200—3000h,无霜期 110—140d,全年平均降水量为 200—800mm。根据河流及用水调度的差异,将宁夏黄河流域分为引黄灌区、黄右区间、黄左区间、清水河、苦水河、红柳沟和

盐池内流区 7 个分区(图 1)。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

本文获取了 1985 年和 2010 年两期 Landsat-5 TM 影像数据(30m * 30m, 来源于“国际科学数据服务平台”)、DEM(90m * 90m, 来源于“国际科学数据服务平台”)等数据。使用 ERDAS IMAGINE 9.2 对 TM 影像进行辐射校正、几何纠正和配准,采用监督分类提取耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类主要景观类型。参考与研究区自然条件相似的已知区域建立对应判读标志,并结合人-机交互式对错分的地区进行修改,分类结果借助 Google Earth 软件^[13]、相关航拍数据等进行验证^[14-15],结果表明 1985 年和 2010 年两期影像分类的 Kappa 系数分别达到为 0.80 和 0.78,解译精度满足研究要求。

2.2 景观破碎化指数选取

选取有效粒度尺寸(m_{eff})来定量分析流域景观破碎化水平,利用软件 Fragstats 4.1 及 Excel 进行景观破碎化指数的计算和统计分析。有效粒度尺寸融合了生态过程、景观组分与空间格局,从而可以更为综合、客观地表征景观的破碎化状况。有效粒度尺寸越小,破碎化程度就越高^[4]。计算公式如下^[12]:

$$m_{eff}(j) = \frac{1}{A_j} \sum_{i=1}^n A_{ij}^2 \quad (1)$$

式中: $m_{eff}(j)$ 表示为景观 j 的有效粒度尺寸, n 为景观 j 中非破碎斑块的数量, A_{ij} 表示景观 j 中斑块 i 的面积大小, A_j 为景观 j 的面积大小。该指数的取值范围是:最小值为栅格大小,此时相邻斑块之间的类型均不相同;最大值为景观面积,此时该景观具有唯一的类型。

2.3 景观破碎化空间异质性分析

空间异质性是产生空间景观格局的主要原因^[16-17],空间异质性分析必须考虑景观格局的尺度效应^[18]。本研究在连续空间尺度上对景观破碎化进行空间计算,借助半变异函数,以地统计学方法^[19-20]揭示变量的空间异质性,以此来确定合适的分析尺度(特征尺度)。

(1)半变异函数。半变异函数是地理现象分布中的空间依赖性与空间异质性的一个综合性衡量指标,主要参数包括:块金值 C_0 、基台值 C_0+C 及变程 A_0 。其中块金值与基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ 则反映了随机部分引起的空间异质性占总空间异质性的比重。其定义为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_{i+1}) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中, h 为两样本点的空间分隔距离, $Z(x_i)$ 与 $Z(x_i+h)$ 分别是区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 和 x_i+h 上的观测值($i = 1, 2, \dots, N(h)$), $N(h)$ 是分隔距离为 h 时的样本对总数。

(2)特征尺度确定。利用 Fragstats 4.1 的“滑窗”功能,获取不同尺度下景观破碎化的空间变异特征,再运用 GEM(Geospatial Modelling Environment)生成 20000 个随机点,并在 Arcgis10.2 中对样点进行赋值,最后利

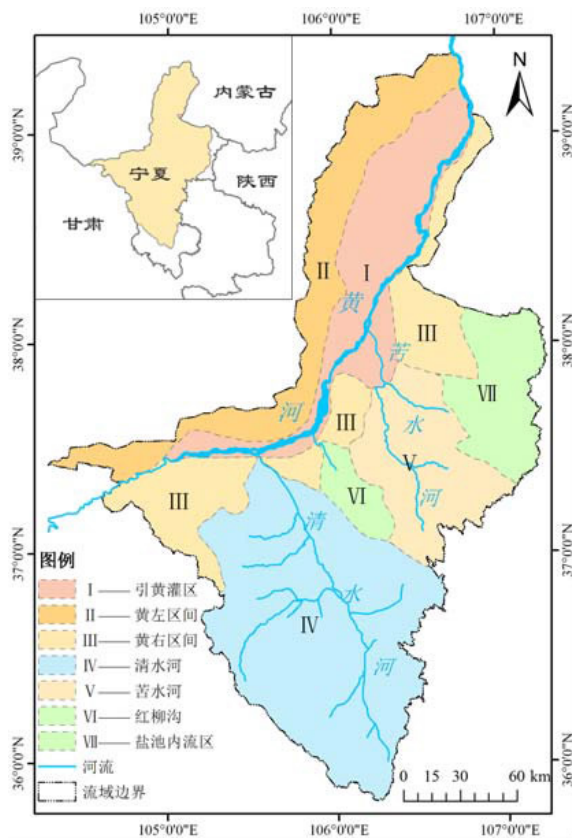


图 1 宁夏黄河流域位置及分区示意图

Fig.1 Sub-basins and location of the Ningxia Yellow River Valley

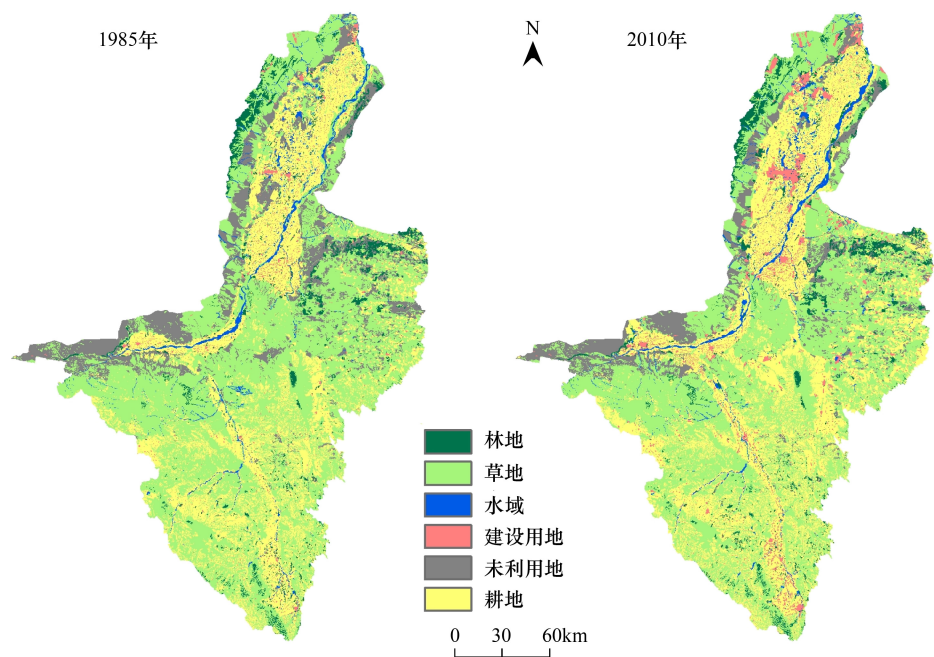


图2 1985年和2010年宁夏黄河流域景观类型分布图
Fig.2 Landscape types of the study area in 1985 and 2010

用GS+7.0软件对连续尺度序列上景观破碎化指数的空间变异特征值进行计算,进而确定流域景观空间异质性的特征尺度。

3 结果与分析

3.1 流域景观破碎化的数量变化

宁夏黄河流域7个分区面积和尺度不同,各分区的 m_{eff} 直接作为破碎化程度的比较依据将带来较大误差。因此,本文以流域分区的 m_{eff} 与其分区面积的比值来表征该流域分区的破碎化程度(百分比),比值越大破碎化程度越低,比值越小破碎化程度越高。计算结果如表1所示。

表1 1985—2010年宁夏黄河流域分区有效粒度尺寸(m_{eff})变化
Table 1 Effective mesh size(m_{eff}) of the Ningxia Yellow River Valley from 1985 to 2010

流域分区 Sub-basin	面积/km ² Area	1985		2010		m_{eff} 变化比例/% m_{eff} change percentage
		$m_{\text{eff}}/\text{km}^2$	比例/% Percentage	$m_{\text{eff}}/\text{km}^2$	比例/% Percentage	
引黄灌区 The Yellow River Water Irrigation Area	6691.54	1228.82	18.36	1388.32	20.75	12.98
黄右区间 The Huangyou Area	6144.33	644.16	10.48	627.74	10.22	-2.55
黄左区间 The Huangzuo Area	5747.11	399.96	6.96	361.41	6.29	-9.64
清水河 Qingshui River	13641.01	3840.82	28.16	1833.36	13.44	-52.27
苦水河 Kushui River	4877.88	2166.21	44.41	1614.56	33.10	-25.47
红柳沟 Hongliugou River	1075.86	526.34	48.92	314.35	29.22	-40.28
盐池内流区 Yanchi Inland Area	3375.72	761.49	22.56	331.40	9.82	-56.48
流域整体 The Ningxia Yellow River Valley	41553.45	6326.62	15.23	2974.32	7.16	-52.99

流域整体景观的 m_{eff} 在1985年为6326.62 km²,2010年大幅减小为2974.32 km²,减小比例高达52.99%,说明25年间景观整体的破碎化程度大幅加剧。人口和经济快速发展,具有较大斑块面积的草地和未利用地发生转变,斑块面积进一步减小,破碎化程度加剧,景观异质性加大。

从流域分区来看,各流域分区的破碎化程度不一,破碎化最剧烈的是黄左区间,其 m_{eff} 仅占该区面积的 6.96%,其后依次是黄右区间、引黄灌区、盐池内流区、清水河、苦水河和红柳沟。在上个世纪 80 年代,流域人口少、经济发展水平低,人为因素对流域景观破碎化影响较大的区域主要在人口聚集区,即引黄灌区;此外,自然地理条件在一定程度上决定景观破碎化水平,在例如黄左区间和黄右区间等地形地貌复杂程度较大的区域,人为干扰较小,但自然景观复杂程度较大,也具有较高的景观破碎化水平;而苦水河和红柳沟地形地貌较为简单,景观类型单一,人为干扰也较小,破碎化程度最小。

由于各流域分区自然地理环境的不同,人口与经济的发展也表现出差异,对流域分区的景观破碎化的影响也不相同。从 1985—2010 年的 m_{eff} 变化可知,清水河、苦水河、盐池内流区、黄右区间、红柳沟和黄左区间的破碎化程度均有所加剧,其中清水河和盐池内流区的变化最为剧烈, m_{eff} 减小幅度高达 52.27% 和 56.48%;7 个分区中仅有引黄灌区的 m_{eff} 有所增大,景观破碎化程度有所减弱。清水河流域大部分属于黄土高原,地形地貌复杂、建设用地和耕地的增加、草地的减少等引起景观复杂程度加大,破碎化程度加剧;盐池内流区的降水在研究时段有所增加^[21],植被水分条件得到改善,并且“三北”防护林工程和防沙治沙工程等引起草地、林地面积增加,未利用地大幅减少,再加之耕地和建设用地的增长,景观破碎化程度增加;在人口最为密集的引黄灌区,对耕地和建设用地的需求加大,并连接成片,而草地和未利用地等面积大幅减少,使得景观类型单一化,导致破碎化程度有所降低。

3.2 流域景观破碎化的空间变异特征

3.2.1 特征尺度

以流域 1985 年有效粒度尺寸 (m_{eff}) 的空间尺度变异分析结果作为景观破碎化分析尺度确定的依据,结果如图 3 所示。由图可知空间变异特征值(块金值 C_0 与基台值 ($C_0 + C$) 的比值)随幅度的增加而增大,在 4500m 左右时开始相对平稳,表明在该尺度能够反映景观破碎化空间变异特征,因此在 Fragstats 软件中设置 4500m 作为空间分析的“滑窗”大小。

3.2.2 景观破碎化指数的空间变异特征

流域 m_{eff} 大小的空间分布在 4500m 的空间尺度下如图 4 所示,高值代表景观破碎化程度低,景观类型单一,且分布较连续,低值代表景观破碎化程度高,景观类型间的组合复杂。1985 年和 2010 年流域有效粒度尺寸的高值区和低值区空间分布状况大体相同,高值区和低值区交错分布,且低值区范围明显多于高值区。破碎化程度较大的区域主要位于流域南部、中东部、黄河沿岸及贺兰山山麓地带,在流域分区上与清水河流域、盐池内流区、引黄灌区、黄左区间、黄右区间等相对应,景观破碎化的空间异质性与流域分区景观破碎化的程度保持一致。

就 1985 年和 2010 年流域 m_{eff} 的空间变化而言, m_{eff} 减小的区域的范围明显大于 m_{eff} 增大的区域,即景观破

碎化程度加大的区域多于下降的区域,景观破碎化空间异质性表现出明显的上升趋势,其中以流域南部和中东部的变化最为明显,结果与对应的清水河流域和盐池内流区景观破碎化的数量变化也保持一致。

3.3 不同背景下的景观破碎化异质性

景观破碎化在不同自然条件和人为干扰背景下的空间异质性不同。本文以海拔和降水作为自然背景条件,来探究景观破碎化在不同自然条件下的空间异质性(图 5-a、b);由于受限于研究区人口和经济数据,本文仅以距城市和居民住宅地等人为活动最强区域的距离大小来表征流域内人为干扰的强弱^[22-23],分析景观破

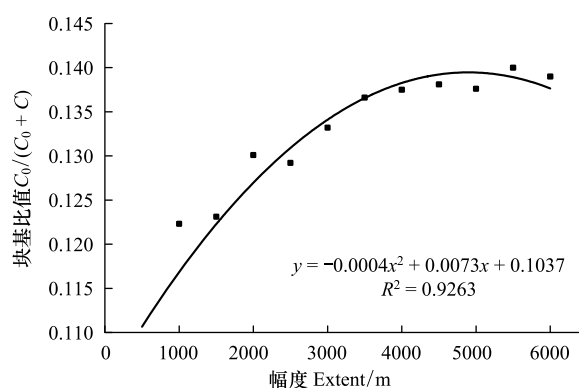


图 3 不同研究幅度下宁夏黄河流域景观破碎化空间变异特征及其变化趋势

Fig.3 The trend of characteristic values of spatial heterogeneity with different extents in the Ningxia Yellow River Valley

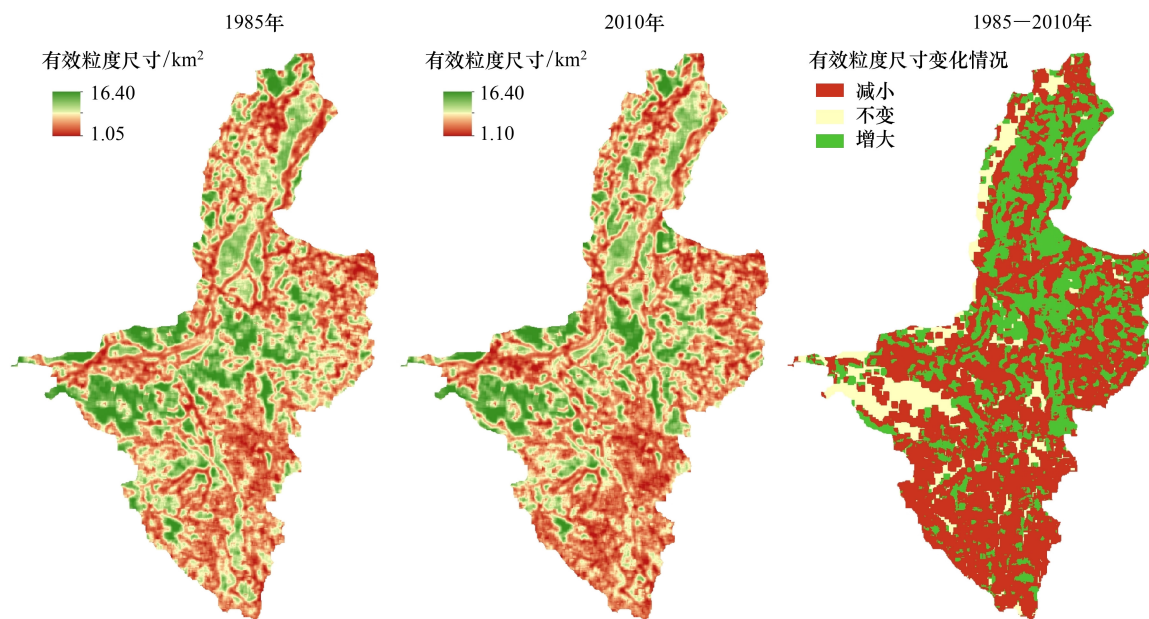


图4 宁夏黄河流域景观破碎化的空间格局

Fig.4 The spatial pattern of effective mesh size in the Ningxia Yellow River Valley

破碎化在不同人为干扰强度(图 5-c、d)下的空间异质性,即距建设用地距离越小的区段人为干扰越强。不同区段的景观破碎化程度以该区段所包含上文获取到随机点来计算平均有效粒度尺寸($avg-m_{eff}$)表示,值越小,破碎化程度越高。

3.3.1 海拔变化下的景观破碎化异质性

不同海拔区段的 $avg-m_{eff}$ 空间分异结果显示,1985 年和 2010 年研究区内景观破碎化异质性特征基本一致。2400 m 以下区段的景观破碎化程度均较高,且变化较为平稳;在 2400 m 以上区段的破碎化程度随海拔升高而明显降低(图 6-a)。表明 2400m 以下区段景观破碎化受海拔影响较小,以上区段景观受海拔因子的影响强烈。

就 1985 和 2010 年流域景观破碎化的变化来看,除 1064—1200 m 区段外,其他海拔区段的景观破碎化均有不同程度的加剧,在 1200—2400 m 区段破碎化程度加剧幅度随海拔的上升而增大,在 2400 m 以上区段景观破碎化加剧的幅度随海拔的上升而降低。在海拔背景条件一致情况下,流域 2010 年景观破碎化程度较 1985 年发生加剧变化,表明变化主要是由于其他自然条件变化和人为因素干扰引起的。

3.3.2 降水变化下的景观破碎化异质性

通过对流域不同降水量区域的有效粒度尺寸进行计算可知(图 6-b),降水对流域景观破碎化变化有明显作用。在空间变化上,景观破碎化程度在 1985 年和 2010 年均表现出随降水的增加而加剧的变化,在多年平均降水量最大的 400—425mm 区段,破碎化程度达到最大。呈现这种变化是由流域降水的不均匀分布、流域自北向南的三级地形地貌分布以及人口经济等人为因素共同作用造成的。

景观破碎化程度在 1985 年到 2010 年流域各区段的破碎化程度均有不同程度的加剧。宁夏黄河流域近 30 年降水呈下降变化,气温逐渐升高,总体向暖干化发展变化^[24-25],并会进一步影响流域的能量平衡,从而加速流域景观破碎化进程^[7]。此外,研究时段内流域人口和经济快速发展,不同降水区段人为影响均有所加剧,景观类型发生变化,也是导致流域破碎化程度加大的原因。

3.3.3 人为干扰下的景观破碎化异质性

由不同人为干扰强度区段的 $avg-m_{eff}$ 可知(图 5-c、d,图 7),1985 年和 2010 年研究区内景观破碎化程度与人为干扰强度呈现出相同的变化趋势。在距建设用地 1500 m 以内的强人为干扰区段,斑块类型由较为单一

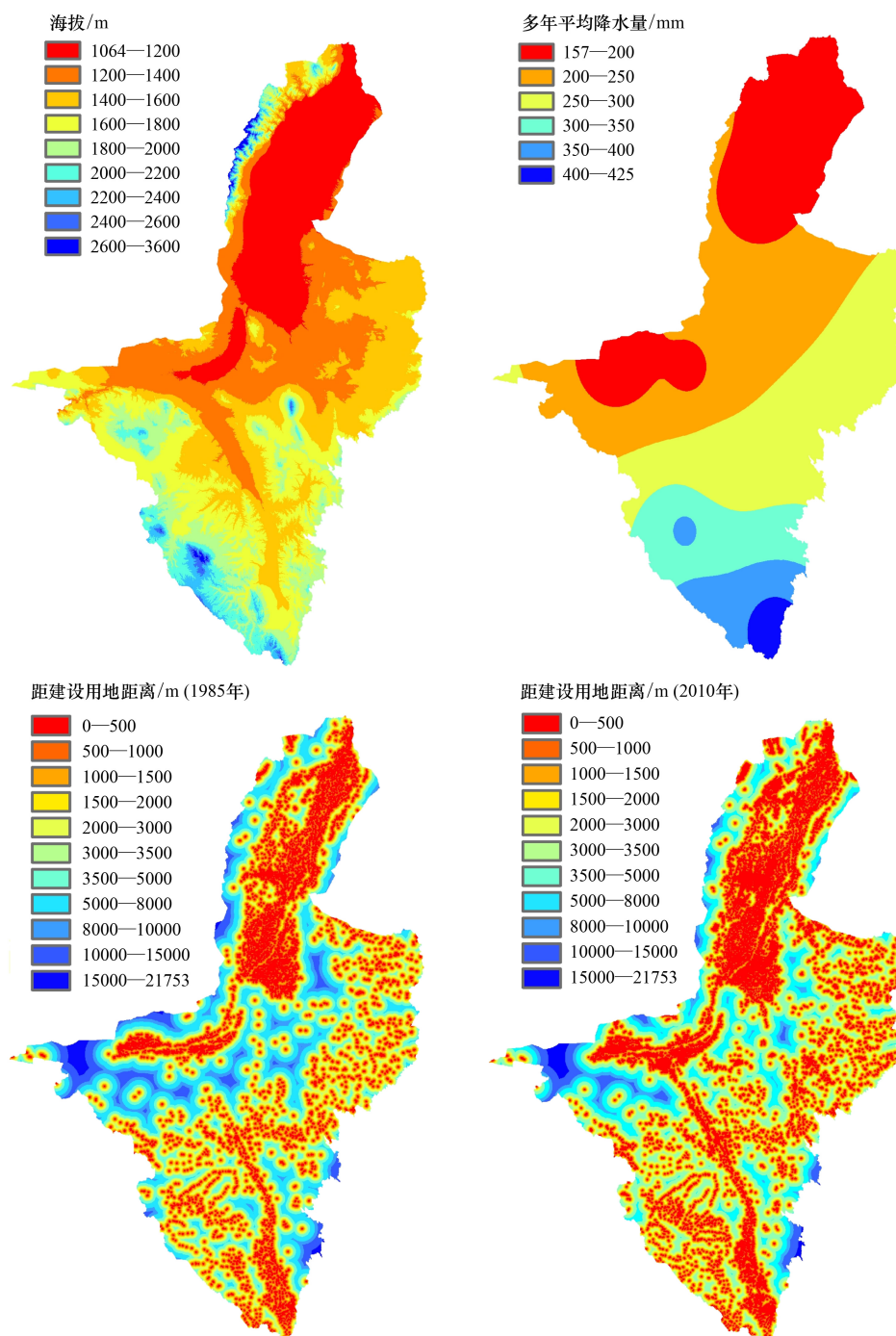


图5 海拔、多年平均降水量和人为干扰强度的区段划分

Fig.5 Zones of elevation, mean annual precipitation and human influence

建设用地逐渐向斑块类型多样的城市郊区变化,因此景观破碎化程度随人为干扰强度的减小而增大;在1500—10000 m 中强度人为干扰区段,景观破碎化随人为干扰强度的降低而逐渐减弱;在10000 m 以外区段,破碎化程度又有明显的加剧变化。

就1985和2010年流域景观破碎化的变化来看,人为干扰较强的1500m 以内和人为影响较弱的10000 m 以外区段的景观破碎化程度均有所加剧。结合图5可知,1500m 以内区域的变化主要由受较强人为干扰引起,而10000 m 以外区段可能受生态修复措施和降水、气温等自然条件变化的影响更为显著。而在1500—10000m 之间的中度人为干扰区段的景观破碎化程度在1985年到2010年间基本未发生改变,表明在人为干

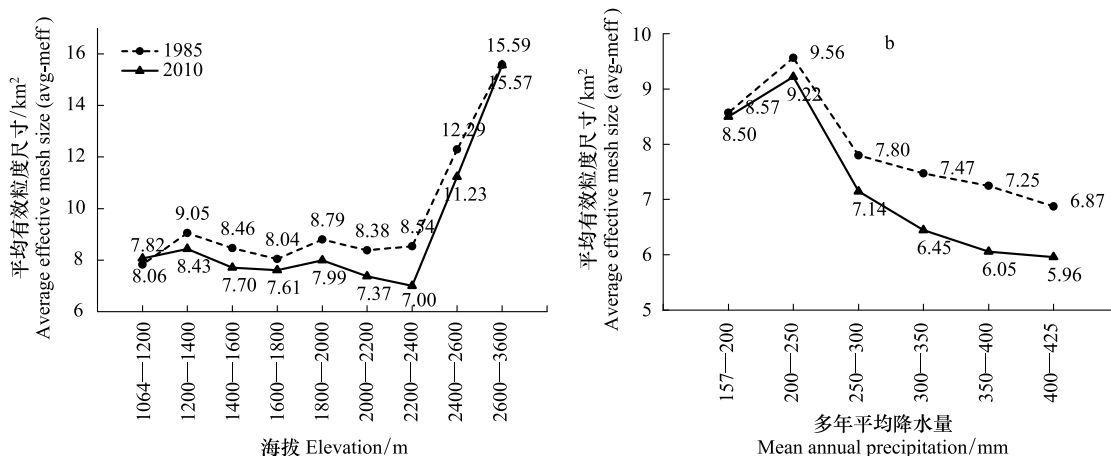


图6 景观破碎化随海拔(a)和降水(b)的空间变异特征

Fig.6 Effective mesh size of different zones in the Ningxia Yellow River Valley (a. Elevation, b. Mean annual precipitation)

扰强度相同的情况下,由自然条件改变引起景观破碎化发生的变化有限。

4 结论

对宁夏黄河流域景观破碎化进行研究,选取有效粒度尺寸(m_{eff})作为景观破碎化程度的度量参数,对流域在1985—2010年间景观破碎化程度进行分析,并利用“滑窗法”对流域景观破碎化的空间变异特征进行分析,得到以下几点结论。

在研究时段内,宁夏黄河流域内黄左区间的景观破碎化程度最高,红柳沟和苦水河的破碎化程度最低,流域整体的景观破碎化在25年间急剧增加。

研究区内景观破碎化程度大的区域面积偏大,25年间景观破碎化程度加剧的区域增长显著,以流域南部和中东部最为明显,且与相应流域分区的数量变化保持一致。

景观破碎化在2400 m以下区段受海拔影响较小,以上区段具有随海拔升高而下降的效应;降水在空间上的不均匀分布及降水量的变化均对流域景观破碎化的空间异质性及变化有重要影响;在建设用地及近郊人为干扰较强区段的景观破碎化程度随人为干扰强度的增加而增大。

研究区在25年间景观破碎化受人为干扰影响产生的变化最为显著,由自然条件改变产生的影响有限。

在未来的流域整体的管理上,应结合流域的不同流域分区、自然以及不同人为干扰等因素对流域景观破碎化的影响来做出合理的利用规划,使其生态负面影响最小化。

参考文献(References):

- [1] Khaznadar M, Vogiatzakis I N, Griffiths G H. Land degradation and vegetation distribution in Chott El Beida wetland, Algeria. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(3): 369-377.
- [2] 姜朋辉, 赵锐锋, 赵海莉, 卢李朋, 谢作轮. 黑河中游湿地景观破碎化与气候变化的关系. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1661-1668.
- [3] 何念鹏, 周道玮, 吴冷, 张玉芬. 人为干扰强度对村级景观破碎度的影响. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 897-899.
- [4] 李正国, 王仰麟, 张小飞, 吴健生. 陕北黄土高原景观破碎化的时空动态研究. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2066-2070.

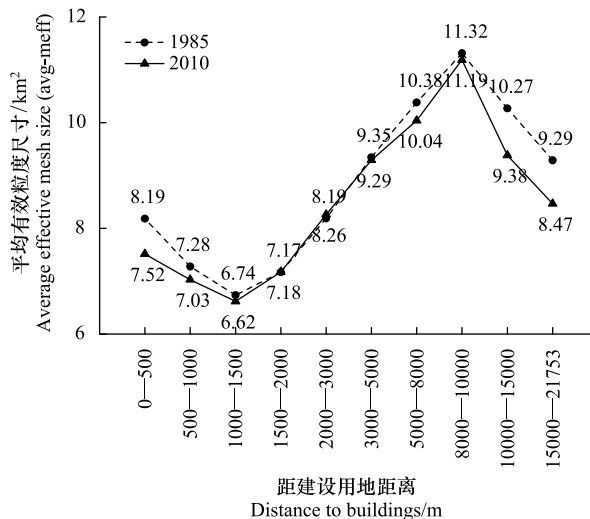


图7 景观破碎化随人为干扰的空间变异特征

Fig.7 Effective mesh size of different zones of human influence in the Ningxia Yellow River Valley

- [5] 石玉胜, 肖捷颖, 沈彦俊, 刘敏. 土地利用与景观格局变化的空间分异特征研究——以天津市蓟县地区为例. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 416-421.
- [6] Reddy C S, Sreelekshmi S, Jha C S, Dadhwal V K. National assessment of forest fragmentation in India; landscape indices as measures of the effects of fragmentation and forest cover change. *Ecological Engineering*, 2013, 60: 453-464.
- [7] 赵锐锋, 姜朋辉, 赵海莉, 樊洁平. 黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析. 生态学报, 2013, 33(14): 4436-4449.
- [8] 高江波, 蔡运龙. 区域景观破碎化的多尺度空间变异研究——以贵州省乌江流域为例. 地理科学, 2010, 30(5): 742-747.
- [9] Jaeger J A G, Bertiller R, Schwick C, Müller K, Steinmeier C, Ewald K C, Ghazoul J. Implementing landscape fragmentation as an indicator in the Swiss Monitoring System of Sustainable Development (MONET). *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4): 737-751.
- [10] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 曲衍波. 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. 生态学报, 2013, 33(17): 5363-5374.
- [11] 李栋科, 丁圣彦, 梁国付, 赵清贺, 汤茜, 孔令华. 基于移动窗口法的豫西山地丘陵地区景观异质性分析. 生态学报, 2014, 34(12): 3414-3424.
- [12] Jaeger J A G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size; new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 2000, 15(2): 115-130.
- [13] Luedeling E, Buerkert A. Typology of oases in northern Oman based on Landsat and SRTM imagery and geological survey data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1181-1195.
- [14] Michelson D B, Liljeberg B M, Pilesjö P. Comparison of algorithms for classifying Swedish landcover using Landsat TM and ERS-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(1): 1-15.
- [15] 郑青华, 罗格平, 朱磊, 周德成. 基于 CA_Markov 模型的伊犁河三角洲景观格局预测. 应用生态学报, 2010, 21(4): 873-882.
- [16] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华, 谈文琦, 梅安新. 不同尺度下城市景观综合指数的空间变异特征研究. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2053-2059.
- [18] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology; the Robert H. Macarthur award lecture. *Ecology*, 1992, 73(6): 1943-1967.
- [19] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [20] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. 地理学报, 2000, 55(4): 428-438.
- [21] 璩向宁, 王惠荣. 宁夏盐池县近 50 年气候变化特征分析. 宁夏工程技术, 2006, 5(4): 321-322.
- [22] 朱建军, 崔保山, 姚华荣, 董世魁. 纵向岭谷区公路沿线土地利用变化与扩展效应. 自然资源学报, 2006, 21(4): 507-515.
- [23] 秦佩恒, 武剑峰, 刘雅琴, 曾辉. 快速城市化地区景观可达性及其对林地的影响——以深圳市宝安区为例. 生态学报, 2006, 26(11): 3796-3803.
- [24] 李艳春, 李艳芳. 宁夏近百年来的气候变化及突变分析. 高原气象, 2001, 20(1): 100-104.
- [25] 赖荣生, 余海龙, 黄菊莹. 宁夏中部干旱带气候变化及其对春玉米气候生产潜力的影响. 中国农业大学学报, 2014, 19(3): 108-114.