

张金茜, 巩杰, 柳冬青. 地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J]. 地理科学, 2018, 38(8): 1370-1378. [Zhang Jinxi, Gong Jie, Liu Dongqing. Dynamics and Driving Factors of Landscape Fragmentation Based on GeoDetector in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(8): 1370-1378.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.08.020

地理探测器方法下甘肃白龙江流域 景观破碎化与驱动因子分析

张金茜, 巩杰, 柳冬青

(兰州大学资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于GIS技术、景观格局指数、主成分分析和地理探测器的方法, 定量分析了1990~2014年甘肃白龙江流域的景观破碎化及其驱动因子。结果表明: 1990~2014年甘肃白龙江流域景观破碎化程度先增加后降低; 研究期间流域东南部的景观指数变化最为剧烈和复杂, 主要是文县和武都区; 人类干扰(人类活动强度和土地利用类型)和地形因子(高程、坡度和坡向)对景观破碎化空间分异的影响显著不同, 其中人类干扰是景观破碎化空间分异的主要驱动因子。

关键词: 地理探测器; 景观破碎化; 甘肃白龙江流域

中图分类号: P901 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2018)08-1370-09

景观破碎化是指自然或人文因素干扰所导致的景观由简单趋向于复杂的过程^[1], 它直接影响着景观中生物多样性、能量流动、物质循环等生态特征与过程, 是导致土地退化、生态系统服务功能弱化及生物多样性减少的主要原因^[2]。因此, 景观破碎化成为景观生态学重要的研究热点之一^[3]。近年来, 国内外学者致力于景观破碎化研究, 主要集中在景观破碎化时空格局特征与其驱动因子研究^[3]、对生物多样性^[4]及栖息地^[5]的影响研究以及景观破碎化对生态系统过程和功能的影响研究^[6]等方面。其中, 景观破碎化的驱动因子研究不仅可以深入了解其成因, 而且可以建立景观结构特征与内外部驱动作用的动力联系, 并为其动态预测奠定基础^[7]。国外对景观破碎化驱动因子的研究侧重于对比同一因子影响下不同区域景观破碎化过程间的差异性, 同时对各驱动因子进行细化与量化, 重视人文因子的驱动作用^[8]; 国内侧重于某一区域的景观破碎化驱动因子分析。概括来讲, 景观破碎化驱动因子的研究方法主要分为定性描述和定量分析, 定性分析方法粗糙, 仅能表征景观破

碎化与各因子驱动关系的发展趋势^[9], 难以明晰驱动因子在多大程度上影响景观破碎化程度; 定量方法主要是相关性分析、主成分分析、灰度关联分析、经典回归模型等, 此类方法主观性较强, 未能定量分析各驱动因子在景观破碎化中的相互作用(协同作用、拮抗作用或相互独立)^[10]。地理探测器是探测空间分异及揭示其背后驱动因子的一组统计学方法, 它基于空间数据特有的空间分异性, 在度量了空间分异度的同时, 挖掘空间分异性所隐含的独特信息^[11], 它的优势是可以定量分析景观破碎化各驱动因子之间的相对重要性; 探测各驱动因子的交互作用; 驱动因子既可以是可量化因子, 也可以是定性因子^[10]。目前, 地理探测器因其独特优势已被应用于土地利用、区域经济、公共卫生、环境污染等多个领域^[12,13], 但在景观破碎化中的应用报道少见。

甘肃白龙江流域是甘肃省主要的用材林基地, 矿产资源丰富, 但流域也是长江上游水源涵养与水土保持的重要生态区, 同时还是中国滑坡、土壤侵蚀和泥石流灾害高发区之一, 生态环境脆

收稿日期: 2017-07-11; **修订日期:** 2017-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(41771196、41271199)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41771196, 41271199).]

作者简介: 张金茜(1995-), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事土地变化科学与景观生态研究。E-mail: zhangjq2016@lzu.edu.cn

通讯作者: 巩杰, 副教授。E-mail: jgong@lzu.edu.cn

弱,这就不可避免使得社会经济发展与生态环境保护的矛盾更加尖锐。因此,甘肃白龙江流域的土地利用/覆被变化、景观格局时空变化及其驱动机制、生态系统服务功能与生态安全等研究主题必然受到广泛关注。众多学者已从土地利用、植被、生态系统服务与生态评价等方面在甘肃白龙江流域进行了系统研究,并取得丰硕成果^[14-16],而有关流域景观格局变化及其驱动力的研究报道较少。本文以甘肃白龙江流域为研究区,基于景观格局指数、主成分分析和地理探测器等方法,开展流域景观破碎化及其驱动因子分析,尝试为认识景观破碎化背后的过程机理提供另一种途径,旨为流域的可持续发展提供理论支撑。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

甘肃白龙江流域位于甘肃省东南部,地理位置是 $103^{\circ}00' \sim 105^{\circ}30' E$, $32^{\circ}36' \sim 34^{\circ}24' N$,地处青藏高原向秦巴山地和黄土高原过渡的交错带,流域面积约 $1.84 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。流域地势西北高东南低,海拔 $573 \sim 4866 \text{ m}$,山地、河谷与黄土地貌相间分布。境内气候类型复杂,年均气温 $6 \sim 15^{\circ} \text{ C}$,年降水量 $400 \sim 850 \text{ mm}$ 。土壤类型主要有棕壤、暗棕壤、高山草甸土、褐土等;植被类型主要有亚高山针叶林、高山灌木林、落叶阔叶林、落叶阔叶和常绿阔叶混交林等。流域主要包括宕昌、迭部、舟曲、文县和武都大部分地区,是一个多民族聚集区,少数民族以藏族、回族为主。

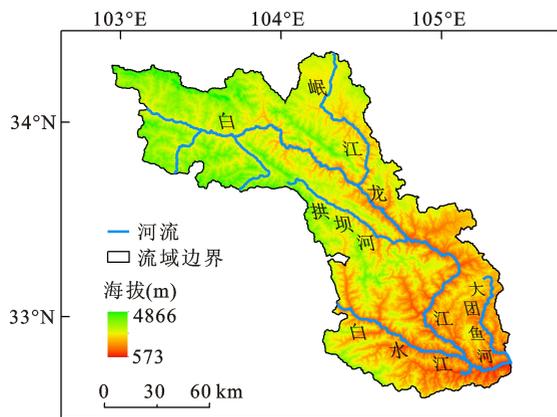


图1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源与处理

甘肃白龙江流域景观类型图数据源的时间分别为1990、2002和2014年,来源于Landsat TM/ETM+遥感数据,空间分辨率为 30 m ,时相为7~8月。预处理过程主要包括辐射校正、大气校正、几何配准、波段融合、图像镶嵌与裁剪等过程。根据LUCC分类标准^[17]和甘肃白龙江流域实际情况,通过ArcGIS10.3目视解译将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、居民工矿用地和未利用地,经野外验证和高分辨率遥感影像检验,数据解译整体精度达84%以上,满足研究要求。

DEM是 30 m 的ASTER GDEM数据,来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),用于提取坡度、坡向及海拔等级区间分类等;人类活动强度通过人口密度、居民点、耕地面积和道路4个因子计算^[18]。

1.3 研究方法

采用景观格局指数比较法,基于FRAGSTATS软件,在景观水平上进行景观指数计算以描述流域景观破碎化的整体特征。参考相关文献^[19-21]并结合研究区实际情况,选取边缘密度(ED)、蔓延度(CONTAG)、香农多样性(SHDI)和分离度(DIVISION)表征流域景观的破碎化程度。各景观指数计算公式和生态学意义参见文献[22]。

为了直观反映流域1990~2014年3个时期景观指数的空间变化特征,采用网格分析法揭示景观指数的区域差异。参考前人研究^[23,24]与流域范围,本文网格大小采用 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$,共将流域划分为148个网格,后采用FRAGSTATS计算不同时期各网格的景观指数,并基于GS+和ArcGIS地统计模块对各景观指数进行普通克里格插值,得到流域不同时期各景观指数空间分布图。

运用地理探测器的方法开展景观破碎化(分析变量)与驱动因子之间的空间关联关系。构建分析变量的操作步骤:基于ArcGIS平台,创建1000个随机点代表总体,依据随机点分别在各景观指数插值图中提取数值,然后导入SPSS进行主成分分析得到一个新的综合变量来表示流域景观破碎化;驱动因子主要是高程、坡度、坡向、土地利用类型和人类活动强度。

地理探测器主要由风险探测、因子探测、生态探测和交互探测组成^[11],其核心思想基于假设:如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自

变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[25-27]。模型的公式表达如下：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2$$

式中, q 为某指标的空间异质性, $q \in [0,1]$; N 为研究区全部样本数; σ_i^2 为指标的方差; $i=1, 2, \dots, L$, i 表示分区, L 表示分区数目。 q 的大小反映了空间分异的程度, q 值越大,表示空间分层异质性越强,反之则空间分布的随机性越强。当 $q=0$ 时指示研究对象不存在空间异质性;当 $q=1$ 时指示完美的空间异质性。

2 结果及分析

2.1 流域景观破碎化的基本特征

1990~2014年甘肃白龙江流域景观指数的变化规律表明,流域景观破碎化程度先增加后降低(表1)。由表1看出,1990~2014年流域景观的ED和SHDI呈先增后减的变化趋势,表明流域景观在边缘形状上由不规则向规则发展,景观类型的多样化程度先增后减;CONTAG先减后增,表明流域景观中不同斑块类型的团聚程度由弱到强,CONTAG越高,说明景观中有连通性较高的优势斑块存在,连接性较好,反之则存在较多的小斑块,破碎化程度较高;DIVISION呈微弱的下降趋势。

表1 1990~2014年甘肃白龙江流域景观水平的景观指数

Table 1 Landscape pattern indices in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province in 1990-2014

景观指数	ED(m/km ²)	CONTAG (%)	SHDI	DIVISION
1990年	28.42	62.16	1.15	0.98
2002年	29.25	61.00	1.19	0.97
2014年	22.36	63.83	1.12	0.95

一般的,景观破碎化受人类活动的影响,县(区)行政单元可以更好的反映人类活动。可以看出,1990~2002年,流域内各县(区)景观指数ED有增有减,武都、文县和宕昌增加,幅度为:武都>文县>宕昌;景观指数CONTAG在各县(区)中均减少,幅度为:文县>舟曲>迭部>武都>宕昌;仅武都区的景观指数SHDI呈略微下降趋势(-0.000 8),其余县(区)均增加,幅度为:文县>舟曲>迭部>宕昌;仅武都和宕昌的景观指数DIVISION略下降(-0.002 3和-0.004 7),其余县(区)均增加,幅度为:舟曲>文县>迭部。综合分析,1990~2002年文县和武都的景观破碎化程度显著增加(图2)。

2002~2014年,流域内各县(区)景观指数ED均减少,幅度为:文县>武都>宕昌>舟曲>迭部,且文县和武都的减少幅度远高于其他县(区);仅宕昌的景观指数CONTAG略微下降(-0.449 5),其余县(区)均增加,幅度为:文县>舟曲>迭部>武都;仅武都和宕昌的景观指数SHDI略微增加,其余县(区)均减少,幅度为:文县>舟曲>迭部;景观指数DIVISION仅宕昌呈略微增加的趋势,其余县(区)均减少,幅度为:舟曲>迭部>文县>武都。综合分析,2002~2014年文县的景观破碎化程度显著降低。

2.2 流域景观指数的空间分异

甘肃白龙江流域ED的空间分布情况如图3。1990年流域ED高值区主要为武都、宕昌及文县东部,低值区主要为舟曲西部及文县南部(图3a);2002年武都东部ED显著提高(图3b);2014年ED几乎无高值区,与2002年相比,武都、文县和宕昌的ED大幅减少(图3c)。1990~2014年,ED剧烈变化区主要是武都和文县;宕昌东南部变化也较明显。

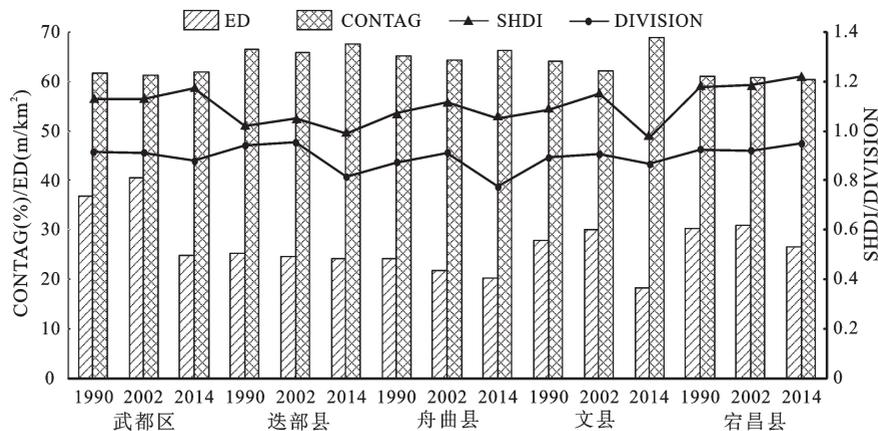


图2 甘肃白龙江流域各县(区)景观水平的景观指数

Fig.2 Landscape pattern indice in 5 counties (districts) of the Bailongjiang Watershed in Gansu in 1990-2014

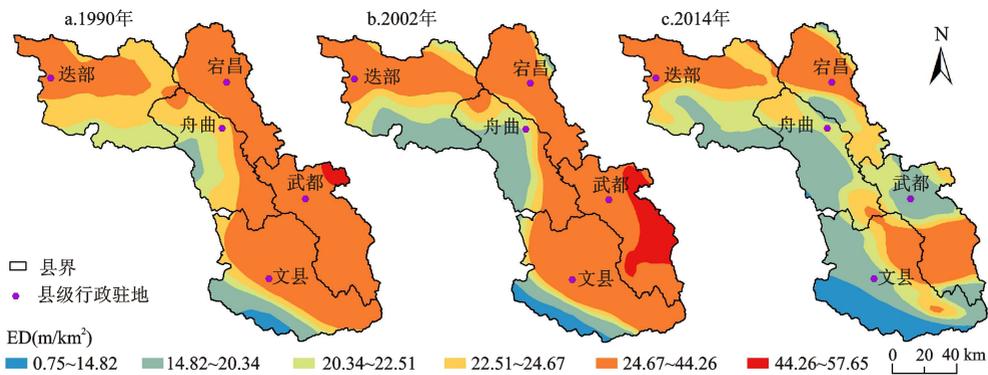


图3 甘肃白龙江流域ED空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ED in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province

甘肃白龙江流域CONTAG空间分布情况如图4。1990年流域CONTAG高值区与低值区在空间上交错分布(图4a);2002年武都东南及文县东部的CONTAG显著降低,其余各县变化不显著(图4b);2014年各县(区)CONTAG均增加,且高值区的分布面积相比2002年相对扩大(图4c)。1990~2014年CONTAG在各县(区)均有较明显变化,武都和文县尤为剧烈和复杂。

甘肃白龙江流域SHDI空间分布情况如图5。1990年流域SHDI高值区条状分布(图5a);2002年SHDI高值区主要是文县中部(图5b);2014年SHDI高值区显著减少(图5c)。1990~2014年文县SHDI剧烈变化。

甘肃白龙江流域DIVISION空间分布情况如图6。可以发现,2014年SHDI高值区与1990年和2002年相比显著减少(图6c)。1990~2014年,流域绝大部分地区DIVISION剧烈变化,尤以文县显著。

综合分析景观指数ED、CONTAG、SHDI和

DIVISION的空间分布规律表明,1990~2014年流域东南部的景观破碎化程度先增后减,其变化最为剧烈和复杂,以文县和武都区为主。

2.3 流域景观破碎化空间分异的驱动因子分析

通过景观指数ED、CONTAG、SHDI和DIVISION表征研究区景观破碎化,由于其在反映景观破碎化的信息中存在一定重叠,因此使用主成分分析将其重新组合成一组新的互不相关的综合变量以表征流域景观破碎化,并将该综合变量作为地理探测器的分析变量;同时,对各驱动因子(高程、坡度、坡向、土地利用类型和人类活动强度)进行分区处理,导入地理探测器运算。

甘肃白龙江流域景观指数的主成分分析结果见表2。理论上,1990、2002和2014年的景观指数均可做主成分分析,但考虑到公因子方差的提取程度、初始特征值和KMO大小,KMO统计量可表征因子间的相关性程度,其值介于0~1,且KMO越接近1,表明因子间的相关性越强,越适合主成分

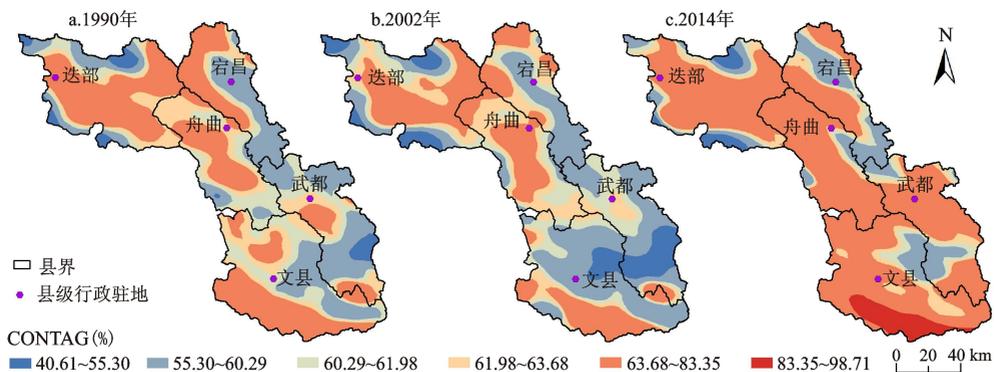


图4 甘肃白龙江流域CONTAG空间分布

Fig.4 Spatial distribution of CONTAG in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province

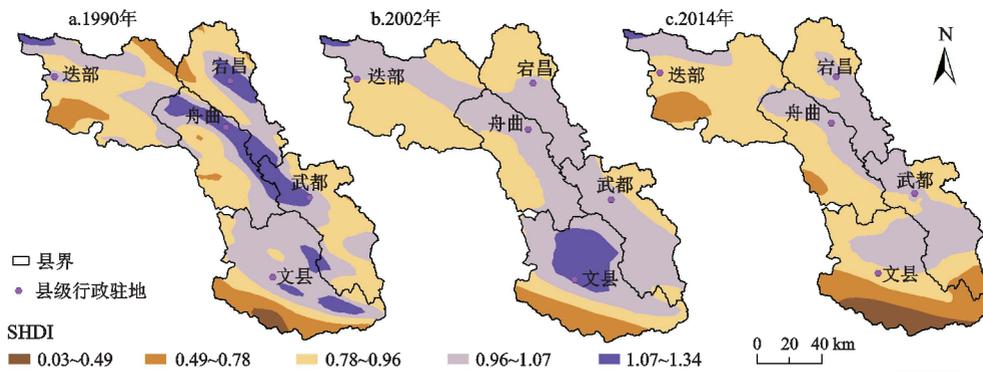


图5 甘肃白龙江流域SHDI空间分布

Fig.5 Spatial distribution of SHDI in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province

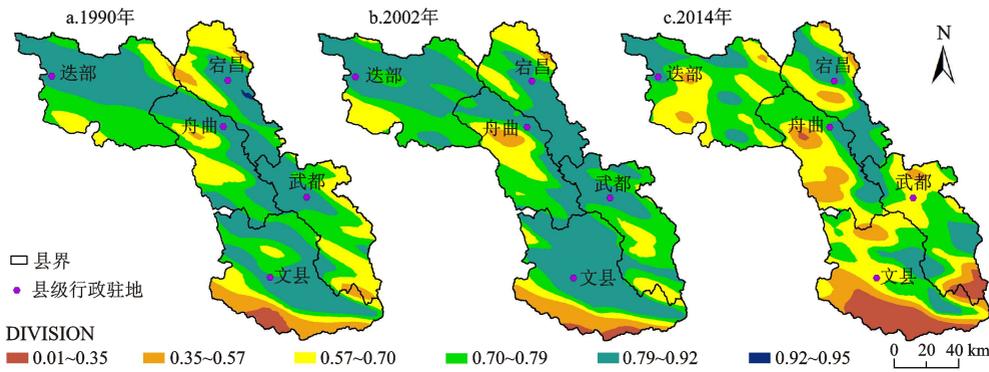


图6 甘肃白龙江流域DIVISION的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of DIVISION in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province

表2 甘肃白龙江流域景观指数的主成分分析

Table 2 Principal component analysis of the landscape pattern index in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province

年份	KMO	Bartlett 检验(sig)	景观 指数	公因子方差		成 份	初始特征值		景观 指数	主成份 1
				初始	提取		合计	方差的%		
1990	0.697	0.000	CONTAG	1.000	0.692	1	2.756	68.908	CONTAG	-0.832
			SHDI	1.000	0.842	2	0.739	18.485	SHDI	0.918
			ED	1.000	0.482	3	0.383	9.572	ED	0.695
			DIVISION	1.000	0.740	4	0.121	3.035	DIVISION	0.860
2002	0.684	0.000	CONTAG	1.000	0.585	1	2.611	65.283	CONTAG	-0.765
			SHDI	1.000	0.734	2	0.712	17.796	SHDI	0.857
			ED	1.000	0.573	3	0.467	11.669	ED	0.757
			DIVISION	1.000	0.719	4	0.210	5.252	DIVISION	0.848
2014	0.834	0.000	CONTAG	1.000	0.844	1	3.261	81.525	CONTAG	-0.918
			SHDI	1.000	0.811	2	0.364	9.090	SHDI	0.901
			ED	1.000	0.720	3	0.251	6.282	ED	0.849
			DIVISION	1.000	0.886	4	0.124	3.104	DIVISION	0.941

分析。本文选取2014年作为研究年份开展进一步分析。由表2知,2014年的景观指数在主成分分析

后,第一主成份可以解释原变量81.525%,并且CONTAG、SHDI和DIVISION对景观破碎化的影

响权重达到0.9以上,ED也达到0.849,说明选取第一主成份表征流域景观破碎化的合理性。景观破碎化综合变量表达式为: $F=(-0.51)\times Z_{CONTAG}+0.50\times Z_{SHDI}+0.47\times Z_{ED}+0.52\times Z_{DIVISION}$,其中, Z_{CONTAG} , Z_{SHDI} , Z_{ED} 和 $Z_{DIVISION}$ 为CONTAG、SHDI、ED和DIVISION标准化后的数值。

地理探测器的分析变量构建完成后,对各驱动因子进行分区,具体的分区方法、数目及区段说明见表3。

生态探测,可以比较各驱动因子间对分析变量空间分异的影响是否有显著差异^[1]。其探测结果表明:土地利用类型和人类活动强度均与高程、坡度和坡向之间存在显著差异,土地利用类型与人类活动强度之间不存在显著差异,高程、坡度和坡向相互之间均不存在显著差异。这表明人类干扰和地形因子对景观破碎化空间分异的影响显著不同。

因子探测,可以探测各驱动因子多大程度上解释了分析变量的空间分异^[1]。由表4知,人类活动强度、土地利用类型和高程在不同程度上解释了景观破碎化的空间分异,而由于人类活动强度和土地利用类型的 q 统计值远高于高程,因此表明人类干扰对景观破碎化空间分异的解释能力高于高程。

交互探测,可以识别不同驱动因子之间共同作用是否增加或减弱对分析变量的解释力^[1]。由表5知,任何两种驱动因子对景观破碎化空间分异的交互作用都要大于一个驱动因子单独作用。就对景观破碎化空间分异的影响而言,人类活动强度与高程的交互作用影响最强,与土地利用类型的交互作用次之。高程、坡度和坡向与土地利用类型或人类活动强度发生交互作用时对景观破碎化空间分异的影响显著增强,这在一定程度上表

明人类干扰对流域景观破碎化的空间分异起到重要作用。

3 讨论和结论

3.1 讨论

1) 1990~2002年甘肃白龙江流域东南部的景观破碎化程度较高,原因主要有:流域东南部主要是农耕区,人口密度较大,人类活动对景观的干扰较强;随着时间推移,流域人口逐渐增多,耕地需求量不断上涨,而流域东南部的山前平原、低丘及河谷带更易开发转变为耕地。无节制开垦和樵采以及道路网络建设等加剧了流域景观破碎化^[23]。2002~2014年流域东南部景观破碎化程度明显减弱,主要原因是:流域农业生产活动趋于有序且呈规模化;山间川地或低坡地生产力的提高使农作物增产增收;退耕还林(还草)政策使得陡坡耕地大面积退耕为林草地;新农村建设使人类居住地高密度集中起来,这在一定程度上减弱了流域的景观破碎化程度。

2) 地理探测器虽有独特优势,但也存在一定缺陷。如:较难解释驱动因子之间交互作用的机理;驱动因子的分类或分级方法定性成分较大;连续型驱动因子的离散化处理无明确标准,其结果直接影响着地理探测器运算结果的精度。因此受地理探测器本身局限性的影响,还不能很好解决各驱动因子交互作用机理及对地理探测器运行结果的合理验证,在以后的研究中将改进地理探测器模型以开展更为深入的研究。

3) 景观格局变化过程在不同时空尺度下的研究显示它们不是分离孤立的,大尺度过程是小尺度景观格局变化及其相互作用累积的结果,小尺度过程会受到大尺度过程制约,不同尺度下的

表3 地理探测器的驱动因子分区说明

Table 3 Zone instruction of the explanatory factors of the GeoDetector

驱动因子	分区方法	分区数	区段说明
高程(m)	前人研究 ^[28]	1~8	1. ≤1000 2. 1000~1500 3. 1500~2000 4. 2000~2500 5. 2500~3000 6. 3000~3500 7. 3500~4000 8. > 4000
坡度(°)	前人研究 ^[28]	1~9	1. 0~5 2. 5~10 3. 10~15 4. 15~20 5. 20~25 6. 25~30 7. 30~35 8. 35~40 9. > 40
坡向	ArcGIS自动分类	1~9	1. 无 2. 北 3. 东北 4. 东 5. 东南 6. 南 7. 西南 8. 西 9. 西北
土地利用类型	LUCC一级分类系统	1~6	1. 耕地 2. 林地 3. 草地 4. 水域 5. 居民工矿用地 6. 未利用地
人类活动强度	Natural Breaks	1~5	1. 0.02~0.06(弱) 2. 0.06~0.13(较弱) 3. 0.13~0.22(一般) 4. 0.22~0.32(较强) 5. 0.32~0.57(强)

表4 地理探测器的因子探测

Table 4 Factor detector of the GeoDetector

驱动因子	高程	坡度	坡向	土地利用 类型	人类活动 强度
q 统计量	0.0304	0.0186	0.0102	0.1220	0.1536
$Sig.q$	0.000	0.0190	0.3450	0.000	0.000

表5 地理探测器的交互探测

Table 5 Interaction detector of the GeoDetector

驱动因子	高程	坡度	坡向	土地利用 类型	人类活动 强度
高程	0.0304				
坡度	0.1006	0.0186			
坡向	0.0998	0.0966	0.0102		
土地利用类型	0.1734	0.1460	0.1525	0.1220	
人类活动强度	0.3558	0.1747	0.1916	0.2601	0.1536

主导驱动因子均不相同。本文仅以2014年为例探测了研究区景观破碎化的驱动因子,今后应当对多个年份开展研究以揭示主要驱动因子及其驱动作用强度在时序上的变化规律。

3.2 结论

1) 1990~2014年甘肃白龙江流域景观破碎化程度先增加后降低。流域内各县(区)尺度分析表明,1990~2002年文县和武都区的景观破碎化程度显著增加,2002~2014年文县的景观破碎化程度显著减少。

2) 1990~2014年甘肃白龙江流域东南部(以文县和武都为主)的景观破碎化程度先增强后减弱,其变化最为剧烈和复杂。

3) 人类干扰(人类活动强度和土地利用类型)和地形因子(高程、坡度和坡向)对甘肃白龙江流域景观破碎化空间分异的影响显著不同;人类干扰是流域景观破碎化空间分异的主要原因。

参考文献(References):

[1] 王宪礼, 布仁仓, 胡远满, 等. 辽河三角洲湿地的景观破碎化分析[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 299-304. [Wang Xianli, Bu Rencang, Hu Yuanman et al. Analysis on landscape fragment of Liaohe delta wetlands. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 299-304.]

[2] Liu H Y, Li Y F, Cao X et al. The current problems and perspectives of landscape research of wetlands in China. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1394-1401.

[3] 李文杰, 乌铁红, 李晓佳. 内蒙古希拉穆仁草原旅游地景观格局动态变化[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 307-313. [Li Wenjie, Wu Tiehong, Li Xiaojia. Dynamic change of landscape pattern in Xilamuren grassland tourist area of Inner Mongolia. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(3): 307-313.]

[4] 吴春燕, 郝建锋. 景观破碎化与生物多样性的相关性[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(15): 9245-9247. [Wu Chunyan, Hao Jianfeng. Landscape fragmentation and biodiversity relativity. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(15): 9245-9247.]

[5] Juliana P, Ferenc J. Multi-node selection of patches for protecting habitat connectivity: Fragmentation versus reachability[J]. Ecological Indicators, 2017, 81: 192-200.

[6] Matthew G E. Mitchell, Andre's F. Suarez-Castro, Maria Martinez-Harms et al. Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2015, 30(4): 190-198.

[7] 阿斯卡尔江·司迪克. 塔里木河下游地区近50年景观格局动态变化及驱动力研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010. [Asikaerjiang · Sidike. Research of landscape pattern dynamic changes and driving force in recent 50 years of lower reaches of Tarim River. Wulumuqi: Xinjiang Normal University, 2010.]

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

[9] 陈雪梅. 近60年三江平原湿地动态变化及驱动力分析[D]. 四平: 吉林师范大学, 2014. [Chen Xuemei. Sanjiang Plain wetlands change and driving forces in recent 60 years. Siping: Jilin Normal University, 2014.]

[10] 刘吉平, 马长迪, 刘雁, 等. 基于地理探测器的沼泽湿地变化驱动因子定量分析——以小三江平原为例[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2017, 49(2): 127-135. [Liu Jiping, Ma Changdi, Liu Yan et al. Quantitative study on the driving factors of marsh change based in Geographical Detector—Case study on Small Sanjiang Plain. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 127-135.]

[11] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. Scientia Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[12] 陈昌玲, 张全景, 吕晓, 等. 江苏省耕地占补过程的时空特征及驱动机理[J]. 经济地理, 2016, 36(4): 155-163. [Chen Changling, Zhang Quanjing, Lv Xiao et al. Quantitative study on the driving factors of marsh change based in Geographical Detector—Case study on Small Sanjiang Plain. Economic Geography, 2016, 36(4): 155-163.]

[13] 刘彦随, 杨忍. 中国县域城镇化的空间特征与形成机理[J]. 地理学报, 2012, 67(8): 1011-1020. [Liu Yansui, Yang Ren. The spatial characteristics and formation mechanism of the county urbanization in China. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(8):

- 1011-1020.]
- [14] 巩杰, 谢余初, 赵彩霞, 等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8):2153-2160. [Gong Jie, Xie Yuchu, Zhao Caixia et al. Landscape ecological risk assessment and its spatiotemporal variation of the Bailongjiang Watershed, Gansu. China Environmental Science, 2014, 34(8): 2153-2160.]
- [15] 高彦净, 巩杰, 贾珍珍, 等. 甘肃白龙江流域土地利用在地形梯度上的空间分布[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 680-686. [Gao Yanjing, Gong Jie, Jia Zhenzhen et al. Spatial distribution of land-use on terrain gradient in Bailongjiang Watershed of Gansu Province. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(5): 680-686.]
- [16] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 等. 甘肃白龙江流域生态系统粮食生产服务价值时空分异[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1719-1728. [Xie Yuchu, Gong Jie, Qi Shanshan et al. Assessment of ecosystem food production and its spatio-temporal heterogeneity in the Bailong River Watershed, Gansu. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1719-1728.]
- [17] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. [Liu Jiuyan. Remote sensing macro survey and dynamic study of resources and environment in China. Beijing: Science and Technology of China Press, 1996.]
- [18] 张玲玲. 甘肃白龙江流域生态系统服务评估及影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [Zhang Lingling. Ecosystem services assessment and its driving forces in the Bailongjiang Watershed of Gansu. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]
- [19] 汤萃文, 张海风, 陈银萍, 等. 祁连山南坡植被景观格局及其破碎化[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2305-2310. [Tang Cuiwen, Zhang Haifeng, Chen Yinping et al. Vegetation landscape pattern and its fragmentation on southern slope of Qilian Mountain. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2305-2310.]
- [20] 付刚, 肖能文, 乔梦萍, 等. 北京市近二十年景观破碎化格局时空变化分析[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 1-12. [Fu Gang, Xiao Nengwen, Qiao Mengping et al. Spatial-temporal changes of landscape fragmentation patterns in Beijing in the last two decades. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 1-12.]
- [21] 巩杰, 孙朋, 谢余初, 等. 基于移动窗口法的肃州绿洲化与景观破碎化时空变化[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6470- 6480. [Gong Jie, Sun Peng, Xie Yuchu et al. Spatiotemporal change and landscape fragmentation in suzhou oasis using the moving window method. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6470-6480.]
- [22] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. [Wu Jianguo. Landscape Ecology—Pattern, Process, Scale and Hierarchy(2nd ed). Beijing: Higher Education Press, 2007.]
- [23] 李栋科, 丁圣彦, 梁国付, 等. 基于移动窗口法的豫西山地丘陵地区景观异质性分析[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3414-3424. [Li Dongke, Ding Shengyan, Liang Guofu et al. Landscape heterogeneity of mountainous and hilly area in the western Henan Province based on moving window method. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3414-3424.]
- [24] 刘吉平, 董春月, 盛连喜, 等. 1955~2010年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 879-887. [Liu Jiping, Dong Chunyue, Sheng Lianxi et al. Landscape pattern change of marsh and its response to human disturbance in the Small Sanjiang Plain, 1955-2010. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 879-887.]
- [25] Wang J F, Li X H, Christakos G et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [26] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with Geodetector. Environmental Modelling & Software, 2012, 33: 114-115.
- [27] 董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 135-147. [Dong Yuxiang, Xu Qian, Yang Ren et al. Delineation of the northern border of the tropical zone of China's mainland using Geodetector. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 135-147.]
- [28] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于InVEST模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1585-1593. [Zhang Ying, Xie Yuchu, Qi Shanshan et al. Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang Watershed in Gansu based on InVEST model. Resources Science, 2016, 38(8): 1585-1593.]

Dynamics and Driving Factors of Landscape Fragmentation Based on GeoDetector in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province

Zhang Jinxi, Gong Jie, Liu Dongqing

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education/College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Bailongjiang watershed, located in the transitional ecotone among the Loess Plateau, Qinba Mountains and Tibet Plateau, a vital water conservation areas and ecological environment fragile areas in the upper Yangtze River with frequency geohazards, conflict between human and nature, was chosen as the study area to analyze the spatiotemporal change and driving factors of the landscape fragmentation. Based on landscape pattern index, principal component analysis, GeoDetector and platforms of GIS and RS, the spatio-temporal change and driving factors of the landscape fragmentation were quantitatively analyzed in Bailongjiang watershed of Gansu Province from 1990 to 2014. The results showed that: 1) The change regularity of landscape pattern indices showed that the degree of landscape fragmentation increased firstly and then decreased from 1990 to 2014. To be specific, Edge Density(ED) and Shannon's Diversity Index(SHDI) of the watershed showed the trend of increase firstly and then decrease, which indicated that the landscape of the watershed developed from irregularity to regularity in edge shape and the diversity of landscape types enhanced firstly and then weakened. Contagion Index(CONTAG) of the watershed showed the situation of decreased firstly and then increased, which suggested that reunion degree of different patch types changed from weak to strong, the higher the CONTAG, the better connectivity, otherwise, there were more small patches, representing higher fragmentation. Landscape Division Index (DIVISION) showed a slight downward trend. 2) In general, landscape fragmentation is affected by human activities, and counties or districts scale can better reflect human activities. The scale analysis of counties or districts showed that the degree of landscape fragmentation increased dramatically in Wenxian and Wudu during 1990-2002 and decreased significantly in Wenxian during 2002-2014. 3) Landscape fragmentation degree of the southeastern watershed (mainly in Wenxian and Wudu) enhanced firstly and then weakened and the variation tendency was most intense and complicated. 4) Taking 2014 as an example, this article explored the driving factors of landscape fragmentation based on GeoDetector. The outcome of ecological detector deemed that there were striking differences between land use types and elevation, slope, and aspect, and so did human activities intensity, nevertheless, land use types and human activities intensity had no difference, which illustrated that human disturbance (i.e. land use types and human activities intensity) and topographic factors (i.e. elevation, slope and aspect) had different effects on the spatial differentiation of landscape fragmentation. Moreover, the result of factor detector showed that human disturbance had the highest ability to explain the spatial differentiation of landscape fragmentation which meant human interference was the momentous driving factor. Finally, the result of interaction detector showed that the interaction between human activities intensity and elevation had the strongest influence on landscape fragmentation, followed by the interaction with land use types. The study aims to provide theoretical support for sustainable development in Bailongjiang watershed of Gansu Province.

Key words: GeoDetector; landscape fragmentation; the Bailongjiang Watershed of Gansu Province