

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.040.

黄鑫, 程文仕, 李晓丹, 等. 干旱内陆河流域土地利用转型的生态环境效应变化特征及其驱动因素探测[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 324-332.
HUANG Xin, CHENG Wenshi, LI Xiaodan, et al. Recognition on the Changes and Driving Factors of Eco-environmental Effect of Land Use Transformation in Arid Inland River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 324-332.

干旱内陆河流域土地利用转型的生态环境 效应变化特征及其驱动因素探测

黄鑫, 程文仕, 李晓丹, 杨昌裕, 黄倩倩

(甘肃农业大学 管理学院, 兰州 730070)

摘要:为探讨土地利用转型对生态环境质量的影响并明确相关驱动因素作用机理,以黑河流域中游这一典型干旱内陆河为研究对象,利用生态环境质量指数、标准差椭圆模型和地理探测器工具,在对研究区2000—2020年土地利用转型生态环境效应数量变化、空间分布及方向特征进行多维测定基础上,对影响生态质量空间分异的驱动因素及其交互作用机制进行了识别与分析。结果表明:(1)2000—2020年,研究区土地利用转型频发,林地、灌木和人造地表大幅增加,草地、裸地和湿地减少,“南草北裸”的空间分布特征未发生扭转,草地和裸地是流域其他地类最为重要的转型补给源;(2)黑河流域中游生态环境质量整体处于较低水平但向好发展,“北低南高”的空间分布格局显著,其生态环境质量呈“正西北—正东南”朝向的变化趋势特征;(3)人为活动及高程、植被覆盖和坡度是黑河流域生态环境质量空间分异的主要驱动因子,自然、社会和经济诸因素激烈的交互与协同作用,共同导致流域生态环境质量的空间分异。综上,黑河流域中游生态环境质量趋好,但需严控人为活动,保障流域土地利用与生态安全持续稳定。

关键词:土地利用转型;生态环境效应;标准差椭圆;地理探测器;黑河流域中游

中图分类号:F301.2; X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0324-09

Recognition on the Changes and Driving Factors of Eco-environmental Effect of Land Use Transformation in Arid Inland River Basin

HUANG Xin, CHENG Wenshi, LI Xiaodan, YANG Changyu, HUANG Qianqian

(College of Management, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the impact of land use transformation on eco-environmental quality and to clarify the mechanism of relevant driving factors, taking the middle reaches of Heihe River Basin, a typical arid inland river basin, as the research object, with the help of eco-environmental quality index, standard devotional ellipse model and the Geo-detector tools, we successively measured the quantitative change, the spatial distribution as well as the directional characteristics of eco-environmental effects of land use transformation from 2000 to 2020 of the study area, and based on that, the driving factors that may affect the spatial differentiation of the eco-environmental quality and their interaction mechanism were further identified and analyzed. The results showed that: (1) land use transformation occurred frequently in the middle reaches of Heihe River Basin from 2000 to 2020, with a conspicuous increase in forest land, shrub land and man-made surface, and a decrease in the area of grassland, bare land, as well as the wetland; however, the spatial distribution characteristics of ‘grassland in the south and bare land in the north’ had not been reversed; grassland and bare land were the most important transformation supply sources for the other land types in the basin; (2) the eco-environmental quality in the middle reaches of Heihe River Basin was still at a low

收稿日期:2022-01-11

修回日期:2022-01-20

资助项目:甘肃农业大学盛彤笙创新基金(GSAU-STS-1747);甘肃省青年科技基金(20JR10RA558)

第一作者:黄鑫(1986—),男,河南洛阳人,硕士,讲师,主要从事土地生态学研究。E-mail:huangx@gsau.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

level as a whole, but the development showed a positive trend in the same time; the spatial distribution pattern of ‘low in the north and high in the south’ was prominent; in the past 20 years, the eco-environmental quality of the basin had changed dramatically, and the change range had expanded, which presented an overall change trend from due northwest direction to due southeast direction; (3) the results of geographical detector indicated that human activities, elevation, vegetation cover as well as the slope factors were the main driving factors for the spatial differentiation of eco-environmental quality in Heihe River Basin; in addition, the fierce interaction and synergy among natural, social and economic factors jointly led to the spatial differentiation effect of eco-environmental quality in the study area. In conclusion, the eco-environmental quality in the middle reaches of Heihe River Basin tended to be good, but human activities should be strictly controlled to ensure the sustainable and stable land use and ecological security of this basin.

Keywords: land use transformation; eco-environmental effects; standard deviational ellipse; Geo-detector; the middle reaches of Heihe River Basin

作为研究土地利用/覆被问题的新切入点^[1],土地利用转型是指在社会经济发展变革背景下与之对应的土地利用形态在数量、功能、结构等层面的转变过程^[2]。该概念的提出和引入^[3-4]引发广泛的学术热议,涉及土地利用转型理论与框架^[5]、转型特征与机制^[6-7]、转型模式与城乡关系等^[8-10]诸方面。研究表明,土地利用转型是引发生态环境变化的重要诱因^[11],其改变不仅能对区域气候、水资源、碳排放等^[12-13]环境因素产生扰动,同时还对地区生态系统服务功能价值、景观生态格局等^[14-15]产生影响,继而引发复杂多变的生态环境效应。准确把控土地利用转型的生态环境变化,关乎社会经济与生态环境耦合协同与持续发展,因此土地利用转型的生态环境效应问题逐步成为研究热点。

当前国内外学者基于不同视角、利用多种方法对土地利用转型的生态环境效应进行研究。总体上看,目前研究着重关注土地利用转型的结构、方向及由此产生的生态环境“数量变化”的增减平衡^[16-17],对其空间变化,尤其是方向性改变关注较少;内容上看,已有研究从社会经济统计层面,基于行政区划尺度,对影响土地利用转型生态环境效应的驱动机制进行区分^[18],但格网尺度精细化因子探测还少有探索;就方法而言,基于单一或复合指标的直接测度模型^[19-20]和基于土地利用变化的综合测度模型^[21]都可用于效应测定^[18]。其中,生态环境质量指数(Eco-environmental Quality Index,下简称EQI)能基于土地类型特征并就其产生的生态影响和环境扰动进行综合性、差异化赋值,以此反馈土地转型产生的生态环境总体影响,因此在相关研究中应用最为广泛。另外,从研究视角和范围看,以“生产-生活-生态”相协调的“三生空间”为切入点,以全国、省域、经济带等^[22-24]为对象的相关研究成果显赫。相反,基于地理学视角以LUCC分类作为出发点的探索较少,此外流域尺度的

土地利用转型及生态环境效应研究目前也取得一定进展,但并未受到重视。流域作为一种特殊的地理组成单元,具有差异明显的自然本地特性和下辖多行政单元的社会经济梯度特征,其转型及生态环境效应变化更为复杂^[25]。特别对干旱内陆河流域而言,土地利用转型的客观发生与敏感的自然环境和高生态脆弱性间,如何协调和平衡,还缺乏典型研究范式。

黑河流域地处西北内陆腹地,是西部地区重要生态功能源地和安全屏障,其中游地区更是“一带一路”建设重要廊道和桥接枢纽。随着西部大开发和生态文明建设的推进,流域中游土地开发与转型日益活跃,生态环境负荷与风险持续增加。基于此从LUCC视角出发,采用EQI对流域中游2000—2020年土地利用转型的生态环境效应进行评估,并借助标准差椭圆和地理探测器,对流域生态环境效应变化方向及影响因素进行识别,以期协调地区土地合理开发与生态环境有序发展提供科学参考和依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黑河流域位于河西走廊中段,是中国第二大内陆河,流域从上游到下游形成以水为纽带的高山冰雪/冻土-森林-草原-绿洲-沙漠-戈壁等景观系统。本文所述黑河中游地区(37°55′—40°45′N, 97°20′—101°50′E)依行政区域划分,主要包括:嘉峪关市、酒泉市、金塔县、高台县、临泽县、张掖市、民乐县、山丹县及肃南地区,北靠额济纳旗,南接祁连山,西临玉门市,东依合黎山,总面积约 $4.80 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。其北部属中温带干旱区,南部属高原温带干旱区,年均降水量和蒸发量分别为70~312 mm和1 900~3 500 mm,差异较大。区域内较为典型的地带性植被主要包括温带小灌木、半灌木等荒漠植被以及绿洲人工植被等^[26]。

1.2 数据来源

研究区 2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用数据源自 GlobeLand30 产品 (<http://www.globallandcover.com/>),分辨率 30 m×30 m,数据平均总精度高于 83%,

Kappa 系数高于 0.78^[27-28]。数据集采用土地利用覆被分类法进行地类划分,包含耕地、林地等 10 个 1 级类。借鉴董建红^[18]、李晓文^[29]等所制定 EQI 参考值,利用面积加权对各地类进行赋值(表 1)。

表 1 黑河流域中游土地利用覆被类型及其生态环境质量指数

土地覆被类型	内容	EQI
耕地	水田、灌溉/雨养旱地、菜地、牧草种植地、大棚用地、茶园等	0.25
林地	落叶阔/针叶林、常绿阔/针叶林、混交林、疏林地	0.72
草地	草原、草甸、稀树/荒漠草原、城市人工草地	0.2
灌木	山地灌丛、落叶/常绿灌丛、荒漠灌丛	0.65
湿地	内陆沼泽、湖泊沼泽、河流洪泛湿地、森林/灌木湿地、泥炭沼泽、红树林、盐沼	0.60
水体	江河、湖泊、水库、坑塘	0.57
人造地表	城镇等居民、工矿、交通设施等	0.20
裸地	荒漠、沙地、砾石地、裸岩、盐碱地等	0.026
冰川和永久积雪	高山地区永久积雪、冰川、冰盖等	0.90

注:研究区不含苔原地类,故未涉及该 EQI 指数。

区域生态环境是诸要素综合作用结果。结合相关成果^[22,30],合并数据可获取性,从自然、社会和经济 3 个维度选取区域生态环境影响因素。(1) 自然。海拔、坡度(地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn/>)、NDVI(<https://earthengine.google.com/>);距河流距离(OpenStreetMap Data <https://download.geofabrik.de/>);(2) 社会。人口密度(Worldpop 开

放空间人口密度 <https://www.worldpop.org/>);人类影响指数 HAI(用以描述流域土地利用及生态环境等受人为活动干扰和影响强度,通过计算获取^[31-32]);(3) 经济。GDP 空间 km 网格(中国科学院资源环境科学与数据中心 <https://www.resdc.cn/>);路网密度(OpenStreetMap Data)。各指标要素经过数据完善与处理后的空间分布特征见图 1。

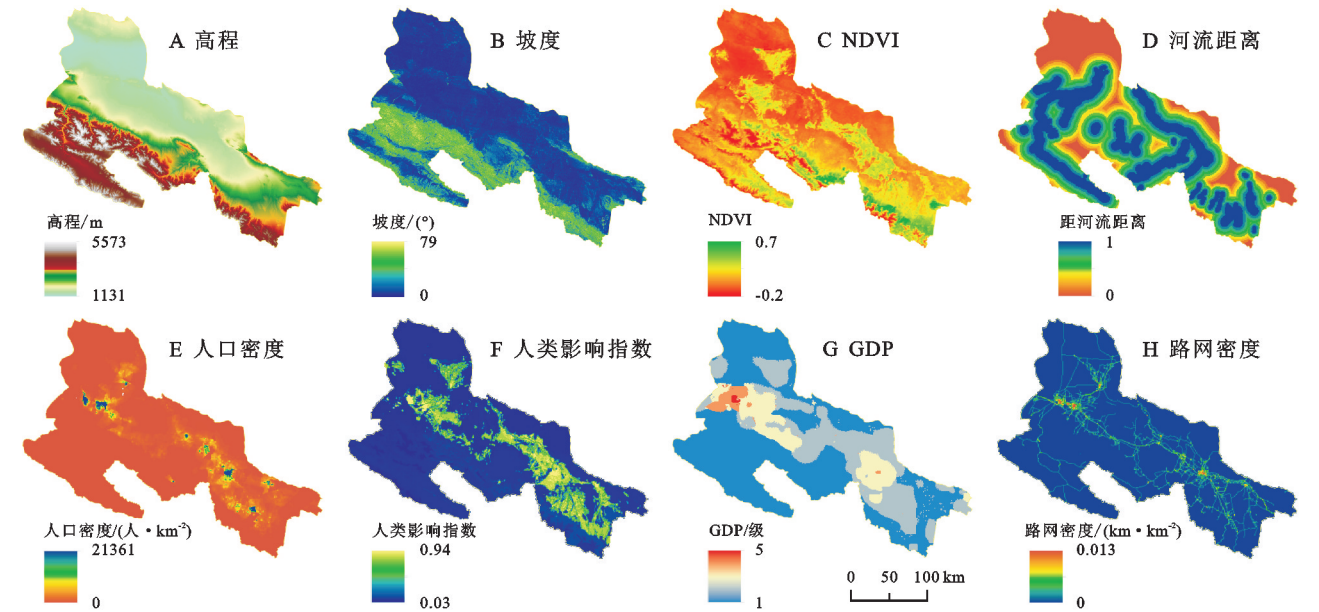


图 1 黑河流域中游生态环境质量空间分异驱动因子空间分布

2 研究方法

2.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵能将任意两期土地利用变化转移面积按矩阵方式排列,以此描述特定时段内地区土地利用结构变化及其功能转移特征^[33]。

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:A 为面积;i,j 分别为研究期初与期末不同土地利用类型;n 为土地利用类型数量。

2.2 流域生态环境质量

为获取栅格层面生态环境质量,首先确定最优尺度的格网大小以降低不同研究尺度对地理空间数据测算结果准确性的干扰和影响。参考相关成果,按“最终格网数量 $\approx 1/2$ 采样点数量”标准^[33],将 2000—2020 年各类用地斑块均值视为采样点,约 8.87 万个,经多轮调试,最终选定 1.1 km \times 1.1 km 的正方形网格对研究区进行等间距采样,生成样区 4.06 万个。各网格单元对应生态环境质量(下简称 EV)测算公式为^[33]:

$$EV_i = \frac{\sum_{m=1}^n \frac{A_{mi}}{A_m} R_i}{n} \quad (2)$$

式中:EV_{*i*} 为第 *i* 个网格单元的生态环境质量;A_{*mi*} 为第 *m* 个网格单元内用地类型 *i* 的面积;A_{*m*} 为第 *m* 个网格单元的面积;R_{*i*} 为第 *i* 类用地类型所对应的生态环境质量指数;*n* 为研究区土地利用类型数量。

2.3 标准差椭圆

标准差椭圆是分析地理数据空间分布方向特征的经典方法,能够衡量要素中心、离散趋势和方向分布并予以可视化表达^[34]。椭圆大小体现要素在空间格局的集中程度,其平均中心即要素在空间分布的重心位置,长、短轴方向表示要素在空间分布上的主、次趋势方向,长度表征要素在对应方向的离散度,二者差值越大说明要素方向性越强^[34-35]。此处仅列重心坐标公式,具体可见文献^[35]:

$$M(\bar{X}, \bar{Y}) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (3)$$

式中: $M(\bar{X}, \bar{Y})$ 为重心坐标; w_i 为权重; x_i, y_i 为要素 *i* 的坐标。

2.4 地理探测器

地理探测器是探索要素空间分异的重要工具,具有适用性广、多自变量共线性免疫等优点,已应用诸多领域^[36-37]。其中,因子探测可探查 EV 空间分异及各影响因素对其空间分异的解释力,表达式为^[36]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中: q 为影响因素对 EV 的解释力; $h = 1, 2, \dots, L$ 为 EV 或各因素的分类或分区; N_h 和 N 为子区域和全区的总单元数; σ 为子区域和全域 EV 的离散方差; q 的值域范围介于 0~1,值越接近于 1 则说明因子的影响强度越大,解释力越强,反之亦然。

交互探测用以识别 2 种影响因素共同作用时,对 EV 空间分布的影响效果:增强、减弱或相互独立,具体包括非线性减弱、非线性增强、独立等 5 种类型。

3 结果与分析

3.1 流域土地利用转型特征

土地利用时空格局与演化特征表明(图 2,表 2),2000—2020 年研究区各类用地转型变化剧烈,转入转出频繁,呈不同特点:数量上,各类用地增减变化不一。其中,耕地、林地、灌木、人造地表、水体及冰川永久积雪呈增加态,以林地、灌木和人造地表增幅最高,分别为 $1.060 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $1.004 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $5.31 \times 10^4 \text{ hm}^2$,草地、裸地和湿地呈下降态,降幅分别为 13.42%, 2.98%, 30.94%;空间上,20 a 间研究区“南草北裸”的分布格局基本平稳,土地利用类型以草地、裸地和耕地为主,张掖、酒泉、嘉峪关等区域城市扩张效应显著。地类间的内部转型关系则表明,各地类补给来源及其转出去向存在不一致。如耕地主要由草地、裸地转入,同时向人造地表和草地转出;湿地主要向草地和裸地转入,并向草地、水体和耕地转出。总体来看,草地和裸地是黑河流域中游其他地类类型最为主要的转入源,二者转出总面积分别达到 $3.787 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $1.441 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占总转出面积的 85.28%,与其他地类的物质能量转换最为频繁。相比而言,林地、耕地和灌木地接收得到的转入补给量相比其他类型更高,占总转入补给的 52.36%。

西部大开发和地区社会经济发展诉求,使得辖区城市扩展空间外溢,区域土地利用转型加速,外围耕地侵蚀和裸地开发强度增大。自 2000 年以来,黑河流域逐步启动大规模退耕还林、荒山造林工程,对地区水资源、湿地生态环境等进行改造和保育,但由于受黑河调水、围垦造田以及工农业生产等活动影响,流域湿地面积缩减、保育功能退化亦客观存在。2008 年农经司批准将黑河流域退耕还林还草调整为灌区节水改造工程并就农业种植结构进行调整,流域退耕还草进度放缓,但对区域水资源特别是人工水资源开发建设起到助力,而牲畜存栏量的大幅增长和草地的不断转出,则共同导致了流域草地面积的持续下降。

3.2 流域土地利用转型的生态环境效应变化特征

3.2.1 数量变化特征 黑河流域中游 2000 年、2010 年、2020 年 EV 均值分别为 0.239 3, 0.240 9, 0.255 6,整体处于Ⅱ级较低水平,但总体向好发展,质量均值期末较期初提升 6.81%(表 3)。对 EV 进行分区统计:20 年间Ⅰ级低质量区面积小幅增长后有所回落,Ⅱ级较低质量区持续增加,Ⅲ级中等质量区逐年递减。总体来看,Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ级区在数值总量上占主导地位,但 3 类面积总占比在 20 年间呈现持续递减趋势,由期初 98.98%下降到期末的 95.95%,总降幅 3.03%。同比之下,Ⅳ级、Ⅴ级区面积稳

步增加,网格数量分别由 2000 年 402 个和 39 个上升到 2020 年 1 527 个和 203 个,但二者面积总占比偏低,只有 4.05%。这些改变一方面说明,随着环境保护各项政策的落地实施,退耕还林还草工程的长期生态环境效应得

以释放和展现,流域生态环境良性发展初现端倪;另外一方面也说明,流域生态环境内部分区变化趋势多样且频繁,总体偏低的 EV 格局尚未发生根本性扭转,生态环境保护任重道远。

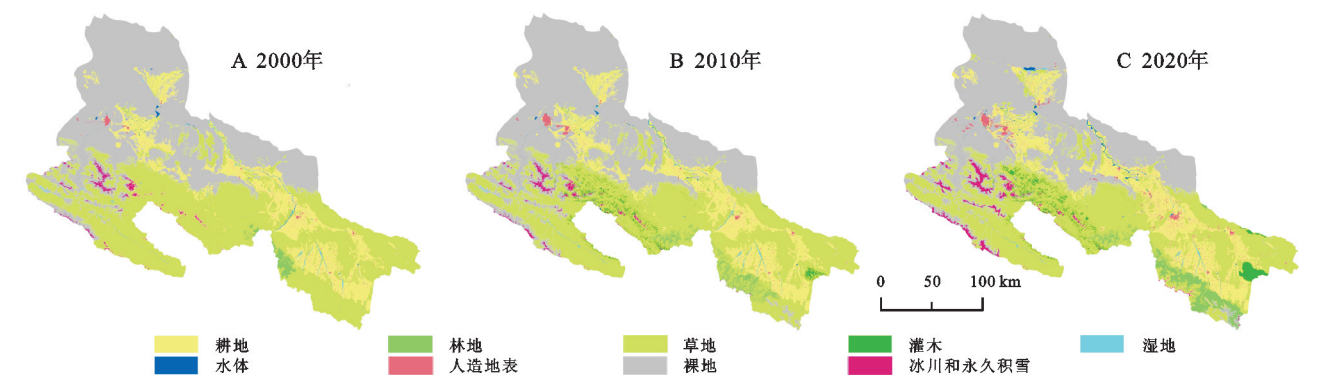


图 2 黑河流域中游 2000—2020 年土地利用状态

表 2 2000—2020 年黑河流域中游土地利用变化转移矩阵 10⁴ hm²

年份	土地利用 类型	2020 年									
		耕地	林地	草地	灌木	湿地	水体	人造地表	裸地	冰川永久积雪	期初转出
2000 年	耕地	54.601	0.076	2.069	0.007	0.051	0.098	2.943	0.225	—	5.468
	林地	0.031	2.319	1.115	0.000	0.001	0.002	0.001	—	—	1.150
	草地	5.376	11.647	173.660	9.874	0.280	0.409	1.142	8.070	1.072	37.870
	灌木	—	—	0.000	0.006	—	—	0.000	0.002	—	0.002
	湿地	0.133	0.003	0.642	0.007	0.647	0.324	0.009	0.019	0.000	1.138
	水体	0.100	0.022	0.245	0.016	0.058	0.479	0.009	0.087	0.000	0.537
	人造地表	0.425	0.000	0.039	0.000	0.001	0.005	2.530	0.054	—	0.525
	裸地	4.242	0.000	5.303	0.097	0.195	0.414	1.734	182.619	2.429	14.414
	冰川永久积雪	—	—	0.065	0.043	—	—	—	0.094	2.790	0.202
	期末转入	10.307	11.748	9.478	10.045	0.586	1.253	5.839	8.550	3.501	61.307

注:“—”代表未发现。

表 3 2000—2020 年黑河流域中游生态环境质量面积比重

生态环境 质量		值域 区间	2000 年		2010 年		2020 年	
			网格数量/个	面积占比/%	网格数量/个	面积占比/%	网格数量/个	面积占比/%
低质量区	I 级	[0,0.2]	16749	41.23	17050	41.94	16134	39.70
较低质量区	Ⅱ级	(0.2,0.4]	8908	22.34	9554	23.88	10375	25.96
中等质量区	Ⅲ级	(0.4,0.6]	14533	35.41	13459	32.90	12392	30.29
较高质量区	Ⅳ级	(0.6,0.8]	402	0.93	506	1.15	1527	3.62
高质量区	V 级	(0.8,1.0]	39	0.08	62	0.13	203	0.43

3.2.2 空间分布特征 2000—2020 年,研究区 EV 整体稳定并呈现“北低南高”的空间格局(图 3)。

I 级低质量区面积广阔,涵盖金塔绿洲、嘉峪关、酒泉东南和西北及高台东北至合黎山、盘头山、大青山一线。该区域身居内陆腹地,属典型温带大陆性气候,干燥少雨,土地覆被以裸地为主且毗邻巴丹吉林沙漠,自然条件较恶劣,生态环境水平低。Ⅱ级较低质量区集中分布在民乐、张掖、高台、酒泉、嘉峪关、金塔等市县范围,该区域是河西走廊中部重要

的社会经济集散地和平原绿洲分布区,人类活动相对剧烈,人为影响和破坏较为显著。Ⅲ级中质量区主要位于祁连山脉西侧、酒泉以南以及肃南和山丹以东,部分区域属高原温带干旱区,草地资源较为丰富。相比而言,Ⅳ级较高和 V 级高质量区面积最少,主要沿祁连山国家级自然保护区自西向东分布。其中西部Ⅳ,V 级区主要分布在高原冰川和永久积雪附近,水源涵养与保育效益显著;中部Ⅳ,V 级区零散分布于肃南地区;东部Ⅳ,V 级区位于民乐西北、东

南以及山丹东南向焉支山森林公园区域,形成两个较为显著的Ⅳ,Ⅴ级高质量聚集区。除前述原因外,2017 年启动的祁连山黑河流域山水林田湖草生态

保护修复工程试点,通过矿山矿点生态修复、水源涵养、造林封育、河道治理等举措,亦对提高地区 EV 起到积极影响。

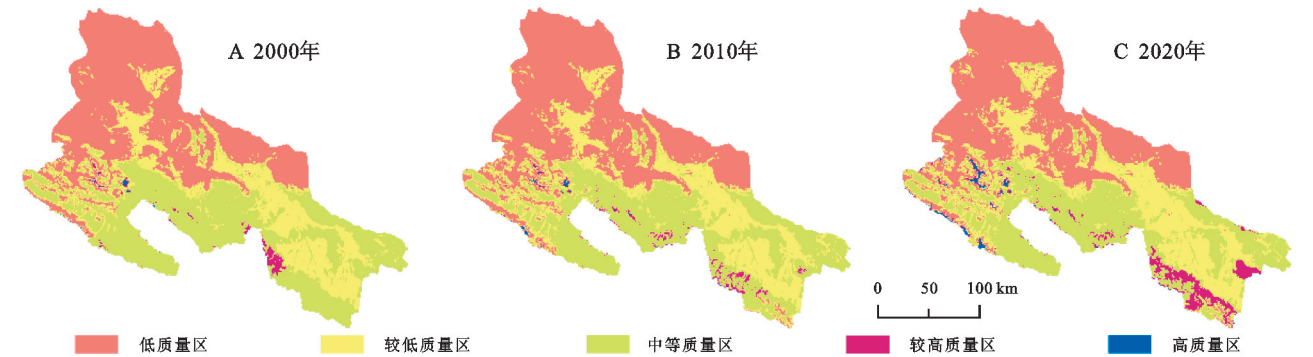


图 3 黑河流域中游 2000—2020 年生态环境质量空间分布

3.2.3 方向变化特征 通过网格相减提取 2000—2020 年发生变化的生态环境格网单元,分别从 EV 水平的增减方向和空间分布的改变方向对其方向变化特征进行分析。

从质量增减方向看(图 4A—B),2000—2010 年流域 EV 变化剧烈,退化萎缩区与好转增长区正负碰

撞、交错分布,覆盖中游大部分区域,增减变化呈集中连片、连续分布。2010—2020 年,退化萎缩区向东、北迁移,好转增长区向西、南转移,变化总量较之前有所下降,呈现出区域集聚性增强、整体离散性扩大的空间分布特征,好转增长区亦然,也呈现出类似的分布特征。

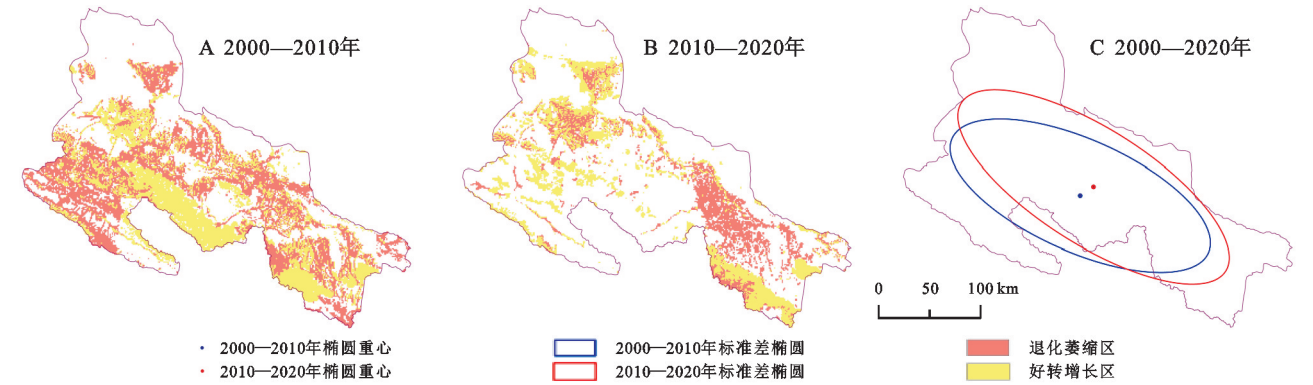


图 4 黑河流域中游 2000—2020 年生态环境质量变化及其标准差椭圆

从空间分布改变方向看(图 4C,表 4),2000—2010 年和 2010—2020 年 2 期标准差椭圆长轴方向基本保持一致,表明流域 EV 变化主要发生在“西北—东南”方向,且 2010—2020 年椭圆长短半轴之差 99.35 km 较 2000—2010 年 85.39 km 更大,说明 2010—2020 年 EV“西北—东南”变化的方向性相比之前更为明显;同时,2010—2020 年的方位转角由 2000—2010 年的 113.28° 增加到 121.62°,说明 2010—2020 年 EV 变化还具有向“正西北—正东南”进一步偏移的趋势。除此之外,20 年来标准差椭圆

长、短轴长度及椭圆面积也都呈现不同幅度增加,说明 2000—2020 年,流域 EV 变化范围有所扩张,分布格局具有集中度下降、离散性增强的特点。总体来看,流域 EV“西北—东南”的地理空间变化走向与其人口分布及城市发展方向一致。“西北—东南”一线以连霍高速为纽带,桥接河西走廊经济带,区域社会生产活跃,土地利用转型频繁,EV 变化的人为影响显著。空间重心向东北方迁移也进一步证实,以高台、临泽、张掖为中心、以“西北—东南”为方向主导的 EV 变化相对其他区域更为激烈。

表 4 黑河流域中游 2000—2020 年生态环境质量变化的标准差椭圆参数

时间段	中心点 X 坐标	中心点 Y 坐标	椭圆 X 轴 长度/km	椭圆 Y 轴 长度/km	方位角/ (°)	椭圆面积/ km ²
2000—2010 年	99°25′59″	39°4′55″	140.53	55.14	113.28	24340.72
2010—2020 年	99°34′33″	39°9′6″	156.43	57.08	121.62	28047.59

3.3 流域土地利用转型生态环境效应的驱动因素探测

3.3.1 因子探测分析 以自然、社会和经济因素为自变量,以 EV 为因变量,计算 2020 年各因子 q 统计值并据其大小排序(表 5): $HAI > DEM > NDVI > Slope > Dis_River$ (距河流距离) $> GDP > POP$ (人口密度) $> Road$ (路网密度)。

结果表明,自然、社会和经济因素对黑河流域中游 EV 的空间分布均具有影响,但作用程度不一。其中,社会因素的人类影响 HAI 作用最为显著,其解释力超过 50%,说明人类活动对流域 EV 干扰最强,是黑河流域中游 EV 空间分异的主导因子;DEM,NDVI 和 Slope 等自然因素次之,也均超过 20%,是流域 EV 空间分异的重要因子。一方面,黑河流域中游深居内陆腹地,地貌类型多样、地形起伏度大,南北高差 4 000 m,水热条件不均,植被覆盖分异明显。较差的自然本底特性,为黑河流域 EV 的空间分异奠定了基础,同时也加深了其对人类活动引发扰动的高敏感性。另一方面,随着

城市化、工业化进程加快,人类活动强度、范围和规模不断增加,对流域生态环境的影响持续增强。近年发生的祁连山自然保护区生态环境破坏事件就充分证明,大规模探矿采矿、高强度水电开发等活动,不仅对流域自然植被造成严重破坏,还易引发水土流失、地表塌陷、减水断流等恶性生态环境灾难。由此可见,HAI 对流域生态环境改变不可忽视。相比之下,GDP 对黑河流域中游 EV 空间分异影响较低,为一般因子。这可能与流域大部分地区经济欠发达,对生态环境成本支付及偿还能力有限相关。此外,POP 和 Road 对 EV 也具有影响,但二者的 p 值均大于 0.01,统计不显著。造成这一结果的原因可能与黑河流域人口总量相对稀疏、人口分布相对聚集有关。最新公布的第 7 次全国人口普查公报显示,除嘉峪关人口略有增加外,张掖、酒泉均呈大幅下降,人口外溢十分突出。同时,黑河流域中段主干路网较之东部地区不论密度还是辐射范围都存在差距和限制,因此其作用相对不显著。

表 5 2020 年黑河流域中游因子探测结果

探测因子	DEM	Slope	NDVI	Dis_River	HAI	POP	Road	GDP
q	0.3870	0.2426	0.3582	0.0892	0.5346	0.0016	0.0015	0.0284
P	0	0	0	0	0	0.5090	0.4832	0

3.3.2 交互探测分析 交互探测结果显示,所选因素中任意两因子的交互作用 q 值均大于其单因子 q 值,因子的两两交互作用不存在独立或减弱关系,均表现为双因子增强或非线性增强,即因子两两交互产生的作用大于两因子独立作用时产生的最大值或强

于二者独立作用之和,因子的共同作用增加了其对 EV 空间分异的解释力(表 6)。这一结果说明,研究区 EV 空间分异的结果并非单一因子造成而是由不同因子耦合交互所形成的协同增强效应共同影响和决定。

表 6 2020 年黑河流域中游交互式探测结果

交互探测统计值	DEM	Slope	NDVI	Dis_River	HAI	POP	Road	GDP
DEM	0.3870							
Slope	0.3981	0.2426						
NDVI	0.5913	0.5426	0.3582					
Dis_River	0.4472	0.2964	0.3889	0.0892				
HAI	0.7265	0.6604	0.6144	0.5570	0.5346			
POP	0.4316	0.2698	0.3845	0.0916	0.5391	0.0016		
Road	0.4148	0.2576	0.3759	0.0980	0.5447	0.0047	0.0015	
GDP	0.4708	0.2777	0.4154	0.1915	0.5734	0.0360	0.0316	0.0284

从总体来看,HAI 与 DEM 的交互作用对流域 EV 空间分异影响最强,其交互探测 q 值最高,达到 0.726 5。此外, $HAI \cap Slope$ (0.660 4), $HAI \cap NDVI$ (0.614 4), $NDVI \cap DEM$ (0.591 3), $HAI \cap GDP$ (0.573 4), $HAI \cap Dis_River$ (0.557 0), $HAI \cap Road$ (0.554 7), $NDVI \cap Slope$ (0.542 6)以及 $HAI \cap POP$ (0.539 1)等交互作用也都超过 50%。由此可见,人类影响 HAI 与其他各类因子间的交互作用结果较为显著,其交互作用明显强于其他因子间产生的交互影响,起主导作用。同时,NDVI 与 DEM 和 Slope 等自

然因子内部间发生的交互作用影响也较为强烈。

4 讨论与结论

(1) 2000—2020 年,黑河流域中游土地利用转型频繁,具有数量上增减不一、空间上南北分异和结构上出入不均等多重特点。耕地、林地、灌木、人造地表、水体及冰川永久积雪呈增加态,湿地、裸地和草地呈减少态。草地和裸地作为地区主要用地类型,覆盖范围广,整体呈现“南草北裸”的空间分布格局。同时 2 类面积 20 年来逐步减少,成为补给其他土地类型最为重要的转入

源。黑河流域下辖广泛,具有多行政单元同理共治的典型特征。实现跨地区国土空间统筹规划、区域资源合理调配、用地政策无缝衔接、土地利用有序转型,是保障流域土地利用可持续、生态环境安全格局稳定的关键。

(2) 2000—2020 年,黑河流域中游 EV 总体平稳,处于较低水平但整体趋好,“北低南高”的空间分布格局显著,EV 以低、较低和中等为主,较高和高质量区占比少,分布也相对离散和稀疏。EV 局部改善、整体维稳偏低的状态可能长期共存,需要展开长效监测和管控措施,以保证其向良性方向持续发展。

(3) 2000—2020 年,黑河流域中游流域 EV 变化剧烈,变化范围呈扩张态,整体朝“西北—东南”方向改变,特别是自 2010—2020 年的后 10 a,朝“正西北—正东南”偏移的方向性趋势更加明显,其时空分布状态和变化特征与流域社会经济发展格局及土地利用转型变迁都较为吻合。

(4) 因子探测结果显示,社会因素的 HAI 及自然因素的 NDVI,DEM 和 Slope 是引发流域 EV 空间分异的主导因子和重要推手。黑河流域中游 EV 空间分异是自然、社会和经济各因素诸因子彼此协同、激烈交互共同作用的产物。在逐利发展的同时,应当重视人类活动对 EV 产生的重要影响,严格遵循用途管制制度,建立健全应对各种人类活动及行为的风险管控机制,加强对敏感脆弱区及自然条件薄弱区的生态环境修复,及时开展土地整治,采用多维度、差异化调控模式与策略,防止和杜绝自然本底退化、人为活动次生破坏退化等影响 EV 良性发展的事件发生,为“一带一路”建设构建坚实生态壁垒。

土地利用转型的生态环境效应是追求社会经济发展与生态环境和谐统一的现实命题。GlobeLand30 数据集空间分辨率较高,但除苔原地类外,均无更为细致的 2 级分类结果,因此对 EV 的精细化区分存在缺陷。在以 EQI 为基础的生态环境效应测算体系中,EQI 的确定仍以参考和引用为主,缺乏可分地域、可依时间更新的更为精细、权威和系统的参照标准,尚有待完善。另外,地理空间数据具有较强的尺度依赖,研究均偏向于在最优尺度下进行探索,对不同尺度产生的 EV 扰动尚不明确。除此之外,地理探测器最大处理数量存在上限,需要按需对数据进行处理,格网密度变化对数据精度影响客观存在。再者,文章更多关注了土地利用转型生态环境效应过去产生的变化和当下所处状态,对其未来不同情景下的“向前看”问题未作涉及,有待在后期予以拓展和完善。

参考文献:

[1] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio-

ecological feedback versus socio-economic change[J]. Land Use Policy, 2010,27(2):108-118.

[2] 龙花楼.论土地利用转型与土地资源管理[J].地理研究, 2015,34(9):1607-1618.

[3] Grainger A. National land use morphology: patterns and possibilities[J]. Geography, 1995,80(3):235-245.

[4] 龙花楼,李秀彬.区域土地利用转型分析:以长江沿线样带为例[J].自然资源学报,2002,17(2):144-149.

[5] 宋小青.论土地利用转型的研究框架[J].地理学报, 2017,72(3):471-487.

[6] 刘永强,龙花楼.黄淮海平原农区土地利用转型及其动力机制[J].地理学报,2016,71(4):666-679.

[7] 田俊峰,王彬燕,王士君.东北地区土地利用转型特征测度与机制探索[J].经济地理,2020,40(9):184-195.

[8] 吴思,胡守庚,熊婷,等.长江中游经济带主体功能区土地利用转型模式研究[J].资源科学,2018,40(11):2213-2224.

[9] 龙花楼,戈大专,王介勇.土地利用转型与乡村转型发展耦合研究进展及展望[J].地理学报,2019,74(12):2547-2559.

[10] 陈万旭,李江风,冉端.长江中游城市群土地利用转型和城镇化之间的空间关系[J].长江流域资源与环境, 2019,28(5):1036-1048.

[11] Long H L. Land use policy in China: Introduction[J]. Land Use Policy, 2014,40(3):1-5.

[12] 梁国付,丁圣彦.气候和土地利用变化对径流变化影响研究:以伊洛河流域伊河上游地区为例[J].地理科学, 2012,32(5):635-640.

[13] 阿依吐尔逊·沙木西,刘新平,祖丽菲娅·买买提,等.西部绿洲城市土地利用转型的生态环境效应:以乌鲁木齐市为例[J].农业资源与环境学报,2019,36(2):149-159.

[14] 戴文远,江方奇,黄万里,等.基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究:以福州新区为例[J].自然资源学报,2018,33(12):2098-2109.

[15] 吴健生,冯喆,高阳,等.基于 DLS 模型的城市土地政策生态效应研究:以深圳市为例[J].地理学报,2014,69(11):1673-1682.

[16] 路昌,张傲.东北地区土地利用转型及其生态环境效应[J].中国农业大学学报,2020,25(4):123-133.

[17] 袁悦,井立蛟,杨鸿雁,等.昌黎县土地利用转型对生态环境效应的影响[J].水土保持研究,2019,26(2):194-201.

[18] 董建红,张志斌,笪晓军,等.“三生空间”视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力分析:以甘肃省为例[J].生态学报,2021,41(15):1-10.

[19] Niedertscheider M, Gingrich S, Erb K H. Changes in land use in South Africa between 1961 and 2006: an integrated socio-ecological analysis based on the human appropriation of net primary production framework[J]. Regional Environmental Change, 2012,12(4):715-727.

[20] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.

- [21] 高星,刘泽伟,李晨曦,等.基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J].生态学报,2020,40(20):7113-7122.
- [22] 孔冬艳,陈会广,吴孔森.中国“三生空间”演变特征,生态环境效应及其影响因素[J].自然资源学报,2021,36(5):1116-1135.
- [23] 孙善良,张小平.陕西省土地利用转型时空演变及其生态环境效应分析[J].水土保持研究,2021,28(6):356-363.
- [24] 苑韶峰,唐奕钰,申屠楚宁.土地利用转型时空演变及其生态环境效应:基于长江经济带127个地级市的实证研究[J].经济地理,2019,39(9):174-181.
- [25] 邓楚雄,彭勇,李科,等.基于生产-生态-生活空间多情景模拟下的流域土地利用转型及生态环境效应[J].生态学杂志,2021,40(8):2506-2516.
- [26] 王福红,赵锐锋,张丽华,等.黑河中游土地利用转型过程及其对区域生态质量的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):4057-4066.
- [27] 陈军,陈晋,廖安平,等.全球30 m地表覆盖遥感制图的总体技术[J].测绘学报,2014,43(6):551-557.
- [28] 陈军,廖安平,陈晋,等.全球30 m地表覆盖遥感数据产品:Globe Land 30[J].地理信息世界,2017,24(1):1-8.
- [29] 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[J].第四纪研究,2003,23(3):280-290.
- [30] 陈万旭,李江风,曾杰,等.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[J].地理研究,2019,38(9):63-77.
- [31] 严恩萍,林辉,王广兴,等.1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J].生态学报,2014,34(20):5962-5973.
- [32] 黄木易,方斌,岳文泽,等.近20 a来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测[J].地理研究,2019,38(11):2790-2803.
- [33] 杨清可,段学军,王磊,等.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J].地理科学,2018,38(1):97-106.
- [34] 伊木然江·阿卜来提,张永福,孜比布拉·司马义.基于Globe Land 30的哈密市2000—2020年土地利用格局变化研究[J].水土保持通报,2021,41(1):182-189.
- [35] 樊涵,杨朝辉,王丞,等.贵州省自然保护地时空演变特征及影响因素[J].应用生态学报,2021,32(3):1005-1014.
- [36] 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.
- [37] 赖国华,胡宝清,李敏,等.桂西南-北部湾地区“三生”用地演变及其驱动力的地理探测[J].水土保持研究,2021,28(4):236-243.

(上接第323页)

- [17] 薛冰,肖骁,李京忠,等.基于POI大数据的城市零售业空间热点分析:以辽宁省沈阳市为例[J].经济地理,2018,38(5):36-43.
- [18] Le K G, Liu P, Lin L T. Determining the road traffic accident hotspots using GIS: based temporal-spatial statistical analytic techniques in Hanoi, Vietnam[J]. Geo-spatial Information Science,2020,23(2):153-164.
- [19] 王兆峰,刘庆芳.产业融合背景下运动休闲特色小镇的空间分异及形成因素[J].地理科学,2020,40(8):1310-1318.
- [20] 王雄,龚健,孟现勇,等.长江中游地区贫困村空间分异研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(10):2136-2145.
- [21] 陈舒婷,郭兵,杨飞,等.2000—2015年青藏高原植被NPP时空变化格局及其对气候变化的响应[J].自然资源学报,2020,35(10):2511-2527.
- [22] 沈中健,曾坚.闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系[J].地理学报,2021,76(3):566-583.
- [23] 浩飞龙,王士君.基于网络口碑的长春市文化娱乐场所空间布局研究[J].人文地理,2016,31(6):66-72.
- [24] 薛冰,肖骁,李京忠,等.基于POI大数据的城市零售业空间热点分析:以辽宁省沈阳市为例[J].经济地理,2018,38(5):36-43.
- [25] 廖艳梅,兰安军,尹林江,等.喀斯特山区农村居民点空间分布特征及其影响因素[J].水土保持研究,2021,28(6):233-241.
- [26] 蔡碧凡,陶卓民,张建国,等.浙江休闲农业经营主体发展特征与空间演化[J].经济地理,2017,37(5):181-190.
- [27] 黄晗,李寻欢,周扬.中国丘陵山区农村贫困时空格局及其演变机制研究:以江西省于都县为例[J].地理科学进展,2020,39(6):938-950.
- [28] 刘兆军,王琪,杜国明.东北粮食主产区村庄宅基地空心化空间分异及其影响因素分析:以黑龙江省克山县为例[J].中国土地科学,2020,34(6):94-102.
- [29] 王振波,王新明.京津冀农民专业合作社时空演化及影响因素解析[J].生态学报,2019,39(4):1226-1239.
- [30] 熊熙,张仕超,梁靖茹,等.丘陵山区家庭农场时空拓展特征及驱动力分析:以重庆市江津区为例[J].山地学报,2021,39(1):71-87.
- [31] 芮旸,杨钰华,韩静,等.县域高质量果业专业合作社发育的空间归因:基于陕西省省级示范社数据[J].中国农业资源与区划,2021,42(5):82-92.