DOI: 10.20103/j.stxb.202407181687

段艺璇,沈亲,高光耀,郑桂姿.生态用地与农田和沙地的权衡/协同关系定量解析——以西辽河流域为例.生态学报,2025,45(6):2838-2850. Duan Y X, Shen Q, Gao G Y, Zheng G Z. Quantitative analysis of the trade-off/synergy between ecological land, farmland and sandy land: a case study in the West Liao River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6):2838-2850.

生态用地与农田和沙地的权衡/协同关系定量解析

——以西辽河流域为例

段艺璇1,沈 亲1,*,高光耀2,郑桂姿3

1 北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点实验室,北京 100083
2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
3 诸城市林业发展中心,诸城 262200

摘要:气候变化和人类活动显著改变了生态系统要素及其之间的权衡/协同关系,探究要素之间的关系及其关键影响因子对于 指导生态系统管理和应对未来气候变化至关重要。以西辽河流域为研究区,分析 1990—2020 年生态系统要素的时空变化及生 态用地、农田和沙地景观梯度的演变,应用相关性分析和双变量空间自相关模型刻画生态用地与农田、沙地之间的权衡/协同关 系,并通过地理探测器揭示影响生态用地与农田、沙地之间权衡程度变化的关键因子。结果表明:(1)西辽河流域生态用地减 少、非生态用地增加,具体表现为生态用地中水体和草地面积分别减少了 25.7%和 5.2%,非生态用地中农田面积增加了 10.2%, 生态系统要素之间的转换主要发生在草地、水体和农田之间。生态用地景观梯度在中部逐渐离散,破碎化程度增加;农田景观 梯度由东部向西南方向递增和聚集;沙地景观梯度在中部以聚集分布为主。(2)生态用地与农田之间存在显著的权衡关系,权 衡区域面积先增加后减少,主要集中在中部和南部平原地区,约占研究区面积的 46%;协同区域面积先减少后增加,约占研究区 面积的 8%,人均 GDP 和人口密度是影响生态用地与农田权衡关系的重要因子。(3)生态用地与沙地的权衡区域集中在科尔 沁沙地和西部山区,权衡区域与协同区域均呈现长期且相对稳定的态势,其权衡面积占比约为研究区域面积的 23%,协同区域 约占研究区面积的 22%。高程和城市化速率是影响生态用地与沙地权衡关系的重要因子。研究结果可以为流域生态系统空间 优化和管理提供科学依据。

关键词:生态系统要素;景观梯度;时空格局;权衡/协同关系;驱动因子

Quantitative analysis of the trade-off/synergy between ecological land, farmland and sandy land: a case study in the West Liao River Basin

DUAN Yixuan¹, SHEN Qin^{1,*}, GAO Guangyao², ZHENG Guizi³

1 State Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Zhucheng Forestry Development Center, Zhucheng 262200, China

Abstract: Climate change and human activities have significantly altered ecosystem elements and the trade-off/synergy between them. Exploring the spatio-temporal variation characteristics of ecosystem elements, understanding the relationships among these elements, and identifying their key influencing factors are essential for guiding effective ecosystem management and for adapting to future climate change. This study analyzed the spatio-temporal changes of various ecosystem elements in the West Liao River Basin from 1990 to 2020, as well as the evolution of landscape gradients in ecological land, farmland,

收稿日期:2024-07-18; 网络出版日期:2024-12-23

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0015-02)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shenqin2017@ bjfu.edu.cn

and sandy land. Correlation analysis and bivariate spatial autocorrelation models were applied to explore the trade-off/ synergy between ecological land, farmland, and sandy land. In addition, the factors affecting the trade-off between ecological land, farmland, and sandy land were revealed by using the Geodetector. The results showed that: (1) There was a notable expansion of non-ecological land at the expense of ecological land. Among them, farmland area increased by 10.2%, while water and grassland areas decreased by 25.7% and 5.2%, respectively. The conversion between ecosystems mainly occurred among grassland, water, and farmland. The spatial distribution of farmland landscape gradients in the West Liao River Basin became more pronounced and tended to cluster from the eastern to the southwestern areas. Meanwhile, the sandy land landscape gradients were predominantly concentrated in the central region. Conversely, the ecological land landscape gradients exhibited a gradual dispersion in the central region, accompanied by an increase in fragmentation. (2) A significant trade-off was observed between ecological land use and farmland within the West Liao River Basin. The areas involved in this trade-off initially expanded and then contracted, predominantly located in the central and southern plains, which constituted approximately 46% of the total study area. The area of synergy regions initially decreased and then showed an increase, making up approximately 8% of the study area. Per capita Gross Domestic Product (GDP) and population density were identified as significant factors influencing the trade-off dynamics between ecological land use and farmland. (3) The most pronounced trade-off between ecological land and sandy land were primarily observed in the Horqin Sandy Land and western mountainous regions. Both the trade-off and synergy regions exhibited a long-term, relatively stable trend. The trade-off area constituted roughly 23% of the total study area, while the synergy area made up about 22%. Key factors affecting the trade-off relationship between ecological land use and sandy land included elevation and the rate of urbanization. The findings of this research can offer a scientific foundation for the spatial optimization of river basin ecosystems.

Key Words: ecosystem components; landscape gradient; spatial-temporal pattern; trade-off/synergy; drivers

山、水、林、田、湖、草、沙是生态系统的核心要素^[1],要素间存在密切的相互作用和耦合关系^[2]。社会经济活动的扩张和自然环境的变迁导致生态系统要素的剧烈变化^[3-4]。为了研究这些要素在生态系统中的作用及其对环境变化的响应,众多学者对生态用地、农田和沙地等关键生态系统要素进行了深入探讨。Hu 等^[5]分析了近 30 年珠海市生态用地时空变化及驱动因素;Wang 等^[6]对影响农田扩张的驱动因子进行研究; Zhu 等^[7]以科尔沁沙地为例对其国土空间治理提出建议。以往研究多聚焦于单一要素,而忽略了生态系统作 为一个整体的复杂性和相互依存性,进而导致生态系统内在动态和相互作用的理解不足^[8]。因此,加强对生态系统要素之间关系的理解,对于制定科学的生态环境治理策略,推动生态系统可持续发展具有重要意义。

权衡/协同是生态系统服务和功能之间的典型关系^[9–10]。此消彼长为权衡,同增同减为协同^[11]。不同 生态系统要素之间也存在空间上的博弈^[12],由于缺乏对生态系统要素的量化,鲜有研究探究生态系统要素之 间的权衡/协同关系。而景观梯度分析能够有效表达研究对象的空间分布^[13–14],为深入探讨生态系统要素之 间的权衡/协同关系提供有力手段^[12]。生态系统要素之间的权衡/协同关系的变化受到多种因子的综合影 响,目前探究这些驱动因子的常用方法有偏相关分析^[15]、多元线性回归^[16]和地理探测器^[17–18]等。其中,地 理探测器具有物理含义明确,解释效力高和适用范围广等优势^[19],已被广泛应用于揭示农田^[17]、草地^[18]等 生态系统多功能之间权衡/协同关系的驱动机制,从而为驱动因子的空间分异性特征研究^[20],量化因子在生 态系统要素间权衡/协同关系中的作用提供强有力的分析手段。

西辽河流域是典型的生态脆弱区^[16],其生态系统表现出较低的稳定性与抗干扰能力^[21],易于发生生态 退化且自我修复能力有限^[22],深入探究该区域内生态系统要素之间的相互作用及其关键驱动因子,对于解释 生态系统的稳定性及恢复机制具有重要意义^[23]。因此,本文通过转移矩阵法系统分析该流域生态系统要素 的时空分布特征,利用景观梯度模型绘制了流域生态用地、农田和沙地的景观梯度空间分布,通过相关性分析 和双变量空间自相关分析探究生态用地与农田、沙地的权衡/协同关系。相较于协同关系提供的互补与增益效应,权衡关系揭示了不同生态系统要素之间潜在的冲突和竞争^[24],而这种冲突会对生态系统整体的稳定性构成更为直接的挑战,因此,本文利用地理探测器识别生态用地与农田、沙地权衡关系的关键驱动因子,为流域生态空间的合理规划与管理提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

西辽河流域(北纬 41°—46°,东经 117°—123°)位于我国内蒙古东北部,毗邻河北省、辽宁省和吉林 省^[25],流域面积 1.26×10⁵km²,气候类型为温带大陆性气候,年平均气温 5 ℃—6.5 ℃,年平均降水约 376 mm,集中在 7 月和 8 月^[26]。水资源人均占有量 851 m³,属于典型水资源匮乏区和生态脆弱区^[16]。整体地形 自西向东逐渐降低,行政上隶属于通辽市和赤峰市,主要河流为西辽河,老哈河,西拉木伦河和新开河(图 1)。 流域西部山地分布有森林,山地—平原过渡区拥有较大面积的草场,适合发展牧业,东部平原主要为农田覆 盖,是我国重要的粮食生产基地,中部为科尔沁沙地。



图 1 研究区位置及地形 Fig.1 Location and topography of study area

1.2 数据来源

1.2.1 土地覆被数据

本文中 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年西辽河流域土地利用来自中国土地覆被数据集(ChinaCover), 空间分辨率为 30m × 30m。由于流域内分布着我国面积最大的沙地,其存在对生态系统和环境构成了显著的 负面影响,特别将沙地作为独立的土地覆被进行划分,其他用地涉及的土地覆被类型有裸岩、裸土和盐碱地。 因此,根据《全国土地覆被 I、II级分类系统》及西辽河流域的土地类型特征将流域土地覆被数据重新划分为 八类:林地、草地、湿地、水体、农田、沙地、建设用地和其他用地。为了进一步分析生态用地各要素之间的关 系,本文在二级分类的基础上,将林地、草地、湿地、水体等对生态系统可持续性具有重要贡献的用地类型定义 为生态用地^[23]。

1.2.2 驱动因子数据

本文以生态用地与农田、生态用地与沙地之间权衡程度的变化为因变量,从自然和社会经济两个维度选择了14个因子作为解释变量(表1)。自然因子包括影响生态系统结构与功能的地形因子(海拔和坡度)和气候因子(年均气温和年均降水)。社会经济因子反映人类活动对自然资源利用强度和其对生态系统干扰程

度^[23],包括体现人口对生态系统压力的人口密度,模拟人类活动对生态系统干扰的城市化速率和距道路的距离, 衡量地方经济发展水平的人均 GDP 和农业产值以及评估居民消费水平的农村可支配收入和城镇可支配收入。

Table 1 Selection and Explanation of Driving Factors				
类型	驱动因子	数据来源	驱动因子说明	
Туре	Driving factor	Data source	Driving factor description	
自然因子	海拔	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn	地形条件	
Natural factors	坡度	基于高程数据提取		
	年均气温	国家地球系统数据科学中心	气候条件	
	年均降水	http://www.geodata.cn		
社会经济因子	人口密度	中科院资源与环境科学数据中心 https://www.resdc.cn	区域人口的空间表达	
Social and economic	距铁路的距离	OpenStreetMap	像元几何中心到最近铁路的欧式距离	
factors	距主干道的距离	https://www.openstreetmap.org	像元几何中心到最近主干道的欧式距离	
	距一级道路的距离		像元几何中心到最近一级道路的欧式距离	
	距二级道路的距离		像元几何中心到最近二级道路的欧式距离	
	人均 GDP	中科院资源与环境科学数据中心 https:///www.resdc.cn	研究区常住单位在一定时期内生产活动的最 终成果	
	城市化速率	内蒙古统计年鉴	城市人口/总人口	
	农业产值		农、林、牧、渔业全部产品的总产值	
	农村可支配收入		农村居民可自由支配的收入	
	城镇可支配收入		城镇居民可自由支配的收入	

表1 驱动因子选取与说明

GDP:国内生产总值 Gross domestic product

2 研究方法

2.1 景观梯度模型

景观梯度是指某种景观类型在单位网格面积中所占的份额,反映了景观类型的特征和趋势。景观梯度值越大,某种景观类型的分布越密集,景观梯度的时空变化反映了景观的干扰过程和退化趋势^[27-28],其表达关系如下:

$$DI = \frac{CA}{\sum_{i=1}^{n} CA_i} \times 100 \tag{1}$$

式中,DI为给定景观类型梯度值,CA为单位网格内给定景观的面积,CA_i为单位网格内不同景观类型的总面积。

对研究区进行空间网格化,并通过空间插值计算每种景观类型的空间分布特征。参考渔网景观生态学的 相关研究,最佳景观样地面积是平均斑块面积的 2—5 倍^[29]。通过 Fragstats 软件计算出研究区平均斑块面积 为 457.3 hm²,根据研究区实际情况,选择 5 倍平均斑块面积 22.8 km²为单个网格面积,因此,确定 5 km × 5 km 为基本网格评价单元。

2.2 生态用地与农田、沙地景观梯度权衡/协同分析

2.2.1 相关性分析

采用 Pearson 相关系数和莫兰指数定量分析生态用地与农田、沙地之间的相互作用:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (Y_i - \bar{Y})^2}}$$
(2)

式中,r为相关系数,X和Y为不同生态要素的景观梯度值,i为样本个数。

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} (x_i - \bar{x})^2}$$
(3)

式中,*I*为莫兰指数,*x_i*和*x_j*分别为不同生态系统要素的景观梯度值,*w_{ij}*为景观梯度值。莫兰指数*I*的取值范围为[-1,1]。若 0<*I*<1,表示聚类趋势,若-1<*I*<0,则表示离散趋势。显著的负相关(*I*<-0.5,*r*<-0.5)表明两种生态系统要素之间存在显著的权衡关系,而显著的正相关(*I*>0.5,*r*>0.5)表明两种生态系统要素之间存在显著的权衡关系,而显著的正相关(*I*>0.5,*r*>0.5)表明两种生态系统要素之间存在显著的协同关系^[30]。

2.2.2 双变量空间自相关

双变量空间自相关通常被认为是相邻空间单元中一个变量和另一个变量之间的相关性,已被广泛用于诊断两个变量之间的权衡/协同关系^[22]。本文通过 Geoda 软件包中的权重和空间模块分析景观尺度上的二元 空间聚类,以衡量生态用地与农田、沙地景观梯度之间的空间权衡/协同效应。

$$I_{i} = \frac{n(x_{i} - \bar{x}) \sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_{j} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \bar{x})^{2}}$$
(4)

式中,*I_i*为二元局部空间自相关系数,*n*为研究区空间单元数量,*x_i*和*x_j*分别为不同生态系统要素的景观梯度 值,*w_{ij}*为景观梯度值。空间关联格局分为五种类型:高-高协同区、低-低协同区、高-低权衡区、低-高权衡区以 及不显著区^[27]。

2.3 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[19]提出,旨在测量空间分层异质性程度并揭示其在各种自然和社会经济过程中的驱动力的方法,可以定量识别各种驱动因子对因变量空间模式的贡献,驱动因子对因变量空间差异的权衡影响可以通过 q 值估计:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$
(5)

式中,q为驱动因子对因变量的定量贡献,q值越高表明解释力越强,L为变量的分层,N和N_h为研究区样本 总数和h层的样本总数,分别为研究区的方差和h层在子区域的方差。

3 结果与分析

3.1 西辽河流域生态系统格局时空变化

3.1.1 西辽河流域生态系统要素时空分布特征

西辽河流域1990、2000、2010和2020年各生态系统要素分布如图2。草地广泛分布在西辽河流域的整个 区域,是研究区最主要的结构(约占研究区面积的45%)。林地主要分布在流域西部,农田主要分布在东部平 原,中部为科尔沁沙地。1990—2020年,研究区水域面积明显减少,较1990年下降了25.7%,草地面积较 1990年下降了5.21%,农田面积明显增加,较1990年增加了10.2%。沙地和林地占比相对稳定,没有明显变 化。综上所述,研究区生态用地面积减少,非生态用地面积增加。

1990—2020年间西辽河流域生态系统要素之间的转换主要发生在草地、水体和农田之间。1990—2000年间,在流域中部、东部和南部,有大量生态用地转化为农田(图3)。其中,草地转出最多,向农田转出2480.8 km²,占草地流出面积的54.9%(图4);2000—2010年,流域东部明显有条状生态用地转化为农田。通过转移矩阵分析可知,该时期水体变化最剧烈,向农田转出179.7 km²,占水体流出面积的42.9%;2010—2020年,流域东部和南部有大面积生态用地转为农田,同时流域东北部有较明显的农田转为生态用地(图3)。结合转移



图 2 西辽河流域 1990—2020 年生态系统空间分布 Fig.2 Spatial distribution of ecosystem in the West Liao River Basin from 1990 to 2020

矩阵,该时段草地净减少最多,向农田转出 2787.1 km²,占草地流出面积的 53.9%(图 4) 3.1.2 生态用地、农田和沙地景观梯度变化

根据研究区实际情况,将景观梯度划分[0-5]、[5-10]、[10-20]、[20-40]、[40-60]、[60-80]、 [80-100]共8个梯度等级(图5)。生态用地集中分布在西部山区以及中部山区—平原过渡区,景观梯度值 在[60-80]分布面积最大。1990-2020年,在高景观梯度[60-100]区间,生态用地景观由56.9%下降至 52.6%,景观面积减少了4.3%,在低景观梯度[0-40],生态用地景观由20.5%增至24.8%,景观面积增加了 4.3%。农田集中分布在东部平原地区,景观梯度值在[20-40]分布面积最大。从1990-2020年,在高景观 梯度[60-100]区间,农田景观由8.8%增加至13.9%,景观面积大幅增加5.1%,在低景观梯度[0-40],农田 景观由72.0%降低至67.8%,景观面积降低4.2%。沙地景观梯度在[0-5]的分布面积最大,仅在科尔沁沙地有 明显高景观梯度沙地。1990-2020年,高景观梯度[60-100]沙地仅占研究区面积0.5%左右,低景观梯度[0-40]沙地占研究区总面积98.1%,在中景观梯度[40-60],沙地面积由1.4%降低至1.3%,景观面积降低了0.1%。 3.2 生态用地与农田、沙地的权衡/协同关系

3.2.1 生态用地与农田的权衡/协同关系

双变量空间自相关分析表明,在1990—2020年,生态用地与农田的景观梯度具有全局空间自相关性,全局莫兰指数 *I*<-0.5, Pearson 相关系数 *r*<-0.6。生态用地与农田景观梯度之间存在显著的权衡关系,从1990—2020年,莫兰指数 *I* 和 Pearson 相关系数 *r* 的绝对值均呈上升趋势,表明权衡程度增加(表 2)。通过聚类分析,西辽河流域生态用地与农田的权衡/协同关系表现出不同的空间模式,图 6 为通过 *P*<0.01 显著性检验的像元数量分别占研究区总面积的百分比。1990—2020年,权衡区域分别占研究区总面积的 45.9%、48.3%、46.0%,47.0%;协同区域分别占研究区总面积的 8.4%、7.3%、8.2%、7.9%(图 6)。权衡区域主要位于



图 3 西辽河流域 1990—2020 年土地利用转移变化







东部平原和西北部山区,东部平原地形适宜且有西辽河水源涵养滋润,适合粮食生长和农业发展,生态用地与 农田存在明显的低-高聚集,1990—2020年,东部平原地区权衡区域有较明显扩张;西北侧为大兴安岭南端,分 布有森林,生态用地与农田存在明显的高-低聚集,此区域权衡区域面积无明显变化(图7)。

Table 2 Landscape gradient correlation b	etween ecological land	and farmland in the w	est Liao River Basin fr	om 1990 to 2020
相关系数 Correlation coefficient	1990	2000	2010	2020
Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient	-0.670 ***	-0.689 ***	-0.690 ***	-0.703 ***
全局莫兰指数 Global Moran'I	-0.514	-0.532	-0.534	-0.557

表 2 西辽河流域 1990—2020 生态用地与农田的景观梯度相关性 .

1.0

ъ.

1000 / 0000

. . . .

* P<0.1; ** P<0.05; *** P<0.01

... .

....

http://www.ecologica.cn

1990—2000年



图 5 西辽河流域 1990—2020 年生态用地、农田及沙地景观梯度空间分布

Fig.5 Landscape gradient spatial distribution of ecological land, farmland and sandy land in the West Liao River Basin from 1990 to 2020

3.2.2 生态用地与沙地的权衡/协同关系

在 1990—2020 年,生态用地与沙地的景观梯度具有全局空间自相关性,全局莫兰指数 *I*<-0.04, Pearson 相关系数 *r*<-0.01,生态用地与沙地景观梯度之间权衡关系不显著,从 1990—2020 年流域生态用地与沙地之 间的莫兰指数 *I* 和 Pearson 相关系数 *r* 的绝对值小幅下降,表明研究区权衡面积略有减小(表 3)。通过聚类分 析,西辽河流域生态用地与沙地的权衡/协同关系表现出不同的空间模式,1990—2020 年,通过 *P*<0.01 显著 性检验的权衡区域像元数量分别占研究区总面积的 23.7%、23.2%、23.5%、22.1%;协同区域分别占研究区总

Table 3 Landscape gradient correlation b	etween ecological land	and sandy land in the	West Liao River Basin f	rom 1990 to 2020
相关系数 Correlation coefficient	1990	2000	2010	2020
Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient	-0.073 ***	-0.066 ***	-0.061 ***	-0.042 ***
全局莫兰指数 Global Moran'I	-0.025	-0.016	-0.015	-0.012

表 3 西辽河流域 1990—2020 年生态用地与沙地的景观梯度相关性



图 6 西辽河流域 1990—2020 年权衡、协同及不显著区域占研究区面积比例 Fig.6 Proportion of trade-off, synergy and insignificant area in the Xiliao River Basin from 1990 to 2020



图 7 西辽河流域 1990—2020 年生态用地—农田权衡/协同关系的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of trade-off/synergy of ecological land and farmland in the Xiliao River Basin from 1990 to 2020 高-高为在单位网格内,生态用地和农田景观梯度值都低;低-高为在单位网格内,生态用地和农田景观梯度值都低;低-高为在单位网格内,生态用地景观梯度值低,农田景观梯度值高;高-低为在单位网格内,生态用地景观梯度值高,农田景观梯度值低

面积的 22.6%、23.6%、23.5%、24.4%(图 6)。权衡区域主要位于科尔沁沙地和西北部大兴安岭区域,研究区 中部为我国四大沙地之一科尔沁沙地,该区域主要用地类型为沙地,因此生态用地与其存在明显的低-高聚 集。西部为大兴安岭南段,分布有森林,该区域生态用地与沙地之间存在明显的高-低聚集。1990—2020 年,



图 8 西辽河流域 1990—2020 年生态用地—沙地权衡/协同的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of trade-off/synergy of ecological land and sandy land in the West Liao River Basin from 1990 to 2020

权衡区域面积变化不显著(图 8)。

3.3 生态用地与农田、沙地权衡关系的驱动因素

本文通过地理探测器,进一步探究自然因子和社会经济因子对西辽河流域生态系统要素之间权衡程度的 影响。探测结果显示,生态系统要素之间关系受到多种主导因素的影响(表4)。在影响生态用地与农田权衡 关系的驱动因子中,社会经济因子的q值整体高于自然因子,表明社会经济因子更能解释生态用地与农田之 间的权衡程度。其中人均 GDP、人口密度以及农村可支配收入对生态用地与农田的权衡关系的影响更大,q 值分别为 0.263、0.219 和 0.138。结果表明,社会经济增长以及农村经济发展水平是影响生态用地与农田之间 权衡关系的重要因素。在影响生态用地与沙地权衡关系的驱动因子中,高程解释力最大,q值为 0.257。其次 为城市化速率和城镇可支配收入,q值分别为 0.146 和 0.143。

4 讨论

4.1 生态系统要素时空变化分析

西辽河流域近 30 年生态系统要素之间转换频繁,要素间的转变以草地、水体和农田为主。1990—2000 年,随着人口数量的持续增长,对农畜产品的生产需求大幅增加^[31],这一社会经济因子显著影响了区域生态 系统格局。为满足日益增长的生产需求,草地、水体等生态用地被开垦为农田;牧区盲目扩大牲畜量,造成部 分草地退化^[32]。因此,在该时间段内流域内草地、水体等生态用地的面积减少,农田面积增加。2000 年之 后,随着退耕还林还草等生态恢复工程的实施^[33],流域中部和西部有部分农田转化为生态用地,但由于对粮 食需求持续增加以及对政策的执行力度不一等原因^[12],导致流域农田扩张程度强于生态用地的恢复程度,该 时间段内整体上农田面积仍然增加,草地、水体等生态用地面积减小。

6期

Table 4 Results of Geodelector						
类型 Type	驱动因子 Driving factor	生态用地-农田 Ecological land and farmland	生态用地-沙地 Ecological land and sandy land			
自然因子	海拔	0.038 **	0.257 **			
Natural factors	坡度	0.005 *	0.073 **			
	年均气温	0.045 **	0.097 **			
	年均降水	0.054 **	0.077 **			
社会经济因子	人口密度	0.219 **	0.044 **			
Social and economic factors	距铁路的距离	0.037 **	0.053 **			
	距主干道的距离	0.063 **	0.026 **			
	距一级道路的距离	0.045 **	0.036 **			
	距二级道路的距离	0.048 **	0.037 **			
	人均 GDP	0.263 **	0.018 **			
	城市化速率	0.123 **	0.146 **			
	农业产值	0.112 **	0.141 **			
	农村可支配收入	0.138 **	0.046 **			
	城镇可支配收入	0.118 **	0.143 **			

表 4 地理探测器结果

景观梯度分析可以直观反应景观变化程度的空间信息,揭示景观空间格局特征^[34]。1990年以来,西辽 河流域高景观梯度生态用地减少,低景观梯度生态用地增加,表明生态用地聚集程度逐渐降低,破碎化程度增 加;高景观梯度农田大幅增加,特别是在东部平原以及南部水网比较密集区域,其农业基础设施水平相对较 好,农田聚集程度明显增加。农田的不断扩张导致生态用地面积减小,从而造成生态用地退化^[12]。研究期 间,沙地在不同景观梯度下变化不大,在空间上存在明显聚集分布,特别是在科尔沁沙地,该区域高景观梯度 沙地占绝对优势,仅在外围有小面积中景观梯度沙地转为低景观梯度,表明该区域沙地沙漠化程度降低。主 要由于三北防护林等生态恢复工程的实施,使得流域内沙漠化土地整体扩展的趋势得到了一定的遏制^[35]。 这与第六次全国荒漠化和沙化调查结果^[36]一致,沙地沙漠化程度逐步减轻。

4.2 生态用地与农田、沙地之间权衡关系的驱动因子分析

西辽河流域生态用地与农田之间存在显著的权衡(表 2),二者之间的矛盾较为突出。生态用地与农田的低-高权衡区域主要位于地形适宜的东部和南部区域,研究时段内低-高权衡区域存在较明显的扩张(图 7), 农田的扩张通常会导致生态用地的退化,加剧生态用地与农田之间的权衡。研究表明农村居民的经济状况会显著影响农田扩张^[37];同时,GDP、人口年增长率等社会经济因子也会进一步影响农田的变化^[38]。1990—2000年,西辽河流域人口的增长导致对粮食的需求量增加^[32];社会经济条件的改善使得农民开垦农田的意愿更为强烈^[39],因此,该时段内农田显著扩张,而生态用地退化,生态用地与农田之间权衡面积呈显著增加。2000年以后,由于退耕还林还草政策的实施^[33],有部分农田转化为生态用地,因此,在 2010年和 2020年,生态用地与农田之间的权衡面积相较 2000年有所减少。

西辽河流域中部的科尔沁沙地,生态用地与沙地之间存在长期较稳定的权衡区域,且权衡区域的面积无 明显变化(表3,图8)。城市化速率和城镇可支配收入等社会经济因子是影响权衡关系的主要因素。研究表 明,农村人口的增长与沙漠化进程的加速存在密切联系^[40]。特别是在内蒙古地区,人类活动在植被退化的过 程中扮演了关键角色^[41]。近三十年来,随着经济收入和社会经济效益提升,国家和地方政府加大了生态环境 治理的力度,特别是"三北"防护林等重点生态恢复工程的实施^[32],有效抑制了生态用地与沙地之间的权衡 关系,促进了二者的协同发展。生态恢复工程的实施虽然在一定程度上控制了沙漠化进程,缓解了生态用地 与沙地的权衡,但由于水资源短缺,恶劣的气候条件和土壤贫瘠等因素,植被的成活率仍然较低,未能从根本 上缓解生态用地与沙地之间的权衡^[35]。因此,对应的可持续发展策略除控制人口增长外,还需进一步加强植 被保护,以推动生态系统要素之间的协同发展。

4.3 对生态管理的建议和启示

针对生态用地与农田权衡面积持续增加的现象,在土地管理上,可以关注二者最有可能发生变化的区域, 设置转化的弹性空间^[12],利用二者之间的长期反馈来促进土地管理政策的调整。由于大面积平原地区已经 由水体、草地等生态用地转化为农田,流域河流断流严重,缺水问题显著,在平原地区开展植树造林等生态恢 复措施,可能会加剧干旱的风险,造成生态系统之间的权衡关系加剧。未来在实施控制生态用地与沙地权衡 面积情况下,可以通过减少沙漠化进程,适地适树,选择能适应沙地条件的植被,根据不同植被的生态需水量 和科学的立地条件评价来确定种植规模^[42]。同时,通过人为干扰改善生态用地与沙地之间的权衡。在保证 农牧民生活水平的前提下,根据山水林田湖草沙与当地人民之间的相互作用来制定政策和规划^[43],加强草原 执法力度,改善目前"边治理,边破坏"的情况^[8]。而后逐渐转变牧民的生产生活方式,从依赖草原向绿色产 业转变^[6],减轻草地生产压力,从而改善生态用地与沙地之间的权衡关系。

5 结论

(1)1990—2020年,西辽河流域生态用地减少,非生态用地增加,其中水域大幅减少25.7%,草地减少5.2%,农田增加10.2%。生态系统之间的转换主要发生在草地、水体、农田之间。生态用地在低景观梯度[0—40]区间增加4.3%,在高景观梯度[60—100]区间减少4.3%;农田在低景观梯度[0—40]区间减少42.7%,在高景观梯度[60—80]区间增加5.1%,特别是在东部平原地区,高景观梯度空间增加明显;沙地在中景观梯度[40—60]区间减少0.1%;

(2)1990—2020年,生态用地与农田景观之间存在显著的权衡关系,权衡区域面积先增加后减少,集中在中部和南部平原地区,面积约占研究区面积的46%;协同区域面积先减少后增加,面积约占研究区面积的8%,人均GDP、人口密度是解释生态用地与农田权衡关系的重要因子:

(3)1990—2020年生态用地与沙地景观之间在科尔沁沙地区域存在长期较稳定的权衡区域,此外东部平 原地区也有较为明显的权衡区域,权衡面积约占研究区面积的23%;协同区集中在流域南部,约占研究区总 面积的22%;高程和城市化速率是解释生态用地与沙地权衡关系的重要因子。

参考文献(References):

- [1] 油畅,渠鸿娇,郭泺.山水林田湖草沙生命共同体理念下社会一生态系统时空耦合及模拟预测.生态学报,2024,44(7):2745-2760.
- [2] 于恩逸,齐麟,代力民,于大炮,赵福强,周莉,周旺明,朱琪,毛诚瑞,吴钢."山水林田湖草生命共同体"要素关联性分析——以长白山地 区为例. 生态学报,2019,39(23): 8837-8845.
- [3] Wang Q Z, Guan Q Y, Lin J K, Luo H P, Tan Z, Ma Y R. Simulating land use/land cover change in an arid region with the coupling models. Ecological Indicators, 2021, 122: 107231.
- [4] Jost E, Schönhart M, Skalský R, Balkovič J, Schmid E, Mitter H. Dynamic soil functions assessment employing land use and climate scenarios at regional scale. Journal of Environmental Management, 2021, 287: 112318.
- [5] Hu Y F, Zhang Y Z. Spatial-temporal dynamics and driving factor analysis of urban ecological land in Zhuhai city, China. Scientific Reports, 2020, 10: 16174.
- [6] Wang L Y, Zhang S Y, Xiong Q Q, Liu Y, Liu Y F, Liu Y L. Spatiotemporal dynamics of cropland expansion and its driving factors in the Yangtze River economic belt: a nuanced analysis at the county scale. Land Use Policy, 2022, 119: 106168.
- [7] Zhu W J, Zhang Z H, Zhang H B, Tovuudorj R. Integrating spatial patterns and driving factors of cultural ecosystem services into territorial spatial governance: a case study of the horqin sandy land with multi-ethnic settlements. Habitat International, 2024, 148: 103093.
- [8] 刘志民,余海滨."山水林田湖草沙生命共同体"理念下的科尔沁沙地生态治理.中国沙漠,2022,42(1):34-40.
- [9] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors a case study in the Loess Plateau of China. Science of the Total Environment, 2017, 607: 1250-1263.
- [10] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. Ecology and Society, 2006, 11: art28.
- [11] Lee H, Lautenbach S. A quantitative review of relationships between ecosystem services. Ecological Indicators, 2016, 66: 340-351.
- [12] Wang H, Zhang C, Yao X C, Yun W J, Ma J N, Gao L L, Li P S. Scenario simulation of the tradeoff between ecological land and farmland in black soil region of Northeast China. Land Use Policy, 2022, 114: 105991.

- [13] Linde D V, Subiros J V. Landscape Ecology and Geographical Information Systems in the Face of the Social and Environmental Change in the Mediterranean Mountain Areas. A Methodological Approach to the Study Case of Hortmoier and Sant Aniol Valleys (Alta Garrotxa, Girona). Areas-Revista Internacional De Ciencias Sociales, 2006, (25): 58-73.
- [14] 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. 生态学报,2018,38(9): 3300-3310.
- [15] 佘王康,杨勤丽,王国庆,金双彦. 青藏高原雪深变化特征及其与气象要素的偏相关分析. 水利水运工程学报,2023(6): 35-45.
- [16] 陈慧敏,赵宇,付晓,吴钢. 西辽河上游生境质量时空演变特征与影响机制. 生态学报,2023,43(3): 948-961.
- [17] Liu Y, Wan C Y, Xu G L, Chen L T, Yang C. Exploring the relationship and influencing factors of cultivated land multifunction in China from the perspective of trade-off/synergy. Ecological Indicators, 2023, 149: 110171.
- [18] 刘宥延. 生态优先背景下祁连山草地"三生功能"权衡协同及空间格局优化研究[D]. 兰州; 兰州大学, 2023.
- [19] 王劲峰,徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报,2017,72(1): 116-134.
- [20] 高煜,刘琳,张正勇,田浩,陈泓瑾,张雪莹,张明羽,王统霞,康紫薇,余凤臣. 2000—2019 年青藏高原山体效应动态变化及驱动力分析. 地 理学报,2024,79(7): 1842-1861.
- [21] Canetti A, Braz E M, de Mattos P P, Figueiredo Filho A, Basso R O. Tree strata structure in an ecotone among the Amazon forest types: a comparative study. Forest Science, 2019, 65(6): 693-702.
- [22] Ren J, Ma R R, Huang Y H, Wang Q X, Guo J, Li C Y, Zhou W. Identifying the trade-offs and synergies of land use functions and their influencing factors of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the upper reaches of Yellow River Basin, China. Ecological Indicators, 2024, 158: 111279.
- [23] Zhang Y Q, Zhao X, Gong J, Luo F, Pan Y P. Effectiveness and driving mechanism of ecological restoration efforts in China from 2009 to 2019. Science of the Total Environment, 2024, 910: 168676.
- [24] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [25] Jiang W, Fu B J, Gao G Y, Lv Y H, Wang C, Sun S Q, Wang K, Schüler S, Shu Z G. Exploring spatial-temporal driving factors for changes in multiple ecosystem services and their relationships in West Liao River Basin, China. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166716.
- [26] Gao Z D, He J S, Dong K B, Li X. Trends in reference evapotranspiration and their causative factors in the West Liao River basin, China. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232; 106-117.
- [27] Hou L, Wu F Q, Xie X L. The spatial characteristics and relationships between landscape pattern and ecosystem service value along an urban-rural gradient in Xi'an city, China. Ecological Indicators, 2020, 108: 105720.
- [28] Baró F, Palomo I, Zulian G, Vizcaino P, Haase D, Gómez-Baggethun E. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: a case study in the Barcelona metropolitan region. Land Use Policy, 2016, 57: 405-417.
- [29] Chalfoun A D, Martin T E. Assessments of habitat preferences and quality depend on spatial scale and metrics of fitness. Journal of Applied Ecology, 2007,44(5): 983-992.
- [30] Ahmad Shaikh S F E, See S C, Richards D, Belcher R N, Grêt-Regamey A, Galleguillos Torres M, Carrasco L R. Accounting for spatial autocorrelation is needed to avoid misidentifying trade-offs and bundles among ecosystem services. Ecological Indicators, 2021, 129: 107992.
- [31] Li M Y, Li X B, Liu S Y, Lyu X, Dang D L, Dou H S, Wang K. Analysis of the spatiotemporal variation of landscape patterns and their driving factors in Inner Mongolia from 2000 to 2015. Land, 2022, 11(9): 1410.
- [32] 刘二燕,赵媛媛,周蝶,武海岩,高广磊,丁国栋. 科尔沁—浑善达克沙地 2000—2020 年土地沙化时空变化格局. 中国沙漠, 2024, 44 (4): 46-56.
- [33] 吕基新,赖勇,耿守保,陈升忠. 1992—2018 年内蒙古自治区植被动态演替特征及驱动力. 应用生态学报,2022,33(5): 1240-1250.
- [34] 陈学渊,张春英,韩晓静,吴永常. 退耕还林过程中旱地—林地景观梯度时空变化分析—以西北旱区陕西耀州为例. 中国农业资源与区划,2021,42(3):7-15.
- [35] Qi K, Zhu J J, Zheng X, Wang G G, Li M C. Impacts of the world's largest afforestation program (Three-North Afforestation Program) on desertification control in sandy land of China. GIScience & Remote Sensing, 2023, 60(1): 2167574.
- [36] 眷国盛,王翠萍,李锋,刘政,孙涛. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析. 林业资源管理,2023(1):1-7.
- [37] van Vliet J, de Groot H L F, Rietveld P, Verburg P H. Manifestations and underlying drivers of agricultural land use change in Europe. Landscape and Urban Planning, 2015, 133: 24-36.
- [38] Uisso A M, Tanrivermiş H. Driving factors and assessment of changes in the use of arable land in Tanzania. Land Use Policy, 2021, 104: 105359.
- [39] Zhang Y, Wang W X, Feng Y F. Impact of different models of rural land consolidation on rural household poverty vulnerability. Land Use Policy, 2022,114: 105963.
- [40] Feng Q, Ma H, Jiang X M, Wang X, Cao S X. What has caused desertification in China? Scientific Reports, 2015, 5: 15998.
- [41] Sun B, Li Z Y, Gao W T, Zhang Y Y, Gao Z H, Song Z L, Qin P Y, Tian X. Identification and assessment of the factors driving vegetation degradation/regeneration in drylands using synthetic high spatiotemporal remote sensing data—a case study in Zhenglanqi, Inner Mongolia, China. Ecological Indicators, 2019, 107: 105614.
- [42] Zhang J T, Zhang Y Q, Qin S G, Wu B, Ding G D, Wu X Q, Gao Y, Zhu Y K. Carrying capacity for vegetation across Northern China drylands. Science of the Total Environment, 2020, 710: 136391.
- [43] Ge X D, Li Y G, Luloff A E, Dong K K, Xiao J. Effect of agricultural economic growth on sandy desertification in Horqin Sandy Land. Ecological Economics, 2015, 119: 53-63.