

DOI: 10.5846/stxb202209202694

刘欣, 查妮依, 王欣言, 王维奇, 王凯平, 张云路. 退耕还林(草)工程对中国北方农牧交错带生态系统健康的影响. 生态学报, 2023, 43(15): 6392-6405.

Liu X, Zha N Y, Wang X Y, Wang W Q, Wang K P, Zhang Y L. Study of the impacts of the Grain for Green Program on Ecosystem Health of the Agro-Pastoral Ecotone of North China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6392-6405.

退耕还林(草)工程对中国北方农牧交错带生态系统健康的影响

刘 欣, 查妮依, 王欣言, 王维奇, 王凯平, 张云路*

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要: 生态系统健康是生态环境治理的目标, 探究国家级生态修复项目退耕还林(草)工程对中国北方农牧交错带生态系统健康的影响, 确定合理的生态环境恢复和资源管理策略, 有助于加快生态环境建设、促进区域可持续发展。基于“压力-状态-响应”(PSR)模型, 构建起一套包括自然、社会和经济等方面的综合指标体系, 评估了 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年中国北方农牧交错带的生态系统健康水平, 利用 Moran's *I* 分析退耕还林(草)工程和区域生态系统健康的空间相关性, 并从普通最小二乘法、地理加权回归模型、时间加权回归模型和时空地理加权回归模型中, 选择最优回归模型, 揭示退耕还林还草实施强度变化(Δ NDVI)对生态系统健康变化(Δ EHI)的影响机制。结果表明:(1)2000—2015 年, 中国北方农牧交错带的生态系统健康指数呈现“先下降后上升”的变化趋势, 区域整体处于亚健康状态和一般健康状态, 健康状况逐渐转好。(2)全局双变量 Moran's *I* 结果显示, 在 2000—2010 年工程的开始和发展阶段, 退耕还林(草)工程对生态系统健康呈现正相关影响关系, 而 2010—2015 年间, 两者之间变为负相关关系。(3)多种回归模型相比较, GTWR 模型表现最优。在 2000—2010 年间, 退耕还林(草)工程对研究区域东北部生态系统健康变化具有显著正向影响, 在 2010—2015 年间, 该区域由正向驱动变为负向驱动; 中部地区则一直保持正向驱动; 西南部地区则呈现“负向驱动—正向驱动—负向驱动”的波动变化情况。

关键词: 生态系统健康; 退耕还林(草); 北方农牧交错带; 时空演变; 空间相关性; 时空地理加权回归

Study of the impacts of the Grain for Green Program on Ecosystem Health of the Agro-Pastoral Ecotone of North China

LIU Xin, ZHA Niyi, WANG Xinyan, WANG Weiqi, WANG Kaiping, ZHANG Yunlu*

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Ecosystem health is the goal of ecological environment management. An accurate and objective evaluation of ecosystem health is necessary to improve the regional ecological environment. As a semi-arid ecological transition area, the Agro-Pastoral Ecotone of North China connecting the agricultural region in the east with the pastoral area in the west, the ecological environment is sensitive and fragile due to the influence of human activities. Exploring the impact of the national ecological restoration project of the Grain-for-Green program on the ecosystem health of the Agro-Pastoral Ecotone of North China, determining the strategies of ecological restoration and resource management, it will contribute to promote regional sustainable development. Therefore, we built a comprehensive system, based on the "pressure-state-response" (PSR) model, including natural, social and economic aspects to assess the ecological health index of the Agro-Pastoral Ecotone of North China in 2000, 2005, 2010 and 2015. We used Moran's *I* to analysis the spatial correlation between the Grain-for-

基金项目: 国家林业局林业标准制修订项目(2022-LY-038)

收稿日期: 2022-09-20; 网络出版日期: 2022-12-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyunlu1986829@163.com

本研究尚缺中国港澳台统计数据。

Green program and the regional ecological health. The optimal regression model is selected from the ordinary least squares model (OLS), the geographically weighted regression model (GWR), the temporally weighted regression (TWR), the geographically and temporally weighted regression (GTWR), to reveal the influence of the Grain-for-Green program (Δ NDVI) on the change in ecological health (Δ EHI). The running result of optimization showed that: (1) from 2000 to 2015, the ecosystem health index of Agro-Pastoral Ecotone of North China shows a trend of "decreasing and then increasing", and the region is in subhealthy and general health, and the state of ecosystem health is gradually improving. (2) The results of the bivariate spatial autocorrelation analysis (the bivariate Moran's I) showed that the impact of the Grain-for-Green program on ecological health was positive correlation during the beginning and development stages of the project from 2000 to 2010, while from 2010 to 2015, the relationship of them became negative. (3) Compared with various spatial regression models, the geographically and temporally weighted regression (GTWR) models performed the best, with a significant positive spatial effect of the reforestation project on ecosystem health in the northeastern part of the study area between 2000 and 2010, with the most positive effect in the northeastern part of the study area, but a positive to negative effect in the central part of the study area between 2010 and 2015. In the central region, the positive effect was maintained, while the southwestern region showed a fluctuating pattern of "negative-positive-negative effect". The results of the study can provide a reference for the scientific promotion of ecosystem structure optimization and ecological civilization construction in the Agro-Pastoral Ecotone of North China.

Key Words: ecosystem health; the Grain-for-Green program; Agro-Pastoral Ecotone of North China; temporal and spatial evolution; spatial correlation; geographically and temporally weighted regression

生态系统健康是区域生态系统在外部干扰下,维持生态结构、功能和稳定性的一种自我调节和恢复能力,健康的生态系统对自然、社会和经济的可持续发展至关重要^[1-2]。在过去 50 年中,随着社会经济发展,人类活动对环境的干扰不断增强,造成全球至少三分之二的生态系统退化,使得生态问题越来越严重,威胁着人类的生存和发展^[3-4],如何实现区域生态系统健康可持续发展是当前人们广泛关注且亟待解决的问题^[5]。因此,运用合理的评估方法是有效识别区域生态系统健康状况、指导生态环境保护和管理的核心^[6]。目前,评价生态系统健康主要采用“活力-组织-弹性”(VOR)模型和“压力-状态-响应”(PSR)模型等评估框架。其中,VOR 模型注重对生态系统完整性的评价,忽略了人类活动对生态环境的影响;而 PSR 模型更侧重于自然环境与人类活动的相互作用,能够全面反映内部生态因子与外界人为因素的影响与干扰。因此,本次研究选用 PSR 模型,从自然生态和人类社会等方面对生态系统健康进行科学全面地评估^[7-8]。

当前,关于生态系统健康评价的研究主要是针对于城市群、流域、森林、草地等独立的生态系统,而很少关注不同生态系统之间的过渡区的生态健康问题^[9-10]。这种过渡区因受到相邻生态系统的相互作用,同时在人类活动的影响下,使其具有生物多样性丰富、生态系统易受影响、生态环境脆弱敏感等特质^[11-12]。中国北方农牧交错带作为牲畜放牧到农业发展的过渡地带,是我国重要的生态安全屏障带^[13]。但由于人们过度放牧、开垦耕地等活动,造成了北方农牧交错带林地退化、土壤沙化、风沙天气骤增等生态恶化问题^[14-15]。为了应对北方农牧交错带的生态可持续发展,21 世纪以来,政府大力投资生态恢复项目,开展了以退耕还林(草)工程为主的生态修复工作^[16],退耕还林(草)工程被认为是预防和处理区域环境问题最有效的措施之一^[17]。因此,探究退耕还林(草)人为生态修复工程对北方农牧交错带生态系统健康的影响机制,对指导我国生态环境治理有着至关重要的意义。

以中国北方农牧交错带为研究对象,选择 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年作为时间点,根据区域特征选取指标因子,构建起符合中国北方农牧交错带的 PSR 评估模型,分析生态系统健康的时空动态演变特征。并选择最优回归模型以探索二者之间的空间关系,揭示退耕还林(草)对北方农牧交错带生态系统健康发展的影响机制。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

中国北方农牧交错带是我国传统农业区域与畜牧业区域相交汇合的过渡地带。研究参考中国农业农村部于 2017 年发布的《农业部关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见》^[18], 选择内蒙古、辽宁、河北、山西、陕西、甘肃、宁夏共 7 个省(自治区)的 146 个县(市)作为研究区域(图 1), 其地处东经 102°55′—123°28′, 北纬 34°35′—45°30′, 总面积为 813459.06km², 海拔高程在 160—4973m 之间。区域属于温带大陆性气候区, 年平均降水量为 300—450mm, 是我国中东部地区重要的水源涵养带和生态安全屏障。

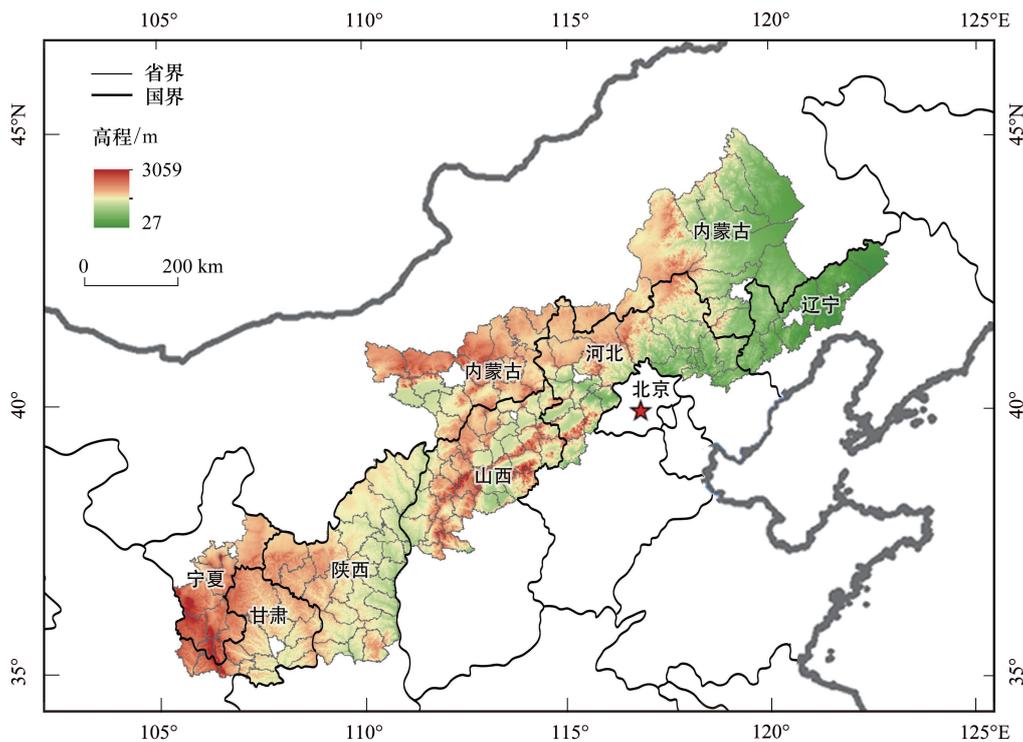


图 1 研究区域区位图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 数据来源

本次研究数据包括 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年研究区域的土地利用数据、归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、植被净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 遥感数据、夜间灯光数据、年降水量数据、气温数据、人口空间插值数据和国内生产总值数据, 均来源于中国科学资源环境数据云平台 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>), 土壤含水量数据、地表蒸散量数据来源于地球大数据工程的数据共享服务系统 (<https://data.casearth.cn/>)。具体数据的类型、分辨率及来源见表 1。其中, 将土地利用数据二级地类重分类为林地、耕地、草地、水域、建设用地和未利用地共 6 个类型。粮食单产数据来源于 2000—2015 年各个省份统计年鉴, 粮食价格数据来源于 2015 年《中国农产品价格调查年鉴》等资料。对所有数据采用大小一致的网格全面覆盖研究区域, 将网格尺度设定为 5km×5km。

2 研究方法

2.1 基于 PSR 模型的生态系统健康评估

以北方农牧交错带的区域特征建立“压力-状态-响应”模型 (Pressure-State-Response, PSR)。压力指人类

为满足粮食生产、经济生产、生态保护等需求而对土地生态系统的胁迫,生态系统健康面临的压力来自生态系统内部自然因素和外部人类活动因素,选取代表自然环境压力与人为发展压力的降水量、气温、人口密度、GDP 和夜间灯光指数 5 个指标来构建压力准则层面;状态反映了环境要素的变化和环境政策的目的,主要包括自然环境状况和生态系统状况^[19]。结合 VOR 模型,从生态系统结构和功能等多个角度选取 NPP、Shannon 多样性指数、蔓延度、斑块凝聚度、生态弹性度来评估生态系统的状态^[20],并将生态系统服务价值纳入状态层面^[11],以反映生态系统的完整性与功能性;响应指生态环境为了应对人类生存发展而产生的负面影响,根据指标的可获取性和可比性原则,选取景观破碎化指数和代表农牧地区特色的蒸散量、土壤含水量等指标对生态系统响应进行描述^[21]。具体指标计算见表 2。

表 1 数据来源和描述

Table 1 Data sources and descriptions

数据 Data	来源 Source	空间分辨率 Resolution
土地利用遥感监测数据 Land use remote sensing monitoring data	以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源。	1km×1km
植被覆盖指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大值合成法生成的年度植被指数数据集。	1km×1km
年平均气温 Mean annual temperature	基于 MODIS 地表温度数据 LST 每 8 天 1km 的温度 LST 数据。	1km×1km
土壤含水量 Soil moisture content	表征土壤干旱的指标,直接反映作物可利用水分状况。	1km×1km
年平均降水量 Mean annual precipitation	为中国陆地年降水频率模型的最优分布和及其参数集。	0.25°
地表蒸散量 Surface evapotranspiration	数据进行三维坐标旋转、WPL 校正等通量质量控制。	1km×1km
植被净初级生产力 Net primary productivity (NPP)	基于光能利用率模型 GLO_PEM 计算获取。	1km×1km
夜间灯光指数 Night light index	以各年份的 DMSP/OLS 和 NPP-VIIRS 卫星夜光遥感影像数据,处理生成的逐年度夜间灯光亮度数据。	1km×1km
人口密度 Population density	在全国分县人口统计数据的基础上,通过空间化制备的人口分布格网数据。	1km×1km
国内生产总值 Gross domestic product (GDP)	在全国分县 GDP 统计数据的基础上,通过空间插值生成的空间格网数据。	1km×1km

表 2 指标数学模型计算

Table 2 Mathematical model calculation of indicators

指标 Index	数学模型 Mathematical models	说明 Description
Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index (SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)$	式中, p_i 为景观类型 i 所占面积的比例, m 为景观类型的数目。
斑块凝聚度指数 Patch cohesion index (COHESION)	$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^m p_{ij}}{\sum_{j=1}^m p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} \times 100$	式中, a_{ij} 指第 i 类景观中 j 个斑块的面积 (m^2); p_{ij} 代表第 i 类景观中第 j 个斑块的周长 (m); A 为该景观的总面积 (hm^2)。
蔓延度指数 Contagion index (CONTAG)	$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[(p_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \left[\ln(p_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] \quad (100)$	式中, p_i 为类型斑块所占的面积百分比; g_{ik} 为 i 类型斑块和 k 类型斑块毗邻的数目; m 景观中的斑块类型总数目。

续表

指标 Index	数学模型 Mathematical models	说明 Description
生态弹性指数 Ecological resilience	$ER = \sum_{i=1}^m S_i P_i$	式中, ER 为生态弹性度; i 为第 i 个土地利用覆盖类型; S_i 为土地利用类型 i 的面积; P_i 为第 i 种生态系统弹性系数。参考相关研究 ^[16] , 得到各土地类型的生态系统弹性系数(表 3)。
生态系统服务价值 Ecosystem service value (ESV)	$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \times P_i$	式中, ESV 为单位生态系统服务价值总量; A_i 为土地利用类型 i 的面积; P_i 为土地利用类型 i 的单位面积生态系统服务价值。研究采用谢高地等 ^[22] 制定的生态系统服务价值当量表, 查询 2000—2015 年各个省份(自治区)的统计年鉴, 计算得到研究区域的生态系统单位面积价值量表(表 4)。
景观破碎度指数 Landscape fragmentation index	$C_i = \frac{N_i}{A_i}$	式中, C_i 为景观 i 的破碎度; N_i 为景观 i 的斑块数; A_i 为景观 i 的总面积。

表 3 不同土地利用类型的生态系统弹性系数

Table 3 Ecosystem elasticity coefficient of different land use types

用地类型 Land use types	耕地 Arable land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
弹性系数 Modulus of elasticity	0.40	0.85	0.75	0.80	0.20	0.10

表 4 中国北方农牧交错带生态系统单位面积价值量表

Table 4 Scale of ecosystem value per unit area of the Agro-Pastoral Ecotone of North China

生态系统服务/(元/hm ²) Ecosystem services	耕地 Arable land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
总价值 The total value	58631.92	1893.48	8768.58	5694.62	41954.15	0.00

针对不同性质划分正向影响指标和负向影响指标, 进行标准化处理。

正向指标:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}$$

负向指标:

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}$$

式中, 选取 n 个区域, m 个指标, 则第 i 个区域的第 j 个指标的数值 ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。

利用熵值法计算各项指标权重, 避免指标选择和权重确定过于主观的问题^[23]。

$$w_j = \frac{1 + k \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \ln \left(\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \right)}{\sum_{j=1}^m d_j}$$

式中, ($i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$) $k = 1/\ln(n) > 0$, 满足 $e_j \geq 0$ 。

最终, 构建起中国北方农牧交错带的生态系统健康评价体系(表 5)。

表 5 中国北方农牧交错带的生态系统健康评价体系

Table 5 Ecosystem health assessment system of the Agro-Pastoral Ecotone of North China

准则层 Rule layer	子准则层 Sub-criterion layer	指标层 Index layer	正向或负向 Positive or negative	权重 Weight	
压力 Pressure	气象	降水量	正向	0.0793	
		气温	正向	0.0506	
	城市化	人口密度	负向	0.1120	
		GDP	负向	0.0730	
		夜间灯光指数	负向	0.0935	
状态 State	活力	植被净初级生产力(NPP)	正向	0.0506	
		组织	Shannon 多样性指数(SHDI)	正向	0.0487
	弹性	蔓延度指数(CONTAG)	正向	0.0496	
		斑块凝聚度指数(COHESION)	正向	0.1289	
		生态弹性度指数	正向	0.0741	
		功能	生态系统服务价值(ESV)	正向	0.0485
		响应 Response	生态环境	景观破碎度指数	负向
		蒸散量	正向	0.0634	
		土壤含水量	正向	0.0517	

计算生态系统健康指数(EHI)。目前,关于生态系统健康评价的等级划分尚且没有统一的标准,为了更精确地表示生态系统健康状况,本文参考相关文献研究^[24-26],将其平均分为 5 个等级,范围从 0 到 1,间隔为 0.2(表 6)。EHI 模型的公式如下:

$$EHI = \sum_{i=1}^n w_i \times b_{ij}$$

式中,EHI 反映生态系统健康指数, $i \in [1, n]$; i 为第 i 个评价指标; w_i 为第 i 个指示符的权重; b_{ij} 为第 i 个指示符的归一化值。

表 6 中国北方农牧交错带生态系统健康评估标准

Table 6 Assessment criteria for ecosystem health of the Agro-Pastoral Ecotone of North China

综合指数值 Composite index value	0.8—1.0	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	<0.2
标准 Standard	非常健康	一般健康	亚健康	一般不健康	严重不健康

2.2 退耕还林(草)工程量化

退耕还林(草)工程不单是将耕地和荒地等用地转化成林地和草地,还包括封山育林、林草抚育等进一步增加林草植被覆盖度的工作。因此,仅仅用土地利用变化不能全面地反映工程的进度和强度。为了更准确地量化退耕还林(草)工程对区域生态系统健康的影响,本研究将用 $\Delta NDVI$ 来量化退耕还林(草)的实施强度变化,直观分析工程的实施与变化情况。

2.3 退耕还林(草)工程对生态系统健康的影响

2.3.1 双变量空间自相关分析

空间自相关分析是准确识别不同变量数据在同一个分布区内存在相互依赖性的核心方法^[27]。本研究采用 Global Moran's I 对退耕还林(草)和生态系统健康的空间关联模式进行度量和检验。Moran's $I > 0$ 表示存在空间正相关性,其值越大,空间相关性越明显;Moran's $I < 0$ 表示存在空间负相关性,其值越小,空间差异越大。计算公式如下:

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

式中, I 为全局 Moran's I 指数; n 为空间单元的数量; x_i 、 x_j 分别为单元 i 和单元 j 的观测值; W_{ij} 为空间单元 i 和 j 的空间权重邻接矩阵 ($ij = 1, 2, 3, \dots, n$)。

2.3.2 空间回归分析

明确二者之间的空间关系后, 鉴于需要更好地了解两者之间存在的时空异质性, 引入回归模型来探索北方农牧交错带退耕还林(草)工程对生态系统健康的影响机制^[1,23]。研究将最小二乘法 (Ordinary Least Squares, OLS)、地理加权回归模型 (Geographically Weighted Regression, GWR)、时间加权回归模型 (Temporally Weighted Regression, TWR)、时空地理加权回归模型 (Geographically and Temporally Weighted Regression, GTWR) 分别进行回归分析, 对比回归结果, 选择最优模型。具体计算法见表 7。

表 7 空间回归分析方法

Table 7 Analysis of the spatial regression model

模型 Model	计算公式 Formula to calculate	说明 Description
普通最小二乘法 Ordinary least squares (OLS)	$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon_i$	式中, y_i 为因变量, X_1 到 X_n 为解释变量; β 为回归系数, 表示对应的解释变量与因变量之间关联强度和类型; ε_i 为随机误差项。
地理加权回归 Geographically weighted regression (GWR)	$y_i = \beta(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^n \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i$	式中, $\beta(u_i, v_i)$ 是 (u_i, v_i) 空间位置的地理加权回归截距, $\beta_j(u_i, v_i)$ 是 k 项自变量(驱动因子)在 (u_i, v_i) 空间位置的加权回归系数。
时间加权回归 Temporally weighted regression (TWR)	$y_i = \beta_0(t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(t_i) x_{ij} + \varepsilon_i$ $\beta(t_i) = (X^T W(t_i) X)^{-1} X^T W(t_i) y$	式中, t_i 表示样本 i 的时间坐标 $W(t_i)$ 是一个 $n \times n$ 的时间权重矩阵, 其对角线元素是根据核函数计算的。
时空地理加权回归 Geographically and temporally weighted regression (GTWR)	$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^d \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i$	式中, y_i 为在观测点 (u_i, v_i, t_i) 处因变量 y 和因变量 X_1 到 X_n 的观测值, $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 i 个观测点 (u_i, v_i, t_i) 处的未知参数, ε_i 为独立同分布的误差项。

3 结果

3.1 中国北方农牧交错带退耕还林(草)的时空变化

中国北方农牧交错带 2000—2015 年的退耕还林(草)工程实施强度变化情况表明(图 2), 2000—2005 年间, 工程初始阶段, 高强度退耕还林(草)实施区域集中于东北部, 建设强度远高于其他地区; 2005—2010 年间, 退耕还林(草)工程实施力度较大区域集中在西南部, 东北部地区则呈现减弱趋势; 2010—2015 年间, 全区退耕造林还草强度大范围下降, 东北部则显著上升。

3.2 中国北方农牧交错带生态系统健康的时空变化

根据 PSR 模型计算出中国北方农牧交错带 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年生态系统健康指数为 0.594、0.592、0.596 和 0.605(图 3)。总体来看, 2000—2015 年间, 研究区域生态系统健康指数呈现“先下降后上升”的变化趋势, 健康状况逐渐转好。观察各标准层的计算结果, 在研究时段内, 压力指数和状态指数均先下降后逐渐上升。压力指数先下降直至 2005 年开始快速上升; 状态指数在 2010 年缓慢上升至原始数值; 响应指数呈现先上升至 2010 年后下降的趋势变化。

由 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年各等级生态系统健康水平的面积占比可知(图 4), 在研究时段内, 中国北方农牧交错带主要由亚健康水平地区和一般健康水平地区分布构成。亚健康状态面积占比先上升至 61% 后逐渐下降至 45%, 说明处于生态环境恶劣地区逐渐减少; 一般健康状态区域占比先稍有下降后大幅度上涨, 直至 2015 年增长至占比 55%, 生态恢复逐渐向有序方向发展。

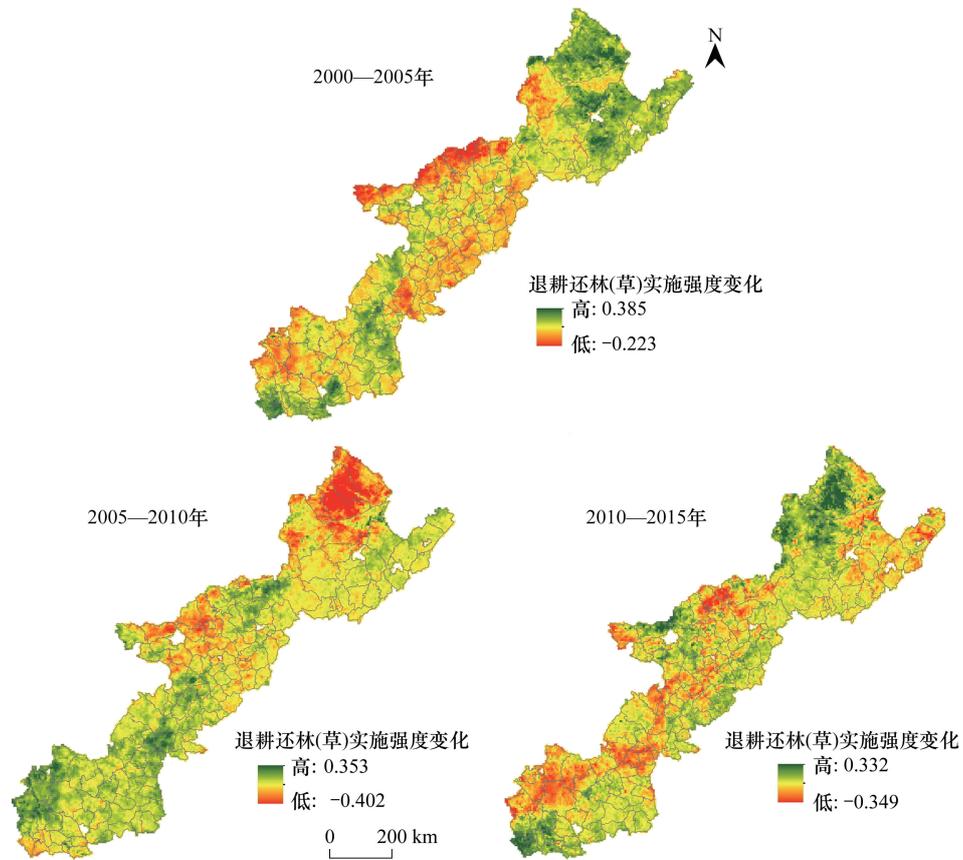


图 2 2000—2015 年中国北方农牧交错带退耕还林(草)实施强度变化图

Fig.2 The implementation of strength of the Grain for Green Program in the Agro-Pastoral Ecotone of North China from 2000 to 2015

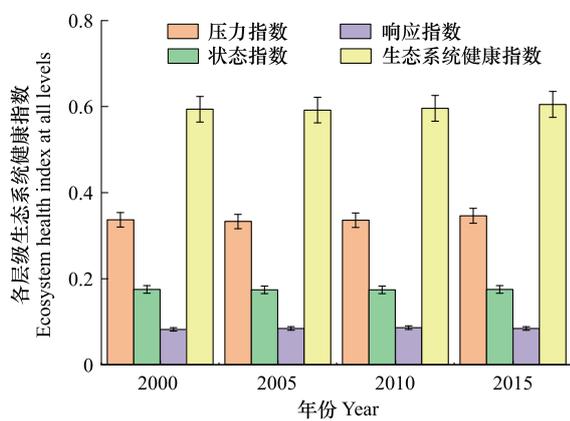


图 3 2000—2015 年中国北方农牧交错带生态系统健康评价图
Fig.3 Ecosystem health assessment of the Agro-Pastoral Ecotone of North China from 2000 to 2015

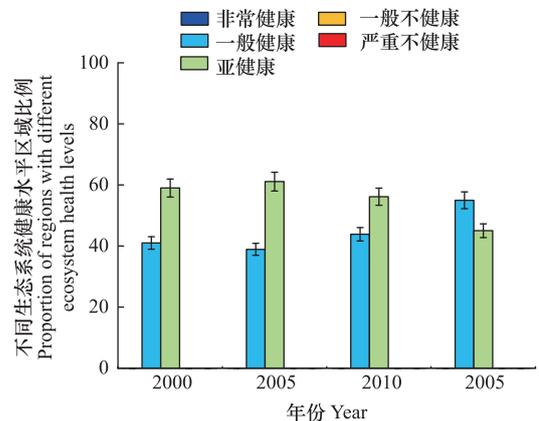


图 4 2000—2015 年中国北方农牧交错带不同生态系统健康水平区域比例图
Fig.4 Proportion of regions with different ecosystem health levels of the Agro-Pastoral Ecotone of North China from 2000 to 2015

中国北方农牧交错带 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年生态系统健康水平空间分布如图(图 5)。2000 年,研究区域北部大范围为亚健康状态,南部部分区域的生态系统健康水平较高,处于一般健康状态;2005 年,东北部部分地区提升至一般健康状态;2010 年,中部与东北部过渡区域生态系统健康水平得到明显提升;

2015 年,中部和东北部等区域大面积转变为一般健康状态,生态系统趋于稳定。

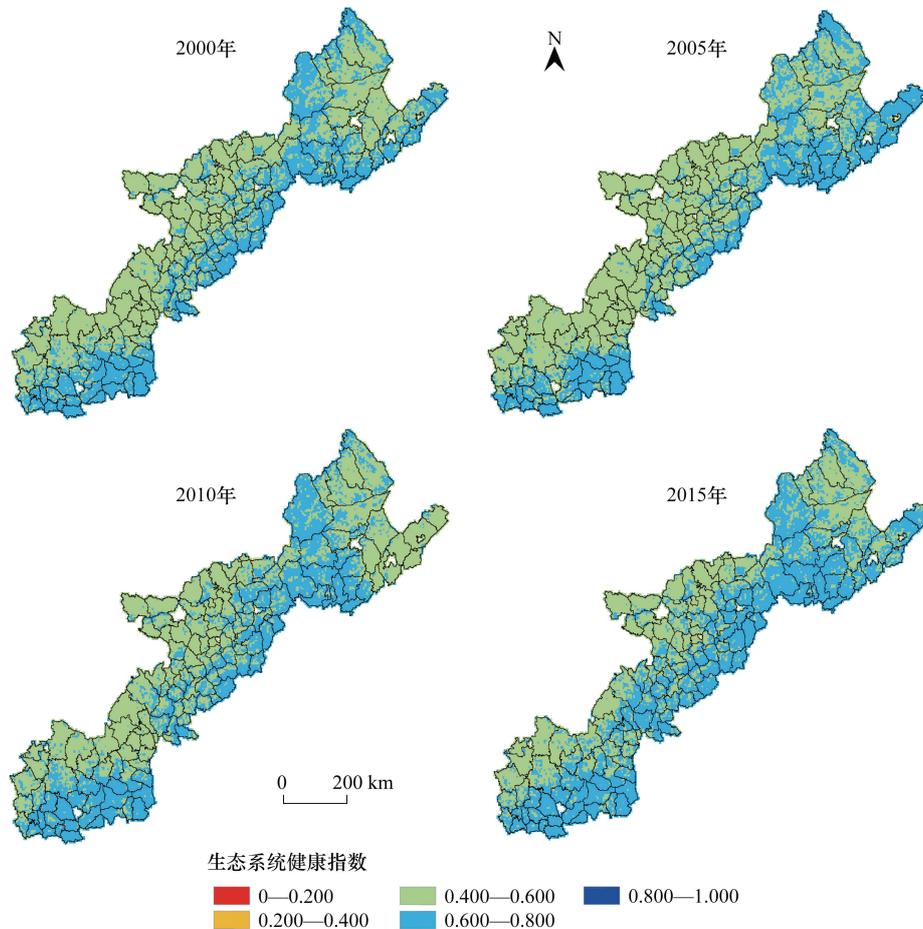


图 5 2000—2015 年中国北方农牧交错带生态系统健康水平时空分布图

Fig.5 Spatial and temporal distribution map of ecosystem health level of the Agro-Pastoral Ecotone of North China from 2000 to 2015

如图 6 所示,中国北方农牧交错带 2000—2015 年生态系统健康变化情况。结果表明,2000—2005 年间,生态系统健康水平正向变化区域集中在东北部,此处生态环境质量逐渐增强;2005—2010 年间,研究区域西南部和中部地区的生态系统健康得到了明显改善,东北部则出现明显的生态退化趋势,衰退为亚健康状态;2010—2015 年间,中部和东北部地区生态系统健康水平得到了显著提高,东北部健康水平提升情况尤为突出。与此同时,其他区域的生态系统健康水平面临大范围下降且恶化程度加剧的困难。

3.3 退耕还林(草)与中国北方农牧交错带生态系统健康的相关性分析

退耕还林(草)工程实施强度变化与生态系统健康变化的全局双变量 Moran's I 分析结果见表 8。为了测试 Moran's I 结果是否显著,使用 Geoda 软件中蒙特卡洛模拟了 999 次置换结果测试,所有结果均通过了 0.001 的显著性检验,表明结果存在 99.9% 的置信度。Moran's I 指数在研究期间由正值转为负值,说明两者之间的空间正相关效应逐渐减弱,并转化为负相关关系。2000—2005 年和 2005—2010 年, Moran's I 指数分别为 0.1496、0.2915,说明在工程初始和发展阶段,两者之间存在明显的空间正相关关系,且在工程实施的 10 年内相关性增强,说明生态造林效果显著,明显改善了区域生态系统健康水平;然而 2010—2015 年间,这种相关性逐渐消失, Moran's I 指数降低变为 -0.0352,这表明北方农牧交错带生态系统健康水平的提升,不单单是退耕还林(草)工程的实施导致的,同时政府还通过其他手段改善了研究区域的生态状况。

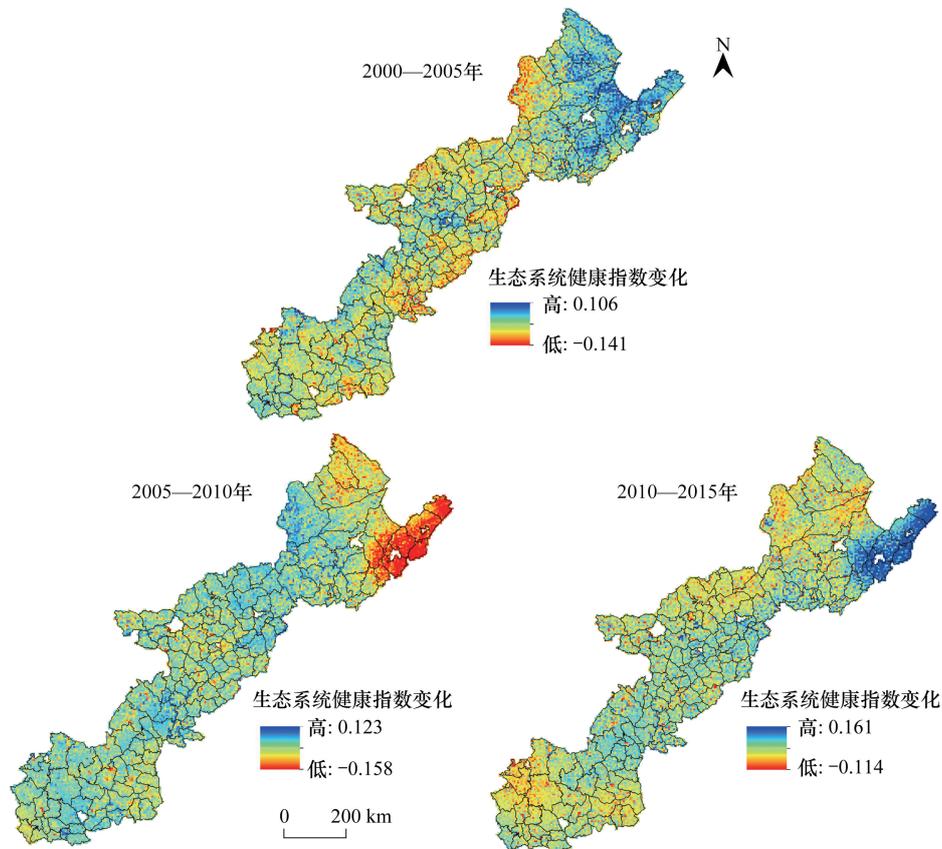


图6 2000—2015年中国北方农牧交错带生态系统健康变化图

Fig.6 Variation map of ecosystem health level of the Agro-Pastoral Ecotone of North China from 2000 to 2015

3.4 退耕还林(草)对中国北方农牧交错带生态系统健康的时空影响机制

3.4.1 空间回归模型比较

为了进一步探索北方农牧交错带退耕还林(草)与生态系统健康之间存在的时空影响机制,需要利用回归模型对二者之间的关系进行空间估计和验证。因此,选择哪种回归模型来更好地拟合数据是一个问题。通过对OLS、TWR、GWR和GTWR四种模型的运行结果进行比较(表9)。与其他三种模型相比,GTWR的AICc值相比最小,调整过后的 R^2 值最大,拟合度最好。因此,在本研究将采用GTWR模型解释退耕还林(草)与生态系统健康之间的时空影响关系。

3.4.2 退耕还林(草)对生态系统健康的时空分布影响

GTWR模型回归结果如图7所示,在空间分布上,2000—2015年间,随着退耕还林(草)工程的开展,北方农牧交错带的生态系统健康变化具有很强的空间异质性,正向影响空间和负向影响空间并存分布,说明各地区工程实施力度和持续时间的差异性较大。2000—2005年工程实施初期,GTWR拟合的回归系数在-0.1603—1.4193之间,退耕还林(草)对研究区域东北部具有显著的正向空间影响,特别是对内蒙古、河北和辽宁三省交汇处的正向驱动作用最大。对西南部的负向驱动作用较大,二者之间呈负相关关系;2005—2010年工程加速发展阶段,回归系数在0.0345—0.6421之间,工程的实施与生态系统健康在整体区域上呈正相关关系,对辽宁省的正向作用依旧最强;2010—2015年间,回归系数在-0.7076—0.4255之间,负向驱动作用空

表8 2000—2015年中国北方农牧交错带退耕还林(草)与生态系统健康的全局双变量Moran's I结果

Table 8 Global bivariate Moran's I of GGP and ecosystem health of the Agro-Pastoral Ecotone of North China from 2000 to 2015

年份 Year	2000—2005	2005—2010	2010—2015
Moran's I	0.1496	0.2915	-0.0352
P	0.0010	0.0010	0.0010
Z	3.7067	6.9287	4.2674

间大面积分布于整个研究区域,只有中部的山西、内蒙古和西南部的甘肃、宁夏等部分地区存在小范围正向影响。

表 9 2000—2015 年中国北方农牧交错带退耕还林(草)与生态系统健康的回归模型比较结果

Table 9 Results of regression models comparing GGP and ecosystem health of the Agro-Pastoral Ecotone of North China from 2000 to 2015

回归模型 Regression model	解释变量 Explanatory variable	退耕还林(草)实施强度变化 Variation of implementation intensity of the Grain-for-Green(Δ NDVI)		
	被解释变量 Explained variable	生态系统健康指数变化 Variation of ecosystem health index(Δ EHI)		
	AICc	R^2	R^2_{adj}	
OLS	-1307.55	0.0492	—	
TWR	-1328.65	0.1152	0.1131	
GWR	-1324.34	0.1398	0.1378	
GTWR	-1437.40	0.3843	0.3829	

Δ NDVI:归一化差异植被指数的变化量 Variation of normalized difference vegetation index; Δ EHI:生态系统健康指数变化量 Variation of Ecosystem Health Index; AICc:校正 Akaike 信息准则 Akaike Information Criterion corrected; R^2 :决定系数 Coefficient of Determination; R^2_{adj} :调整后的 R^2 Adjust R^2

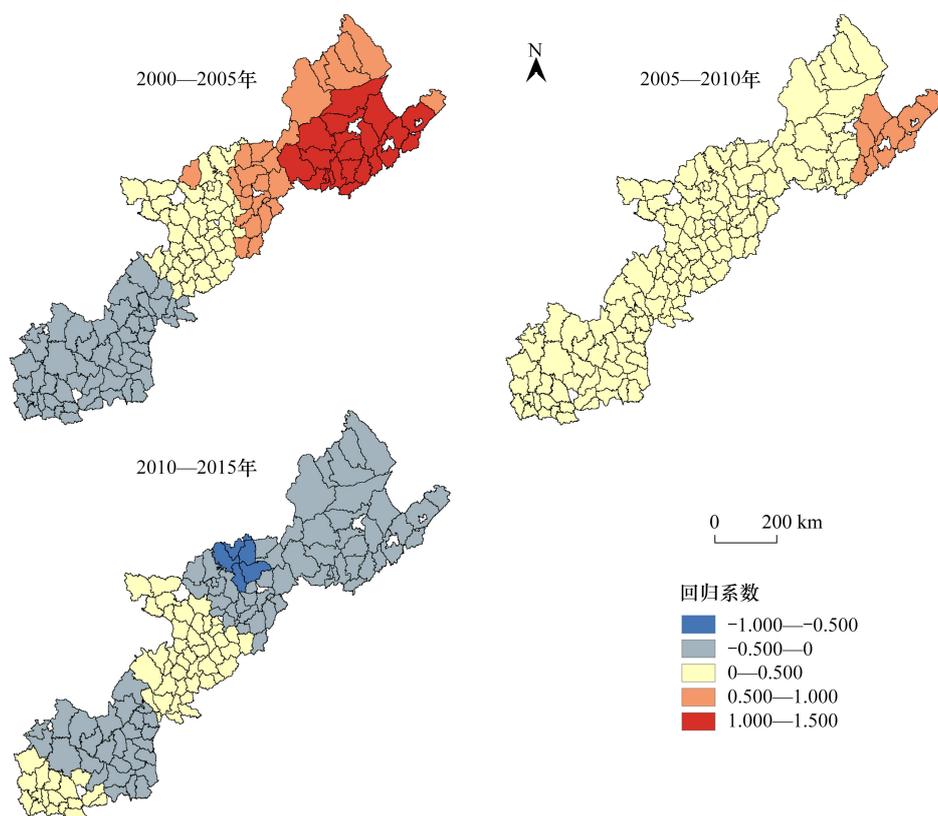


图 7 2000—2015 年中国北方农牧交错带 GTWR 模型回归结果显示图

Fig.7 Regression results of GTWR in the Agro-Pastoral Ecotone of North China from 2000 to 2015

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 中国北方农牧交错带的生态系统健康评价

生态系统健康评估包括对于生态系统健康自身机制和生态系统对外部干扰做出的反应等两方面诊断,人

为因素和自然因素都会影响区域生态系统健康状况^[28]。中国北方农牧交错带是一个涵盖“生态—社会—经济”的复合性系统,拥有波段过渡性和区域不稳定性农牧地区特点,这决定着生态系统结构、状态和功能将被人类活动所影响。PSR 模型反映的是人类活动和自然系统之间的相互作用,强调人类系统是生态系统的重要组成部分。因此,本研究采用 PSR 模型评价北方农牧交错带的生态系统健康水平。但研究对于量化生态系统属性的相应指标并没有采用以往的固定模式,而是以研究区域的生态系统特性为导向进行选择的^[29]。所以,本次指标体系是基于区域生态系统典型特征,增加了蒸散量、土壤含水量、NPP 等表示农牧区域生态系统健康状况的指标,并将生态系统服务价值也纳入体系,从自然生态和人类社会等全方面、科学地对生态系统健康进行评估,构建了适合农牧地区的评价体系。评价结果表明,在退耕还林(草)工程的影响下,2000—2015 年间,研究区域生态系统健康指数呈现“先下降后上升”的变化趋势,全区已有超过一半地区处于一般健康状态,健康水平向好发展。Liu 等^[30]学者评估 2000—2018 年中国北方农牧交错带的 ESV 变化情况,发现在退耕还林(草)植被重建项目影响下,区域 ESV 总值增加,对生态系统状态与功能产生了正向变化,使得生态系统整体效益处于上升态势。这与本研究得到的 2000—2015 年期间生态系统健康指数上升结果相近。

(2) 退耕还林(草)对生态系统健康的影响机制

确定退耕还林(草)工程对中国北方农牧交错带区域生态系统健康的影响机制,对于科学制定与实施生态修复政策、实现区域可持续发展是非常重要的。大部分学者都只选择一种回归模型探索生态系统健康与各类因素的关系^[31—33],然而每个区域生态系统的基本特征并不相同,生态系统的结构和功能在不同时空尺度下也存在差异^[34]。因此,通过多种模型比较,选择体现时空尺度变化的回归模型,对于准确探寻两者之间的关系至关重要。相对比以往定性选择回归模型的方式,本次研究通过定量对比 OSL、GWR、TWR 和 GTWR 四种模型的带宽、拟合度后,选定最优的 GTWR 模型,该方法可以更准确地探索两者的响应关系。GTWR 分析结果表明,2000—2015 年间,随着退耕还林(草)工程的推进,使得北方农牧交错带各时段内生态系统健康变化各呈现不同的影响机制,具有很强的空间异质性,各地区工程实施力度和持续时间的差异性较大。2000—2010 年间,工程实施初期和中期,退耕还林(草)对研究区域东北部生态系统健康水平具有显著的正向空间影响,这与 Wang 等人^[35]发现退耕还林(草)工程显著增强了北方农牧交错带的生态系统健康水平的研究结果一致。2010—2015 年间,东北部区域由正向驱动变为负向驱动;中部地区则一直保持正向驱动作用;西南地区呈现“负向驱动—正向驱动—负向驱动”的波动趋势。Han 等^[36]学者在利用线性回归探讨退耕还林工程对长江流域上游生态系统健康的影响中,发现在 2000—2005 年,生态系统健康的变化与退耕还林的恢复林地面面积变化呈现显著正相关关系,而在 2005—2015 年,二者之间未显示出明显相关性。这表明在工程实施初期退耕还林还草明显改善了区域生态系统健康状况,而实施中后期整体健康水平的增长意味着不仅通过植树造林,同时也通过其他方式改善了区域生态环境。这与本研究得到二者之间影响关系的时间演变特征相吻合,在退耕还林(草)的不同阶段采取的不同措施都有效地增强了区域生态系统健康。但在工程的后期阶段,相比纯粹为了改善生态条件而退耕植树造林,更注重区域植被生长,提升生态环境质量^[37]。

4.2 结论

本研究采用了反映人类社会压力和自然环境状态的 PSR 模型,并以此为基础进行了农牧地区指标特色修正,以 Δ NDVI 量化退耕还林(草)工程实施情况,探究中国北方农牧交错带生态系统健康的时空变化及二者之间的影响机制。研究结果显示:

(1) 在退耕还林(草)方面,2000—2015 年间,研究区域退耕还林(草)实施力度整体上有所增强。东北部“先减弱后增强”的变化趋势最为显著,中部地区实施强度持续加大,西南部呈现“先增强后减弱”的波动趋势。

(2) 在生态系统健康方面,2000—2015 年的时间变化上,研究区域生态系统健康指数呈现“先下降后上升”的变化趋势,健康程度逐渐转好。在空间分布上,研究区域整体一直处于亚健康状态和一般健康状态,直至 2015 年,一般健康状态区域占总面积的 55%,生态恢复逐渐向有序方向发展。

(3) 双变量空间自相关分析结果显示,在 2000—2010 年间,退耕还林(草)工程对生态系统健康影响呈现正相关关系,而 2010—2015 年间,两者之间变为负相关关系。分析具体的空间影响机制,通过多种回归模型相比较,GTWR 模型表现最优,可满足长时间阶段性的空间分析需求。分析 GTWR 模型拟合结果发现退耕还林(草)的实施强度对北方农牧交错带的生态系统健康变化具有很强的空间异质性。2000—2005 年间,退耕还林(草)对研究区域东北部具有显著的正向空间影响,对西南部的生态系统健康呈负向驱动作用;2005—2010 年间,东北部的正向影响依旧最突出;2010—2015 年间,东北部和西南部均转变为负向驱动影响,只有中部和西南部的部分地区存在正向驱动效果最大。侧面表明北方农牧交错带退耕还林(草)工程是以逐步分区的方式进行的,不同省份地区会因自然因素和人为因素的差异而导致工程实施力度和效果有所区别。

参考文献(References):

- [1] He J H, Pan Z Z, Liu D F, Guo X N. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China. *The Science of the Total Environment*, 2019, 673(7): 553-564.
- [2] Wei W, Nan S X, Liu C F, Xie B B, Zhou J J, Liu C Y. Assessment of spatio-temporal changes for ecosystem health: a case study of Hexi Corridor, northwest China. *Environmental Management*, 2022, 70(1): 146-163.
- [3] Bongaarts J. IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Population and Development Review*, 2019, 45(3): 680-681.
- [4] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, Sun X F, Connor J D, Crossman N D, Stafford-Smith M, Wu J G, He C Y, Yu D Y, Liu Z F, Li A, Huang Q X, Ren H, Deng X Z, Zheng H, Niu J M, Han G D, Hou X Y. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [5] Li W J, Xie S Y, Wang Y, Huang J, Cheng X. Effects of urban expansion on ecosystem health in Southwest China from a multi-perspective analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 294(6141): 126341.
- [6] Li W J, Wang Y, Xie S Y, Cheng X. Spatiotemporal evolution scenarios and the coupling analysis of ecosystem health with land use change in Southwest China. *Ecological Engineering*, 2022, 179: 106607.
- [7] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [8] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 174-182.
- [9] Yang X M, Chen H Q, Gong Y S, Zheng X H, Fan M S, Kuzyakov Y. Nitrous oxide emissions from an agro-pastoral ecotone of Northern China depending on land uses. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 213: 241-251.
- [10] Laurance W F, Didham R K, Power M E. Ecological boundaries: a search for synthesis. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, 16(2): 70-71.
- [11] Yang Y J, Wang K, Liu D, Zhao X Q, Fan J W. Effects of land-use conversions on the ecosystem services in the agro-pastoral ecotone of Northern China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119360.
- [12] Wu Z H, Lei S G, He B J, Bian Z F, Wang Y H, Lu Q Q, Peng S G, Duo L H. Assessment of landscape ecological health: a case study of a mining city in a semi-arid steppe. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(5): 752.
- [13] 郭泽呈, 魏伟, 石培基, 周亮, 王旭峰, 李振亚, 庞素菲, 颀斌斌. 中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局. *地理学报*, 2020, 75(9): 1948-1965.
- [14] Liu Z F, Ding M H, He C Y, Li J W, Wu J G. The impairment of environmental sustainability due to rapid urbanization in the dryland region of Northern China. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 187: 165-180.
- [15] Yang Y J, Wang K, Liu D, Zhao X Q, Fan J W, Li J S, Zhai X J, Zhang C, Zhan R Y. Spatiotemporal variation characteristics of ecosystem service losses in the agro-pastoral ecotone of Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7): 1199.
- [16] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [17] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, Sun X F, Connor J D, Crossman N D, Stafford-Smith M, Wu J G, He C Y, Yu D Y, Liu Z F, Li A, Huang Q X, Ren H, Deng X Z, Zheng H, Niu J M, Han G D, Hou X Y. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [18] 中华人民共和国农业农村部. 关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见, 2017.
- [19] Sun R, Yao P P, Wang W, Yue B, Liu G. Assessment of wetland ecosystem health in the Yangtze and Amazon River Basins. *International Journal*

- of Geo-Information, 2017, 6(3): 81.
- [20] 袁毛宁, 刘焱序, 王曼, 田璐, 彭建. 基于“活力—组织力—恢复力—贡献力”框架的广州市生态系统健康评估. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1249-1257.
- [21] 徐菲, 王永刚, 张楠, 王旭, 范清. 北京市白河和潮河流域生态健康评价. 生态学报, 2017, 37(3): 932-942.
- [22] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.
- [23] Ge F J, Tang G L, Zhong M X, Zhang Y, Xiao J, Li J F, Ge F Y. Assessment of ecosystem health and its key determinants in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(2): 771.
- [24] Sun B D, Tang J C, Yu D H, Song Z W, Wang P G. Ecosystem health assessment: a PSR analysis combining AHP and FCE methods for Jiaozhou Bay, China. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 168(2): 41-50.
- [25] Yang W C, Xu K, Lian J J, Bin L L, Ma C. Multiple flood vulnerability assessment approach based on fuzzy comprehensive evaluation method and coordinated development degree model. *Journal of Environmental Management*, 2018, 213: 440-450.
- [26] 牛明香, 王俊, 徐宾铎. 基于 PSR 的黄河河口区生态系统健康评价. 生态学报, 2017, 37(3): 943-952.
- [27] Shaikh S F E A, 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(12): 107992.
- [28] Das M, Das A, Pereira P, Mandal A. Exploring the spatio-temporal dynamics of ecosystem health: a study on a rapidly urbanizing metropolitan area of Lower Gangetic Plain, India. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107584.
- [29] Li H L, Jian P, Liu Y X, Hu Y N. Urbanization impact on landscape patterns in Beijing City, China: a spatial heterogeneity perspective. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 50-60.
- [30] Liu M Z, Jia Y G, Zhao J J, Shen Y J, Pei H W, Zhang H J, Li Y L. Revegetation Projects significantly improved ecosystem service values in the agro-pastoral ecotone of Northern China in recent 20 years. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147756.
- [31] Yang Y J, Wang K, Liu D, Zhao X Q, Fan J W, Li J S, Zhai X J, Zhang C, Zhan R Y. Spatiotemporal variation characteristics of ecosystem service losses in the agro-pastoral ecotone of Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7): 1199.
- [32] 陈万旭, 卞娇娇, 钟明星, 曾杰, 梁加乐, 曾源源. 交通通达度对生态系统健康的影响——以长江中游城市群为例. 生态学报, 2022, 42(14): 5721-5733.
- [33] Cui N, Feng C C, Han R, Guo L. Impact of urbanization on ecosystem health: a case study in Zhuhai, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4717.
- [34] Kruse M. Ecosystem health indicators. In *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018.
- [35] Wang Z Y, Yu Q R, Guo L. Quantifying the impact of the grain-for-green program on ecosystem health in the typical agro-pastoral ecotone: a case study in the Xilin gol league, Inner Mongolia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(16): 5631.
- [36] Han R, Guo L, Xu N Y, Wang D. The effect of the grain for green program on ecosystem health in the upper reaches of the Yangtze River Basin: a case study of eastern Sichuan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(12): 2112.
- [37] 李世东. 中国退耕还林研究. 北京: 科学出版社, 2004.