

分类号：
学 号：20202018004

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



天山北坡人类活动强度与生态环境质量的 关联性分析

学 位 申 请 人	陈泓瑾
指 导 教 师	刘琳教授
申请学位门类级别	理学硕士
学 科、专 业 名 称	地理学
研 究 方 向	地图学地理信息系统
所 在 学 院	理学院

中国·新疆·石河子
2023 年 10 月

**Correlation analysis between Human Activity Intensity and Ecological
Environment Quality on the North Slope of Tianshan Mountains**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Natural Science

By

Chen Hong-jin

(Cartography and Geographical Information System)

Dissertation Supervisor: Prof. Liu Lin

October, 2023

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：阿泓璋

时间：2023年10月29日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：阿泓璋

时间：2023年10月29日

导师签名：刘琳

时间：2023年10月29日

摘要

人类文明发展史是人类活动与生态环境相互影响、相互作用的曲折历程。在全球生态环境问题日益突出的背景下，人地矛盾演变及人地协调发展广受关注，客观认识人类活动并探索其强度和范围与生态环境质量的时空关联对于区域可持续发展的理论和现实意义重大。天山北坡地区作为中国西北典型的干旱绿洲区，生态环境脆弱，在区域经济加速发展和快速城市化的背景下，人类生产和生活日趋活跃，加剧了社会经济与生态环境的失衡，天山北坡的生态环境面临着严峻挑战。探究天山北坡人类活动强度与生态环境质量的关联性，有助于深入认识全球变化背景下区域生态环境系统的变化机制，可为区域人类活动调控、协调人地关系以及生态环境改善提供借鉴。本文基于多源遥感数据与社会经济数据，选择人口分布、土地利用类型、夜间灯光亮度、道路距离等七个人类活动强度因子，采用层次分析法和综合指数法构建人类活动强度综合指数（HAI），同时在遥感生态指数的基础上，引入“净度”因子构建扩展型遥感生态指数，采用GIS空间分析方法和趋势分析法定量分析人类活动强度与生态环境质量的时空演变规律；基于相关分析法与双变量自相关模型分析天山北坡人类活动强度与生态环境质量间的线性相关关系及空间依赖关系，进一步探究天山北坡人类活动强度与生态环境质量的时空关联。结果表明：

（1）2000-2019年天山北坡平均人类活动强度处于较低水平（0.17），呈逐年增强趋势（ $0.032 \cdot a^{-1}$ ）；空间上整体呈现南北低，西北与中部高的空间分布格局；中部高值区呈现“L”型分布，自各市/县中心向外呈放射状降低，市/县间以道路为支撑形成“带”状通道；其中石河子市多年平均人类活动强度最高，接近中强度人类活动水平。

（2）天山北坡多年平均生态环境质量为较差水平（0.31）且呈波动增长趋势，年均增长率为 $0.017 \cdot a^{-1}$ ，研究区59.54%的区域处于生态环境质量改善趋势；空间上南部整体生态环境质量优于北部，由南向北可分为：天山北麓中水平—山前草地较差水平—绿洲中水平—荒漠差水平四个生态环境质量区。

（3）天山北坡人类活动强度与生态环境质量在年际变化与空间依赖关系中均呈现“双向异性”特征。年际线性相关上，二者为弱正相关（ $R=0.07$ ）关系，呈中部高南北低的空间分布格局；负相关区域占比略大（51.24%）且整体相关性偏弱。在空间相关上，二者存在空间依赖关系且也呈弱空间正相关，空间聚类格局以低活动-低生境和低活动-高生境为主，研究期内人类活动强度与生态环境质量间的空间相关性逐渐增强。

（4）综合时空关联性结果显示，天山北坡人类活动对天山北坡生态环境质量呈较弱正效应，在正相关聚类中耕地、林地与草地总占比均在60%以上，负相关聚类中则以未利用地为主，均高于55%，地类结构与人类活动对生态环境影响的正负密切相关，在原生生态质量较高的地类中人类活动更容易呈现为生态环境正效应。

关键词：人类活动强度；生态环境质量；净度；扩展型遥感生态指数；双变量空间自相关

Abstract

The history of human civilization development is a tortuous process of mutual influence and interaction between human activities and the ecological environment. Against the backdrop of increasingly prominent global ecological and environmental issues, the evolution of human land conflicts and the coordinated development of human land have received widespread attention. Objectively understanding human activities and exploring the spatiotemporal relationship between their intensity and scope and ecological environment quality are of great theoretical and practical significance for regional sustainable development. The northern slope of Tianshan Mountains, as a typical arid oasis area in northwest China, has a fragile ecological environment. Against the backdrop of accelerated regional economic development and rapid urbanization, human production and life are becoming increasingly active, exacerbating the imbalance between social economy and ecological environment. The ecological environment of the northern slope of Tianshan Mountains is facing severe challenges. Exploring the correlation between human activity intensity and ecological environment quality on the northern slope of Tianshan Mountains can help deepen the understanding of the change mechanisms of regional ecological environment systems under the background of global change, and provide reference for regional human activity regulation, coordination of human land relations, and ecological environment improvement. This article is based on multi-source remote sensing data and socio-economic data, selecting seven human activity intensity factors such as population distribution, land use type, nighttime light brightness, and road distance. The Analytic Hierarchy Process and Comprehensive Index Method are used to construct the Human Activity Intensity Comprehensive Index (HAI). At the same time, on the basis of the remote sensing ecological index, the "cleanliness" factor is introduced to construct an extended remote sensing ecological index. Using GIS spatial analysis methods and trend analysis methods to quantitatively analyze the spatiotemporal evolution patterns of human activity intensity and ecological environment quality; Based on the correlation analysis method and bivariate autocorrelation model, the linear correlation and spatial dependence between human activity intensity and ecological environment quality on the northern slope of Tianshan Mountain are analyzed, and the spatiotemporal correlation between human activity intensity and ecological environment quality on the northern slope of Tianshan Mountain is further explored. The results indicate that:

(1) From 2000 to 2019, the average human activity intensity on the northern slope of the Tianshan Mountains was at a relatively low level (0.17), but showed an increasing trend year by year ($0.032 \cdot a^{-1}$); The overall spatial distribution pattern shows a low north-south and high northwest and central regions; The high value area in the central region presents an "L" shaped distribution, with a radial decrease from the center of each city/county outward, and a "belt" shaped channel is formed between cities/counties supported by roads; with Shihezi City having the highest average human activity intensity over the years, approaching the level of moderate human activity.

(2) The average ecological environment quality on the northern slope of the Tianshan Mountains over the years is at a moderate level (0.31) and shows a fluctuating growth trend, with an average annual growth rate of $0.017 \cdot a^{-1}$. 59.54% of the study area is in the trend of improving ecological environment quality; In terms of space, the overall ecological environment quality of the southern part is better than that of the northern part. From south to north, it can be roughly divided into four ecological environment quality areas: moderate level in the northern foothills of the Tianshan Mountains, poor level in the piedmont grasslands, moderate level in oases, and poor level in deserts.

(3) The intensity of human activities and the quality of the ecological environment on the northern slope of the Tianshan Mountains exhibit a "bidirectional anisotropy" feature in their interannual changes and spatial dependencies. In terms of interannual linear correlation, the two are weakly positively correlated ($R=0.07$), showing a spatial distribution pattern of high in the middle, low in the north, south, and low in the south; The proportion of negative correlation areas is slightly higher (51.24%) and the overall correlation is weak. In terms of spatial correlation, there is a spatial dependency relationship and a weak positive spatial correlation between the two. The spatial clustering pattern is mainly low activity low habitat and low activity high habitat. The spatial correlation between human activity intensity and ecological environment quality gradually strengthened.

(4) The comprehensive spatiotemporal correlation results show that human activities on the northern slope of the Tianshan Mountains have a weak positive effect on the ecological environment quality of the northern slope. In the positive correlation clustering, the total proportion of arable land, forest land, and grassland is over 60%, while in the negative correlation clustering, unutilized land is the main area, with both exceeding 55%. The land type structure is closely related to the positive and negative impacts of human activities on the ecological environment, in land types with higher native ecological quality, human activities are more likely to present positive ecological effects.

Key words: Human activity intensity; Ecological environment quality; Clarity; Extended Remote Sensing Ecological Index; Bivariate spatial autocorrelation

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第1章 绪论.....	1
1.1 选题背景与研究意义.....	1
1.2 国内外研究综述.....	2
1.2.1 人类活动强度研究进展.....	2
1.2.2 生态环境质量研究进展.....	5
1.2.3 人类活动强度与生态环境质量关联性研究进展.....	7
1.3 研究内容、目标及关键问题.....	9
1.3.1 研究内容.....	9
1.3.2 研究目标.....	10
1.3.3 拟解决的关键问题.....	10
1.4 研究创新之处.....	11
1.4.1 构建普适性的人类活动强度综合指标体系.....	11
1.4.2 引入“净度”因子构建扩展型遥感生态环境质量评价体系.....	11
1.5 小结.....	12
第2章 数据与研究方法.....	13
2.1 研究区概况.....	13
2.1.1 自然条件.....	14
2.1.2 社会经济条件.....	14
2.2 数据说明与预处理.....	15
2.2.1 数据说明.....	15
2.2.2 数据来源与预处理.....	16
2.3 研究方法.....	18
2.3.1 层次分析法.....	18
2.3.2 主成分分析法.....	19
2.3.3 趋势分析法.....	19
2.3.4 相关系数法.....	20
2.3.5 双变量空间自相关模型.....	20
2.4 技术路线.....	21

2.5 小结	22
第3章 天山北坡人类活动强度时空变化分析	23
3.1 人类活动强度综合指标体系的构建	23
3.1.1 人类活动因子选择	23
3.1.2 综合指标体系构建	24
3.2 人类活动强度时空分异特征分析	25
3.2.1 人类活动强度时序变化	25
3.2.2 人类活动强度空间变化	27
3.3 小结	31
第4章 天山北坡生态环境质量时空变化分析	32
4.1 生态环境质量评价体系的构建	32
4.1.1 生态环境因子的计算	32
4.1.2 基于主成分分析的生态环境质量估算	34
4.2 生态环境质量时空分异特征分析	35
4.2.1 生态环境质量时序变化	35
4.2.2 生态环境质量空间变化	36
4.3 小结	40
第5章 天山北坡人类活动强度与生态环境质量的时空关联性分析	41
5.1 人类活动强度与生态环境质量线性相关性分析	41
5.2 人类活动强度与生态环境质量双变量空间自相关分析	44
5.2.1 人类活动强度与生态环境质量的全局空间关联	44
5.2.2 人类活动强度与生态环境质量的局部空间关联	45
5.3 人类活动强度与生态环境质量的时空关联综合分析	47
5.3.1 人类活动强度与生态环境质量时空关联显著性聚类分析	48
5.3.2 地类结构对人类活动与生态环境质量时空关联的影响	49
5.4 小结	52
第6章 结论与展望	53
6.1 主要结论	53
6.2 问题与展望	54
参考文献	55
致谢	64
作者简介	66
导师评阅表	67

第 1 章 绪论

1.1 选题背景与研究意义

人类活动因人类社会的发展绵延不断，涵盖了社会、经济、政治与个体、群体等方面人类一切可能产生的活动或者行为（叶笃正等，2001）。不同的人类活动方式，构成了地球生态环境以及人与自然关系演化的现实基础，而人类活动的目的、性质和规模大小的变化，是导致人类活动与地球自然关系态势变化的重要因素（徐勇等，2015）。自上世纪 70 年代以来，由臭氧层空洞引发的全球变暖、酸雨，及森林破坏、物种多样性减少，水资源短缺与荒漠化、海洋污染等全球生态环境问题日益凸显，人类活动对生态环境及自然过程的侵扰引起了各国学界的高度重视（Miler R B et al., 1994；刘燕华等，2006；史培军等，2009）。近年来，人类对生态环境的影响倍增，人类活动逐渐成为影响生态演变过程的重要驱动力之一。因此，全面客观地认识人类活动、定量评价人类活动的强度、规模，探究其时空分异规律及其与生态环境质量的关联性，对于预防人类活动可能产生的生境威胁有重要意义。

人类活动强度（Human Activity Index，以下简称 HAI）是表征人类活动对一定区域产生扰动作用程度的综合指标，能客观表征人类活动对陆地表层的利用、改造和开发程度（徐勇等，2015），其定量表达是评价人类活动对生态环境影响的重要依据（刘世梁等，2018）。随着社会经济的快速发展和人类生产生活方式的巨大转变，人类改造自然的强度、深度和规模不断扩大，人类活动表现出多元化、复杂化和综合化的特征，这对客观界定和表征当前人类活动强度带来了很大挑战。目前 HAI 定量方法主要分为基于自然-社会-经济复合体的综合评价（Han Z et al., 2016；段群滔等，2020）和基于土地利用转移和景观生态学（徐勇等，2015；韩美等，2017；Venter Oscar et al., 2016；Venter Oscar et al., 2016）的人类活动强度空间模拟两种，主要从人类活动引起的结果变化出发，未能全面体现人类活动的动因和过程，致使对区域人类活动的刻画尚显粗糙和片面。目前人类活动强度的度量尚未形成普适性强且广泛应用的综合指标算法（徐勇等，2015），基于此，人类活动强度的全面定量化评价具有重要的理论价值和现实意义。

生态环境质量是在一定时间和空间上对生态系统要素、结构和功能的全面反映（Barbara S et al., 2017），体现了生态系统中景观要素与生态过程在不同干扰下相互作用的结果（傅伯杰等，2010）。分析人类活动与区域生态环境质量的关系，是客观认识

区域人类活动的环境响应及其生态环境效应的基础（郭强，2020；李慧敏，2021）。传统生态环境质量的研究往往集中于区域土地利用变化等单一人类活动形式对生态环境的影响（汪容基等，2021；李晓雅等，2021），注重对生态系统本身的刻画，少有综合各项人类活动形式的全面评价。但事实上人类活动的信息化表达更为关键，对人类活动强度进行定量化与空间化，能够更好地对其时空分异规律进行描述，也更有利于为生态环境质量的变化提供支撑（Roth D et al., 2016；Schroeder T A et al., 2017），故如何耦合二者间的关系是当下研究的重点与难点。

新疆天山北坡地区作为中国西北典型的干旱绿洲区，生态环境脆弱，对人类活动的响应敏感，其生态环境状态变化受到广泛关注。在气候变化的大背景下，近年来天山北坡人类活动的不断加强以及对生态资源的快速开发利用，当地社会经济与生态环境质量逐渐失衡，尤其是工业、农业和旅游业的发展，使当前天山北坡的生态环境面临严峻挑战（管延龙等，2015）。为此，探究天山北坡人类活动强度及其与生态环境质量的关联性，有助于深入理解人类活动的生态环境效应、厘清全球变化背景下区域可持续发展的方向，为生态环境保护及区域人地关系协调提供借鉴。

1.2 国内外研究综述

1.2.1 人类活动强度研究进展

人类活动是指人类生产生活过程中一切可能形式的活动或行为，其与生物圈内每个地点、组成部分和过程均密切相关，涵盖个体、群体、社会、政治、经济等不同方面（刘世梁等，2018）。在前人研究中，人类活动常被表述为 Hemeroby、人类干扰（陈利顶等，2000）及人为压力（Eastwood P D et al., 2007）等，其中，Hemeroby 一词来源于希腊语 hemeros，由芬兰植物学家 Jalas 等于 1955 年首次提出（Jalas J et al., 1955），通过对区域当下的植被覆盖状态与无人人类活动干预情景下构建的自我调节植被最终状态间差异的量化，以评价人类活动对植被生长发育状态的影响。

人类活动强度则是指区域内因人类活动的影响而产生的扰动程度。当前学术界普遍认为莱温等学者在 1975 年进行的土壤侵蚀背景值估测（无人干扰条件下）拉开了关于人类活动对区域生态环境影响程度定量评价的帷幕（Programme U, 1995），由于其研究结果对人类活动影响强度的量化难以推进与延展，现在来看并不具备普遍意义。“人为干扰度”的概念在 1976 年由德国生态学家 Sukopp 首次提出，并被定义为“一种评断人类有意或无意的干扰对生态系统产生的影响”的综合方法（Sukopp H et al., 1976）。随后 Sanderson 等首次构建了全球尺度的“人类足迹指数”（Human footprint index, HFI）

以评估人类活动对自然的影响程度 (Sanderson E W et al., 2002), 通过将地类转移、交通可达性、电力基础设施与人口密度等 9 个数据层进行缓冲区分析及影响力赋值计算得到, 指数越高人类活动的影响越大。同时, Sanderson 等还考虑到地表众生态系统间的差异, 得出了人类活动对生态环境影响的全球分布数据集, 进而在自然保护区的监测、管理以及人类活动影响评价等方面被广泛使用, 许多学者均采用该方法对不同研究尺度的人类活动对生态系统的影响进行了量化评估 (Woolmer G et al., 2008; González-Abraham C et al., 2015; Allan J R et al., 2017)。但随着社会发展与数据精细的升级, 人类活动的复杂性与人类足迹指数方法的欠缺逐渐凸显, 许多学者开始不断改进 HFI。Ette 等在 2011 年基于土地利用强度、生物物理脆弱性和人类干预时间这三个维度, 构建了人类足迹指数 (Ette A et al., 2011); Correa 等则在 Etter 的指数基础上, 进一步引入表征生境损失程度与破碎化程度的变量 F_{frag} , 构建了基于多维空间的人类足迹指数 (Spatial human footprint index, SHFI) 以评估墨西哥人类活动对景观连通性的影响 (Correa Ayram et al., 2017)。

国外学者定量评价人类活动对生态环境的影响多聚焦于宏观层面, 优势在于能对人类活动对各种生态系统干扰的时空分布和变化进行宏观把控, 易于区域对比研究的进行; 且其评价结构多与生态学互为依托, 其结果更具生态层面的理论意义。但由于人类活动复杂多样, 其对生态环境的产生影响也不尽相同, 相较之下评价指标不够全面, 社会经济因素不足, 对于特定区域缺乏对人类活动干扰情况的全面性表达。

目前, 国内学者对人类活动强度的量化研究主要从生态环境影响和土地利用变化两个角度进行。一方面, 以人类活动产生的生态环境影响为出发点, 以生态问题区或生态脆弱区的基本生境状况为依据, 构建人类活动强度综合评价体系以实现定量评价。文英从自然、社会和经济三个角度, 选取水资源、生物量、环境综合指数与人口等 9 个指标, 在层次分析与加权分析的基础上测度了全国各省市的人类活动强度 (文英, 1998), 拉开了国内人类活动强度定量评价研究的序幕; 章家恩等从人类对生态环境退化的干扰程度出发, 耦合环境污染综合指数、区域旅游活动强度、人口密度指数、工业与城市化发展水平以及农业土地利用强度这五个指数量化人类活动对生态环境的扰动程度, 并在此基础上探讨了区域生态质量退化的驱动力因子 (章家恩等, 2003); 张翠云等则以人类活动对水循环的影响为导向, 综合水库数量、引水渠长度、开采井数量等五个指标, 利用变异系数法和综合指数法定量评价黑河流域上中下游近 50 年内 3 个年代区间的人类活动强度 (张翠云等, 2004)。总体来看, 当前此类评价体系大多以行政单元作为评估单位, 以社会统计数据为主要数据源, 缺乏与空间地理数据的结合, 能直观反映行政单元内部的人类活动时空分异情况的研究成果较少。

另一方面, 随着 RS 与 GIS 技术的逐渐成熟, 学者们开始尝试将社会经济统计数据

与空间地理数据进行集合,逐步将 GIS 的空间分析技术应用到人类活动强度评价体系的构建中。在景观与土地利用变化的视角下,国内学者强调景观与土地利用类型是人类活动的直接作用媒介与主要载体,通过改变区域内不同景观或土地利用类型的赋值规则进行人类活动强度的计算。如陈浮等在 2001 年将景观类型进行细致划分,并以人类活动对各景观成分(耕地、园地、湿地、建设用地、盐碱地等)的影响程度为依据,构建了人类活动强度指数(Human activity index)用于评价区域内景观受人类活动的影响强度(陈浮等,2001),该方法被应用于典型干旱绿洲区(贡璐等,2009)和黄骅市(荣益等,2017)等地。2007 年,胡志斌等着眼于道路、居民点和地形三个因子进行 HAI 指数的构建(胡志斌等,2007),分析了岷江上游区域的人类活动强度及时空分布特征;郑文武则综合运用空间插值、地形校正及空间叠加技术,聚焦于工业、农业和交通三个层面,充分结合统计数据(工、农业人口密度及产值)与遥感数据(土地利用类型)对城镇、耕地和交通线路中的人类活动强度进行了模拟,并估算了南方红壤丘陵区人类活动强度(郑文武等,2010)。2010 年,人为干扰度的概念首次被陈爱莲等学者引入自然保护区的监测和评估研究,在遥感影像的支持下共划分 30 类二级景观,对辽宁双台河口湿地自然保护区内人为干扰强度的时空演变规律进行了系统评估(陈爱莲等,2010)。孙永光等将景观格局指数引入人为干扰度中,分析了广西北海地区人为干扰的时空分异规律,进一步探讨了景观格局指数的响应机制(孙永光等,2014)。2015 年徐勇提出陆地表层人类活动强度指数(Human activity intensity of land surface, HAILS),其以建设用地为基准,对不同地类赋予相应的建设用地当量折算系数,从而达到评估区域人类活动对地面表层影响程度的目的(徐勇等,2015),后被应用于黔南生物多样性保护优先区(刘慧明等,2016)、黄土高原(徐小任等,2017)等地区。上述方法以土地利用及其变化为出发点展开,其优势在于结论可靠且操作简单,同时适用于大尺度区域的人类活动干扰研究,是其被广泛应用的重要因素;缺点在于大多研究仅从土地利用类型(景观类型)转化的角度对区域的人类活动强度进行定量评价局限性较强,无法体现人类活动的复杂性与对生态环境影响的多面性。

综上所述,目前国内外人类活动干扰量化评价体系多样且各有侧重,多数仍处于起步发展阶段,尚未形成相对统一的体系或者较为公认的指标。结合多源遥感数据与统计数据,基于人类活动的复杂性更全面地挑选人类活动的评价指标,是今后人类活动强度定量评价的发展方向。

1.2.2 生态环境质量研究进展

广义上的生态环境是指在一定范围内，人类赖以生存与发展的物质基础和空间条件；从狭义上来看，生态环境则是可以对生物系统和环境系统产生影响的物质或能量的总和（毛文永等，1998）。人类对于生态环境质量的研究可以追溯到上世纪六十年代，第二次世界大战结束后，工业化进程加快，世界人口呈现出爆炸性增长，人们对资源的需求越来越大，成为人类进一步掠夺自然资源的契机（齐文强等，2020）。在人类对自然进行开发和改造的同时，人口与生态资源间的矛盾越来越尖锐，导致了一系列诸如土地荒漠化、水土流失、臭氧层破坏、温室效应等问题的出现，对社会的生产力和经济发展造成巨大影响。为解决生态环境问题，越来越多的学者把研究的重点放在生态环境质量评价研究上（刘洪岐等，2008；海热提等，2004）。从研究对象的上来看，国内外专家学者对生态环境质量评价研究的展开主要围绕着两个问题进行。其一是从生态环境的状况出发；其二是对自然环境的影响，即生态环境的功能。由于生态环境所涵盖的要素繁多，难以从其综合性角度出发展开深入研究，为此国内外专家学者多从生态环境的某一方面入手进行讨论与挖掘。

国外早期开展生态环境质量的相关研究，主要涉及生态安全性评价、生态环境脆弱性研究、林草退化研究、生态环境风险评价等（付在毅等，2001）。Houghton 等在探究土地利用类型变化与生态环境的相关关系过程中发现，在耕地与林地过渡区内，林地转变为耕地会导致区域内生态环境产生较大变化，致使小环境内的局部气候改变并面临外来物种入侵等威胁，迫使地类变化区的生态安全承受巨大压力（Houghton R A et al., 1985）。Richard 基于环境理论，使用 GIS 技术评估了美国东部斯特林森林的环境敏感性（Richard G et al., 1998）；Bob 认为，景观密实度与发展潜力等因素都会影响环境的安全（Bob Crabtree et al., 1998）；John 的研究表明环境价值与景观质量密切相关（John T et al., 1999）；Marco Trevisan 在 GIS 技术的支撑下通过非点源农业危险指数(NPSAHI)，分级评价了各农业行为的生态环境影响（Trevisan M et al., 2000）。Luck 等补充了原有的生态足迹指数并将其与城市生态模型相结合，推算出制约城市生态系统发展的关键因子，并利用改进的人类足迹方法对 20 个城市的生态环境质量进行了对比分析（Luck M A et al., 2001）。Michael 等以可能价值法、旅行费用法等常用的经济学研究方法为基础，对区域生态环境质量展开了评价（Jun M J et al., 2004）。Jeppesen 以浮游动物作为湖泊生态环境质量的指示物，根据欧洲水框架指令（WFD）对丹麦、爱沙尼亚和英国的湖泊进行生态环境质量评价研究（Erik Jeppesen et al., 2011）；Erika 通过计算生态稳定系数（CES）评估了斯洛伐克道路发展的生态环境质量（Erika Igondova et al., 2016）；William 对通用植物区系质量评估（FQA）计算器的运用也证实了 FQA 在在线监测与评估区域

生态环境质量方面的优势 (William A et al., 2016); Rodríguez 等将卫星影像、景观指数、空间显示模型和广义线性模型等方法结合, 对智利温带林区的土地利用变化对生态环境质量的影响进行预测 (Rodríguez-Echeverry J et al., 2018)。与此同时, 部分学者也对水环境的生态质量进行探索, Marchini 基于新型两极指数 (TWIN) 的开发与应用, 从硬底栖动物入手评价泻湖的生态环境质量情况 (A. Marchini et al., 2016)。

尽管生态环境质量相关研究在国内起步较晚, 但国家长期以来对自然的生态环境的保护重视度较高。《无公害生态评估技术指南》于 1998 年发布, 为国内有关专家进行自然生态环境评估提供了重要的理论基础。我国学者对生态环境质量评价方法和评价体系的研究也已取得了丰富的成果。王万新以 AHP 层次分析法为基础, 构建了成都市生态环境质量评价模型 (王万新等, 1996), 以经济发展水平、资源丰富程度和外接自然环境三个指标为准则层, 选择 45 项三级因子为指标层, 并通过回归分析对区域生态环境质量进行了评价和预测。刘庄等则选择了 4 项一级指标, 16 项二级指标和 29 项三级指标, 同样利用层次分析法 (AHP) 构建了江苏省生态环境质量评价指标, 通过方根法计算各个层级的权重完成生态环境质量评价体系的构建 (谢志仁等, 2001)。但基于层次分析法构建的生态环境质量评价体系, 指标越多其受主观影响越大, 以定性为主, 定量分析结果难以令人信服。随着科技的发展, 遥感、GIS 等技术在全球范围内的广泛运用, 为更加细致、全面地进行生态环境质量评价研究创造了有利的条件。江振蓝等在 ENVI 环境下利用遥感数据提取了生态环境评价因子 (江振蓝等, 2004), 采用 1:10 万地形数据, 经投影转换等处理后复合高程、坡度数据与提取到的环境因子, 生成综合影像, 在线性回归方程的辅助下对各因子赋予相应权重, 最终构建出福州市生态环境遥感评价模型。徐涵秋提出了“遥感生态指数 (RSEI)”, 这是一种综合评价生态环境现状的新方法, 可以直接得到基于遥感图像的相应环境指标 (徐涵秋, 2013), 其后许多学者基于 RSEI 指数模型探究区域生态环境动态监测 (宋慧敏等, 2016) 及进行区域土地利用变化的生态环境质量 (李晓雅等, 2021) 等研究。自我国《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015) (环境保护部, 2015) 发布以来, 许多学者基于其中的生态环境状况指数 (EI) 进行了区域生态环境状况评价研究 (胡金龙等, 2016; 廖晋一等, 2021), 但由于各地区的生态环境状态截然不同, 对其产生影响的因素也不尽相同, 因此这种固定的权重分配模式在区域生态环境质量评价中存在一定的局限性, 难以准确地反映出区域生态环境的真实特征。为此, 郭强将 EI 与 RSEI 相结合, 从气象、地形、地表、土壤侵蚀四个方面选取了 6 个指标, 构建生态环境质量评价指标体系 (EQI) 以探究济南市城市化进程的生态环境效应 (郭强, 2020)。

综上, 国内外在研究生态环境质量评价中都取得了丰硕的研究成果。国外学者多从生态学角度构建区域生态环境评价模型; 国内学者则从生态学、经济学、社会学等多个

角度出发,以我国生态环境的诸多典型特征为对象进行了大量的实践研究,建立了黄淮海水土流失区土壤侵蚀敏感性评价体系(林泽民等,2015)与亚热带季风气候区流域生态安全度模型(解雪峰等,2014)等具有我国生态系统特色的生态环境评价模型,推动了生态环境评价研究的深入。现有研究普遍集中于区域生态环境质量变化(刘海龙等,2018;李慧敏,2021)或土地利用转换(李晓雅等,2021;齐学蕾等,2020;汪容基等,2021)、城市扩张(赵丹阳等,2017;郭强,2020)等单一人类活动对生态环境质量的影响,而人类活动因子的综合评估较少;同时,多数研究仅侧重于时间或空间变化,缺乏时空统一视角下的生态环境质量评价。基于上述局限,本文的着力点和研究目标在于时空统一视角下的综合人类活动强度与生态环境质量的关联性分析。

1.2.3 人类活动强度与生态环境质量关联性研究进展

“人的行为在多大程度上影响了自然演化过程?”(Marsh G P et al., 1864),这一问题的提出引发了学术界关于人类活动对自然环境影响评估的广泛讨论。1989年,McCloskey等以荒野(大于 4×10^5 ha且没有人造建筑物的大块土地)数据为基础,构建了首个全球尺度的、无人类活动干扰的生态系统的分布数据集(McCloskey J et al., 1989)。Hannah等在1995年对全球范围内天然栖息地中人类扰动的范围进行了评价,其结果显示尚未受到任何干扰的土地占全球陆地面积的52%(Hannah L et al., 1994)。进入21世纪以来,随着人类改造自然界的力度不断增强、规模不断扩张,生态环境所承受的扰动和压力成倍增加。Ellis等发现,全球无冰区域内,荒地(Wildness)面积占比不足25%(Ellis E C et al., 2008);Krausmann等的研究发现,1910年到2005年人类占用的净初级生产力翻了一倍(Krausmann F et al., 2013);Halpern等的研究认为人为活动产生的压力严重影响了全球至少五分之一的海洋,而且这种压力正在不断加大(Halpern B S et al., 2015)。IPCC AR6指出“人类活动导致气候变暖的结论是明确的”,由此引发的一系列连锁反应必然显著影响生态环境(IPCC, 2022)。越来越多的证据表明人类活动对自然界的冲击不断加剧,且可能使现有生态系统失去稳定(Steffen W et al., 2015),也印证了George一百多年前的结论和预测。因此,对人类活动强度与生态环境质量的关联性进行评估,正确认识人类活动对生态环境质量的正负效应是预防潜在生态威胁的关键。

作为人与环境系统的重要交互方式,人类活动在不同领域内被广泛讨论。传统的地理学研究中侧重于人地关系的探索,往往忽视了人类活动产生的生态环境影响(郭晓佳,2014;杨宇等,2019);在生态学(适宜性、脆弱性与生态效应评价等)研究中,人类活动往往被视为生态环境变化的关键驱动因子,侧重于相关关系探究(王志杰等,2018)。

随着社会的进步与发展人类活动的形式与种类逐渐复杂化、多样化，与此同时，人类活动对生态环境质量的影响的度量方式也随之多元化起来。为此，国内外学者在人类活动与生态环境质量的关系研究中多从两方面出发，一方面基于一类或几类人类活动行为进行，一方面基于不同生态环境因子进行。在众多人类活动行为中，土地利用变化作为人类活动的最直观体现之一，成为众多学者研究人类活动与生态环境质量间关系的对象。Houghton 等在探究土地利用类型变化与生态环境的相关关系过程中发现，在耕地与林地过渡区内，林地转变为耕地会导致区域内生态环境产生较大变化，致使小环境内的局部气候改变并面临外来物种入侵等威胁，迫使地类变化区的生态安全承受巨大压力（Houghton R A et al., 1985）；Cimini 等在地中海典型山区近 59 年来土地利用转移研究中意识到，森林面积的扩张能够有效提升区域生态环境质量（Cimini D et al., 2013）；Mdk 等利用 2000-2009 年间的土地利用数据、土壤数据与植被数据，在 InVEST 模型的支持下，对加纳、科迪瓦两国的碳储量、水土保持、水源供应和生物多样性进行了全面的评估，剖析了区域内生态环境时空动态变化情况以及生态系统服务质量格局（Mdk L et al., 2013）；李慧敏从土地利用变化出发，将空间杜宾模型与耦合协调度模型相结合，分析了东北地区城市土地的时空演化过程及其生态环境效应（李慧敏，2021）。此外，学者们还探究了城市化、各类污染物排放等人类活动行为产生的生态环境影响。城市化是人类活动变化的重要体现，郭强从城市化进程对生态环境质量的影响出发，得出耕地面积缩减与建设用地面积的增加是济南市生态环境质量下降的主要原因（郭强，2020）；Srinivasan 等基于六种主要生态破坏的人类活动（温室气体排放、氯氟烃气体的排放、农业集约与扩张、森林砍伐、过度捕捞和红树林的损失），估计了全球由于人类活动而造成的生态系统服务的变化（U. Thara Srinivasan et al., 2008）；Sophak 等通过沉积物记录体现的人类活动变化情况，对厄瓜多尔太平洋海岸在晚全新世期间人类活动的生态影响进行研究（Sophak Lim et al., 2014）；Reartes 等通过构建模型评价了洛斯莫利诺斯水库在人为营养负荷情景下生态环境质量的响应（S.B. Rodriguez Reartes et al., 2016）。根据不同研究的区域性及尺度差异，选择不同的生态环境因子进行生态环境质量的度量是研究的基础。Walter 评估了全球人类活动对生物多样性、干扰调节、水产、温室气体、水有效性和水质六种淡水生态环境因子的影响，研究结果表明人类活动降低了全球淡水的潜在生态环境质量（Dodds Walter K et al., 2013）；杨帆（2018）与于淑亭（2018）从土壤环境与地表生物量变化出发，过土壤 pH 值、有机质、氮、钾盐的含量变化以及地上植物生物量等典型指标的变化反映区域人类活动对生态环境质量的影响，分析连续时间尺度下各生态环境指标与人类活动强度间的相关关系，分别探究了莱州湾滨海湿地与黄河三角洲滨海湿地人类活动对生态环境质量的影响。

总体来看，人类活动常作为辅助信息被引入现阶段的大部分研究中，通过选择单个