



生态学杂志

Chinese Journal of Ecology

ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目: 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素
作者: 朱增云, 阿里木江·卡斯木
DOI: 10.13292/j.1000-4890.202010.009
收稿日期: 2020-03-19
网络首发日期: 2020-07-25
引用格式: 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素. 生态学杂志. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202010.009>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13292/j.1000-4890.202010.009

基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素

朱增云 阿里木江·卡斯木*

(新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆师范大学丝绸之路经济带城市化发展研究中心, 乌鲁木齐 830054)

摘要 利用 1995—2015 年土地利用分类的成果, 运用 CA-Markov 模型模拟预测伊犁谷地 2025 年未来时空变化的土地利用状况, 结合 InVEST 模型评估伊犁谷地 1995—2025 年的生境质量时空格局, 并采用空间统计方法和地理探测器模型分析了生境质量的变化特征, 并对生境质量的空间分布和变化趋势进行驱动因子探测、交互作用探测以及生态探测分析。结果表明: 1995—2025 年土地利用类型的总体变化趋势, 耕地与建设用地面积逐期呈增加趋势, 林地与未利用地面积呈波动变化态势, 整体处于先减少后增加的趋势, 草地与水域则出现减少态势, 减少的趋势缓慢下降; 生态退化度高值区主要在河谷平原耕作与城建区域且呈现为条带状分布, 应加强生态修复工程; 低值区为高山林草地区域, 总体上表现为低值区环绕高值区, 呈现嵌套分布, 应着重进行生态功能保护; 生境质量与生态退化度的高低值区域呈现相反的趋势。各县生态退化总体稳定, 且退化程度较小, 属可控范围内, 生境质量在 1995—2015 年处于下降趋势, 2015—2025 年有所上升, 不同县市生境质量缓慢升高, 说明该区域生态环境得以改善; 利用地理探测器探索出生境质量空间变化分布受自然和人为等因子的综合作用, 主导影响因子是土地利用, 其次为坡度, 在交互作用探测与生态探测中, 各因子对生境质量空间分布的差异性表现显著, 并呈现出双因子增强。

关键词 生境质量; InVEST; CA-Markov; 地理探测器; 驱动因子; 伊犁谷地

Spatial-temporal evolution of habitat quality in Yili Valley based on geographical detectors and its influencing factors. ZHU Zeng-yun, Alimujiang Kasimu* (School of Geography Science and Tourism, Research Center of Urbanization Development of Silk Road Economic Belt, Urumqi 830054, China)

Abstract: Based on the results of land use classification from 1995 to 2015, this paper uses the CA-Markov model to predict the future temporal and spatial change of the land use in Yili Valley in 2025. Combining the InVEST model to assess temporal and spatial patterns of habitat quality in Yili Valley from 1995 to 2025, and the use of space Statistical methods and geographic detector models analyze the characteristics of habitat quality changes, and analyze the spatial distribution and change trends of habitat quality for driving factor detection, interaction detection, and ecological detection analysis. Study the influence of factors on the spatial and temporal distribution pattern under the driving and interaction. The overall change trend of land use types from 1995 to 2025, the area of cultivated land and construction land shows a gradual increase trend, the area of forest land and unused land fluctuates, and the overall trend is to decrease first and then increase. The water area shows a decreasing trend, and the decreasing trend is slowly decreasing. The high-value areas of ecological degradation are mainly in the farmland and urban construction areas of the river valley and present as a stripe distribution, and ecological restoration projects should be strengthened; the low-value areas are alpine forest and grassland areas, and the

国家自然科学基金项目 (41661037, 41361043) 资助。

收稿日期: 2020-03-19

接受日期: 2020-06-24

*通讯作者 E-mail: alimkasim@xjnu.edu.cn

low-value areas are generally surrounded by high values. The area has a nested distribution, and emphasis should be placed on the protection of ecological functions; the high and low value areas of habitat quality and ecological degradation show opposite trends. The ecological degradation of each county is generally stable, and the degree of degradation is relatively small. It is within the controllable range. The habitat quality is in a downward trend from 1995 to 2015, and it has increased from 2015 to 2025. The habitat quality of different counties and cities has slowly increased, indicating that the region's ecological environment can be improved. The use of geographic detectors to explore the spatial distribution of habitat quality is affected by a combination of natural and man-made factors. The dominant influencing factor is land use, followed by slope. In the interaction detection and ecological detection, each factor has significant differences in the spatial distribution of habitat quality, and shows a two-factor enhancement.

Key words: habitat quality; InVEST; CA-Markov; geographical detector; driving factor; Yili Valley.

生境指生态系统能够为特定个体或种群提供适宜的生存环境及繁殖能力的场所(Riedler *et al.*, 2018; 谢余初等, 2018)。一般通过生境质量指数来表征生境质量的高低, 反映其生物物种在繁衍过程中的遗传变异与潜在能力, 一定程度上评价研究区的生物多样性(Hillard *et al.*, 2017; 冯舒等, 2018; Dominique *et al.*, 2018)。近些年, 不合理的人类活动导致土地利用结构发生变化, 从而造成原有生境面积不断缩小及生态系统服务功能的退化与改变(Newbold *et al.*, 2015; Otto *et al.*, 2016)。因此, 面对当前现有自然资源供给, 并结合研究区环境约束的压力下, 研究生境质量时空格局演变迫在眉睫。

近年来, 国内外众多学者对生境质量评估方面进行大量的研究, 并取得丰硕的研究成果, 目前对于生境质量的研究主要分为两个方面, 一是通过实地野外调查获取研究区生境胁迫因子相关数据, 加以修正参数, 并结合土地利用数据, 构建生境质量的指标体系(刘红玉等, 2006; 侯孟阳, 2019); 二是借助其他生态模型定量评估生境质量, 例如: InVEST 模型、GUMBO 模型、MAXENT 模型、SolVES 模型(Boumans *et al.*, 2002; 刘振生等, 2013; Sherrouse *et al.*, 2014), 其中, InVEST 模型应用最为广泛。利用该模型研究意大利自然保护区生境质量的变化, 结果证实生境质量的好坏与保护力度大小呈正相关(Sallustio *et al.*, 2017)。基于 InVEST 模型对非洲西部的科特迪瓦和加纳进行生态系统服务功能评估, 分析出生境质量功能的分布格局和变化状况, 为该区域生产、生活及生态空间的布局提供合理化的建议(Leh *et al.*, 2013)。我国学者是从 2010 年开始运用 InVEST 模型对不同区域、不同尺度等多方面进行生境质量相关研究, 以东北地区为研究区, 基于 2005、2010、2015 年土地利用数据, 从土地利用演变视角下, 结合该模型对研究区的生境质量进行相关评价(杨志鹏等, 2018); 结合 ArcGIS 和 InVEST 模型, 得到长三角地区生境质量评价结果, 划定出 2024 和 2034 年 3 类规划情境下的城市增长边界, 为区域情景模拟可持续发展提供支撑(吴健生等, 2015)。采用 InVEST 模型分析河北省张家口市 2005—2015 年生境质量的时空变化, 利用地理加权回归探究各个地类产生的变化对生境质量的影响(王惠等, 2019); 上述研究主要集中分析了在某一时段上内生境质量的时空格局变化, 对于未来生境质量的预测模拟研究较少(邓越等, 2018), 为了有效地反映区域生态环境质量, 开展未来时期生境质量的预测模拟则十分必要。前人对于研究影响生境质量驱动力的较少, 本文运用地理探测器模型结合自然-人文等因素共同探索生境质量空间分异特征及其主要驱动力。

伊犁谷地位于全国“两横三纵”城市化战略格局中陆桥通道横轴的西端, 是新疆天山北坡地区重要的生态功能区及“一带一路”倡议布局下新疆段的重要节点, 同时也是构建国家生态环境保护屏障的关键区域。随着“新型城镇化”与“乡村振兴”战略的推进与实施, 频繁的人类活动造成河谷内部及边缘地带自然生态系统功能的退化, 超载放牧与砍伐使其草原和原始森林遭到破坏, 威胁到多种动植物的生境环境。如何在快速城镇化阶段的过程中, 确保伊犁谷地生态系统的稳定性, 是干旱区大背景下面临的重大问题。因此, 本研究利用 1995—2015 年土地利用分类的成果, 运用 CA-Markov 模型模拟预测伊犁谷地 2025 年未来时空变化的土

地利用状况,结合 InVEST 模型评估伊犁谷地 1995—2025 年的生态系统服务功能时空格局,根据研究区实际状况,选取相关自然及人文等因子,借助空间统计方法和地理探测器模型探索伊犁谷地生境质量时空格局演变特征及影响因子的驱动作用。积极深入探索土地利用的发展变化过程对生境质量的影响,了解生境质量现状以及未来变化的发展趋势,对研究区提出科学有效土地利用规划,识别出绿色生态空间,充分发挥人的积极能动性,有利于实现“河谷-森林”生态系统多种功能之间的可持续发展。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

伊犁谷地地处我国新疆天山山脉西部,位于亚欧大陆桥的腹地,地理范围为(42°14'16"N—44°50'30"N, 80°09'42"E—84°56'50"E)。是被西北-东南走向的北天山与西南-东北走向的南天山夹峙所造成开口向西的楔形的峡谷,形成西宽东窄,西低东高的地势,东西共长于 360 km²,南北最宽于 275 km²,根据伊犁州国民经济和社会发展统计(2015 年)生产总值(GDP)为 1639.77 亿元,比上年增长 8.7%。其中第一产业 456.08 亿元,产总值 34119 元,增长 7.6%。增长 6.0%;第二产业 497.01 亿元,增长 8.1%;第三产业 686.67 亿元,增长 11.0%。人均生产总值 34119 元,增长 7.6%。

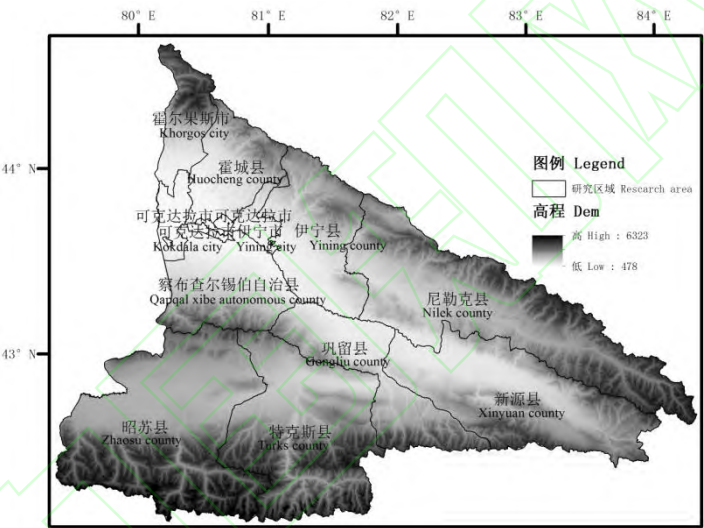


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location map of study areas

1.2 数据来源与处理

本文使用的气象数据包括平均降雨量、平均气温,将气象数据进行整理成软件所需格式,对伊犁地区 20 个气象站点的经纬度转换,利用克里金差值法进行插值,逐步生成研究区年均降雨与气温数据,经过研究区的裁剪,需要的标准格式的气象数据模型中;地形数据采用 SRTM 90M DEM 产品,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),从中提取坡度坡向等信息;研究区土地利用数据为 1995、2005、2015 年三期数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),通过地面调研资料及定点对比的方式进行实地验证,解译总精度达 85%以上,均达到分类要求,该数据满足研究区土地利用的精度要求,按分类体系划分耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个一级类;归一化植被指数(NDVI)和潜在蒸散量(PET)源于 NASA(美国国家航空航天局)网站免费下载,采用 MODIS13Q1 和 MOD16A2 产品,其空间分辨率为 1 km,根据研究区范围获取 2 个 Tile(h24v04、h23v04),每年 23 期 46 景,共 776 幅。借助于 MRT(MODIS Reprojection Tool)对月数据进行投影和数据格式转换,对数据进行提取及拼接,利用研究区边界进行裁剪等处理;社会经济数据包括:GDP、人口网格插值的数据,其空间分辨率为 1 km,来源于中国科学院资源环境数据共享中心。

1.3 研究方法

1.3.1 生境质量模型

InVEST 模型中的生境质量模块(Habitat Quality model)将不同土地利用类型与威胁源建立起两者之间的联系,利用研究区土地利用类型数据,划定不同生境类型对威胁源的响应程度进行分析,并获得退化情况和生境分布特征,模型认为生境质量越好,区域生物多样性越高,生态系统越稳定(谢余初等, 2018), 以下生境退化度计算公式:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_x} \left\{ \frac{w_x}{\sum_{r=1}^R w_y} \right\} r_y i_{rxy} \beta_x S_{jx} \quad (1)$$

$$\text{If } \text{linear } i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}} \right) \quad (2)$$

$$\text{If } \text{exp onential } i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{r\max}} \right) d_{xy} \right] \quad (3)$$

式中: y 代表胁迫因子, r 代表威胁图层的栅格数量; Y_x 代表胁迫因子所占单个栅格数; w_x 代表归一化胁迫因子的权重; r_y 用来判断栅格 y 的胁迫因子值; i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫因子值 y_r 对生境栅格 x 之间的距离函数; S_{jx} 代表生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性。 d_{xy} 表示每个栅格 x 与 y 之间的直线距离; $d_{r\max}$ 表示生境胁迫因子 r 的最大影响距离。

生境质量计算公式:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (4)$$

式中, Q_{xj} 代表土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数; D_{xj} 代表土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度; k 代表半饱和常数; H_j 代表土地利用类型 j 中的生境适合度; z 代表模型默认参数。

依据伊犁谷地的实际情况,选取受到人类干扰较大的建设用地、耕地及未利用地作为伊犁谷地生态环境的威胁源头,结合区域特点再参考已有相关研究(谢余初等, 2018;吴未等, 2018)和专家意见对各个威胁源的权重和最大影响距离、威胁因子的敏感性进行参数的设置。各个威胁因子的敏感度的范围在 0~1 区间内,越接近 1 说明生境类型对威胁因子的敏感度越大,抗干扰能力差。具体设置参数如表 1、表 2 所示。

表 1 威胁源的权重和最大影响距离

Table 1 The weight and the maximum influence distance of the threat source

威胁因子 Threats	最大影响距离 (km) Maximum distance of influence	权重 Weight	空间衰减类型 Spatial decay type
耕地 Cultivated land	2	0.2	线性 Linear
建设用地 Construction land	8	1	指数 Exponential
未利用地 Unused land	3	0.4	线性 Linear

表 2 各土地利用类型对胁迫因子的敏感性

Table 2 Sensitivity of land types to each threat

土地利用类型 Land use type	生境适宜度 Habitat suitability	敏感程度 Sensitivity		
		建设用地	耕地	未利用地

		Construction land	Cultivated land	Unused land
耕地 Cultivated land	0.4	0.9	0.2	0.5
林地 Forest	1	0.8	0.5	0.2
草地 Grassland	0.9	0.5	0.2	0.3
水域 Water	1	0.6	0.4	0.5
建设用地 Construction land	0	0	0	0
未利用地 Unused land	0.1	0.3	0.1	0.2

1.3.2 CA-Markov 模型

(1)Markov 模型是一种随机模型,根据事件的当前状况预测其未来各个时刻变动状况,其本质是对事件发生概率的预测(周杰等, 2018)。该模型主要依据初始时期到另一个不同时期的状态间转移概率与矩阵,以此为基础,预测未来某时刻的土地利用变化趋势。公式如下:

$$S(t+1) = S(t) \times P_{ij} \quad (5)$$

式中: S_t , S_{t+1} 为 t , $t+1$ 时刻土地利用系统的状态; P_{ij} 为状态转移矩阵。

(2)元胞自动机是一种时间、空间、状态都离散的局部的格网动力学模型,具有模拟复杂系统时空演化过程的能力(黎夏, 2007)。具体解释:

$$S_{t+1} = f(S_t, n) \quad (6)$$

式中: S 为元胞有限、离散的状态集合; n 为元胞的邻域; t , $t+1$ 为不同的时刻; f 为局部空间的元胞转换规则。

1987 年,美国克拉克大学实验室推出 IDRISI CA-Markov 模型,将图像处理功能与 GIS 完美结合的软件,CA-Markov 模型优势互补了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的优点与 Markov 模型长时间序列预测的能力(胡碧松等, 2018; 潘月等, 2018),利用 CA-Markov 模型能更加准确地从时间和空间上模拟土地利用类型的变化情况,具有较强的科学性与实用性。基于此,本文分别以 1995—2005 年各土地利用类型之间的转化面积作为马尔科夫状态土地转移概率矩阵;通过多准则评价模型选取高程、坡度、降雨、温度、离道路距离、GDP、人口密度作为限制性因子,并根据不同的土地利用类型转换之间的特点选取水域与建设用地作为约束性因子,由此得到各地类空间分布状态转移图集,为模拟预测 2015、2025 年土地利用类型空间分布的提供适宜性图集。

1.3.3 土地利用动态度

土地利用动态度用来描述了研究区某一土地利用类型在一定时间段内的变化率,能够表现土地利用空间动态变化的强度,对分析生境质量时空变化趋势提供依据(吕晖等, 2017)。公式是:

$$R_s = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (7)$$

式中, R_s 为某一土地利用类型在研究期间的年变化率, U_a 和 U_b 表示研究初时期值和后时期值的土地利用类型的面积, T 为研究期的时间长度。

1.3.4 地理探测器

探测空间分异性是地理探测器的核心特点之一,可以揭示其背后驱动力的一种新型统计

学方法，能够有效地判别变量因子之间的空间分层异质性（王劲峰等, 2017）。因子探测器可度量不同因子对生境质量时空变化分异性，以及探测其影响程度大小，如式（8）所示：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma^2_h}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中， q 是某影响因子对生境质量时空分布的影响程度大小， L 为影响因子的样本数， N_h 、 N 是次区 h 和整个研究区的生境质量， h^2 、 σ^2 是次区 h 和研究区生境质量的离散方差。 q 的取值区间为[0, 1]，值越大则表明分区因素对研究区生境质量空间分布影响越大，反之则越小。

交互作用探测为判断不同影响因子之间的交互作用，即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加还是减弱对生境质量的解释力，两个因子之间的关系可分为以下几类（表 3）：

表 3 双因子交互作用结果类型

Table 3 Types of two-factor interaction result

判断依据 Criterion	交互作用类型 Interaction
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱 Non-linear attenuation
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱 Single factor non-linear attenuation
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强 Two-factor enhancement
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立 Independent
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强 Nonlinear enhancement

生态探测：用于比较两两因子对生态质量的空间分布的影响是否具有有显著的差异：

$$F = \frac{N_{X_1} (N_{X_2} - 1) SSW_{X_1}}{N_{X_2} (N_{X_1} - 1) SSW_{X_2}} \quad (9)$$

式中： N_{X_1} 及 N_{X_2} 分别表示因子 X_1 和 X_2 的样本数量； SSW_{X_1} 和 SSW_{X_2} 分别表示由 X_1 和 X_2 形成的分层的层内方差之和。

将自然-人文数据运用格网方法按研究区范围设置格网大小，经多次试验的将格网大小设置为 3 km×3 km，共 3475 个网格点，同时用于生境质量（作为探测因子）与影响因素（作为解释因子）匹配起来，采用标准差分级法将研究区自然-人文等数据进行逐级分级，对各个影响因素进行离散，各年份生境质量作为因变量，以自然因子与人文因子作为自变量。

1.3.5 研究框架

本文以伊犁谷地生境退化与生境质量时空演变为视角，用以探究影响其空间格局变化的影响因素，构建“预测-评估-影响因子”的研究框架，如图 2 所示：①利用 1995—2015 年土地利用分类的成果，结合空间化的自然要素、人为要素数据，运用 CA-Markov 模型模拟预测 2025 年未来时空变化的土地利用状况，对其预测结果进行精度验证；②根据研究区实际情况将设置生境胁迫因子及威胁源的敏感性等参数数据，结合 InVEST 模型，定量评估伊犁谷地 1995—2025 年的生境质量与生境退化功能，在此基础上分析其时空格局演化规律特征；③筛选影响时空变异的主要因子，并采用地理探测器模型对生境质量的空间异质性进而归因化分析，研究在因子、交互与生态作用下对时空格局产生的影响程度。

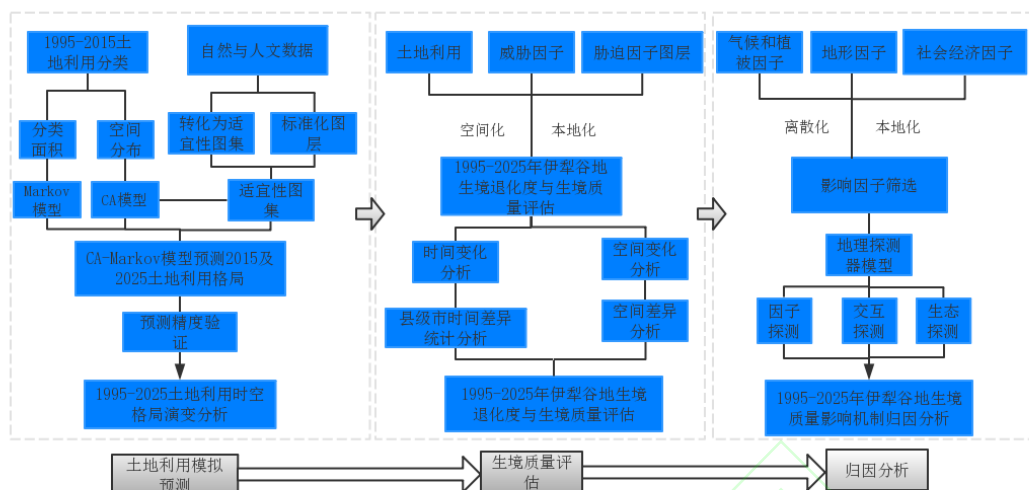


图 2 研究框架图
Fig. 2 Research framework

2 结果与分析

2.1 土地利用格局空间预测模拟

本文结合加权线性合并法利用 CA-Markov 模拟出 2015 与 2025 年土地利用状况(图 3)，并对 2015 年现状土地利用数据与 2015 年模拟土地利用数据进行混淆矩阵检验，获得 Kappa 系数进行精度检验，该结果为 0.8688，检验结果符合本研究精度需要。从伊犁谷地 1995—2025 年土地利用类型总体变化趋势可见(图 3)，耕地面积逐期呈增加趋势，其动态变化率为 1.16%、0.54%、0.90%；林地面积不同时段存有差异，呈波动变化态势，整体处于先下降后上升的趋势，在 1995—2005 年小幅度下降 0.12%，其他时间段均表现为略微上升，变化率分别为 0.01%、0.05%；草地与水域则出现减少态势，其动态变化率为 0.36%、0.15%、0.13% 及 1.94%、0.49%、0.44%，减少的趋势缓慢下降；建设用地一直处于增加趋势，分别增长了 0.02%、1.91%、0.38%；集中分布在伊宁市、可克达拉市、察布查尔自治县、新源县、巩留县；未利用地在 1990—2005 年呈减少趋势，2005 年后则处于增长状态，2015 年后略微下降，其土地利用类型面积变化是直接导致生境质量指数与生境退化度变化的重要原因。

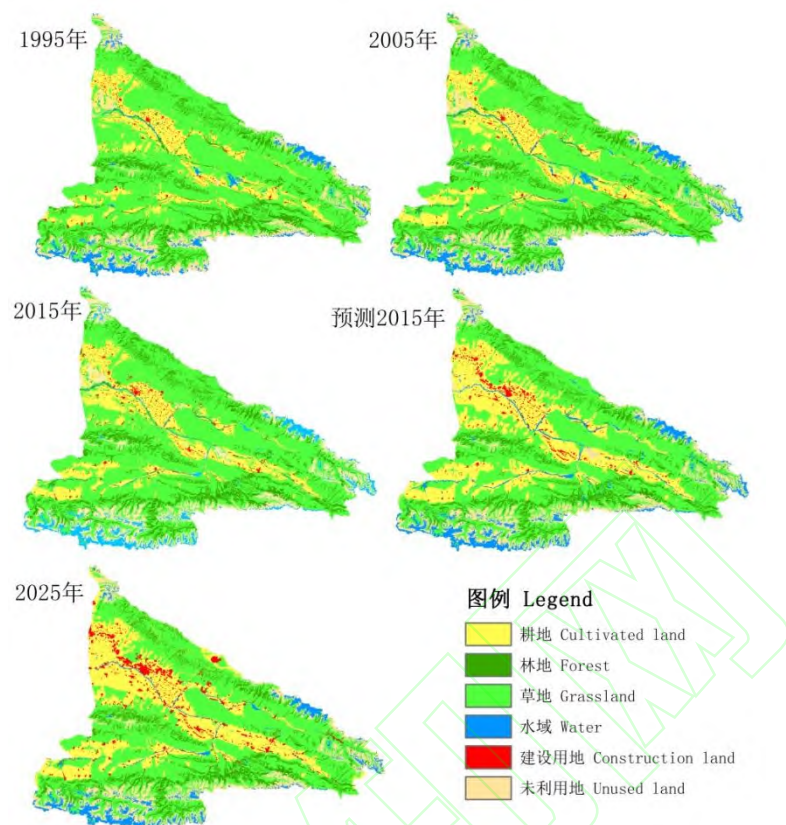


图 3 1995—2025 年伊犁谷地土地利用类型
Fig. 3 Land use types of Yili Valley from 1995 to 2025

2.2 生境退化度时空变化

利用 InVEST 模型中的生境质量模块得到 1995—2025 年 4 期研究区生境退化度时空分布格局（图 4）。生境退化度的高值区域沿河流呈条带状分布在霍城-伊犁河冲积台地、尼勒克东北部山地、昭苏县南天山山地以及霍城县，这些地区位于人类活动相对频繁的河谷平原耕作地带，分布着未利用地、低覆盖草地、建设用地等区域；尤其研究区建设用地扩张向西北方向延伸，以伊-霍经济圈为核心呈辐射方式分布和扩散，与生境退化扩散趋势具有一致性，由于城市扩展的影响，其周边区域退化度也保持高值状态，未来合理规划伊犁谷地形成“一主两副、两带三区”的城镇化空间格局。未利用地受特殊地形和气候原因，生物多样性单一，其生境遭到破坏，一旦受人类活动的频繁干扰，就难以恢复到原始的生境中，应采取生态保护与维护措施防止生境环境进一步的退化。生境退化度的低值区域集中分布于察布查尔锡伯自治县中部湿地、巩留县西天山自然保护区、特克斯中游冲积平原，昭苏-特克斯中天山的地区及林业发展区，这部分区域以林草地为主，生物多样性丰富，受人类活动干扰较少，生态保护程度较高，生境环境质量良好，且变化相对稳定。在南北天山山脉附近、伊犁河河流其支流形成的树状河流廊道等的区域开发难度较高，故其保持原有的状态。后续应积极推动研究区林草地管护及恢复与防治体系、促进生物多样性保护工程的建设，实施湿地动植物多样性保护与修复体系建设，开展绿洲生态防护体系建设工程。

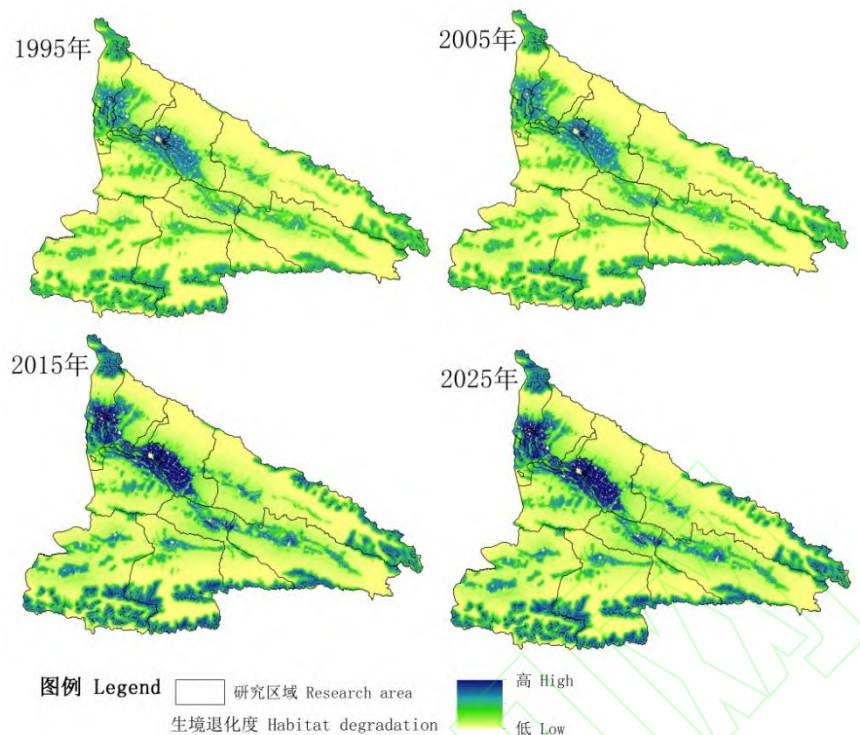


图 4 1995—2025 年伊犁谷地生境退化度

Fig. 4 Habitat degeneration degree in the Yili Valley from 1995 to 2025

为更加细致了解研究区生境退化度的变化，通过 ArcGIS 软件的统计计算可以得到伊犁河谷各年份以县市为单元的生境退化的平均值，划分出不同县市生境退化度（图 5），生境退化度为 0~1，生境退化值越接近于 1 表明生境质量越差。研究区的生境退化度在 1995—2015 年处于上升趋势，2015—2025 年处于下降趋势。可克达拉市的退化度由 0.03 又升高到 0.04；察布查尔锡伯自治县退化度由一开始的 0.01 升高 0.02；伊宁市由 0.02 升高到 0.05，退化程度最为明显，伊宁县由 0.01 升高到 0.02；意味着这些区域人类活动程度逐渐增强，导致生境退化程度逐渐升高，表明生态环境质量有待进一步提高；特克斯县的退化度并不明显，尼勒克县、昭苏县、霍尔果斯市总体是变化差异不显著，其中尼勒克县生境退化度是所有县市中最低的。霍城县、巩留县、新源县的退化度来总体是略微上升的，上升的程度处于 0.007~0.009，衰退逐期升高，这些区域主要以生态保育控制、生态旅游发展为主，其保护的力度要大于其他区域。生境退化度总体较低，说明在伊犁谷地地区，生境质量在未来一段时间内保持一个良性的发展模式，生态质量也同时呈现出较好的状态，并未随着城市扩展和经济发展而达到退化度较高的不可调和状态。

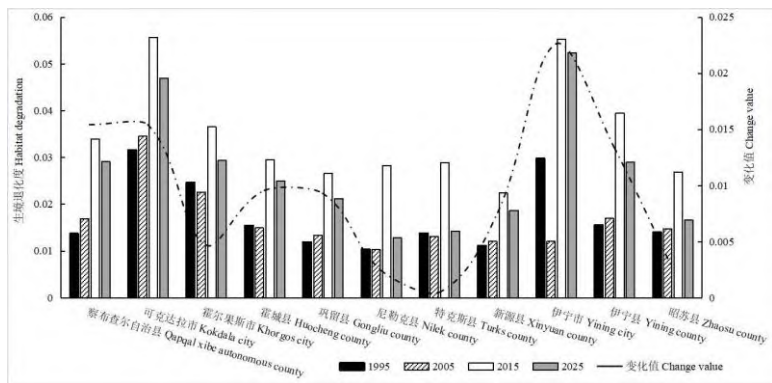


图 5 伊犁谷地各县市生境退化度时间变化

Fig. 5 Temporal changes of habitat degradation in counties and cities in Yili Valley

2.3 生境质量时空变化

为深入了解研究区生境质量的变化，将生境质量值按照以下划分标准：0~0.3、0.3~0.6、0.6~0.9、0.9~1 等分为差、一般、良好、优 4 个等级（图 6）。伊犁谷地生境质量空间分布格局呈现出由中部平原向四周山地逐渐升高的分布态势，研究区霍城县北部及尼勒克北部、巩留县及新源县南部以及西天山自然保护区林草地一带地区的物种资源和生物多样性丰富，属生境质量最好，主要因为位于中山带，海拔在 1500~2000 m，年降水丰富，蒸发量小，且受人类活动影响少，又分布着大量原始林草地，生物多样性相对于其他区域较为丰富，被称为亚欧大陆腹地野生生物物种的“天然基因库”。霍城-伊犁河冲积台地、尼勒克东北部山地、昭苏县南天山山地大量分散着未利用地（永久性冰川积雪、盐域）以及霍城县西南部图开沙漠区域，从侧面反映出生境质量易受人类农业与工业活动的影响，由于平原绿洲区气候温和湿润，地势平坦，土壤肥沃，是重要的农牧业基地，是人群聚居的区域，工业活动最集中的区域对生境质量造成一定的影响，随着区域工业园与旅游业发展，研究区对多条基础交通道路的修建，使其生境被道路设施不断分割，表现也越来越破碎。未来应加强对这部分区域的生态修复，控制工业与建设用地的面积。1995—2025 年生境质量的空间分布格局的变化主要是在伊犁河-巩乃斯流域外围平原的附近。大多数地区生境质量呈现持平的情况，间接说明伊犁谷地生态系统较为稳定，不易受到外界因素的干扰而发生变化。

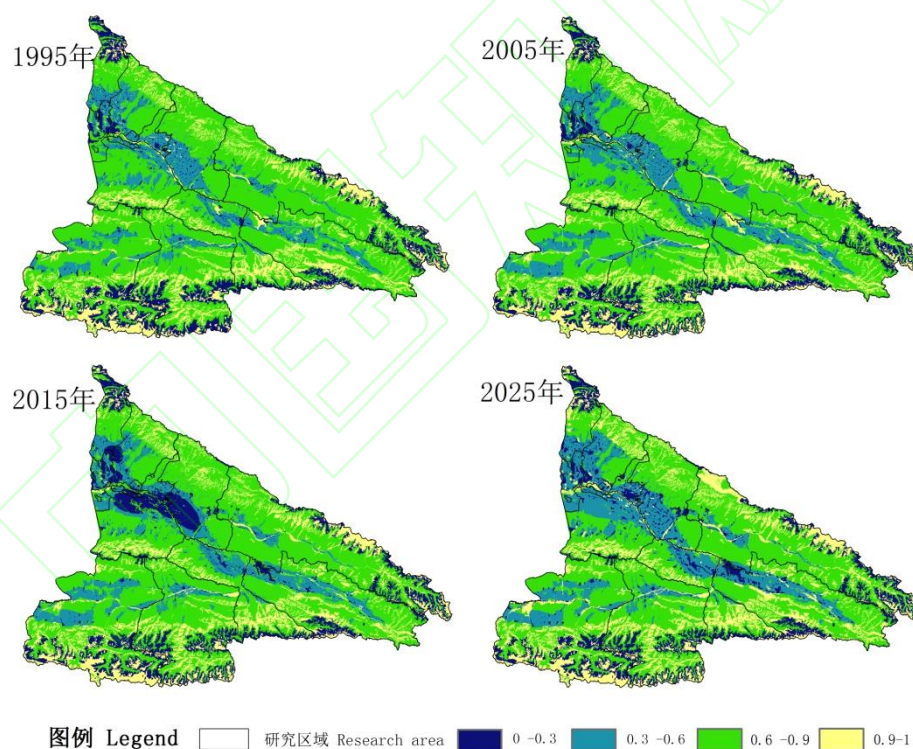


图 6 1995—2025 年伊犁谷地生境质量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of habitat quality in Yili Valley from 1995 to 2025

从图 7 可知，研究区的生境质量在 1995—2015 年处于下降趋势，2015—2025 年处于上升趋势，生境质量指数缓慢升高。其中霍尔果斯市，尼勒克县的生境质量指数变化差异基本不大；霍城县、巩留县、新源县、伊宁县的生境质量指数来总体是下降的，下降的程度处于 0.03~0.04；其中伊宁市生境指数由 0.62 到 0.50，下降的幅度最大。其次可克达拉市的生境质量指数由 1995 年的 0.51 下降为 2015 年的 0.40，到 2025 年时有所上升，可克达拉市的生境质量指数是所有县市中最低的，意味着该区域生境质量较差，有待提高；察布查尔锡伯自治县指数由一开始的 0.77 下降到 0.68；主要原因是位于高承载力地区，建设用地从中心城

镇向外扩张，地区部分生态用地转变为建设用地，用以经济增长、工业发展，进而导致研究区整体生境质量时空分布发生深度性的变化。霍尔果斯市与昭苏县总体上变化不明显；特克斯县的生境质量指数是增高趋势，由 0.74 上升 0.76，表明在整个区域中特克斯县生境环境逐渐趋于良好。总体而言伊犁谷地地区生境质量区域发展差异不明显，且生境质量均值较高，表示出该地区生态环境总体较好，这也与伊犁谷地的各种自然条件相互照应，但从伊犁谷地的生境质量可以发现，城镇化发展进程深刻地改变原有区域的自然环境，生境空间格局的改变对伊犁谷地地区的自然环境、社会经济发展易产生深远的影响。

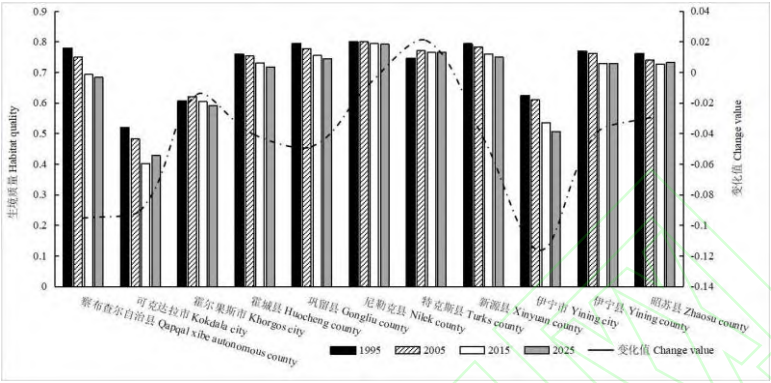


图 7 伊犁谷地各县市生境质量功能时间变化
Fig.7 Temporal changes of habitat quality functions in counties and cities in the Yili Valley

2.4 生境质量空间差异驱动因子分析

从因子探测的结果可得知（表 4），不同因子的决定力 q 值并不高。决定力（ q 值）从大到小依次排序为土地利用>坡度>高程>GDP>温度>NDVI>年降雨量>潜在蒸散发>人口密度，影响生境质量空间变化分布的第一主导因素依就是土地利用，贡献率达 0.1636，第二主导因素坡度，贡献率为 0.0338，其次是贡献力为高程、年降雨量、GDP、温度、NDVI，由此得知，土地利用变化是引起生境质量变化的重要驱动力，依据研究区土地利用面积的变化，建设用地与耕地增长速度逐期增加，成为伊犁谷地生境质量最大的威胁源，可调整对应地类面积直接有助于生境质量的提高，而坡度与高程的 q 值超过年降水量、潜在蒸散量，表明伊犁谷地的地形因素相对于其他因素对影响生境质量空间变化的解释力更大，影响更为明显。由因子探测结果可以看出，该区域的自然环境因素显著影响各项生态系统服务功能空间变化的分布格局，未来加大保护自然环境的力度，实施生态修复和恢复生物多样性，在一定程度上可以保障该区域生态安全。

表 4 生境质量年际空间变化的因子探测结果
Table 4 Factor detection results of interannual spatial changes in habitat quality

决定力 q statistic	高程 Dem	坡度 Slope	降雨 Precipitation	蒸散发 Evapotranspiration	温度 Temperature	NDVI	土地利用 Land use	GDP	人口密度 Population density
影响因子 Threat factor	0.0211	0.0338	0.0053	0.004	0.0111	0.0078	0.1636	0.0124	0.0019

从表 5 可知，高程 $\cap$ 降雨、降雨和其他要素因子、温度和其他要素因子、NDVI 和其他要素因子、坡度 $\cap$ 降雨、蒸散发、温度及 NDVI、蒸散发 $\cap$ GDP 外其他要素交互存在非线性增强（不加*号），其他呈现出双因子增强（加*号），但从交互产生的作用大小来看，NDVI $\cap$ 土地利用（0.2207），高程 $\cap$ 土地利用（0.2133），降雨 $\cap$ 土地利用（0.1996），坡度 $\cap$ 土地利用（0.1958），潜在蒸散发 $\cap$ 土地利用（0.1954），其次为土地利用 $\cap$ 人口密度（0.1681）、土地利用 $\cap$ GDP（0.1684），其中人口密度 $\cap$ GDP 交互作用最低为 0.0019。研究区其他因子

与土地利用类型交互作用明显,可以得知不同的土地利用类型结构决定不同生态系统类型的分布格局,人为因子对土地利用类型的分布起到次要作用,其原因是人口密度的增加造成耕地及建设用地侵占其他生态类型用地,加重了周边城镇地区的生态压力,使两因子之间交互作用相比于其他功能交互更加凸显。伊犁谷地地区主要是以“三山夹四谷一盆”的地貌为主,南北天山附近山高沟深,地势起伏大,因受地形的影响山区温度较低、年降雨较充足,河流和冰川融水带来充足的水源,为动植物的生长发育提供强适宜的生存空间,形成物种多样性丰富的区域,应将生境质量良好的区域作为生物多样性保护区红线范围之内,在生态红线内严格控制人为破坏生态系统,对生境已破坏的地区,采用生物与工程措施相结合的形式,积极促进自然生境的恢复,构建研究区特定的生态走廊,保持生态走廊健康,维持生境质量的稳定。通过生态探测器,经探测具体来看,高程与土地利用、土地利用与人口密度、GDP之间差异不显著,降雨与土地利用、温度与土地利用及 NDVI、蒸散发与土地利用之间差异显著,其余因子之间差异不显著。

表 5 生境质量交互探测与生态探测结果

Table 5 Habitat quality interactive detection and ecological detection results

因子 Factors	高程 Digital Elevation Model	坡度 Slope	降雨 Precipitation	蒸散发 Evapotranspi- ration	温度 Temperature	NDVI Normalized Difference Vegetation Index	土地利用 Land use	GDP Gross domestic product	人口密度 Population density
高程 Digital Elevation Model	0.0212								
坡度 Slope	0.0419*	0.0339							
降雨 Precipitation	0.0369	0.0485	0.0053						
蒸散发 Evapotranspiration	0.0311*	0.0473	0.0395	0.0111					
温度 Temperature	0.0308	0.0507	0.0200	0.0262	0.004				
NDVI Normalized Difference Vegetation Index	0.0379	0.0474	0.0198	0.0225	0.0225	0.0078			
土地利用 Land use	0.2133+	0.1958+*	0.1996+	0.1954+	0.177+	0.2207+	0.1636		
GDP Gross domestic product	0.0291*	0.0424*	0.0231	0.0231*	0.0221	0.0257	0.1681+*	0.0124	
人口密度 Population density	0.0237*	0.036*	0.0116	0.0155	0.0095	0.0142	0.1684+	0.0133*	0.0019

注：不加*号表示两两因子的交互作用为非线性增强，加*号表现为双因子增强，“+”表示生态探测中为显著差异，否则无标记。

Note: The absence of the * sign means that the interaction between the two factors is a non-linear enhancement, and the plus sign signifies a two-factor enhancement. "+" indicates a significant difference in ecological detection, otherwise there is no mark.

3 讨论

3.1 模型应用中变量参数的设定以及替代存在一定的局限性

本文借助 CA-Markov 模型构建土地利用空间格局,依据 InVEST 模型结合地理空间探测分析方法对伊犁谷地生境退化度及生境质量时空格局变化进行预测与评估,InVEST 模型相对于其他评估模型较为成熟,但仍存在不足之处,设置模型胁迫因子参数时借鉴前人学者

的研究成果,后期应结合实地调查的数据来获取胁迫因子等参数从而进行相关设置,能够精准评估该区域的生境质量,另一方面,CA-Markov 模型为研究未来时期的生境质量提供一种新思路,针对预测所选样本数量较少及约束因子不能全面概括研究区自然与社会等影响因素,在后续研究中应该更加着眼于定量及细化影响因素,将进一步加强土地利用模拟预测精度,提高评估的未来时期生境质量结果,在今后研究中以期科学合理地制定生态安全格局的管理措施提供有效的依据。

3.2 生境质量变化影响要素的多元复合性

由于影响生境质量变化是多要素共同作用之下的结果,本研究尝试通过引入地理探测器模型探讨分析研究两两因子在驱动与交互作用下对其时空格局分布的影响机制,明确其主控因子。因影响生境质量的各个因素综合作用之间关系较为复杂,但人文数据难以获取与量化,存在影响结果的不确定性,尽可能降低人文变量对生境质量结果造成过多的差异化,以期寻求量化人文因子的衡量指标。从自然-人文综合因素研究结果上来看引起生境质量变化影响因素的具有多元复合性,但多要素的耦合驱动机制目前仍是一个难题,今后考虑加入当地政府制定生态政策与环保制度措施,拓宽影响因子选取范围和其局限性,挖掘多时空、多尺度影响因素的作用机制,探索多元因子对其影响进行驱动力研究,下一步以期能够尝试构建地理探测器与生境质量的多因子耦合驱动分析。

3.3 2025 年伊犁谷地生境质量仍呈下降趋势,区域生境风险增加

伊犁谷地作为国家区域协同发展战略丝绸之路经济带上的重要组成部分和“一带一路”新疆段的重要节点,近些年来,由于城镇化、旅游经济快速发展显著地改变了该区域的土地利用和生态系统服务功能空间格局,区域内人口聚集及不合理的土地利用方式对生态用地不断的侵占,使其草地和水域生态系统面积下降,造成其生境退化度在 2005—2015 年升高,生境质量降低,在此期间不停受到外界环境的扰乱与损害,造成生境的不断割裂、破碎化,这种趋势到 2025 年仍出现下降趋势,下降的速率有所缓和,该区域生境风险有一定程度上的增加。

3.4 伊犁谷地未来发展与建议

针对生境质量低值区域以生态手段修复生境质量遏制进一步恶化,加大退牧还草还林等生态工程,防止人为的破坏,要做好生态保育措施和红线划定,构建多条河流与林草地的生态走廊,可以优化生态源点构成的生态网络格局,因此亟需配合提升生物多样性,促进自然生态系统恢复,通过采用生物与工程措施的实施,积极恢复自然生境,打造质量优良的生态腹地。对于人群聚居区控制“摊大饼”式的建设用地扩张分布,控制新增道路、铁路交通线路建设规模,避免交通线路占用生态用地,设置景观绿化带以拉动该区域生态旅游发展,减少城镇化对生态系统功能与生态本底的破坏,在有条件区域通过水系、绿带等构建生态廊道,需保持生态系统健康、维持生态结构稳定。另一方面可通过整合区域性,以生态功能为基础,未来构建该区域“四区多点线”生态空间规划格局,应将多条河流水系形成的生态廊道与多个生态节点,设置绿色屏障以期维护生态安全从而提高生境低值及退化程度高区域的生态质量。

4 结 论

1995—2025 土地利用类型的总体变化趋势,耕地与建设用地面积逐期呈增加趋势,林地与未利用地面积呈波动变化态势,整体处于先减少后增加的趋势,草地与水域则出现减少态势,减少的趋势缓慢下降,其土地利用类型面积变化是直接导致生境质量指数与生境退化度变化的重要原因,要保护现有自然生态系统,防止土地利用结构的改变使其重要生境区域的发生退化。

生态退化度高值区主要在河谷平原耕作与城建区域且呈现为条带状分布,应加强生态修复工程,低值区高山林草地区域,总体上表现为低值区环绕高值区,呈现嵌套分布,应着重

进行生态功能保护；生境质量与生态退化度的高低值区域呈现相反的趋势。各县生态退化总体稳定，且退化程度较小，属可控范围内，生境质量在 1995—2015 年处于下降趋势，通过对在现有城镇布局基础上进一步集约开发、集中建设，严格控制土地利用开发强度及修复生态环境，2015—2025 年有所上升，由于不同县市绿色生态空间扩大，其生境质量缓慢升高，说明该区域生态环境得以改善。

利用地理探测器辨识并探讨生境质量空间分异的主要影响因子，主导影响因子是土地利用，贡献率最高，其次为坡度，自然环境因素塑造了伊犁谷地生境质量分布格局；在交互作用探测与生态探测中，各因子对生境质量空间分布的差异性表现显著，并呈现出双因子增强，因此在干旱区大背景下的伊犁河谷区域内生态环境的变化只要受制于土地利用变化的转变，应通过调整区域土地利用结构使其生境质量整体得到改善。

参考文献

- 邓 越, 蒋卫国, 王文杰, 等. 2018. 城市扩张导致京津冀区域生境质量下降. *生态学报*, **38**(12): 4516-4525. [Deng Y, Jiang WG, Wang WJ, et al. 2018. Urban expansion led to the degradation of habitat quality in the Beijing-Tianjin-Hebei Area. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(12): 4516-4525.]
- 冯 舒, 孙然好, 陈利顶. 2018. 基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究. *生态学报*, **38**(12): 4167-4179. [Feng S, Sun RH, Chen LD. 2018. Spatio-temporal variability of habitat quality based on land use pattern change in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(12): 4167-4179.]
- 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 等. 2019. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景. *自然资源学报*, **34**(3): 539-552. [Hou MY, Yao SB, Deng J, et al. 2019. Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an city at the grid scale based on Sloping Land Conversion Program. *Journal of Natural Resources*, **34**(3): 539-552.]
- 胡碧松, 张涵玥. 2018. 基于CA-Markov模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究. *长江流域资源与环境*, **27**(6): 1207-1219. [Hu BS, Zhang HY. 2018. Simulation of land-use change in Poyang Lake region based on CA-Markov mode. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, **27**(6): 1207-1219.]
- 黎 夏. 2007. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体. 北京: 科学出版社. [Li X. 2007. Geographical Simulation System: Cellular Automata and Multi-agent System. Beijing: Science Press.]
- 刘红玉, 李兆富, 白云芳. 2006. 挠力河流域东方白鹤生境质量变化景观模拟. *生态学报*, **26**(12): 4007-4013. [Liu HY, Li ZF, Bai YF. 2006. Landscape simulating of habitat quality change for oriental white stork in Naoli River Watershed. *Acta Ecologica Sinica*, **26**(12): 4007-4013.]
- 刘振生, 高 惠, 滕丽微, 等. 2013. 基于MAXENT模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价. *生态学报*, **33**(22): 7243-7249. [Liu ZS, Gao H, Teng LW, et al. 2013. Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(22): 7243-7249.]
- 吕 晖, 郭雪白, 赵万东. 2017. 河南省土地利用变化特征及其空间格局. *中国农业资源与区划*, **38**(7): 142-145. [Lü H, Guo XB, Zhao WD. 2017. Characteristics and spatial pattern of land use change in Henan province. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, **38**(7): 142-145.]
- 潘 月, 于东升, 王秀虹, 等. 2018. 基于CA-Markov模型的土地利用景观格局预测研究. *土壤*, **50**(2): 391-397. [Pan Y, Yu DS, Wang XH, et al. 2018. Prediction of land use landscape pattern based on CA-Markov model. *Soils*, **50**(2): 391-397.]
- 王 惠, 许月卿, 刘 超, 等. 2019. 基于地理加权回归的生境质量对土地利用变化的响应——以河北省张家口市为例. *北京大学学报: 自然科学版*, **55**(3): 509-518. [Wang H, Xu YQ, Liu C, et al. 2019. Response of habitat quality to land use change based on geographical weighted regression. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, **55**(3): 509-518.]
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, **72**(1): 116-134. [Wang JF, Xu CD. 2018. Geode-tector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, **72**(1): 116-134.]
- 吴 未, 廉文慧. 2018. 生态系统服务功能视角下建设用地扩张对生境网络的影响: 以苏锡常地区白鹭栖息地为例. *长江流域资源与环境*, **27**(5): 1043-1050. [Wu W, Lian WH. 2018. Impact of construction land expansion on the little egret habitat networks in Su-Xi-Chang area: From the perspective of ecosystem service function. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, **27**(5): 1043-1050.]
- 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 2015. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. *应用生态学报*, **26**(11): 3457-3466. [Wu JS, Cao QW, Shi SQ, et al. 2015. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei Area based on land use change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **26**(11): 3457-3466.]
- 谢余初, 巩 杰, 张素欣, 等. 2018. 基于遥感和InVEST模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究. *地理科学*, **38**(6): 979-986. [Xie YC, Gong J, Zhang SX, et al. 2018. Spatiotemporal change of landscape biodiversity based on InVEST model and remote sensing technology in the Bailong river watershed. *Scientia Geographica Sinica*, **38**(6): 979-986.]
- 杨志鹏, 许嘉巍, 冯兴华, 等. 2018. 基于InVEST模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究. *生态科学*, **37**(6): 139-147. [Yang ZP, Xu JW, Feng XH, et al. 2018. Effects of land use change on habitat based on

- InVEST model in Northeast China. *Ecological Science*, **37**(6): 139-147.]
- 周杰, 张学儒, 牟凤云, 等. 2018. 基于CA-Markov的土壤有机碳储量空间格局重建研究: 以泛长三角地区为例. *长江流域资源与环境*, **27**(7): 1565-1575. [Zhou J, Zhang XR, Mu FY, *et al.* 2018. Spatial pattern reconstruction of soil organic carbon storage based on CA-Markov: A case study in Pan-Yangtze River Delta. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, **27**(7): 1565-1575.]
- Boumans R, Costanza R, Farley J, *et al.* 2002. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model. *Ecological Economics*, **41**(3): 529-560.
- Dominique W, Gabriela S, Klaus E. 2018. Predicting habitat quality of protected dry grasslands using landsat NDVI phenology. *Ecological Indicators*, **91**: 447-460.
- Hillard EM, Nielsen CK, Groninger JW. 2017. Swamp rabbits as indicators of wildlife habitat quality in bottomland hardwood forest ecosystems. *Ecological Indicators*, **79**: 47-53.
- Leh MDK, Matlock MD, Cummings EC, *et al.* 2013. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **165**: 6-18.
- Newbold T, Hudson LN, Hill SL, *et al.* 2015. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, **520**: 45-50.
- Otto CR, Roth CL, Carlson BL, *et al.* 2016. Land-use change reduces habitat suitability for supporting managed honey bee colonies in the Northern Great Plains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**: 10430-10435.
- Riedler B, Lang S. 2018. A spatially explicit patch model of habitat quality, integrating spatio-structural indicators. *Ecological Indicators*, **94**: 128-141.
- Sallustio L, DE Toni A, Strollo A, *et al.* 2017. Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy. *Journal of Environmental Management*, **201**: 129-137.
- Sherrouse BC, Semmens DJ, Clememt JM. 2014. An application of social values for ecosystem services (SolVES) to three national forests in Colorado and Wyoming. *Ecological Indicators*, **36**: 68-79.

作者简介 朱增云, 女, 1993 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境遥感。E-mail: 1048179192@qq.com

责任编辑 魏中青