



干旱区研究
Arid Zone Research
ISSN 1001-4675, CN 65-1095/X

《干旱区研究》网络首发论文

题目： 基于 FLUS-Markov 模型的多情景景观生态风险评价与预测——以南疆克州为例
作者： 金梦婷，徐丽萍，徐权
收稿日期： 2021-06-03
网络首发日期： 2021-10-11
引用格式： 金梦婷，徐丽萍，徐权. 基于 FLUS-Markov 模型的多情景景观生态风险评价与预测——以南疆克州为例[J/OL]. 干旱区研究.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1095.X.20211009.1713.005.html>



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。

基于 FLUS-Markov 模型的多情景景观生态风险评价与预测——以南疆克州为例

金梦婷, 徐丽萍*, 徐权

(石河子大学理学院, 兵团绿洲城镇与山盆生态系统重点实验室, 干旱区景观生态重点实验室, 新疆 石河子 832000)

*通信作者 徐丽萍. E-mail: xlpalw@163.com

摘要 以新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州(克州)为例, 基于 2005—2015 年土地利用空间格局变化, 利用 FLUS-Markov 复合模型预测 2025 年土地利用情况, 采用 Criteria Importance Though Intercriteria Correlation (CRITIC) 权重法构建自然增长和生态保护情景下的景观生态风险指数, 并采用自然断点法由低到高划分为 5 个等级 (Risk I、Risk II、Risk III、Risk IV 和 Risk V), 以风险指数质心和标准差椭圆评价不同年份、多情景下景观生态风险时空格局和变化特征, 探究影响其演化特征的驱动因素。研究结果表明: (1) 在自然增长情境下, 耕地、水域、建设用地面积不断增加, 林地、草地、荒漠和裸地面积逐渐减小; 生态保护情境下, 草地相比于自然增长情景增加了 51 km²。(2) 2005—2025 年, 克州景观生态风险整体呈现增加的趋势, 生态保护情境相比于自然增长情景下的 Risk I、Risk II 和 Risk IV 面积分别增加 34 km²、1240 km² 和 66 km², Risk III 和 Risk V 面积分别减少 695 km² 和 645 km²。(3) 2005—2025 年, 2 种情景下克州 Risk I、Risk II、Risk IV 和 Risk V 呈扩散分布状态, Risk III 呈现紧凑收缩状态。(4) 影响景观生态风险演化的主要因素是地形气候因子(解释力 85%以上), 其次人口(解释力 59%以上)也是重要的驱动因子, GDP 对景观生态风险变化的贡献减小。

关键词 土地利用; FLUS-Markov 模型; 景观生态风险指数; 情景模拟; 驱动力; 新疆

FLUS-Markov model-based multiscenario evaluation and prediction of the landscape ecological risk in Kezhou, South Xinjiang

JIN Mengting, XU Liping, XU Quan

(College of Science, Shihezi University, Corps Key Laboratory of Oasis Towns and Mountain Basin Ecosystems, Key Laboratory of Landscape Ecology in Arid Region, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract In this study, the Kirgiz Autonomous Prefecture of Kizilsu in Xinjiang was set as an example to use an FLUS-Markov composite model based on changes in the land use spatial pattern from 2005 to 2015 for predicting the land use situation in 2025. The criteria importance though intercriteria correlation weight method was applied to construct the landscape ecological risk index under the two scenarios of natural growth and ecological protection. The natural risk index was also determined. The breakpoint method was divided into five levels (from low to high): risks I–V. Risk index centroid and standard deviation ellipse are used to evaluate the spatiotemporal pattern and changes in the characteristics of landscape ecological risk in different years and multiscenarios and to explore the driving factors affecting its evolution characteristics. Results show that (1) the area covered by cultivated land, water area, and construction land is increasing under a natural growth scenario, whereas the area spanning woodland, grassland, desert, and bare land is gradually decreasing. The grassland area under the ecological protection scenario increases by 51 km² compared with that under the natural growth scenario. (2) From 2005 to 2025, the overall landscape ecological risk of Kezhou increased. Compared with the natural growth scenario, the areas under risks I, II, and IV in the ecological protection scenario increased by 34, 1,240, and 66 km², respectively, and

收稿日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760151)

作者简介: 金梦婷(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事土地利用覆被变化研究. E-mail: jmt530666@163.com

网络首发时间: 2021-10-11 10:50:47 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1095.X.20211009.1713.005.html>

the areas under risks III and V decreased by 695 and 645 km², respectively. (3) From 2005 to 2025, risks I, II, IV, and V in Kezhou would be in a diffused distribution state, and risk III would be in a compact contraction state. (4) The main factors affecting the evolution of landscape ecological risk are topographic and climatic factors (interpretation over 85%). Another important driving factor is population (interpretation over 59%). The contribution of GDP to the changes in the landscape ecological risk is reduced.

Key words land use; FLUS-Markov model; landscape ecological risk index; scenario simulation; driving force; Xinjiang

随着城市化进程及人类活动的日益增强, 景观格局受到的胁迫和干扰日益加剧, 对原生生态系统的结构、质量和功能产生几乎不可逆的重大影响^[1]。景观生态风险评价能够从自然基础和生态景观 2 个层面选取指标作为区域景观生态风险的评价因子, 在最适宜尺度下建立综合评价模型, 进而定量评估在人与自然因素影响下, 景观格局和生态过程相互作用间不良生态影响产生的可能性与损失。因此, 景观生态风险评价继而成为度量和评估生态环境质量和演化的重要手段^[2-4]。近年来, 众多学者选择相关景观指标、方法和模型针对不同区域和研究目的, 开展了大量卓有成效的景观生态风险评价工作^[5-11]。目前, 景观生态风险评价通常可以划分为基于风险源汇和基于景观格局 2 种评价方法, 后者在一定程度上打破了传统生态系统评价的固有模式, 以土地利用变化为诱因, 在区域尺度上直接从空间格局的角度评价景观生态风险^[1]。土地利用对生态产生的影响具有累积性和区域性特征, 可以直观地体现在生态系统的结构和组成上, 反映人类活动对自然生态系统的影响方式及程度^[12]。但结合时间和空间尺度, 基于模型模拟未来多情景土地利用变化及其景观生态风险评价的研究尚显不足。Future Land Use Simulation (FLUS) 模型^[13]是一种基于元胞自动机的土地利用预测模型, 可以根据各驱动因素与土地利用类型之间的转化规则和定量关系, 运用轮盘赌选择算法, 有效地模拟不同年份、不同情景下的土地利用空间格局, 并对模拟的土地利用数量需求进行空间分配^[14-16]。但该模型缺乏对土地利用数量需求的模拟, 因此需要借助其他模型或方法计算。Markov 模型是侧重时间维度分析土地利用变化预测模型, 具有长期数量预测效率高的优势^[17-18], 与 FLUS 模型结合, 既可以提高土地利用数量需求的预测精度, 又可以有效地模拟多情景下土地利用的空间变化^[19], 充分发挥了 2 个模型在数量预测和空间分布方面的优势, 实现了土地利用在空间和数量上的双重模拟。

同时, 景观生态风险指标的权重赋值是评价中不可或缺的环节, 不恰当的方法应用可能会直接左右评价结果, 显著增加评价结果的不确定性^[11]。在现阶段, 大多数研究是基于学者的经验和判断进行主观的权重赋值^[20-22], 但根据区域具体数据运算结果而确定的客观赋值方法研究并不多见。权重赋值方法本身在普适性方面并无优劣之分, 需要根据研究目的选择合适的赋权方法, 然而目前的一些景观生态评价更多关注于景观格局指数的计算, 忽略了各指数之间的相关性^[23-27], 这影响了风险评价结果的适用性与可信度降低。因此, 为了筛选和构建最佳景观格局指数以及有效降低人为主观因素的影响, 通过反复实验推敲, 依据研究目的和景观指数的生态意义, 结合研究区特点, 采用 Criteria Importance Though Intercriteria Correlation (CRITIC) 权重法^[28]对多指标进行客观赋值, 以构建景观生态风险指数。

本文以新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州(以下简称克州)作为研究区, 该地区地形起伏较大, 地貌类型多样, 景观类型丰富, 但景观整体格局相对较为破碎、稳定性及恢复力差, 生态环境脆弱, 在人类活动和自然干扰下变化迅速且明显。鉴于此, 本文以 2005 年、2015 年克州土地利用数据为基础, 采用 FLUS-Markov 复合模型预测 2025 年自然增长和生态保护情景下的土地利用变化情况, 并运用 CRITIC 权重法构建景观生态风险指数, 通过计算风险指数质心和标准差椭圆评价 2005—2025 年不同情景下的景观生态风险时空格局和变化特征, 并利用地理探测器对其演化特征进行驱动力分析。该研究能够为景观生态风险评价理论与方法探究提供一定的参考作用, 为新疆的国土空间规划以及决策提供一定的科学依据, 有助于实现新疆生态环境空间的可持续发展。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

克州位于新疆维吾尔自治区西南部，地跨天山山脉西南部、帕米尔高原东部、昆仑山北坡和塔里木盆地西北缘。克州生态问题突出、经济发展相对落后，且生态环境指数低于新疆整体水平^[29]。克州北部和西部分别与吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦两国接壤，边境线长达 1195 km，东部与阿克苏地区相连，南部与喀什地区毗邻，全州东西长约 500 km，南北宽约 140 km，面积 72500 km²。克州气候属典型的温带大陆气候，其特点是光照充足，干旱少雨，冬季寒冷，夏季炎热，春秋季节短促，且气温多变。气候差异极大，垂直反应明显。既有终年永冻的寒冷高山带，又有夏季酷炎的平原区；既有终年不化的冰雪降水带，又有干旱无雨的久旱区，相对温差达 16.6 ℃。

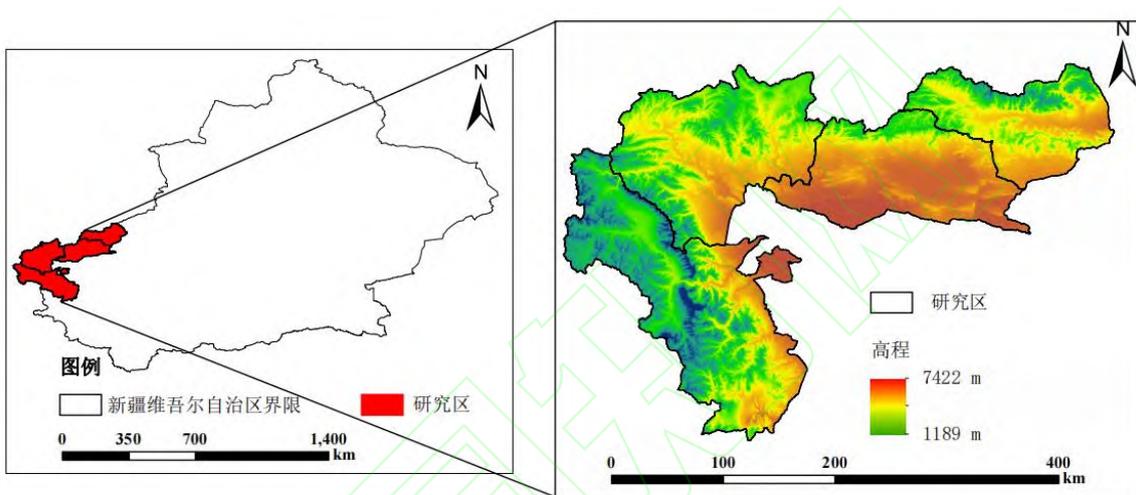


图 1 研究区位置及高程示意图
Fig. 1 Location and elevation of study

1.2 数据来源及处理

本文数据（表 1）均来源于中国科学院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn/>）。本文根据《土地利用现状分类标准》（GB/T 21010-2017）一级分类和数据说明，结合克州自然环境的特点及研究需求，对土地利用类型进行重分类。进一步将未利用地划分为荒漠和裸地，最终将土地划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、荒漠和裸地七类。

所选模拟土地利用变化的驱动因素包括地形、气象和社会经济因素。其中地形因素包括高程和坡度；气象因素包括气温和降水；社会经济因素包含人口和 GDP。为了开展实验，将以上数据均重采样为 1 km，投影方式统一转化为 Albers。

表 1 数据说明
Tab. 1 Data declaration

数据类型	数据内容	数据时间	数据分辨率	数据用途
土地利用数据	土地利用类型	2005 年,2015 年	1 km×1 km	模型输入数据
地形数据	高程、坡度	2005 年,2015 年	30 m×30 m	
气象数据	气温、降水	2005 年,2015 年	1 km×1 km	驱动因子数据
社会经济数据	人口、GDP	2005 年,2015 年	1 km×1 km	

2 研究方法

2.1 基于 FLUS-Markov 复合模型的土地利用变化预测

2.1.1 土地利用情景设置

根据新疆国土空间规划的需求,本研究重点模拟了自然增长和生态保护 2 种情景。研究通过修改 FLUS 模型的输入参数,估算克州 2025 年自然增长和生态保护 2 种情景下的各用地类型空间分布。自然增长情景即不刻意改变土地利用类型,使其按照当前实际条件自然演变。生态保护情景即划定生态保护红线区域,加强对林地、草地、水域等生态用地的保护,同时减弱其他用地类型的扩张能力。

2.1.2 FLUS-Markov 复合模型的运行

(1) 设定限制区域。根据研究区实际情况,本研究不设置限制区域,允许土地利用发生转化。

(2) 计算未来土地利用面积。本研究以 2005 年和 2015 年 2 期数据为基础,利用 Markov 模型计算得到研究区 2025 年各类土地利用类型的面积。

(3) 输入土地利用变化驱动数据。所选驱动因素包括地形、气象和社会经济等多个方面,共计 6 类数据。

(4) 设置转移矩阵和领域因子参数。转移矩阵用 0 和 1 表示,当一种用地类型不允许向另一种转化时,将矩阵对应的值设为 0,允许转化时设为 1。领域因子参数用于表示某地类转为其他地类的难易程度,参数范围 0~1,越接近 1 代表该土地利用类型的扩张能力越强。本文重点研究自然增长和生态环境保护 2 种情景,为控制变量,故该参数设置相同。

(5) 验证模型精度。本研究利用该模型,首先根据 2005 年土地利用数据模拟了 2015 年土地利用情况,并将其与 2015 年实际情况进行点对点的对比验证,采用 Overall Accuracy、Kappa 系数和 FoM 值对模拟结果进行精度验证。Overall Accuracy 和 Kappa 系数值越大,代表模拟精度越高,FoM 是匹配率,值越小越精确。模拟结果的 Overall Accuracy 和 Kappa 分别为 97.70%、96.48%,FoM 仅为 0.02,能够满足研究需要。

2.2 景观生态风险指数的构建

景观指数高度浓缩了景观格局信息,可用于分析不同尺度上的各种生态过程,以反映生态景观结构特征与演变^[30]。在以往景观生态风险评价研究的基础上^[24],结合研究区特点和景观指数的生态意义,经反复实验计算,摒弃了重复值及较小值的计算方式,对景观破碎度指标(C_i)、景观分离度指标(N_i)、景观优势度指标(D_i)进行了重新构建(表 2)。并借助景观生态学方法,选取景观结构指数(S_i)、景观脆弱度指数(F_i)、景观损失度指数(R_i)作为风险评价指标,以此构建景观生态风险指数(ERI_i),表征克州景观生态风险空间分异及格局变化情况。本研究经野外踏勘以及与同期土地利用变更数据的对比,所选取的指标能够较好的反映实际情况。在此基础上,根据景观生态风险指数值的分布特点,利用自然间断法^[21-24]将景观生态风险划分为 5 个等级:低生态风险(Risk I)、较低生态风险(Risk II)、中生态风险(Risk III)、较高生态风险(Risk IV)和高生态风险(Risk V)。

表2 景观格局指数计算方法
Tab. 2 Calculation methods of landscape pattern indices

名称	景观指数	生态意义
景观破碎度指标 (C _i)	边缘密度(ED) 面积加权的平均形状因子 (SHAPE_AM)	ED 用于揭示景观或类型被边界分割的程度, 是景观破碎化程度的直接反应, 边界密度越高, 反映景观破碎度越高。SHAPE_AM 是度量景观空间格局复杂性的重要指标之一, 对于自然斑块或自然景观的形状分析还有另一个很显著的生态意义, 即常说的边缘效应。
景观分离度指标 (N _i)	斑块结合指数 (COHESION) 聚集度指数 (AI) 集聚指数 (IJI)	COHESION 指标描述的是景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势, 由于该指标包含空间信息, 是描述景观格局的最重要的指数之一。AI 来源于斑块类型水平上的邻近矩阵的计算, 是反映景观聚集与分离程度的重要指标之一。IJI 对那些受到某种自然条件严重制约的生态系统的分布特征反映显著。
景观优势度指标 (D _i)	最大斑块指数 (LPI)	LPI 有助于确定景观的模地或优势类型等, 其值的大小决定着景观中的优势种、内部种的丰度等生态特征, 其值的变化可以改变干扰的强度和频率, 反映人类活动的方向和强弱。
景观结构指数 (S _i)	$S_i = a(ED) + b(SHAPE_AM) + c(COHESION) + d(AI) + e(IJI) + f(LPI)$	反映不同景观所代表的生态系统受到干扰的损失程度。式中: a、b、c、d、e、f 为相应景观指数的权重, 为避免人为赋值的主观性, 本研究采用 CRITIC 权重法进行客观赋值。
景观脆弱度指数 (F _i)	专家打分赋值获得	表示不同景观类型对外界干扰的敏感性, 值越大, 生态风险越大。景观脆弱度的大小与其在景观自然演替过程中所处的阶段有关, 结合研究区特点, 本文将景观类型按其脆弱度由高到低依次赋值: 7 裸地、6 荒漠、5 水域、4 耕地、3 草地、2 林地、1 建设用地。
景观损失度指数 (R _i)	$R_i = \sqrt{S_i \times F_i}$	表示不同景观类型所代表的生态系统受到外界干扰时, 其自然属性损失的程度。
景观生态风险指数 (ERI _i)	$ERI_i = \sum_{k=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i$	表示一个评价单元内综合生态损失度的相对大小, 即评价单元内生态风险大小。式中: ERI _i 为第 i 个评价单元的景观生态风险指数; A _{ki} 为第 k 个评价单元内景观类型 i 的面积; A _k 为第 k 个评价单元的面积。

为有效降低人为主观因素的影响, 研究基于 SPSS AU 平台, 采用 CRITIC 权重法对景观破碎度指标、景观分离度指标和景观优势度指标进行赋值, 最终权重如表 3 所示。CRITIC 权重法是一种客观赋权法, 其思想在于对比强度和冲突性 2 项指标。对比强度使用标准差进行表示, 如果数据标准差越大说明波动越大, 权重会越高; 冲突性使用相关系数进行表示, 如果指标之间的相关系数值越大, 说明冲突性越小, 那么其权重也就越低。权重计算时, 对比强度与冲突性指标相乘, 并且进行归一化处理, 即得到最终的权重。

构建的景观生态风险指数是一种空间变量, 为了能够弥补以平均值来表达整个区域景观分布的不足, 参考国家格网 GIS 的相关标准《地理格网》(GB12409—2009)和相关格网景观生态学研究^[31-32], 格网宜采用平均斑块面积的 2~5 倍, 并根据克州土地利用类型的面积、覆盖情况、工作量及空间信息的完整性, 最终对比发现创建 10 行×10 列的渔网将研究区划分为 100 个评价单元能很好的区分空间的同质性和异质性。基于此, 分别计算各评价单元生态风险指数, 利用反距离权重法^[33]进行空间插值, 以绘制生态风险级别图。

表3 景观格局指数权重
Tab. 3 The weight of landscape pattern index /%

年份	权重					
	ED	SHAPE_AM	COHESION	AI	IJI	LPI
2005	0.85	9.59	22.89	25.31	35.78	5.58
2015	0.88	9.41	20.87	25.38	37.73	5.73
2025年自然增长情景	0.97	9.81	18.50	23.67	40.60	6.44
2025年生态保护情景	0.90	9.52	20.07	24.48	39.29	5.74

2.3 景观生态风险质心与标准差椭圆

质心是描述地理现象空间分布的一个重要指标，景观生态风险的质心迁移变化能够很好地从空间上描述其时空演变特征，通过了解各时期不同生态风险等级的质心分布，可以发现景观生态风险的变化趋势。标准差椭圆法是分析空间分布方向性特征的经典方法之一，椭圆的大小反映空间格局总体要素的集中程度，偏角（长半轴）反映格局的主导方向。因此本文借鉴相关研究^[34]，用质心偏移判定克州景观生态风险扩展方向，通过标准差椭圆法对其扩展方向进行验证。

2.4 景观生态风险演化驱动力分析

地理探测器既可以探测空间分异性，也可以检验 2 个变量空间分布的一致性，是揭示其背后驱动力的一种统计学方法^[35]。地理探测器中的因子探测器能够用因子的解释力判断某种因子对该景观生态风险演化的影响程度^[20]。本文以研究区景观生态风险指数作为因变量，驱动因子作为自变量，利用因子探测器得到各驱动因子的贡献值（PD），以探究各驱动力的影响程度。驱动因子的选择包括自然因素和社会经济因素，其中自然因素包含气象（气温、降雨）、地形（DEM、坡度）方面，社会经济因素包含人口和 GDP 方面。为了避免数据空间自相关性和人为因素的影响，采用随机取样的方法，在研究区内随机生成 1000 个样点，并提取每个点所在空间位置的生态风险值和驱动因子值用于分析。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化现状分析

2005—2015 年克州耕地、水域、建设用地面积呈增加的态势（表 4），分别增加 203 km²、10 km² 和 17 km²，林地、草地、荒漠和裸地面积呈减少的态势（-2 km²、-78 km²、-135 km² 和 -15 km²）。2015 年研究区土地利用类型以草地和裸地为主，面积占比分别为 53.29% 和 22.98%，其次为荒漠和水域（13.22%、7.94%），耕地、林地和建设用地面积占比极小（1.75%、0.72% 和 0.09%）。由此可见，2005—2015 年克州随着城镇化以及屯垦戍边的不断发展，持续开垦农田，加快城镇化进程，荒漠和裸地的面积有所下降，水域面积有所增加，为克州的社会经济发展起到了积极推动作用，但是人类活动可能对林地和草地等生态用地造成了一定的负面影响。

表4 研究区土地利用面积
Tab. 4 Land use area of study area

土地利用类型	面积/ km ²			
	2005 年	2015 年	2025 年 自然增长情景	2025 年 生态保护情景
耕地	1017	1220	1420	1265
林地	506	504	502	502
草地	37268	37190	37113	37164
水域	5534	5544	5554	5554
建设用地	48	65	81	81
荒漠	9358	9223	9091	9195
裸地	16055	16040	16025	16025

2015—2025 年土地利用格局变化特征与 2005—2015 年相似（图 2 和表 4），耕地、水域、建设

用地面积不断增加, 其他用地类型面积逐渐减小, 而在生态保护情景下, 草地得到了一定程度上的有效保护。2025 年耕地面积在自然增长和生态保护情景下较 2015 年分别增加了 200 km² 和 45 km², 荒漠分别减少了 132 km² 和 28 km²。作为主要生态用地的草地, 2015—2025 年面积均呈现下降的趋势, 但在生态保护的情景下得到了有效的保护, 相比于自然增长情景下增加了 51 km²。而林地、水域、建设用地和裸地在两种情景下都未发生明显变化, 但相比于 2015 年, 水域和建设用地分别增加了 10 km² 和 16 km², 林地和裸地分别减少了 15 km² 和 2 km²。

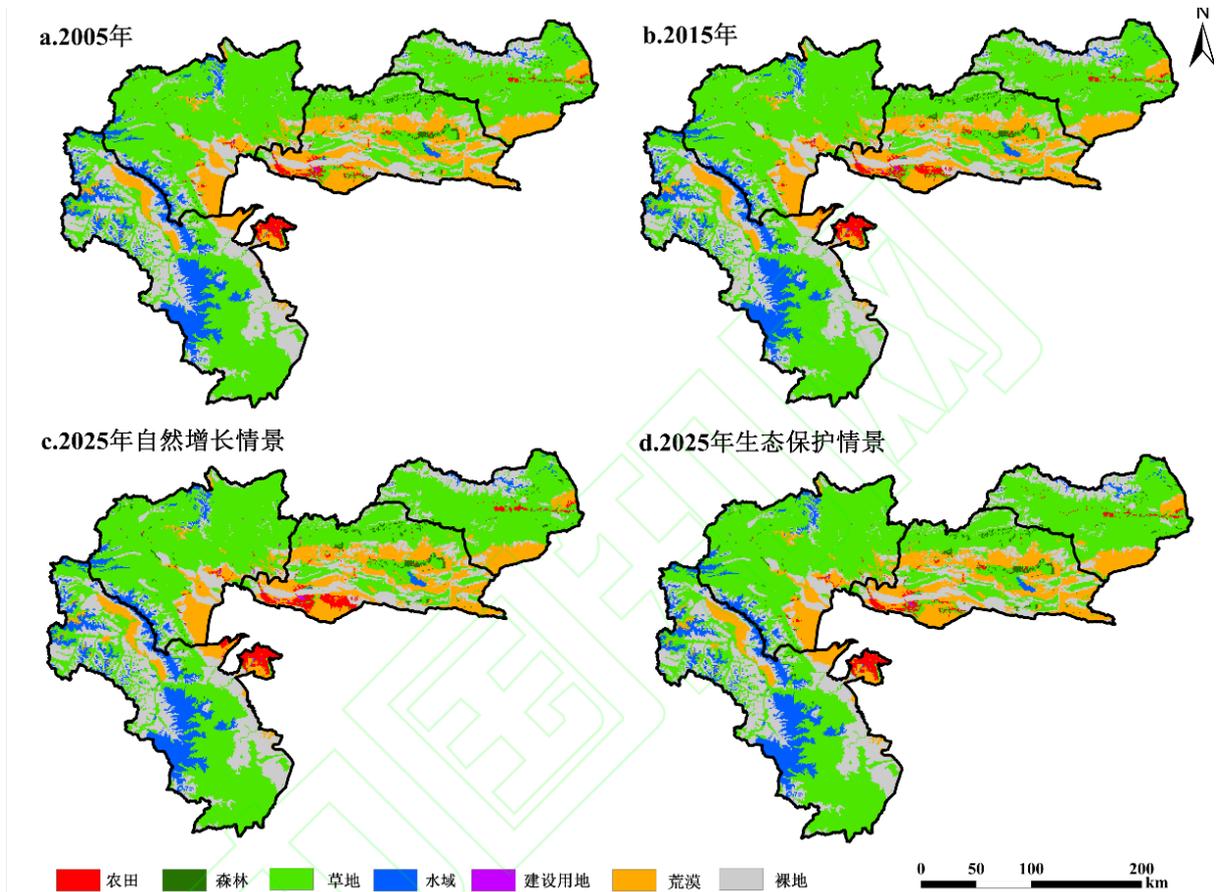


图2 研究区土地利用图
Fig. 2 Land use maps of study area

3.2 基于多情景土地利用变化模拟的景观生态风险分析

克州 2005—2015 年生态风险指数介于 12.55~18.64 之间, 均值分别为 16.84 和 16.77; 自然增长情景下, 2025 年生态风险指数介于 12.12~19.03 之间, 均值为 16.59; 生态保护情景下, 生态风险指数介于 12.3~19.27 之间, 均值为 16.73。从最大值、最小值和均值角度来看, 2015 年较 2005 年生态风险指数最大值在上升, 均值在下降, 说明 2015 年克州整体生态风险有所下降, 但局部地区生态风险激增。2025 年自然增长和生态保护情景下生态风险均值都小于 2015 年, 最值均大于 2015 年, 说明 2015—2025 年克州生态风险整体呈下降的趋势, 但同样存在局部地区生态风险激增。

2005—2015 年, 克州 Risk III 和 Risk IV 呈增加的态势 (图 3 和表 5), 分别增加 385 km² 和 317 km², Risk I、Risk II 和 Risk V 面积呈减少的态势 (-26 km²、-378 km² 和 -298 km²)。2015 年克州以 Risk III、Risk IV 和 Risk V 为主, 面积占比分别为 26.56%、25.73% 和 28.18%, 其次为 Risk II (17.44%), Risk I 面积占比最小 (2.09%)。在自然增长和生态保护情景下克州均以 Risk IV 为主, 面积占比分别为 32.87% 和 33.31%, 其次为 Risk III (30.48% 和 25.89%), Risk I 面积占比相对最小 (2.09% 和 2.32%)。

2025 年生态保护情景相比于自然增长情景, 其 Risk I、Risk II 和 Risk IV 面积均呈增加的趋势 (34 km²、1240 km² 和 66 km²), Risk III 和 Risk V 面积均呈减少的趋势 (-695 km² 和 -645 km²), 由此可见, 2015—2025 年克州生态风险整体呈现增加的趋势, 但生态保护可有效起到降低生态风险的作用。

整体来看, 克州低风险区、较低风险区及中生态风险主要分布在克州北部, 土地利用以草地为主; 高风险区主要分布在克州西南部, 土地利用以裸地和荒漠为主; 较高风险区主要围绕高风险区分

表5 不同等级景观生态风险面积
Tab. 5 Area of landscape ecological risk in different levels

级别	2005 年		2015 年		2025 年自然增长情景		2025 年生态保护情景	
	面积/km ²	比例 /%						
低生态风险 Risk I	343	2.26	317	2.09	317	2.09	351	2.32
较低生态风险 Risk II	3021	19.93	2643	17.44	2085	13.76	3325	21.94
中生态风险 Risk III	3640	24.02	4025	26.56	4619	30.48	3924	25.89
较高生态风险 Risk IV	3583	23.64	3900	25.73	4982	32.87	5048	33.31
高生态风险 Risk V	4568	30.14	4270	28.18	3152	20.80	2507	16.54

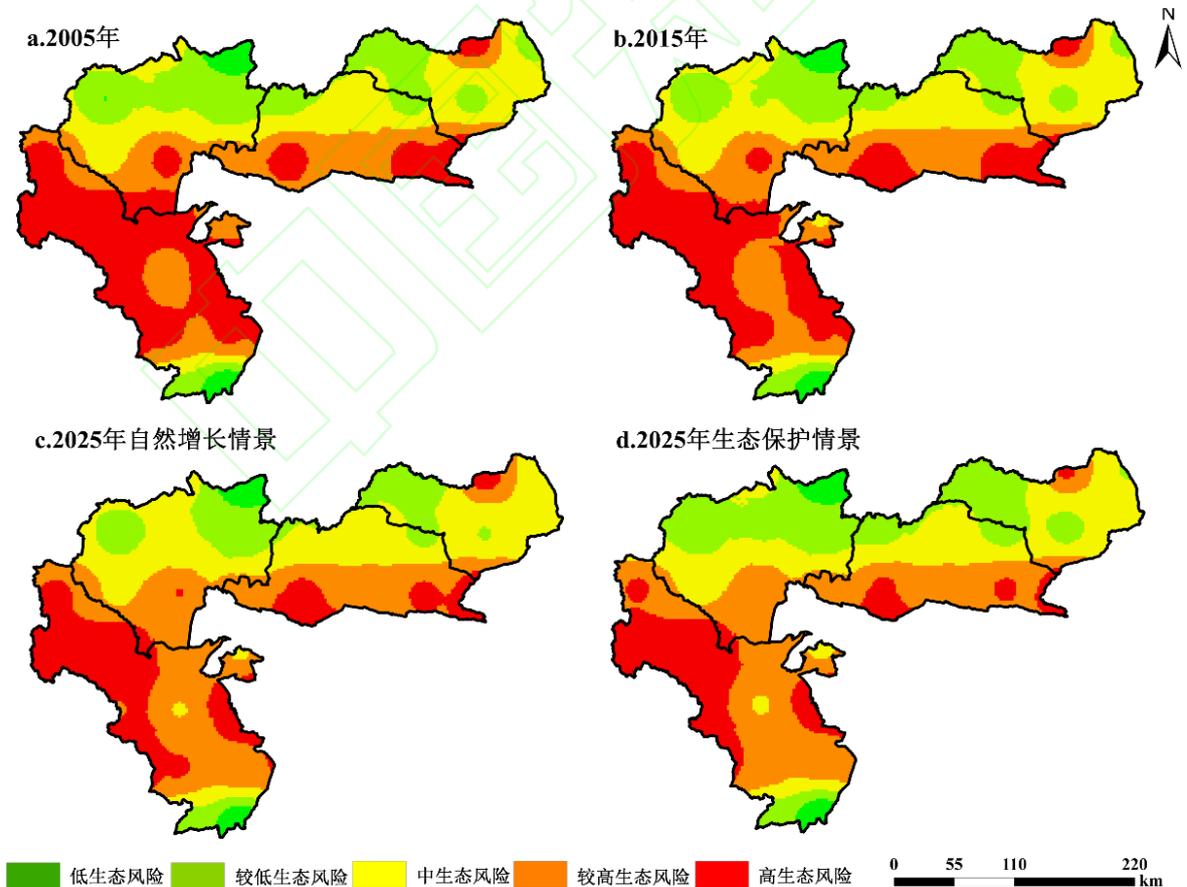


图3 生态风险空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of ecological risks

3.3 生态风险质心与标准差椭圆分析

克州景观生态风险空间格局分布在不断变化,低生态风险、较低生态风险、较高生态风险和高生态风险区呈扩张状态,分布更加分散,中生态风险呈现收缩状态,分布更加紧凑(图4)。2025年自然增长情景相比2005年,克州 Risk I 和 Risk IV 的质心分别向东北转移了 95.35 km 和 80.53 km, Risk II 质心向西北转移了 25.61 km, Risk III 质心向东南转移了 116.60 km, Risk V 质心向南转移了 51.91 km,而 Risk I、Risk II、Risk IV 和 Risk V 标准差椭圆的面积分别增加了 16628.17 km²、2214.74 km²、3839.85 km²和 11089.56 km², Risk III 标准差椭圆面积减少了 28036.8 km²,不同情景下,景观生态风险质心分布与标准差椭圆也存在差异。2025年生态保护情景较自然增长情景, Risk I 的质心向西南转移了 123.77 km, Risk II 的质心向东转移了 22.87 km, Risk III、Risk IV 和 Risk V 的质心分别向西北转移了 109.88 km、24.66 km 和 21.61 km,而 Risk II、Risk III 和 Risk V 标准差椭圆面积分别增加了 33031.41 km²、25581.25 km²和 19227.57 km², Risk II 和 Risk IV 标准差椭圆面积分别减少了 51528.45 km²和 24007.07 km²,这表明生态保护情景在一定程度上可以使 Risk II、Risk III 和 Risk V 区域分布更加分散,使 Risk I 和 Risk IV 区域分布更加聚集。

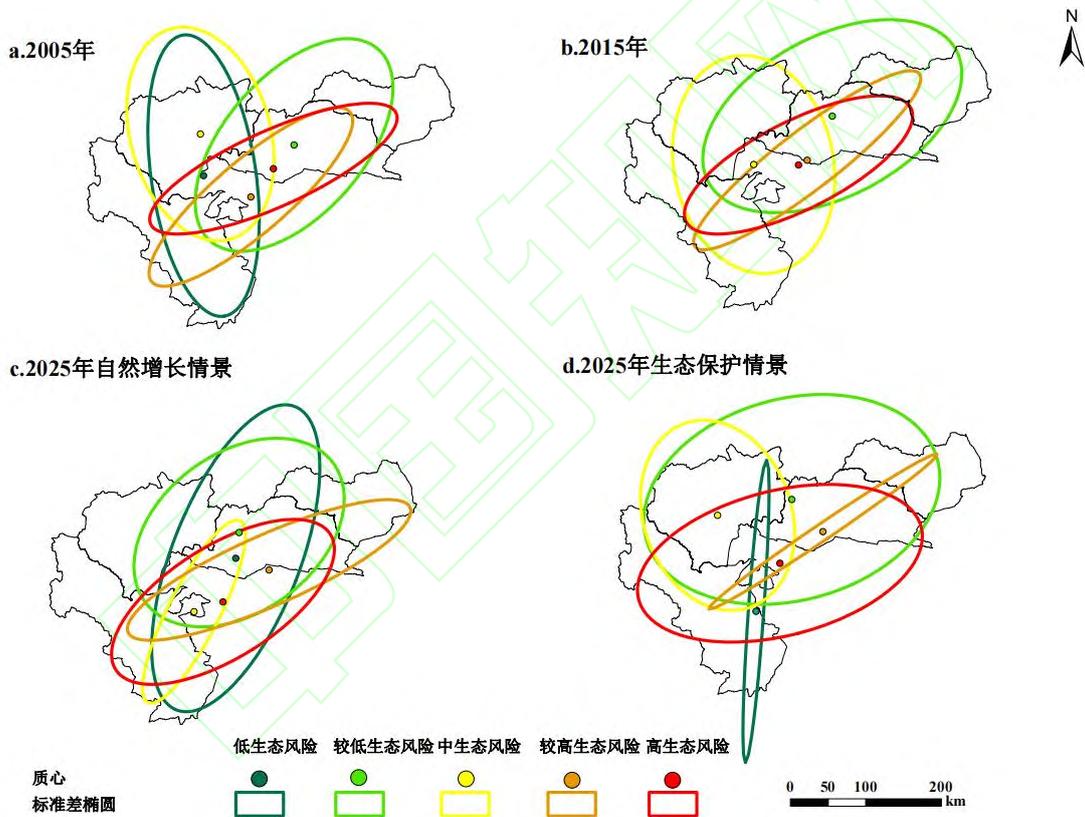


图4 生态风险质心与标准差椭圆
Fig. 4 Centroid and standard ellipse of ecological risk

3.4 景观生态风险演化驱动力分析

克州的景观生态风险演化受到自然、经济、社会等多种因素的综合影响,本研究利用 Geodetector 软件对克州 2000 年及 2015 年影响景观生态风险演化的驱动因子进行因子探测分析(表 6)。

由表 6 可知,从各因子对景观生态风险值的影响力来看,2005—2015 年自然因素的 PD 值均高于社会经济因素的 PD 值。其中温度(0.917~0.909)、降雨(0.925~0.894)、高程(0.938~0.941)、坡度(0.859~0.857)的解释力均在 85% 以上,因此,地形气候因子是影响景观生态风险演化的主要因素;其次是人口的 PD 值从 0.598 上升到 0.636,解释力均在 59% 以上,说明人口是推动景观生态风险

演化的重要因子；GDP 的 PD 值从 0.479 降至 0.131，解释力由 48% 降至 13%，表明 GDP 对景观生态风险变化的贡献减小。

表6 景观生态风险演化相关的各因子PD值

Tab. 6 PD values of various factors related to landscape ecological risk evolution

年份	温度	降雨	人口	国内生产总值	高程	坡度
2005	0.917	0.925	0.598	0.479	0.938	0.859
2015	0.909	0.894	0.636	0.131	0.941	0.857

4 讨论与结论

4.1 讨论

基于 FLUS-Markov 复合模型的应用，实现了土地利用在空间和数量上的双重模拟，充分发挥了 2 个模型在空间分布和数量预测方面的优点，克服了单一模型的弊端，在一定程度上提高了对未来土地利用空间格局预测的精度，但本研究仍存在一些关键点值得进一步探讨：

在结果精度方面，相比于张月等^[27, 36]利用 CA-Markov 模型预测新疆艾比湖土地利用/覆盖变化和利用 FLUS 模型模拟广州市土地利用变化的研究，本文充分考虑了自然和社会多种影响因素，从而提高了模拟精度。从同一研究区的土地利用模拟情况来看，本研究的模拟精度也高于于涛等^[37]对克州 2015 年土地利用的模拟精度。

在研究方法方面，对未来土地利用多情景模拟时，驱动因子的选择对模型精度影响较大。本文从自然因素和社会经济因素 2 个方面进行分析，而未来土地利用变化深受当地政策影响，在后期研究中可纳入评价，以提高 FLUS-Markov 复合模型模拟精度和分析结果的可解释性。其次，本文采用客观赋权 CRITIC 权重法对景观破碎度指标、景观分离度指标和景观优势度指标进行赋值，评价结果经野外踏勘以及与同期土地利用变更数据对比，判读合理。但在今后研究中需进一步探究客观赋权法与专家打分法对景观生态风险评价结果的具体影响，以优化评价结果。

4.2 结论

(1) 2015—2025 年土地利用格局变化特征与 2005—2015 年相似，耕地、水域、建设用地面积不断增加，其他用地类型面积逐渐减小，而在生态保护情景下，草地得到了一定程度上的有效保护，相比于自然增长情景下增加了 51 km²。

(2) 2025 年自然增长情景相比于 2005 年，低生态风险、较低生态风险、中生态风险、较高生态风险和高生态风险面积变化占比分别为-0.17%、-6.17%、6.46%、9.23%和-9.34%。生态保护情景下提高了低生态风险、较低生态风险和较高生态风险的占比。

(3) 2005—2025 年，克州景观生态风险空间格局分布在不断变化，低生态风险、较低生态风险、较高生态风险和高生态风险区呈扩张状态，中生态风险呈现收缩状态。生态保护情景在一定程度上可以使较低生态风险、中生态风险和高生态风险区域分布更加分散，使低生态风险和较高生态风险区域分布更加聚集。

(4) 基于地理探测器进行景观生态风险驱动力分析表明，温度、降雨、高程、坡度对景观生态风险变化有明显作用，人口也是影响景观生态风险演变的重要因素，而 GDP 对其的影响未达到显著水平。

参考文献：

- [1] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677. [Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Progress and prospects of landscape ecological risk assessment research[J]. Journal of Geography, 2015, 70(4): 664-677.]
- [2] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437. [Li Qingpu, Zhang Zhengdong, Wan Luwen, et al. Landscape pattern optimization of Ningjiang River basin based on landscape ecological risk assessment[J]. Journal of Geography, 2019, 74(7): 1420-1437.]
- [3] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK[J]. 地理学报, 2018,

- 73 (5): 843-855. [Cao Qiwen, Zhang Xiwen, Ma Hongkun, et al. Advances in landscape ecological risk research and ecosystem services-based evaluation framework: ESRISK[J]. Journal of Geography, 2018, 73 (5): 843-855.]
- [4] 石玉琼, 王宁练, 李团胜, 等. 榆林市景观生态风险及其时空分异[J]. 干旱区研究, 2019, 36 (2): 494-504. [Shi Yuqiong, Wang Ninglian, Li Tuansheng, et al. Landscape ecological risk and its spatiotemporal variation in Yulin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36 (2): 494-504.]
- [5] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J]. 地理学报, 2015, 70 (7): 1052-1067. [Liu Yanxu, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Ecological risk assessment of urban landscape based on a three-dimensional framework of ecological adaptive cycle[J]. Journal of Geography, 2015, 70 (7): 1052-1067.]
- [6] Mo Wenbo, Wang Yong, Zhang Yingxue, et al. Impacts of road network expansion on landscape ecological risk in a megacity, China: A case study of Beijing[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574:1000-1011.
- [7] 王晓峰, 延雨, 李月皓, 等. 银川市湿地景观演变及其驱动因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38 (3): 855-866. [Wang Xiaofeng, Yan Yu, Li Yuehao, et al. Wetland landscape evolution and its driving factors in Yinchuan[J]. Arid Zone Research, 2021, 38 (3): 855-866.]
- [8] Li Jialin, Pu Ruiliang, Gong Hongbo, et al. Evolution characteristics of landscape ecological risk patterns in coastal zones in Zhejiang Province, China[J]. Sustainability-Basel, 2017, 9(4):584.
- [9] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J]. 生态学报, 2016, 35 (3): 791-799. [Pan Jinghu, Liu Xiao. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35 (3): 791-799.]
- [10] 周亚军, 刘廷玺, 段利民, 等. 锡林河流域上游河谷湿地景观格局演变及其驱动力[J]. 干旱区研究, 2020, 37 (3): 580-590. [Zhou Yajun, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Driving force analysis and landscape pattern evolution in the up stream valley of Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2020, 37 (3): 580-590.]
- [11] Shi Hui, Yang Zhaoqing, Han Fang, et al. Assessing landscape ecological risk for a world natural heritage site: A case study of Bayanbulak in China[J]. Ecology Environment & Conservation, 2015, 24(1):269-283.
- [12] 许妍, 高俊峰, 高永年. 基于土地利用动态变化的太湖地区景观生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2011, 23 (4): 642-648. [Xu Yan, Gao Junfeng, Gao Yongnian. Landscape ecological risk assessment in Taihu Lake based on dynamic land use change[J]. Lake Science, 2011, 23 (4): 642-648.]
- [13] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape Urban Plan, 2017, 168:94-116.
- [14] 秦琦瑞, 李雪梅, 陈庆伟, 等. 基于 FLUS 模型的天山山区未来土地利用变化预估[J]. 干旱区研究, 2019, 36 (5): 1270-1279. [Qin Qirui, Li Xuemei, Chen Qingwei, et al. Prediction of future land use change in Tianshan Mountains based on FLUS model[J]. Arid Zone Research, 2019, 36 (5): 1270-1279.]
- [15] 王明常, 郭鑫, 王凤艳, 等. 基于 FLUS 的长春市土地利用动态变化与预测分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49 (6): 1795-1804. [Wang Mingchang, Guo Xin, Wang Fengyan, et al. FLUS-based analysis of land use dynamics and prediction in Changchun City[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49 (6): 1795-1804.]
- [16] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 等. 耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J]. 自然资源学报, 2019, 34 (06): 1171-1185. [Cao Shuai, Jin Xiaobin, Yang Xuhong, et al. Compound optimization of county-level land use structure and layout by coupling MOP and GeoSOS-FLUS models[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34 (06): 1171-1185.]
- [17] 孙定钊, 梁友嘉. 基于改进 Markov-CA 模型的黄土高原土地利用多情景模拟[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23 (5): 825-836. [Sun Dingzhao, Liang Youjia. Multi-scenario simulation of land use dynamic in the Loess Plateau using an improved Markov-CA model[J]. Journal of Geoinformation Science, 2021, 23 (5): 825-836.]
- [18] 李志明, 宋戈, 鲁帅, 等. 基于 CA-Markov 模型的哈尔滨市土地利用变化预测研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38 (12): 41-48. [Li Zhiming, Song Ge, Lu Shuai, et al. Change and prediction of the land use in HARBIN City based on CA-Markov model[J]. China Agricultural Resources and Zoning, 2017, 38 (12): 41-48.]
- [19] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74 (03): 446-459. [Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping, et al. Ecosystem carbon stock assessment based on land-use change scenarios: an example from the Qi River basin in the Taihang Mountains[J]. Journal of Geography, 2019, 74 (03): 446-459.]
- [20] 刘春艳, 张科, 刘吉平. 1976—2013 年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38 (11): 3729-3740. [Liu Chunyan, Zhang Ke, Liu Jiping. Changes in landscape ecological risk and drivers in the Sanjiang Plain from 1976-2013[J]. Journal of Ecology, 2018, 38 (11): 3729-3740.]
- [21] 娄妮, 王志杰, 何嵩涛. 基于景观格局的阿哈湖国家湿地公园景观生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27 (1): 233-239. [Lou Ni, Wang Zhijie, He Songtao. Landscape ecological risk assessment of Aha Lake National Wetland Park based on landscape pattern[J]. Soil and water conservation research, 2020, 27 (1): 233-239.]
- [22] 谢小平, 陈芝聪, 王芳, 等. 基于景观格局的太湖流域生态风险评估[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (10): 3369-3377. [Xie Xiaoping, Chen Zhicong, Wang Fang, et al. Ecological risk assessment of Taihu Lake basin based on landscape pattern[J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (10): 3369-3377.]
- [23] 张行, 陈海, 史琴琴, 等. 陕西省景观生态脆弱性时空演变及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37 (2): 496-505. [Zhang Hang, Chen Hai, Shi Qin, et al. [Spatiotemporal evolution and driving factors of landscape ecological vulnerability in Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2020, 37 (2): 496-505.]
- [24] 吕乐婷, 张杰, 孙才志, 等. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J]. 生态学报, 2018, 38 (16): 5952-5960. [Lv Leting, Zhang Jie, Sun Caizhi, et al. Landscape ecological risk assessment of the Shouhe River Basin based on land use change[J]. Journal of Ecology, 2018, 38 (16): 5952-5960.]
- [25] 黄木易, 何翔. 近 20 年来巢湖流域景观生态风险评估与时空演化机制[J]. 湖泊科学, 2016, 28 (4): 785-793. [Huang

- Muyi, He Xiang. Landscape ecological risk assessment and spatial and temporal evolution mechanisms in the Chaohu Lake basin over the past 20 years[J]. *Lake Science*, 2016, 28 (4) : 785-793.]
- [26] 刘世梁, 刘琦, 张兆苓, 等. 云南省红河流域景观生态风险及驱动力分析[J]. *生态学报*, 2014, 34 (13) : 3728-3734. [Liu Shiliang, Liu Qi, Zhang Zhaoling, et al. Landscape ecological risks and drivers in the Red River Basin, Yunnan Province[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 34 (13) : 3728-3734.]
- [27] 张月, 张飞, 周梅, 等. 干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (1) : 233-242. [Zhang Yue, Zhang Fei, Zhou Mei, et al. Landscape ecological risk assessment and spatial and temporal differentiation in the inland Lake Ebey region of the arid zone[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (1) : 233-242.]
- [28] 王昆, 宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. *技术经济与管理研究*, 2003 (6) : 48-49. [Wang Kun, Song Haizhou. A comparative analysis of three objective weighting methods[J]. *Technology Economics and Management Research*, 2003 (6) : 48-49.]
- [29] 李翔, 李学军. 南疆三地州自我发展能力的测度及实证分析[J]. *新疆社科论坛*, 2014 (4) : 57-62. [Li Xiang, Li Xuejun. Measurement and empirical analysis of self-development capacity of three southern Xinjiang prefectures[J]. *Xinjiang Social Science Forum*, 2014 (4) : 57-62.]
- [30] 陈海珍, 石铁柱, 郭国锋. 武汉市湖泊景观动态遥感分析(1973-2013年)[J]. *湖泊科学*, 2015, 27 (4) : 745-754. [Chen Haizhen, Shi Tiezhu, Wu Guofeng. The dynamic analysis of lake landscape of Wuhan City in recent 40 years[J]. *Lake Science*, 2015, 27 (4) : 745-754.]
- [31] 苏海民, 何爱霞. 基于RS和地统计学的福州市土地利用分析[J]. *自然资源学报*, 2010, 25 (1) : 91-99. [Su Haiming, He Aixia. Analysis of land use based on RS and geostatistics in Fuzhou City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25 (1) : 91-99.]
- [32] 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[J]. *生态学报*, 2018, 38 (9) : 3300-3310. [Wang Fang, Chen Zhicong, Xie Xiaoping. Analysis of spatial-temporal evolution and its driving forces of construction land and cultivated landscape in Taihu Lake Basin[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 38 (9) : 3300-3310.]
- [33] G.A. Achilleos. The Inverse Distance Weighted interpolation method and error propagation mechanism-creating a DEM from an analogue topographical map[J]. *Journal of Spatial Science*, 2011, 56(2): 283-304.
- [34] 卢世俊. 乌鲁木齐城市空间扩展特征及驱动机制[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*: 1-12[2021-07-23]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200119>. [Lu Shijun. Characteristics and driving mechanism of urban space expansion in Urumqi[J/OL]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*:1-12[2021-07-23]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200119>.]
- [35] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72 (1) : 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Journal of Geography*, 2017, 72 (1) : 116-134.]
- [36] 李玮麒, 兰泽英, 陈德权, 等. 广州市土地利用多情景模拟及其生态风险时空响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40 (4) : 204-210. [Li Weiqi, Lan Zeying, Chen Dequan, et al. Multi-scenario simulation of land use and its spatial-temporal response to ecological risk in Guangzhou City[J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2020, 40 (4) : 204-210.]
- [37] 于涛, 沈浩, 仲嘉亮. 基于CA-Markov模型的新疆克州土地利用动态模拟研究[J]. *新疆环境保护*, 2008 (1) : 11-14. [Yu Tao, Shen Hao, Zhong Jialiang. Dynamic analogue research of land utilization of Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture Xinjiang base on CA - Markov model[J]. *Xinjiang Environmental Protection*, 2008 (1) : 11-14.]