

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202310024



# 伊犁河谷“三生”空间景观生态风险 时空演变与多情景模拟

吴常蕊<sup>1,2</sup>, 王宏卫<sup>1,2</sup>, 罗魁<sup>1,2</sup>, 郑旭东<sup>1,2</sup>, 闫晓梅<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 地理科学与遥感学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆大学 新疆绿洲生态自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 基于伊犁河谷 1990—2020 年土地利用数据, 利用景观生态风险评价模型探析“生产-生活-生态”(“三生”)空间及景观生态风险格局时空演变特征, 借助 PLUS 模型模拟伊犁河谷 2030 年生产空间优先、生活空间优先和生态空间优先 3 种情景下“三生”空间格局及景观生态风险分布特征。结果表明: 1990—2020 年, 伊犁河谷“三生”空间以草地生态空间为主, 草地生态空间和林地生态空间面积呈减少趋势, 其余空间呈增加趋势; 1990, 2000, 2010, 2020 年景观生态风险均值分别为 0.035 5, 0.033 1, 0.034 8, 0.034 6, 伊犁河谷景观生态风险呈先下降后上升趋势, 风险等级在空间分布上呈现梯度变化; 2020—2030 年 3 种情景的景观生态风险均呈上升趋势, 景观生态风险均值从大到小为生活空间优先情景、生态空间优先情景、生产空间优先情景。

**关键词:** “三生”空间; 景观生态风险; PLUS 模型; 模拟预测; 伊犁河谷

**中图分类号:** P 901; X 826

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2024)01-0061-10

## Spatiotemporal Evolution and Multi Scenario Simulation of Ecological Risks in “Three Lives” Spatial Landscape of Ili River Valley

WU Changrui<sup>1,2</sup>, WANG Hongwei<sup>1,2</sup>, LUO Kui<sup>1,2</sup>,  
ZHENG Xudong<sup>1,2</sup>, YAN Xiaomei<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographic Science and Remote Sensing, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2. Key Laboratory of Xinjiang Oasis Ecological Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** Based on the land-use data of the Ili River Valley from 1990 to 2020, the landscape ecological risk assessment model was used to explore the spatiotemporal evolution characteristics of the “production-living-ecological”(“three lives”) spaces and landscape ecological risk patterns. The PLUS model was used to simulate the spatial patterns and the landscape ecological risk distribution characteristics of “three lives” under the three scenarios including the production space priority, the living space priority and the ecological space priority of the Ili River Valley in 2030. The results showed that, from 1990 to 2020, “three lives” spaces of Ili River Valley was dominated by the grassland ecological space, and the area of grassland ecological space and woodland ecological space showed a decreasing trend, while the remaining space showed an increasing trend. In 1990,

**收稿日期:** 2023-10-02

**通信作者:** 王宏卫(1967-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事干旱区生态环境与城乡发展的研究。E-mail: wang-hw\_777@163.com。

**基金项目:** 新疆第三次综合科学考察资助项目(2021xjkk0902)

2000,2010 and 2020, the average landscape ecological risks were 0.035 5, 0.033 1, 0.034 8 and 0.034 6, respectively. The landscape ecological risks of the Ili River Valley showed a trend of first decreasing and then increasing, and the risk levels showed a gradient change in spatial distribution. From 2020 to 2030, the landscape ecological risks showed an upward trend under the three scenarios, and the average value of landscape ecological risks which ranged from high to low were the living space, the ecological space, and the production space of priority scenarios.

**Keywords:** “three lives” space; landscape ecological risk; PLUS model; simulation prediction; Ili River Valley

美国环境保护署在 20 世纪 90 年代提出生态风险评估框架,为深入理解生态系统的稳定性和可持续性提供理论支持<sup>[1]</sup>。生态风险评估是基于现有生态风险源评估系统的潜在损害<sup>[2-3]</sup>,生态风险评估框架不仅有助于更好地管理环境,还有助于更全面地了解潜在的生态风险<sup>[4-5]</sup>。

景观生态风险评价作为生态风险评估的重要分支,强调在自然和人为的影响下的景观结构和类型<sup>[6-9]</sup>,而当前的研究主要集中于人类活动频繁的大城市和生态脆弱区域,例如,流域、行政区、城市、矿区和自然保护区等<sup>[10-16]</sup>,对于生态类型复杂的绿洲地区,特别是在“三生”空间视角下的景观生态风险变化的研究相对薄弱<sup>[17-22]</sup>。

绿洲地区作为生态系统中的亮点,其生态环境变化对整个区域的可持续发展具有重要影响<sup>[9]</sup>。然而,现有的研究大多基于短时间跨度的土地利用数据,对于长时间跨度的景观生态风险变化缺乏深入研究。因此,探讨绿洲地区长时间序列景观生态风险的演变特征及未来趋势显得尤为重要,这将有助于全面地理解和预测区域的生态环境状况。伊犁河谷不仅是新疆乃至中亚地区的生态调节枢纽,同时也是承载新疆重要社会经济发展的地理单元<sup>[23-24]</sup>。本文对伊犁河谷“三生”空间景观生态风险时空演变与多情景模拟进行研究。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

伊犁河谷位于新疆天山西部的伊犁河上游,东经 80°09′~84°56′,北纬 42°14′~44°50′。伊犁河谷东面、南面和北面都被群山环绕,地势西低东高,西宽东窄,伊犁河由东向西穿越伊犁中央。

伊犁河谷属于温带大陆性气候,气候温和湿润,年均气温为 10.4℃,年降雨量约为 417.6 mm,山区降雨量可达 600 mm,是新疆最湿润的地区。伊犁河谷农牧业发展优势明显,农牧产品丰富。随着经济发展和城镇化进程加快,人类活动对“三生”空间格局影响越来越大,生态环境长期受到人类活动干扰,进而影响着区域生态风险,以伊犁河谷为研究区域,研究区域示意图,如图 1 所示。

### 1.2 数据来源

采用 1990,2000,2010,2020 年土地利用栅格数据(30 m×30 m),年均降水、年均气温、植被覆盖度(FVC)、人均国内生产总值(GDP)、人口密度数据均为精度 1 km×1 km 的栅格数据,30 m×30 m 的均重采样。以上数据均来自中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云平台(<http://www.Gscloud.cn>),坡度和坡向由 DEM 数据衍生得到,研究区域矢量边界由中国县级行政区划边界图进行提取,距离数据由欧氏距离法计算。基于“三生”空间与土地利用主导功能的视角,结合研究区域的实际情况,归并基础数据中各用地类型<sup>[25]</sup>。

“三生”空间分类体系,如表 1 所示。

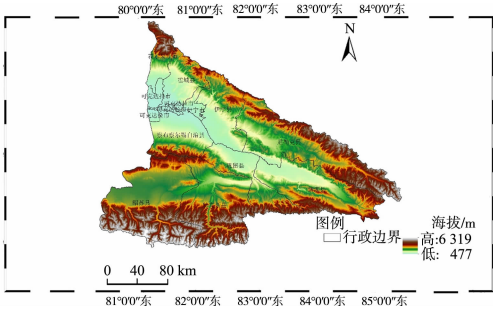


图 1 研究区域示意图

Fig.1 Sketch diagram of study area

表 1 “三生”空间分类体系

Tab. 1 Classification system of “three lives” spaces

“三生”空间分类		土地利用分类系统的二级分类
一级分类	二级分类	
生产空间	农业生产空间	旱地、水田
	工矿生产空间	其他建设用地
生活空间	城镇生活空间	城镇用地
	农村生活空间	农村居民点
生态空间	草地生态空间	低覆盖度草地、中覆盖度草地、高覆盖度草地
	林地生态空间	林地、疏林地、灌木林地、其他林地
	水域生态空间	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地
	其他生态空间	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩、其他

2 研究方法

2.1 PLUS 模型

PLUS 模型利用土地扩展分析策略(LEAS)计算研究区域各土地利用类型的增长概率,结合不同土地利用类型的像元数、转换矩阵、各土地利用类型的邻域权重和多类型随机种子(CARS)对研究区域未来土地利用进行模拟,从而确定土地扩张和景观动态变化的驱动因素<sup>[26-27]</sup>。以 2010,2020 年土地利用数据为基础,综合文献[22,28-37],从研究区域实际情况、数据可获取性和驱动因子可量化性 3 方面进行考虑,在验证 PLUS 模型精度时,不断调整因子,最终得到模拟精度较高的影响因子组合。土地利用模拟驱动因子,如图 2 所示。

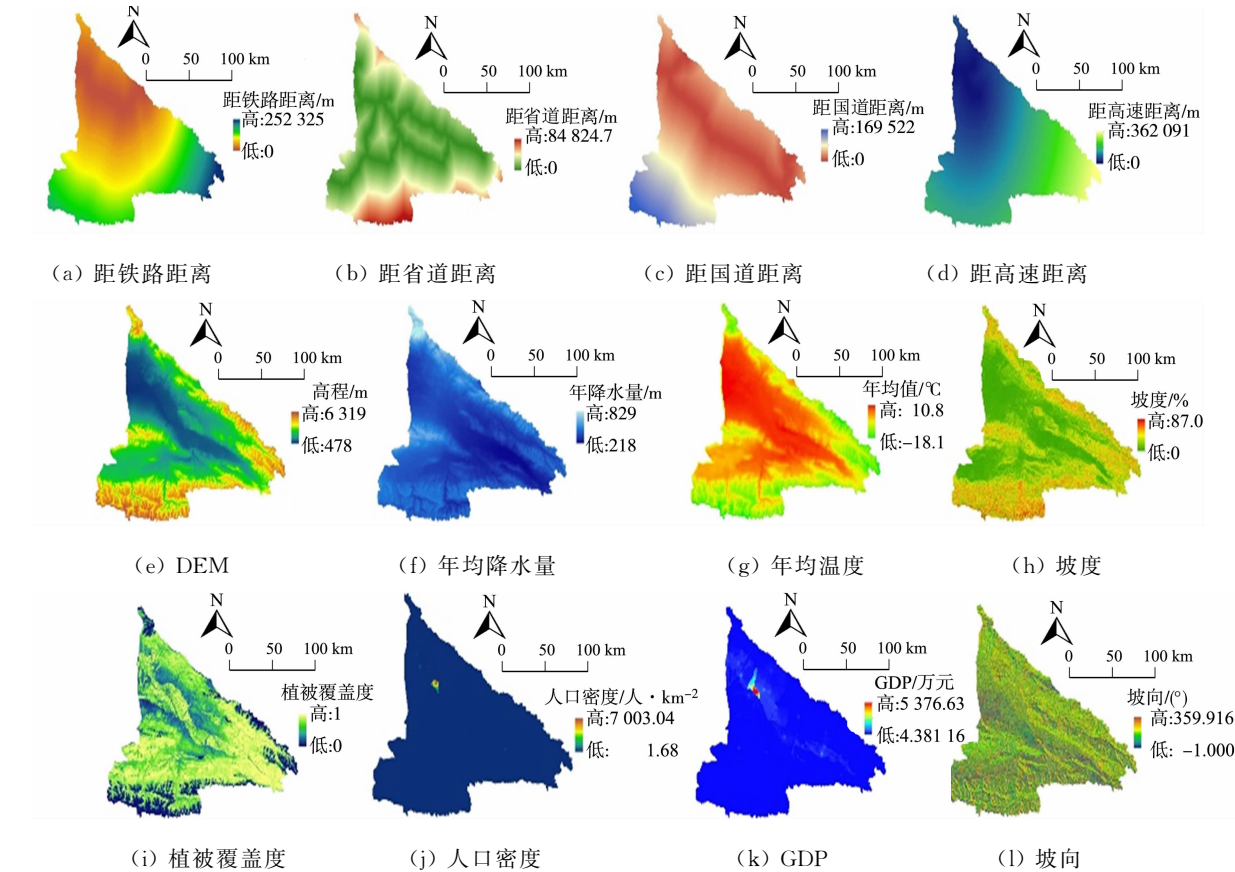


图 2 土地利用模拟驱动因子

Fig. 2 Driving factors of land-use simulation

利用 2010 年土地利用现状图,模拟得到 2020 年土地利用空间分布状态,PLUS 模型整体精度为 0.92,Kappa 系数为 0.85(>0.80)。因此,模拟结果精度较高,可对 2030 年的土地利用格局进行模拟。

综合考虑不同的发展需求,在 PLUS 模型中设置生产空间优先发展、生活空间优先发展和生态空间优先发展 3 种情景,从而模拟伊犁河谷 2030 年的土地利用格局<sup>[38-39]</sup>。转换原则设计如下:1) 生产空间优先发展情景下,农业生产空间和工矿生产空间是重要空间类型,因此,保护并扩大生产空间是这一情景的主要目标,伊犁河谷处于经济发展的重要阶段,预计生态空间向生产空间转化的可能性将提高 10%;2) 生活空间优先发展情景下,通过限制生活空间向其他空间类型转化来实现生活空间优先发展,禁止高等级空间类型向低等级空间类型转换(空间类型等级由高向低为城镇生活空间、乡村生活空间、工矿生产空间、农业生产空间、林地生态空间、草地生态空间、水域生态空间、其他生态空间);3) 生态空间优先发展情景下,将生态环境保护作为第一目标,限制城市化,将生态保护红线设为限制区,限制生态空间向其他空间类型的转出,不允许高生态效益用地向低生态效益用地转换,增加其他空间类型向生态空间的转换概率。

空间类型转换成本矩阵,如表 2 所示。表 2 中:1 表示可能转换;0 表示不可能转换;a,b,c,d,e,f,g,h 分别表示农业生产空间、工矿生产空间、城镇生活空间、农村生活空间、草地生态空间、林地生态空间、水域生态空间和其他生态空间。

表 2 空间类型转换成本矩阵  
Tab. 2 Space types conversion cost matrix

空间 类型	生产空间优先情景								生活空间优先情景								生态空间优先情景							
	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h
a	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
b	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
c	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
d	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
e	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
f	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
g	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
h	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1

参考文献[37],根据空间类型扩张面积的占比进行计算,得到不同场景下的邻域因子权重(表 3)。表 3 中: $s$  表示空间类型扩张面积; $\eta$  表示扩张面积比例(邻域因子权重)。邻域因子权重数值范围为 0~1,数值越大,表明该空间类型转化为其他空间类型难度越大,扩张能力越强;反之,则转为其他空间类型越容易。

表 3 邻域因子权重  
Tab. 3 Neighborhood factor weights

参数	农业生产空间	工矿生产空间	城镇生活空间	农村生活空间	草地生态空间	林地生态空间	水域生态空间	其他生态空间	合计
$s/\text{km}^2$	641 572	77 940	42 978	38 057	310 235	134 801	57 623	74 808	1 378 014
$\eta/\%$	46.5	5.7	3.1	2.8	22.5	9.8	4.2	5.4	100.0

2.2 景观生态风险模型

为了明确“三生”空间景观生态风险状况,基于网格采样法(格网宜采用平均斑块面积的 2~5 倍<sup>[17]</sup>),选用 3 km×3 km 的网格作为评价单元(风险小区 6 220 个),利用 Fragstats 计算各时期各单元的景观生态风险指数。将景观生态风险指数作为景观风险小区中心点的风险指数,构建景观生态风险模型<sup>[32]</sup>。评价单元  $k$  的景观生态风险指数( $I_{\text{ER},k}$ )越小,表示该评价单元的生态风险程度越低,反之,景观生态风险程度越高。 $I_{\text{ER},k}$  表达式为

$$I_{\text{ER},k} = \sum_{i=1}^N \frac{s_{k,i}}{s_k} \times I_{\text{R},i}。$$

(1)

式(1)中: $s_{k,i}$  为评价单元  $k$  中  $i$  类景观的面积; $s_k$  为评价单元  $k$  的总面积; $I_{\text{R},i}$  为  $i$  类景观的损失度指数, $I_{\text{R},i} = I_{\text{E},i} \times I_{\text{V},i}$ ,  $I_{\text{E},i}$  为  $i$  类景观干扰度指数,  $I_{\text{V},i}$  为  $i$  类景观类型的脆弱度指数。

景观干扰度指数  $I_{\text{E},i}$  表达式为

$$I_{\text{E},i} = \alpha I_{\text{C},i} + \beta I_{\text{N},i} + \gamma I_{\text{F},i}。$$

(2)

式(2)中: $I_{C,i}$ 、 $I_{N,i}$ 、 $I_{F,i}$ 分别为*i*类景观破碎度指数、分离度指数和分维数指数; $\sigma$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别为各景观指数的权重, $\alpha+\beta+\gamma=1$ , $\alpha=0.5$ , $\beta=0.3$ , $\gamma=0.2$ <sup>[29]</sup>。

景观格局指数的计算方法,如表 4 所示。

表 4 景观格局指数的计算方法

Tab. 4 Calculation methods of landscape pattern index

序号	指数	公式	生态学含义
1	$I_{C,i}$	$I_{C,i} = \frac{n_i}{s_i}$	$n_i$ 为景观类型 $i$ 的斑块个数; $s_i$ 为景观类型 $i$ 的面积; $I_{C,i}$ 越小,表明所对应的景观生态系统稳定性越高 <sup>[30]</sup> ,反之,则稳定性越低
2	$I_{N,i}$	$I_{N,i} = I_{l,i} \times \frac{s}{s_i}$ $I_{l,i} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_i}{s}}$	$I_{l,i}$ 为景观类型 $i$ 的距离指数; $s$ 为景观总面积; $I_{N,i}$ 表示在景观类型中不同斑块间的分离程度,其值越小,表明所对应的景观空间分布越简单,越完整 <sup>[31]</sup> ,反之,分布越复杂,破碎化程度越高
3	$I_{F,i}$	$I_{F,i} = \frac{2 \ln \left( \frac{p_i}{4} \right)}{\ln s_i}$	$p_i$ 为景观类型 $i$ 的周长; $I_{F,i}$ 取值范围为 1~2,其值越小,景观斑块形状越简单,反之,越复杂,当 $I_{F,i} < 1.5$ 时,景观斑块形状趋于简单,当 $I_{F,i} = 1.5$ 时,景观斑块稳定性较差(处于布朗随机运动状态),当 $I_{F,i} > 1.5$ 时,景观斑块形状复杂 <sup>[33]</sup>
4	$I_{V,i}$	专家咨询 并归一化	其他生态空间权重赋值为 8,水域生态空间为 7,农业生产空间为 6,草地生态空间为 5,林地生态空间为 4,工矿生产空间为 3,农村生活空间为 2,城镇生活空间为 1,归一化处理得到伊犁河谷各景观类型的脆弱度指数,其值表示某景观类型受到外界干扰后的敏感程度 <sup>[34]</sup>

### 3 研究结果与分析

#### 3.1 土地利用变化分析

1990—2020 年,伊犁河谷主要用地为草地生态空间(GES),占地面积可达 60%以上。伊犁河谷农业生产空间(APS)、工矿生产空间(IPS)、城镇生活空间(ULS)、农村生活空间(RLS)、水域生态空间(WES)和其他生态空间(OES)面积呈增加趋势,分别增加 1 687.49,84.99,73.36,1.06,49.85,75.96 km<sup>2</sup>;草地生态空间和林地生态空间(FES)面积则呈减少趋势,分别减少了 1 733.38,245.68 km<sup>2</sup>。空间类型转移图,如图 3 所示。

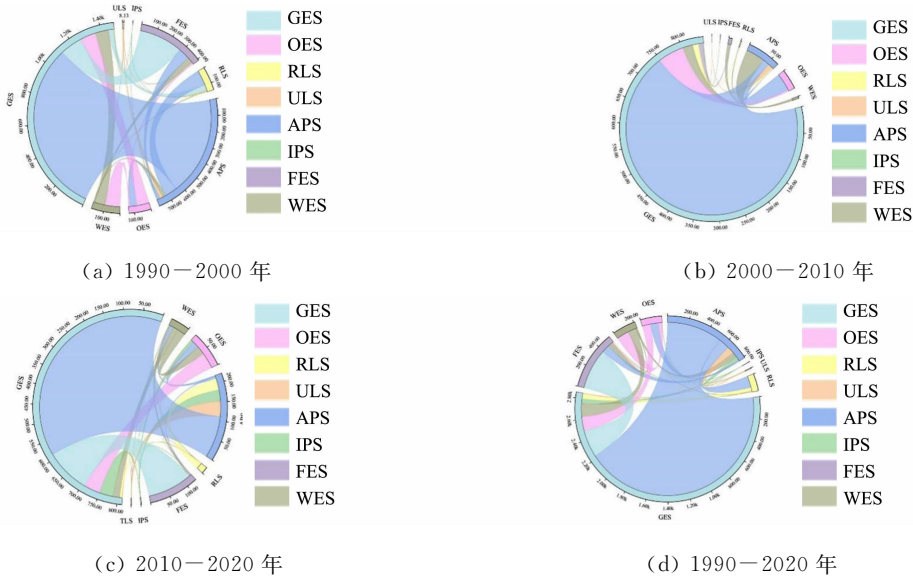


图 3 空间类型转移图

Fig. 3 Space types of transfer diagram

由图 3 可知:1990—2020 年,内伊犁河谷以草地生态空间与农业生产空间、林地生态空间、其他生态空间相互转换为主。草地生态空间转为农业生产空间的面积最多(448.56 km<sup>2</sup>),占草地生态空间转出总面积的 78.36%,农业生产空间转为草地生态空间的面积为 537.64 km<sup>2</sup>,占农业生产空间转出总面



积的 66.12%。这表明伊犁河谷“三生”空间的变化以草地生态空间的转出、转入为主导。

3.2 景观生态风险时空演变分析

1990—2020 年景观生态风险,如图 4 所示。基于自然断点法将生态风险统一分为 5 个等级的生态风险区,即低风险区域( $I_{ER} \leq 0.015\ 6$ )、较低风险区域( $0.015\ 6 < I_{ER} \leq 0.025\ 9$ )、中风险区域( $0.025\ 9 < I_{ER} \leq 0.036\ 2$ )、较高风险区域( $0.036\ 2 < I_{ER} \leq 0.046\ 4$ )和高风险区域( $I_{ER} > 0.046\ 4$ )。

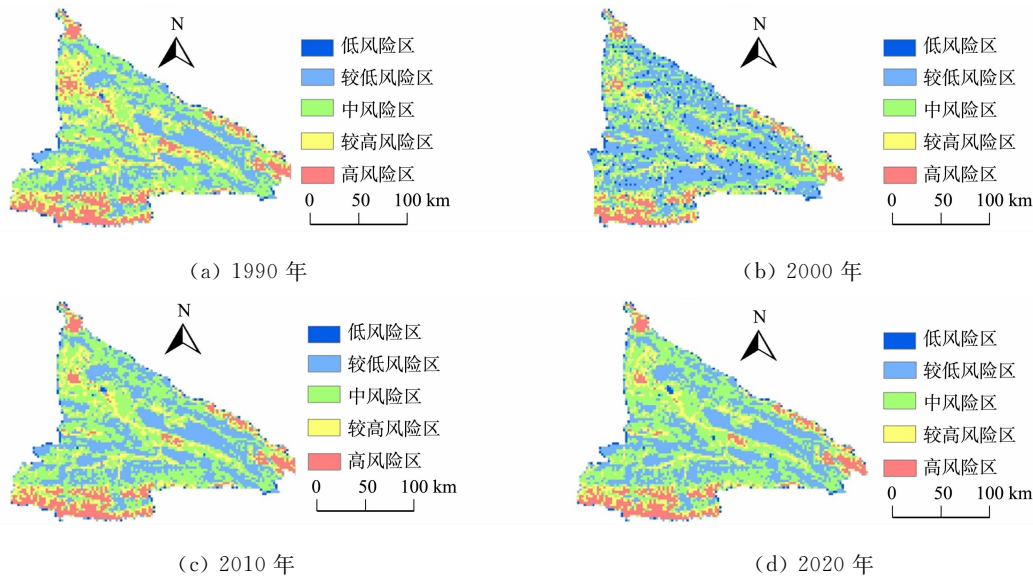


图 4 1990—2020 年景观生态风险

Fig. 4 Landscape ecological risk from 1990 to 2020

从时间尺度上看,1990 年, $I_{ER}$  为 0.005 5~0.060 4,其平均值为 0.035 5;2000 年, $I_{ER}$  为 0.005 5~0.057 8,其平均值为 0.033 1;2010 年, $I_{ER}$  为 0.005 5~0.056 8,其平均值为 0.034 8;2020 年, $I_{ER}$  为 0.005 3~0.056 7,其平均值为 0.034 6。

从空间分布上看,1990 年,高风险区域主要分布于伊犁河谷最北部、东部、南部的山地区域(图 4 (a)),此区域以其他生态空间为主,包括积雪等,景观类型较复杂,景观损失度和景观脆弱度均较大,故景观生态风险较高;较高风险区域的分布以高风险区域为中心,向四周扩散分布,主要沿伊犁河、特克斯河及巩乃斯河分布,河岸区域以农业生产空间为主,生产空间和生活空间零散分布其中,人类活动干扰较强,景观斑块趋于破碎和零散;中、较低风险区主要分布于谷地,该区域以林地生态空间和草地生态空间为主,连片分布,降水充足,气候适宜,人类活动干扰相对较小,因此,景观生态风险较低;低风险区域的面积占比极小,仅为 1.53%,集中分布于伊宁市东南部,是由于该区域中城镇生活空间集中分布,景观类型单一,斑块数少,破碎度极低,因此,景观生态风险低。2000 年,中、较高、高风险区域面积显著减少(图 4(b)),分别减少 3 771,2 889,2 358  $\text{km}^2$ ,分布范围明显收缩,而较低、低风险区面积显著增加,分别增加 2 187,6 831  $\text{km}^2$ ,低风险区的大量分布于各个县市,虽仍是星点状分布,但数量和面积均增加,这得益于退耕还林、还草政策的实施。2010 年,中、较高、高风险区域的面积增加(图 4(c)),分别增加 5 301,594,1 269  $\text{km}^2$ ,较低、低风险区域的面积分别减少 2 124,5 040  $\text{km}^2$ ,较高、高风险区域的分布更为集中,低风险区域仅分布在伊宁市、昭苏县、新源县及研究区边缘。2020 年风险区的分布与 2010 年相似(图 4(d)),变化较小,低风险区域在巩留县也有分布,位于伊宁市的低风险区面积增加。此外,伊犁河谷的景观生态风险分布呈现出以高风险区为中心,较高风险区、中风险区、较低风险区、低风险区依次出现的特征。总的来说,1990—2020 年,低风险区主要集中于新疆伊宁市且呈扩张趋势。

景观生态风险面积统计,如表 5 所示。由表 5 可知:1990—2000 年,低风险区与较低风险区的面积占比由 31.98%上升到 48.08%,中风险区面积占比由 35.88%降到 29.15%,较高风险区面积和高风险区面积占比由 32.14%降低到 22.77%,这个阶段以较低风险区面积上升,中风险区面积下降为主,景观生态风险显著降低;2000—2020 年,景观生态风险明显上升,其中,2010—2020 年有略微下降,但不明显,2000—2020 年的低和较低风险区面积占比共降低 12.52%,中风险区面积增速较快(增加 10.67%),

较高风险区面积先增加后减少(减少 0.26%),高风险区面积占比减少 2.11%,伊犁河谷景观生态风险分布主要以中风险为主,景观生态风险高值虽有降低,高值区面积有缩减,但整体景观生态风险仍呈上升趋势。

表 5 景观生态风险面积统计  
Tab. 5 Landscape ecological risk area statistics

风险区等级	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年	
	s/km <sup>2</sup>	η/%	s/km <sup>2</sup>	η/%	s/km <sup>2</sup>	η/%	s/km <sup>2</sup>	η/%
低风险区	855	1.53	3 042	5.43	918	1.64	999	1.78
较低风险区	17 046	30.45	23 877	42.65	18 837	33.65	18 909	33.78
中风险区	20 088	35.88	16 317	29.16	21 618	38.62	22 293	39.83
较高风险区	11 124	19.87	8 235	14.71	8 829	15.77	8 091	14.45
高风险区	6 867	12.27	4 509	8.05	5 778	10.32	5 688	10.16
合计	55 980	100.00	55 980	100.00	55 980	100.00	55 980	100.00

3.3 伊犁河谷土地利用生态风险预测

3.3.1 3 种情景的“三生”空间分布预测 3 种情景的“三生”空间分布图,如图 5 所示。由图 5(a),(b)可知:PLUS 模型模拟精度较高。由图 5(c)可知:2030 年,农业生产空间和工矿生产空间的扩张加剧,面积分别增加了 391.19,72.60 km<sup>2</sup>,伊犁河谷有 362.18 km<sup>2</sup> 的草地生态空间转向农业生产空间和工矿生产空间。由图 5(d)可知:伊犁河谷已经存在城市化趋势,伊犁河谷的生态空间和生活空间均扩张,增加面积分别为 526.21,61.21 km<sup>2</sup>,伊犁河谷其他生态空间和生产空间均有所缩减,分别减少了 26.98,589.29 km<sup>2</sup>,各县市的生产空间面积均减少。由图 5(e)可知:伊犁河谷的城市用地扩张受到明显抑制,生活空间、生产空间面积都呈减少趋势,共缩减 578.15 km<sup>2</sup>,草地生态空间和林地生态空间面积分别增加 561.58,58.82 km<sup>2</sup>,而水域生态空间和其他生态空间面积分别减少 8.36,26.78 km<sup>2</sup>。

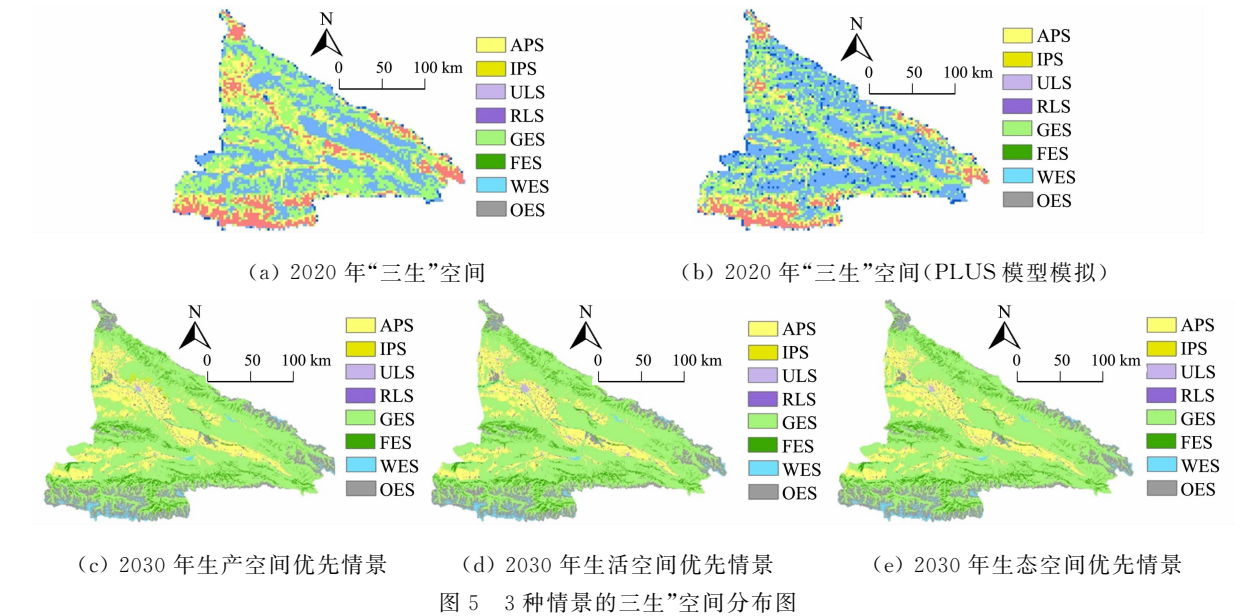


图 5 3 种情景的“三生”空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution diagrams of “three lives” of three scenarios

3.3.2 基于土地利用的景观生态风险预测 从空间分布来看,2030 年,生产空间优先情景、生活空间优先情景、生态空间优先情景的生态风险分布特征与 2020 年相差较小,研究区特殊的三山夹两谷的地形特征对风险区分布有较大影响。

3 种情景的景观生态风险等级面积,如表 6 所示。由表 6 可知:3 种情景的中风险区均占比最大,分别为 37.14%,41.07%,40.73%,面积为 20 790,22 995,22 797 km<sup>2</sup>;3 种情景的低风险区占比最小,分别为 1.50%,1.58%,1.46%,面积为 837,882,819 km<sup>2</sup>;生产空间优先情景下低和较低风险区面积最小(15 732 km<sup>2</sup>),高和较高生态风险面积最大(19 458 km<sup>2</sup>),生态空间优先情景下的低和较低风险区面积最大(16 488 km<sup>2</sup>),高和较高风险区面积最小(16 695 km<sup>2</sup>)。

表 6 3 种情景的景观生态风险等级面积  
Tab. 6 Areas of landscape ecological risk level under three scenarios

景观生态风险区	生产空间优先情景		生活空间优先情景		生态空间优先情景	
	$s/\text{km}^2$	$\eta/\%$	$s/\text{km}^2$	$\eta/\%$	$s/\text{km}^2$	$\eta/\%$
低风险区	837	1.50	882	1.58	819	1.46
较低风险区	14 895	26.61	15 246	27.23	15 669	27.99
中风险区	20 790	37.14	22 995	41.07	22 797	40.73
较高风险区	12 087	21.58	10 152	18.14	9 981	17.83
高风险区	7 371	13.17	6 705	11.98	6 714	11.99
合计	55 980	100.00	55 980	100.00	55 980	100.00

2030 年 3 种情景的景观生态风险,如图 6 所示。

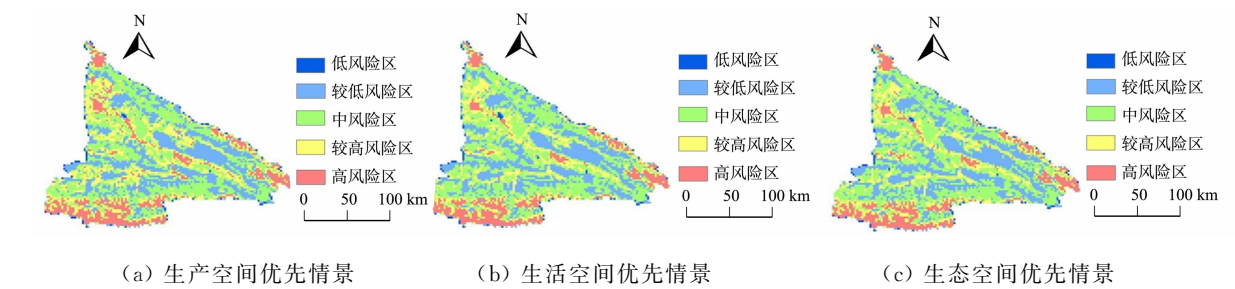


图 6 2030 年 3 种情景的景观生态风险

Fig. 6 Landscape ecological risks of three scenarios in 2030

生产空间优先情景的景观生态风险范围为 0.005 6~0.063 1,均值为 0.036 093 235(3 种情景中最高),区域整体景观生态风险等级明显升高,中风险等级向较高风险转移面积最多(5 490 km<sup>2</sup>),风险等级上升、不变、下降区域分别为风险恶化区(风险恶化区域较大,占研究区面积的 20.74%,呈星点状分布,河岸地区的分布相对集中)、稳定区(面积为 44 253 km<sup>2</sup>,占比为 79.05%)、改善区(位于新疆察布查尔锡自治县的西北角,面积仅有 117 km<sup>2</sup>,占比 0.21%)。

生活空间优先情景的景观生态风险范围为0.005 6~0.058 4,均值为 0.035 628 9 3,整体生态风险虽仍呈上升趋势,但以较低风险转向中风险为主,面积为 3 870 km<sup>2</sup>,风险恶化区、改善区、稳定区面积分别为 8 136,198,47 646 km<sup>2</sup>。

生态空间优先情景的景观生态风险也呈升高态势,景观生态风险值为 0.005 6~0.062 7,均值为 0.035 627 599,风险转移特征与生活空间优先情景相似,风险恶化区、改善区、稳定区面积分别为7 677, 198,48 105 km<sup>2</sup>。

因此,虽然 3 种情景中生活空间优先情景的景观生态风险均值最低,但从风险区面积占比来看,生态空间优先情景下伊犁河谷的整体生态风险最低。

3 结论

- 1) 1990—2020 年,伊犁河谷“三生”空间以草地生态空间为主,占地面积达 60%以上。伊犁河谷农业生产空间、工矿生产空间、城镇生活空间、农村生活空间、水域生态空间和其他生态空间面积增加,草地生态空间和林地生态空间面积则减少。
- 2) 1990—2020 年,景观生态风险降低,这一时期景观生态风险均值呈现减小趋势;2000—2020 年,景观生态风险明显上升,均值虽有波动但不明显。
- 3) 2020—2030 年,生产空间优先情景下,区域整体生态风险等级明显升高,中风险等级向较高风险转移面积最多。生活空间优先情景下,整体生态风险虽仍呈升高趋势,但风险转移特征以较低风险转向中风险为主。生态空间优先情景下,景观生态风险也呈升高态势,风险转移特征与生活空间优先情景相似,伊犁河谷整体生态风险最低。这是由于 20 世纪 90 年代中期以来,国家西部大开发从政策的角度鼓励了新疆土地的开发<sup>[40-45]</sup>。



参考文献:

[1] TIAN Peng, LI Jialin, GONG Hongbo, *et al.* Research on land use changes and ecological risk assessment in Yongjiang River Basin in Zhejiang Province, China[J]. Sustainability, 2019, 11 (10): 2817. DOI: 10. 3390/su11102817.

[2] PENG Jian, ZONG Minli, HU Yina, *et al.* Assessing landscape ecological risk in a mining city: A case study in Liaoyuan City, China[J]. Sustainability, 2015, 7(7): 8312-8334. DOI: 10. 3390/su7078312.

[3] CUI Lu, ZHAO Yonghua, LIU Jianchao, *et al.* Landscape ecological risk assessment in Qinling Mountain[J]. Geological Journal, 2018, 53: 342-351. DOI: 10. 1002/gj. 3115.

[4] CHEN Gong, LI Qi, PENG Fei, *et al.* Henan ecological security evaluation using improved 3D ecological footprint model based on emergy and net primary productivity[J]. Sustainability, 2019, 11 (5): 1353. DOI: 10. 3390/su11051353.

[5] YAN Yichen, JU Hongrun, ZHANG Shengrui, *et al.* The construction of ecological security patterns in coastal areas based on landscape ecological risk assessment: A case study of Jiaodong Peninsula, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(22): 12249. DOI: 10. 3390/ijerph182212249.

[6] LIU Di, CHEN Hai, ZHAN Hang, *et al.* Spatiotemporal evolution of landscape ecological risk based on geomorphological regionalization during 1980-2017: A case study of Shaanxi Province, China[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 941. DOI: 10. 3390/su12030941.

[7] YANG Yang, SPYROU B, WHITE J M, *et al.* Palladium-mediated CO<sub>2</sub> extrusion followed by insertion of allene: Translating mechanistic studies to develop a one-pot method for the synthesis of alkenes[J]. Organometallics, 2020, 39(3): 453-467.

[8] 王洁, 摆万奇, 田国行. 土地利用生态风险评价研究进展[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 576-585. DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20200306.

[9] 高星, 刘泽伟, 李晨曦, 等. 基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7113-7122. DOI: 10. 5846/stxb202002240325.

[10] 陈慧敏, 周冬梅, 张军, 等. 基于景观格局的渭河流域甘肃段生态风险评价[J]. 农业工程, 2022, 12(11): 72-79.

[11] 刘可喧, 王冬梅, 魏源送, 等. 密云水库流域多尺度景观生态风险时空演变趋势[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 105-117.

[12] 修扬景, 侯蒙京, 田骄阳, 等. 基于土地利用/覆盖的甘肃省景观生态风险时空变化特征[J]. 草业学报, 2023, 32(1): 1-15. DOI: 10. 11686/cyxb2021298.

[13] 翟培秀, 李飞雪, 邱小倩, 等. 长三角地区景观生态风险时空演变评估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 245-255.

[14] 王玲, 汪森. 成渝城市群景观生态风险演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3): 626-637.

[15] 杨庚. 景观格局演变背景下晋北大型露天矿区生态系统弹性与风险评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.

[16] 乔斌, 曹晓云, 孙玮婕, 等. 基于生态系统服务价值和景观生态风险的生态分区识别与优化策略: 以祁连山国家公园青海片区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 986-1004.

[17] 陈心怡, 谢跟踪, 张金萍. 海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 975-986. DOI: 10. 5846/stxb201909211974.

[18] CHEN Jian, DONG Bin, LI Haoran, *et al.* Study on landscape ecological risk assessment of hooded crane breeding and overwintering habitat[J]. Environmental Research, 2020, 187(4): 109649. DOI: 10. 1016/j. envres. 2020. 109649.

[19] 何钊全, 尚雪, 张铜会, 等. 近 20 年陕北黄土丘陵区景观生态风险时空变化及其冷热点格局[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2514-2525. DOI: 10. 13292/j. 1000-4890. 202310. 007.

[20] 王敏, 胡守庚, 张绪冰, 等. 干旱区绿洲城镇景观生态风险时空变化分析: 以张掖绿洲乡镇为例[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5812-5824. DOI: 10. 5846/stxb202105111234.

[21] 袁雪松, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 基于 FLUS 模型粤港澳大湾区“三生空间”多情景模拟预测[J]. 地理科学, 2023, 43(3): 564-574. DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2023. 03. 018.

[22] 赵霖雨, 崔柳, 王佳, 等. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究: 以湛江市中心城区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6307-6320.

[23] 康紫薇, 张正勇, 位宏, 等. 基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6472-6485. DOI: 10. 5846/stxb201908191731.

- [24] 樊影,王宏卫,杨胜天,等. 基于生境质量和生态安全格局的阿勒泰地区生态保护关键区域识别[J]. 生态学报, 2021,41(19):7614-7626. DOI:10.5846/stxb202011202987.
- [25] 杨清可,段学军,王磊等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J]. 地理科学,2018,38(1):97-106. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2018.01.011.
- [26] LIU Shishi,SU Hang,CAO Guofeng,*et al.* Learning from data: A post classification method for annual land cover analysis in urban areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2019,154(8):202-215. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2019.06.006.
- [27] YAO Yao,LIU Xiaoping,LI Xia,*et al.* Simulating urban land-use changes at a large scale by integrating dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata[J]. International Journal of Geographical Information Science,2017,31(12):2452-2479. DOI:10.1080/13658816.2017.1360494.
- [28] 王子尧,黄楚梨,李惊,等. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J]. 生态学报,2022,42(14):5789-5798. DOI:10.5846/stxb202108202319.
- [29] 靳甜甜,张云霞,朱月华,等. 黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性:以子午岭区为例[J]. 应用生态学报,2021,32(5):1623-1632. DOI:10.13287/j.1001-9332.202105.030.
- [30] 高宾,李小明,李志刚,等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报,2011,31(12):3441-3450.
- [31] PENG Jian,WANG Yanglin,ZHANG Yuan,*et al.* Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns[J]. Ecological Indicators,2010,10(2):217-223.
- [32] 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.
- [33] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J]. 生态学报,2007(4):1257-1264. DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2007.04.001.
- [34] 孙才志,闫晓露,钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报,2014,34(2):247-257. DOI:10.5846/stxb201303200465.
- [35] 孔冬艳,陈会广,吴孔森. 中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素[J]. 自然资源学报,2021,36(5):1116-1135. DOI:10.31497/zrzyxb.20210503.
- [36] 姜昕彤,翟石艳,王铮,等. 基于未来土地利用模拟模型的郑州市“三生空间”模拟及生态环境效应分析[J]. 生态学报,2023,43(15):6225-6242.
- [37] 柳梦琪. 基于 PLUS 模型的老挝土地利用格局时空演变及模拟预测研究[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
- [38] 陈鸿基,杨庆媛,彭立娟,等. 三峡库区县域“三生空间”时空演变特征与情景模拟[J]. 农业工程学报,2022,38(13):285-294.
- [39] 苏迎庆,刘庚,赵景波,等. 基于 FLUS 模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. 干旱区研究,2021,38(4):1152-1161.
- [40] 李万年,曹月娥,张婷婷. 基于 GIS 的伊犁河谷 2000—2010 年土地利用的动态变化[J]. 湖北农业科学,2017,56(20):3853-3858. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2017.20.016.
- [41] 贺可,吴世新,杨怡,等. 近 40 a 新疆土地利用及其绿洲动态变化[J]. 干旱区地理,2018,41(6):1333-1340.
- [42] 谈旭,王承武. 伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J]. 应用生态学报,2023,34(10):2747-2756. DOI:10.13287/j.1001-9332.202310.021.
- [43] 郑艺文,刘晓煌,熊茂秋,等. 1990—2018 年新疆“三生”用地时空变化特征及其碳排放效应[J]. 草业科学,2022,39(12):2565-2577.
- [44] LIANG Xun,GUAN Qingfeng,CLARKE K C,*et al.* Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers Environment and Urban Systems,2021,85:101569. DOI:10.1016/j.compenvurbysys.2020.101569.
- [45] 牛统莉,熊立华,陈杰,等. 基于 PLUS 模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J]. 生态学报,2022,42(10):3947-3958.

(责任编辑: 陈志贤)

英文审校: 刘源岗)