

doi: 10.12029/gc20231121001

陈武迪, 刘晓煌, 李洪宇, 孙兴丽, 王玉刚, 刘晓洁, 邢莉圆, 王然, 雒新萍, 王超, 赵宏慧. 2024. 新疆天山 1990—2050 年生态系统服务功能及安全格局[J]. 中国地质, 51(5): 1644–1663.

Chen Wudi, Liu Xiaohuang, Li Hongyu, Sun Xingli, Wang Yugang, Liu Xiaojie, Xing Liyuan, Wang Ran, Luo Xinping, Wang Chao, Zhao Honghui. 2024. Ecosystem service function and security pattern of Tianshan Mountains in Xinjiang from 1990 to 2050[J]. Geology in China, 51(5): 1644–1663(in Chinese with English abstract).

## 新疆天山 1990—2050 年生态系统服务功能及安全格局

陈武迪<sup>1,2</sup>, 刘晓煌<sup>2,3</sup>, 李洪宇<sup>2,3</sup>, 孙兴丽<sup>4</sup>, 王玉刚<sup>5,6</sup>, 刘晓洁<sup>7</sup>, 邢莉圆<sup>2,3</sup>, 王然<sup>2,3</sup>,  
雒新萍<sup>2,3</sup>, 王超<sup>2,3</sup>, 赵宏慧<sup>2,3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074; 2. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055; 3. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055; 4. 河北地质大学自然资源资产资本研究中心, 河北石家庄 050031; 5. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011; 6. 中国科学院阜康荒漠生态系统国家野外科学观测站, 新疆阜康 831505; 7. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**【研究目的】在全球气候变化和人类活动不断扩展的背景下, 自然生态系统及其提供的服务功能面临着日益严重的威胁和衰退。为应对这一挑战, 确定并保护对生态可持续性具有重大价值的关键地点变得至关重要。生态安全格局是指一种全面策略和方法, 旨在保障区域生态可持续性。【研究方法】本研究基于 In-VEST 模型、PLUS 模型和电路理论等, 对西北干旱区天山地区生态系统服务与生态安全格局(ESP)的动态变化进行了评价。【研究结果】1990—2050 年土地利用/覆盖变化(LUCC)空间分布上基本稳定。近 30 年来总转换面积为  $32.52 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 主要是荒地和草地之间的转化。与 2020 年相比, 2050 年自然增长(ND)、生态保护(EP)和城市发展(UD)情景下的土地总转换面积分别为  $21.43 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $23.09 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $22.87 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 其中林地面积净增加的最多, 主要由草地转化而成。EP 情景下林地、草地和水体面积增加。其他两种情景下建设用地和耕地面积大幅扩大。与 ND 和 UD 情景相比, EP 情景的生态系统服务功能更大。1990—2050 年天山地区 ESP 存在明显的空间差异, 较大的生态源和较小的阻力廊道主要分布在天山地区生态系统服务功能较高的中部和北部。相反, 破碎的生态源和较大的抗性廊道大多分布在被沙地、裸地或山地阻隔的西部地区。东南部为荒漠地区, 没有生态源, 缺乏生态廊道。近 30 年来, 生态源区面积减少了  $1.84 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 呈现破碎化趋势, 生态网络更加复杂。与 2020 年相比, 2050 年 EP 情景下的生态源面积和夹点面积分别增加  $10.53 \times 10^3 \text{ km}^2$  和  $0.11 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 生态障碍带点面积减少  $0.38 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。除 EP 场景外, 其余两种情景的生态源面积也有所增加, 但低于 EP 场景。【结论】生态保护情景在塑造 LUCC 的过程中起到了重要的作用, 对维护生态安全和生态系统的完整性具有极大的意义。

**关键词:** 土地利用类型模拟; 生态系统服务; 生态地质调查工程; 生态安全格局; 电路理论

**创新点:** (1)通过量化过去和未来生态系统服务来构建生态源和阻力面; (2)对未来土地利用类型模拟, 构建 2050 年不同情境下的生态安全格局; (3)揭示 1990—2050 年天山地区不同时期的生态安全格局动态变化特征。

中图分类号: X171.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1644-20

收稿日期: 2023-11-21; 改回日期: 2024-02-17

基金项目: 科技部第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk090405, 2021xjkk140104)和中国地质调查局项目(DD20230514)联合资助。

作者简介: 陈武迪, 男, 2000 年生, 硕士生, 主要从事资源与环境、自然资源观测研究; E-mail: 1830708775@qq.com。

通讯作者: 刘晓煌, 男, 1972 年生, 正高级工程师, 主要从事自然资源观测研究; E-mail: liuxh19972004@163.com。

## Ecosystem service function and security pattern of Tianshan Mountains in Xinjiang from 1990 to 2050

CHEN Wudi<sup>1,2</sup>, LIU Xiaohuang<sup>2,3</sup>, LI Hongyu<sup>2,3</sup>, SUN Xingli<sup>4</sup>, WANG Yugang<sup>5,6</sup>, LIU Xiaojie<sup>7</sup>, XING Liyuan<sup>2,3</sup>, WANG Ran<sup>2,3</sup>, LUO Xiping<sup>2,3</sup>, WANG Chao<sup>2,3</sup>, ZHAO Honghui<sup>2,3</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Natural Resource Coupling Process and Effects, Beijing 100055, China; 3. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China; 4. Hebei University of Geosciences, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 5. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 6. National Fukang Desert Ecosystem Field Sciences Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831505, Xinjiang, China; 7. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** This paper is the result of ecological geological survey engineering.

**[Objective]** Under the background of global climate change and the continuous expansion of human activities, natural ecosystems and their service functions are facing increasingly serious threats and recessions. In order to address this challenge, it is critical to identify and protect key sites that are of great value to ecological sustainability. Ecological security pattern refers to a comprehensive strategy and method to ensure regional ecological sustainability. **[Methods]** Based on the In-VEST model, PLUS model and circuit theory, this study evaluated the dynamic changes of ecosystem services and ecological security pattern (ESP) in the Tianshan Mountains in the arid region of Northwest China. **[Results]** The spatial distribution of land use type (LUCC) was basically stable from 1990 to 2050. In the past 30 years, the total conversion area was  $32.52 \times 10^3 \text{ km}^2$ , which was mainly the conversion between wasteland and grassland. Compared with 2020, the total land conversion areas under the scenarios of Natural development scenario (ND), Ecological protection scenario (EP) and Urban development scenario (UD) in 2050 are  $21.43 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,  $23.09 \times 10^3 \text{ km}^2$  and  $22.87 \times 10^3 \text{ km}^2$ , respectively. Among them, the net increase of forest land area is the most, which is mainly transformed from grassland. The area of forest land, grassland and water body increased under EP scenario. In the other two scenarios, the area of construction land and cultivated land has expanded significantly. Compared with ND and UD scenarios, the ecosystem service function of EP scenario is greater. There are obvious spatial differences in ESP in the Tianshan Mountains from 1990 to 2050. The larger ecological sources and smaller resistance corridors are mainly distributed in the central and northern parts of the Tianshan Mountains with higher ecosystem service functions. On the contrary, broken ecological sources and large resistance corridors are mostly distributed in the western region blocked by sand, bare land or mountains. The southeast is a desert area, with no ecological source and lack of ecological corridors. In the past 30 years, the area of ecological source area has decreased by  $1.84 \times 10^3 \text{ km}^2$ , showing a trend of fragmentation, and the ecological network is more complex. Compared with 2020, the area of ecological source and pinch point under EP scenario in 2050 will increase by  $10.53 \times 10^3 \text{ km}^2$  and  $0.11 \times 10^3 \text{ km}^2$  respectively, and the area of ecological barrier zone will decrease by  $0.38 \times 10^3 \text{ km}^2$ . In addition to the EP scenario, the ecological source area of the other two scenarios also increased, but lower than the EP scenario. **[Conclusions]** Ecological protection scenarios play a vital role in shaping LUCC and are of great significance for maintaining ecological security and ecosystem integrity.

**Key words:** land use type simulation; ecosystem services; ecological geological survey engineering; ecological security pattern; circuit theory

**Highlights:** (1) Constructing ecological sources and resistance surfaces by quantifying past and future ecosystem services. (2) Simulating the future land use types and constructing the ecological security pattern under different scenarios in 2050. (3) Revealing the dynamic change characteristics of ecological security pattern in different periods of Tianshan Mountains from 1990 to 2050.

**About the first author:** CHEN Wudi, male, born in 2000, master candidate, mainly engaged in resources and environment, natural resources observation research; E-mail: [1830708775@qq.com](mailto:1830708775@qq.com).

**About the corresponding author:** LIU Xiaohuang, male, born in 1972, professor level senior engineer, mainly engaged in natural resources observation research; E-mail: liuxh19972004@163.com.

**Fund support:** Supported by the Third Xinjiang Scientific Expedition Program (No. 2022xjkk090405, No. 2021xjkk140104) and the project of China Geological Survey (No. DD20230514).

## 1 引 言

生态安全是指确保生态系统能够在保持自身健康和完整性的基础上,为人类提供必要的生态系统服务,并满足人类福祉需求的一种状态,是人类社会可持续发展的关键要素(肖笃宁等, 2002; Ke et al., 2021; Wen and Hou, 2021)。随着人们对生态环境的经济和社会问题越来越重视,生态安全已逐渐成为国际生态系统研究的热门话题,也是人类社会可持续发展的一个重要新方向(Gerten et al., 2015; 付宇佳等, 2022)。生态安全格局(ESP)以及生态系统结构与过程的整体性,是指通过构建和维护一个完整的生态系统,以缓解区域生态问题,并在空间区域内实施相应的对策。这种方法被认为是控制城市蔓延、实现区域生态安全、促进社会可持续发展的重要保障和基本途径(Kang et al., 2021),为保护生态安全、有效管理生态系统提供了重要的空间途径(韩王亚等, 2023)。

目前,“识别生态源头、构建阻力面、提取廊道”的研究框架已成为构建区域 ESP 的标准范式(彭建等, 2017, 2018; 韩宗伟等, 2019; 潘竟虎和李磊, 2021)。ESP 建设的第一步是识别生态源,主要通过评估生态适宜性、生态风险、生态重要性或连通性来进行。在这些技术中,基于生态系统服务的生态重要性评估是最常见的(Peng et al., 2018; Kang et al., 2021; Li et al., 2023)。生态源是城市发展中满足生态安全需要的最小生态用地,是城市扩张与生态保护权衡的结果,一般优先识别生态系统服务功能高的区域作为生态源。在评估和量化生态系统服务功能方面,In-VEST 模型由于参数调整灵活、评价结果空间表达性高、能达到时空和多目标权衡等特点,被广泛使用(张铭丹和李运刚, 2023; 于芝琳等, 2024)。阻力面的相关概念是指反映物种迁移或生态过程空间迁移难易程度的格局,构建这样的阻力面是准确提取生态廊道的前提(Kang et

al., 2021)。现有的阻力面构建研究多是基于与土地利用类型、坡度、高程等生态因子相关的阻力系数,再根据专家经验赋值(王晓玉等, 2020)。然而,这种方法在一定程度上忽略了给定土地利用类型内部的差异,也没有考虑人类活动对生态阻力系数的影响。因此,修正基本生态抗性面已成为近年来生态抗性面建设的重要趋势。确定生态廊道最常用的模型是最小累积阻力(MCR)模型(戴璐等, 2020; 于梦林等, 2022)、最小成本路径(LCP)(韦宝婧等, 2022; 曹加杰和傅剑玮, 2023)和电路理论(Huang et al., 2022; 韩王亚等, 2023)。MCR 模型已被广泛用于模拟生态廊道,可以快速指出生态流的最优路径,但忽略了物种的随机游走,无法明确廊道的具体范围和关键节点。电路理论中的生态流与电流具有随机游走特性,存在类比关系。电路理论与 LCP 模型结合可改善预测复杂景观中的运动模式、测量栖息地斑块的隔离程度、识别重要的景观斑块等不足。目前,电路理论已广泛应用于生态保护分析(Proctor et al., 2015; Carroll et al., 2017),模拟了野生动物的运动和基因流,以实现生态保护和连通性。

由于未来模式的发展充满了不确定性和复杂性,有必要在模型仿真和情景分析的基础上对 ESP 进行预测和强化。生态安全可以从土地利用/覆盖变化(LUCC—Land Use and Cover Change)中反映出来(Li et al., 2020)。由于快速的 LUCC 威胁着生态安全,因此模拟未来 LUCC 模式对于确保生态安全和可持续发展至关重要(Zhang et al., 2020)。然而,以往的研究多侧重于历史生态安全的评价和格局构建,而基于气候变化下未来 LUCC 格局的 ESP 模拟较少。近年来,一些研究基于 LUCC 模拟进行了生态安全的动态预测,如元胞自动机(CA)、CA-Markov、CLUE-S 模型、未来土地利用模拟(FLUS)模型和斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型(Gong et al., 2009; Li et al., 2020; Zhang et al., 2020; Liang et al., 2021)。PLUS 模型集成了

土地扩展分析策略和基于随机斑块种子的 CA 模型, 与其他模型相比, 可以更详细地模拟多种土地利用类型的斑块演变。

新疆天山地区是全球温带干旱区大型山地生态系统的最典型代表, 也是全球变化的敏感地带, 生态环境十分脆弱, 自然资源和能源相对富集, 在亚洲中部干旱区生态地理格局中具有重要地位和作用, 是影响新疆乃至中国中西部地区天气气候和生态环境的重要天然屏障(Youcun et al., 2017)。然而, 天山地区也遭受了森林砍伐、矿产资源开采、旅游开发等破坏性活动, 对山区生物多样性造成了一定的威胁(胡汝骥, 2004)。本文旨在探索新疆天山地区的生态安全格局, 为保护天山地区生态系统的完整性, 增强生态系统服务功能, 保持重点生境之间的生态连通性实现区域可持续发展提供科学依据和政策建议; 从而为区域生态安全格局、国土空间规划与生态系统修复等研究提供较为科学、全面的研究思路和研究方法, 同时也可作为生物多样性保护与生态建设提供科学依据。本文主要内容如下: (1) 基于 PLUS 模型对 1990—2050 年土地利用类型变化进行研究和模拟; (2) 基于 In-VEST 模型量化生态系统服务功能的时空变化; (3) 基于 LUCC、生态系统服务功能和电路理论确定 ESP 的动态变化。

## 2 研究区概况

中国天山地区 (73°80'28"~96°38'56"N, 39°21'40"~45°38'8"E) 横穿新疆中部, 面积约  $46.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占新疆总面积 28.01%, 包括天山山脉以及吐鲁番盆地等(Xia et al., 2008)。天山山脉是亚洲内陆中部的一条著名山脉, 也是世界上最大的独立纬向山系(图 1), 在中国境内全长 1852 km, 由博罗克努山、哈尔克塔巫山、依连哈比尔尕山、博格达山、巴里坤山等 20 多条山脉和 10 多个山间盆地地貌单元组成(胡汝骥, 2004), 跨越了克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、阿克苏地区等 11 个地州市, 山脊线平均海拔 4000 m, 最高峰托木尔峰海拔 7443 m(胡汝骥, 2004)。

天山属于典型的温带大陆性气候, 山区年平均气温差异很大, 天山北坡年平均气温 2.5~5.0 °C, 南坡年平均气温 7.5~10.0 °C, 山区多年平均年降水总量为  $810 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。天山被誉为“中亚水塔”, 是锡尔

河、楚河、伊犁河等众多中亚河流的发源地, 也是受气候变化影响最为敏感的地区之一(Chen et al., 2016)。天山是全球唯一由巨大沙漠夹持的大型山脉, 以深居内陆的地理区位、温带大陆性干旱气候、山盆相间的地貌格局、众多的冰川河流、特殊的生物区系和生态过程等诸多自然特征, 成为全球温带干旱区大型山地生态系统的典型代表(Groombridge and Jenkins, 2000)。

## 3 数据与方法

### 3.1 数据来源

CLCD(China Land Cover Dataset) 数据集由武汉大学黄昕教授团队发布(<https://zenodo.org>)。该数据基于 Google Earth Engine 上 335709 景 Landsat 数据制作而成, 包含 1985—2020 中国逐年土地覆盖信息, 空间分辨率为 30 m。基于 5463 个目视解译样本, CLCD 的总体准确率达 80%。研究区被分为耕地、林地、草地、水体、雪/冰、荒地、不透水面、湿地 8 种不同的土地利用类型; 温度、降雨和土壤数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>)(FAO and IIASA, 2021; Peng, 2024a, b), 降雨侵蚀性因子是根据降雨栅格数据计算而得; 地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度以及死亡有机质数据通过查阅相关文献获得(许文强等, 2016; Lu et al., 2022; 如克亚·热合曼等, 2022); 数字高程模型(DEM)来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>), 坡度、坡向和地形起伏度数据根据 DEM 计算得到; 国内生产总值(GDP)和人口网格化数据集(POP)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>); 道路数据和河网数据来源于 OpenStreetMap Data extract (<https://www.openstreetmap.org>); 政府位置数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.web-map.cn>)。具体数据信息见表 1 和表 2。

### 3.2 研究思路

通过建立不同时期的生态系统评价模型, 研究天山地区重点生境之间的生态连通性和生态系统完整性, 为天山地区生态保护与管理提供理论支持。构建生态安全格局的实质是要形成包含生态源、廊道、关键节点一体化网络的关键格局。通过识别和保护关键格局, 可以很好地保障区域生态系统服务和生态过程。本研究的生态安全格局识别

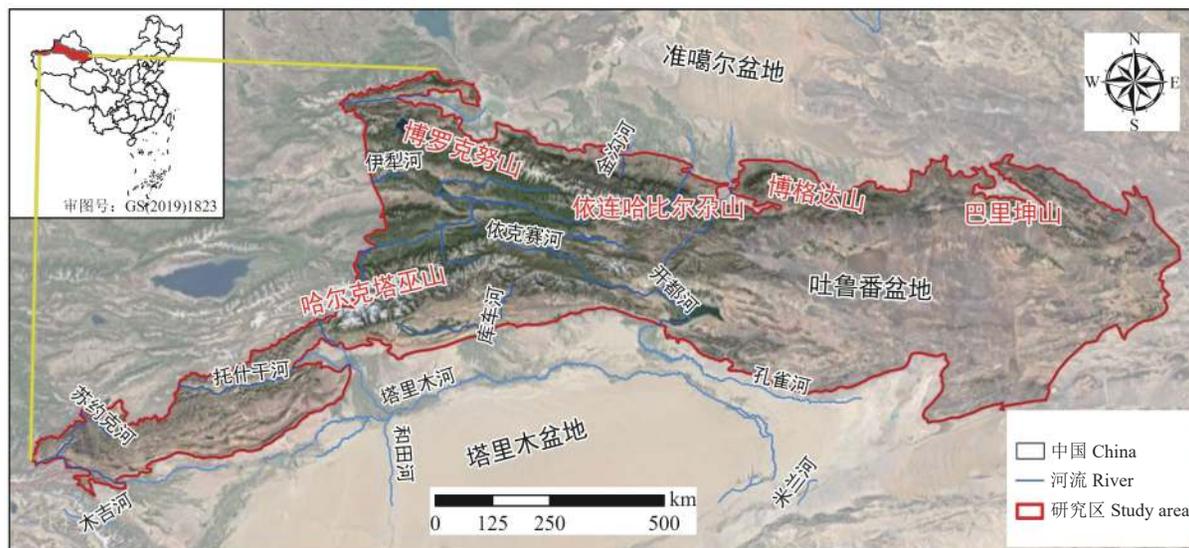


图1 研究区位置示意图(基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1823号的标准地图绘制,底图边界无修改,后图同)  
Fig.1 Location diagram of the study area (Based on the standard map drawing of the standard map service website GS (2019) 1823 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified, and the following diagram is the same)

表1 数据来源及描述

Table 1 Data sources and description

数据	描述	数据来源
1990、2000、2010、2020年土地利用类型数据	空间分辨率为30 m	<a href="https://zenodo.org">https://zenodo.org</a>
温度/°C	逐月平均温度数据,空间分辨率为1 km	国家青藏高原科学数据中心
降水/mm	逐月平均温度数据,空间分辨率为1 km	<a href="https://data.tpdc.ac.cn/home">https://data.tpdc.ac.cn/home</a>
降雨侵蚀性因子	反映研究区的降雨强度和时间	通过降雨数据计算获得
土壤数据	用于计算植物可利用水分(PAWC)和土壤侵蚀性因子	国家青藏高原科学数据中心 <a href="https://data.tpdc.ac.cn/home">https://data.tpdc.ac.cn/home</a>
地上碳密度/(t/hm <sup>2</sup> )	地上生物量的碳密度	
地下碳密度/(t/hm <sup>2</sup> )	地下生物量的碳密度	查阅相关文献(许文强等, 2016; Lu et al., 2022; 如克亚·热合曼等, 2022)
土壤碳密度/(t/hm <sup>2</sup> )	土壤的碳密度	
死亡有机质/(t/hm <sup>2</sup> )	死亡有机物碳密度	
数字高程模型/m	用于计算坡向、坡度、地形起伏,空间分辨率为30 m	地理空间数据云 <a href="https://www.gscloud.cn">https://www.gscloud.cn</a>
国内生产总值/(万元/km <sup>2</sup> )	栅格单元所在的县级行政区单元的GDP统计值,空间分辨率为1 km	中国科学院资源环境科学数据中心 <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a>
人口网格化数据集/(人/km <sup>2</sup> )	栅格单元所在的县级行政区单元的人口统计值,空间分辨率为1 km	
道路数据	计算到道路的距离	OpenStreetMap Data extract
河网数据	计算到河道的距离	( <a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a> )
政府位置	计算到政府的距离	全国地理信息资源目录服务系统 <a href="https://www.webmap.cn">https://www.webmap.cn</a>

分为3个步骤:第一步是对未来土地利用类型的模拟;第二步是基于生态系统服务的量化来确定生态来源以及构建阻力面;三是基于电路理论提取生态廊道和关键节点。具体框架如图2所示。

### 3.3 生态安全格局识别

#### 3.3.1 生态系统服务评价

天山地区具有重要的水资源涵养和生物多样性保护功能,是中国重要的生态安全屏障。然而,

表 2 不同土地利用类型的碳密度 (t/hm<sup>2</sup>)

**Table 2 Carbon density of different land use types (t/hm<sup>2</sup>)**

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机质数据
耕地	2.9	3.44	76.6	1.24
林地	30.89	9.12	107.82	2.48
草地	0.49	4.29	75.54	0.22
水体	0.64	0.45	0	0
雪/冰	0	0	0	0
荒地	0.45	0.87	38.55	0
不透水面	2.26	1.45	0	0
湿地	1.85	1.48	212.68	0

该地区的土壤侵蚀也很高,这是由于起伏的地形、干燥的气候和人为干扰所致。因此,使用 In-VEST 软件对研究区的 4 种典型生态系统服务(如碳储量、产水量、土壤保持和生境质量)进行了评估。产水量反映了生态系统通过截留降雨所具有的保水能力(Li et al., 2021)。通过考虑土地利用类型、气候、土壤和地形,对土壤保持进行了量化(Guo et al., 2023; Yuan et al., 2023)。碳储量(包括地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机质)随时间的变化归因于土地利用/覆盖从一种类型到另一种类型的转换(Sharp et al., 2016)。生境质量代表了景观的生物多样性,高质量的栖息地具有丰富生物多样性的潜力(Peng et al., 2018)。关于这些计算的更多细节可以在 In-VEST 模型的用户指南中找到(Sharp et al., 2016)。

3.3.2 生态源构建

生态源是促进生态过程、维持生态系统完整性

和提供高质量或数量的生态系统服务的关键生态斑块。因此,可以通过评估生态系统服务来确定关键生态斑块。由于降雨量较多,研究区植被覆盖度高;但由于地形起伏,水土流失也非常高。因此,选取土壤保持、碳储量和产水量 3 种典型生态系统服务功能进行评价。基于自然断裂法,将这 3 种生态系统服务功能划分为 5 个等级(Peng et al., 2018),并选择每种生态系统服务功能等级为 4 级和 5 级的重叠斑块作为生态源。

3.3.3 阻力面构建

阻力面表明了物种在生态源间移动的困难程度,并反映了对生态过程的水平阻力(Adriansen et al., 2003; Beier et al., 2008; Spear et al., 2010)。阻值不仅与生态流量的距离有关,还与土地覆盖和人为干扰有关(Gao et al., 2021)。例如,人类活动会阻碍不同景观斑块之间的物质循环和能量交换;因此,大多数研究都是基于专家经验来分配与土地利用类型相对应的阻值。由于该方法无法描述同一土地利用类型的内部差异,因此需要进行额外的栖息地质量评估。然而,缺乏关于动物运动概率的详细经验数据是相当普遍的。由于高生境质量意味着高生物多样性,即对物种的低抗性,因此该方法根据生境质量的逆比赋予抗性值(Peng et al., 2018)。

In-VEST 模型考虑了自然栖息地本身的质量、威胁程度以及每个栖息地对不同威胁的相对敏感性(Sharp et al., 2016)。也就是说,重点关注 4 个因素:每种威胁的相对影响,每种栖息地类型对每种

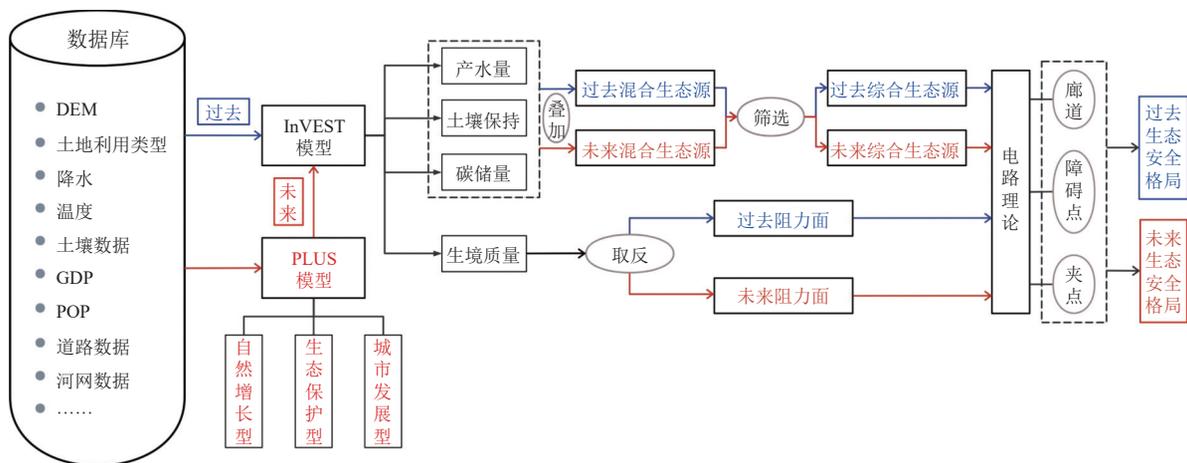


图 2 生态安全格局识别框架  
Fig.2 Identification framework of ecological security patter

威胁的相对敏感性, 栖息地与威胁源之间的距离, 以及栖息地斑块受到法律保护的程度。评价结果从 0 到 1, 代表了生境质量从最差到最好的程度。在本研究中, 参数的设置依据 In-VEST 用户指南和相关研究, 其中生境对各胁迫因子的敏感性如表 3 所示。自然栖息地类型包括耕地、林地、草地、水体、雪/冰、荒地、不透水面和湿地, 威胁来源包括城市、铁路、主干道和次干道。

### 3.3.4 生态廊道及关键夹点提取

生态廊道是指连接不同生态斑块的通道, 它们可以为物种的扩散、迁徙和基因交流提供途径, 维持生物多样性和生态系统稳定性(Liu et al., 2021)。生态夹点是指生态廊道中的瓶颈区域, 是生物最可能活动或休息的空间, 它们对廊道的连通性和质量有重要影响, 如果被破坏或丧失, 可能导致廊道的断裂或功能下降。生态障碍点是指对廊道形成或维持有负面作用的区域, 它们通常具有较高的阻力值或障碍物, 如果被移除或改善, 可能提高廊道的连通性和质量。21 世纪初, McRae et al. (2008) 引入回路理论来模拟生物的基因流动和运动路线。目前, 电路理论被广泛应用于 ArcGIS10.8 和 Circuitscape4.0.5 中的链接映射器工具包来识别生态廊道和关键点。

## 3.4 未来生态安全格局识别

### 3.4.1 土地利用类型的预测

#### (1) PLUS 模型

PLUS 模型是用于栅格数据的土地利用类型模拟的元胞自动机(CA), 它集成了基于土地扩展分析策略的规则挖掘框架和基于多类型随机种子的 CA 模型, 用于预测土地利用斑块的动态(Liang et al., 2021), 可以更好地挖掘各类土地利用变化的诱因, 具有较高的模拟精度。PLUS 模型结合随机种

子生成和阈值递减机制, 在发展概率约束下自动生成时空动态仿真补丁。

#### (2) 场景描述

未来气候变化条件下 LUCC 的模拟与预测需要输入温度、降水、人口和 GDP 等主要参数。最新气候变化情景数据国际耦合模式比较计划第 6 阶段(CMIP6)模型通过耦合共享的社会经济路径(SSPs)和代表性浓度路径(RCPs), 为研究人员提供了全球气候变化的多种未来发展情景(Cook et al., 2020)。SSP2-4.5 情景表明经济社会发展处于中等强迫的中间道路。总体而言, 在 SSP2-4.5 情景下, 研究区社会经济和 LUCC 保持了现有的发展趋势。中国的土地利用类型受到地方土地管理政策的深刻影响, 土地政策的驱动因素对土地利用变化也有显著影响(Wang et al., 2012)。这些变化是区域发展政策、城市化政策和生态保护政策共同作用的结果。特别是中国实施的三北防护林工程、自然退耕还林工程、退耕还林工程、退牧还草工程等国家生态修复工程, 改善了生态环境, 恢复了退化的生态系统(Lu et al., 2018)。因此, 在气候变化情景下, 基于不同土地管理政策, 模拟和预测多种潜在土地利用类型情景, 提供基于未来土地利用类型的 ESP 演变特征, 对保障国家和区域生态安全、平衡生态保护与经济发展具有重要意义。因此本文建立了自然增长(ND)、生态保护(EP)和城市发展(UD)3 种潜在土地利用变化情景, 检测了这些情景下的生态系统服务功能变化和 ESP 演变。

#### (3) 模型验证

为了验证土地利用模拟的准确性, 引入 Kappa 系数来检验 PLUS 模型的性能。Kappa 系数用公式表示为(Zhang et al., 2022):

$$Kappa = \frac{P_o - P_c}{P_d - P_c}$$

其中,  $P_o$  为正确模拟的比例;  $P_c$  为投影模拟的期望比例;  $P_d$  为理想模拟值, 一般定义为 1。当  $Kappa > 0.8$  时, 表明模拟结果可信, 模型精度在统计上令人满意。

为了验证模型的可靠性, 本文选取 15 个驱动因素以及 2000 年和 2010 年的土地利用数据作为预测变量输入 PLUS 模型, 计算天山地区各土地利用类型的增长概率。在此基础上, 以 2010 年土地利用数据为模拟参考图, 运行 PLUS 模型, 得到 2020

表 3 生境对各胁迫因子的敏感性

Table 3 Sensitivity of habitats to various stress factors

地类代码	地类	生境适宜性	城市	铁路	主干道	次干道
1	耕地	0.3	0.5	0.2	0.2	0.2
2	林地	1	1	0.7	0.6	0.5
3	草地	0.9	0.7	0.6	0.6	0.3
4	水体	1	0.9	0.6	0.5	0.6
5	雪/冰	0.1	0.2	0.2	0.2	0
6	荒地	0.1	0	0.1	0.1	0
7	不透水面	0	0	0	0	0.2
8	湿地	0.4	0.6	0.3	0.4	0.6

年土地利用的模拟结果。将模拟结果与 2020 年的实际土地利用数据进行比较,以评估 PLUS 模型的模拟精度。通过与实际土地利用图的对比,总体精度为 91.15%, Kappa 系数为 0.911, 证明 PLUS 模型的土地利用模拟可以有效地用于未来土地利用情景。基于 1990—2020 年土地利用数据, PLUS 模型预测了 2050 年土地利用的时空变化, 驱动因素如图 3 所示。

### 3.4.2 未来生态安全格局构建

将未来气候数据与 PLUS 模型生成的 2050 年土地利用类型数据导入 In-VEST 模型中, 结合其他环境变量, 生成 2050 年不同情境下的生态系统服务功能。结合 2.4 节所述的方法, 生成 2050 年的生

态源、阻力面、生态廊道、生态夹点以及生态障碍点等数据, 从而构建出在未来不同情境下的生态安全格局。

## 4 结果与分析

### 4.1 1990—2050 年土地利用类型的时空变化

天山地区草地和荒地广泛分布(图 4, 表 4), 其北坡面向准噶尔盆地, 气候湿润多雨, 年均降水量达到 600 mm 以上, 植被丰富, 主要为草地; 南坡面向塔里木盆地, 气候干旱少雨, 年均降水量只有 100 mm 左右, 植被稀疏, 主要是荒漠和荒漠草原, 生态环境相对脆弱。在 2020 年, 8 个土地利用类型面积从高到低为: 荒地为  $251.65 \times 10^3 \text{ km}^2$  (54.34%)、

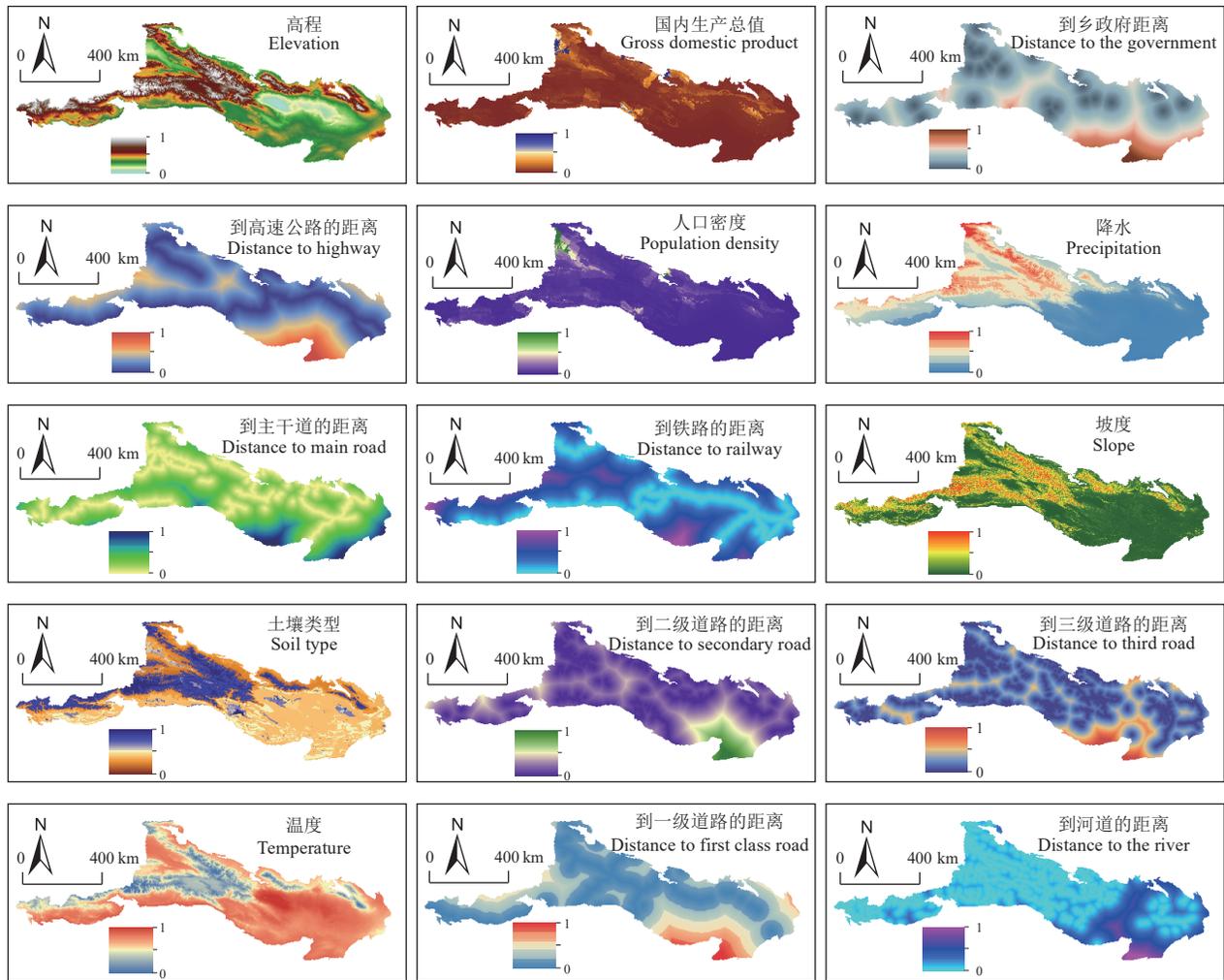


图 3 天山地区土地利用模拟归一化驱动因子空间分布(驱动因素的原始数据经过归一化处理, 以消除因素之间的量纲影响)

Fig.3 Spatial distribution of normalized driving factors of land use simulation in Tianshan area  
(The original data of driving factors are normalized to eliminate the dimensional influence between factors)

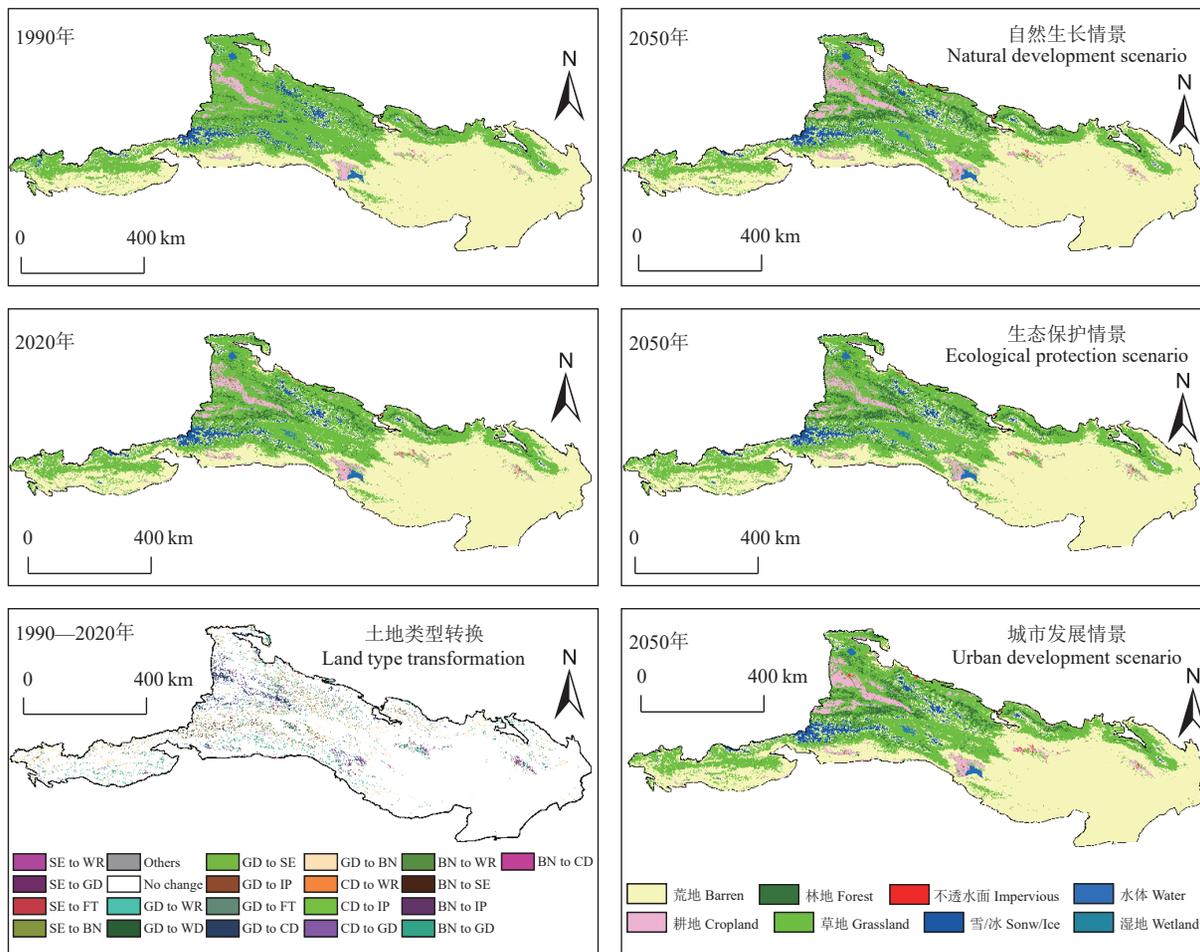


图4 1990—2050 天山地区土地利用类型空间分布特征

CD—耕地; FT—林地; GD—草地; WR—水体; SE—雪/冰; BN—荒地; IP—不透水面; WD—湿地

Fig.4 Spatial distribution characteristics of land use types in Tianshan Mountains from 1990 to 2050  
CD—Cultivated; FT—Forest; GD—Grassland; WR—Water; SE—Snow/Ice; BN—Barren; IP—Impervious; WD—Wetland

表4 1990—2050 年研究区土地利用类型面积变化 (10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>)

Table 4 Changes in land use types in the study area from 1990 to 2050 (10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>)

土地利用类型	1990年	2020年	2050年			转化面积(2020—2050)年		
			ND	EP	UD	ND	EP	UD
耕地	12.83	17.57	21.91	15.23	21.92	4.34	-2.33	4.35
林地	6.84	12.52	17.83	19.97	17.79	5.31	7.46	5.27
草地	180.02	165.06	154.96	168.25	154.87	-10.10	3.19	-10.19
水体	1.79	2.50	3.13	2.51	3.10	0.64	0.01	0.60
雪/冰	13.66	12.37	12.33	13.07	12.61	-0.03	0.71	0.24
荒地	247.56	251.64	251.06	242.61	250.39	-0.58	-9.03	-1.25
不透水面	0.13	0.94	1.19	0.75	1.73	0.25	-0.18	0.79
湿地	0.23	0.48	0.66	0.67	0.66	0.18	0.18	0.18
总计	463.07	463.07	463.07	463.07	463.07			

注: ND—自然增长型; EP—生态保护型; UD—城市发展型。

草地为 165.06×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>(35.65%)、耕地为 17.57×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>(3.79%)、林地为 12.52×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>(2.7%)、雪/冰为 12.37×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>(2.67%)、水体为 2.5×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>

(0.54%)、不透水面为 0.94×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>(0.20%)、湿地为 0.48×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>(0.11%)。同时,土地利用也具有典型的分布特征。草地和林地主要集中在起伏

程度较大的山地地区(哈尔克塔巫山、依连哈比尔尕山、博格达山等),耕地主要集中在起伏较小、水资源较丰富的天山西部的平原地区,荒地主要集中在降水较少(图 4)的东部荒漠地区。近 30 年来,天山地区土地利用类型集中,总转换面积达到  $32.52 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,主要是荒地和草地之间的转化。其中耕地、林地和荒地分别增加了  $4.74 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $5.68 \times 10^3 \text{ km}^2$  和  $4.08 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,而草地和冰/雪却减少了  $14.96 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $1.29 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。

根据 PLUS 模型的预测,天山地区 2050 年和 2020 年相比,不同情境下的草地和荒地仍是天山

地区的主要土地利用类型,占总面积的 87%~88% (表 4),但土地利用类型的变化是不可避免的。在未来 30 年,天山地区土地利用类型在自然增长型(ND)、生态保护型(EP)、城市发展型(UD)3 种情景下转换面积分别为  $21.43 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $23.09 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $22.87 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,其中林地面积净增加的最多,分别为  $5.31 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $7.46 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $5.27 \times 10^3 \text{ km}^2$ (表 4),主要由草地转化而来(图 5)。在 ND 和 UD 情境下,草地面积减少了  $10.1 \times 10^3 \text{ km}^2$  和  $10.19 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,主要转化为荒地、耕地和林地,少量转化为水体、不透水面、冰/雪和湿地(图 5)。在

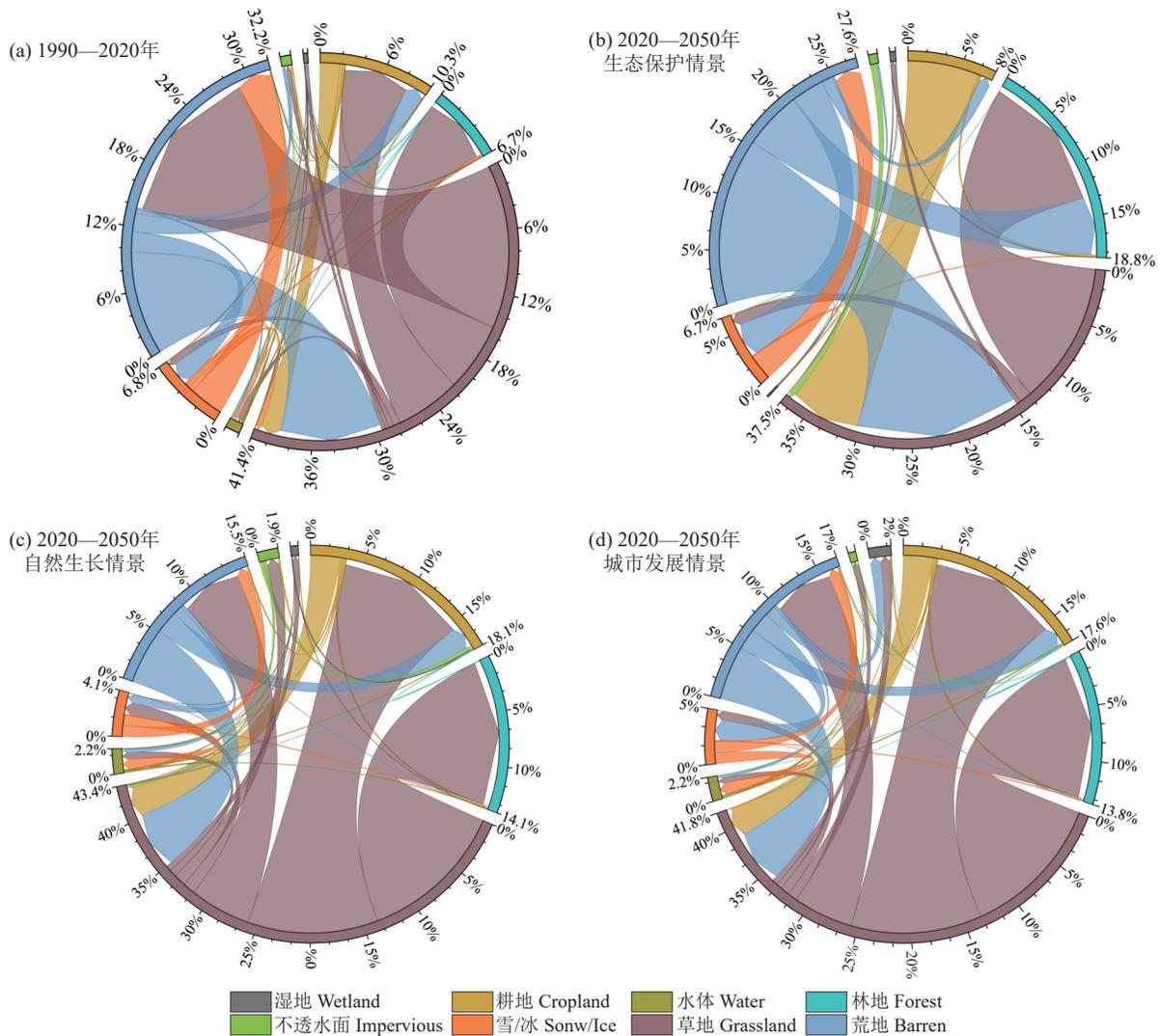


图 5 1990—2050 年土地利用转换弦线图

(箭头的宽度表示土地面积转换的相互作用比例)

Fig.5 Land use conversion chord chart from 1990 to 2050

(The width of the arrow represents the interaction ratio of land area conversion)

EP 情境下,草地面积增加  $3.19 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,主要由荒地和耕地转化而来(图 5)。相比于 2020 年,ND 情景下耕地面积增加了  $4.34 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,其次为水体增加了  $0.64 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,最后为不透水面和湿地,分别为  $0.25 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $0.18 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,同时荒地面积减少了  $0.58 \times 10^3 \text{ km}^2$ ;在 UD 情景下,不同地类的转化和 ND 情境下类似,只有不透水面面积的变化有些不同,增加了  $0.79 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,比 ND 情景下多增加了  $0.54 \times 10^3 \text{ km}^2$ ;在 EP 情景下林地和草地增加最多(表 4),分别为  $7.46 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $3.19 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,同时荒地面积减少了  $9.03 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,高于其他两种情景。同时,ND 情景和 UD 情景下的耕地和不透水面扩张均高于 EP 情景。

#### 4.2 生态系统服务功能的时空变化

结果表明:1990—2050 年,碳储量、产水量、土壤保持和生境质量具有相似的空间分布格局(图 6,图 7,图 8,图 9),总体表现为:高值区主要集中在山地草原带、中山森林带以及河谷地带、山间盆地等,

这些区域植被覆盖较好地区。低值区集中在荒漠带和冰雪带等。从 1990 到 2050 年,天山地区产水量、土壤保持、生境质量 3 种生态系统服务功能表现为先下降再上升的趋势(图 10)。从 1990—2020 年,由于城市化进程加快(表 4),不透水面地增加对周边生境构成威胁,引起生境碎片化和景观连通性变差,最终导致生态系统服务功能下降。到 2050 年,尤其是生态保护情景下,产水量、土壤保持、生境质量 3 种生态系统服务功能得到明显改善,分别增加了  $75.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $27.61 \times 10^8 \text{ t}$  和 0.019。碳储量生态系统服务功能从 1990 到 2050 年显著增加,到 2020 年和生态保护情景下的 2050 年,分别增加了  $0.26 \times 10^8 \text{ t}$  和  $0.96 \times 10^8 \text{ t}$ ,主要原因是林地面积显著增加,固碳能力增强(Lu et al., 2022)。

#### 4.3 生态安全格局的动态变化

生态阻力面由生境质量取反得到,所以空间分布与生境质量相同,高低值相反。从图 11 可以看出,抗性值较低的区域主要分布在植被和降水净初

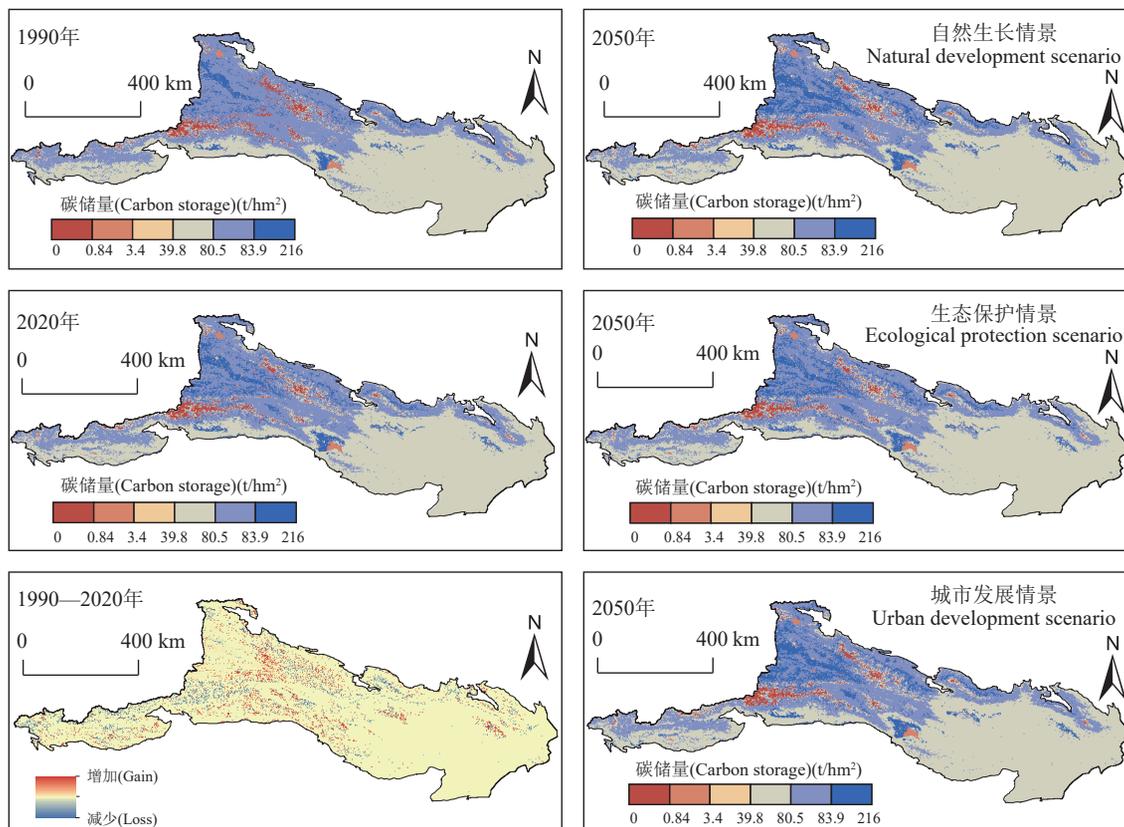


图 6 1990—2050 年碳储量空间分布  
Fig.6 Spatial distribution of carbon storage from 1990 to 2050

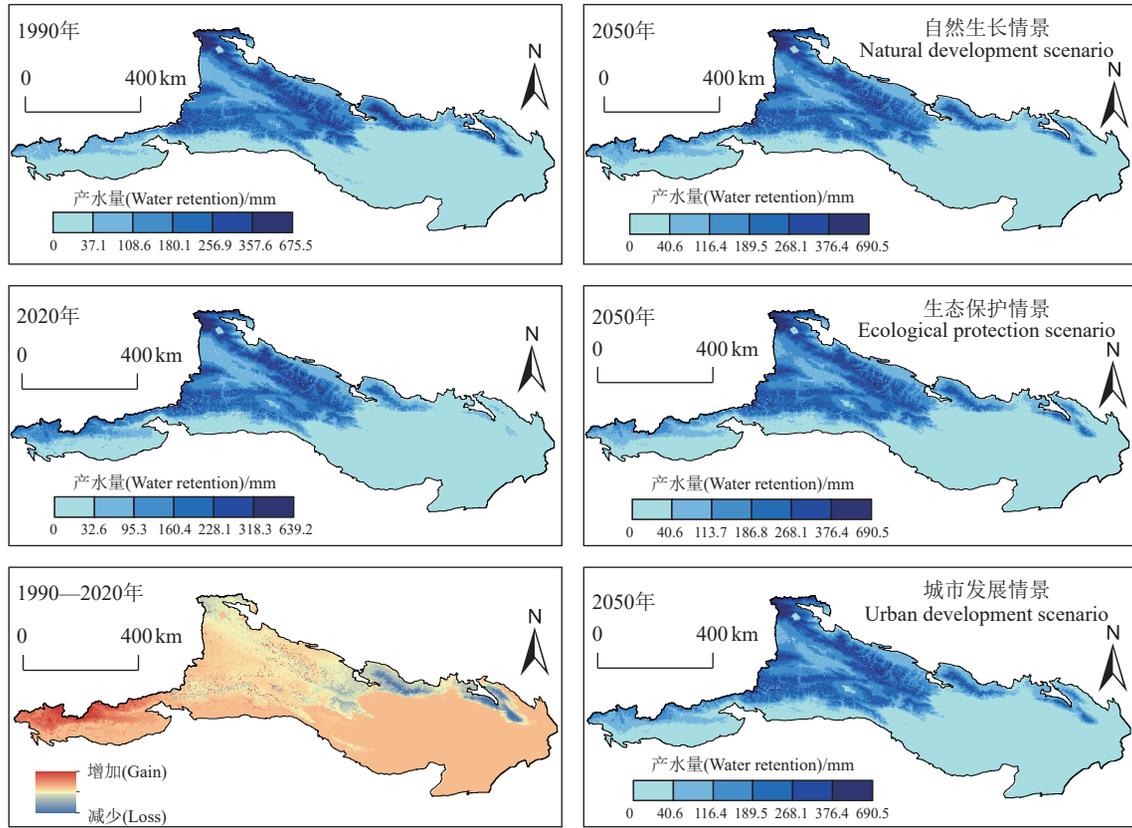


图 7 1990—2050 年产水量空间分布  
Fig.7 Spatial distribution of water yield from 1990 to 2050

级生产力较高的区域,这意味着生物多样性水平较高,并有利于物种运动和生态过程。较高的阻力值一般分布在沙漠、干旱缺水或生存条件相对恶劣的地区,不利于生物生存。2020年天山地区综合阻力值为 0.582,在 ND、EP、和 UD 三种情景下 2050 年的阻力值分别为 0.589、0.566、0.590,可以看出在自然增长和城市发展情景下阻力值进一步增高,阻碍了生物迁移与交流。在生态保护情景下的阻力值最低,有利于生物的连通性和物种移动性,所以在未来的发展策略上应注重生态环境的保护。

1990—2050 年,天山地区生态安全格局较为稳定(图 12),生态源主要分布在研究区中部及北部,生境质量高,生态系统服务功能相对完整,河网密集。研究区西部生态资源分布较为零散,面积较小,裸地和沙地分布较广,植被覆盖度较低,鉴于生态源越小,越容易受到自然和人为因素的影响,更容易破碎化或消失。我们需要更多地关注这些区域。研究区东南部主要为荒地,阻力较高,生态系

统服务功能低,不利于生物生存,没有生态源。此外,近 30 年生态源个数增加了 68 个,但面积减少了  $1.84 \times 10^3 \text{ km}^2$ (表 5),由此可见生态破碎化加重。由表 6 可知,生态源在耕地土地利用类型中的面积增加,在草地土地利用类型中的面积减少,证明人类的活动干预对天山地区的生态安全格局造成了一定的影响。同时,生态廊道长度增加了 1383 km,表明破碎的生态源对生物迁移和交流增加了一定的阻力成本。

从图 12 还可以看出,1990—2050 年天山地区生态廊道的空间分布存在明显差异。由于天山地区东南部为戈壁沙漠,缺乏生态资源,所以缺乏廊道连接。较大的抗性廊道主要分布在天山地区西部,源间距离较远,被沙地、裸地或山地阻隔。阻力较小的廊道主要分布在天山地区中部和北部的绿洲上。与 2020 年相比,2050 年不同情境下的生态源、夹点和障碍点面积均有所变化(表 5),具体来看:2050 年 3 种情景下的生态源面积均有所增加,分别为  $5.23 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $10.53 \times 10^3 \text{ km}^2$  和  $4.72 \times$

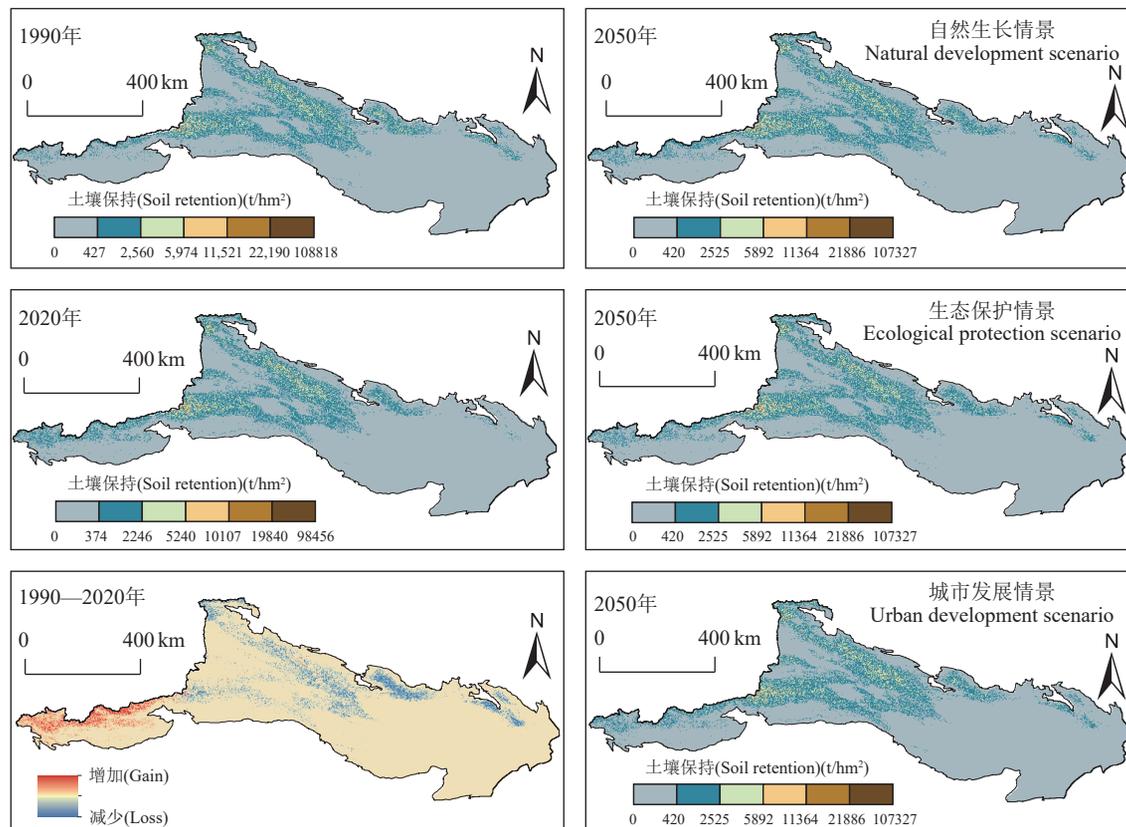


图 8 1990—2050 年土壤保持量空间分布  
Fig.8 Spatial distribution of soil conservation from 1990 to 2050

$10^3 \text{ km}^2$ , 其中耕地、林地和草地 3 种土地利用资源约占生态源总面积的 90%(表 6), 生态环境有所改善, 其中在生态保护情景下改善最多。此外, 生态夹点和障碍点的面积在不同情境下呈现出各自的变化。具体来说(表 6), 在 EP 情境下, 生态系统服务的改善使得生态源面积增加了  $10.53 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 生态夹点面积增加了  $0.11 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 与此同时, 生态障碍点面积减少了  $0.38 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。在 UD 情境下, 生态源面积增加了  $4.72 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 生态夹点面积增加了  $0.04 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 而生态障碍点面积略有增加, 为  $0.02 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。在 ND 情境下, 生态源面积增加了  $5.23 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 生态夹点面积减少了  $0.16 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 生态障碍点面积则增加了  $0.13 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。表明在未来, 生态保护情景对天山地区生态安全格局起到改善作用。

## 5 讨论

### 5.1 基于 ESP 的生态保护与管理启示

土地利用类型和生态系统服务在 ESP 的建设

中起着决定性作用, 耕地、林地、草地具有较高的生态系统服务功能, 其面积的增减影响着生态源面积的增减, 进而影响整个生态系统的完整性和连通性(Li et al., 2023)。比如, 1990—2050 年研究区碳储量呈显著增加趋势, 主要原因是林地面积显著增加, 使得固碳能力增强, 从而在一定程度上增加了生态系统的完整性, 这与卢雅焱(Lu et al., 2022)对天山碳储量时空演变的研究一致。值得注意的是, 研究区生态系统服务功能的改善和提高不仅需要加强生态保护和修复工作, 还需要综合考虑当地的社会经济发展和人类活动(Peng et al., 2018)。例如, 在生态保护情景下, 虽然生态系统服务功能得到了明显改善, 但是这并不意味着可以完全忽视人类活动的影响(孙张涛等, 2023; 王璐晨等, 2024)。因此, 未来需要进一步研究如何在保护和改善生态系统服务功能的同时, 实现当地社会的可持续发展, 从而更好地维护天山山区的生态环境和生态安全。

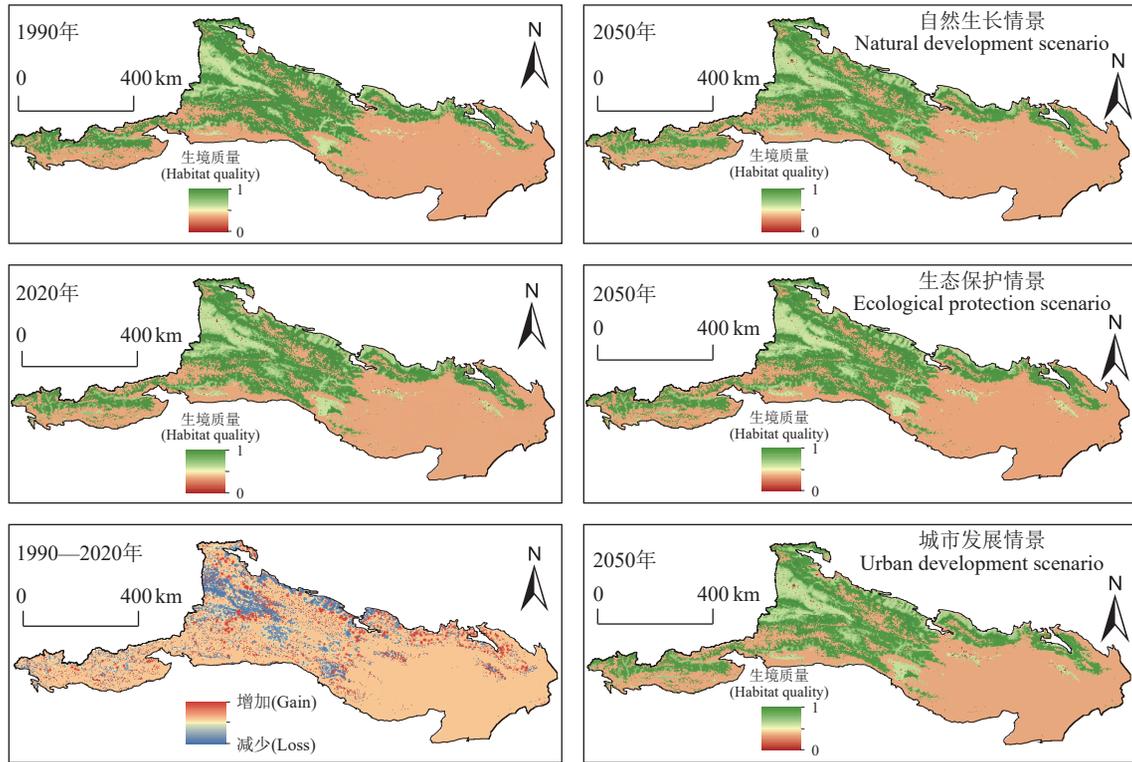


图 9 1990—2050 生境质量空间分布  
Fig.9 Spatial distribution of habitat quality from 1990 to 2050

另外, 1990—2020 年, 天山地区建设用地仅占整个研究区的 0.02%~0.21%。其未来扩张不足以影响整个研究区生态系统服务功能的变化, 但对局部环境的破坏不容忽视。在本研究中, 天山地区的 ESP 在过去和未来都是总体稳定的。天山地区西部生态系统服务功能较低, 平均阻值最高, 生态资源分布稀疏破碎, 生态廊道较长, 生态环境脆弱, 长而窄。天山地区由于极端的环境, 恢复的时间和经济成本比其他地区要高 (Li et al., 2023), 当地应该尊重研究区的自然规律而开发, 并适当优先考虑自然保护区或国家重点生态功能区生态廊道和节点的生态修复。天山地区中部和北部地区生态条件适宜, 河流网络密集, 生物资源丰富, 生态源集中, 平均抗性值低, 具有较高的产水、土壤保持、碳储存和生境质量等生态系统服务功能。这些地区廊道长度短, 连通性高。

此外, 在土地利用类型和生态系统服务之间, 笔者发现了显著的关联性。林地、草地和耕地等土地利用类型具有较高的生态系统服务功能。这些土地利用类型在过去三十年内的变化将直接影响

整个生态系统的完整性和连通性。然而, 关于天山地区的 ESP 建设, 即使在过去三十年内, 其总体格局保持相对稳定。在本研究中, 我们观察到天山地区西部的生态系统服务功能相对较低, 平均阻值较高。这意味着在未来的发展中, 当地应该关注局部环境破坏的潜在风险, 并优先考虑对研究区域内生态廊道和节点的生态修复, 以实现生态系统的自然过渡和缓解栖息地破碎化问题。另一方面, 天山地区中部和北部地区, 由于气候适宜、河流网络密集和生物资源丰富, 这些地区的生态服务功能相对较高。廊道长度短、连通性高, 为实现生态系统的自然过渡提供了便利条件。在城镇和工矿用地较为集中的区域, 如天山地区中部和北部, 生态保护不仅限于自然保护区, 还应涵盖周边地区, 以实现生态系统的自然过渡, 从而有效缓解栖息地破碎化问题 (Huang et al., 2022)。总之, 在生态系统服务功能中, 我们可以看到土地利用类型与生态系统服务之间的紧密关联。为了实现研究区域内生态系统的自然过渡和缓解栖息地破碎化问题, 有必要对生态环境进行保护和修复, 并合理规划土地利用类型,

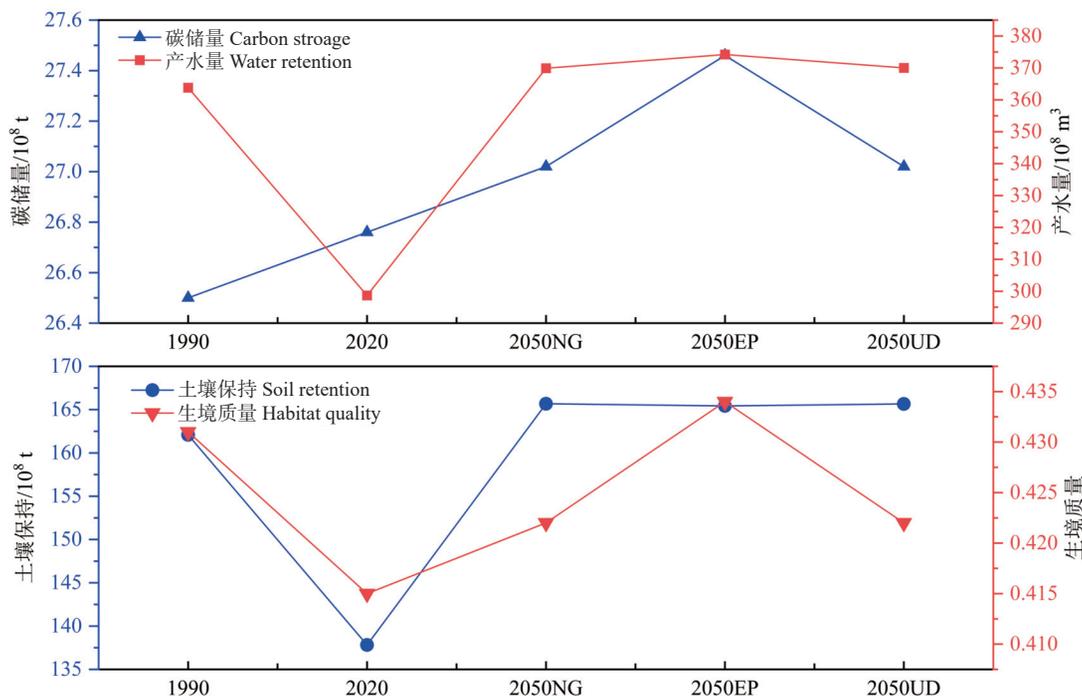


图 10 1990—2050 年天山地区生态系统服务功能的时间变化

ND—自然增长型; EP—生态保护型; UD—城市发展型

Fig.10 Temporal variation of ecosystem service function in Tianshan Mountains from 1990 to 2050

ND—Natural growth ; EP—Ecological protection type ; UD—Urban development type

以实现可持续发展(Gao et al., 2021)。在实践中,应当注重生态环境的平衡保护和修复,防止过度开发和破坏生态系统的完整性,以确保生态系统服务功能的持续发挥和提高。

## 5.2 研究的局限性和未来工作的方向

生态安全格局的研究通常基于土地利用类型来识别生态斑块,但这种方法可能会忽略同一土地类型内存在的空间异质性,从而影响生态廊道的识别精度(Li et al., 2022)。并且 ESP 的建造受到许多驱动因素的影响。人类活动通过土地利用类型影响生态系统服务功能,进而影响 ESP,特别是生态源和生态廊道的完整性和连通性(Li et al., 2023)。在本研究中,笔者基于 PLUS 模型、In-VEST 模型和电路理论建立了 1990—2050 年的 ESP。基于生境质量构建了综合阻力面,避免了主观性。但与许多已有的研究类似,本研究仍有其诸多机遇和挑战。首先,不同土地利用类型情景对 ESP 有影响,EP 情景下,林地、草地和水体进一步增加,生态系统服务功能改善,生态源之间的连通性较高。与 EP 情景相比,其他两种情景下的耕地和建设用地面积均有

所扩大,生态源区面积和生态廊道数量均有所减少,阻力值均有所增加。然而,由于时空差异,生态保护与恢复措施在改善生态系统服务和生态安全方面也存在一定的滞后性,造成了未来效益的诸多不确定性。随着天山地区城市化进程的加快和极端气候事件的发生,这些情况对今后实施长期生态保护和观测具有重要意义。其次,数据来源和可及性有限,并且缺乏基于 In-VEST 模型的生态系统服务评估验证。我们需要利用更多的高分辨率数据和更多的站点级观测来获得更可靠的结果(Dong et al., 2021)。最后,生态廊道宽度对廊道的生态功能有重要影响(Gao et al., 2021),再加上不同物种的空间和运动特征各有其特点,所以走廊宽度是 ESP 建设中的一个难题(Huang et al., 2021)。最近的研究表明,基于电路理论,随着累积阻力阈值从 1 km 增加到 20 km,生态廊道宽度逐渐扩大(Huang et al., 2021; Gao et al., 2022),但廊道的空间分布和生态点的位置几乎没有变化(Peng et al., 2018; Huang et al., 2021)。在未来的研究中,我们需要从空间异质性、物种特殊性、目标和生态效应中获得适当的走廊宽度。

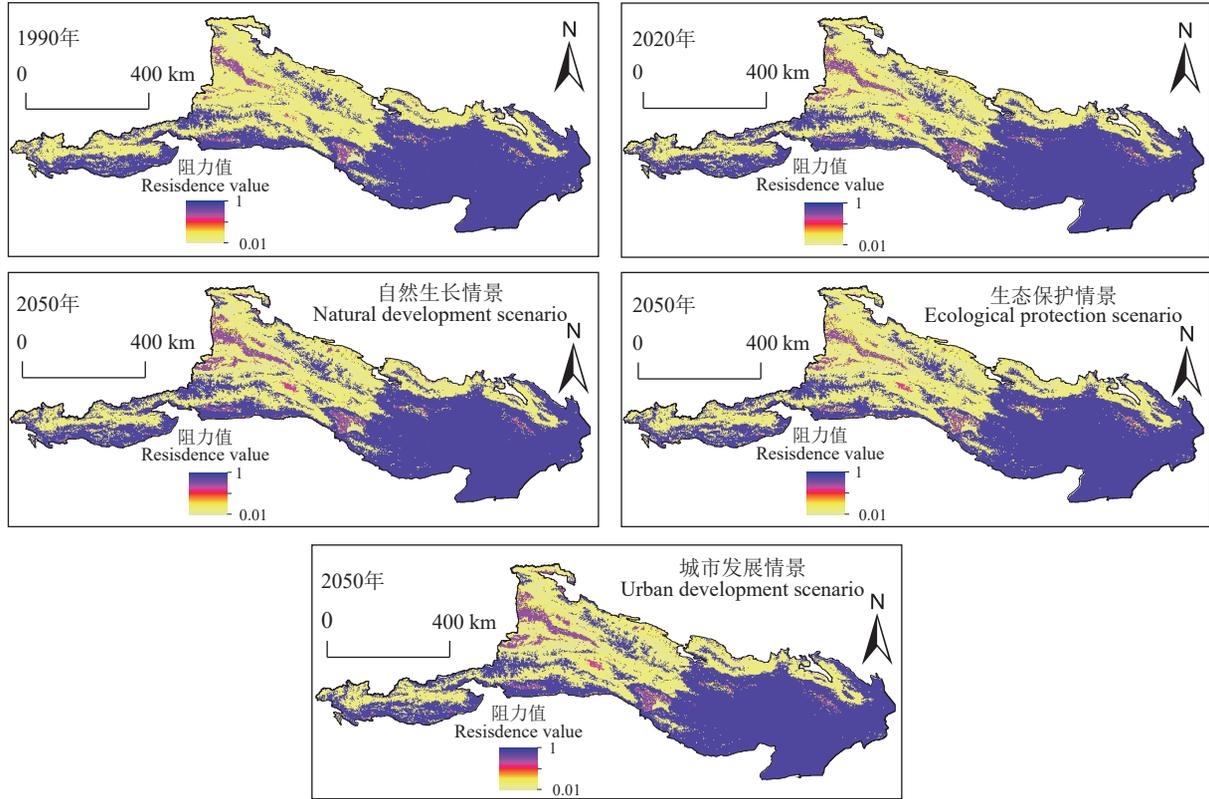


图 11 天山地区阻力面空间分布特征  
Fig.11 Spatial distribution characteristics of resistance surface in Tianshan area

表 5 天山地区生态安全格局特征  
Table 5 Characteristics of ecological security pattern in Tianshan area

类别		1990年	2020年	2050年		
				ND	EP	UD
生态源	数量/个	190	258	284	285	286
	面积/(10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	77.05	75.21	80.44	85.74	79.93
生态廊道	数量/个	390	532	576	580	589
	长度/km	9083	10466	8926	9634	9407
生态夹点	面积/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	1.62	1.57	1.41	1.68	1.54
生态障碍点	面积/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	1.21	1.39	1.52	1.01	1.41

注: ND—自然增长型; EP—生态保护型; UD—城市发展型。

表 6 1990—2050 年天山地区生态源所处地类的变化  
Table 6 Changes of land types of ecological sources in Tianshan Mountains from 1990 to 2050

类型	1990年面积 (/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	2020年面积 (/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	2050年面积/(10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )		
			NG	EP	UD
耕地	5.20	6.93	7.90	5.55	7.82
林地	0.39	2.67	8.59	8.64	8.62
草地	66.63	58.60	55.77	63.83	55.84
雪/冰	2.97	2.76	2.95	2.41	2.56
荒地	1.86	3.87	4.62	4.71	4.50
总计	77.05	74.83	79.83	85.14	79.34

## 6 结 论

本研究通过量化生态系统服务功能, 提取形成生态源和阻力面, 构建不同情景下的生态安全格局, 主要得出以下结论:

(1)1990—2050 年间天山地区的土地利用类型的变化相对稳定, 主要以草地和荒地地类为主, 具有典型的空间异质性。近 30 年, 研究区土地利用类型集中, 总转换面积达到  $32.52 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 主要是荒地和草地之间的转化。与 2020 年相比, 2050 年 ND、EP、UD 三种情景下的土地转换面积分别为  $21.43 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $23.09 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $22.87 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。在 EP 情境下, 林地、草地和水域面积均有所扩大, 而建设用地和耕地面积的增长幅度较小, 低于其他两种情境。

(2)从总体上看, 研究区域的碳储量、水保蓄能力、土壤保持能力和生境质量表现出以下特点: 高值区主要集中在山地草原带、中山森林带以及河谷地带、山间盆地等地带, 这些区域的植被覆盖较

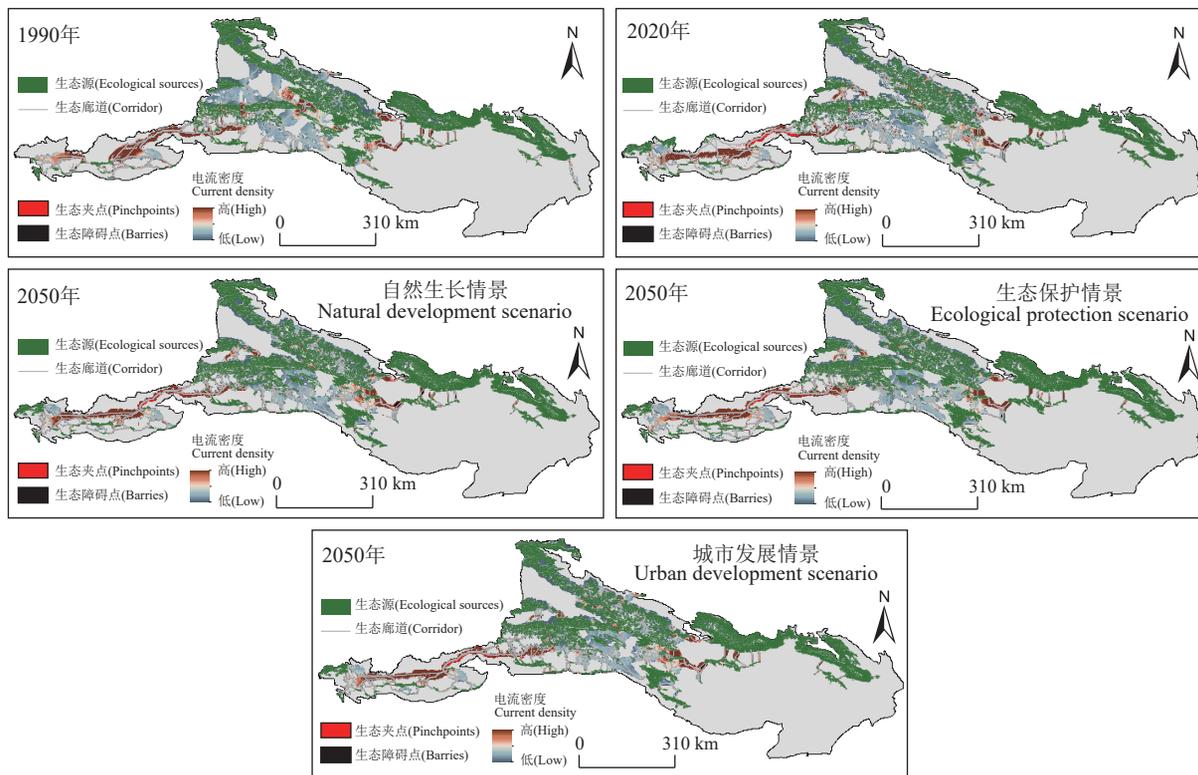


图 12 1990—2050 年天山地区生态安全格局空间分布  
Fig.12 Spatial distribution of ecological security pattern in Tianshan Mountains from 1990 to 2050

好。而低值区则主要分布在荒漠带和冰雪带等地。2050 年 EP 情境下的生态系统服务总体改善程度略高于其他两种情境。

(3) 近 30 年来,天山地区的 ESP 发生了变化,空间差异明显。生态源面积减少了  $1.84 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 呈现破碎化趋势,生态网络更加复杂。较大的生态源和较小的阻力廊道主要分布在研究区的中部及北部,具有较高的生态系统服务功能。相反,由于源间距离较远,且被沙地、裸地或山地阻隔,碎片化生态源和较大的抗性廊道主要分布在西部地区。与 2020 年相比,2050 年生态源面积有所增加,生态夹点和障碍点面积在不同情景下有不同的变化。具体为,EP 情景生态系统服务功能改善,生态源面积增加  $10.53 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,生态夹点面积增加  $0.11 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,生态障碍点面积减少  $0.38 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。UD 情景生态源增加  $4.72 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,生态夹点面积增加  $0.04 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,生态障碍点面积增加  $0.02 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。ND 情景下生态源增加  $5.23 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,生态夹点面积减少  $0.16 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,生态障碍点面积增加  $0.13 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。此外,除 EP 情景外,其他情景的生态廊道

长度均有所减少。研究结果表明,不同的土地利用/覆盖变化(LUCC)情景会影响生态系统服务(ESP)的构建方式,这对于提升干旱内陆地区生态系统的完整性和可持续性具有重要意义。然而,由于干旱内陆地区生态系统的多样性和特殊性,以及干旱生态系统对全球环境变化的响应存在不确定性,因此在实际应用中还需要考虑这些因素的影响。

## References

- Adriaenssens F, Chardon J P, De Blust G, Swinnen E, Villalba S, Gulinc H, Matthysen E. 2003. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model[J]. *Landscape and Urban Planning*, 64(4): 233–247.
- Beier P, Majka D R, Spencer W D. 2008. Forks in the road: Choices in procedures for designing wildland linkages[J]. *Conservation Biology*, 22(4): 836–851.
- Cao Jiajie, Fu Jianwei. 2023. Research on the construction method of urban green space habitat network based on InVEST model and Least-cost path: A case study of Nanjing[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 39(1): 53–58 (in Chinese with English abstract).
- Carroll C, Roberts D R, Michalak J L, Lawler J J, Nielsen S E,

- Stralberg D, Hamann A, Mcrae B H, Wang T L. 2017. Scale-dependent complementarity of climatic velocity and environmental diversity for identifying priority areas for conservation under climate change[J]. *Global Change Biology*, 23(11): 4508–4520.
- Chen Y, Li W, Deng H, Fang G, Li Z. 2016. Changes in central Asia's water tower: Past, present and future[J]. *Scientific Reports*, 6(1): 35458.
- Cook B I, Mankin J S, Marvel K, Williams A P, Smerdon J E, Anchukaitis K J. 2020. Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios[J]. *Earths Future*, 8(6): e2019EF001461.
- Dai Lu, Liu Yaobin, Huang Kaizhong. 2020. Construction of an ecological security network for waterfront cities based on MCR model and DO index: A case study of Jiujiang City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 75(11): 2459–2474 (in Chinese with English abstract).
- Dong J Q, Peng J, Xu Z H, Liu Y X, Wang X Y, Li B. 2021. Integrating regional and interregional approaches to identify ecological security patterns[J]. *Landscape Ecology*, 36(7): 2151–2164.
- FAO, IIASA. 2021. China Soil Map Based Harmonized World Soil Database (HWSD) (v1.1) (2009) [M].
- Fu Yujia, Tan Changhai, Liu Xiaohuang, Sun Xingli, Yuan Zemin, Zheng Yiwen. 2022. Definition, classification, observation and monitoring of natural resources and their application in territorial planning and governance[J]. *Geology in China*, 49(4): 1048–1063 (in Chinese with English abstract).
- Gao J B, Du F J, Zuo L Y, Jiang Y. 2021. Integrating ecosystem services and rocky desertification into identification of karst ecological security pattern[J]. *Landscape Ecology*, 36(7): 2113–2133.
- Gao M W, Hu Y C, Bai Y P. 2022. Construction of ecological security pattern in national land space from the perspective of the community of life in mountain, water, forest, field, lake and grass: A case study in Guangxi Hechi, China[J]. *Ecological Indicators*, 139: 108867.
- Gerten D, Rockström J, Heinke J, Steffen W, Richardson K, Cornell S. 2015. Response to comment on "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet"[J]. *Science*, 348(6240): 1217.
- Gong J Z, Liu Y S, Xia B C, Zhao G W. 2009. Urban ecological security assessment and forecasting, based on a cellular automata model: A case study of Guangzhou, China[J]. *Ecological Modelling*, 220(24): 3612–3620.
- Groombridge B, Jenkins M. 2000. *Global Biodiversity: Earth's living resources in the 21st Century*[C]//: Cambridge, UK: World Conservation Press, 2000
- Guo F, Liu X, Mamat Z, Zhang W, Xing L, Wang R, Luo X, Wang C, Zhao H. 2023. Analysis of spatiotemporal variations and influencing factors of soil erosion in the Jiangnan Hills red soil zone, China[J]. *Heliyon*, 9(9): e19998.
- Han Wangya, Xia Shuangshuang, Zhou Wei, Shen Yu, Su Xukun, Liu Guohua. 2023. Constructing ecological security pattern based on ecological corridor identification in Lhasa River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 43(21): 8948–8957 (in Chinese with English abstract).
- Han Zongwei, Jiao Sheng, Hu Liang, Yang Yumin, Cai Qing, Li Bei, Zhou Min. 2019. Construction of ecological security pattern based on coordination between corridors and sources in national territorial space[J]. *Journal of Natural Resources*, 34(10): 2244–2256 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruji. 2004. *Natural Geography of Tianshan Mountains, China* [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese with English abstract).
- Huang K X, Peng L, Wang X H, Deng W. 2022. Integrating circuit theory and landscape pattern index to identify and optimize ecological networks: A case study of the Sichuan Basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(44): 66874–66887.
- Huang L Y, Wang J, Fang Y, Zhai T L, Cheng H. 2021. An integrated approach towards spatial identification of restored and conserved priority areas of ecological network for implementation planning in metropolitan region[J]. *Sustainable Cities and Society*, 69: 102865.
- Kang J M, Zhang X, Zhu X W, Zhang B L. 2021. Ecological security pattern: A new idea for balancing regional development and ecological protection. A case study of the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 26: e01472.
- Ke X L, Wang X Y, Guo H X, Yang C, Zhou Q, Mougharbel A. 2021. Urban ecological security evaluation and spatial correlation research based on data analysis of 16 cities in Hubei Province of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 311: 127613.
- Li M Y, Liang D, Xia J, Song J X, Cheng D D, Wu J T, Cao Y L, Sun H T, Li Q. 2021. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model[J]. *Journal of Environmental Management*, 286: 112212.
- Li Q, Zhou Y, Yi S Q. 2022. An integrated approach to constructing ecological security patterns and identifying ecological restoration and protection areas: A case study of Jingmen, China[J]. *Ecological Indicators*, 137: 108723.
- Li Y G, Liu W, Feng Q, Zhu M, Yang L S, Zhang J T, Yin X W. 2023. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi Regions, Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 855: 158940.
- Li Z T, Li M, Xia B C. 2020. Spatio-temporal dynamics of ecological security pattern of the Pearl River Delta urban agglomeration based on LUCC simulation[J]. *Ecological Indicators*, 114: 106319.
- Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. 2021. 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*, 85: 101569.
- Liu Z H, Huang Q D, Tang G P. 2021. Identification of urban flight corridors for migratory birds in the coastal regions of Shenzhen City based on three-dimensional landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 36(7): 2043–2057.
- Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. 2018. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(16): 4039–4044.
- Lu Y, Xiaoliang X, Jicai L, Xiaohua F, Luyuan L. 2022. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model[J]. *Arid Zone Research*, 39(6): 1896–1906.
- McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. 2008. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation[J]. *Ecology*, 89(10): 2712–2724.
- Pan Jinghu, Li Lei. 2021. Optimization of ecological security pattern in Gansu section of the Yellow River Basin using OWA and circuit model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 37(3): 259–268 (in Chinese with English abstract).
- Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. 2018. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 644: 781–790.
- Peng Jian, Li Huilei, Liu Yanxu, Hu Yina, Yang Yang. 2018. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 73(4): 701–710 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jian, Zhao Huijuan, Liu Yanxu, Wu Jiansheng. 2017. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. *Geographical Research*, 36(3): 407–419 (in Chinese with English abstract).
- Peng S. 2024a. 1-km Monthly Mean Temperature Dataset for China (1901–2023) [M]. National Tibetan Plateau Data Center.
- Peng S. 2024b. 1-km Monthly Precipitation Dataset for China (1901–2023) [M]. National Tibetan Plateau Data Center.
- Proctor M F, Nielsen S E, Kasworm W F, Servheen C, Radandt T G, Machutchon A G, Boyce M S. 2015. Grizzly bear connectivity map in the Canada–United States trans-border region[J]. *Journal of Wildlife Management*, 79(4): 544–558.
- Reheman·Rukeya, Kasim·Alim, Ablat·Halmu-rat, Duolat·Xilinayi, Xu Jinhua. 2022. Research on the temporal and spatial evolution of habitat quality in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains based on InVEST Model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 38(9): 1112–1121 (in Chinese with English abstract).
- Sharp R, Tallis H, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin–Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N 2016. InVEST+ VERSION+ User's Guide. The Natural Capital Project [M]. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Spear S F, Balkenhol N, Fortin M J, Mcrae B H, Scribner K. 2010. Use of resistance surfaces for landscape genetic studies: Considerations for parameterization and analysis[J]. *Molecular Ecology*, 19(17): 3576–3591.
- Sun Zhangtao, Yu Zhengwei, Shu Siqi, Xu Chuangsheng, Shuyang. 2023. Evaluation of ecosystem services of Chinese provincial land and suggestions for ecological geological survey[J]. *Geology in China*, 50(2): 479–494 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Chen Y Q, Shao X M, Zhang Y Y, Cao Y G. 2012. Land-use changes and policy dimension driving forces in China: Present, trend and future[J]. *Land Use Policy*, 29(4): 737–749.
- Wen J F, Hou K. 2021. Research on the progress of regional ecological security evaluation and optimization of its common limitations[J]. *Ecological Indicators*, 127: 107797.
- Wang Luchen, Han Haihui, Zhang Jun, Huang Jiao, Gu Xiaofan, Chang Liang, Dong Jiaqiu, Long Rui, Wang Qian, Yang Bingchao. 2024. Spatio-temporal evolution of land use and human activity intensity in the Tarim River Basin, Xinjiang [J]. *Geology in China*, 51(1): 203–220(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoyu, Chen Tianqian, Feng Zhe, Wu Kening, Lin Qian. 2020. Construction of ecological security pattern based on boundary analysis: A case study on Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(10): 3375–3384 (in Chinese with English abstract).
- Wei Baojing, Su Jie, Hu Xijun, Xu Kaiheng, Zhu Manle, Liu Luyun. 2022. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 42(7): 2995–3009 (in Chinese with English abstract).
- Xia C H, Hu Z C, Xi C, Ming C W. 2008. The new methodology of geomorphologic zonalization in Xinjiang based on geographical grid [J]. *Geographical Research*, (3): 481–492, 725–726.
- Xiao Duning, Chen Wenbo, Guo Fuliang. 2002. On the basic concepts and contents of ecological security[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13(3): 354–358 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenqiang, Yang Liao, Chen Xi, Gao Yaqi, Wang Lei. 2016. Carbon storage, spatial distribution and the influence factors in Tianshan forests[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(4): 364–373 (in Chinese with English abstract).
- Youcun L, Keqin J, Kui Z, Yan L, Tianding H, Yu Z. 2017. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 39(4): 748–759.

- Yu Menglin, Liu Pinghui, Zhu Chuanmin. 2022. Construction of ecological security network based on minimum cumulative resistance model at Ningbo City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 42(1): 217–224 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zhilin, Zhao Mingsong, Gao Yingfeng, Wang Tao, Zhao Zhidong, Wang Shihang. 2024. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Huaibei City based on InVEST-PLUS Model[J]. *Environmental Science*, 45(6): 1–21 (in Chinese with English abstract).
- Yuan J L, Liu X H, Li H Y, Wang R, Luo X P, Xing L Y, Wang C, Zhao H H. 2023. Assessment of spatial-temporal variations of soil erosion in Hulunbuir Plateau from 2000 to 2050[J]. *Land*, 12(6): 1214.
- Zhang D, Wang X, Qu L, Li S, Lin Y, Yao R, Zhou X, Li J. 2020. Land use/cover predictions incorporating ecological security for the Yangtze River Delta region, China[J]. *Ecological Indicators*, 119: 106841.
- Zhang Mingdan, Li Yungang. 2023. Study on ecosystem service trade-off / synergy relationship in Ruili-Daying River Basin[J]. *Study on Soil and Water Conservation*, 30(6): 415–422 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Zhong Q L, Cheng D L, Xu C B, Chang Y N, Lin Y Y, Li B Y. 2022. Landscape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region[J]. *Ecological Indicators*, 136: 108642.
- 8948–8957.
- 韩宗伟, 焦胜, 胡亮, 杨宇民, 蔡青, 黎贝, 周敏. 2019. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建[J]. *自然资源学报*, 34(10): 2244–2256.
- 胡汝骥. 2004. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 潘竟虎, 李磊. 2021. 利用 OWA 和电路模型优化黄河流域甘肃段生态安全格局[J]. *农业工程学报*, 37(3): 259–268.
- 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 2018. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. *地理学报*, 73(4): 701–710.
- 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 2017. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. *地理研究*, 36(3): 407–419.
- 如克亚·热合曼, 阿里木江·卡斯木, 哈力木拉提·阿布来提, 希丽娜依·多来提, 许金花. 2022. 基于 InVEST 模型的天山北坡城市群生境质量时空演化研究[J]. *生态与农村环境学报*, 38(9): 1112–1121.
- 孙张涛, 余正伟, 舒思齐, 许闯胜, 舒阳. 2023. 中国省域生态系统服务价值评价与生态地质调查工作建议[J]. *中国地质*, 50(2): 479–494.
- 王璐晨, 韩海辉, 张俊, 黄姣, 顾小凡, 常亮, 董佳秋, 龙睿, 王倩, 杨炳超. 2024. 塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究[J]. *中国地质*, 51(1): 203–220.
- 王晓玉, 陈甜倩, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 2020. 基于地类边界分析的江苏省生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 40(10): 3375–3384.
- 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 徐凯恒, 朱满乐, 刘路云. 2022. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J]. *生态学报*, 42(7): 2995–3009.
- 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 2002. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. *应用生态学报*, 13(3): 354–358.
- 许文强, 杨辽, 陈曦, 高亚琪, 王蕾. 2016. 天山森林生态系统碳储量格局及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 40(4): 364–373.
- 于梦林, 刘平辉, 朱传民. 2022. 基于 MCR 模型的宁波市生态安全网络构建[J]. *水土保持通报*, 42(1): 217–224.
- 于芝琳, 赵明松, 高迎风, 王涛, 赵治东, 王世航. 2024. 基于 InVEST-PLUS 模型的淮北市碳储量时空演变及预测[J]. *环境科学*, 45(6): 1–21.
- 张铭丹, 李运刚. 2023. 瑞丽江-大盈江流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. *水土保持研究*, 30(6): 415–422.

## 附中文参考文献

- 曹加杰, 傅剑玮. 2023. 基于 InVEST 模型和最小成本路径的城市绿色空间生境网络构建方法研究——以南京为例[J]. *中国园林*, 39(1): 53–58.
- 戴璐, 刘耀彬, 黄开忠. 2020. 基于 MCR 模型和 DO 指数的九江滨水城市生态安全网络构建[J]. *地理学报*, 75(11): 2459–2474.
- 付宇佳, 谭昌海, 刘晓煌, 孙兴丽, 袁泽民, 郑艺文. 2022. 自然资源定义、分类、观测监测及其在国土规划治理中的应用[J]. *中国地质*, 49(4): 1048–1063.
- 韩王亚, 夏双双, 周维, 申宇, 苏旭坤, 刘国华. 2023. 基于生态廊道识别的拉萨河流域生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 43(21):