

# 基于 NPP 的干旱区生物多样性维护功能评价及其驱动因素分析

杜洁, 木合塔尔·艾买提, 陈艳桃, 贾岩, 刘玉婷

(喀什大学 生命与地理科学学院, 新疆 喀什 844000)

**摘要:**【目的】开展干旱区生物多样性维护功能评价,以揭示该区域生物多样性时空变化特征、明确生物多样性关键保护区域,进而提升生态环境治理效率。【方法】基于 MODIS17A3 数据集、气象数据和高程数据等,以典型干旱区喀什地区为例,采用 NPP 定量指标法对喀什地区的生物多样性维护重要性进行评估与分级,并选取坡度、地形起伏度、植被覆盖度、土地利用类型、GDP、人口密度、城镇化率、第一产业比重 8 个因子作为自变量,运用地理探测器对喀什地区生物多样性维护功能驱动因素进行探测和分析。【结果】①喀什地区生物多样性维护功能区总面积为 24 622.28 km<sup>2</sup>,占总面积的 22.29%。其中,极重要区面积最小,占 12.45%,主要分布在喀什噶尔河绿洲区;重要区占 19.53%,分布在叶尔羌河绿洲区和喀什噶尔河中游两岸地区;一般重要区占 68.02%,集中在两大绿洲区毗邻地带和南部山区。②2000—2020 年喀什地区生物多样性维护功能呈上升趋势,极重要区和重要区面积增加了 717.58 km<sup>2</sup>,增幅为 0.65%。③城镇化率、人口密度、GDP 在 2000 年、2010 年和 2020 年的解释力均大于 0.350,是喀什地区生物多样性维护功能变化的主要驱动因素;其中城镇化率与人口密度的交互作用最为显著,2000 年、2010 年和 2020 年解释力分别为 0.746、0.756、0.594。【结论】喀什地区生物多样性维护功能受水资源与人类活动共同制约,是干旱区人地关系与自然过程相互作用的集中体现。

**关键词:**植被净初级生产力(NPP);干旱区;生物多样性;地理探测器;喀什地区

**中图分类号:**F301.21

**文献标志码:**A

2020 年 9 月 30 日,习近平总书记在联合国生物多样性峰会上的讲话中指出:“生物多样性关系人类福祉,是人类赖以生存和发展的重要基础。”维护地球生物多样性、保证生物资源可持续性,是目前世界各国普遍关注的生态环境议题,也是所提倡的全球环境保护行动和计划中的重点内容。开展生物多样性维护功能评价,对于掌握区域生物多样性的空间变化格局、明确生物多样性保护的重点区域、增强生态管理效率等方面具有重大意义<sup>[1-2]</sup>。

近年来,国内外在生物多样性维护功能评价方面的研究日趋成熟,评价目标、评价方法和评价尺度呈现出多元化的特征。其中,评价目标主要包括基因、物种、生态系统等,评价方法包括生态调查法、指标评价法等,评价尺度主要覆盖区域、流域、国家以及全球等<sup>[3-4]</sup>。随着遥感技术的快速发展和数据处理能力的提升,遥感(Remote Sensing,RS)、地理信息系统(Geographic Information System,GIS)以及全球定位系统(Global Positioning System,GPS)技术在

生物多样性研究领域中的应用<sup>[5-7]</sup>,促使生物多样性维护功能的评价方法由定性趋向定量,评价结果由粗略趋向精准<sup>[8-10]</sup>。在此背景下,部分国家和地区已陆续开展重要植物区<sup>[11-14]</sup>、重要野生动物区<sup>[15-17]</sup>等关键区域的划定与保护工作,并在区域生态保护中取得了重要进展。目前,国内学者以省级、市级、县级等多尺度行政单元为研究对象,综合运用光学利用率模型、净初级生产力(Net Primary Productivity,NPP)法及最大熵(Maximum Entropy,MaxEnt)模型法等,深入剖析区域生态系统功能特征。如,裴文明等<sup>[18]</sup>在用光学利用率模型估算 NPP 的基础上,对 2000—2020 年黑龙江省生物多样性维护功能重要性进行了评估与分级。陈和彦<sup>[19]</sup>以县级为评价尺度,用生物多样性维护服务能力指数作为评估指标,对云县生态系统服务功能重要性进行了单项评价。马孟泉等<sup>[20]</sup>分别选用 NPP 法和 MaxEnt 模型法对盘锦市生物多样性维护功能重要性进行评价。整体来看,国内学者对生物多样性维

收稿日期/Received: 2025-02-07

修回日期/Revised: 2025-05-06

基金项目:新疆自治区厅级科研项目“生态文明视角下喀什地区土地利用结构优化研究”(20242879);新疆自治区科技计划项目(2021D01B05)

第一作者:杜洁(2000—),女,硕士研究生,从事区域生态资源环境评价与地理教学方面的研究。E-mail:17599477212@163.com。

通信作者:木合塔尔·艾买提(1982—),男,维吾尔族,副教授,从事区域生态资源环境评价研究与地理教学方面的研究。E-mail:muhtar99@sina.com。

护功能重要性评价研究较为丰富,为区域生态保护实践提供了重要参考。

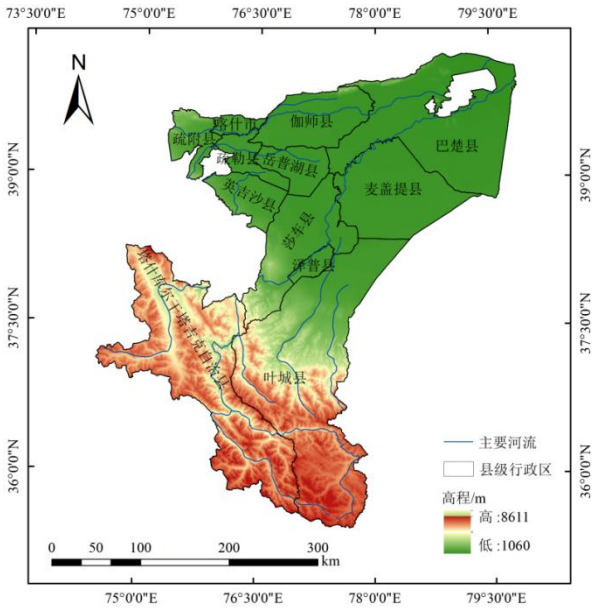
干旱区作为全球生态系统的重要组成部分,其生物多样性形成与维护机制的特殊性,决定了相关研究对优化全球生态格局、保障生态系统稳定具有重要科学价值。喀什地区深居西北内陆,区域内绿洲与荒漠、山地、戈壁相互交错,是典型的干旱区绿洲生态系统。同时,喀什作为我国向西开放的重要窗口,其经济的高质量发展对实现新疆维吾尔自治区经济的跨越式发展有重要意义,而当地的生态环境与经济可持续发展紧密相关<sup>[21-22]</sup>。鉴于西北干旱区生态系统的脆弱性与喀什地区生态保护的迫切需求,本研究基于 NPP 定量指标法,对 2000—2020 年喀什地区生物多样性维护功能重要性展开系统评价。通过空间格局和时空演变多维度分析生物多样性维护功能的分布特征,并运用地理探测器深入探究其驱动因素,旨在为干旱区生物多样性保护、生态系统修复及区域可持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

喀什地区地处中国西北部,新疆维吾尔自治区西南部(北纬  $35^{\circ}28' \sim 40^{\circ}16'$ ,东经  $71^{\circ}39' \sim 79^{\circ}52'$ )。地形三面环山一面敞开,北部是天山南脉,西部为帕米尔高原,南部是喀喇昆仑山,东部为塔克拉玛干沙漠,地势由西南向东北倾斜<sup>[23-24]</sup>。喀什地区深处内陆,远离海洋,降水量稀少,年均降水量介于  $60.1 \sim 135.6 \text{ mm}$ ,属于典型的温带大陆性干旱气候区<sup>[25]</sup>。区域内沙漠、裸地等未利用土地面积占比较大,水域、林地及草地占比较小,森林覆盖率仅为  $4.5\%$ ,且部分区域无植被覆盖,生态环境具有脆弱性和敏感性的特征<sup>[26]</sup>。截止目前,喀什地区共有 21 种国家级重点保护野生植物,其中新疆沙冬青

、盐生肉苁蓉、裸果木和梭梭为主要优势物种。喀什地区拥有国家一级、二级重点保护野生动物共 36 种,主要包括黄羊、盘羊、雪豹、赤狐等。生态环境部发布的《中国生物多样性保护优先区域范围》公告中明确指出,喀什地区下辖的巴楚县和麦盖提县涉及到了塔里木河流域生物多样性保护优先区域。



注:该图基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

### 1.2 数据来源

本研究使用的数据主要包括喀什地区的 NPP 数据、气象数据、高程数据和土地利用类型数据等(见表 1)。考虑研究区范围较小和提高图像分辨率,利用 ArcGIS 10.8 将以上数据坐标系统一转换至 Xian\_1980\_3\_Degree\_GK\_CM\_78E 投影坐标系,空间分辨率均重采样为  $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 。

表 1 研究数据来源

Tab.1 Sources of research data

| 数据类型  | 分辨率/m | 时间序列      | 来源                                                                                     |
|-------|-------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| NPP   | 500   | 2000—2020 | 美国国家航空局( <a href="https://www.earthdata.nasa.gov">https://www.earthdata.nasa.gov</a> ) |
| 气象    | 1 000 | 2000—2020 | 国家青藏高原数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn">https://data.tpdc.ac.cn</a> )            |
| 高程    | 1 000 | —         | 资源环境科学数据平台( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )                |
| 地形起伏度 | 1 000 | —         | 地球资源数据云( <a href="https://www.gis5g.com">https://www.gis5g.com</a> )                   |

|          |       |                |                                                                               |
|----------|-------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 植被覆盖度    | 250   | 2000—2020      | 国家青藏高原数据中心( <a href="https://data.tpdac.ac.cn">https://data.tpdac.ac.cn</a> ) |
| 土地利用类型   | 30    | 2000—2020      | 武汉大学杨杰和黄昕教授提供的中国区<br>1990—2020 年的土地利用类型数据                                     |
| GDP 空间分布 | 1 000 | 2000、2010、2020 | 资源环境科学数据平台( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )       |
| 人口密度空间分布 | 1 000 | 2000、2010、2020 | 资源环境科学数据平台( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )       |
| 城镇化率     | —     | 2000、2010、2020 | 全国第五次、第六次、第七次人口普查                                                             |
| 第一产业比重   | —     | 2000、2010、2020 | 新疆统计年鉴                                                                        |

## 2 研究方法

### 2.1 生物多样性维护功能评估模型

生物多样性维护功能的大小与气候、地形、植被等生态环境因子有着密切关系<sup>[27]</sup>。《生态保护红线划定指南》提供了两种生物多样性维护功能指数计算方法,分别为物种分布模型法和 NPP 定量指标法。NPP 定量指标法参数较少,操作较为简单,适用范围具有地域性特征,其数值越大越有利于生物多样性的形成与维护<sup>[28]</sup>。基于此,本研究采用 NPP 定量指标法对喀什地区生物多样性维护功能重要性进行计算与评估,计算公式为

$$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \quad (1)$$

式(1)中: $S_{bio}$ 为生物多样性维护功能指数; $NPP_{mean}$ 为多年植被净初级生产力平均值; $F_{pre}$ 为多年平均降水量; $F_{tem}$ 为多年平均气温; $F_{alt}$ 为海拔因子。

采用最大值最小值法将 $NPP_{mean}$ 、 $F_{pre}$ 、 $F_{tem}$ 、 $F_{alt}$ 四个评价因子进行归一化处理,再根据上述公式计算得出生物多样性维护服务能力指数。归一化公式为

$$D_{ij} = \frac{A_{ij} - \min_i}{\max_i - \min_i} \quad (2)$$

式(2)中: $D_{ij}$ 是对于因子 j 的指标 i 的归一化值; $A_{ij}$ 是因子 j 第 i 个指标值; $\max_i$ 和 $\min_i$ 分别是第 i 个指标中的最大值和最小值。

首先,根据上述公式(2)用 Arc GIS 将计算得到的生物多样性维护功能进行归一化处理。其次,用 Microsoft Office Excel 降序排列归一化后的栅格值,并对处理后的栅格值进行累加,将累加栅格值占生物多样性维护能力总值比例的 80%与 50%所对应的栅格值,作为生物多样性重要性分级分界点。最

后,使用 Arc GIS 重分类工具,将生物多样性维护功能重要性分为极重要区、重要区和一般重要区。

表 2 2000—2020 年喀什地区生物多样性维护功能重要性等级划分

| Tab.2 Classification of the importance levels of biodiversity conservation functions in Kashi region from 2000 to 2020 |          |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|
| 栅格值                                                                                                                    | 累加栅格值比例% | 等级划分  |
| 24~100                                                                                                                 | <50%     | 极重要区  |
| 10~24                                                                                                                  | 50%~80%  | 重要区   |
| 0~10                                                                                                                   | >80%     | 一般重要区 |

### 2.2 地理探测器

为深入剖析喀什地区 2000-2020 年生物多样性维护功能时空演变的驱动机制,本研究运用地理探测器进行单因子探测和交互作用探测。

分异及因子探测:探测生物多样性维护功能的空间分异性,明确每个影响因子对生物多样性维护功能的影响力。用  $q$  值度量,取值范围为 $[0,1]$ <sup>[29]</sup>。 $q$  值越接近 1,表明该因子对因变量空间异质性的解释力越大<sup>[30]</sup>。

交互作用探测:识别不同影响因子对生物多样性维护功能的交互作用。在评估两个影响因子共同作用对生物多样性维护功能空间分异的解释力时,主要将交互作用类型划分为 5 类。(见表 3)

表 3 两个自变量对因变量交互作用的类型<sup>[31]</sup>  
Tab.3 Types of interaction between two independent variables and dependent variable

| 判据                                       | 交互作用  |
|------------------------------------------|-------|
| $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$ | 非线性减弱 |

$$\begin{aligned} \text{Min}[q(X_1), q(X_2)] &< q(X_1 \cap X_2) \\ &< \text{Max}[q(X_1), q(X_2)] \end{aligned} \quad \text{单因子非线性减弱}$$

$$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)] \quad \text{双因子增强}$$

$$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2) \quad \text{非线性增强}$$

$$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2) \quad \text{独立}$$

注:  $X_1$  和  $X_2$  表示生物多样性维护功能的影响因子

在参考前人研究的基础上<sup>[32]</sup>, 本研究分别选取 2000 年、2010 年、2020 年的坡度( $X_1$ )、地形起伏度( $X_2$ )、植被覆盖度( $X_3$ )、土地利用类型( $X_4$ )、GDP( $X_5$ )、人口密度( $X_6$ )、城镇化率( $X_7$ )、第一产业比重( $X_8$ )共 8 个因子作为自变量, 以生物多样性维护功能作为因变量。基于研究区的空间范围, 在 Arc GIS 中采用  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  的网格对喀什地区进行分割和采样, 将提取的 1 109 个样本点数据导入地理探测器软件中, 以分析生物多样性维护功能时空变化的驱动因素。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生物多样性维护功能空间格局变化

研究结果显示, 喀什地区 2000—2020 年的生物多样性维护功能区总面积为  $24\,622.28 \text{ km}^2$ , 占喀什地区总面积的 22.29%。生物多样性维护功能极重要区的面积为  $3\,067.56 \text{ km}^2$ , 占生物多样性维护功能区总面积的 12.45%, 集中分布在西北部的喀什噶尔河绿洲区。生物多样性维护功能重要区的面积为  $4\,807.60 \text{ km}^2$ , 面积占比为 19.53%, 主要分布在叶尔羌河绿洲区和喀什噶尔河中游两岸地区。生物多样性维护功能一般重要区面积为  $16\,747.12 \text{ km}^2$ , 面积占比为 68.02%, 主要分布在两大绿洲区的毗邻地带及南部海拔较低的山区。

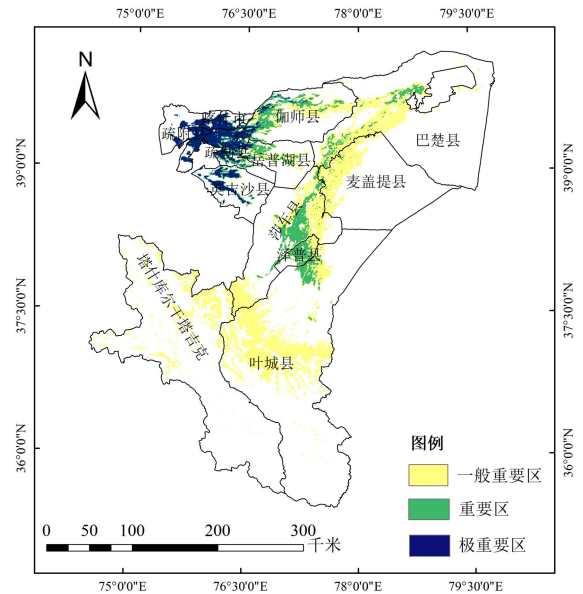


图 2 2000—2020 年喀什地区生物多样性维护功能重要性评价

Fig.2 Evaluation of the importance of biodiversity conservation function in Kashi region from 2000 to 2020

#### 3.1.1 各行政区生物生物多样性维护功能分析

通过对喀什各行政区生物多样性维护功能进行分析, 表明喀什地区各县市生物多样性维护功能等级在空间分布上具有显著差异(见表 4)。生物多样性维护功能极重要区主要集中在疏勒县、疏附县东部、英吉沙县北部、喀什市, 分别占极重要区总面积的 32.95%、25.77%、15.30%、14.66%。该区域主要集聚于地势平坦的喀什噶尔河绿洲区, 水热资源较为充足, 植被覆盖率较高, 为动植物的生存与繁衍提供了适应的环境, 是喀什地区生物多样性维护的关键区域。生物多样性维护功能重要区主要分布在莎车县的中部、伽师县的西部、巴楚县的中部和泽普县, 分别占重要区总面积的 23.90%、21.82%、12.49%、9.62%。该区域处于水源丰富的喀什噶尔河绿洲区和叶尔羌河绿洲区, 区内包括金胡杨国家森林公园、叶尔羌河湿地公园等, 生态环境良好, 有利于生物多样性的形成与维护。生物多样性维护功能一般重要区主要分布在叶城县的中部、巴楚县的西南部、莎车县的东北部、塔什库尔干塔吉克自治县的北部, 分别占一般重要区总面积的 34.49%、16.17%、14.17%、12.98%。该区域大部分处于两大绿洲区的毗邻地带和南部海拔较低的山区, 区内虽已设立塔什库尔干野生动植物自然保护区和帕米尔高原阿拉尔国家湿地公园, 但水热条件较差, 植被较为稀疏, 动植物种类相对匮乏。

表 4 各行政区生物多样性维护功能重要性分区的面积及占比  
Tab.4 The area and proportion of the important zoning for biodiversity conservation functions in each administrative region

| 行政区         | 极重要区               |       | 重要区                |       | 一般重要区              |       |
|-------------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|             | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  |
| 喀什市         | 449.74             | 14.66 | 49.87              | 1.04  | 5.31               | 0.03  |
| 巴楚县         | 0                  | 0     | 600.68             | 12.49 | 2 708.59           | 16.17 |
| 伽师县         | 284.97             | 9.29  | 1 048.05           | 21.82 | 1 089.02           | 6.50  |
| 麦盖提县        | 0                  | 0     | 70.86              | 1.47  | 1 906.23           | 11.38 |
| 莎车县         | 0                  | 0     | 1 149.05           | 23.90 | 2 373.45           | 14.17 |
| 疏附县         | 790.58             | 25.77 | 4.67               | 0.10  | 0                  | 0     |
| 疏勒县         | 1 010.62           | 32.95 | 359.84             | 7.48  | 36.12              | 0.22  |
| 塔什库尔干塔吉克自治县 | 0                  | 0     | 0                  | 0     | 2 171.70           | 12.98 |
| 叶城县         | 0                  | 0     | 451.54             | 9.39  | 5776.07            | 34.49 |
| 英吉沙县        | 469.30             | 15.30 | 201.52             | 4.19  | 39.13              | 0.23  |
| 岳普湖县        | 62.35              | 2.03  | 408.85             | 8.50  | 389.51             | 2.33  |
| 泽普县         | 0                  | 0     | 462.67             | 9.62  | 252.01             | 1.50  |

### 3.1.2 各土地利用类型生物多样性维护功能分析

研究表明,喀什地区生物多样性维护功能的极重要区和重要区均以耕地为主,面积为 2 261.56 km<sup>2</sup>和 3 360.65 km<sup>2</sup>,分别占生物多样性维护区域总面积的 9.185%和 13.649%;生物多样性维护一般重要区以草地为主,面积为 9 586.95 km<sup>2</sup>,占生物多样性维护区域总面积的 38.936%。

由此得知,喀什地区不同土地利用类型的生物多样性维护功能的空间分布差异较大。耕地、草地

和林地生物多样性维护功能较为显著,是维护喀什地区生物多样性功能的关键土地利用类型,在生态系统的物质循环、气候调节以及水土保持等关键生态过程中发挥着关键作用。建设用地生物多样性维护功能程度较低,其极重要区、重要区、一般重要区分别占生物多样性维护区域总面积的 0.001%、0.002%和 0.031%。建设用地主要用于城镇开发与建设活动,如大规模的城市建造、道路铺设等,会使原生自然生态系统遭到破坏与改变,从而对生物多样性维护和生态环境建设产生不利影响。

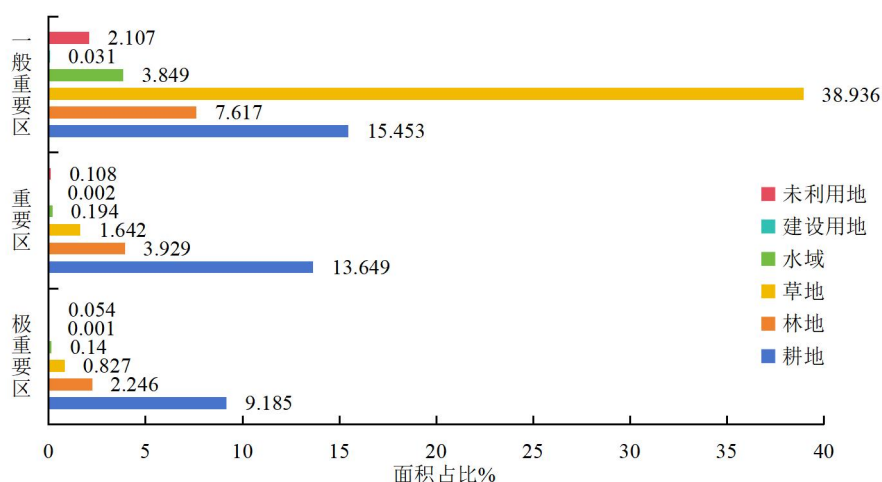


图 3 各土地利用类型生物多样性维护重要性分级的面积占比

Fig.3 The proportion of the area in which the importance of biodiversity conservation is graded by land use type

### 3.2 生物多样性维护功能时间变化趋势

基于生态系统演替的阶段性特征,本研究选择10年为周期进行动态评估,这一时间尺度既能避免短期气候波动造成的干扰,又能在保障数据连续性与完整性的同时,契合多数生态保护政策的实施周期,从而有效分析生态系统的动态变化特征及其驱动机制。研究表明,2000—2020年生物多样性维护功能重要区总面积为2 4620.59 km<sup>2</sup>,2000—2020年生物多样性维护重要区总面积为2 4621.39 km<sup>2</sup>,增加了0.8 km<sup>2</sup>,整体呈微弱上升的趋势。从生物多样性维护功能各级重要区来看,极重要区和重要区的面积在后十年均有轻微幅度的下降,下降幅度分别0.01%和0.34%。一般重要区面积后十年呈现增加的趋势,增加幅度为0.25%。这表明喀什地区的生态格局随时间的推移虽有一定的波动变化,但

整体的生物多样性维护区域仍保持增加的趋势。

从2000—2020年总体变化情况来看,喀什地区生物多样性维护功能极重要区和重要区的面积均呈上升的趋势,共增加了717.58 km<sup>2</sup>,增加幅度为0.65%,主要体现在疏勒县的中部和东部、伽师县的西南部、岳普湖县的西北部。一般重要区面积呈下降的趋势,下降幅度为0.65%,这一变化趋势主要是由于莎车县中部、泽普县中部和叶城县西北部等地区受环境保护政策的影响,区内生态环境得到改善、生物多样性维护功能逐步提升,由一般重要区上升到了重要区。由此可知,喀什地区近二十年生物多样性维护功能总体呈上升趋势,而不同重要区面积呈现出波动式变化。这种波动变化既反映了生态系统自身的敏感性与适应性,也凸显了环境保护政策在引导区域生物多样性维护功能优化升级方面的影响。

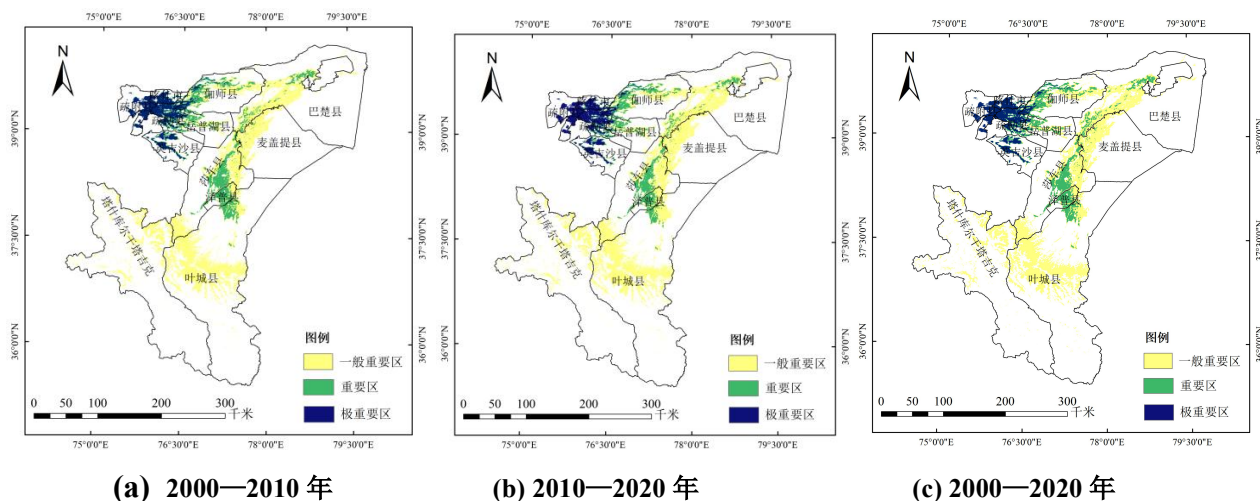


图4 喀什地区2000—2020年生物多样性维护功能重要性变化情况

Fig.4 Changes in the importance of biodiversity conservation function in Kashi region from 2000 to 2020

### 3.3 生物多样性维护功能影响因子探测结果分析

#### 3.3.1 单因子探测及影响分析

由因子探测结果可知(见表5),2000年、2010年和2020年的各个影响因子均通过了置信度( $P$ 值 $<0.05$ )的检验,表明各影响因子对喀什地区生物多样性维护功能的变化均有显著差异。从时间角度来看,2000年喀什地区生物多样性维护功能变化的主要驱动因素为城镇化率、人口密度和GDP。2010年城镇化率、GDP和人口密度仍是生物多样性维护功能变化的主要驱动因素,其中GDP和人口密度的解释力在增强,而城镇化率的解释力呈轻微下降趋势。在2020年,第一产业比重、GDP和人口密度成为生物多样性维护功能变化的主要驱动因素,第一产业比重的解释力在持续增强,而GDP和人口密度的 $q$

值虽呈波动变化,但对喀什地区生物多样性维护功能变化仍有很强的解释力。

从综合角度来看,城镇化率、人口密度、GDP是影响喀什地区2000—2020年生物多样性维护功能变化的主要驱动因素,这些社会经济因素通过转变土地利用方式、资源消耗模式以及生态环境保护政策等方面,进一步影响生物多样性维护功能的提升。坡度、地表起伏度、植被覆盖度和土地利用类型的解释力相对较弱,为次要驱动因素,这些自然因素通过影响生物栖息地的质量、数量和分布,间接地影响生物多样性的丰富度和稳定性。因此,在喀什地区的生物多样性保护工作中,需要综合考虑自然和社会经济两方面的驱动因素,制定科学的保护策略和管理措施。

表 5 各年份生物多样性维护功能影响因子的解释力  $q$  值

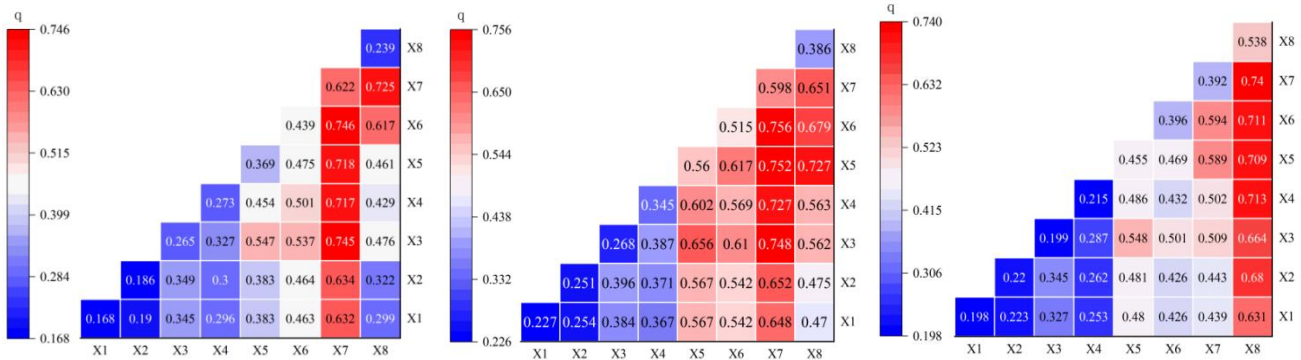
Tab.5 Interpretation power  $q$  values of the factors influencing biodiversity conservation function in each year

| 影响因子   | 2000 年 |     | 2010 年 |     | 2020 年 |     |
|--------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
|        | $q$ 值  | 重要性 | $q$ 值  | 重要性 | $q$ 值  | 重要性 |
| 坡度     | 0.168  | 8   | 0.227  | 8   | 0.198  | 8   |
| 地形起伏度  | 0.186  | 7   | 0.251  | 7   | 0.220  | 5   |
| 植被覆盖度  | 0.265  | 5   | 0.268  | 6   | 0.199  | 7   |
| 土地利用类型 | 0.273  | 4   | 0.345  | 5   | 0.215  | 6   |
| GDP    | 0.369  | 3   | 0.560  | 2   | 0.455  | 2   |
| 人口密度   | 0.439  | 2   | 0.515  | 3   | 0.396  | 3   |
| 城镇化率   | 0.622  | 1   | 0.598  | 1   | 0.392  | 4   |
| 第一产业比重 | 0.239  | 6   | 0.386  | 4   | 0.538  | 1   |

3.3.2 交互作用探测及协同路径分析

为系统揭示喀什地区生物多样性维护功能时空演变的驱动机制,本研究进一步对坡度( $X_1$ )、地形起伏度( $X_2$ )、植被覆盖度( $X_3$ )、土地利用类型( $X_4$ )、GDP( $X_5$ )、人口密度( $X_6$ )、城镇化率( $X_7$ )、第一产业比重( $X_8$ )进行交互作用探测,从而剖析生态环境与社会因子对生物多样性维护功能的影响路径。从交互作用探测结果(见图 5)可知,2000 年和 2010 年人口密度与城镇化率的交互作用最为显著,交互解释力分别为 0.746、0.756。2020 年人口密度与城镇化率的交互作用明显减弱,而第一产业比重与城镇化率的交互作用逐渐增强,交互解释力高达 0.740,并与多个因子的交互作用解释力均达到较高水平,这表明农业活动发展对喀什地区的生态环境保护具有重要的影响。城镇化率作为解释力最强的影响因子,其变化也会受到植被覆盖度、土地利用类型类型、

坡度等自然因素的影响,进而导致城镇化率与其他因素之间的协同效应相较于单一因素的作用更为突出。城镇化进程的加速往往伴随着土地利用类型的急剧转变,大规模的城市扩张与基础设施建设导致原生植被覆盖面积破坏,进而影响生物栖息地的完整性与连续性。相反,恶劣的生态环境会降低土地生产力,限制农业生产的可持续发展,同时增加城市生态治理成本,阻碍城镇化的进程。这种生态环境与社会经济因子协同作用的复杂路径,不仅揭示了喀什地区生物多样性维护功能演变的内在机理,更为干旱区生态系统的动态演变与可持续管理提供重要参考。因此,当地政府在制定生态保护政策时,应全面统筹考虑社会经济发展与生态环境承载能力,重点调控城镇化与农业活动的协同关系,通过优化土地利用规划、推动产业绿色转型等措施,推动生物多样性保护与社会经济发展相协调,促进干旱区生态、经济与社会的可持续发展。



(a) 2000 年

(b) 2010 年

(c) 2020 年

图 5 喀什地区生物多样性维护功能因子交互作用探测结果

Fig.5 Detection results of interaction of functional factors for biodiversity conservation in Kashi region

## 4 讨论

### 4.1 生物多样性维护功能空间分布问题

喀什地区作为国家级塔里木河荒漠化防治生态功能核心区,其独特的地形格局和气候条件,构成了典型的山地—绿洲—荒漠过渡生态系统<sup>[33]</sup>,为研究干旱区生物多样性维护功能的空间分异规律提供了理想样本。同时,喀什地区作为我国向西开放的重要战略节点,近年来经济快速发展,城镇化进程不断加快,人类活动对生态环境的干预强度增大,使得当地生态环境保护与经济可持续发展之间的关系愈发紧密。基于此,本研究立足喀什地区脆弱的生态系统和复杂的人类活动影响,从多个维度分析生物多样性维护功能空间分异及其驱动机制。研究结果表明,喀什地区生物多样性维护功能重要区呈现显著的空间分异。喀什噶尔河绿洲区水资源丰富、生态系统稳定,为生物多样性维护极重要区;叶尔羌河绿洲区及喀什噶尔河中游沿岸为重要区;绿洲区毗邻地带与南部山区则构成一般重要区。这一空间分布格局揭示了在干旱环境中,水资源的空间分布与供给能力是影响植被生长、决定生态系统类型与分布范围的主要驱动因素,凸显了水热条件协同作用对干旱区生态格局的影响。从不同土地利用类型来看,耕地、草地和林地是生物多样性维护的关键植被类型,可为区域可持续发展提供重要的生态服务功能。这一发现与何颖等<sup>[34]</sup>玛纳斯河流域的相关研究结论相一致。研究结果的趋同不仅验证了干旱区生态系统服务功能的区域共性,而且揭示了人类活动干预下干旱区生态系统的适应性特征,即人工绿洲与自然生态系统在水资源制约下的协同演化机制,为“一带一路”背景下的干旱区生态安全格局优化提供科学参考。

### 4.2 生物多样性维护功时空变化问题

喀什地区在 2000 至 2020 年间,生物多样性维护功能整体呈现上升趋势,而不同重要区面积呈现出波动式变化。其中,极重要区和重要区面积增加了 717.58 km<sup>2</sup>,增幅为 0.65%。这一变化趋势与喀什地区实施的一系列生态保护措施密切相关,反映了喀什地区生态修复与保护工作成效初显。近年来,喀什地区通过统筹山水林田湖草沙一体化治理,坚持“宜林则林、宜草则草、宜乔则乔、宜灌则灌”的原则,有效提升了林草湿生态系统的质量,改善了生物多样性环境。生物多样性维护功能中各类生物与

生存环境所构成的系统在基因维持、物种维护以及生态系统保护等方面所发挥出的积极作用,与人类社会的生存与发展有着密不可分的关系<sup>[35]</sup>。作为干旱区典型区域,喀什地区生物多样性维护功能的变化及面临的挑战,能为干旱区应对环境限制、优化生态修复措施提供借鉴,助力推动干旱区生态可持续发展。

### 4.3 生物多样性维护功能驱动因子问题

本研究从自然因素和社会因素两个层面深入分析了生物多样性维护功能时空变化的驱动因素,这一综合分析框架为理解生物多样性功能变化提供了更为全面的视角。自 2010 年“喀什经济特区”成立以来,喀什地区人口规模的显著扩张和城市化进程急剧加速。在此背景下,社会经济因素如第一产业比重、城镇化率以及人口密度逐渐成为影响该地区生物多样性维护功能变化的关键驱动力。城镇化率的提高往往伴随着土地利用方式的改变,大量的生态用地被转化为建设用地,导致生态系统的破碎化和生物栖息地的减少。人口密度的增加则会加剧对自然资源的利用和消耗,增加人类活动对生态系统的干扰,而且揭示了一个普遍规律:无论是在湿润地区<sup>[36]</sup>还是干旱地区,城市扩张、土地开发和资源利用导致环境恶化和生物多样性丧失,对生态系统服务的稳定性产生了极大的影响,亟需引起政府、社会各界的高度重视,以便从政策制定、城市规划、生态修复等多方面协同发力,缓解城市化对生物多样性造成的负面影响,以维持生态系统的稳定与平衡。GDP 的增长反映了经济活动的活跃程度,经济活动的扩张往往伴随着对生态环境的开发和利用。这些因素共同作用,对生物多样性维护功能产生了显著的影响。然而,需要注意的是,这些驱动因素对生物多样性维护功能的影响具有复杂性和双重性。一方面,社会经济的发展为生态保护提供了更多的资金和技术支持,有利于实施更大规模的生态保护工程;另一方面,过度的开发和利用也会对生态系统造成破坏,降低生物多样性维护功能。因此,干旱区应注重协调经济发展与生态保护的关系,科学合理地规划和利用土地资源,推动绿色经济发展,以实现生物多样性维护功能的可持续提升。

## 5 结论

1)2000—2020 年喀什地区生物多样性维护功

能区的空间分布表现出显著差异。生态服务功能极重要区多集中在水源充足、植被覆盖度高区;重要区主要分布于生态环境适宜、海拔较低区;一般重要区则多分布在水热条件较差、植被覆盖度低区。在土地利用类型方面,耕地、草地和林地因其较高的生物多样性维护功能,成为该地区生态服务功能的关键类型,而建设用地由于人为活动干扰较大,对生物多样性维护和生态环境建设的影响相对较为负面。这一空间格局表明,喀什地区生物多样性维护功能具有显著的水资源制约性性和生态脆弱性,是干旱区人地关系与自然过程相互作用的集中体现。

2)从2000—2020年总体变化来看,喀什地区生物多样性维护功能整体呈现上升趋势,但增幅较小,反映出干旱区生态恢复的缓慢性 and 复杂性。极重要区和重要区面积有所扩大,表明干旱区生态保护措施初步见效,但仍需持续加强。

3)研究表明,城镇化率、人口密度、GDP是影响喀什地区2000—2020年生物多样性维护功能的主要驱动因素。这一结果表明了人类活动在干旱区生物多样性维护中的主导作用,未来生态政策应重点关注优化水资源合理配置、土地利用结构、产业绿色转型等方面,促进生物多样性保护与区域可持续发展的协调。

## 参考文献

- [1]李海东,高吉喜.生物多样性保护适应气候变化的管理策略[J].生态学报,2020,40(11):3844-3850.[LI H D,GAO J X.Management strategies for biodiversity conservation to adapt to climate change[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(11):3844-3850.]
- [2]刘铭华,陈艳梅,邹长新,等.区域尺度生物多样性维护功能综合评估方法与实证研究[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):287-294.[LIU M H,CHEN Y M,ZOU C X,et al.Regional-scale comprehensive assessment method for biodiversity maintenance function and empirical research[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2021,37(3):287-294.]
- [3]丁晖,秦卫华.生物多样性评估指标及其案例研究[M].北京:中国环境科学出版社,2009:6-12.[DING H,QIN W H.Biodiversity assessment indicators and case studies[M].Beijing:China Environmental Science Press,2009:6-12.]
- [4]李昊民.生物多样性评价动态指标体系与替代性评价方法研究[D].中国林业科学研究院,2011:8-14.[LI H M.Research on dynamic index system and alternative evaluation methods for biodiversity assessment[D].Chinese Academy of Forestry,2011:8-14.]
- [5]莫建飞,莫伟华,陈燕丽.基于净初级生产力的广西喀斯特区生物多样性维护功能评价[J].科学技术与工程,2019,19(29):371-377.[MO J F,MO W H,CHEN Y L.Evaluation of biodiversity maintenance function in the Karst District of Guangxi based on net primary productivity[J].Science,Technology and Engineering,2019,19(29):371-377.]
- [6]STOMS D M,ESTES J E.A remote sensing research agenda for mapping and monitoring biodiversity[J].Remote Sensing,1997,14(10):1839-1860.
- [7]NAGENDRA H,GADGIL M.Satellite imagery as a tool for monitoring species diversity:assessment[J].Applied Ecology,1999,36:388-397.
- [8]郭庆华,胡天宇,姜媛茜,等.遥感在生物多样性研究中的应用进展[J].生物多样性,2018,26(8):789-806.[GUO Q H,HU T Y,JIANG Y Q,et al.Progress in the application of remote sensing in biodiversity research[J].Biodiversity,2018,26(8):789-806.]
- [9]刘方正,杜金鸿,周越,等.无人机和地面相结合的自然保护地生物多样性监测技术与实践[J].生物多样性,2018,26(8):905-917.[LIU F Z,DU J H,ZHOU Y,et al.Technology and practice of biodiversity monitoring in natural protected areas combining UAV and ground[J].Biodiversity,2018,26(8):905-917.]
- [10]刘仁杰.地理信息系统在生物多样性评估与保护方面的空间分析与决策支持[J].科技与创新,2024(13):181-184.[LIU R J.Spatial analysis and decision support of geographic information system in biodiversity assessment and conservation[J].Science and Innovation,2024(13):181-184.]
- [11]KOR L,PEREZ F,INWOOD K,et al.An evaluation of important plant areas around the world.[J].Conservation biology :the journal of the Society for Conservation Biology,2025,39(4):e70013.
- [12]ROZO M C,RODRÍGUEZ A S I,BENAVIDES C J,et al.Prioritization of important plant areas for conservation of frailejones (Espeletiinae,Asteraceae) in the Northern Andes[J].Biodiversity and Conservation,2024,33(14):1-26.
- [13]RICHARDS L S,FAROOQ H,MATIMELE H,et al.Identifying Mozambique's most critical areas for plant conservation:An evaluation of protected areas and Im

- rtant Plant Areas[J].Biotropica,2023,55(6):1183-1194.
- [14]VELLAK K,INGERPUU N,VELLAK A,et al.Vascular plant and bryophytes species representation in the protected areas network on the national scale[J].Biodiversity and Conservation,2010,19(5):1353-1364.
- [15]SARALAMBA C,DUANGCHANTRASIRI S,SORNSA M,et al.Estimation of White-Handed Gibbon Density and Population Size in Huai Kha Khaeng Wildlife Sanctuary,Western Thailand.[J].American journal of primatology,2025,87(10):e7008.
- [16]MORI M G,NEMATOLLAHI S,GUERRA A A C,et al.Integrating MaxEnt and InVEST modeling methods to identify priority areas for the conservation of emblematic and endemic wildlife in the Peruvian Tropical Andes[J].Global Ecology and Conservation,2025,62:e03626-e03626.
- [17]R. J C,ANGELA K,G.A J J.Monitoring changes in landscape structure in the Adirondack-to-Laurentians (A2L) transboundary wildlife linkage between 1992 and 2018: Identifying priority areas for conservation and restoration[J].Landscape Ecology,2022,38(2):383-408.
- [18]裴文明,葛峰,张慧,等.基于净初级生产力的黑龙江生物多样性维护功能重要性评价[J].东北师大学报(自然科学版),2024,56(2):140-149.[PEI W M,GE F,ZHANG H,et al.Importance evaluation of biodiversity maintenance function in Heilongjiang based on net primary productivity[J].Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition),2024,56(2):140-149.]
- [19]陈和彦,谢可立.基于NPP的云县生物多样性维护功能重要性评价[J].陕西林业科技,2023,51(1):7-11.[CHEN H Y,XIE K L.Evaluation of the importance of biodiversity maintenance function in Yunxian County based on NPP[J].Shaanxi Forest Science and Technology,2023,51(1):7-11.]
- [20]马孟泉,张慧,高吉喜,等.生物多样性维护生态保护红线划定方法对比[J].生态学报,2019,39(19):6959-6965.[MA M X,ZHANG H,GAO J X,et al.Comparison of red line demarcation methods for biodiversity conservation [J].Journal of Ecology,2019,39(19):6959-6965.]
- [21]李路,孙桂丽,陆海燕,等.喀什绿洲土地利用空间格局变化特征分析[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(5):141-150.[LI L,SUN G L,LU H Y,et al.Analysis of the change characteristics of the spatial pattern of land use in Kashi Oasis [J].Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2020,42(5):141-150.]
- [22]朱敏,木合塔尔·艾买提,阿力木·依明,等.2000—2020年喀什地区植被净初级生产力时空变化及其驱动因素研究[J].中国资源综合利用,2024,42(4):150-159.[ZHU M,MUHETAER Amat,ALIM Imin,et al.Spatiotemporal changes and driving factors of vegetation net primary productivity in Kashgar region from 2000 to 2020[J].China Resources Comprehensive Utilization,2024,42(4):150-159.]
- [23]阿力木·依明,木合塔尔·艾买提,朱敏.近二十年喀什地区植被覆盖的时空变化与影响因素分析[J].北方园艺,2023(4):60-70.[ALIM Imin,MUHETAER Amat,ZHU M.Spatiotemporal changes and influencing factors of vegetation coverage in Kashgar region in recent two decades[J].Northern Horticulture,2023(4):60-70.]
- [24]陈西亮,张佳华.基于TM影像的喀什地区土地利用分类[J].湖北农业科学,2016,55(15):4001-4005.[CHEN X L,ZHANG J H.Land use classification in Kashi region based on TM images[J].Hubei Agricultural Science,2016,55(15):4001-4005.]
- [25]谢培,顾艳玲,张玉虎,等.1961-2015年新疆降水及干旱特征分析[J].干旱区地理,2017,40(2):332-339.[XIE P,GU Y L,ZHANG Y H,et al.Analysis of Precipitation and Drought Characteristics in Xinjiang from 1961 to 2015[J].Journal of Arid Zone Geography,2017,40(2):332-339.]
- [26]董墨.新疆喀什地区土地利用变化及其驱动力分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.[DONG M.Analysis of land use change and its driving forces in Kashgar region of Xinjiang[D].Harbin:Northeast Forestry University,2016.]
- [27]郭志华,臧润国,蒋有绪.生物多样性的形成、维持机制及其宏观研究方法[J].林业科学,2002,38(6):116-124.[GUO Z H,ZANG R G,JIANG Y X.Formation and maintenance mechanisms of biodiversity and its macroscopic research methods[J].Scientia Silvae Sinicae,2002,38(6):116-124.]
- [28]环境保护部,国家发展和改革委员会.生态保护红线划定指南[R].北京:环境保护部,国家发展和改革委员会,2017.[Ministry of Environmental Protection,

- National Development and Reform Commission. Guidelines for delimiting ecological protection red line[R]. Beijing:Ministry of Environmental Protection, National Development and Reform Commission, 2017.]
- [29] WANG J, ZHANG T, FU B. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [30] 王赛超, 薛万来, 吴卿, 等. 密云水库上游流域产水服务时空变化及驱动因素分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2025, 46(3): 88-97. [WANG S C, XUE W L, WU Q, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of water yield services in the upstream watershed of Miyun Reservoir[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2025, 46(3): 88-97.]
- [31] 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 J F, XU C D. Geographic detector: principle and prospect[J]. *Journal of Geography*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [32] 李静, 李帅, 张英, 等. 2000~2020 年黄河流域生物多样性维护功能时空变化及驱动分析[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(9): 4780-4790. [LI J, LI S, ZHANG Y, et al. Spatiotemporal variation and driving analysis of biodiversity maintenance function in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(9): 4780-4790.]
- [33] 马增辉, 马钢. 喀什地区生态环境现状、问题和生态保护修复措施探索[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(18): 128-130, 135. [MA Z H, MA G. Exploration of Ecological Environment Status, Issues, and Conservation Measures in Kashgar Region[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(18): 128-130, 135.]
- [34] 何颖, 马松梅, 张林, 等. 玛纳斯河流域 NPP 时空变化及其生物多样性维护功能重要性评价[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4664-4673. [HE Y, MA S M, ZHANG L, et al. Spatiotemporal variation of NPP and importance evaluation of biodiversity maintenance function in Manas River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4664-4673.]
- [35] 刘天可, 肖军仓. 基于净初级生产力的河南省黄河流域生物多样性维护功能重要性评价[J]. *河南科技*, 2020(16): 143-145. [LIU T K, XIAO J C. Evaluating the Conservation Value of Biodiversity in the Yellow River Basin, Henan Province, Based on Net Primary Productivity[J]. *Henan Science and Technology*, 2020(16): 143-145.]
- [36] 李智喻, 穆小玲, 任苏明, 等. 河南省生态系统服务质量时空分布特征[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2025, 46(5): 50-61. [LI Z Y, MU X L, REN S M, et al. Characteristics of Spatiotemporal Distribution of Quality of ecosystem services in Henan Province[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2025, 46(5): 50-61.]

## Evaluation of Biodiversity Conservation Function in Arid Areas Based on NPP and Analysis of Its Driving Factors

DU Jie, MUHETAER Aimaiti, CHEN Yantao, JIA Yan, LIU Yuting

(School of Life and Geography Sciences, Kashi University, Kashi 844000, China)

**Abstract: 【Objective】** The purpose of carrying out the evaluation of biodiversity conservation function in arid regions is to reveal the spatial and temporal variation characteristics of biodiversity in arid regions, identify the key protection areas of biodiversity, and improve the efficiency of ecological environment management.

**【Method】** Based on the MODIS17A3 dataset, meteorological data, elevation data, etc., taking the typical arid area - Kashi Prefecture as an example, the NPP (Net Primary Productivity) quantitative indicator method was used to evaluate and classify the importance of biodiversity conservation in Kashi Prefecture. Eight factors, namely slope, topographic undulation, vegetation coverage, land use type, GDP, population density, urbanization rate and the proportion of the primary industry, were selected as independent variables. A geographic detector was used to detect and analyze the driving factors of biodiversity conservation function in Kashi area. **【Result】** ① The total area of biodiversity conservation functional zones in Kashi Prefecture is

24,622.28 km<sup>2</sup>, accounting for 22.29% of the total area. Among them, the extremely important area has the smallest area, accounting for 12.45%, and is mainly distributed in the Kashgar River Oasis area. The important areas account for 19.53%, distributed in the Yarkant River Oasis area and both banks of the middle reaches of the Kashgar River. The generally important areas account for 68.02%, concentrated in the adjacent areas of the two major oasis areas and the southern mountainous region.② From 2000 to 2020, the biodiversity conservation function in Kashi Prefecture showed an upward trend. The area of extremely important and important areas increased by 717.58 km<sup>2</sup>, with an increase rate of 0.65%.③ The explanatory power of urbanization rate, population density and GDP in 2000, 2010 and 2020 was all greater than 0.350, which were the main driving factors for the changes in biodiversity conservation function in Kashi Prefecture. Among them, the interaction between the urbanization rate and population density is the most significant, and the explanatory power in 2000, 2010 and 2020 is 0.746, 0.756 and 0.594 respectively.【Conclusion】The maintenance function of biodiversity in Kashi region is restricted by water resources and human activities, which is the concentrated embodiment of the interaction between human-land relationship and natural process in arid region.

**Keywords:** Net primary productivity of vegetation;Arid region;biodiversity; geodetector; Kashi region