

DOI: 10.5846/stxb202006011415

韩鑫, 胡江玲, 刘传胜, 王心源. 基于遥感的山地景观健康诊断及格局演变研究——以新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁为例. 生态学报, 2021, 41(16): 6451-6465.

Han X, Hu J L, Liu C S, Wang X Y. Mountain landscape health diagnosis and pattern evolution based on remote sensing: Case study in Xinjiang Tianshan Karajun-Kurdening. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6451-6465.

基于遥感的山地景观健康诊断及格局演变研究 ——以新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁为例

韩 鑫^{1,2,3,4,5}, 胡江玲^{1,2,*}, 刘传胜^{6,7}, 王心源^{6,7}

1 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054

2 新疆师范大学人文社会科学重点研究基地丝绸之路经济带城市发展研究中心, 乌鲁木齐 830054

3 新疆环境保护科学研究院, 乌鲁木齐 830011

4 新疆环境污染监控与风险预警重点实验室, 乌鲁木齐 830011

5 新疆清洁生产工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830011

6 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

7 联合国教科文组织国际自然与文化遗产空间技术中心, 北京 100094

摘要: 基于 1977、1990、1997、2013 和 2017 年 5 期 Landsat 和 Sentinel-2 遥感影像, 以监督分类的结果和景观格局指数为基础, 结合景观生态学理论和前人研究成果, 构建了适于干旱区山地类自然遗产地的景观健康诊断体系, 通过区域网格分析和空间插值等方法, 对新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观健康状况进行诊断, 实现了对范围内各处景观状态的诊断, 并结合无人机正射影像对诊断结果进行验证, 既丰富了景观生态健康方向的研究, 又为自然遗产地生态环境的监测、评估、保护与管理等提供技术方法的支撑和实际应用案例。研究表明: 40 年间冰雪、水体、针阔混交林景观缩减严重, 裸地占比年变化率高达 62.54%, 扩张明显; 研究区除 1997 年景观健康等级为较差外, 其余年份景观健康均为一般; 40 年来研究区北部的景观健康状况要比南部好, 同时应将零星分布的健康等级为较差、极差的区域作为今后保护工作的重点对象和典型区。

关键词: 景观健康诊断; 景观健康格局演变; 景观指数; 新疆天山自然遗产地

Mountain landscape health diagnosis and pattern evolution based on remote sensing: Case study in Xinjiang Tianshan Karajun-Kurdening

HAN Xin^{1,2,3,4,5}, HU Jiangling^{1,2,*}, LIU Chuansheng^{6,7}, WANG Xinyuan^{6,7}

1 School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2 Research Center of Silk Road Economic Belt Urban Development, Key Research Base of Humanities and Social Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

3 Xinjiang Academy of Environmental Protection Science, Urumqi 830011, China

4 Xinjiang Key Laboratory for Environmental Pollution Monitoring and Risk Warning, Urumqi 830011, China

5 Xinjiang Engineering Technology Research Center for Cleaner Production, Urumqi 830011, China

6 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China

7 International Centre on Space Technologies for Natural and Cultural Heritage Under the Auspices of United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Beijing 100094, China

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (编号 XDA19030501); 科技部国家重点研发计划项目 (2016YFC0503302); 新疆师范大学人文社会科学重点研究基地丝绸之路经济带城市发展研究中心招标课题 (XJNURWJD062018A03)

收稿日期: 2020-06-01; **网络出版日期:** 2021-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 81407687@qq.com

Abstract: At the 37th World Heritage conference in 2013, Xinjiang Tianshan successfully applied for World Natural Heritage. Xinjiang Tianshan has world-class aesthetic value and ecological value. However, with the continuous development and utilization of tourism resources, the ecological environment here is inevitably disturbed by human activities. It is a key problem how to accurately diagnose where the ecological environment has been damaged when we planning and managing natural heritage sites. To solve this problem, we need to build a landscape health diagnosis system based on RS and GIS technology and landscape ecology theory. This paper selects the Xinjiang Tianshan Natural Heritage Site Karajun-Kurdening region as the research area. Based on Landsat and sentinel-2 remote sensing images of 1977, 1990, 1997, 2013 and 2017, the ecological landscape of the study area was classified and interpreted by using the method of supervised classification. The landscape pattern index was calculated by fragstast software, combining landscape ecology theory and Chinese scholars' research results from the landscape stress degree, landscape vitality, natural heritage sites outstanding universal value, and landscape resilience 4 aspects. We constructed a landscape health diagnosis system suitable for mountainous natural heritage sites in arid regions using regional grid analysis and spatial interpolation method. The landscape health in Xinjiang Tianshan Natural Heritage Site Karajun-Kurdening region was diagnosed. In July, 2018, we carried out 17 aerial photogrammetry in the research area using unmanned aerial vehicle (UAV) to verify the accuracy of landscape health diagnosis system. Then, we used the Smart3D software to get 17 high-resolution orthophoto images, through comparing the orthophoto image with diagnostic image. The research results can be obtained. 1) In the past 40 years, the landscape of ice, water and theropencedrymion decreased seriously. The annual change rate of bare land obvious expansion was as high as 62.54%. 2) The landscape health status of the study area was average except in 1997. Since 1997, the landscape health value in the study area has been continuously increasing. 3) From 1977—2017, the landscape health in the north is better than that in the south of the study area. At the same time, the scattered distribution areas with poor or extremely poor landscape health status should be regarded as the key objects and typical areas of future protection work. It is worth mentioning that our landscape health diagnosis system has stronger applicability, landscape health diagnosis system can better monitor and diagnose the landscape health condition in the study area.

Key Words: landscape health diagnosis; landscape health pattern evolution; landscape index; Xinjiang Tianshan Natural Heritage Site

景观系统健康是近年来生态系统管理领域的研究热点^[1],是实现人类社会经济可持续发展的根本保证^[2],其为区域环境管理提供新思路和新方法^[3-4]。近年来景观生态系统健康以实证研究为主,聚焦于湿地海岸^[5-6]、城市^[7-8]、草原^[9]、河流^[10-11]以及森林^[12-13]的健康评价,其研究方法较多通过建立、改进或套用评价指标体系,部分研究再借助于软件技术手段进行。当前通过遥感技术综合调查数据^[14]、PSR 模型^[15]、城市化因素^[16]以及景观自然演替^[17]等实现生态系统健康评估的研究应用也较为常见。景观健康诊断是在时间长河中对景观状态变化的客观诊断,只有运用比较的观点才会有相对的健康与不健康^[18],目前景观健康诊断的研究还处在发展上升阶段,其前沿性研究是将景观生态健康概念与其它生态学理论以及 RS 与 GIS 等技术来相结合诊断景观系统健康^[19-20],但诊断指标体系和诊断模型的构建是其研究的关键^[21],同时在实际应用中存在指标体系过于庞杂、诊断模型可操作性较差等问题^[22-24],而且大都未能明确研究区域内景观健康问题突出的地点,只是通过简洁的数值来进行评价,也基本上忽略了对评价结果的验证。针对以上关于指标复杂、操作困难、结果不明以及验证不足的问题,以干旱区山地区域景观为例,将 RS 与 GIS 方法与景观生态学理论相结合,探索一套关于景观健康诊断的新方法、新模式,为区域生态系统保护提供数据基础与方法依据。

本文以新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域为研究区(包括核心区与缓冲区),基于多源遥感影像,通过监督分类、景观格局指数计算,以景观生态学等理论为基础,充分考虑研究区景观空间格局对山地类自然遗产地生态系统健康的影响,运用区域网格分析方法构建评价单元,根据研究区生态系统特点,构建景观健康诊断指标体系,并采用 GIS 和 RS 技术,对研究区 1977—2017 年间景观健康状态进行时空动态诊断,进一步丰

富新疆天山自然遗产地关于景观生态方向的研究,为区域景观系统健康诊断提供一种新方法、新思路,为喀拉峻-库尔德宁区域旅游资源合理开发利用和景观资源可持续发展管理提供基础数据依据和科学技术支撑,助力于我国自然遗产地保护与管理事业高效平稳的进行,进而支撑区域生态环境监督管理、推动优化国土空间开发布局、有针对性地实施生态保护修复工程、维护国家和区域生态安全、为建设美丽中国贡献力量。

1 研究区概况

2013 年第 37 届世界遗产大会在柬埔寨金边成功举办,根据遗产遴选标准(7)和(9),我国新疆天山包括喀拉峻-库尔德宁区域(伊犁哈萨克自治州)在内的 4 个片区以“新疆天山”命名成功申请为世界自然遗产。喀拉峻-库尔德宁片区位于新疆伊犁哈萨克自治州巩留县南部与特克斯县东部地区,自然遗产地核心区面积为 1138.88km²,缓冲区面积为 893.99km²。该区域被誉为是新疆天山生物多样性最丰富区域^[25],是天山针叶林和天山山地草原草甸最典型代表;是全球雪岭云杉和中亚野果林的最佳生境区与起源地,并拥有完整的垂直自然景观带,是众多第三纪残遗物种的避难所,号称欧亚大陆腹地野生生物物种“天然基因库”^[26],拥有天山美学价值最高的景观资源,代表了新疆天山独特的美学价值,具备世界级的美学价值和生物生态学价值^[27];是温带干旱区山地综合自然景观美的最突出代表。研究区位置图(图 1):

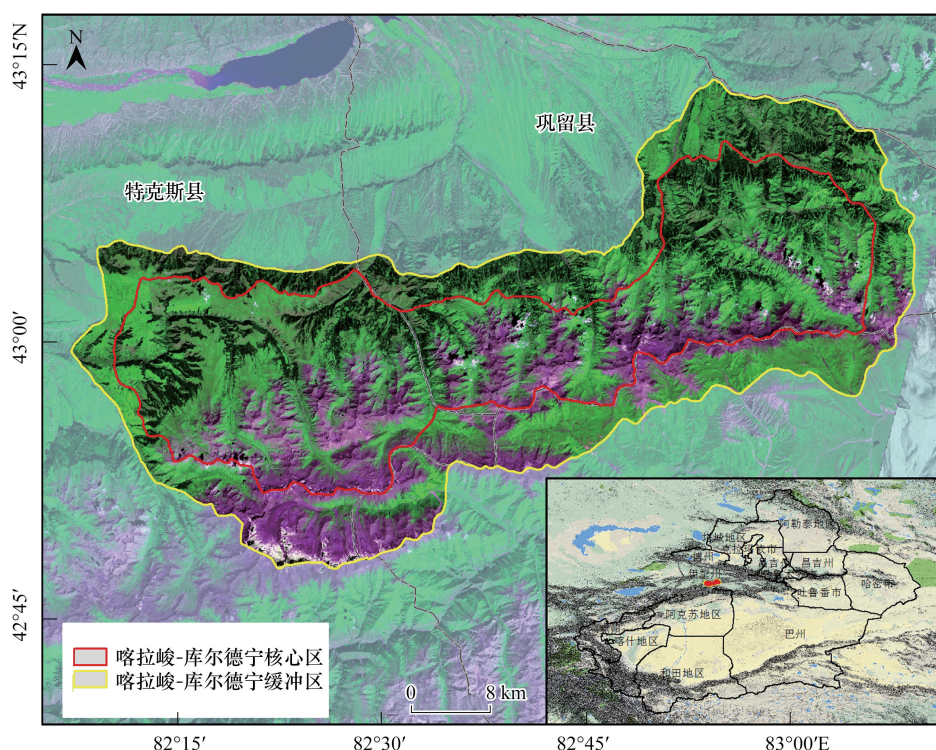


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Sketch map of location of the study area

2 研究数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源

(1) 遥感数据

遥感数据来源于美国地质勘查局网站(<https://www.usgs.gov/>),在影像选取中考虑(1)研究区内最好无

云干扰;(2)成像时间较为接近;(3)不同时期影像时间序列具有可对比性。选取了 MSS、TM、OLI、Sentinel-2 类型的 5 景影像,影像具体情况表 1 所示。

表 1 遥感影像原始数据
Table 1 Original data of remote sensing image

时间 Time	数据类型 Data type	轨道参数 Orbital	云覆盖率 Cloud	空间分辨率/% Resolution	波段数/m Band
1977-08-17	Landsat MSS	P157/r30	3	80	4
1990-08-02	Landsat TM	P146/r30	2	30	7
1997-08-21	Landsat TM	P146/r30	0	30	7
2013-08-01	Landsat OLI	P146/r30	1	30	7
2017-08-08	Sentinel-2	T44TNN	2	10	4
		T44TPN	3	10	4

(2)图件数据

新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域缓冲区(.shp)和核心区(.shp)来源于中国科学院新疆生态地理研究所。

(3)野外实测数据

2017 年 7 月前往研究区深入了解生物多样性和自然景观垂直带分布情况,2018 年 7 月使用无人机完成正摄飞行 17 架次,飞行点位图 2 所示。

航测重叠度设置中航向和旁向重叠率为 80% 和 70%,正射影像云台俯仰角为 90°,飞行高度视实际情况来设定,一般空旷地点,高度为 80—100m。

2.1.2 数据处理

(1)遥感影像预处理

通过对获取的影像数据进行拼接、大气校正、辐射校正、影像重采样以及裁剪等预处理,形成适合开展分类解译的数据。研究区景观类型分为:冰雪、苔原、针叶林、针阔混交林、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、水体、裸地;关于景观分类体系的建立、精度验证、景观指数的计算、景观格局演变及其生态健康状态的初步评价等成果不再赘述^[28];本研究中景观分类结果(图 3)是景观健康诊断体系中各指标计算的基础数据。

(2)无人机数据处理

无人机数据处理流程如下:

- 1) 导入经过整理后的某一飞行区域相片到 PhotoScan 软件中。
- 2) “对齐照片”,该软件根据航片的位置、海拔以及相似程度等信息将照片自动进行排列,其中精度选择根据区域照片数量和电脑处理能力,设置为高或中。
- 3) “建立密集点云”,其中质量等级的选择与之前“对齐照片”一致。
- 4) “生成网格”,这一模块中表面模型应该选择“任意”,源数据这一选项要选取“密集点云”,面数根据成像结果的质量进行设置。
- 5) “生成纹理”,到达这一步骤时映射模式应该选“正射影像”,混合模式应该选“镶嵌”(默认),纹理大小要设为“4096”。
- 6) “生成正射影像”,该步骤中投影要设为“WGS 84”,完成后进行相片导出。

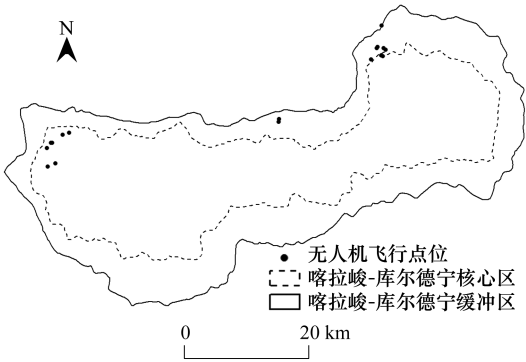


图 2 2018 年新疆天山自然遗产地无人机飞行区域位置图
Fig.2 Location map of UAV Flight Area in Xinjiang Tianshan natural heritage site in 2018

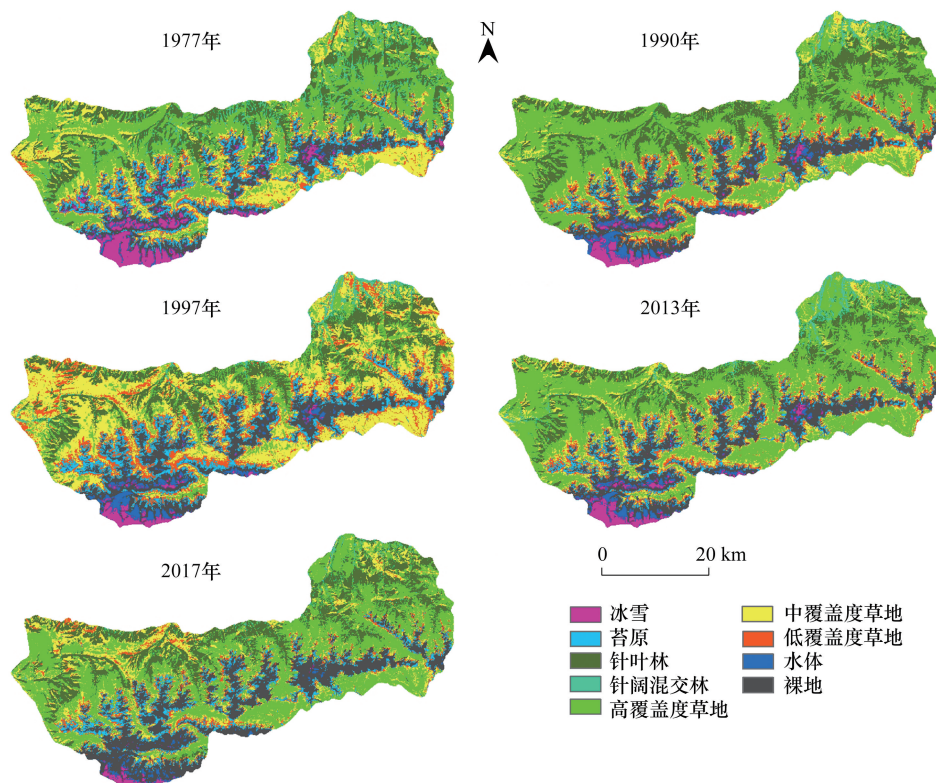
图3 1977—2017年研究区景观分类图^[28]

Fig.3 Landscape classification map of the study area from 1977 to 2017

2.2 研究方法

为科学、准确地反应研究区复杂的景观健康状况,基于景观分类结果,依据科学性、综合性、系统性、可比性、实用性及可行性原则,结合自然遗产地突出普遍价值(OUV, Outstanding universal value)以及研究区景观格局指数,学习借鉴前人的相关研究,构建景观健康诊断体系。

2.2.1 景观健康诊断概念模型与诊断体系构建

从景观生态学角度出发,基于遥感影像和研究区景观时空格局指数,参考陆丽珍^[29]基于土地利用空间格局,构建的适用于舟山岛生态系统健康诊断的“活力-组织结构-恢复力-生态系统服务功能”评价指标体系,遵循科学性、可持续性、系统性、代表性、数据可获取性、普适性、独特性原则^[30],充分考虑目前区域景观和旅游开发现状、景观格局动态演变过程、遗产地 OUV 在景观演变中受到威胁的因素、景观资源在区域开发规划过程中承受的压力,结合景观健康、生态系统健康、生态安全度等研究中的评价体系,围绕景观胁迫程度、景观内部与景观相互间的活力状况、突出普遍价值多样性、受干扰后景观恢复能力、景观可提供的社会服务价值五个方面选取景观健康诊断指标,构建景观健康诊断概念模型(图4)与体系(表2),其中景观胁迫度是反映景观受到威胁程度;景观活力是指景观内部活动状况;景观多样性表现区域 OUV 的保持状态;景观恢复力是指景观系统受到扰动后;景观服务价值是指各景观对人类社会所提供的物质和生存环境的服务性能。

2.2.2 景观健康诊断方法

景观系统健康状态综合指数 SHI_i :

$$SHI_i = K_{LSD_k} \times (1 - LSD_i) + K_{LV_k} \times LV_i + K_{LD_k} \times LD_i + K_{LRF_k} \times LRF_i + K_{LSV_k} \times LSV_i \quad (1)$$

式中, SHI_i 为*i*区域景观健康状态综合指数; LSD_i 表示*i*区域景观的景观胁迫度值, LV_i 表示*i*区域景观的景观活力值, LD_i 表示*i*区域景观的景观多样性值, LRF_i 表示*i*区域景观的景观恢复力值, LSV_i 表示*i*区域景观的景观服务价值数; K_{LSD_k} 表示*k*年 LSD 的权重, K_{LV_k} 表示*k*年 LV 的权重, K_{LD_k} 表示*k*年 LD 的权重, K_{LRF_k} 表示*k*年

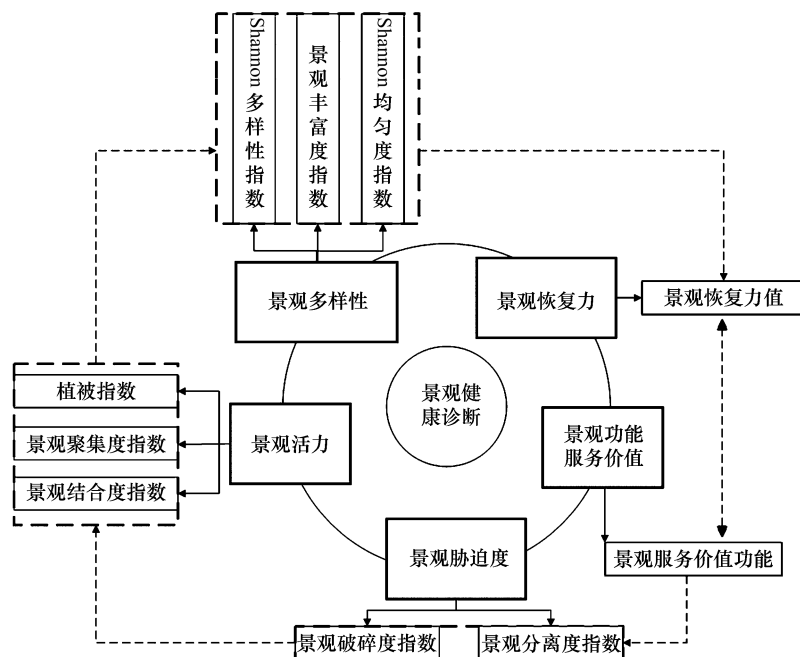


图4 新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观健康诊断概念模型

Fig.4 Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdeneing landscape health diagnosis conceptual model

LRF 的权重, K_{LSV_k} 表示 k 年 LSV 的权重。

(1) 景观健康诊断指标算法

胁迫度 (LSD): 用裸地用景观破碎度和景观分离度^[31]来表示。

景观破碎度指数:

$$A_i = \frac{\sum_j A_{ij}}{N_i}; A_{ji} = \frac{N_{ij}}{S_{ij}} \quad (2)$$

其中 A_i 表示 i 区域景观破碎度; A_{ji} 表示 i 区域内景观 j 的破碎度; N_i 表示 i 区域内景观类型数总和; N_{ji} 表示区域 i 内景观 j 的总斑块数; S_{ji} 表示区域 i 内景观 j 的总面积。

景观分离度指数:

$$B_i = \frac{S_i^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}^2} \quad (3)$$

其中, B_i 表示 i 区域景观分离度; S_i 表示 i 区域面积; S_{ij} 表示区域 i 内景观 j 的总面积。

景观活力 (LV): 通过植被指数、景观聚集度^[32]、景观结合度^[33]表示。

植被指数:

$$C_i = \frac{\sum_j NDVI_{ji}}{N_i} \quad (4)$$

其中, C_i 表示区域 i 内植被指数; $NDVI_{ji}$ 表示区域 i 内景观 j 景观植被指数; N_i 表示区域 i 内景观类型数。

表2 新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观健康诊断指标表

Table 2 Landscape health diagnosis indicators of Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdeneing

目标层 Target layer	因素层 Factor layer	指标层 Index layer
景观 Landscape	景观胁迫度	景观破碎度指数 景观分离度指数
健康 Health	景观活力	植被指数 景观聚集度指数 景观结合度指数
诊断 Diagnosis	景观多样性	Shannon 多样性指数 Shannon 均匀度指数 景观丰富度指数
体系 System	景观恢复力 景观服务价值	景观恢复力指数 景观服务价值指数

景观聚集度指数:

$$D_i = \sum_{j=1}^m \frac{S_{ij}}{S} \times AI \quad (5)$$

其中, D_i 表示 i 区域景观聚集度指数; S_{ij} 表示区域 i 内景观 j 的总面积; S 表示研究区总面积, AI 表示整体研究区景观聚集度指数。

景观结合度指数:

$$E_i = \sum_{j=1}^m \frac{S_{ij}}{S} \times \text{CHOESION} \quad (6)$$

其中, D_i 表示 i 区域景观结合度指数; S_{ij} 表示区域 i 内景观 j 的总面积; S 表示研究区总面积, CHOESION 表示整体研究区景观结合度指数。

景观多样性(LD): 选择 Shannon 多样性、Shannon 均匀度^[34]、景观丰富度^[35]指数表征景观组织结构。

Shannon 多样性指数:

$$F_i = \sum_{j=1}^m \frac{S_{ij}}{S} \times \text{SHDI} \quad (7)$$

其中, F_i 表示 i 区域景观结合度指数; S_{ij} 表示区域 i 内景观 j 的总面积; S 表示研究区总面积, SHDI 表示整体研究区景观结合度指数。

Shannon 均匀度指数:

$$G_i = \frac{F_i}{\ln m_i} \quad (8)$$

其中, G_i 表示 i 区域景观 Shannon 均匀度指数; F_i 表示区域 i 内景观 Shannon 多样性指数; m_i 表示 i 区域斑块类型数量。

景观丰富度指数:

$$H_i = \frac{N_i}{S_i} \quad (9)$$

其中, H_i 表示 i 区域景观丰富度指数; N_i 表示 i 区域景观类型数; S_i 表示 i 区域面积。

景观恢复力(LRF): 根据不同景观类型对整体景观系统恢复的贡献和作用, 考虑研究区位于我国伊犁河谷地带, 气候温和湿润与我国西部干旱区气候的差异性, 因此选择参考刘明华^[36]等的研究, 构建适用于本研究区的各类型景观恢复力值(表3)。

表3 新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域各类型景观恢复力赋值

Table 3 Assignment of landscape resilience of different types by Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdening

景观类型 Landscape type	恢复力 Resilience	特征 Characteristic
针叶林 Coniferous forest	1	这些类型对维持景观恢复力具有决定性的
针阔混交林 Theropencedrymion	0.9	意义
水体 Water	0.8	
高覆盖度草地 High coverage grassland	0.7	
中覆盖度草地 Medium coverage grassland	0.6	这些类型对维持景观恢复力有重要作用,
苔原 Tundra	0.5	如果利用不好, 则容易导致恢复力下降
冰雪 Ice and snow	0.4	
低覆盖度草地 Low coverage grassland	0.1	这种景观类型贡献相对很小

景观恢复力计算公式为:

$$R = \sum_i \frac{A_i \times R_i}{A} \quad (10)$$

式中, R 为生态系统总恢复力; A_i 为第 i 种地类面积; R_i 为第 i 种地类的恢复力系数, A 为研究区总面积。

景观服务价值(LSV): 是指景观系统能够为人类社会提供物质和生存环境的能力^[37]。基于高亚鸣^[38]等人的研究, 通过计算伊犁河谷地区 2001—2012 年生态服务价值平均值与景观类型平均值商值, 来代表研究区单位面积景观服务价值。其中水体服务价值较高是由其面积较小导致, 同时也与我国西北干旱区实际相符(表 4)。

表 4 新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观服务价值

Table 4 Landscape service value by Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdening

景观类型 Landscape type	单位面积景观 服务价值/(10 ⁹ 元/km ²) Landscape service value per unit area	景观类型 Landscape type	单位面积景观 服务价值/(10 ⁹ 元/km ²) Landscape service value per unit area
针叶林 Coniferous forest	6.66	苔原 Tundra	2.91
针阔混交林 Theropencedrymion	7.20	裸地 Bare land	0.07
高覆盖草地 High coverage grassland	1.28	水体 Water	42.79
低覆盖草地 Low coverage grassland	5.012	冰雪 Ice and snow	3.50
中覆盖草地 Medium coverage grassland	5.18		

景观服务价值指数:

$$J_i = \sum_{j=1}^m S_{ij} \times W_j \quad (11)$$

其中 J_i 表示 i 区域景观服务价值指数; S_{ij} 表示 i 区域 j 景观面积; W_j 表示 j 景观服务价值。

(2) 指标权重确定与量纲统一

影响新疆天山自然遗产地景观健康状况的指标较多, 且关系复杂, 为确保权重系数的客观性、公正性和科学性, 运用变异系数赋权法确定权重。用 V_i 表示指标 C_i 的变异系数, 指标 C_i 的权重系数公式如下^[39], 指标权重系数表 5。

$$C_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^{10} V_i} \quad (12)$$

量纲统一通过极值归一化方法实现:

$$P_i = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (13)$$

式中, P_i 为标准化后 i 指标值; $\max(X_i)$ 为 i 指标最大值, $\min(X_i)$ 为 i 指标最小值。

(3) 景观健康诊断等级划分

景观健康诊断等级的划分参考陆丽珍关于舟山岛生态系统健康评价的等级划分进行, 景观健康诊断等级表 6 所示。

2.2.3 区域景观格网化诊断

为了对研究区内每一处景观健康状况进行诊断, 采用格网化处理^[40-42], 在研究区内生成大小、面积一致的网格(研究区边缘部分除外), 对每一个网格内的景观健康状态进行诊断, 最后以各网格景观健康诊断值为基础, 通过 ArcGIS 中插值分析^[43-44], 做出研究区景观健康诊断结果图, 使同一年内研究区内每一处景观都能够被评价到。

(1) 诊断单元

将研究区范围等间距 3km×3km 网格化, 生成 273 个网格作为本次研究的诊断单元。网格化依据: 1) 本研究的影像像元大小为 30m×30m, 网格化要为其倍数, 易于分割与比较。2) 考虑到如果划分太小, 每一网格将景观分割过于破碎, 将会影响到诊断的准确性。3) 经过多次实验认为 3km×3km 网格大小较为合适比较与数

据处理。研究区网格化图 5 所示,网格编号从左下至右上由 1 至 273 依次编号。

表 5 新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观健康诊断指标权重表
Table 5 Weight table of landscape health diagnosis indicators by Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdening

一级 One level	二级 Two level	三级 Three level
景观健康诊断 Landscape health diagnosis	年份	景观胁迫度 景观破碎度指数 景观分离度指数
	1977	0.38 0.27 0.11
	1990	0.31 0.18 0.13
	1997	0.31 0.21 0.1
	2013	0.33 0.2 0.13
	2017	0.34 0.22 0.12
	景观活力	植被指数 景观聚集度指数 景观结合度指数
	1977	0.13 0.08 0.03 0.02
	1990	0.12 0.08 0.02 0.02
	1997	0.13 0.09 0.02 0.02
	2013	0.11 0.09 0.01 0.01
	2017	0.12 0.07 0.03 0.02
	景观多样性	Shannon 多样性指数 Shannon 均匀度指数 景观丰富度指数
	1977	0.27 0.01 0.19 0.07
	1990	0.28 0.03 0.17 0.08
	1997	0.3 0.04 0.2 0.06
	2013	0.28 0.03 0.18 0.07
	2017	0.27 0.07 0.06 0.14
	景观恢复力	景观恢复力指数
	1977	0.14 0.13
	1990	0.14 0.14
	1997	0.13 0.13
	2013	0.14 0.14
	2017	0.14 0.14
	景观服务价值	景观服务价值指数
	1977	0.09 0.09
	1990	0.15 0.15
	1997	0.13 0.13
	2013	0.14 0.14
	2017	0.13 0.13

表 6 新疆天山自然遗产地景观健康诊断等级划分表
Table 6 Classification of landscape health diagnosis grade by Xinjiang Tianshan natural heritage site

健康状态 Health status	标准划分 Categorization	健康状态 Health status	标准划分 Categorization
良好 Good	>0.8	较差 Worse	0.2—0.4
较好 Quite good	0.6—0.8	极差 Very bad	<0.2
一般 General	0.4—0.6		

(2) ArcGIS 空间插值

以网格中心点代表整个网格景观健康状态,将各网格景观健康诊断赋值于网格中心点,在整个研究区进行反距离权重插值方法进行空间插值分析。

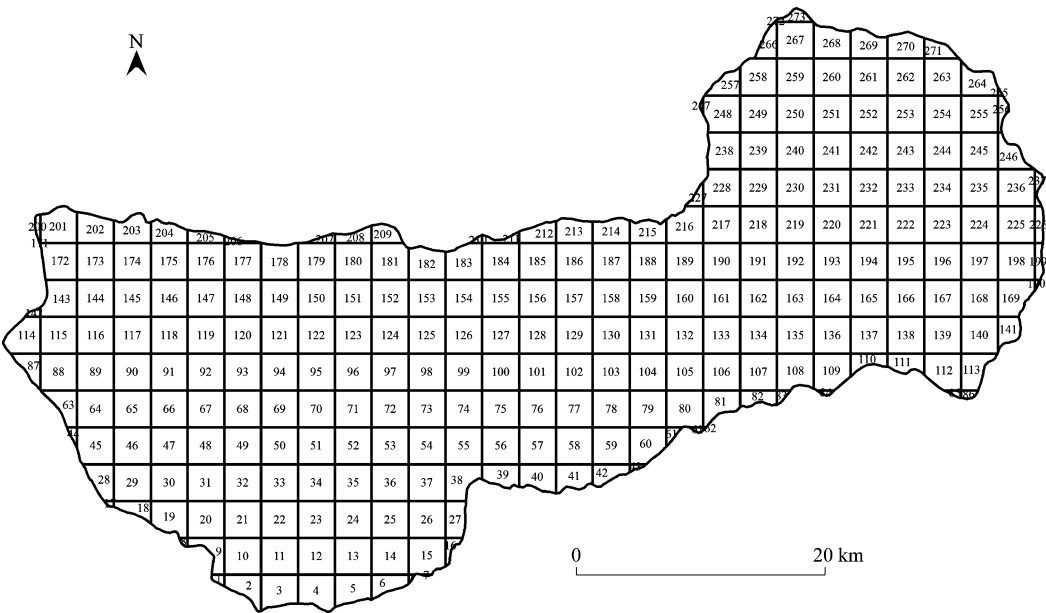


图 5 研究区网格化图

Fig.5 Sketch map of Gridding of study area

3 结果与分析

3.1 不同区域景观健康诊断

(1) 不同景观健康状况评估

基于研究区 1977、1990、1997、2013、2017 年景观类型变化情况(表 7),结合景观格局指数和目前已有研究成果,分析评估研究区不同景观健康状况。

表 7 1977—2017 年新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观类型变化情况表

Table 7 Changes of landscape types by Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdening in 1977—2017 years

项目 Items	1977 年 占有率/% Occupancy	1990 年 占有率/% Occupancy	1997 年 占有率/% Occupancy	2013 年 占有率/% Occupancy	2017 年 占有率/% Occupancy	1977—2017 年 变化率/% Variability
冰雪 Ice and snow	4.09	2.39	1.58	2.07	0.64	-84.49
苔原 Tundra	8.73	4.75	9.27	5.67	6.78	-22.34
针叶林 Coniferous forest	16.38	17.69	16.29	13.37	18.35	12.00
针阔混交林 Theropencedrymion	5.33	1.23	2.23	2.51	1.23	-76.89
高覆盖度草地 High coverage	29.39	41.12	10.39	42.60	35.75	21.64
中覆盖度草地 Medium coverage	17.67	10.05	30.83	11.89	13.07	-26.02
低覆盖度草地 Low coverage	7.07	7.77	13.74	7.04	6.42	-9.23
水体 Water	0.80	2.09	2.14	1.53	0.65	-19.11
裸地 Bare land	10.53	12.90	13.54	13.33	17.12	62.54

由表 7 可以看出:1977—2017 年研究区主要景观为针叶林及各类草地(高、中、低覆盖度草地),其面积之和分别占 5 个时段研究区面积的 70.51%、76.64%、71.24%、74.89%、73.58%。结合已有景观格局指数分析不同景观生态健康状况^[24]:针叶林景观各年占有率变化起伏小,1977—2017 年面积增加 37.16%,变化率为 12%,景观健康状态为健康;针阔混交林占有率降低,40 年间变化率为-76.89%,景观健康状态堪忧;草地类景观是研究区的主体景观,40 年间各类型草地占有率变化幅度相对稳定,景观状态健康稳定,说明研究区山地

草原草甸景观是最典型的代表;冰雪、水体景观总体占有率较低,但水资源类型景观是西北干旱区各景观类型存在的基础,而且研究区冰雪、水体景观所见程度较大,尤其冰雪景观变化率为-84.49%,全球大环境变化也对景观健康状态造成影响;裸地景观占有率呈现持续扩张态势,变化率高达 62.54%,裸地面积不断扩张或将导致研究区内植被覆盖程度、整体景观抗干扰度以及自我恢复能力降低。

(2) 不同时期景观健康诊断均值分析

先通过影像分类和指数计算分析,根据景观健康诊断体系,计算不同时期各网格区的景观健康诊断值,其结果非常庞大,而且不同时期各区域景观健康诊断值对比较难,因此通过计算不同年份各网格区景观健康诊断的均值,来实现对景观健康状况的诊断,表 8 所示:

表 8 1977—2017 年新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观健康诊断结果

Table 8 Results of landscape health diagnosis by Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdening in 1977—2017 years

年份 Year	景观健康诊断值 Landscape health diagnostic value	景观健康状况 Landscape health
1977	0.33	较差
1990	0.56	一般
1997	0.41	一般
2013	0.48	一般
2017	0.52	一般

由表 8 可以看出各研究时段内景观健康诊断值由高到低排列为:1990 年景观健康诊断值最高为 0.56, 2017 年景观健康诊断值为 0.52, 2013 年景观健康诊断值为 0.48, 1997 年景观健康诊断值为 0.41, 1977 年景观健康诊断值最低为 0.33; 1977 至 1990 年研究区景观健康状态明显升高, 1990 至 1997 年间研究区景观健康状态降低, 1997 至 2017 年间研究区景观健康状态持续升高; 景观健康等级方面: 1977 年景观健康状况较差, 1990、1997、2013、2017 年景观健康状况均为一般。

3.2 景观健康诊断空间插值分析

从不同区域景观健康诊断结果可以看出, 最终结果太过于简洁与概括, 只用一个数值来表达某一年整个研究区的景观健康状况, 无法看出研究区内部景观健康状况在空间上的分布与变化情况, 因此, 以 273 个网格中心点来代替网格区域, 并将景观健康诊断值赋值于中心点之上, 再通过 ArcGIS 空间插值方法对研究区景观健康状况进行计算与处理, 得到能够从时间与空间上反应景观健康状况诊断结果图(图 6 所示)。同时根据景观健康诊断等级划分, 对 273 个网格景观健康诊断值进行统计分析(表 9), 从数据上进一步精确反应区域景观健康格局演变状况以及各类健康等级占比。

表 9 1977—2017 年研究区各网格区景观健康诊断值等级划分表(%)

Table 9 Classification of landscape health diagnosis value in each grid area by Study area

年份 Year	0—0.2(极差) Very bad	0.2—0.4(较差) Worse	0.4—0.6(一般) General	0.6—0.8(较好) Quite good	0.8—1(良好) Good
1977	0.73	90.11	8.8	0	0.36
1990	0.73	7.69	54.21	32.97	4.4
1997	1.1	49.45	45.79	3.3	0.36
2013	0.73	29.3	53.11	13.56	3.3
2017	1.47	17.95	53.11	24.54	2.93

由图 6 和表 9 得出: 研究区 1977 年间 90.11% 的区域景观健康状态为较差, 中北部零星出现 8.8% 的区域为一般健康, 并非区域内所有景观健康均为较差。1990 年间 54.21% 的区域健康等级为一般, 广泛分布于研究区中部、东南部以及西部部分区域; 32.97% 的区域景观健康程度为较好, 主要分布在研究区东北、中偏西部区域, 以及西南少部分区域; 还有 4.4%、7.69%、0.73% 的区域景观健康等级分别为良好、较差和极差, 说明

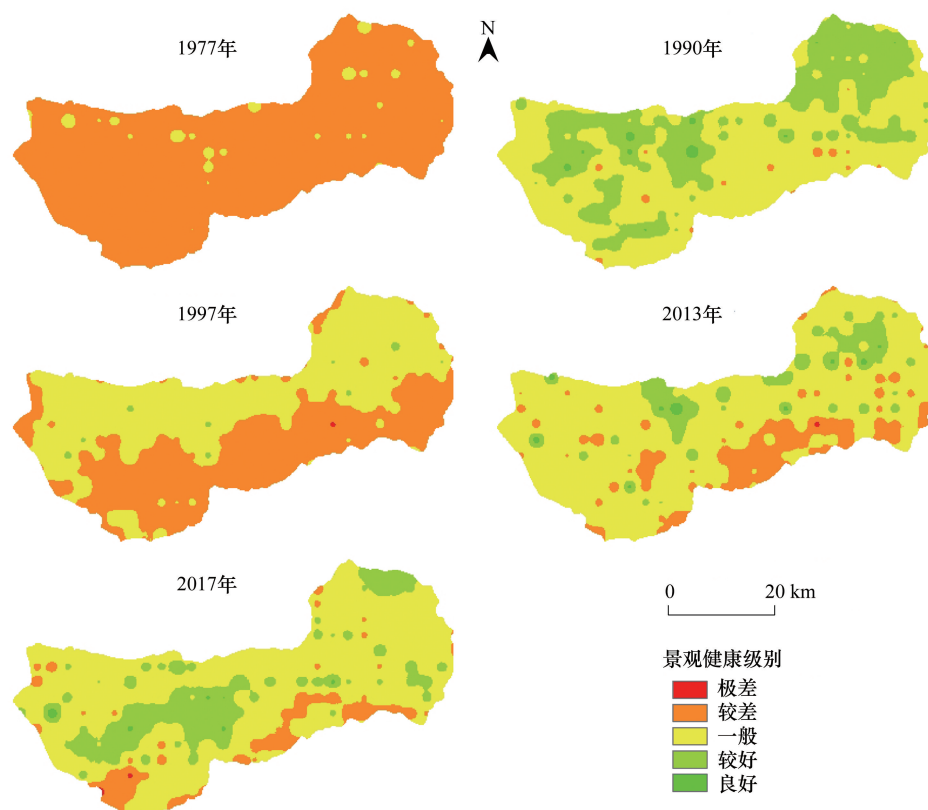


图6 新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域 1977—2017 年景观健康诊断结果图

Fig.6 Results of landscape health diagnosis by Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdenei in 1977—2017 years

整体呈现一般与较好的区域内还存在较差与极差的景观。1997 年间 45.79% 的区域景观健康状态为一般,且主要分布于研究区北部;49.45% 的区域景观健康等级为较差,主要分布于南部区域;3.3% 的区域景观健康较好且零星出现在健康状况一般的区域中;南部也存在一般健康的区域。2013 年间 53.11% 的区域景观健康状况为一般且分布广泛;29.3% 的区域景观健康状况较差,主要分布于研究区中偏南部高山地带;13.56% 区域景观健康状况为较好,主要在北部区域,且部分较好的区域内部共出现 3.3% 景观健康状况为良好的区域。2017 年间景观健康状况一般的区域占总面积的 53.11%,分布也与 2013 年类似;24.54% 的区域景观健康等级为较好,主要分布于中偏西和东北部分区域;17.95% 区域景观健康程度较差,主要出现在南部、西北部。综合 1977—2017 年来看,极差这一景观健康等级出现的区域个数较为稳定,占比最少且分布较为分散;较差的等级在 1977 年占比最多,其次是在 1997 年,而且自 1997 年以后较差的占比逐渐呈现下降趋势,同时发现较差的区域主要是分布在研究区的南部与中偏南部的高山地区;景观健康为一般的占比除了 1977 年以外其余年相对保持平稳且占比基本超过 50%,1990、2013、2017 年分布较为广泛;景观健康等级较好的区域在 1990 年占比最高为 32.97%,1997—2017 年间较好的区域占比也在逐年增加;景观等级为良好的区域个数较少且分布较为分散与极差等级相似。

3.3 无人机正射影像验证诊断结果

通过计算获得的景观健康诊断结果,应当对其准确性通过一定的方法或数据进行验证,2018 年 7 月 8 日至 17 日对研究区典型区域进行无人机航空摄影测量,经过处理得到了正射影像。无人机正射影像数据分辨率为厘米级,正射影像中能够清楚的识别地物,利用其对景观健康诊断结果进行验证分析比较合适。将正射影像与景观健康诊断结果进行叠加图 7:

通过将 2017 年景观健康诊断结果与无人机正射影像叠加后可以看出:2018 年 7 月 10 日 4#点位置无人

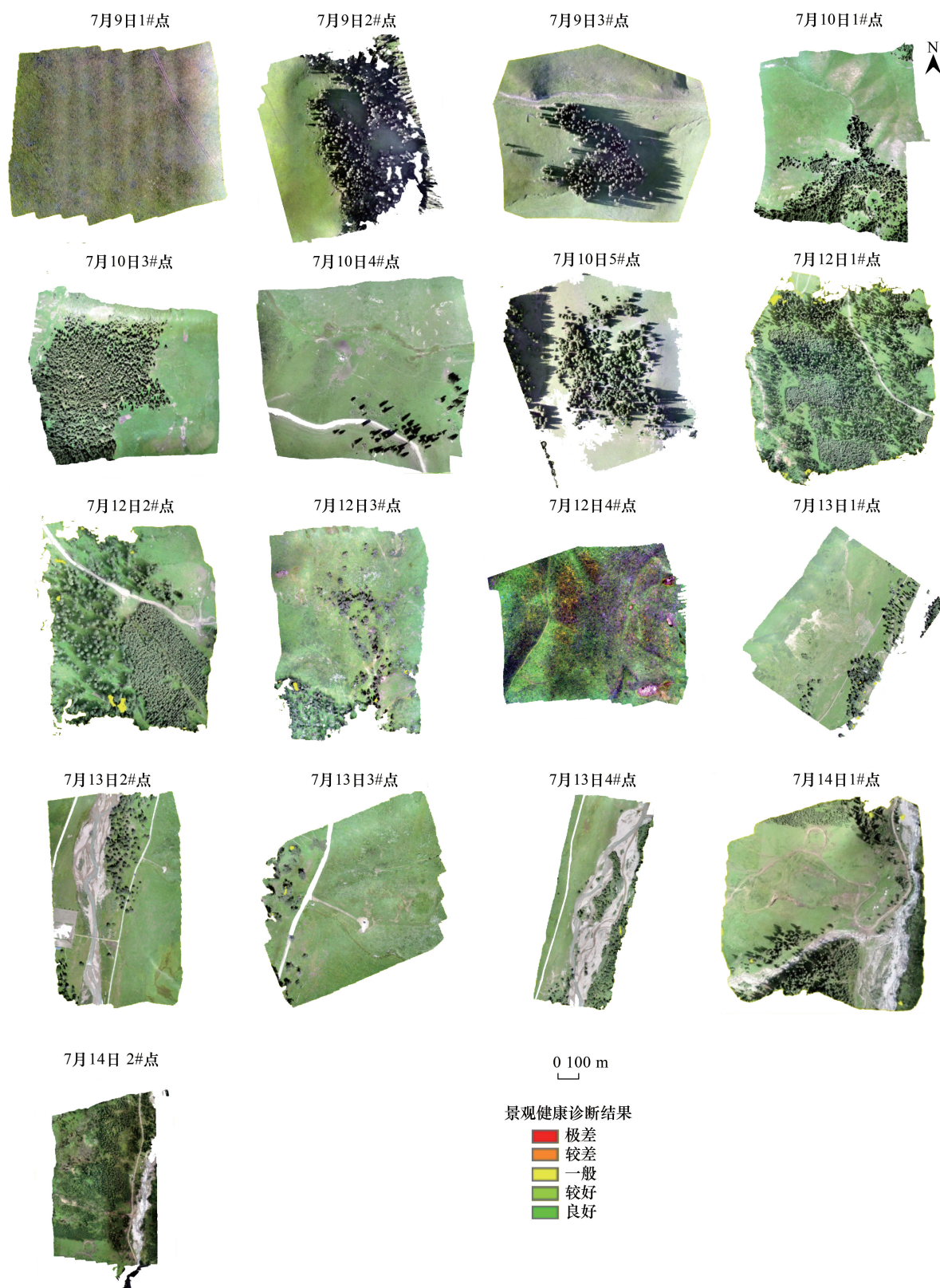


图7 新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观健康诊断结果正射影像验证图

Fig.7 Landscape health diagnosis results orthophoto verification chart by Xinjiang Tianshan natural heritage site Karajun-Kurdening

机正射影像区域景观健康状态为较好外,其余获取的无人机正射影像区域景观健康均为一般。使用正射影像与景观健康结果图叠加,清楚的看出无人机航拍区域的地物景观,能够较直观的对景观健康结果进行验证,证明了本研究的景观健康诊断结果基本符合实际情况,能够代表当时的景观健康水平,进而说明构建的景观健康诊断体系具有一定的科学与实际意义。

4 结论与讨论

在景观数据的基础上,结合其他相关指标与前人研究成果,构建适合新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域景观健康诊断指标体系,从表征自然遗产地突出普遍价值和景观受干扰因素等方面选取 10 个诊断指标,利用变异系数法确定各时期指标权重,运用景观指数法计算新疆天山自然遗产地喀拉峻-库尔德宁区域的景观健康值,并结合景观健康诊断等级分析研究区的景观健康状况,得出如下结论:

(1) 针叶林、草地类景观为研究区主体景观类型,40 年来景观格局变化状况相对保持稳定,景观健康程度为健康;冰雪、水体、针阔混交林三类景观缩减严重,景观健康状况堪忧;裸地景观呈现持续扩张态势。

(2) 研究区 1977 年景观健康等级为较差且诊断值最低,1990 年诊断值最高,1990、1997、2013、2017 年景观健康等级均为一般,1997 至 2017 年间景观健康诊断值持续升高。

(3) 研究区 1977 年 90% 以上区域景观健康等级为较差;1990、2013、2017 年超过 50% 区域景观健康等级为较好;2017 年景观健康等级为一般与较好的区域面积几乎持平;1997—2017 年间景观健康等级为良好的区域面积逐年增加,同时较差面积逐年减少;综合 1977—2017 这 40 年来看,整体研究区北部区域景观健康状况要比南部好。

(4) 通过实证研究结果说明建立的景观健康诊断模型可操作性强,指标具有代表性,区域网格化与插值分析方法能够全面真实的反应出研究区内景观健康状况,最后再结合无人机影像对诊断结果进行验证,进一步体现了整套景观健康诊断过程的科学性与严谨性。

随着保护区与遗产地的建立,有针对性的保护措施维持了研究区主体景观健康状态,但针阔混交林受人类活动影响强烈,景观受破坏程度大,恢复保护效果不明显。水资源类景观受到全球气候变化的影响显著,随着全球变暖的日益加剧面积逐渐减少,进而导致了裸地面积的不断增长,如果开发利用资源不当等人类活动影响加大,今后裸地的扩张或将成为影响整体生态系统健康的重要因素。研究区景观健康诊断值大小与主体景观面积占比有密切关系,1990 年景观健康诊断值最大,同时主体景观面积在研究时段内占比也最大,因此研究区内对于主体景观的保护力度不能够松懈。通过将研究区网格化以及插值分析,能够在大面积呈现一种景观健康等级的区域中明确看出面积很小的其他景观健康等级区域,例如 1990 年研究区景观健康诊断值等级为一般,但其内部还有 32.97% 区域为较好,良好、较差和极差部分也有零散,从整体来看可将占比较少的区域忽略,但如果从保护生态环境典型区的角度来看较差和极差的区域才是需要进行重点保护的典型区域。人类活动也是影响区域健康状况的重要因素,1983 年西天山自然保护区建立,2013 年新疆天山申遗成功,保护区管理部门的设立对区域景观健康具有积极作用,这也是研究区 1997 年的景观健康比 1990 年差很多,一直到 2013 年以后均呈现好转趋势的原因。最后要说明遥感影像的质量以及景观分类的精度是诊断结果准确程度的基础与根本,研究区 1977 年获取的影像传感器为 MSS,其分辨率仅为 78 m,这或许是导致 90% 以上区域景观健康等级为一般的原因,早年间科技水平有限,但今后通过无人机来进行精细化景观健康诊断将是重要的研究方向与技术。

参考文献(References):

- [1] 彭建,党威雄,刘焱序,宗敏丽,胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.
- [2] 邓祥征,金贵,何书金,王成新,李兆华,王占岐,宋马林,杨庆媛,张安录,陈建成. 发展地理学研究进展与展望. 地理学报, 2020, 75(2): 226-239.
- [3] 陈利顶,李秀珍,傅伯杰,肖笃宁,赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [4] Yang L, Liu Y. A summary of research on landscape health assessment of wetland parks in China. Journal of Landscape Research, 2019, 11(6):

- 110-112, 118-118.
- [5] 杨利, 钟佩君, 石彩霞. 中国湿地公园景观生态健康研究进展. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29(6): 21-25, 49-49.
- [6] 崔莉. 基于景观格局变化分析的沿海区域生态系统保护研究——以浙江沿海地区为例. 管理世界, 2018, 34(6): 72-82, 93-93.
- [7] 燕守广, 李辉, 李海东, 张银龙. 基于土地利用与景观格局的生态保护红线生态系统健康评价方法——以南京市为例. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1109-1118.
- [8] 闫水玉, 朱茜, 刘涛, 邓玉婷. 基于城市生态系统健康评价的规划响应策略研究. 西部人居环境学刊, 2018, 33(4): 54-59.
- [9] 白雪莲, 王理想, 季树新, 陈正新, 常学礼. 鄂尔多斯草原沙漠交错区生态系统健康评价——以十大孔兑为例. 中国沙漠, 2020, 40(1): 187-194.
- [10] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 刘娅, 李艺. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001.
- [11] 易凤佳, 黄端, 刘建红, 邱娟, 施媛媛, 李仁东. 汉江流域湿地变化及其生态健康评价. 地球信息科学学报, 2017, 19(1): 70-79.
- [12] 贾大鹏, 王新杰, 刘雨. 金沟岭林场森林健康评价. 东北林业大学学报, 2019, 47(8): 47-52, 57-57.
- [13] 吴庭天, 杨众养, 陈宗铸, 雷金睿, 陈小花, 李苑菱. 红树林生态系统健康评价指标体系的建立与应用. 热带林业, 2020, 48(1): 67-70, 74-74.
- [14] Irfan Z B, Ling V, Shan J. Ecological health assessment of the Ousteri wetland in India through synthesizing remote sensing and inventory data. Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use, 2020, 25(1): 84-92.
- [15] Das S, Pradhan B, Shit P K, Alamri A M. Assessment of wetland ecosystem health using the Pressure - State - Response (PSR) model: a case study of mursidabad district of west Bengal (India). Sustainability, 2020, 12(15): 5932.
- [16] Cui N, Feng C C, Han R, Guo L. Impact of urbanization on ecosystem health: a case study in Zhuhai, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4717.
- [17] Wu N T, Liu A J, Wang Y F, Li L H, Chao L M Q Q G, Liu G X. An assessment framework for grassland ecosystem health with consideration of natural succession: a case study in Bayinxile, China. Sustainability, 2019, 11(4): 1096.
- [18] 曹宇, 肖笃宁, 欧阳华, 陈高. 额济纳天然绿洲景观演化驱动因子分析. 生态学报, 2004, 24(9): 1895-1902.
- [19] 张沛, 徐海量, 杜清, 凌红波, 张鹏, 赵新风. 基于 RS 和 GIS 的塔里木河干流生态环境状况评价. 干旱区研究, 2017, 34(2): 416-422.
- [20] 茹克亚·萨吾提, 阿斯娅·曼力克, 李虎, 尼加提·卡斯木, 郑逢令, 李学森, 热娜·阿不都克力木, 亚森·喀哈尔. 乌鲁木齐山地草地生态系统服务价值变化评估——基于遥感与 GIS. 生态学报, 2020, 40(2): 522-539.
- [21] Gobster P H, Ribe R G, Palmer J F. Themes and trends in visual assessment research: introduction to the *Landscape and Urban Planning* special collection on the visual assessment of landscapes. Landscape and Urban Planning, 2019, 191: 103635.
- [22] Wu Z H, Lei S G, He B J, Bian Z F, Wang Y H, Lu Q Q, Peng S G, Duo L H. Assessment of landscape ecological health: a case study of a mining city in a semi-arid steppe. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(5): 752.
- [23] 杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强. 苏州太湖三山岛国家湿地公园景观健康评价. 湿地科学, 2017, 15(5): 657-664.
- [24] 孙才志, 陈富强. 鸭绿江口滨海湿地景观生态健康评价. 湿地科学, 2017, 15(1): 40-46.
- [25] 王昭国, 杨兆萍, 曹开军, 安强, 刘群, 王瑾蓉. 世界自然遗产保护的社区感知差异及其影响因素分析——以喀拉峻世界自然遗产地为例. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1311-1317.
- [26] 刘华先, 杨兆萍, 王瑾蓉, 韩芳, 王昭国. 基于 GIS 的山地自然遗产露营适宜度分析——以新疆天山遗产库尔德宁为例. 干旱区研究, 2016, 33(4): 843-850.
- [27] 李慧, 耿蕊. 草原旅游景区游步道设计研究——以新疆喀拉峻草原为例. 美与时代(上), 2019, (11): 29-32.
- [28] 韩鑫, 刘传胜, 胡江玲, 王心源, 骆磊, 赵颜创, 李丽, 冀欣阳, 晏慧, 王玥. 新疆天山自然遗产地景观格局动态演化及其生态健康评价. 干旱区地理, 2019, 42(1): 195-205.
- [29] 陆丽珍, 詹远增, 叶艳妹, 陈建裕, 牟永铭. 基于土地利用空间格局的区域生态系统健康评价——以舟山岛为例. 生态学报, 2010, 30(1): 245-252.
- [30] 师满江. 1961—2015 年兰州市主城区土地利用与景观生态变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [31] 傅伯杰, 陈利军, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用(第2版). 北京: 科学出版社, 2011: 1-396.
- [32] Pierce L L, Running S W. The effects of aggregating sub-grid land surface variation on large-scale estimates of net primary production. Landscape Ecology, 1995, 10(4): 239-253.
- [33] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007: 1-266.
- [34] 肖笃宁, 李秀珍, 高俊, 常禹, 张娜, 李团胜. 景观生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2010: 1-326.
- [35] Bohan D A, Haughton A J. Effects of local landscape richness on in-field weed metrics across the Great Britain scale. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 158: 208-215.
- [36] 刘明华, 董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价. 地理研究, 2006, 25(5): 930-938.
- [37] 邹月. 西安市土地利用景观格局变化的生态系统服务价值响应及优化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [38] 高亚鸣, 孙慧兰. 基于土地分类利用下伊犁河谷地区的生态服务价值研究. 生态科学, 2017, 36(1): 193-200.
- [39] 张平, 刘普幸. 河西走廊瓜州绿洲生态系统稳定性评价与生态风险防御对策. 农业现代化研究, 2009, 30(6): 731-734.
- [40] 罗格平, 周成虎, 陈曦. 从景观格局分析人为驱动的绿洲时空变化——以天山北坡三工河流域绿洲为例. 生态学报, 2005, 25(9): 2197-2205.
- [41] 周德成, 罗格平, 韩其飞, 尹昌应, 李龙辉, 胡玉昆. 天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应. 生态学报, 2012, 32(1): 81-92.
- [42] 贾慧聪, 曹春香, 马广仁, 鲍达明, 武晓波, 徐敏, 赵坚, 田蓉. 青海省三江源地区湿地生态系统健康评价. 湿地科学, 2011, 9(3): 209-217.
- [43] 邓书斌, 陈秋锦, 杜会建, 徐恩惠. ENVI 遥感图像处理方法(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2014: 1-475.
- [44] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程(第二版). 北京: 科学出版社, 2012: 1-578.