

DOI: 10.5846/stxb202201190192

魏柏浩, 阿里木江·卡斯木, 如克亚·热合曼, 赵永玉. 天山北坡城市群生态承载力演变与生态敏感性分析. 生态学报, 2023, 43(4): 1399-1411.
Wei B H, KASIMU · Alimujiang, REHEMAN · Rukeya, Zhao Y Y. Ecological carrying capacity evolution and ecological sensitivity analysis of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1399-1411.

天山北坡城市群生态承载力演变与生态敏感性分析

魏柏浩¹, 阿里木江·卡斯木^{1,2,3,*}, 如克亚·热合曼¹, 赵永玉¹

1 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054

2 新疆师范大学丝绸之路经济带城镇化发展研究中心, 乌鲁木齐 830054

3 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054

摘要:经济的快速发展及人类活动的不断加剧,造成了各种生态环境问题,对可持续发展构成了严重威胁。探讨城市群土地利用变化、生态承载力演变特征及生态敏感性分析,是推动城市群生态环境优化,提升城市群土地利用管理方式的重要理论依据。以天山北坡城市群为研究区,基于土地利用数据对天山北坡城市群 2000—2020 年土地利用变化进行分析,采用生态足迹模型对研究区的生态足迹及生态承载力进行推算,并结合植被覆盖度、坡度、人口密度、土地利用类型、高程 5 个生态敏感性因子,对天山北坡城市群进行多因子综合生态敏感性评价。结果表明:2000—2020 年天山北坡城市群内建设用地和耕地转入量较大,分别增长 107.79% 和 46.45%,林地和水域面积逐步减少,反映了天山北坡城市群在研究期内处于快速城镇化阶段,城市建成区的不断扩大对部分生态生产用地构成一定的威胁。在快速城镇化的背景下,天山北坡城市群人均生态足迹总体呈现上升的趋势,生物资源生态赤字问题仍然存在,能源为主的其他资源的生态盈余呈现缩小趋势。生态敏感性高值区域主要分布在天山北坡城市群各城市的周边地区,中度敏感地区环绕在敏感高值区周围,分别占研究区面积的 11.21% 和 35.18%。在未来发展中天山北坡城市群需要进行区域生态敏感性的评价,针对不同的生态敏感性分区提出不同的保护和利用策略,同时需要发挥区域内各个城市的生产优势,扬长避短,实现天山北坡城市群土地资源合理利用及生态与社会及经济的高质量发展。

关键词:天山北坡城市群;土地利用变化;生态足迹;生态承载力;生态敏感性分析

Ecological carrying capacity evolution and ecological sensitivity analysis of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains

WEI Bohao¹, KASIMU · Alimujiang^{1,2,3,*}, REHEMAN · Rukeya¹, ZHAO Yongyu¹

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

2 Research Centre for Urban Development of Silk Road Economic Belt, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

3 Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China

Abstract: The rapid economic development and the continuous intensification of human activities causing various ecological and environmental problems, have posed a serious threat to sustainable development of city. For the optimization of the ecological environment of urban agglomeration, it is of great help to explore the changes of the land use of urban agglomeration, the characteristics of how its ecological carrying capacity changes, and its ecological sensitivity. These three factors above could be used as an important basis when it comes to improve the land use management of urban agglomerations. This study takes urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains as the research area, analyzes its land use change from 2000 to 2020 based on land use data, and uses the Ecological Footprint model to measure

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0901);自治区创新环境(人才、基地)建设专项项目(2022D04007);自治区社会科学基金项目(22BJY020)

收稿日期:2022-01-19; **网络出版日期:**2022-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: alimkasim@xjnu.edu.cn

the ecological footprint and ecological carrying capacity of the study area. Combined with five ecological sensitivity factors including vegetation coverage, slope, population density, land use type, and elevation, a multi-factor comprehensive ecological sensitivity evaluation was carried out on urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains. The results show that from 2000 to 2020, the transfer of construction land and cultivated land within the agglomeration was relatively large, increasing by 107.79% and 46.45% respectively, and that the area of forest land and water area have gradually decreased. These factors reflected that during the time urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains was in the stage of rapid urbanization, where the continuous expansion of urban built-up areas posed a certain threat to some ecological production land. In such context, the per capita ecological footprint of the urban agglomeration has generally shown an upward trend, the ecological deficit of biological resources still existed, and the ecological surplus of other resources (mainly energy) has shown a shrinking trend. The highly-sensitive area of ecological sensitivity were mainly distributed in the surrounding areas of the cities, covering the area of 11.21% of the urban agglomeration, meanwhile the moderately-sensitive areas surrounded the highly-sensitive areas, accounting for 35.18% of the target area. For the future development of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains, it is necessary to conduct an evaluation of regional ecological sensitivity, and propose different protection and utilization strategies for different ecologically sensitive zones. In the meantime, advantages of each city in the region shall be fully considered to promote the rational use of land resources and to improve the development ecologically, socially and economically.

Key Words: urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains; land use change; ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological sensitivity analysis

生态系统是人类生存和发展的基础,生态资源供给与人类消费的动态关系是基本的人地关系^[1]。生态承载力是人类推进城市化发展时对生态环境和可持续自然资源受到干扰剧烈程度的重要度量指标^[2]。因而,探索当地生态系统承载力演变规律,是促进可持续发展的重要任务^[3]。

生态敏感性是生态系统对外界干扰的适应能力^[4],根据生态敏感性分析可以明确一个地区发生生态环境问题的可能性。基于土地利用变化的生态承载力和生态敏感性评价可以估量区域生态环境在不造成严重退化和不可逆转破坏的情况下,为持续的人类活动、人口增长、土地利用以及物质发展提供支撑的能力^[5]。

土地是人类在地球表面进行生产生活的重要载体,更是城市经济、社会、文化活动的必需载体^[6],通过土地利用变化可以较为清晰地反映出人类活动与自然环境相互作用下产生的生态环境变化及其特征^[7]。在当前中国推进新型城镇化战略的大背景下,城市群越来越成为城市发展的新形态和新趋势,更是国家新型城镇化的主体区域,城市群的发展必须会导致土地利用方式、格局和利用强度的变化,对区域生态系统构成威胁^[8-9]。因此,基于土地利用变化的生态承载力和生态敏感性分析可以为区域的可持续发展提供科学参考。

提高区域生态系统生态承载力已经成为当今乃至未来一段时间内经济社会发展的重要任务,国内学者在1999年将生态承载力模型引入我国^[10],随后开展了大量的应用研究,如徐卫华等^[11]提出区域生态承载力预警评价方法,为区域的生态承载力评价提供依据。近年来,谢文瑄等^[12]研究城市扩展模式与生态足迹之间的动态关系,并为城市可持续发展提出相关建议;靳相木等^[13]从三维生态足迹模型出发,研究生态土地承载力指数。而本研究区相关的研究主要利用生态足迹模型分析新疆的发展状况^[14]、干旱地区的生态生产生活承载力变化^[15]、基于生态足迹对南北疆可持续发展分析^[16]等内容,而在现有的经济社会环境下,从生态承载力角度解决生态脆弱区的环境问题,是近年来解决生态脆弱地区资源环境问题的突破口和重点^[17]。高山地形和干旱气候等自然因素的影响导致生态环境非常敏感,在这种自然条件的影响下将严重影响到区域的可持续发展^[18],已有研究主要关注研究区所产生的生态供给,鲜有基于土地利用结合该区域的生态承载力和生态敏感性的生态系统供需综合分析。

鉴于此,本研究以天山北坡城市群为研究区,采用遥感数据对天山北坡城市群 2000—2020 的土地利用变

化进行分析;在此基础上利用生态足迹模型分析天山北坡城市群的生态承载力变化,并对所处地区生态系统的生态盈余和生态赤字的情况进行分析。再利用生态敏感性评价对天山北坡城市群敏感区域情况进行分析。目的在于更好把握区域内的生产、消耗量,为天山北坡城市群土地利用优化和生态环境保护提供一定科学参考。

1 研究区概况

天山北坡城市群北接准噶尔盆地,南临天山山麓,位于 42°78′—45°59′N, 84°33′—90°32′E,由乌鲁木齐市、昌吉回族自治州、吐鲁番市和克拉玛依市全域,以及伊犁州奎屯市,塔城地区的乌苏市、沙湾县,以及规划范围内的兵团各市组成,面积 $2.154 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)。天山北坡城市群属于温带大陆性气候,日较差、年较差大。该区域生态环境脆弱,在人类活动与自然气候的双重影响下,其城镇化发展中面临各类资源短缺、土地资源供给紧张、绿洲退化、生态脆弱导致的环境恶化等现实问题。区域内脆弱的生态环境会制约天山北坡城市群社会经济的可持续发展。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中提出促进城市群发展,推动城市群一体化发展。作为新疆城镇化水平最高,新型城镇化的主体区和经济发展的战略核心区^[19],天山北坡城市群承载着新时代丝绸之路经济带核心区建设、国家安全、“十四五”规划和 2035 年远景目标中新型城镇化战略在新疆实现的重要任务^[20],对该区域的生态系统环境提出了更大的考验。

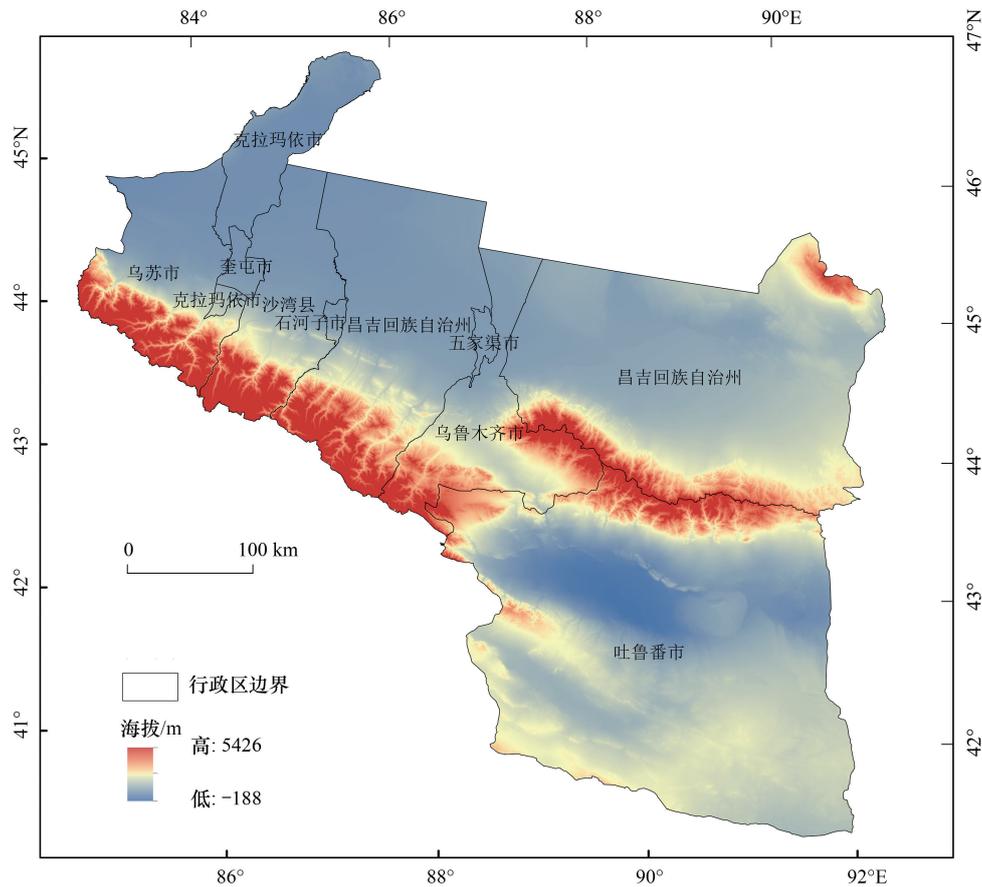


图 1 天山北坡城市群示意图

Fig.1 Schematic diagram of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

本研究所用的土地利用数据包括 2000、2005、2010、2015、2020 五期土地利用数据(来源于 <https://www.>

resdc.cn/, 分辨率 30m)。根据本研究的目的及景观特征, 参照全国土地利用分类体系(GB/T21010—2007), 采用一级分类标准, 将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

生态足迹(EF)计算所需的粮食生产量, 油料生产量、瓜果生产量, 水产生产量、各类能源生产量、各类资源消费量、人口等基础数据来自《中国统计年鉴》、《中国县域统计年鉴》、《新疆统计年鉴》及各地州市统计年鉴。非生物资源账户推算利用 2008 年由联合国粮农组织公布的统计数据的平均能源足迹和折算系数进行计算。

生态敏感性评价采用的天山北坡城市群高程数据(来源于地理空间数据云); 坡度信息基于高程数据影像进行提取; 天山北坡城市群范围内归一化植被指数(NDVI)数据利用谷歌遥感云计算的 Google Earth Engine(GEE)平台, 调用 2020 年 NDVI 连续性指数 MYD13A1 V6 500m 分辨率产品; 人口密度则利用夜间灯光数据 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 进行逐年校正获得研究区年序列数据集, 像元灰度值(DN)的值域范围统一为 0—63。取其中 2020 年平均夜间灯光数据作为人口密度的灯光指数因子, 以 DN 值的不同取值范围作为人口密度对生态敏感性的不同影响程度。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用转移分析

土地利用转移分析主要采用土地利用矩阵定量描述土地利用的系统状态, 表示一定时间间隔内 T1 时间点到 T2 时间点之间, 各类土地利用类型的变化过程及其相互转移量^[21]。其数学表达式为公式(1):

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 S_{ij} 表示土地从 T1 时间点到 T2 时间点的土地利用情况, m, n 均为土地利用类型。本研究利用地理信息系统的叠置分析和统计工具获得 2000—2005、2005—2010、2010—2015、2015—2020、2000—2020 年的土地利用矩阵, 基于土地利用转移矩阵, 分析 20a 的天山北坡城市群土地利用时空变化。

2.2.2 生态承载力评价

生态承载力评价研究中, 生态足迹计算是基于生物量的角度, 将各种生物、能源等资源消费折算为相对应的土地面积, 从而判断生态系统是否处在可承载的状态^[22], 即是对所研究区域的土地生产能力评估的一项综合环境指标。生态足迹利用区域内人口各项消费行为的需求量和消费量对所需生态资本进行计算; 生态承载力则是区域内自然环境能为该区域人口提供各类生态资本的能力。本研究基于天山北坡城市群多年的土地利用状况和均衡因子、产量因子以计算区域内的生态足迹和生态承载力:

(1) 生态足迹与生态承载力模型

生态足迹模型计算公式如公式(2)所示:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{i=1}^n (aa_i \times r_j) = N \times \sum_{i=1}^n (C_i / P_i) \times r_j \quad (2)$$

生态承载力的计算公式如公式(3)所示:

$$EC = N \times ec = N \times \sum_{j=1}^n (a_j \times r_j \times y_j) \quad (3)$$

其中, EF 为区域总人口所产生的生态足迹(hm^2), EC 为区域总人口的生态承载力(hm^2), N 为研究区域内总人口数量(万人), ef 为人均生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$), aa_i 为人均第 i 种消费物品折算的生物生产面积, C_i 和 P_i 分别对应第 i 种消费物品的人均消费量和平均生产能力, ec 为人均生态承载力($\text{hm}^2/\text{人}$) a_j 为第 j 种土地类型的人均生态生产面积, r_j 和 y_j 分别为第 j 种土地类型的均衡因子和产量因子。

(2) 均衡因子与产量因子

均衡因子反映了不同土地利用类型的平均每公顷的相对生态生产力,所有国家的均衡因子基本相同,并随着每年世界产量变化而变化。本研究所使用的均衡因子结合联合国粮食及农业组织(FAO)统计数据库相关数据进行计算。

产业因子反映的是各国特定土地利用类型平均每公顷的相对生产力。每个国家每一种土地利用类型中都有其相对应的产量因子。本研究所采用的产量因子取自 2020 年全球生态足迹网 (<https://www.footprintnetwork.org/>) 中根据粮农组织的数值所推算的产量因子进行计算。由于生物多样性的需求,世界环境与发展委员会(WCED)规定在生态承载力计算时需要扣除 12% 的生物多样性保护面积^[23-24]。

(3) 生态盈余与生态赤字

生态盈余/赤字由研究区内生态足迹与生态承载力计算而得出,生态承载力高于生态足迹,则呈现生态盈余,反之则呈现生态赤字,区域内的生态盈余和生态赤字共同表示该区域的人地系统的供需情况与区域可持续发展的水平。

$$S_y = EC_y - EF_y \quad (4)$$

式中, S_y 为生态盈余或生态赤字, y 代表研究年份, EC_y 代表第 y 年的研究区的生态承载力,而 EF_y 则表示第 y 年研究区所产生的生态足迹; $S_y > 0$ 则代表研究区域属于生态盈余状态,反之则处于生态赤字状态。

(4) 能源生态足迹和承载力计算

能源消费主要包括原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油,液化石油气、天然气和电力。基于天山北坡城市群各城市统计年鉴中 2000、2005、2010、2015、2020 年的化石能源消耗量,以及全球平均能源足迹和折算系数,将研究区内的能源消费所消耗的热量折算成化石能源用地面积,再根据生态足迹和生态承载力模型进行计算,得出其能源账户所对应的生态足迹和生态承载力^[25]。

2.2.3 生态敏感性评价

生态环境敏感性是指生态系统对各种环境变化和人类活动干扰的敏感程度^[4]。生态环境敏感性高的区域受到不合理人类活动的影响时,将会出现复杂的生态环境问题,因此生态敏感性是区域生态环境保护的重要指标之一^[26]。本研究借助地理信息系统软件的空间分析技术,采用多因子综合评价分析,对天山北坡城市群生态敏感性区域进行分析。

(1) 生态敏感性评价方法

首先根据天山北坡城市群的自然环境和人文环境构建属于研究区的生态敏感性评价因子体系,并对各单一因子进行分级评价;其次通过层次分析法(AHP法)确定评价因子的各因子权重,最后通过加权叠加法进行综合评价,明确研究区中生态环境敏感性在区域中的分布特征。

(2) 生态敏感性评价因子体系建立

生态敏感性评价因子的确立对评价结果的可靠性影响比重较大,各生态敏感性区域的形成都是区域内各类生态要素和人类活动的综合结果,因此,评价因子的选取需要顾及区域中的各类生态要素和人类活动的影响^[27]。参考多位学者的研究成果^[28-29],根据天山北坡城市群的自然环境特征和专家咨询意见,选取了植被覆盖度^[30-31]、高程、坡度、人口密度^[32]、土地利用^[33]作为评价因子,并按照各评价因子按影响等级对四个敏感度进行赋值,分级标准如表 1 所示。

(3) 评价因子权重确定

各项因子的权重值和其敏感性影响呈现正相关关系,根据层次分析方法(AHP法)对生态敏感性指标体系中各因子进行两两比较,得出指标间的相对重要性分为 5 个等级。在此基础上构建判断矩阵,运用方根法对判断矩阵进行归一化处理,利用层次分析软件进行一致性检验,并通过一致性结果($CR = 0.0891$, $CR < 0.1$)判断该判断矩阵一致性结果符合要求,后得出各因子权重,如表 2 所示。

表 1 生态敏感性指数分级标准

Table 1 Ecological sensitivity index classification standard

评价因子 Evaluation factor	轻度敏感 Mildly sensitive	低度敏感 Low sensitive	中度敏感 Moderately sensitive	高度敏感 Highly sensitive
植被覆盖度 NDVI	<0	0—0.12	0.12—0.25	0.25—1
坡度 Slope/(°)	0—5	5—15	15—25	>25
人口密度 The population density	>20	11—20	6—10	0—5
土地利用类型 Land use	未利用地/建设用地	耕地	草地	林地/水域
高程 Elevation/m	>2600	1300—2600	500—1300	<500
赋值 Assignment	1	3	5	7

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

表 2 生态敏感性判断矩阵及因子权重

Table 2 Ecological sensitivity judgment matrix and factor weights

评价因子 Evaluation factor	植被覆盖度 NDVI	坡度 Slope	人口密度 The population density	土地利用类型 Land use	高程 Elevation	权重 Weight
植被覆盖度 NDVI	1	7	5	3	1/3	0.2964
坡度 Slope	1/7	1	1	1/3	1/5	0.0595
人口密度 The population density	1/5	1	1	1/3	1/3	0.0749
土地利用类型 Land use	1/3	3	3	1	1/5	0.1357
高程 Elevation	3	5	3	5	1	0.4335

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

如图 2 所示,2000 年天山北坡城市群的土地利用类型以未利用地为主(占 54.79%),其次为草地(占 32.07%)。而到 2020 年,天山北坡城市群仍以未利用地为主要用地类型,未利用地和草地比例相对稳定且略有减少,分别占 53.99%和 30.42%。而其余用地类型中,耕地用地和建设用地持续增加,耕地面积从 2000 年到 2020 年的增加量为 7131.81km²,变化率为 46.45%;建设用地的变化量增长幅度最大,增加量为 1762.12km²,变化率达到了 107.79%。林地和水域两种用地类型在研究期内面积减少幅度最大,分别减少 49.65%和 47.52%(表 3)。随着新疆城镇化水平不断提高,研究区范围内的建设用地面积占比从原有的 0.84%到 1.75%。

表 3 2000—2020 年天山北坡城市群各土地利用变化

Table 3 Land use change of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2020

年份 Year	土地利用类型 Land use types	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Waterbody	建设用地 Built-up land	未利用土地 Unused land
2000	面积/km ²	15353.21	5156.14	62204.01	3336.10	1634.77	106273.05
2005	面积/km ²	16432.88	5170.48	61286.84	3334.64	1817.91	105914.25
2010	面积/km ²	21347.89	2742.33	57875.41	1834.01	2347.14	107814.31
2015	面积/km ²	22545.52	2596.48	59196.74	1765.44	3085.32	104780.68
2020	面积/km ²	22485.02	2596.09	59020.78	1750.82	3396.88	104718.49
2000—2005	面积变化量/km ²	1079.67	14.34	-917.16	-1.46	183.14	-358.80
	变化率/%	7.03	0.28	-1.47	-0.04	11.20	-0.34
2005—2010	面积变化量/km ²	4915.01	-2428.15	-3411.44	-1500.62	529.23	1900.06
	变化率/%	29.91	-46.96	-5.57	-45.00	29.11	1.79
2010—2015	面积变化量/km ²	1197.63	-145.85	1321.33	-68.57	738.19	-3033.63
	变化率/%	5.61	-5.32	2.28	-3.74	31.45	-2.81
2015—2020	面积变化量/km ²	-60.50	-0.40	-175.96	-14.62	311.56	-62.19
	变化率/%	-0.27	-0.02	-0.30	-0.83	10.10	-0.06
2000—2020	面积变化量/km ²	7131.81	-2560.05	-3183.23	-1585.28	1762.12	-1554.56
	变化率/%	46.45	-49.65	-5.12	-47.52	107.79	-1.46

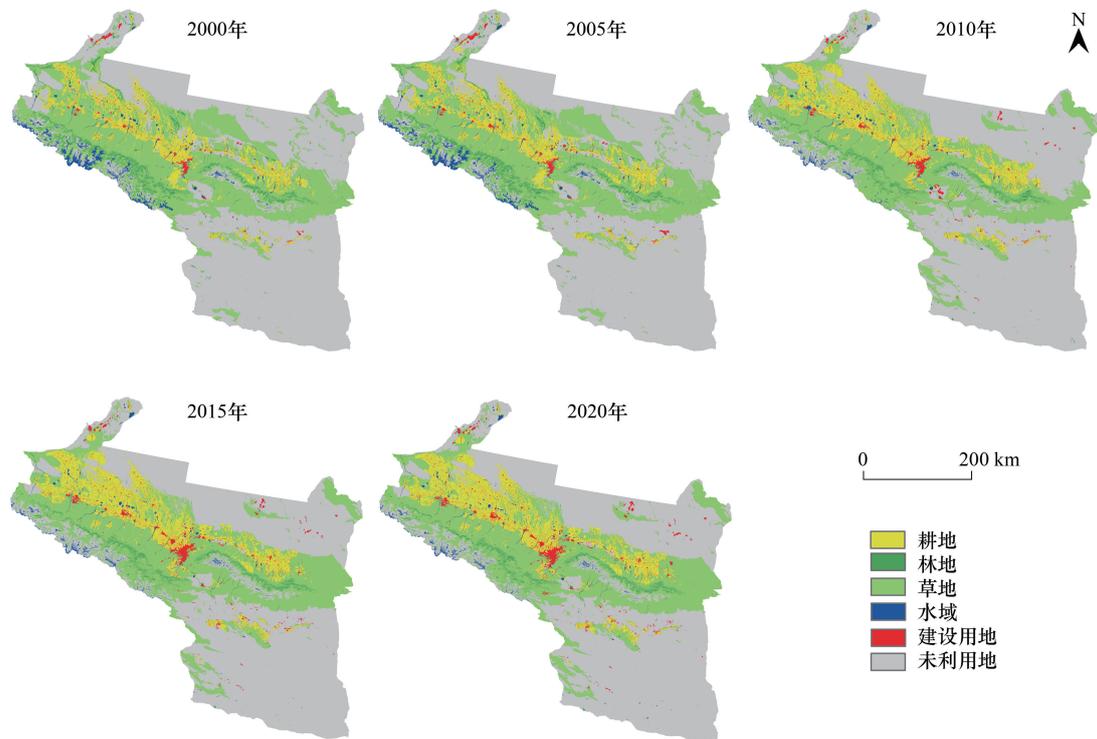


图 2 天山北坡城市群 2000—2020 年土地利用变化

Fig.2 Land use of Urban Agglomeration in the Northern Slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2020

结合土地利用转移可视化弦图(图 3)和表 4 所示,耕地的增加主要源于草地和未利用地的转移,在 2000—2005 年期间转移量最大,转移面积分别为 914.85km²和 378.60km²;而建设用地的增加主要由耕地、草地、未利用地转化而成,在 2015—2020 年期间转移面积最大,分别转移面积 112.04km²、167.55km²和 110.38km²。而在研究区内土地利用面积减少量较大的林地主要向草地转化,转移面积为 2521.01km²;水域则主要向未利用地和草地转化,转移面积分别为 1786.42km²和 425.66km²。

表 4 2000—2020 年天山北坡城市群土地利用转移矩阵 /km²

Table 4 Land use transfer matrix of Urban Agglomeration in the Northern Slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2020

土地利用类型 Land use types	草地 Grassland	耕地 Cropland	建设用地 Built-up land	林地 Forest	水域 Waterbody	未利用地 Unused land
草地 Grassland	44235.71	5838.64	841.87	842.38	279.75	10163.21
耕地 Cropland	1150.74	13286.37	788.48	29.49	42.09	56.04
建设用地 Built-up land	94.82	358.39	1016.50	2.17	3.39	159.49
林地 Forest	2521.01	640.08	61.60	1668.73	33.64	230.80
水域 Waterbody	425.66	52.01	16.78	0.77	1052.83	1786.42
未利用地 Unused land	10584.21	2309.40	671.65	52.29	338.41	92305.33

3.2 生态足迹与生态承载力分析

3.2.1 生态足迹分析

由表 5 分析可知,天山北坡城市群的人均生态足迹从 2000—2015 年波动上升,由 2000 年时的 6.7980hm²/人增长至 2015 年的 14.7862hm²/人,年均增长率达 7.83%,在 2015 年到 2020 年平稳增长至 15.3317hm²/人。化石能源为代表的其他资源消耗总体增加,从 2000 年的 4.6381hm²/人增长至 2015 年的 11.5675hm²/人,到 2020 年则缓增至 13.1083hm²/人。由于开采能源的缘故,造成化石能源足迹总体上升。而

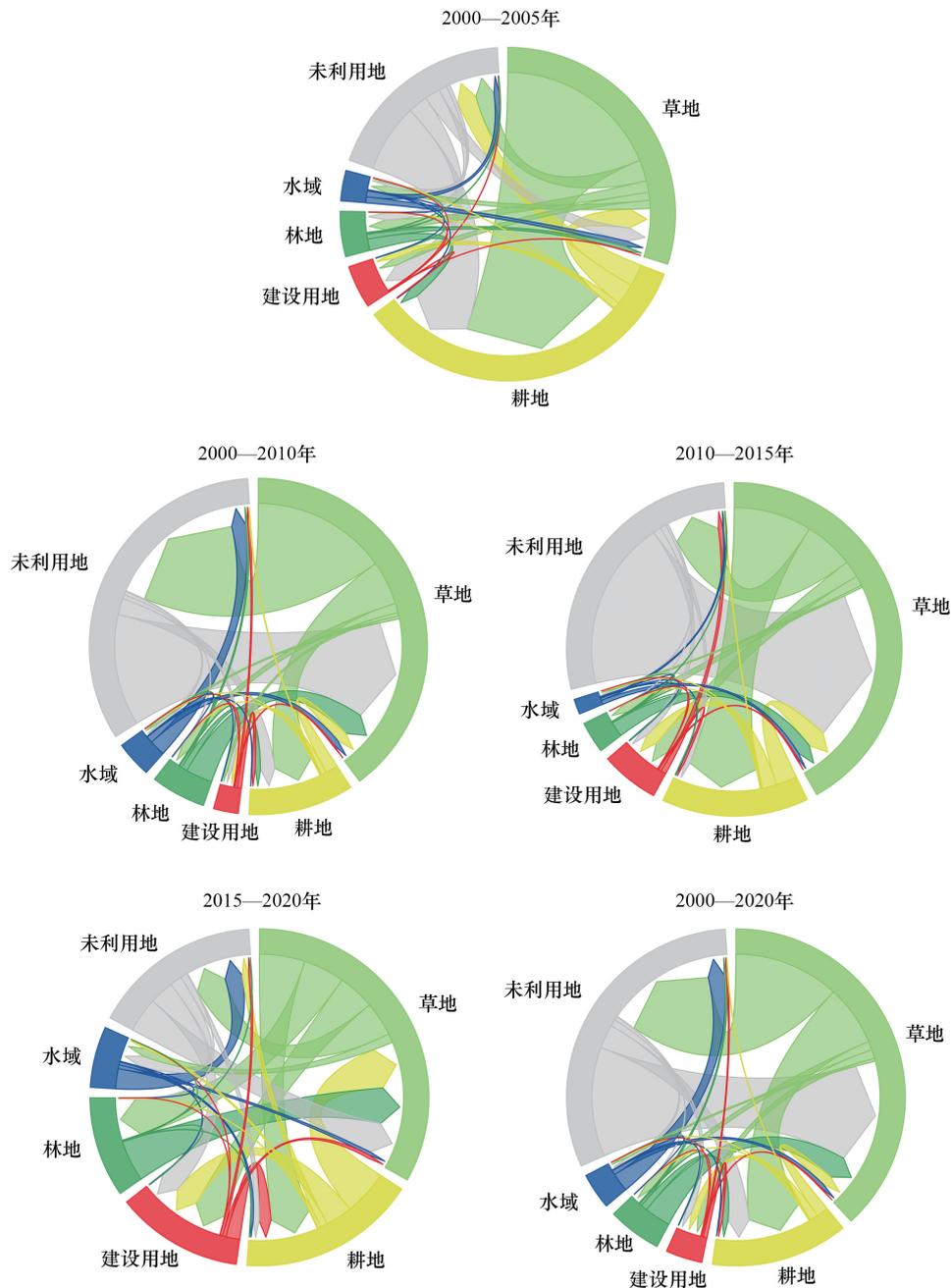


图3 天山北坡城市群 2000—2020 年土地利用转移弦图

Fig.3 The chord diagram of land use transfer in urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2020

生物资源足迹在研究期内处于平稳波动状态,在 2010 年处于峰值,达到 $3.3006\text{hm}^2/\text{人}$ 。

3.2.2 生态承载力与生态盈亏分析

根据表 5 以及生态盈亏双色图(图 4)可知,生物资源账户的生态足迹常年处于生态赤字状态,2000—2010 年生物资源账户生态赤字不断扩大,于 2010 年达到最大的 $-1.3844\text{hm}^2/\text{人}$,2010—2020 年生物资源账户的生态赤字有平稳下落的趋势,但生物资源账户的生态赤字问题仍在存在。由于处于多种能源产区,其他资源账户常年处于生态盈余状态,其中 2000 年到 2015 年其他资源生态盈余状态总体呈现扩大的趋势,从 2000 年的 $3.3065\text{hm}^2/\text{人}$ 到 2015 年的 $8.1602\text{hm}^2/\text{人}$,而 2015—2020 生态盈余缩小至 $5.9601\text{hm}^2/\text{人}$,表明该时间段其他资源的人均生态足迹相对扩大,需要在能源消耗的过程中节能减排达到降低生态足迹的需求。

表 5 天山北坡城市群 2000—2020 年人均生态足迹与人均生态承载力分析/(hm²/人)

Table 5 Analysis of per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2020

生态足迹账户		生物资源账户			其他资源账户		
Ecological footprint account		Biological resource account			Other resource account		
土地利用类型		耕地	林地	草地	水域	化石能源用地	建设用地
Land use types		Cropland	Forest	Grassland	Waterbody	Fossil energy land	Built-up land
2000	人均 EF	1.2971	0.0290	0.8331	0.0007	3.2185	1.4197
	人均 EC	0.7374	0.0300	0.5957	0.0007	5.4889	2.4558
	人均生态盈余	-0.5597	0.0010	-0.2374	-0.0001	2.2704	1.0361
2005	人均 EF	1.2598	0.0624	0.7875	0.0008	5.2268	2.1303
	人均 EC	0.7162	0.0325	0.5631	0.0007	8.9213	3.6770
	人均生态盈余	-0.5436	-0.0299	-0.2244	-0.0001	3.6945	1.5467
2010	人均 EF	2.2568	0.2620	0.7810	0.0007	5.2193	0.6331
	人均 EC	1.2830	0.0741	0.5585	0.0006	8.9013	1.0797
	人均生态盈余	-0.9739	-0.1879	-0.2225	-0.0001	3.6819	0.4466
2015	人均 EF	2.2722	0.1494	0.7963	0.0008	10.1489	1.4186
	人均 EC	1.2917	0.0782	0.5694	0.0007	17.3083	2.4194
	人均生态盈余	-0.9805	-0.0712	-0.2269	-0.0001	7.1594	1.0008
2020	人均 EF	1.4728	0.0515	0.6987	0.0004	9.8210	3.2873
	人均 EC	1.1755	0.0268	0.4996	0.0003	16.0910	2.9774
	人均生态盈余	-0.2973	-0.0247	-0.1991	0.0000	6.2700	-0.3099

EF:生态足迹 Ecological footprint; EC:生态承载力 Ecological carrying capacity; 此处人均 EC 已扣除 12% 的生物多样性保护面积

3.3 区域生态敏感性分析

在确定各评价因子及其权重后,利用加权叠加法对 2020 年天山北坡城市群综合生态敏感性进行评价分析。利用研究区植被覆盖度、坡度、人口密度、土地利用类型、高程 5 项生态敏感性进行计算,得到综合生态敏感性空间分布并对其进行敏感度分级,计算各种敏感程度的区域面积占比(表 6)。

根据表 6 和图 5 所示,天山北坡城市群范围内高敏感度分布较为明显,主要分布在克拉玛依都市区,奎独乌胡都市区、石沙玛都市区,乌昌五都市圈以及吐鲁番都市区周边。中度敏感区主要环绕在高敏感度外分布,如昌吉州东部的吉木萨尔县、奇台县、木垒哈萨克自治县周边区域。而在研究区内分布面积比重最大的低敏感度地区,且用地类型大多属于土地利用类型中城市中心建成区以及研究区范围内的未利用地。轻度敏感地区受到坡度和海拔的影响,人类对其进行生态利用的开发难度大,并不适宜用作生态开发利用,故判定为轻度敏感地区,在研究区范围内的轻度敏感地区主要分布在天山山脉中。

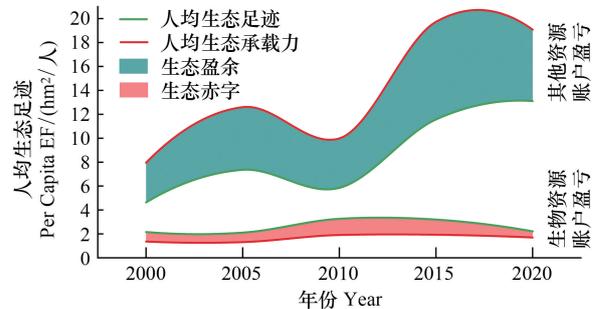


图 4 天山北坡城市群生物资源和其他资源盈亏状况

Fig.4 Profit and loss of biological resources and other resources in urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains

表 6 天山北坡城市群生态敏感性综合评价结果

Table 6 Comprehensive evaluation result of ecological sensitivity of the urban agglomeration on Urban Agglomeration in the Northern Slope of Tianshan Mountains

	轻度敏感	低度敏感	中度敏感	高度敏感
	Mildly sensitive	Low sensitive	Moderately sensitive	Highly sensitive
面积 Area/km ²	18195	85418	67982	21659
比重 Proportion/%	9.42	44.20	35.18	11.21

4 讨论与结论

4.1 讨论

2000—2020 年天山北坡城市群的建设用地、耕地面积显著增加,林地和水域持续减少,在此基础上生态压力持续增加,区域人均生态足迹总体处于上升状态,生物账户生态赤字问题仍有存在,其他资源的生态盈余略有缩小。由图 6 分析可知,各城市的生态足迹与生态承载力存在不同差距,在研究中所列举的城市中 2000 年昌吉州、奎屯、以及塔城地区的乌苏、沙湾的生物资源账户生态足迹明显高于所处地区的生物资源承载力,分别达到 $-0.9271\text{hm}^2/\text{人}$ 、 $-1.37191\text{hm}^2/\text{人}$ 和 $-1.6410\text{hm}^2/\text{人}$,而其他资源账户生态足迹虽处于生态盈余的状态,但与当地的生态承载力相接近,而乌鲁木齐、克拉玛依、吐鲁番的生物资源账户则处于一个较低的赤字状态。随着人口和 GDP 的增长,2000—2020 年各城市生态足迹都处于上升的趋势,尤其在 GDP 提速较快的 2005—2015 年期间,各市的生态足迹和生态承载力均有较大的

变化,生态赤字和生态盈余缩小的问题日渐突出。结合方创琳^[19]对天山北坡城市群经济社会发展指标的研究发现,天山北坡城市群在 2000 年以来总人口、城镇人口都有微升的趋势,GDP 有大幅提升的趋势。天山北坡城市群的生态足迹与人均 GDP、建成区面积的增长呈正相关的关系(图 7),表明天山北坡城市群的生态环境受到人口城市化、土地城市化、社会经济发展的共同影响。土地城市化使大量具有生态生产功能的土地转化为城市建设用地,而人口进一步向天山北坡城市群集聚,使城市群的生态环境压力提升,引起人均生态承载力逐渐下降,导致天山北坡城市群生物资源生态赤字扩大和其他资源生态盈余的减少。

在生态环境问题日益加剧的背景下,寻找天山北坡城市群可持续发展方向尤为重要。由于天山北坡城市群处于西北内陆生态脆弱区的特殊位置,如何在社会经济发展与环境保护之间找到平衡点是引导天山北坡城市群发展的重中之重。根据姚士谋^[34]研究表明,城市群可能来自不同的行政区域,各行政区域之间的发展目标、生态政策、环境保护等方面存在差异,这会导致城市群内城市之间存在一定的冲突。同时,随着区域生活水平的提升,对生物资源、能源及生活环境等生态环境需求与日俱增,通过调整区域中各城市的功能结构对改善城市群生态系统尤为重要。根据向秀容等^[35]研究表明,天山北坡城市向周边地区扩张的同时,未利用地被转变为生物生产空间,导致生态承载力的总量有一定程度的上升。当前,面对天山北坡城市群出现的生态盈余的缩小和生态赤字仍然存在的问题,依靠未利用地转变为生物生产空间的方法增大生态的可承载能力将有可能衍生更多及复杂的生态环境问题。土地在生态利用与发展的过程中,生态敏感性分析显得尤为重要。因此结合土地利用类型、生态承载力分析以及划分生态敏感性区域分析天山北坡城市群符合当前生态文明建设、高质量发展的时代背景。本研究分析天山北坡城市群的生态敏感性及其主要地区的生态足迹、生态承载力状况,了解不同敏感性区域的空间分布状况,可以为该区域在未来一段时间内城市群内资源环境互补、环境治理政策及高质量发展提供合理的科学参考。

本研究基于生态足迹法对天山北坡城市群的生态承载力进行研究分析,虽然通过计算生态足迹可以对区域内各类土地生产能力进行估算,但生态足迹法计算对均衡因子、产量因子以及统计数据的可获取性和准确性有较强的依赖。而对于天山北坡城市群的后续研究,可以利用更精准的地区数据进行生态足迹的细化计算,如利用改进后的三维生态足迹模型^[36-37],引入自然资源流量和自然资源存量的概念,扩充二维生态足迹

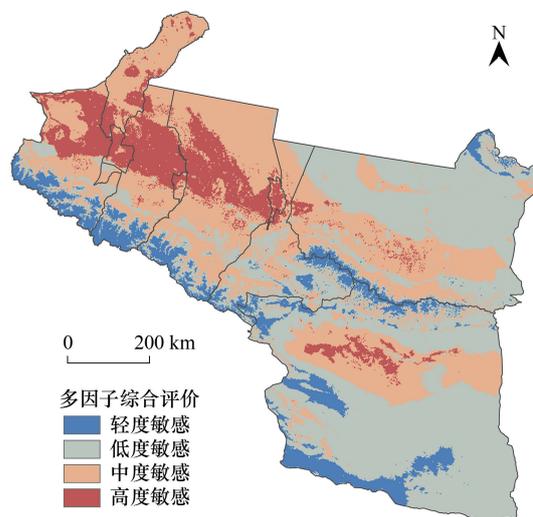


图 5 2020 年天山北坡城市群多因子综合生态敏感性评价

Fig.5 Multi-factor comprehensive ecological sensitivity evaluation of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains in 2020

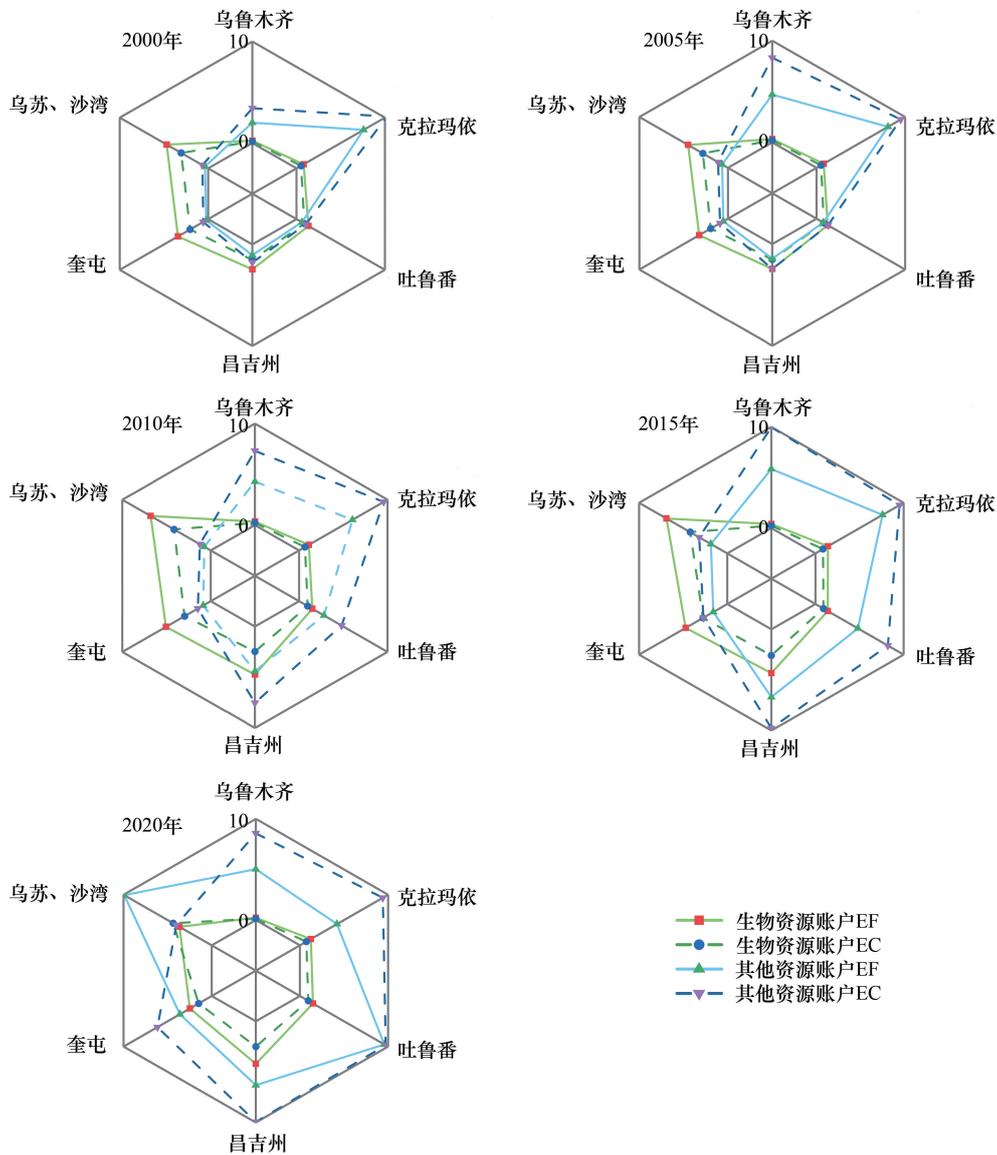


图 6 天山北坡城市群主要城市生态足迹与生态承载力雷达图

Fig.6 Radar map of ecological footprint and ecological carrying capacity of major cities in urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains

EF:生态足迹 Ecological footprint; EC:生态承载力 Ecological carrying capacity

对可再生资源 and 不可再生资源的占用状况,对区域生态足迹的广度和深度有更层次的分析;同时也可以利用遥感影像反演研究区 NPP 值对生态足迹计算的均衡因子和产量因子进行估算^[38-39]。基于此,日后的研究可以进一步结合遥感影像利用 PSR 模型^[40]、状态空间法^[41]、生态系统服务消耗评价法^[42]等对地区的生态承载力进行研究,以弥补生态足迹法对统计数据的依赖和计算上的误差。而生态系统安全评价方面则可以利用具有完整评价体系的 InVEST 模型的生境评估模块揭示区域生态系统的脆弱性^[43],为探寻区域生态系统功能改善和区域生态规划提供更为科学的生态脆弱性、敏感性评价。

4.2 结论

本研究结合天山北坡城市群的现实状况,对天山北坡城市群 20a.的土地利用变化进行了分析,对研究区的生态足迹、生态承载力进行分析,并结合生态敏感性分析对天山北坡城市群在生态环境方面未来的发展进行了探讨,主要结论如下:

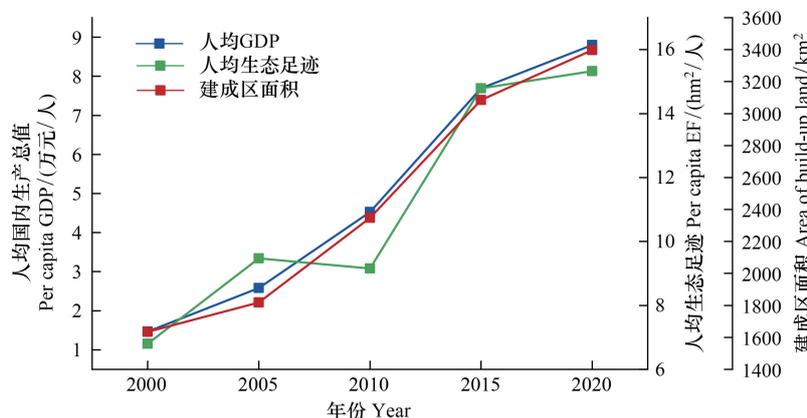


图7 天山北坡城市群人均生态足迹与人均 GDP 的关系

Fig.7 The relationship between per capita ecological footprint and per capita GDP of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains

(1) 2000—2020 年天山北坡城市群城市化发展迅速,处于快速城市化阶段,各类土地之间的转移尤为明显。建设用地和耕地的转入量较大,与研究期起始年份相比,分别增长 107.79% 和 46.45%,在 2015—2020 年转入较为显著。而林地和水域的转出量尤为显著,在快速城市化的同时,需要重点对研究区范围内的林地和水域进行生态保护。

(2) 天山北坡城市群人均生态足迹总体呈现上升的趋势,生物资源生态赤字问题仍然存在,能源为主要的其他资源生态盈余呈现缩小的趋势。由于天山北坡城市群正处于快速城镇化的阶段,随着区域人均 GDP 的增长,人均生态足迹也呈逐年增长的态势。由区域内生态足迹和生态承载力所反映的生态问题表明,天山北坡城市群需要在不影响当地居民生产生活的情况下,对生态承载力进行扩大以及对区域内的生活、生产能源消费结构进行转型升级,并制定碳排放达峰行动方案,加大温室气体排放控制力度,降低碳排放强度,降低天山北坡城市群的人均生态足迹。

(3) 着眼于天山北坡城市群在未来发展,需要注意区域生态敏感性的评价,发挥区域内各个城市的生产优势,扬长避短,避免在生态敏感度中高值区域进行不合理的大规模开发,以大城市为中心协调统筹周边地州市县的生态系统服务,以做到天山北坡城市群各地州市县之间的资源互补。此外,需要通过现代物流、交通运输途径联通区域内生物资源、以化石能源为代表的其他资源之间的流动,以达到降低区域生态足迹的目的。同时也需要结合生态保护红线的动态变化对天山北坡城市群进行合理的开发利用,在生态环境保护的状态下实现天山北坡城市群城镇化的高质量发展。

参考文献 (References):

- [1] Fang C L, Liu H M, Li G D. International progress and evaluation on interactive coupling effects between urbanization and the eco-environment. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(8): 1081-1116.
- [2] 于贵瑞, 张雪梅, 赵东升, 邓思琪. 区域资源环境承载力科学概念及其生态学基础的讨论. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 577-590.
- [3] Chen H, Oda K, Taniguchi M. Visualizing the environmental balance: retrospective, perspective, and prospective. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, 2016, 72(5): I_41-I_50.
- [4] Tsou J, Gao Y F, Zhang Y Z, Genyun S, Ren J C, Li Y. Evaluating urban land carrying capacity based on the ecological sensitivity analysis: a case study in Hangzhou, China. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 529-529.
- [5] 李振亚, 魏伟, 周亮, 刘春芳, 郭泽呈, 庞素菲, 张静. 中国陆地生态敏感性时空演变特征. *地理学报*, 2022, 77(1): 150-163.
- [6] 张杰, 李清泉, 吴祥茵, 张晨晨, 王敬哲, 邹国锋. 基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析. *生态学报*, 2021, 41(21): 8375-8386.
- [7] 张俊茂, 臧传富. 东南诸河流域 1990—2015 年土地利用时空变化特征及驱动机制. *生态学报*, 2019, 39(24): 9339-9350.

- [8] Wu M W, Wu J Q, Zang C F. A comprehensive evaluation of the eco-carrying capacity and green economy in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 281: 124945.
- [9] Zhou J Y, Chang S S, Ma W Q, Wang D Y. An unbalance-based evaluation framework on urban resources and environment carrying capacity. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 72: 103019.
- [10] 徐中民, 陈东景, 张志强, 程国栋. 中国 1999 年的生态足迹分析. *土壤学报*, 2002, 39(3): 441-445.
- [11] 徐卫华, 杨琰琰, 张路, 肖焱, 王效科, 欧阳志云. 区域生态承载力预警评估方法及案例研究. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 306-312.
- [12] 谢文瑄, 黄庆旭, 何春阳. 山东半岛城市扩展模式与生态足迹的关系. *生态学报*, 2017, 37(3): 969-978.
- [13] 靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例. *生态学报*, 2017, 37(9): 2982-2993.
- [14] 陈东景, 徐中民. 生态足迹理论在我国干旱区的应用与探讨——以新疆为例. *干旱区地理*, 2001, 24(4): 305-309.
- [15] 方创琳, 鲍超, 张传国. 干旱地区生态-生产-生活承载力变化情势与演变情景分析. *生态学报*, 2003, 23(9): 1915-1923.
- [16] 金梦婷, 徐丽萍, 李鹏辉. 南北疆区域经济差异化三维生态足迹自然资本利用的时空演变. *生态学报*, 2020, 40(13): 4327-4339.
- [17] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(2): 399-410.
- [18] 刘康, 欧阳志云, 王效科, 徐卫华, 苗鸿. 甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布. *生态学报*, 2003, 23(12): 2711-2718.
- [19] 方创琳. 天山北坡城市群可持续发展战略思路与空间布局. *干旱区地理*, 2019, 42(1): 1-11.
- [20] 新疆维吾尔自治区人民政府. 新疆维吾尔自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要. (2021-06-11). https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzlgzh/dfzgh/202106/t20210611_1283166.html?code=&state=123.
- [21] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨. *资源科学*, 2010, 32(8): 1544-1550.
- [22] Siche R, Pereira R, Agostinho R, Ortega E. Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(10): 3182-3192.
- [23] Wackernagel M, Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Philadelphia: New Society Publishers, 1996.
- [24] WCED. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [25] 符国基. 海南生态省生态可持续发展定量研究——生态足迹方法的应用. *农业现代化研究*, 2006, 27(1): 11-16.
- [26] 闫虎, 王玉杰, 张会兰. 新疆巴音郭楞蒙古自治州生态敏感性分析. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1226-1233.
- [27] 王国玉, 白伟岚. 风景名胜区生态敏感性评价研究与实践进展. *中国园林*, 2019, 35(2): 87-91.
- [28] 亚库普·约麦尔, 阿里木江·卡斯木. 喀什市土地利用变化下的生态敏感性研究. *生态科学*, 2016, 35(2): 19-25.
- [29] Yang Y J, Song G. Human disturbance changes based on spatiotemporal heterogeneity of regional ecological vulnerability: a case study of Qiqihaer city, northwestern Songnen Plain, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 291: 125262.
- [30] 袁领兄, 李坤, 范舒欣, 董丽. 基于 GIS 的太原市土地生态敏感性评价. *中国城市林业*, 2021, 19(3): 19-24.
- [31] 刘乐怡, 杨双娜, 张龙, 宋钰红. 基于土地利用演变的生态敏感性评价——以香格里拉市为例. *西部林业科学*, 2021, 50(6): 124-131.
- [32] 卓莉, 陈晋, 史培军, 辜智慧, 范一大, 一之瀨俊明. 基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟. *地理学报*, 2005, 60(2): 266-276.
- [33] 李东梅, 吴晓青, 于德永, 高正文, 吴钢. 云南省生态环境敏感性评价. *生态学报*, 2008, 28(11): 5270-5278.
- [34] 姚士谋. *中国城市群新论*. 北京: 科学出版社, 2016.
- [35] 向秀容, 潘韬, 吴绍洪, 刘卫东, 马丽, 王晓峰, 尹云鹤, 李静. 基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测. *地理研究*, 2016, 35(5): 875-884.
- [36] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析——选取 11 个国家为数据源. *生态学报*, 2015, 35(11): 3766-3777.
- [37] Fang K, Zhang Q F, Yu H J, Wang Y T, Dong L, Shi L. Sustainability of the use of natural capital in a city: Measuring the size and depth of urban ecological and water footprints. *Science of the Total Environment*, 2018, 631-632: 476-484.
- [38] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 401-406.
- [39] 王笑影, 张慧, 朱文泉, 温日红, 李荣平, 马姜明. 基于三维生态足迹模型的桂林市 2000-2018 年生态承载力变化评估. *气象与环境学报*, 2021, 37(6): 62-70.
- [40] 王奎峰, 李娜, 于学峰, 王岳林, 刘洋. 基于 P-S-R 概念模型的生态环境承载力评价指标体系研究——以山东半岛为例. *环境科学学报*, 2014, 34(8): 2133-2139.
- [41] 纪学朋, 白永平, 杜海波, 王军邦, 周亮. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性. *生态学报*, 2017, 37(17): 5861-5870.
- [42] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 白艳莹. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 1-11.
- [43] Wu L L, Sun C G, Fan F L. Estimating the characteristic spatiotemporal variation in habitat quality using the InVEST Model—a case study from Guangdong - Hong Kong - Macao Greater Bay Area. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 1008.