



王守兴,周翼,杨明新,李成先,宁晓春,王雁鹤,谷强,魏代军,刘晓洁. 三江源地区生态承载力时空动态评价及分区研究[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(03): 218-231.

WANG Shouxing, ZHOU Yi, YANG Mingxin, LI Chengxian, NING Xiaochun, WANG Yanhe, GU Qiang, WEI Daijun, LIU Xiaojie. Spatiotemporal dynamic evaluation and regional division research of ecological carrying capacity in the Three Rivers Source region[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(03): 218-231.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.03.20

三江源地区生态承载力时空动态评价及分区研究

王守兴^{1,2} 周翼^{3*} 杨明新^{1,2,4} 李成先¹ 宁晓春¹ 王雁鹤^{1,2} 谷强^{1,2}
魏代军¹ 刘晓洁⁵

- (1. 中国地质调查局 西宁自然资源综合调查中心, 西宁 810021;
2. 三江源水资源与生态系统过程野外观测研究站, 西宁 810021;
3. 湖南师范大学 地理科学学院, 长沙 410081;
4. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055;
5. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 为促进生态脆弱区生态环境可持续发展,本研究以三江源地区为研究对象,采用综合指数法方法,从稳定性、支撑力和承压能力3个维度构建三江源生态承载力评估模型,研究三江源地区2010年和2020年生态承载力,并进行分区管控分析。结果表明:1)对于单一维度而言,从稳定性来看,三江源水域稳定性降低,冰川在范围缩小的同时稳定性略有上升,草地在范围缩小的同时归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)略有提高;从支撑力看,水源涵养量与土壤保持量均有提升,但生境质量略有降低;从承压能力看,三江源地区草地承压能力有所降低。2)总体上,三江源地区生态承载力2020年比2010年降低了3%,三江源生态承载力亟待提高。3)基于三江源地区生态承载力综合评估结果,可将三江源地区划分为4个类型。其中,I型区域生态承载力最差,特别需要重视冰川稳定性问题;II型区域生态承载力较稳定,是分布最广泛的区域;III型区域草地稳定性较高,但生境质量较低;IV型区域是重要的河湖保护区域。因此,不同承载力级区的提升策略应有所不同,未来三江源地区需要进一步加强针对性生态修复和管理策略,特别是要结合各区域的生态特征和承载力状况,实施差异化管理措施。

关键词 综合指数法;生态承载力;空间分区;生态脆弱区;三江源

中图分类号 P942;K903

文章编号 1007-4333(2025)03-0218-14

文献标志码 A

Spatiotemporal dynamic evaluation and regional division research of ecological carrying capacity in the Three Rivers Source region

WANG Shouxing^{1,2}, ZHOU Yi^{3*}, YANG Mingxin^{1,2,4}, LI Chengxian¹, NING Xiaochun¹,
WANG Yanhe^{1,2}, GU Qiang^{1,2}, WEI Daijun¹, LIU Xiaojie⁵

- (1. Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining 810021, China;
2. Water Resources and Ecosystem Processes Field Observatory of the Three-River Head Waters, Xining 810021, China;
3. School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;
4. Key Laboratory of Coupling Processes and Effects of Natural Resource Elements, Beijing 100055, China;
5. Institute of geographic sciences and natural resource research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

收稿日期: 2024-06-17

基金项目: 中国地质调查项目(DD20220959);中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目(KC20220018)

第一作者: 王守兴(ORCID:0009-0002-4187-8867),工程师,主要从事自然资源与生态地质调查研究,E-mail:wangshx717@163.com

通讯作者: 周翼(ORCID:0009-0008-6914-683X),讲师,主要从事土地资源管理研究,E-mail:Zhou_yi@hunnu.edu.cn

Abstract To promote the sustainable development of the ecological environment in the ecologically fragile area, this study took the Three Rivers Source region as the research object. The comprehensive index method was adopted to construct an evaluation model of the ecological carrying capacity of the Three Rivers Source region from the three dimensions of stability, support and pressure. The ecological carrying capacities of the Three Rivers Source region in 2010 and 2020 were determined and regional control analysis was carried out. The results show that: 1) From the single dimension of stability, the stability of the Three River Source water area decreases, the stability of glaciers slightly increases while the range shrinks, and the NDVI of grasslands slightly increases while the range shrinks; From the perspective of support, there is an increase in source conservation and soil conservation, but the habitat quality slightly decreases; From the perspective of bearing capacity, the theoretical carrying capacity of grasslands in the Three Rivers Source area has decreased. 2) Overall, the ecological carrying capacity of the Three Rivers Source decreased by 3% in 2020 compared to 2010, with degradation and rapid degradation areas accounting for about 41%. The ecological carrying capacity of the Three Rivers Source urgently needs to be improved. 3) Based on the comprehensive evaluation results of the ecological carrying capacity of the Three Rivers Source, the ecological carrying capacity can be divided into four different regions. Among them, the Type I region has the worst ecological carrying capacity, and special attention should be paid to the issue of glacier stability; Type II regions have relatively stable ecological carrying capacity and are the most widely distributed regions; Type III regional grasslands have higher stability and lower habitat quality; Type IV areas are important river and lake protection areas. The strategies for improving the carrying capacity of different functional regions are different. Therefore, the improvement strategies should align with different carrying capacity levels. The Three Rivers Source region must focus on targeted restoration and management, and implement measures tailored to each area's ecological characteristics and capacity.

Keywords synthetical index method; ecological carrying capacity; spatial zoning; ecologically fragile areas; Three Rivers Source region

随着全球人口的不断增长以及工业化和城市化的加速发展,资源开发和利用的压力不断增加,使得人类赖以生存的自然生态系统面临日益严重的威胁^[1-2]。目前,环境污染^[3-4]、森林砍伐^[5]、土地退化^[6-7]和气候变化^[8-10]等问题已经引起全球关注。生态承载力是特定生态系统对其内部和外部压力的响应能力^[11-12],用来表征生态系统对人类活动的容纳能力,是人类的经济、社会和生态需求能够和谐共存的关键^[13-15]。生态承载力理论的起源可归结为早期经济学家、人口学家和生态学家的研究。早期的生态承载力主要探讨了人口增长与资源限制之间的关系^[16];19世纪末和20世纪初,一些生态学家和生物学家开始研究其他物种的种群动态,认识到承载力的概念不仅仅适用于人类种群,而且适用于所有生物^[17-18];至20世纪后半叶,承载力理论在可持续资源管理和环境保护的背景下变得更加重要。在全球变化背景下,生态承载力理论越来越多地应用于全球范围内有效应对了全球气候变化、人口过剩和全球自然资源可持续性相关的紧迫挑战^[19-20]。开展生态承载力

的相关研究,不仅有助于防止生态资源的过度开发^[21],保护生物多样性^[22],维持自然生态平衡,还有助于区域可持续发展,促进人类的生存和繁荣与地球的生态平衡相协调^[23]。

生态脆弱区通常指生态系统结构和功能不稳定、对外界干扰敏感、恢复能力较弱的地区,由于面临着更加严峻的环境挑战和生存压力^[24-25],因此,生态脆弱区的生态系统更容易受到自然或人为干扰。尤其是在全球气候变化背景如更频繁、更强烈的极端天气事件、气温上升和降水模式的改变,这将使生态脆弱区域更容易受到气候变化的严重影响,趋向不稳定状态^[26-27]。此外,生态脆弱地区往往与社会经济高度脆弱地区重合,这些地区的经济增长高度依赖自然资源,包括农业、渔业和林业,人口的不断增长与经济的不断发展,进一步加剧了当地生态系统的压力^[28-29]。因此,由于生态、社会经济和气候变化挑战的共同作用,生态脆弱区的生态环境更加容易退化,需要加强对生态脆弱区域的生态承载力的研究^[30-32],这对于评估生态脆弱区生态系统在不造成不可逆转破坏

的情况下所能承受的极限,实现生态脆弱区的可持续发展至关重要^[33]。

目前,国内外学者围绕着青藏高原^[34]、黄土高原^[35]、农牧交错带^[36]等生态脆弱区生态承载力展开了大量的研究,有效促进了当地生态环境的可持续发展。然而,已有研究评价指标体系尚未完全体现生态脆弱区生态特色,主要集中于单时段的评价且存在生态偏向性,无法反映其随时段的连续变化特征,并且对研究区域空间差异性的关注不够,多数研究将研究区域作为一个整体予以分析,而忽视了区域内或区域间发展水平和资源环境约束特征的差异。因此,需要在构建面向生态脆弱区的生态承载力评估体系的基础之上,展开长时间序列生态承载力评估,并在此基础上,分析生态脆弱区内部不同区域生态承载力特征,探索生态承载力优化路径,从而更好地实现生态脆弱区域的可持续发展。

三江源地区作为典型的生态脆弱区,是长江、黄河、澜沧江的源头,被誉为“亚洲水塔”,不仅是我国重要的生态安全屏障,而且是北半球气候敏感启动区、全球生态系统调节稳定器和高寒生物自然物种资源库^[37-38]。随着全球的气候变化加剧^[39]以及社会经济的发展,三江源地区生态压力不断增加,这可能导致三江源生态系统超载,从而威胁区域生态安全^[40]。实际上,由于三江源地区特殊的地理位置和脆弱的生态系统,该地区已经面临着较为严峻的生态承载力问题,如过度放牧所导致的草地退化^[41],并引发土壤侵蚀^[42],气候变化导致三江源地区水源涵养功能降低^[43]与冰川退缩^[44],此外,由于栖息地破坏、盗猎等原因,一些物种的种群数量正在减少,生物多样性不断降低^[45]。因此,进行三江源地区生态承载力评估至关重要。

基于此,本研究拟以三江源地区这一典型生态脆弱区为研究区域,立足于三江源地区典型生态特色,构建面向生态脆弱区的生态承载力评估体系,结合多源地理数据,从不同维度定量评估三江源地区的生态承载力,并分析其时空变化,在此基础上,通过聚类分析的手段对三江源地区的生态承载力特征进行聚类分析,针对不同生态承载力分区提出三江源地区生态承载力可持续发展建议,以期为三江源地区实现可持续发展提供科学建议。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区域

三江源地区位于青藏高原腹地、青海省南部,包含22个县级行政区,总面积36.3万km²。三江源地区是黄河、长江和澜沧江的发源地,每年向下游地区输送洁净水资源逾600亿m³。三江源地区是高原生物多样性最集中的地区,素有“高寒生物种质资源库”之称。研究区植被类型有针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌丛、草甸、草原、沼泽及水生植被、垫状植被和稀疏植被等9个植被型。三江源国家公园内共有野生动物125种,多为青藏高原特有种,且种群数量大。其中兽类47种、鸟类59种、鱼类15种。三江源发育和保持着原始、大面积的高寒生态系统,世界上面积最大的高原湿地生态系统,全球海拔最高的世界自然遗产,广泛分布冰川雪山、高海拔湿地、荒漠戈壁、高寒草原草甸。在2000年,国家批准设立三江源自然保护区,并将自然保护区内的地区划分为核心区、缓冲区与实验区3种不同的管制区;2021年10月,我国正式设立三江源国家公园,并将国家公园划分为核心保护区与一般控制区等不同功能区,详见图1。

1.2 基于三江源地区特色的生态承载力评估指标体系构建

生态承载力的概念与内涵随着社会发展而不断演变。早期研究认为生态承载力是指一个区域或生态系统能够在不破坏其生态功能的前提下,维持一定数量的生物或人类活动的的能力^[46]。近年来,生态承载力的内涵被进一步拓展,加入了更多系统性和综合性的视角,认为生态承载力不仅需要考虑自然资源和环境容量,还要加入社会经济因素,如基础设施^[47]、社会服务^[48]等,与此同时,承载力不是静态的,随着技术进步与气候变化,承载力也将不断演化^[33],强调通过调整管理策略,提高区域的承载力。因此,生态承载力的指标不仅仅涵盖了资源类、环境类、生物类以及社会经济类等指标^[49],还往往将气候变化^[50]以及社会发展^[51]等要素作为生态承载力评估的重要指标。

基于此,本研究立足于三江源地区的主导生态问题,考虑到生态承载力的综合性与动态性,兼顾评估指标的可获得性、可综合性、科学性和针对性,最终基于生态系统结构、功能和压力提炼了稳定

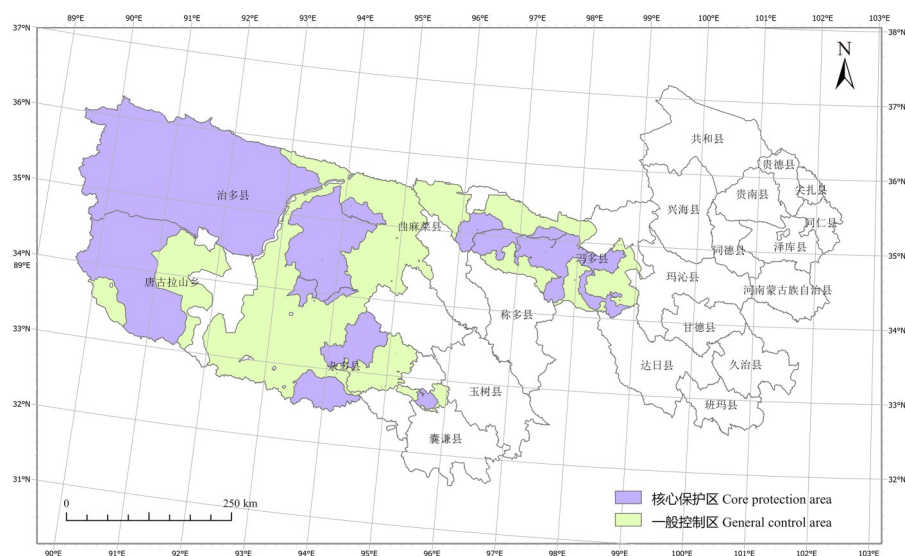


图 1 三江源区位及国家公园区位图

Fig. 1 Location of the Three Rivers Source region and national park protection zoning map

力、支撑力和承压力3个维度,选择水域稳定力指数、冰川稳定力指数、草地植被指数、水源涵养量、土壤保持量、生境质量和草地承压能力等指标进行评价,详见表1。

从生态系统结构来看,三江源地区是高寒生态系统典型代表,包含了草地、湿地、河流、湖泊、雪山、冰川、冻土等高原景观。但近年来,三江源地区气候变化与极端气候事件的增加,使得近年来三江源部分地区洪涝、干旱与地质灾害频发,使得三江源地区的草地质量有所降低,出现冰川不断萎缩、水域面积发生较大变化等问题,因此,维持三江源地区的冰川雪山、高海拔湿地、荒漠戈壁、高寒草原草甸的完整是生态承载力评估的重要内容。

三江源地区不仅是江河发源地和亚洲水塔,还是我国重要的生物多样性保护优先区域,但近年来由于气候变化与栖息地的破坏,当地的水源涵养功能与生物多样性不断降低,土壤流失现象加剧。借鉴王红旗等^[52]提出的生态支撑力概念,本研究在生态功能重要性方面,选取水源涵养能力与生物多样性维持作为该区域生态支撑力的评估指标,具体来说,主要包含了水源涵养量、土壤保持量以及生境质量三项指标。

承压力方面,牧业是当地最主要的人类活动方式,会对草地资源造成压力,威胁三江源地区的草地安全,理论承载力反映了草地所能承载的家畜数量,是承压能力的重要体现。

表1 三江源生态承载力评估指标体系

Table 1 Evaluation index system for the ecological carrying capacity of Three Rivers Source region

不同维度承载力 Carrying capacity in different dimensions	一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	含义 Definition
稳定性 Stability capacity	水域稳定性	水域稳定性指数	水域范围变动幅度,保持水域系统稳定的能力
	冰川稳定性	冰川稳定性指数	冰川范围变动幅度,保持冰川系统稳定的能力
	草地稳定性	草地植被指数	草地范围变动幅度、NDVI变化,保持草地系统稳定的能力
支撑力 Support capacity	水源涵养	水源涵养量	一定时间段内生态系统储存的水量
	土壤保持	土壤保持量	生态系统防止土壤流失的侵蚀调控能力及对泥沙的储积保持能力
	生境质量	生境质量	生境为个体或种群的生存提供适宜条件的能力
承压力 Pressure bearing capacity	生产承压能力	草地承压能力	草地理论载畜量,反映草地可以承载的动物数量

1.3 研究方法

1.3.1 稳定力评估

在一组长时间序列的栅格图像中,某种生态系统的范围不断变化,那么变化的区域即为该系统的不稳定区域,发生的变动的频率越高,意味着该像元所代表的生态系统越不稳定;相反,如果该像元不发生变化或者发生变化的频率较低,则该像元所代表的生态系统越稳定。因此,本研究利用 Google Earth Engine 遥感云平台与 Landsat 8 OLI 遥感数据,计算了三江源地区逐年归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)指数与归一化雪盖(Normalized Difference Snow Index, NDSI)指数,基于 NDWI 与 NDSI 指数提取三江源地区的水域与冰川范围,在此基础上,结合生态稳定力判别方法,分别计算 2010 年与 2020 年三江源地区的水域稳定力与冰川稳定力。对于草地而言,本研究不仅考虑三江源地区的草地范围变化,而且考虑了草地 NDVI 变化,从面积与 NDVI 2 个角度分析草地的稳定力。首先从遥感计算云平台(Google Earth Engine)下载三江源地区的 MCD12Q1 与 MOD13Q1 产品,分别提取三江源地区 2000—2020 年的草地范围与 NDVI 值,在此基础上计算三江源地区的草地稳定力。

1.3.2 支撑力评估

三江源地区生态维持能力主要采用水源涵养量、土壤保持量和生境质量等 3 个生态服务功能来衡量,均采用 InVEST 模型基于像元尺度计算获得。其中,水源涵养量(Y_x)是基于土地利用、土壤类型、坡度和降雨等因素,通过综合指数用来评估特定区域的水源涵养能力。计算公式如下:

$$Y_x = P_x - E_x \quad (1)$$

式中: P_x 为 x 像元的年降水量; E_x 为 x 像元的年实际蒸发量。

土壤保持量(USLE)基于通用土壤流失方程,通过计算斑块的潜在土壤流失量以及泥沙输移情况,将土壤潜在流失与土地利用类型、土壤类型、坡度、降雨量等数据联系起来。计算公式如下:

$$USLE = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

式中: R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

生境质量表征生态系统能够提供物种生存繁

衍条件的潜在能力,本研究采用生境质量指数表征,应用 InVEST 模型通过测度土地利用数据与生物多样性威胁信息来测算。计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \times \exp(-D_{xj}) \quad (3)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 中的栅格 x 的生境质量,指数越大,表示生境质量越好; H_j 为土地利用类型 j 的生境适合性; D_{xj} 为土地利用类型 i 中的栅格 x 所受胁迫水平。

1.3.3 承压能力评估

以草地理论承载力作为表征三江源生态系统承压能力的主要指标。计算公式为:

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (G_{i,j} \times c_{i,j})}{UG \times D} \quad (4)$$

式中:CA为理论载畜量,个/km²(以标准羊计); $G_{i,j}$ 为行政区 i 第 j 类草地的全年干草总量,kg; $c_{i,j}$ 为行政区 i 范围内牲畜对第 j 种草地所产牧草的利用率;UG为每个羊单位每天需要的干草量 1.8 kg/d; D 为一年的天数,数值为 365。

全年标准干草量由下式计算:

$$NPP_{i,j} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(NPP_{i,j} \times A_{i,j})}{1\,000 \times S_{i,j} (1 + SG_{i,j})} \quad (5)$$

式中: $NPP_{i,j}$ 为行政区域 i 范围内第 j 种草地年总NPP; $A_{i,j}$ 为行政区域 i 范围内第 j 种草地总面积,km²; $S_{i,j}$ 为行政区域 i 范围内第 j 种草地的生物量NPP的转换系数; $SG_{i,j}$ 为行政区域 i 范围内第 j 种草地地下部分和地上部分生物量比例系数。

1.3.4 综合生态承载力估算

在计算稳定力、支撑力与承压力的基础之上,本研究进一步运用极差法将各指标数据标准化,运用层次分析法计算各个指标的权重,在分别求出各目标层的承载力的基础之上,按下列公式计算综合生态承载力:

$$ECC = W_n \times C_n + W_m \times C_m + W_r \times C_r \quad (6)$$

式中:ECC为综合生态承载力; W_n 、 W_m 与 W_r 分别为稳定力 C_n 、支撑力 C_m 以及承压能力 C_r 的权重,由层次分析获得。

1.3.5 生态承载力分区

结合层次聚类方法对生态承载力进行分区研究。层次聚类分析是一种无监督学习的聚类方法,用于将数据集分层次地进行分组。其主要分为2种方式:自底向上(凝聚型)和自顶向下(分裂型)。自底向上方法从每个数据点作为一个独立的簇开始,不断合并最相

似的簇,直到所有数据点被合并为一个簇;自顶向下方法则从一个大簇开始,不断将簇分裂成更小的簇,直到每个数据点成为一个独立的簇。这种方法通过构建树状结构(树状图)展示数据点之间的关系,使得可以直观地观察到聚类过程中的层次结构,适用于数据规模较小且需要详细聚类结构的情景。

1.4 数据来源

本研究所使用的数据主要有地理本底数据、遥

感数据与气候数据 3 类,详见表 2。地理本底数据包括 DEM、土壤类型以及行政区划数据;遥感数据主要包括 Landsat 8 OLI 遥感影像,MCD12Q1、MOD13Q1、MOD17A3HGF 等遥感产品,主要用于计算 NDWI、NDSI 等各种指数,提取土地利用类型等。此外,本研究还收集了三江源地区的降水、气温与蒸散发等数据,用于计算土壤保持量与水源涵养量。具体数据及其来源详见表 3。

表 2 三江源生态承载力评估主要数据列表

Table 2 Main data used for ecological carrying capacity assessment of the Three Rivers Source region

数据类别 Data type	数据名称 Data name	空间分辨率 Spatial resolution	时间阶段 Time	说明 Description	来源 Source
地理本底数据 Geographic data	高程 DEM	30 m	2015 年	计算地形因子	https://spdx.org/licenses/CC-BY-4.0.html
	土壤类型 Soil type	1 000 m	2013 年	获取土壤信息	https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/
	行政区划 Administrative districts	矢量数据	2022 年	获取行政区划信息	https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=120
遥感数据 Remote sensing data	Landsat 8 OLI	30 m	2000—2020 年	计算 NDWI、NDSI 等各种指数	https://earthexplorer.usgs.gov/
	MCD12Q1	500 m	2000—2020 年	提取土地利用类型	https://lpdaac.usgs.gov/
	MOD13Q1	250 m	2000—2020 年	NDVI 数	https://lpdaac.usgs.gov/
	MOD17A3HGF	500 m	2010—2020 年	获得草地 NPP	https://lpdaac.usgs.gov/
气候数据 Climate data	降水 Rainfall	1 000 m	2000—2020 年	计算土壤保持量与水源涵养量	https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=96
	温度 Temperature	1 000 m	2000—2020 年	计算土壤保持量与水源涵养量	https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=96
	蒸散发 Evapotranspiration	1 000 m	2000—2020 年	计算土壤保持量与水源涵养量	https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8b11da09-1a40-4014-bd3d-2b86e6dccad4/

2 结果与分析

2.1 三江源生态承载力评估

2.1.1 三江源生态系统稳定性

本研究利用水域稳定性指数对三江源地区多年的水域范围变动幅度进行了分析,结果见图 2。可见与 2010 年相比,2020 年三江源地区水域平均稳定性值由 51% 降低至 49%,意味着三江源地区的

水域范围变动幅度增加,稳定性呈现出降低趋势,与近年来三江源地区气候变化尤其是降雨模式发生了较大变化有关。其中:同仁县与泽库县水域稳定性值最低,这是因为该地区水体规模较小,受气候影响较大,因此,维持自身稳定的能力较差;相反地,共和县与河南蒙古族自治县的水域稳定性则高于三江源地区的其他区县,这与其分布有较大面积的水体有关。

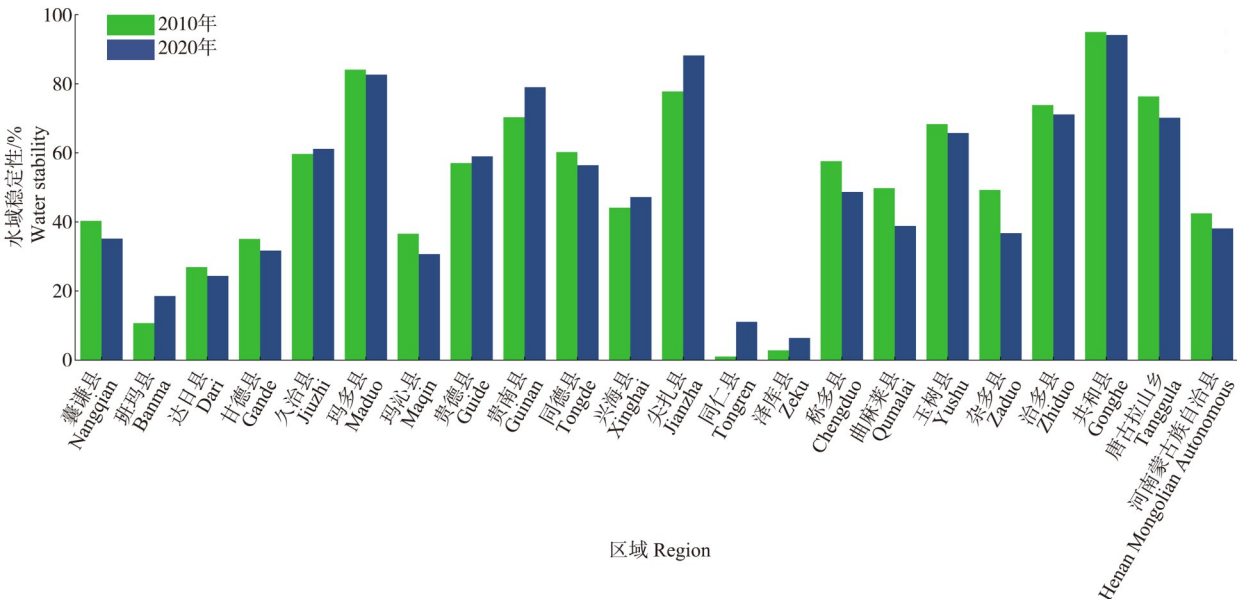


图 2 2010 年与 2020 年三江源地区水域稳定性

Fig. 2 Wate stability of Three Rivers Source region in 2010 and 2020

本研究通过雪盖指数估算三江源地区的冰川稳定性,结果见图3。可见:在2010—2020年,三江源地区的冰川的雪盖指数呈现出降低趋势,这是因为近年来三江源地区气候不断增暖,从而导致冰川范围不断萎缩;然而,三江源地区2010年冰川平均稳定力值为61%,至2020年提升为87%,说明在2010—2020年,三江源地区的水域稳定力有所提

高,可能是因为早期冰川范围所处海拔较低,随着气候增暖,冰川范围不断收缩。因此,早期冰川稳定力较低,然而,随着冰川范围缩小,所处区域海拔不断升高,气候增暖导致的冰川融化情况有所改善,因此,冰川稳定力有所恢复。对于不同地区而言,由于缺少冰川,三江源地区东部的贵德、贵南等县的冰川稳定指数较低。

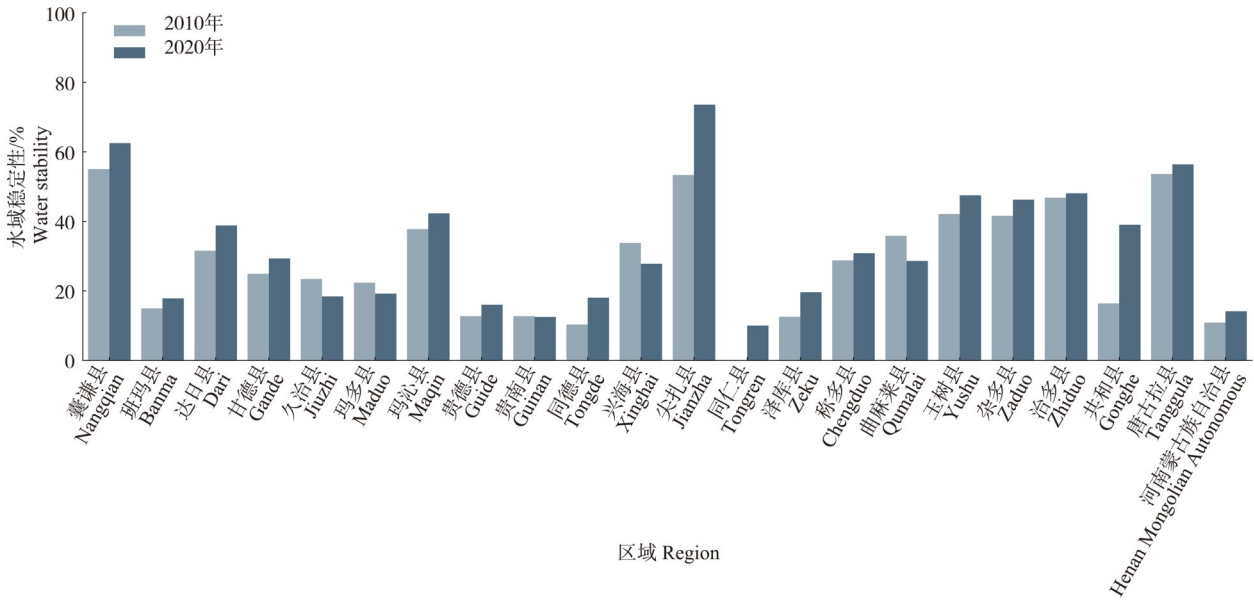


图 3 2010 与 2020 年三江源地区冰川稳定性

Fig. 3 Glacier stability of Three Rivers Source region in 2010 and 2020

结合三江源地区的土地覆被数据与NDVI数据,估算了三江源地区草地稳定性,结果见图4。由图4(a)可见2010—2020年,三江源地区的草地面积整体呈现出减少的趋势。其中:杂多县是草地消失规模最大的区县,这与当地过度放牧有关;共和县则是草地面积增加规模最大的区县。由图4(b)可见:2020年时三江源

地区的平均NDVI指数提升了4%左右;河南蒙古族自治县的平均NDVI指数最高,达到0.42以上,而唐古拉山乡的平均NDVI值最低,仅为0.12左右。近年来三江源地区草地不断“变绿”的原因主要在于三江源气候呈现出“暖湿化”的变化趋势,不断提升的温度与增加的降雨为当地植被生长提供了适宜的环境。

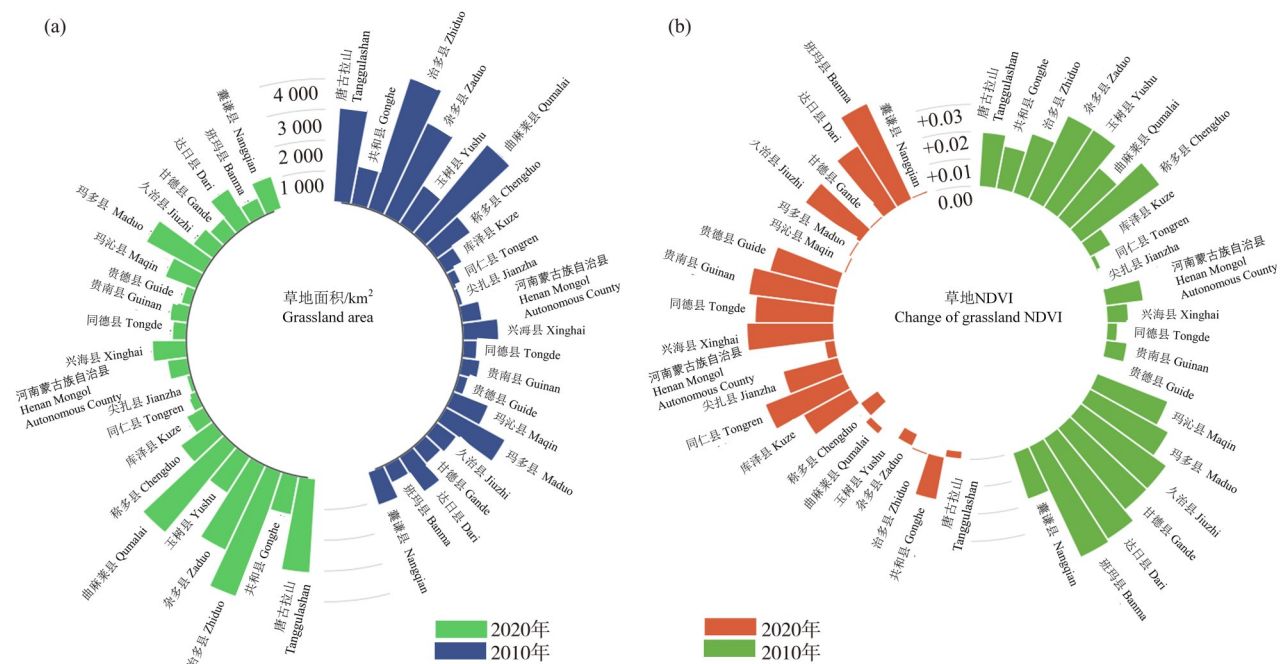


图4 2010年和2020年三江源地区草地面积(a)和NDVI变化(b)

Fig. 4 Changes in grassland area (a) and its NDVI (b) of Three Rivers Source region in 2010 and 2020

2.1.2 三江源生态系统支撑力

如图5所示,三江源生态承载力由土壤保持量、水源涵养量以及生境质量构成。可见受降雨增加与植被变绿的影响,三江源地区的土壤保持量(图5(a))与水源涵养量(图5(b))均有所提升。从水源涵养量来看,与2010年相比,2020年时三江源地区平均每像元的含水量提高了4%左右,这与近年来三江源不断增加的降雨与不断改善的生态。除了地区内部的湖泊、河流等水体的水源涵养量较高外,三江源地区的水源涵养量高值区域主要集中在三江源的南部以及东部地区,这些地区往往植被覆盖度较高,且降雨更加充沛,尤其是囊谦县,相反地,兴海县的水源涵养功能最低。此外,三江源地区的土壤保持量在2020年提高了5%左右(图5(a))。其中,高值区域主要集中在三江源的南部以及东部地区,囊谦县土壤保持量远远超过其他

区县。然而,2020年时三江源地区的生境质量降低了2%(图5(c)),这与近年来三江源地区人类活动不断增强,破坏了动植物栖息地有关。其中,除了水域外,三江源地区的生境质量高值区域主要集中在东部与南部地区,尤其是河南蒙古族自治县生境质量在2010年时最高,而同仁县在2020年时最高,相反地,治多县与曲麻莱县的生境质量无论是在2010年还是2020年都低于其他区县。

2.1.3 三江源生态系统承压力

通过估算三江源地区的理论载畜量表征三江源生态系统承压力,结果见图6。由图6(a)可见从空间分布来看,草地理论承载力分布特征差异十分明显,整体而言呈现出东高西低与南高北低的特征,而且无论在2010年还是2020年,三江源地区草地承载力的高值区域都主要集中在东南部,这主要是因为东南部气候更加温暖且降雨较多。由图6

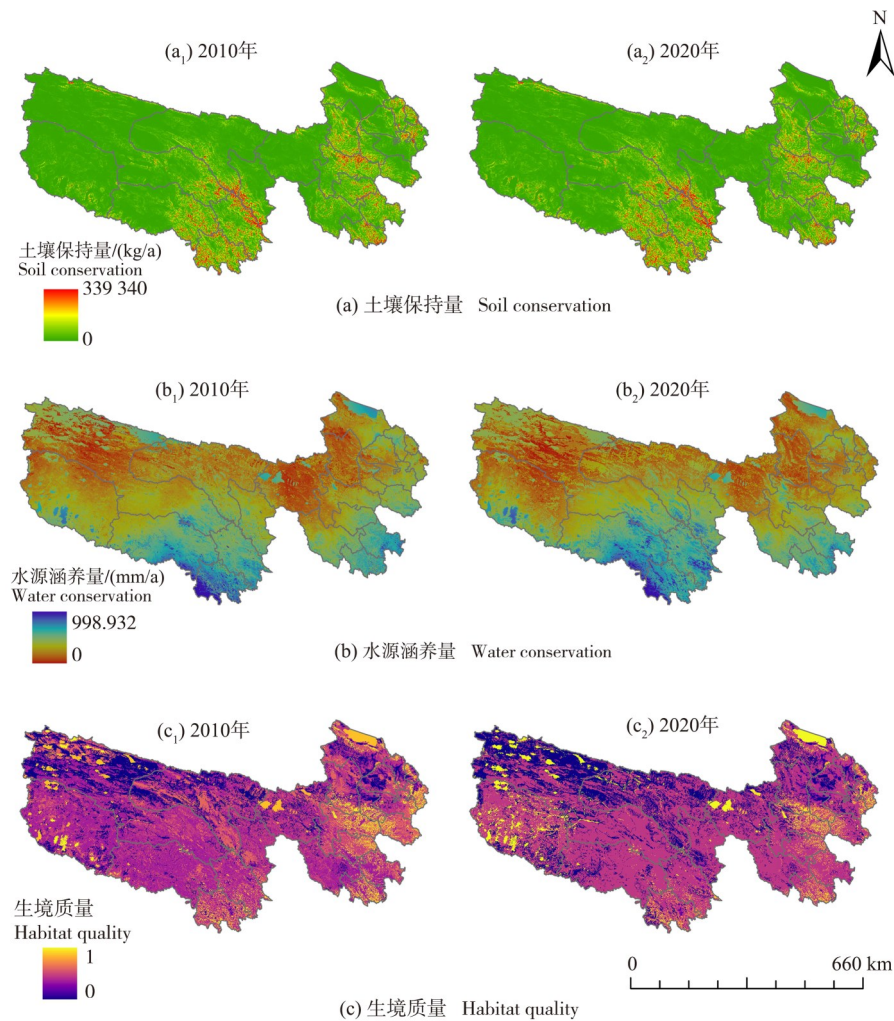


图5 2010年和2020年三江源地区土壤保持量(a)、水源涵养量(b)和生境质量变化(c)

Fig. 5 Soil conservation (a), water conservation (b) and habitat quality (c) of Three Rivers Source region in 2010 and 2020

(b)可见三江源地区的草地理论承载力有所降低,在2010年时三江源地区草地理论承载力为46个/km²(以标准羊计),而在2020年时三江源地区草地理论承载力为42个/km²,整体而言,三江源地区的草地承载力降低了8%左右,与三江源地区不断萎缩的草地面积有关。具体而言,河南蒙古族自治县的草地理论承载力最高,但是在2020年时降低幅度也最大;其次,久治县、同仁县等地区的草地理论承载力也较高。相反地,唐古拉山乡、治多县以及曲麻莱县的草地理论承载力最低,与当地草地面积较少有关。

2.2 三江源生态承载力综合评估

尽管部分生态承载力指标有所改善,但是整体而言,三江源地区的生态承载力有所降低。具体来看,与2010年相比,2020年三江源生态承载力降低

了3%。从空间分布特征来看,三江源地区的生态承载力呈现出东高西低、南高北低的整体格局,其中西北部的生态承载力最弱(图7),主要是因为西北部是三江源地区生态环境最为脆弱的地区,这里不仅具有较低的生态稳定力而且生态支撑力与生态承压能力都比较弱。尤其是,治多县、曲麻莱县等区域的生态承载最弱,而囊谦县得益于更好的气候条件,整个区域表现出较强的生态承载力。若将不同时刻生态承载力变化按变化幅度<-0.5, -0.5≤变化幅度<0,变化幅度=0,0<变化幅度≤0.5,变化幅度>0.5,将生态承载力变化划分为快速退化、退化、稳定、提升、快速提升5个等级后发现,虽然三江源地区的生态承载力整体呈现出降低的趋势,但从面积上看,呈现出提升与快速提升趋势的生态系统面积占比达到55%左右,而退化与快

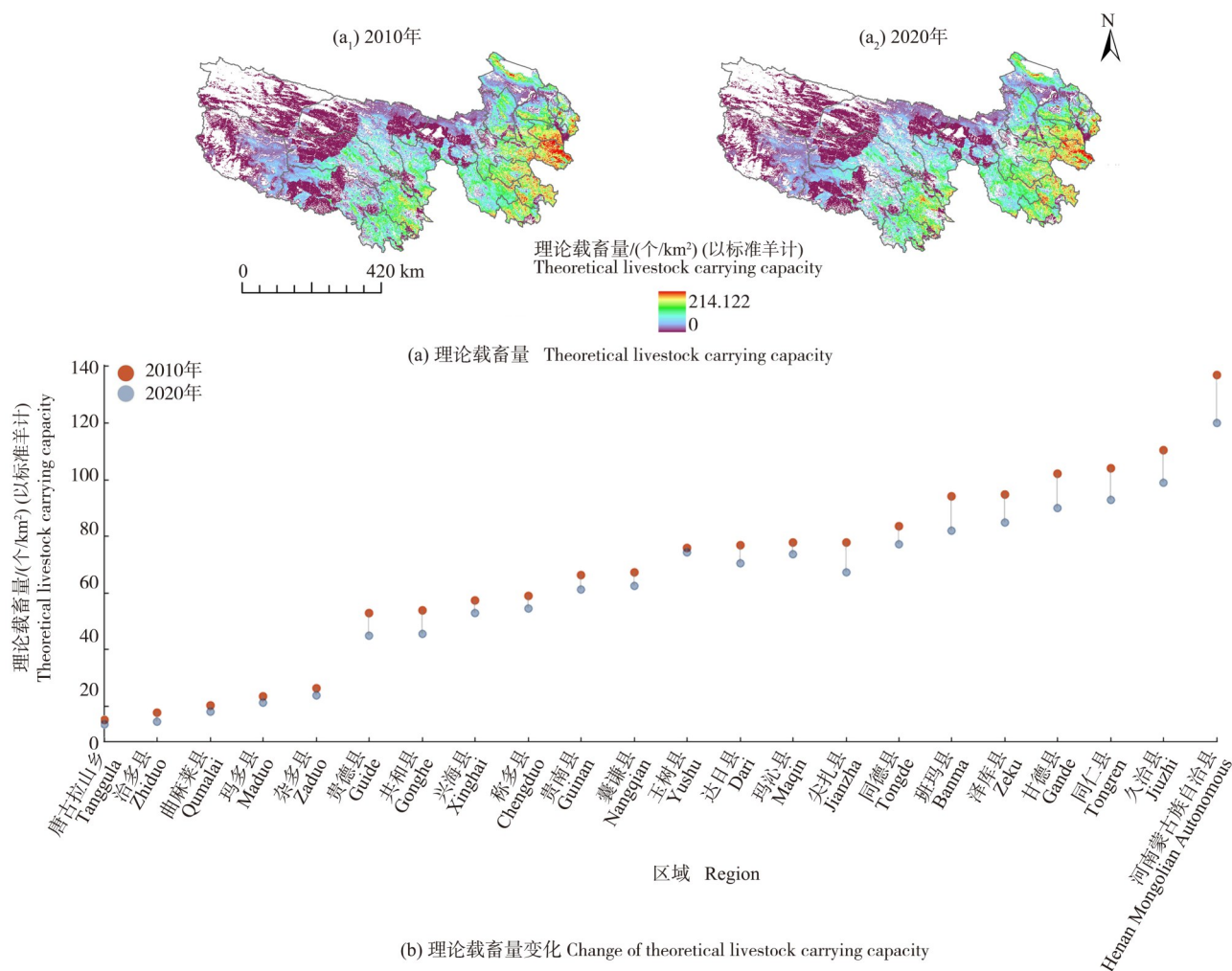


图6 2010、2020年三江源地区理论载畜量(a)及变化(b)

Fig. 7 Theoretical livestock carrying capacity (a) and its changes (b) of Three Rivers Source region in 2010 and 2020

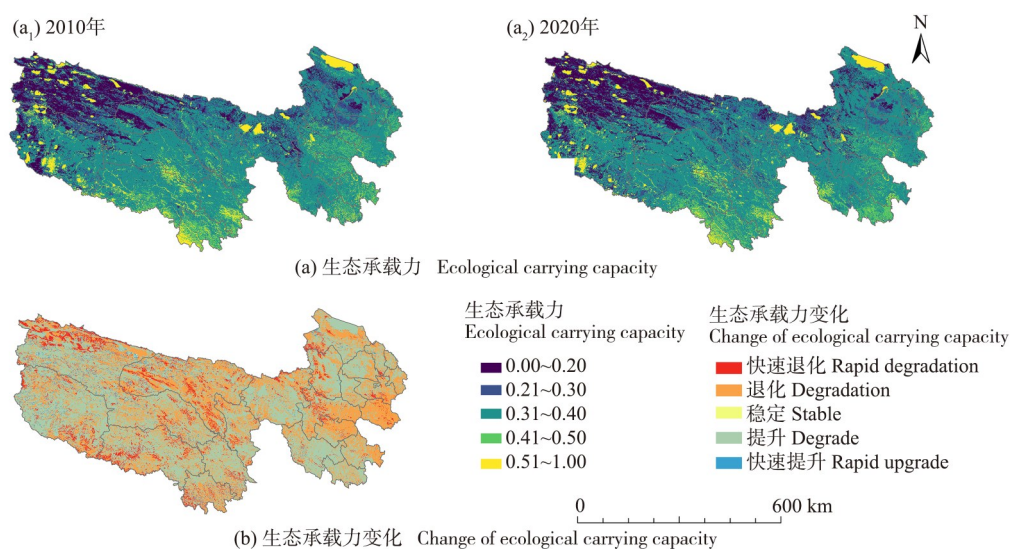


图7 2010和2020年三江源地区生态承载力(a)及变化(b)

Fig. 8 Ecological carrying capacity (a) and its changes (b) of Three Rivers Source region in 2010 and 2020

速退化区域的面积占比达到41%左右,说明超过一半的区域生态承载力都有所改善,但是改善的幅度小于退化的幅度,导致整体生态承载力有所降低。

2.3 三江源生态承载力分区

为了实现三江源地区的生态承载力可持续化发展,文章在综合评估三江源地区生态承载力的基础之上,采取层次聚类方法对三江源地区的生态承载力进行了综合分区,根据三江源的生态承载力差异可以将三江源地区划分为下列4种类型:

(1)Ⅰ型区域。主要分布在三江源的西部地区,约占研究区总面积的19%,除了冰川稳定力外,生态承载力评价各指标均低于其他区域,这说明该区域生态承载力最差,需要尤为注意高原特有的冰川消融问题。

(2)Ⅱ型区域广泛分布于三江源全区,约占研究区总面积63%,主要表现为具有较高的草地稳定力与生境质量等特征,同时,该区域的草地理论承载力与水源涵养量也较高。

(3)Ⅲ型区域主要分布在三江源地区的北部与中部,占三江源地区总面积的14%的左右,该区域草地具有较高的稳定力,但是生境质量较低。

(4)Ⅳ型区域主要分布在三江源地区的湖泊与河流范围内,占三江源地区总面积的4%左右,该区域水域稳定力与生境质量较高,水源涵养量也较大,体现了其重要的生态地位。

三江源地区不同的生态承载力特征使得在实现三江源地区可持续发展时需要因地制宜,坚持分区保护的方针。对于Ⅰ型区域需要在遏制生态环境进一步恶化的基础之上,确保冰川系统的稳定力。Ⅱ型区域重点是维持当前的生态现状,防止草地退化。Ⅲ型区域需要在提升该区域的生境质量的基础之上,防止草地退化。Ⅳ型区域最重要的可持续发展措施是维护其水域系统的稳定力以及其丰富的水源涵养功能。

3 讨论与结论

本研究显示2010年与2020年相比,三江源地区的水域稳定力略有下降,与全球许多其他水文研究的发现相一致。全球范围内,水体稳定性受到气候变化、冰川消退和人类活动的共同影响,如南极和阿尔卑斯山等冰川地区的水域稳定性也出现了类似下降的趋势^[53]。此外,本研究虽然发现冰川稳

定性有所增加,但冰川的雪盖指数却在降低,结果与全球冰川融化以及青藏高原地区冰川变化的总体趋势也是一致的^[54-55]。值得重视的是,近年来诸多研究表明,由于生态修复工程以及气温升高、降雨增多等气候条件变化,青藏高原地区正在逐渐变绿,生态系统逐渐向好^[56-57]。然而,本研究发现草地NDVI值虽然有所提升,而三江源地区的草地范围在不断萎缩,且生态承载力有所降低,表明虽然草地的植被覆盖率增加,但整体面积的减少以及社会经济发展所带来的生态压力仍然是一个值得关注的问题。未来需要进一步结合三江源生态承载力分区特征,采取具有针对性的措施增强三江源地区生态承载力。虽然本研究在一定程度上有利于更全面地掌握三江源生态承载力变化特征,但是受限于数据的可获得性,本研究并未对三江源地区所有的生态系统承载力进行评估,未来需要进一步收集数据,对三江源地区的生态承载力进行全面综合的评估。

本研究以三江源生态系统为研究对象,在构建符合区域特色的生态承载力评估理论基础之上,结合三江源地区极重要的生态地位与极脆弱的生态环境,从稳定力、支撑力与承压能力3个方面,探究了三江源地区生态承载力时空变化与分区特征。主要结论如下:

1)2010—2020年,三江源主要生态系统呈现出不同的变化特征。其中:水域稳定力上升,冰川稳定力降低,草地范围缩小但NDVI有所提升;水源涵养量与土壤保持量均有提升,但生境质量与承压能力略有降低,最终使得三江源地区生态承载力有所降低。

2)基于三江源生态承载力特征可将三江源地区划分为4种类型区域。其中:Ⅰ型区域生态承载力最差,需重视冰川稳定力问题;Ⅱ型区域生态承载力较稳定,是分布最广泛的区域;Ⅲ型区域草地稳定力较高,但生境质量较低;Ⅳ型区域是重要的河湖保护区域。

参考文献 References

- [1] 王礼茂,郎一环.中国资源安全研究的进展及问题[J].地理科学进展,2002,21(4):333-340
Wang L M, Lang Y H. Progress and problems of resources security studies in China [J]. *Progress in Geography*, 2002 (4): 333-340 (in Chinese)

- [2] 夏军, 刘春葵, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12
Xia J, Liu C Z, Ren G Y. Opportunity and challenge of climate change impact on the water resource of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 1-12 (in Chinese)
- [3] 谢晓苇, 李代超, 卢嘉奇, 吴升, 许芳年. 基于移动监测数据的不同城市市场景下PM_{2.5}浓度精细模拟与时空特征解析[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(8): 1459-1474
Xie X W, Li D C, Lu J Q, Wu S, Xu F N. Fine simulation and analysis of temporal and spatial characteristics of PM_{2.5} concentration distribution in different urban scenarios based on mobile monitoring data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(8): 1459-1474 (in Chinese)
- [4] Sicard P, Agathokleous E, Anenberg S C, De Marco A, Paoletti E, Calatayud V. Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858(Pt 2): 160064
- [5] 徐欢, 李美丽, 梁海斌, 李宗善, 伍星. 退化森林生态系统评价指标体系研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 9034-9042
Xu H, Li M L, Liang H B, Li Z S, Wu X. Review of the evaluation index system for degraded forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 9034-9042 (in Chinese)
- [6] Shao W Y, Zhang Z P, Guan Q Y, Yan Y, Zhang J. Comprehensive assessment of land degradation in the arid and semiarid area based on the optimal land degradation index model[J]. *CATENA*, 2024, 234: 107563
- [7] 屈冉, 李双, 徐新良, 王昌佐, 通拉嘎. 草地退化杂类草入侵遥感监测方法研究进展[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5): 761-767
Qu R, Li S, Xu X L, Wang C Z, Tong L G. Progress on methods of grassland degradation and weed invasion monitoring based on remote sensing[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(5): 761-767 (in Chinese)
- [8] 许艳, 路文海, 曾容, 刘倡. “基于海洋解决方案倡议”在应对气候变化领域的应用思考[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(1): 121-128
Xu Y, Lu W H, Zeng R, Liu C. Reflections on the application of “The Ocean Solutions Initiative” for climate change [J]. *Climate Change Research*, 2024, 20(1): 121-128 (in Chinese)
- [9] Bograd S J, Jacox M G, Hazen E L, Lovecchio E, Montes I, Pozo Buil M, Shannon L J, Sydeman W J, Rykaczewski R R. Climate change impacts on eastern boundary upwelling systems[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2023, 15: 303-328
- [10] Eckardt N A, Ainsworth E A, Bahuguna R N, Broadley M R, Busch W, Carpita N C, Castrillo G, Chory J, DeHaan L R, Duarte C M, Henry A, Krishna Jagadish S V, Langdale J A, Leakey A D B, Liao J C, Lu K J, McCann M C, McKay J K, Odeny D A, de Oliveira E J, Platten J D, Rabbi I, Rim E Y, Ronald P C, Salt D E, Shigenaga A M, Wang E T, Wolfe M, Zhang X W. Climate change challenges, plant science solutions [J]. *The Plant Cell*, 2023, 35(1): 24-66
- [11] 王家骥, 姚小红, 李京荣, 常虹, 王渊高. 黑河流域生态承载力估测[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2): 44-48
Wang J J, Yao X H, Li J R, Chang H, Wang Y G. Assessment for ecological carrying capacity of Heihe River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13(2): 44-48 (in Chinese)
- [12] Wu X L, Hu F. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106243
- [13] 席梅竹, 赵中秋, 赵颖丽. 基于PLUS模型的2030年滦河流域山区段生态承载力时空格局多情景预测[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 518-529
Xi M Z, Zhao Z Q, Zhao Y L. Multi-scenario prediction of the spatial and temporal patterns of ecological carrying capacity in the mountain section of Hutuo River basin in 2030 based on the PLUS model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(3): 518-529 (in Chinese)
- [14] 段海煦, 曾维华, 陈家军. 基于可视化分析的“生态、环境、资源”承载力研究[J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 5031-5040
Duan H X, Zeng W H, Chen J J. Study on the carrying capacity of “ecology, environment and resources” based on visualization analysis[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(9): 5031-5040 (in Chinese)
- [15] 叶圣. 长江经济带资源环境承载力与社会发展质量耦合协调及影响机制研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2023
Ye S. Coupling coordination and influence mechanism among resource and environmental carrying capacity and social development quality in the Yangtze River Economic Belt [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2023 (in Chinese)
- [16] Malthus T R. *An Essay on the Principle of Population as It Affects the Future Improvement of Society*[M]. London: J. Johnson. 1809
- [17] Pearl R. The growth of populations [J]. *The Quarterly Review of Biology*, 1927, 2(4): 532-548
- [18] Lotka A J. Contribution to the energetics of evolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1922, 8(6): 147-151
- [19] Wu X L, Hu F. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106243
- [20] Peng B H, Li Y, Elahi E, Wei G. Dynamic evolution of ecological carrying capacity based on the ecological footprint theory: A case study of Jiangsu Province[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 19-26
- [21] Ding L, Chen K L, Cheng S G, Wang X. Water ecological carrying capacity of urban lakes in the context of rapid urbanization: A case study of east lake in Wuhan[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 89: 104-113
- [22] 荣月静, 郭新亚, 杜世勋, 李霞, 宁婷, 张梦莹. 基于生态系统服务功能及生态敏感性与PSR模型的生态承载力空间分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 323-329
Rong Y J, Guo X Y, Du S X, Li X, Ning T, Zhang M Y. Study of ecological carrying capacity using PSR model based on ecosystem services and ecological sensitivity, and PSR model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 323-329 (in Chinese)
- [23] Bu J H, Li C H, Wang X, Zhang Y, Yang Z W. Assessment and prediction of the water ecological carrying capacity in Changzhou City, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123988
- [24] 冷疏影, 刘燕华. 中国脆弱生态区可持续发展指标体系框架设计[J]. 中国人口·资源与环境, 1999, 9(2): 40-45
Leng S Y, Liu Y H. A conceptual framework of sustainable developmental indicators of the fragile environment of China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 1999, 9(2): 40-45 (in Chinese)
- [25] 马晓琳, 郭莎莎, 徐扬, 魏子谦, 高子婷, 于力, 侯建丽. 生态脆弱区生态安全格局构建研究[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9500-9513
Ma X L, Guo S S, Xu Y, Wei Z Q, Gao Z T, Yu L, Hou J L. Research on ecological security pattern construction in vulnerable ecological region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(22): 9500-9513 (in Chinese)
- [26] 孙康慧, 曾晓东, 李芳. 1980—2014年中国生态脆弱区气候变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(4): 455-468

- Sun K H, Zeng, X D, Li F. 2019. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980-2014 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019, 24(4): 455-468(in Chinese)
- [27] Hu J J, Huang Y, Du J. The impact of urban development intensity on ecological carrying capacity: A case study of ecologically fragile areas[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(13): 7094
- [28] 刘胜强,赵雪雁. 生态脆弱区农户返贫脆弱性评估及其影响因素:以陇南山区为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(3):1009-1023
- Liu S Q, Zhao X Y. Vulnerability assessment of farmers returning to poverty in ecologically fragile areas and its influencing factors: A case study of Longnan mountain area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(3):1009-1023 (in Chinese)
- [29] 王睿,洪菊花,骆华松,杜忠,魏芸云. 典型生态脆弱区生态环境与贫困耦合分析:以四川省藏区为例[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3):125-132
- Wang R, Hong J H, Luo H S, Du Z, Wei Y Y. Coupling analysis of ecological environment and poverty in typical ecological fragile areas: A case study in Tibetan areas in Sichuan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(3):125-132 (in Chinese)
- [30] 杜文鹏,闫慧敏,封志明,杨艳昭,陈如霞. 基于生态供给-消耗平衡关系的中尼廊道地区生态承载力研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(18):6445-6458
- Du W P, Yan H M, Feng Z M, Yang Y Z, Chen R X. Ecological carrying capacity in the China-Nepal corridor based on supply-consumption relationship [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6445-6458 (in Chinese)
- [31] 赵东升,张雪梅,邓思琪,于贵瑞. 区域资源环境承载力的评价理论及方法讨论[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 591-602
- Zhao D S, Zhang X M, Deng S Q, Yu G R. Evaluation theory and method of regional resources and environmental carrying capacity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3):591-602 (in Chinese)
- [32] 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[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 577-590
- Yu G R, Zhang X M, Zhao D S, Deng S Q. Discussion on the scientific concepts of regional resources and environmental carrying capacity and its ecological basis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 577-590 (in Chinese)
- [33] 于贵瑞,徐兴良,王秋凤. 全球变化对生态脆弱区资源环境承载力影响的研究进展[J]. *中国基础科学*, 2020, 22(5): 16-20
- Yu G R, Xu X L, Wang Q F. Progress of the effects of global changes on the resource and environmental carrying capacity of the ecologically fragile areas[J]. *China Basic Science*, 2020, 22(5): 16-20 (in Chinese)
- [34] Fang Y P, Zhu F B, Yi S H, Qiu X P, Ding Y J. Ecological carrying capacity of alpine grassland in the Qinghai - Tibet Plateau based on the structural dynamics method [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(8): 12550-12578
- [35] Liang W, Fu B J, Wang S, Zhang W B, Jin Z, Feng X M, Yan J W, Liu Y, Zhou S. Quantification of the ecosystem carrying capacity on China's Loess Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 192-202
- [36] Huang D, Wang K, Wu L. Problems and strategies for sustainable development of farming and animal husbandry in the Agro-Pastoral Transition Zone in Northern China (APTZNC)[J]. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2007, 14(4): 391-399
- [37] 桑春云,王倩,郭建茂,李建华,李文峰,王勇. 三江源牧草气候生产力变化及对气象干旱的响应[J]. *中国农业气象*, 2024, 45(1): 12-22
- Sang C Y, Wang Q, Guo J M, Li J H, Li W F, Wang Y. Change in forage grass climate productivity and response to meteorological drought in Sanjiangyuan[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(1): 12-22(in Chinese)
- [38] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, Chen Y Z, Gang C C, An R, Li J L. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 563: 210-220
- [39] 赵晓娜,陈琼,支泽民. 三江源国家公园人兽冲突风险评价[J]. *野生动物学报*, 2024, 45(1):148-156
- Zhao X N, Chen Q, Zhi Z M. Risk assessment of human-animal conflict in Sanjiangyuan National Park[J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2024, 45(1):148-156 (in Chinese)
- [40] Bondaruk V, Lezama F, del Pina A, Pineiro G. Overseeding legumes in natural grasslands: Impacts on root biomass and soil organic matter of commercial farms [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 743: 140771
- [41] 张重,龚健,李靖业,张子煜,张木茜. 基于信息量模型的三江源东部草地退化易发性评价:以青海省果洛州为例[J]. *资源科学*, 2022, 44(3):464-479
- Zhang Z, Gong J, Li J Y, Zhang Z Y, Zhang M Q. Grassland degradation susceptibility assessment of the eastern area of the three rivers source region based on the information quantity model: A case study of Golog Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province [J]. *Resources Science*, 2022, 44(3):464-479 (in Chinese)
- [42] 黄婷婷,赵辉,赵院,任婧宇,李子轩,李斌斌. 三江源国家公园土壤侵蚀及其分布特征[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(5):95-103,110
- Huang T T, Zhao H, Zhao Y, Ren J Y, Li Z X, Li B B. Soil erosion and its spatial distribution characteristics in Three-River-Source National Park [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(5):95-103, 110 (in Chinese)
- [43] 张法伟,李红琴,罗方林,王春雨,王军邦,马文婧,杨永胜,李英年. 基于增强回归树模型的三江源国家公园表层土壤储水及水源涵养功能的评估[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(12):2471-2478
- Zhang F W, Li H Q, Luo F L, Wang C Y, Wang J B, Ma W J, Yang Y S, Li Y N. Evaluations on topsoil water storage and water conservation capacity of the Sanjiangyuan National Park based on boosted regression trees [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(12): 2471-2478 (in Chinese)
- [44] 马维谦. 2000-2018年三江源冰川及其服务价值变化[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021
- Ma W Q. Three Rivers Source glacier and its service value change from 2000 to 2018[D]. Lanzhou: Lanzhou Northwest Normal University, 2021 (in Chinese)
- [45] 张同作,江峰,张婧捷,蔡振媛,高红梅,顾海峰,宋鹏飞. 三江源国家公园野生动物保护与管理对策[J]. *兽类学报*, 2023, 43(2): 193-205
- Zhang T Z, Jiang F, Zhang J J, Cai Z Y, Gao H M, Gu H F, Song P F. A review of wildlife conservation and management strategies of Sanjiangyuan National Park [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2023, 43(2): 193-205 (in Chinese)
- [46] 尹美善,王叁,李红利,朱立傲. 基于CiteSpace的国内外生态承载力研究热点分析[J]. *建筑与文化*, 2023, (7): 124-126
- Yin M S, Wang S, Li H L, Zhu L A. Analysis of research hotspots of ecological carrying capacity at home and abroad based on CiteSpace [J]. *Architecture & Culture*, 2023, (7): 124-126 (in Chinese)
- [47] 刘亚静,周晓君. 基于评估模型的典型市政基础设施承载力评价[J]. *地理空间信息*, 2023, 21(11): 68-72
- Liu Y J, Zhou X J. Evaluation of typical municipal infrastructure bearing

- capacity based on evaluation model[J]. *Geospatial Information*, 2023, 21(11): 68-72 (in Chinese)
- [48] 丁玉贤, 张焱, 周洪富. 城市综合承载力时空演进动态研究: 以呼包鄂为例[J]. 内蒙古科技大学学报, 2021, 40(4): 313-319
- Ding Y X, Zhang Y, Zhou H F. Study on spatial-temporal dynamic evolution of urban comprehensive carrying capacity: A case study of Hohhot-Baotou-Erdos [J]. *Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology*, 2021, 40(4): 313-319 (in Chinese)
- [49] Chapman E J, Byron C J. The flexible application of carrying capacity in ecology[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2018, 13: e00365
- [50] Anamaghi S, Behboudian M, Mahjouri N, Kerachian R. A resilience-based framework for evaluating the carrying capacity of water and environmental resources under the climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: 165986
- [51] Xue Q, Song W, Zhang Y L, Mou F Y. Research progress in ecological carrying capacity: Implications, assessment methods and current focus[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(5): 514-525
- [52] 顾琦玮, 王红旗, 刘晓宇, 田雅楠, 郑焱楠. 生态支撑力概念模型的构建及应用[J]. 环境科学研究, 2017, 30(2): 249-256
- Gu Q W, Wang H Q, Liu X Y, Tian Y N, Zheng Y N. Construction and application of ecological supporting capacity conceptual model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(2): 249-256 (in Chinese)
- [53] Zemp M, Huss M, Thibert E, Eckert N, McNabb R, Barandun M, Machguth H, Nussbaumer. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise[J]. *Nature*, 592(7854), 2021, 524-528
- [54] Li Z F, Zhu H A, Jorge G, Gu S Y, Heino J, Xiong X, Yang J L, Zhao X F, Jia Y T, Xie Z C, Zhang J Q. Historical and dispersal processes drive community assembly of multiple aquatic taxa in glacierized catchments in the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Environmental Research*, 2024, 251: 118746
- [55] David R, Regine H, Fabien M, Romain H, William K, Matthias H, Etienne B, Douglas B, Loris C, Daniel F, Brain M, Robert W M. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters [J]. *Science*, 2023, 379(6627): 78-83
- [56] Wang S, Wei Y. Qinghai-Tibetan plateau greening and human well-being improving: the role of ecological policies[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1652
- [57] Shi S Y, Wang P, Zhan X Y, Han J Q, Guo M H, Wang F. Warming and increasing precipitation induced greening on the northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2023, 233: 107483
- 责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 王守兴, 工程师。主要从事生态修复、生态承载力评价等方面的研究。主持中国地质调查局地质调查项目一项, 参与完成多项中国地质调查局地质调查项目。在《地理科学进展》、《生态学报》、*Global Ecology and Conservation* 等期刊上发表多篇论文。



通讯作者简介: 周翼, 博士, 讲师。主要从事国土空间生态修复研究。主持多项湖南省教育厅、自然资源部洞庭湖流域生态保护修复工程技术创新中心项目, 参与完成国家重点研发计划课题及国家自然科学基金等4项项目, 在 *Sustainable Cities and Society*、*Building and Environment*、《长江流域资源与环境》等期刊上发表多篇论文。