

地震对三江源国家公园生态环境的影响机制与损失评估

殷成龙¹, 周强², 刘峰贵², 陈睿山^{1,3}, 孟飞⁴

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008;

3. 上海交通大学设计学院, 上海 200240; 4. 山东建筑大学测绘地理信息学院, 济南 250101)

摘要: 国家公园是中国生态文明建设的重要内容, 是推进自然生态和生物多样性保护的切实行动。然而, 自然灾害是影响国家公园建设和可持续发展的重要因素。三江源地区是中国重要的生态屏障, 生态环境极为脆弱、敏感, 自我调节和修复能力差, 一旦破坏, 极难恢复。三江源地区地震及其次生灾害频发, 对生态环境影响深远。为系统评估地震对三江源国家公园生态环境的影响, 在近年来青藏高原多次地震灾害评估的基础上, 构建了地震灾害对三江源国家公园生态环境直接和间接影响的评估框架。基于此框架, 以2021年青海玛多地震为例, 通过实地调查、基于遥感和GIS等方法, 综合评估了地震对三江源国家公园生态系统与生态基础设施的影响以及生态系统服务价值损失, 并在此基础上提出了构建地震对国家公园生态环境影响评估平台的建设思路。结果表明: 地震严重损害了三江源国家公园的生态管护设施和冰川、冻土、植被、地表、水系等生态系统要素的结构稳定性, 导致区域生态系统的功能受到破坏; 地震发生当年导致的生态系统服务价值损失达1492.67亿元, 远超116.95亿元的直接经济损失。本文提出的评估框架及平台构建思路, 可为评估未来地震对三江源乃至整个青藏高原地区国家公园的生态环境影响提供参考。

关键词: 三江源; 国家公园; 地震; 生态环境; 影响机制; 损失评估

三江源地区地处青藏高原腹地, 是高原生物多样性最集中和全球气候变化最敏感的地区, 丰富的自然资源和重要的生态功能使其成为中国重要的生态安全屏障^[1]。然而, 三江源地区生态环境极为脆弱、敏感, 自我调节和修复能力差, 一旦破坏, 极难恢复。三江源国家公园是中国第一个国家公园体制试点, 以生态文明和自然资源保护为建设目的, 是实现三江源地区生态恢复的最佳路径和自然保护地体系的重要组成部分^[2]。

由于印度洋板块对亚欧板块的碰撞挤压, 导致青藏高原的三江源及其周边地区构造运动剧烈, 是中国地震活动最频繁的地区^[3-6]。频繁发生的地震尤其是强震, 会对三江源国家公园的生态环境造成一系列复杂而深远的影响。然而, 综合评估地震对三江源地区尤其是三江源国家公园生态环境影响的工作较少, 也缺乏相关的规范和标准, 且目前尚未有聚焦于三江源国家公园灾害影响的系统性研究。有关三江源地区和三江源国家公园生态环境的研究, 主要分为以下三类: 一是从自然角度出发, 多从生物量估算、生态脆

收稿日期: 2022-09-05; 修订日期: 2023-02-07

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0906); 国家重点研发计划课题 (2017YFC1503001)

作者简介: 殷成龙 (1995-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 研究方向为土地变化与自然灾害风险。

E-mail: yinchenglong95@163.com

通讯作者: 陈睿山 (1982-), 男, 甘肃武威人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为综合自然地理学、土地利用及人类环境耦合、资源环境与可持续发展。E-mail: chenrsh04@gmail.com

弱性评估、气候变化特征及其影响评估、生态产品价值的变化与核算、植被覆盖变化、冰川变化与水源涵养功能评估等^[7-13]；二是从生态建设与服务功能的角度入手，进行三江源国家公园环境保护指标体系的构建与生态系统游憩服务功能的探讨^[14,15]；除此以外，亦有从生态保护过程中所产生的矛盾作为切入点的研究^[16,17]。在三江源国家公园与青藏高原国家公园群建设的背景下，建立一套标准规范，从而快速、定量、综合评估未来地震对三江源国家公园生态环境的影响具有重要价值，既有助于灾害发生时的损失评估，又可为灾后的恢复与重建提供基础。

鉴于此，本文基于近年来青藏高原多次地震灾害评估工作，建立了评估框架分析地震对三江源国家公园生态环境的影响，并以三江源地区2021年发生的青海玛多地震为例，通过现场实地调查、遥感和GIS的空天地一体化技术来综合分析地震对三江源国家公园生态环境的影响。引入青藏高原生态资产价值评估方法，定量评估了地震导致的三江源国家公园生态系统服务价值损失。并在此基础上提出构建国家公园生态环境地震影响评估平台的思路，以期为评估未来地震对三江源及整个青藏高原地区国家公园生态环境的影响及灾后恢复重建提供科学借鉴与技术支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

三江源地处青海省南部，总面积39.5万km²（89°45′~102°23′E，31°39′~36°12′N），是长江、黄河、澜沧江的发源地，素有“中华水塔”“亚洲水塔”之称，在供水与调节生态服务、生物多样性保护等方面发挥着举足轻重的作用^[18,19]。三江源位于中国最大的地震区——青藏高原地震区内，是地震活动最强烈、大地震频繁发生的地区之一。据统计，进入21世纪以后，三江源及其周边共发生5级以上地震64次。其中，6级以上地震10次，7级以上4次，8级以上1次（截至2022年12月）。21世纪以来三江源地区及其周边的典型地震分布情况如图1所示。

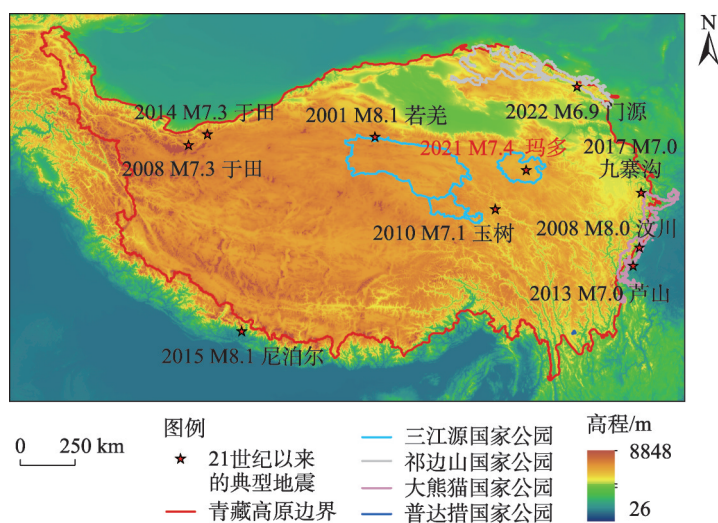


图1 三江源地区及其周边典型地震分布情况

Fig. 1 Distribution of typical earthquakes in the Sanjiangyuan region and its surroundings

三江源国家公园(图2)是中国第一个国家公园,位于三江源地区腹地。面积19.07万 km^2 ,占三江源地区总面积的48.28%,由长江源、黄河源、澜沧江源三个园区组成。其中,长江源园区面积14.69万 km^2 、黄河源园区面积3.17万 km^2 、澜沧江源园区面积1.21万 km^2 。三江源国家公园不仅是中国西部生物多样性热点地区,也是中国气候变化响应最敏感的地区之一^[20]。

1.2 数据来源

(1) 在中国地震局官方网站检索得到的三江源及其周边21世纪以来的震级、震中、震源深度和发震时刻历史数据(<https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/index.html>)。(2) 2021年青海玛多5.22地震烈度空间分布数据,由国家应急管理部发布的地震烈度图矢量化所得。(3) 青海玛多地震灾后实地调查数据。(4) 三江源国家公园矢量边界数据,来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)^[21]。(5) 国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)发布的青藏高原边界数据^[22,23]。(6) 国家青藏高原科学数据中心发布的三江源地区范围数据集^[24]和数字高程模型(DEM)数据^[25]。(7) 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(www.ncdc.ac.cn)发布的中国第二次冰川编目数据集^[26]和中国冻土分布图^[27]。(8) 自然资源部2020年GlobeLand 30数据(<http://www.globallandcover.com/>)^[28]。(9) 国家科技资源共享服务平台(<https://www.esi.cn/>)。(10) 陆地卫星Landsat 8 TIRS/OLI遥感影像数据(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。

1.3 研究方法

本文使用以下方法,对地震所造成的生态环境影响进行定性与定量相结合的综合损失评估,以期深入认识地震灾害对三江源国家公园生态系统的影响,为灾后监测、评估与恢复重建提供方法框架。

1.3.1 实地调查

对受地震灾害影响的三江源国家公园内的冰川、冻土、水系、植被、地表和生态管护基础设施等进行实地调查勘探,获得现场资料。

1.3.2 定量评价

基于遥感和GIS等的分析、空天地一体化技术,在冰川、冻土、水系、植被、地表等方面,对生态系统所受的影响进行定量评价,进而分析潜在的生态退化风险,并探讨地震对三江源国家公园生态环境的影响模式与机制。

通过归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[29]结合Landsat 8 OLI/TIRS遥感影像对地震前后三江源国家公园植被覆盖变化进行监测。使用谢高地等^[30]提出的青藏高原生态资产价值评估方法,对三江源国家公园受损的冰川、冻土、植被、湿地和地表的生态系统服务价值进行评估。考虑到该论文的收稿年份为2002年,与

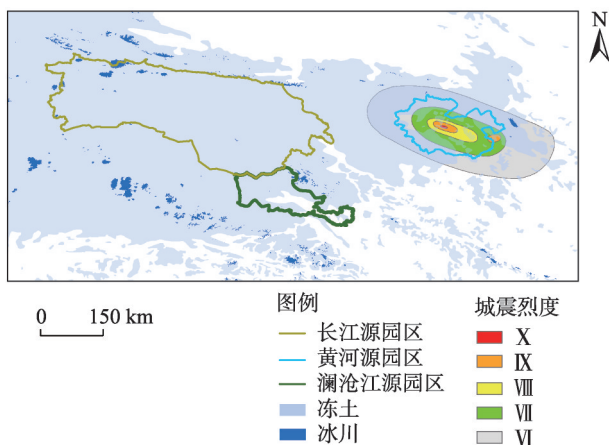


图2 三江源国家公园玛多地震烈度图

Fig. 2 Seismic intensity map of Madoi in Sanjiangyuan National Park

玛多地震时间相隔19年,存在明显的通货膨胀,而中国的通货膨胀率没有官方权威数据公布,故采用2002—2021年间年均金价变化(63.50~374.61元/g)代替通货膨胀率计算生态系统服务价值损失。与此同时,以《建筑震后应急评估和修复技术规程》(JGJ/T415—2017)^[31]中“直接经济损失估算”方法作为生态管护基础设施损失评估的依据,并结合青海省建设工程造价站提供的玛多县最新的非住宅用房造价指标,估算得到地震对生态管护基础设施造成的经济损失。

2 地震对三江源国家公园生态环境的影响模式与机制

2.1 地震对三江源国家公园生态环境影响的评估框架

地震对环境或生态的影响(Earthquake Environmental Effects, EEEs)一直是地震灾害评估的重点。因为生态环境影响包括的范围较为广泛,不仅要考虑相应的各种要素,还要考虑不同空间尺度的影响及不同时间尺度的滞后效应。Potter等^[32]采用枚举法,从自然、社会、经济三个方面,选择了土壤液化和水质、生态和生物多样性、洪涝、地质灾害、垃圾废物和土地污染6个自然要素,致死率和健康、教育、犯罪、社区连通性和娱乐及地方认同、少数民族5个社会要素,家庭住房和保险、商业、就业3个经济要素评估了英国坎特伯雷2010—2011年地震的影响。2007年,Michetti等^[33]提出了地震环境强度等级概况图,影响深远^[34],Audemard等^[35]在此基础上提出了地震环境效应目录。意大利环境保护研究所(伊斯普拉)发布了网络平台来评估地震生态环境效应^[36],从现代和历史地震中收集有关地震环境影响的特征及空间分布信息,但是该数据库只具备过往地震存储查询功能,不具备新发地震评估功能。日本地震和海啸的环境影响评估中,也采用了EEEs目录的评估方法^[37]。但截至目前,地震对生态环境的综合影响评估在中国还缺乏深入研究,对三江源地区和国家公园的研究更是十分缺乏,需要构建相应框架和平台,从而在灾害发生时可以开展快速、精准评估。图3为本文所概括的地震对三江源国家公园生态环境的影响机制。

2.2 地震对三江源国家公园生态环境的直接影响

地震对三江源国家公园生态环境的影响分为直接影响和间接影响两类,其直接影响包括对冰川、冻土、水系、植被、地表等生态系统要素的影响以及对生态管护基础设施的影响。其中,生态管护基础设施包括生态管护站、巡山公路、生态监测设施等。

地震对冰川的影响包括冰川裂缝、冰崩、冰川跃动、冰湖溃决洪水、冰川泥石流等灾害类型。地震可能导致冰川在坡度较大的坡面断裂,在重力作用下失稳而引发冰块崩解、坍塌。地震也可能导致冰川底部滑动,使冰川以超出正常运动速度数十甚至数百倍的速度快速前进,形成冰川跃动灾害。地震还可能触发冰川地震,导致二次地震的发生,并产生二次破坏。

在地震过程中,土体颗粒之间的摩擦过程会产生一定的热量,当土体产生的热量大于向外部散失的热量时,就会导致温度的升高,从而加剧冻土层消融。其次,地震会破坏国家公园内冻土斜坡的稳定性。土体颗粒摩擦导致的温度升高,不仅能够加快冻土层消融,还会对斜坡稳定性产生影响,尤其是对于含有冰体的冻土斜坡,具体表现为斜坡滑动,加剧滑坡、崩塌等地质灾害的产生。

地震对三江源国家公园内水系造成的影响通常较为明显。以玛多地震为例,通过对

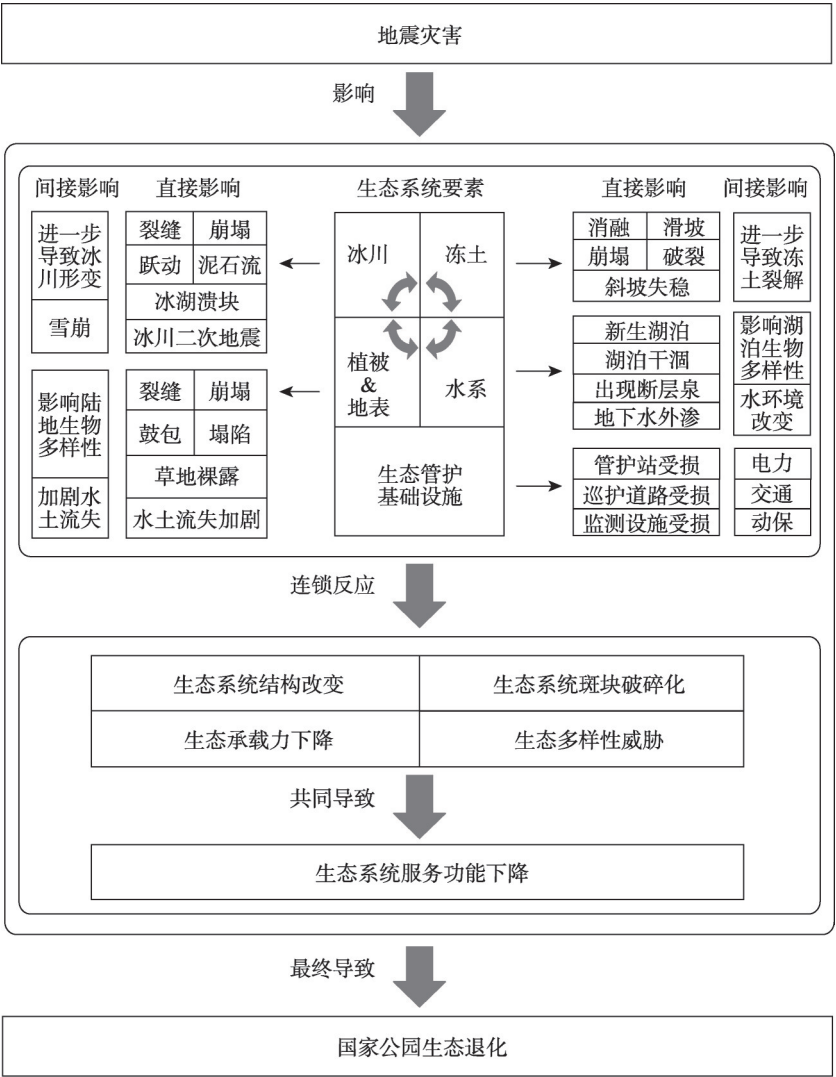


图3 地震对三江源国家公园生态环境的影响机制

Fig. 3 Influence mechanism of earthquakes on the ecological environment of Sanjiangyuan National Park

震区的地面调查与卫星遥感调查，震后部分区域出现新生湖泊，部分区域湖泊干涸。

2.3 地震对三江源国家公园生态环境的间接影响与连锁反应

间接影响和连锁反应的研究是灾害研究的热点，是因一种灾害发生而引发一系列灾害的多米诺骨牌现象，即原生灾害诱发次生灾害的事件，自然地理要素和基础设施要素之间的相互依赖性得到研究者的广泛关注^[38-41]。例如2011年的东日本大地震，先是诱发了海啸与核电站爆炸（直接影响），进而将灾害影响扩散至陆地与海洋生态系统，还导致了日本汽车产业与金融行业的动荡（间接影响与连锁反应）；而2021年郑州暴雨事件，除造成的城市内涝、人员伤亡等直接影响外，其间接影响与连锁反应还使得铁路交通枢纽瘫痪，甚至影响了全球供应链和贸易关系网络。Rinaldi等^[42]提出了关键基础设施之间的关联框架，对研究基础设施之间的关联意义重大。地震灾害的间接影响和连锁反应，有些可在天的尺度上出现，有的则可能在数年后才会显现。如1993年青海省库容330万m³

的沟后水库垮坝，发生溃坝洪水，造成下游300多人遇难，该事件与1990年青海共和县发生的7.0级地震有着密不可分的关系。

地震对三江源国家公园的间接影响，既会对园区内的基础设施如水库水电站等水利设施以及道路等造成破坏，进而影响电力供应、交通运输、动物保护等；也会进一步导致冰川形变、冻土裂解（会加剧草地生态系统的水土流失并产生负向演替）和地下、地表水环境改变等多种后果。地震还会引发冰川湖溃决和雪崩等灾害。地震导致的地表破裂、植被受损和湖泊消失，使得物种适宜栖息地面积缩小，进而对陆地和湖泊生物多样性的影响也属于间接影响。

三江源国家公园震区中区域基质物理性破坏会引发生态环境的一系列连锁反应（生态系统承载力下降、区域生态系统斑块破碎化与连通性降低，生物多样性保护受到威胁，生态系统结构改变及生态系统功能受到影响等），从而将共同导致三江源国家公园区域生态系统的服务功能下降。

上述直接与间接影响可能会最终导致国家公园生态退化的级联效应，并在短期和长期带来进一步的影响。

3 青海玛多地震对三江源国家公园生态环境影响的损失评估

3.1 青海玛多地震特征

2021年5月22日凌晨2时04分，青海省果洛藏族自治州玛多县发生7.4级地震，震源深度17 km，震中位于北纬34.59°，东经98.34°。该次地震是四川汶川地震之后中国发生的震级最高的一次地震，地震灾害总特征为：地震破坏大、人员伤亡少、结构损毁严重、生态影响深广。

本次地震的震中玛多县是青海省海拔最高的县，全县平均海拔4500 m以上，高寒湿地、草地生态系统形态独特，植被以高寒草甸为主。玛多县位于三江源地区核心腹地，县域内分布有三江源国家公园中的黄河源园区，素有“黄河之源”的美誉，生态地位十分重要，既是青藏高原重要的生态屏障，也是黄河中下游地区经济社会发展的重要生态功能平衡区。

3.2 对冰川、冻土的影响

通过遥感手段监测，本次地震范围波及三江源冰川区域，会对三江源国家公园产生影响。故使用空间分析法，通过叠加三江源冰川分布位置及玛多地震烈度，分析此次地震对冰川的影响（图4）。若地震未实时导致冰川产生形变，则相关影响需经历一段时间后才能显现出来。本次分析仅涉及三江源冰川可能被影响的位置及范围。

根据图2计算，三江源地区冰川总面积约2308.19 km²，其中三江源国家公园内分布有1137.45 km²。受地震最直接影响（烈度范围内，图4）的冰川面积为104.14 km²，地理位置紧邻黄河源园区，均分布在VI度（6度）区内。表1为2021年青藏高原不同类型生态系统服务价值。地震发生当年冰川生态系统服务价值的损失为2281.71万元。在行政区划中，冰川主要连片分布于玛沁县境内，另有少量冰川零散分布在西北的都兰县。

由于本次地震发生在春夏之交，且三江源国家公园内冰川分布较广，不仅可能会出现冰川裂缝、冰崩、冰川跃动等灾害，而且可能会导致冰湖溃决、洪水和冰川泥石流的发生。灾害最可能发生地点即为图4烈度范围内面积为104.14 km²的冰川范围。

青藏高原多年冻土区有 $1.50 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，占中国多年冻土总面积的 69.76%，青藏高原面积的 58.12%^[43]。根据图 2 计算，三江源国家公园内冻土总面积约 11.17 万 km^2 ，受地震最直接影响（烈度范围内，图 4）的冻土面积为 3.42 万 km^2 ，占国家公园冻土总面积的 30.62%。由于冻土层为非单一生态系统类型，借助 2020 年 GlobeLand 30 数据，与冻土数据进行叠加分析，受损的 3.42 万 km^2 冻土中，草地、裸土和湿地的面积分别为 29488.73 km^2 、4403.96 km^2 和 263.76 km^2 ，地震发生当年冻土生态系统服务价值的损失为 933.67 亿元。

冻土层是三江源国家公园承载所有生态系统的基础。经分析，本次地震对三江源国家公园生态系统和生物多样性最大的直接影响是将加剧冻土层的消融。主要原因为地裂等形变将改变地表热量的吸收传导，并且深层地震所产生的热能将逐步自下而上传导至地表。地震影响与全球气候持续变暖效应双重叠加，加剧了冻土层的消融，进而将会造成地表水系和水文状况的改变，使草地生态系统产生负向演替。

3.3 对植被、地表的影响

草地生态系统是三江源国家公园生态系统的主体，由于震区的高寒特点，区域生态系统十分脆弱。图 5 为三江源国家公园受地震影响现场调查图。玛多地震造成草地、湿地发生大面积崩塌、裂纹、裂缝、鼓包和塌陷（图 5b）。经现场调查统计，震区草地受损面积为 70 万亩（1 亩 $\approx 667 \text{ m}^2$ ），湿地受损面积达 250 万亩，经计算，地震发生当年草地和湿地生态系统服务价值的损失分别为 13.15 亿元和 545.58 亿元。位于黄河源园区的黄河源水电站，如果因地震影响导致拆除，其库区水面下降还将会导致约 4 万亩草地裸露。

三江源国家公园受玛多地震影响最大的园区为黄河源园区，对该园区地震前后的植被覆盖变化进行遥感监测。因 7 月属于该地区植被长势良好的季节，且由于气温相对较高，积雪等干扰较少，故分别选取 2019 年 7 月和 2021 年 7 月条带号为 134/036 的 Landsat 8 TIRS/OLI 高质量遥感影像进行地震前后的植被覆盖变化监测，结果如图 6 所示。相较于地震发生前，在地震发生当年的 7 月，园区绝大多数地表均出现了植被覆盖减少的情况，面积占比达 66.39%，园区草地生态系统遭受严重破坏；在行政区划上，园区所辖的玛查理镇、黄河乡、扎陵湖乡三个乡镇中，黄河乡为此次地震中黄河源园区植被覆盖减

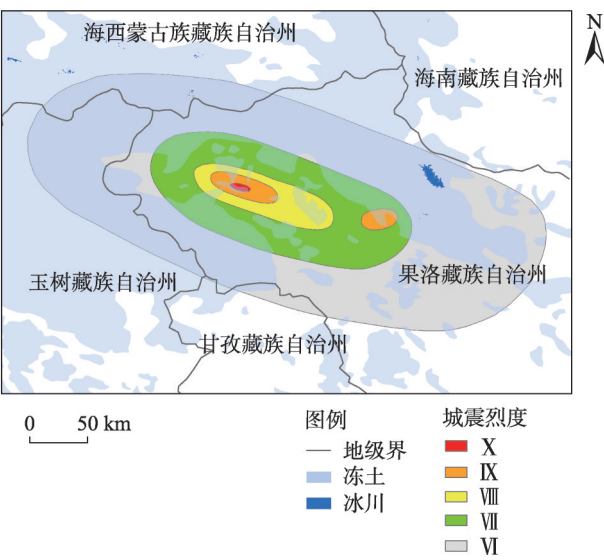


图 4 玛多地震震区冰川、冻土的分布情况
Fig. 4 Distribution of glacier and permafrost in Madoi earthquake

表 1 青藏高原不同类型生态系统服务价值
Table 1 The service value of different types of ecosystems on the Tibetan Plateau

生态系统类型	单价/(万元/ km^2)
高寒草甸	281.76
冰川	21.91
高寒荒漠	37.38
湿地	3273.29

a1. 玛查理镇刊木青村生态管护站受损



a2. 黄河源园办公楼受损



b1. 玛多县玛查理镇江多村—刊木青村断裂带



b2. 曲麻莱县秋智乡布甫村地面崩塌



b3. 玛多县扎陵湖乡尕泽村地震鼓包



b4. 玛多县扎陵湖乡尕泽村地震塌陷



c1. 玛多县扎陵湖乡尕泽地震喷泉



c2. 玛多县花石峡镇斗纳村分布密集断层泉



c3. 玛多县玛查理刊木青村湖泊干枯



c4. 玛多县玛查理刊木青村出现新生湖



注：图a1~a2为三江源国家公园部分生态管护基础设施受损情况现场调查图，图b1~b4为三江源国家公园部分地表地质灾害现场调查图，图c1~c4为三江源国家公园部分湖泊新生和干涸现场调查图。

图5 三江源国家公园受地震影响现场调查情况

Fig. 5 On-site investigation of the earthquake-affected Sanjiangyuan National Park

少最为严重的乡镇；在海拔高度分布方面，黄河源园区的海拔范围为4137~5107 m，植被覆盖减少的情况主要发生在海拔4500 m以下区域，占减少总面积的75.70%；在空间分布上，除园区南部和西部的部分地区外，其余区域的植被覆盖变化情况均以减少为主。地震发生后，土壤失去原有功能，适宜生境面积减少，生境支撑能力下降。草地生态系统水土流失加剧，生态承载能力严重下降。

此次地震导致地表破裂严重，空间上呈非对称双侧破裂模式，最大滑动量分布区位于震中东南方向，破裂

长度约140~160 km。在长约230 km、宽约75 km的调查区内发现活动断裂6条、地裂缝653条、断层泉1237个、地震鼓包97个，且地裂缝总体呈西北—东南方向展布。调查发现的最长裂缝达4500 m，最大宽2.5 m，位于玛多县玛查理镇江多村—刊木青村断裂带（图5b1）。距离地表破裂东西两侧大野马岭和昌麻河GNSS测站发现超过1 m的同震水平向偏移。在地表破裂迹线西北90 km距离处有多个GNSS测站显示有20~30 cm的西北方向运动，东南80 km处有约30 cm的东南方向运动。据此，初步估计沿地表破裂两侧区域100 km范围内有20 cm以上地表永久变形。地表发生的严重破裂，将导致冻土层消融现象的加剧。

3.4 对水系的影响

震中玛多县位于三江源国家公园中的黄河源园区，境内河流纵横，主要河流有玛曲、热曲、江曲、勒那曲、多曲等；湖泊星罗棋布，其中扎陵湖、鄂陵湖两“姊妹湖”被联合国《湿地公约》列为国际重要湿地。

经统计分析，震后共出现地震断层泉1237处，其中2处已形成喷泉，尤以花石峡镇斗纳村断层泉分布最为密集；玛多县玛查理镇刊木青村、江多村2处湖泊干枯；花石峡镇扎地村、扎陵湖勒那村、玛查理镇刊木青村均出现新生湖泊。地震对自然水系造成的改变，对高原湖泊、高寒湿地等生态系统造成严重破坏。图5c为部分区域出现的新生湖泊和湖泊干枯。震区内唯一的生态水利工程黄河源水电站，自1996年建成运行以来，与扎陵湖已形成稳定的水文生态系统。经水利部门专家组现场检查，坝体暂无明显的裂缝、管涌、渗漏等异常现象。库坝水位为4269.25 m，库容15.04亿 m³，出口流量35 m³/s。如果未来出现异常，将会进一步对水文、植被等生态系统要素造成影响。

地震亦对该区域的水资源安全产生严重影响。其中，当洛乡有40%的水井缺水，另有60%的水井变浑浊；黄河乡饮用水源浑浊度已超过《地下水质量标准》Ⅲ类标准。地震还使得国家公园的水源涵养能力降低，对区域生态安全屏障产生影响，并危及区域生物多样性安全。

三江源国家公园地处青藏高原气候尾间区，水系及水资源所遭受的地震影响对该地

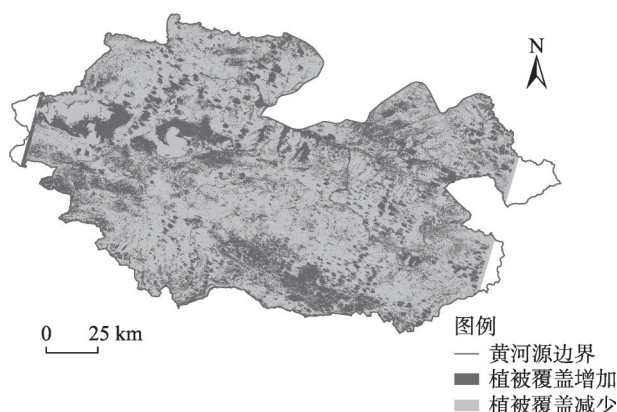


图6 黄河源园区地震前后植被覆盖变化情况

Fig. 6 Changes in vegetation cover in the Yellow River Source Park before and after the earthquake

区一直以来因水而存的生态系统带来了严峻的挑战，应当引起相关部门的高度重视，做好监测与恢复工作。

3.5 生态管护基础设施受损情况

除对上述生态系统要素造成影响外，地震还导致了三江源国家公园生态保护设施中的管护站、巡护道路、监测设施等不同程度损毁（图 5a）。据实地调查，位于震中的玛多县黄河乡、扎陵湖乡、玛查理镇生态管护站房屋受损面积共约 1536 m²，受损房屋类型为非住宅用房，建筑结构以钢混结构为主，估算得到地震对生态管护站造成的经济损失为 387.07 万元。其中黄河源园区房屋受损较重，内部出现吊顶掉落、墙面多处裂缝、顶棚及墙皮多处脱落、承重墙出现斜裂缝等情况，扎陵湖乡阿涌村有房屋坍塌情况；另外，玛多县城和多个村庄的生态巡护道路存在不同程度的损毁情况；生态监测设施暂未出现损坏情况，运行正常。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本文基于近年来青藏高原多次地震灾害评估，构建了地震灾害对三江源国家公园生态环境直接和间接影响的评估框架，并以 2021 年青海玛多地震为例，基于现场实地调查、遥感和 GIS 的空天地一体化技术，综合评估了地震对三江源国家公园生态系统与生态基础设施的影响以及生态系统服务价值损失。所得主要结论如下：

（1）在生态环境影响方面，地震对三江源国家公园的生态环境产生了深远的影响，尤其是造成的大面积冻土消融、地表破裂、地表和地下水网结构的改变等结果，严重损害了高原腹地水塔区的生态管护基础设施和冰川、冻土、植被、地表、水系等结构稳定性，导致区域生态系统的功能受到破坏。

（2）在生态系统服务价值方面，玛多地震发生当年导致的三江源国家公园的生态系统服务价值损失达 1492.67 亿元，尤以冻土和湿地的损失最大，分别达 933.67 亿元和 545.58 亿元。生态系统服务价值损失远超地震所导致的 116.95 亿元的直接经济损失。

（3）在评估框架方面，本文提出的地震灾害对三江源国家公园生态环境直接和间接影响的评估框架，可为评估未来可能发生的地震对三江源及整个青藏高原地区国家公园的生态环境影响及灾后恢复和重建提供科学借鉴与技术支撑。

4.2 研究展望

4.2.1 国家公园生态环境地震影响评估平台

基于前述评估标准与框架，结合前文总结的相关研究进展，本文在此提出集过往地震信息存储、查询，新发地震快速、精准评估于一体的国家公园生态环境地震影响评估平台的建设思路。平台基于高分辨率遥感影像和 WebGIS 进行开发，通过数据库进行地震信息存储，主要由以下三个模块构成：

一是数据库存储模块。该数据库旨在青藏高原范围内存储地震灾害信息，不仅包含了地震的时间、位置等信息，还包含了基于上述评估框架的地震灾害对国家公园造成的不同类别的影响，并将可用的图像、视频文件等存储在数据库中。二是交互式操作模块。在此可以通过单击震中所在位置的符号，在空间上查看关于某次地震的信息，也可以查看某一特定时间范围内地震活动的地理空间分布情况。通过放大每个地点的细节，

可以更好地定位每个单独的地震事件。通过双击某次地震事件,可以交互式调用与该次地震相关的在数据库中存储的信息。同样,也可在数据库中对交互式操作模块进行反向调用。三是新发地震评估模块。基于已有框架,输入新发地震的调查数据和结果,包括RS、GIS、地质和现场调查数据等,自动生成对国家公园影响的快速评估结果,使得地震影响评估具有较高的时效性和较好的精确度。

4.2.2 地震对国家公园生态环境潜在有利影响的研究

无论是目前已有的地震对青藏高原生态环境的影响研究,还是本文所进行的地震对三江源国家公园生态环境的影响评估,大多聚焦于地震灾害所造成的不利影响,而未从一分为二的角度,对潜在的有利影响进行探讨。地震对以三江源国家公园为代表的青藏高原国家公园的地表生态破坏,虽然会经历一个缓慢的恢复过程,但是从整个地球生态系统的演变过程来看,依然是一个相对短期的阶段。地震可以重新分配地表断层沿线的高山草地生态系统的物种丰度,长远来看可能存在一些潜在的益处。在未来的工作中,在关注不利影响的同时,也会探索有利影响具体表现在哪些方面,从而进一步完善地震对国家公园生态环境影响的评估框架。

致谢: 感谢桂林理工大学测绘地理信息学院王志华女士为本文插图绘制过程中所做出的贡献。

参考文献(References):

- [1] 王穗子,樊江文,张雅娴,等. 基于草地畜牧业生产的三江源地区承载力多情景模拟分析. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1893-1902. [WANG S Z, FAN J W, ZHANG Y X, et al. Multi-scenario simulations of carrying capacity of the Three River Headwaters Region based on animal husbandry production. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1893-1902.]
- [2] 李禾尧,何思源,王国萍,等. 国家公园灾害风险管理研究与实践及其对中国的启示. 自然资源学报, 2021, 36(4): 906-920. [LI H Y, HE S Y, WANG G P, et al. Practice of disaster risk management in global national parks and its enlightenment to China. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 906-920.]
- [3] WANG Q, ZHANG P Z, FREYMUELLER J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 2001, 294(5542): 574-577.
- [4] LIU Q Y, VAN DER HILST R D, LI Y, et al. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nature Geoscience*, 2014, 7(5): 361-365.
- [5] WANG M, SHEN Z K. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2020, 125(2), Doi: 10.1029/2019JB018774.
- [6] WANG Y B, DENG Y F, SHI F, et al. The Indo-Eurasia convergent margin and earthquakes in and around Tibetan Plateau. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2020, 115(2): 118-137.
- [7] 曾纳,任小丽,何洪林,等. 三江源国家公园草地上生物量的时空动态及其气候影响. 生态学报, 2023, 43(3): 1175-1184. [ZENG N, REN X L, HE H L, et al. Spatial-temporal dynamics of the grassland aboveground biomass and its association with climate changes in the Three River Source National Park. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1175-1184.]
- [8] DI L, CAO C X, DUBOVYK O, et al. Using fuzzy analytic hierarchy process for spatio-temporal analysis of eco-environmental vulnerability change during 1990-2010 in Sanjiangyuan Region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 612-625.
- [9] 李红梅,颜亮东,温婷婷,等. 三江源地区气候变化特征及其影响评估. 高原气象, 2022, 41(2): 306-316. [LI H M,

- YAN L D, WEN T T, et al. Characteristics of climate change and its impact assessment in the Three-River Regions. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(2): 306-316.]
- [10] 杜傲, 沈钰仟, 肖焱, 等. 国家公园生态产品价值核算研究. *生态学报*, 2023, 43(1): 208-218. [DU A, SHEN Y Q, XIAO Y, et al. Research on accounting of ecological products value in National Parks. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 208-218.]
- [11] MA B R, ZENG W H, HU G Z, et al. Normalized difference vegetation index prediction based on the delta downscaling method and back-propagation artificial neural network under climate change in the Sanjiangyuan Region, China. *Ecological Informatics*, 2022, 72: 101883, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101883>.
- [12] WANG L, BI Y Q, WANG F T, et al. Scrutinise the variations of glaciers and their climatic attributions in the Sanjiangyuan National Park during 1969-2018. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(4): 531-539.
- [13] 张法伟, 李红琴, 罗方林, 等. 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. *生态学杂志*, 2022, 41(12): 2471-2478. [ZHANG F W, LI H Q, LUO F L, et al. The evaluations on topsoil water storage and water conservation capacity of the Sanjiangyuan National Park based on boosted regression tress. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(12): 2471-2478.]
- [14] 付梦娣, 刘伟伟, 李博炎, 等. 国家公园生态环境保护成效评估指标体系构建与应用. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 4109-4118. [FU M D, LIU W W, LI B Y, et al. Construction and application of an evaluation index system for ecological and environmental protection effectiveness of national parks. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12): 4109-4118.]
- [15] ZENG Y X, ZHONG L S, WANG L E. Spatiotemporal changes in recreation potential of ecosystem services in Sanjiangyuan, China. *Journal of Spatial Science*, 2018, 63(2): 359-377.
- [16] 赵晓娜, 陈琼, 陈婷. 三江源国家公园人兽冲突现状与牧民态度认知研究. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(4): 39-46. [ZHAO X N, CHEN Q, CHEN T. Human-animal conflicts and the cognition of herdsmen in the Three-River-Source National Park. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(4): 39-46.]
- [17] DAI Y C, LI Y, XUE Y D, et al. Mitigation Strategies for Human-Tibetan Brown Bear (*Ursus arctos pruinosus*) Conflicts in the Hinterland of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Animals*, 2022, 12(11): 1422.
- [18] HAN Y H, DONG S K, WU X Y, et al. Integrated modeling to identify priority areas for the conservation of the endangered plant species in headwater areas of Asia. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 47-56.
- [19] ZHANG Y, HUANG W Y, ZHONG D Y. Major moisture pathways and their importance to rainy season precipitation over the Sanjiangyuan Region of the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 2019, 32(20): 6837-6857.
- [20] ZHANG J J, JIANG F, LI G Y, et al. Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(11): 6643-6654.
- [21] 王旭峰. 三江源国家公园界线矢量数据集. 国家青藏高原科学数据中心, 2020. [WANG X F. Boundary vector data set of Sanjiangyuan National Park. National Tibetan Plateau Data Center, 2020.]
- [22] 张懿锂, 李炳元, 郑度. 《论青藏高原范围与面积》一文数据的发表: 青藏高原范围界线与面积地理信息系统数据. *地理学报*, 2014, 69(s1): 65-68. [ZHANG Y L, LI B Y, ZHENG D. Datasets of the boundary and area of the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(s1): 65-68.]
- [23] 张懿锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1-8. [ZHANG Y L, LI B Y, ZHENG D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-8.]
- [24] 魏彦强. 三江源区范围数据集(2018). 国家青藏高原科学数据中心, 2018. [WEI Y Q. The boundaries of the source regions in Sanjiangyuan Region (2018). National Tibetan Plateau Data Center, 2018.]
- [25] National Aeronautics and Space Administration. 第三极地区高程数据集(2013). 国家青藏高原科学数据中心, 2019. [National Aeronautics and Space Administration. Elevation dataset of the Third pole (2013). National Tibetan Plateau Data Center, 2019.]
- [26] 刘时银, 郭万钦, 许君利. 中国第二次冰川编目数据集. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2019. [LIU S Y, GUO W Q, XU J L. The second glacial catalogue data set of China. National Cryosphere Desert Data Center, 2019.]
- [27] 吴立宗. 基于《中国冰雪冻土图》的中国冻土分布图. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2018. [WU L Z. Distribution

- map of frozen ground in China based on Map of Snow, Ice and Frozen Ground in China. National Cryosphere Desert Data Center, 2018.]
- [28] CHEN J, BAN Y, LI S. China: Open access to earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434, Doi: 10.1038/514434c.
- [29] CARLSON T N, RIPLEY D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.
- [30] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196. [XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.]
- [31] 中国建筑科学研究院.《建筑震后应急评估和修复技术规程》(JGJ/T415-2017). 2017. [China A B R. Technical regulations for post-earthquake emergency assessment and repair of buildings (JGJ/T415-2017). 2017.]
- [32] POTTER S H, BECKER J S, JOHNSTON D M, et al. An overview of the impacts of the 2010-2011 Canterbury earthquakes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015, 14: 6-14.
- [33] MICHETTI A M, ESPOSITO E, GUERRIERI L, et al. Environmental seismic intensity scale-ESI 2007. *Mem. Descr. Carta Geol. D'Ital*, 2007, 74: 7-23.
- [34] KING T R, QUIGLEY M C, CLARK D. Earthquake environmental effects produced by the Mw 6.1, 20th May 2016 Perthmann earthquake, Australia. *Tectonophysics*, 2018, 747: 357-372.
- [35] AUDEMARD F, AZUMA T, BAIocco F. Earthquake Environmental Effect for seismic hazard assessment: The ESI intensity scale and the EEE Catalogue. Italy: ISPRA, Istituto Superior per la protezione e la ricerca ambientale, 2015: 135-138.
- [36] BEER M, KOUGIOUMTZOGLOU I, PATELLI E, et al. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Germany: Springer, 2015: 932-944.
- [37] GRÜTZNER C. Japan EQ & Tsunami: Environmental effects. <https://paleoseismicity.org/japan-eq-tsunami-environmental-effects/>, 2011-03-13.
- [38] REITER K, KNITTEL N, BACHNER G, et al. Barriers and ways forward to climate risk management against indirect effects of natural disasters: A case study on flood risk in Austria. *Climate Risk Management*, 2022, 36: 100431, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100431>.
- [39] 宋妍, 李振冉, 张明. 自然灾害对经济增长的长期间接影响: 基于汶川地震灾区县级数据的合成控制法分析. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(9): 117-126. [SONG Y, LI Z R, ZHANG M. The long-run indirect effects of natural disasters on economic growth: Analysis of synthetic control method based on county level data of Wenchuan Earthquake stricken areas. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(9): 117-126.]
- [40] 荣莉莉, 谭华. 基于孕灾环境的突发事件连锁反应模型. *系统工程*, 2012, 30(7): 40-47. [RONG L L, TAN H. Modeling chain reactions to emergency based on disaster-pregnant environment. *Systems Engineering*, 2012, 30(7): 40-47.]
- [41] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 1-12. [SHI P J, LYU L L, WANG M, et al. Disaster system: Disaster cluster, disaster chain and disaster compound. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 1-12.]
- [42] RINALDI S M, PEERENBOOM J, KELLY T K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *Control Systems, IEEE*, 2002, 21: 11-25.
- [43] JIN H J, LI S X, CHENG G D, et al. Permafrost and climatic change in China. *Global and Planetary Change*, 2000, 26(4): 387-404.

Mechanism and damage assessment of the impact of earthquakes on the ecological environment of Sanjiangyuan National Park

YIN Cheng-long¹, ZHOU Qiang², LIU Feng-gui², CHEN Rui-shan^{1,3}, MENG Fei⁴

(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geographic Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3. School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: National parks are an important part of the construction of ecological civilization in China, and a practical action to promote natural ecological protection and protect biodiversity. However, natural disasters are an important factor affecting the construction and sustainable development of national parks. The Sanjiangyuan region is an important ecological barrier in China, and the ecological environment is extremely fragile and sensitive. It has poor self-regulation and repair capacity and once damaged, it is extremely difficult to recover. The frequent occurrence of earthquakes and their secondary disasters in the Sanjiangyuan region has a great impact on the ecological environment. In order to systematically assess the impact of earthquakes on the ecological environment in the context of the construction of the Sanjiangyuan National Park, this paper constructs a framework for assessing the direct and indirect impacts of seismic hazards on the ecological environment of the park based on the assessment of several seismic hazards on the Tibetan Plateau in recent years. Based on this framework, this paper takes the 2021 Qinghai Madoi earthquake as an example, and comprehensively evaluates the impact of the earthquake on the ecosystem and ecological infrastructure of Sanjiangyuan National Park and the loss of ecosystem service value through field surveys, remote sensing, and GIS methods. On this basis, the idea of building an assessment platform for the impact of earthquakes on the ecological environment of national parks is proposed. The results show that the earthquake seriously damaged the ecological management and protection facilities of Sanjiangyuan National Park and the structural stability of ecosystem elements such as glaciers, permafrost, vegetation, surface and water system, destroying regional ecosystem functions. The value loss of ecosystem services caused by the earthquake reached 149.267 billion yuan, far exceeding the direct economic loss of 11.695 billion yuan. The evaluation framework and platform construction ideas proposed in this paper can provide a reference for evaluating the impact of future earthquakes on the ecological environment of the Sanjiangyuan region and even the entire Tibetan Plateau National Park.

Keywords: Sanjiangyuan; national park; earthquake; ecological environment; impact mechanism; damage assessment