

DOI: 10.5846/stxb202207131998

孙然好, 何晓银, 孙龙, 孙涛, 钟荣华, 段兴武, 陈利顶. 流域水电开发对干热河谷社会-生态系统的影响及意义. 生态学报, 2023, 43(14): 5639-5647.  
Sun R H, He X Y, Sun L, Sun T, Zhong R H, Duan X W, Chen L D. Impacts of watershed hydropower development on social-ecological systems in hot-dry valleys. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5639-5647.

# 流域水电开发对干热河谷社会-生态系统的影响及意义

孙然好<sup>1,2,\*</sup>, 何晓银<sup>1,2</sup>, 孙 龙<sup>1,2</sup>, 孙 涛<sup>1,2</sup>, 钟荣华<sup>3</sup>, 段兴武<sup>3</sup>, 陈利顶<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

**摘要:** 西南干热河谷是我国重要生态脆弱区和经济发展落后区, 流域大型水电开发是干热河谷重要的人类干扰活动, 对生态脆弱区的社会-生态系统造成极大影响。社会-生态系统演变的方向和规律具有复杂性和非线性变化, 又涉及到生态保护修复、能源安全、经济发展和乡村振兴等国家重大需求, 因此, 亟待加强流域社会-生态系统演变和驱动机制方面的研究。通过总结当前研究的进展和不足, 提出了加强生态系统演变的长期监测和分析、深入研究流域社会经济演变规律和驱动机制、完善流域生态资产价值评估和生态补偿机制、构建流域社会-生态系统耦合理论与方法等对策建议, 从而为脆弱生态区未来可持续发展提供科技支撑。

**关键词:** 生态修复; 水电开发; 流域安全; 社会-生态系统

## Impacts of watershed hydropower development on social-ecological systems in hot-dry valleys

SUN Ranhao<sup>1,2,\*</sup>, HE Xiaoyin<sup>1,2</sup>, SUN Long<sup>1,2</sup>, SUN Tao<sup>1,2</sup>, ZHONG Ronghua<sup>3</sup>, DUAN Xingwu<sup>3</sup>, CHEN Liding<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China

**Abstract:** Giant hydropower development is a major human disturbance activity in the watersheds of southwestern China, which has a great impact on the socio-ecological systems of ecologically fragile areas. The changing direction and pattern of socio-ecological system evolution are complex and non-linear and involve major national needs such as ecological protection and restoration, energy security, economic development, and rural revitalization. Therefore, there is an urgent need to strengthen research on the evolution and driving mechanisms of socio-ecological systems in watersheds. By summarizing the progress and shortcomings of current research, we propose countermeasure suggestions such as strengthening a long-term monitoring and analysis of ecosystem evolution; conducting in-depth research on the laws and driving mechanisms of the watershed socio-economic evolution; improving the valuation of watershed ecological assets and ecological compensation mechanisms; and constructing the theory and methods of watershed socio-ecological system coupling. This study will provide the scientific and technological support for the future sustainable development of fragile ecological zones.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2102209)

收稿日期: 2022-07-13; 网络出版日期: 2023-03-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rhsun@rcees.ac.cn

**Key Words:** ecological restoration; hydropower development; watershed security; social-ecological systems

社会-生态系统 (SESs) 是人与自然交互作用形成的具有复杂性、非线性、不确定性和多层嵌套等特性的耦合系统<sup>[1]</sup>, 需要整合社会、经济、生态等多个系统, 涉及生态学、社会学、政治学、公共健康等多个学科。当前国土空间生态保护与修复研究正从侧重于单一生态要素、单一生态过程的研究向多要素和多过程综合、格局-过程-服务集成、自然和人文过程耦合等系统治理方向发展<sup>[2]</sup>, 未来将进一步加深人类社会系统与自然生态系统交互作用和相互渗透<sup>[3]</sup>, 从而推动人地系统的正向演替和协调优化, 促成人与自然和谐共生的生态文明进入更高阶段<sup>[1]</sup>。随着生态文明建设, 新型城镇化与乡村振兴战略的不断推进, 人地关系与国土空间治理格局正在经历着重大变革, 社会-生态系统协调与区域发展面临的问题愈加复杂<sup>[4]</sup>, 如何实现区域可持续发展成为人地关系地域系统实证研究的核心与目标<sup>[5]</sup>。

干热河谷是指高温、低湿的河谷地带, 大部分位于热带或亚热带地区, 我国干热河谷主要分布在横断山脉的金沙江、元江、怒江、澜沧江等河流海拔在 1500 m 以下的河谷地带<sup>[6]</sup>。西南干热河谷是我国重要的水电能源基地, 近 20 年, 水电开发与生态环境的关系已由建设过程中考虑环保措施转变为坚持“生态优先”。干热河谷的脆弱生态系统一直备受学者的关注, 现有干热河谷生态系统研究往往侧重于自然生态过程监测、模拟、评估等, 将生态系统演变简单归结为地质、地貌、气候等影响, 人类活动驱动因子尚未有效识别, 在水电开发背景下对于西南干热河谷的社会-生态复合系统研究甚少。我国西南干热河谷地区普遍是经济发展落后区, 干热河谷脆弱的生态系统限制了资源开发利用, 而长期不合理的人类活动加剧了干热河谷生态系统的受损强度, 开发利用与生态保护的矛盾极为突出<sup>[7-8]</sup>。梯级电站开发规模大, 势必会对当地脆弱的生态系统和社会经济结构产生影响。基于此, 本研究拟梳理干热河谷脆弱社会-生态系统的形成原因和背景, 分析梯级电站开发影响下的自然生态系统和人类社会系统的演变趋势, 以生态系统服务为纽带, 研究社会-生态系统的互馈机制, 从而深入研判能源开发、生态保护和人类福祉的权衡和协同途径, 以期面向生态保护与高质量发展为目标的干热河谷人地关系优化提供科学依据。

## 1 干热河谷的生态特征与社会发展状态

### 1.1 干热河谷的生态脆弱性

气候变化的背景下, 脆弱生态系统的保护与修复受到各国重视, 也是国内外研究的焦点和前沿<sup>[1,9-13]</sup>。脆弱生态系统在外界因素作用下, 特别是人类活动干扰下, 生态系统的结构和功能极易发生改变, 恢复与重建到原有的状态难度巨大。干热河谷地区光热资源丰富, 地形起伏大, 土层相对浅薄, 植被覆盖率低, 降雨集中, 水土流失严重, 植被恢复和生态治理难度极大, 属于典型脆弱生态系统类型区<sup>[14-16]</sup>。

我国西南地区特殊的地理位置和地形地貌组合形成了典型的干热气候。干热河谷的大部分地区处于热量基础高的热带、准热带、亚热带, 深切河谷背风坡产生的“焚风效应”使得气流下沉增温, 另外河谷地形封闭不易散热“谷风”持续时间较长, 形成了热量聚集的高值区。其多年日平均气温 18—20℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的积温达 6000—6500℃, 元谋等地可达 8000℃ 以上<sup>[6]</sup>。河谷地带年降水量为 600—800 mm, 降水年内分配不均, 干湿季分明, 降水主要集中在雨季 5 月至 10 月 (89%—95%), 干季 11 月至翌年 5 月的降水极少<sup>[17]</sup>。高温、大风的环境导致河谷地带的蒸发量远大于降水量, 年蒸发量为年降水量的 3 到 6 倍<sup>[18]</sup>, 雨季也经常会出现干旱缺水的情况, 水热矛盾十分突出。

干热气候使水分成为限制干热河谷生态系统发育的关键因子, 影响植物群落的空间分布。干热河谷土壤类型以燥红土为主, 保水性弱, 元江地区的土壤含水量一年中有长达 7、8 个月处于凋萎湿度状态<sup>[19]</sup>。植物为适应干旱生境, 稀树灌草丛演替成为干热河谷特有的次生性顶级植物群落, 2—5 m 的乔木和 0.5—2 m 的灌木稀疏生长在以中草和禾草草丛为主的草地植被上, 优势种和常见种多为生态适生种或耐干热种, 植物形态特征普遍多毛、多刺、叶小<sup>[20]</sup>。我国干热河谷的稀树灌草丛系古萨王纳植被的残存类型, 属于河谷型萨王纳

(Valley-type savanna), 保护这一珍稀濒危的植被类型对于生物多样性保护具有重要意义<sup>[21]</sup>。

除了干热气候与干旱贫瘠的立地条件, 严重的水土流失和不合理的人为经济活动给干热河谷地区植被恢复带来了极大的困难。金沙江干热河谷区水土流失面积超过 46.6%, 年输沙量占长江宜昌站以上年输沙量的 45.3%<sup>[22]</sup>, 沟谷溯源侵蚀在深切河谷的地形下作用强烈, 崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害频发, 在雨季水动力作用下地表径流冲刷带走大量表层土壤, 加之人为破坏植被, 土地退化朝裸岩化和石漠化发展。干热河谷生态系统脆弱长期制约着区域可持续发展, 为解决这一问题, 诸多学者从干热河谷的水土保持、植被恢复等方面做了大量研究。例如在植被保护与恢复方面, 主要包括提高植被抗性、引进耐高温耐旱物种、以及进行植被适应性研究<sup>[15, 23-26]</sup>; 在水土保持方面, 包括土壤持水特性以及侵蚀格局、土壤侵蚀过程和机理<sup>[27-32]</sup>、以及在土地整治工程措施层面进行的探讨等<sup>[33-36]</sup>。近年来干热河谷生态系统保护与修复的重要性愈发受到关注, 尤其是在水电集中开发的背景下, 干热河谷生态脆弱性面临新的变化和挑战, 需要以更加系统、深入的视角出发, 研究干热河谷生态系统可持续恢复。

## 1.2 干热河谷的社会发展状态

西南干热河谷所在的地区一直是我国极度贫困的典型地区, 贫困严重制约了社会经济发展。我国贫困最大地区之一的乌蒙山连片贫地区位于金沙江流域下游, 该地区贫困人口和少数民族众多, 山高坡陡, 耕地质量差, 广种薄收, 属于脱贫攻坚战国家重点关注的区域<sup>[37]</sup>。位于金沙江下游右岸的云南昭通市和左岸的四川凉山彝族自治州, 坐拥三大水电站白鹤滩、溪洛渡、向家坝, 然而拥有丰富水力资源的昭通市与凉山彝族自治州一直都是我国深度贫困地区。据《中国县域统计年鉴(2020年)》的数据显示, 金沙江下游流域的凉山州的美姑县、金阳县等 5 县, 昭通市的绥江县和水富市, 地区生产总值不足百亿元, 第一产业比值普遍大于 20%, 反映了当地经济处于落后水平, 第一产业占据重要地位。第一二产业融合发展程度较低, 以核桃、花椒为代表的特色干热河谷特色农业链延伸困难, 规模化经营水平不高。

干热河谷地区致贫原因主要是人地关系之间的尖锐矛盾, 根据区域增长理论, 在生产力低下的干热河谷地区, 人依赖自然的程度很高, 持续的人口增长压力和生计模式的逐步单一化, 导致干热河谷地区林地和草地大量减少, 低效和裸露用地大幅扩张的景观格局, 形成了区域生态环境难以承载的经济开发模式<sup>[38]</sup>。交通和农田水利基础设施落后也是致贫原因之一, 干热河谷地形复杂, 基础设施修建的技术难度高, 投资成本高。另外地区的人均受教育率较低, 文化程度不高, 知识转化技能薄弱, 限制了经济的快速发展。

## 2 干热河谷水电开发的社会和生态意义

### 2.1 干热河谷水电开发的社会价值

可再生的水电能源一直以来是我国的第二大电源<sup>[39]</sup>, 在中国的能源体系中占有重要地位。立足实现碳中和目标, 技术成熟的水电能源是现阶段乃至长期最现实、最可靠的选择<sup>[40]</sup>。2020 年, 我国电力行业碳排放量约占全国碳排放总量的 38%, 非化石能源发电量占比达到 34%。实现碳达峰、碳中和目标, 推动电力生产低碳化尤为必要和紧迫。我国西南地区水电蕴藏量大, 积极开发西南水电是促进电力向零碳方向发展的必由路径之一。

西南干热河谷地带由于其独特的地形优势, 拥有丰富的水电资源, 大型水利水电开发是干热河谷地区重要的提水增效工程, 是加快国家能源转型、助推地方经济发展的重要引擎, 在实现节能减排目标和应对气候变化方面发挥着重要作用。以金沙江为例, 金沙江水能资源十分丰富, 理论蕴藏量为 1.13 亿 kW, 约占全国六分之一, 其中技术可开发的装机容量超过 1 亿 kW。此外, 金沙江下游是我国典型的干热河谷地区之一, 占全国干热河谷总面积的 58%, 金沙江下游已经建成四座梯级水电站(图 1), 总库容 459 亿 m<sup>3</sup>、总装机容量 0.448 亿 kW。作为世界级绿色能源基地, 金沙江流域梯级电站开发可以优化国家能源格局、缓解区域电力供需矛盾、促进地方经济发展。2020 年 10 月, 国务院印发 2030 年前碳达峰行动方案, 提出到 2030 年, 非化石能源消费比重达到 25% 左右, 对水电开发利用提出了更高要求。

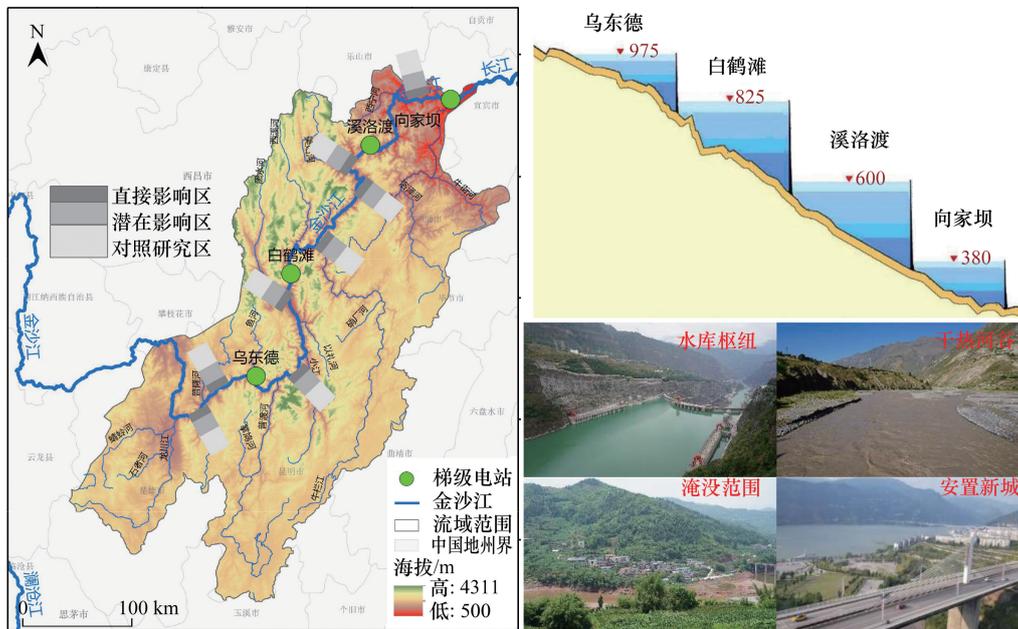


图1 金沙江下游干热河谷水电开发示意图

Fig.1 The sketch map of hydropower construction in hot-dry valleys of China

### 2.2 干热河谷的生态安全屏障功能

干热河谷在《全国生态功能区划》中属于川滇干热河谷土壤保持重要区,在长江大保护战略中占有极其重要的地位<sup>[41-42]</sup>。《云南省重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》提出构建“三屏两带”的生态保护和修复格局,其中金沙江干热河谷带是关键区域。《云南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》提出加强金沙江干热河谷地带等区域的生态保护修复,筑牢国家西南生态安全屏障。金沙江下游梯级电站建成后将淹没大面积干热河谷地带,不仅会影响自然生态系统结构和功能,更会影响地方经济发展和人类社会系统的运行模式,导致社会-生态系统的平衡状态发生改变,而这又反过来影响水电能源开发效率和可持续性。因此,金沙江流域社会-生态系统的可持续发展是保障长江流域生态保护修复和绿色能源开发“两翼齐飞”的重要基础。

## 3 水电开发对干热河谷社会-生态系统的影响

### 3.1 水电开发对干热河谷的生态影响

大型水利工程建设除了直接影响水生生态系统,如水生动植物健康、下游河道侵蚀、温室气体排放等<sup>[11,43-45]</sup>,也会对陆生生态系统造成显著影响<sup>[46]</sup>。梯级电站的建设周期长、土地扰动面积大<sup>[47]</sup>,开发过程直接影响地貌和植被<sup>[48]</sup>,改变原有地形地貌、景观格局。电站蓄水会淹没大面积陆生生态系统,淹没区因为周期性水资源排蓄形成消落带,导致消落带动植物生境和多样性损失,致使泥沙、污染物等进入水库的最后一道屏障丧失,进而影响水库水质、库岸稳定等<sup>[49-50]</sup>。此外,电站蓄水过程会增强地表蒸散发,改变局地温度和湿度,这一改变可能延伸至数公里甚至十余公里以外。而土壤-植被系统可能对局地气候的这一变化做出响应,从而影响生态系统功能的发挥<sup>[43-44]</sup>。

大型水电站开发对干热河谷生态系统的影响具有复杂性和特殊性,但是目前尚缺少系统研究。其复杂性和特殊性主要表现在干热气候特征和峡谷地形两方面。具体来说,干热河谷潜在蒸发大,梯级电站蓄水为潜在蒸发提供了充足的水源,与没有蓄水或湿润区域相比,实际蒸发会显著增大。另一方面,在峡谷地形的影响下,通过蒸发进入大气的水汽,一定程度受到峡谷地形限制,囿于其中,与平缓地形相比,蓄水对局地气候的改

变可能得到放大。因此,水电开发对干热河谷水热条件改变成为不可忽略的一个关键因素。水热条件的这一变化可能对与温度、湿度密切相关植物生长和物候规律产生影响。与之相关的水分循环、养分循环等关键生态过程也会随之发生变化,直接影响水源涵养、水土保持、固碳等生态系统服务能力<sup>[30]</sup>。生态系统格局-过程耦合的效应存在不确定性,以及对应的生态功能和服务的响应机理变化规律也不清楚。此外,当前研究多关注水电站开发的负效应,而对可能产生的积极影响缺少系统辨识。梯级电站开发存在建设、蓄水、运行等不同阶段,更加增添了电站开发对生态系统影响的复杂性。在金沙江梯级电站建设和运行的不同阶段,需要更加系统和完整的生态监测,并进一步加强数据集成和模拟预测研究。

### 3.2 水电开发对库区移民生计的影响

金沙江干热河谷流域大规模梯级电站开发是人类主动改造和利用自然资源的行为,水电开发这一外界干扰因子的加入,打破了原有干热河谷地区社会-生态系统的交互方式。在水电开发之前干热河谷农户生计普遍具有五大特点:一是自然资本受到自然灾害等不可控因素影响较大;二是农户的物质资本水平低不具有可转化性;三是农户几乎没有足够的金融资本来抵抗生计风险;四是不重视对人力资本的投入;五是交通闭塞导致社会资本薄弱。水电开发涉及到庞大的移民人口,光是金沙江下游四大电站涉及的四川、云南两省搬迁移民就有 30 余万人。移民安置是水电工程建设中的重要部分,若采取不适宜的安置方式,则容易产生“水土不服”的症状,对移民生计造成困难。

水电开发改变移民生计策略。随着我国移民政策的逐渐完善,移民安置方式从传统的补偿性安置转为开发性移民安置<sup>[51-52]</sup>,移民安置方式呈现多样化,移民的生产和生活方式更加多元化;安置区产业结构调整,促进特色农业、物流服务、建材建筑、旅游观光、餐饮娱乐等一二三产业融合发展,为移民就业提供多种渠道;此外梯级电站开发规模大,施工周期长,电站施工建设期也带动了当地就业,改变收入来源和工作性质,同时也刺激了当地经济结构和发展模式改变。

水电开发提高移民生计质量。水电开发所建造的交通和通信基础与移民安置区的基础设施,为农产品外运,产业园区建设创造了有利条件;移民可以通过政府提供的知识技能培训,提高工作技能和生活手段;电站不仅能提供流域范围内城乡充足的农业、工业和生活用水,还能保障下游城市的防洪安全;电站运行所获的收益与当地政府分享,直接提升了地区政府的财政收入,对提升居民福利、保护生态环境均有积极作用;而电站本身为了保障生产和运行安全所开展的生态保护和修复工程,也直接影响了干热河谷生态系统稳定性和质量。

生计模式转换存在潜在的生计风险。据测算金沙江中下游的移民约 90% 为农村移民<sup>[53]</sup>,一定数量农业人口的移入,将对地方原有的人口职业结构产生影响;移民搬迁后需要被动放弃虫草等林下资源,这类资源补偿基本为零,自然资本利用受损;金沙江下游水电开发淹没了大量适宜耕作的山谷田地,安置地耕地资源调整困难,土地宜耕性差,制约着农业安置模式的发展;少数民族因水电开发改变居住地,这将影响到少数民族文化的地域组合<sup>[54]</sup>和社会关系网络的重构,不可避免会出现一些非移民社会排斥行为从而影响民族团结和社会稳定。生计风险的叠加或交替发生时,生计将很有可能出现不可持续性,导致移民安置后返贫问题。我国干热河谷的水电开发既是机遇,也是挑战。电站的建设给干热河谷地区的经济发展带来跨越式千载难逢的机会,而如何做好水电移民安置工作是一项艰巨的任务。构建可持续的移民生计模式,是实现库区移民“搬得出、稳得住、能致富”,水电开发与移民和谐共赢的基础和前提。

### 3.3 水电开发对社会-生态系统互馈机制的影响

大型水利水电开发对干热河谷社会-生态系统的影响主要分为两个方面。首先,大型梯级电站的库容和规模巨大,截流蓄水等改变了区域原有的下垫面类型,直接影响局地气候、植被、土壤和微生物等关键过程,改变自然生态系统结构和功能<sup>[11, 55]</sup>;其次,大型梯级电站在建设和运营期间会影响人类社会系统,包括人口分布、土地利用、就业方式、产业结构、经济水平、城镇化发展等人类生产生活方式,从而间接对自然生态系统产生影响<sup>[56]</sup>。

当前干热河谷生态系统研究侧重于自然生态过程,人类活动驱动因子尚未有效识别,尤其缺乏社会-生态系统互馈机制研究。干热河谷脆弱生态区的生态承载能力较低,对人类活动干扰的敏感性较高<sup>[57]</sup>,长期以来形成一种独特的社会结构和民族文化模式,经济发展面临很大压力<sup>[58]</sup>,而经济发展水平又是生态保护的重要保障能力<sup>[59]</sup>。干热河谷地区的社会-经济-自然复合生态系统维持着脆弱平衡状态<sup>[60]</sup>,当前研究尚未有效厘清梯级电站开发对干热河谷“生产-生活-生态三生空间”的影响,而这种影响背后的自然-社会互馈机制更加缺乏清晰解析。因此,将梯级电站开发影响的自然过程和人文过程进行集成,揭示干热河谷社会-生态系统变化的驱动机制,对维护国家生态安全和推动流域高质量发展具有重要意义。

生态系统服务是人类从生态系统所获得的各种惠益,被视为链接自然生态系统和人类社会系统的桥梁和纽带<sup>[61]</sup>。生态系统服务是链接自然生态系统和人类社会系统的重要途径,亟待开展大型水利工程影响的生态系统服务权衡和协同机制研究。生态系统服务包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务等<sup>[61]</sup>,在自然过程和人类需求的影响下,生态系统服务之间存在着此消彼长的权衡关系或彼此增益的协同关系<sup>[60, 62]</sup>。在国内典型地区已经开展了生态系统服务权衡和协同方面的研究,比如黄土高原<sup>[63]</sup>、喀斯特地区<sup>[64-65]</sup>、城市群地区<sup>[66]</sup>等。基于生态系统服务的生态承载力和生态安全研究,为生态保护红线、山水林田湖草系统修复等国家战略提供了科学依据<sup>[67-68]</sup>。生态系统服务提升与科技扶贫的融合,在巩固脱贫成效和推进少数民族地区发展方面也发挥了重要作用<sup>[65]</sup>。生态系统服务权衡和协同机制将自然过程与人类活动联系起来,是评估和调控社会-经济-自然复合生态系统的重要依据<sup>[63, 69]</sup>,对于自然资源的合理配置与利用具有关键的指导意义(图2)。

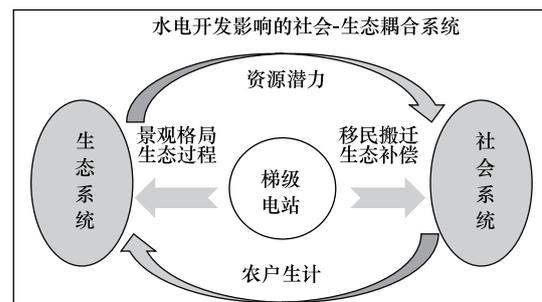


图2 水电开发影响的干热河谷社会-生态耦合系统

Fig. 2 The coupling of social-ecological systems affected by hydropower construction in hot-dry valleys of China

#### 4 未来研究展望

(1) 加强干热河谷生态系统演变的长期监测和分析,揭示水电开发影响的正负生态效应。干热河谷生态系统具有独特性,在水电开发影响下的生态系统变化规律尚无明确结论,尤其是梯级电站的大范围、长时间影响不明确。区域水汽增加后,一定程度囿于峡谷之中,有利于植物的生长,由此导致的碳氮循环会造成水分和养分利用效率的改变,进一步影响植物生产力和农作物产量的变化。因此,水电开发在不同尺度、不同时间段的正、负生态效应亟需深入和系统研究。

(2) 深入研究流域社会经济演变规律和驱动机制,促进生态保护与乡村振兴协调发展。认识人类活动影响下干热河谷生态系统服务变化的驱动机制,是协调人地关系的重要视角,在国家实施《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》、从脱贫攻坚迈向乡村振兴的大背景下,干热河谷地区能源开发、生态保护和人类福祉的关系需要进一步厘清。脆弱生态系统的保护与修复是践行生态文明战略的基本保障,基于生态保护与乡村振兴协调研究将为此提供解决方案。

(3) 完善流域生态资产价值评估和生态补偿机制,实现多重利益攸关方的互利共赢。干热河谷自然生态系统和人类社会系统的耦合作用,改变了生态系统服务的流动与供需,进而影响人类福祉。然而,基于生态系统服务的人地关系辨识与调控面临两大难题:一是干热河谷生态系统格局-过程-服务的级联效应不明确,生态系统服务响应机理尚需深入研究;二是大型水电站开发的直接和间接影响量化不够,生态系统服务与能源开发和人类福祉的关联机制不清楚。科学理解生态系统服务的权衡和协同机制,有利于指导生态系统管理实践,实现生态保护与高质量发展的“双赢”目标。

(4) 构建流域社会-生态系统耦合理论与方法,提出针对脆弱生态区未来可持续发展的社会-生态结构优化模式。针对干热河谷生态脆弱区,识别社会系统与生态系统的相互作用和复杂反馈机制,尤其要构建科学合理的社会-生态系统耦合协调评价指标体系,发展稳态转换识别方法,揭示稳态转换的驱动机制。在此基础上,构建耦合社会系统与生态系统的模型,将管理要素纳入考虑,模拟不同情景下社会-生态系统状态与区域可持续发展目标实现情况,从而提出统筹区域自然与社会需求的社会-生态结构优化模式(图 3)。

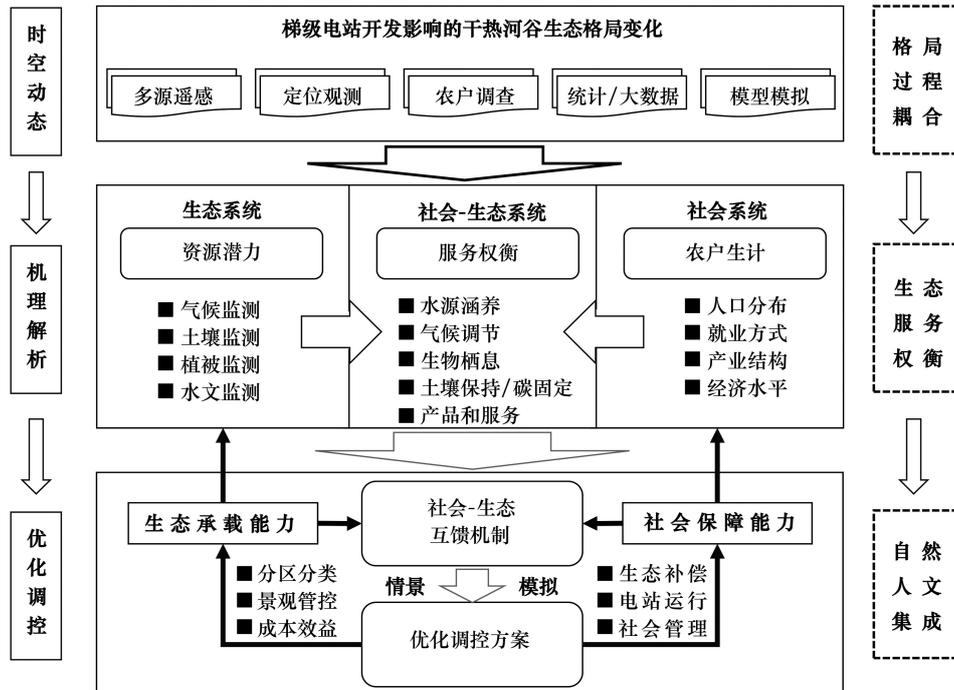


图 3 未来研究重点和生态调控方向

Fig.3 The research focuses and ecological optimization directions

参考文献 (References):

[ 1 ] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 64-69.

[ 2 ] 于贵瑞, 杨萌, 陈智, 张雷明. 大尺度区域生态环境治理及国家生态安全格局构建的技术途径和战略布局. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1141-1153.

[ 3 ] 陈发虎, 吴绍洪, 崔鹏, 蔡运龙, 张镱铨, 尹云鹤, 刘国彬, 欧阳竹, 马巍, 杨林生, 吴铎, 雷加强, 张国友, 邹学勇, 陈晓清, 谈明洪, 王训明, 包安明, 程维新, 党小虎, 韦炳干, 王国梁, 王五一, 张兴权, 刘晓晨, 李生宇. 1949—2019 年中国自然地理学与生存环境应用研究进展. 地理学报, 2020, 75(9): 1799-1830.

[ 4 ] 樊杰. “人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石. 地理学报, 2018, 73(4): 597-607.

[ 5 ] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学. 地理科学, 2020, 40(8): 1221-1234.

[ 6 ] 何永彬, 卢培泽, 朱彤. 横断山—云南高原干热河谷形成原因研究. 资源科学, 2000, 22(5): 69-72.

[ 7 ] Whitmore T J, Brenner M, Engstrom D R, Song X L. Accelerated soil erosion in watersheds of Yunnan Province, China. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 49(1): 67-72.

[ 8 ] 戴佳栋, 张泽洪, 张建辉, 贾立志, 王勇, 许海超. 干热河谷区耕作侵蚀作用下坡面水力侵蚀特性. 水土保持学报, 2021, 35(1): 116-124, 131-131.

[ 9 ] Wang W, Wang W J, Li J S, Wu H, Xu C, Liu T. The impact of sustained drought on vegetation ecosystem in southwest China based on remote sensing. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1679-1691.

[ 10 ] Martin D M. Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. Restoration Ecology, 2017, 25(5): 668-673.

[ 11 ] Grill G, Lehner B, Thieme M, Geenen B, Tickner D, Antonelli F, Babu S, Borrelli P, Cheng L, Crochetiere H, Ehalt Macedo H, Filgueiras R, Goichot M, Higgins J, Hogan Z, Lip B, McClain M E, Meng J, Mulligan M, Nilsson C, Olden J D, Opperman J J, Petry P, Reidy Liermann C, Sáenz L, Salinas-Rodríguez S, Schelle P, Schmitt R J P, Snider J, Tan F, Tockner K, Valdujo P H, van Soesbergen A, Zarfl C. Mapping the

- world's free-flowing rivers. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221.
- [12] Beauchamp E, Hiron M, Brown K, Milner-Gulland E. Twenty priorities for future social-ecological research on climate resilience. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 105006.
- [13] 吴绍洪, 赵东升. 中国气候变化影响、风险与适应研究新进展. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(6): 1-9.
- [14] 潘韬, 吴绍洪, 何大明, 戴尔阜, 刘玉洁. 纵向岭谷区地表格局的生态效应及其区域分异. *地理学报*, 2012, 67(1): 13-26.
- [15] 杨济达, 张志明, 沈泽昊, 欧晓昆, 耿宇鹏, 杨明玉. 云南干热河谷植被与环境研究进展. *生物多样性*, 2016, 24(4): 462-474.
- [16] 邵方丽. 干热河谷典型地区植被恢复研究综述. *林业建设*, 2017, (1): 22-27.
- [17] 刘方炎, 李昆, 孙永玉, 唐国勇, 张春华. 横断山区干热河谷气候及其对植被恢复的影响. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(12): 1386-1391.
- [18] 柴宗新, 范建容. 金沙江干热河谷植被恢复的思考. *山地学报*, 2001, 19(4): 381-384.
- [19] 黄成敏, 何毓蓉. 云南省元谋干热河谷的土壤抗旱力评价. *山地研究*, 1995, 13(2): 79-84.
- [20] 周麟. 云南省元谋干热河谷的第四纪植被演化. *山地研究*, 1996, 14(4): 239-243.
- [21] 金振洲. 云南元江干热河谷半萨王纳植被的植物群落学研究. *广西植物*, 1999, 19(4): 289-302.
- [22] 杨万勤, 王开运, 宋光煜, 官阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷典型区生态安全问题探析. *中国生态农业学报*, 2002, 10(3): 120-122.
- [23] 张建利, 沈蕊, 施雯, 柳小康, 欧晓昆. 金沙江流域干热河谷上中下游草地植物群落结构与相似性. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1272-1277.
- [24] Klenner W, Walton R, Arsenault A, Kremsater L. Dry forests in the Southern Interior of British Columbia: historic disturbances and implications for restoration and management. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(10): 1711-1722.
- [25] 纪中华, 方海东, 杨艳鲜, 潘志贤, 沙毓沧. 金沙江干热河谷退化生态系统植被恢复生态功能评价——以元谋小流域典型模式为例. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1383-1389.
- [26] 姚鑫, 戴福初, 陈健. 金沙江干热河谷区滑坡遥感解译研究. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(3): 18-21.
- [27] 田园, 王静, 胡燕. 我国干热河谷地区土壤侵蚀研究进展. *中国水土保持*, 2013, (6): 51-54.
- [28] Dong Y F, Xiong D H, Su Z A, Li J J, Yang D, Shi L T, Liu G C. The distribution of and factors influencing the vegetation in a gully in the Dry-hot Valley of southwest China. *CATENA*, 2014, 116: 60-67.
- [29] Zhang L L, Zhao Z Q, Zhang W, Tao Z H, Huang L, Yang J X, Wu Q X, Liu C Q. Characteristics of water chemistry and its indication of chemical weathering in Jinshajiang, Lancangjiang and Nujiang drainage basins. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 506.
- [30] Duan X W, Bai Z W, Rong L, Li Y B, Ding J H, Tao Y Q, Li J X, Li J S, Wang W. Investigation method for regional soil erosion based on the Chinese Soil Loss Equation and high-resolution spatial data: case study on the mountainous Yunnan Province, China. *CATENA*, 2020, 184: 104237.
- [31] 贾立志, 张泽洪. 不同逆坡耕作强度对干热河谷区坡耕地水蚀的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 14-19, 27-27.
- [32] 游翔, 张闻多, 张素, 孔祥周, 熊东红, 李琬欣, 刘琳. 攀枝花干热河谷区坡面产流产沙研究. *中国水土保持*, 2020, (6): 28-30.
- [33] Duan X W, Zhang G L, Rong L, Fang H Y, He D M, Feng D T. Spatial distribution and environmental factors of catchment-scale soil heavy metal contamination in the dry-hot valley of Upper Red River in southwestern China. *CATENA*, 2015, 135: 59-69.
- [34] 李昆, 刘方炎, 杨振寅, 孙永玉. 中国西南干热河谷植被恢复研究现状与发展趋势. *世界林业研究*, 2011, 24(4): 55-60.
- [35] 李鹏, 李占斌, 郑郁. 不同土地利用方式对干热河谷地区土壤可蚀性的影响. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 16-19.
- [36] 刘琳, 熊东红, 张闻多, 李琬欣, 袁勇, 张宝军, 张信宝. 元谋干热河谷平沟建园土地治理工程效益及生态风险. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 251-258.
- [37] 靳永翥, 丁照攀. 精准扶贫战略背景下项目制减贫绩效的影响因素研究——基于武陵山、乌蒙山、滇桂黔三大集中连片特困地区的调查分析. *公共行政评论*, 2017, 10(3): 46-70.
- [38] 李苗裔, 王石英, 蒋蓉, 张伟. 干热河谷区土地利用/覆被和景观格局变化分析——以得荣县为例. *四川农业大学学报*, 2012, 30(1): 60-66.
- [39] 程春田, 武新宇, 申建建, 李刚, 廖胜利, 刘本希. 亿千瓦级时代中国水电调度问题及其进展. *水利学报*, 2019, 50(1): 112-123.
- [40] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题. *电力系统自动化*, 2021, 45(16): 29-36.
- [41] 何大明, 吴绍洪, 彭华, 杨志峰, 欧晓昆, 崔保山. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 338-344.
- [42] 崔鹏, 王道杰, 范建容, 王玉宽, 贺秀斌, 朱波, 韦方强, 王根绪. 长江上游及西南诸河区水土流失现状与综合治理对策. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 43-50.
- [43] Ziv G, Baran E, Nam S, Rodríguez-Iturbe I, Levin S A. Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(15): 5609-5614.
- [44] Deemer B R, Harrison J A, Li S Y, Beaulieu J J, DelSontro T, Barros N, Bezerra-Neto J F, Powers S M, dos Santos M A, Vonk J A. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience*, 2016, 66(11): 949-964.
- [45] Anderson E P, Jenkins C N, Heilpern S, Maldonado-Ocampo J A, Carvajal-Vallejos F M, Encalada A C, Rivadeneira J F, Hidalgo M, Cañas C

- M, Ortega H, Salcedo N, Maldonado M, Tedesco P A. Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams. *Science Advances*, 2018, 4(1): eaao1642.
- [46] Winemiller K O, McIntyre P B, Castello L, Fluet-Chouinard E, Giarrizzo T, Nam S, Baird I G, Darwall W, Lujan N K, Harrison I, Stiassny M L J, Silvano R A M, Fitzgerald D B, Pelicice F M, Agostinho A A, Gomes L C, Albert J S, Baran E, Petrerre M, Zarfl C, Mulligan M, Sullivan J P, Arantes C C, Sousa L M, Koning A A, Hoetinghaus D J, Sabaj M, Lundberg J G, Armbruster J, Thieme M L, Pet alry P, Zuanon J, Vilara G T, Snoeks J, Ou C, Rainboth W, Pavanelli C S, Akama A, Soesbergen A V, Sáenz L. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science*, 2016, 351(6269): 128-129.
- [47] Ansar A, Flyvbjerg B, Budzier A, Lunn D. Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. *Energy Policy*, 2014, 69: 43-56.
- [48] 陈洋, 王玮, 罗龙海, 张俊鹏, 刘欢. 金沙江干热河谷地带大型水电工程建设区水土流失防治措施探讨——以白鹤滩水电站为例. *水电与新能源*, 2018, 32(1): 68-71, 78-78.
- [49] Adamoli J, Sennhauser E, Acero J M, Rescia A. Stress and disturbance: vegetation dynamics in the dry Chaco region of Argentina. *Journal of Biogeography*, 1990, 17(4/5): 491-500.
- [50] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir-A unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [51] 朱烈夫, 殷浩栋, 张志涛, 柯水发. 生态补偿有利于精准扶贫吗? ——以三峡生态屏障建设区为例. *西北农林科技大学学报: 社会科学版*, 2018, 18(2): 42-48.
- [52] 马巍, 骆辉煌, 禹雪中. 水电工程移民安置方式研究综述. *中国水能及电气化*, 2011, (4): 33-40.
- [53] 孔令强, 施国庆, 张峻荣. 金沙江中下游水能资源开发与农村移民安置. *人民长江*, 2007, 38(5): 104-107.
- [54] 包广静. 水电移民安置中的文化作用机制分析及其对策研究——以怒江为例. *西北人口*, 2011, 32(1): 88-90, 94-94.
- [55] 赵文娟, 杨世龙, 王潇. 基于 Logistic 回归模型的生计资本与生计策略研究——以云南新平县干热河谷傣族地区为例. *资源科学*, 2016, 38(1): 136-143.
- [56] 赵文娟, 杨世龙, 徐蕊. 元江干热河谷地区生计资本对农户生计策略选择的影响——以新平县为例. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(S2): 162-165.
- [57] Lin Y M, Cui P, Ge Y G, Chen C, Wang D J, Wu C Z, Li J, Yu W, Zhang G S, Lin H. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 13-26.
- [58] 杨庭硕, 伍孝成. 民族文化与干热河谷灾变的关联性. *云南社会科学*, 2011, (2): 39-44.
- [59] Itekhhar M S, Polyakov M, Ansell D, Gibson F, Kay G M. How economics can further the success of ecological restoration. *Conservation Biology*, 2017, 31(2): 261-268.
- [60] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [61] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 罗跃初. 生态系统服务功能管理研究进展. *生态学报*, 2013, 33(3): 702-710.
- [62] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [63] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [64] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [65] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 曾馥平. 科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径. *中国科学院院刊*, 2020, 35(10): 1264-1272.
- [66] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 郭旭东. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望. *中国土地科学*, 2018, 32(12): 82-89.
- [67] 高吉喜, 张向晖, 姜响, 欧晓昆, 何大明, 石建斌. 流域生态安全评价关键问题研究. *科学通报*, 2007, 52(S2): 216-224.
- [68] 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.
- [69] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.