

DOI: 10.5846/stxb201905291106

应凌霄,王军,周妍.闽江流域生态安全格局及其生态保护修复措施.生态学报,2019,39(23):8857-8866.

Ying L X, Wang J, Zhou Y. Ecological-environmental problems and solutions in the Minjiang River basin, Fujian Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8857-8866.

闽江流域生态安全格局及其生态保护修复措施

应凌霄,王军*,周妍

自然资源部国土整治中心自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035

摘要:流域及其生态环境问题受到国内外的广泛关注,我国面临的流域生态环境问题突出亟待解决,体现流域生态系统完整性的山水林田湖草生命共同体理念对我国流域生态保护修复工作具有重要意义。以福建省山水林田湖草生态保护修复试点的工程区——闽江流域为例,在介绍其生态环境特征的基础上,通过梳理分析,根据区域生态功能的重要性构建“一江一带一区一屏”的闽江流域总体生态安全格局,面临的主要生态环境问题包括闽江水环境污染、流域岸带水土流失、矿区生态破坏、森林屏障和生物多样性退化等一系列威胁;分析提出了闽江水环境综合治理、干支流沿岸带水土流失防治、矿区废弃土地修复、武夷山地等重要生态屏障森林和生物多样性保护等主要任务及相应工程措施,体现了流域整体性、系统性的保护修复需求和内在逻辑;讨论了监测、评价等保障措施,为改善闽江流域生态系统和开展山水林田湖草生态保护修复工程提供科学依据和实践经验。
关键词:闽江流域;生态安全格局;生态保护修复任务措施

Ecological-environmental problems and solutions in the Minjiang River basin, Fujian Province, China

YING Lingxiao, WANG Jun*, ZHOU Yan

Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

Abstract: The ecological and environmental issues associated with river basin have received worldwide attention, and in China, the problems associated with river basins urgently require solutions. By promoting the integrity of watershed ecosystems, the concept of community of shared life composed of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands is of great significance to the ecological protection and restoration of river basins in China during the new era. In the present study, the Minjiang River basin (Fujian Province, China), which is a national pilot project area for ecological protection and restoration was concerned. Based on the introductions to its ecological-environmental conditions, and the importance of regional ecological functions within the Minjiang River basin *via* literature review and analysis, the overall ecological security pattern composed of the river, riparian zones, mining areas, and ecological barriers were proposed. The present study also revealed a series of related threats, such as river pollution, riparian hillside soil erosion, mining destruction, forest barriers, and biodiversity degradation. Considering the ecological security pattern and current ecological-environmental issues, the present proposes major tasks and corresponding engineering measures, including the treatment of water in the Minjiang River, management of soil erosion along riparian zones, repair of abandoned land within mining areas, protection of forests and biodiversity in the Wuyi Mountains and other important ecological barriers, thereby reflecting the integrated and systematic requirements and intrinsic logic for basin protection and restoration. Supporting measures such as monitoring

基金项目:国家自然科学基金项目(41771207)

收稿日期:2019-05-29; 修订日期:2019-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangjun@lrcr.org.cn

and evaluation are also discussed. This study provides a scientific basis and practical experience for improving ecosystems in the Minjiang River basin and for implementing national projects of ecological protection and restoration in China.

Key Words: Minjiang River basin; ecological security pattern; ecological protection and restoration task and measure

流域是由自然和社会多种特征组分协同构成的、具有层次结构和整体功能的复杂系统^[1],是生态保护和修复乃至地球系统科学领域研究的热点^[1-4]。国外众多研究表明,流域生态环境往往存在着水环境污染^[5-7]、水土流失^[8-10]、矿山景观生态破坏^[11-13]和森林与生物多样性退化^[14-16]等问题,需要采取相应的措施综合治理。我国的流域生态环境同样也面临着类似的问题,主要有森林等自然植被减少、水土污染、水土流失、自然地质灾害威胁等等^[17]。例如,王磊等^[18]的研究表明近年来太湖流域水环境受到工业化污染的持续强烈影响;段锦等^[19]揭示了东江流域植被趋于人工化,水源涵养功能在研究时期内一直下降,水土流失风险加大,同时生物多样性保护功能降低;Liu等^[20]关注了鄱阳湖水系的梅江流域,认为20世纪森林砍伐导致的土壤持水能力减弱的问题,在植树造林后并没能得到完全恢复;孔令桥等^[21]指出长江流域的快速城镇化导致了自然生态系统退化;Wang等^[22]在黄土高原诸河流域的研究表明,随着流域面积的增加,土地利用和管理方式对土壤侵蚀的影响增大;钟莉娜等^[23]认为建溪流域土地整治的实施,使流域内草地、水域的灾害风险略有增大;刘怡娜等^[24]揭示了长江流域城镇扩张和农业生产对水质净化功能的显著负作用。

党的十八大以来,党中央、国务院高度重视生态环境保护修复工作,从2013年习近平总书记首次提出山水林田湖草生命共同体的理念,到2015年党的十八届五中全会提出“筑牢生态安全屏障,坚持保护优先、自然恢复为主,实施山水林田湖生态保护修复工程”,从2017年党的十九大将建设美丽中国作为全面建设社会主义现代化国家重大目标、提出要统筹山水林田湖草生态系统治理,到2019年的《政府工作报告》继续要求“加强生态系统保护修复。推进山水林田湖草生态保护修复工程试点”,都强调了生态保护修复要以生命共同体重要理念为指导,对山上下、地上下、陆地海洋以及流域上下游进行整体保护、系统修复、综合治理,真正改变治山、治水、护田各自为战的工作局面^[25-26]。从而,对于单元结构完整而功能复杂的流域生态系统,其保护修复无疑应作为山水林田湖草生态工程的重要试点和山水林田湖草生命共同体理念的集中体现;基于流域的整体性和系统性,根据流域生态系统的结构功能特征,总结其面临的主要生态环境问题,提出总体生态安全格局和综合性保护修复措施^[27-28],才能实现我国流域生态环境问题的有效解决,促进流域的可持续发展。在这样的背景下,福建省成为近年来设立的我国第一个国家生态文明试验区,被赋予开展生态文明改革和建设的经验积累和路径探索的重任;同时,作为福建省的母亲河,闽江流域于2018年正式开始实施山水林田湖草生态保护修复工程试点。

然而有关调查研究表明,我国前几年启动的山水林田湖草生态保护修复工程试点,已经出现了拼凑项目和盲目实施等有悖于生命共同体理念的弊端^[29];流域生态保护修复存在着偏离山水林田湖草“整体保护、系统修复、综合治理”的风险,而面临着以往生态建设工程中生态系统思维欠缺、工程项目协同机制和集成评估不足等问题^[30-32],甚至还会导致流域一边治理一边破坏的后果^[33]。本文拟通过总结分析相关文献,探求解决流域山水林田湖草生态保护修复工程实施中整体性和系统性不足问题,揭示工程实施遵循的“生态安全格局—生态环境问题—保护修复任务措施”这一内在逻辑;具体研究途径为,根据闽江流域生态特征和重要功能辨析提出闽江流域总体生态安全格局,在总体生态安全格局下梳理其面临的主要生态环境问题,针对相应的问题探讨生态保护修复的任务和措施,从而贯彻生态保护修复的整体性和系统性要求,为新时代流域生态建设和实施流域山水林田湖草生态保护修复工程提供参考和借鉴。

1 闽江流域概况

闽江流域范围位于东经 116°23′—119°43′、北纬 25°23′—28°19′之间,发源于福建省西部的武夷山脉,最

后由福州市闽江河口流入台湾海峡,流域面积达 6.1 万 km^2 ,约占福建全省面积的一半^[34](图 1)。闽江流域属亚热带季风气候,气候温暖湿润,年均气温 18°C 左右,年降水量约为 1700mm,气象灾害则以暴雨洪涝和台风灾害为主。闽江流域在我国和福建省社会经济中都占有重要地位,是海峡西岸经济区的重要组成部分;同时,闽江流域位于我国重要生态屏障——南方丘陵山地带,是我国东南部地区具有水源涵养、土壤保持和生物多样性保护等重要生态功能的地区,保障着我国东南地区和台湾海峡生态安全。



图 1 闽江流域位置

Fig.1 Location of the Minjiang River basin

森林生态系统是闽江流域面积最大的生态系统,约占流域面积的 75%^[35]。闽江流域属亚热带常绿阔叶林一级分布区,其中武夷山地具有我国东南现存面积最大、保留最为完整的中亚热带常绿阔叶林森林生态系统,在全球同纬度带中具有典型性和代表性。河流生态系统是闽江流域内起联系作用的核心部分,流域内河网密度为 $0.0907\text{km}/\text{km}^2$ 。上游河流沿山谷发育,构成溪流众多、径流量大、流域面广的树状水系;中游段主流比降较大,河谷狭窄,滩多水急;下游河床比小,流速缓慢,大部分属于漫滩曲流型河流。

闽江流域生物多样性较高,植物种类 2297 种,其中高等植物 166 科 841 属 2002 种,有苏铁、南方红豆杉、水松、伯乐树(钟萼木)、银杏等国家一级保护植物 5 种,以及刺桫欏、粗齿桫欏、金毛狗等二级保护植物 28 种。流域野生动物资源丰富,哺乳类 110 多种,鸟类 540 多种,爬行类 110 余种,两栖类 25 种,鱼类 174 种,昆虫 5000 多种^[36],其中很多被列为国家和省级保护物种。闽江口湿地和三明市沙溪流域明溪段等地还位于全球性的候鸟迁徙通道,是亚洲东部鸟类迁徙的重要停歇站和冬候鸟的越冬地、夏候鸟的繁殖地。

2 总体生态安全格局

汤小华对福建省生态功能区划的研究表明,生态系统服务功能综合评价的极重要地区和重要地区主要分布于闽西和闽中山地,具有关键的生态屏障作用^[37];而闽江流域涵盖了这一生态屏障的大部分区域,包括流域上游的武夷山地和中游的鹫峰山-戴云山地,是我国大面积亚热带常绿阔叶林重要分布区和水源涵养区,也是我国生物多样性保护的重点地区^[38-40]。山地靠近闽江流域主要干支流的坡面一直延伸到河岸的区域,是流域生态屏障与闽江水系的直接联系地带,也是自然过程和工农业生产生活等人为活动频繁发生的地带,往往具有重要的水土保持功能^[41-42]。因此,这一地带与流域核心——水系,以及生态屏障一起构成了流域总体生态安全骨架,承担着闽江流域水源涵养、土壤保持、生物多样性保护等重要生态功能。同时,鉴于“青山挂白”的矿山在福建省的广泛分布和所受到的特殊关注,矿山区域一直被作为生态保护修复的重点对象^[43-45];恢复矿区自然生态环境,是对闽江流域生态功能的重要补充和对总体生态安全的重要提升。

从流域整体性和系统性的保护修复出发,构建闽江流域“一江一带一区一屏”的总体生态安全格局(图2)。“一江”指闽江水系,涵盖了闽江干流及支流的水环境,是闽江流域的核心组成部分,具有水质净化、水生生物多样性保护等主要生态功能。“一带”指闽江干流及主要支流沿线第一重山的坡面带,具有水土保持的重要功能,同时也是人为活动和自然条件变化等地表过程频繁的区域。“一区”指分布在流域范围内的矿区,是闽江流域生态修复的特殊区域,恢复其自然生态功能对生态安全格局有着重要的补充和完善作用。“一屏”指流域的山地生态屏障,包括源头和上游的武夷山地生态屏障和中游的鹫峰山-戴云山地生态屏障,具有重要的水源涵养和生物多样性保护功能,是流域生态保护修复的重点区域。按照整体保护、系统修复、区域统筹、综合治理的思路,基于总体生态安全格局,以“一江一带一区一屏”对应的生态环境问题导向,提出生态保护修复的主要任务和工程措施,以期使流域生态环境得到显著改善,实现生态保护修复与经济社会发展协同共赢,从而为全国树立生态文明建设新样板和山水林田湖草生态保护修复实践新经验^[46]。

3 主要生态环境问题

闽江流域生态环境及其变化对流域总体生态安全格局深刻影响,在福建生态省和海峡西岸经济区建设中起着关键性的作用^[47]。流域内大规模的人类活动带来的负面效应导致了流域生态环境自我调节和自然恢复功能逐渐减弱,引起了日趋严重的生态安全问题,如“一江”水环境污染、“一带”水土流失、矿区生态破坏、森林屏障和生物多样性面临威胁等等^[48]。

3.1 水环境污染问题突出

20世纪八九十年代以来,闽江流域大量的农业生产和生活污水、工业废水和废弃物排放,江河污染日益严重,河道变窄,水质恶化^[49]。2005年上半年,闽江干支流Ⅲ类水质达标率仅有83.7%^[50];另外局部河段网箱养殖过密,造成水体富营养化^[51]。之后虽然地方政府大力开展相关整治工作,整体水质有所提升,Ⅰ—Ⅱ类水质占96.1%^[52],但闽江干支流COD、氮磷、油类和重金属等主要排放总量仍然较高,2017年排放总量达120.43万t^[53],达不到生活用水要求的Ⅲ类水质仍然存在,主要分布于闽江干流中游和下游大樟溪流域^[52],以及闽江口^[54]。究其原因,畜禽养殖和农业面源污染一直是造成闽江流域污染的重要来源之一,中上游地区(如南平市境内建溪流域和三明市境内金溪、九龙溪-沙溪流域)尤为严重^[55-56];沿江生活污水处理设施建设滞后,生活源水污染占比仍然较大,生活污水排放量相当于工业污水排放量的1倍以上^[57];重工业企业沿闽江上游各支流两岸分布,产业结构性与布局性带来的环境风险十分突出^[58]。

3.2 水土流失依然严重

闽江流域是福建省水土流失最为严重的地区之一,根据《全国水土保持规划(2015—2030年)》,福建省有22个水土流失治理重点县,而其中闽江流域就占了11个;流域水土流失面积大,仍有大面积的严重的水土流失区亟待治理,截至2015年底,水土流失总面积50.23万hm²,水土流失率8.24%,其中,中度及以上流失面

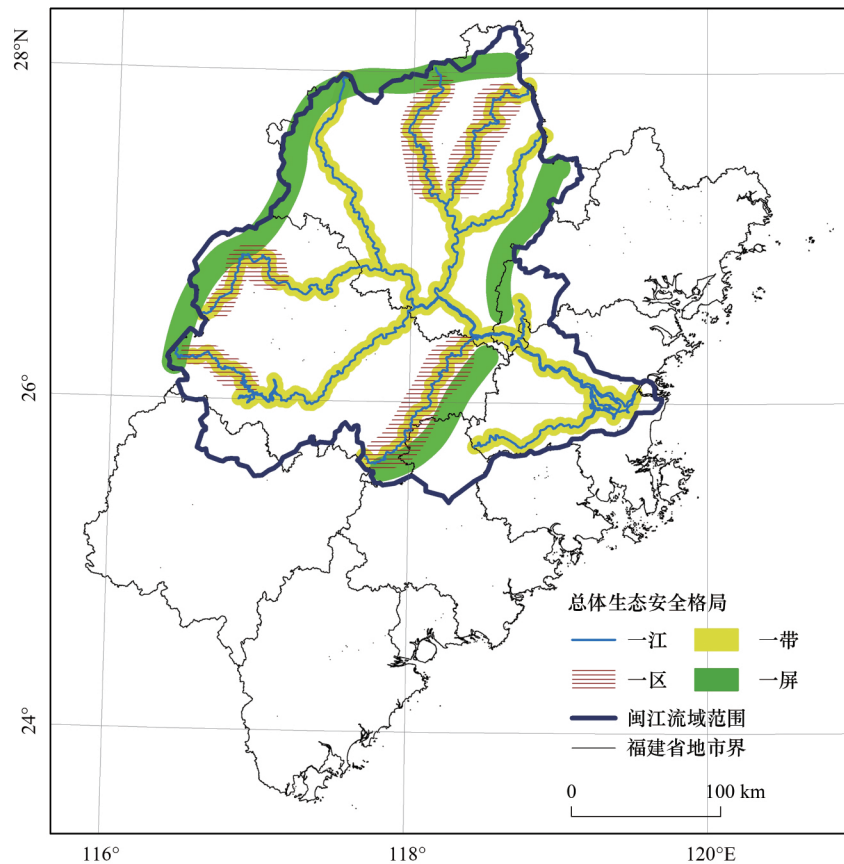


图2 闽江流域总体生态安全格局

Fig.2 Ecological security pattern of the Minjiang River basin

积 24.54 万 hm^2 , 占 49%。流域上游是闽西山地, 其主要干支流两侧坡度陡峭, 红壤广泛发育加上水保护措施不到位使得水土流失最为严重^[59], 同时由于森林群落结构的不合理导致其中林下水土流失现象尤为突出^[60-61]; 流域中游主要干支流沿岸带局部分布缓丘盆谷, 这些地区近年来人为活动加剧, 城市建设、交通基础设施建设、矿产开采以及果园茶园开发, 造成大面积的新增水土流失^[62]; 另外, 一些河道两岸“边治理、边破坏”、“一方治理、多方破坏”的现象依然存在^[50], 生态基础仍很脆弱, 容易反复。

3.3 矿区生态破坏明显

闽江流域是福建省重要的矿产资源宝库, 大量矿区开采各类矿石, 对地方经济发展做出巨大贡献^[63]。然而, 长期的开发和加工对生态环境影响严重, 突出表现为以下方面。首先是矿点多, 废弃矿山和无主矿山多, 主要分布于建溪流域上游、九龙溪和闽江源-金溪等流域, 其开采过程中形成众多高陡露采边坡和废渣堆, 易发生崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害, 同时压占和损毁大量的土地资源导致地形地貌景观和天然植被破坏, 生态环境严重受损^[64-65]。另外, 铅锌等有色金属开发还会产生大量重金属污染物, 闽江中上游是福建省最重要的铅锌矿开采区, 铅锌矿石开采、选矿和冶炼产业散布, 其中以尤溪流域大田县、尤溪县等地重金属本底最高, 不但会造成当地农作物产品重金属污染, 还会进入水系对下游流域和海洋生态造成负面影响^[64, 66]。

3.4 森林和生物多样性面临退化威胁

21 世纪以来, 闽江流域森林覆盖率有所提高, 目前约为 75%^[35]; 但林分质量较低, 森林可持续性处于中等偏弱状态, 生态功能面临退化威胁, 主要体现在以下几个方面: 一是天然林严重退化, 占森林面积比由 1978 年的 75.7% 降低到 20 世纪末的 52.3%^[67], 尤以闽江源等上游山地减少最甚^[41, 68], 而人工林和经济林的比例提高; 二是人工造林的林种单一, 林分结构中针叶林和阔叶林比例失调, 杉木和马尾松占绝大多数, 而阔叶林

所占比例大幅下降,针叶林阔叶林面积比由 20 世纪 80 年代的 1.46:1 到 21 世纪变为 4.65:1^[69],从而导致上游各一级支流流域森林水源涵养功能下降^[70];三是从龄组结构看,森林后备资源贫乏,用材林消耗过度,低龄化趋势明显,中幼林面积占 85% 以上^[67],制约了森林资源可持续发展。

闽江流域森林生态功能面临威胁,也使生物多样性受到严峻挑战^[71-72]。一是上游陆域生境局部恶化^[35],主要是在闽江源-金溪和建溪流域上游,由于森林生态功能降低,环境污染,导致生态系统复杂性降低,造成动植物生境恶化。二是中下游水域动物栖息地锐减和迁徙通道受阻^[73-74],河道采砂、河岸取土、占用河滩地等现象仍然存在,同时流域梯级电站开发率高达 85%^[75],数量庞大的各类塘坝隔断鱼类洄游通道,部分鱼类产卵场被破坏,对水生动物多样性保护造成重大影响,尤其造成下游水口水库区及其上游段鱼类种类减少^[74]。三是流域自然保护区保护能力不足^[76-77],突出表现为武夷山等重要地区保护区面积不足,各类保护区分散,市县级保护区管理粗放,斑块式保护小区变动随意性大;一些自然保护区中还分布有村落^[78],酒店农家乐等服务设施缺乏生活污水、垃圾的处理转运设施,面源污染进入到保护区中,降低保护区生境质量。四是下游河口段外来物种入侵呈上升态势^[79-80],互花米草、水葫芦、空心莲子草等对生态环境的危害较大^[81],防控形势仍然严峻,生态安全受到严重威胁。

4 生态保护修复任务和措施

4.1 生态保护修复主要任务

4.1.1 实施水环境综合治理

针对“一江”开展闽江流域水环境综合治理。着眼于流域多功能特征,上下游协调,分级分类实施,系统推进水污染防治、水生态保护和水资源管理,全面提升闽江流域水环境质量,降低闽江入海的有机物、氨氮和重金属总量,改善闽江入海水质,改变台湾海峡海西侧海水水质“亚健康”状态,构筑台湾海峡生态安全屏障^[82]。

4.1.2 加强水土流失防治

对于“一带”形成干支流流域联动,综合防治水土流失。以支流为骨架、以小流域为单元、以自然恢复为主、因地制宜、系统治理的原则^[55],促进干流和主要支流沿线第一重山的自然植被保护和恢复,对涉及人类活动的流域坡耕地、茶园、竹林、马尾松林及崩岗等土地利用通过梯田改造、林草植被恢复与改良、沟道防护等措施进行全面治理^[83]。

4.1.3 开展废弃矿区修复

对分布在流域范围内的矿区实施综合性的生态修复。根据“宜耕则耕、宜林则林、宜园则园、宜水则水”的原则,对试点区内历史遗留废弃矿山恢复损毁土地使用功能^[84-85];同时在矿山修复过程中,要与周边生态环境相结合,对有条件区域考虑与后期规划相衔接,为地方政府下一步将引入社会资本打造矿山遗址公园提供基础,实现废弃矿山资源化^[85]。

4.1.4 强化森林和生物多样性保护

对于流域的生态屏障根据自然生态系统服务类型强化主导功能。严格保护天然林和生态公益林,控制林木资源消耗型项目建设,对林地退化的区域进行森林抚育,提高常绿阔叶林比例,改善森林结构,增强水源涵养、土壤保持等重要生态功能^[55];加强自然保护区的建设、监督和管理,大力建设自然保护区群网,禁止各种破坏自然资源和产生环境污染的开发建设活动,以维护生物多样性,保护和修复我国东南生物基因宝库^[76]。

4.2 生态保护修复工程措施

4.2.1 水环境治理与生态修复工程

基于流域水环境存在的一系列污染问题和生态保护修复任务,形成相应的工程措施^[51, 86-87]: 1) 水源地保护工程,使管控(封禁)措施、水源涵养林建设和湿地保护修复等多措并举,主要针对于各主要支流源头; 2) 农村面源污染治理工程,包括垃圾处理和污水处理设施建设,以及畜禽养殖和水产养殖污染源综合整治,分

布于流域干支流两岸城镇乡村的人类活动区; 3) 已污染水体修复工程, 进行淤积物、污染物清理处置, 以及应用人工湿地、生态浮岛、曝气复氧、生物膜法等生物净化, 尤其注意流域上游和下游到河口段的污染水体治理; 4) 河道综合整治与水资源调配工程, 实施疏浚河道、建设生态护岸和堤防等措施。

4.2.2 水土流失防治及农地生态功能提升工程

针对水土流失问题和防治任务, 加强闽江源区天然林保护和流域上游沿线防护林建设和保护^[41, 68]; 在流域中游沿线第一重山坡面带开展梯田改造及配套设施建设、林草植被恢复与改良、沟道防护为主的水土流失治理工程, 具体包括退耕还林还草、坡改梯、坡面水系工程建设、生态防护林和生态堤岸等防护设施建设等内容^[88], 同时配合实施农用地生态功能提升工程, 包括整治田块、改良土壤、建设灌排设施、整修田间道路、完善农田防护与生态环境保持体系、配套农田输配电设施和灾毁土地修复等一系列措施^[83, 89]。

4.2.3 废弃矿山生态修复和地质灾害防治工程

根据废弃矿山的分布及其造成的环境破坏和地质灾害威胁等问题, 结合其治理任务, 需要采取以下工程措施^[90-91]。在流域上游和源头区域的矿区, 大力加强土地整治和植被恢复, 重塑废弃排土场地形地貌、再造和改良土壤生境、重建植被和优化矿山景观; 对于中游尤溪流域等地的重金属矿山分布区, 还要重点实施水土污染治理工程, 通过酸性土壤改良、增施有机菌肥和磷肥、种植吸附能力强的植物和湿地处理等措施对酸性水土污染和重金属污染进行综合治理; 所有矿区还有其他地质灾害易发地都要开展地灾防治工程, 采取截排水、支挡和主动加固等措施对稳定性差、危险性大、危害程度高、难以搬迁的重要滑坡地质灾害点进行综合防治。

4.2.4 森林和生物多样性保护工程

由于流域森林人工化问题突出、生态系统破碎化程度高、水源涵养功能较弱和生物多样性保护面临较大的压力, 需要实施相应的保护修复工程^[55, 81, 92]。一是森林生态功能提升工程, 主要是划定武夷山地、鹫峰山-戴云山地集中连片的生态保护红线区, 加大生态屏障的天然林和生态公益林保护力度, 推进亚热带常绿阔叶林的抚育和恢复; 二是湿地保护恢复工程, 对于上游山地湖泊湿地、闽江下游及河口湿地, 改善湿地微气候和水循环, 提供亲水空间, 去除水体中的有机污染, 控制互花米草等外来入侵植物; 三是重要候鸟迁徙通道保护与修复工程, 特别针对沙溪流域的国际候鸟通道, 恢复通道栖息地基底自然生态环境、进行物种选育和培植、优化群落结构; 四是自然保护区建设和提升工程, 开展保护能力建设, 改善保护区自然村人居环境。

5 结论和讨论

闽江流域是维持我国东南丘陵山地区和台湾海峡生态安全的重要部分, 具有“一江一带一区一屏”总体生态安全格局, 同时面临着水环境污染问题突出、水土流失严重、矿区生态破坏、森林生态功能退化显著和生物多样性受到威胁等一系列生态环境问题。应当遵循山水林田湖草生命共同体的理念, 基于流域整体性、系统性的逻辑进行生态保护修复。在闽江流域总体生态安全格局的框架下, 针对相应的生态环境问题, 实施和强化闽江水环境综合治理、干支流沿岸带水土流失防治、矿区废弃土地生态修复、武夷山地等重要生态屏障森林和生物多样性保护等工程措施, 以期使闽江流域生态系统得到显著改善, 有效提高资源环境承载能力, 保障台湾海峡生态安全, 提升我国东南生态屏障功能, 为我国山水林田湖草生态保护修复工程提供科学依据和实践经验。

在未来的生态保护修复工程开展中, 还须注重机制创新和能力建设, 为流域生态保护修复工作提供保障。一是在流域关键节点布局水土质量数据采集分析设备, 全天候在线监测水土污染情况, 并配合完善现场抽样巡查制度, 实现污染的长效防控^[93-94]。统一规划、整合优化设立生态环境质量监测点位, 汇集大气、地表水、地下水、土壤、植被、动物和微生物等要素, 构建集中式生活饮用水水源监测、干支流水质监测、生态屏障和自然保护区生态质量监测等动态监测体系, 构建矿区区域、流域水系沿线城镇生活-工业区和农业生产养殖区等固定源、面源和移动源在内的各项污染源实时监测体系, 客观、准确反映流域水土质量状况和污染源转移路

径,不定期开展抽样验证,为闽江流域水土环境保护修复提供长期数据支撑。

二是需要充分利用中高分辨率的卫星遥感和无人机等现代通信技术,构建流域生态系统综合监管平台,提升生态保护修复成效^[28,95]。在流域生态系统尺度上,借助遥感等高新技术建立相关大数据平台;基于各类生态环境数据资源,整合“一江一带一区一屏”等关键地理空间信息,开展大数据挖掘和统计分析,建立以各级流域为单元的生态环境质量监测、趋势预测和预警机制,完善生态保护修复成效评估体系,为整个闽江流域山水林田湖草生态保护修复工程提供科学高效的、精细化的信息管理综合平台。

三是建立流域生态系统服务功能评价体系,量化基于生态系统服务功能的补偿指标,探讨设立流域生态横向补偿资金相关制度,推动全流域经济社会生态协调发展^[96-98]。根据流域上下游生态功能定位和区域特点,建立生态补偿示范区(例如武夷山地生态屏障),构建科学合理的生态价值核算体系以及分区域生态补偿标准,提出价值补偿、工程补偿等模式的路径;按照“谁开发、谁保护,谁破坏、谁恢复,谁受益、谁补偿,谁污染、谁付费”原则,建立流域生态补偿资金筹集制度、分配制度和资金管理制度,为缓解闽江流域生态保护与发展压力、提升流域综合效益提供制度支持。

参考文献(References):

- [1] 程国栋,李新. 流域科学及其集成研究方法. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(6): 811-819.
- [2] 陈能汪,王龙剑,鲁婷. 流域生态系统服务研究进展与展望. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 113-119.
- [3] 周浩,于晓英,李晶. 流域生态系统研究进展. 现代农业科技, 2017, (2): 164-164, 171-171.
- [4] 彭文启,刘晓波,王雨春,邹晓雯. 流域水环境与生态学研究回顾与展望. 水利学报, 2018, 49(9): 1055-1067.
- [5] Noh J, Choi H, Lee S. Water quality projection in the Geum River basin in Korea to support integrated basin-wide water resources management. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(4): 1745-1756.
- [6] Ogrinc N, Tjaša K, Kočman D. Integrated approach to the evaluation of chemical dynamics and anthropogenic pollution sources in the Sava River basin//Milačić R, Ščančar J, Paunović M, eds. *The Sava River*. Berlin: Springer, 2015: 75-94.
- [7] Bilgin A, Konanç M U. Evaluation of surface water quality and heavy metal pollution of Coruh River Basin (Turkey) by multivariate statistical methods. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(12): 1029.
- [8] Borrelli P, Märker M, Schütt B. Modelling post-tree-harvesting soil erosion and sediment deposition potential in the Turano River Basin (Italian Central Apennine). *Land Degradation & Development*, 2015, 26(4): 356-366.
- [9] Haregeweyn N, Tsunekawa A, Poesen J, Tsubo M, Meshesha D T, Fenta A A, Nyssen J, Adgo E. Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 95-108.
- [10] Mehri A, Salmanmahiny A, Tabrizi A R M, Mirkarimi S H, Sadoddin A. Investigation of likely effects of land use planning on reduction of soil erosion rate in river basins: Case study of the Gharesoo River Basin. *CATENA*, 2018, 167: 116-129.
- [11] Petty J T, Fulton J B, Strager M P, Merovich G T Jr, Stiles J M, Ziemkiewicz P F. Landscape indicators and thresholds of stream ecological impairment in an intensively mined Appalachian watershed. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(4): 1292-1309.
- [12] Merriam E R, Petty J T, Merovich G T Jr, Fulton J B, Strager M P. Additive effects of mining and residential development on stream conditions in a central Appalachian watershed. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, 30(2): 399-418.
- [13] Erskine P D, Fletcher A T. Novel ecosystems created by coal mines in central Queensland's Bowen Basin. *Ecological Processes*, 2013, 2(1): 33.
- [14] Celentano D, Rousseau G X, Engel V L, Zelarayán M, Oliveira E C, Araujo A C M, de Moura E G. Degradation of riparian forest affects soil properties and ecosystem services provision in eastern Amazon of Brazil. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 482-493.
- [15] Pasqualini V, Derolez V, Garrido M, Orsoni V, Baldi Y, Etourneau S, Leoni V, Rébillout P, Laugier T, Souchu P, Malet N. Spatiotemporal dynamics of submerged macrophyte status and watershed exploitation in a Mediterranean coastal lagoon: Understanding critical factors in ecosystem degradation and restoration. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 1-14.
- [16] Sanches Fernandes L F, Fernandes A C P, Ferreira A R L, Cortes R M V, Pacheco F A L. A partial least squares - Path modeling analysis for the understanding of biodiversity loss in rural and urban watersheds in Portugal. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1069-1085.
- [17] 尚宗波,高琼. 流域生态学——生态学研究的一个新领域. 生态学报, 2001, 21(3): 468-473.
- [18] 王磊,张磊,段学军,董雅文,秦贤宏. 江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应. 生态学报, 2011, 31(22): 6832-6844.
- [19] 段锦,康慕谊,江源. 东江流域生态系统服务价值变化研究. 自然资源学报, 2012, 27(1): 90-103.
- [20] Liu W F, Wei X H, Fan H B, Guo X M, Liu Y Q, Zhang M F, Li Q. Response of flow regimes to deforestation and reforestation in a rain-

- dominated large watershed of subtropical China. *Hydrological Processes*, 2015, 29(24): 5003–5015.
- [21] 孔令桥,张路,郑华,徐卫华,肖焱,欧阳志云. 长江流域生态系统格局演变及驱动力. *生态学报*, 2018, 38(3): 741–749.
- [22] Wang J, Zhong L N, Zhao W W, Ying L X. The influence of rainfall and land use patterns on soil erosion in multi-scale watersheds: A case study in the hilly and gully area on the Loess Plateau, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(10): 1415–1426.
- [23] 钟莉娜,王军,白中科,陈艳华,董占杰. 农用地整理对区域景观动态与生态风险影响研究——以福建省建溪流域为例. *中国土地科学*, 2019, 33(1): 73–82.
- [24] 刘怡娜,孔令桥,肖焱,郑华. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. *生态学报*, 2019, 39(3): 844–852.
- [25] 张惠远,郝海广,舒昶,王一超. 科学实施生态系统保护修复 切实维护生命共同体. *环境保护*, 2017, 45(6): 31–34.
- [26] 成金华,尤喆. “山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(2): 1–6.
- [27] 邹长新,王燕,王文林,徐德琳,林乃峰,李文静. 山水林田湖草系统原理与生态保护修复研究. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(11): 961–967.
- [28] 张惠远,李圆圆,冯丹阳,郝海广. 明确内容标准 强化实施监管——山水林田湖草生态保护修复的路径探索. *中国生态文明*, 2019, (1): 66–69.
- [29] 罗明,于恩逸,周妍,应凌霄,王军,吴钢. 山水林田湖草生态保护修复试点工程布局及技术策略. *生态学报*, 2019, 39(23): 8692–8701.
- [30] 王军. 关于国土综合整治服务生态系统的思考. *中国土地*, 2018, (7): 33–35.
- [31] 胡熠. 我国流域治理机制创新的目标模式与政策含义——以闽江流域为例. *学术研究*, 2012, (1): 49–54.
- [32] 王威,贾文涛. 生态文明理念下的国土综合整治与生态保护修复. *中国土地*, 2019, (5): 29–31.
- [33] Zhang M M, Wang S, Fu B J, Gao G Y, Shen Q. Ecological effects and potential risks of the water diversion project in the Heihe River Basin. *Science of the Total Environment*, 2017, 619–620: 794–803.
- [34] 赵昭炳. 福建省地理. 福州: 福建人民出版社, 1993.
- [35] 白健,刘健,余坤勇,张林波,李新通,王德旺. 基于 InVEST-Biodiversity 模型的闽江流域生境质量变化评价. *中国科技论文*, 2015, 10(15): 1782–1788.
- [36] 苏时鹏,张春霞. 闽江流域森林资源与环境关系的动态分析. *国土与自然资源研究*, 2004, (3): 47–49.
- [37] 汤小华. 福建省生态功能区划研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2005: 141–141.
- [38] 陈昌笃. 论武夷山在中国生物多样性保护中的地位. *生物多样性*, 1999, 7(4): 320–326.
- [39] 陈敏. 闽东北鹫峰山顶部植被演变规律的初步探讨. *林业勘察设计*, 2009, (2): 138–141.
- [40] 薛凡,刘金福,兰思仁,郑世群,何中声. 戴云山国家级自然保护区植物多样性评价与可持续发展策略研究. *武夷科学*, 2013, 29(1): 6–15.
- [41] 梁文慧. 论闽江流域生态林保护工程建设. *华东森林经理*, 2002, 16(1): 39–42.
- [42] 张家栋. 闽江流域中下游特殊地段防护林营造技术的探讨. *福建林业科技*, 2001, 28(3): 47–50.
- [43] 吴能棋. 福清市“青山挂白”生物与工程治理措施的探讨. *林业勘察设计*, 2002, (2): 60–62.
- [44] 方东阳,周丽芳. 浅谈“青山挂白”治理中存在的问题及对策. *福建水土保持*, 2004, 16(4): 41–44, 53–53.
- [45] 许文年,戴方喜,吴少儒,李金景,魏汉林,时晓燕. 生态修复技术在厦门市“青山挂白”整治工程中的应用. *中国水土保持*, 2006, (2): 32–34.
- [46] 岳世平. 福建省生态治理的主要做法与经验总结. *厦门特区党校学报*, 2015, (6): 73–77.
- [47] 刘刚. 闽江源生态保护研究. *福建省社会主义学院学报*, 2014, (6): 87–92.
- [48] 王智苑,郑雯. 福建省流域生态现状研究进展. *水利科技*, 2013, (3): 33–35, 39–39.
- [49] 赵昭炳. 闽江生态环境问题及其整治. *福建环境*, 1998, 15(2): 2–4.
- [50] 汪集友,朱秀端. 闽江健康与水土保持. *水利科技*, 2007, (4): 61–63.
- [51] 周长春,谢红彬. 闽江流域水环境保护研究. *地下水*, 2007, 29(4): 93–95, 113–113.
- [52] 程学宁,卢毅敏. 基于 SOM 和 PCA 的闽江流域地表水水质综合评价. *水资源保护*, 2017, 33(3): 59–67.
- [53] 林祥. 闽江污染物入海总量变化趋势研究. *环境保护科学*, 2018, 44(5): 101–105, 117–117.
- [54] 郑德祥,钟兆全,龚直文,陈平留. 闽江流域生态安全问题及建议. *北京大学学报: 自然科学版*, 2005, 6(5): 445–448.
- [55] 朱秀端,蔡国隆. 闽江流域水土保持与生态安全. *亚热带水土保持*, 2007, 19(1): 10–12, 23–23.
- [56] 翁彩云. 加强闽江上游水环境综合整治的对策研究. *能源与环境*, 2012, (6): 64–65, 67–67.
- [57] 李裕光. 加强“闽江上游水源地保护”的几点建议. *亚热带水土保持*, 2008, 20(2): 45–46.
- [58] 陈传明. 闽江流域生态环境问题的成因分析与对策. *台湾海峡*, 2000, 19(2): 237–243.
- [59] 陈文祥. 福建省长汀县水土流失地形因子影响分析. *亚热带水土保持*, 2016, 28(1): 5–8.

- [60] 何圣嘉,谢锦升,杨智杰,尹云锋,李德成,杨玉盛. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 65-70.
- [61] 徐涵秋,张博博,关华德,胡秀娟,陈明华,付伟. 南方红壤区林下水土流失的遥感判别——以福建省长汀县为例. 地理科学, 2017, 37(8): 1270-1276.
- [62] 王庚,查轩,黄少燕,白永会,康佩佩,刘根华,戴金梅. 福建省永定县的水土流失动态变化. 水土保持通报, 2016, 36(6): 272-277.
- [63] 郭春桥,刘文臣,李小强. 福建铅锌矿山开采价值凸现. 中国金属通报, 2013, (6): 38-39.
- [64] 赖礼煌. 福建煤矿开采对当地环境的影响及对策. 内蒙古煤炭经济, 2017, (22): 85-86.
- [65] 李想. 关于科学有序开发利用福建省矿产资源的建议. 冶金经济与管理, 2018, (4): 54-56.
- [66] 陈诗太. 金属矿山生态环境问题与环保管理对策——以福建尤溪铅锌矿山为例. 中国高新技术企业, 2013, (29): 71-73.
- [67] 张春霞,苏时鹏. 闽江流域森林资源与环境的动态分析. 福建环境, 2003, 20(6): 48-50.
- [68] 张俊钦. 福建母亲河闽江源头生态建设的思考. 林业建设, 2004, (4): 6-8.
- [69] 余坤勇,刘健,齐兴兰,黄维友,黄春华. 基于RS技术闽江流域生态公益林分蓄积量的动态监测. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2007, 36(5): 481-485.
- [70] 赖日文,刘健,汪琴,叶伟. 闽江流域生态公益林林型对水源涵养的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(10): 111-118.
- [71] 林捷,叶功富,谭芳林,程良绥,黄财声. 闽江流域生态系统恢复与重建对策. 防护林科技, 2004, (3): 28-30.
- [72] 高兆蔚. 论森林、淡水与湿地——以福建省为例. 林业资源管理, 2011, (2): 5-7.
- [73] 林丹军,尤永隆,苏雪红,颜雅雅,薛秀华. 闽江中下游鱼类资源现状调查与分析. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(4): 1-10.
- [74] 罗希茜. 闽江水口下游鱼类资源初步调查. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(3): 54-58.
- [75] 程永隆,沈恒,许友勤. 闽江梯级电站对水环境的影响. 水资源保护, 2011, 27(5): 114-118.
- [76] 黄建兰. 福建闽江源国家级自然保护区保护管理现状与发展对策. 福建林业, 2017, 34(6): 17-18, 20-20.
- [77] 占昕,潘文斌,郑鹏,柯锦燕,陈奇亮. 闽江河口湿地自然保护区及其周边区域景观自然性评价. 生态学报, 2017, 37(20): 6895-6904.
- [78] 侯雨峰,陈传明,胡国建. 福建闽江河口湿地国家级自然保护区社区居民可持续生计评价与分析. 湿地科学, 2018, 16(4): 530-536.
- [79] 陈桂香,高灯州,陈刚,曾从盛,王维奇. 互花米草入侵对我国红树林湿地土壤碳组分的影响. 水土保持学报, 2017, 31(6): 249-256.
- [80] 郑洁,刘金福,吴则焰,洪伟,何中声,蓝亦琦,刘思迪. 闽江河口红树林土壤微生物群落对互花米草入侵的响应. 生态学报, 2017, 37(21): 7293-7303.
- [81] 艾金泉,方伟城,陈丽娟. 闽江河口湿地生态退化现状与保护对策. 云南地理环境研究, 2009, 21(3): 37-41.
- [82] 庄一廷. 闽江流域水环境安全及管理对策初探. 能源与环境, 2007, (5): 116-118.
- [83] 杨邦杰,鄢文聚,王洪波. 农林复合经济区口粮田建设——福建龙岩江西赣州调研报告. 中国发展, 2014, 14(2): 1-6.
- [84] 连金友. 福建土地资源中露天非金属矿产生态环境恢复治理探讨. 资源节约与环保, 2014, (1): 161-162.
- [85] 王希智. 矿山景观生态恢复方法探讨——以福建南安杨子山为例. 工程技术研究, 2019, 4(2): 60-61.
- [86] 徐莉. 实行开发与保护相结合 加强山区饮用水源地保护. 亚热带水土保持, 2012, 24(2): 68-70.
- [87] 黎元生,胡熠. 闽江流域农业面源污染治理决策分析. 福建农林大学学报: 哲学社会科学版, 2013, 16(2): 5-8.
- [88] 黄骁男. 水土保持新技术在闽江流域的应用与发展. 黑龙江水利科技, 2012, 40(10): 179-181.
- [89] 官紫玲. 土地整治环境影响综合评价研究——以福建建阳市为例. 时代农机, 2015, 42(12): 75-76, 84-84.
- [90] 欧阳淑冰. 浅析福建主要露天非金属矿产废弃物复绿技术. 能源与环境, 2017, (5): 87-88, 93-93.
- [91] 张帅. 福建连江历史遗留矿山采矿用地复垦潜力分析与对策研究. 福建地质, 2018, 37(1): 51-60.
- [92] 张国防,陈志平. 闽江流域洪灾与森林生态系统建设. 水土保持研究, 2000, 7(3): 239-242.
- [93] 饶清华,许丽忠,张江山. 闽江流域突发性水污染事故预警应急系统构架初探. 环境科学导刊, 2009, 28(3): 69-72.
- [94] 白亮. 闽江流域地表水环境监测断面优化布设. 环境科学导刊, 2013, 32(6): 105-108.
- [95] 李钢,尹鹏程,张季一,蔡先变. “智慧国土”建设探讨. 测绘科学, 2014, 39(8): 62-66, 57-57.
- [96] 欧阳志云,郑华,岳平. 建立我国生态补偿机制的思路与措施. 生态学报, 2013, 33(3): 686-692.
- [97] 林秀珠,李小斌,李家兵,饶清华. 基于机会成本和生态系统服务价值的闽江流域生态补偿标准研究. 水土保持研究, 2017, 24(2): 314-319.
- [98] 黎元生. 基于生命共同体的流域生态补偿机制改革——以闽江流域为例. 中国行政管理, 2019, (3): 93-98.