

DOI: 10.20103/j.stxb.202311202526

周金星, 关颖慧, 汪亚峰, 秦伟, 何丙辉, 王克勤, 吴秀芹, 万龙, 丁亚丽. 西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范. 生态学报, 2024, 44(18): 7937-7943.

Zhou J X, Guan Y H, Wang Y F, Qin W, He B H, Wang K Q, Wu X Q, Wan L, Ding Y L. Technology and demonstration of comprehensive control of soil and water loss in Southwest alpine Gorge area. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 7937-7943.

西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范

周金星^{1,6,7,*}, 关颖慧^{1,6}, 汪亚峰², 秦伟³, 何丙辉⁴, 王克勤⁵, 吴秀芹^{1,6}, 万龙^{1,6}, 丁亚丽^{1,6}

1 北京林业大学水土保持学院, 云南建水生态站, 北京 100083

2 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

3 中国水利水电科学研究院, 北京 100038

4 西南大学, 重庆 400715

5 西南林业大学, 昆明 650224

6 北京林业大学教育部林业生态工程研究中心, 北京 100083

7 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083

摘要: 西南高山峡谷区覆盖大横断“七脉六江”地区, 是国家“三区四带”重要生态安全屏障, 对保障国家生态安全和区域高质量发展具有重要作用。针对西南高山峡谷区存在的水土流失分异演变地带性规律及其关键驱动机制, 水土流失对农业耕作、高陡地形、岩溶地质及冻融作用等复杂驱动条件的响应及其防控机制, 民族聚集区生态系统服务功能整体提升及生态生产协同的理论对策等问题, 选取兰坪、云龙、永胜、康定以及波密县为典型示范区, 开展国家重点研发计划活动, 以西南高山峡谷不同类型区水土流失分异规律和综合防治为主线, 按照三个层次开展水土流失综合防治与示范研究, 攻克高精度土壤侵蚀预报模型与监测技术瓶颈, 形成生态系统服务整体提升的“水土流失防治-生态系统服务-民族经济发展”的多目标水土流失综合防治技术体系, 最终为西南高山峡谷区生态系统恢复提供科学依据与技术支持。

关键词: 西南高山峡谷区; 水土流失; 民族聚集; 生态系统服务

Technology and demonstration of comprehensive control of soil and water loss in Southwest alpine Gorge area

ZHOU Jinxing^{1,6,7,*}, GUAN Yinghui^{1,6}, WANG Yafeng², QIN Wei³, HE Binghui⁴, WANG Kebin⁵, WU Xiuqin^{1,6}, WAN Long^{1,6}, DING Yali^{1,6}

1 Jianshui Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Tibetan Plateau Research Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

4 Southwest University, Chongqing 400715, China

5 Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

6 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

7 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The Southwest Alpine and Canyon Area covers the “Seven Mountain Ranges and Six Rivers” in the Hengduan Mountains Region of China. It serves as an important ecological security barrier for the national “Three Zones and Four

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302900); 北京林业大学“5·5 工程”科研创新团队项目(BLRC2023B09)

收稿日期: 2023-11-20; **采用日期:** 2024-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zjx9277@126.com

Belts” strategy and plays a crucial role in safeguarding national ecological security and promoting high-quality regional development. Due to the complex terrain and diverse planting methods of various ethnic groups, the region exhibits significant differentiation in soil erosion, with complex causes and prominent conflicts. Additionally, the accuracy in monitoring and forecasting soil erosion in the area is much lower, and the severity of soil erosion has been underestimated, making soil erosion a serious constraint on the region’s sustainable socio-economic development. In view of the zonal law and its key driving mechanism of soil and water loss differentiation and evolution, the response and its prevention and control mechanism of soil and water loss to agricultural cultivation, high and steep terrain, karst geology, freeze-thaw and other complex driving conditions, as well as the overall improvement of ecological service function and the countermeasures of ecological production coordination in ethnic gathering areas, the research team selected Lanping, Yunlong, Yongsheng, Kangding and Boni County as typical demonstration areas to carry out the “National Key R & D Program of China” named “Technology and Demonstration of Comprehensive Prevention and Control of Soil and Water Loss in Southwest Alpine and Canyon Areas (2022YFF1302900)”. The main line of this research is the differentiation law and comprehensive prevention and control of soil and water loss in different types of alpine and canyon areas in Southwest China. Comprehensive soil erosion control and demonstration research should be carried out at three levels (basic theoretical research, technology model development, and integrated optimization demonstration), the focus is on studying the characteristics, evolution patterns, and key driving factors of soil erosion in different types of alpine canyon areas, elucidating the response mechanisms of soil erosion to the combined effects of multiple forces such as freeze-thaw and karst processes, as well as agricultural planting patterns, developing optimized soil erosion models and intelligent soil and water conservation monitoring technologies, and establishing technical models for soil erosion control and ecological industry. Consequently, the bottleneck of high-precision soil erosion prediction model and monitoring techniques will be overcome, and the multi-objective integrated soil erosion control technology system, which aims to enhance the overall ecosystem services, consists of “soil erosion control-ecosystem services-ethnic economic development” will be achieved. Finally, this study will provide scientific basis and technical support for soil and water conservation, ecological civilization construction, and rural revitalization in southwest alpine canyon area.

Key Words: southwest alpine and canyon area; soil erosion; ethnic gathering; ecosystem services

水土流失是全球面临的重要生态环境问题之一^[1-2], 严重威胁区域生态、粮食安全, 制约社会经济发展^[3-5]。西南高山峡谷区覆盖大横断“七脉六江”地区, 气候、水文、地形及地质等时空分异特征显著, 作为中国“三区四带”的重要生态安全屏障, 其对保障国家生态安全和区域高质量发展具有重要作用。然而, 西南高山峡谷区受复杂地形地质约束、复合侵蚀营力(水力-冻融-重力)驱动、少数民族聚集区耕种活动以及水电工程开发利用等活动影响, 区域水土流失态势尚未得到有效遏制^[6-8]。因此, 针对西南高山峡谷区特殊的自然、人文因素, 加强水土保持、生态修复、监测预报等基础应用研究, 整体提升该区域生态系统服务功能、推进水土保持与民族经济协同发展已迫在眉睫。

目前, 国内外已形成较完善的水土流失防治理论体系, 尤其在水土流失机理探索、侵蚀预报模型构建等方面取得显著成绩。欧美等国家先后研发 USLE、EUROSEM、WEPP 和 SWAT 等模型^[9-11], 并在世界各国得到广泛应用与修正。我国在水土流失综合治理技术、管理与监督、小流域综合治理等方面均走在世界前列^[12-14], 特别是在黄土高原、南方红壤以及东北黑土区均取得重大突破^[15]。在土壤侵蚀预报方面, 依托 973 项目建立并完善了中国土壤流失方程(CSLE), 并在黄土高原区、东北黑土区成功推广应用^[16]。“十三五”期间, 国家重点研发项目在西南岩溶石漠化区、干旱河谷区生态治理与生态产业开发等方面给予大力支持, 在石漠化综合治理与干旱河谷生态修复等方面取得重大突破^[17]。本项目参加团队依托“喀斯特断陷盆地石漠化演变及综合治理技术与示范”、“喀斯特槽谷区土壤地上(下)流/漏失过程与模拟研究”、“长江上游坡地耕地

整治与高效生态农业关键技术试验示范”等项目,在岩溶断陷盆地、岩溶槽谷水土流失阻控与石漠化治理、坡耕地水土流失综合防治、干旱河谷脆弱生态区植被恢复等^[18-23]方面取得了重要进展,并基于 CSLE 框架构建了考虑地质因素的土壤侵蚀模型模块(CSLE-G),大幅提高了现有土壤侵蚀模型在岩溶峡谷区土壤侵蚀的模拟精度,相关成果得到中国地质调查局的推广应用。但总体上,这些成果主要集中在海拔低于 2000 m 的西南中低山区,与西南高山峡谷区水土流失特点相差甚远,针对西南高山峡谷区水土流失的研究仍很薄弱。

西南高山峡谷区具有高陡地形、岩溶地质^[24-25]和陡坡耕种等有别于其他地区的土壤侵蚀特征^[26-27]。该区海拔小于 2000 m 的区域约 10%,种植模式为经济林果、农业耕种,集约化程度高;2000—3500 m 约占 25%,为少数民族主要聚集区,以陡坡耕种、林农复合为主;3500 m 以上高山区域约 65%,农牧交错、受冻融与水蚀复合影响。此外,岩溶区占整个区域的约 36%。这些复杂的地质条件、人为因素等均加剧了植被恢复、土壤保持和水土资源高效利用的难度^[27]。同时,地形效应及其带来的环境异质性,也给该区生态环境参量的获取带来极大限制,加之特殊的地势、冻融、岩溶、耕作等因素影响和稀缺的观测站点数据,极大限制了现有土壤侵蚀模型的预报精度和水土流失动态监测精度^[28],使得我国西南高山峡谷区水土流失问题被严重低估^[29]。此外,该区生态系统相对脆弱^[30],至今仍未形成适宜不同峡谷类型区的水土流失监测技术与综合防治技术体系。

鉴于岩溶地质-地形急变复杂、侵蚀驱动因素分异明显、少数民族聚居人地矛盾突出等影响,西南高山峡谷区水土流失过程机制与综合治理研究明显落后于我国其他水土流失区。国家《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出要“科学推进水土流失和荒漠化、石漠化综合治理”,并将水土保持作为国家生态文明建设的主要内容,是实现乡村振兴与巩固拓展脱贫攻坚成果的重要举措。因此,亟需系统揭示西南高山峡谷区水土流失分异规律,研发适宜高山峡谷区特殊复杂条件的侵蚀预报模型,提高监测与预报精度;突破耦合山地资源利用与保护性耕作技术瓶颈,实现水土资源高效利用与少数民族经济协同发展,构建“水土流失防治-生态系统服务-民族经济发展”的多目标水土流失综合防治技术体系,可为水土保持、生态保护修复和乡村振兴提供有力的科学支撑与技术示范。

1 总体思路

西南高山峡谷区涉及《全国水土保持区划》中藏东南高寒高山峡谷生态维护区(I 区)、藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区(II 区)、滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区(III 区)、滇西北高山峡谷生态维持区(IV 区)等 4 种类型区(图 1)。岭谷高差极为悬殊,气候分异明显,水热组合多样、侵蚀类型复杂,呈现“四区”水平分布特点和“三带”垂直分异特征。

海拔 2000 m 以下为“中低山河谷带”,汉族居住为主、土地集约化程度高,以经济林果与农业集约经营为主,土壤侵蚀为水蚀类型,主要分布在 III、IV 区;海拔 3500 m 以上“高山带”主要分布在 I、II 区,农业耕种程度低,以林农、牧农活动为主,属水蚀与冻融复合侵蚀区;而 2000—3500 m 的“中山带”,主要分布在 II、III、IV 区,聚集了白、普米、傈僳、怒、彝、傣、藏等近 30 个少数民族,占总人口的 80%,以坡耕地为主,陡坡地形、局地气候及少数民族耕种对水土流失影响显著,该区以水蚀为主,由于长期陡坡垦殖、农业模式单一、产业基础薄弱等问题导致生产力低下,形成“高山峡谷型贫困”集中区。此外,西南高山峡谷区还分布着 36% 的岩溶面积。

针对西南高山峡谷区复杂的自然环境和多民族聚居形成的生态脆弱、侵蚀危害严重和经济发展滞缓等问题,围绕“辨识过程-明晰机理-构建技术-县域示范”思路,明晰高山峡谷区水土流失驱动机制与分异规律,构建适宜的水土流失智慧监测技术与高精度侵蚀预报模型,突破水土保持与产业经济协同发展的技术瓶颈,形成生态系统服务整体提升的“水土流失防治-生态系统服务-经济持续发展”县域示范。技术路线见图 2。

2 拟解决的关键科学问题

(1) 气候-地质-峡谷地形与复合侵蚀营力作用的高山峡谷水土流失分异、演变规律及驱动机制

西南高山峡谷区复杂气候与地形地质分异,水力、冻融、重力等多侵蚀营力复合驱动,影响和控制了高山

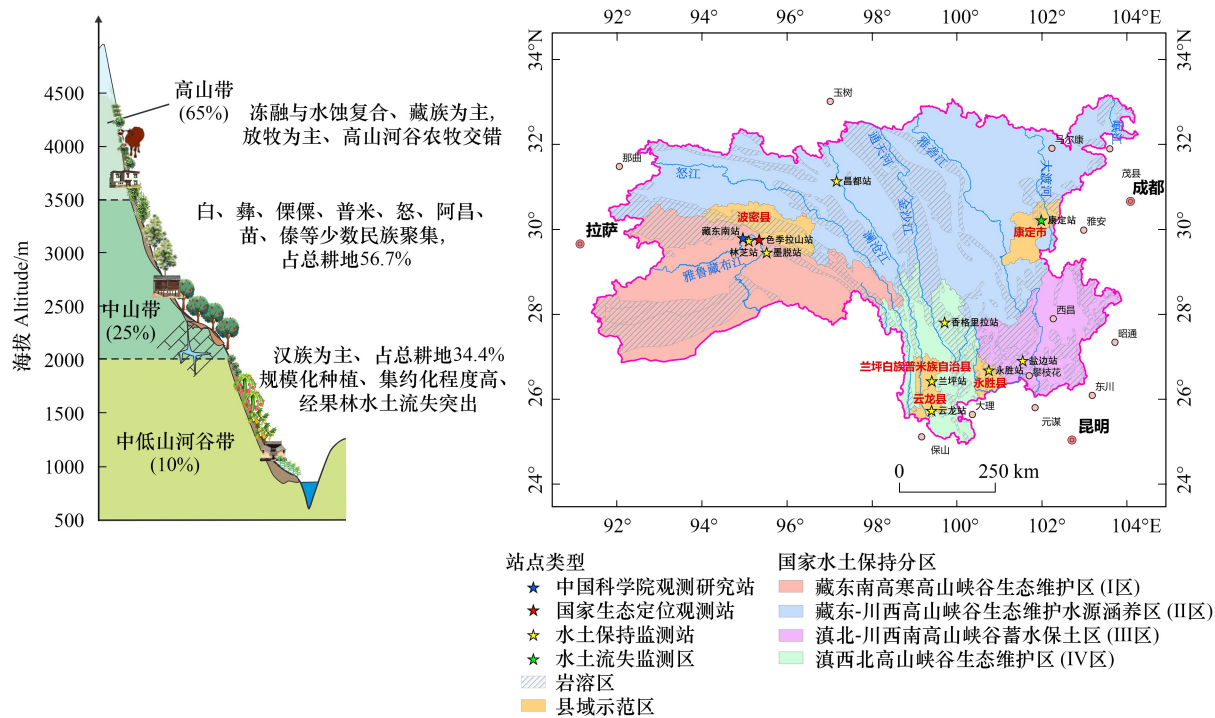


图 1 研究区“四区、三带”特征

Fig.1 Overview of the project research area

峡谷区水土流失的发生和时空演变过程,但相关的水土流失分异、演变规律、关键因子与驱动机制尚不明确,一定程度上限制了对高山峡谷土壤侵蚀过程、机理和危害的认识,进而制约了土壤侵蚀的监测与预报。开展相关研究将有效服务高山峡谷区土壤侵蚀模型优化和水土流失综合防治体系构建,完善高山峡谷复杂条件下的水土流失基础理论。

(2) 水土流失对农业种植与弃耕、高陡地形、岩溶地质和冻融作用的复杂响应及其防控机理

西南高山峡谷区水土流失受少数民族种植模式与弃耕撂荒等人类活动,以及不同气候与岩溶地质、不同类型河谷水热条件和高海拔冻融作用等自然条件的共同影响,水土流失响应机制尚不明确。系统揭示人地关系和自然条件主导驱动下的水土流失响应过程与机理,可为高山峡谷区水土流失阻控措施体系和产业模式优化提供科学依据,并丰富完善区域水土流失综合防治理论。

(3) 高山峡谷区生态服务功能整体提升及生态生产协同理论与对策

高山峡谷区特色产业发展与生态系统服务提升的融合,是巩固脱贫成果与实施乡村振兴的重大科技需求。在典型高山峡谷区生态系统服务评估的基础上,兼顾不同利益主体诉求,定量分析主导生态系统服务的权衡和协同程度,可为筛选和优化配置少数民族农林种植模式、一年生与多年生耕作等生产经营方式提供理论依据,实现典型峡谷区生态系统服务整体提升的目标。

3 研究内容

(1) 西南高山峡谷区水土流失分异、演变规律及驱动机制

明晰高山峡谷区复杂地形地质等要素分异以及多民族聚集区水土流失分布格局与地带性分异规律,提出不同峡谷类型水土流失治理的科学分区,解析多营力复合侵蚀规律及其耦合机理,阐明水土流失对农业种植模式、高陡地形、岩溶地质和冻融作用的响应机制,揭示复杂地形地质、生态环境分异与民族聚集区农业耕种的水土流失规律及驱动机制,为研究区土壤侵蚀综合预报模型构建与参数优化、水土保持措施合理配置、阻控

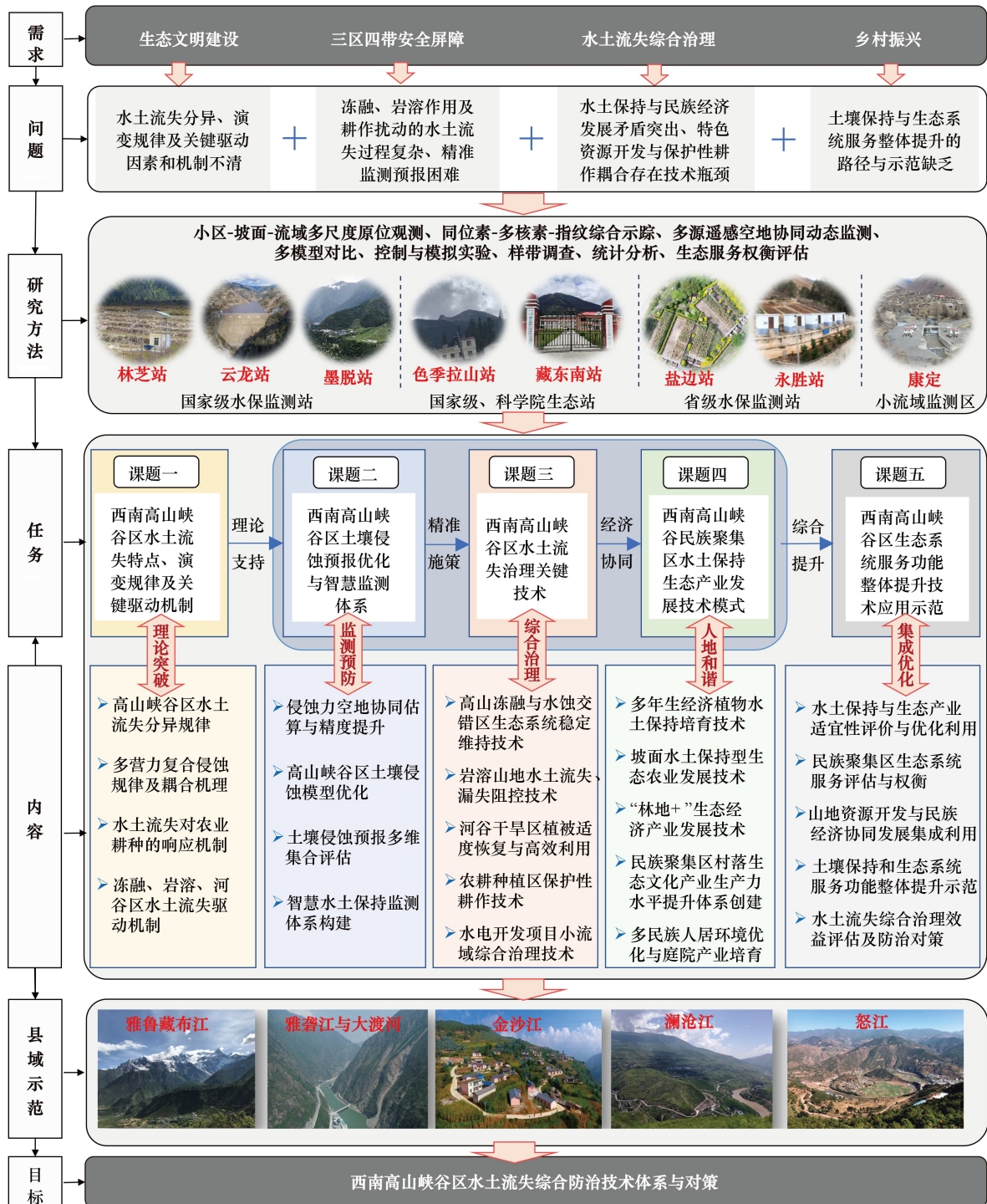


图 2 总体技术路线

Fig.2 Overall technical route of the project

技术提升和产业模式优化提供理论依据。

(2) 西南高山峡谷区土壤侵蚀预报优化与智慧监测体系

研发西南高山峡谷区降雨侵蚀力空地协同估算与精度提升技术,提出考虑峡谷高陡地形、高海拔冻融、岩溶区水土漏失和民族聚集区耕作扰动侵蚀影响的模型参数表征或因改进方法,发展西南高山峡谷区土壤侵蚀优化模型;研究模型精度多维集合评估技术,明确土壤侵蚀优化模型在研究区应用的准确度与可靠性;形成

适宜不同类型高山峡谷区的水土流失监测技术,构建智慧水土保持监测体系。

(3) 西南高山峡谷区水土流失综合治理关键技术

研发西南高山峡谷冻融区水源涵养与生态系统稳定性维持技术,西南高山峡谷岩溶区侵蚀关键带水土保持技术,西南高山峡谷干旱河谷区植被适度恢复与水资源高效利用技术,西南高山峡谷农耕种植区土壤保持与保护性耕作技术以及西南高山峡谷区水电开发项目水土保持与小流域综合治理技术,形成西南高山峡谷区水土流失综合治理关键技术体系。

(4) 西南高山峡谷民族聚集区水土保持生态产业发展技术与模式

分析典型农林业、畜牧业、村落文化产业的水土资源利用特征,研发多年生特色经济植物的种苗快繁、高效节水等关键栽培技术;集成山地、河谷生态农业和“林地+”生态产业等高截流蓄水技术、微区域集水、光伏高效集水节水、复合立体种植等土壤保土保水保肥和林地水源涵养功能增持关键技术;创新基于环境质量优化提升的农牧复合产业与村落文化产业发展中面源污染防控多层次技术体系。

(5) 西南高山峡谷区生态系统服务整体提升技术集成与应用示范

集成山地特色资源开发、水土流失治理与民族经济协同调控技术,构建生态服务功能整体提升的水土流失综合防治技术体系,发展生态与民族经济协同振兴的产业模式,并进行典型县域示范。

研究内容主要分为三大部分,包括基础理论研究(课题1)、技术模式研发(课题2—4)、集成优化示范(课题5)三个方面。其中,课题1 关键夯实理论基础,突破西南高山峡谷区水土流失过程与驱动机制的基础理论制约,为课题2—4 提供理论支撑;课题2—4 突破高山峡谷区不同类型区水土流失监测、预报手段和水土流失综合防治等技术瓶颈;结合课题1—4 的成果,课题5 关键集成生态功能整体提升的水土保持技术模式,并进行县域示范,实现理论、技术、应用的有机融合,为西南高山峡谷区水土流失治理提供对策。

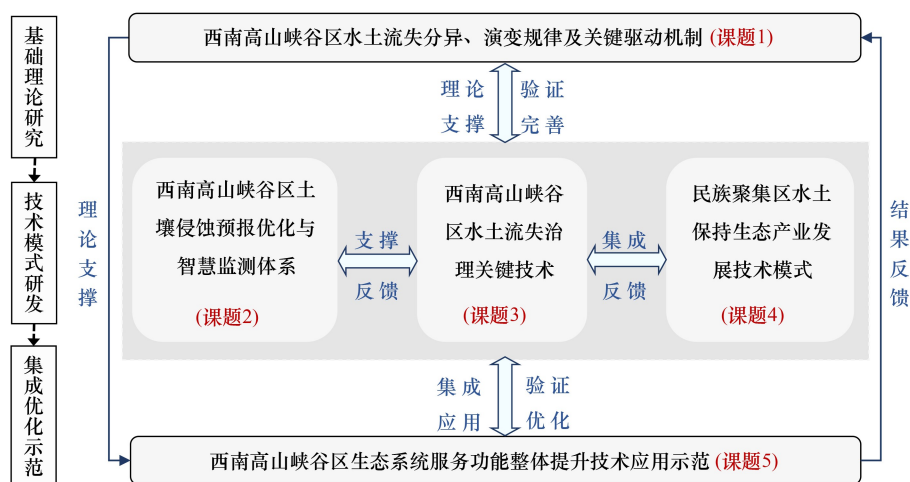


图3 研究内容间的相互关系

Fig.3 The correlation between the content of research

4 研究目标和预期成果

4.1 研究目标

针对西南高山峡谷区复杂自然环境和少数民族聚居形成的生态系统脆弱、土壤侵蚀严重和经济发展滞缓等突出问题,在深入剖析不同类型高山峡谷区水土流失关键驱动因素的基础上,科学揭示西南高山峡谷区复杂地形地质与多民族聚集区农业耕种的水土流失规律与驱动机制,研发适用于不同高山峡谷类型的水土流失监测技术并发展适用于该区特殊复杂条件的土壤侵蚀模型,形成水土保持与民族经济协同发展的水土流失综合防治体系,为西南高山峡谷区水土保持、生态保护修复和乡村振兴提供科技支撑及县域示范。

4.2 预期成果

本研究预计构建适宜不同空间尺度的水土流失治理技术适宜性评价指标体系及量化模型;筛选不同类型高山峡谷区特色山地资源开发与民族经济协同发展模式;提出高山峡谷区生态系统服务功能整体提升对策建议 1—2 项;建设县域示范区 5 个,示范面积达 4000hm²。

5 结语

鉴于岩溶地质-地形急变复杂、侵蚀驱动因素分异明显、少数民族聚居人地矛盾突出等特殊因素,西南高山峡谷区水土流失过程机制与综合治理研究明显落后于我国其他水土流失区。国家《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出要“科学推进水土流失和荒漠化、石漠化综合治理”,并将水土保持作为国家生态文明建设的主要内容,是实现乡村振兴与巩固拓展脱贫攻坚成果的重要举措。因此,亟需系统揭示西南高山峡谷水土流失分异规律,研发适宜高山峡谷区特殊复杂条件的侵蚀预报模型,提高监测与预报精度;突破耦合山地资源利用与保护性耕作技术瓶颈,实现水土资源高效利用与少数民族经济协同发展,构建“水土流失防治-生态系统服务-民族经济发展”的多目标水土流失综合防治技术体系,可为水土保持、生态保护修复和乡村振兴提供有力的科学支撑与技术示范。

参考文献 (References):

- [1] Brown L R. The global loss of topsoil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1984, 39(3): 162-165.
- [2] Gelagay H S, Minale A S. Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 2016, 4(2): 126-136.
- [3] Rao E M, Xiao Y, Ouyang Z Y, Yu X X. National assessment of soil erosion and its spatial patterns in China. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(4): 1-10.
- [4] Pimentel D. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 2006, 8(1): 119-137.
- [5] Panagos P, Standardi G, Borrelli P, Lugato E, Montanarella L, Bosello F. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 471-484.
- [6] 李益敏,袁静,蒋德明,王东驰,刘心知. 基于 GIS 的西南高山峡谷区滑坡风险性评价—以怒江州泸水市为例. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(6): 94-102.
- [7] 黄钰铃,惠二青,员学锋,李靖. 西南地区水资源可持续开发与利用. *水资源与水工程学报*, 2005, 16(2): 46-49+54.
- [8] 马芊红,张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望. *地球科学进展*, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [9] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1): 287-306.
- [10] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, Govers G, Poesen J W A, Auerswald K, Chisci G, Torri D, Styczen M E. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields and Small Catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(6): 527-544.
- [11] Ascough J, Baffaut C, Nearing M, Liu B Y. The WEPP watershed model: I. Hydrology and erosion. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(4): 921-933.
- [12] 王礼先. 水土保持生态环境建设用水研究//百万人才工程学术技术专题论坛. 北京: 中国环境科学学会, 2004: 340-347.
- [13] 关君蔚. 生态控制系统工程. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [14] 刘震,田小波,聂仕潭,段耀晖,滕吉文. 华北东部复杂的 660km 相变界面. *地球物理学报*, 2016, 59(6): 2039-2046.
- [15] 水利部. 中国水土流失防治与生态安全—北方土石山区卷. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] 刘宝元,毕小刚,符素华. 北京土壤流失方程. 北京: 科学出版社, 2010.
- [17] 包维楷. 西南干旱河谷区生态综合治理及生态产业发展技术研发. *科技成果管理与研究*, 2020, 15(8): 69-71.
- [18] 肖林颖,吴秀芹,周金星,肖桂英. 岩溶断陷盆地典型县域石漠化治理综合效益评价—以云南建水县为例. *地球学报*, 2021, 42(3): 444-450.
- [19] 张华,王波,高瑜,康晓莉,王宇,刘绍华,康晓波,罗为群,赵勇. 岩溶断陷盆地湿地成因类型及水流系统特征研究. *中国岩溶*, 2023, 42(4): 672-684.
- [20] 吕文凯,周金星,万龙,关颖慧,刘玉国,肖桂英,丁玉雄,刘发万. 滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价. *地球学报*, 2021, 42(3): 341-351.
- [21] 曾荣昌,张玉启,何丙辉,李天阳,曾成. 喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对坡面集中流水力学特性的影响. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1179-1189.
- [22] 甘凤玲. 喀斯特槽谷区水土流失/漏失过程与水动力学机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [23] 胡林安,邱江梅,李强. 云南岩溶断陷盆地植被演替土壤碳氮磷化学计量学特征. *中国岩溶*, 2023, 42(6): 1213-1223.
- [24] 曹建华,袁道先,童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策. *草业科学*, 2008, 25(9): 40-50.
- [25] 袁道先. 碳循环与全球岩溶. *第四纪研究*, 1993, 13(1): 1-6.
- [26] 唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004.
- [27] 水利部. 中国水土流失防治与生态安全—总卷. 北京: 科学出版社, 2010.
- [28] 李锐. 中国水土流失基础研究的机遇与挑战. *自然杂志*, 2008, 30(1): 6-11.
- [29] 陈发虎,汪亚峰,甄晓林,孙建. 全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究. *中国藏学*, 2021(4): 21-28.
- [30] 傅伯杰,欧阳志云,施鹏,樊杰,王小丹,郑华,赵文武,吴飞. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306.