

西南地区农业水资源利用及雨水资源 高效调控技术路径研究

鲍玉海¹, 贺秀斌¹, 尹飞虎^{2,3,4}, 伍巧^{1,5}, 龚道枝², 崔宁博^{6*}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610299;
2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3. 作物高效用水与抗灾减损国家工程实验室,
北京 100081; 4. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 新疆石河子 832000; 5. 中国科学院大学,
北京 100049; 6. 四川大学水利水电学院, 成都 610041)

摘要: 西南地区降水时空分布不均, 季节性干旱、工程性缺水与水土流失问题突出, 雨水资源高效调控是该区域水土流失治理与农业抗旱防旱的关键举措, 对保障国家粮食安全具有重要意义。本文系统梳理了包括云南省、贵州省、四川省、重庆市在内的西南地区水资源特征及农业干旱特点, 总结了农业水资源开发利用的现状及存在问题, 阐述了西南地区雨水资源高效调控的基本特征、具体技术路径及主要措施。研究发现, 西南地区水资源丰富但时空分布不均, 农业供水保证率亟待提高, 自然水系、人工水网与坡面雨水资源集蓄利用工程的互联互通和协同互济能力不够, 水资源时空调配能力弱。研究建议, 加强大中型水库和“五小水利”工程建设、研发分区分类的地表径流调控技术体系、推进生态清洁小流域建设、推广农田高效节水灌溉技术体系、强化雨水资源集蓄利用模型开发、完善“建管运”长效机制、强化农村小型水利工程建设科技支撑, 为缓解西南地区农业干旱、增加农业水资源供给、优化水资源调配和粮食生产提供技术支撑。

关键词: 雨水资源; 集雨利用; 季节性干旱; 旱地; 西南地区

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A

Current Situation of Agricultural Water Resource Utilization and Technology Path for the Efficient Regulation Rainwater Resources in Southwestern China

Bao Yuhai¹, He Xiubin¹, Yin Feihu^{2,3,4}, Wu Qiao^{1,5}, Gong Daozhi², Cui Ningbo^{6*}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. National Engineering Laboratory for Crop Efficient Water Use and Disaster Loss Mitigation, Beijing 100081, China; 4. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

Abstract: Southwestern China is prone to drought hazards due to rainfall patterns shift, leading to water scarcity for engineering

收稿日期: 2024-03-10; **修回日期:** 2024-06-26

通讯作者: *崔宁博, 四川大学水利水电学院教授, 研究方向为农业水土工程; E-mail: cuiningbo@126.com

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305203, 2022YFC3204004); 中国工程院咨询项目“四川季节性干旱区农业绿色高效用水机制与抗旱减灾战略研究”(2023-DFZD-31)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

purposes, crop devastation, and ecosystem destruction. The effective management of rainwater resources is crucial for addressing these issues and mitigate agricultural effects induced by drought, which is vital for ensuring national food security. This study reviews the water resource characteristics and agricultural drought patterns across Yunnan, Guizhou, Sichuan, and Chongqing in Southwestern China, and examines the fundamental characteristics, specific technical approaches, and primary measures of an efficient rainwater regulation and control system in this region. Results of the study indicates that the spatiotemporal distribution of water resources is uneven in Southwestern China and the reliability of agricultural water supply urgently needs further improvement. This is due to a lack of integration among natural water systems, artificial water networks, and rainwater harvesting projects on slopes, which hinders the efficient allocation of water resources across different periods and regions. To address these challenges, it is recommended to (1) enhance the construction of large and medium-sized reservoirs and implement “five types of small water conservancy” projects, (2) develop surface runoff control technologies for different regions and environments, (3) promote ecological and clean small-watersheds management, (4) expand the adoption of water-saving irrigation technologies in agriculture, (5) establish models for utilizing rainwater resources, (6) improve sustainable mechanisms for infrastructure construction, management, and operation, and (7) provide technological support for small water conservancy projects in rural areas. These efforts will provide critical technical support to alleviate agricultural drought impacts, increase agricultural water supply, optimize water distribution, and maintain food security in Southwestern China.

Keywords: rainwater resources; rainwater collection and utilization; seasonal drought; dryland; Southwestern China

一、前言

在水资源短缺、干旱加剧等多重因素叠加的驱动下，全球粮食价格波动性增强，粮食安全成为世界各国共同关注的重大问题。干旱是制约世界农业生产的最重要因素，而全球气候变化致使干旱事件的出现频率变高、强度增高、持续时间变长、骤发干旱比例上升和干旱发展速度加快，严重威胁全球粮食安全、生态安全和水资源安全^[1-4]。全球干旱正在经历由缓向骤的急转，2023年，全球约有18.4亿人遭受干旱的影响，其中有4.7%的人口遭受严重或极端干旱影响；预计2100年，遭受极端干旱的人口将增加到8%^[5-7]。我国是世界上受干旱灾害影响和损失最为严重的国家之一^[8]，干旱缺水导致粮食生产安全面临较大的不确定性^[9]。农业用水开源成为当前农业灌溉技术创新的重点，进一步实现农业多源供水、提升抗旱减灾能力成为保障我国粮食稳产增产亟需解决的关键问题。

大型调水工程可以有效解决区域间水资源分布不均和水土资源配置不合理等问题，而坡面雨水集蓄可以补充当地农业用水源，提高农业用水保障程度，降低农业用水成本^[10]。雨水资源化作为农业非常规水资源利用和多水源联合调度的重要途径，在全球日益得到广泛关注^[11-13]。自20世纪90年代以来，雨水集蓄利用在我国集雨补灌旱作农业方面得到快速发展，形成了甘肃省“121雨水集流工程”、内蒙古自治区“112集雨节水灌溉工程”、四川省“坡面水系工程”、江西省“坡面径流调蓄工程”、贵州省“喀斯特山区坡面集雨工程”等模式，在增

加农业供水、优化水资源配置体系、提高水资源利用效率、提升现有非灌溉耕地粮食产能、防治山丘区旱地水土流失方面发挥了重要作用。但当前雨水资源化研究侧重于动力拦截、就地入渗、径流蓄存、集蓄灌溉等地块或坡面尺度的技术研发及推广^[14]，互联互通、相互调节、互为补充的大、中、小、微水利工程网络体系尚未形成，存在雨水资源化的集蓄工程配置水平偏低、利用不充分、政策不健全、认识不到位等问题。2023年，我国印发的《关于加强非常规水源配置利用的指导意见》提出，因地制宜推广农业集雨节水灌溉技术，用于农业补充灌溉。

第三次全国国土调查主要数据公报和各省份2023年统计年鉴显示，包括云南省、贵州省、重庆市、四川省在内的我国西南地区总面积约为 $1.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，占全国总面积的12%，其中山丘区的旱地面积约占现有耕地面积的68.15%，区域干旱灾害频次高、范围广^[15,16]。西南地区干旱持续时间长、强度大以及联合重现期间隔的空间变异性显著下降，这也表明干旱空间分布更趋于广泛^[17]。此外，近年来，西南地区降水异常引起的旱涝交替现象频发，成为旱涝急转灾害的多发区域，且干旱灾害的极端性趋强^[18-21]，对区域粮食安全、供水安全和生态安全都造成了严重威胁，农业干旱灾害损失远超全国平均水平^[15,22]。虽然雨水集蓄利用一直是西南地区坡面水土保持、流域综合治理、农田水利基础设施建设等工作的重点，但目前西南地区农田水利基础设施依然薄弱，农业灌排设施短板突出，农田水利“最后一千米”建设滞后，水资源时空调

配能力弱,季节性缺水、工程性缺水问题仍未得到根本性扭转,制约了粮食生产安全。为此,本文紧密围绕长江大保护、乡村振兴、特色农业产业发展与粮食安全等重大国家战略需求,梳理总结西南地区农业水资源利用现状及雨水资源化存在的突出问题,明晰雨水资源高效调控技术体系,提出缓解农业干旱、增加农业水资源供给、优化水资源调配的发展建议,为西南地区粮食安全生产提供技术支撑。

二、西南地区的水资源特征及农业干旱特点

(一) 西南地区降水和水资源分布特征

西南地区降雨量充足,雨热同期,年平均降水量为 629.9~1678.5 mm,受垂直地带性影响,降水空间分布差异显著,总体呈现为东多西少、南多北少的特点^[20]。其中,川西高原高海拔山区的年降水量低于 1000 mm,滇东北、川中丘陵区、岷江干旱河谷等区域是西南地区的降水相对低值中心,滇南、滇西、黔东南、渝东南以及川西雅安等是西南地区的年降水量高值区域。西南地区的降水量季节分布极不均匀,从时间分布看,夏季(7—9月)降水量占年降水量的 85% 以上^[23],冬、春季降水量相对较低;在年际变化上,近 50 年来降水量整体呈减小趋势^[24],但降水频率和强度增大,极端降水增多^[25]。在全球气候变暖的背景下,基于高分辨率数据模拟的西南地区未来极端降水变化趋势表明,未来降水和极端降水指数与历史时期相比,都呈显著增长态势且极端降水增幅更大^[26]。

西南地区的水资源特征主要表现在 3 个方面:一是总量相对丰沛。2023 年,西南地区的水资源总量约为 $3.59 \times 10^{11} \text{ m}^3$,占长江流域水资源量的 40.34%;2019—2023 年,西南地区多年平均水资源量达到 $5.65 \times 10^{11} \text{ m}^3$,占全国水资源总量的 19.54%^[27,28](见图 1)。二是水资源区域分布不均。来自长江、澜沧江和雅鲁藏布江等河流的水量占比大,而四川盆地腹部、川西北干旱河谷、金沙江干热河谷、滇中和黔中等地区的水资源量占比较少;四川省和云南省的水资源总量较丰富,贵州省和重庆市的水资源总量相对较少,四川省 2019—2023 年的多年平均水资源总量分别是云南省、贵州省、重庆市的 1.89 倍、

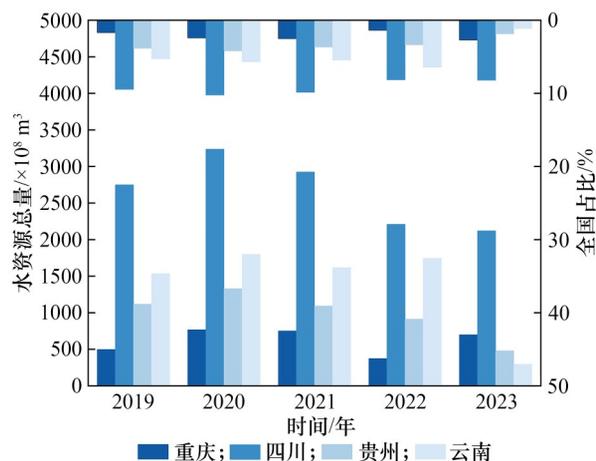


图1 西南地区2019—2023年的平均水资源总量及全国占比

2.69 倍、4.29 倍,存在水资源分布与集中用水地区不匹配的问题,导致区域性水资源短缺。三是季节性缺水问题突出。天然降水补给的河川径流是该区水资源的主要形式,受区域降水影响,水资源在时间分配上具有夏秋多、冬春少的特点,季节分配不均,主要集中在每年的 7—9 月。

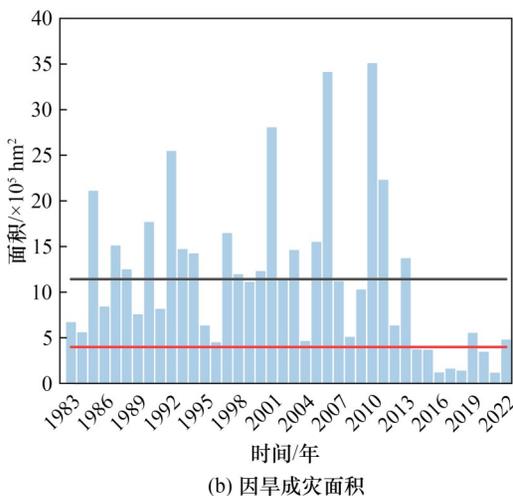
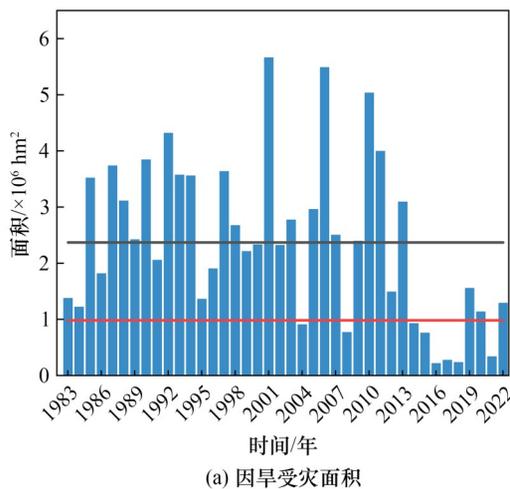
(二) 西南地区农业干旱的特点及危害

受全球气候变化、地形和气候带等影响,西南地区的农业干旱具有因旱受灾面积大、影响范围广、持续时间长、部分地区连年受灾、因旱成灾率高等特点,尤其是易发生季节性干旱^[19,29,30]。在季节分布上,春、冬季频次较多,夏、秋季次之,最常见的是夏秋连旱,其次是春夏连旱^[21];夏季干旱主要以轻、中旱为主,整体呈现西部高、东部低的块状分布,具有较强的局地性特征,中旱及以上干旱的发生概率为 9%~22%^[31]。在年际变化上,20 世纪 60 年代,西南地区持续性干旱发生频次最多,其他时段发生较少;2020—2022 年,西南地区的春旱主要出现在云南省中西部;2022—2023 年,冬春连旱的主要影响区向北扩展至云南省中北部、贵州省以及四川省局部地区^[20,31]。在空间分布上,横断山地和四川盆地的干旱最为严重,云贵高原次之,前者的干旱发展趋势较为缓慢,而后的干旱发展速度最快;四川南部和云南北部是农业干旱频发区^[32]。

全国旱灾呈频发、重发的态势,在遇一般干旱年的情况下,西南地区农业面临的干旱灾害风险较小,但在 50 年一遇和 100 年一遇的气象干旱情况下,

西南地区农业面临的旱灾风险剧增^[7]。1983—2012年，西南地区农业因旱受灾和成灾的面积均维持高位；而2013—2022年则显著下降^[33]（见图2）。

农业干旱显著影响了西南地区的粮食生产，不同时期、不同区域、不同承灾体的损失存在差异。2022年夏季，西南地区持续性高温少雨的极端天气造成农耕地遭受重度土壤水分胁迫，出现了严重的土壤失墒情况。2008—2020年，西南地区因干旱灾害造成的年平均直接经济损失达到109亿元，占全国的17.09%^[34]。2022年冬—2023年春的连旱造成136.6万人饮水困难，农作物受灾面积约为 $3.17 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，直接经济损失达25亿元；作为特色农业产业发展的芒果、葡萄、柑橘、甘蔗、花椒、辣椒等经济作物受灾影响较重，受灾面积占比约为农作物受灾面积的73%^[31]，严重影响了当地农村经济的发展。



— 1983—2022年平均值；— 2013—2022年平均值
图2 西南地区1983—2022年农业旱灾面积变化

三、西南地区农业水资源开发利用现状及存在的问题

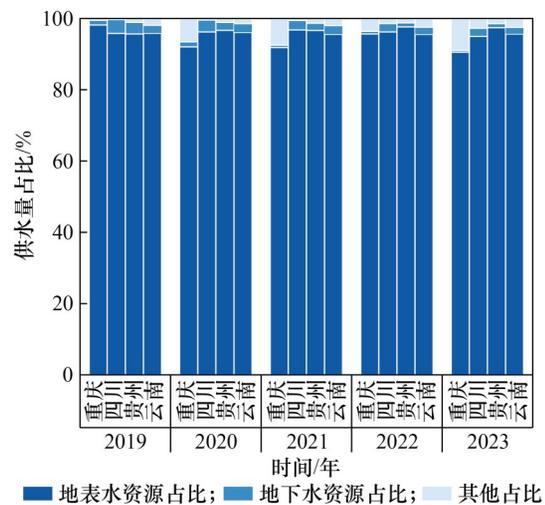
(一) 西南地区农业水资源开发利用现状

截至2022年年底，西南地区已建成各类水库工程21 240座，水库总库容为 $2.559 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，有效灌溉总面积约为 $6.87 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ；水闸共有3147处，其中引水闸有493处；塘坝窖池共计 3.72×10^6 座，蓄水总量为 $1.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，有效灌溉总面积为 $1.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[33]。

据各省份水资源公报数据，2019—2023年，西南地区年均地表水源供水量占总供水量的95.76%，包括蓄水（含跨流域调水量）、引水、提水和非工程供水量，分别占地表水源供水量的49%、28.7%、21.8%和0.5%；地下水及其他水源供水量仅占4.24%（见图3）；人均综合用水量为 278 m^3 ，其中农业用水量占社会总用水量的63.25%，表明农业仍是西南地区各省（市）的用水第一大户；耕地实际灌溉亩（1亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$ ）均用水量为 355 m^3 ，农田灌溉水有效利用系数为0.5。

(二) 西南地区农业水资源开发利用存在的主要问题

近年来，西南地区水利建设稳步发展，以大型为主、中小型并举的灌区格局基本形成，农业发展保障能力持续增强，但在山区雨水资源化方面存在设施老化失修、渠系配套率低、高效利用率低、效益发挥不佳等问题，仍有“水来留不住、旱时用不上”的现象，区域性、工程性、季节性缺水形势依



然严峻，制约了西南地区农业的可持续发展和粮食安全保障能力的提升。

1. 工程性缺水仍然突出，农业供水保证率亟待提高

西南地区水资源的多年平均开发利用率仅为 0.18%，远低于全国平均水平^[35]，大量水资源无法被当地土地充分利用，工程性缺水问题突出。以重庆市为例，人均蓄引提水能力仅为 270 m³，约是全国平均水平的 60%，预计 2035 年的缺水量将达到 3×10⁹ m³；同时，现代化农业灌排设施体系建设明显滞后，耕地有效灌溉率仅为 36%，低于全国及西南其他省份的平均水平；非常规水源供水占比不到 0.6%，低于全国平均水平；渝西 8 区以 11% 的本地水资源量支撑了全市 23% 的人口和 25% 的国内生产总值（GDP），人均水资源占有量仅为 398 m³；渝东南、渝东北地区多属喀斯特地貌，水资源丰沛但人均水资源占有量低；夏汛冬枯，汛期（每年 5—9 月）的水资源量占全年水资源总量的近 70%，径流高峰期与作物需水高峰期失配；供水水源结构有待完善，蓄水工程“少小散”，小型水库和塘坝供水占蓄水工程供水量的 50% 以上，供水保证率不高，极端干旱防控能力亟待提升。

2. 水网主骨架尚不完善，水资源空间调配能力不足

西南地区的喀斯特地貌、河谷地貌和盆地地貌分布广泛，90% 以上是高原山地、中低山和丘陵，地势起伏大。尽管水资源总量较为丰富，但人口、GDP、耕地等要素分布与水资源量高程错位，水低田高，水资源开发利用程度较低，带来了水资源空间分布、供水保障体系与经济社会发展布局匹配性较差的问题。多年来，西南地区多措并举，加大水利投入和建设，陆续建成了都江堰灌区、武都引水、升钟灌区、牛栏江—滇池补水工程、滇中调水一期、黔中调水一期等骨干水网工程，紫坪铺、亭子口、鲁班、黑龙滩、黔中、夹岩、马岭、黄家湾等大型调蓄水库和一批中小型水利工程，水资源集约利用和配置格局初具雏形^[36-39]。但因区域骨干水网工程前期论证复杂、生态制约因素多、建设缓慢，现有水网骨干工程主要为区域性和局部性工程，水网主骨架和大动脉尚不完善，水源工程历史欠账较多，除已建成的骨干水网工程以外，其余工程多为单点建设并形成独立水源—供水体系，大中

型水源、小微型水源、江河渠系之间尚未连通形成水网，跨区域、跨流域的水资源空间调配能力差，区域性水资源丰枯互济、互联互通能力不足，水资源统筹调配能力不强、供水保障水平不高。此外，尚未从根本上解决用水需求与水资源空间赋存匹配差的突出问题，生产生活用水长期挤占部分水库灌溉和生态供水的现象突出，山区农业灌溉水资源供需矛盾较为严峻，水土资源失配问题依然突出，农田灌溉保证率有待提高。

3. “五小水利”工程互联互通能力弱，各级水源保障协同融合不够

随着西南地区城乡融合、乡村振兴、成渝地区双城经济圈建设和长江经济带发展战略的深入推进，用水刚性需求持续增加。据测算，2035 年，四川省的水资源缺口将达 7.9×10⁹ m³^[40]。总体来看，西南地区的水源结构单一，如四川省的水利工程蓄引提水供给量仅占水资源供给总量的 13%，不到全国平均水平的 50%，有效灌溉面积仅占耕地面积的 45%，旱地不到 40%。各级水网协同度不高，骨干水网、重点水源工程连通性较差，较难协同发挥水资源时空调配的功能。山区部分发挥重要水源保障作用的“五小水利”（小水窖、小水池、小泵站、小塘坝、小水渠等）工程修建年限已长，存在设施老化、引排灌配套不足、渠系淤埋损毁等问题，蓄水及水源调配能力退化。坡面“五小水利”工程与骨干水网、重点水源工程等尚未形成水系联通，难以达到高水高用、低水低用、自流输水、互连互通的供水结构布局目标，致使水网“最后一千米”安全保障能力减弱。部分河段生态水量不足，农村河流治理存在短板，农业面源污染风险长期存在，岷江、沱江、小江、梁滩河等局部河段以及部分中小河流的水生态环境存在退化风险，河湖生态保护治理能力有待提升。

4. 部分区域水资源可利用量少，开发利用难度大

云南省约有 94% 的国土面积为山地，山高谷深，水资源利用难度大。云南省的水资源可利用量仅占全省水资源总量的 21.8%。由于水资源开发利用程度存在较大的区域差异，滇池、达旦河、龙川江、泸江等流域已临近或超过合理开发利用上限，进一步开发利用潜力低，需依靠节水和跨流域调水才能解决水资源供需矛盾。滇西、滇西南地区的水资源开发

利用潜力较高,但存在开发难度大、成本高等问题。此外,受移民、环境保护等的影响,新建供水工程成本逐渐变高。例如,虽然贵州省、重庆市过境水资源较为丰富,但山高坡陡、河谷深切,致使水源工程建设难度大、费用高,增加了供水成本。贵州省、渝东南、渝东北等喀斯特地区的地质构造特殊复杂,岩溶漏斗、裂隙、落水洞、溶洞、洞穴系统等极为发育,大气降水易快速汇入地下,不利于地表产流。此外,西南地区水资源时间分布不均,汛期水资源量约占全年水资源总量的70%,径流高峰期与作物高需水时期不匹配,也加大了水资源开发利用难度。

四、西南地区雨水资源高效调控技术路径

(一) 西南地区雨水资源高效调控总体思路

天然降水是西南地区极其重要的可用水资源,但多以暴雨形式年内集中分布。降雨径流既是水土流失的源动力,又是农业生产的重要水源。因此,雨水资源集蓄利用是减缓西南地区干旱缺水的有效途径,调控坡面降雨径流是西南地区采取旱地水土保持措施的关键。该区域雨水资源高效调控的核心是将作为侵蚀动力的降雨径流消能转化成解决干旱缺水的水资源。自1989年长江上游水土保持重点防治工程实施以来,集蓄雨水被广泛用于作物需水关键期的重要补充灌溉水源。小流域综合治理和生态文明建设的深入推进,对流域雨水资源调控提出了更高要求。当前的雨水资源化利用,在内涵上不仅包括人畜饮水、作物补灌、城市生态用地灌溉和地下水补给等,还包括有关水资源利用的水土保持、水源涵养、城市防洪和生态环境改善等方面^[41]。通过自然过程或人为过程,将雨水用于农业生产以提高作物产量和改善农业生态系统,是当前雨水资源化利用的主要发展目的^[42]。

针对水土流失、季节性干旱等对西南地区旱地农业生产造成的双重影响,该区域的雨水资源高效利用从降雨径流拦蓄为主逐渐演变为排水保土、先排后蓄、蓄以为用的降雨径流调控方式^[43,44],实施与坡耕地改造、坡面水系工程配套的小流域综合治理,有效涵养水源,改变降水再分配和汇集方式,延长地表径流汇集时间或改变地表径流路径,就地截流促渗,增加土壤水库库容;通过汇流蓄存、集蓄灌溉、农艺节水等提升雨水径流资源的利用率,

有效阻控坡面水土流失,进而提高土壤抗旱保墒能力,并辅以高效节水技术,缓解干旱缺水,促进当地农业稳产高产。

(二) 西南地区雨水资源高效调控的技术路径及主要措施

长期以来,地表径流调控是水土保持的核心^[45],主要通过采取各种水土保持措施对降水在时空上进行人工调节,达到雨水资源重新分配、集蓄、利用的目的。西南地区雨水资源高效调控主要有雨水就地拦蓄入渗、减少蒸发、梯级集蓄、高效利用等4种技术途径。其中,“五小水利”工程是重要组成部分,降雨径流的“截排池蓄”是水土流失治理和农业发展的重要内容^[46]。西南地区雨水资源高效调控的技术途径及其主要措施如表1所示。

五、西南地区雨水资源高效调控技术建议

(一) 平坝浅丘区加强大中型水库建设,提升水源供水能力与耕地灌溉保障率

针对西南地区城乡用水、农业干旱突出的问题,建议持续巩固水利基础设施建设成果,提升区域供水协同调节能力。加快推进建设大中型调蓄水源工程,优化配置水资源,强化水资源区域协调能力,全面增强区域对重特大干旱灾害的抵御能力,辅以农业种植结构调整和高效节水农业灌溉技术推广等措施,提升农业灌溉用水效率与效益。

(二) 山丘区加强“五小水利”工程建设,夯实山丘区农业发展基础

“五小水利”工程是山丘区水网建设的“毛细血管”和农田水利的基础,按照区分轻重缓急和产业配套的原则,聚焦粮食安全,开展雨水资源“蓄、引、排、提、节”高效利用,因地制宜拓展“五小水利”工程建设,发展末级渠系管道输水和高效节水灌溉技术,提高农业生产用水供给能力,保障作物一般年份有增产水可灌、干旱年份有保产水可灌。

(三) 创新地表径流调控技术体系,提高水系联通、水源相济能力

一是对西南地区的中低山、丘陵、平原等开展分区、分类雨水资源开发利用技术体系及模式的基

表1 西南地区雨水资源高效调控技术路径及主要措施

调控路径	主要措施	效果评价
就地拦蓄入渗	水土保持林	西南地区森林生态系统年均水源涵养量约为 $1.1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，其中，林冠截留占 24.57%、枯落物截留占 1.61%、土壤蓄水量占 73.82% ^[47] ；在森林覆盖率高的地区，水稻、玉米和红薯的因旱受灾率、成灾率、绝收率分别比其他地区低 16.6%、16.2%、4% ^[48]
	退耕还林还草	可增加植被覆盖、控制水土流失、降低径流速度、增加雨水入渗、增加季节产水量 ^[49,50]
	坡改梯	梯田可以显著改变流域汇水面积和洪峰流量 ^[51] ，如石坎梯田修建区径流系数较工程实施前下降了 16% ^[52]
	封禁治理	自然封育显著提高了表层土壤和凋落物持水能力，水源涵养能力随封育年限增加而增强 ^[53] ；近年来，草地围栏封育使土壤毛管持水量、饱和持水量分别按每年 1.95 mm、1.77 mm 的速率增加 ^[54]
减少蒸发	生物覆盖	秸秆覆盖可通过蓄水调温、保墒、改变农田蒸散等，促进作物增产和水分高效利用 ^[55,56] ；与清耕对照相比，紫色土坡地柑橘园不同绿肥覆盖可分别减少 22.75%、21.06%、10.55% 的地表径流损失 ^[57]
	砾石覆盖	砾石覆盖部分地表可促进入渗，减少蒸发 ^[58,59] 。砾石覆盖后蒸发速率平均降低 36.9%，地表径流速率平均降低 25.4%，并使土壤含水量和蓄水量提升 ^[60]
	地膜覆盖	在播种期和苗期具有保持土壤水分、控制土壤蒸发的作用，发挥了保墒和节约用水的良好功能 ^[61,62] ；地膜覆盖能有效提高土壤表层水分含量，在秸秆、地膜两元处理下，农田玉米收获时的土壤贮水量为 360.36 mm，比裸地处理增加 158.14 mm ^[63]
梯级集蓄	截排沟渠	截排沟渠可分段拦蓄径流泥沙、引导坡面排水过程 ^[64] ；采取半透水型截排水沟措施的紫色土坡耕地具有较好的调控径流作用，地表径流收集效率较传统截水沟高 12%~15%；对于 5 年、10 年和 20 年一遇的降雨，地表径流收集量分别增加了 0~53.9%、0~41.6% 和 0~36.4% ^[65]
	“五小水利”工程	云南省大理州山区在建成 1.331×10^5 处“五小水利”工程后，新增蓄水量为 $6.71 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，新增供水量为 $4.83 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，解决了农村 4.604×10^5 人的饮水困难问题 ^[66]
	中小型水库	中小型水库库容对旱灾成灾面积的影响最显著，在减轻农业旱灾成灾面积方面的作用甚至大于大型水库 ^[67]
农业利用	节水灌溉	元谋大型灌区实施水肥一体化等“智慧三网”建设后，有效解决了全县 1/4 的土地灌溉难题，土地复种指数由 1.49 提高到 1.97，节水率达 48.6%，实现亩均增产 24.2% ^[68]
	新能源提灌	会东县光伏水源工程（太阳能提灌站）解决了高二半山缺水难题，灌溉面积达 6100 hm ² ，预计每年可增收 1834.5 万元 ^[69]
	农艺节水	合理利用农艺节水技术是提高水分利用效率，减少水资源浪费的重要措施 ^[70,71] ；其中，横坡垄作和穴播增加了受雨面积和入渗时间，提高了坡面的整体入渗能力，具有较好的保水效果 ^[72]

础科学研究，优化雨水集蓄系统的方案设计，因地制宜，有针对性地采取拦蓄排灌技术，充分利用好该地区的雨水资源。二是加强分区、分类的雨水高效利用技术研发与模式应用，结合西南地区丰富的新能源发电资源，构建清洁能源系统驱动的“引、提、储、灌、排”人工智能水网系统方案，建设“五小水利+高位水池+新能源提水补灌”的水土保持与水资源高效利用示范工程，优化山丘区“五小水利”工程技术体系，研发“坡面水系+多塘系统+江河水网”的高效互联互通技术，提升农田节水抗

旱防灾能力，筑牢区域水安全保障。

（四）推进建设生态清洁小流域，加强水源涵养与河湖生态复苏

生态清洁小流域建设是全面推动小流域综合治理提质增效，助力美丽中国建设、乡村振兴的关键举措。建议通过生态清洁小流域建设，发挥“山水林田湖草沙”系统治理体系的调水和净水功能，强化各种生态要素的协同治理，增强水土保持各项措施的关联性和耦合性，提升区域水源涵养能力；合理

布局坡面路网水系，加快坡耕地、坡园地水土流失治理进程，改善坡地蓄水保土能力，提高耕地质量和土地生产力。以自然河流水系、调蓄工程和引排水工程为依托，推进农村水系综合整治，加强河流生态廊道建设，从地块-坡面-流域尺度协同提升水土资源与生产力布局的匹配程度；增强自然水系、人工水网与坡面水利工程的连通性，实现水源工程的多源互联互通，提升水资源时空调节能力，保障流域清水出流，促进地表水体水质改善，保护和恢复河湖水生态环境。

（五）加强农田水利工程高效节水灌溉技术应用，提高特色农业用水效率

围绕西南地区乡村产业振兴和生态文明建设的实际要求，开展水土保持生态环境建设，与改善农村生态环境、提升农业综合生产能力、发展生态产业、增产增收和美化农村人居环境等有机结合，以小流域为单元，基于水资源承载能力评价，开展“山水林田湖草沙”综合规划；宜农则农、宜林则林，科学确定水土开发规模，精准配置水土保持工程、林草和农耕措施，充分利用流域雨水资源，优化水土资源配置；调整农业生产和农作物品种结构，发展特色优势产业，推动农业绿色转型。大力推广蓄水保墒、测墒节灌、集雨补灌、土壤深松、新型保水剂、全生物降解地膜等旱作农业节水技术，分区域规模化应用示范喷灌、滴灌、低压管灌、微灌、水肥一体化等节水灌溉技术；加强农田土壤墒情监测，开展不同模式灌溉试验，提升作物水肥利用效率与综合效益，推进建设农业节水技术、设施设备应用示范基地。

（六）强化雨水资源开发利用模型开发，优化系统工程规划设计

建议构建适用于西南丘陵山地的分布式雨水资源化潜力评估模型，开展区域雨水资源化潜力量化评估，提高雨水集蓄利用工程设计水平，提高工程设施蓄水能力与坡面产流汇水的适配度；基于作物模型进行灌溉决策优化，调整有限灌溉水量在作物不同生育期的配置；开展需水量与可集水量的衔接以及集流面与蓄水设施的匹配设计，系统构建集流面、蓄水设施、供水规模、灌溉规模等协同能力的雨水集蓄利用规划设计模型，开展丘陵山地雨水集蓄利用的工程优化设计研究。

（七）完善“建管运”长效机制，持续发挥农村小型水利工程调蓄供水作用

建议持续利用农业灌溉供水保障工程、国家水土保持重点工程、地方水利发展等专项和配套资金，因地制宜兴建小型水源工程、田间排灌体系等农村小型水利工程，加强机电泵站、小型河道等工程设施的新建、续建、修复与改造；完善应对农业干旱事件的水源储备制度，加强灌排工程体系管护，形成多种水源互补模式，提高农田灌溉保证率。积极探索农村小型水利工程“政府引导、社会参与”的建设模式，形成农村小型水利工程建设专项资金“以奖代补”长效机制，增加建设补助资金，探索多元化的小型农村水利工程建设经费来源途径，深化水源工程投融资体制改革，构建多元化投融资体系。积极推进农村小型水利工程集体资产的“确权、赋权、活权”工作，明晰产权责任，发挥企业、村集体、农业合作社和农民参与管护的积极性，持续巩固农村小型水利工程管理体制改革成果，明确小型水利工程管护责任主体，落实管护经费。

（八）建立全国丘陵山地雨水资源开发技术联盟，强化农村小型水利工程建设科技支撑

建议整合科研院所、高校、企业、地方政府、行业主管部门各自优势，以山丘区雨水资源开发利用为导向，提升节水抗旱能力、优化水土资源配置、促进区域特色优势农业产业发展为目标，建立健全“产学研”协同创新机制，成立全国丘陵山地雨水资源水土保持开发技术联盟。立足山丘区农业干旱现状，围绕提升雨水资源利用率和水分生产率，兼顾区域生态和粮食安全，创新区域雨水资源利用理念与方法，开展土壤水库调蓄、地表径流调控、雨水集蓄、高效节水灌溉等山丘区雨水资源化高效利用理论与技术研究；加强灌排体系、计量监测设施、抗旱补水高效调度等工程与管理体制方面的科技创新，强化水网建设、河流生态廊道建设、水土流失治理、水资源配置等领域的科研创新，在雨水资源水土保持开发利用中推广新材料、新技术、新工艺等。及时制定、修订相关团体技术标准，完善工程建设标准体系，加强人员的培训与技术交流，科学规范工程实施过程，不断提升工程建设技术水平和工程建设成效。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 10, 2024; **Revised date:** June 26, 2024

Corresponding author: Cui Ningbo is a professor from College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University. His major research fields include agricultural water and soil engineering. E-mail: cuiningbo@126.com

Funding project: National Key R&D Program of China (2023YFF1305203, 2022YFC3204004); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Mechanism of Green and Efficient Agricultural Water Use and Drought Mitigation Strategy in Seasonal Arid Areas of Sichuan” (2023-DFZD-31)

参考文献

- [1] Romanello M, McGushin A, Di Napoli C, et al. The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Code red for a healthy future [J]. *Lancet*, 2021, 398(10311): 1619–1662.
- [2] 熊少堂, 赵钢铁, 郭成超, 等. 我国各大流域复合高温干旱事件变化趋势与归因分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(1): 83–96.
Xiong S T, Zhao T T G, Guo C C, et al. Evaluation and attribution of trends in compound dry-hot events for major river basins in China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2024, 54(1): 83–96.
- [3] Wang S P, Zhang Q, Liu Y Z, et al. Effects of global warming on drought onset in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130964.
- [4] 徐群, 赵亮. 近 136 年(1885—2020 年)长江中下游伏旱期划分及其演变分析 [J]. *大气科学*, 2024, 48(3): 1072–1094.
Xu Q, Zhao L. The division and evolution for hot-dry periods in the middle and lower reaches of the Yangtze River in the past 136 years (1885—2020) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(3): 1072–1094.
- [5] United Nations Convention to Combat Desertification. Global drought snapshot 2023: The need for proactive action [R]. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification, 2023.
- [6] Yuan X, Wang Y M, Ji P, et al. A global transition to flash droughts under climate change [J]. *Science*, 2023, 380(6641): 187–191.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022—Impacts, adaptation and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [8] Shu Z K, Jin J L, Zhang J Y, et al. 1.5 °C and 2.0 °C of global warming intensifies the hydrological extremes in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 635: 131229.
- [9] 陈有华, 曾梦晴, 陈彬. 气候变化对粮食生产韧性的影响——基于作物多样化的调节效应研究 [J]. *生态学*, 2024, 44(16): 6937–6951.
Chen Y H, Zeng M Q, Chen B. Impact of climate change on the resilience of food production: Research of the moderating effect based on crop diversification [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(16): 6937–6951.
- [10] 王恒, 王博. 农田水利高质量发展: 关键问题与对策建议 [J]. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2022, 22(4): 35–43.
Wang H, Wang B. High quality development of field irrigation: Key issues and countermeasures [J]. *Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition)*, 2022, 22(4): 35–43.
- [11] Yao J P, Wang G Q, Jiang X M, et al. Exploring the spatiotemporal variations in regional rainwater harvesting potential resilience and actual available rainwater using a proposed method framework [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 160005.
- [12] dos Santos S M, de Farias M M. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in Northeast Brazil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 1007–1015.
- [13] Foster T, Rand E C, Kotra K K, et al. Contending with water shortages in the Pacific: Performance of private rainwater tanks versus communal rainwater tanks in rural Vanuatu [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(11): e2021WR030350.
- [14] 高学睿, 闫程晟, 王玉宝, 等. 黄土高原典型区雨水资源化潜力模拟与评价 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 275–283.
Gao X R, Yan C S, Wang Y B, et al. Simulation and evaluation of rainwater harvesting potential in typical areas of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 275–283.
- [15] 倪深海, 吕娟, 刘静楠, 等. 变化环境下我国干旱灾害演变趋势分析 [J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(10): 1–7.
Ni S H, Lyu J, Liu J N, et al. Analysis on the evolution trend of drought disaster in China under changing environment [J]. *China Flood & Drought Management*, 2022, 32(10): 1–7.
- [16] 谢清霞, 谷晓平, 万雪丽, 等. 西南地区干旱的变化特征及其与大气环流的关系 [J]. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 79–86.
Xie Q X, Gu X P, Wan X L, et al. Characteristics of drought variation and its relationship with general circulation of Southwest China [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 79–86.
- [17] 王林, 陈文, 黄刚, 等. 中国西南超级干旱的变化特征和多尺度异常叠加效应分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(7): 2114–2132.
Wang L, Chen W, Huang G, et al. Characteristics of super drought in Southwest China and the associated compounding effect of multi-scalar anomalies [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2024, 54(7): 2114–2132.
- [18] 赵东升, 张家诚, 邓思琪, 等. 1960—2018 年中国西南地区旱涝急转的时空变化特征 [J]. *地理科学*, 2021, 41(12): 2222–2231.
Zhao D S, Zhang J C, Deng S Q, et al. Spatio-temporal characteristics of drought-flood abrupt alternation in the Southwest China from 1960 to 2018 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(12): 2222–2231.
- [19] 韩兰英, 张强, 马鹏里, 等. 中国西南地区农业干旱灾害风险空间特征 [J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 1015–1023.
Han L Y, Zhang Q, Ma P L, et al. Spatial characteristics of comprehensive risk of agricultural drought disaster in Southwestern China [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(4): 1015–1023.
- [20] 杨春艳, 严小冬, 夏阳, 等. 近 56a 西南区域降水分布及持续性干旱的研究 [J]. *中低纬山地气象*, 2021, 45(2): 15–22.
Yang C Y, Yan X D, Xia Y, et al. Study on precipitation distribution and persistent drought in Southwest China in recent 56 years [J]. *Mid-low Latitude Mountain Meteorology*, 2021, 45(2): 15–22.
- [21] 许继军, 陈桂亚, 杨明智, 等. 长江流域干旱灾害应对的主要难点及其科技需求 [J]. *人民长江*, 2023, 54(8): 25–31.
Xu J J, Chen G Y, Yang M Z, et al. Difficulties and scientific and

- technological demands of drought disaster mitigation in the Changjiang River Basin [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(8): 25–31.
- [22] 董蓉蓉, 粟晓玲, 屈艳萍, 等. 2022年长江流域不同类型干旱时空响应关系 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 61–70.
Dong R R, Su X L, Qu Y P, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 61–70.
- [23] 闫彩霞, 曾波, 董元昌, 等. 中国西南地区暴雨时空变化特征分析 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 48(8): 71–82.
Yan C X, Zeng B, Dong Y C, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics of heavy rain over Western China [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 48(8): 71–82.
- [24] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近60年中国西南地区干旱灾害规律与成因 [J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 632–639.
Han L Y, Zhang Q, Yao Y B, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 632–639.
- [25] 陈子凡, 王磊, 李谢辉, 等. 西南地区极端降水时空变化特征及其与强ENSO事件的关系 [J]. *高原气象*, 2022, 41(3): 604–616.
Chen Z F, Wang L, Li X H, et al. Spatiotemporal change characteristics of extreme precipitation in Southwestern China and its relationship with intense ENSO events [J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(3): 604–616.
- [26] 林文青, 陈活泼, 徐慧文, 等. 西南地区未来极端降水增加将导致其人口暴露风险加剧 [J]. *大气科学学报*, 2023, 46(4): 499–516.
Lin W Q, Chen H P, Xu H W, et al. Significant increase of precipitation extremes will enlarge its population exposure over Southwest China in the future [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2023, 46(4): 499–516.
- [27] 水利部长江水利委员会. 长江流域及西南诸河水资源公报(2023) [M]. 武汉: 长江出版社, 2024.
Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. *Changjiang & Southwest rivers resources bulletin 2023* [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2024.
- [28] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2023) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China resources bulletin (2023)* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2024.
- [29] 贾艳青, 张勃, 马彬, 等. 1960—2015年中国西南地区持续性干旱事件时空演变特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(5): 171–176.
Jia Y Q, Zhang B, Ma B, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of persistent drought in Southwest China in 1960—2015 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(5): 171–176.
- [30] 侯艳, 崔宁博, 郭立, 等. 西南季节性干旱区夏玉米水氮耦合效应与水氮生产函数研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(4): 34–40.
Hou Y, Cui N B, Guo L, et al. The effect of water-nitrogen coupling on growth of summer maize in seasonally arid areas and water-nitrogen production function in Southwestern China [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(4): 34–40.
- [31] 刘南江, 冯爱青, 张鹏, 等. 2023年西南地区冬春连旱时空特征及防范应对建议 [J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(7): 16–20.
Liu N J, Feng A Q, Zhang P, et al. Spatial-temporal patterns of the winter 2022-spring 2023 drought in Southwest China and recommendations for drought disaster risk reduction [J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(7): 16–20.
- [32] 赵兰兰, 闻童, 赵兵, 等. 西南地区近50年干旱趋势及特征分析 [J]. *水文*, 2021, 41(6): 59, 91–95.
Zhao L L, Wen T, Zhao B, et al. Drought tendency and characteristic analysis in Southwest China during recent 50 years [J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(6): 59, 91–95.
- [33] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴(1984—2022) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1984—2022.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China resources bulletin (1984—2022)* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1984—2022.
- [34] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2008—2019) [M]. 北京: 气象出版社, 2009—2020.
China Meteorological Administration. *Yearbook of meteorological disasters in China (2008—2019)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009—2020.
- [35] 王建华, 何国华, 何凡, 等. 中国水土资源开发利用特征及匹配性分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 1–8.
Wang J H, He G H, He F, et al. Utilization and matching patterns of water and land resources in China [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(4): 1–8.
- [36] 权燕, 白绍斌. 基于打造“天府粮仓”视角的四川水资源保障对策思考 [J]. *中国水利*, 2023 (9): 10–12.
Quan Y, Bai S B. Measure thinking for safeguarding water resources from the perspective of building a “grain warehouse” in Sichuan [J]. *China Water Resources*, 2023 (9): 10–12.
- [37] 姜大川, 赵钟楠, 何奇峰, 等. 关于推进成渝地区水网建设的若干思考 [J]. *中国水利*, 2023 (9): 4–6.
Jiang D C, Zhao Z N, He Q F, et al. Thoughts of promoting the construction of the water network in Chengdu–Chongqing region [J]. *China Water Resources*, 2023 (9): 4–6.
- [38] 袁伟, 王树鹏. 云南加快水利建设助力农业发展的现状与对策 [J]. *中国水利*, 2023 (5): 46–50.
Yuan W, Wang S P. Current situation and measures of accelerating water project construction to support agricultural development in Yunnan [J]. *China Water Resources*, 2023 (5): 46–50.
- [39] 夏军, 陈进, 余敦先, 等. 变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战 [J]. *地理学报*, 2023, 78(7): 1608–1617.
Xia J, Chen J, She D X, et al. Opportunities and challenges of national water network construction under changing environment [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1608–1617.
- [40] 四川省水利厅. 四川省现代水网建设规划 [EB/OL]. (2023-08-28) [2024-06-20]. <https://slt.sc.gov.cn/scssl/c109024/2023/8/28/9970b9e8b67f453986fc1741a2b27919.shtml>.
Sichuan Provincial Water Resources Department. *Construction planning of Sichuan provincial water network* [EB/OL]. (2023-08-28) [2024-06-20]. <https://slt.sc.gov.cn/scssl/c109024/2023/8/28/9970b9e8b67f453986fc1741a2b27919.shtml>.
- [41] 余海龙, 黄菊莹, 肖国举. 黄土高原半干旱区雨水资源化研究综述 [J]. *人民黄河*, 2010, 32(1): 46–47, 49.
Yu H L, Huang J Y, Xiao G J. Summary of study on rain water re-

- sources of semi-arid region in the Loess Plateau [J]. *Yellow River*, 2010, 32(1): 46–47, 49.
- [42] 唐小娟. 关于中国雨水集蓄利用发展前景的几点思考 [J]. *中国农村水利水电*, 2009 (8): 52–54.
Tang X J. Reflections on China's development prospects of rain-water harvesting and utilization [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009 (8): 52–54.
- [43] 张平仓, 程冬兵. 南方坡耕地水土流失过程与调控研究 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(3): 35–39, 49.
Zhang P C, Cheng D B. Process and regulation of soil and water loss of slope farmland in South China [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(3): 35–39, 49.
- [44] 鲍玉海, 丛佩娟, 冯伟, 等. 西南紫色土区水土流失综合治理技术体系 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 143–150.
Bao Y H, Cong P J, Feng W, et al. Comprehensive management system of soil and water loss in purple soil area of Southwestern China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(3): 143–150.
- [45] 郭廷楠, 段巧甫. 径流调控理论是水土保持的精髓——四论水土保持的特殊性 [J]. *中国水土保持*, 2001 (11): 1–5.
Guo T F, Duan Q F. The theory of runoff regulation and control is the quintessence of soil and water conservation: The fourth discussion on the unique characteristics of soil and water conservation [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2001 (11): 1–5.
- [46] 张平仓, 程冬兵. 长江流域水土流失治理方略探讨 [J]. *人民长江*, 2020, 51(1): 120–123.
Zhang P C, Cheng D B. Discussion on general plan of soil and water conservation for Yangtze River Basin [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(1): 120–123.
- [47] 李凯, 王根绪, 孙向阳, 等. 西南地区森林生态系统水源涵养评价 [J]. *地理科学*, 2023, 43(12): 2217–2227.
Li K, Wang G X, Sun X Y, et al. Evaluation of water conservation function of forest ecosystem in Southwest China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(12): 2217–2227.
- [48] 四川省林业厅. 林业在四川抗旱减灾中的作用 [J]. *中国林业*, 2007 (4): 24–25.
Forestry Department of Sichuan Province. The role of forestry in drought resistance and disaster reduction in Sichuan [J]. *Forestry of China*, 2007 (4): 24–25.
- [49] 黄麟, 祝萍, 曹巍. 中国退耕还林还草对生态系统服务权衡与协同的影响 [J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 1178–1188.
Huang L, Zhu P, Cao W. The impacts of the Grain for green project on the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1178–1188.
- [50] 文亦蒂, 毕玉芬, 董亚芳. 金沙江流域退耕还草地水土保持效益分析研究 [J]. *土壤*, 2006, 38(4): 489–493.
Wen Y F, Bi Y F, Dong Y F. Benefit of forage on water and soil conservation in Jinsha valley [J]. *Soils*, 2006, 38(4): 489–493.
- [51] Meerkerk A L, van Wesemael B, Bellin N. Application of connectivity theory to model the impact of terrace failure on runoff in semi-arid catchments [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(19): 2792–2803.
- [52] Hammad A A, Haugen L E, Børresen T. Effects of stonewalled terracing techniques on soil-water conservation and wheat production under Mediterranean conditions [J]. *Environmental Management*, 2004, 34(5): 701–710.
- [53] 蒋仲龙, 叶柳欣, 刘军, 等. 封育年限对毛竹林凋落物和土壤持水效能的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(5): 860–866.
Jiang Z L, Ye L X, Liu J, et al. Effects of enclosure duration on litter and soil water holding capacity of *Phyllostachys edulis* forest [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2020, 37(5): 860–866.
- [54] 李红琴, 乔小龙, 张镡锂, 等. 封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 195–200.
Li H Q, Qiao X L, Zhang Y L, et al. Effects of fencing on the soil water conservation in Maduo alpine grassland-source of Yellow River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 195–200.
- [55] 马建涛, 柴守玺, 程宏波, 等. 农田秸秆覆盖技术及其应用研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41(3): 597–602.
Ma J T, Chai S X, Cheng H B, et al. Research progress of straw mulching technology and its application in farmland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(3): 597–602.
- [56] 杨庆楠, 高士军, 张何普, 等. 秸秆覆盖对土壤水热状况的影响 [J]. *中国农学通报*, 2024, 40(8): 80–85.
Yang Q N, Gao S J, Zhang H P, et al. Effects of straw mulching on the soil moisture and temperature [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(8): 80–85.
- [57] 张志彬. 绿肥覆盖下紫色土坡地柑橘园水土保持及有机碳流失特征研究 [D]. 重庆: 西南大学(硕士学位论文), 2023.
Zhang Z B. Study on characteristics of soil and water conservation and organic carbon loss in citrus orchards on sloping land with purple soil covered with green manure [D]. Chongqing: Southwest University (Master's thesis), 2023.
- [58] 胡廷飞, 王辉, 胡传旺, 等. 砾石覆盖厚度对斥水土壤入渗特性的影响及模型优选 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 17–22, 29.
Hu T F, Wang H, Hu C W, et al. Effect of thickness of gravel cover on infiltration characteristics of water repellent soils and its model optimization [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 17–22, 29.
- [59] 李王成, 马东祥, 贾振江, 等. 砾石覆盖下的农田土壤环境效应: 研究进展与展望 [J]. *江西农业大学学报*, 2024, 46(2): 278–288.
Li W C, Ma D X, Jia Z J, et al. Soil environmental effects of gravel-sand mulched field: Research progress and prospects [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(2): 278–288.
- [60] 王永武, 朱青, 赖晓明, 等. 土壤水文过程对土壤砾石的响应——全球Meta分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(9): 2094–2109.
Wang Y W, Zhu Q, Lai X M, et al. Response of soil hydrological processes to soil rock fragments: A global Meta-analysis [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2023, 53(9): 2094–2109.
- [61] 夏自强, 蒋洪庚, 李琼芳, 等. 地膜覆盖对土壤温度、水分的影响及节水效益 [J]. *河海大学学报*, 1997, 25(2): 39–45.
Xia Z Q, Jiang H G, Li Q F, et al. Effect of mulch on soil temperature and moisture and analysis of water saving benefit [J]. *Journal of Hohai University*, 1997, 25(2): 39–45.
- [62] 蒋文君, 康银红, 陈瑶, 等. 不同覆盖方式对土壤水热分布的影响 [J]. *土壤通报*, 2022, 53(1): 74–80.
Jiang W J, Kang Y H, Chen Y, et al. The influence of different

- mulching methods on the distribution of soil water and heat [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 74–80.
- [63] 孟源, 胡兵辉. 元谋干热河谷旱地玉米-小麦不同覆盖保水栽培措施的水分效应 [J]. *安徽农业大学学报*, 2016, 43(4): 598–603.
Meng Y, Hu B H. Effects of different covering measures on soil moisture for corn-wheat cultivation in dry-hot valley of Yuanmou [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2016, 43(4): 598–603.
- [64] 黄欢, 何丙辉, 鲍玉海, 等. 不同截排水布置方式下坡耕地坡面产流产沙的模拟研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(10): 97–102.
Huang H, He B H, Bao Y H, et al. Effects of different surface water drainage patterns on the characteristics of runoff and sediment under simulated rainfall condition [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(10): 97–102.
- [65] 张平仓, 丁文峰. 长江中上游坡耕地侵蚀产沙调控理论与实践 [J]. *人民长江*, 2018, 49(1): 23–27.
Zhang P C, Ding W F. Theory and practice of sediment erosion control on slope cropland in upper and middle reaches of Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(1): 23–27.
- [66] 杨荣福. 云南大理州“五小水利”工程建设成效 [J]. *中国防汛抗旱*, 2015, 25(3): 95–96.
Yang R F. Construction effect of five small water conservancy projects in Dali Prefecture, Yunnan Province [J]. *China Flood & Drought Management*, 2015, 25(3): 95–96.
- [67] 吕晨钟, 涂捷. 农田水利建设对农业水旱灾成灾面积的影响研究——以水库建设为例 [J]. *生态经济(学术版)*, 2012, 28(2): 251–253.
Lyu C Z, Tu J. Construction of water conservancy is to study the impact of agricultural flood and drought disaster area: A case study of reservoir construction [J]. *Ecological Economy*, 2012, 28(2): 251–253.
- [68] 谢永生, 纪学伟. 云南干热河谷灌区“智慧三网”建设与运营研究——以元谋大型灌区丙间片 11.4 万亩高效节水灌溉项目为例 [J]. *水利发展研究*, 2023, 23(7): 58–62.
Xie Y S, Ji X W. Research on the construction and operation of the “Three Smart Networks” in dry-hot valley irrigation district of Yunnan: A case study on the high-efficiency water-saving irrigation project of 114 000 mu in Bingjian section, Yuanmou large irrigation district [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(7): 58–62.
- [69] 李恩金, 冉冬梅. 会东县太阳能提灌站的发展分析 [J]. *四川农业与农机*, 2017 (6): 37, 45.
Li E J, Ran D M. Development analysis of solar energy irrigation station in Huidong County [J]. *Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery*, 2017 (6): 37, 45.
- [70] 杨锦越, 赵晓燕, 沈建华, 等. 青贮玉米农艺节水技术的研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(19): 4–6, 10.
Yang J Y, Zhao X Y, Shen J H, et al. Research progress on agronomic water-saving technology of silage corn [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(19): 4–6, 10.
- [71] 高传昌, 王兴, 汪顺生, 等. 我国农艺节水技术研究进展及发展趋势 [J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(1): 146–150.
Gao C C, Wang X, Wang S S, et al. Research progress and development trend of agronomic water-saving technology [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(1): 146–150.
- [72] 张杰豪, 梁心蓝, 黄洪粮, 等. 不同耕作措施对花生结荚期产流产沙过程的影响 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 71–78.
Zhang J H, Liang X L, Huang H L, et al. Effects of different tillage practices on the yield of runoff and sediment in peanut podding stage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 71–78.