

序

中国生态脆弱区类型多、地域广，从西北干旱区到西南青藏高原高寒区、从北方农牧交错区到南方喀斯特石漠化区，每个生态脆弱区表现出各自的脆弱特点和不同的生态问题。中国科学院“美丽中国生态文明建设科技工程”专项在开展生态脆弱区绿色发展途径与区域综合示范等研究的基础上，对生态脆弱区生态保护技术和经济发展模式进行了系统集成，完成了专著《中国生态脆弱区生态修复技术与绿色发展模式》，这对未来乡村振兴和美丽中国建设均具有借鉴和参考价值。在成果即将出版之际，邀我作序，欣然允之。

生态脆弱区具有资源环境系统稳定性差、抗干扰能力弱的特点，在全球变化和人为活动双重影响下，其服务功能逐渐减弱，严重威胁着区域生态安全和可持续发展。生态系统脆弱性和社会经济系统脆弱性往往联系在一起，生态脆弱区通常存在资源匮乏、环境承载力弱等问题，这直接影响了当地居民的生产生活条件，限制了经济发展的可能性，从而导致贫困问题的发生和持续存在。同时，贫困群体可能为了生计而过度利用自然资源，导致环境退化，而生态环境的恶化又可能加剧贫困，因此生态脆弱与贫困呈现极密切的伴生关系。

我作为一位长期生活在西北、研究在高寒区、领导过资源环境领域工作、主导过气候变化研究的学者，对全国生态脆弱区生态保护和经济发展之间的矛盾和问题感同身受。过去几十年我国生态恢复和保护成就斐然。然而，生态脆弱区特殊的自然地理环境和相对落后的人文条件导致保护和发展之间的矛盾始终存在，加之不科学的人类行为，不是过度开发就是极端保护，生态脆弱区生态保护和经济发展的问题始终没有得到根本解决。《中国生态脆弱区生态修复技术与绿色发展模式》集成工作，就是在综合已有成熟技术、集成行之有效发展模式的基础上，力图通过模块化技术、装配式集成，给出具有广泛适用性、效果好、可持续的综合集成模式，不仅为生态脆弱区生态修复与绿色发展提供科学理论依据，而且为不同脆弱区提供可学习、可复制、可应用的实践途径。

美丽中国建设是实现成为发达国家目标的主要标志之一，其中生态脆弱区任务重、问题多、困难大。专著《中国生态脆弱区生态修复技术与绿色发展模式》的出版，相信并期待其将在未来生态脆弱区生态恢复和经济绿色发展中发挥科学支撑和实践指导作用。

秦大河

2025年9月20日

前 言

美丽中国建设是全面建设社会主义现代化国家的重要目标。在我国 2020 年全面建成小康社会之后,将继续推进 2035 年基本实现美丽中国目标、2050 年全面建成和谐美丽强国,2019 年中国科学院启动了 A 类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”项目(以下简称美丽中国专项)。美丽中国专项共设置了十个项目,分别是京津冀及周边城乡环境污染综合治理技术与示范、长三角区域生态环境协同管理与综合治理示范、粤港澳大湾区城市群生态建设工程与生态系统智能管理示范、长江经济带干流水环境水生态综合治理与应用、近海与海岸带环境综合治理及生态调控技术和示范、生态脆弱区绿色升级发展途径与区域综合示范、绿水青山提质增效与乡村振兴关键技术与示范、自然保护地健康管理及生态廊道设计技术、极端天气气候条件下水文地质灾害风险综合防控关键技术及示范和美丽中国地理图景与应用示范。其中生态脆弱区、绿水青山和生物多样性项目涉及生态共性问题,在专项实施的后期,专项专家组提出以生态脆弱区项目为主,综合绿水青山和生物多样性项目的相关成果进行成果集成,本专著就是专项集成主要内容的成果展示。

我国以西南喀斯特石漠化区、西北干旱区和北方农牧交错带、青藏高原高寒区为代表的生态脆弱区占国土陆地面积 70% 以上。这里脆弱的生态系统对人类活动和气候变化表现出双重高敏感性,人类和气候双驱影响下的脆弱生态系统变化巨大。而且,我国生态脆弱区的类型较多,不同区域生态系统抗干扰能力、气候敏感程度、时空波动性、边缘效应及环境异质性等特征明显不同,生态恢复和经济发展提质增效的重点和难度存在较大差别。过去 70 年我国生态治理成效显著,在总结成功治理经验的基础上,国家层面已经确立了以自然生态恢复为主的指导思想。然而,生态脆弱与贫穷落后往往如影相随,经济落后地区多数处于生态脆弱区。在此背景下,审视生态脆弱区实现美丽中国目标的关键问题、生态自然恢复的质量需要人为干预保障、自然恢复的速度需要在科学干预下加快、生态保护与经济发展双赢的途径需要深化研究。因此,如何在生态环境治理过程中提质、加速、增值上攻坚克难,确保生态脆弱区绿色升级发展,是生态脆弱区实现美丽中国目标的当务之急。

在过去几十年生态治理的实践中,我国生态脆弱区生态治理已经创新地提出许多卓有成效的技术体系,推陈出新许多对地方发展起到巨大推动作用的绿色发展模式。如何在此基础上综合集成,我们面临着各种集成思路的选择。为此,通过集成组、参与项目组、专项专家组和中国科学院领导自下而上、自上而下多次反复讨论,形成了“分区聚焦、装配集成、因地制宜、广谱效优”的集成思路。分区聚焦就是针对不同生态脆弱区生态治理和经济发展的的问题,在同一区域内聚焦影响面广泛的主要问题;装配集成就是将已有较成熟但相对分散的技术和模式按科学分类,形成可组装的技术模块,并凝练出集成主线,将不同技术模块沿集成主线进行组装,从而形成集成模式;因地制宜就是组

装集成的模式可根据不同的地域环境和经济发展条件,模式的全部或部分技术能够得到应用;广谱效优就是集成模式针对某一生态脆弱区具有广泛适用性,不仅具有良好的效果,而且效果稳定可持续。在这一集成思路指导下,集成课题组召开了十余次研讨会,在反复研讨的基础上,形成了目前的书稿内容。

本专著共6章。第1章绪论,主要作者有丁永建、吴锦奎、茆亚平,贡献作者有丁光熙;第2章喀斯特石漠化治理与绿色发展的五“股”丰登模式(环普模式),主要作者有白晓永、刘秀明、岳跃民,主要贡献者有杜朝超、李俊翰、张思蕊;第3章机织沙障与人工结皮协同快速高效固沙技术体系(沙坡头模式2.0),主要作者有张志山、赵洋、牛清河,主要贡献者有潘颜霞、杨荣、郭群、屈建军、赵文智、何志斌;第4章北方农牧交错带生态系统多维修复与功能提升技术模式(大榆模式),主要作者有李晓宇、上官周平、姜明,主要贡献者有李同川、佟守正、樊军、李玉霖、贾晓旭、刘志民、陈国双、黄迎新、王娇;第5章三江源国家公园“三草耦合-三生协同”发展模式(三江源模式),主要作者有李奇、赵亮、赵新全,主要贡献者有杨燕、于慧、张同作、江峰、徐世晓、胡林勇;第6章生态脆弱区乡村振兴规划与特色资源综合利用模式,主要作者有李裕瑞、闫巧玲、邓祥征、石雷、杨建平,主要贡献者有郑晓、吴波、程伟、刘政安、王利军。本书稿由丁永建最后统稿,吴锦奎和茆亚平协助统稿并完成书稿材料汇总、书稿格式等大量前期工作。

本书由中国科学院战略性先导科技专项(A类)“美丽中国生态文明建设科技工程”集成任务“生态系统修复及绿色升级核心技术模式”(XDA2310040309)资助。集成任务涉及三个项目包括:生态脆弱区绿色升级发展途径与区域综合示范(XDA23060000,项目六),项目负责人为丁永建(中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州)和王世杰(中国科学院地球化学研究所,贵阳);绿水青山提质增效与乡村振兴关键技术与示范(XDA23070000,项目七),项目负责人为邵明安(西北农林科技大学,杨凌);自然保护地健康管理生态廊道设计技术(XDA23080000,项目八),项目负责人为汪小全(中国科学院植物研究所,北京)。

在书稿交付之际,对参与本次集成工作的各位同仁深表谢意。集成工作复杂困难,来自不同单位、不同项目、不同学科的人员汇集一起,同心协力、集思广益、坚持始终、攻坚克难,最终完成集成任务,对大家的努力和付出点赞和致谢!在完成集成工作的过程中,王梅霞、白海强、金天、何贝贝、何锐等参与会务工作,协助研讨会顺利进行,在此对他们的辛勤付出表示衷心感谢!同时,由于时间较短,集成工作难免存在许多不完善之处,期待读者批评指正。

丁永建

2025年9月26日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国生态治理取得的成效	2
1.2 生态脆弱区美丽中国生态文明建设中存在的主要问题	3
1.3 生态系统修复及绿色升级核心技术模式集成	5
1.3.1 技术模式集成总体思路	6
1.3.2 技术模式集成总体方案	7
1.3.3 技术模式集成主要内容	7
参考文献	12
第 2 章 喀斯特石漠化治理与绿色发展的五“股”丰登模式（环普模式）	13
2.1 引言	13
2.2 科学内涵	15
2.3 技术要点	16
2.3.1 岩溶水高效利用技术体系	17
2.3.2 喀斯特土壤防漏与地力提升技术体系	24
2.3.3 退化植被群落修复与优化配置技术体系	27
2.3.4 碳酸盐岩风化碳汇核算技术体系	31
2.3.5 石漠化生态农业培育和成效评估技术体系	38
2.4 典型案例	41
2.4.1 贵州普定石漠化治理与绿色发展技术综合示范	41
2.4.2 广西环江石漠化治理与绿色发展技术综合示范	43
2.4.3 贵州印江石漠化治理与绿色发展技术综合示范	45
2.5 推广潜力与展望	47
2.5.1 推广潜力	47
2.5.2 主要问题及关键制约因素	49
2.5.3 展望	51
参考文献	53
第 3 章 机织沙障与人工结皮协同快速高效固沙技术体系（沙坡头模式 2.0）	56
3.1 研究背景	56
3.1.1 我国土地沙漠化现状	56
3.1.2 我国沙漠化土地治理技术及存在问题	58
3.2 科学内涵	61

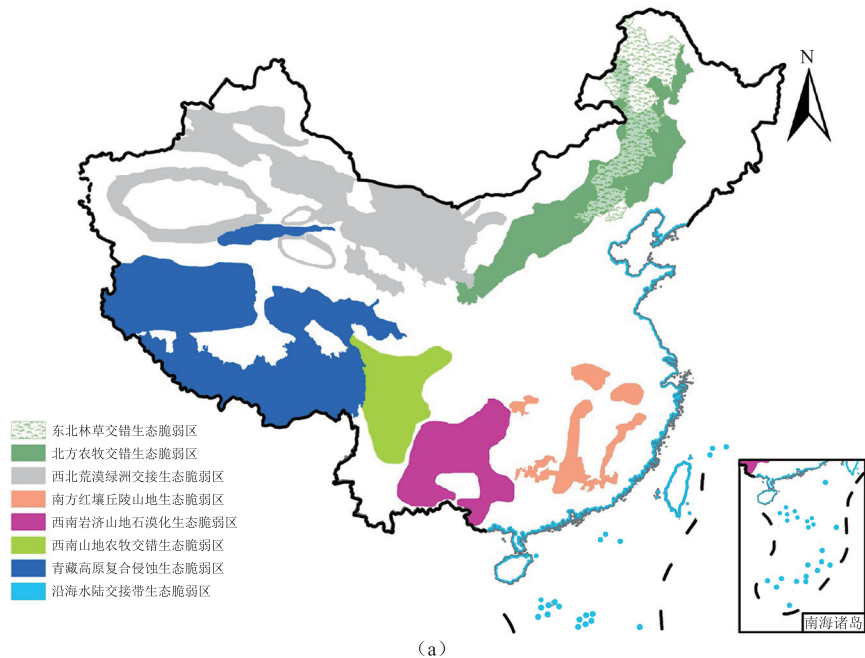
3.3 核心技术	62
3.3.1 阻沙栅栏和大网格高立式阻沙网格技术	62
3.3.2 草方格沙障机械化制备技术	65
3.3.3 干旱沙区固沙植物栽植技术	68
3.3.4 人工生物土壤结皮沙化土地治理技术	72
3.4 典型案例	77
3.4.1 库姆塔格沙漠东缘物理固沙技术综合示范	77
3.4.2 巴丹吉林沙漠边缘植物固沙技术综合示范	81
3.4.3 腾格里沙漠腹地交通干线“四带一体”防护体系	86
3.5 推广潜力与展望	89
3.5.1 推广潜力	89
3.5.2 存在问题与展望	90
参考文献	92
第4章 北方农牧交错带生态系统多维修复与功能提升技术模式（大榆模式）	96
4.1 研究背景	96
4.1.1 北方农牧交错带的生态与发展问题	97
4.1.2 北方农牧交错带的生态建设情况	99
4.1.3 北方农牧交错带的机遇与挑战	100
4.2 科学内涵	101
4.2.1 模式内涵	101
4.2.2 理论基础	102
4.3 模式内容	103
4.3.1 沙化土地林草恢复技术体系	103
4.3.2 土壤改良与肥力快速提升技术体系	110
4.3.3 盐碱化土地综合防治技术体系	112
4.3.4 农-草-畜-水综合发展技术体系	120
4.4 应用案例	129
4.4.1 东北农牧交错带生态功能提升与绿色发展综合示范（大安市）	130
4.4.2 陕北农牧交错沙地治理与绿色发展综合示范（榆林市）	135
4.5 推广潜力与展望	136
4.5.1 推广潜力	136
4.5.2 展望	138
参考文献	139
第5章 三江源国家公园“三草耦合-三生协同”发展模式（三江源模式）	142
5.1 引言	142
5.2 科学内涵和理论基础	144
5.2.1 科学内涵	144
5.2.2 理论基础	146

5.3 核心技术	148
5.3.1 保护地草地的生态功能评估、维持和提升技术体系	148
5.3.2 放牧地草地的可持续利用和生计提升技术体系	158
5.3.3 栽培草地高质高效生产技术体系	167
5.3.4 “三草耦合-三生协同”模式集成	171
5.4 应用案例	179
5.4.1 保护地草地：野外监测-绿色承载力-边界调整-公园评估	179
5.4.2 放牧地草地：生态补偿-草畜平衡管理-三生协同	182
5.4.3 栽培草地：海南州智慧生态牧-草-饲-育产业发展案例	184
5.5 推广潜力与展望	186
5.5.1 推广潜力	186
5.5.2 展望	190
参考文献	194
第6章 生态脆弱区乡村振兴规划与特色资源综合利用模式	197
6.1 引言	197
6.1.1 国家战略需求	197
6.1.2 地方发展需要	198
6.2 模式内容	198
6.2.1 科学内涵	198
6.2.2 技术内容	199
6.3 应用案例	236
6.3.1 绿水青山状态评估与综合区划技术的示范应用	236
6.3.2 乡村振兴规划编制与村庄分类技术的示范应用	238
6.3.3 惠农富民路径提升技术的示范应用	244
6.3.4 特色高值资源生物“三产”融合模式的示范应用情况	252
6.3.5 “冰雪+”山地旅游发展模式的示范应用情况	261
6.4 推广潜力与展望	263
6.4.1 应用推广潜力	263
6.4.2 应用推广时需要注意的问题	264
6.4.3 研究展望	266
参考文献	266

第1章 绪 论

生态脆弱区是生态系统组成结构稳定性较差，抵抗外在干扰和维持自身稳定的能力较弱，易于发生生态退化且难以自我修复的区域。生态脆弱区具有资源环境系统稳定性差，抗干扰能力弱等特点，在全球变化和人为活动双重影响下，服务功能逐渐减弱，严重威胁着区域生态安全和可持续发展（祁新华等, 2013；Detchon and van Leeuwen, 2014）。生态系统脆弱性和社会经济系统脆弱性往往联系在一起（Thomalla et al., 2006），生态脆弱区通常资源匮乏、环境承载力弱，这直接影响了当地居民的生产生活条件，限制了经济发展的可能性，从而导致贫困问题的发生和持续存在。同时，贫困群体可能为了生计而过度利用自然资源，导致环境退化，而生态环境的恶化又可能加剧贫困，因此生态脆弱与贫困呈现极密切的伴生关系（Thomas, 2008）。

我国是世界上生态脆弱区分布面积最大、脆弱生态类型最多、生态脆弱性表现最明显的国家之一。以西南喀斯特石漠化、西北干旱区沙漠化、北方农牧交错带土地沙化/盐渍化、黄土高原水土流失退化、青藏高原高寒草地退化为代表的生态脆弱区占国土陆地面积 70%以上。我国的生态脆弱区大多位于生态过渡区和植被交错区，处于农牧、林牧、农林等复合交错带，是我国目前生态问题相对突出、经济相对落后和人民生活相对贫困的区域。在 2020 年实现全面脱贫前，我国生态脆弱区覆盖了 75% 的贫困区（刘军会等，2015），生态脆弱与贫穷落后如影相随（图 1.1）。



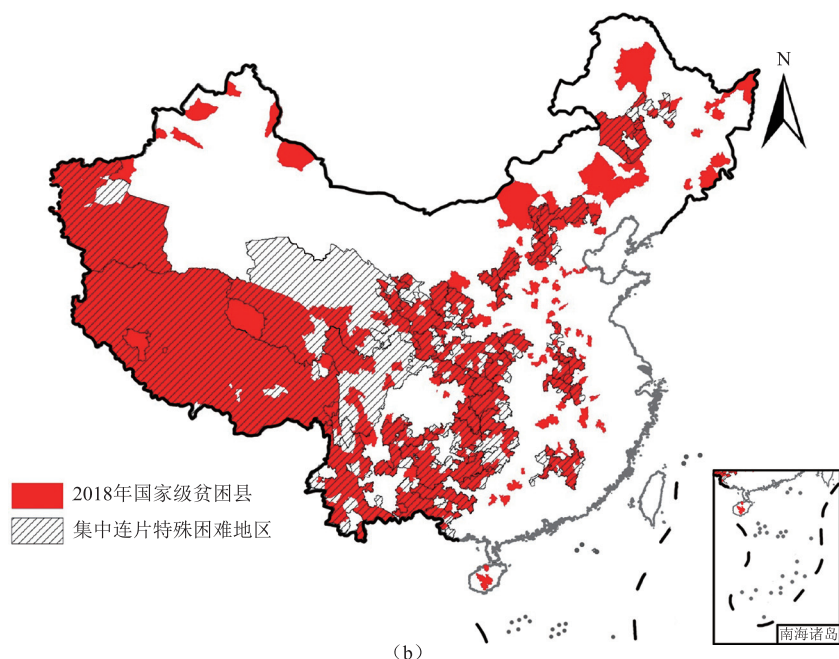


图 1.1 中国的主要生态脆弱区 (a) 与国家级贫困县和集中连片特困区 (b)

1.1 我国生态治理取得的成效

长期以来,生态脆弱区是我国生态治理的重点区。经过多年和几代人的不懈努力,我国以生态脆弱区生态治理为标志的生态建设工作取得显著成效。特别是进入 21 世纪以来,我国推行退耕还林(草)政策,坚持保护优先、自然恢复为主,统筹山水林田湖草沙冰系统治理,推动开展重大生态保护和修复工程,推进大规模国土绿化行动,生态保护修复工作取得显著进展,初步形成生态修复新格局。

为了实现系统化治理,2016 年以来,国家累计实施 25 个山水林田湖草生态保护修复工程试点。截至 2021 年,中央财政合计下达奖补资金 500 亿元,工程试点累计完成生态保护和修复面积约 200 万 hm^2 ^①,包括土地综合整治、矿山生态修复、流域水环境治理、污染与退化土地修复、森林和草原植被恢复等多个方面,有效提升了重点生态区及重要生态节点的生态系统质量。随着“三北”防护林、天然林保护、退耕还林还草、退牧还草、石漠化综合治理、全国重要生态系统保护和修复、全国防沙治沙示范区、京津风沙源治理等重点工程深入实施,农林水牧多管齐下综合治理,重点地区和薄弱环节集中治理,我国生态综合治理取得了显著成效。2013~2021 年,我国累计完成造林面积约 5944 万 hm^2 ,其中人工造林面积约 3222 万 hm^2 ,占全部造林面积的 54.2%;累计完成防沙治沙任务 0.17 亿 hm^2 ,建立了 41 个全国防沙治沙综合示范区、125 个国家沙漠(石

① 两处都是:生态文明建设深入推进 美丽中国引领绿色转型——党的十八大以来经济社会发展成就系列报告之十五.https://www.stats.gov.cn/sj/sjjd/202302/t20230202_1896691.html.

漠)公园;累计新增水土流失综合治理面积约 53.4 万 km²。2020 年,全国水土流失面积共 269.3 万 km²^①。与第一次全国水利普查(2011 年)相比,全国水土流失面积减少 25.6 万 km²,下降 8.7%,呈现面积和强度“双下降”趋势。

2012 年以来,国家在生态脆弱区大力推进生态补偿扶贫、国土绿化扶贫、生态产业扶贫,助力 2000 多万贫困人口脱贫增收。通过扶贫促进生态保护,通过生态保护推动生态脆弱区绿色发展,在扶贫脱贫-生态保护-绿色发展中探索、形成和发展出一系列技术体系和模式范例,为生态脆弱区生态保护和绿色发展积累了宝贵经验,为实现美丽中国目标奠定了良好基础。

1.2 生态脆弱区美丽中国生态文明建设中存在的主要问题

大规模生态恢复建设必须坚持以自然恢复为主的指导思想,这是在总结过去无数失败经验教训的基础上总结出的一条重要经验。自然恢复是指大规模的、无灌溉的生态恢复过程。在这一指导思想下,我国生态脆弱区面积广阔,面临着恢复与发展矛盾突出的现实,一些生态脆弱区自然恢复难度大,需要适度的人为干预促进恢复;一些生态脆弱区生态恢复缓慢,需要人工适度干预加快自然恢复的速度;一些生态脆弱区需要在自然恢复的基础上,考虑生态保护与经济发展协同共进。为解决这些实际需求,生态脆弱区生态建设中的以下问题值得高度关注。

(1) 确保绿色长久的科技支撑能力亟待加强。在过去生态治理成就显著的大背景下,生态建设中出现了许多问题。核心问题是违背自然规律的建设,造成短期“绿”、长期“黄”的不可持续现象。例如,沙漠化治理过度追求植被盖度,而忽视了生态系统的稳定性和可持续性,导致沙漠化治理工程中速生乔木林的大面积推广,缺乏适宜沙漠化土地治理的灌草植被应用,进而造成大面积固沙植被的退化、土壤水量失衡[图 1.2(a)]。在干旱区,山地大面积成片造林严重违背基于水土承载力的草地-森林地带性规律,导致阳坡和半阳坡人工林出现严重退化[图 1.2(b)]。绿洲边缘防护体系耗水量偏高,仍依赖灌溉和地下水维持,亟待通过人工植被和自然植被融合来构建节水型防护体系,降低生态用水的比例。在石漠化地区,一方面,忽视石灰岩坡地裂隙发育,导致坡面水利工程不能发挥应有作用;另一方面,忽视喀斯特植被喜钙岩生的特性,不合理引进的经果林成活率低[图 1.2(c)],挂果率也低,甚至出现不结果的情况(广西河池核桃)[图 1.2(d)]。在三江源高寒地区,恢复的物种多以筛选和引种速生及具有耐性的物种为主,短期效果显著,但稳定性较差,且成本高、投入大。总之,在脆弱区生态建设中缺乏基于土壤水分的植被承载力与植被恢复规模间关系科学认知基础上的宏观布局,对生态“美”的认识存在偏差,科学适宜的盖度和树种,是确保多样性和可持续性的关键,亟须科技介入指导。上述问题的实质是提高生态恢复的质量问题。

① 两处都是:生态文明建设深入推进 美丽中国引领绿色转型——党的十八大以来经济社会发展成就系列报告之十五.https://www.stats.gov.cn/sj/sjjd/202302/t20230202_1896691.html.



图 1.2 不适宜种植造成的不良后果

(a) 民勤县 4 万 hm^2 固沙林 50 年后全部枯死；(b) 浑善达克沙地死亡的落叶松人工林；(c) 广西都安瑶族自治县 40 万株任豆树成活率仅为 10%；(d) 广西河池市核桃挂果率低，甚至不挂果

(2) 生态恢复速率与实现美丽中国目标尚存在时滞差距。从实现美丽中国目标的几个时间维度上比较，按目前生态治理的速度，生态脆弱区实现美丽中国目标存在较大困难。西南喀斯特地区现仍有石漠化土地 1200 万 hm^2 ，按照石漠化土地面积每年最多减少 16 万 hm^2 来计算，全面治理尚需 75 年；目前干旱区仍有 30 万 hm^2 未得到有效治理，以目前 1980 km^2/a 的治理速率，在 2035 年仅能完成 14%，2050 年治理不到 30%；东北农牧交错带 1975~2015 年农田扩张 245 万 hm^2 ，牧区牲畜超载率达 20.6%，湿地萎缩 176 万 hm^2 ，生态治理任务依然艰巨；青海三江源仍有 68.5% 的退化草地处于退化状态，且恢复草地的植被群落结构尚未明显好转。因此，实现生态脆弱区变“绿”的基本治理目标需要加速。能否科学加速，以沙坡头国家野外站观测试验结果为例，该站地处年降水量不足 200mm 的沙漠化严重地区。1956~2015 年沙漠治理的观测试验（图 1.3）表明，在开始阶段，通过人工干预稳定流沙，流沙稳定并在地表形成生物结皮，大概需要 10 年。然后，需要 15~20 年进入生态自然恢复、自然定居种群缓慢增加阶段，这一阶段生态系统尚未达到稳定，总体上灌木和草本竞争，灌木多于草本。此后，生态系统进入以草本为主的基本稳定阶段。可见，在这样的地区，生态恢复的关键是第一阶段，即稳定沙漠，形成生物结皮，此后才能进入较为稳定的自然恢复过程中。现有技术可通过人工培育生

物结皮，1~2 年就可形成稳定的结皮，达到加快恢复生态的目的。

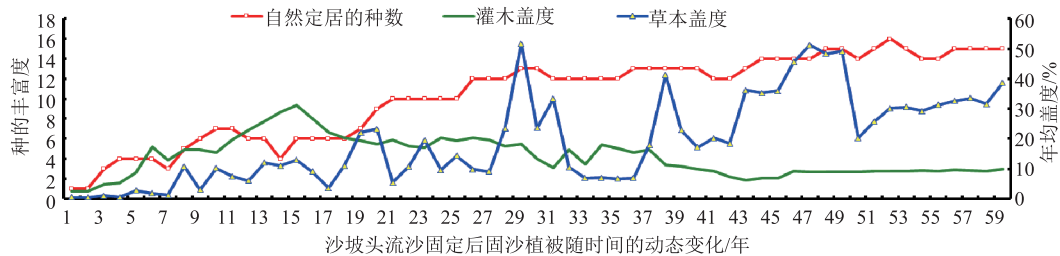


图 1.3 1956~2015 中国科学院沙坡头国家野外观测试验研究站生态恢复观测结果（李新荣，2016）

（3）“绿水青山”转变为“金山银山”的关键技术与途径亟待突破和创新。如何将“绿水青山”转变为“真金白银”，实实在在地为地方脱贫致富、实现美丽中国目标服务，是未来生态建设的重点，尤其是生态脆弱区，生态建设就生态论生态问题突出，对生态增值增效重视不够，亟须统筹考虑生态与经济、文化、政治和社会发展五位一体，促进绿色升级发展。例如，以往的石漠化、沙漠化治理过于强调单一的植被覆盖度增加，而忽略了生态系统的供给服务、调节服务、文化服务和支持服务等功能，亟待创新生态治理理念，从单一的生态型转向生态经济型，从以往单打独斗、各自为战转向科研院所-政府-企业-农牧民联动，综合集成创新的生态恢复与产业协同的绿色发展途径与增值增效模式，为人居环境改善、生态经济产业富民和居民生活幸福指数的提升提供全面保障。

在绿水青山价值体现和乡村振兴中，绿水青山的巨大潜在服务功能和价值还没有得到系统认识；在乡村人口、经济结构巨变背景下如何利用地理空间理论，对乡村振兴进行合理规划；不同地域、不同环境如何选择适宜的发展产业等，既是生态脆弱区发展问题，又是可持续的生态保护问题。同时，生态脆弱区光热资源丰富，葡萄酿酒、牡丹全产业链等发展潜力巨大，特色资源得天独厚。生态脆弱区广泛分布的冰冻圈，既是生态系统生命共同体的特殊组成部分，又是重要的自然资源，但是长期以来，冰冻圈的美丽价值尚没有得到重视和高效利用。生态脆弱区在国家层面采取了强有力的保护措施，如三江源国家公园、祁连山国家公园等，如何平衡生态保护与生态服务的关系，发挥冰冻圈、绿水青山、国家公园和生态保护区巨大的生态服务功能，既建设好美丽生态家园，又使其功能和价值增值增效，造福一方，普惠大众，需要创新生态脆弱区绿色升级发展的新思路，探索可持续发展的新模式、寻求生态优美-生活优质-经济优良发展的新途径。

1.3 生态系统修复及绿色升级核心技术模式集成

如前所述，我国生态脆弱区生态治理多年来取得了巨大成就，但也存在一定问题。目前，在我国 2020 年全面脱贫的基础上，2035 年基本实现美丽中国目标、2050 年全面建成和谐美丽强国愿景（以下简称美丽中国目标）成为未来国家发展的目标，生态脆弱区确立了生态、经济、文化、政治和社会发展“五位一体”发展的核心思想。在此背景下，审视生态脆弱区实现美丽中国目标的关键问题，需要稳住脱贫成果、科学实现绿

水青山建设、高效推进经济发展。在实现生态美丽和经济发展双赢的条件下,生态自然恢复的质量需要通过人工干预加以保障、自然恢复的速度需要在科学指导下加快,同时生态与经济发展双赢的途径需要深化进一步研究。因此,如何在提质、加速、增值上攻坚克难,确保生态脆弱区绿色升级发展,是生态脆弱区实现美丽中国目标的当务之急。

1.3.1 技术模式集成总体思路

在生态脆弱区,生态文明建设应始终坚持生态、经济、文化、政治和社会发展“五位一体”的建设方针,生态文明建设不是生态自身的建设,是生态建设和社会经济发展的协同共进,是可持续环境“优美”下的生态“文明”。这里的环境“优美”是指适应自然地理环境和气候条件的、符合植被持续和稳定生存的生态系统。在这样的条件下,沙漠与冰川一样优美、荒漠草原与湖泊湿地一样美丽。在这样的“绿水青山”下,社会经济能够高效发展,人地和谐,就是生态文明中“文明”的体现。根据上述理解,我们提出未来生态文明建设中,应坚持自然生态恢复为主导、恢复与发展协同有序原则,沿着生态脆弱区由生态“变绿”到人民“增富”这一主线,通过提质、加速、增效科技示范,为生态脆弱区美丽中国建设做出贡献(图1.4)。

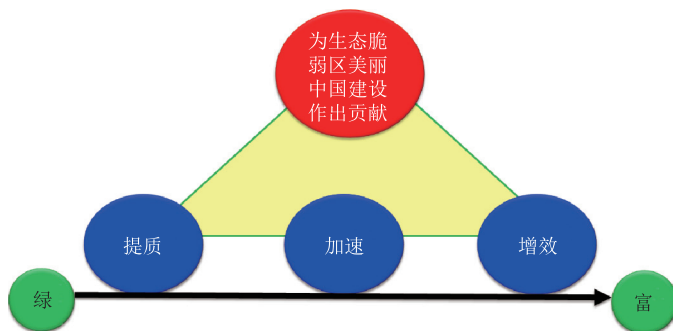


图 1.4 生态脆弱区美丽中国生态文明建设主线

在提质方面,运用绿色承载力的理念确定不同立地条件和资源禀赋下绿色承载力关键参数和阈值,厘清生态的“绿”和发展的“富”之间的联动关系,解决生态建设的空间布局问题。

在加速方面,通过攻坚克难,研发、集成、装配速度快、效率高、成本低、适用广、寿命长、环境友好型的生态治理技术,加速生态脆弱区生态建设速度,为满足 2035 年基本实现美丽中国目标、2050 年全面建成和谐美丽强国愿景提供技术示范。

在增效方面,以“五位一体”生态建设理念为指导,以生态脆弱区绿色增值增效升级发展为目标,创新生态文明建设的新机制、创建生态建设的新模式、创造绿色升级发展的新途径。

1.3.2 技术模式集成总体方案

针对我国生态环境建设中存在的问题，中国科学院于 2018 年批准、2019~2023 年实施了中国科学院 A 类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”。美丽中国专项中的项目六“生态脆弱区绿色升级发展途径与区域综合示范”、项目七“绿水青山提质增效与乡村振兴关键技术及示范”、项目八“自然保护地健康管理与生态廊道设计技术”，三个项目各自或多或少的涉及我国的生态脆弱区问题。2018 年以来，研发人员在我国东北、西北、西南等地的林区、高原、平原、山区等开展了与生态脆弱区生态环境治理相关的系列理论研究、技术研发和实践示范。为了总结形成生态脆弱区生态环境治理与区域绿色发展技术和模式，利用三个项目已有的生态系统保护、修复、绿色发展（乡村振兴）技术，在空间上对地理条件、治理技术/发展模式有共性的技术和模式进行集成、组合、凝练，形成了“分区聚焦、装配集成、因地制宜、广谱效优”的集成思路。“分区聚焦”就是针对不同生态脆弱区生态治理和经济发展的不同问题，在同一区域内聚焦影响面广泛的主要问题；“装配集成”就是将已有较成熟但相对分散的技术和模式按科学分类，形成可组装的技术模块，并凝练出集成主线，将不同技术模块沿集成主线进行组装，从而形成集成模式；“因地制宜”就是组装集成的模式可根据不同的地域环境和经济发展条件，模式的全部或部分技术能够得到应用；“广谱效优”就是集成模式针对某一生态脆弱区具有广泛适用性，不仅具有良好的效果，而且效果稳定可持续。在这一集成思路的指导下，从喀斯特石漠化治理、沙漠化防治、半干旱地区/农牧交错带绿色发展、国家公园建设和发展、乡村振兴宏观综合发展 5 个方向上通过综合集成，形成了生态治理技术体系和绿色发展的综合模式。这些综合集成技术体系和模式具有科学基础厚实、集成度高、涵盖面广、适应性强等特点，可为加快生态脆弱区生态建设、提高生态脆弱区发展质量、满足 2035 年基本实现美丽中国目标和 2050 年全面建成和谐美丽强国愿景助推加力（图 1.5）。

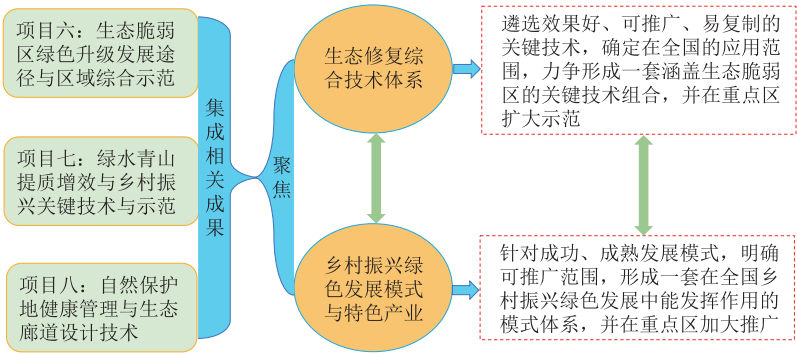


图 1.5 生态系统修复及绿色升级核心技术模式集成技术路线图

1.3.3 技术模式集成主要内容

在美丽中国专项形成的技术、模式的基础上，结合已有生态环境治理的技术和模式，

对三个项目初步提出的技术体系、发展模式进行集成（图 1.6），形成 5 个体系/发展模式方向。

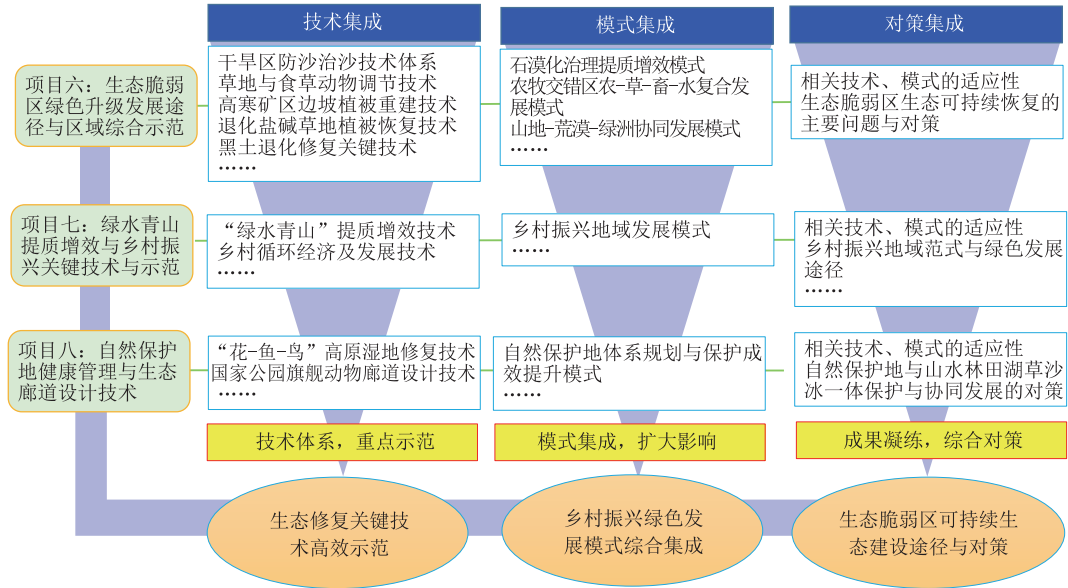


图 1.6 生态系统修复及绿色升级核心技术模式集成内容简略图

1. 喀斯特石漠化水-岩-土-生-人五“股”丰登的环普治理模式

石漠化土地面积占全球陆地面积的 15%，威胁到 2.2 亿人的生存和发展。石漠化是我国西南喀斯特区最严重的生态地质灾害，涉及我国 8 个省/直辖市。解决喀斯特石漠化地区的生态和发展问题是在西南喀斯特区实现乡村振兴、开展美丽中国建设的首要任务。虽然过去石漠化治理成效显著，生态状况稳步好转，但以往的石漠化治理过程并没有协同推进生态高水平保护和经济高质量发展，过于片面强调植被覆盖度的提高，而忽视了喀斯特生态系统的稳定性、物种多样性、持续性和抗风险能力，更是忽视了产业结合、民生改善和健康美丽。并且石漠化治理速度远远滞后于人民日益增长的美好生活需要，进度有待加快，喀斯特地区水土流失，石多土少，漏水严重，植被生长受土壤瘠薄和养分易流失的限制，恢复难度大，最终导致石漠化难以系统恢复和治理。随着对石漠化形成、演变和喀斯特生态系统形成演化认识的深入，以及新技术在石漠化治理过程中的广泛应用，特别是面向国家美丽喀斯特区、生态脆弱区绿色发展建设提质、加速、增效的迫切需求，亟须创新石漠化治理技术体系和模式。

针对中国石漠化现状，围绕喀斯特石漠化治理工程中亟待解决的技术难题，基于水-岩-土-生-人等不同的圈层，以石漠化地区生态恢复为目的开展了技术集成与示范。经过反复试验研究和实践，依托贵州普定喀斯特生态系统观测研究站和中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站成熟技术与发展模式，总结石漠化多年治理理论和积累实践，集成性地提出了一种适应于不同喀斯特地理背景的石漠化水土生耦合综合治理的“五股

丰登”的治理模式（环普模式），其包含5种技术体系：水资源防漏与高效利用技术体系（水）、成土-碳汇时空定量评估技术体系（岩-气）、土壤地力提升技术体系（土）、植被建植技术体系（生）、产业管理和监测评估技术体系（人）。该模式在贵州、广西等不同等级石漠化地区进行了推广应用，具有显著的生态、经济和社会效益，在喀斯特石漠化地区具有广阔的推广潜力和应用前景。

2. 物理与生物协同治沙技术体系（沙坡头模式2.0）

国家林业和草原第六次全国荒漠化和沙化调查（2019年）结果显示，我国北方共有沙漠化面积168.8万 km^2 ，占国土总面积的17.58%，主要分布在北方干旱区和青藏高原。其中，需生态修复治理的区域共计93.9万 km^2 ，占沙漠化面积的55.6%。人工植被建设是我国进行沙漠化（或沙害）防治使用最广的方法。然而，由于沙区自然条件严酷、水资源匮乏、沙化土地面积大，仅用植被建设实现生态恢复、防治沙害不仅花费巨大，而且治理的效果和可持续性在不同的地区均存在不同程度的问题，有限的水分不能支撑大面积的人工植被建设成为主要瓶颈。过去的治理工作总结出“以固为主，固阻结合”的治理模式（沙坡头模式1.0），其技术内涵主要包括风沙前沿建立阻沙栅栏，阻止外部沙源的输入（固）；以草方格和植物固沙，防治就地起沙（阻）。沙坡头模式1.0的核心技术为半隐蔽式草方格沙障（以下简称草方格）流沙固定措施，所用麦草/稻草等容易老化腐烂、维持时间短，削弱了固沙效果。化学与工程固沙虽然提高了治理的速度，但成本高、污染风险大和可持续性差。沙坡头模式1.0存在的主要问题：阻沙栅栏过低降低了阻沙效果差；草方格反复扎设，人力物力消耗过大；固沙植物初始密度过大、生长缓慢、过度消耗土壤水分；生物土壤结皮形成周期长（10~20年），导致地表稳定速度缓慢。

针对上述问题，该模式主要涉及智能化、可装备实施的防沙治沙新材料及施工工艺，构建流沙快速固定的技术体系；集成成本低、固沙效率高、治沙效果好、适用范围广、操作简易、易推广和绿色环保的土壤生物治理技术，构建典型区域绿色环保沙化土地治理模式；从技术创新、模式创新、产业创新和制度创新出发改变传统防沙治沙理念，集成农-牧业与其他产业协同发展模式，创新防沙治沙和绿色发展理念，提出干旱区资源保护和合理利用的途径以及退化生态系统恢复重建与应对气候变化的对策，提出绿色承载力和生态布局决策。该模式包括4项核心技术：阻沙栅栏和大网格高立式阻沙网格技术、草方格沙障机械化制备技术、干旱沙区固沙植物栽植技术和人工生物土壤结皮快繁与固沙技术，是目前干旱区治沙最新集成模式。由于该模式的主要技术体系脱胎于宁夏沙坡头早期的风沙治理，后期模式的试验、示范也主要集中在沙坡头地区，因此称为“沙坡头模式2.0”。

“沙坡头模式2.0”已在库姆塔格沙漠东缘的物理固沙技术综合示范、巴丹吉林沙漠边缘的植物固沙技术综合示范、腾格里沙漠腹地交通干线“四带一体”防护体系建设等实践中得到了应用，产生了较好的生态效益和经济效益。该治沙模式在沙区有着广泛的应用前景。

3. 北方农牧交错带生态系统多维修复与功能提升技术模式

中国北方农牧交错带是从半干旱向干旱区过渡的广阔地带,总面积约 81 万 km²,是我国面积最大、空间尺度最长的农牧交错带,是我国中东部地区遏制荒漠化、沙化东移和南下的主要生态安全屏障。自 19 世纪末期以来,大量其他地区的人口向北方农牧交错带涌入,致使该地区经历了频繁的草地开垦,自然资源的过度利用加剧了生态脆弱的北方农牧交错带土壤侵蚀、草地退化、土地荒漠化等一系列的生态环境问题,对区域可持续发展产生了严重的负面影响。为了缓解生态环境的退化问题,自 20 世纪 90 年代末以来,国家在北方农牧交错带实施了一系列的生态建设工程,如退耕还林还草工程、京津冀周围地区沙源整治工程、“三北”防护林保护工程和全国重点区防沙治沙工程等。这些生态建设工程在一定程度上改变了区域的土地利用模式,抑制了北方农牧交错带生态环境的恶化趋势。迄今为止,北方农牧交错带生态恢复机制、技术、模式方面的研究和试验示范还面临众多挑战:用于遏制湿地、草地退化的关键技术不完善,基础研究与实际应用衔接不紧密,技术集成和试验示范的力度不够;退化生态系统整治模式单调,整治模式对尺度和空间格局的差异考虑不充分;缺乏按类型、性质、尺度和空间配置差别而配备的湿地、草地可持续管理模式。在面对社会经济发展这个终极目标上,如何实现生态产业化、产业生态化的可持续发展,还需要基于区域绿色承载力进行精确评估,集成各项生态治理技术,加强多学科交叉、产学研用融合、多种模式示范扩大受益规模等研究。

北方农牧交错带生态系统多维修复与功能提升技术模式,简称大榆模式,根据东北农牧交错带技术大安综合示范区与陕北农牧交错带技术榆林综合示范区名称而命名。该模式主要针对北方农牧交错带土地力下降、土地沙化、盐碱化的生态问题,以及农牧结构不合理和发展不可持续的问题,研发和集成了沙化土地林草恢复技术体系、土壤改良与肥力快速提升技术体系、盐碱化土地综合防治技术体系、农-草-畜-水综合发展技术体系,包含沙地樟子松高效防衰造林“六位一体”技术、粗质地土壤改良与肥力快速提升技术、中重度盐碱化土地羊草种群恢复技术、稻-苇-渔(蟹)-菌湿地生态农业技术等 14 项技术,并集中在东北农牧交错带的大安市和陕北农牧交错带的榆林市示范应用。通过该模式的沙化土地和盐碱化土地的植物恢复和综合治理,种养结合、草畜平衡等技术的研发和应用,区域植被面积和蓄积实现“双增长”,退化面积和程度实现“双减轻”,实现了生态环境“整体好转、局部良性循环”的历史性转变,也使区域农民生产方式和收入结构发生根本改变,表现出人地关系和谐的景象。

集成适合中国半干旱区“绿水青山”类型——森林、草地、水体(如湿地、河流)、沙地等复合生态系统服务功能及价值的生态学评价技术体系;精准评估与预测北方重要“绿水青山”类型的健康状态、资源禀赋、生态系统服务功能及总价值量的现状及未来变化趋势,识别不同区域、不同类型“绿水青山”存在的主要问题(如脆弱性、弹性、阈值、拐点)与发展短板;集成典型区域森林、草原、水体生态系统服务功能价值提升、主体功能维持/提升的“绿水青山”维持技术,以吉林大安和陕西神木为主要示范区,开展“绿水青山”特色生态产业综合培育技术、典型区域(乡村)振兴技术与示范,指导