

曾小红, 叶爱中, 赵晨光. 山水林田湖草沙复合系统治理演进与多目标优化研究综述[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2026, 24(3): 632-644. Zeng Xiaohong, Ye Aizhong, Zhao Chenguang. A review on the governance evolution and multi-objective optimization in the mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts complex system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2026, 24(3): 632-644. (in Chinese)

# 山水林田湖草沙复合系统治理演进 与多目标优化研究综述

曾小红<sup>1,2</sup>, 叶爱中<sup>1,2</sup>, 赵晨光<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 山水林田湖草沙系统是生态-经济-社会协同发展的典型复合系统, 但该系统的治理演进与多目标优化研究仍缺乏归纳。我国过去 76 年治理历程可分为 5 个逐步深化阶段: 萌芽探索期(1949—1978 年)奠定单目标治理基础; 系统治理初期(1979—1998 年)形成多目标协同治理雏形; 系统治理推进期(1999—2012 年)治理上升为国家战略; 生态文明深化期(2013—2020 年)确立“生命共同体”理论; 智慧治理新时期(2021 年至今)推动技术融合创新。结果表明: 面向该系统的“综合最优”目标, 通常需依托基于自然的解决方案与跨部门协同, 并在保障生态系统服务功能稳定的前提下, 刻画生态-经济-社会效益的帕累托最优权衡关系。进一步归纳多目标优化方法在该系统多个领域的应用模式及效益目标函数设置, 涉及经济效益、生态效益、适宜性与土地紧凑性等维度的综合权衡。当前研究总体呈现智能算法与系统治理需求深度融合的发展趋势。系统总结了山水林田湖草沙复合系统的治理理论与实践演进及相关优化研究进展, 可为类似系统治理研究提供科学借鉴。

**关键词:** 生命共同体; 治理; 生态修复; 历程; 多目标优化

**中图分类号:** TV213; P343 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2026.0061

山水林田湖草沙系统是由多种自然生态要素构成的复合生态系统, 各要素相互依存, 形成有机统一的生命共同体<sup>[1-2]</sup>。该系统本质复杂, 具有多稳态、非线性等特征<sup>[3]</sup>, 治理需统筹多重目标<sup>[4]</sup>。21 世纪以来, 国家全面推进生态文明建设, 在自然保护地和生态治理工程方面取得显著进展<sup>[5-6]</sup>。随着一系列生态工程的实施<sup>[7-8]</sup>, 全国生态环境质量稳步改善, 作为关键指标之一的归一化植被指数显著提升<sup>[9]</sup>, 体现了修复成效。但早期工程常针对单一问题, 部分区域出现了如沙地樟子松人工林衰退所代表的“造林-耗水-生态退化”的循环, 暴露出传统治理在系统协调上的局限<sup>[10-11]</sup>。

为解决单目标治理引发的生态失衡问题, 国家逐步确立“山水林田湖草沙是一个生命共同体”的系统治理理念, 2015 年《生态文明体制改革总体方

案》将其上升为国家战略。2016 年启动山水林田湖草沙一体化保护和修复工程(以下简称“山水工程”)试点, 探索综合治理路径。2020 年“双碳”目标的提出, 进一步凸显了提升生态系统碳汇能力的重要性<sup>[12]</sup>。生态保护修复通过增强植被和土壤碳库的固碳能力, 成为实现该目标的重要路径之一<sup>[13]</sup>。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》明确了“三区四带”的布局, 同年发布的《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》规范了从问题诊断到监测评估的全流程技术体系。“十四五”期间“山水工程”加快落地<sup>[14]</sup>, 标志着我国生态治理步入系统化与规范化的新阶段。

但系统治理理念在实际落地中仍面临挑战: 一方面, 传统条块分割管理模式导致跨区域协同困难; 另一方面, 单一目标导向的治理难以应对, 如科尔

收稿日期: 2025-08-06 修回日期: 2026-04-12 网络出版时间: 2026-04-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20260415.1046.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF1306305)

作者简介: 曾小红(2002—), 女, 陕西汉中, 主要从事生态水文学研究。E-mail: [z1128\\_x@163.com](mailto:z1128_x@163.com)

通信作者: 叶爱中(1978—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士, 主要从事水文集合预报研究。E-mail: [azye@bnu.edu.cn](mailto:azye@bnu.edu.cn)

沁沙地出现的“林-水-田”等多要素资源竞争问题。后者的根源在于现有研究多聚焦单一要素,缺乏对“多要素-多过程”耦合关系的通盘考量,导致量化权衡生态-经济-社会多重目标成为核心难题。

近年来,“山水工程”在多个流域尺度广泛实施,系统治理理念与多目标优化方法的融合应用已取得初步成效。然而,真正能支撑该理念的定量化、多目标优化研究尚处探索初期,缺乏系统性梳理。为此,本文针对该复合系统治理,总结其治理历程与核心内涵,并重点归纳多目标优化在系统治理中的应用模式与关键路径,以期对未来研究提供相关参考。

## 1 山水林田湖草沙复合系统治理研究的分析维度

围绕山水林田湖草沙复合系统治理实践及相关研究进展,从治理演进、系统治理内涵与多目标优化方法3个维度加以梳理(图1)。三者逻辑上呈递进关系:治理演进反映问题情境与阶段特征;系统治理内涵提供多要素耦合与目标结构的理论解释;多目标优化方法则对应复杂权衡关系的定量表达与方案选择路径。流域或区域等空间单元作为治理与优化展开的现实场域贯穿其中。

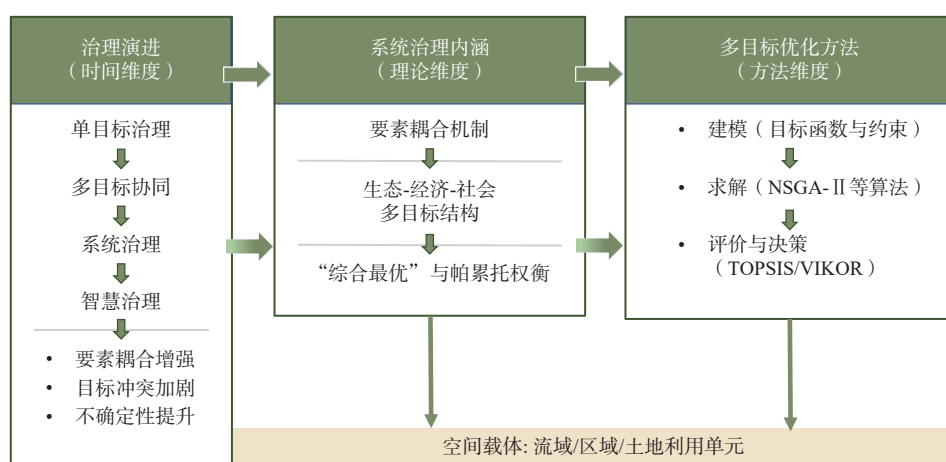


图1 山水林田湖草沙复合系统治理研究的分析结构

Fig. 1 Analytical structure of research on the governance of the mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts system

## 2 山水林田湖草沙复合系统的治理历程

山水林田湖草沙复合系统的治理是我国生态文明建设的重要实践,其历程反映了我国对生态环境保护认识的逐步深化。从单目标治理到系统治理的转变,展现了我国在生态治理领域的卓越成就与宝贵经验。山水林田湖草沙复合系统的治理历程见图2。

### 2.1 萌芽探索期（1949—1978年）：单目标治理的初步实践

新中国成立初期,生态治理以水土保持和保障粮食生产等单一目标为主。1952年,国务院发布指示推动黄土高原等地区小规模水土流失治理;同年,黄河水利委员会设立绥德水土保持科学试验站<sup>[15]</sup>,标志着水土保持工作转向科学研究。1954年,我国首个沙漠科学考察站在宁夏中卫建立,麦草方格技术被提出并应用<sup>[16]</sup>。1957年,中共中央和国务院发布相关决定,目标是在十年内基本消灭普通水旱灾害,由此在全国掀起兴修水利热潮。1978年,国务

院批准建设“三北防护林”工程,开启我国大规模生态工程建设的先河。然而,过度垦殖的破坏性远大于局部且零散的治理成效<sup>[17]</sup>,此阶段生态状况整体上面临较大压力。

### 2.2 系统治理初期（1979—1998年）：多目标协同治理的雏形构建

改革开放后,生态治理体系化建设提上日程。1979年,《环境保护法(试行)》的颁布,初步建立法律依据。1989年,《环境保护法》正式实施。1993年,《关于加强水土保持工作的通知》将水土保持确立为必须长期坚持的基本国策,并明确其作为国土治理根本与发展基础的战略地位。1994年,《中国21世纪议程》发布,明确提出可持续发展三大核心:经济发展、环境保护和社会进步<sup>[18]</sup>,标志着我国生态治理向多目标协同治理转变。同年10月,我国正式签署《联合国防治荒漠化公约》。1998年,长江流域特大洪水后,国务院提出“封山植树、退耕还林;平垸行洪、退田还湖;以工代赈、移民建镇;加固干

堤、疏浚河湖”32 字灾后重建方针,将生态修复与灾害治理系统结合,并统筹社会发展因素,标志着生态治理向“自然-社会协同调控”的体系化模式转

型。此阶段虽存在“重造林、轻管护”等问题,但为后续系统化治理奠定了基础。



图 2 山水林田湖草沙复合系统的治理历程

Fig. 2 The governance journey of the integrated system of mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts system

## 2.3 系统治理推进期（1999—2012 年）：工程化治理的系统推进

1999 年,退耕还林工程启动试点,标志着生态治理进入以系统性工程为抓手的新阶段。2000 年,京津风沙源治理工程和天然林资源保护工程相继启动,治理向区域协同和多目标统筹深化。2002 年,《防沙治沙法》实施使治沙工作步入法治轨道。2008 年,《全国生态功能区划》发布,为生态补偿机制的建立奠定基础。2012 年,党的十八大将生态文明建设纳入“五位一体”总体布局,生态治理提升至国家战略核心,标志着从“被动应对环境问题”向“主动塑造生态现代化”的治理范式转型。此阶段,生态补偿机制不完善<sup>[19]</sup>等问题逐渐显现。

## 2.4 生态文明深化期（2013—2020 年）：基于顶层设计的整体治理

2013 年,“山水林田湖是一个生命共同体”理念首次提出,推动生态治理由单一要素向多要素整合转变。2016 年,我国启动“山水林田湖生态保护修复试点项目”。2017 年,国家公园体制方案首次将“草”纳入“山水林田湖生命共同体”,提出统筹保护管理<sup>[20]</sup>;党的十九大报告正式明确“山水林田湖草”的系统治理。与此同时,多个生态保护修复工程项目启动。2020 年,《山水林田湖草生态修复保护工程指南(试行)》发布为山水工程实施提供技术规范;同年,《黄河流域生态保护和高质量发展总

体规划纲要》审议通过,首次将“沙”纳入“七位一体”治理体系,标志治理工作迈入系统化、整体化新阶段。此时期,重大工程推进显著提升了生态系统的稳定性。

## 2.5 智慧治理新时期（2021 年至今）：生命共同体的一体化实践

2020 年 12 月,中办、国办印发《关于全面推行林长制的意见》,部署全国全面推行林长制;2021 年全国两会期间,习近平总书记在内蒙古代表团谈及生态治理,专门把治沙问题纳入其中,由此确立山水林田湖草沙一体化保护和系统治理顶层治理理念,标志着我国生态治理正式迈入系统修复、整体保护、综合治理的全新发展阶段。2021—2030 年的三北工程六期建设致力于跨区域协作与生态防护网络建设。以全域规划、全要素统筹、全链条管理为特点的“山水工程”,作为系统治理理念的实体化实践,于 2022 年底入选联合国首批“世界生态恢复旗舰项目”。2023 年 9 月,水利部提出推进“数字孪生流域”建设,构建虚实交互的智慧流域平台,这一举措与“十四五”规划中推进智慧水利、智慧气象等建设要求相契合,通过智能监测和精准调控<sup>[21]</sup>,赋能“生命共同体”的精准保护与修复,为“山水工程”提供核心支撑。截至 2024 年 8 月,全国已实施“山水工程”52 个,治理面积超过 1 亿亩<sup>[22]</sup>。此阶段生态治理实践逐步向智能化、精准化发展。

### 3 山水林田湖草沙复合系统治理的核心内涵

山水林田湖草沙复合系统的治理演进表现为治理目标、要素耦合与决策不确定性的持续提升:从早期的单一目标简单结构,到系统治理理念下的多要素协同与复杂权衡,再到当前受气候变化、政策与跨区域因素影响的高维多情景强约束问题。这一复杂度的演进,构成了多目标优化范式发展的现实背景。

#### 3.1 治理理念与要素耦合机制

山水林田湖草沙复合系统的治理是基于系统论和生态学原理的治理模式,旨在统筹各要素及其相互作用关系,实现生态系统的整体保护、修复与可持续发展<sup>[1,23]</sup>。其治理遵循的核心原则:整体性强调从生命共同体视角统筹多要素配置,避免孤立治理<sup>[24-26]</sup>;协同性注重要素间及部门间联动,通过多要素协同提升治理效能;系统优化则基于生态学原理动态配置资源,以实现生态、经济与社会效益的综合平衡。为落实协同性与系统优化要求,系统治理逐步构建林长制<sup>[27]</sup>、河湖长制等为代表的责任制度体系,通过跨部门协作机制、信息共享平台及联动调度方式,强化治理主体之间的协调与约束,缓解传统“条块分割”导致的协同不足,也为后续多目标优化结果的分级实施、协同决策与反馈调整提供制度与组织基础。

在生态保护与修复过程中,山水林田湖草沙复合系统各要素之间存在复杂的非线性交互与反馈关系,可视为一个具有自适应特征的生命共同体。已有研究用“皮毛”结构<sup>[28]</sup>来刻画系统要素关系:山、水、湖、沙构成系统的“皮”,对应区域的生态承载能力,林、田、草构成系统的“毛”,对应生态生产能力,二者相互依存,共同维系系统稳定性。具体而言,山体调节径流并涵养水源,林田促进湖草稳定,湖草滞沙成壤,沙壤又对山体形成反馈补给<sup>[24]</sup>(图3)。各要素通过水、物质与能量的传输形成循环反馈结构,从而实现生态、经济与社会目标的动态平衡。该机制不仅体现了生态系统内部的要素协同,也揭示了社会-生态系统框架下自然过程与人类调控的互动关系,为多目标优化提供理论基础。在实践层面,基于自然的解决方案<sup>[29]</sup>作为关键路径,通过工程与管理手段推动一体化治理体系的构建<sup>[30-31]</sup>。我国在流域与区域尺度开展了多项系统治理实践,展现出系统性与创新性并重特征。在流域治理方面,流域系统科学<sup>[32]</sup>通过其系统视角促进了多要素的综合治理,从而优化了治理策略的效果和实施效率。湖北三峡地区通过水环境修复与水土保持实

现跨区域协同治理<sup>[33]</sup>。太湖流域构建“挡引捞控”防控体系,结合桑基鱼塘与遥感技术治理蓝藻和农业面源污染。赤水市大同河流域通过退耕还林、冲沟治理和生态护坡改善水土与水质,同时划定保护区维护生物多样性<sup>[34]</sup>。塔里木河源流区依据山地-绿洲-荒漠生态分异特征实施分区修复,有效遏制荒漠化扩张<sup>[35]</sup>。此外,在高寒生态系统中,若尔盖湿地<sup>[36]</sup>通过实施本地优势丛生植物重建与水位调控相结合的修复策略,改善了土壤微环境与水文过程,显著提升了退化湿地的植被恢复能力与生态系统稳定性。近年来,以数字孪生<sup>[37]</sup>为代表的新型智慧治理技术通过集成实时监测数据与动态模型,为流域生态过程模拟和治理成效评估提供精确化技术支撑,并进一步为多目标优化提供持续的数据支撑与情景推演,从而支持模型参数的动态更新与多情景下的滚动优化分析。在区域协同治理方面,干旱-半干旱沙地系统中的科尔沁沙地<sup>[38]</sup>通过“以路治沙”构建网格化固沙体系,并以恢复原生榆树疏林草地为核心的综合治理模式,实现了地表稳定性提升与生态退化趋势的有效遏制。六盘山区通过构建生态安全格局和优化关键生态节点,提升了生态稳定性和水土保持能力,分区施策显著增强了生态系统服务功能<sup>[39]</sup>。承德市通过水源保护、生态廊道建设与矿山农田整治提升了京津水源地生态功能<sup>[40-41]</sup>。泰山区域创新“湿地-修复-矿山-流域”协同治理模式,新增湿地 724 hm<sup>2</sup>,使东平湖水质稳定达到Ⅲ类标准,同时修复矿山面积 3 144 hm<sup>2</sup><sup>[42]</sup>。太行地区以“一山一渠两流域”布局实现生态与经济效益双赢。

#### 3.2 “综合最优”目标及其实现路径

在系统梳理山水林田湖草沙复合系统治理实践与多目标优化研究的基础上,可将多目标协同与整体效益提升的内在逻辑概括为“综合最优”的分析视角。该视角强调在保障生态系统健康前提下,通过要素协同配置,在生态-经济-社会多重目标之间寻求协调优化,并在约束条件下形成帕累托意义上的整体最优情形,即达成“1+1>2”的协同效应。为便于对该概念进行定量讨论,可借助多目标优化模型加以表达:一方面,通过设置多维度指标体系,并结合阈值约束或权衡规则刻画目标间关系,为优化分析提供计算基础;另一方面,在生态底线约束下,结合土地利用多目标优化分析 7 要素空间配置的协同联动。帕累托前沿可用于刻画不同目标组合下的可行解集,并为“综合最优”情形下的方案比选提供判别依据。

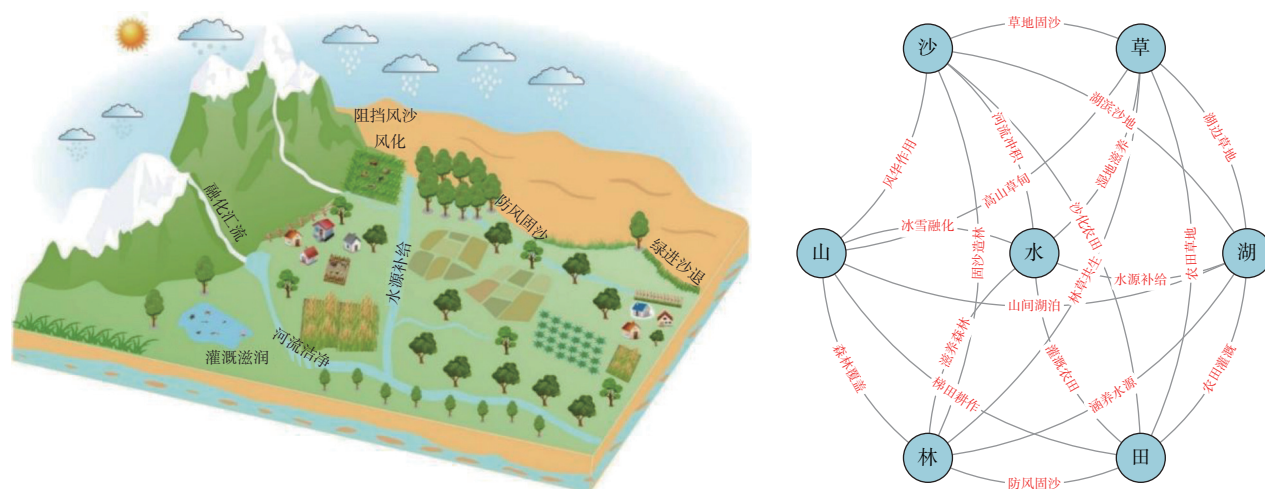


图 3 山水林田湖草沙复合系统内涵示意

Fig. 3 Schematic illustration of the connotations of mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts system

经济维度强调资源可持续利用与产业结构优化,通过单位面积产值、资源利用效率<sup>[43]</sup>及投入产出差值<sup>[44]</sup>等指标衡量经济产出最大化与开发成本最小化<sup>[45]</sup>的实现程度。生态维度以维护生物多样性为基础,通过提升水源涵养、土壤保持与碳汇等关键生态功能,保障生态系统健康运行,其优化目标聚焦于提升生态服务总价值和土地利用的环境协调性,同时衔接国家“双碳”战略,体现碳储量和碳汇的贡献。量化评估常基于当量因子法的服务价值系数<sup>[46-47]</sup>,需依据研究区的气候、产量、物价及生态功能差异进行区域修正,或以森林为基准计算绿当量<sup>[48]</sup>。社会维度关注人居环境改善、社会公平和社区韧性增强,通过城镇化水平、人均建设用地、人均粮食与耕地占有量、人均收入等指标衡量优化成效<sup>[49]</sup>,在多目标优化中常作为约束条件,确保社会基本需求<sup>[50-51]</sup>。

“综合最优”并不等同于任意帕累托非劣解,而是指在多重约束与多维判别标准下,从解集中识别出的相对协调方案。通常可从效率性(如理想点距离或加权距离)<sup>[52]</sup>、协调性(如加权满意度或效用函数)<sup>[53-54]</sup>与稳健性(如多情景下目标函数波动性、约束违约概率或生态系统服务稳定性)<sup>[55-56]</sup>等对帕累托(Pareto)解集进行综合评价,以避免单一目标占优或对情景变化高度敏感的解。在实际决策中,多目标优化结果通常需经过“优化-评价-决策”等分阶段分析过程,将帕累托解集进一步转化为符合治理偏好与政策约束的代表性方案,从而提升其在系统治理中的可解释性与可操作性。

### 3.3 多目标优化的目标体系构建与治理应用

借鉴黄河流域的“139+”水沙调控指标体系<sup>[57]</sup>理念,相关研究通常将“可持续运行”引入优化框架,

围绕生态安全、经济可行与社会公平构建目标函数体系(见表 1),为多目标建模提供导向依据。

土地资源与农业结构优化方面:新疆昌吉州通过 GMOP-PLUS 模型实现“田-草-沙-水”要素的空间协同优化,在生态底线约束下实现经济与生态效益双提升;古浪县通过土地结构优化促进“田-林-草-水”秩序化配置,结合生态绿当量与政策性约束求解“三效合一”方案<sup>[61]</sup>;乌鲁木齐市构建低碳导向模型,将碳排放作为独立优化目标,协调经济与生态效益,实现土地利用结构的低碳优化<sup>[45]</sup>;东北黑土区通过水-碳-经济-生态耦合模型增加水稻面积 13.7%,同步提高产量、固碳、农民收入,并缓解水资源压力<sup>[62]</sup>;荆州市东部区域采用 DSSAT-CLUE-s-InVEST-NSGA-II 模型优化作物情境,在保障农业生产的同时提升生态系统服务价值和人类福祉<sup>[63]</sup>;西北旱区基于水足迹模型优化种植结构,实现节水与效益协同<sup>[64]</sup>。

水资源与生态系统协同优化方面:引江济淮工程(河南段)以缺水率、抽水量和供水公平性为目标构建调度模型,保障供水空间均衡性<sup>[65]</sup>;开都河流域通过水-能源-生态多目标优化协调发电与生态水位需求<sup>[66]</sup>;黑泉水库利用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithmic, NSGA-II)与 TOPSIS 决策方法优化调度方案,在灌溉、生态流量与发电量之间实现折中平衡<sup>[67]</sup>;若尔盖高寒湿地基于生态系统稳态转化理论,运用 NSGA-II 算法提出无偏好修复策略,提升经济效益 41.45%、生态效益 9.18%、湿地修复适宜性 1.65%<sup>[68]</sup>。治沙区基于非线性多目标优化模型,综合考虑固碳制氧价值与水资源效率,优化植物配置与灌溉方案,实现沙漠治理

与资源利用的协同优化<sup>[69]</sup>。上述案例虽涉及不同区域类型与治理情景,但总体上具有较强的代表性,其共同特征在于围绕关键限制因子的识别与多要素协同调控,形成了可借鉴的治理机制。

表1 山水林田湖草沙复合系统多目标优化经济、社会、生态效益常用公式

Tab. 1 Commonly used formulas for multi-objective optimization of economic, social, and ecological benefits in the mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts system

|                 | 土地资源利用优化                                                                                              | 水权分配优化                                                                                                                                           | 水资源配置优化                                                                                                                                                                                                                                                                        | 农业种植结构优化                                                                                                                                            |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 山水林田湖草沙复合系统优化分类 | 经济效益常由不同土地利用类型的经济产出决定,社会效益由粮食安全和基本需求的保障程度衡量,生态效益通过生态系统服务进行评价 <sup>[50, 58]</sup>                      | 经济效益由各产业水权分配量所带来的经济效益进行综合分析;社会效益由区域需水量与分配得到的水量差异度最小来衡量;生态效益以保证区域基本生态用水进行设定 <sup>[41, 59]</sup>                                                   | 经济效益由供水成本和单位用水收益决定;社会效益由所提供的就业岗位数间接表示;生态效益由单位立方水产生的生态服务价值表示 <sup>[60]</sup>                                                                                                                                                                                                    | 经济效益由作物播种面积及产量、现金成本和产出决定;社会效益由作物产量的经济产出和需要消耗的劳动力决定;生态效益正面价值考虑气候调节价值、蓄水防洪服务价值、土壤保持价值和农业维持生物多样性价值,负面价值考虑化肥、农药环境污染 <sup>[44]</sup>                     |
| 经济效益            | $f_1(A) = \sum_{i=1}^n (a_i \times A_i)$ <p>式中: <math>a_i</math> 为土地利用类型 <math>i</math> 的经济效益系数</p>   | $f_1(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} D_{j,k} x_{j,k}$ <p>式中: <math>D_{j,k}</math> 为 <math>k</math> 分区内第 <math>j</math> 用户在分配年每立方水所带来的经济效益</p> | $f_1^+(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (n_{ij}^+ - m_{ij}^+) x_{ij}^+ R_{ij}$ <p>式中: <math>m_{ij}^+</math> 为不同用户 <math>j</math> 相对于水源 <math>i</math> 单位供水成本, 元/<math>m^3</math>; <math>n_{ij}^+</math> 为不同水源 <math>i</math> 相对于用户 <math>j</math> 单位用水收益, 元/<math>m^3</math></p> | $f_1(S) = \sum_{j=1}^n S_j Q_j \times (P_j - C_j)$ <p>式中: <math>C_j</math> 为第 <math>j</math> 种作物的现金成本, 元/kg</p>                                     |
| 三大效益目标函数        | $f_2(A) = \sum_{i=1}^n (b_i \times A_i)$ <p>式中: <math>b_i</math> 为土地利用类型 <math>i</math> 的社会效益系数</p>   | $f_2(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} [E_{j,k} - x_{j,k}]$ <p>式中: <math>E_{j,k}</math> 为 <math>k</math> 分区内第 <math>j</math> 用户的需求水量</p>        | $f_2^+(x) = \sum_{j=1}^J \left( \sum_{i=1}^I x_{ij}^+ R_{ij} \right) s_j^+$ <p>式中: <math>s_j^+</math> 为水源 <math>i</math> 对用户 <math>j</math> 的单位用水部门提供的从业岗位, 人/<math>m^3</math></p>                                                                                             | $f_2(S) = \sum_{j=1}^n S_j \times (P_j \times Q_j - L_j)$ <p>式中: <math>L_j</math> 为 <math>j</math> 种作物的劳动力成本, 主要指家庭用工和雇工费用, 元/<math>hm^2</math></p> |
| 生态效益            | $f_3(A) = \sum_{i=1}^n (c_i \times A_i)$ <p>式中: <math>c_i</math> 为土地利用类型 <math>i</math> 的生态服务价值系数</p> | $f_3(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} \frac{x_{j,k}}{P_{j,k}}$ <p>式中: <math>P_{j,k}</math> 为 <math>k</math> 分区内第 <math>j</math> 用水户生态需水量</p>   | $f_3^+(x) = \sum_{j=1}^J \left( \sum_{i=1}^I x_{ij}^+ R_{ij} \right) t_j^+$ <p>式中: <math>t_j^+</math> 为不同用水部门单位用水可创造的生态环境服务价值, 元/<math>m^3</math></p>                                                                                                                          | $f_3(S) = \sum_{j=1}^n S_j \times E$ <p>式中: <math>E</math> 为第 <math>j</math> 种作物单位面积生态价值, 元/<math>hm^2</math></p>                                   |

注:  $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型的规划面积,  $km^2$ ;  $x_{j,k}$  为  $k$  分区第  $j$  用户所分配的水量;  $R_{ij}$  为水源  $i$  与用水部门  $j$  的配置关系(1表示配水, 0表示不配水);  $x_{ij}^+$  指水源  $i$  分配给用户  $j$  的水量,  $10^8 m^3$ ;  $S_j$  为第  $j$  种作物播种面积,  $hm^2$ ;  $Q_j$  为第  $j$  种作物的单位产量,  $kg/hm^2$ ;  $P_j$  为作物  $j$  的平均出售价格, 元/kg。

山水林田湖草沙复合系统在空间上主要对应不同土地利用类型,其治理过程本质上体现为土地利用类型的空间配置与转化。在此基础上,为更系统地刻画山水林田湖草沙复合系统治理中的多目标权衡关系,土地利用优化常被作为重要载体,在栅格尺度上设置包含经济效益、生态效益、适宜性与土地紧凑性的多目标优化问题<sup>[68, 70]</sup>。其中,土地利用类型的空间转化过程受到自然本底条件、土地利用管制与工程实施可行性约束的共同限定,并最终通过优化求解与评价决策过程形成相应的治理方案。

需要注意的是,不同研究在目标函数设置、权重分配及约束选取方面存在显著差异,这种差异本质上源于研究区自然条件、发展阶段及治理目标的情景依赖性。例如,水资源约束突出的干旱区,生

态流量或用水效率往往作为硬约束,而在粮食安全压力较大的区域,农业产量或耕地保有量通常被赋予更高权重。上述差异并不必然削弱研究结论的可靠性,而是反映了多目标优化对不同治理情景的适应性特征。以示例方式说明系统治理中典型目标函数的构建思路,该目标体系并不构成对治理目标类型的限定。其中:  $E_x$ 、 $E_y$  分别为经济和生态目标;  $C_s$  为土地紧凑性目标,通过约束空间布局的离散化程度,降低修复与保护单元的空间破碎化风险,为系统治理的长期稳定与实施效率提供结构保障;适宜性目标( $S_w$ )可涵盖生态修复适宜性或土地利用适宜性,用于反映不同空间单元在自然条件与工程可行性约束下的配置合理性。相应地,上述目标可分别表示为如下4类目标函数:

$$E_x = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_k x_{ijk} \quad (1)$$

$$E_y = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_k x_{ijk} \quad (2)$$

$$C_o = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ijk} x_{ijk} \quad (3)$$

$$S_w = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N d_k x_{ijk} \quad (4)$$

$$r_{ijk} = \sum_{\varepsilon=-1}^1 \sum_{\delta=-1}^1 [x_{(i+\delta)(j+\varepsilon)k} - x_{ijk}] \quad (5)$$

式(1)~(5)中:  $M$  和  $N$  分别为规划区的行数和列数;  $K$  为研究区土地利用类型数量;  $x_{ijk}$  为未来栅格单元  $(i, j)$  的土地利用类型, 如果栅格单元  $(i, j)$  的土地利用类型为  $k$ , 则  $x_{ijk} = 1$ , 否则为 0;  $a_k$ 、 $b_k$ 、 $r_{ijk}$ 、 $d_k$  分别为单位地块土地利用类型  $k$  的经济效益系数、生态效益系数、土地紧凑度和适宜性效益系数。

尽管现有研究多聚焦特定要素耦合, 尚未实现该系统 7 要素整体联动优化, 但相关研究已为系统层面的综合建模与评价提供了必要基础。借鉴“139+”体系的系统化思路, 未来可在更大尺度和更复杂场景下进一步完善目标架构与评价路径, 从而提升山水林田湖草沙复合系统治理的长期稳定与高质量运行的可达性与可检验性。

#### 4 山水林田湖草沙复合系统多目标优化方法

在山水林田湖草沙等复合生态系统治理中, 多目标优化<sup>[71]</sup> 是应对生态、经济与社会等多重目标冲突的核心方法。由于系统治理需在多重约束条件下统筹多目标协同, 单一目标或权重方法难以反映不同目标组合下的可行权衡关系, 通常需要帕累托最优解集刻画目标间的权衡结构, 以支撑多方案比较与决策选择<sup>[72]</sup>。该类问题普遍具有高维度、强冲突及显著空间异质性, 其关键在于如何在多目标冲突中识别兼顾系统效率、协调性与稳定性的优化方案。

从治理复杂度演进的角度看, 优化方法的选择不仅与治理阶段相关, 更取决于治理问题的目标结构及不确定性特征。在以单一资源配置或工程效率提升为主、决策偏好相对明确的情景下, 单目标或加权综合方法仍具有一定适用性; 随着系统治理理念的确立, 当治理对象转向多要素耦合与多目标

协同、且多个目标之间存在显著权衡关系而难以事先确定权重时, 基于帕累托前沿的多目标优化方法更适于刻画目标冲突结构, 并生成可供决策比较的折中方案<sup>[73]</sup>。进一步地, 在当前强调长期稳定性与风险防控的治理背景下<sup>[74]</sup>, 治理问题往往呈现多情景与不确定性特征, 此时仅依赖确定性多目标优化难以保证方案在不同未来条件下的可靠性, 需要根据不确定性出现的位置及其信息特征引入相应的建模范式: 当不确定性主要体现在参数或情景层, 且其概率分布已知或可合理估计时, 可采用随机规划刻画多情景下目标函数的期望表现或约束满足概率<sup>[75]</sup>; 当不确定性难以用概率描述且治理目标强调风险防控与底线安全、需确保方案在最不利情景下仍具可行性时, 鲁棒优化更为适用<sup>[76]</sup>; 而当不确定性主要来源于目标、约束或决策偏好本身的模糊性与难以精确量化特征时, 模糊规划可通过引入满意度或效用函数刻画不同方案的综合可接受性与协调性。上述方法范式并非与治理阶段严格一一对应, 而是反映了治理问题复杂度、不确定性程度及决策目标特征对优化方法选择的内在驱动, 可根据具体研究目的与情景条件灵活选用。

在具体求解层面, 当前多目标优化方法主要分为传统优化算法和智能优化算法两类(表 2)。传统优化算法多通过权重设定或约束转化实现求解, 具有一定适用性, 但其结果对权重阈值设定高度敏感, 难以刻画山水林田湖草沙复合系统中多要素耦合的复杂权衡关系。随着治理问题由单一要素配置转向多要素、多目标协同, 智能优化算法逐渐成为土地利用多目标优化的重要工具。其中: 非支配遗传算法(NSGA)能够通过非支配排序刻画多目标权衡关系, 但在计算效率与解集保持方面存在一定局限; 非支配排序遗传算法(NSGA-II)通过引入快速非支配排序、拥挤距离与精英策略, 在无需预设目标权重的条件下可生成分布均衡的帕累托解集, 因而成为生态治理领域优化的常用方法<sup>[77-80]</sup>。NSGA-II 通过算子改进与约束嵌入, 可适配干旱区、生态脆弱区及农业集约区等多类型情景, 并常与 InVEST、IPCC 清单方法及 PLUS 模型耦合<sup>[81]</sup>, 用以支撑土地利用优化、水资源配置与生态修复等空间决策任务。模拟退火(simulated annealing, SA)、粒子群(particle swarm optimization, PSO)及遗传算法(genetic algorithm, GA)亦在土地利用优化中有所应用, 其在计算效率方面具有一定优势, 但对多目标

问题支持不足,通常需通过引入多样性维持策略或混合算法加以改进。多目标遗传算法( multi-objective genetic algorithm, MOGA)思路与 NSGA 相近,但其种群多样性依赖稳定参数,收敛速度相对较慢。蚁群算法(ant colony optimization, ACO)在土地利用与空间配置优化中的应用相对较少,已有研究表明其可用于部分空间配置问题,但在山水林田湖草沙复合系统的治理中尚未形成成熟且通用的应用范式,相关研究多将其作为辅助方法或与其他模型结合使用。

表 2 多目标优化方法  
Tab. 2 Multi-objective optimization methods

| 序号     | 方法             | 思想                                                                                                      | 优点                                                    | 缺点                                                      |
|--------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 传统优化算法 | T <sub>1</sub> | 加权求和法 <sup>[83]</sup><br>对各目标函数赋予不同权重并求和,将多目标问题转化为单目标优化问题求解                                             | 简单有效,易于实现;调整权重组合,可获得不同的帕累托最优解                         | 权重的选取与各个目标的相对重要程度密切相关,主观性强;在搜索空间非凸时,难以在帕累托最优前端的非凸部分上求得解 |
|        | T <sub>2</sub> | $\varepsilon$ -约束法 <sup>[84-85]</sup><br>选定一个目标函数进行优化,将其他目标函数转化为约束求解                                    | $\varepsilon$ 在优化过程中可选取不同的值,获取多个帕累托最优解                | 耗时较长,计算开销大;依赖 $\varepsilon$ 的选取,缩小搜索范围,造成最优解的偏差         |
|        | T <sub>3</sub> | 最小-最大法 <sup>[86]</sup><br>通过最小化各目标函数与预设目标值的最大偏差求最优解                                                     | 适用于目标函数存在冲突的问题                                        | 计算量大,目标值设定较难                                            |
|        | T <sub>4</sub> | 目标规划法 <sup>[87]</sup><br>在约束条件下,使目标函数尽可能接近预设目标值                                                         | 求解效率高,适用于确定性问题                                        | 依赖先验知识,,目标设定影响结果                                        |
|        | T <sub>5</sub> | 字典排序法<br>在先验知识的支持下,按目标函数重要性排序,依次优化,直至求出最优解                                                              | 方法简单易用                                                | 各目标函数的重要程度不易厘清,针对问题域的性质了解甚少,排序随意性强,降低解的可信度              |
| 智能优化算法 | A <sub>1</sub> | GA<br>借助生物进化中的遗传、突变等特点,通过选择、交叉、变异等计算过程,在大规模种群迭代过程中搜索最优解                                                 | 使用范围广;全局优化能力好;具备并行搜索能力;对搜索空间本身的特征没有过多要求,可处理复杂优化问题     | 耗费计算资源多                                                 |
|        | A <sub>2</sub> | MOGA <sup>[88]</sup><br>对种群中的全部个体进行非支配排序,并采用自适应小生境技术和受限杂交技术来维持种群多样性,以获得均衡的帕累托前沿解                        | 效率高易于实现                                               | 如果小生境数目信息是基于目标函数的,那么两个具有相同目标函数向量的不同个体无法在同一代种群中存在        |
|        | A <sub>3</sub> | NSGA <sup>[89]</sup><br>通过非支配排序将种群个体分层(类似剥水果皮),逐级标记非劣解并利用适应值共享维持多样性,递归处理剩余个体,最后通过比例选择生成下一代,逐步逼近帕累托最优解集  | 较高的计算复杂性,能处理多目标问题并在参数空间共享以保持种群多样性                     | 计算复杂度高,缺乏精英保留机制,且共享参数需预设,可能导致不收敛或陷入局部解问题                |
|        | A <sub>4</sub> | NSGA- II <sup>[90]</sup><br>通过快速非支配排序降低计算复杂度,采用拥挤距离维持种群多样性,并引入精英保留策略,使父代与子代共同竞争                         | 提高算法搜索效率,计算复杂度降低,引入精英保留和拥挤距离提高解的质量与分布均匀性,同时有效维持种群的多样性 | 存在难以找到孤立点,目标数量增加可能导致搜索偏移的问题                             |
|        | A <sub>5</sub> | PSO <sup>[91-92]</sup><br>模拟鸟群或鱼群行为的优化方法,每个潜在解称为粒子,粒子在解空间中通过跟踪个体最优(Pbest)和全局最优(Gbest)来更新自己的位置和速度,以寻找最优解 | 受研究问题维度的变化小,较快速度收敛到全局最优解,算法简单、易于实现,经验参数少              | 存在收敛“早熟”现象,算法寻优求解后期的收敛速度缓慢,有时甚至近似于停滞                    |
|        | A <sub>6</sub> | ACO <sup>[93]</sup><br>模拟蚂蚁觅食时的信息素传递和正反馈机制,引导蚂蚁在搜索空间中迭代优化路径,逐步收敛至最优解                                    | 正反馈性、优秀的搜索能力、高效的并行计算能力、灵活的可扩展性                        | 易陷入局部最优,对参数敏感,且在大规模问题上计算复杂度较高                           |
|        | A <sub>7</sub> | SA<br>模拟固体物质的冷却退火过程,从高温开始逐渐降温,允许在一定概率下接受劣解,以跳出局部最优,最终在低温下达到全局最优解                                        | 具备全局搜索能力,适于高维、非凸、复杂问题,易于实现                            | 可能因降温策略不当导致收敛质量下降或计算时间过长                                |

从决策可靠性角度看,单一权重或目标设定下的最优解通常具有较强的情景依赖性,而帕累托解集所反映的目标权衡结构相对稳定。因此,多目标优化方法主要用于生成满足多重约束的候选解集,而 TOPSIS、VIKOR 等多指标评价方法则作为决策层工具<sup>[82]</sup>,用于在既定方案集或帕累托解集中识别符合治理偏好的代表性方案,二者在山水林田湖草沙复合系统的治理中具有互补关系。

## 5 结论与展望

本文系统梳理了山水林田湖草沙复合系统治理与多目标优化的研究进展。相关研究表明,该系统的治理理念经历了从单目标治理向“生命共同体”整体治理理念的演进,逐步形成较为完善的治理体系。作为多要素耦合的复杂生态系统,其治理强调基于整体性、协同性和系统优化原则,通过统筹自然与社会经济因素,寻求“综合最优”的协同配置状态,即兼顾经济效益、生态效益、适宜性与土地紧凑性的多目标协调优化。多目标优化凭借其在处理复杂系统问题上的优势,已从传统方法演进为智能算法,并广泛应用于土地与水资源配置等领域。同时,相关制度创新和数字孪生流域等信息化平台的发展,也为提升系统治理的精准性与协同性提供了支撑。

当前研究仍存在系统性优化框架整合不足的问题,有待进一步完善能够覆盖全要素并刻画其复杂非线性耦合关系的整体分析与优化框架。此外,生态系统固有的不确定性(如气候变化、政策扰动、市场波动等)以及跨区域、跨部门的协同管理难题,也为构建可落地、可操作的治理方案带来了艰巨挑战。因此,未来研究可从 3 个层面进一步深化,在机理层面深入揭示全要素交互与权衡机制,在模型层面发展融合机理模型与智能算法的全要素多目标优化路径,在决策层面增强方案在不确定环境下的稳健性与可操作性,通过多维度创新,为“山水工程”的精准实施与动态调控提供理论参考和方法借鉴。

### 参考文献:

- [1] 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[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(2): 1-6. DOI: 10.12062/cpre.20181121.
- [2] 李月辉, 胡远满, 王正文. 山水林田湖草沙一体化保护和修复工程与景观生态学[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(1): 249-256. DOI: 10.13287/j.1001-9332.

202301.026.

- [3] 孙晶, 王俊, 杨新军. 社会-生态系统恢复力研究综述[J]. *生态学报*, 2007(12): 5371-5381. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.12.050.
- [4] 李义天, 邓金运, 孙昭华. 长江流域自然生态环境破坏与水沙灾害的关系[J]. *水土保持学报*, 2002(6): 31-35. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2002.06.010.
- [5] 周妍, 苏香燕, 应凌霄, 等. “双碳”目标下山水林田湖草沙一体化保护和修复工程优先区与技术策略研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3371-3383. DOI: 10.5846/stxb202201280266.
- [6] 于贵瑞, 王永生, 杨萌. 生态系统质量及其状态演变的生态学理论和评估方法之探索[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 865-877. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202204.026.
- [7] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 等. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J]. *地理学报*, 2022, 77(9): 2133-2153. DOI: 10.11821/dlxb202209001.
- [8] Bryan B A, Gao Lei, Ye Yangqing, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency[J]. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204. DOI: 10.1038/s41586-018-0280-2.
- [9] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 等. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(9): 3557-3568. DOI: 10.5846/stxb202012313335.
- [10] 宋立宁, 朱教君, 郑晓. 基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3249-3256. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201711.002.
- [11] 刘志民, 余海滨, 汪海洋. 科尔沁沙地“山水林田湖草沙”一体化治理原理及实施重点[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3441-3447. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202212.026.
- [12] 孔凡婕, 应凌霄, 文雯, 等. 基于国土空间生态修复的固碳增汇探讨[J]. *中国国土资源经济*, 2021, 34(12): 70-76. DOI: 10.19676/j.cnki.1672-6995.000679.
- [13] Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, Yi Xiao, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459. DOI: 10.1126/science.aaf2295.
- [14] 财政部、自然资源部、生态环境部召开山水林田湖草沙一体化保护和修复工程推进会[EB/OL]. (2023-10-16)[2026-02-12]. [https://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caizhengxinwen/202310/t20231016\\_3911245.htm](https://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caizhengxinwen/202310/t20231016_3911245.htm).
- [15] 赵富德. 黄河流域水土保持科技工作的回顾与展望[J]. *中国水土保持*, 1996(10): 36-39. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.1996.10.012.
- [16] 王涛. 中国防沙治沙实践与沙漠科学发展的 70 年:

- I. 初创篇[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 1-4. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00152.
- [17] 陶格斯. 中国环境问题的历史变化[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(8): 188-192. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2009.08.052.
- [18] 刘培哲. 可持续发展理论与《中国 21 世纪议程》[J]. 地学前缘, 1996(1): 1-9. DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.1996.01.001.
- [19] 欧阳志云, 郑华, 岳平. 建立我国生态补偿机制的思路与措施[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 686-692. DOI: 10.5846/stxb201212071759.
- [20] 宋昌素. 山水林田湖草沙一体化保护和系统治理[J]. 行政管理改革, 2024(10): 64-71. DOI: 10.14150/j.cnki.1674-7453.2024.10.005.
- [21] 黄艳, 喻杉, 罗斌, 等. 面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 253-269. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210865.
- [22] 自然资源部. 服务国家重大战略 我国“山水工程”持续稳步推进[EB/OL]. (2024-08-12)[2026-02-12]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202408/content\\_6968753.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202408/content_6968753.htm).
- [23] 余新晓, 贾国栋. 统筹山水林田湖草系统治理带动水土保持新发展[J]. 中国水土保持, 2019(1): 5-8. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2019.0005.
- [24] 胡春宏, 张晓明. 山水林田湖草沙系统治理与水土保持高质量发展[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 441-447. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.044.
- [25] 祁闯, 陆继来, 王国祥, 等. 太湖流域山水林田湖草一体化保护修复[J]. 环境监测管理与技术, 2024, 36(6): 1-6. DOI: 10.19501/j.cnki.1006-2009.2024.06.011.
- [26] 余露, 刘源. 自然资源系统治理的创新模式探索[J]. 自然资源学报, 2023, 38(9): 2386-2402. DOI: 10.31497/zrzyxb.20230913.
- [27] 李川辉, 侯方森, 吴成亮. 林长制助推森林生态产品价值实现的理论逻辑与实践路径[J]. 世界林业研究, 2025, 38(3): 92-99. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2025.0045.y.
- [28] 崔桂鹏, 肖春蕾, 雷加强, 等. 大国治理: 中国荒漠化防治的战略选择与未来愿景[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 943-955. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230706002.
- [29] 傅伯杰, 王军. 基于自然的解决方案理论内涵与中国实践[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(7): 1157-1167. DOI: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250513005.
- [30] Eckart K, Mcphee Z, Bolisetti T. Performance and implementation of low impact development: A review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 413-432. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.254.
- [31] Liu Yaoze, Engel B A, Flanagan D C, et al. A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 580-593. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.212.
- [32] 江恩慧, 王远见, 田世民, 等. 流域系统科学初探[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1026-1037. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200573.
- [33] 李涛, 唐涛, 邓红兵, 等. 湖北省三峡地区山水林田湖草系统原理及生态保护修复研究[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8896-8902. DOI: 10.5846/stxb201905301131.
- [34] 吴虹. 贵州省赤水市大同河流域山水林田湖草生态保护修复工程研究[J]. 安徽地质, 2024, 34(3): 236-240. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6157.2024.03.010.
- [35] 李正, 赵林. 西北干旱区山水林田湖草沙系统治理研究实践: 以塔里木河重要源流区为例[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(12): 13-18. DOI: 10.19676/j.cnki.1672-6995.000782.
- [36] Shi Tianyu, Jing Liandong, Liu Jia, et al. Periphyton as a nature-based solution for remediation of degraded Zoige alpine wetlands: Process, effects and evaluation[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 377: 124647. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124647.
- [37] Kim Y, Oh J, Bartos M. Stormwater digital twin with online quality control detects urban flood hazards under uncertainty[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 118: 105982. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105982.
- [38] 李玉强, 王旭洋, 郑成卓, 等. 科尔沁沙地防沙治沙实践与生态可持续修复浅议[J]. 中国沙漠, 2024, 44(4): 302-314. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00102.
- [39] 包玉斌, 王耀宗, 路锋, 等. 六盘山区国土空间生态安全格局构建与分区优化[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1172-1183. DOI: 10.13866/j.azr.2023.07.14.
- [40] 王波, 王夏晖, 张笑千. “山水林田湖草生命共同体”的内涵、特征与实践路径: 以承德市为例[J]. 环境保护, 2018, 46(7): 60-63. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2018.07.014.
- [41] 靳玉莹, 赵勇, 张金萍, 等. 基于多目标优化模型的承德市初始水权分配[J]. 水电能源科学, 2017, 35(1): 156-159. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2017.01.039.
- [42] 张兆民, 宋王芳, 窦凤珂, 等. 泰山区域山水林田湖草生态保护修复研究与实践[J]. 测绘科学, 2025, 50(1): 144-151. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2025.01.014.
- [43] 周惠成, 彭慧, 张弛, 等. 基于水资源合理利用的多

- 目标农作物种植结构调整与评价[J]. *农业工程学报*, 2007(9): 45-49. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2007.09.008.
- [44] 李彦彬, 马嘉彤, 李道西, 等. 改进粒子群算法在农业种植结构优化中的应用[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 62-71. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2021405.
- [45] 孟梅, 崔雪莹, 王志强. 低碳视角下乌鲁木齐市土地利用结构优化研究[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(19): 261-265. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.059.
- [46] 马瑞, 范燕敏, 武红旗, 等. 耦合 Gmop 与 Plus 模型的干旱区土地利用格局模拟[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 143-153. DOI: 10.13254/j.jare.2021.0865.
- [47] 王世忠, 刘卫东, 曹振宇. 基于 NSGA-II 的土地利用数量结构优化研究: 以舟山市定海区为例[J]. *地理科学*, 2010, 30(2): 290-294. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2010.02.018.
- [48] 沙宇聪, 田付玮, 戴江玉, 等. 河湖生态产品价值核算与实现机制研究进展[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(4): 858-872. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2025.0087.
- [49] 黄海. 土地利用结构多目标优化遗传算法[J]. *山地学报*, 2011, 29(6): 695-700. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2011.06.011.
- [50] 黄苏宁, 黄显峰, 方国华, 等. 基于多目标遗传算法的水土资源优化配置研究[J]. *中国农村水利水电*, 2013(5): 33-36. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2013.05.008.
- [51] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 等. 权衡城市扩张、耕地保护与生态效益的京津冀城市群土地利用优化配置情景分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4341-4350. DOI: 10.5846/stxb201712312369.
- [52] Li Wen, Chen Zejian, Li Mingcheng, et al. Carbon emission and economic development trade-offs for optimizing land-use allocation in the Yangtze River Delta, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109950. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.109950.
- [53] Ding Tianran, Steubing B, Achten W M J. Coupling optimization with territorial LCA to support agricultural land-use planning[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 328: 116946. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.116946.
- [54] Ma Shuhua, Wen Zhuzhu. Optimization of land use structure to balance economic benefits and ecosystem services under uncertainties: A case study in Wuhan, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 311: 127537. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127537.
- [55] Hildemann M, Verstegen J A. Quantifying uncertainty in Pareto fronts arising from spatial data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 141: 105069. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105069.
- [56] Strauch M, Cord A F, Pätzold C, et al. Constraints in multi-objective optimization of land use allocation-repair or penalize?[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 118: 241-251. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.05.010.
- [57] 江恩慧, 李洁玉, 王远见, 等. 黄河流域系统可持续运行的“139+”水沙调控指标体系[J]. *水利学报*, 2025, 56(4): 423-432. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20240509.
- [58] 徐爽, 朱永明. 基于土地利用功能最大化的多情景土地利用优化研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(11): 90-100. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20221110.
- [59] 付银环, 李新旺, 徐宝同, 等. 不确定性多目标模糊规划在水资源优化配置中的应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 470-479. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0047.
- [60] 陈文苑, 张明, 赵伟. 不确定条件下水资源系统多目标优化配置研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(12): 12-24. DOI: 10.11660/slfdbx.20211202.
- [61] 白文静, 刘淑英, 王平, 等. 基于灰色多目标线性规划的武威市古浪县土地利用结构优化研究[J]. *中国集体经济*, 2019(21): 6-8.
- [62] 齐鹏, 孙佳歆, 章光新, 等. 东北黑土区水土资源配置及其空间格局优化[J]. *科学通报*, 2024, 69: 4063-4078. DOI: 10.1360/TB-2023-1270.
- [63] 温贝, 刘玉成. 农业生态系统优化: 基于多模型耦合的土地利用多样性与生态服务价值最大化策略[J]. *天津农业科学*, 2024, 30(5): 49-58. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6500.2024.05.009.
- [64] 张家欣, 黄会平, 韩宇平, 等. 水足迹视角下西北旱区种植结构协同调整[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 751-760. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0073.
- [65] 宋志红, 刘渊, 江生金, 等. 引江济淮工程(河南段)多目标水量优化调度[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(1): 39-47. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0006.
- [66] 唐晓宇, 刘铁, 黄粤, 等. 开都河流域水-能源-生态综合收益下的水资源优化配置[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(1): 90-98. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2025.0009.
- [67] 杨国轩, 傅志敏, 王亚坤, 等. 考虑适宜生态流量的水库多目标优化调度研究[J]. *水电能源科学*, 2025, 43(1): 192-196. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241653.
- [68] 赵丞豪, 张学霞, 姜东旻, 等. 基于 NSGA-II 算法的

- 若尔盖高原高寒湿地生态修复格局优化[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(2): 55-64. DOI: 10.16843/j.sswc.2022021.
- [69] 郭文贤, 郭萍, 潘琦, 等. 基于 Pareto 解集的治沙区非线性分式多目标水土资源优化配置模型[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(2): 172-185. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.02.15.
- [70] 王昊煜, 高培超, 谢一茹, 等. 基于改进型 NSGA-II 算法的西宁市土地利用多目标优化[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(6): 84-89. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2020.06.013.
- [71] McNulty A, Ombuki-berman B, Engelbrecht A. A comparative study of evolutionary algorithms and particle swarm optimization approaches for constrained multi-objective optimization problems[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2024, 91: 101742. DOI: 10.1016/j.swevo.2024.101742.
- [72] Pareto V. Cours d'économie politique[M]. Lausanne: F. Rouge, 1896: 34-36.
- [73] Miller B W, Eaton M J, Symstad A J, et al. Scenario-based decision analysis: Integrated scenario planning and structured decision making for resource management under climate change[J]. *Biological Conservation*, 2023, 286: 110275. DOI: 10.1016/j.biocon.2023.110275.
- [74] Liu Qinghua, Sun Xiao, Huang Qingxu, et al. Optimizing the landscape in grain production and identifying trade-offs between ecological benefits based on production possibility frontiers: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 377: 124583. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124583.
- [75] Mo Ran, Xu Bin, Zhang Jianyun, et al. Multiobjective risk-based optimization for real-time interbasin water diversion under decomposed chance-constrained total water use[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, 58: 102252. DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102252.
- [76] Groetzner P, Werner R. Multiobjective optimization under uncertainty: A multiobjective robust (relative) regret approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 296: 101-115. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.03.068.
- [77] Gao Peichao, Wang Haoyu, Cushman S A, et al. Sustainable land-use optimization using NSGA-II: Theoretical and experimental comparisons of improved algorithms[J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36: 1877-1892. DOI: 10.1007/s10980-020-01051-3.
- [78] Song Mingjie, Chen Dongmei. A comparison of three heuristic optimization algorithms for solving the multi-objective land allocation (MOLA) problem[J]. *Annals of GIS*, 2018, 24: 19-31. DOI: 10.1080/19475683.2018.1424736.
- [79] Liu Hongjiang, Yan Fengying, Tian Hua. Towards low-carbon cities: Patch-based multi-objective optimization of land use allocation using an improved non-dominated sorting genetic algorithm- II [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108455. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108455.
- [80] Luan Chaoxu, Liu Renzhi, Zhang Qiyang, et al. Multi-objective land use optimization based on integrated NSGA-II-PLUS model: Comprehensive consideration of economic development and ecosystem services value enhancement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140306. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140306.
- [81] Chen Ning, Xin Cunlin, Zhang Bo, et al. Contribution of multi-objective land use optimization to carbon neutrality: A case study of northwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111219. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111219.
- [82] Opricovic S, Tzeng G H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156: 445-455. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
- [83] Romero C. Handbook of critical issues in goal programming[M]. Oxford: Pergamon Press, 1991.
- [84] Marglin S. Public investment criteria[M]. Cambridge: MIT Press, 1967.
- [85] Haimes Y Y. Integrated system identification and optimization[A]. *Control and Dynamic Systems*[C]. New York: Academic Press, 1973: 435-518. DOI: 10.1016/B978-0-12-012710-8.50013-3.
- [86] Zeng Zhenghong, Lyu Dongwen. Mini-max multi-objective optimization in structural design[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1990, 30: 1213-1228. DOI: 10.1002/nme.1620300609.
- [87] Das I. Nonlinear multicriteria optimization and robust optimality[D]. Houston: Rice University, 1999.
- [88] Fonseca C M, Fleming P J. Multi-objective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms-part II: Application example[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 1998, 28(1): 38-47. DOI: 10.1109/3468.650320.
- [89] Srinivas N, Deb K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms [J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2: 221-248.

- DOI: [10.1162/evco.1994.2.3.221](https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221).
- [90] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [A]. Parallel problem solving from nature-PPSN VI[C]. Berlin: Springer, 2000: 849-858.
- [91] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Piscataway: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [92] 代金汕, 葛恒军, 阚永庚, 等. 泵站单机组优化调度组合改进粒子群算法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 978-986. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0097](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0097).
- [93] Dorigo M. New perspectives about default hierarchies formation in learning classifier systems[C]. Advances in Artificial Intelligence-AI\*IA 1991. Berlin: Springer, 1991: 218-227.

## A review on the governance evolution and multi-objective optimization in the mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts complex system

ZENG Xiaohong<sup>1,2</sup>, YE Aizhong<sup>1,2</sup>, ZHAO Chenguang<sup>1,2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Disaster Risk Reduction, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China )

**Abstract:** The mountains, waters, forests, farmlands, lakes, grasslands, and deserts form a typical complex system that supports the coordinated development of ecology, economy, and society. However, there is still a lack of comprehensive studies on how governance evolves and how to optimize multiple objectives within this system. This study reviews China's 76-year governance process: the budding and exploratory phase (1949-1978) laid the foundation for single-objective governance; the initial phase of systematic governance (1979-1998) formed the prototype of multi-objective coordinated governance; the advancement phase (1999-2012) elevated governance to the level of a national strategy; the deepening of ecological civilization phase (2013-2020) established the "community of life" theory; and the new era of intelligent governance (2021-present) promotes technological integration and innovation. Related research indicates that achieving "comprehensive optimality" for this system typically requires reliance on nature-based solutions and cross-sectoral collaboration, while safeguarding the stability of ecosystem service functions and identifying Pareto-optimal trade-offs among ecological, economic, and social benefits. This paper further summarizes the application patterns and objective function specifications of multi-objective optimization methods across multiple domains in this system, covering comprehensive trade-offs across dimensions such as economic and ecological benefits, suitability and land compactness. Current research indicates a trend toward deep integration of intelligent algorithms and governance requirements. This systematic review of the theoretical and practical evolution of governance for the mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts complex system, as well as related optimization research progress, serves as a valuable resource for similar system governance studies.

**Key words:** community of life; governance; ecological restoration; process; multi-objective optimization