

# 黄土高原生态系统修复进展研究

张杰林

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2024年1月29日; 录用日期: 2024年3月14日; 发布日期: 2024年3月21日

## 摘要

生态修复是可持续发展的生命线, 是生态环境建设的主体。自我国开展“退耕还林(草)”工程以来, 我国生态修复取得了大量成就, 大面积提高了我国整体植被覆盖度水平。生态修复作为恢复和提升生态系统健康及功能的主要措施。近年来, 作为全球广泛关注并积极探索的方向, 定期对生态修复进行研究和探讨极为重要。黄土高原作为典型的生态脆弱区, 一直面临着各种生态问题, 在我国的生态保护中具有显著的战略地位。本文基于生态修复机理、黄土高原生态修复的典型模式特征等相关理论做更深入的研究, 并结合黄土高原实际情况, 找到黄土高原目前生态修复的问题, 并探索其解决办法。

## 关键词

黄土高原, 生态修复, 研究进展

# Research on the Advances in Ecological Restoration of the Loess Plateau

Jielin Zhang

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Jan. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 21<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Ecological restoration is the lifeline of sustainable development and the main body of ecological environment construction. Since China has carried out the “Grain for Green” project, China has made significant achievements in ecological restoration, greatly improving the overall vegetation coverage level in China. Ecological restoration is the main measure to restore and enhance the health and functions of ecosystems. In recent years, it has been widely concerned and actively explored globally, and conducting regular research and discussions on ecological restoration is extremely important. As a typical ecologically fragile area, the Loess Plateau has been facing various

文章引用: 张杰林. 黄土高原生态系统修复进展研究[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(3): 261-268.

DOI: 10.12677/ag.2024.143024

ecological problems and holds a significant strategic position in China's ecological protection. This article conducts a deeper study based on the mechanisms of ecological restoration and the typical characteristics of ecological restoration in the Loess Plateau, and combines the actual situation of the Loess Plateau to identify the current issues in ecological restoration in the region and explore solutions.

## Keywords

Loess Plateau, Ecological Restoration, Research Progress

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 生态修复机理研究

### 1.1. 生态修复机理

自工业革命以来,全球社会经济开始飞速发展,但随着经济的不断发展,生态环境也在遭受着越来越多的破坏,生态环境问题日益突出,生态修复成为各国亟待解决的问题。从本质而言,生态修复就是遵循大自然的规律,以大自然修复能力为主,人工介入为辅,以期能够更快地将被破坏的生态环境恢复到原有的生态,促使生态系统平稳有序[1]。生态修复的核心是遵循生态系统规律,并通过生物、工程、环保等技术开展消除破坏生态的因素,使自然植被恢复到原有水平、原始状态,使生态系统恢复至平衡稳定。同时生态修复涉及的学科、方法、技术十分广泛,是一项持续且繁琐的重大工程。

### 1.2. 国外生态修复研究

早在 1935 年国外 Leopld 等人就开展了生态修复实验。自 20 世纪 20 年代开始,美、英、德、澳等经济发展水平前列的国家就开展了因矿山开采导致的生态破坏[2],逐渐开始进行土地复垦等技术,生态问题得到了广泛关注。50 年代生态修复类型逐渐扩展。20 世纪 60 年代,受到生态工程学概念启发,欧洲部分国家尝试应用,并形成了所谓的“生态工程工艺技术”。70 年代后,由于生态工程学影响,生态系统恢复开始出现。1975 年,美国弗吉尼亚工学院召开“受损生态系统的恢复”会议,自此生态恢复成为当时最受重视的生态学概念之一。此后多年内美国等国家尝试了各种方式的修复手段。1993 年《恢复生态学(Restoration Ecology)》杂志创刊。2001 年召开的“国际恢复生态学”大会将“跨越边界的生态恢复”作为主题。目前国外生态学主要在森林、草原等生态系统研究采矿、放牧、重金属污染等人为干扰影响下造成的退化和自然恢复的机制,涉及到植被、土壤、气候、微生物、动物等多个方面。具有积累性好、综合性和连续性强的特点[3] [4] [5] [6] [7]。目前国外生态修复的关注点在:矿区、建筑区、砍伐森林区及受损湿地等方面,主要聚焦与土壤、生物多样性恢复。联合国于 2019 年宣布了生态系统恢复十年计划(2021 年~2030 年),通过大规模恢复生态系统,以期成为应对气候危机、供水和粮食安全以及生物多样性的有效措施。此外,根据联合国千年生态系统服务评估报告,处于退化与不可持续状态的生态系统约占全球面积的 60% [8]。因此,控制和恢复退化生态系统对满足日益增长的人口对粮食、饲料、生物量能源、纤维和木材的需要以及维持全球变化背景下生态系统稳定性至关重要[9],也是实现 17 项可持续发展目标的关键环节[10]。目前,国外的生态修复现状相对较好,许多国家已经将生态修复纳入其环保政策和计划中。以下是一些具体的例子:美国拥有世界上最先进的生态修复技术之一,如湿地修复、矿

山修复等。美国环保局还设立了一个名为“超级基金”的项目，旨在清理和修复受污染的土地。欧洲国家也非常重视生态修复，例如荷兰的“自然恢复”项目，以及德国的“褐煤矿区生态修复”项目。澳大利亚在生态修复方面也有很多成功的案例，例如墨尔本的“碧海蓝天”项目，该项目通过人工制造沙滩和人工礁石来恢复海洋生态系统。加拿大政府设立了“加拿大土地修复计划”，该计划旨在修复因工业活动而受损的土地。尽管这些国家的生态修复工作取得了一定的成效，但是仍然面临着许多挑战，如气候变化的影响、资金短缺等问题。因此，各国都在不断探索和改进生态修复的方法和技术。

### 1.3. 国内生态修复研究

我国自 20 世纪 50 年代以来开始在华南地区开展植被恢复技术及机理研究。从 50 年代末开始我国学者逐渐重视生态修复问题，并且在这一时期投入大量的人力物力和财力进行生态系统恢复重建方面工作。70 年代末，“三北”防护林工程开展。80 年代开展沿海防林工程建设和太行山绿化工程。80 年代末在农牧交错区、干旱荒漠区等区域进行了生态系统恢复重建研究及开展示范。90 年代淮河、太湖、珠江、辽河、黄河流域防护林工程设以及大兴安岭火烧迹地森林恢复研究、阔叶红松林生态系统恢复、山地生态系统的恢复与重建、毛乌素沙地恢复等提出了许多生态恢复与重建技术与优化模式，先后发表了大量有关生态恢复与重建的论文、论著；在实践上已形成大批的小流域生态恢复的成功事例[11][12][13]，极大地促进了我国恢复生态学的研究与发展。1990 年我国召开了“全国土地退化防治学术讨论会”，会议总结了我国在土地退化方面的研究动态与进展，提出了许多切实可行的生态恢复与重建的技术和模式[14][15]。90 年代以后，陕北地区已经进行了大量的生态修复实践工作，并由此提出“封山育林”的建议；几乎在同一时期，内蒙古也通过长期的研究和反复实践，提出“进一退二还三”的战略。2000 年水利部统筹规划，提出依靠生态自我修复能力，加快水土流失防止步伐的思路，并采取一系列对策及措施。2003 年在全国普遍开展生态修复工程。

我国侧重于退化生态系统形成原因、解决方法等方面研究。形成了生物多样性恢复为核心的修复模式。我国近年的生态恢复与重建研究主要表现出如下特点：注重理论研究、人工重建研究；大量进行生物途径恢复；快速性和短期性；恢复过程因地制宜；及时开展生态修复评价；加强恢复重建的生态学过程的研究。当前国内外关于生态修复的研究众多，并逐步形成了较完善的理论体系，这为我国生态修复工程的规划提供了理论上的参考。我国具有广泛的生态脆弱区，且脆弱生态类型多样、生态脆弱性严重。其中，荒漠化、水土流失、石漠化等多集中在西北和西南地区，占国土面积的 22%左右[16]，鉴于此，我国开展了一系列的生态恢复措施[17][18]，如植树造林、退耕还林(草)、天然林保护工程、流域综合治理、水土保持工程、自然保护区建设等，均取得了重要成效。在生态恢复工程探索中，我国也开发出一系列的生态恢复技术，据统计自“十五”以来，共研发 214 项核心技术，其中的造林技术、生物篱技术、节水保土技术等均已得到广泛应用[19][20]，生态恢复技术的研发也逐渐从单一目标转化为兼顾生态效益、社会效益和经济效益的复合模式[19]，综合治理已成为当前生态恢复的主要措施。国内的生态修复现状总体上呈现出积极向好的趋势。近年来，我国政府高度重视生态环境保护，实施了一系列生态修复工程，如退耕还林还草、湿地保护、沙漠治理等，取得了显著成效。同时，我国的生态修复技术和方法也在不断提高和完善，如土壤改良、植被重建、水体修复等技术的研究和应用。但是，由于历史欠账较多，部分地区生态破坏严重，生态修复任务依然艰巨。未来，我国将继续加大生态修复力度，推动生态文明建设，实现人与自然和谐共生。

## 2. 黄土高原的生态环境特征

黄土高原总面积约为  $65 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，位于我国第二级阶梯，涵盖了黄河中上游地区(图 1)，海拔

1000~2000 m, 黄土高原由于易被侵蚀, 年均降水量在 400~600 mm, 且降雨主要集中于夏季[21]。降水量总体呈现东南向西北逐渐减少的特点[22]。大部分地区的年平均气温为 6~14℃, 自东南向西北逐渐降低[23]。在黄土高原的 6 个综合治理分区中[24], 黄土高原沟壑区和丘陵沟壑区占比最大, 分别占 30.8% 和 21.5% [25], 同时也是黄土高原水土治理和生态修复的重点区域。

黄土高原风蚀、水蚀、重力侵蚀均很严重, 集中的水土流失面积占总面积的 67.2%, 每年输入黄河的泥沙量达 16 亿 t, 侵蚀土壤达 20 亿 t。在长期侵蚀作用下, 形成了典型的塬、梁、峁, 地表破碎严重。在水土流失区, 年际土壤侵蚀模数大于 5000 t/km<sup>2</sup> 的地区占比达 24.4%, 每年产沙量占总产沙量的 87.5%。

自 1998 年至 2001 年间, 我国北方沙漠化土地扩大趋势严重, 作为农牧交错带、西部高原与干旱地区过渡带, 黄土高原风蚀沙化严重, 土壤沙漠化有增无减, 主要分布在宁夏、内蒙古、陕北长城沿线一带, 土地面积约 20 万 km<sup>2</sup>, 其中沙漠化面积占 62.8%, 严重沙漠化面积达 3.57 万 km<sup>2</sup>。沙源极为丰富、沙丘密集连绵、流地沙丘面积大、沙漠化程度高。在国家实施“退耕还林(草)”的政策下, 土地沙漠化正逐渐改善。

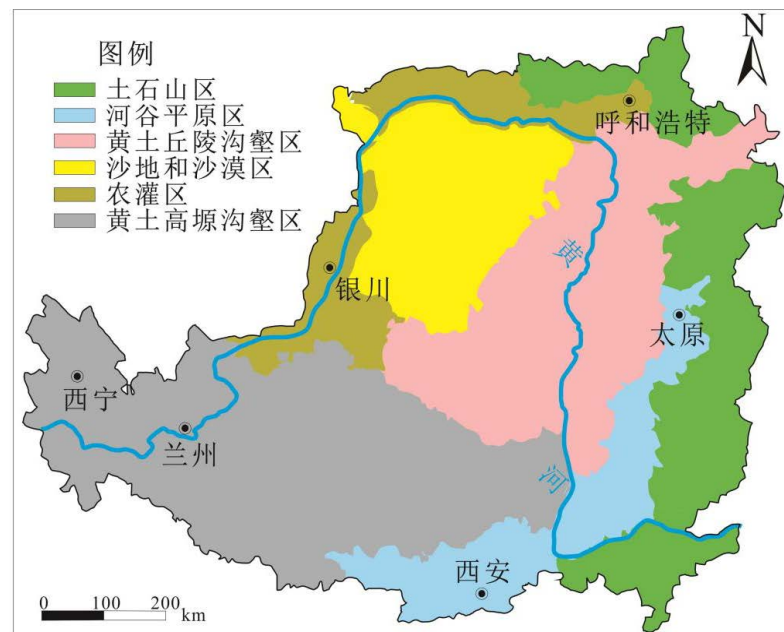


Figure 1. Loess Plateau ecosystem restoration and management compartmentation diagram

图 1. 黄土高原治理分区图

从黄土高原水资源稀缺, 根据已有资料, 该区河流年平均径流量为 603.75 亿 m<sup>3</sup>, 以农田灌溉为主, 但在丘陵和高平原很少有灌溉条件。从地下水资源来看, 虽有储量达 335.98 亿 m<sup>3</sup>, 但由于区内河谷下切, 无良好储水条件。地下水埋藏很深, 多在 50~60 m 内, 更有甚者达 100 m 以上, 开发利用代价甚高。在这种情况下, 如何高效利用水资源, 当地农林草业生产有着深远影响。

### 3. 生态修复模式及评价效益指标的研究

本世纪以来, 经过长期的研究后发现, 生态修复可快速完成大面积水土流失治理工作, 且十分有利于植被恢复, 值得在全国范围内进行推广。如: 解明曙等提出了适宜生态修复 8 类地区[26]; 张青峰和王九军等提出了黄土高原生态修复的方案[27], 此后该方案得到大力推广; 毛德华等就西北地区生态修复情况, 寻找存在的问题提出相应的对策和建议[28]; 袁和第等人通过系统分析黄土高原水土流失治理措施体



系和流域土地利用情况提出黄土高原水土流失治理模式形成具体的生态修复机制框架[29]，实践证明，这种修复模式非常有效。

**Table 1.** The Index of ecological restoration comprehensive benefit evaluation system  
**表 1.** 生态修复综合效益评估体系指标

	类别	生态系统服务	服务指标
综合效益	生态效益	调节服务	产水服务
		供给服务	土壤保持
		支持服务	食物供给
			固碳(植被净初级生产力)
	社会经济效益	经济及娱乐文化服务	GDP、第一二三产业增加值

生态修复效益指标通常包括以下几个方面：生物多样性、生态系统功能、景观连续性、生态恢复速度、社会经济效益、环境质量等，因此对于生态修复效益需要进行综合评估，生态修复综合效益评估体系指标见表 1。

生态修复的环境效应，就是指治理水土流失、生态修复等举措对环境造成的影响。需要指出的是，水土流失区域的生态和环境问题具有复杂性，在进行生态修复时，可能会对环境产生正面和负面影响。目前，许多国内外的学者已经对这一概念进行了定义和研究，并提出相应的评价指标。例如，美国在上世纪 80 年代中期实施了自然生态保护项目，并深入研究了该项目对土壤性状、土壤侵蚀等方面的影响；刘霞、张光灿等通过各种试验手段对生态修复工程的生态效益、经济效益等进行研究；近年来，国内学者卢玉东等详细分析和探讨了我国重庆市璧山小流域生态修复现状，并使用了一些前沿科技，如遥感技术等展开生态修复效益监测研究[30]。谷丛楠等利用层测分析法构建了基于 DEA 算法的矿山修复生态效益评估模型，以完善生态评估过程中的不足[31]。廖迎娣等人在充分研究江苏长江岸线生态修复中存在的问题的基础上，提出了植被覆盖度、水土保持度、原生植物恢复度、植物物种多样性 4 个主要指标、护岸型式多样性、岸线曲直度 2 个辅助指标，并通过建立相关的生态修复评价指标体系，实现了对生态修复效果的量化评价[32]。

### 3.1. 黄土高原的生态修复的典型模式

黄土高原生态修复是一项重大的系统工程，必须运用系统工程原理对其生态经济系统进行系统分析，剖析其生态经济恶性循环的症结和具体表现、恶性循环的产生原因，进而探讨生态修复、建立区域良性循环的途径。

#### 3.1.1. 小流域水土流失综合治理模式

小流域综合治理，是基于流域内自然特点和社会经济条件，确定流域内生产发展方向，合理调整产业用地。坚持全面治理，全面提升综合配置。小流域水土流失成因及其特点，遵循自然规律，把握经济规律，制定科学的治理规划。提高生产能力、改善生态环境是不断提高生产力和环境容量的重要手段。以小流域为单元，因地制宜、因害设防、科学规划是小流域水土流失综合治理的一项十分重要的基础工作。前期要对流域内部各种自然资源、水土流失现状进行调查。近年来，黄土高原的小流域综合治理始终坚持因地制宜、“还林(草)工程与耕作措施相结合；经济、社会与生态效益相结合；治理与开发相结合”的基本原则。结合小流域各自的特点，围绕相关产业开发进行了多方有效的探索，涌现出了一批小流域综合治理与经济开发相结合的典型如表 2。

**Table 2.** Several typical models  
**表 2.** 几种典型模式

类型	特点
协调发展的 立体开发模式	其主要特点是在治理的基础上, 针对不同部位土地实行立体开发, 按照本地条件合理安排各种作物的时空分布结构, 最大限度地利用自然资源, 从而提高经济效益。
科学开发型模式	其主要特点是充分改造和利用土地, 进行广度开发和依靠农业技术实行集约经营, 进行深度开发。
层递开发型模式	其主要特点是通过深度开发小流域资源, 通过开发生产更多初级产品, 在此基础上以市场为导向, 向农副产品加工、保鲜、贮藏、运销、服务等二、三产业延伸, 实现增值增效。
综合开发型模式	其主要特点是在综合治理的同时, 结合旅游、休憩、观光设施、疗养等综合场所, 或者因地制宜地生产瓜果、蔬菜、肉、禽、蛋等农副产品, 较好地满足其文化和生活消费需求。

### 3.1.2. 淤地坝治理模式

淤地坝是指在水土流失地区各级沟道中, 以拦截泥沙为目的而修建的坝体建筑物。其拦泥淤成的地叫坝地。历史上认为这些淤地坝中的农田更加高产。在流域沟谷中淤地坝对于抬高沟道侵蚀基准面、防治水土流失、改善当地生产生活条件等方面均有十分重要的意义。是小流域综合治理的一项重要措施。淤地坝具有投资少、见效快、利用时间长、效益高等特点。在我国晋、陕、蒙、甘等省分布最多。黄土高原自 20 世纪 50 年代起修建了大量淤地坝, 被认为是治理水土流失最为有效的措施之一[33]。

### 3.1.3. 退耕还林(草)工程建设模式

20 世纪末期国家按照长远规划将水土流失严重和粮食产量低而不稳的坡耕地和沙化耕地以及生态地位重要的耕地, 由原来的土地利用方式改为草地、林地, 国家对退耕户给予一定的补助。通过退耕还林(草)实现增加农民收入、调整农村土地结构、改善自然环境和生态环境的目的。自退耕还林(草)工程实施以来, 黄土高原植被覆盖率大幅度提升[34]。

### 3.1.4. 禁封治理模式

在内蒙古等传统农牧业为主的地区, 传统农牧业是导致生态环境恶化、百姓收入增长缓慢的主要原因。为此该地区禁牧、休牧、舍饲养畜, 促进生态自我修复, 同时不断优化畜牧的品种、大力种植优质牧草, 成效显著, 不仅平均植被覆盖率达 80%, 且农牧民人均收入也在不断增长, 形成“双赢”的局面。

## 4. 生态修复发展趋势

1) 技术革新: 随着科技的不断演进, 生态修复的技术手段正逐步优化, 例如基因科技、纳米科技等先进技术的运用, 大大提升了生态修复的效率和质量。同时借助互联网建立数据平台, 可完成自动化检测、远程智控等多种作业, 得到更准确的数据, 大量提高工作效率等。

2) 整合性增强: 生态修复的趋势从单独处理某一环境问题转向全方位的综合治理, 如同步解决大气污染、水体污染及土壤污染等多元问题。

3) 强调预防: 修复工作的重心逐渐从前期的损害修复转向预防为主, 这意味着在项目的规划和设计阶段就将环保考量纳入其中, 以防止新的环境问题的产生。

4) 公众参与度提升: 随着环保意识的觉醒, 公众对生态修复的关注与日俱增, 社区园艺、公众植树等公众参与的生态修复活动日益增多。

5) 政策驱动效应: 各级政府正在推出一系列政策来促进生态修复的发展, 包括提供财政资助、制定相关法律法规等措施。

6) 全球合作: 面对全球性的环境挑战, 生态修复需要跨越国界的合作, 诸如跨国生态修复项目等国

际合作形式日渐重要。

## 5. 黄土高原的生态修复中存在的问题

经过众多科研者多年的潜心投入，关于黄土高原生态修复机理、模式、成效等领域都开展了深入研究，为我国黄土高原生态修复治理提供了宝贵的理论依据及技术支持。但对于黄土高原生态修复仍需要注意以下几个问题：

1) 黄土高原生态退化是多个方面因素综合影响下的结果，比如人为因素、自然因素等，我们仍然需要多角度、多方面结合，加快生态系统恢复时间、提升可逆性修复能力，以及能够找到更有效的措施来完成生态系统的演替进程等等。

2) 需要对黄土高原生态修复进行科学、合理、综合的评价，当前绝大多数基于 NDVI 指数进行评价，大多着眼于宏观尺度的整个黄土高原或某一地貌区，对微观小流域的生态修复状况评价较少，限制了对黄土高原小流域生态修复状况的深入认识。同时，存在外来植物入侵、本地植物比例不高、人工栽种植物面积广泛等问题。

因此，加快黄土高原生态环境恢复任重道远。□

## 6. 结论

基于上述分析，生态修复是可持续发展的基本，是生态环境建设的核心。生态修复是黄土高原未来生态文明建设过程、经济结构转型中最核心的组成部分，对我国全面绿色经济发展具有深远意义，然而现阶段，这项工作在实践中存在许多问题[35]，统筹性不够、系统性不足、多学科多技术交叉不足等问题。希望今后在黄土高原生态修复进程、修复能力及修复水平评估等方面开展进一步研究，不断完善和补充我国水土保持生态修复理论和技术研究成果，同时大力探索新技术、新方法，将先进的科技手段充分投入到生态修复工作服务，为我国大面积水土流失区的生态建设提供参考，为可持续发展提供科学依据和实践基础。

## 参考文献

- [1] 杨爱民, 刘孝盈, 李跃辉. 水土保持生态修复的概念、分类与技术方法[J]. 中国水土保持, 2005(1): 15-17, 55.
- [2] 徐广军. 水土保持生态修复的基本理论及技术方法[J]. 黑龙江水利科技, 2006(6): 35-36.
- [3] Jenins, M.A. and Parker, G.R. (1998) Composition and Diversity of Woody Vegetation in Silvicultural Openings of Southern Indiana Forest. *Forest Ecology and Management*, **109**, 57-64. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00256-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00256-4)
- [4] Aiba, S., Hii, D.A. and Agetsuma, N. (2001) Comparison between Old-Growth Stands and Secondary Sands Regenerating after Clear-Felling in Warm-Temperate Forests of Yakushima, Southern Japan. *Forest Ecology and Management*, **140**, 163-175. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00325-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00325-X)
- [5] Xiong, D.G. and Xian, X.F. (2004) Consumptive Ecological Footprint and Productive Ecological Footprint: A Modification on Ecological Footprint Theory to Evaluate Regional Sustainable Development. *Journal of Chongqing University (English Edition)*, **235**, 51-54.
- [6] Strobel, C.J. (1999) Environmental Monitoring and Assessment Program: Current of Virginian Province (U.S.) Estuaries. *Environmental Monitoring and Assessment*, **56**, 13-15.
- [7] Fung, T. and Siu, W. (2000) Environmental Quality and Its Changes, an Analysis Using NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 1011-1024. <https://doi.org/10.1080/014311600210407>
- [8] Chopra, K., Leemans, R., Kumar, P., et al. (2005) Ecosystems and Human Well-Being: Policy Responses. Island Press, Washington DC, Vol. 3, 621.
- [9] Daily, G.C. (1995) Restoring Value to the World's Degraded Lands. *Science*, **269**, 350-354. <https://doi.org/10.1126/science.269.5222.350>
- [10] Fu, B.J., Wang, S., Zhang, J.Z., et al. (2019) Unravelling the Complexity in Achieving the 17 Sustainable-Development

Goals. *National Science Review*, **6**, 386-388. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz038>

- [11] 焦居仁. 生态修复的要点与思考[J]. 中国水土保持, 2003, 23(2): 1-2.
- [12] 左长清. 实施生态修复几个问题的探讨[J]. 水土保持研究, 2004, 9(4): 4-6.
- [13] 梁宗锁, 左长清. 简论生态修复与水土保持生态建设[J]. 中国水土保持, 2003, 10(4): 12-13.
- [14] 陈法杨. 全国水土保持生态修复分区讨论[J]. 中国水土保持, 2003, 12(8): 2-3.
- [15] 王俊玲. 结合退耕还林, 实施水土保持生态修复工程[J]. 甘肃林业, 2004, 3(2): 1-4.
- [16] 全国主体功能区规划[M]. 北京: 人民出版社, 2015.
- [17] 张磊, 林乃峰, 徐德琳, 等. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1057-1063.
- [18] 高吉喜, 杨兆平. 生态功能恢复: 中国生态恢复的目标与方向[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(1): 1-6.
- [19] 甄霖, 胡云锋, 魏云洁, 等. 典型脆弱生态区生态退化趋势与治理技术需求分析[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 63-74.
- [20] 傅伯杰, 刘国华, 欧阳志云. 中国生态区划研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [21] Tang, X., Miao, C.Y., Duan, Q.Y., *et al.* (2018) Analysis of Precipitation Characteristics on the Loess Plateau between 1965 and 2014, Based on High-Density Gauge Observations. *Atmospheric Research*, **213**, 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.013>
- [22] 张艳芳, 王姝. 黄土高原植被降水利用效率对植被恢复/退化的响应[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 138-146.
- [23] Wang, H., Liu, G.H., Li, Z.S., *et al.* (2016) Driving Force and Changing Trends of Vegetation Phenology in the Loess Plateau of China from 2000 to 2010. *Journal of Mountain Science*, **13**, 844-856. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3465-2>
- [24] Cao, Z., Li, Y., Liu, Y., *et al.* (2018) When and Where Did the Loess Plateau Turn “Green”? Analysis of the Tendency and Breakpoints of the Normalized Difference Vegetation Index. *Land Degradation & Development*, **29**, 162-175. <https://doi.org/10.1002/ldr.2852>
- [25] 王夏青, 张秀云, 周强, 等. 清末“回民起义”时期黄土高原中部土壤侵蚀和人地关系演变[J]. 地理科学, 2022, 42(2): 303-313.
- [26] 解明曙, 吴秋丽, 谌利斌, 等. 实施陆地生态修复的科学观[J]. 中国水利, 2004(8): 33-34.
- [27] 张青峰, 王九军, 田鹏, 等. 黄土高原水土保持生态修复机理与模式研究[J]. 陕西农业科学, 2005(6): 58-60.
- [28] 毛德华, 夏军, 黄友波. 西北地区生态修复对策探讨[J]. 水土保持通报, 2003(3): 11-15.
- [29] 袁和第, 信忠保, 侯健, 等. 黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6398-6416.
- [30] 卢玉东, 尹光志, 熊有胜, 等. 应用 TM 图像分析重庆南川市土壤侵蚀与植被覆盖度的关系[J]. 南京农业大学学报, 2005(4): 72-75.
- [31] 谷丛楠. 基于 DEA 算法的矿山修复生态效益评估模型[J]. 安徽地质, 2022, 32(1): 67-71.
- [32] 廖迎娣, 张欢, 侯利军, 等. 江苏长江岸线生态修复评价指标体系研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3910-3916.
- [33] Shi, P., Zhang, Y., Ren, Z.P., *et al.* (2019) Land-Use Changes and Check Dams Reducing Runoff and Sediment Yield on the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, **664**, 984-994. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.430>
- [34] 傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应[J]. 科学通报, 2022, 67(32): 3768-3779.
- [35] 崔道珍. 水土保持和生态修复建设存在的问题及对策[J]. 乡村科技, 2020(15): 121, 124.