学术讨论

水土保持与生态修复工程显著提升了黄土高原的生态韧性

——PNAS Nexus期刊论文介绍兼论中全新世黄河下游年输沙量

张勋昌[1], 陈 杰[2], 刘国彬[3]

(1.美国农业部农业研究局, 俄克拉荷马 厄尔雷诺 73036, 美国;
2.武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉, 湖北 430072;
3.西北农林科技大学 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]应用黄土高原长达数千年的历史记录检验社会-生态系统韧性学说,阐明黄土高原成功治理的科学依据,为制定提升生态系统韧性和生态系统服务的适应性管理政策提供科学参考。[方法]以黄河年输沙量的相对偏差作为韧性替代指标评估黄土高原的生态韧性,分析生态韧性的动态变化,并通过生态学适应性循环、扰沌理论、快慢变量概念等对其做出了合理解释。[结果]论证了在中全新世时期黄河每年向下游输沙约8.00×10^8 t。阐述了慢变量(包括气候、水文、植被、土壤和地貌等)是决定生态系统韧性和生态系统服务的最根本因素。通过改变慢变量来增强生态系统韧性,是实现自然与人类双赢的有效途径。黄土高原生态环境的成功治理是大幅度改变慢变量的结果,包括大面积植被恢复和大规模淤地坝和梯田建设。[结论]水土保持与生态修复工程显著提升了黄土高原的生态韧性。人类活动既可以削弱生态系统韧性,也可以提升其韧性。在此过程中,能够提供比原始状态更好的生态系统服务。中国成功治理黄土高原生态退化与黄河水患的实践证明,人类已经学会了在利用自然资源的过程中,遵循自然规律并不断提升生态环境韧性,以促进人与自然更加和谐地发展。

关键词: 生态修复; 水土保持; 黄土高原; 慢变量; 生态韧性; 韧性替代指标; 适应性循环; 扰沌理论; 社会-生态复合系统

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0478-04 **中图分类号:** S157, X24

文献参数: 张勋昌, 陈杰, 刘国彬.水土保持与生态修复工程显著提升了黄土高原的生态韧性[J].水土保持通报,2026,46(5):478-481. Zhang Xunchang, Chen Jie, Liu Guobin. Soil and water conservation, and ecological restoration projects significantly enhanced ecological resilience of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):478-481.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.043 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.043**

我们近期在国家自然科学基金(No. W2412158)资助下,基于黄土高原数千年的历史记录,就人类能否重建严重受损的生态韧性问题开展了合作研究,在*PNAS Nexus*期刊2026年第5期发表了相关学术论文(Humans can rebuild severely eroded resilience: Demo with millennia-long records in China's Loess Plateau. PNAS Nexus 2026,5, pgag127)。原文链接地址为:https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgag127。本文阐明了其中黄土高原成功治理的科学依据,希望得到国内学术界更广泛的关注,也为国家制定提升生态系统韧性和生态系统服务功能的适应性管理政策提供科学参考。

随着全球人口的增长和科学技术的进步,人类活动对自然生态系统的影响不断加剧。一般认为,人类在利用自然资源时必然会破坏自然。尽管人们越来越强调通过有意识的人类行动,将生态系统调整为更理想的状态,而不是被动适应现有条件。但是,由于缺乏大尺度和长时序的数据记录,这一理论至今尚未得到验证。中国黄土高原保存着人类改变生态-社会复合系统的千年记录,为检验生态学理论和启发式模型提供了独特的方法与途径。

文章论证了人类活动既可以削弱生态系统韧性,也可以提升其韧性。较高的韧性可以提供比原始状态更好的生态系统服务。文章将韧性替代指标定量化为年输沙量的相对偏差(原始状态值与计算年份值之差再除以原始状态值)。由于森林砍伐

收稿日期:2026-06-12 **修回日期:**2026-08-26 **采用日期:**2026-08-30
资助项目:国家自然科学基金项目"欧亚大陆旱区骤发干旱的气候响应机理及社会生态风险研究"(No.W2412158)
第一作者:张勋昌(1960—),男(汉族),博士,研究员,长期从事水土保持,土壤侵蚀与水文模型,非点源污染模拟,气候变化影响评估等研究。Email:john.zhang@usda.gov。

和农业扩张,韧性替代指标从原始状态下的0下降到20世纪50年代的－1,而通过人为干预环境慢变量,目前已提高至约0.8,远高于初始值。在社会-生态系统中,如何通过改变慢变量来增强其韧性,应当成为适应性生态系统管理的首选目标。

1　文章引入的新概念、新理论及其说明和论证的主要问题

结合生态学适应性循环(adaptive cycles)、扰沌理论(Panarchy)、韧性替代指标概念(resilience surrogate concept)以及关于韧性与慢变量相互作用的假设模型在内的启发式模型等,该项研究论证了通过改变慢变量来增强生态系统韧性,是实现自然与人类双赢的有效策略。研究引入物理学和生态学中快变量和慢变量概念,以生态系统韧性学说为理论依据,将人类社会融入生态系统,进而从社会-生态系统角度论述了人类在高强度利用自然资源的过程中,积极保护和大力改善自然,重建严重受损生态系统韧性的科学依据及理论基础。

从社会-生态系统的视角来看,生态韧性被定义为:在面对扰动和不断的环境变化时,社会-生态复合系统能够持续向人类提供生态系统服务的能力。为了便于具体操作应用,有必要将韧性明确定义为"什么对什么的韧性"("resilience of what to what"),亦即韧性替代指标概念[1]。对于特定的社会-生态系统,可以通过针对特定的扰动机制以及社会最需要的生态系统服务,来选取具有可操作性的韧性替代指标。该指标强调社会-生态韧性,即生态系统在面对人类利用和环境波动时维持理想生态系统服务的基础能力。在黄土高原最需要的生态系统服务是水土保持,而最主要的干预是人类活动。因而用年输沙量的相对偏差作为黄土高原韧性替代指标可以较好地反映在人为干预下生态韧性的动态变化。

替代指标理论的核心假设认为,通过分析少数几个快变量和慢变量,便能够理解生态系统的动态过程[2]。慢变量定义了社会-生态复合系统的底层结构或配置,而快变量则揭示了在该底层结构控制下社会-生态复合系统的动态变化。作为社会-生态系统的一种动态属性,韧性可以通过慢变量和快变量的变化及其相互作用来研究。支撑生态系统动态过程的慢变量控制着整个系统,是维持或构建理想生态系统韧性和生态系统服务最根本的决定因素[3]。在黄土高原特定社会-生态系统中,慢变量包括气候、水文、植被、土壤和地貌等,而水沙动态可作为反映这些慢变量影响的快变量。

适应性循环概念是生态系统韧性变化的一种普遍模式。它在我们对韧性的认识以及理解其动态特征方面发挥着关键作用[4]。为描述生态系统的动态过程,Holling提出了一个适应性循环模型[5]。该模型由4个典型阶段组成:增长(r)、保护(K)、释放(Ω)和重组(α)。其中,r—K阶段构成了一个可预测的前循环(fore loop),而Ω—α阶段则构成了一个不可预测的后循环(back loop),为潜在创新提供空间。重组阶段(α)会进入新的增长阶段(r);这一新阶段可能与先前的r阶段相似,也可能在慢变量的影响下显著偏离,沿着新的轨迹发展到另一种状态。此外,这些循环会在不同的时空尺度上以嵌套层级的方式相互作用。这种由层级结构组织并在时空尺度上相互作用的集合被称为扰沌理论[4]。该理论将不同时间和空间尺度上的适应性循环连接成一个层级体系。扰沌理论为理解复杂社会-生态系统中韧性的变化,以及解决人与自然相互作用所产生的问题,提供了一个替代性的理论框架。

2　黄土高原水土保持及生态修复的历史过程及其验证的问题

(1) 黄土高原在历史上遭受的三次较大规模的森林砍伐与农业扩张对生态系统的破坏可用三个适应性循环来描述。第一次始于公元元年前后,砍伐主要发生在黄土高原河谷平原,输沙量增幅有限;第二次发生在公元907—1368年间,因人口压力与人类需求的进一步加速,开垦区域由平原地区扩大至陡坡与低山,农业生产类型由牧业为主转向种植业为主,输沙量快速增加;第三次发生在公元1369—1949年间,由于明代长城修建、屯军与清代人口大规模迁入,自然植被受到大范围毁坏,输沙量剧增,并接近极限。

(2) 1950年后国家对生态环境修复和生态韧性重建日益重视。1950—1985年间,贫困问题导致生态系统持续退化。强烈的生态危机促使政府意识到现有发展模式难以为继,需彻底转型。黄土高原生态修复可划分为4个阶段,对应4个适应性循环,每个循环始于重组阶段(α),随后的增长阶段(r)由主导干预措施与国家保护政策引导,逐步向更理想,更具韧性的生态系统演化。这4个阶段和主要的生态修复措施与国家保护政策是:①1950—1970年,以修建梯田的坡面工程为主;②1971—1985年,以修建淤地坝的沟道工程为主;③1986—1999年,从粮食生产向生态保护转型,强化生物措施,辅以梯田与淤地坝工程;④2000—2024年,全面实施退耕还林还草植被恢复,结合坡面与沟道工程措施进行系统治理。

研究表明,生态系统的韧性来源于包括气候、土地利用、水文、土壤和地貌在内的环境慢变量。而基于科学的有意识的人类干预慢变量,能够避免不理想状态的出现,并将社会-生态系统转变为更理想的状态。通过改变慢变量来构建生态系统韧性,应当是创造生态与社会双赢的有效策略。研究表明,建立在适应性循环基础上的生态韧性概念和扰沌理论,能够解释黄土高原社会-生态系统中韧性的动态变化,为黄土高原成功的生态修复找到理论依据。韧性替代指标概念为评估系统韧性,识别系统状态转变的关键阈值以及制定管理政策提供了一种实用方法。

水土保持与生态修复工程显著提升了黄土高原的生态韧性。中华人民共和国成立以来,成功治理黄土高原生态退化与黄河水患的实践证明,人类已经学会了在利用自然资源的过程中,遵循自然规律,保护并不断改善自然生态环境。黄土高原生态环境的成功治理是大幅度改变慢变量的结果,包括大面积植被恢复和大规模淤地坝和梯田建设。黄土高原成功的生态恢复与改善代表了人类努力的一项非凡成就,为联合国实现可持续发展目标做出了巨大贡献,并树立了光辉的榜样。这一显著成果源于多方协同努力,包括政府重视下的生态修复投资与系统规划及实施、科学创新、群众的广泛参与以及适应性管理等。

3 关于中全新世(7 500~2 500 a前)黄河下游年输沙量的探讨

黄土高原保存着数千年人类改变社会-生态系统的记录,为检验生态学韧性理论提供了独特而有力的证据。在中全新世(7 500~2 500 a前)黄河每年约向下游输沙8.00×10^8 t,20世纪50年代年输沙量约1.60×10^9 t。21世纪以来(至2023年)年输沙量仅为1.30×10^8 t。这显示了黄土高原治理的巨大成就。中全新世每年8.00×10^8 t的输沙量是计算韧性替代指标的基础,也是评估黄土高原治理绩效的基准,故有必要对其作额外说明,希望能抛砖引玉,引发国内学术界的进一步讨论。

中全新世黄河每年向下游输沙8.00×10^8 t数据的来源包括如下7个方面。①Saito等[6]估算出中全新世在河南省的黄河三门峡站年输沙量在2.70×10^8~4.00×10^8 t之间,计算堆积量时使用的堆积面积是8.00×10^4 km^2,比后来印证的面积小。②任美锷和朱显谟[7]估算的黄河输沙量在河南省孟津站大约为每年5.00×10^8 t,这是根据33%的输移比计算的,这个输移比是按照20世纪50年代海河、滦河下游出山后的泥沙沉积率推算的。③叶青超等[8]、景可和陈永宗[9]估算的中全新世黄河向下游的输沙量为每年1.075×10^9 t,计算了包括华北平原冲积扇、水上水下三角洲及深海沉积。他们所用的冲积扇厚度比后来确证的20 m要厚一些。④Wang Houjie[10]根据文献资料得出中全新世在河南省的黄河花园口站的年输沙量在3.00×10^8~7.00×10^8 t之间。⑤文献[6—7,11]中的共识是中全新世入海泥沙(包括水上三角洲沉积),在1.00×10^8~2.00×10^8 t之间。在2 500 a前没有堤坝的情况下,若根据26%的输移比计算[12],花园口的输沙量每年应在3.80×10^8~7.60×10^8 t之间。⑥Milliman等[11]估算黄河在秦汉时期(200 BC—60 AD)每年向下游的输沙量高达1.00×10^9 t。⑦师长兴等[13]做了非常详细的研究,利用华北平原300多个^{14}C数据,计算得出中全新世的输沙量应为8.00×10^8 t左右,这也是文章中采用8.00×10^8 t的核心依据。

黄土高原沟道发育强烈,沟壑密度大(一般为4~6 km/km^2),冲沟以上的沟坡上都被覆着马兰黄土,说明这些沟道最晚在几万年前已经存在,导致沟道强烈侵蚀的部分原因是自晚更新世以来鄂尔多斯地台的不断抬升和与之对应的华北平原的沉降。强烈的沟道侵蚀会产生大量泥沙,即使在植被覆盖度高的中全新世,总侵蚀量也会相当可观。同中全新世相比,现在黄土高原已建设淤地坝1.10×10^5多个,水库3 000多座。它们不仅能拦截上游来的泥沙,更重要的是水库和淤地坝能抬高当地的侵蚀基准面,从而进一步控制沟道侵蚀。黄土高原林草覆盖率在2011年已达46%,2023年的数据是67%[14],这应当已接近生态水文植被承载力的极限。刘国彬等[15]根据潼关站2000—2012年的泥沙资料,估算出梯田和坝地的减沙率为34%,水库拦沙和引水减沙率为21%,降雨变化减沙率为21%,植被恢复减沙率为23%。这些研究结果在一定意义上可以解读中全新世8.00×10^8 t和2000—2023年间1.30×10^8 t黄河年均输沙量差异的原因。另外,一般认为黄土高原沟道侵蚀量占总侵蚀量的50%以上,淤地坝除拦截上游来沙外还能有效控制沟道侵蚀。对淤地坝减少沟道侵蚀的效益有待进一步研究。淤地坝对沟道侵蚀的控制作用也应是解读中全新世8.00×10^8 t和近年来1.30×10^8 t黄河输沙差异的原因之一。

致谢:本文在写作过程中得到了西北农林科技大学水土保持科学与工程学院刘文兆教授的鼎力相助,谨此致谢!

(下转封面3)

（上接第 480 页）

参考文献(References)

[1] Carpenter S, Walker B, Anderies J M, et al. From metaphor to measurement: Resilience of what to what? [J]. Ecosystems, 2001,4(8):765-781.

[2] Rinaldi S, Scheffer M. Geometric analysis of ecological models with slow and fast processes [J]. Ecosystems, 2000,3(6):507-521.

[3] Gunderson L H, Walters C J. Resilience in wet landscapes of southern Florida [M]// Resilience and the Behavior of Large-Scale Systems. Princeton: Princeton University Press, 2012:165-182.

[4] Gunderson L H, Holling C S. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems [M]. Princeton: Princeton University Press, 2013.

[5] Holling C S. The resilience of terrestrial ecosystems: Local surprise and global change [M]// Clark W C, Munn R E. Sustainable Development of the Biosphere. Cambridge University Press, 1986:292-317.

[6] Saito Y, Yang Zuosheng, Hori K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: A review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the holocene [J]. Geomorphology, 2001,41(2/3):219-231.

[7] Ren Mei'e, Zhu Xianmo. Anthropogenic influences on changes in the sediment load of the Yellow River, China, during the holocene [J]. The Holocene, 1994, 4(3): 314-320.

[8] 叶青超,景可,杨毅芬,等.黄河下游河道演变和黄土高原侵蚀的关系[C]//第二次河流泥沙国际学术会议论文集.北京:水利电力出版社,1983:597-607.
Ye Qingchao, Jing Ke, Yang Yifen, et al. The Relationship between the evolution of the lower Yellow River channel and the erosion of the Loess Plateau [C]// Proceedings of the Second International Conference on River Sediment. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983:597-607.

[9] 景可,陈永宗.黄土高原侵蚀环境与侵蚀速率的初步研究[J].地理研究,1983,2(2): 1-11.
Jing Ke, Chen Yongzong. Preliminary study of the erosion environment and rates on the Loess Plateau [J]. Geographical Research, 1983,2(2):1-11.

[10] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950—2005): Impacts of climate change and human activities [J]. Global and Planetary Change, 2007,57(3/4):331-354.

[11] Milliman J D, Qin Yunshan, Ren Meie, et al. Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers: The Yellow River (Huanghe) example [J]. The Journal of Geology, 1987,95(6):751-762.

[12] 任美锷.黄河的输沙量:过去、现在和将来:距今15万年以来的黄河泥沙收支表[J].地球科学进展,2006,21(6):551-563.
Ren Mei'e. Sediment discharge of the Yellow River, China: Past, present and future: A synthesis [J]. Advances in Earth Science, 2006,21(6):551-563.

[13] Shi Changxing, Dian Zhang, You Lianyuan. Changes in sediment yield of the Yellow River basin of China during the holocene [J]. Geomorphology, 2002, 46(3/4): 267-283.

[14] 傅伯杰,刘彦随,曹智,等.黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J].中国科学院院刊,2023,38(8):1110-1117.
Fu Bojie, Liu Yansui, Cao Zhi, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1110-1117.

[15] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
Liu Guobin, Shangguan Zhouping, Yao Wenyi, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017,32(1):11-19.