

基于黄土高原聚淤沉积物重建侵蚀历史与人地关系的研究进展

肖俊强^{1,2*}, 王紫譔¹, 祖明月¹

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²湖南文理学院地理科学与旅游学院, 湖南 常德

收稿日期: 2025年9月15日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月27日

摘 要

土壤侵蚀是流域物质 - 能量 - 信息传输的关键过程, 受降水、地形、土壤特性和人类活动等多因子耦合作用影响, 对区域生态安全与黄河泥沙输送具有深远影响。黄土高原以其厚层黄土覆盖与丘陵 - 沟壑地貌, 为研究事件尺度到年代尺度的侵蚀过程提供了天然实验场。聚淤(由滑坡/崩塌堵塞沟谷形成的天然淤地坝)沉积因“源一体化、层理清晰、旋回性强、保存完整”的特征, 可将每次暴雨——侵蚀事件在剖面中以下粗上细的沉积旋回记录下来, 成为重建近代——历史期土壤侵蚀与人地关系的高分辨陆地档案。在聚淤研究的物理、地球化学与生物学特征及其在旋回划分、交叉定年与环境解释中的应用的的基础上。基于旋回产沙模数与年际暴雨量构建的双累积曲线, 可在统计上分离气候驱动与人为干预并识别异常年份; 靖边与合水等案例表明不同地貌 - 气候背景下人类活动对侵蚀响应存在显著差异, 与此同时, 交叉定年、产沙量计算等方面的误差表明该方法还有一定的局限性, 需改进后方可加以推广。

关键词

聚淤(淤地坝), 土壤侵蚀, 人地关系, 黄土高原

Advances in Reconstructing Erosion History and Human-Land Interactions from Natural Check Dam Deposits on the Chinese Loess Plateau

Junqiang Xiao^{1,2*}, Zixuan Wang¹, Mingyue Zu¹

¹College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²School of Geography Science and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde Hunan

Received: September 15, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 27, 2025

*通讯作者。

文章引用: 肖俊强, 王紫譔, 祖明月. 基于黄土高原聚淤沉积物重建侵蚀历史与人地关系的研究进展[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(10): 1413-1420. DOI: 10.12677/ag.2025.1510131

Abstract

Soil erosion is a key process of material-energy-information transfer within catchments, driven by the coupled effects of precipitation, topography, soil properties and human activities, and it exerts a profound influence on regional ecological security and sediment delivery to the Yellow River. The Chinese Loess Plateau, with its thick loess cover and highly dissected hill-gully topography, provides a natural laboratory for studying erosion processes from event to decadal scales. Jujiu (natural check dam) deposits—formed when landslides or slope collapses block gullies—are characterized by a single sediment source, clear stratification, pronounced coarsening-fining couplets and good preservation; they therefore record individual storm-driven erosion-sedimentation events in high resolution and serve as valuable archives for reconstructing modern-historical erosion and human-land interactions. Building on the physical, geochemical and biological signatures used in jujiu studies and their application to couplet delineation, cross-dating and environmental interpretation, we show that a double-cumulative-curve approach (cumulative annual sediment production vs. cumulative interannual storm rainfall) can statistically separate climatic forcing from anthropogenic disturbance and identify anomalous years. Case studies from Jingbian and Heshui demonstrate that human impacts on erosion differ markedly with geomorphologic and climatic context. At the same time, dating uncertainties and errors in sediment-conversion calculations indicate methodological limitations that must be addressed before wider application.

Keywords

Gully-Pond (Natural Check Dam), Soil Erosion, Human-Land Relationships, Loess Plateau

Copyright © 2025 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. 引言

黄土高原位于中国中西部,是世界上最大、厚度最大且连续分布最广的黄土分布区之一,约覆盖 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ (约 64 万平方公里),横跨陕西、甘肃、宁夏、青海、山西、河南、河北等省区(并延伸至部分邻近行政区),位于黄河中上游流域,对中国北方的水文与生态格局具有基础性影响[1]。该区以厚层粉沙(黄土)覆盖为主,地形以丘陵-沟壑为主,地表被强烈的水力-重力侵蚀所塑造,沟壑纵横、地貌破碎,地下水资源总体有限,生态系统对降水波动和地表扰动具有较高的脆弱性。长期的开垦、毁林与过牧,使得黄土高原成为全球最严重的水土流失区之一,其严重程度不仅影响区域生态和农业生产,也决定了下游黄河的泥沙输运与河道形态演化[2]。作为世界上最为剧烈的土壤侵蚀区和生态脆弱区之一,黄土高原一直是研究侵蚀及驱动机制、人地关系演变的热点区域,这关系着黄河流域的水土保持和生态修复措施的制定、社会经济的高质量发展[3]-[7]。为治理水土流失、恢复生态功能,中国自 20 世纪中后期以来开展了多轮治理工程,对减轻土壤侵蚀和改善生态系统服务产生了明显作用,但其时空效应、长期碳-水-土反馈以及与人类社会经济活动的复杂耦合仍是研究热点和争议点[8]。

在这样的大背景下,聚淤(由滑坡/崩塌等地质过程堵塞沟谷而形成的天然“淤地坝”及其后续沉积)作为一种独特的沉积环境,因其“源一体化、层理清晰、旋回性强、保存完整”的特性,能够以年——事件尺度记录局地的径流——侵蚀事件与植被/土地利用变化,从而成为重建黄土高原近代——历史期土

壤侵蚀事件及人地关系的重要天然档案。聚湫沉积通常以由下粗上细的双层旋回记录单次暴雨引发的侵蚀——输沙事件，结合地球化学指标(如元素比例)、放射性示踪(如 ^{137}Cs)与生物指标(如孢粉)，可以实现旋回划分、年代控制与环境解释[9]-[11]。尽管近年来基于聚湫的研究在方法学(高分辨率 XRF 扫描、粒度分层学、孢粉与碳同位素分析)和案例报道上取得了大量进展，但仍存在若干需要系统回答的问题：第一，旋回定量与事件尺度侵蚀量的推算存在方法学不统一的问题(不同研究在剖面采样、粒级换算与产沙效率假设上差异较大)；第二，将沉积记录与定年史料、气候指数和社会历史事件严格对应以建立因果链条，仍受年代学误差与历史资料空间适配性的制约；第三，人为工程与自然因子(如极端降雨)在不同时段的相对贡献，尚需通过更广域、多剖面的系统对比与数值模型加以剖析[12]-[14]。

基于以上认识，本文旨在系统梳理聚湫沉积学特征、回顾并比较当前用于事件级侵蚀与人地关系重建的主要方法、总结代表性研究案例，并讨论方法学的局限与未来研究方向。通过全面评估聚湫作为高分辨率陆地沉积档案的潜力与不足，期望为黄土高原侵蚀 - 人地演变研究提供方法论上的参考与未来研究的优先方向。

2. 聚湫形成过程及其沉积特征

2.1. 聚湫形成及沉积过程

聚湫形成始于山坡滑坡或崩塌体堵塞沟谷，形成天然淤坝，截留后续降雨冲刷下来的泥砂与有机质，导致沟谷内形成滞水或淤积洼地(淤地坝)，而后由于粒不同，在分层作用下分成细颗粒层和粗颗粒层。在暴雨或强径流事件下，输沙过程常表现为由下粗上细的沉积旋回，每一旋回对应一次侵蚀——输沙事件(图 1)。

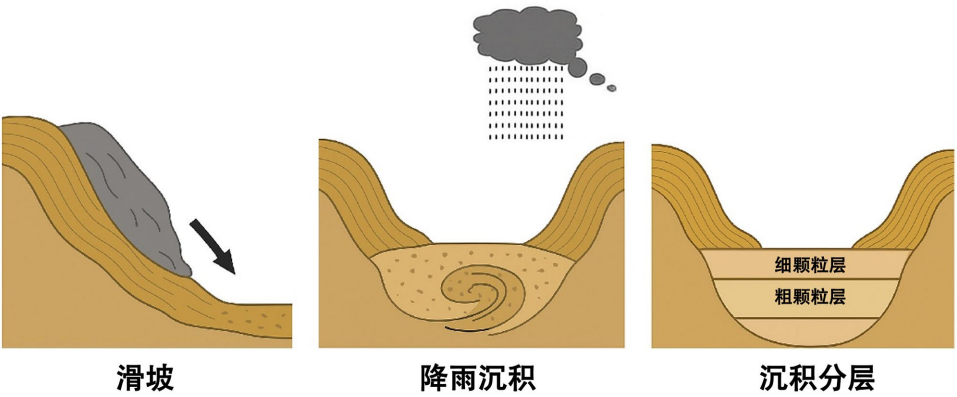


Figure 1. Schematic diagram of Jujiu (natural check dam) formation and deposition processes
图 1. 聚湫形成及沉积过程示意图

2.2. 聚湫沉积旋回特征

Table 1. Selected sedimentary indicators and their interpretative significance [15] [16]
表 1. 部分沉积特征指标及其指示意义[15] [16]

指标	测定或识别方法	环境/事件意义	说明
沉积旋回	视觉剖面、粒度曲线配合 元素/色差	每个旋回对应一次暴雨——输沙事件	明显的下粗上细分层
年际冻融层	视觉结构、含水/孔隙/亮度、Ca 富集	标记年际界线，可用于年级划分	细层表面“冻豆腐状”、高 Ca 与高 Slope (Ca vs Fe)

续表

元素比 Rb/Zr (Zr、Al 等)	XRF 核扫描(高分辨)	Rb/Zr、Zr 等反映粒级与来源差异， 辅助识别隐蔽旋回	细层较高 Rb/Zr；粗层相反
Ca/Zr、Fe/Zr 等	XRF/化学分析	指示碳酸盐富集、风化/成土与冻融 影响	年际冻融层 Ca/Zr、Ca 与 Fe 相 关性斜率增大
放射性示踪 $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$	γ 谱放射测年	^{137}Cs 峰值(≈ 1963 、1986 区域差异)用 于交叉定年	^{137}Cs 峰对应近现代核爆事件
孢粉 Pollen	化学处理 + 镜检定量与 指纹分析	重建植被类型、覆盖度与人类利用 (农作物/林草)	粉类组合变化指示土地利用变化
有机质/SOC Or- ganic carbon	TOC 测定、碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$)	细层富集表明滞留/有机富集期； $\delta^{13}\text{C}$ 指示植被类型	细层 TOC 含量高， $\delta^{13}\text{C}$ 可区分 C3/C4 植被

这些聚淤/淤地坝将自坝体形成以来的经历再次侵蚀搬运的黄土截留在坝库中，并以沉积旋回为最小单元连续地保存下来，形成约 10 m 到 60 m 不等的沉积序[17] [18]，沉积旋回不仅在粒度上有明显分层，还可通过地球化学元素比值、放射性示踪(如 ^{137}Cs)及孢粉、有机质等生物指标实现旋回划分、年代控制与环境解释(如表 1)，从而在事件——年代尺度上重建近代——历史期的侵蚀强度及人地关系。

2.2.1. 旋回物理特征

黄土高原聚淤(天然滑坡坝)沉积序列由多次单次暴雨洪水侵蚀堆积而成，每个沉积旋回具有明显的双层结构：下部为粗颗粒层，上部为细颗粒层(图 2)。粗颗粒层主要由粗粉砂和细砂组成，含水量低、亮度高，富集密度大的石英、锆石等重矿物，体现了高能侵蚀事件下大颗粒物质率先沉积的特征。上部细颗粒层以黏粒和细粉砂为主，含水量高、亮度低，层理水平，富含轻矿物(如方解石、白云母、伊利石、绿泥石、高岭石等)及有机质。旋回层厚度和数量主要受暴雨次数和强度控制，因此旋回厚度可反映单次洪水产沙量，旋回数量则记录了流域内强降水事件的频率。值得注意的是，聚淤沉积序列中经常出现年际冻融层——即年内最后一次洪水形成的细颗粒层，结构松软如“冻豆腐”(图 2)，可作为旋回的年际划分界线。通过高分辨扫描和放射性示踪技术，已发现靖边(北部丘陵沟壑区)和合水(南部高塬沟壑区)聚淤上部近期沉积序列中划分出的旋回数分别为 35 和 18 个，且每次细层中的 ^{137}Cs 峰值与 1963 年以来的强降水事件一一对应，表明物理层理特征可以高分辨率地记录流域历年洪水入侵侵蚀历史。总体而言，沉积旋回的物理指标(层厚、粒度和结构)是划分洪水旋回单元、重建降雨——产沙历时的关键参数，并指示了暴雨事件的频率和强度。



Figure 2. Sedimentary couplet stratigraphy and annual freeze-thaw layer
图 2. 沉积旋回分层及冻融层

2.2.2. 地球化学特征

聚湫沉积旋回的上下层在化学成分上呈显著差异：粗颗粒层富含 Si、Zr 等元素(对应石英、锆石等)、Ca 碳酸盐含量低；细颗粒层富含 Al、K、Fe、Ca、Sr 等元素，对应黏土矿物和方解石等轻矿物。这一分布反映了沉积物在水动力分选过程中的矿物组成差异。基于此，不同层位元素比值可作为有效指标来划分旋回层，如 Rb/Zr 比值在细层中偏高、粗层中偏低，因此被推荐用于高分辨率划分沉积旋回。例如，金等(2017)利用高分辨 XRF 扫描发现，下部粗层高 Zr、上部细层高 Al、Fe、Rb、Ca 和 Sr，据此提出以 Rb/Zr 比划分旋回，在靖边与合水聚湫中分别得到 35 和 18 个沉积旋回。此外， ^{137}Cs 放射性同位素因 1960 年代全球试验而沉积于细颗粒层中，其峰值在各年际冻融层对应年可作为时间标尺，验证了沉积旋回与历史强降水事件的一一对应关系。沉积旋回的地球化学指标不仅实现了对可见和隐蔽旋回的精细划分，也表明了上游水土流失时的颗粒输移规律和流域化学风化强度。例如，对旋回细层的 Ca/Zr 与 Fe/Zr 关系分析揭示，南部合水流域由于更温湿而成土发育和淋溶作用更强(年内细颗粒层 Ca/Zr、Fe/Zr 比值及斜率高于靖边)，而北部靖边则冻融作用更明显(年际冻融层 Ca/Zr、Fe/Zr 斜率较年内细颗粒层更高)。综上，化学元素及其比值在旋回划分与古环境指示中发挥了重要作用，它们既能反映泥沙的来源和分选过程，也能指示区域气候和土壤形成差异。

2.2.3. 生物特征

聚湫沉积旋回的细颗粒层普遍富含有机质、生物质和孢粉等生物指标。研究表明，每个旋回上层细颗粒层的土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、微生物生物量碳(MBC)和氮(MBN)、磷脂脂肪酸(PLFA)以及细菌、真菌、放线菌丰度均显著高于下部粗层，而粗层中此类指标极低。这一分布是由于细颗粒层孔隙致密、吸附有机质和水分(亮度低、含水量高)，从而有利于孢粉、微生物有机质等生物物质的保存和富集。典型旋回中细层孢粉浓度远高于粗层(高达数千粒/g)，反映了流域植被类型和覆盖度情况。因此，通过分析细层孢粉组合可以追踪植被演替和土地利用变化：如古代旋回中大量十字花科和禾本科花粉，表明当时沟谷植被以野草为主；近代旋回中农作物、林草花粉的比例变化则可指示人类活动影响。微生物群落结构的研究(如 PLFA 谱系分析)同样成为关注热点：微生物群落对环境变化和植被恢复极为敏感，其群落组成和生物量的微观记录为推断流域生态环境变迁提供了辅助信息。这些生物指标在旋回划分中作用有限(多集中在细层)，但在识别气候和人类活动信号方面意义重大：一方面，细层内生物和孢粉含量高有助于确认每次侵蚀事件和植被环境；另一方面，孢粉组合变化、微生物种群变动等可反映干湿气候波动、植被覆盖及土地利用(如退耕还林)演变等历史过程。综上所述，黄土高原聚湫沉积旋回的生物特征为流域古生态重建提供了关键证据，并可与物理、化学特征相结合以综合解析古气候和人地关系。

3. 侵蚀历史重建

土壤侵蚀的发生是降雨、土地利用、地形、土壤等各种因素相互影响与制约的综合结果，土壤侵蚀和环境相辅相成，相互作用，侵蚀的加重也会加剧生态环境的变化[19] [20]。

黄土高原聚湫和淤地坝沉积序列由层理清晰且含有不同数量年际冻融层的沉积旋回组成。旋回的特征已在前一章介绍，年际冻融层是黄土高原聚湫流域一年周期内最后一次暴雨侵蚀泥沙形成的、经历当年冬季霜冻和次年春季融化作用的细颗粒层，其土壤质地结构和化学组成均发生了变化，特别是土壤孔隙中的碳酸盐(如 CaCO_3)在冻融作用下富集于地表细颗粒层中，故高 Ca 与 Fe 含量及高相关性斜率(S)是鉴定冻融层的地球化学指标。由此可知，每一个旋回对应一次暴雨侵蚀事件，年际冻融层则可以对沉积旋回进行一个年际划分，在两个年际冻融层之间可能有多个沉积旋回，这代表该年气候较为湿润，有多次侵蚀性降雨发生，而也有可能年际冻融层之间没有沉积旋回，这表明该年气候较为干旱，没有侵蚀性降雨发生。所以，年内旋回数可指示该年侵蚀性降水事件的频率[21]-[25]。

据此, 基于年际冻融层的年际划分, 依据“大雨对大沙、小雨对小沙”的原则将各旋回的产沙模数和逐年暴雨量及发生时间一一对应, 我们即可以重建该段沉积的年代序列, 有现代降水记录以来的年份可根据多项指标(^{137}Cs 含量分布、年际冻融层、旋回产沙模数等)进行交叉定年, 没有现代降水记录以前的年份, 由于只有旱涝灾害等级的文献记载, 则需将旱涝灾害等级与年际降水量进行换算, 再根据历史文献记录去筛查出符合要求的年份。侵蚀量的重建则需对产沙量和产沙模数进行估算, 土壤的平均容重是一定的, 产沙量的计算需要先计算出泥沙体积, 而体积(v)计算公式由聚淤沉积旋回的具体形状来确定, 产沙模数则根据聚淤的流域面积进行估算[26] [27]。

4. 人地关系研究及案例

随着人类活动范围和强度的持续增强与扩大, 其对全球环境的影响也愈发明显, 其强度、深度等标志着地质时期已有全新世转入人类世。土壤圈作为“地球关键带”的核心要素, 人类世中高强度人类活动对其影响更为明显, 其中土壤侵蚀又是土壤圈最为重要的地貌塑造和变化过程。因此, 研究人类活动对土壤侵蚀的影响, 识别这种变化系统的相互演变机制, 可以帮助我们更好的制定相关的策略与实施合理的措施来进行水土保持。

在重建历史侵蚀的基础上, 计算实测降水与相应产沙模数间的线性相关方程, 据此方程和各沉积旋回产沙模数重建对应的历史时期降水事件强度的基础上, 建立过去一段时间的各流域累积降水强度和累积产沙模数的双累积曲线, 用以区别强降水和人类活动对各流域土壤侵蚀强度的影响。基于聚淤沉积旋回的累积年际产沙模数和基于累积年际降水量的双累积曲线进行拟合(图 3), 可以发现相关系数较高, 显著系数低, 说明拟合的较好, 但是在部分年份会表现出增强或减弱, 而造成这部分变化的原因就是人类活动, 对这部分存在显著差异的年份进行历史文献查询, 并与土壤侵蚀增强或减弱一一对应, 重建这一高强度人类活动驱动下的人地关系演变, 并对其机制进行简单探讨。

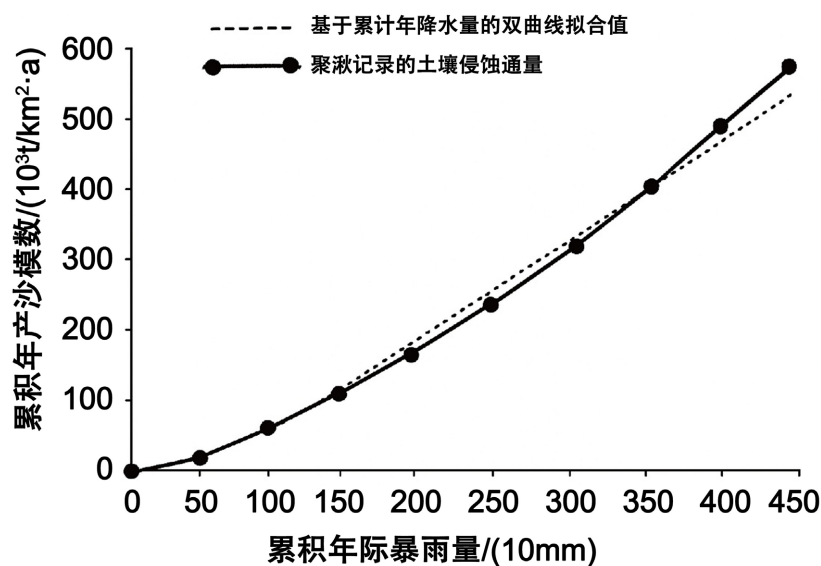


Figure 3. Model of the relationship between cumulative interannual sediment-production modulus and fitted values derived from cumulative precipitation

图 3. 累积年际产沙模数与基于累积降水量的拟合值分布模型

王夏青等[28]基于双累积曲线的方法对黄土高原上的两个典型聚淤进行了分析并对比发现, 清末“回民起义”时期两个不同的聚淤记录的土壤侵蚀通量都有所响应, 但响应并不相同, 在靖边地区, 高强度

的人类活动对当地生态环境的破坏会产生一些短期内“不可逆”的效果，地表土壤在严重的生态 - 水文状况恶化后侵蚀加剧且朝荒漠化方向发展[29]；靖边地区的生态环境极为脆弱，环境承载力较低，人口 - 生态 - 土壤侵蚀间的弹性较小，该区域的生态环境仅可承受较低的人口密度和较弱的人类活动。人口数量一旦快速增加就会破坏当地的生态平衡，增强土壤侵蚀程度。但在合水地区，高强度人类活动虽破坏当地的生态环境，但生态植被在东亚季风较湿润环境和低人口压力下可快速的自然恢复，有效减缓地表水土流失；合水地区的生态环境承载力较高，人口 - 生态 - 土壤侵蚀间的弹性较大，人口数量适当增加后不会明显破坏当地的生态平衡和地表过程。

由此可以知道，人类活动对不同地貌区的具体影响不是一致的，在地势较为陡峭且较为干旱的地区，战争会明显的加强该区域的土壤侵蚀强度，但在地势平坦且气候较为湿润的区域，战争虽然也会破坏植被加强侵蚀，但在土壤水分快速补充后自然植被恢复较快，其恢复速度超过了战争带来的破坏程度，且战争后人类活动减少，所以反而减弱了土壤侵蚀强度。因此，针对不同区域的生态保护和水土流失治理需要分区治理，实施与该区域相适应的保护措施，从而有效的提高治理的效率。

5. 结论与展望

土壤侵蚀是一个较为复杂的演变过程，涉及到流域内表土侵蚀风化、水文和生物地球化学循环等，因此它有效记录了流域关键带物质、能量、和信息的流动与转化，通过对黄土高原土壤侵蚀量变化过程及驱动机制的研究有助于更好地理解该地的降水变化，人类活动强度等过程。

黄土高原聚湫(天然滑坡坝)沉积作为一种高分辨率的陆地沉积档案，能够以事件 - 年代尺度记录流域侵蚀过程与植被/土地利用变化。聚湫沉积旋回(下粗上细)结合年际冻融层、 ^{137}Cs 峰值以及高分辨 XRF 得到的元素比值(如 Rb/Zr 、 Ca/Zr)和孢粉/有机质指标，可实现旋回划分、交叉定年与环境解释，从而在识别暴雨事件频率、估算产沙模数及区分气候与人为驱动方面发挥实用作用。已报道的靖边、合水等案例证明：双累积曲线法(累积降水 vs. 累积产沙)联合历史文献对接，能有效识别人为活动引起的异常年份及其区域差异。与此同时，方法学不一致、年代学误差、产沙量换算和空间代表性等不确定性仍限制结论的可推广性。

参考文献

- [1] Huang, T., An, S., Huang, W. and Liu, B. (2025) Loess Plateau Cropland: Evolution and Ecological Impacts over Four Millennia. *Land*, **14**, Article 1015. <https://doi.org/10.3390/land14051015>
- [2] Wei, H., Zhao, W. and Wang, H. (2021) Effects of Vegetation Restoration on Soil Erosion on the Loess Plateau: A Case Study in the Ansai Watershed. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article 6266. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126266>
- [3] 崔彩贤, 沈霖, 远佳怡, 等. 黄土高原土壤调控原理与应用研究知识图谱——基于 CiteSpace 的文献可视化分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 396-408.
- [4] Fu, B., Wang, S., Liu, Y., Liu, J., Liang, W. and Miao, C. (2017) Hydrogeomorphic Ecosystem Responses to Natural and Anthropogenic Changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **45**, 223-243. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020552>
- [5] Chen, Y., Wang, K., Lin, Y., Shi, W., Song, Y. and He, X. (2015) Balancing Green and Grain Trade. *Nature Geoscience*, **8**, 739-741. <https://doi.org/10.1038/ngeo2544>
- [6] 金钊, 王云强, 高光耀, 等. 地球关键带与地表通量综合观测研究为黄土高原生态保护和可持续发展提供有力的科技支撑[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(3): 378-387.
- [7] Jiang, C., Zhang, H., Wang, X., Feng, Y. and Labzovskii, L. (2019) Challenging the Land Degradation in China's Loess Plateau: Benefits, Limitations, Sustainability, and Adaptive Strategies of Soil and Water Conservation. *Ecological Engineering*, **127**, 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.018>
- [8] Li, H., Wu, Y., Liu, S., Zhao, W., Xiao, J., Winowiecki, L.A., et al. (2022) The Grain-for-Green Project Offsets

- Warming-Induced Soil Organic Carbon Loss and Increases Soil Carbon Stock in Chinese Loess Plateau. *Science of The Total Environment*, **837**, Article 155469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155469>
- [9] Zhao, T., Yang, M., Walling, D.E., Zhang, F. and Zhang, J. (2017) Using Check Dam Deposits to Investigate Recent Changes in Sediment Yield in the Loess Plateau, China. *Global and Planetary Change*, **152**, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.03.003>
- [10] Wen, X. and Zhen, L. (2020) Soil Erosion Control Practices in the Chinese Loess Plateau: A Systematic Review. *Environmental Development*, **34**, Article 100493. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100493>
- [11] Bai, L., Shi, P., Wang, W., Li, Z., Yu, K., Li, P., et al. (2023) Sediment Sources and Their Impacts on a Check Dam-Controlled Watershed, Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, **20**, 1660-1673. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7888-2>
- [12] 李勉, 杨剑锋, 侯建才, 等. 黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 64-69.
- [13] 魏霞, 李占斌, 李勋贵. 黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 108-113
- [14] Ma, T., Liu, B., He, L., Dong, L., Yin, B. and Zhao, Y. (2024) Response of Soil Erosion to Vegetation and Terrace Changes in a Small Watershed on the Loess Plateau over the Past 85 Years. *Geoderma*, **443**, Article 116837. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116837>
- [15] 王夏青, 彭保发, 李福春, 等. 黄土高原聚淤沉积旋回特征及地球化学划分[J]. 土壤, 2018, 50(5): 1046-1054.
- [16] 金章东, 王夏青, 张信宝, 肖军, 张飞. 黄土高原聚淤沉积旋回、土壤侵蚀及区域差异[J]. 第四纪研究, 2017, 37(6): 1161-1174.
- [17] Wang, Y., Chen, L., Fu, B. and Lü, Y. (2014) Check Dam Sediments: An Important Indicator of the Effects of Environmental Changes on Soil Erosion in the Loess Plateau in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **186**, 4275-4287. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3697-6>
- [18] Long, Y., Zhang, X., Li, M., Li, M. and Zhang, Y. (2008) Identification of the Deposited Layers in Landslides Reservoir and Investigation of the Sediment Yields during the Later Sixteenth Century on the Hill Loess Plateau, China. *Science Bulletin*, **53**, 3908-3913. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0466-3>
- [19] 汪滨, 张志强. 黄土高原典型流域土壤侵蚀对退耕还林土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 60-70.
- [20] Li, P., Chen, J., Zhao, G., Holden, J., Liu, B., Chan, F.K.S., et al. (2022) Determining the Drivers and Rates of Soil Erosion on the Loess Plateau since 1901. *Science of The Total Environment*, **823**, Article 153674. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153674>
- [21] 李勉, 姚文艺, 史学建. 淤地坝拦沙减蚀作用与泥沙沉积特征研究[J]. 水土保持研究, 2005(5): 111-115.
- [22] 谢晓健, 苏正安, 周涛, 等. 桑干河流域淤地坝沉积泥沙特征及其来源解析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 49-59.
- [23] 朱冰冰, 霍云霏, 周正朝. 黄土高原坡沟系统植被格局对土壤侵蚀影响研究进展[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(4): 149-156.
- [24] 龙翼, 张信宝, 李敏, 等. 陕北子洲黄土丘陵区古聚淤洪水沉积层的确定及其产沙模数的研究[J]. 科学通报, 2009(1): 73-78.
- [25] 邹钰文, 黄莹, 余冬立. 基于 Web of Science 数据库的黄土高原淤地坝环境效应文献计量分析[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(5): 126-131.
- [26] Tang, Q., Wang, S., Fu, B., Wang, Y. and Gao, G. (2018) Check Dam Infilling Archives Elucidate Historical Sedimentary Dynamics in a Semiarid Landscape of the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, **118**, 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.004>
- [27] Lu, J., Sun, B., Ren, F., Li, H. and Jiao, X. (2021) Effect of Freeze-Thaw Cycles on Soil Detachment Capacities of Three Loamy Soils on the Loess Plateau of China. *Water*, **13**, Article 342. <https://doi.org/10.3390/w13030342>
- [28] 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.
- [29] 王晗. 人口变动, 土地利用和环境变化关系研究[J]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2008.