

引用格式: 杨磊, 冯青郁, 陈利顶. 黄土高原水土保持工程措施的生态系统服务[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 87-95. [Yang L, Feng Q Y, Chen L D. Ecosystem services of soil and water conservation measures on the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 87-95.] DOI: 10.18402/resci.2020.01.09

# 黄土高原水土保持工程措施的生态系统服务

杨磊<sup>1,2</sup>, 冯青郁<sup>1</sup>, 陈利顶<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**黄土高原严重的水土流失是黄河泥沙的主要来源。自1950s以来大规模实施的水土保持工程建设是黄土高原水土流失治理的重要举措, 在减少入黄泥沙方面做出了巨大贡献。水土保持工程措施通过直接或间接地作用于坡面、沟道的水文过程和物质迁移过程等, 改变了水资源和土壤资源的时空分配格局, 在土壤保持、粮食供给、水文调节等方面发挥了重要作用, 对黄河流域生态安全具有重要贡献。本文系统综述了黄土高原水土保持工程措施的发展演变, 阐述了水土保持工程措施对水土过程的作用机制及对关键生态系统服务的贡献, 探讨了新形势下黄土高原水土保持工程措施建设面临的问题、挑战。在此基础上提出今后黄土高原水土保持工程措施应加强维护和管理, 提升应对极端气候事件和自然灾害的能力, 面向国家生态文明建设和区域社会经济发展需求, 统筹工程措施与植被措施, 进行科学的设计与合理的时空配置, 以维护黄土高原及黄河流域生态安全、维持和提升区域生态系统服务功能及社会经济效益。

**关键词:**水土保持; 生态系统服务; 水文过程; 土壤过程; 社会-经济-自然复合生态系统; 黄土高原

DOI: 10.18402/resci.2020.01.09

## 1 引言

黄土高原生态环境脆弱, 是中国乃至全球土壤侵蚀最为严重的地区, 是黄河泥沙的主要来源区和重点治理区, 是中国核心的生态环境脆弱区之一, 也是中国生态屏障的重要组成部分和生态文明建设的重点区域<sup>[1]</sup>。黄土高原土质疏松, 大部分区域地形破碎、丘陵沟壑纵横, 且气候干旱。水土流失是制约这一地区社会经济发展与人民生活水平提高的重要因素。为控制水土流失、提升社会经济效率、改善区域生态环境, 自1950s以来, 在黄土高原地区陆续开展了大规模的水土保持和生态工程建设<sup>[2,3]</sup>。水土保持工程措施配合植被建设、耕作措施等, 有效控制了水土流失、保障了粮食生产、提升了应对自然灾害的能力, 有效推动了黄土高原生态环

境改善、人民生活水平提高和社会经济发展<sup>[1,2]</sup>。

黄土高原水土保持工程措施取得了显著的生态效益, 大量相关研究也从不同角度探讨了水土保持工程措施和生态恢复对不同尺度水文过程、土壤过程、植被生态过程的影响, 建立了生态过程与生态系统服务的关系<sup>[4,5]</sup>。经过几十年的建设和发展, 水土保持工程措施在黄土高原分布广泛且类型多样, 但仍然存在着空间布局不合理、运行维护不足、功能失调和经济效益偏低等问题。在新时期水土保持、植被恢复、经济效益提升等多方面的需求下, 水土保持工程措施的建设、运行和维护面临着新的问题和挑战<sup>[6]</sup>。本文将简要论述黄土高原地区水土保持工程措施的主要类型及演变过程, 解析水土保持工程措施对水、土过程的作用机制及关键生态系

收稿日期: 2019-12-19, 修订日期: 2020-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871194; 41561112); 中国科学院生态环境研究中心科技促进社会经济发展能力建设项目(RCEES-NLJS-2019-03)。

作者简介: 杨磊, 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为景观格局与生态安全、植被恢复与生态水文。E-mail: leiyang@rcees.ac.cn

通讯作者: 陈利顶, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为景观格局与生态过程、区域生态安全与可持续发展。E-mail: liding@rcees.ac.cn

统服务的形成过程,提出新形势下黄土高原水土保持工程措施建设的问题与展望,以期为黄土高原及黄河流域生态安全和可持续发展提供科学依据。

## 2 水土保持工程措施的主要类型及其发展演变特征

黄土高原地区大规模建设的水土保持工程措施主要包括沟道水土保持工程和坡面水土保持工程。沟道水土保持工程措施主要是淤地坝,以及近年来发展的治沟造地、固沟保塬等工程措施;坡面水土保持工程措施主要包括梯田,以及用于拦截泥

沙、辅助植被建设的鱼鳞坑、水平沟、水平阶、反坡梯田等工程措施(图1)。

淤地坝主要通过河道拦截径流,达到拦截泥沙、淤地造田的功能。淤地坝淤满以后土地较为平整,相比自然坡面拥有较好的土壤养分和水分条件,具有较好的生态效益和粮食供给能力<sup>[7]</sup>。统计表明,经过近70年的建设,黄土高原现存淤地坝数量超过了5.6万座<sup>[8]</sup>,淤地坝的建设也经历了从蓄水拦泥到淤地生产,从小型淤地坝到大型淤地坝,从单坝建设到坝系建设的发展过程<sup>[6,7]</sup>。

(a) 水平梯田



(b) 淤地坝



(c) 反坡梯田



(d) 鱼鳞坑



(e) 水平沟



(f) 水平阶



图1 黄土高原不同类型的水土保持工程措施

Figure 1 Different types of soil and water conservation measures on the Loess Plateau



坡面工程措施主要通过改变下垫面微地形的形态与结构特征,使得地表水文过程和物质迁移过程发生改变,进而产生不同于自然坡面的生态环境效应<sup>[9]</sup>。中国早在西汉时期就出现了雏形“梯田”,修建梯田一直是黄土高原坡面水土流失治理、改善农业生产条件、保障粮食安全的核心工程措施之一<sup>[6]</sup>。鱼鳞坑、水平沟、水平阶等坡面整地措施主要用于减少坡面产流、产沙,增加降水入渗,是黄土高原植被恢复的重要辅助措施,在提高植被成活率、提升植被生态系统服务功能等方面发挥了重要作用<sup>[9,10]</sup>。

自20世纪50年代以来,黄土高原地区水土保持工程措施建设经历了一系列阶段。其中,50—60年代中期主要以营造梯田辅以植树造林等坡面治理为主;60—70年代末期集中在修建淤地坝、营造梯田等沟坡联合治理为主;70—90年代末从营造梯田、修建淤地坝、植树造林等开始走向配合自然修复的小流域综合治理;2000年以后则在以上措施的基础上开展了大规模的退耕还林还草工程,并且2010年以后在退耕还林还草的基础上辅以治沟造地等流域综合整治与生态循环经济建设<sup>[11-13]</sup>。总体而言,黄土高原水土保持工程措施建设经历了从单一的坡面工程治理过渡到坡面和沟道联合的工程治理,再到工程措施和植被措施相结合的小流域综合治理。2000年以来,水土保持工程措施成为黄土高原大规模植被建设的重要辅助手段,有力促进

了区域生态系统恢复和环境改善。

### 3 水土保持工程措施对关键生态系统服务的贡献

水土保持工程措施通过改变水文过程和物质迁移过程等,影响水土资源的再分配,发挥土壤保持、土壤肥力提升、粮食供给、水文调节、水源涵养等关键生态系统服务(图2),是典型的社会-经济-自然相互作用的人地耦合系统。

#### 3.1 土壤保持与固碳

黄土高原大规模水土保持工程建设使得这一地区进入黄河的泥沙量快速减少,是黄河泥沙减少的重要原因之一<sup>[14,15]</sup>。其中,淤地坝可有效拦截来自上游坡面和沟道侵蚀土壤,使大量土壤在淤地坝内沉积,直接减少汇流区进入河流的泥沙量,同时拦截径流,减轻对沟谷的冲刷<sup>[7]</sup>。数据表明,黄土高原的淤地坝每年减少进入黄河的泥沙达到300~500万t<sup>[15]</sup>。黄河潼关站的年均输沙量由20世纪70年代前的16.0亿t,锐减到2000—2005年的2.6亿t<sup>[16]</sup>,2011年以后已经锐减到1.5亿t左右<sup>[17]</sup>。冉大川等<sup>[18]</sup>分析发现,黄河中游河口镇至龙门区间(简称河龙区间)淤地坝减沙量占水土保持措施年均减沙量的64.7%。Li等<sup>[19]</sup>在黄河支流皇甫川流域的研究表明淤地坝在1990—1999年间减少径流泥沙27.7%,而在2000—2012年间则贡献了泥沙减少量的78.3%。Zhao等<sup>[20]</sup>对皇甫川流域的模拟研究也发

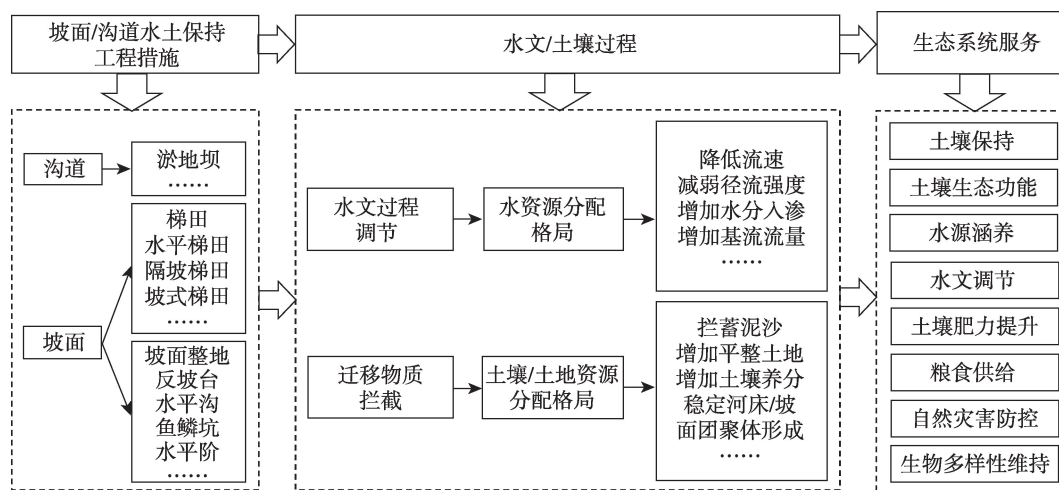


图2 水土保持工程措施的生态过程与生态系统服务

Figure 2 Mechanisms of soil and water conservation engineering contributing to ecosystem services

现,若不考虑土地利用变化,淤地坝可减少51.9%的径流泥沙,而土地利用变化和淤地坝的共同作用则可减少流域径流泥沙的80%。相比而言,水平梯田在减少坡面土壤侵蚀的同时,还具有在时间和空间上合理调控降水资源的独特功能<sup>[21,22]</sup>,是坡面土壤保持的重要措施之一。例如,刘世梁等<sup>[23]</sup>通过WEPP模拟研究发现,梯田建设有效拦截了产沙过程,随着坡度从5°到25°,梯田对泥沙的拦截率从20%上升到84%。1960s以来黄土高原多地的实测数据表明,水平梯田可减少地表径流70%~90%,减沙90%~100%<sup>[24]</sup>。

淤地坝、坡面整地等工程措施也是黄土高原的一个重要碳汇,有估算认为黄土高原地区淤地坝固碳量达到了9.52亿t<sup>[15,25]</sup>。坡面土壤侵蚀迁移的表层土壤碳含量一般较高,并且侵蚀作用的选择性会使土壤中含碳量高的粘粒和粉粒优先迁移,因此淤地坝、水平沟、隔坡梯田等工程措施内沉积物中常常出现碳富集<sup>[25,26]</sup>。尤其对于淤地坝而言,由于土壤的压实作用,淤地坝内空气流通差,抑制了土壤微生物活动,降低了土壤有机碳的矿化分解速率,提升了淤地坝作为陆地生态系统碳汇的潜力<sup>[26]</sup>。黄土高原的多个研究均表明淤地坝是良好的土壤碳库。例如,李勇等<sup>[27]</sup>对延安碾庄沟流域进行调查和估算认为,1957—2000年淤地坝工程存储有机碳达17.3万t。Lv等<sup>[28]</sup>估算延安大中型淤地坝土壤有机碳储量达0.423亿t,占黄土高原表层0~40cm土壤有机碳储量的1.48%。另一方面,水土保持工程措施作为植被恢复的重要辅助手段,也在很大程度上促进了生态系统的固碳<sup>[22]</sup>。

### 3.2 土壤肥力提升与粮食安全

梯田等工程措施在控制水土流失的同时,减少了因土壤侵蚀而导致的土壤颗粒和养分的流失,同时也降低了滑坡、洪水、干旱等自然灾害的风险,增强了农业生态系统的稳定性,是区域粮食安全的重要保证<sup>[22,29]</sup>。相比坡耕地,梯田、淤地坝等通过长期稳定的耕作可以有效改善土壤结构和养分条件,碳、氮、磷、钾等养分物质的生物地球化学循环过程有所改变,耕地质量得到明显改善,作物产量有显著的提升<sup>[21]</sup>。例如,Liu等<sup>[30]</sup>研究发现,黄土高原西部庄浪县修建3年的梯田产量比坡耕地提高27%,

在后续耕作中作物产量还可以提高27.07%~52.78%。Xu等<sup>[31]</sup>在延安的研究也发现,梯田内不同作物的产量均高于对照自然坡面,并且梯田的增产效果随着坡度的增加而增大。目前黄土高原梯田面积已占这一区域耕地总面积的60%左右,梯田内粮食平均单产可达到坡耕地的2~3倍<sup>[6]</sup>,尤其是在大规模退耕还林还草使得区域耕地面积大量减少的情况下,黄土高原粮食产量仍有波动性上升的趋势<sup>[32]</sup>。

淤地坝淤满以后可将沟道、河滩、荒坡等难以利用的土地转变为地势平坦的优质农田<sup>[7]</sup>,有效改善了黄土丘陵区农业生产条件。淤地坝内土壤多由径流冲刷坡面表层土壤沉积而来,侵蚀土壤有机质、氮、磷等养分含量较高,并且因汇流作用淤地坝内水分条件较好,作物产量高且相对稳定,粮食供给功能要优于坡面,已成为黄土高原重要的粮食产地之一<sup>[7]</sup>。数据表明,淤地坝内粮食单产是梯田的2~3倍,是坡耕地的6~10倍<sup>[6,15]</sup>,黄土高原淤地坝农田只占区域农田总面积的9%,但其粮食产量却占到区域粮食总产量的20.5%<sup>[15]</sup>。而且淤地坝良好的水肥条件很好地促进了农业产业结构优化,提高了农业集约化经营程度和土地生产利用率<sup>[6]</sup>。总体而言,黄土高原大规模的梯田建设和淤地坝建设,是保障这一地区粮食安全和生态安全、推进乡村振兴战略实施的重要资产储备<sup>[6,33]</sup>。

### 3.3 水源涵养与水文调节

水土保持工程措施的一项重要功能是减少侵蚀,拦截地表径流,增加入渗<sup>[34]</sup>。水土保持工程措施通过改变水文路径、减少水文连通性、降低径流流速并延长水分入渗时间,从而增加土壤水分含量,达到涵养水源和径流调控的功能<sup>[7]</sup>。设计和管理良好的淤地坝可以有效拦截迁移物质,减弱沉积物随急流迁移导致的泥石流等自然灾害。尤其是大暴雨事件下,淤地坝是泥沙的重要汇集地,对径流与洪峰的消减作用显著<sup>[17]</sup>。另一方面,对于沟道水土保持工程来说,淤地坝还可以拦蓄地表径流,增加水与河床的接触时间,从而增加地下水补给,提高降水资源的利用效率<sup>[7]</sup>。例如,皇甫川流域的模拟结果表明,淤地坝贡献了1990—2012年径流量减少的24.8%,2000—2012年径流量减少的65.2%<sup>[19]</sup>,而河龙区间淤地坝年均减水量占到水土保持措施年



2020年1月

均减水量的59.3%<sup>[18]</sup>。

坡面水土保持工程措施最为直接的作用是增加了地表粗糙度,形成许多不同大小和形状的微型蓄水单元,增加了降水入渗<sup>[35]</sup>。当然,不同水土保持工程措施对土壤水源涵养能力的影响有所不同,并且在水平和垂直方向上存在较大的季节波动<sup>[36-38]</sup>。研究认为,黄土高原地区水平梯田的保水率可达85%~95%,工程和植物措施相结合的侵蚀沟保水率达75%~85%<sup>[34]</sup>。黄土高原降水量稀少、气候干旱,水分是区域生态系统的主要限制因子。反坡梯田、鱼鳞坑、水平阶和水平沟等水土保持工程措施常与植被恢复相结合,通过土壤水源涵养和土壤性质的改善来提高植被成活率和生物量<sup>[39]</sup>。在干旱、半干旱地区,坡面水土保持工程措施已成为维持植被生态系统稳定的重要辅助措施<sup>[40]</sup>。Yang等<sup>[41]</sup>在黄土高原西部的研究发现,梯田、水平阶等坡面整地措施可以有效改善0~8 m深度土壤水分状况,有助于人工植被的稳定生长与生态系统服务维持。这一结果也表明,水土保持工程措施的长期生态效应是值得关注的一个重要方面。

## 4 新时期水土保持工程措施建设的建议

### 4.1 加强水土保持工程措施的维护和管理,提升应对极端气候事件的能力

黄土高原经历了近70年的水土流失治理工作,现有的水土保持工程措施是长期水土保持建设积累的成果<sup>[42]</sup>。由于区域社会经济结构变迁和气候变化等因素的影响,黄土高原不少水土保持工程措施存在年久失修、维护不足的现象,不少已建成的水土保持工程措施面临损毁、衰败的威胁,制约了水土保持功能的发挥和生态系统服务的维持,甚至威胁到了局地生态系统和社会经济安全<sup>[6,8]</sup>。焦菊英等<sup>[43]</sup>研究发现,水平梯田的质量对其减水减沙效益的影响很大,而降雨量和降雨强度是水平梯田发挥水土保持效益的重要影响因素。在缺乏有效维护的情况下,遇到特大暴雨等极端气候事件,梯田、淤地坝的这种地形构造极易拦蓄过多降水,引发泥石流、滑坡等地质灾害,使得多年的水土保持建设成果毁于一旦,更威胁了下游群众的生命财产安全。

在全球变化的大背景下,极端气候事件有所增加,水土保持工程措施的建设和维护更需要考虑提升应对极端气候事件和自然灾害的能力,提高区域生态系统的稳定性<sup>[44]</sup>。现阶段亟需开展已建成水土保持工程措施的系统调查与评估,针对性地进行维护和管理,使水土保持工程措施的功能符合区域生态环境保护和社会经济发展的需求。

### 4.2 水土保持工程措施与植被措施的效益权衡与合理配置

黄土高原大规模退耕还林还草工程实施以来,区域植被覆盖度显著增加,人工植被已经成为这一地区的主要植被类型<sup>[45]</sup>。植被恢复使得坡面植被覆盖能有效拦截降雨,减少了坡面产流产沙。大规模植被建设和工程措施的综合作用,改变了区域水循环过程<sup>[46,47]</sup>。研究表明当前黄土高原植被覆盖已接近区域水分承载力阈值,大规模植被恢复导致植被耗水增加,使得河道水量大幅度减少<sup>[48]</sup>,造成淤地坝面临无沙可淤的问题<sup>[17]</sup>,限制了淤地坝淤地造田的功能。坡面梯田、水平沟等工程措施也直接改变了水文过程,将大部分降雨就地拦蓄在坡面,难以形成径流进入河道。水土保持工程措施、植被建设的综合作用使得河道径流减少,可利用水量降低,影响了区域生产、生活用水,并且对下游的水资源利用也产生了一定的影响。在黄土高原水土流失治理与生态恢复的过程中,需要进一步明确水土资源对工程措施和植被措施响应的过程、效应和特征,基于区域生态系统服务需求,权衡不同尺度上工程措施和植被措施的生态效益,进行科学的设计和合理的时空配置,提升综合生态效益。

### 4.3 耦合社会-经济-生态系统的水土保持多元效益提升与科学统筹

社会-经济-自然复合生态系统强调自然系统的合理性,经济系统的利润和社会系统的效益<sup>[49]</sup>。当前中国生态文明建设、乡村振兴、山水林田湖草生态保护修复等新的社会发展形势和生态建设需求下,黄土高原水土流失治理已经从单一的土壤侵蚀控制转向社会-经济-生态效益的综合提升,水土保持工程措施的建设和维护更需要考虑其整体性与系统性<sup>[6]</sup>。在这种典型的人地耦合系统中,需要

进一步明确变化环境下不同工程措施对生态过程的作用机制,明确生态过程的改变对生态系统服务的影响<sup>[4]</sup>。水土保持工程措施对生态系统服务的贡献存在时间和空间上的差异,对水土保持工程措施的生态系统服务需求也存在协同和权衡,而权衡可发生在不同的生态系统服务之间,也可发生于现在和未来服务的获取之间<sup>[4,7]</sup>。厘清水土保持工程措施对生态系统服务的贡献,提升单位面积生态系统服务功能,兼顾水土保持工程措施的多元生态效益,对黄土高原区域生态功能的维持与提升具有重要的科学和实践意义。

随着国家城镇化战略的推进和生态恢复政策的实施,黄土高原的乡村经济和社会环境发生了重大变化,区域生态系统高强度人类活动的压力正在逐步缓解。其中,农业人口及农村劳动力的迁移对于水土保持工程措施的建设与管理有重要影响。新的社会经济形势下乡村常住人口普遍减少且呈现老龄化的趋势,使得现有梯田、淤积农田等的利用率明显降低,在黄土高原许多地区出现宽幅梯田的弃耕现象,窄幅梯田的弃耕现象则更为严重<sup>[17,22]</sup>。当前社会经济形势下,大规模新建水土保持工程措施在一定程度上造成了资金浪费,也造成高质量的土地有效利用率不足和弃耕退耕等问题<sup>[50]</sup>。水土保持工程措施的建设中,需解决好农民的当前生活和长远生计问题,将水土保持工程建设同农业生产、农村经济发展、农民增收紧密结合起来,满足新形势下生态文明建设和国家生态安全的需求。水土保持工程措施的建设、使用和维护,应以生态问题和社会、经济问题为综合导向,合理设计类型和规模,以利于农产品产业化、集约化、多样化经营,实现农业经济的持续稳定增长和生态效益提升<sup>[51]</sup>。应基于区域社会经济发展和居民需求,进行科学的统筹与规划,充分考虑区域差异,统筹区域山水林田湖草,合理配置农业用地和生态用地,因地制宜开展水土保持工程措施的建设,并进行科学合理的空间配置,以维护区域生态安全,提升社会经济效益。

## 5 结论

黄土高原水土保持工程措施通过作用于沟道或坡面的水文过程和物质迁移过程,发挥了土壤保

持、粮食供给、水源涵养和水文调节等关键生态系统服务功能。新形势下黄土高原需加强水土保持工程措施的维护与管理,提升其应对极端气候事件和自然灾害的能力,权衡水土保持工程措施和植被措施的生态效益,基于国家生态安全战略和区域社会、经济、生态环境需求,科学统筹、规划与配置水土保持工程措施,提升区域生态系统服务功能和社会经济效益。

## 参考文献(References):

- [1] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [2] Fu B J, Liu Y, Lv Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [3] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(1): 9-20.
- [4] Fu B J, Wang S, Su C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [5] Wang S, Fu B J. Trade-offs between forest ecosystem services[J]. *Forest Policy and Economics*, 2013, 26: 145-146.
- [6] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7398-7409. [Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7398-7409.]
- [7] 冯棋, 杨磊, 汪亚峰. 拦截坝生态系统服务研究进展[J]. *土壤通报*, 2019, 50(4): 983-992. [Feng Q, Yang L, Wang Y F. Ecosystem services of check dam: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4): 983-992.]
- [8] 刘晓燕, 高云飞, 王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. *人民黄河*, 2017, 39(4): 1-5. [Liu X Y, Gao Y F, Wang F G. Quantity and distribution of warping dams that still have sediment retaining ability in the Loess Plateau[J]. *Yellow River*, 2017, 39(4): 1-5.]
- [9] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 等. 微地形改造的生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6462-6469. [Wei W, Yu Y, Jia F Y, et al. Research progress in the ecological effects of micro-landform modification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6462-6469.]



2020年1月

- [10] 杨磊, 张子豪, 李宗善. 黄土高原植被建设与土壤干燥化: 问题与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7382–7388. [Yang L, Zhang Z H, Li Z S. Effects of large-scale re-vegetation on soil desiccation in the Loess Plateau: Problems and perspectives[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7382–7388.]
- [11] 李相儒, 金钊, 张信宝, 等. 黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议[J]. 地球环境学报, 2015, 6(4): 248–254. [Li X R, Jin Z, Zhang X B, et al. Analysis of ecosystem management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development[J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(4): 248–254.]
- [12] 金钊. 走进新时代的黄土高原生态恢复与生态治理[J]. 地球环境学报, 2019, 10(3): 316–322. [Jin Z. Ecological restoration and remediation on the Chinese Loess Plateau in the new era [J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(3): 316–322.]
- [13] 王飞, 李锐, 杨勤科, 等. 黄土高原水土保持政策演变[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 103–107. [Wang F, Li R, Yang Q K, et al. Policy development of soil and water conservation in the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1): 103–107.]
- [14] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38–41.
- [15] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, et al. Check dam in the Loess Plateau of China: Engineering for environmental services and food security[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(24): 10298–10299.
- [16] Jin Z, Cui B L, Song Y, et al. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau?[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16): 8527–8528.
- [17] 胡春宏, 张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水力学报, 2018, 49(9): 1028–1039. [Hu C H, Zhang X M. Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predications in the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 49(9): 1028–1039.]
- [18] 冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 93–100. [Ran D C. Water and sediment variation and ecological protection measures in the middle reach of the Yellow River[J]. Resources Science, 2006, 28(1): 93–100.]
- [19] Li E H, Mu X M, Zhao G J, et al. Effects of check dams on runoff and sediment load in a semi-arid river basin of the Yellow River [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017, 31(7): 1791–1803.
- [20] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2017, 148(2): 126–137.
- [21] Chen D, Wei W, Chen L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 173: 109–121.
- [22] Wei W, Chen D, Wang L X, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 388–403.
- [23] 刘世梁, 王聪, 张希来, 等. 土地整理中不同梯田空间配置的水土保持效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 59–62. [Liu S L, Wang C, Zhang X L, et al. Soil and water conservation effect of different terrace configuration in land consolidation project[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 59–62.]
- [24] 刘晓燕, 王富贵, 杨胜天, 等. 黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 793–800. [Liu X Y, Wang F G, Yang S T, et al. Sediment reduction effect of level terrace in the hilly-gully region in the Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 793–800.]
- [25] Wang Y F, Chen L D, Gao Y, et al. Carbon sequestration function of check-dams: A case study of the Loess Plateau in China[J]. AM-BIO, 2014, 43(7): 926–931.
- [26] 冯棋, 汪亚峰, 杨磊, 等. 土壤侵蚀对陆地碳源汇的作用机制研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1505–1512. [Feng Q, Wang Y F, Yang L, et al. Research progress on mechanisms of soil erosion on terrestrial carbon source and sink[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(6): 1505–1512.]
- [27] 李勇, 白玲玉. 黄土高原淤地坝对陆地碳贮存的贡献[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 1–4. [Li Y, Bai L Y. Variations of sediment and organic carbon storage by check-dams of Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 1–4.]
- [28] Lv Y H, Sun R H, Fu B J, et al. Carbon retention by check dams: Regional scale estimation[J]. Ecological Engineering, 2012, 44: 139–146.
- [29] 陈蝶, 卫伟, 陈利顶, 等. 梯田生态系统服务与管理研究进展[J]. 山地学报, 2016, 34(3): 374–384. [Chen D, Wei W, Chen L D, et al. Progress of the ecosystem services and management of terraces [J]. Mountain Research, 2016, 34(3): 374–384.]
- [30] Liu X H, He B L, Li Z X, et al. Influence of land terracing on agricultural and ecological environment in the Loess Plateau regions of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(4): 797–807.
- [31] Xu Y, Yang B, Tang Q, et al. Analysis of comprehensive benefits of transforming slope farmland to terraces on the Loess Plateau: A case study of the Yangou Watershed in Northern Shaanxi Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(3): 448–457.
- [32] Lv Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. Plos One, 2012, 7(2): e31782.
- [33] Wang S, Fu B J, Chen H B, et al. Regional development boundary of China's Loess Plateau: Water limit and land shortage[J]. Land

- Use Policy, 2018, 74: 130–136.
- [34] 余新晓, 吴岚, 饶良懿, 等. 水土保持生态服务功能评价方法[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 110–113. [Yu X X, Wu L, Rao L Y, et al. Assessment methods of ecological functions of soil and water conservation measures[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(2): 110–113.]
- [35] Wei W, Chen L D, Yang L, et al. Microtopography recreation benefits ecosystem restoration[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(20): 10875–10876.
- [36] 张北赢, 徐学选, 刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水保措施条件下土壤水分状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 54–58. [Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z. Soil water condition under different measures of soil and water conservation in loess hilly and gully region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 54–58.]
- [37] Zhang S, Carmi G, Berliner P. Efficiency of rainwater harvesting of microcatchments and the role of their design[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 95: 22–29.
- [38] 王晶, 朱清科, 赵芸, 等. 陕北黄土区阳坡微地形土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 16–21. [Wang J, Zhu Q K, Zhao Y, et al. Soil moisture characteristics of micro-topography in south slope of loess region in northern Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(4): 16–21.]
- [39] 穆兴民, 陈霖伟. 黄土高原水土保持措施对土壤水分的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 39–44. [Mu X M, Chen J W. Effects of measures of soil and water conservation on soil water content in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 5(4): 39–44.]
- [40] Wei W, Feng X R, Yang L, et al. The effects of terracing and vegetation on soil moisture retention in a dry hilly catchment in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 1323–1332.
- [41] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 475: 111–122.
- [42] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on the Loess Plateau: Challenges and prospects[J]. AMBIO, 1999, 28(8): 663–668.
- [43] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 59–63. [Jiao J Y, Wang W Z, Li J. Analysis on soil and water conservation benefit of level terrace under different rainfall condition in loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 5(3): 59–63.]
- [44] Wei W, Chen L D, Fu B J. Effects of rainfall change on water erosion processes in terrestrial ecosystems: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2009, 33(3): 307–318.
- [45] Lv Y H, Zhang L W, Feng X M, et al. Recent ecological transitions in China: Greening, browning, and influential factors[J]. Scientific Reports, 2015, DOI: 10.1038/srep08732.
- [46] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328 (3–4): 548–558.
- [47] Gao G Y, Fu B J, Zhang J J, et al. Multiscale temporal variability of flow–sediment relationships during the 1950s–2014 in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 609–619.
- [48] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China’s Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019–1022.
- [49] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统[J]. 生态学报, 1984, 4(1): 1–9. [Ma S J, Wang R S. The social-economic-natural complex ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 1984, 4(1): 1–9.]
- [50] Chen L D, Wei W, Fu B J, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective[J]. Progress in Physical Geography, 2007, 31(4): 389–403.
- [51] 许炯心. 黄土高原水土保持有效性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 105–109. [Xu J X. Effectiveness of water and soil conservation on Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 105–109.]



# Ecosystem services of soil and water conservation measures on the Loess Plateau

YANG Lei<sup>1,2</sup>, FENG Qingyu<sup>1</sup>, CHEN Liding<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Serious soil losses on the Loess Plateau are the main source of sediments in the Yellow River. Large-scale implementation of soil and water conservation measures since the 1950s is one of the key actions for decreasing soil and water losses in this region. Soil and water conservation measures can modify hydrological processes and soil loss processes on hillslopes or in channels by changing hydrological pathway, runoff velocity, and sediment transportation, and then change the spatial and temporal distribution of water and soil resources at corresponding scales. Different types of soil and water conservation measures played substantial roles in sediment trapping, hydrological adjustment, and regional food security maintenance on the Loess Plateau during the past decades. Soil and water conservation measures have a substantial contribution in reducing the sediment loads of the Yellow River, and are important for maintaining ecological security in the Yellow River Basin. This study aimed at (1) systematically summarizing the types and development of soil and water conservation measures on the Loess Plateau for the past seven decades; (2) revealing the effects of soil and water conservation measures on hydrological and soil processes and related critical ecosystem services and underlying mechanisms at multiple spatial scales; and (3) presenting the problems, challenges, and future prospects of soil and water conservation measures on the Loess Plateau. It is suggested that implementation of soil and water conservation measures on the Loess Plateau in the future needs to focus on their maintenance and improvement toward integrated benefits, strengthen their resilience to extreme climate events and natural hazard-induced disasters, and balance tradeoffs among social-economic-ecological benefits. Improvement in the effectiveness of soil and water conservation measures can help maintaining ecological security and enhancing regional ecosystem functions of the Loess Plateau.

**Key words:** soil and water conservation; ecosystem services; hydrological process; soil process; social-economic-natural complex system; Loess Plateau