

DOI: 10.5846/stxb201909121903

宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展. 生态学报, 2020, 40(1): 2-9.

Ning Z, Gao G Y, Fu B J. Changes in streamflow and sediment load in the catchments of the Loess Plateau, China: a review. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 2-9.

黄土高原流域水沙变化研究进展

宁 珍^{1,2}, 高光耀^{1,2,*}, 傅伯杰^{1,2}

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: 人类活动和气候变化是影响流域水文过程的两大驱动因素, 径流输沙是流域水文过程的总体反映, 变化环境下径流输沙的变化规律与成因分析是水文学和全球变化研究的热点问题。黄土高原是我国水土流失最严重的地区。20 世纪 50 年代以来, 黄土高原地区开展了大规模的生态环境建设和水土流失综合治理, 显著改变了流域土地利用和植被覆盖。下垫面条件改变与气候变化综合作用, 使得流域水沙情势发生剧变。围绕黄土高原流域水沙变化的时空尺度特征与驱动机制, 总结了径流输沙和水沙关系变化特征的研究结果, 归纳了径流输沙变化的归因分析方法与人类活动和气候变化影响的贡献分割结果, 探讨了气候变化、植被恢复、水土保持工程措施以及流域景观格局对水沙变化的影响机制。未来应加强流域水沙演变的时空尺度特征特别是水沙关系非线性特征的定量研究, 阐明极端事件对水沙动态的影响与贡献; 开展水沙变化影响机制的多要素综合解析, 发展耦合地表覆被动态特征和气候变化的降雨-径流-输沙模型, 揭示生态恢复与水沙演变过程互馈机制; 开展未来气候变化、社会经济发展和生态建设工程情景下水沙动态的趋势预测, 为黄土高原生态综合治理和水资源管理与黄河水沙调控提供策略建议。

关键词: 径流输沙; 时空变异; 人类活动; 气候变化; 驱动机制

Changes in streamflow and sediment load in the catchments of the Loess Plateau, China: a review

NING Zheng^{1,2}, GAO Guangyao^{1,2,*}, FU Bojie^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Human activities and climate change are two critical driving forces of catchment hydrological processes, for which, streamflow and sediment load are the two main indicators. Changing trends and attribution analysis of streamflow and sediment load under changing environments are now the focus of hydrological and global change studies. The Loess Plateau (LP) of China is well known for its severe soil erosion and the heavy sediment load of the Yellow River that flows through it. To control soil erosion in the LP, large ecological restoration construction projects and several soil and water conservation measures have been implemented since the 1950s, which have resulted in extensive land use and vegetation cover changes. These extensive changes in land surface conditions in combination with climate change have dramatically altered the hydrological regime, including streamflow, sediment load, and flow-sediment relationships in the LP. The spatio-temporal variability of streamflow and sediment load, and the dominant mechanisms behind these changes are important issues in the development of strategies for sustainable land and water management in the LP. We reviewed previous studies that documented changes in streamflow, sediment load, and flow-sediment relationships to improve our understanding of these

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41822103, 41471094); 中国科学院青年促进会项目 (2016040)

收稿日期: 2019-09-12; **修订日期:** 2019-12-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gygao@rcees.ac.cn

processes. The methods used to separate the impacts of human activities and climate change on streamflow and sediment load and the results obtained in these studies are summarized here. The influence of climate change, vegetation restoration, soil and water conservation measures, as well as catchment landscape patterns on driving changes in streamflow and sediment load are also discussed. Finally, the following further studies are proposed: 1) Studying the spatio-temporal patterns in streamflow and sediment load evolution and quantifying the non-linear characteristics of flow-sediment relationships, 2) Demonstrating the effects and contributions of extreme events on streamflow and sediment load dynamics, 3) Conducting comprehensive analyses on the influence of multiple factors on streamflow and sediment load, 4) Developing a coupled rainfall-streamflow-sediment yield model that includes the dynamic characteristics of surface cover and climate change, with the aim of revealing feedback mechanisms between ecological restoration and the evolution of streamflow and sediment load, and 5) Predicting streamflow and sediment load dynamics under future scenarios of climate change, with the added effects of socio-economic development and ecological construction engineering; which is likely to provide suggestions for ecological treatment and water resource management in the LP, and regulation of water and sediment in the Yellow River.

Key Words: streamflow and sediment load; spatio-temporal variations; human activities; climate change; driving mechanisms

气候变化在全球范围内不同程度地改变了流域水文过程^[1],进而影响流域输沙量^[2]。20 世纪以来,为改善日益恶化的生态环境,世界各国开展了广泛的生态恢复工程^[3]。人类活动驱动下的地表过程变化深刻影响了生态系统的结构和功能与空间分布,引起流域水沙过程变化^[2]。气候-下垫面-产流输沙构成了流域的水文系统,流域产流输沙对气候和下垫面有着复杂的响应关系,具有非线性和不确定性特征^[4-5]。过去几十年,世界上大部分河流的径流和输沙量均发生显著变化,不同区域、不同河流在不同阶段的水沙变化程度具有明显差异性,而人类活动和气候变化对水沙变化的驱动作用也体现出较强的时空变异特征^[1,6-7]。流域水沙变化已成为全球变化研究的重要组成部分,对其变化过程和驱动机制的认识有助于流域生态环境管理,对可持续发展决策也至关重要。

黄土高原是我国土壤侵蚀最严重的地区,大量泥沙带入黄河中游河段,使黄河成为世界上含沙量最多的河流,多年平均输沙量达 16 亿吨,其泥沙量占世界河流泥沙总量的 6%^[8]。自 20 世纪 50 年代,尤其是 70 年代以来,黄土高原地区开展了大规模的生态环境建设和水土流失综合治理,如大面积人工造林种草、修建淤地坝和梯田以及小流域综合整治等^[9-10]。1999 年之后又推行了退耕还林(草)工程政策,土地利用和地表覆盖条件发生强烈演变^[11-12]。同时,在全球气候变暖的背景下,自 20 世纪 50 年代以来,黄土高原地区的降水减少,气温升高,气候暖干化的趋势明显^[13-14]。植被措施使得坡面的产流产沙能力明显降低,且植被生长会增加流域蒸散发,消耗一定的水资源,而工程措施将大量泥沙拦截在小流域内,气候暖干化也会使得径流出现一定程度的降低。因此,剧烈的人类活动和明显的气候变化对黄土高原地区流域水循环和侵蚀产沙产生了深刻的影响,土壤侵蚀明显减弱,河流输沙显著降低。监测资料显示,黄河径流量与输沙量过去 60 年急剧降低,减少约 70%,潼关站的输沙量由 20 世纪 70 年代每年 16 亿吨剧减为 2000 年以来的平均值 3 亿吨左右^[15-16]。此外,黄土高原降雨集中且多暴雨,而且地形地貌和景观格局具有明显的空间异质性,使得区域产流产沙特征时空分异显著。因此,深入解析黄土高原流域水沙变化的时空尺度与驱动机制对黄土高原水土流失治理和生态环境建设以及黄河水沙调控具有重要意义。围绕这一问题,本文从流域径流输沙和水沙关系变化特征、流域水沙变化归因分析和流域水沙变化驱动机制等三个方面对黄土高原流域水沙变化的相关研究进行综述和探讨,并归纳需要进一步研究的问题。

1 流域径流输沙和水沙关系变化特征

黄土高原剧烈的土地覆被变化和明显的气候变化综合作用显著改变了水文过程,使得黄土高原主要流域

近 60 年来径流输沙均表现出显著的下降趋势,且呈现出一定的空间分异特征。Zhang 等和 Rustomji 等的研究表明,1950—2000 年期间河口龙门区间 11 个主要流域的年径流量和输沙量均显著降低,下降幅度分别为 $0.13\text{—}1.58\text{ mm/a}$ 和 $0.03\text{—}0.42\times 10^3\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$,年径流输沙突变的拐点在 1971—1985 年之间,且 7 个流域的年平均含沙量呈显著下降趋势^[17-18]。1957—2012 年期间,黄土高原 58 个主要子流域中有 44 个子流域的年径流量呈显著下降趋势($-0.1\text{—}2.6\text{ mm/a}$),52 个子流域的年输沙量显著降低($-2.86\text{—}636\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$),径流输沙下降最显著区域主要位于黄土高原北部,变化不显著区域主要位于渭河下游,径流输沙下降表现出阶段性特征(1957—1979、1980—1999 和 2000—2012),且 2000—2012 下降最剧烈^[19]。Zheng 等利用 122 个水文站的数据分析表明,黄土高原 2008—2016 多年平均径流和输沙量相比 1971—1987 年分别减少 22% 和 74%^[20]。

上述研究主要集中在分析径流和输沙量在年尺度上的变化特征,径流输沙变化在不同时间尺度上的变异特征逐渐引起重视。Gao 等研究表明,1961—2011 年期间河口龙门区间近一半多流域径流量的年际变异系数出现增加趋势,而几乎所有流域输沙量、产沙系数和含沙量的年际变异系数增加^[21]。以上结果说明,径流输沙的总量在显著降低,但其年际间的变异性在逐渐增强。另外,黄土高原的径流输沙主要集中在汛期,而且极端暴雨事件发挥着重要作用,7—8 月径流输沙对年值的贡献可分别达 50% 和 80%,最大单日径流和输沙量约占年值的 10% 和 30%^[22]。Rustomji 等的研究也表明,最大 5 日径流天数可输送全年输沙量的 50%—99%^[18]。因此,黄土高原流域径流输沙的年际变异性增强,不同时间尺度间的水沙变化表现出较强的关联特征,且极端事件对黄土高原水沙变化具有关键作用。

黄土高原的水文情势在过去几十年也出现明显变化,相关研究分析了除径流和输沙量外其他水文情势变量的变化趋势。黄土高原大部分流域的年径流系数、含沙量和产沙系数在过去 60 年均表现出显著下降趋势^[23-24]。Mu 等通过对比前后时段(1957—1978,1979—2003)河龙区间佳芦河、秃尾河、湫水河和延河等流域的径流频率曲线,发现径流在高频期(非汛期)减少约 20%—45%,在低频期(汛期)减少更多,超过 50%^[25]。黄土高原主要流域的基流均显著降低,但基流比在大部分流域表现出上升趋势,且在一些流域上升趋势显著,这主要是由于水土保持和植被恢复措施对径流的调蓄功能,使得基流比增加,而地表径流的比例降低^[26]。Gao 等利用日径流资料估算黄土高原流域的地下储水量,发现 1955—2010 年期间,北部区域的大部分流域地下水储水量呈显著下降趋势(-0.0299 mm/a),南部区域的流域呈上升趋势(-0.00467 mm/a),另有 8 个流域的地下水储水量没有显著变化^[27]。因此,黄土高原的水沙情势变化表现出较强的复杂性,除径流和输沙量外,需要考虑更多的水文要素,全面刻画流域的水沙变化特征。

黄土高原的流域水沙关系也是流域水沙变化研究的热点话题。许炯心从高含沙水流、廖建华等从含沙量变化等角度研究水沙行为特征,认为水土保持措施及植被改善降低了年均含沙量,减少了高含沙水流发生频率^[28-29]。Rustomji 等的研究表明 1950—2000 期间黄土高原典型流域低径流条件下的水沙关系曲线变化较小,而水土保持工程措施使得高径流条件下的含沙量出现较大程度的降低^[18]。Gao 等对比了 1950—1999 和 2000 年以后黄土高原 7 个典型流域径流输沙动态关系的变化,认为水土保持措施和退耕还林还草工程显著降低了径流的产沙能力,削弱了大部分流域的水沙关系^[30]。Zheng 等研究了 1950—1995 期间不同空间(小区、小流域和流域)和时间(次降雨事件和年)尺度的水沙关系,发现次降雨事件的径流-输沙关系可用比例函数表达,而年径流-输沙之间为线性关系^[31]。Zhang 等的研究表明,生态恢复改变了不同时间尺度上的水沙关系,使得各径流条件下的含沙量均大幅降低^[32]。Gao 等系统研究黄土高原主要流域 1950—2014 的水沙关系变化,结果表明 2000 年之前年和月径流-输沙均表现出较好的线性关系,幂函数水沙曲线可以较好描述日尺度上的水沙关系,但 2000 年之后,径流-输沙之间的相关性明显减弱,难以用确定的函数关系式表征^[33]。因此,黄土高原流域水沙关系在不同阶段(基准期、水土保持综合治理期、退耕还林还草实施期)和不同时间尺度(年、月、日)均表现出明显的尺度依赖性,而水沙关系的变异性主要受植被恢复措施影响。

2 流域水沙变化归因分析

流域水沙变化的影响因素主要归为两大类:人类活动和气候变化。人类活动的影响主要体现在通过工程措施和生产生活取水等直接作用和改变流域下垫面条件进而间接影响流域产流产沙等两个方面。气候变化影响流域水文循环系统,以降水和气温为主要表征形式的气候变化对径流的形成、地域分布及其携沙能力起着重要作用。径流变化归因分析方法比较成熟,国内外学者主要采用数据统计分析、气候弹性和水文模拟等方法定量区分气候变化和人类活动对流域径流变化的影响^[34-36]。对于输沙,由于其过程复杂且受多种因素影响,以往一般采用经验统计或分布式水文模型的方法进行归因分析。数据统计分析通过在人类活动影响较少的基准期建立降雨等气候变量与径流输沙的统计关系式,预测人类活动影响期的径流输沙量并与实测值对比进行水沙变化的归因分析。气候弹性系数方法基于水量平衡方程和 Budyko 假设,通过径流的降水和潜在蒸散发弹性系数,确定出降水和蒸散发变化导致的径流变化量,根据水量平衡方程确定气候变化对径流的影响。流域水文模拟法以水文模型为工具还原天然径流和输沙量,通过对比分析人类活动影响期的实测径流输沙量与还原的天然径流输沙量差值来分离人类活动影响期间各因素对流域水沙的影响程度,成为目前量化人类活动与气候变化贡献的重要研究方法。黄土高原流域水沙变化归因目前开展了大量研究,很多研究都综合采用多种方法进行贡献分割,并进行相互比较和验证。

对于径流变化的原因,以往研究普遍认为在 2000 年之前,水土保持措施引起的流域地表覆盖变化对径流减少的贡献略大于气候变化的影响,而人类活动是 2000 年之后径流显著降低的主要原因,且人类活动和气候变化的贡献率存在较大的空间异质性,北部区域流域人类活动贡献率大于南部区域。Zhao 等采用 Budyko 模型和线性回归方法分析了黄土高原 18 个主要流域 1950—2010 期间年径流变化的主要原因,结果表明气候变化是北洛河和延河流域径流降低的主要原因,而其它流域径流降低主要是由人类活动引起的,水土保持工程、水利工程建设和农业灌溉是径流显著降低的主要因素^[37]。Liang 等采用基于 Budyko 框架的弹性系数和拆解分析方法分割了气候变化和生态恢复对黄土高原 14 个主要流域 1961—2009 期间年径流量变化的贡献,结果表明生态恢复措施是径流量减少的主要原因,气候变化影响较小,贡献率分别为 68% 和 32%,而且生态恢复对黄土高原北部区域径流变化的影响较南部大,南部区域径流变化对气候变化的响应更为敏感^[38]。Gao 等基于弹性系数方法分析了黄土高原 14 个主要流域年径流变化的原因,认为地表覆盖变化是黄土高原径流减少的主要原因,降雨对径流减少的作用大于潜在蒸散发,在具体流域,土地覆被和气候变化所起的作用不尽相同,地表覆盖在 10 个流域起主导作用,气候变化在 3 个流域为主要因素,在 1 个流域两者影响基本相同^[23]。Wu 等采用 8 种不同形式的 Budyko 模型,开展了黄土高原 17 个主要流域 1961—2013 期间汛期和非汛期径流变化的归因分析,结果发现汛期和非汛期径流变化对降雨的敏感性要高于潜在蒸散发,8 种 Budyko 模型计算的汛期径流变化贡献率比较一致,但非汛期径流的归因分析结果存在较大变异,人类活动是汛期径流减少的主要原因(贡献率约为 73%),但气候变化对非汛期径流减少的作用要大于人类活动^[39]。Wu 等系统分析了经验统计、弹性系数和水文模型等方法进行径流变化归因分析的优缺点,并以黄土高原的延河流域为案例,比较了 3 种方法得到的贡献分割结果,发现气候变化的贡献率为 46.1%—60.8% (平均值为 54.1%),人类活动的贡献率为 39.1%—53.9% (平均值为 45.9%),弹性系数和水文模型计算的结果比较一致,而经验统计方法存在较大的不确定性^[40]。从上述研究可以看出,不同方法得到的气候变化和人类活动对径流变化的贡献量结果基本一致,通过分布式水文模型可以深入揭示气候变化、植被恢复等下垫面条件改变对流域水文过程的影响机制与时空分异特征。

对于输沙变化的原因,普遍认为人类活动的贡献率要明显大于气候变化,2000 年之前水土保持工程措施(特别是淤地坝)是输沙减少的主要因素,而植被恢复措施逐渐成为 2000 年之后输沙降低的主要因子^[41]。Feng 等利用 WATEM/SEDEM 模型研究了黄土高原小流域输沙对土地利用变化的响应机制,认为退耕还林政策实施导致的农地面积减少是流域输沙量降低的主要原因^[42]。Gao 等基于降雨-输沙统计模型分析了黄土高

原 15 个主要流域 1961—2011 期间输沙减少原因,结果表明,地表覆被对输沙减少的贡献率大于 70%,降雨的贡献率小于 30%,特别是 2000 年以来,在植被恢复和水土保持工程措施综合作用下,地表覆盖贡献率接近 90%,土地覆被变化对水沙锐减的驱动在时间上存在“加剧性特征”^[21]。Yang 等基于统计分析方法的结果表明,植被恢复和梯田对黄土高原主要流域输沙减少的贡献为 66.3%,气候变化的作用为 9.1%^[43]。Wang 等发展了基于泥沙恒等式的归因诊断分析方法,率定了各因素对黄土高原过去 60 年输沙减少的贡献量,发现 58% 的输沙量减少是由产流能力降低引起的,其次是产沙能力(30%)和降水(12%)的贡献,坝库、梯田等工程措施是 1970 年代至 1990 年代黄土高原产沙减少的主要原因,占 54%,2000 年以来,随着退耕还林还草工程的实施,植被措施成为土壤保持的主要贡献者,占 57%^[16]。Zhao 等采用 6 种不同的方法(线性回归、双累积曲线、泥沙恒等式因子分析、淤地坝沉积物方法、Sediment Delivery Distributed (SEDD) 模型和 Soil Water Assessment Tool (SWAT) 模型)分割了人类活动和气候变化对黄土高原皇甫川流域过去 60 年输沙减少的贡献率,结果表明人类活动的贡献率为 $93.6\% \pm 4.1\%$,气候变化的贡献率为 $6.4\% \pm 4.1\%$,除线性回归外其余五种方法的计算结果基本一致^[44]。Zhang 等发展了基于弹性系数理论的流域输沙变化归因分析方法,分割了降雨、潜在蒸散发和地表覆被特征对径流输沙变化的贡献量,从水土保持工程综合治理期(1980—1999)到退耕还林还草实施期(2000—2014),生态恢复对径流减少的贡献量从 55% 增加到 75%,对输沙减少的贡献量从 63% 增加到 81%,植被恢复措施逐渐成为水沙减少的主导因子^[45-46]。以往研究均一致表明人类活动是输沙减少的主要原因,但植被恢复、梯田淤地坝等水土保持工程措施以及水库建设等各因子对输沙变化的具体影响目前仍难以准确量化。

3 流域水沙变化驱动机制

黄土高原过去 60 年总的气候变化趋势是降雨在绝大部分流域降低,潜在蒸散发降低和增加的流域各占一半左右,但非汛期的潜在蒸散发在绝大部分流域均显著增加,这使得气候变化对非汛期径流降低的作用明显^[39]。降雨与径流输沙关系呈现出明显的时空格局特征。在基准期(1970 年之前),降雨与径流输沙的回归关系显著,而且西北部流域降雨与径流输沙关系的显著性大于东南部流域,但 2000 年之后,降雨-径流输沙关系显著减弱,且空间格局特征发生较大变化^[21]。尽管气候变化不是黄土高原径流输沙变化的主要原因,但降雨格局特别是暴雨事件分布对黄土高原流域径流输沙具有重要影响,而且水土保持工程和植被恢复措施使得流域产流产沙的降雨阈值明显增加,进一步增强了极端降雨的重要性^[21]。张建军采用偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)识别了影响径流输沙的极端气象因子,结果显示驱动产流的主导气象因子分别为年总降水量、有效降水总量、年最大次降水量、大雨降水量(日降水量 >25 mm)、大雨天数和年连续降水天数,驱动产沙的主导因子为年最大次降水量、大雨降水量(日降水量 >25 mm)、侵蚀性降水量、年总降水量和年连续降水天数^[47]。除极端气候事件外,气候变化引起的干旱过程也是黄土高原流域水沙变化的重要原因^[48-49]。

人类活动主要通过改变流域下垫面条件进而对水文过程产生显著影响,以往研究主要分析了水土保持工程措施和植被恢复对流域水沙变化的影响机制。Xin 等的研究表明,退耕还林(草)工程实施前植被覆盖与产沙量呈负相关关系,工程实施后植被归一化指数上升,流域产沙量下降,退耕还林(草)对流域产沙减少具有重要的作用^[50]。张晓明等研究表明森林植被的增加与坡改梯措施能显著减少流域丰水、平水及枯水期的径流量,土地利用/覆被变化对流域径流的影响具有季节性,且森林植被增加对径流的减少作用比坡改梯措施明显^[51]。Liang 等发现流域地表特征参数随生态建设治理面积比例呈线性增加,流域特征参数变大意味着下垫面条件改变导致流域产流能力的下降,而且 60—80 年代坡面措施与下垫面参数的关系并不密切,但是随着时间的推移尤其在 90 年代以后坡面措施对流域特征变化的驱动作用逐步加强^[38]。Wang 等的研究表明,坡面和沟道的生物和工程等多种措施共同作用把黄河输沙量控制到了人类活动影响之前的程度^[16]。Gao 等定量分析了地表覆盖变化对水沙影响的时空格局特征,发现土地覆被变化对水沙锐减的驱动在空间上存在明显的

南北分异特征,年代平均径流系数、产沙系数和含沙量均与流域地表覆盖变化的面积比例存在显著的线性关系^[21,23]。Shao 等通过模型模拟发现,2000 年以来黄土高原蒸散发增加速率为 4.39 mm/a,植被耗水量增加速率为 4.9 mm/a,植被恢复是径流减少的关键因子^[52]。张建军通过分析输沙变化的弹性系数发现,黄土高原泥沙减少是径流减少和含沙量降低共同作用的结果,植被恢复主要通过改变径流来减少输沙,而淤地坝等工程措施主要改变水沙关系来减少输沙,同时土地覆被对水沙减少的贡献率随生态恢复措施的面积渐进增加,但减水减沙贡献在一定面积比例时(约 50%)会存在阈值^[46]。上述研究表明,影响黄土高原流域水沙变化的主要下垫面因子逐渐从工程措施过渡到植被措施,生态恢复在关注面积的同时,要考虑生态恢复的空间布局和优化配置,合理配置工程和植被恢复措施,实现减沙不减水的生态水文效益最大化目标。

流域下垫面条件改变引起的景观格局变化对流域水沙具有重要影响。刘晓君等的研究表明,景观指数与径流量、泥沙量呈显著线性相关,其中景观多样性相关的指数如香农多样性指数(Shannon Diversity Index)和辛普森多样性指数(Simpson Diversity Index)均与径流呈极显著正相关,而泥沙仅与蔓延度指数(Contagion Index)、斑块结合度(Patch Cohesion Index)呈显著负相关^[53]。Tian 等发现连接性指数(Index of Connectivity)和水库指数(Reservoir Index)均与流域径流变化程度存在较好的相关性,而且土地利用变化对径流的影响程度要强于坝库建设^[54]。Zhou 和 Li 基于土壤侵蚀的“源-汇”理论,发展了坡度-水文响应单元景观指数(Slope-HRUs landscape index)来定量指征流域径流输沙变化,并在延河流域得到较好应用^[55]。

4 研究展望

人类活动引起的下垫面条件改变(如土地利用变化、水土保持工程、植被恢复措施)是黄土高原流域水沙变化的关键因素,而人类活动很大程度上是受政策驱动。具体来说,从 1949—2010 年,黄土高原共出台与泥沙管理相关的主要政策 19 个,如大跃进、农业学大寨、小流域综合治理和退耕还林等^[56]。相关政策的出台,使得土地利用和下垫面发生剧烈变化,黄土高原流域水沙相应的经历了急剧增加,又明显降低的发展阶段^[57-58]。因此,黄土高原输沙减少是长期政策调整发展的结果,同时也受社会经济发展状况等多种因素的影响^[56]。根据黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030 年),黄土高原未来还将继续实施大规模的生态建设工程。同时,以全球变暖为突出标志的气候变化,特别是极端天气事件的增加,进一步加速了流域水文过程的时空演变进程。

基于上述背景,黄土高原流域水沙变化应加强机理机制、模型方法和趋势预测等方面的研究,重点关注以下方向:(1)流域水沙特征和极值事件的时空演变规律。加强对流域水沙演变的时空尺度特征特别是水沙关系非线性特征的定量研究,全面揭示水沙情势变化特征与机制。量化极值事件在水沙变化中的重要作用,阐明极端气候事件对水沙动态的影响机制。(2)水沙变化影响机制的多要素综合解析。加强植被恢复、工程措施和地形土壤等具体因子和气候变化以及人类活动直接驱动(社会经济发展、生态建设政策)对水沙变化影响的定量贡献和时空格局研究,发展耦合地表覆被动态特征和气候变化的降雨-径流-输沙模型,揭示生态恢复与水沙演变过程互馈机制。(3)未来水沙动态的情景模拟与趋势预测。随着黄土高原坝库等工程措施拦沙能力的逐渐下降,在黄土高原维持一个可持续的植被生态系统对有效保持土壤和控制黄河输沙量反弹具有更加重要的作用。因此,亟需开展未来气候变化、社会经济发展和生态建设工程情景下水沙动态的趋势预测,为新时期黄土高原生态综合治理和水资源管理与黄河水沙管理提供策略建议。

参考文献(References):

- [1] Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 2005, 438(7066): 347-350.
- [2] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, Green P. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [3] Kauppi P E, Ausubel J H, Fang J Y, Mather A S, Sedjo R A, Waggoner P E. Returning forests analyzed with the forest identity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(46): 17574-17579.

- [4] Sivapalan M, Kumar P, Harris D. Nonlinear propagation of multi-scale dynamics through hydrologic subsystems. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(9/10): 935-940.
- [5] Verduyck K, Grabowski R C, Rickson R J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews*, 2017, 166: 38-52.
- [6] Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, Xu K H, Smith L C. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000. *Global and Planetary Change*, 2008, 62(3/4): 187-194.
- [7] Cohen S, Kettner A J, Syvitski J P M. Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity. *Global and Planetary Change*, 2014, 115: 44-58.
- [8] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, Liu J P, Sun X X, Wang Y. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3/4): 331-354.
- [9] 姚文艺, 徐建华, 冉大川. 黄河流域水沙变化情势分析与评价. 郑州: 黄河水利出版社, 2011.
- [10] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [11] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.
- [12] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [13] Zhang B Q, He C S, Burnham M, Zhang L H. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China. *Science of the Total Environment*, 2016, 539: 436-449.
- [14] Miao C Y, Sun Q H, Duan Q Y, Wang Y F. Joint analysis of changes in temperature and precipitation on the Loess Plateau during the period 1961-2011. *Climate Dynamics*, 2016, 47(9/10): 3221-3234.
- [15] 冉大川, 左仲国, 吴永红, 李雪梅, 李智慧. 黄河中游近期水沙变化对人类活动的响应. 北京: 科学出版社, 2012.
- [16] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [17] Zhang X P, Zhang L, Zhao J, Rustomji P, Hairsine P. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China. *Water Resources Research*, 2008, 44(7): W00A07, doi: 10.1029/2007WR006711.
- [18] Rustomji P, Zhang X P, Hairsine P B, Zhang L, Zhao J. River sediment load and concentration responses to changes in hydrology and catchment management in the Loess Plateau region of China. *Water Resources Research*, 2008, 44(7): W00A04, doi: 10.1029/2007WR006656.
- [19] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, An Z F, Klik A, Wang F, Jiao F, Yue X L, Gao P, Sun W Y. Evidence and causes of spatiotemporal changes in runoff and sediment yield on the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 579-590.
- [20] Zheng H Y, Miao C Y, Wu J W, Lei X H, Liao W H, Li H. Temporal and spatial variations in water discharge and sediment load on the Loess Plateau, China: a high-density study. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 875-886.
- [21] Gao G Y, Zhang J J, Liu Y, Ning Z, Fu B J, Sivapalan M. Spatio-temporal patterns of the effects of precipitation variability and land use/cover changes on long-term changes in sediment yield in the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(9): 4363-4378.
- [22] Gao G Y, Ma Y, Fu B J. Multi-temporal scale changes of streamflow and sediment load in a loess hilly watershed of China. *Hydrological Processes*, 2016, 30(3): 365-382.
- [23] Gao G Y, Fu B J, Wang S, Liang W, Jiang X H. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558: 331-342.
- [24] Gao Z L, Zhang L, Zhang X P, Cheng L, Potter N, Cowan T, Cai W J. Long-term streamflow trends in the middle reaches of the Yellow River Basin: detecting drivers of change. *Hydrological Processes*, 2016, 30(9): 1315-1329.
- [25] Mu X M, Zhang L, McVicar T R, Chille B, Gao P. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2007, 21(16): 2124-2134.
- [26] Wu J W, Miao C Y, Duan Q Y, Lei X H, Li X Y, Li H. Dynamics and attributions of baseflow in the semiarid Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(7): 3684-3701.
- [27] Gao Z L, Zhang L, Cheng L, Zhang X P, Cowan T, Cai W J, Brutsaert W. Groundwater storage trends in the Loess Plateau of China estimated from streamflow records. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 281-290.
- [28] 许炯心. 人类活动对黄河中游高含沙水流的影响. *地理科学*, 2002, 22(3): 294-299.
- [29] 廖建华, 许炯心, 杨永红. 黄土高原区高含沙水流发生频率空间分异及其影响因素. *水科学进展*, 2008, 19(2): 160-170.
- [30] Gao Z L, Fu Y L, Li Y H, Liu J X, Chen N, Zhang X P. Trends of streamflow, sediment load and their dynamic relation for the catchments in the middle reaches of the Yellow River over the past five decades. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3219-3231.
- [31] Zheng M G, Yang J S, Qi D L, Sun L Y, Cai Q G. Flow-sediment relationship as functions of spatial and temporal scales in hilly areas of the Chinese Loess Plateau. *CATENA*, 2012, 98: 29-40.
- [32] Zhang J J, Zhang X P, Li R, Chen L L, Lin P F. Did streamflow or suspended sediment concentration changes reduce sediment load in the middle reaches of the Yellow River? *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 357-369.
- [33] Gao G Y, Fu B J, Zhang J J, Ma Y, Sivapalan M. Multiscale temporal variability of flow-sediment relationships during the 1950s-2014 in the Loess

- Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 609-619.
- [34] Dey P, Mishra A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions. *Journal of Hydrology*, 2017, 548: 278-290.
- [35] Wang X X. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: an overview. *Advances in Water Resources*, 2014, 71: 209-218.
- [36] Zhang L, Cheng L, Chiew F, Fu B J. Understanding the impacts of climate and land use change on water yield. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 167-174.
- [37] Zhao G J, Tian P, Mu X M, Jiao J Y, Wang F, Gao P. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 387-398.
- [38] Liang W, Bai D, Wang F Y, Fu B J, Yan J P, Wang S, Yang Y T, Long D, Feng M Q. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [39] Wu J W, Miao C Y, Wang Y M, Duan Q Y, Zhang X M. Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 263-275.
- [40] Wu J W, Miao C Y, Zhang X M, Yang T T, Duan Q Y. Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 328-337.
- [41] 刘晓燕. 黄河近年水沙锐减成因. 北京: 科学出版社, 2016.
- [42] Feng X M, Wang Y F, Chen L D, Fu B J, Bai G S. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4): 239-248.
- [43] Yang X N, Sun W Y, Li P F, Mu X M, Gao P, Zhao G J. Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 591-600.
- [44] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, Gao P, Sun W Y, Li E H, Wei Y H, Huang J C. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 773-784.
- [45] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, Zhang L. Explanation of climate and human impacts on sediment discharge change in Darwinian hydrology: derivation of a differential equation. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 827-834.
- [46] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, Gupta H V. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the Loess Plateau, China. *Water Resources Research*, 2019, 55(11): 9604-9622.
- [47] 张建军. 黄河中游水沙变化影响机制与归因分析. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2018.
- [48] Zhang B Q, Zhao X N, Jin J M, Wu P T. Development and evaluation of a physically based multiscalar drought index: the Standardized Moisture Anomaly Index. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(22): 11575-11588.
- [49] Zhang B Q, He C S. A modified water demand estimation method for drought identification over arid and semiarid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 230-231: 58-66.
- [50] Xin Z B, Yu X X, Lu X X. Factors controlling sediment yield in China's Loess Plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(6): 816-826.
- [51] 张晓明, 曹文洪, 余新晓, 武思宏. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/覆被变化的径流调节效应. *水利学报*, 2009, 40(6): 641-650.
- [52] Shao R, Zhang B Q, Su T X, Long B, Cheng L Y, Xue Y Y, Yang W J. Estimating the increase in regional evaporative water consumption as a result of vegetation restoration over the Loess Plateau, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(22): 11783-11802.
- [53] 刘晓君, 李占斌, 李鹏, 张铁钢, 徐国策, 高海东. 基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究. *生态学报*, 2016, 36(18): 5691-5700.
- [54] Tian X J, Zhao G J, Mu X M, Zhang P F, Tian P, Gao P, Sun W Y. Hydrologic alteration and possible underlying causes in the Wuding River, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133556.
- [55] Zhou Z X, Li J. The correlation analysis on the landscape pattern index and hydrological processes in the Yanhe watershed, China. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 417-426.
- [56] Wang S, Fu B J, Liang W, Liu Y, Wang Y F. Driving forces of changes in the water and sediment relationship in the Yellow River. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 453-461.
- [57] 汪岗, 范昭. 黄河水沙变化研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [58] 穆兴民, 赵广举, 高鹏, 孙文艺. 黄土高原水沙变化新格局. 北京: 科学出版社, 2019.