
* 专 *
* 家 *
* 论 *
* 坛 *

黄河未来输沙量态势及其适用性对策

穆兴民^{1,2}, 赵广举^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 孙文义^{1,2}, 王双银³

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水利建筑与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探索黄河输沙预测的新思路, 预估黄河未来输沙态势与输沙量水平, 为黄河流域生态治理规划提供参考。[方法] 结合黄河流域水土保持生态修复现状, 采用单累积曲线法、滑动平均及频率分析方法, 分析 1950—2019 年黄河主要来沙区间的实测输沙量变化特征及其未来态势。[结果] 1950—2019 年黄河输沙量呈现阶梯式减少。1950—2019 年黄河中游各站累积实测输沙量随时间的变化可用“左半抛物线”表征。黄河输沙量自 1997 年以来已进入相对稳定态势, 目前已达企稳状态; 黄河潼关站未来年输沙量在 90% 频率下为 1.00×10^8 t 左右, 在 10% 频率下为 5.00×10^8 t 左右, 未来多年平均输沙量为 1.40×10^8 t。



[结论] 为了维持黄河输沙量低稳状态, 提升水土保持措施质量与标准, 补齐“后水土保持”短板, 构建完善的水沙关系调控体系, 维持黄河下游河道冲淤平衡, 是黄河流域生态保护与高质量发展的保障。

关键词: 黄河; 输沙量; 累积曲线; 频率预测; 滑动平均; 趋势预测; 水土保持; 黄土高原

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2020)05-0328-05

中图分类号: TV142, S157

文献参数: 穆兴民, 赵广举, 高鹏, 等. 黄河未来输沙量态势及其适用性对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 328-332. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.046; Mu Xingmin, Zhao Guangju, Gao Peng, et al. Future trend of sediment discharge in Yellow River and its adaptation strategies [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 328-332.

Future Trend of Sediment Discharge in Yellow River and Its Adaptation Strategies

Mu Xingmin^{1,2}, Zhao Guangju^{1,2}, Gao Peng^{1,2}, Sun Wenyi^{1,2}, Wang Shuangyin³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] New ideas in studying the variations of sediment discharge was explored to predict the future trend of sediment transportation level in the Yellow River, in order to provide a reference for the ecological management and hydraulic planning in this region. [Methods] Cumulative curve, moving average method and frequency analysis were used to analyze the variation characteristics and future trend of sediment discharge at the mainstream stations of the Yellow River from 1950 to 2019, based on the current status of soil and water conservation measures in the basin. [Results] The sediment discharge of the Yellow River decreased step by step from 1950 to 2019. From 1950 to 2019, the variation of cumulative measured sediment discharge at stations in the middle reaches of the Yellow River could be characterized by a “semi parabola”. According to the current status of ecological restoration and soil and water conservation in the Yellow River basin, sediment discharge of the Yellow River remained relative stable after 1997, and has reached a steady state in recent years. The annual sediment discharge at Tongguan station of the Yellow River over the next years was expected to be 1.00×10^8 tons at 90% frequency and 5.00×10^8 tons at 10% frequency, and the average annual sediment discharge was expected to be 1.40×10^8 tons. [Conclusion] In order to maintain a

收稿日期: 2020-08-13

修回日期: 2020-10-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土区植被恢复对土壤物理特性及其产流特征的驱动效应”(41671285); 国家重点研发计划项目“黄河流域水沙多时空演变及其分异规律”(2016YFC0402401)

第一作者: 穆兴民(1961—), 男(汉族), 陕西省华阴市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持、生态水文等方面的研究和教学工作。
Email: xmmu@ms.iswc.ac.cn.

lower and stable state of sediment discharge in the Yellow River, improving the quality and standard of soil and water conservation measures, strengthening the weakness of post soil and water conservation, and establishing a comprehensive runoff-sediment regulation system are crucial to balance the scouring and silting in the lower reaches of the Yellow River, which is the guarantee of ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin.

Keywords: the Yellow River; sediment discharge; cumulative curve; frequency prediction; moving average; trend prediction; soil and water conservation; the Loess Plateau

黄土高原的自然环境决定了黄河水沙变化是一个值得长期研究的课题。黄河水沙的增加、减少甚或不变都会引起社会各界的关注^[1]。黄河未来输沙量预测直接关系到黄河流域水沙关系调控与水利工程的合理配置,是制定流域高质量发展规划及工程决策的重要依据和科学基础。影响黄河输沙量的因素主要可分为气候、下垫面两大类^[2-3]。两大类因素中又可根据不同指标分为诸多不同的次一级因子。由于影响黄河输沙量的各因素之间及其因子间相互作用的复杂性,其作用机理尚不清晰,使得人们在进行黄河输沙量研究时较难构建准确的机理模型,未来逐年输沙量预测实属不易。因此,黄河输沙量预测是一个极具挑战性的科学难题,相较而言鲜有报道。古希腊哲学家亚里士多德曾说“求知是所有人天生的渴望”,德国天文学家约翰·开普勒也指出“测量就是为了求知”^[4]。

目前,应用较为广泛的输沙量情势预测方法主要包括时间序列回归方法、水文泥沙模型情景分析以及近年发展起来的机器学习方法^[5]。时间序列分析就是对时间序列数据进行处理、分析和挖掘,发现其存在的特征、规律和关系,并客观地预测或预报。预测是时间序列分析的最高形态。基于单变量或多变量的时间序列回归模型因其输入数据量少,计算简便,常被用于趋势变化的预测。近年来出现的机器学习方法亦成为时间序列预测的研究热点之一^[6]。耦合气候模式与下垫面要素变化驱动的水文泥沙模型是对未来水文情势变化研究的一个重要方法。上述方法中,无论是经验统计方法还是物理过程模型模拟,已有观测资料及其变化特征都是其未来趋势的预测和评估的基础。所有预测工作都应该基于已有事实开展。离开已有观测事实或现实条件的预测就可能失去实际意义。对大空间尺度而言,统计回归方法不一定是最好的,但它往往是最有效的方法。离散数据累积能增强数据变化的规律性^[7-8],即使在不清楚原始数据概率分布特征的情况下,对不服从任何分布的任意离散原始数据序列,按照一定规则进行累积后生成的新序列,其过程线都有可能变成较为光滑的曲线,进而可用某些简单的函数进行拟合。

潼关水文站位于黄河中游下端,集水区面积占黄河流域面积的 91%。潼关站以下地区,汇入干流的支流及其沙量甚少。分析黄河上游至下游各水文站输沙量沿程变化可知^[9],潼关及陕县水文站输沙量最大,即其基本反映了整个河流的输沙量。20 世纪 60 年代陕县站停测,因此现在一般用潼关水文站的输沙量代表整个黄河的输沙量。本文采用黄河来沙的主要区间河口镇至潼关间控制站 1950—2019 年的实测输沙量序列,借鉴数据累积理论、滑动平均及发生概率的思想^[9],分析黄河输沙量年际变化态势,进而预估黄河未来不同频率下的输沙量,为黄河流域生态保护与高质量发展规划提供参考依据。

1 黄河实测输沙量态势分析

年际过程线是表征气候水文要素年际变化过程最常用的方法。但因研究要素年际过程的随机离散性,有经验的研究者通过对过程线的分析,一般可以初步研判某要素的演变过程(如趋势、阶段、突变或周期等特征)。根据 1950—2019 年黄河潼关站年输沙量可绘制其变化过程曲线(如图 1 所示)。按照黄河输沙量变化的阶段特征划分^[2],潼关站近 70 a 来输沙量呈阶梯式减少,其中 1950—1979,1980—1999,2000—2019 年各时段年均输沙量分别为 1.47×10^9 , 7.90×10^8 , 2.40×10^8 t。较首次正式公布的 1919—1961 年黄河年均输沙量 1.60×10^9 ^[9] 分别减少了 8%,51% 和 85%。这种减少现象是多数人始料未及的。

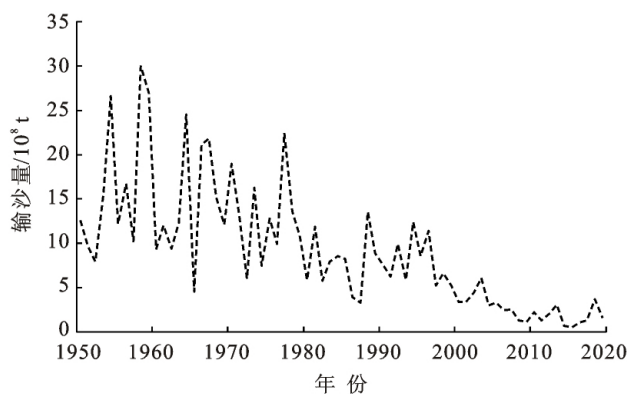


图 1 1950—2019 年黄河潼关站实测输沙量年际变化过程

利用黄河中游头道拐、吴堡、龙门、潼关 4 个水文站的实测输沙量数据序列,绘制各站输沙量随时间变化的单累积曲线。结果发现,各站累积年输沙量随时间的变化都可以非常完美地用开口向下的抛物线的左半部,即“左半抛物线”来拟合,其拟合方程如下:

$$S = -aY^2 + bY + c \quad (1)$$

式中: S 为年累积输沙量(10^8 t); Y 为年份序号; a 、 b 及 c 为经验系数。

黄河潼关站年输沙量单累积曲线如图 2 所示。黄河中游其他 3 个水文站(头道拐、吴堡、龙门)的输沙量变化曲线图略。这 4 站 1950—2019 年实测输沙量序列单累积曲线经验公式(1)的决定系数 R^2 分别为潼关站 0.999 2(最高),龙门站 0.997 8,吴堡站 0.997 4,头道拐站 0.995 4(最小);潼关站 1919—2019 年的 R^2 值亦达 0.995 3。各站拟合公式统计检验均达到 0.01 置信度即极显著水平。以上分析表明,已有的 4 个水文站的实测输沙量序列均符合此规律。因此,根据自然辩证法中简单枚举法和完全归纳法的逻辑推理理论,可以推断黄河中游年实测输沙量序列的单累积过程分布符合“左半抛物线”规律。

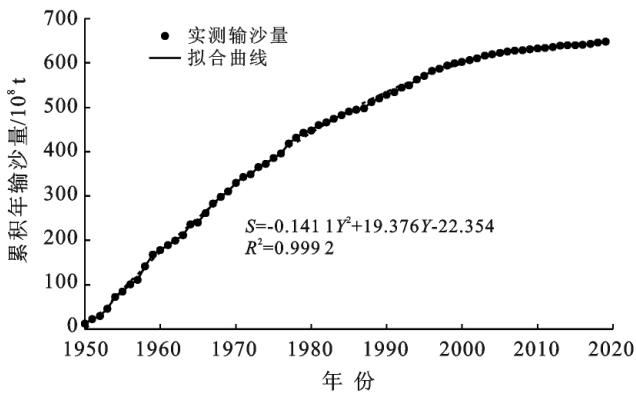


图 2 1950—2019 年黄河潼关站年输沙量单累积曲线

首先,根据黄河中游所有水文站年输沙量累积变化曲线和区域水土保持与生态修复现状,黄河输沙量数值不可能为负数,而开口向下的二次函数抛物线在达最大值后会开始逐渐减小,显然不符合实际。因此,笔者认为仅用开口向下的抛物线的左半段即“左半抛物线”描述其变化过程比较合理。其次,解析各站单累积曲线经验公式(1)发现,黄河输沙量在 2019 年左右基本达到或接近抛物线顶点,由于输沙量为非负值,因此即使未来输沙量值无限接近于零,曲线在达到顶点后仍存在逐渐增加的趋势。第三,分析“左半抛物线”斜率的变化过程可以发现,自 1997 年之后其斜率逐年变小,趋近于零。这表明自 1997 年以来,年输沙量累积值的增速整体呈稳定减小态势,亦说明黄土高原水土保持措施减沙作用的边际贡献率已逼

近临界最大阈值。第四,分析并比较黄河中游 1950—1996 年与 1997—2019 年两个时段年降雨量以及日降雨量 ≥ 10 , ≥ 15 , ≥ 25 , ≥ 50 mm 的统计特征值(平均值、均方差、偏态系数、最大值及最小值),1997—2019 年与 1950—1996 年这两个降雨序列在统计学上属于一个整体。即两个时期降水特征基本一致。第五,黄河上中游地区的植被是影响产沙的关键因素。近年来,黄土高原土壤侵蚀显著降低^[1],淤地坝几乎处于已无沙可淤的状态。根据 MODIS 遥感数据计算黄土高原水土流失区的植被覆盖度,发现该区植被盖度自 20 世纪 90 年代至 2020 年显著增加,丘陵沟壑区增加趋势尤为显著。黄土高原延河、北洛河以南区域植被未来恢复潜力有限,且该区目前的植被覆盖度已经接近其稳定减沙效益的阈值。这说明未来在该区难以通过提升植被盖度等植被措施达到大幅降低侵蚀产沙的效果。

基于以上几个方面的事实和分析,可以推断黄河输沙量自 1997 年以来已进入相对稳定态势,目前已基本达到企稳状态。

2 黄河未来输沙量频率预测

由于影响产沙和输沙要素未来数量的不确定性,要正确预测未来逐年输沙量显然不易。同时,未来输沙量预估应该基于某时段作为参考期。参考期的下垫面应该接近未来实际或者比较稳定。但在情景分析的水文泥沙模型预估中,往往仅采用某一年的特征值作为模型的预估下垫面,这显然不妥。机器学习如人工神经网络、随机森林等方法采用已有历史数据,但不同时期输沙量序列因水土保持和生态修复等因素的不同导致下垫面的差异而产生的输沙量差异,显然会干扰预估结果。因此,选择近期某一时段作为参考期似乎更为科学。本文根据 1997 年以来黄河年输沙量为新常态及“左半抛物线”斜率变化特征的基本判断,选择 1997—2019 年作为黄河未来输沙量预估的参考基准时段。

算术平均数仅反映某一时期黄河输沙量在数量上的总体水平。当样本较少时算术平均值的抽样误差较大,易受样本序列极端值的影响出现“被平均”的情况。为此在黄河流域生态保护与高质量发展工程规划中,往往要考虑不同发生频率的输沙量,特别是极端高输沙量。1997—2019 年仅 23 a 序列相对较短,极值对均值的影响较大。同时,基于滑动平均的物理意义,本文采用 10 a 滑动取最大值(经验频率 9%)和最小值(经验频率 91%)的方法,从而得到不同频率下黄河输沙量新序列。据研究结果,黄河流域

降雨量、天然径流量年际变化都表现出 10 a 左右的强周期。因此,在进行滑动取最大值或最小值时选择 10 a。本文选择 1997—2019 年的黄河潼关站输沙量序列,从 1997 年开始,逐年滑动分别求每 10 a 内最大及最小输沙量,得到一组(14 个)输沙量数据新序列(见表 1)。分析表 1 可见,9%经验频率下黄河潼关站 10 a 滑动年输沙量变化于 $3.10 \times 10^8 \sim 6.60 \times 10^8$ t 之间,平均为 4.80×10^8 t。而 91%频率下的

10 a 滑动输沙量变化于 $6.00 \times 10^7 \sim 2.50 \times 10^8$ t 之间,平均 1.10×10^8 t。在水利水保工程及规划时,往往会根据经验对预测结果进行“适当”放大或缩小。因此,在常态输沙量的气候及下垫面条件下,基于概率分布特征,可以预估黄河潼关站未来年输沙量在 90%频率下为 1.00×10^8 t,在 10%频率下约为 5.00×10^8 t 左右的水平。按此发生频率加权计算,未来多年平均输沙量为 1.40×10^8 t。

表 1 1997—2019 年黄河潼关站不同频率的输沙量

 10^8 t

项 目	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
实测输沙量	5.2	6.6	5.3	3.4	3.4	4.5	6.1	3.0	3.3	2.5	2.5	1.3
10 a 滑动最大										6.6	6.6	6.1
10 a 滑动最小										2.5	2.5	1.3
项 目	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均
实测输沙量	1.1	2.3	1.3	2.1	3.1	0.7	0.6	1.1	1.3	3.7	1.7	2.9
10 a 滑动最大	6.1	6.1	6.1	6.1	3.3	3.3	3.1	3.1	3.1	3.7	3.7	4.8
10 a 滑动最小	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.1

3 黄河未来泥沙态势的适用性策略

输沙量是制定黄河流域生态保护与高质量发展的关键依据。本文基于黄河实测输沙量,发现黄河中游各水文站年输沙量单累积过程能够用开口向下的抛物线之左半部分很好地拟合。同时综合黄河上中游降雨和下垫面状况,得出黄河未来年输沙量目前已进入一个企稳状态。通过频率分析,预估黄河潼关站未来年输沙量会基本维持在 1.00×10^8 t(90%频率)至 5.00×10^8 t(10%频率)水平。

虽然在有限的时间范围内气候特别是降雨会有所波动,但随着生态文明建设国策及黄河流域生态保护战略的推进,黄河上中游地区水土保持措施整体功能会继续向好发展。由于黄河输沙量目前已基本达到一个企稳状态,黄土高原的水土保持亦应随之进入一个新时代。为了继续维持黄河输沙量长期较低的状态,实现黄河流域的高质量发展,促进黄河的长治久安,黄土高原的水土保持需要采取以下几方面的适用性策略。

(1) 调整黄土高原水土保持治理空间格局。尽管近 20 a 黄土高原入黄泥沙只有 20 世纪 50 年代之前的约 15%,但由于黄土高原地貌、植被、土壤及侵蚀类型的空间差异,高塬沟壑区以及晋陕蒙交界的砭砂岩地区水土流失依然严重,部分区域年侵蚀产沙模数仍在 $10\ 000$ t/km² 以上^[11]。因此,需要强化对高塬沟壑区、砭砂岩区等水土流失严重区的治理工作,加强水土流失机理及治理措施的研究和试验示范。

(2) 加强“后水土保持”监管。水土保持工作多

属于公益事业,由于长期以来存在重建轻管的问题,使得治理后各项水土保持措施缺乏维护维修资金,制约了各项措施效应的持续有效发挥。大量老旧的小型淤地坝几近淤满,淤地坝和梯田的管理和维护不到位,存在垮塌致灾风险,也是暴雨后导致土壤侵蚀及河流输沙突增的主要因素。因此,必须创新管理模式和投融资机制,努力补齐短板,增加“后水土保持”资金落实,加强淤地坝、梯田等工程巡查及其除险加固,确保各项水土保持措施的长期有效运行。

(3) 巩固和提升退耕还林(草)成果。植被是黄土高原防治水土流失的根本措施,但林草植被恢复与建设一直是黄土高原水土流失治理中的“软肋”。经过 20 a 的政策导向和持续治理,黄土高原基本呈现出沟坡林灌成荫,梁峁绿草铺地的景观,水土流失得到有效遏制,举世瞩目。若盲目乐观,特别是对刚刚恢复的、脆弱的林草资源进行不合理利用,一旦致使林草植被遭受破坏,黄河泥沙将会在很短时间内回归“原点”。同时,黄土高原退耕还林(草)政策实施中,重林轻草的问题严重,特别是未能按照自然立地条件,盲目还“林”导致人工林退化及土壤干层问题依然突出,需要尽快解决。因此,要充分遵循以草灌为主的显域性地带植被及立地条件差异,克服重林轻草的现象,改变几乎千篇一律的退耕只还林的政策模式,推进退耕还草。通过荒山草地、退耕林草地、耕地等集中连片流转,创建家庭牧场,以便集中管理,促进林草地的科学有序利用,确保林草植被退得下保得住。

(4) 修订和完善水土保持措施建设质量标准,构建完善的水沙调控体系。中国现有水土保持措施建设标准及投资标准多产生于 20 世纪 80 年代,设计标

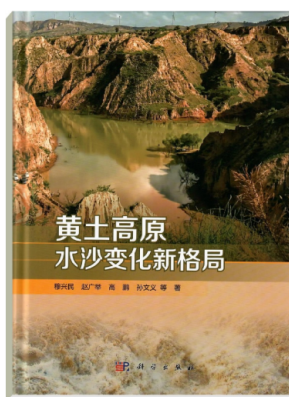
准较低,投资补助不足,所建工程难以抵御全球变化背景下强暴雨事件,严重制约当地经济社会的发展水平。20世纪80年代至2020年,虽然黄土高原植被覆盖度由28%增至60%以上,但由于部分地区人工植被结构及配置不合理,导致地表过度耗水,出现土壤干层甚至局部人工植被退化的问题。短历时、高强度局地暴雨是黄土高原侵蚀产沙的主要动力和新的研究方向,也是该区洪涝灾害频发的主要原因。未来需要大幅提升水土保持措施质量标准,构建完善的水沙调控体系,保持黄河下游河道长期的冲淤平衡,维护黄河的长治久安,为流域生态保护和高质量发展提供保障,进而不断满足人民群众日益增长的美好生活需要。

致谢:本文在写作过程中得到了合肥工业大学系统工程研究所所长金菊良教授、水利部黄河水利委员会总工程师刘晓燕教授级高级工程师、西北农林科技大学水利与建筑工程学院宋松柏教授、西北农林科技大学水土保持研究所韩剑桥副教授的鼎力支持,并提出了诸多建设性修改意见和建议,谨此致谢!

[参 考 文 献]

- [1] 穆兴民,赵广举,高鹏,等.黄土高原水沙变化新格局[M].北京:科学出版社,2019.
- [2] 穆兴民,胡春宏,高鹏,等.黄河输沙量研究的几个关键问题与思考[J].人民黄河,2017,39(8):1-4,48.
- [3] 穆兴民,徐学选,陈霁巍.黄土高原生态水文研究[M].北京:中国林业出版社,2001.
- [4] 比斯瓦斯(Biswas A K).水文学史[M].刘国纬,译.北京:科学出版社,2007:44-59.
- [5] 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].水利学报,2018,49(9):1028-1039.
- [6] 王光谦,钟德钰,吴保生.黄河泥沙未来变化趋势[J].中国水利,2020(1):9-12,32.
- [7] 穆兴民.双累积曲线及其在水文气象和人类活动效应评价中的应用[EB/O][2016-12-07][2020-8-21].<https://wenku.baidu.com/view/54461a37905f804d2b160b4e767f5acfa1c783f5.html>.
- [8] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [9] Mu Xingmin, Zhang Xiuqin, Shao Hongbo, et al. Dynamic changes of sediment discharge and the influencing factors in the Yellow River, China, for the recent 90 years [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012,40(3):303-309.
- [10] Zhao Guangju, Mu Xingmin, Han Mengwei, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the Northern Loess Plateau [J]. Catena, 2017,149:110-119.
- [11] 高健翎,张建国,朱莉莉,等.黄土丘陵沟壑区水土保持关键措施变化特征[J].水土保持通报,2019,39(3):114-118.

《黄土高原水沙变化新格局》一书出版发行



黄河泥沙是一个值得长期研究的重要课题,特别是21世纪以来黄河泥沙的突兀性减少引起了各界的广泛关注。《黄土高原水沙变化新格局》一书集成西北农林科技大学水土保持研究所生态水文团队多年的研究成果,系统地分析了关于黄河径流及输沙研究的进展,以及影响黄土高原降雨及水土保持措施的变化;分别从典型支流到区域尺度,揭示了黄河径流及其输沙格局变化及其主要原因;针对各界关注的焦点,研究了黄土高原植被及淤地坝的减水减沙机理及其作用。

《黄土高原水沙变化新格局》一书为穆兴民、赵广举、高鹏等同志所著,由科学出版社于2019年4月出版。该书共有344页,约51.6万字,包含7个篇章。第一章:黄土高原水土流失与水土保持;第二章:黄土高原侵蚀性降雨格局变化;第三章:黄河径流与气候和人类活动;第四章:黄河输沙与气候和人类活动;第五章:黄土高原植被恢复的径流及泥沙效应;第六章:黄土高原小流域土壤侵蚀产沙评价;第七章:黄土高原淤地坝拦沙对输沙的影响。该书可供水利、水土保持、水资源、地理、泥沙、环境、农业等领域的科技工作者、大专院校师生和流域管理者参考阅读。

《黄土高原水沙变化新格局》一书第一著人穆兴民(1961—),男(汉族),陕西省华阴市人,中共党员,博士,研究员(教授),博士生导师。Email: xmmu@ms.iswc.ac.cn。他长期从事水土保持、生态水文、水沙变化的科教与实践工作,共计发表论文384篇(其中中文276篇,英文108篇);主编和参编出版专著10部。曾任中国科学院水利部水土保持研究所(西北农林科技大学)土地资源环境研究部副主任、人事教育办公室主任、研究生部主任、党委副书记、副所长等职务。培养了一批从事水土保持、生态水文及河流水沙工作的硕士和博士。连续主持3项国家自然科学基金、多项省部和国家级项目。他的研究工作曾得到中央电视台、科学时报、中国水利报、参考消息、腾讯网、英国《卫报》、韩国文化广播公司电视台、香港电台电视部等媒体的采访和报道。