胡春宏，张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J]. 水利水电技术，2020，51(1)：1-11.
HU Chunhong，ZHANG Xiaoming. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2020，51(1)：1-11.

黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化

胡春宏，张晓明
(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100048)

摘 要：“黄河流域治理，重在保护，要在治理”。明晰黄土高原生态治理成效及其影响下的黄河水沙关系变化，有助于为黄河水沙关系协调提供科技支撑。通过梳理黄土高原水土流失治理历程及措施变化，辨析了治理措施的减沙效应。研究表明：(1)黄土高原历经五个典型治理阶段，主色调由黄变绿，下垫面发生不可逆的变化；(2)2000年以来，主要产沙区汛期雨量偏丰且极端降雨增加，而黄河沙量相对1919—1959年锐减了85%，中游中常洪水发生频次降低，下游河道由淤积转为冲刷；(3)林草、梯田和淤地坝减沙成效显著，溃损淤地坝淤积泥沙出库比<15%，难以发生“零存整取”现象；(4)与历史极端降雨事件相比，2000年后相似降雨条件下，典型流域次洪水量和沙量分别减少30%~78%、53%~88%，水土保持成效显著；(5)新水沙情势下应适时调整黄土高原水土流失治理格局，并完善水沙调控体系，改造下游河道，解放滩区。

关键词：黄土高原；黄河；水沙关系；治理措施；淤地坝；极端降雨
doi：10.13928/j.cnki.wrahe.2020.01.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**
中图分类号：TV882.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-0860(2020)01-0001-11

Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River

HU Chunhong，ZHANG Xiaoming
(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin，China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Beijing 100038，China)

Abstract “The Yellow River governance focuses on protection and governance”. Clarifying the effects of ecological governance on the Loess Plateau and its influences on variation of the runoff-sediment relationship of the Yellow River is helpful to provide a scientific and technical support for the coordinating the runoff-sediment relationship of the Yellow River. Through sorting out the processes of soil erosion control of the Loess Plateau and the changes of the governance measures，the sediment reduction effect of the governance measure are discriminated and analyzed herein. The study shows that (1) the Loess Plateau experiences five typical governance processes and the dominant hue of the Loess Plateau changes from yellow to green，while the underlying surface therein is irreversibly changed；(2) since 2000，the rainfalls during flood seasonsare relatively abundant along with the increases of extreme rainfalls，while the sediment transport of the Yellow River is sharply decreased by 85% if it is compared with that during the period of 1919—1959 along with the decreases of the occurrence frequencies of the middle stream moderate and normal

收稿日期：2019-12-16
基金项目：国家重点研发计划(2016YFC0402408)
作者简介：胡春宏(1962—)，男，中国工程院院士，教授级高级工程师，博士，主要从事江河治理领域研究工作。E-mail：huch@iwhr.com

floods and the transformation of the downstream channel sedimentation into erosion; (3) the sediment reduction effects from grass-land, terraced fields and warp-land dams are significant along with the sediment discharge ratio of less than 15%, thus the phenomenon of the so called "deposit in installments while withdraw in lump sum" is difficult to occur; (4) comparing with the historical extreme rainfall events, the typical secondary flood volumes and sediment yields within the river basin are decreased by 30% ~78% and 53% ~88% respectively with significant soil and water conservation effects under the conditions of the similar rainfalls and the intensities after 2000; (5) it is advisable to adjust the patterns of the soil erosion governanceof the Loess Plateau, perfect the water-sediment regulation system, improve the downstream channel and emancipate the flood plain under the new situation of water-sediment regime therein.

Keywords: Loess Plateau; Yellow River; water-sediment relationship; governance measures; warp-land dam; extreme rainfall

0 引 言

九曲黄河万里沙。黄土高原生态环境禀赋条件差，土壤侵蚀强度大，大量泥沙下泄入黄，使黄河“善淤、善决、善徙”，给中华民族带来过深重灾难。黄河是中华民族的母亲河，黄河流域的保护和发展历来是安民兴邦的大事。2019 年 8 月 19—22 日与 9 月 16—18 日，习近平总书记先后在甘肃省和河南省考察调研，对黄土高原水土保持与黄河治理作了内涵丰富的指示，提出“坚持绿水青山就是金山银山”“要仅仅抓主水沙关系调节这个‘牛鼻子’”“共同抓好大保护，协同推进大治理，让黄河成为造福人民的幸福河”，黄河流域生态保护和高质量发展成为重大国家战略。黄土高原地区的水土流失直接影响着黄河的生态安全，长期制约区域经济社会可持续发展。因此，水土流失防治是黄河流域生态保护的主要内容和治理的根本措施，也是黄河高质量发展的基本保障。新中国成立 70 年来，经过几代人持之以恒的不懈治理，黄土高原主色调已由“黄”变“绿”，入黄沙量由 1919—1959 年 16 亿 t/a 锐减至 2000—2018 年约 2.5 亿 t/a。本文通过梳理黄土高原水土流失治理历程及措施变化，分析了黄河水沙变化特征及其水土保持措施作用机理，并提出未来黄土高原和黄河流域治理策略，为推进黄河流域绿色发展与黄河成为幸福河提供科技支撑。

1 黄土高原水土流失治理历程与黄河水沙变化

黄河干流全长 5 464 km，流域面积 79.5 万 km^2，内蒙古河口镇(控制站头道拐)以上为上游，河口镇至郑州桃花峪(控制站花园口)为中游，桃花峪以下为下游。黄土高原水土流失面积 45.4 万 km^2，占黄河流域水土流失总面积 46.5 万 km^2 的 98%。黄土高原向黄河贡献了 97% 的泥沙。黄土高原与黄河流域位置图及干流主要水文站分布如图 1 所示。

1.1 黄土高原水土流失治理历程

1.1.1 黄土高原水土流失治理发展阶段

黄土高原地区一直是我国水土保持工作的重点，自建国以来持续开展了大规模的水土流失防治，主要分为五个发展阶段：一是解放初期至 20 世纪 70 年代的系统试验推广和发展阶段，建立了一大批不同类型区的水土保持试验站和工作站，开展水土流失成因、规律观测研究，并试验推广了机修梯田、水坠筑坝、飞播造林等系统防治技术；二是 20 世纪 80 年代的小流域综合治理阶段，在实践中总结提出了“山顶植树造林戴帽子，山坡退耕种草披褂子，山腰兴修梯田系带子，沟底筑坝淤地穿靴子”等治理模式；三是 20 世纪 90 年代的依法防治水土流失、深化水土保持改革阶段，1991 年《中华人民共和国水土保持法》诞生，1993 年水利部设置水土保持司，黄土高原持续

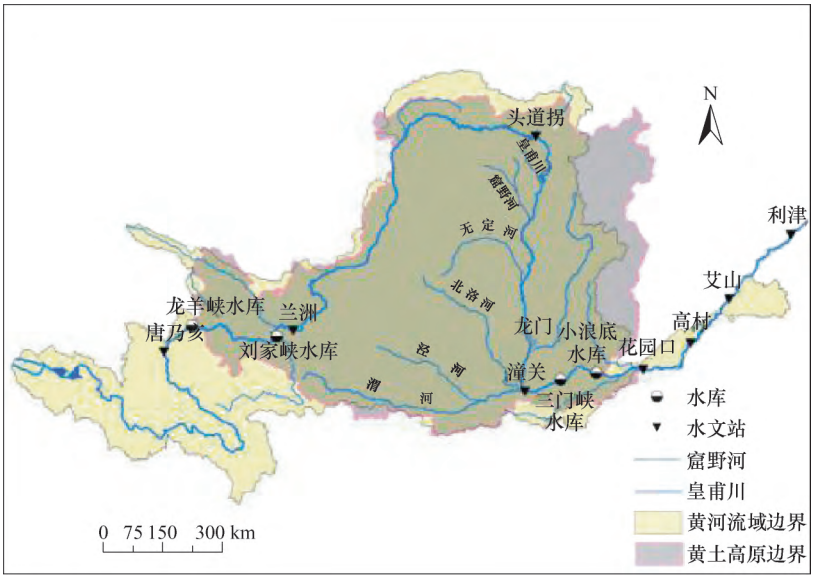


图 1 黄土高原与黄河流域地理位置及干流主要水文站分布

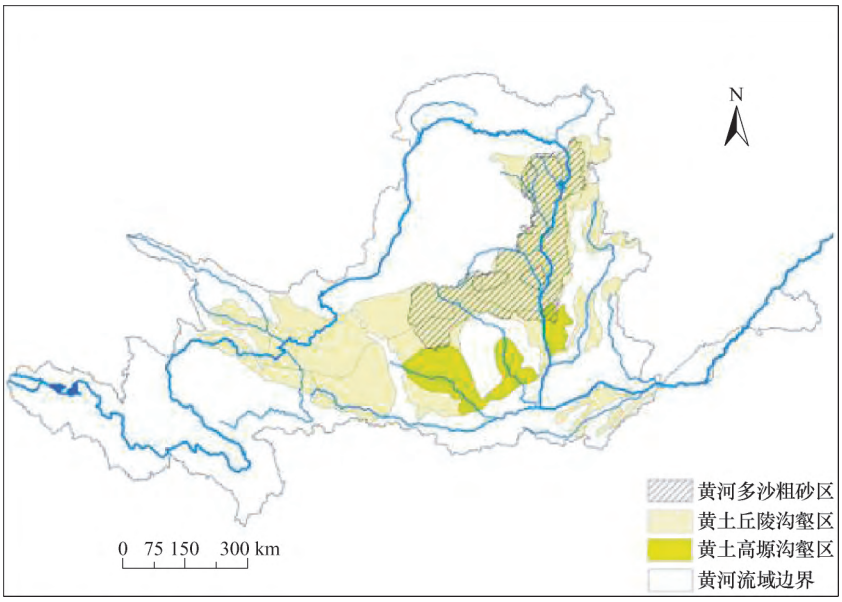


图2 黄土高原丘陵区沟壑区和黄土高原高塬沟壑区空间分布

开展了秀美山川建设；四是1999年以后的生态建设和保护阶段，实施退耕还林(草)、封山绿化和坡改梯、淤地坝系等工程建设；五是党的十八大以后的生态文明、绿色发展理念引领水土流失高标准系统治理、强化监督管理阶段，“绿水青山”与“金山银山”相融相生，自2019年习总书记考察甘肃、河南后，提出将黄河流域生态保护和高质量发展作为重大国家战略，黄土高原进入了大保护和大治理协同推进时期。

1.1.2 黄土高原水土流失治理措施变化

经过70余年科学治理和综合防治，黄土高原地区的水土保持措施面积逐年增加，近20年增加土水保持措施面积21.3万km^2，造林种草、梯田和封禁各占60%、25%和15%。如图2所示，黄土丘陵沟壑区和黄土高塬沟壑区为黄河主要产沙区，黄河泥沙90%以上来自这两个区域，该区域1954—2017年各措施累积面积变化和骨干坝建设情况如图3和图4所示。截至2018年，黄土高原林草覆被率由20世纪80年代总体不到20%增加到63%，梯田面积由1.4万km^2提升至5.5万km^2，建设淤地坝5.9万座，其中骨干坝5899座。黄土高原林草覆被率变化、梯田和淤地坝分布如图5和图6所示。

1.2 黄河水沙变化特征

1.2.1 黄土高原汛期雨量非显著性减少，主要产沙区偏丰且极端降雨增加

如图7所示，自1919年以来，黄土高原汛期降雨量呈非显著性减少趋势，主要产沙区2010—2018年降雨与1966—2018年(1966年以前黄土高原雨量站点相对较少)均值比较，总体偏丰11%，河龙区间中部和湟水上游偏丰程度最大，渭河上游、洮河、祖厉河区间偏枯。如图8所示，400 mm等雨量线在中游变化大，其中窟野河、无定河流域周边自2010年以来增加明显，雨量线向西北移动约90 km。如图9所示，结合极端降雨指数定义标准[1]，基于主要产沙区46个国家雨量站1960—2016年3个时段极端降雨事件时空分布规律分析表明：随着时间推移，极端降雨占总降水量比例呈增加趋势，河潼区间由1960—1980年的48%增加到2000年以后的53%；从空间分布看，1960—1980年极端降雨量占总降水量比例较高区域主要集中

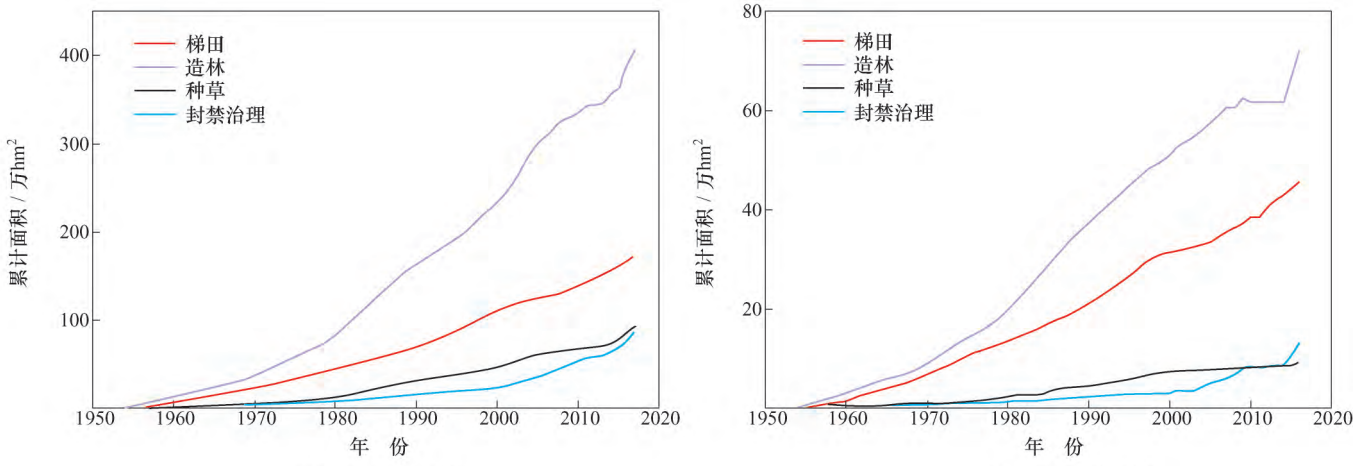


图3 黄土丘陵沟壑区和黄土高塬沟壑区1954—2017年各水土保持措施面积累积变化

在河龙区间窟野河、黄甫川等流域；2000 年以后极端降雨量占总降水量比例较高区域由河龙区间局部发展至河潼区间大部，河潼区间极端降雨比例明显增多。

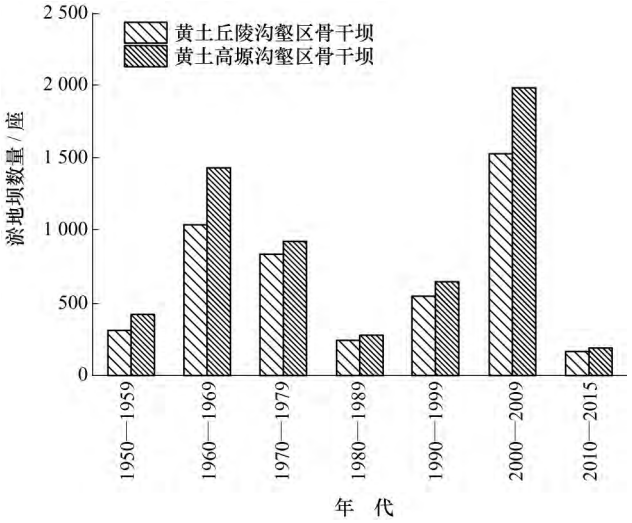


图 4　黄土丘陵沟壑区和黄土高塬沟壑区不同年代骨干坝建设数量

1.2.2　黄河泥沙锐减，黄土高原不同区间来沙占比发生显著变化

根据潼关站 1919—2018 年水沙实测资料，黄河年平均径流量和输沙量分别从 1919—1959 年的 426.4 亿 m^3/a 和 16.0 亿 t/a 减少到 2000—2018 年的 236.4 亿 m^3/a 和 2.5 亿 t/a，分别减少约 45% 和 85%，(见表 1)。1960—1986 年期间，中小型淤地坝等水土保持措施逐步实施，刘家峡水库 1968 年建成运行，水量和沙量比 1919—1959 年分别减少 6% 与 24%；1987—1999 年期间，小流域综合治理和治沟骨干工程实施，龙羊峡、刘家峡水库联合运用，生产建设项目开始依法监管，水量和沙量比 1919—1959 年分别减少 39% 与 49%；2000—2018 年期间，退耕还林还草、淤地坝坝系工程和坡改梯等水土保持及生态建设推进力度大，水量和沙量锐减，沙量减幅大于水量。

表 1　不同时段黄河来水来沙量及相对基准期变化量

时段/年	水量/亿 m^3	沙量/亿 t	相对基准期 1919—1959 年减少量	
			水量/%	沙量/%
1919—1959	426.6	16.00		
1960—1986	399.4	12.10	6.4	24.1
1987—1999	261.6	8.10	38.7	49.3
2000—2018	236.4	2.48	44.6	84.5

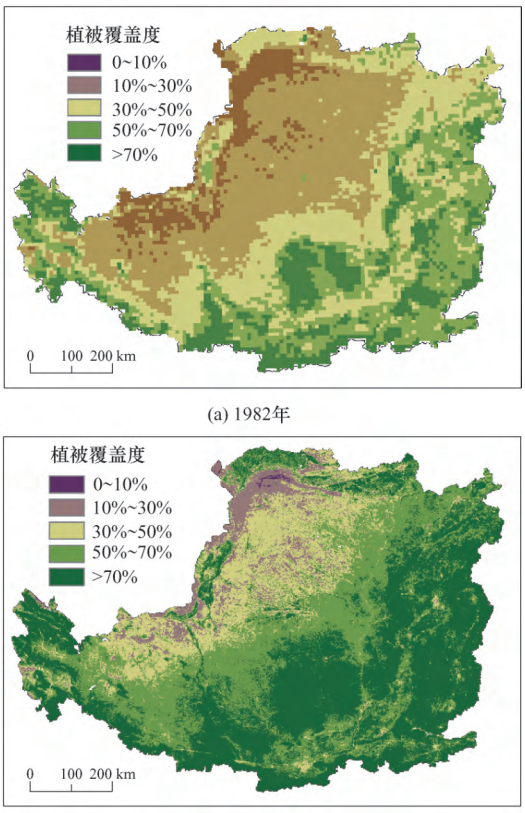


图 5　1982 年和 2018 年黄土高原植被覆盖率

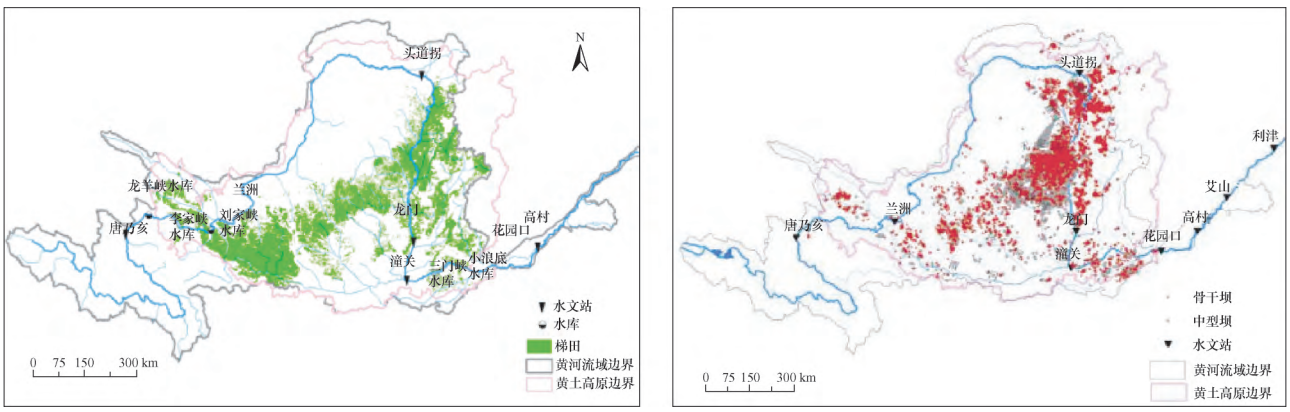


图 6　2018 年黄土高原梯田和淤地坝空间分布

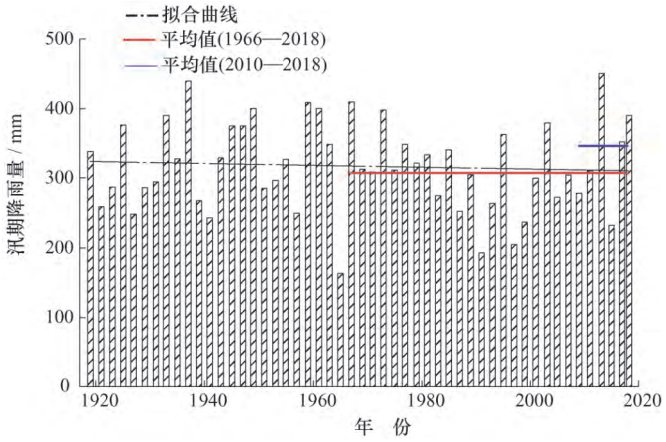


图 7　黄河主要产沙区 1919—2018 年汛期降雨量

黄土高原河龙区间 2000 年后水土保持及生态建设成效明显，退耕还林与淤地坝建设等主要集中在河龙区间，由图 5 和图 6 可见，林草植被覆盖率增加 30% 以上，淤地坝分布占黄土高原总数的 84%[12]。因此，从黄河流域产沙情况看，河龙区间来沙在 2000 年以后的贡献由 2000 年前 71% 降至 51%，龙潼区间则从 29% 升至 49%[13]，龙潼区间水土流失治理有待进一步加强。

1.2.3　黄河中游中常洪水发生频次降低，下游河道由淤积转为冲刷

日平均大于 2 000 m^3/s 的流量利于河道泥沙输移[14]。潼关站 2000—2018 年汛期日平均流量大于2 000 m^3/s 出现的年平均天数由 1960—1986 年的 58 d/a 减少为 14 d/a，相应水量占汛期水量的比例由 1960—1986 年的 71% 减少为 30%。且中游中常洪水自上世纪 80 年代后期以来发生场次明显减少，潼关站 3 000 m^3/s 和 6 000 m^3/s 以上年均场次由 1987 年以前的 5.5 场/a 和 1.3 场/a 降为 1987—1999 年的 2.8 场/a 和 0.3 场/a，2000 年以来 3 000 m^3/s 以上仅为 1.2 场/a。同时，2000 年后花园口站以下下游河道由累积淤积泥沙 48.2 亿 t 变为累积冲刷泥沙 29.4 亿 t，下游平滩流量由 1960 年代初的约 8 000 m^3/s 下降到 1999 年的 2 000 m^3/s，通过 2002 年以来小浪底水库的调水调沙，下游河道平滩流量恢复到4 300 m^3/s 左右。花园口站年平均含沙量小于 20 kg/m^3 时黄河下游河道基本不淤积[14]，2000 年以后，由于中上游水保和生态工程建设，特别是小浪底水库的直接拦沙约 45 亿 t，使下游河道由淤积转为冲刷，过流能力加大、洪水位下降、游荡性变弱，下游河势总体向好。

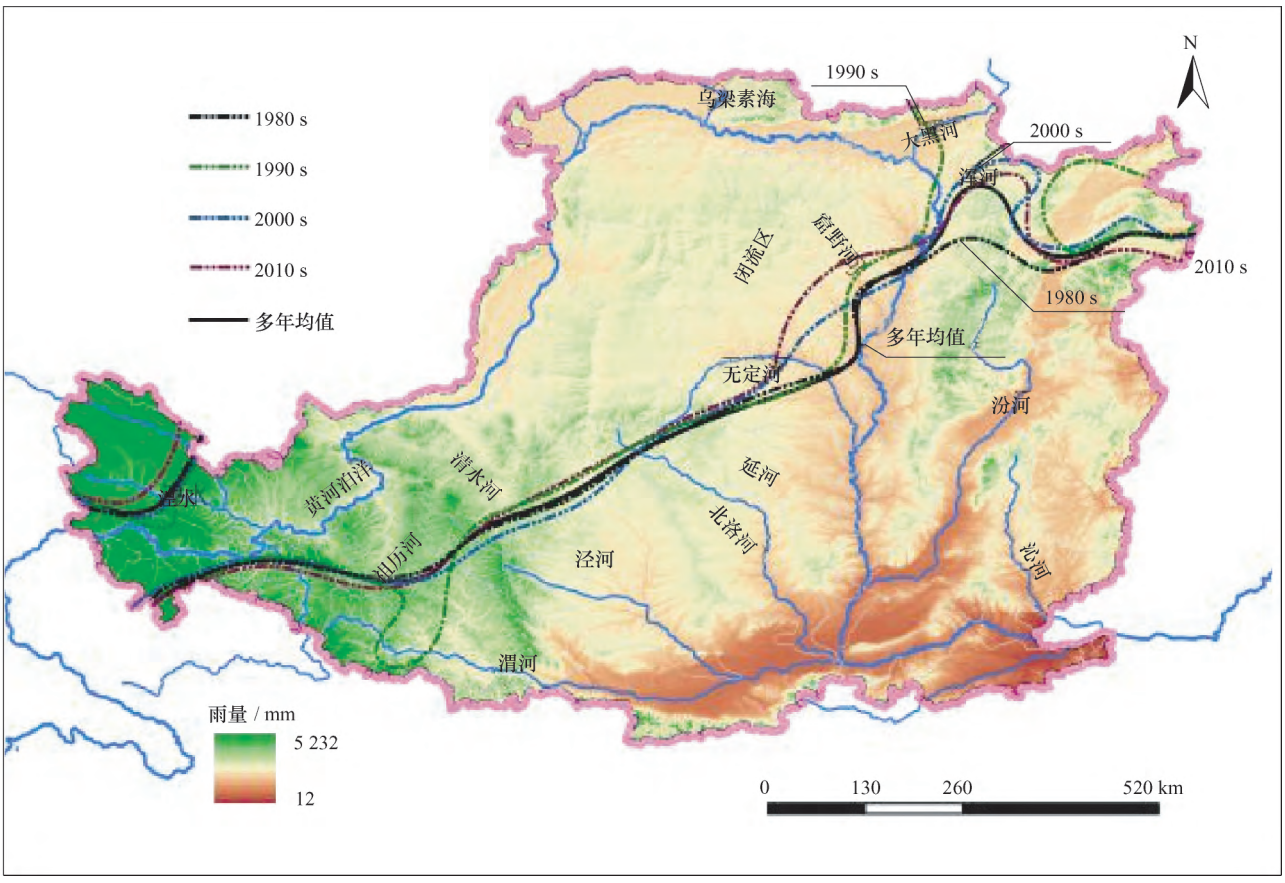
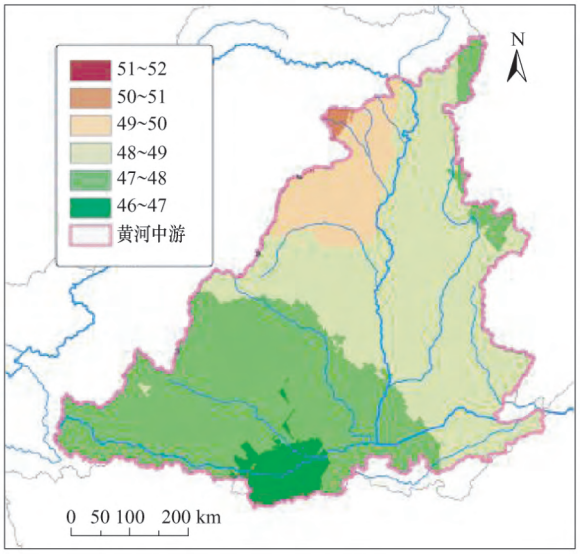
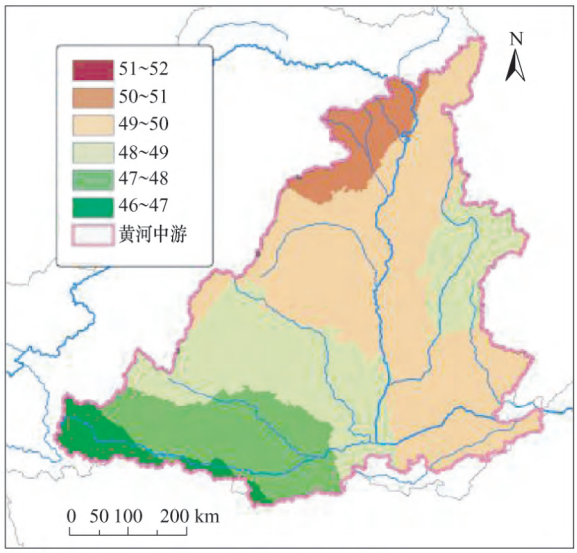


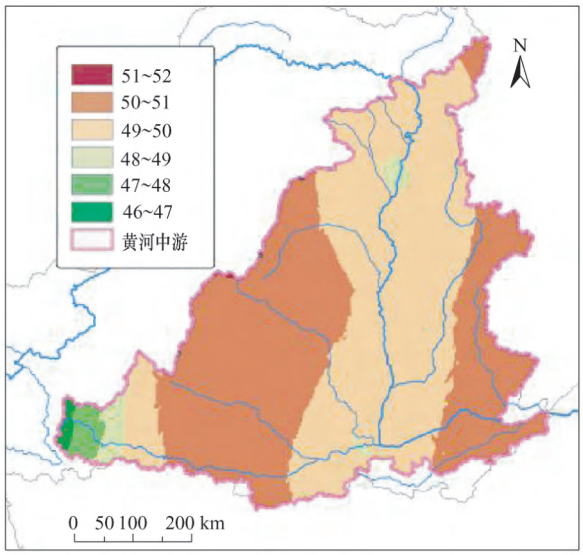
图 8　黄土高原 400 mm 等降雨量线变化



(a) 1960—1980年



(b) 1981—2000年



(c) 2001—2016年

图9 黄河中游暴雨时空分布（单位:%）

2 黄土高原水土流失治理措施减沙效益分析

2.1 林草植被减沙作用及临界效应

植被通过增加降雨入渗、拦蓄径流、降低侵蚀动能等，从而减少土壤侵蚀。植被可提高流域产流的临界雨量，减水减沙作用也存在临界现象。对于坡面尺度，林草植被覆盖率在50%～60%以下时，随植被覆盖率增加其减水减沙作用显著，当大于这一临界则随覆盖率增加，减水减沙作用明显降低[5]。对于流域尺度，在自然植被覆盖率60%以上，可抑制30～50 mm左右场次降雨不产生地表径流、不产沙[6]。如图10所示，黄土高原不同侵蚀类型区，遏制产沙，即流域产沙模数≤1 000 t/(km^2·a)的林草有效覆盖率阈值为[7]：盖沙区和砾质丘陵区约45%；黄土丘陵区约55%；砒砂岩区约75%(该区域难于实现的标准)。若按产沙模数≤2 500 t/(km^2·a)标准，丘陵区第1～4副区的林草有效覆盖率阈值约为46%～52%；而丘陵区第5副区和高塬区，林草有效覆盖率阈值大于50%，流域产沙量也渐趋稳定，但因产沙机制特殊，即使林草梯田的有效覆盖率达到70%，也难使产沙模数降低至2 000 t/(km^2·a)以下。

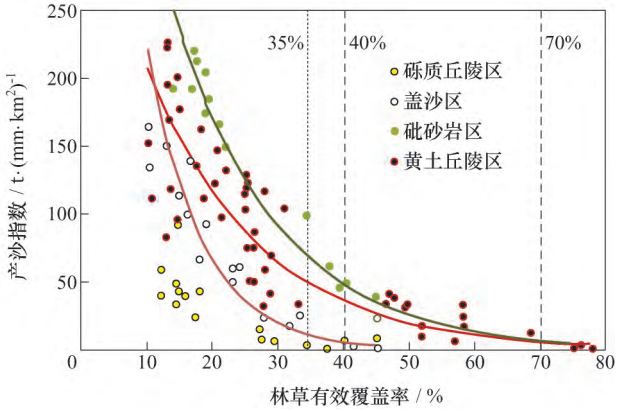


图10 不同类型区林草植被覆盖率阈值[7]

2.2 梯田工程的减沙作用及其临界效应

坡式水平梯田可拦蓄10～20 a一遇的次降雨相邻两埂间坡面径流泥沙；20 cm以上地埂梯田可保证在100 mm以下场次降雨下梯田不被冲毁[8]，因此，梯田发挥其水土保持效益的前提条件是降雨量及其强度，质量则是其充分发挥水土保持作用的保证。合理的流域梯田布局(如布置在流域上游好于下游，坡面上部好于下部)能提高梯田的减沙效益20%左右[8]。选择流域梯田比(指梯田面积与轻度以上水蚀面积之比)作为评价其减蚀作用指标[8]，在流域梯田比5%～

30%范围内，梯田比与减沙幅度成正比，当梯田比大于35%～40%后，其减沙作用基本稳定在90%左右(见图11)。据2017年无定河流域“7·26”特大暴雨水土保持综合考察，相对于坡耕地，农地修梯田减洪71%，反坡梯田的油松侧柏混交和反坡梯田的油松林减流84%以上、减沙达90%以上[9]。

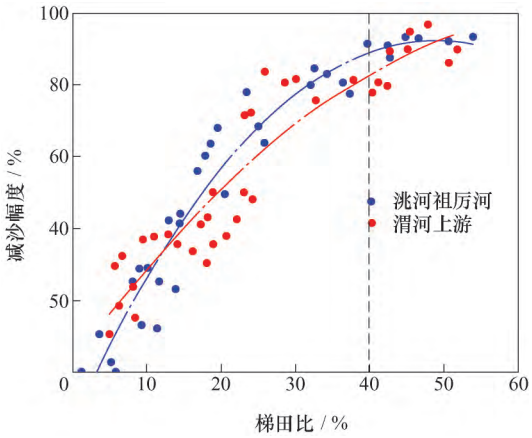


图11　不同类型区梯田比阈值[8]

2.3　淤地坝工程的拦沙减沙作用

2.3.1　淤地坝直接拦沙作用

淤地坝可直接将泥沙拦截在坝库内，但随着淤地坝淤积泥沙的增加，其拦沙能力逐渐降低。据现状统计表明：已投入使用但尚未淤积的淤地坝有957座，占淤地坝总量的6%；已完全淤积的有3 635座，占淤地坝总量的22%，其中有3 354座为1980年以前修建；淤积比小于50%的仍占47%。如表2所列，通过黄土高原不同水土流失类型区不同淤地坝实测数据分析及推算，2011—2017年期间黄土高原淤地坝共拦沙10.5亿t，其中骨干坝、中型坝和小型坝的淤积量分别为5.7亿t、2.3亿t和2.5亿t。截止2017年黄土高原仍有拦沙能力的骨干坝、中型淤地坝和小型淤地坝分别为4 319座、5 134座和12 855座，剩余库容22.5亿m^3。

2.3.2　淤地坝减蚀作用的长效性

淤地坝减蚀作用是将侵蚀沟道变为坝地后分散消减径流侵蚀动力，减少沟道侵蚀产沙[10]，其作用具有长效性。淤地坝淤积泥沙后，坝体和坝前平缓坝地可致流速降低、挟沙力下降，且因坝地延长，沟道整体坡降下降，侵蚀基准面抬升，各个沟道坝地末端尾水区发生壅水减速落沙，流域整体的淤积向上游发展，持续减沙。同时，淤地坝抬高侵蚀基准面，减少沟头溯源侵蚀和减轻坡沟系统重力侵蚀，也具有长效性。以典型流域王茂沟为例，其属于无定河流域韭园沟中游左岸的一条以坝系为主的治理支沟，流域面积5.97 km^2，主沟道长度3.80 km，共有淤地坝22座，其中骨干坝2座，中型淤地坝8座，小型淤地坝12座。如图12所示，极端降雨条件下流域沟道坝系串联(CL)、并联(BL)、混联(HL)比无坝(W)在道出口断面最大流速、最大径流剪切力和最大径流功率均分别减小69%、89%和96%，其中混联坝系的减幅度最大。

2.3.3　淤满淤地坝溃堤后淤积泥沙输移机制

以王茂沟典型溃坝为对象，通过测量得到了精度误差为1mm的点云数据，并生成了精度为2 mm的数字地形高程数据(DEM)(见图13和图14)，通过ArcGIS测量典型溃坝形态参数如表3所列。王茂沟淤地坝发生溃坝之后溃口长度小于坝体长度、溃口深

表2　黄土高原淤地坝淤积特性

分区		单坝年均单位控制面积淤积量/万m^3·(km^2·a)$^{-1}$	骨干坝			中型坝			小型坝		
			有效坝数量/座	单坝平均控制面积/km^2	2011—2017年拦沙量/亿t	有效坝数量/座	单坝平均控制面积/km^2	2011—2017年拦沙量/亿t	有效坝数量/座	单坝平均控制面积/km^2	2011—2017年拦沙量/亿t
黄土丘陵沟壑区	丘1	0.31	2 058	4.67	2.86	3 149	1.40	1.31	7 081	0.70	1.47
	丘2	0.31	466	5.93	0.80	559	2.01	0.33	1 394	0.70	0.28
	丘3	0.29	293	5.82	0.47	296	2.29	0.19	801	0.70	0.15
	丘4	0.29	156	4.03	0.17	85	1.56	0.04	328	0.70	0.06
	丘5	0.23	474	5.72	0.59	351	2.03	0.16	1 122	0.70	0.17
土石山区		0.17	268	4.90	0.21	199	2.58	0.08	635	0.70	0.07
黄土高塬沟壑区		0.20	400	4.56	0.34	170	1.96	0.06	775	0.70	0.10
风沙区		0.32	204	4.43	0.28	325	1.59	0.16	719	0.70	0.15
合计			4 319		5.71	5 134		2.32	12 855		2.47

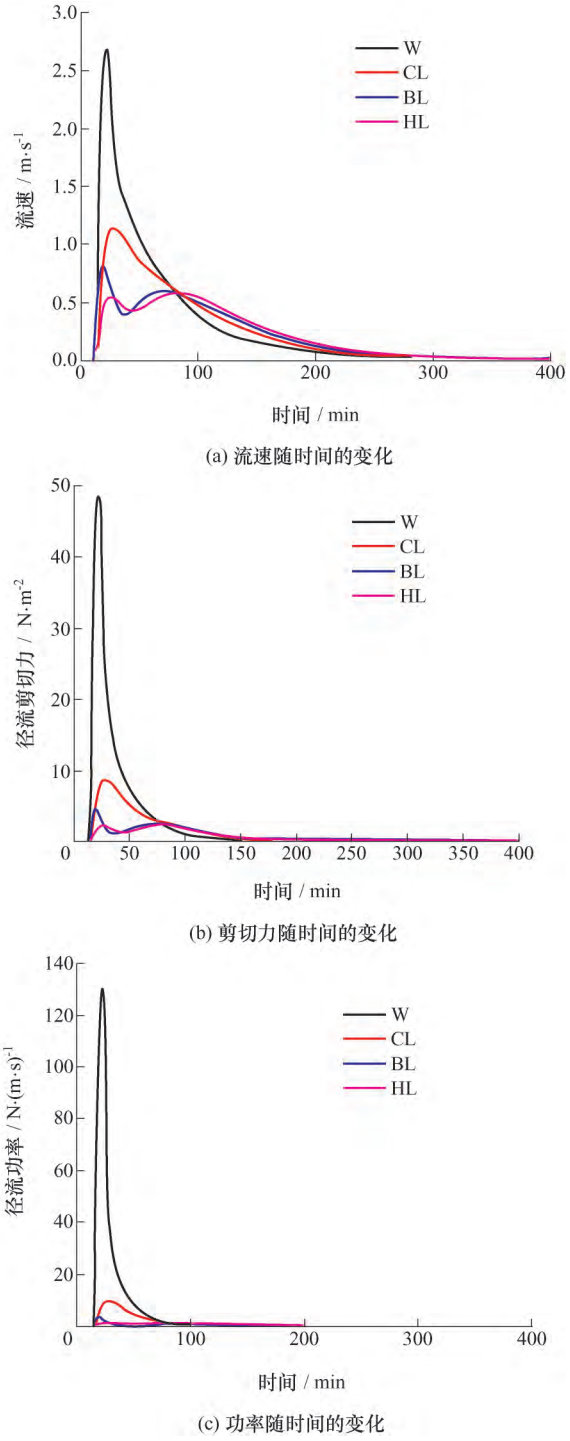


图 12　不同级联方式下出口断面径流流速、剪切力和功率随时间变化过程

度接近坝体深度，即当淤地坝发生溃坝之后并不是坝体垮塌或者整个坝体损毁，而是坝体被洪水冲开一道小于坝体一半长度的溃口，洪水通过溃口溯源侵蚀坝地内淤积泥沙。基于扫描的王茂沟典型溃坝 DEM，通过高程平滑及空间插值等操作还原溃坝前坝体形态，获得溃坝 1、溃坝 2 的溃口体积，并测得坝地中

表 3　王茂沟典型溃坝形态参数　　m

坝　名	坝体长	坝体宽	坝顶宽	坝　高	溃口长	溃口深
溃坝 1	65.0	11.3	4.0	4.7	8.4	4.7
溃坝 2	99.8	36.6	6.7	21.2	19.6	19.4

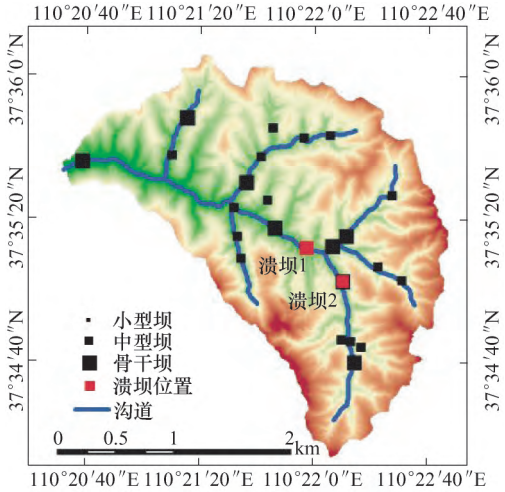


图 13　王茂沟淤地坝布置及典型溃坝位置

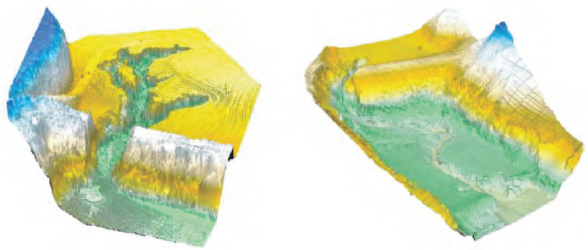


图 14　王茂沟典型溃坝数字地形高程(DEM)

溃口占溃坝前坝地面积比例(即坝地面积溃损比)，溃坝 1 为 4.9%，溃坝 2 为 0.5%，两个溃坝坝地面积溃损比均不超过 5%。

运用一维水流泥沙数学模型模拟淤地坝溃损后的泥沙输移过程，淤地坝未破坏前，泥沙拦蓄在坝前，河床高程逐渐淤积抬升，最终达到平衡纵剖面；淤地坝破坏后，从坝址处发生溯源侵蚀，在库区内拉出一道冲刷槽，冲槽在河底下切的同时伴随着河宽的调整，并不断形成连续陡坎，增租消能[10]。如图 15 所示，绘制了河底宽度随时间的变化曲线，冲刷槽内河宽先经历一快速束窄阶段，后经历缓慢拓宽阶段，根据库区内的泥沙体积随时间变化的计算结果显示，淤地坝破坏后坝体内的泥沙不到 15% 被释放。根据关地沟流域 2012、2017 两次洪水 4 座连续溃损后的淤地

坝调查，淤满淤地坝在坝体冲毁后，在冲刷破坏阶段仅有部分淤积泥沙被冲刷，淤积泥沙出库比 < 12%，难以发生“零存整取”现象[11]。

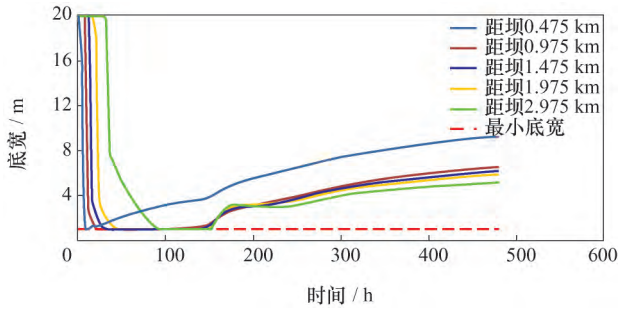


图 15　淤地坝破坏后库区冲刷槽河宽随时变化曲线

3　极端降雨事件下的水土保持成效

3.1　典型极端降雨下的流域洪水输沙特性

开展极端降雨事件下的洪水输沙特性分析，对于深刻认识水土流失治理成效具有重要意义[12]。选取极端降雨事件频发的黄甫川、无定河和湫水河等典型流域为研究对象，通过对比分析历史不同时段相似极端降雨下的典型场次洪水事件产洪产沙特征(见表 4)表明：2000 年以来各流域同等极端降雨条件下次洪水量以及泥沙量较上世纪 60—80 年代均显著减少，其中，洪水量减少范围 30% ~78%，泥沙量减少范围 53% ~88%，减沙幅度大于减洪程度，水土流失治理下的流域下垫面变化发挥了重要作用。

3.2　不同时段流域雨洪、雨沙关系演变

雨洪、雨沙关系变化是客观反映下垫面变化对流域洪水输沙影响的重要方面[13]。为进一步阐明不同历史时期相似极端降雨事件产洪产沙异同，甄别极端降雨条件下的流域雨洪雨沙关系演变特征，选取不同流域洪峰流量 > 1 000 m^3/s 的洪水事件进行分析发现，2000 年后，雨洪雨沙关系发生明显变化(见图 16)。其中，无定河、黄甫川、湫水河流域 2000 年以后次洪水量、次输沙量均位于拟合直线下方，说明 2000 年以后黄河中游地区极端降雨 - 洪水 - 泥沙关系发生明显变化。进一步以 2017 年无定河“7·26”特大暴雨为研究对象，选取无定河白家川站有观测数据以来洪峰流量大于 2 000 m^3/s 的洪水事件，分析表明：与 1977 年特大暴雨相比，在面降雨量大致相同，降雨强度增加 1 倍条件下，“7·26”特大暴雨洪水量减少 34%，产沙量减少更为显著，减幅达 53%。因此，黄河流域极端降雨事件下的大雨大沙现象趋少，水土保持生态建设主导下的流域下垫面变化对黄河流域极端降雨洪水事件泥沙减少发挥了重要作用。

4　结论与建议

4.1　结　论

本文在对建国 70 年以来黄土高原水土流失治理及措施变化梳理的基础上，分析了黄河水沙关系变化特征与林草、梯田和淤地坝减蚀作用及临界效应，辨析了典型流域极端降雨条件下流域治理成效，得到如下认识：

(1) 黄土高原历经五个典型治理阶段，成效显著，治理水土流失面积近 50%，林草覆被率由总体不到 20% 增加到 63%，梯田面积由 1.4 万 km^2 提至 5.5 万 km^2，建设淤地坝 5.9 万座，黄河沙量也从 1919—1959 年平均 16 亿 t/a 降为 2000 年后的 2.5 亿 t/a。

表 4　典型流域近 70 年极端暴雨事件特性

流　域	洪　号	场次降雨量/mm	平均雨强 /mm·h^{-1}	50 mm 笼罩面积/km^2	100 m 笼罩面积/km^2	洪峰流量 /m^3·s^{-1}	次洪量 /亿 m^3	输沙量 /亿 t	最大含沙量 /kg·m^{-3}
无定河(白家川)	20170726	64	3.5	13 687	4 573	4 480	1.67	0.78	873
	19940805	50	2.8	11 848	2 238	3 220	1.70	0.80	526
	19770805	62	1.7	14 945	2 979	3 840	2.54	1.66	737
	19640706	57	1.7	13 543	1 783	3 020	1.48	0.84	633
湫水河(林家坪)	20150802	59	5.8	1 549	0	1 400	0.16	0.06	428
	20120727	65	5.3	1 230	333	1 350	0.14	0.05	497
	19770706	55	5.0	1 297	0	1 860	0.27	0.15	582
	19700809	64	4.4	897	395	2760	0.63	0.43	741
黄甫川(皇甫)	20160818	81	2.9	3 004	359	2 220	0.32	0.10	510
	19880805	81	2.1	1 227	256	6 790	1.54	0.91	802
	19790810	85	2.0	3 198	575	4 960	1.34	0.66	1 400

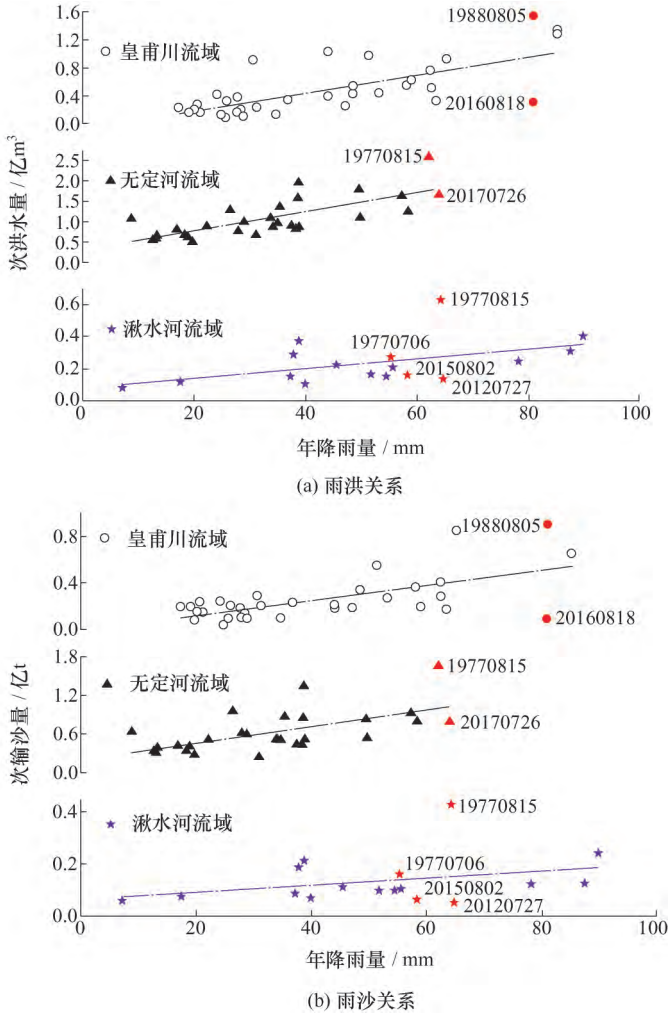


图 16　不同流域典型极端降雨事件下的雨洪、雨沙关系

(2) 2000 年以来黄土高原主要产沙区汛期雨量偏丰、极端降雨增加，但 2000—2018 年黄河沙量相对 1919—1959 年锐减了 85%，且黄河中游中常洪水发生频次降低，下游河道由淤积转为冲刷。

(3) 林草植被和梯田的减沙作用具有临界效应，分别采用有效林草覆被率和梯田比作为阈值指标，抑制流域侵蚀产沙的临界阈值分别约 60% 和 40%；淤地坝工程直接拦沙减沙，并通过消减径流侵蚀功率和抬高侵蚀基准面间接减沙，淤满淤地坝溃损后淤积泥沙出库比 < 15%，难以发生“零存整取”现象。

(4) 极端降雨下无定河等典型流域含沙量较上世纪同等降雨量下平均减少 40% 以上，次洪水量和沙量分别减少 30% ~78% 和 53% ~88%；与 1977 年特大暴雨相比，在面降雨量一致、降雨强度增加 1 倍条件下，“7·26”特大暴雨无定河洪水量减少 34%，产沙量减少 53%，表明水土保持成效显著。

4.2　建　议

(1) 适时调整黄土高原水土流失治理格局。2000 年以来，黄土高原通过实施退耕还林(草)、坡改梯和淤地坝系工程建设等，水土流失治理取得显著成效。随着水沙情势变化与黄河流域生态保护和高质量发展新需求，黄土高原水土流失治理现存的问题凸显，如宜封禁恢复草被的区域过度植树、宜平衡人粮矛盾的地区梯田化不足、宜拦沙减蚀的流域淤地坝工程缺失，而城镇化率高的地区大规模坡改梯、生态环境趋好的流域沟系布坝过密等，导致区域治理不平衡，缺乏新水沙条件下的分区分类综合治理方略统筹指导。因此，建议适时调整黄土高原水土流失治理格局，在强化治理措施的区域差异性、灾害防治的系统性和城乡发展、人口转移的协调性，精准布局适宜措施类型和规模，因地制宜，分区施策，分区精准治理，协同推进乡村振兴和绿色发展。

(2) 完善黄河水沙调控体系。黄河水沙关系不协调是黄河难治的症结所在，紧紧抓主水沙关系调节这个“牛鼻子”，完善水沙调控体系。现阶段宜加快古贤等重点水库建设的研究与论证，推进工程早日建设。古贤水库在水沙调控体系中具有承上启下战略地位，建成后与小浪底水库联合运用可较长期维持河道中水河槽行洪输沙功能，扭转小北干流河道淤积局面，降低潼关高程并长期维持。同时，改造下游河道，缩窄河槽，解放滩区，推进滩区分类治理与生态保护，保障滩区居民脱贫，以保障黄河长治久安，让黄河成为造福人民的幸福河。

参考文献:

[1] 姚文艺. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社，2011.

[2] 刘晓燕. 黄河近年水沙锐减成因[M]. 北京: 科学出版社，2017.

[3] 赵阳，胡春宏，张晓明，等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析. 农业工程学报[J]. 2018，34(21)：112-119.

[4] HU Chunhong，GUO Qinchao. Modeling sediment transport in thelower Yellow Riverand dynamic equilibrium threshold value[J]. Science in China Seri. E Engeineering & Materials Science，2004，47：161-172.

[5] ZHANG Xiaoming，CAO Wenhong，GUO Qinchao. Effect of land use change on surface runoff and sediment yield at different watershed scales on the Loess Plateau[J]. International Journal of Sediment Research，2010，25(3)：641-650.

[6] 李晓宇，刘晓燕，李焯. 黄河主要产沙区近年降雨及下垫面变化对入黄沙量的影响[J]. 水利学报，2017，48(10)：1253-1260.

[7] 刘晓燕，李晓宇，党素珍. 黄河主要产沙区近年降水变化的空间格局[J]. 水利学报，2016，47(4)：463-472.

[8] 刘晓燕，杨胜天，王富贵，等．黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J]．水利学报，2014，45(11)：1293-1297.

[9] 中国科学院水利部水土保持研究所．无定河流域“7·26”特大暴雨水土保持综合考察总报告[R]．北京：中国科学院水利部水土保持研究所，2017.

[10] LI Peng，XU Guoce，LU Kexin，et. al. Runoff change and sediment source during rainstorms in an ecologically constructed watershed on the Loess Plateau，China[J]. Science of the Total Environment，2019，664：968-974.

[11] 胡春宏，张晓明．论黄河水沙变化趋势预测研究若干问题[J]．水利学报，2018，49(9)：1028-1039

[12] 陈瑞东，温永福，高鹏，等．极端降雨条件下延河水沙特征对比分析及其影响因素[J]．生态学报，2017，38(6)：1920-1929.

[13] 石伟，王光谦，邵学军．不同来源区洪水对黄河下游流量—含沙量关系的影响[J]．水科学进展，2003，14(2)：147-151.

（责任编辑　陈小敏）