

文章编号:0559-9350(2018)09-1028-12

## 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题

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 100038)

**摘要:** 1980年代中期以来黄河水沙情势发生了巨大变化, 明晰其过程、特征及水沙变化研究的关键所在, 有助于聚焦核心科学问题, 重点攻关, 为黄河流域生态文明建设提供科技支撑。本文系统分析了黄河流域1950—2016年水沙变化过程, 梳理了不同阶段各家水沙变化趋势预测成果, 辨析了趋势预测结果差异显著的原因。研究表明: 黄河水沙锐减, 时空减幅不同步, 年内利于输沙的流量持续时间和水量、沙量都在减少, 含沙量则与水利水保工程建设呈现协同的阶段变化, 黄河水沙异源的空间分布格局仍然持续; 黄河水沙变化趋势多借助于“水保法”、“水文法”和“物理过程模型法”等开展预测, 不同时期的预测成果差异显著, 其中机理和机制等的认识不足、评价技术等的缺失及预测条件变化的不确定性等是导致差异显著的主要原因。今后需加强黄河水沙变化机理、措施的群体效应、预测结果可信度评估和治黄策略等关键科学问题研究, 为准确预测新形势下黄河水沙变化趋势提供理论基础。

**关键词:** 黄河水沙变化机理; 群体效应; 趋势预测; 集合评估; 治理策略

**中图分类号:** TV882.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20180647

## 1 研究背景

黄河自西向东流经九省区, 以占全国2%的河川径流量, 承担了全国15%的耕地面积和12%的人口供水重任, 为国家的经济建设、粮食安全、能源安全、生态改善等做出了突出的贡献。黄土高原位于黄河中游, 是我国最严重的水土流失与生态环境脆弱区。新中国成立以来, 经过60多年的治理, 黄土高原主色调已改变, 黄河水沙情势发生巨大变化, 据实测资料, 潼关水文站年输沙量由1919—1959年的16亿t减少至2010年以来的1.5亿t, 减少约90.6%。黄河水沙情势剧变, 已影响黄土高原乃至黄河流域现有规划与治理参照依据的科学性和适宜性, 直接关系到黄河水沙调控体系布局 and 下游宽滩区治理方向等未来治黄方略的制定<sup>[1]</sup>。

黄河属于多泥沙河流, 具有显著的地域特征。在国际上, 涉及黄河流域水沙演变机理的研究较少, 其它典型河流水沙变化研究主要集中在洪沙产输机制<sup>[2]</sup>、环境要素变化对河流输沙量影响<sup>[3-4]</sup>以及流域水循环演变规律与归因分析<sup>[5-6]</sup>, 并基于机理研究开发了不同时空尺度流域水文模型, 探讨不同情景下流域径流未来变化趋势<sup>[7-8]</sup>。未来气候情景下的径流泥沙预测, 多采用全球气候模式情景预测结果与水文模型耦合研究方法<sup>[9]</sup>。Walling和Fang分析了全球(除非洲和南美洲以外)的145条主要河流泥沙量变化情况, 认为坝库工程、水土保持措施等是河流泥沙减少的主要影响因素<sup>[10]</sup>。自1980年代以来, 国内先后设立各类科技计划围绕黄河水沙变化特性、成因、规律及发展趋势开展相关工作。如1988和1995年水利部设立两期黄河水沙变化研究基金和黄委设立三期黄河流域水土保持

收稿日期: 2018-07-16; 网络出版日期: 2018-09-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180918.0834.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402407); 国家自然科学基金应急管理项目(L1624052, 51879281); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室项目(SK12018CG04)

作者简介: 胡春宏(1962-), 男, 浙江慈溪人, 中国工程院院士, 主要从事水力学及河流动力学领域研究。

E-mail: huch@iwhr.com

科研基金，以及国家“八五”“九五”重点科技攻关计划项目的相关课题等。“十一五”国家科技支撑计划课题“黄河流域水沙变化情势评价研究”，分析了黄河流域1997—2006年的水沙变化成因，预测了2020年和未来30~50年的水沙变化趋势<sup>[11]</sup>。“十二五”国家科技支撑计划课题“黄河中游来沙锐减主要驱动力及人为调控效应研究”系统评价了梯田、林草措施等的减沙作用及其对水沙变化的贡献率<sup>[12-13]</sup>。2013—2014年，黄河水利委员会与中国水利水电科学研究院联合开展了“黄河水沙变化研究”，对2000—2012年黄河水沙变化成因、趋势、驱动因子贡献率进行了系统分析评价，并预测了未来30~50年黄河来水来沙量<sup>[14]</sup>。

综上所述，江河水沙变化问题一直是国内外学者关注的重点<sup>[15]</sup>，特别是黄河水沙变化研究，是当前黄河治理的焦点和难点问题，也取得了一系列成果，包括黄河水沙变化特性<sup>[16]</sup>、成因<sup>[17]</sup>、规律<sup>[18]</sup>、不同措施减蚀效应及对水沙变化贡献率<sup>[19]</sup>等，并采用水保法、水文法等开展未来水沙变化趋势预测<sup>[20]</sup>，为不同时期的黄河治理开发实践提供了重要的科学依据。鉴于黄土高原侵蚀产沙问题的复杂性，在产汇流机制变化、水沙非线性关系、水沙-地貌-生态多过程耦合效应等关键机理方面认识仍有待深入，流域水沙动力学过程模拟技术仍有待突破，水沙变化趋势预测结果的精准性仍有待提高。为此，本文在黄河水沙变化过程及其特征分析基础上，辨析水沙变化趋势预测结果的差异性，并围绕黄河水沙变化趋势预测结果可信度的若干关键问题展开讨论。

## 2 黄河水沙变化过程及其特征

黄河干流全长5464 km，流域面积79.5万 km<sup>2</sup>。根据地理分布，自上而下分为三部分：内蒙古河口镇以上为上游，河口镇至河南孟津为中游，孟津以下为下游，其中干流头道拐站、潼关站和花园口站分别为黄河上、中、下游分界点的代表性控制站。黄河流域地理位置及干流主要水文站分布如图1所示。

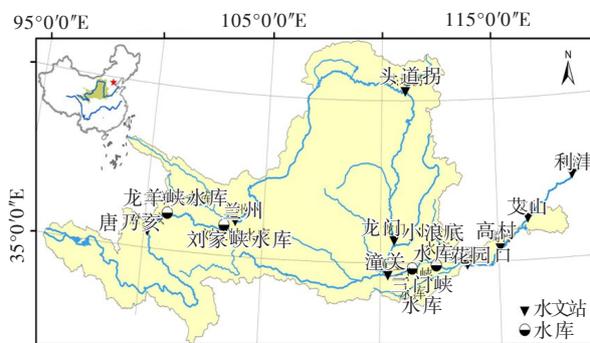


图1 黄河流域地理位置及干流主要水文站分布

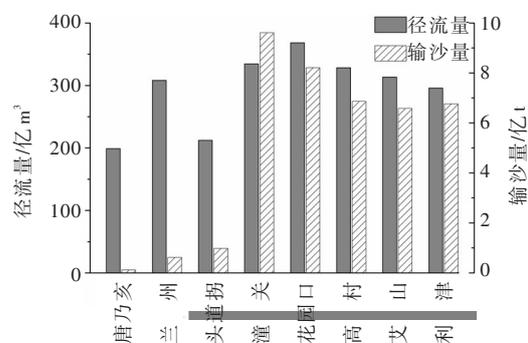


图2 黄河干流水量和沙量的空间分布

**2.1 水沙异源与地区分布极不均** 黄河干流主要水文站1950—2016年(唐乃亥站的数据起于1956年)平均径流量和输沙量对比情况如图2所示，花园口站过水量最高，为368.32亿 m<sup>3</sup>，而潼关站的泥沙输移量最高，为9.61亿 t。黄河流域来水来沙量在空间上呈现出均匀性，其中水量主要来自兰州以上冰川和降雪融水，唐乃亥站与兰州站来水量分别占全河天然径流量约37.0%和59.4%，而来沙量仅占全河沙量(潼关站沙量)的1.1%和6.4%。兰州站至头道拐站区间，年降水量少，对径流补充有限，头道拐站过水量较兰州站降低30.2%，输沙量头道拐站却比兰州站增加60.9%。头道拐至龙门区间，是黄河多沙粗沙主要来源区，该区入黄泥沙占潼关以上总输沙量的70.0%以上。由此可见，黄河来水来沙异源，地区分布不均，黄河来水量主要来自兰州以上区域，占全河的62.0%，来沙量仅占全河的7.5%；黄河泥沙主要来自头道拐至潼关区间，来沙量占全河的91.0%，来水量仅占全河的28.5%。

**2.2 水沙锐减与时空减幅不同步** 黄河水沙主要来自于上中游地区，潼关站控制黄河流域面积

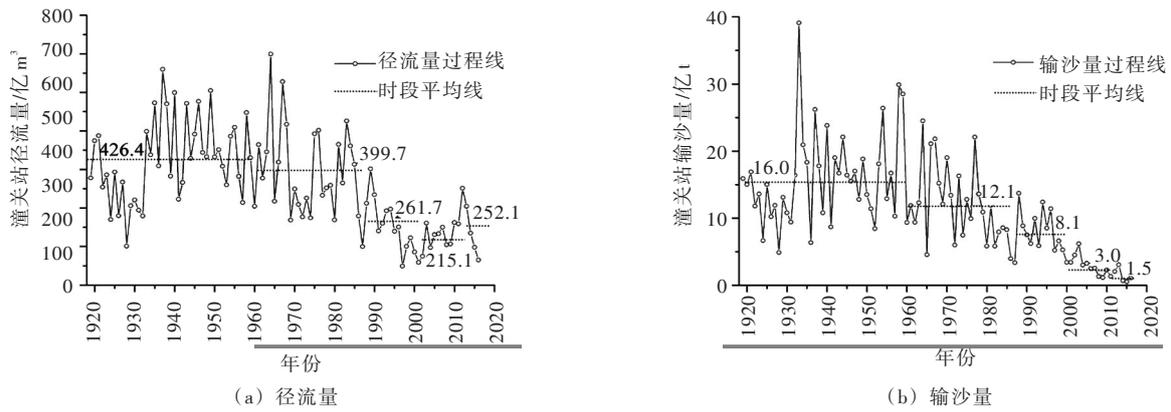


图3 1919—2016年黄河潼关水文站水沙量变化过程

表1 黄河干流主要水文站 1950—2016年径流输沙年际变化趋势

站名	类别	Z值	显著性p值	年均变化量 $\times 10^9/\text{m}^3$	突变年份
兰州	年径流量	-2.32	<0.05*	-1.1	1986
	年输沙量	-3.78	<0.001***	-0.013	1999
头道拐	年径流量	-4.30	<0.001***	-1.94	1986
	年输沙量	-5.87	<0.001***	-0.025	1985
潼关	年径流量	-6.10	<0.001***	-4.12	1985
	年输沙量	-7.40	<0.001***	-0.25	1981、1999

注：Z为M-K检验值；\*95%置信水平；\*\*\*99.9%置信水平

91%、径流量90%、泥沙近100%。通过对潼关站1919—2016年水沙过程实测资料统计分析，黄河径流量和沙量分别从1919—1959年的426.4亿 $\text{m}^3$ 和16.0亿t减少到2000—2010年的215.1亿 $\text{m}^3$ 和3.0亿t，分别减少50.4%和81.3%，特别2011年以来，潼关站沙量已锐减到1.5亿t左右，如图3所示。兰州、头道拐和潼关站1950—2016年径流量和输沙量年际变化M-K趋势性分析如表1所示，由表可见，近70年来黄河干流年径流量呈显著性减少趋势( $p < 0.5$ )，但上中游减少趋势差异较大，潼关站年径流减少趋势最为显著( $p < 0.001$ )，年均减少量达4.12亿 $\text{m}^3$ 。黄河干流年输沙量各站均呈现显著性减少趋势( $p < 0.001$ )，潼关站年输沙量减少尤为显著，兰州站最少。对各站径流输沙数据序列进行Petitt突变检验可知，三站年径流突变年份较为一致，即1985/1986年；而年输沙量突变年份各站差异较大，潼关站年输沙量减少突变年份为1981年和1999年，兰州和头道拐站则分别为1999年和1985年。

根据流域下垫面变化特征与水沙变化的突变年份，可分5个时段来分析三站水量和沙量特征值变化，如图4所示。从径流量来看，兰州站自2000年以后有明显增加，而潼关站自2010年以后才呈现增加趋势，头道拐站在区域上介于两站之间，因此，变化呈现出过渡性变化特征。从输沙量来看，相应箱线图中中值、75%分位值、25%分位值、最大值和最小值均显示了各站各阶段呈逐步递减趋势；头道拐站自1980年代后期至今泥沙量基本保持不变，而潼关站一直呈现稳步减少趋势。另外，黄河水量减少主要集中在头道拐以上，尤其在1980年代后期径流量显著减少，此后基本维持在166.61亿 $\text{m}^3$ 左右。黄河泥沙减少主要集中在头道拐至潼关区间，2011年以来潼关站输沙量减少的14.18亿t中，头道拐以上占7.4%，头道拐至潼关区间占92.6%。显然，黄河来水来沙量在1980年代后期较以前显著减少，水沙变化趋势在年际及空间分布上均不同步，但黄河水沙异源的空间分布格局仍然持续。

**2.3 汛期利于输沙的流量持续时间和相应水量大幅减少** 黄土高原土壤抗蚀力弱，大部分流域年产沙量主要是由汛期几场短历时、高强度的暴雨造成，因此，黄河来沙量对区域降雨非常敏感。由实测资料表明，黄河径流量的年内分配表现为：汛期径流量占年径流量的比例减少，年内径流量月分

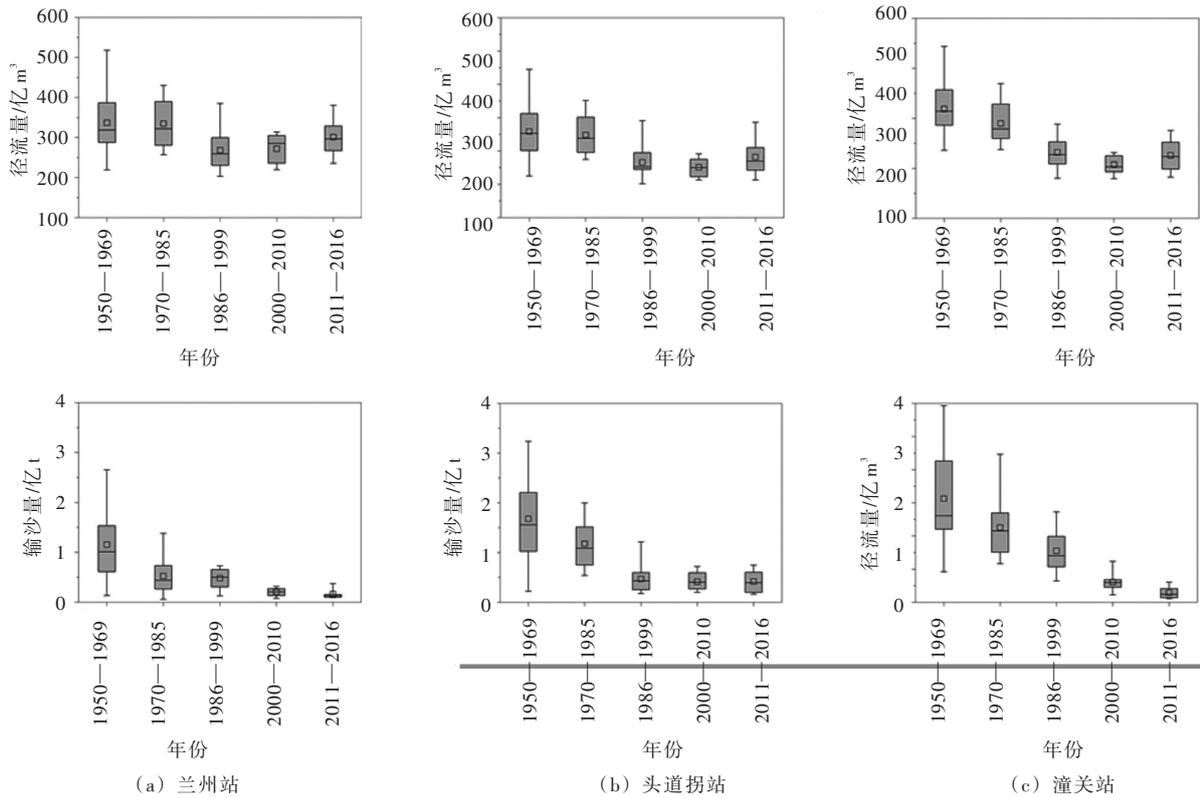


图4 黄河兰州、头道拐和潼关水文站1950—2016年水沙变化过程

配趋于均匀，如图5所示，潼关站1950—1969年汛期水量占全年水量的比例分别从59.1%下降到2010—2016年的46.0%。在黄河水沙量变化的同时，黄河水沙过程也发生了很大变化，汛期平枯水流量历时增加，有利于输沙的大流量历时和相应水量明显减少，如图6所示，2000—2012年潼关站日均流量大于2000 m³/s出现天数占汛期天数的比例由过去的62.2%减少为8.8%，大于2000 m³/s水量占汛期水量的比例由过去的75.8%减少为24.6%，大于2000 m³/s沙量占汛期沙量的比例由过去的87.2%减少为31.2%。兰州与头道拐站也具有相似的变化特性。

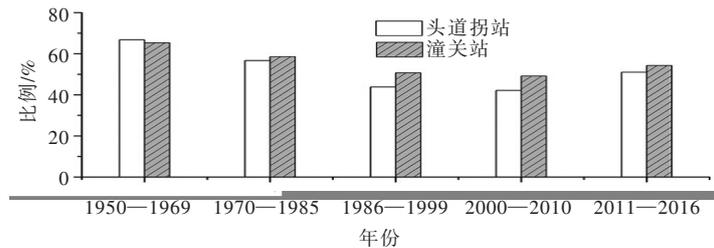


图5 黄河潼关和头道拐站不同时期汛期水量占全年水量比例变化

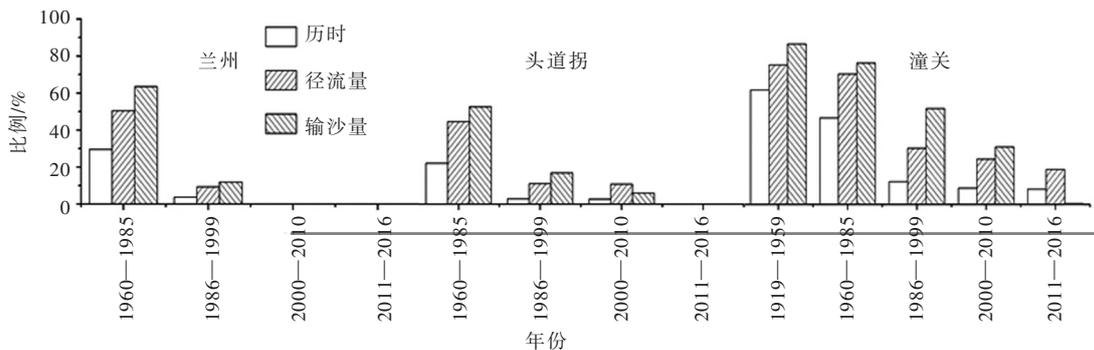


图6 黄河干流主要水文站2000m³/s以上流量级出现天数、水量、沙量占汛期比例变化过程

**2.4 含沙量的阶段变化随水利水保工程建设协同响应** 黄河单位径流输沙能力强, 受干流三门峡(1960年)、刘家峡(1968年)、龙羊峡(1985年)和小浪底(1999年)等水库蓄水淤沙影响, 各站年均含沙量发生阶段性变化, 如图7所示。唐乃亥站泥沙来源较少且上游无水库运行, 其含沙量维持在 $0.5 \text{ kg/m}^3$ 的较低水平。兰州站受上游刘家峡水库运行影响, 1968年前后含沙量从 $3.45 \text{ kg/m}^3$ 降低到 $1.48 \text{ kg/m}^3$ 。头道拐站则从1968年以前的 $6.36 \text{ kg/m}^3$ 降到刘家峡建成运行后的 $4.42 \text{ kg/m}^3$ , 1985年龙羊峡建成并联合运行后含沙量又降至 $2.71 \text{ kg/m}^3$ , 比1968年以前降低约57.4%。潼关站距离上游的刘家峡和龙羊峡水库较远, 且沙量主要来自头潼区间, 因此, 水库汛期蓄水对潼关站含沙量影响并不显著, 龙羊峡水库运行期间(1988—1999年)的含沙量比水库建设以前仅降低9.9%。而1981—1987年和2000年后两段的含沙量显著降低, 均为区间水土保持效益发挥所致<sup>[10,21]</sup>。花园口站在1981—1987年期间同潼关站一样, 含沙量急速降低至 $15.76 \text{ kg/m}^3$ , 而后在1987年后又恢复到 $26.98 \text{ kg/m}^3$ ; 1999年小浪底水库建成运行后, 含沙量再次急速降低至 $4.17 \text{ kg/m}^3$ , 此时的含沙量相当于1950—1980年间含沙量的8.4%。潼关站和花园口站在2000年后的含沙量变化趋势因主要驱动力不同而表现不同, 前者在于水土保持效应的滞后性, 使含沙量逐步减少, 而后者在于小浪底水库淤沙的及时性, 含沙量表现为急剧降低且稳定保持。

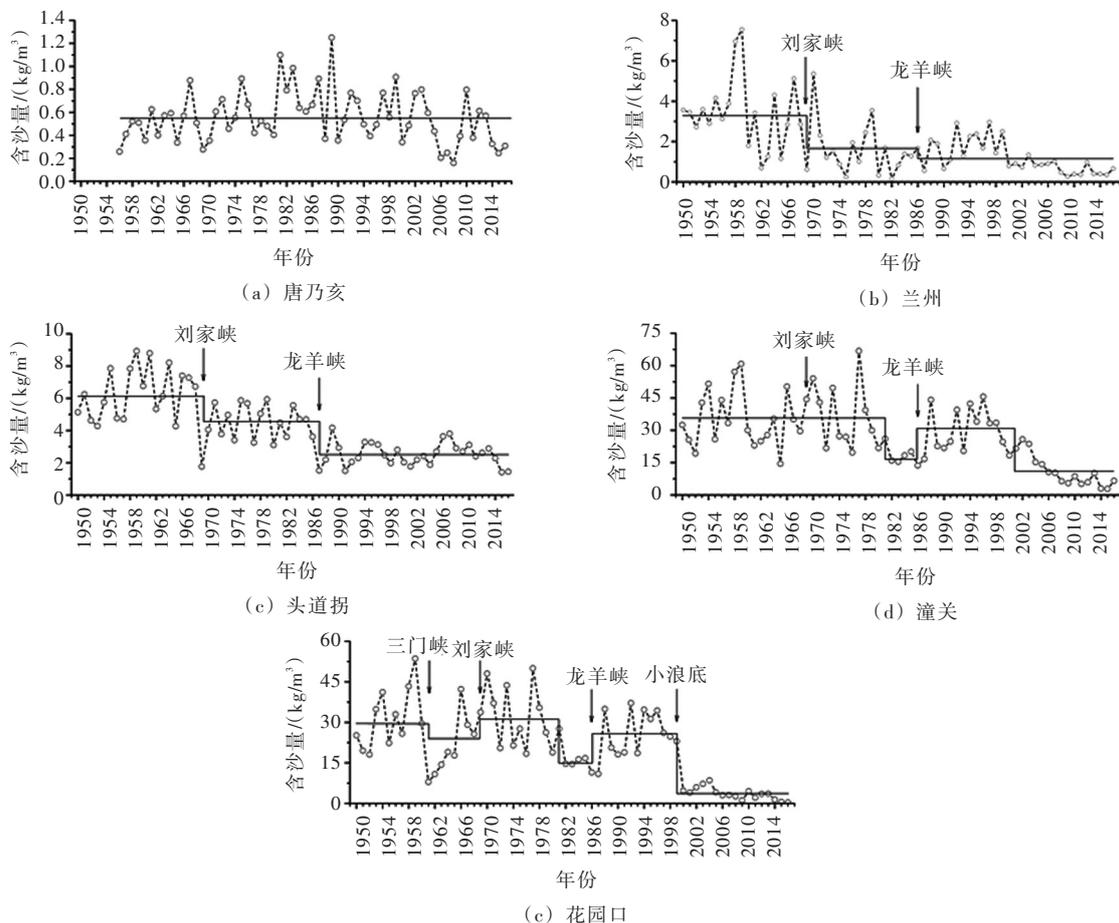


图7 黄河干流主要水文站年均悬移质含沙量变化过程

### 3 黄河水沙变化趋势预测

全球气候变化背景下的降水波动、极端气候现象频发, 干支流坝库修建等人类活动加剧, 以及资源开发和城镇化进程的持续推进, 对黄河水沙变化产生了深刻影响。因此, 预测水沙变化情势对治黄方略制定就显得尤为重要, 也一直是黄河水沙研究的重点和难点问题。

**3.1 国家科技计划项目水沙变化趋势预测** 1980年代后期至1990年代末,水利部和黄河水利委员会通过两期黄河水沙研究基金和三期水土保持科研基金,基于“水保法”与“水文法”定量评价了水土保持措施的减水减沙作用与变化趋势。研究结果显示:1970—1979年、1980—1989年、1990—1996年间,黄河中游水保、水利措施总减沙量分别是4.89亿t、6.17亿t、6.13亿t<sup>[20,22]</sup>。“八五”期间,国家重点科技攻关计划项目“黄河治理与水资源开发利用”预测认为2020年黄河流域多沙粗沙区在丰、平、枯三个水平年下的输沙量分别为20.52亿t、10.31亿t、5.44亿t<sup>[23]</sup>。“十一五”期间,姚文艺等<sup>[24]</sup>通过水文-水保-径流序列重建多方法集成,预测2030和2050年花园口水文站年来水量、年输沙量分别为236亿~244亿m<sup>3</sup>、8.61亿~9.56亿t和234亿~241亿m<sup>3</sup>、7.94亿~8.66亿t。“十二五”期间,刘晓燕等<sup>[25]</sup>采用遥感水文模型预测:在黄河古贤和泾河东庄水库拦沙期结束前,黄河中游潼关站来沙量在2030—2050年为0.7亿~1.0亿t,古贤和东庄水库拦沙期结束的2060年以后,潼关年均来沙量将恢复并维持在4.5亿~5亿t;如果黄河主要产沙区普降高强度暴雨,且该降雨情景发生在“泾河流域连续干旱11年”之后,潼关来沙量甚至可达到16亿t。胡春宏<sup>[1]</sup>采用实测资料与理论分析认为:随着国家“退耕还林”等政策的持续实施,水土保持工作的持续开展,今后黄土高原下垫面将继续向好的方向发展,入黄水量和沙量仍将继续减少,但减少的幅度将降低,并逐步趋于稳定,预计未来50~100年,潼关水文站年平均水量将逐步稳定在210亿m<sup>3</sup>/a左右,年平均输沙量将逐步稳定在3亿t/a左右。

**3.2 黄河流域综合规划与专项研究水沙变化趋势预测** 2013年国务院批准的《黄河流域综合规划(2012—2030年)》报告指出:相对于黄河16亿t泥沙和426亿m<sup>3</sup>水量,现状入黄泥沙年平均减少量为4亿t/a,年平均减水量为10亿m<sup>3</sup>;2020年和2030年入黄泥沙年平均减少量分别为5亿~5.5亿t/a和6亿~6.5亿t/a,年平均减水量分别为15亿m<sup>3</sup>/a和20亿m<sup>3</sup>/a;即使经过长时期治理,2050年前后入黄泥沙年平均减少量为8亿t/a左右<sup>[26]</sup>。

2014年,“黄河水沙变化研究”在已有研究成果基础上,通过调查研究、实地考察和综合分析认为:未来水沙变化仍以人类活动影响为主,综合考虑黄河水沙问题的复杂性、未来主要因素对黄河水沙变化影响的发展趋势以及一些不确定性因素,预估在黄河古贤水库投入运用后,未来30~50年黄河潼关水文站年均径流量为210亿~220亿m<sup>3</sup>,年均输沙量为3亿~5亿t;考虑到规划的淤地坝实施进度有可能滞后于预期,淤地坝在未来50~60年仍可能会发挥少部分拦沙作用,预估未来50~100年潼关水文站年均径流量为200亿~210亿m<sup>3</sup>,年均输沙量为5亿~7亿t<sup>[14]</sup>。

**3.3 黄河水沙变化趋势预测结果差异辨析** 黄河水沙变化预测成果直接关系到黄河治理开发方略制定,因此,各时段均有国家计划课题资助开展相关研究,并取得了相应条件下的预测结果,如表2所示。由表可见,2020年前后及未来50年各时段的泥沙预测值差异都很显著。根据水文站实测数据可明晰2020年左右的预测值在1亿t左右更贴近实际,而未来50年的三类预测结果:8亿t/a、5亿t/a和3亿t/a,则仍需科学评估以确定最可能接近实际的值。表2中各时段的预测方法与预测基准期基本一致,那么预测结果差异为何如此之大。

首先,各阶段对流域生态-地貌-水文耦合系统的过程、机理及互馈机制等认知不一,且目前仍有许多仅局限于定性认识而难于定量表述,表现为越早期的预测越偏离实际。例如,随着流域下垫面覆被的变化,坡面微地形与土壤结构随之变化,坡面的产汇流和流域的水沙关系也可能发生变化,那么传统的水文法预测水沙变化趋势必然出现偏差。

其次,影响流域水沙变化的各措施在较为宽泛的时空尺度上协同演化与协同驱动,其群体效应难于定量表达与计算,而水保法中各措施的减蚀作用只是在小区单项措施监测结果的基础上,直接上推至流域尺度并通过分类计算后的线性叠加来测算各措施的减水减沙效应,无法对措施的耦合作用进行非线性计算,忽略了各措施间的群体效应。

另外,评价方法、技术本身存在天然缺陷,使水沙变化趋势预测失去可信的理论基础。以水文法为例,径流受降水和人类活动影响,其函数关系如下:

$$Q=f(P, H) \quad (1)$$

表2 不同时期黄河沙量预测结果对比

作者/项目	基准期	预测沙量/亿 t			预测区域 (控制站)	预测方法
		2020年	未来30~50年	未来50~100年		
张胜利 <sup>[23]</sup> “八五” 国家攻关	1919—1970年	5.4~20.5	-	-	多沙粗沙区 (龙门站)	水文法、 水保法
姚文艺 <sup>[24]</sup> “十一五” 科技支撑	1919—1959年	9.9	7.9~8.6	-	黄河上中游 (花园口站)	SWAT模型
		5.3	6.6~7.5	-		水保法
刘晓燕 <sup>[25]</sup> “十二五” 科技支撑	1919—1959年	2.6~4.6	0.7~1.0	4.5~5.5	黄河上中游 (潼关站)	遥感水文模型
胡春宏 <sup>[1]</sup>	1919—1959年	-	1.0~3.0	3.0	黄河上中游 (潼关站)	水文法、 水保法
黄河流域综合规划 (2012—2030年) <sup>[26]</sup>	1919—1959年	10.5~11.0	9.5~10.0	8.0	黄河上中游 (潼关站)	水文法、 水保法
黄河水沙变化 研究 <sup>[14]</sup>	1919—1959年	-	3.0~5.0	5.0~7.0	黄河上中游 (潼关站)	水文法、 水保法

式中： $Q$ 为径流； $P$ 为降雨； $H$ 为人类活动。

对式(1)作泰勒展开得到下式：

$$Q = Q_0 + \frac{\partial Q_0}{\partial P_0} \Delta P + \frac{\partial Q_0}{\partial H_0} \Delta H + \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 Q_0}{\partial P_0^2} (\Delta P)^2 + 2 \frac{\partial^2 Q_0}{\partial P_0 \partial H_0} \Delta P \Delta H + \frac{\partial^2 Q_0}{\partial H_0^2} (\Delta H)^2 \right] + O \left[ (\Delta P)^2 + (\Delta H)^2 \right] \quad (2)$$

式中： $\frac{\partial^2 Q_0}{\partial P_0^2} (\Delta P)^2$ 和 $\frac{\partial^2 Q_0}{\partial H_0^2} (\Delta H)^2$ 分别为降雨 $\Delta P$ 和人类活动 $\Delta H$ 的非线性项； $2 \frac{\partial^2 Q_0}{\partial P_0 \partial H_0} \Delta P \Delta H$ 为降雨 $\Delta P$ 和人类活动 $\Delta H$ 的耦合作用项； $O \left[ (\Delta P)^2 + (\Delta H)^2 \right]$ 为更高阶项。

忽略式(2)中二阶及以上偏导项和混合偏导项后的评价措施效应的水文法表达式为：

$$\Delta Q = Q - Q_0 \approx \frac{\partial Q_0}{\partial P_0} \Delta P + \frac{\partial Q_0}{\partial H_0} \Delta H \quad (3)$$

显然，所有水文法均为失去非线性项的近似计算，其剔除了非线性与措施耦合作用的影响。而水保法更是单因素线性函数在结果上的统计，其不确定性和误差来源更为宽广。特别是，水文法和水保法都无法统筹考虑所有影响因素，且减水减沙指标的选择及其指标的统计来源和统计方法等存在差别，所以计算结果的差异就不可避免。水文过程模型虽较为细致刻画了生态水文过程，但同样因参数的概化表达、参数的尺度变异、参数统计来源等等，导致模拟结果存在不确定性。

同时，影响因素在不同尺度的驱动作用存在变异性，黄土高原治理格局的调整与治黄策略的变化均影响预测条件，此时的驱动机制数学表达正确，而彼时因自然条件的改变而出现偏差；且气候和社会经济结构变化及水利水保工程的规划实施存在不确定性，直接影响预测时设定的情景条件是否合理，这些都对结果产生深远影响。科学、合理的趋势预测，需在社会、经济、气候变化、宏观政策等综合分析基础上，借助于新的理论与方法进行科学评估。

#### 4 新情势下黄河水沙变化研究若干问题

黄河水沙作为一个动态变化系统，受自然过程与人工措施叠加影响，加之气候、下垫面、政策等影响因子的变化存在不确定性，使黄河水沙变化机理和机制等许多关键问题仍未厘清，导致各阶段的水沙变化趋势预测成果差异显著，影响未来黄河治理方略的制定，为了准确预测黄河水沙变化趋势，今后研究中需聚焦突破以下关键问题。

##### 4.1 流域水文系统产汇流和产输沙机制变化 气候-降水-下垫面-蒸散发-产流产沙-水沙输移构成

了流域的水文系统。认识黄河水沙变化的内在规律，即需辨识区域水文系统内水文气象规律、流域侵蚀沉积规律与河道水沙输移规律等变化，确定各要素之间相互作用和影响的定性定量关系。近年来黄河重点水土流失区的产汇流和产输沙特征出现了趋势性变化，突出表现为近期年降雨量没有明显改变而径流、泥沙显著减少，如图8所示。其中原因则是降雨特征、降雨-径流关系或者水沙产输模式发生改变。流域年内降雨量分配和降雨强度会随着气候波动而变化，因此，区域水文气象规律变化研究，需在气候模式变化分析基础上开展降雨-暴雨空间分异规律与不确定性研究。流域径流的锐减，或者是因降雨-径流关系变化进而降雨量相近却地表产流量锐减的水文模式/机制转变，或者是因人类活动加剧进而地表产流量相近却流域径流量锐减的水动力模式/机制转变，均须围绕降雨-产流机制的转化条件及其阈值进行剖析。径流侵蚀产沙与水沙输移具有强烈的非线性水动力学关系，不仅受制于流域水文-水动力模式/机制转变影响，且水利水保措施及其空间分布与时间演化的非均质性等不同程度改变水沙产输的边界条件，揭示其内在的互馈机制，将是一个艰巨的科学挑战。

**4.2 流域水沙变化驱动因子的群体效应** 流域是生态-地貌-水文耦合系统，流域水沙量变化与流域内气候气象、植被生态、坡面-沟道微地貌等条件变化密切相关，呈现出群体性、时滞性、非线性、甚至极值关系。既有研究在一定程度上揭示了气候变化(蒸散发潜力)、降水变化、下垫面条件改变对黄河流域径流变化的贡献机制，但远未厘清泥沙变化与其影响因素变化的复杂非线性关系。流域水沙输移的坡面-沟坡-沟道多过程层递耦合机制和林草植被、梯田、淤地坝等多措施耦合效应，在较为宽泛的时空尺度上协同演化，令措施的单因子相关分析法失去可信的理论基础。因此，气候、植被、坡面水保工程、沟道水利工程等各主导因素的单独贡献与群体贡献的理论关系是什么。因素独立假设下的贡献率线性叠加在什么尺度下近似成立。能否寻找到某种有效的影响因素剥离方法，让单措施的效果评估简单易行。这些相互关联的问题，无论是基础认知层面还是实践应用层面，都依赖于对多因子耦合驱动机理的深入认识。

**4.3 林草植被减蚀的临界效应与淤地坝减蚀的时效性** 通过植被覆盖率与侵蚀产沙相关关系表明(如图9所示)，黄土高原不同地貌类型区遏制侵蚀产沙的林草植被覆盖率存在阈值，在砾质丘陵区 and 盖沙区约为35%~40%，盖沙区和黄土丘陵沟壑区约为60%~70%，当小于阈值时植被改善对减沙作用显著，当大于阈值则趋于稳定<sup>[27-28]</sup>。那么，临界效应是否存在约束条件，影响临界值变化的区域特征指标是什么，同一类型区临界值在坡面-流域-景观尺度是否具有同一性，辨析这些基本科学问题在于对林草植被覆盖减蚀的动力机制进行辨识，包括植被对降雨侵蚀能力的消解作用机理、对坡面产汇流过程调控机理及对地表地下产流的再分配机理等。确定产流机制协变的植被覆盖临界，是黄土高原植被建设格局制定的基础科学问题。

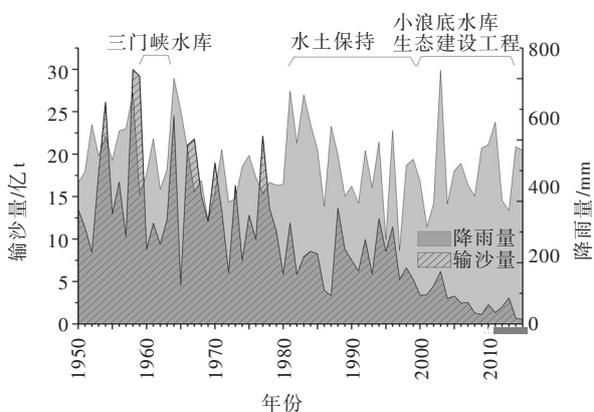


图8 黄河中游水利水保措施对输沙量变化过程的影响

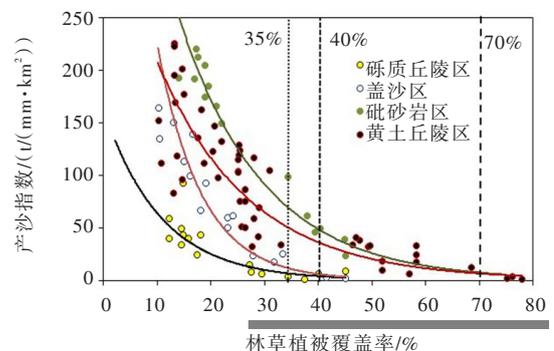


图9 黄土高原不同类型区林草植被覆盖率阈值<sup>[28]</sup>

流域淤地坝系工程作为沟道中控制泥沙下泄最直接、最有效措施，其淤满前的直接与间接减蚀效应已有共识。但鉴于坝系工程定位监测资料少，单坝建设规模与布局多样、蓄排过程动态变化，

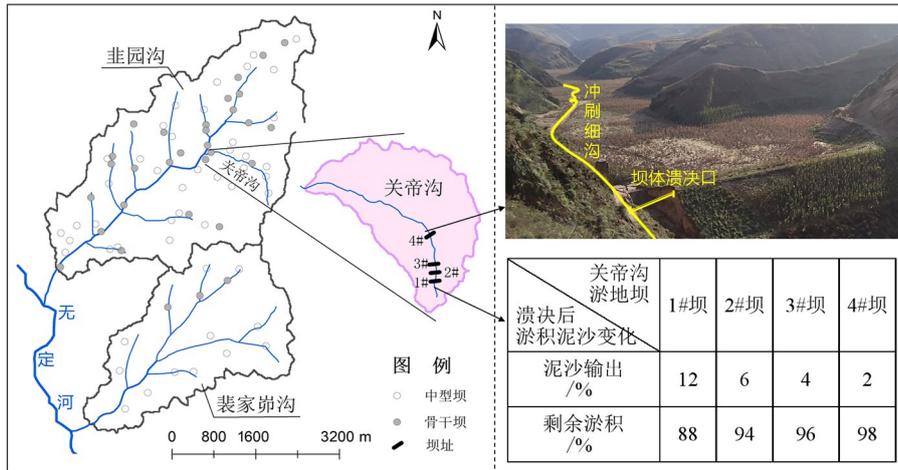


图10 黄土高原裴家茆与韭园沟淤地坝分布及“7·26”特大暴雨关帝沟坝体溃损后淤积泥沙输移变化

使淤地坝减蚀机制难于模拟，坝系拦沙成效难以定量刻画。同时，沟道淤地后侵蚀基准面抬高，对坝控沟坡的稳定及对暴雨高含沙水流侵蚀能量消减等机理研究存在不足。特别是近年，局部区域的特大暴雨导致部分淤地坝坝体出现损毁，引发了大暴雨事件是否会造成淤积耕地大面积损坏和垮塌而出现“零存整取”现象的争论。通过2017年“7·26”特大暴雨韭园沟(次降雨量156 mm)流域关地沟1—4号坝连续溃损后出库的淤积泥沙量调查，其仅占淤积量的4%~12%，坝地冲刷仅是一条洪水流路的细沟，如图10所示。那么野外调查呈现出的淤地坝“淤积一大片、冲刷一条线”如何基于水动力学过程去解译。为此，迫切需要开展极端暴雨下淤地坝溃损成因与溃损后坝地淤积泥沙输移形式、特征及其机制研究，并基于水沙动力学过程模拟与分析，辨识淤地坝工程“原地”、“异地”水沙效应，消除存在的误区，明晰淤地坝防洪减蚀的长效机制。

**4.4 流域水沙变化的动力学过程与模拟趋势预测成果的可信度评估** 黄河流域水沙变化归因分析与趋势预测多是借助于“水文法”与“水保法”<sup>[29]</sup>。2000年后，LISEM、WEPP和SWAT等国际模型<sup>[25,30]</sup>和数字流域模型<sup>[31]</sup>等国内开发的分布式模型逐步开始应用于黄土高原流域侵蚀产沙模拟和预测。但由于黄河流域是水沙-地貌-生态多过程耦合的动态系统，已有的模型在实际应用上受到很大限制。因此，构建适用性强的流域分布式模型需以水沙动力学过程为基础，建立基于地貌单元-河网水系(沟系)构建的空间离散结构相协调的物理过程，实现坡面植被生长模型、坡面水动力学模型、河道水动力学模型的分布式耦合。为实现上述目标，需重点解决模拟技术中监测数据-基础过程-模型分辨率的尺度协调、模型单元的本构模型与模型参数的过程协调、措施耦合作用数学表达等关键技术，并优化计算效率，提升模型实用性。

此外，由于各类模型可能存在某种假定、某些算法的近视或某些参数的概化表达，而模型的输入、参数和结构等又会引发输出结果的不确定，且各类模型由于结构的差异会导致输入数据的分辨率和结构参数等标准不一，使流域水沙变化模拟结果千差万别，甚至相互矛盾。为保证流域水沙变化模拟、预测结果的科学性和实用性，迫切需开展不同预测方法的集合评估，即构建基于各类方法输入、参数、结构和输出等综合评价的集合评估技术，科学确定输出值及其置信区间。集合评估不同于集合预报，前者是在对各类预测结果综合评价基础上提出最靠近真值的值，后者是对同一系统分段模拟来集合输出一个结果，后者是前者的对象。水沙变化不同模拟和预测方法的集合评估，有助于突破黄河水沙趋势预测难于形成一致共识的桎梏，为科学预测未来常态水沙情势提供重要依据。

**4.5 黄土高原水土保持治理格局调整** 新中国成立以来，黄土高原先后实施了坡面治理、小流域综合治理以及退耕还林草工程等，生态环境保护与治理工作取得显著成效。但同时，面对流域减水减沙现状、社会经济结构调整与区域气象-水文系统自我协调约束等，特别是退耕还林工程的持续实施，黄土高原生态保护与治理格局面临新的调整需求。如局部区域植被演替已到高级阶段或者植被覆盖度已到上限，有的地质单元因退耕还林出现耕地面积不足等，那么这些区域的林草植被改善是

表3 2017年无定河流域“7·26”特大暴雨典型坝系流域水沙输移特征

流域	面积 (/km <sup>2</sup> )	降雨历 时/h	降雨量 /mm	径流深 /mm	洪峰流量 /(m <sup>3</sup> /s)	最大含沙 量/(kg/m)	输沙模数 /(t/km <sup>2</sup> )	淤积模数 /(t/km <sup>2</sup> )	侵蚀模数 /(t/km <sup>2</sup> )	泥沙 输移比
韭园沟	70.1	51.3	156.1	18.4	36.1	170	1914	11045	12959	0.15
裴家崓	39.3	36.5	156.7	45.5	126.1	382	7596	-	-	-

否还持续开展。又如，因农村劳动力转移到城镇致使部分区域优质梯田被大量弃耕，而部分区域坡陡沟深、地形破碎使坡地梯田化潜力不足，坡梯政策面临着如何分区域推进等问题。淤地坝工程实现了沟道侵蚀阻控与农业生产有机统一，但由于设计依据的标准陈旧及下垫面变化，新建坝系很难短时期淤满，给汛期防洪带来巨大压力，导致目前淤地坝建设出现了停滞。根据2017年无定河流域“7·26”特大暴雨水土保持综合考察结果显示，韭园沟217座淤地坝中骨干坝27座(主沟道分布9座)、中型坝40座，虽次暴雨流域侵蚀模数达12 959 t/km<sup>2</sup>，但流域泥沙输移比仅为0.15；而裴家崓63座淤地坝中骨干坝0座、中型坝15座，其中14座中、小型淤地坝可拦沙，但仅拦沙6.9万t，输沙模数约是韭园沟的4倍，如图10和表3所示。可见虽然流域下垫面治理措施变化整体向好，但大暴雨事件下淤地坝仍是泥沙的重要汇集地，尤其骨干坝对径流与洪峰削的减作用显著(韭园沟建有骨干坝)，沟道拦沙与水肥耦合的高产坝地仍有广阔的实际需求。因此，在黄河水沙新常态背景下，无论从黄土高原未来治理措施类型与布局，还是措施实施方式与进度安排，均应在以上问题剖析基础上科学筹划、因地制宜、精准实施，适时调整黄土高原治理格局与治理模式。

**4.6 维持黄河流域健康的水沙调控阈值体系与治理方略** 流域水沙运动的通量大小、滞留时间、空间分布，不仅影响着干流河道的水沙输移和冲淤演变、进而影响着干流的生境、生态和防洪等条件，也影响着流域面上的生态功能以及社会经济服务功能。在水沙变化的情势下，入黄水沙总量和时空分布特性，关系到黄河重点水土流失区治理、水资源利用及水沙调控体系运用的大方向，是面向黄河治理实践所提出的重大需求。具体说黄河干流河道防洪减淤、黄河下游宽河治理，从行洪输沙、河道冲淤、水库调度、河流生态等不同角度，提出了中下游控制节点的河床高程、平滩流量、河道冲淤量和生态流量等阈值需求。另一方面，黄河流域水沙产输过程是气象水文、地貌、生态等自然过程和人类活动影响的综合结果，存在多尺度的水沙产输模式以及模式转变的气候与下垫面环境条件阈值体系。维持黄河流域健康的水沙阈值，是流域水沙产输过程与干流河道演变过程协调优化的结果，也是未来流域-河道系统处于近似常态平衡的指标体现。

显然，黄河水沙调控阈值具有丰富的内涵，今后相当长一段时期内紧密围绕水沙变化的趋势、减少的程度、稳定的范围以及由此带来的一系列新问题开展研究，确定现状向未来新常态演化的水沙调控阈值体系，并在此基础上制定相适应的水沙关系调控和下游河道改造等治黄方略。具体治理措施包括<sup>[1]</sup>：加快建设完善黄河水沙调控体系，塑造与维持黄河基本的输水输沙通道，中游降低潼关高程，下游改造河道，黄河口相对稳定流路。其中对应的每项具体措施，仍需开展深入持续的研究工作，明确措施调控的阈值与实现方法。

## 5 结语

本文在对1950—2016年黄河水沙变化过程分析的基础上，梳理了不同阶段各家水沙变化趋势预测成果，辨析了预测结果差异显著的原因，并提出了实现水沙变化趋势准确预测需加强研究的若干关键问题，得到如下认识：(1)1980年代中期以来，黄河水沙情势发生巨变，黄河水沙锐减，时空减幅不同步，年内利于输沙的流量持续时间和水量、沙量都大幅减少，含沙量则与水利水保工程建设呈现协同的阶段变化，黄河水沙异源的空间分布格局仍然没变。(2)黄河水沙变化趋势预测多借助于“水保法”、“水文法”和“物理过程模型法”等方法开展研究，但黄河流域是水沙-地貌-生态多过程耦合、自然过程与人工措施效应叠加、产汇流产输沙的水动力驱动等复杂交互影响的系统，由于对相

关机理认识有待深化,不同措施耦合效应的评价与预测结果可信度评估技术有待突破,影响预测的参照条件存在不确定性,导致了不同时期的预测成果差异显著。(3)为准确预测新情势下黄河水沙变化趋势,需围绕流域产汇流机制变化辨析、水沙变化的驱动因子群体效应、措施水沙效应的极限值与时效性、水沙变化趋势预测结果的可信度评估、黄土高原水土保持治理格局调整和黄河水沙调控阈值体系及其治理方略等关键问题开展深入研究。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报,2016,35(10):1-11.
- [ 2 ] GAO P, GEISSEN V, RITSEMA C J, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(3): 961-972.
- [ 3 ] ALLEN M R, INGRAM W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 2002, 419(6903): 224-232.
- [ 4 ] TAIKAN O, SHINJIRO K. Global hydrological cycles and world water resources [J]. Science, 2006, 313 (5790): 1068-1072.
- [ 5 ] BARNETT T P, PIERCE D W, HIDALGO H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States[J]. Science, 2008, 319(5866): 1080-1083.
- [ 6 ] SHILONG P, PHILIPPE C, YAO H, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [ 7 ] ZHENG C. MIKE SHE: Software for integrated surface water/ground water modeling[J]. Ground Water, 2008, 36(6): 797.
- [ 8 ] ARNOLD J G, WILLIAMS J R, MAIDMENT D A. Continuous-time water and sediment routing model for large basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 21(2): 171-183.
- [ 9 ] NIJSSEN B, O' DONNELL G M, HAMLET A F, et al. Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change [J]. Climatic Change, 2001(50): 143-175.
- [ 10 ] WALLING D E, FANG D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world rivers[J]. Global and Planetary Change, 2003, 39: 111-126.
- [ 11 ] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [ 12 ] 刘晓燕,杨胜天,金双彦,等.黄土丘陵沟壑区大空间尺度林草植被减沙计算方法研究[J].水利学报,2014,45(2):135-141.
- [ 13 ] 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):1293-1300.
- [ 14 ] 水利部黄河水利委员会.黄河水沙变化研究[R].郑州:黄河水利委员会,2014.
- [ 15 ] 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: 223-243.
- [ 16 ] 姚文艺,高亚军,安催花,等.百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析[J].水利水电科技进展,2015,35(5):112-120.
- [ 17 ] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] GAO P, MU X M, WANG F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15: 1-10.
- [ 20 ] 冉大川.黄河中游水土保持措施减沙量宏观分析[J].人民黄河,2006,28(11):39-41.
- [ 21 ] 赵文林.黄河泥沙[M].郑州:黄河水利出版社,1996.
- [ 22 ] 康玲玲,张胜利,魏义长,等.黄河中游水利水土保持措施减沙作用研究的回顾与展望[J].中国水土保持科学,2010,8(2):111-116.

- [ 23 ] 张胜利, 康玲玲, 魏义长. 黄河中游人类活动对径流泥沙影响研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- [ 24 ] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616.
- [ 25 ] 刘晓燕, 党素珍, 张汉. 未来极端降雨情景下黄河可能来沙量预测[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 13-17.
- [ 26 ] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划(2012—2030年)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013.
- [ 27 ] ZHANG X M, WU S H, CAO W H. Dependence of sediment delivery ratio on scale and its fractal characteristics [J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30(4): 338-343.
- [ 28 ] 刘晓燕, 杨胜天, 李晓宇, 等. 黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制[J]. 中国科学(技术科学), 2015, 45(10): 1052-1059.
- [ 29 ] 姚文艺, 焦鹏. 黄河水沙变化及研究展望[J]. 中国水土保持, 2016(9): 55-64.
- [ 30 ] YU Xinxiao, ZHANG Xiaoming, NIU Lili. Simulated multi-scale watershed runoff and sediment production based on GeoWEPP model[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(4): 465-478.
- [ 31 ] 李铁键. 流域泥沙动力学机理与过程模拟[D]. 北京: 清华大学, 2008.

## Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predictions in the Yellow River

HU Chunhong, ZHANG Xiaoming

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

**Abstract:** The condition of runoff and sediment in Yellow River has greatly changed since mid-1980s. Under the new circumstances, a clear understanding in process, characteristics and the key issues of runoff and sediment changes, is of great importance to focus the key scientific problems and support the ecological civilization constructions in the Yellow River Basin. In this study, the changing process and trend of runoff and sediment in the Yellow River Basin during the period of 1950-2016 were analyzed. Meanwhile, the previous predictions and causes of runoff and sediment were reviewed and analyzed. The results show that the runoff and sediment in the Yellow River declined sharply in recent years, with unsynchronized of magnitude. Both the time duration of runoff and the amount of runoff and sediment, which are good for sediment transport, were reduced. Changes of sediment concentration were synchronized with soil and water conservation engineering. In the previous researches, the soil conservation method, hydrologic method and the physical-based modelling method were adopted in the runoff and sediment predictions. Differences of predictions in different historical period were obvious. Insufficient recognition of mechanism, absence of evaluation technique, and uncertainty of prediction conditions, were the main causes. Under the new circumstances, in order to improve predictions in runoff and sediment in Yellow River, more scientific researches need to be strengthened, including the mechanism of runoff and sediment changes, group effect of the driving factor, the credibility evaluation of runoff and sediment predictions, and management strategy of the Yellow River.

**Keywords:** mechanism of runoff and sediment change in Yellow River; group effect; trend prediction; assembly assessment; management strategy

(责任编辑: 李福田)