

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0097

张青青, 钟德钰, 贾宝真. 黄河中游水沙变化归因分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 976-987. ZHANG Q Q, ZHONG D Y, JIA B Z. Attribution analysis of runoff-sediment variation in the middle Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 976-987. (in Chinese)

黄河中游水沙变化归因分析

张青青^{1,3}, 钟德钰^{1,2}, 贾宝真⁴

(1. 青海大学水利电力学院, 西宁 810016; 2. 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016;
3. 青海大学昆仑学院, 西宁 810016; 4. 中规院(北京)规划设计有限公司, 北京 100084)

摘要: 采用基于模糊互判断矩阵的层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)分析人类活动和气候变化对黄河中游水沙变化的贡献率, 并将 FAHP 法分析的结果与累积量斜率变化率比较法(slope changing ratio of cumulative quantity, SCRCQ)分析的结果进行对比, 2 种方法计算结果变化规律一致。结果表明: 气候变化对径流和泥沙的影响小于人类活动的影响, 1970 年代、1980 年代、1990 年代、2000 年代人类活动对径流减少的贡献率分别为 68%、64%、64%、75%, 人类活动对泥沙减少的贡献率分别为 45%、65%、59%、69%。

关键词: 黄河中游; 人类活动; 气候变化; 水沙变化; 贡献率

中图分类号: TV142 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



黄河是中华民族的母亲河, 近几十年来, 黄河水沙变化剧烈, 花园口站 1986—2020 年实测年均径流量和输沙量, 相对于 1950—1985 年分别减少 40%、78%, 给黄河流域生态保护与高质量发展带来了很大的不确定性。自 1980 年代以来, 学者们^[1-2]对黄河水沙变化特性、成因、规律及发展趋势方面做了大量研究, 取得了多项成果, 为黄河的开发利用和治理提供了重要的科学依据, 其中人类活动和气候变化对黄河水沙变化的影响研究是热点之一。以往研究区域多集中于黄河中游地区, 见图 1。姚文艺等^[3]采用水文法和水保法研究了黄河中游人类活动和气候变化的贡献率, 得出 1997—2006 年黄河中游人类活动对径流和泥沙的贡献率分别为 70%(水文法)/80%(水保法)、50%(水文法)/80%(水保法)的结论。时明立^[4]采用水文法研究了河龙区间人类活动和气候变化的贡献率, 结果表明在 1970 年代、1980 年代人类活动对径流的影响约占 80%, 而对泥沙的影响约占 50%。尹国康^[5]采用流域水沙统

计模型研究了多沙粗沙区人类活动和气候变化的贡献率, 认为多沙粗沙区 1980 年代人类活动对径流和泥沙的影响均大于气候变化的影响。总体来看, 人类活动主要表现在水利水保工程建设引起的下垫面条件的变化以及经济社会发展对水量需求的增加, 气候变化主要表现在降水的变化, 而人类活动对黄河径流和泥沙的影响整体呈上升的趋势, 气候变化对黄河径流和泥沙的影响整体呈下降的趋势, 自 1990 年代以后, 人类活动的影响加剧, 见图 2。

无论是研究人类活动还是气候变化对减水减沙的贡献率, 均需先确定天然状态下时段的水沙量, 再计算出人类活动和气候变化明显时段的实际水沙量, 两者之差即为减少量, 从而得出贡献率。主要研究方法有: 双累计曲线法^[6-8]、多元回归分析法^[9-12]、累积量斜率变化率比较法^[13-15]、不同系列对比分析法^[4]、水文法^[3]、水保法^[3]、分离评判法^[16-17]等。双累计曲线法简单、直观、实用, 但应用时两个要素应该具有相同物理成因或明确的因果关系, 且

收稿日期: 2022-01-29 修回日期: 2022-09-19 网络出版时间: 2022-10-21

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221020.1754.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(91547204)

作者简介: 张青青(1988—), 女, 湖北宜昌人, 讲师, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 1256737600@qq.com

通信作者: 钟德钰(1970—), 男, 甘肃金昌人, 教授, 博士, 主要从事泥沙运动基本理论与水沙运动数值模拟研究。E-mail: zhongdy@tsinghua.edu.cn

参考变量不受其他因素影响^[18]。多元回归分析法因各影响因素的权重赋值存在人为性,不同研究者采用该方法研究的同一对象的结果相差较大^[19]。累积量斜率变化率比较法(slope changing ratio of cumulative quantity, SCRCQ 法)能够避免多元回归分析法中的人为因素,也能在一定程度上消除实测数据年际波动的影响,但其有假设前提:水沙量只受降水量的影响^[19]。不同系列对比分析法基于流域大规模的水利水保措施实施前后的实测水文泥沙资料^[4],工作

量大且数据的覆盖面具有一定的局限性。水文法首先基于水土保持治理前的实测水沙资料构建降雨产流产沙模型,然后将治理后的降雨因子代入模型,通过比较模型计算的水沙量和实测水沙量得出减水减沙量^[3]。水保法基于水土保持测试站的小区域观察资料来确定不同水土保持措施的减水减沙指标,再通过线性叠加得到减水减沙量^[3]。分离评判法是从人类活动影响期和基准期的径流变化比例的角度分解气候变化和人类活动对径流变化的贡献率^[20]。

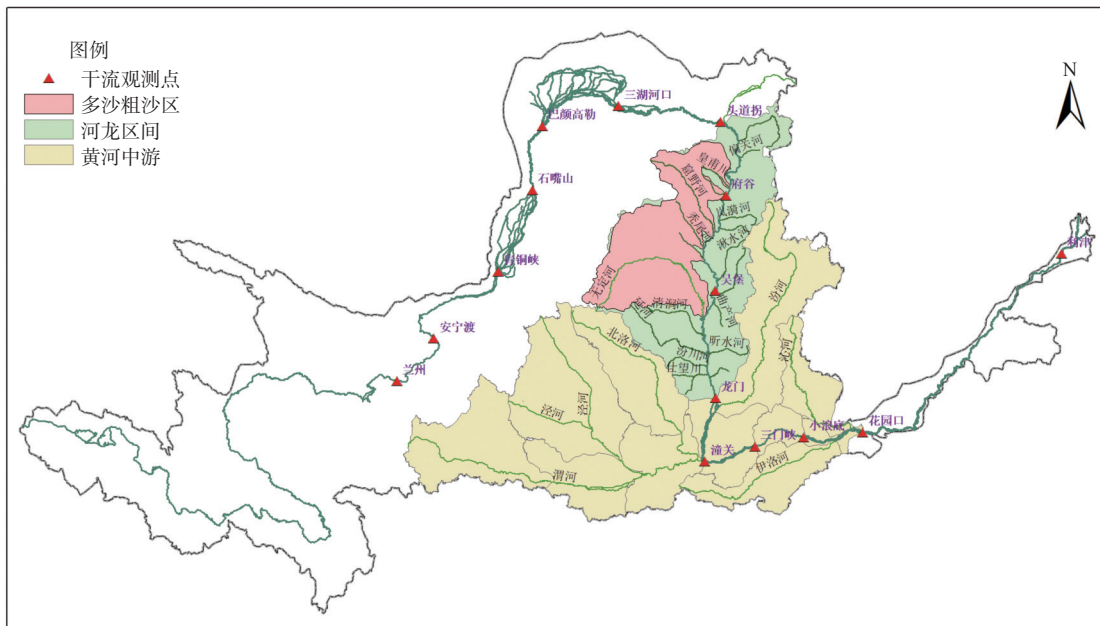


图1 学者们研究的各区域
Fig. 1 Regions studied by scholars

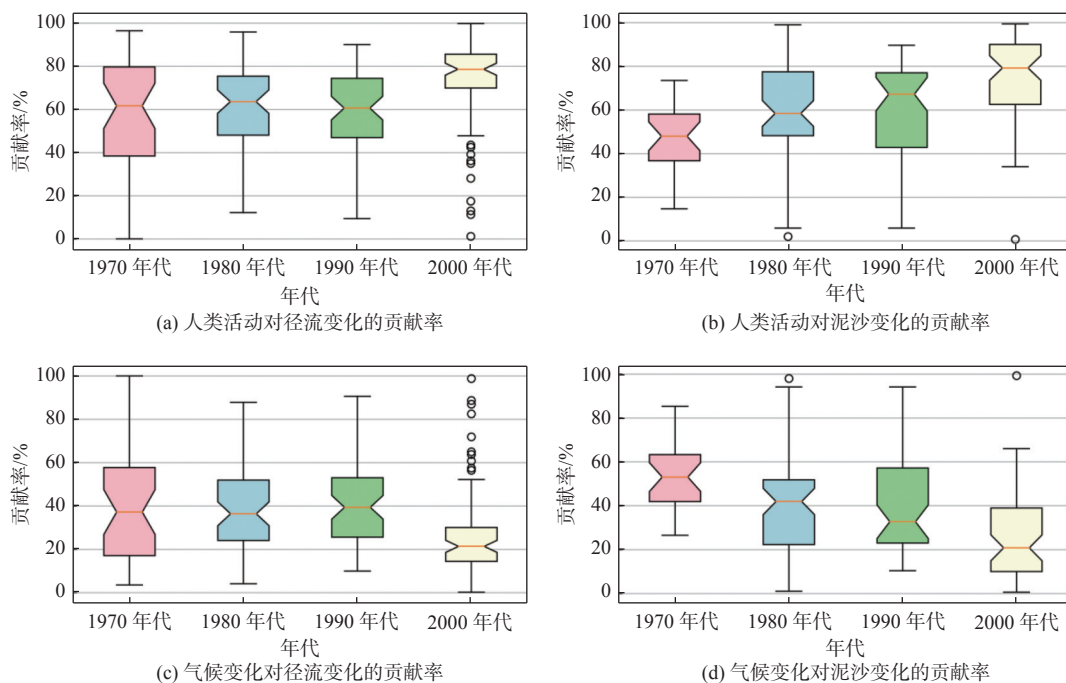


图2 现有学者研究结果汇总
Fig. 2 Summary of existing research results

综上所述,以上各研究方法使用的水文序列获取途径基本分为两类:一是常规水文时序观测数据;二是小规模试验数据。另外不同的研究方法大多存在假设前提。数据资料的来源不同、方法应用的假设前提不同、试验区域的局限性势必会造成对同一区域的水沙变化归因分析的结果存在差异,见图 2(所涉及的参考文献见表 2)。因此,为了综合考虑现有学者的研究优势,采用基于模糊互判断矩阵的层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP),提取现有学者研究的人类活动和气候变化对黄河径流和泥沙减少量贡献率结果的影响因子,分析黄河中游水沙变化的人类活动贡献率和气候变化贡献率,并将 FAHP 法计算的结果与 SCRCQ 法计算的结果进行了对比。

1 基于 FAHP 法的水沙变化归因分析

基于模糊互判断矩阵的层次分析法(FAHP)属于主观权重分配法,是由美国运筹学家 T.L. Saaty 教授提出的系统分析方法,该方法是通过比较指标之间的重要性来构建模糊一致性矩阵,从而实现权重分配,达到综合分析的目的,指标体系的构建是该方法分析的基础。采用此方法分析人类活动和气候变化对黄河中游水沙变化的贡献率,指标筛选的依据为研究区域的代表性。对黄河中游 25 条主要支流控制流域及文献资料收集的 9 个研究区域的代表性进行分析,最终确定 FAHP 法分析径流变化贡献率的指标共有 11 个区域,分析泥沙变化贡献率的指标共有 10 个区域。

1.1 区域代表性

不同学者研究人类活动和气候变化对水沙变化的贡献率,因研究区域的面积和产水产沙特性不同,其结论相对于黄河中游的代表性的强弱也不同。研究区域面积越大,其代表性可能越强;研究区域的产水产沙量越大,其代表性可能也越强。引入代表性系数 C 表征不同研究区域相对于黄河中游水产沙的典型性,计算公式为

$$C_r = \frac{R_a}{R_{\text{总}}} \times \frac{A_a}{A_{\text{总}}} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{S_a}{S_{\text{总}}} \times \frac{A_a}{A_{\text{总}}} \quad (2)$$

式中: C_r 和 C_s 分别为不同研究区域产水产沙的代表性系数; R_a 和 S_a 为不同研究区域径流量和输沙量; $R_{\text{总}}$ 和 $S_{\text{总}}$ 为黄河中游径流量和输沙量; A_a 为不同研究区域面积; $A_{\text{总}}$ 为黄河中游面积。

黄河中游是流域泥沙主要来源区,向黄河贡献

了 97% 的泥沙,主要支流共 25 条,流域面积约为 35 万 km^2 。河龙区间流域面积为 11 万 km^2 ,占黄河中游流域面积的 32%,主要支流共 19 条。多沙粗沙区主体位于河龙区间,占河龙区间流域面积的 76%,是造成黄河泥沙淤积的主要产沙区,占黄河输沙量的 92%,主要支流共 6 条。河口镇-潼关流域区间主要支流共 23 条,龙门-潼关流域区间主要支流共 4 条,三门峡-花园口流域区间主要支流共 2 条。各区域主要支流见图 1。根据科学出版社出版的《黄河水沙时空图谱》(第二版)可查得黄河中游 25 条主要支流水沙量占黄河中上游总水沙量的比例,归一化处理,得到 25 条主要支流径流量和输沙量占比。其他研究区域径流量和输沙量占比根据支流组成确定。根据式(1)和式(2)计算出研究区域相对于黄河中游径流量和输沙量的代表性系数,黄河中游不同控制区域径流占比、输沙占比及代表性系数见表 1。

为了在 FAHP 法计算结果不受影响的前提下,避免冗长引文,表 1 中代表性系数小于 0.01 的区域不考虑,则:相对于黄河中游径流而言,研究区域的代表性顺序为:黄河中游>河口镇-潼关>龙门-潼关>泾渭洛河流域>河龙区间+北洛河+泾河>河龙区间+北洛河>渭河流域>河龙区间>多沙粗沙区>三门峡-花园口>泾河流域;相对于黄河中游泥沙而言,研究区域的代表性顺序为黄河中游>河口镇-潼关>河龙区间+北洛河+泾河>龙门-潼关>泾渭洛河流域>河龙区间+北洛河>河龙区间>多沙粗沙区>渭河流域>泾河流域。

1.2 影响因子

FAHP 法是通过比较两个指标 i 和 j 之间的重要性来确定模糊一致性矩阵元素 b_{ij} 的赋值,矩阵元素 b_{ij} 赋值在 0 到 1 之间:若指标 i 相对于指标 j 越不重要,则 b_{ij} 越接近于 0;反之,则 b_{ij} 越接近于 1。建立模糊一致性矩阵后,将指标权重 ω_{si} 进行归一化处理,得到指标的影响因子 ω_i ,由此计算出 1970 年代、1980 年代、1990 年代及 2000 年代不同学者研究结果在 FAHP 法中应用的影响因子 ω_i 。指标权重 ω_{si} 及影响因子 ω_i 计算公式如下,式中各参数含义与前述相同。

$$\omega_{si} = \frac{\sum_{j=1}^k b_{ij} + \frac{k}{2} - 1}{k(k-1)} \times (2b_{ii})^2 \quad (i, j = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

$$\omega_i = \frac{\omega_{si}}{\sum_{i=1}^k \omega_{si}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

表 1 黄河中游各区域径流与输沙占比及区域代表性系数

Tab. 1 The proportion of runoff and sediment and the representative coefficients of partial regions in the middle Yellow River

区域	控制面积/ km ²	径流占比/ %	输沙占比/ %	代表性系数		区域	控制面积/ km ²	径流占比/ %	输沙占比/ %	代表性系数	
				C _r	C _s					C _r	C _s
红河	5461	1.44	1.80	0.00022	0.00028	仕望河	2141	0.52	0.21	0.00003	0.00001
偏关河	1915	0.22	0.90	0.00001	0.00005	州川河	436	0.09	0.05	0.00000	0.00000
皇甫川	3175	0.86	4.42	0.00008	0.00040	汾河	39471	6.95	1.94	0.00774	0.00216
孤山川	1263	0.46	1.59	0.00002	0.00006	北洛河	26905	5.44	7.59	0.00413	0.00576
岚漪河	2159	0.45	0.72	0.00003	0.00004	泾河	45421	9.98	28.49	0.01278	0.03649
蔚汾河	1476	0.41	0.92	0.00002	0.00004	渭河	134766	28.05	12.44	0.10660	0.04728
窟野河	8645	3.72	7.90	0.00091	0.00193	伊洛河	18563	18.38	1.11	0.00962	0.00058
秃尾河	3253	2.49	1.60	0.00023	0.00015	沁河	13532	5.46	0.45	0.00208	0.00017
佳芦河	1121	0.41	1.31	0.00001	0.00004	黄河中游	354600	100.00	100.00	1.00000	1.00000
湫水河	1873	0.48	1.84	0.00003	0.00010	河口镇-潼关	329300	76.16	98.44	0.70726	0.91417
三川河	4102	1.59	1.55	0.00018	0.00018	河龙区间+北洛河	138900	31.18	55.57	0.12213	0.21767
屈产河	1023	0.25	0.99	0.00001	0.00003	河龙区间+北洛河+泾河	184300	41.16	84.06	0.21393	0.43689
无定河	29662	8.54	11.64	0.00714	0.00974	河龙区间	112000	25.74	47.98	0.08130	0.15154
清涧河	3468	1.06	3.87	0.00010	0.00038	多沙粗沙区	85300	16.48	28.46	0.03964	0.06846
昕水河	3992	0.88	1.44	0.00010	0.00016	龙门-潼关	246600	50.42	50.46	0.35064	0.35091
延河	5891	1.56	4.81	0.00026	0.00080	三门峡-花园口	32100	23.84	1.56	0.02158	0.00141
汾川河	1662	0.3	0.39	0.00001	0.00002	泾渭洛河流域	20.71	43.47	48.52	0.25388	0.28338

1.3 贡献率

以上 11 个区域文献资料统计详情见表 2, 文献数据按不同的年代进行统计, 现有学者研究结果见图 2。从图 2 中可以看出, 人类活动对径流量和输沙量的影响呈增加趋势, 而气候变化的影响呈减小趋势, 同时, 不同时期各学者的研究结果不尽相同。

人类活动贡献率序列为 $H(1), H(2), \dots, H(n)$, 气候变化贡献率序列为 $P(1), P(2), \dots, P(n)$, 则人

类活动贡献率和气候变化贡献率公式分别为:

$$H = \omega_1 H(1) + \omega_2 H(2) + \dots + \omega_n H(n) = \sum_{i=1}^n \omega_i H(i) \quad (5)$$

$$P = \omega_1 P(1) + \omega_2 P(2) + \dots + \omega_n P(n) = \sum_{i=1}^n \omega_i P(i) \quad (6)$$

表 2 文献资料统计

Tab. 2 Summary of references

研究区域	径流资料参考文献	泥沙资料参考文献
黄河中游	[3,21,22,6,23,24,25]	[3,21,6,26,27,22,28,29,30,31]
河口镇-潼关	[24,32]	[32]
河龙区间	[3,4,21,24,33,11,35]	[3,4,21,29,33,34,35,36,37,38,7,39]
河龙区间+北洛河		[9]
河龙区间+北洛河+泾河		[40]
龙门-潼关	[3,21,24,11]	[3,21]
多沙粗沙区	[5,41]	[5,41,9,42]
三门峡-花园口	[43]	
渭河流域	[33,44,16,10,8,45,17,46]	[3,33,46,47]
泾河流域	[33,12,48,49,50,51]	[3,33,48,50]
泾渭洛河流域		[3,29]

式中: $H(i)$ 和 $P(i)$ 分别为现有学者对人类活动和气候变化对径流和泥沙减少量的贡献率; ω_i 为不同学者研究结果的影响因子。

基于 FAHP 法得出的人类活动和气候变化对黄河中游径流和泥沙减少量的贡献率见表 3。

表 3 人类活动和气候变化对黄河中游水沙变化的贡献率 (FAHP 法)

Tab. 3 Contribution rate change of human activities and climate change in the middle Yellow River (FAHP) %

年代	人类活动贡献率		气候变化贡献率	
	径流	泥沙	径流	泥沙
1970年代	68	45	32	55
1980年代	64	65	36	35
1990年代	64	59	36	41
2000年代	75	69	25	31

2 讨论

2.1 与 SCRCQ 法结果对比

利用常规水文时序观测数据分析人类活动和气候变化对水沙变化的贡献率的主要方法有双累计曲线法、累积量斜率变化率比较法、分离评判法,但由于本节是在假设前提“径流量和输沙量只受降水量的影响”的情况下分析人类活动和气候变化对水沙变化的贡献率,因此采用 SCRCQ 法对比分析 FAHP 法计算结果。累积量斜率变化率比较法 (SCRCQ)^[24] 方法简单易懂,能从定量的角度分析一个因素对另一个因素变化的影响程度,该方法被应用于分析黄河中游、渭河、无定河等区域的人类活动和气候变

化对水沙变化的贡献率。

黄河上游来水占黄河流域的 60% (根据头道拐站和花园口站多年平均天然径流量确定),黄河中游向黄河贡献了 97% 的泥沙,因此在分析人类活动和气候变化对黄河中游径流变化的影响时,需考虑黄河上游来水的影响,而在分析人类活动和气候变化对黄河中游泥沙变化的影响时可以只考虑代表站潼关站的输沙变化。因此黄河中游径流数据采用头道拐站和花园口站实测年径流量,而泥沙数据采用潼关站实测输沙量。降水量数据来源于中国地面气候资料日值数据集 (V3.0),共有 699 个基准、基本气象站,通过克里金插值法得出黄河中游降水量。

2.1.1 累计曲线

研究时段和基准时段与 FAHP 法一致。1956—2010 年黄河中游的径流量、输沙量、降水量随时间的累积曲线及不同时段累积曲线的线性拟合曲线及斜率见图 3, 累计曲线拟合曲线斜率计算公式见式 (7), 且相关系数均大于 0.90, 拟合程度高。潼关站径流量和输沙量变化率均为先增大后减小的趋势,其中输沙量变化率的减小趋势要比径流量大得多,不同年代降水量变化率变化不明显。若时间序列记为 $X=\{x[1], x[2], x[3], \dots, x[N]\}$, 径流量、输沙量、降水量序列记为 $Y=\{y[1], y[2], y[3], \dots, y[N]\}$, 则径流量、输沙量、降水量随时间的累积曲线斜率 a 为

$$a = \frac{(S_y \cdot S_x) / N - S_{xy}}{(S_x \cdot S_x) / N - S_{xx}} \quad (7)$$

式中, $S_x = \sum_{i=1}^N x[i]$, $S_y = \sum_{i=1}^N y[i]$, $S_{xx} = \sum_{i=1}^N x[i]^2$, $S_{xy} = \sum_{i=1}^N (x[i] \cdot y[i])$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

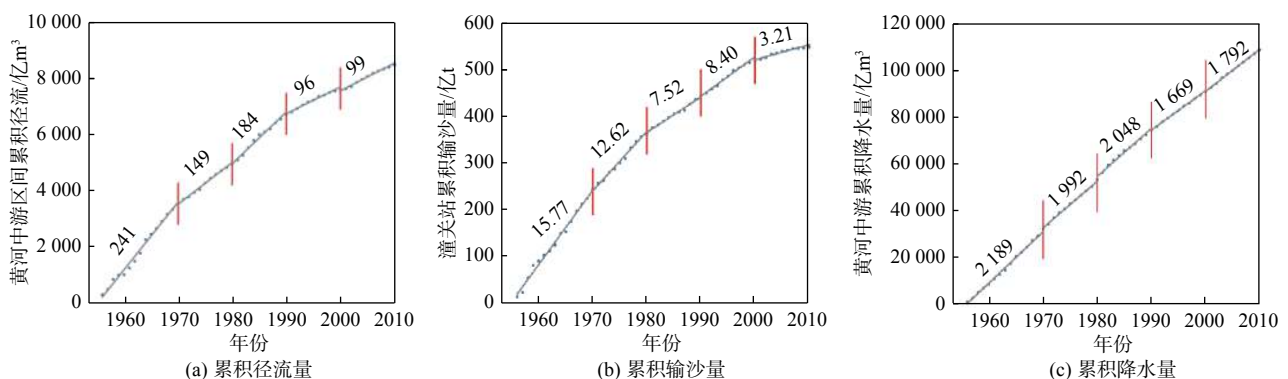


图 3 1956—2010 年径流量、输沙量、降水量累积曲线 (注: 图中数据为该段拟合曲线斜率)

Fig. 3 Cumulative curves of runoff, sediment and precipitation from 1956 to 2010 (note: the data in the figure is the slope of the fitting curve)

2.1.2 贡献率

基准期累积径流量斜率、累积输沙量斜率、累积降水量斜率分别记为 $R_{r基}$ 、 $R_{s基}$ 、 $R_{p基}$, 其他时段斜

率分别记为 R_{ri} 、 R_{si} 、 R_{pi} , 则不同时段相对于基准期的累积径流量斜率变化率、累积输沙量斜率变化率、累积降水量斜率变化率 S_{ri} 、 S_{si} 、 S_{pi} 分别为

$$S_{ri} = (R_{ri} - R_{r基}) / R_{r基} \quad (8)$$

$$S_{si} = (R_{si} - R_{s基}) / R_{s基} \quad (9)$$

$$S_{pi} = (R_{pi} - R_{p基}) / R_{p基} \quad (10)$$

不同时段降水变化对径流和泥沙变化的贡献率 C_{ri} 、 C_{si} 可以表示为

$$C_{ri} = S_{pi} / S_{ri} = \frac{R_{pi} / R_{p基} - 1}{R_{ri} / R_{r基} - 1} \quad (11)$$

$$C_{si} = S_{pi} / S_{si} = \frac{R_{pi} / R_{p基} - 1}{R_{si} / R_{s基} - 1} \quad (12)$$

根据 SCRCQ 法, 计算得出不同时段降水量对径流和泥沙减少量的贡献率, 若不考虑其他气候因素的影响, 则人类活动对径流和泥沙减少量的贡献率分别为 $1 - C_{ri}$ 和 $1 - C_{si}$ 。计算结果见图 4。

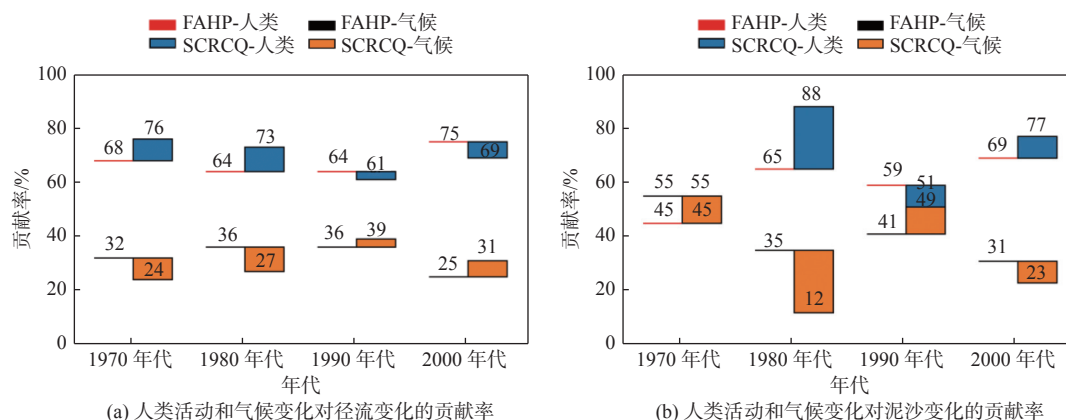


图 4 FAHP 法和 SCRCQ 法结果对比

Fig. 4 Comparison of results between FAHP and SCRCQ

2.1.3 结果对比

FAHP 法和 SCRCQ 法结果见图 4。两种方法均显示不同年代人类活动对径流和泥沙变化的贡献率均大于气候变化的贡献率。采用两种方法分析不同年代人类活动和气候变化对黄河中游径流和泥沙变化的贡献率总体趋势一致: 人类活动对径流变化的贡献率先减小后增大, 对泥沙变化的贡献率先增大后减小再增大, 气候变化对径流和泥沙变化的贡献率的变化则相反。在 1970 年代和 1980 年代 FAHP 法计算的人类活动对径流变化的贡献率小于 SCRCQ 法, 而在 1990 年代和 2000 年代 FAHP 法大于 SCRCQ 法, 气候变化对径流变化的贡献率则相反。在 1970 年代、1980 年代、2000 年代 FAHP 法计算的人类活动对泥沙变化的贡献率小于 SCRCQ 法, 而在 1990 年代 FAHP 法大于 SCRCQ 法, 气候变化对泥沙变化的贡献率则相反。

2.2 气候变化和人类活动影响分析

2.2.1 气候变化

气候变化主要考虑降水变化。黄河中游的区间径流量、泥沙量和降水量整体呈下降趋势, 见图 5。

1970 年代、1980 年代、1990 年代、2000 年代年均径流量相对于 1956—1969 年分别减少 38%、28%、58%、64%, 年均输沙量分别减少 19%、50%、50%、81%, 年均降水量分别减少 0.4%、-5%、20%、17%, 见表 4。若径流量或输沙量下降速度大于降

水量下降速度(相对于基准期), 则说明降水量变化的影响小于人类活动的影响。因此, 气候变化对径流和泥沙的影响小于人类活动的影响。

1970 年代到 1980 年代年均降水量减小的速率大于年均径流量减小的速率, 1980 年代到 1990 年代年均降水量增大的速率大于年均径流量增大的速率, 1990 年代到 2000 年代年均降水量减小, 而年均径流量增大。因此, 气候变化对径流变化的贡献率先增大后减小。

1970 年代到 1980 年代年均降水量减少, 而年均输沙量增加, 1980 年代到 1990 年代年均降水量增加而年均输沙量减少, 1990 年代到 2000 年代年均降水量减少而年均输沙量增加。因此, 降水量对输沙变化的贡献率均小于人类活动的贡献率。从降水量变化的速率相对于输沙量变化的速率来看, 1970 年代到 1980 年代、1980 年代到 1990 年代、1990 年代到 2000 年代分别为 -17.17%、-0.38%、-392%, 因此, 气候变化对泥沙变化的贡献率先减小后增大再减小。

2.2.2 人类活动

在不考虑水库蓄变量的情况下, 径流变化主要受到耗水量和水土保持措施这两项人类活动要素的影响。1956—1999 年耗水量及水保措施减水量数据来源于文献^[25], 2000—2010 年耗水量数据来源于《水资源公报》。黄河中游径流减少量为花园口

站与头道拐站天然径流量的差值与其实测径流量的差值之差。黄河中游耗水量、水保措施减水量、径流减少量年际变化见图 6。若不考虑 2000 年后水土保持措施增加面积,则 1960 年代、1970 年代、1980 年代、1990 年代以及 2000 年代人类活动减水量占径流减少量的 34%、100%、145%、144%、

150%,人类活动减水量大于径流减少量的主要原因是黄河《水资源公报》中各水文站的天然地表水量为实测径流量与地表还原量之和,未考虑水土保持措施减水量。从人类活动减水量的角度来看,人类活动对径流变化的贡献率越来越大,人类活动对径流变化的影响大于气候变化的影响。

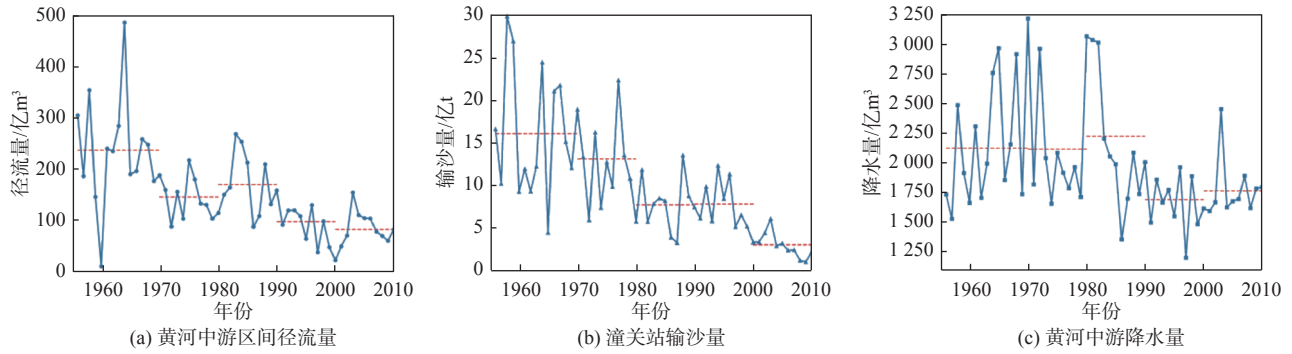


图 5 1956—2010 年黄河中游区间径流、输沙量、降水量年际变化

Fig. 5 Annual variation of runoff, sediment and precipitation in the middle Yellow River from 1956 to 2010

表 4 黄河中游不同时期耗水量、水保措施减水量、区间径流、降水量、输沙量相对于基准期的变化率

Tab. 4 The variation rates of water consumption, water reduction by soil and water conservation measures, interval runoff, precipitation and sediment in different periods in the middle Yellow River with respect to the base period

年代	耗水量	水保措施减水量	区间径流减少量	降水量	输沙量
1970年代	500	325	28	-0.40	-19
1980年代	500	625	32	5	-50
1990年代	500	675	32	-20	-50
2000年代	392		20	-17	-81

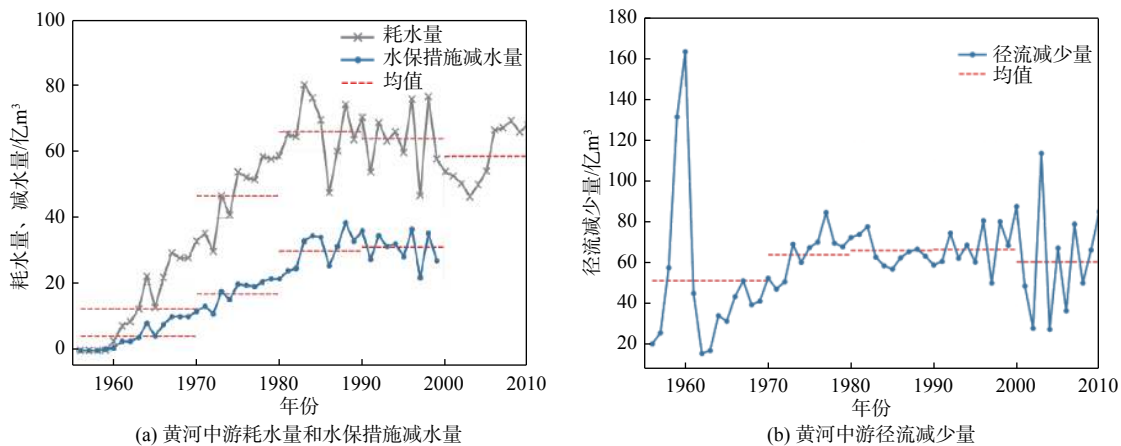


图 6 黄河中游耗水量、水保措施减水量、径流减少量年际变化

Fig. 6 Annual variation of water consumption, water reduction by water conservation measures and runoff reduction in the middle Yellow River

根据《黄河流域水土保持公报(2010年)》,截至 2010 年黄河流域初步治理水土流失面积达到 23 万 km²,水保措施实施后减少了侵蚀面积和侵蚀强

度。1980 年代与 1970 年代相比,输沙强度减少的区域约占黄土高原总面积的 88%,而输沙强度增加的区域仅占黄土高原总面积的 12%,人类活动对泥

沙变化的影响大。根据王光谦等^[52]的研究,水土保持面积对于输沙的影响存在一定的阈值,达到该阈值之后,水土保持措施的减沙作用趋于稳定,达到阈值的时间大概在2000年,2000年后水保措施可减沙量保持平稳。小浪底水利枢纽1999年10月正式下闸蓄水,控制黄河流域92%的面积和近100%的来沙,2000—2010年小浪底库区累计淤积泥沙达28亿m³,小浪底水库对泥沙的减少起到了重要作用,由此可见2000年后人类活动对黄河泥沙量的减少依然起到重要作用。

3 结论

黄河中游区间径流量、泥沙量和降水量整体呈下降趋势。人类活动是造成径流和泥沙减少的主要因素,且对径流和泥沙变化的贡献率整体呈增加趋势,而气候变化贡献率整体呈减小趋势,其中1980年代人类活动对泥沙的影响大于1970年代和1990年代。人类活动对径流影响的主要因素是耗水和水保措施,其中耗水量增加是径流量减少的主要原因。人类活动对泥沙影响的主要原因是水土保持治理面积的增加和水利工程对泥沙的拦截。

相对于基准期,径流量和输沙量下降速度均大于降水量下降速度,气候变化对径流和泥沙的影响小于人类活动的影响;从人类活动减水量的角度分析,人类活动对径流变化的贡献率越来越大;1980年代与1970年代相比,输沙强度减少的区域远大于输沙强度增加的区域,在2000年水保措施减水量达到阈值,但2000年后小浪底水库对泥沙的拦截为泥沙的减少量起到了重要作用,人类活动对泥沙变化的贡献率先增大后减小再增大。不论从径流量、泥沙量、降水量减少率的角度,还是从人类活动减水量占径流减少量的角度分析,亦或是从水利水保措施减沙量等角度分析,人类活动对水沙变化的影响大于气候变化的影响。

采用FAHP法分析的1970年代、1980年代、1990年代以及2000年代人类活动对径流减少的贡献率分别为68%、64%、64%、75%,对泥沙减少的贡献率分别为45%、65%、59%、69%。另外,FAHP法与SCRCQ法分析的不同年代人类活动和气候变化对黄河中游径流和泥沙变化的贡献率变化趋势一致,人类活动对径流变化的贡献率先减小后增大,对泥沙变化的贡献率先增大后减小再增大,气候变化对径流和泥沙变化的贡献率则相反。

参考文献(References):

- [1] 冉大川. 黄河中游河龙区间水沙变化研究综述[J]. *泥沙研究*, 2000(3): 72-81. (RAN D C. Review on runoff and sediment change in the Hekouzhen-Longmen region of middle reach in Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2000(3): 72-81. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2000.03.012.
- [2] 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): 55-63, 93. (YAO W Y, JIAO P. Study and future prospects of runoff and sediment change in Yellow River[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2016(9): 55-63, 93. (in Chinese)) DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2016.0244.
- [3] 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. (YAO W Y, RUAN D C, CHEN J N. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(5): 607-616. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.05.013.
- [4] 时明立. 黄河河龙区间水沙变化的水文分析[J]. *中国水土保持*, 1993(4): 19-22, 65. (SHI M L. Hydrological analysis of the variation of runoff and sediment from Hekouzhen-Longmen intermediate basin of the Yellow River[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1993(4): 19-22, 65. (in Chinese)) DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.1993.04.006.
- [5] 尹国康. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因分析[J]. *地理学报*, 1998(2): 80-83, 85-89. (YIN G K. Analysis of water-sediment variation in sandy area of the middle reaches of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998(2): 80-83, 85-89. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb199802010.
- [6] 高鹏, 穆兴民, 王飞, 等. 黄河中游河口镇-花园口区间水沙变化及其对人类活动的响应[J]. *泥沙研究*, 2013(5): 75-80. (GAO P, MU X M, WANG F, et al. Analysis of impact of human activities on stream flow and sediment discharge from Hekouzhen to Huayuankou in middle reaches of Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(5): 75-80. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2013.05.013.
- [7] 王杰. 河龙区间水沙变化特征及归因分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. (WANG J. Characteristics and attribution analysis of runoff and sediment change in He-long reach[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [8] 杨思雨, 姜仁贵, 解建仓, 等. 渭河上游径流变化特征及归因研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 37-42. (YANG S Y, JIANG R G, XIE J C, et al. Re-

- search on the characteristics and attribution analysis of runoff in the upstream of Weihe River basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(2): 37-42. (in Chinese)
- [9] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区1997—2007年的水沙变化趋势及其成因[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 1-7. (XU J X. Trend of water and sediment variation from 1997 to 2007 in the area of high and coarse sediment yield in the middle Yellow River and its causes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2010.01.013.
- [10] 栗晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007(2): 153-159. (LI X L, KANG S Z, WEI X M, et al. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River basin to the Yellow River[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2007(2): 153-159. (in Chinese)) DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2007.02.032.
- [11] 冯家豪, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(8): 90-103. (FENG J H, ZHAO G J, MU X M, et al. Analysis on runoff regime and its driving factors in the middle reaches of Yellow River[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(8): 90-103. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdb.20200809.
- [12] 杨思雨, 姜仁贵, 解建仓, 等. 泾河流域径流变化趋势及归因分析[J]. *西安理工大学学报*, 2019, 35(2): 186-191. (YANG S Y, JIANG R G, XIE J C, et al. Trend and attribution analysis of runoff in Jinhe River[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2019, 35(2): 186-191. (in Chinese)) DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.02.008.
- [13] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间接流量变化的贡献率[J]. *地理研究*, 2013, 32(3): 395-402. (WANG S J, LI L, YAN M. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River basin[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(3): 395-402. (in Chinese)) DOI: 10.11821/yj2013030001.
- [14] 郭爱军, 畅建霞, 黄强, 等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(8): 212-220. (GUO A J, CHANG J X, HUAGN Q, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on runoff change in Weihe basin[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2014, 42(8): 212-220. (in Chinese)) DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.08.024.
- [15] 孙倩, 于坤霞, 李占斌, 等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化趋势及其主控因素的贡献率[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 945-956. (SUN Q, YU K X, LI Z B, et al. The trends of streamflow and sediment and their driving factors in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 945-956. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb201805013.
- [16] 刘蕊蕊. 气候变化和人类活动对渭河流域径流量的影响[J]. *西北水电*, 2019(3): 7-11. (LIU R R. Impacts of climate change and human activities on runoff in the Wei River basin[J]. *Northwest Hydropower*, 2019(3): 7-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2019.03.002.
- [17] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (WANG G Q. Impacts of climate change on hydrology and water resources in the middle reaches of the Yellow River basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1015790.
- [18] 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. (MU X M, ZHANG X Q, GAO P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 47-51. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2010.04.011.
- [19] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 388-397. (WANG S J, YAN Y X, YAN M, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 388-397. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb201203010.
- [20] 王振海, 李传哲, 于福亮, 等. 气候变化和人类活动对径流影响的贡献分解[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(4): 295-299. (WANG Z H, LI C Z, YU F L, et al. Quantitative analysis of the effect of climate change and human activities on streamflow[J]. *Journal of University of Jinan(Natural Science)*, 2014, 28(4): 295-299. (in Chinese)) DOI: 10.13349/j.cnki.jdxbn.2014.04.036.
- [21] 高鹏. 黄河中游水沙变化及其对人类活动的响应[D]. 西安: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010. (GAO P. Sediment variation and its response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[D]. Xi'an: Grad-

- uate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Eco-Environment, Ministry of Education), 2010. (in Chinese))
- [22] 岳晓丽. 黄河中游径流及输沙格局变化与影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. (YUE X L. Study on changes and influencing factors of runoff and sediment transport pattern in the middle Yellow River[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2016. (in Chinese))
- [23] SHI C X, ZHOU Y Y, FAN X L, et al. A study on the annual runoff change and its relationship with water and soil conservation practices and climate change in the middle Yellow River basin[J]. *Catena*, 2012, 100: 31-41. DOI: [10.1016/j.catena.2012.08.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.007).
- [24] WANG S J, YAN M, YAN Y X, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River[J]. *Quaternary International*, 2012, 282: 66-77. DOI: [10.1016/j.quaint.2012.07.011](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.07.011).
- [25] 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 Discussions*, 2010, 15(1): 347-350. DOI: [10.5194/hess-15-1-2011](https://doi.org/10.5194/hess-15-1-2011).
- [26] 陈永宗. 黄河泥沙来源及侵蚀产沙的时间变化[J]. *中国水土保持*, 1988(1): 25-31,65. (CHEN Y Z. Temporal variation of sediment source and sediment yield in the Yellow River[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1988(1): 25-31,65. (in Chinese)) DOI: [10.14123/j.cnki.swcc.1988.01.005](https://doi.org/10.14123/j.cnki.swcc.1988.01.005).
- [27] 高旭彪, 刘斌, 李宏伟, 等. 黄河中游降水特点及其对入黄泥沙量的影响[J]. *人民黄河*, 2008(7): 27-29. (GAO X B, LIU B, LI H W, et al. Characteristics of precipitation in the middle reaches of the Yellow River and its influence on sediment inflow[J]. *Yellow River*, 2008(7): 27-29. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2008.07.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2008.07.014).
- [28] WANG H J, YANG Z S, YOSHIKI S, et al. Stepwise decreases of the Yellow River sediment load (1950—2005): Impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3): 331-354. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2007.01.003](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.003).
- [29] 董雪娜, 林银萍. 黄河中游区水利和水土保持工程的减沙效益研究[J]. *水土保持学报*, 1992(2): 29-34. (DONG X N, LIN Y P. A study on sediment-decrease benefit of water conservancy and soil conservation projects in Middle Reaches[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992(2): 29-34. (in Chinese)) DOI: [10.13870/j.cnki.stbcb.1992.02.006](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcb.1992.02.006).
- [30] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (WANG W Z, JIAO J Y. Sediment yield from rainfall erosion and sediment transport from the Yellow River in Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [31] 陈小红, 刘美南, 胡荣轩. 黄河中游区水沙时空分布及衰减分析[J]. *水文*, 1997(1): 20-24. (CHEN X H, LIU M N, HU R X. The analysis of descent and distribution of water and sediment at the middle reaches of the Yellow River[J]. *Journal of China Hydrology*, 1997(1): 20-24. (in Chinese)) DOI: [10.19797/j.cnki.1000-0852.1997.01.004](https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.1997.01.004).
- [32] YAO W Y, XIAO P Q, SHEN Z Z, et al. Analysis of the contribution of multiple factors to the recent decrease in discharge and sediment yield in the Yellow River basin, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(9): 1289-1304. DOI: [10.1007/s11442-016-1227-7](https://doi.org/10.1007/s11442-016-1227-7).
- [33] 姚文艺, 徐建华, 冉大川, 等. 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. (YAO W Y, XU J H, RAN D C, et al. Analysis and assessment of water and sediment variation in the Yellow River basin[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2011. (in Chinese))
- [34] 王玲, 董雪娜, 刘九玉, 等. 黄河流域水利水保工程减沙作用综合分析[J]. *人民黄河*, 1997(7): 48-51. (WANG L, DONG X N, LIU J Y, et al. Comprehensive analysis of sediment reduction in water conservancy and conservation projects in the Yellow River basin[J]. *Yellow River*, 1997(7): 48-51. (in Chinese))
- [35] 胡春宏, 王延贵, 张燕菁, 等. 中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 524-532. (HU C H, WANG Y G, ZHANG Y J, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 524-532. (in Chinese)) DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2010.04.009](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2010.04.009).
- [36] 王云璋, 彭梅香, 温丽叶. 80年代黄河中游降雨特点及其对入黄沙量的影响[J]. *人民黄河*, 1992(5): 10-14,61. (WANG Y Z, PENG M X, WEN L Y. Characteristics of rainfall in the middle reaches of the Yellow River and its influence on sediment inflow in the 1980s[J]. *Yellow River*, 1992(5): 10-14,61. (in Chinese))
- [37] 赵业安, 潘贤娣, 申冠卿. 80年代黄河水沙基本情况及特点[J]. *人民黄河*, 1992(4): 11-20,61. (ZHAO Y A, PAN X D, SHEN G Q. The basic situation and characteristics of the Yellow River water and sedi-

- ment in the 1980s[J]. *Yellow River*, 1992(4): 11-20,61. (in Chinese))
- [38] 付金霞, 张鹏, 郑粉莉, 等. 河龙区间近55 a降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 185-192,207. (FU J X, ZHANG P, ZHENG F L, et al. Dynamic change analysis of rainfall erosivity and river sediment discharge of He-Long reach of the Yellow River from 1957 to 2011 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 185-192,207. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.024.
- [39] 李焯. 黄河河口镇—龙门区间年输沙量变化原因分析[J]. *人民黄河*, 2008(8): 41-42. (LI Z. Analysis on the causes of annual sediment transport variation between Hekouzhen and Longmen of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2008(8): 41-42. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2008.08.019.
- [40] 王万忠, 焦菊英, 魏艳红. 黄河主要产沙区雨沙关系及泥沙变化特征[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(2): 41-47. (WANG W Z, JIAO J Y, WEI Y H. Relationship between sediment and rainfall and sediment variation in the main sediment yield area of the Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(2): 41-47. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2019.02.006.
- [41] 张胜利, 李焯, 赵文林, 等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化成因及发展趋势[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. (ZHANG S L, LI Z, ZHAO W L, et al. Causes and trends of water and sediment variation in the middle reaches of the Yellow River[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998. (in Chinese))
- [42] 张胜利, 王轶睿. 80年代黄河中游来沙减少的原因分析[J]. *水土保持通报*, 1992(2): 1-14,60. (ZHANG S L, WANG Y R. Analysis on fact of reduced coming sediment from the middle Yellow River in the 1980s[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992(2): 1-14,60. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.1992.02.001.
- [43] 李荣. 气候变化对黄河中游三花区间水资源的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007. (LI R. Impact of climate change on water resources region from Sanmenxia to Huayuankou of the middle Yellow River[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1080094.
- [44] 侯钦磊, 白红英, 任园园, 等. 50年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(8): 1505-1512. (HOU Q L, BAI H Y, REN Y Y, et al. Analysis of variation in runoff of the main stream of the Weihe River and related driving forces over the last 50 years[J]. *Resources Science*, 2011, 33(8): 1505-1512. (in Chinese))
- [45] 王国庆, 管晓祥, 王乐扬, 等. 气候变化和人类活动对黄河重点区间径流的影响[J]. *人民黄河*, 2019, 41(10): 26-30,39. (WANG G Q, GUANG X X, WANG L Y, et al. Impacts of climate change and human activities on stream flow of the key runoff generation areas of the Yellow River basin[J]. *Yellow River*, 2019, 41(10): 26-30,39. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.10.006.
- [46] 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*, 2012, 9(3): 961-972. DOI: 10.5194/hessd-9-3933-2012.
- [47] MU X M, ZHANG X Q, SHAO H B, 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*, 2011, 40(3): 303-309. DOI: 10.1002/clen.201000319.
- [48] 冉大川. 泾河流域年最大洪水量及洪沙量变化分析[J]. *人民黄河*, 1998(12): 29-31,44. (RAN D C. Analysis of change of annual maximum flood flow and sediment amounts in Jinghe River[J]. *Yellow River*, 1998(12): 29-31,44. (in Chinese))
- [49] 赵姘. 泾河流域气候变化及其水文响应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. (ZHAO C. The climate change and its hydrological response of Jing River basin[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2014. (in Chinese))
- [50] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾河流域水沙变化水文分析[J]. *人民黄河*, 2001(2): 9-11. (RAN D C, LIU B, LUO Q H, et al. Hydrologic analysis of water and sediment change in Jinghe River basin[J]. *Yellow River*, 2001(2): 9-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2001.02.004.
- [51] 冉大川. 泾河流域人类活动对地表径流量的影响分析[J]. *西北水资源与水工程*, 1998(1): 34-38. (RAN D C. Impact of human activities on surface runoff in Jinghe River basin[J]. *Northwest Water Resources and Water Project*, 1998(1): 34-38. (in Chinese))
- [52] 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. (WANG G Q, ZHONG D Y, WU B S. Future trend of Yellow River sediment changes[J]. *China Water*, 2020(1): 9-12,32. (in Chinese))

Attribution analysis of runoff-sediment variation in the middle Yellow River

ZHANG Qingqing^{1,3}, ZHONG Deyu^{1,2}, JIA Baozhen⁴

(1. School of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. State Key laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. Kunlun College of Qinghai University, Xining 810016, China; 4. CAUPD Beijing Planning & Design Consultants Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: Yellow River is the mother river of Chinese nation and is famous for the most sandiness river in the world. The amount and process of water and sediment have changed significantly at present. And the main problem is that the relationship between the runoff and sediment is uncertain. Human activities and climate change are the most important influence factors.

Multiple methods had been applied to study the contribution rates of the two factors to runoff-sediment variation in the Yellow River, such as method of the slope changing ratio of cumulative quantity(SCRCQ), separation evaluation method and double-mass curves of precipitation vs runoff (or sediment load), multiple regression analysis, different series of comparative analysis, hydrological method, soil conservation method and separation judgment method, etc. Many scholars had analyzed the driving factors of runoff and sediment change in the Yellow River basin in the past 40 years based on the method above. And the results varied considerably due to the different assumptions of the methods, data sources and the limitations of the test areas. Fuzzy analytic hierarchy process(FAHP) has an advantage in integrating the research advantages of different scholars to a certain extent. The method based on fuzzy mutual judgment matrix belongs to subjective weight distribution method. The main scoring basis of the evaluation system is the representativeness of the investigative areas. Regional representativeness is measured by the representative coefficients. The representative coefficients are determined by the product of sediment transport ratio and area ratio in the middle Yellow River. And the scoring according to the criteria that if one study area is much more important than the other, then the scoring is closer to 1, and closer to 0 otherwise.

There is a hypothetical premise that runoff and sediment discharge are only affected by precipitation. So SCRCQ had been adopted to analyze the attribution of runoff-sediment variation in the middle Yellow River to compare the results of FAHP. The contribution rate of climate change calculated by SCRCQ is equal to the ratio of the slope change rate of cumulative runoff (or sediment transport) to the slope change rate of cumulative precipitation. The results of the two methods were compared. It is showed that the contribution of human activities to runoff and sediment change was greater than that of climate change in different ages. The contribution rate of human activities to the runoff and sediment change in the middle reaches of the Yellow River in different years was consistent: the contribution of human activities to the runoff change first decreased and then increased, and that to sediment change first increased, then decreased and then increased. Climate change contributes the opposite.

The impact of human activities and climate change on runoff-sediment variation are also discussed. They proved true based on the analysis of the variation of runoff, sediment and precipitation, as well as water reduction by human activities and sediment reduction by water conservancy and conservation measures. In the 1970s, 1980s, 1990s and 2000s, the contribution rates of human activities to runoff reduction were 68%, 64%, 64% and 75%, and that to sediment reduction were 45%, 65%, 59% and 69%, respectively.

Key words: the middle Yellow River; human activity; climate change; runoff-sediment variation; contribution rate