

孤山川流域 1980s 以来次降雨—产流—产沙变化

罗娅^{1,2}, 杨胜天¹, 刘晓燕³, 周旭^{1,4}, 金双彦⁵, 张亦弛¹, 陈珂¹

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 3. 黄河水利委员会, 河南 郑州 450003; 4. 西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637009; 5. 黄河水利委员会 水文局, 河南 郑州 450004)

摘要: [目的] 研究入黄支流降雨—径流—产沙变化规律, 揭示黄河水沙变化成因。[方法] 获取孤山川流域 1985—2010 年 115 场降雨事件数据, 运用径流系数、产沙系数和弹性系数指标, 分析孤山川流域近 30 年降雨—产流—产沙变化。[结果] (1) 与 1980s 相比, 1990s 的降雨多为短历时、弱雨强类型, 2000s 的降雨多为长历时、中雨强类型; 2000s 的降雨—产流能力和降雨—产沙能力减小最为突出, 其平均径流系数、平均产沙系数分别约为 1980s 的 50% 和 23%。(2) 1980s—1990s 降雨—产流弹性系数和降雨—产沙弹性系数分别为 0.13, 4.21; 1980s—2000s 降雨—产流弹性系数和降雨—产沙弹性系数分别为 1.73, 6.19。(3) 径流系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比的相关系数分别为 -0.662 3, -0.911 4, -0.801 0 和 -0.821 4, 产沙系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比的相关系数分别为 -0.887 7, -0.998 5, -0.962 9 和 -0.971 7。[结论] 1980s 以来, 孤山川流域的降雨—产流能力和降雨—产沙能力发生明显变化, 尤其 2000 年后的变化最为突出; 降雨—产沙能力比降雨—产流能力对雨强变化更为敏感; 植被盖度变化是下垫面因素中影响孤山川流域产流产沙能力变化的主要原因。

关键词: 降雨—径流—产沙关系; 次降雨; 孤山川

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0023-07

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.012

Variations of Rainfall, Runoff and Sediment Yield in Gushanchuan River Basin Since 1980s

LUO Ya^{1,2}, YANG Shengtian¹, LIU Xiaoyan³, ZHOU Xu^{1,4}, JIN Shuangyan⁵, ZHANG Yichi¹, CHEN Ke¹

(1. School of Geography, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China; 2. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

3. Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, He'nan 450003, China; 4. School of Land and Resource, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 5. Hydrology Bureau, YRCC, Zhengzhou, He'nan 450004, China)

Abstract: [Objective] To research the rainfall—runoff—sediment change in the tributary of the Yellow river for revealing the causes of Yellow River's water and sediment variation. [Methods] Based on the data of 115 rainfall events during 1985—2010 in Gushanchuan river basin, the temporal variations of rainfall—runoff—sediment relationships was analyzed by using the runoff coefficient, sediment coefficient and elasticity coefficient. [Results] (1) The short-duration, low-intensity and long-duration, moderate-intensity rainfall events were the primary types in 1990s and 2000s compared to 1980s, respectively. Specially, the capacities of rainfall producing runoff and sediment reduced obviously in 2000s, the runoff coefficient and sediment coefficient in 2000s were accounting for about 50% and 23% of that in 1980s. (2) The rainfall—runoff elasticity coefficient and rainfall—sediment elasticity coefficient were 0.13 and 4.21 during the period from 1980s to 1990s, and were 1.73 and 6.19 during the period from 1980s to 2000s, respectively. (3) The correlation between runoff coefficient and the proportion of forest and grass, vegetation coverage, proportion of terrace,

收稿日期: 2015-01-05

修回日期: 2015-01-20

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题“黄河中游产沙环境演变及其水沙调控效应分析”(2012BAB02B05-05); 水利部公益项目“中印东段争议区生态资源遥感监测与评价研究”(201101037); 中央高校基本科研业务费专项联合资助

第一作者: 罗娅(1979—), 女(汉族), 博士, 副教授。主要从事土地利用与水土流失治理研究。E-mail: luoya2002@163.com。

通信作者: 杨胜天(1965—), 男(彝族), 博士, 教授, 博士生导师。主要从事水资源与水环境遥感研究。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn。

proportion of key dam controlling area was -0.6623 , -0.9114 , -0.8010 , -0.8214 , respectively, meanwhile, the correlation between sediment coefficient and the proportion of forest and grass, vegetation coverage, proportion of terrace, proportion of key dam controlling area was -0.8877 , -0.9985 , -0.9629 , -0.9717 , respectively. [Conclusion] The rainfall—runoff—sediment relationship has been changed significantly since 1980s, especially after the year 2000, the influence of rainfall intensity on capacity of rainfall producing sediment is more sensitive than that on capacity of rainfall producing runoff, and the vegetation coverage variation is the major factor which affects the capacities of rainfall producing runoff and sediment in Gushanchuan river basin.

Keywords: rainfall—runoff—sediment relationships; rainfall events; Gushanchuan river basin

黄河的水沙变化规律是制定治黄方略的重要参考依据,受到中国水资源管理部门的高度重视。自 1970s 以来,黄河实测径流量和输沙量逐渐减少^[1-2]。以位于黄河中游的河口镇—龙门区间(简称河龙区间)为例,与 1950—1969 年平均值相比,20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代(1990—1996 年)、近期(1997—2006 年)河龙区间年均径流量分别减少了 1.935×10^9 , 3.615×10^9 , 1.515×10^9 , 4.360×10^9 m^3 ; 年均输沙量分别减少了 2.40×10^8 , 6.23×10^8 , 4.77×10^8 , 7.77×10^8 t ^[3]。研究入黄支流的降雨—径流—产沙变化规律,对于揭示黄河水沙变化成因,优化治黄方略有着重要意义。

黄土高原的水土流失主要由少数几场暴雨产生^[4-5]。气候变化会引起雨强、降雨历时等降雨特征的变化,从而成为黄河水沙变化的原因之一^[6-7]。了解气候变化导致的次降雨特征(降雨历时、雨强等)变化,进而分析降雨变化对流域产流产沙的影响,是研究气候变化对黄河水沙变化贡献度的重要途径和切入点。

近年关于黄河流域降雨—径流—产沙关系变化的研究,主要从两方面开展:一是通过统计坡面尺度的次降雨—径流事件,研究坡面尺度水沙随降雨历时和雨强的变化^[8-11];二是分析流域尺度或区域范围的日(月、年)降雨—径流—产沙长时间序列数据,获知流域尺度或区域范围的水沙随降雨的变化规律^[12-15]。可看出,前者能较好地阐释坡面尺度降雨特征对水沙变化的影响,但由于尺度效应的存在,难以揭示大中空间尺度水沙变化对降雨变化的响应机制;后者能较好地反映出流域(或区域)尺度水沙与降雨的多年变化规律,但由于基础数据的时间步长多为日(月、年),难以精细刻画降雨历时、雨强等降雨特征变化对流域单元产流产沙的影响。通常情况下,黄土高原的一场降雨通常在数小时甚至更短时间内就可完成。因此,要分析降雨变化对流域产流产沙的影响,有必要对流域单元长时间序列次降雨事件中的降雨、产流、产沙观测数据开展深入研究。

本文整理分析孤山川流域 1985—2010 年的次降雨资料,以期达到如下目标:针对雨量站和水文站数据记录时间精度不一的问题,通过数据重采样,将降雨摘录数据和洪水水文要素数据统一为小时时间步长;基于时间步长一致的降雨摘录和洪水水文要素数据,分析 1980s,1990s 和 2000s 这 3 个时期的次降雨变化及其对产流产沙的影响,从而为揭示气候变化与人类活动对黄河水沙变化的贡献率提供参考。

1 研究区概况

孤山川位于黄河中游多沙粗沙区,东经 $110^{\circ}31'$ — $111^{\circ}04'$,北纬 $39^{\circ}0'$ — $39^{\circ}27'$,沟壑密度为 $5.58 \text{ km}/\text{km}^2$ ^[16]。流域面积 $1\ 263 \text{ km}^2$ (高石崖水文站以上),海拔 $796 \text{ m} \sim 1\ 402 \text{ m}$ 。年均降雨量 410 mm ,约 75% 的径流量和 99% 的产沙量产生于雨季^[17]。流域 90% 以上的地区被黄土所覆盖,水土流失严重。自 1970s 以来,孤山川径流量和输沙量持续减少:1970—1979 年,均来水 $9.794 \times 10^7 \text{ m}^3$,均来沙 $2.969 \times 10^7 \text{ t}$;1980—1989 年,均来水 $5.515 \times 10^7 \text{ m}^3$,均来沙 $1.279 \times 10^7 \text{ t}$;1990—1999 年,均来水 $5.234 \times 10^7 \text{ m}^3$,均来沙 $1.130 \times 10^7 \text{ t}$;2000—2010 年,均来水 $1.771 \times 10^7 \text{ m}^3$,均来沙 $2.01 \times 10^6 \text{ t}$ 。孤山川流域的水沙变化代表着黄河中游的水沙变化情况,研究其次降雨的降雨—径流—产沙关系,将有助于厘清黄河水沙变化成因。

2 方法与数据

2.1 降雨摘录与洪水水文要素数据重采样

由于各时期的雨量站和水文站数据记录时间精度不一,时间间隔不同,为保证降雨记录与洪水水文要素记录在时间上能匹配对应,分别对降雨摘录数据和洪水水文要素数据进行时间重采样,生成时间步长为 1 小时的降雨和水文要素数据,从而为后期降雨—径流—产沙变化分析提供数据基础。

2.1.1 降雨摘录数据时间重采样 通过式(1)和(2),对降雨摘录数据进行时间重采样:

$$R_{5\min,i,j} = \frac{R_{x_1-x_2}}{x_2-x_1} \times 5 \quad (1)$$

式中: $R_{5\min,i,j}$ ——某降雨记录 5 min 内降雨量平均值;
 $R_{x_1-x_2}$ ——某降雨记录内降雨总量 (mm); x_1 ,
 x_2 ——某时段降雨记录起止时间(min)。下同。

$$R_i = \sum_{j=1}^{12} R_{5\min,i,j} \quad (2)$$

式中: R_i ——重采样后第 i 小时内的降雨总量 (mm)。

2.1.2 洪水水文要素数据时间重采样 通过式(3)和(4),对洪水水文要素数据中的流量和含沙量 2 个数据进行时间重采样:

$$R_{t_i} = R_{t_1} + \frac{t_i - t_1}{t_n - t_1} \times (R_{t_n} - R_{t_1}) \quad (3)$$

式中: R_{t_i} ——重采样后 t_i 时刻瞬时观测流量 (m^3/s) 或含沙量 (kg/m^3); t_1, t_n ——相邻两条数据的观测记录时刻; R_{t_1}, R_{t_n} —— t_1, t_n 这 2 个时刻对应的瞬时流量或含沙量观测数据。

$$R_i = \sum_{j=1}^{10} R_{6\min,i,j} / 10 \quad (4)$$

式中: R_i ——第 i 小时内的平均流量或含沙量 (m^3/s);
 $R_{6\min,i,j}$ ——第 i 小时内,第 j 个 6 min 内的平均流量或含沙量 (m^3/s)。

2.2 降雨—径流(产沙)事件遴选

由于记录误差的存在,常会出现降雨、径流(产沙)观测数据在时间上不匹配的现象,从而影响降雨—径流—产沙关系的有效分析。为保证所选降雨、径流(产沙)观测数据的有效性,所选降雨—产流(产沙)事件有如下规定。

(1) 降雨事件规定。只要流域内任意雨量站有降雨记录,则认为流域有降雨事件发生。

(2) 降雨—产流事件历时。降雨起始时刻至洪水退却时刻所经历的时间。以 1990 年 9 月 4 日的降雨—径流事件为例(图 1):降雨起始时刻为 9 月 4 日 06:00,洪水退却时刻为 9 月 5 日 09:00,则该降雨—产流事件历时为 27 h。

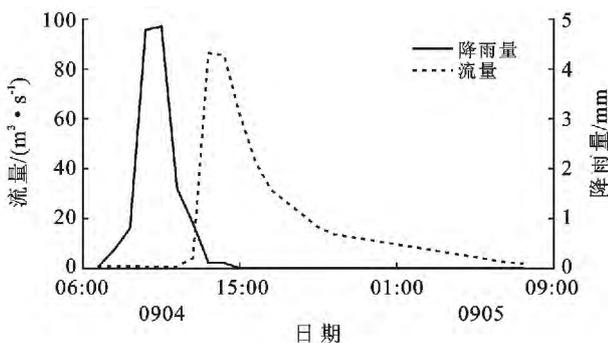


图 1 孤山川 1990 年 9 月 4 日至 5 日降雨—产流过程

2.3 降雨—径流—产沙特征指标

将重采样后的降雨数据与洪水水文要素数据按时间先后排列,获取流域各场降雨的雨量、流量、输沙量等数据,为分析流域降雨—径流—产沙关系提供基础。

2.3.1 降雨特征 雨量、降雨历时和降雨强度是次降雨的最基本特征。由于雨量本身就是降雨历时和降雨强度的乘积,为避免重复,直接选用降雨历时和降雨强度两个指标表示流域的降雨特征。其中,降雨历时是指流域一次降雨的持续时间,即流域内任意雨量站有降雨到所有雨量站降雨停止所经历的时间(h)。降雨强度指流域在单位时间内的面降雨量 (mm/h)。

面降雨量可用算术平均法^[18]和反距离加权空间插值法^[19]计算。通过随机抽样 14 场降雨,将 2 种方法计算的面雨量加以对比,结果显示 R^2 为 0.986,可看出 2 种方法的计算结果基本相同(图 2)。考虑到所选次降雨事件较多,本研究选用较简单的算术平均法计算流域面雨量。

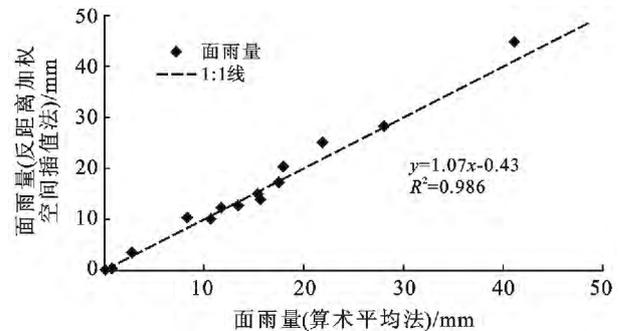


图 2 两种方法计算流域面雨量的结果对比

2.3.2 降雨—产流能力 选取径流系数表示流域的降雨产流能力,用以反映不同时期的降雨—产流关系。径流系数指降雨—径流事件历时内的径流深 (mm)与降雨量 (mm)的比值,单位为 %。公式为:

$$R_G = \frac{T_{R_i}}{P_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_G ——第 i 场降雨的径流系数 (%); T_{R_i} ——第 i 场降雨的径流量深 (mm); P_i ——第 i 场降雨的面雨量 (mm)。 R_G 越大,次降雨的产流能力越强。下同。

2.3.3 降雨—产沙能力 借鉴刘晓燕^[20]等提出的产沙系数概念,并对其修正,作为表示流域降雨产沙能力的指标,用以反映不同时期的降雨产沙关系。次降雨产沙系数可通过式(6)获取:

$$S_G = \frac{sed_i}{A \times P_i} \quad (6)$$

式中： S_G ——第 i 场降雨的产沙系数 [$t/(km^2 \cdot mm)$]； sed_i ——第 i 场降雨的总产沙量（由于研究区梯田、水库、淤地坝等拦截的沙量较少，在此用实测输沙量代替 t ）； A ——流域面积 (km^2)；越大，次降雨的产沙能力越强。

2.4 数据来源

选取水利部门监测发布的 1985—2010 年雨量站降雨摘录数据与水文站洪水水文要素数据作为次降雨—产流—产沙变化分析的数据源。其中，降雨数据来源于孤山川流域及其周边 14 个雨量站的降雨摘录数据，流量和含沙量等径流产沙数据来源于高石崖水文站洪水水文要素数据。

将符合降雨—径流（产沙）事件遴选条件的 115 场降雨作为研究孤山川流域 1980s 以来降雨—径流—产沙变化的基础资料，并将其分为 1980s（1985—1989），1990s（1990—1999），2000s（2000—2010）这 3 个时期加以统计分析（表 1）。其中，1980s 收集到 5 年 22 场降雨资料，1990s 收集到 10 年 54 场降雨资料，2000s 收集到 11 年 39 场降雨资料。

3 结果分析

3.1 次降雨特征变化

统计每场降雨的降雨日期、起讫时间、面雨量，计算出每场降雨的降雨历时与雨强，进而运用算术平均方法，获取孤山川流域每年次降雨的平均历时与雨强等降雨特征（图 3），用以反映次降雨的变化。

由图 3 可看出，1980s，1990s，2000s 孤山川流域次降雨的平均降雨历时为 23，21，25 h，平均雨强分别为 1.26，1.04，1.1 mm/h。结果表明，与 1980s

相比，1990s 的降雨多为短历时、弱雨强类型，而 2000s 的降雨多为长历时、中雨强类型。

表 1 孤山川流域降雨—产流—产沙事件统计

时期	年份	降雨次数/场
1980s	1985	6
	1986	4
	1987	2
	1988	7
	1989	3
1990s	1990	5
	1991	4
	1992	6
	1993	6
	1994	10
	1995	6
	1996	4
	1997	4
	1998	6
	1999	3
2000s	2000	5
	2001	4
	2002	6
	2003	3
	2004	2
	2005	2
	2006	4
	2007	5
	2008	2
	2009	2
	2010	4
合计	26 a	115

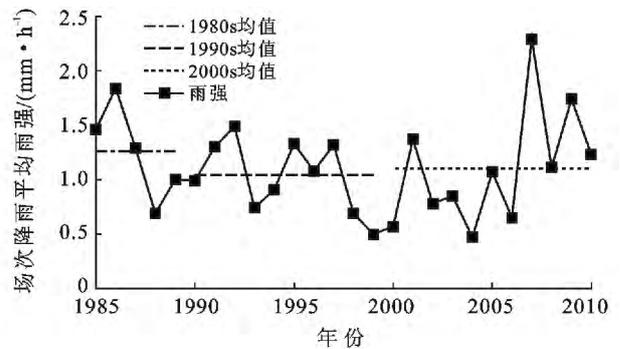
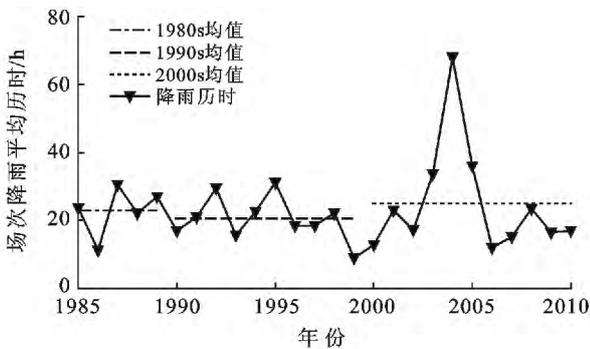


图 3 孤山川流域次降雨特征变化（平均历时和平均雨强）

3.2 次降雨—产流能力变化

统计每场降雨的降雨量和总径流量，通过式（5），

计算出每场降雨的径流系数，进而通过算术平均方法，获取孤山川流域每年次降雨的平均径流系数（图

4),用以反映次降雨的产流能力变化。

由图 4 可看出,1980s,1990s,2000s 孤山川流域次降雨的平均径流系数分别为 19.34%,18.89%,9.24%。结果表明,与 1980s 相比,1990s 的降雨—产流能力未发生明显变化,而 2000s 的降雨—产流能力减小较为明显,其平均径流系数仅约为 1980s 的 50%。

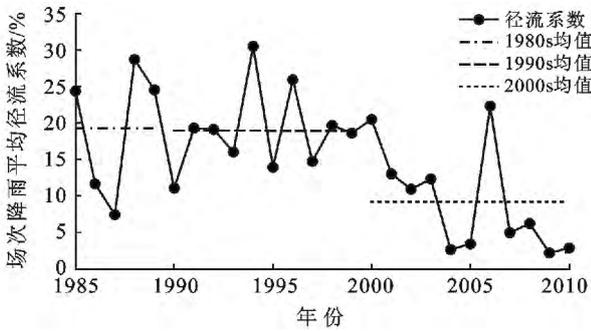


图 4 孤山川流域次降雨—产流能力变化

3.3 次降雨—产沙能力变化

统计每场降雨的降雨量和总输沙量,通过式(6),计算出每场降雨的产沙系数,进而通过算术平均方法,获取孤山川流域每年次降雨的平均径流产沙数(图 5),用以揭示次降雨的产沙能力变化。

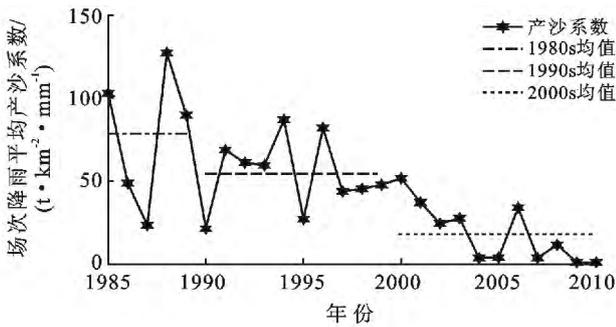


图 5 孤山川流域次降雨—产沙能力变化

由图 5 可看出,1980s,1990s,2000s 孤山川流域次降雨的平均产沙系数分别为 78.43,54.37,18.19。结果表明,与 1980s 相比,1990s,2000s 的降雨—产沙能力均有不同程度的减小,其中,尤以 2000s 减小最为明显,其平均产沙系数仅为 1980s 的 23.19%。

3.4 降雨—产流(产沙)能力对雨强变化的敏感性

在下垫面一致的条件下,雨强是影响次降雨产流产沙能力的主要因素之一,但其对产流产沙的控制能力却有所差异^[8]。为讨论雨强对产流产沙的影响,选用弹性系数方法^[21],分别计算 1990s,2000s 较 1980s 时段内产流系数与产沙系数对雨强变化的弹性,以检

验 1980s 以来孤山川流域产流与产沙对雨强变化的敏感性。弹性系数计算公式为:

$$b = \frac{dK/K}{dX/X} \tag{7}$$

式中: b ——弹性系数(无量纲); K ——平均径流系数(%)或平均产沙系数; X ——平均雨强(mm/h)。 $|b|$ 值越大,表明产流(或产沙)对雨强变化的敏感性越大。

图 6 展示了 1980s 以来降雨—产流(或产沙)的弹性系数变化情况,从中可看出,1980s—1990s 降雨—产流弹性系数和降雨—产沙弹性系数分别为 0.13 和 4.21,1980s—2000s 降雨—产流弹性系数和降雨—产沙弹性系数分别为 1.73 和 6.19。结果表明,1980s 以来,孤山川流域的产沙比产流对雨强变化更为敏感。

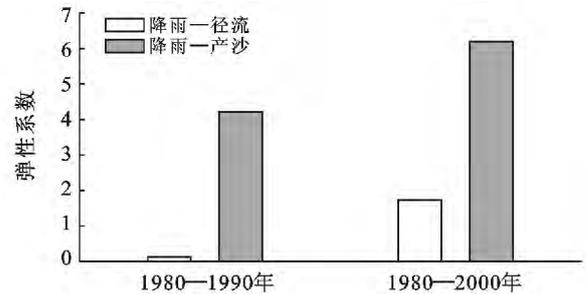


图 6 孤山川流域 1980s 以来降雨—产流(产沙)弹性系数

3.5 下垫面变化对产流产沙能力的影响

下垫面变化是影响流域产流产沙的重要因素。1980s 以来,伴随产流产沙的变化,孤山川流域的下垫面状况也发生明显变化。获取孤山川流域 1980,1998,2010 的林草面积、植被盖度、梯田面积、骨干坝控制面积等数据,分别代表 1980s,1990s 和 2000s 的下垫面状况(表 2),分析径流系数、产沙系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比的相关性(表 3—4),揭示下垫面变化对孤山川流域产流产沙能力的影响。

从表 2 可看出,1980s 以来,孤山川流域的林草面积、植被盖度、梯田面积和骨干坝控制面积有不同程度的增加或提升,其中,植被盖度增加最快,1990s,2000s 的植被盖度分别是 1980s 的 2.27 倍和 3.83 倍。从表 3 可看出,径流系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比的相关系数分别为 -0.662 3, -0.911 4, -0.801 0 和 -0.821 4。从表 4 可看出产沙系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比的相关系数分别为 -0.887 7, -0.998 5, -0.962 9 和 -0.971 7。结果

显示,径流系数、产沙系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比呈现明显的负相关关系,径流系数、产沙系数与植被盖度的相关系数均大于径流系数、产沙系数与其它下垫面指标间的相关系数,表明植被盖度变化是下垫面因素中影响孤山川流域产流产沙能力变化的主要原因。

表 2 孤山川流域不同年代的下垫面状况 %

年代	林草面积比	植被盖度	梯田面积比 ^①	骨干坝控制面积比 ^①
1980s	66.35	13.58	2.16	22.33
1990s	67.99	30.77	2.60	23.92
2000s	68.33	51.95	2.85	24.95

注:①数据来源于黄河上中游管理局调查数据。

表 3 径流系数与下垫面状况的相关性

指标	径流系数	林草面积比	植被盖度	梯田面积比	骨干坝控制面积比
径流系数	1.000 0	-0.662 3	-0.911 4	-0.801 0	-0.821 4
林草面积比		1.000 0	0.912 0	0.979 0	0.971 3
植被盖度			1.000 0	0.976 4	0.983 3
梯田面积比				1.000 0	0.999 4
骨干坝控制面积比					1.000 0

注:显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

表 4 产沙系数与下垫面状况的相关性

指标	径流系数	林草面积比	植被盖度	梯田面积比	骨干坝控制面积比
径流系数	1.000 0	-0.887 7	-0.998 5	-0.962 9	-0.971 7
林草面积比		1.000 0	0.912 0	0.979 0	0.971 3
植被盖度			1.000 0	0.976 4	0.983 3
梯田面积比				1.000 0	0.999 4
骨干坝控制面积比					1.000 0

注:显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

4 结论与讨论

(1) 1980s 以来,孤山川流域的降雨—产流—产沙关系发生了明显变化。与 1980s 相比,1990s 的降雨多为短历时、弱雨强类型,而 2000s 的降雨多为长历时、中雨强类型;2000s 的降雨产流能力和降雨产沙能力减小最为显著,其平均径流系数、平均产沙系数分别约为 1980s 的 50%,23%。

(2) 计算 1980s—1990s,1980s—2000s 的降雨—产流(产沙)弹性系数,分析降雨—产流(产沙)能力对雨强变化的敏感性,发现孤山川流域的降雨—产沙能力比降雨—产流能力对雨强变化更为敏感。分析 1980s—1990s 和 1980s—2000s 的降雨—产流弹性系数和降雨—产沙弹性系数,结果显示,1980s—1990s 降雨—产流弹性系数和降雨—产沙弹性系数分别为 0.13 和 4.21,1980s—2000s 降雨—产流弹性系数和降雨—产沙弹性系数分别为 1.73 和 6.19。可看出,1980s 以来,孤山川流域的降雨—产沙能力比降雨—产流能力对雨强变化更为敏感。

(3) 分析下垫面变化对产流产沙的影响,发现植

被盖度变化是下垫面因素中影响孤山川流域产流产沙能力变化的主要原因。分析径流系数、产沙系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比的相关性,结果显示,径流系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比的相关系数分别为 -0.662 3, -0.911 4, -0.801 0 和 -0.821 4, 产沙系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比的相关系数分别为 -0.887 7, -0.998 5, -0.962 9 和 -0.971 7。可看出,径流系数、产沙系数与林草面积比、植被盖度、梯田面积比和骨干坝控制面积比呈现明显的负相关关系,径流系数、产沙系数与植被盖度的相关系数均大于径流系数、产沙系数与其它下垫面指标间的相关系数,植被盖度变化是下垫面因素中影响孤山川流域产流产沙能力变化的主要原因。

综上,本研究成果可为黄河流域水保工程设计和水沙变化成因分析提供一定的参考。

致谢:感谢王志伟、管亚兵、倪超三位同学在数据收集整理工作中提供的大力帮助!

[参 考 文 献]

- [1] Liu Changming, Zheng Hongxing. Changes in components of the hydrological cycle in the Yellow River basin during the second half of the 20th century[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(2): 2337-2345.
- [2] Zhang Qiang, Xu Chongyu, Yang Tao. Variability of water resource in the Yellow River basin of past 50 years, China[J]. *Water Resources Management*, 2009 (23): 1157-1170.
- [3] 冉大川, 吴永红, 李雪梅, 等. 河龙区间近期人类活动减水减沙贡献率分析[J]. *人民黄河*, 2012, 34(2): 84-86.
- [4] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J]. *地理学报*, 1983, 38(4): 416-425.
- [5] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(5): 21-27.
- [6] 刘昌明. “黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(10): 991-998.
- [7] Tang Y, Tang Q, Tian F, et al. Responses of natural runoff to recent climatic variations in the Yellow River basin, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(11): 4471-4480.
- [8] 据彤军, 刘普灵, 徐学选, 等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J]. *泥沙研究*, 2007(4): 65-71.
- [9] 方海燕, 蔡强国, 李秋艳. 黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究[J]. *地理研究*, 2009, 28(3): 583-591.
- [10] Liu Y, Fu B J, Lü Y H, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2012(138): 404-414.
- [11] El Kateb H, Zhang Haifeng, Zhang Pingchang, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China[J]. *Catena*, 2013 (105): 1-10.
- [12] 穆兴民, 巴桑赤烈, Zhang Lu, 等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J]. *泥沙研究*, 2007(2): 36-41.
- [13] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(6): 1070-1078.
- [14] 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.
- [15] 罗琳, 王忠静, 刘晓燕, 等. 黄河流域中游典型支流汛期降雨特性变化分析[J]. *水利学报*, 2013(7): 848-856.
- [16] 徐建华, 林银平, 吴成基, 等. 黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [17] 王国庆, 陈江南, 李皓冰, 等. 黄土高原孤山川流域水沙变化研究综述[J]. *西北水资源与水工程*, 2003, 14(3): 13-16.
- [18] 徐宗学, 等. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [19] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 260-265.
- [20] 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(2): 135-141.
- [21] Schaake J C. From Climate to Flow[M]// Waggoner. P E. *Climate Change and US Water Resources*. New York, NY(US): Wiley-Interscience, 1990: 177-206.