

DOI:10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0098

HUANG Weidong, NIU Zuirong, LI Jisheng, et al. Water and sediment evolution in a small watershed: the headwaters of the Weihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 884–891. [黄维东, 牛最荣, 李计生, 等. 渭河源区典型小流域水沙演变规律分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 884–891.]

渭河源区典型小流域水沙演变规律分析

黄维东^{1,2}, 牛最荣¹, 李计生², 王毓森²

(1. 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省水文水资源局, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 根据渭河源区清源河典型小流域实测水文资料, 分析了流域水文要素的年内和年际变化规律, 流域降水、径流和泥沙主要集中在汛期, 5–9 月降水量占全年的 78.5%, 5–10 月径流占全年的 78.7%, 5–8 月输沙量占全年的 88.9%。受上游修建水库、水土保持等人类活动的影响, 流域汛期径流和泥沙 1997–2013 年比 1980–1996 年均减少了 5.9%。流域面平均降水量、平均流量、平均输沙量年际变化不稳定, 总体呈减少趋势, 序列最大可能变异点分别为 1995 年、1994 年和 1997 年。建立了流域年降水量与年径流深、次降水量 $P + Pa$ 与次径流深相关模型, 相关系数达到 0.902 和 0.860。以年最大洪峰流量为参数, 分别建立了流域年径流量与年输沙量、次径流量与次输沙量关系模型, 相关系数达到 0.835 和 0.917, 公式模拟值与实测值接近, 误差较小, 可以作为以径流推算泥沙的重要依据。通过定性定量分析人类活动对流域径流、泥沙的影响程度, 对区域抗旱防洪减灾、水资源管理、小流域治理及生态环境保护具有重要意义。

关键词: 水文要素; 序列变异诊断; 降水径流关系; 水沙关系模型; 清源河

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2017)04-0884-08

0 引言

随着全球气候变化和人类活动的加剧, 流域水文要素发生了显著变化, 气温升高、降水量减少导致流域来水来沙减少, 水利水电开发、流域综合治理等人类活动致使区域水资源持续减少, 用水矛盾突出^[1-2]。受极端天气影响, 局地干旱、暴雨洪水及泥石流灾害频发, 对区域用水安全、防洪安全、生态安全造成严重威胁。渭河是黄河的第一大支流, 横跨甘肃、陕西、宁夏三省区, 关中–天水经济区位于流域中游, 但由于流域水资源匮乏、河流泥沙含量高、水土流失严重、区域生态环境脆弱等问题, 严重制约区域经济社会发展。目前学术界对河流泥沙变化的研究大致可分为水沙变化特性研究、水沙变化驱动力及其影响研究和水沙关系预报模型研究等^[3-5]。对流域水沙变化特性的研究较多, 刘晓琼等^[6]研究了基于小波多尺度变换的渭河

水沙演变规律, 赵静等^[7]运用滑动平均法、Man-Kendall 法等分析了渭河流域的水沙演变特征以及水沙关系; 在具体针对渭河水沙变化驱动力的研究中, 许炯心^[8]研究了人类活动对渭河含沙量增减的影响, 孙悦等^[9]分析了 1975–2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应, 晏清洪等^[10]分析了降水 and 水土保持对黄土区流域水沙关系的影响; 水沙关系预报模型研究方面, 熊维新等^[11]、马春林^[12]采用水文法和水保法计算了渭河流域减水减沙效益, 分析了渭河水沙来源以及降雨产流产沙关系, 郑明国等^[13]研究了黄土丘陵沟壑区次暴雨时间尺度的水沙关系特性, 拟合出较大洪水次暴雨径流深和产沙模数之间的关系模型。

由上可见, 对渭河水沙演变规律的研究较多, 但应用渭河源区小流域以降水、径流、泥沙试验为主要目的水文站详细实测长系列资料, 全面分析小流域水沙演变规律及其关系模型的研究较少。特别

收稿日期: 2017-01-16; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(91125015; 51669002); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301083)资助

作者简介: 黄维东(1968–), 男, 甘肃榆中人, 正高级工程师, 从事水文水资源研究工作. E-mail: gsdxhwd@163.com

通信作者: 牛最荣, E-mail: zrnul2@sina.com.

是在 2010 年甘肃舟曲“8·8”特大山洪泥石流灾害发生后，全国范围内开展了中小河流治理，其中水文监测系统站点建设和洪水预警预报系统开发，为山洪灾害防治提供了重要的决策依据，而充分利用小流域实测水文资料，建立和完善暴雨-洪水预报模型，做出较为准确可靠的洪水预警预报结果尤为紧迫和重要。因此本文在相关研究基础上，分析了渭河源区清源河流域的水文要素特征、水沙演变规律，运用 Spearman 秩次检验等 3 种方法分析了流域降水、径流、输沙的历年变化趋势，通过累积距平法、Man-Kendall 法、Lee-Heghinan 法等 8 种方法分析了降水、径流、输沙序列最大可能变异点，分别建立了年和次洪水的雨-水-沙关系模型^[14-15]，并以前期影响雨量、年最大洪峰流量为参数，进一步完善了关系模型，提高了预报精度。研究气候变化和人类活动影响下的小流域水文要素变化规律，分析流域产水产沙机理及其成因，定性定量分析人类活动对河流水量、泥沙的影响程度，对区域抗旱防洪减灾、水资源管理、小流域治理及生态环境保护均具有重要意义。

1 流域概况

渭河源区分布有清源河、龙王沟和唐家河，三条河流在渭源县城汇流后向东南流，始称渭河，过去以主方向确定发源于鸟鼠山的龙王沟为正源，现代遵循“唯长唯远”的原则，发源于豁豁山的清源河应该是渭河正源，龙王沟和唐家河是其支流。清源河流域位于 104° E, 35°08' N，流域面积 114 km²，河长 19.1 km，河道比降 6.28%，最高海拔 3 400 m，最低海拔 2 200 m。流域多年平均气温 6℃，年降水量 615.5 mm，年径流量 0.2058 × 10⁸ m³，年输沙量 6.536 × 10⁴ t，年平均含沙量 3.18 kg · m⁻³。流域内多石质山陵，乔木、灌木、草地等覆被条件较好。清源河上游修建有峡口水库，于 1995 年 6 月 18 日开工建设，2000 年 12 月建成，为年调节水库，控制流域面积 34.7 km²，设计库容 745 × 10⁴ m³，兴利库容 718 × 10⁴ m³，设计灌溉面积 2 667 hm²，主要为城乡供水和农业灌溉，2011 年进行了除险加固。20 世纪 90 年代加大小流域治理，实行退耕还林还草、加大坡耕地改造、兴修水平梯田，拦蓄了一部分径流和泥沙，汇入河道的水量和沙量减少。清源河流域水系及站网分布见图 1。

清源河流域出口处设有控制性水文站——渭源水文站，主要观测水位、流量、泥沙、降水、蒸发及

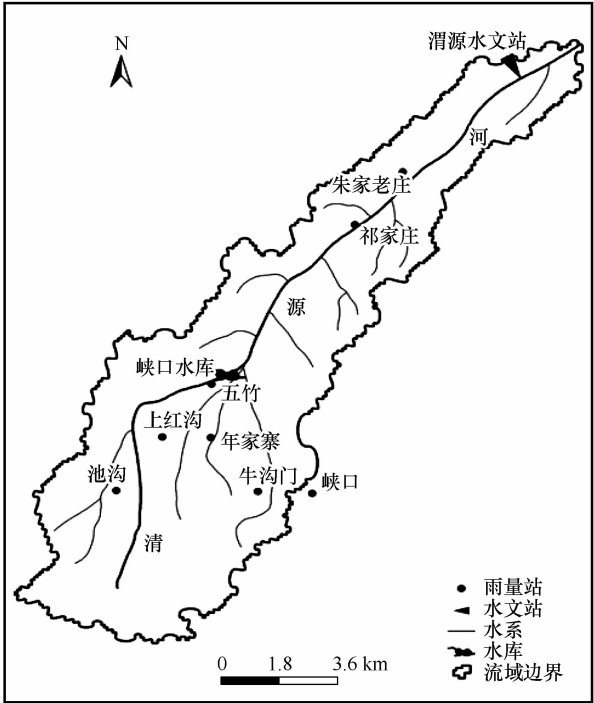


图 1 清源河流域水系及站网分布
Fig. 1 Water system and locations of hydrological station and precipitation stations in Qingyuan River basin

气象辅助项目等，同时在流域内设有 10 处配套雨量站，这些站点主要是观测收集流域水文、气象资料，开展小流域降水径流试验，为水文基础研究和流域治理提供科学依据。本次分析选取渭源水文站自建站以来 1980 - 2013 年实测降水、径流、泥沙资料，对部分雨量站个别缺测年份根据相邻站点进行了相关分析和插补延长。

2 水文要素年内变化

清源河流域降水量主要集中在汛期，代表站渭源站 5 - 9 月降水量占全年的 78.5%，10 月 - 次年 4 月仅占全年的 21.5%；径流主要集中在汛期 5 - 10 月，占全年的 78.7%，11 月 - 次年 4 月仅占全年的 21.3%；输沙量的年内分布比降水量和径流量更为集中，5 - 8 月输沙量占全年的 88.9%，9 月 - 次年 4 月仅占全年的 11.1%。降水量、径流量和输沙量年内分配见表 1。

受上游修建水库、水土保持等人类活动的影响，径流和泥沙的年内分布发生较大变化(图 2)。1980 - 1996 年期间 5 - 10 月径流占年径流总量的 81.4%，1997 - 2013 年期间 5 - 10 月径流占年径流总量的百分数减小到 75.5%。1980 - 1996 年期间 5 - 9 月输沙量占年输沙总量的 97.4%，1997 - 2013

表 1 渭源站水文要素年内分配
Table 1 Monthly variations of precipitation, runoff and sediment runoff at Wei yuan Hydrological Station

水文要素	月值占年总量百分数/%												汛期占全年/%	非汛期占全年/%
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
降水量	1.0	1.5	3.4	6.6	12.9	15.4	18.5	19.1	12.6	7.4	1.2	0.4	78.5	21.5
径流量	1.7	2.0	3.4	5.8	11.2	14.4	15.4	13.3	13.7	10.7	5.4	3.0	78.7	21.3
输沙量	0.0	0.1	1.0	1.3	10.1	29.9	30.2	18.7	7.2	1.0	0.4	0.1	88.9	11.1

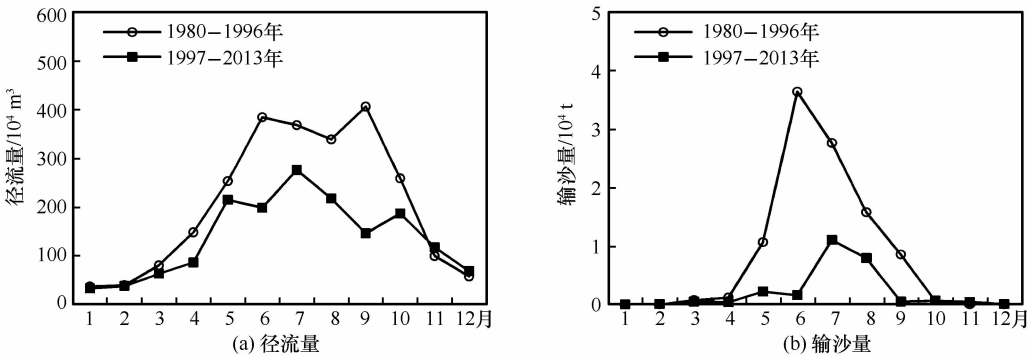


图 2 清源河流域径流量和输沙量年内分配
Fig. 2 Monthly variations of runoff and sediment runoff at Wei yuan Hydrological Station

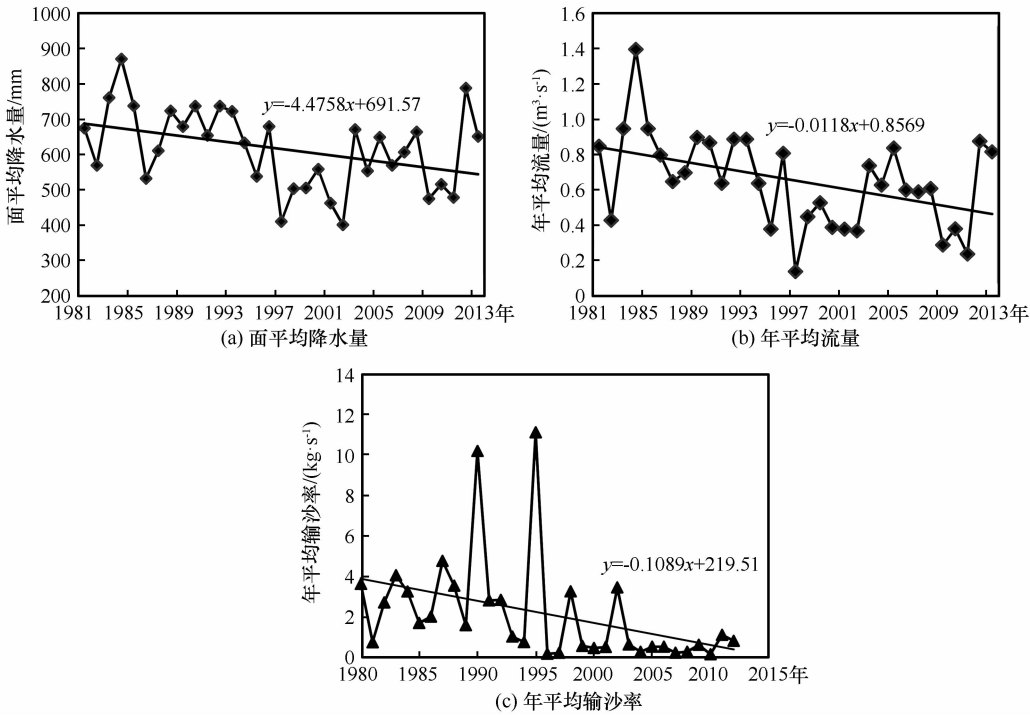


图 3 清源河流域水文要素历年过程线
Fig. 3 Annual variations of precipitation, runoff and sediment runoff at Wei yuan Hydrological Station

年期间 5-9 月输沙量占年输沙总量的百分数减小到 91.5%。水库蓄水拦沙及水土保持等人类活动致使汛期径流和泥沙均减少了 5.9%，径流量最大月份由 9 月提前到 7 月，这与水库在汛前加大泄流腾库、后期蓄水有关，输沙量最大月份则由 6 月推

迟到 7 月，这与水库调沙有关^[16-18]。

3 水文要素历年变化

清源河流域多年平均面降水量为 615.5 mm， $C_v = 0.18$ ， $C_s = 3.5C_v$ ；多年平均实测流量 0.652

$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $C_v = 0.40$, $C_s = 3.5C_v$, 年径流量 $0.2058 \times 10^8 \text{ m}^3$; 多年平均输沙率为 $2.07 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $C_v = 1.40$, $C_s = 3.5C_v$, 年输沙量 $6.536 \times 10^4 \text{ t}$, 年平均含沙量 $3.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。流域面平均降水量、平均流量、平均输沙量年际变化不稳定, 总体均呈减少趋势^[19](图 3)。

4 水文要素序列变异诊断及成因分析

通过 Spearman 秩次检验、Kendall 秩次检验和线性趋势回归法对年降水量、年平均流量、年平均输沙率序列进行计算分析, 检验结果均大于临界值(表 2), 表明清源河流域年降水量、年平均流量、年平均输沙率历年趋势变化显著。

通过累积距平法、Man-Kendall 法、有序聚类法、滑动 F 检验法、Lee-Heghinan 法、滑动 T 检验法、秩和检验法、游程检验法共 8 种方法进行计算分析, 年降水量序列最大可能变异点为 1995 年, 跳

跃前后变化 -17.0% ; 年平均流量序列最大可能变异点为 1994 年, 跳跃前后变化 -36.1% ; 年平均输沙率序列最大可能变异点为 1997 年, 跳跃前后变化 -74.6% (表 3)。

分析清源河流域径流、泥沙减少的原因, 除了降水减少致使径流补给来源减少、产生泥沙的水蚀动力减弱外, 20 世纪 90 年代流域内加大小流域治理, 实行退耕还林还草、加大坡耕地改造、兴修水平梯田, 同时为解决人畜用水修建了许多塘坝和集雨水窖, 清源河上游 1995 年开始修建峡口水库, 2000 年 12 月建成, 这些水利工程和流域治理措施拦蓄了一部分径流和泥沙, 从而使汇入河道的水量和沙量显著减少^[20-21]。刘海江等^[22]研究表明, 由于农田灌溉、修建水库、坡面水保措施增多和淤地坝建设等影响了渭河水沙情势, 导致水沙减少, 20 世纪 90 年代人类活动影响已超出降水等气象因素的影响, 本文分析结果与其一致。

表 2 趋势诊断检验($\alpha = 0.05$)结果统计
Table 2 Results of trends diagnosis test ($\alpha = 0.05$)

水文要素	趋势方程	Kendall 秩次相关法		Spearman 秩次相关法		线性趋势相关法	
		$U(\alpha/2) = 1.96$	是否显著	$T(\alpha/2) = 1.64$	是否显著	$T(\alpha/2) = 1.64$	是否显著
年降水量	$Y = -4.4758X + 691.57$	2.36	显著	2.38	显著	2.29	显著
年平均流量	$Y = -0.0118X + 0.8569$	2.88	显著	2.81	显著	2.96	显著
年平均输沙率	$Y = -0.1089X + 219.51$	3.22	显著	4.11	显著	2.47	显著

表 3 跳跃性诊断检验($\alpha = 0.05$)结果统计
Table 3 Results of jump diagnostic test ($\alpha = 0.05$)

水文要素	趋势程度	检验结果 $T(\alpha/2) = 1.64$	跳跃显著性	跳跃点	跳跃前均值	跳跃后均值	跳跃量	跳跃前后变化 /%
年降水量	减少	3.22	显著	1995 年	678.32	563.14	115.18	-17.0
年平均流量	减少	3.68	显著	1994 年	0.83	0.53	0.30	-36.1
年平均输沙率	减少	3.03	显著	1997 年	3.34	0.85	2.49	-74.6

5 水沙关系分析

5.1 降水与径流关系

点绘清源河流域年降水量与年径流深关系曲线(图 4), 相关关系较好, 相关系数达 0.902。年降水量 P 与年径流深 H 关系拟合公式如下:

$$H = 0.5771P - 173.86 \tag{1}$$

选取清源河流域 1980-2013 年共 44 场次实测暴雨洪水资料, 统计每一场次的径流深 H 及其与之对应的降水量 P 、前期雨量 Pa , 经对照分析 5 d、10 d、15 d 前期雨量, 清源河流域采用 15 d 前期雨

量相关关系相对较好, 点绘次降水 $P + Pa$ 与径流深关系曲线^[23-24](图 5), 相关系数为 0.860。次降水量与径流深关系拟合公式如下:

$$H = 0.0012(P + Pa)^2 + 0.1075(P + Pa) - 5.0246 \tag{2}$$

5.2 水沙关系

分别点绘清源河流域年径流量与年输沙量、次径流量与次输沙量关系曲线(图 6), 相关关系较差, 分析原因, 径流与输沙关系主要受当年最大一场洪水的影响。渭源站自建站以来洪峰流量超过 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的只有 1991 年和 1996 年, 分别为 $164 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $143 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 这两年的关系点据明显偏

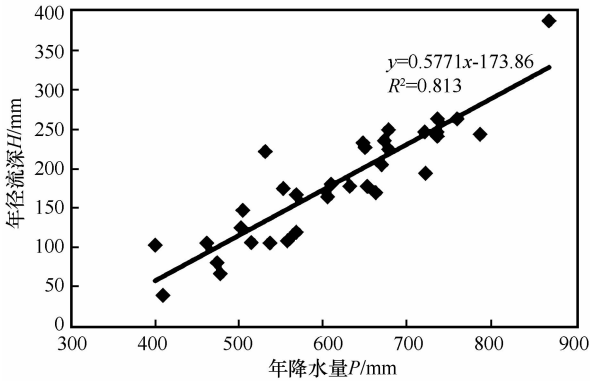


图 4 清源河流域年降水与径流的关系
Fig. 4 Correlation diagram between annual precipitation and annual runoff in the Qingyuan River basin

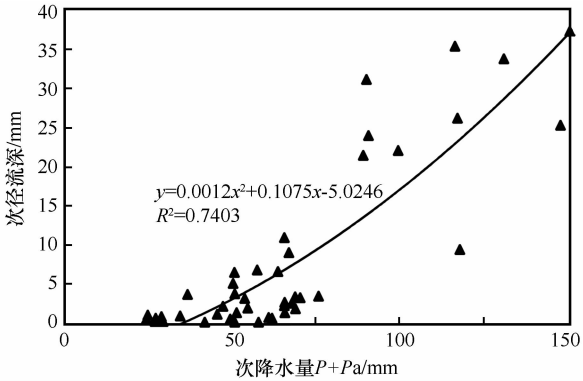


图 5 清源河流域次降水与径流的关系
Fig. 5 Correlation diagram between H and $P + P_a$ in the Qingyuan River basin

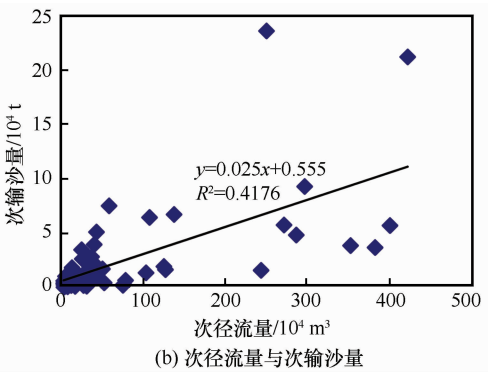
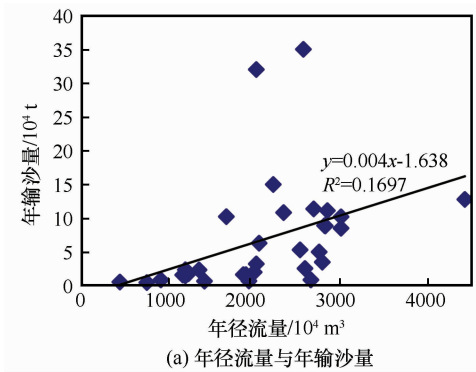


图 6 清源河流域径流量与输沙量的关系
Fig. 6 Relation between annual sediment runoff and annual runoff (left) and relation between sediment runoffs in various flood events and corresponding runoff (right) in the Qingyuan River basin

离, 其它年份都在 $62.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以下, 关系点据相对集中, 可见洪峰流量对泥沙的影响很大^[25]。

以年最大洪峰流量为参数, 输沙量与径流量的关系式表达如下:

$$W_s = a_0 \times W^\alpha \times Q_m^\beta \tag{3}$$

式中: W_s 为输沙量 (10^4 t); W 为径流量 (10^4 m^3);

Q_m 为年最大洪峰流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); a_0 、 α 、 β 为待定系数。

以实测年输沙量、径流量、最大洪峰流量数据拟合公式如下:

$$W_s = 0.000321 W^{0.9958} Q_m^{0.6674} \tag{4}$$

以实测次洪水输沙量、径流量、最大洪峰流量

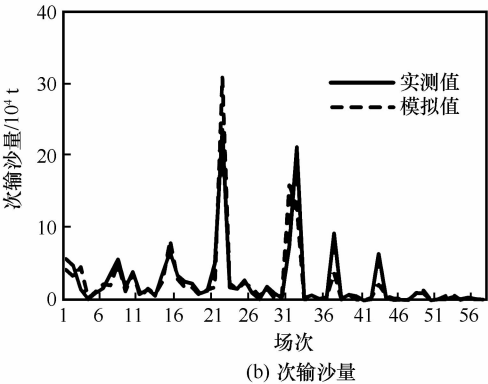
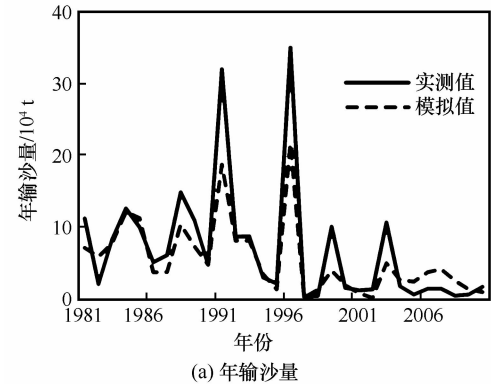


图 7 输沙量模拟值与实测值对照
Fig. 7 Variations of annual sediment runoff, measured and simulated (left) and sediment runoffs in various flood events, measured and simulated (right)

数据拟合公式如下：

$$W_s = 0.01698W^{0.3523}Q_m^{1.0897} \tag{5}$$

实测年输沙量与径流量、最大洪峰流量相关系数为 0.835，次洪水输沙量与径流量、最大洪峰流量相关系数为 0.917，实测值与模拟值对照见图 7，可见选定因子和参数合理，相关关系较好，公式模拟值与实测值接近，误差较小。

6 结论

(1) 清源河流域降水、径流和泥沙主要集中在汛期，代表站渭源站 5－9 月降水量占全年的 78.5%，5－10 月径流占全年的 78.7%，5－8 月输沙量占全年的 88.9%。受上游修建水库和水土保持的影响，径流和泥沙的年内分布发生较大变化，汛期径流和泥沙均减少了 5.9%。

(2) 清源河流域多年平均面降水量为 615.5 mm， $C_v=0.18$ ， $C_s=3.5C_v$ ；多年平均实测流量 $0.652\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ， $C_v=0.40$ ， $C_s=3.5C_v$ ，年径流量 $0.2058\times10^8\text{ m}^3$ ；多年平均输沙率为 $2.07\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $C_v=1.40$ ， $C_s=3.5C_v$ ，年输沙量 $6.536\times10^4\text{ t}$ ，年平均含沙量 $3.18\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。流域面平均降水量、平均流量、平均输沙量年际变化不稳定，总体均呈减少趋势。

(3) 通过 Spearman 秩次检验等方法对水文要素序列的趋势和跳跃进行计算分析，结果表明，清源河流域年降水量、年平均流量、年平均输沙率历年减少趋势变化显著，序列最大可能变异点分别为 1995 年、1994 年和 1997 年，这与 20 世纪 90 年代流域内加大小流域治理、实行退耕还林还草、兴修水平梯田、修建塘坝和集雨水窖以及清源河上游修建峡口水库有关。

(4) 建立了清源河流域年降水量与年径流深、次降水量 $P+Pa$ 与次径流深相关公式，相关系数达到 0.902 和 0.860。以年最大洪峰流量为参数，分别建立了流域年径流量与年输沙量、次径流量与次输沙量关系模型，相关系数达到 0.835 和 0.917，公式模拟值与实测值接近，误差较小，可以作为以径流推算泥沙的重要依据。

参考文献 (References)：

[1] Ding Yihui, Sun Ying. Recent advances in climate change science[J]. Advances in climate change research, 2006, 4(2): 161－167. [丁一汇, 孙颖. 国际气候变化研究新进展[J]. 气候变化研究进展, 2006, 4(2): 161－167.]

[2] Peng Meixiang, Zhao Yingli. Preliminary analysis of the influ-

ence of climate changes in current decade on water and sediment in the upper and middle Yellow River[J]. Yellow River, 1997 (7): 28－31. [彭梅香, 赵莹莉. 近十年气候变化对黄河中上游水沙影响分析[J]. 人民黄河, 1997(7): 28－31.]

[3] Niu Zuirong, Zhao Wenzhi, Liu Jinqi, et al. Study on change characteristics and tendency of temperature, precipitation and runoff in Weihe River basin in Gansu[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 32(2): 73－83. [牛最荣, 赵文智, 刘进琪, 等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J]. 冰川冻土, 2012, 32(2): 73－83.]

[4] Li Changbin, Wang Shuaibing, Yang Linshan, et al. Spatial and temporal variation of main hydrologic meteorological elements in the Taohe River basin from 1951 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1259－1266. [李常斌, 王帅兵, 杨林山, 等. 1951－2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1259－1266.]

[5] Shi Hongling, Hu Chunhong, Wang Yangui, et al. Analysis on variation trends of runoff and sediment of the Yellow River basin and reasons discussion[J]. Yellow River, 2014(4): 1－5. [史红玲, 胡春宏, 王廷贵, 等. 黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J]. 人民黄河, 2014(4): 1－5.]

[6] Liu Xiaoqiong, Liu Yansui, Li Tongsheng, et al. Evolution law of the runoff and sediment discharge of the Weihe River based on wavelet multi-scale transform[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(2): 211－217. [刘晓琼, 刘彦随, 李同昇, 等. 基于小波多尺度变换的渭河水沙演变规律研究[J]. 地理科学, 2015, 35(2): 211－217.]

[7] Zhao Jing, Huang Qiang, Liu Dengfeng. Analysis of runoff and sediment evolution in Weihe River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(3): 14－20. [赵静, 黄强, 刘登峰. 渭河流域水沙演变规律分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(3): 14－20.]

[8] Xu Jiongxin. Influence of human activities on hyperconcentrated flows in the middle Yellow River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3): 294－300. [许炯心. 人类活动对黄河中游高含沙水流的影响[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 294－300.]

[9] Sun Yue, Li Dongliang. Features and response to climate-driven factors of the runoff in the upper reaches of the Weihe River during 1975－2011[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 413－423. [孙悦, 李栋梁. 1975－2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 413－423.]

[10] Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effects of precipitation and erosion control practices on the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of typical watersheds in the hilly-gully region on the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(4): 9－16. [晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降水和水土保持对黄土区流域水沙关系的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 9－16.]

[11] Xiong Weixin, Wang Hong, Zhang Zhizhong. Analysis on benefits of hydraulic projects and soil conservation measures in reduction of runoff and sediment in Weihe River[J]. Yellow River, 1992(7): 21－25. [熊维新, 王宏, 张治忠. 渭河流域水利水保措施减水减沙效益初步分析[J]. 人民黄河, 1992(7): 21－25.]

[12] Ma Chunlin. Analysis on benefits of slope control measures in reduction of runoff and sediment in Weihe River[J]. Yellow River, 1992(7): 25－27. [马春林. 渭河流域坡面治理措施减水减沙效益分析[J]. 人民黄河, 1992(7): 25－27.]

- [13] Zheng Mingguo, Cai Qiangguo, Cheng Qinjuan. One new sediment yield model for single storm events and its application at annual time scale[J]. Geographical Research, 2007, 26(4): 745–754. [郑明国, 蔡强国, 程琴娟. 一种新的流域水沙关系模型及其在年际时间尺度的应用[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 745–754.]
- [14] Xiao Xuenian, Cui Lingzhou, Li Zhanbin. Study on spatial variation of the relationship between runoff and sediment of small watershed on Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(2): 140–142. [肖学年, 崔灵周, 李占斌. 黄土高原小流域水沙关系空间变异研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 140–142.]
- [15] Wang Huan, Li Dongliang, Jiang Yuanchun. Characteristics and reasons of the runoff variation in source regions of the Yellow River during 1956–2012[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 403–412. [王欢, 李栋梁, 蒋元春. 1956–2012 年黄河源区流量演变的新特征及其成因[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 403–412.]
- [16] Niu Zuirong, Zhao Wenzhi, Chen Xuelin, et al. Study of the water resources characteristics in the mid-west sub-water systems of the Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 31(6): 1194–1201. [牛最荣, 赵文智, 陈学林, 等. 黑河流域中西部子水系水资源分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2010, 31(6): 1194–1201.]
- [17] Yan Yuhong, Shen Yongping, Li Yuan, et al. Hydrological feature and flood analysis in Keping River on south slope of Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 824–829. [严宇红, 沈永平, 李宇安, 等. 新疆天山南麓柯坪河水文特性与洪水分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 824–829.]
- [18] Guo Hui, Li Dongliang, Lin Shu, et al. Temporal and spatial variation of precipitation over western China during 1954–2006[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1165–1175. [郭慧, 李栋梁, 林纾, 等. 近 50 多年来我国西部地区降水的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1165–1175.]
- [19] Lan Yongchao, Kang Ersi. Changing trend and features of the runoff from mountain areas of some main rivers in the Hexi inland region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 147–152. [蓝永超, 康尔泗. 河西内陆干旱区主要河流出山径流特征及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 147–152.]
- [20] Niu Yuguo, Zhang Xuecheng. Preliminary analysis on variations of hydrologic and water resources regime and its genesis of the Yellow River source region[J]. Yellow River, 2005(3): 31–33. [牛玉国, 张学成. 黄河源区水文水资源情势变化及其成因初析[J]. 人民黄河, 2005(3): 31–33.]
- [21] Shi Fucheng, Zhang Ran. Cause analysis and recognitions on the recent sharp decreasing of the Yellow River water and sediment amount[J]. Yellow River, 2013, 35(7): 1–3. [史辅成, 张冉. 近期黄河水沙量锐减的原因分析及认识[J]. 人民黄河, 2013, 35(7): 1–3.]
- [22] Liu Haijiang. Analysis of the conditions and trends of water and sediment in the Weihe River basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003. [刘海江. 渭河流域水沙演变情势分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.]
- [23] Liu Xinhua, Xu Hailiang, Ling Hongbo. Research on the high-low flow variation and the correlation between runoff and precipitation at the headwaters of the Aksu River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 741–750. [刘新华, 徐海量, 凌红波. 阿克苏河源流区径流量与降水量丰枯变化和相关性研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 741–750.]
- [24] Zhang Lijie, Zhao Wenzhi, He Zhibin, et al. The characteristics of precipitation and its effects on runoff in a small typical catchment of Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 776–782. [张立杰, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山典型小流域降水特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 776–782.]
- [25] Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Variation in the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of Lü'ergou watershed in the hilly-gully region on the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(5): 1–8. [晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 黄土丘陵沟壑区吕二沟流域水沙关系变化分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 1–8.]

Water and sediment evolution in a small watershed:
the headwaters of the Weihe River

HUANG Weidong^{1,2}, NIU Zuirong¹, LI Jisheng², WANG Yusen²

(1. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Hydrology and Water Resources Bureau
of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the hydrological data from the headwaters of the Weihe River, the annual and inter-annual variations of the hydrological elements were analyzed. It is found that precipitation, runoff and sediment in the basin is mainly concentrated in the flood season, such as precipitation from May to September accounts for 78.5% of annual precipitation, runoff from May to October accounts for 78.7% of annual runoff and sediment discharge from May to August accounts for 88.9% of annual sediment discharge. Human activities, such as reservoir construction and soil and water conservation in the upstream, resulted in decrease of runoff and sediment runoff 5.9% in 1997 – 2013 as compared with that in 1980 – 1996. Precipitation, runoff and sediment runoff in the basin change from year to year with an overall trend of decrease and some jumps in 1995, 1994 and 1997. Models of annual precipitation, annual runoff depth, and $P + Pa$ for the basin are established, of which the correlation coefficients reach 0.902 and 0.860. Based on annual maximum flood parameters, models of basin annual runoff, annual sediment runoff and $P + Pa$ were established, respectively, of which the correlation coefficients were 0.835 and 0.917. The simulation values are close to the measured values, with a small error, showing the simulated results can be used as an important base to calculate sediment from runoff. Through qualitatively and quantitatively analyzing the influence of human activities on basin runoff and sediment, one can see that this study is helpful for the regional struggle against drought, flood and disasters, for water resources management, watershed management and ecological environment protection.

Key words: hydrological elements; sequence variation diagnosis; relation between precipitation and runoff; water-sediment relationship model; Qingyuan River

(本文编辑：周成林)