

1957—2016 年祖厉河上游降水与水沙变化趋势

赵秀兰¹, 周蕊², 张富¹, 胡彦婷¹, 李晓雅¹, 包炳琛¹, 蒋承洋¹

(1.甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2.甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730000)

摘 要:为了探究半干旱黄土区降水量与径流量、输沙量变化趋势及周期分布规律,采用 M-K 突变检验、Morlet 小波及回归分析,对祖厉河上游 1957—2016 年降水量与径流量、输沙量进行了研究。结果表明:降水量、径流量和输沙量呈现出逐年减少的趋势,年际存在明显的“丰—枯”周期性变化。1957—1974 年降水量呈增加趋势,其中 1963—1968 年达到显著水平($p < 0.05$);1975—1994 年无明显的增减趋势,呈波动变化;1995—2016 年呈不显著减少趋势($p > 0.05$);径流量和输沙量变化与降水量相似,1957—1974 年呈增加趋势,1975—1994 年呈不显著减少趋势,1995—2016 年呈显著减少趋势($p < 0.05$)。年降水量存在 3 a、5 a、13 a 和 18 a 的平均变化周期;径流量存在 3 a、6 a 和 18 a 的平均变化周期,输沙量存在 3 a、4 a、5 a 和 18 a 的平均变化周期。径流量、输沙量对降水量变化响应由强逐渐减弱,对水土保持措施量变化响应逐渐增强。

关键词:水沙特征;降水量;M-K 检验法;小波分析;变化趋势

中图分类号:P332.1; P332.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0083-08

Change Trend of Precipitation, Runoff and Sediment in the Upper Zulihe River Basin from 1957 to 2016

ZHAO Xiulan¹, ZHOU Rui², ZHANG Fu¹, HU Yanting¹,

LI Xiaoya¹, BAO Bingchen¹, JIANG Chengyang¹

(1.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2.Gansu Provincial Soil and Water Conservation Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to explore the change trends of precipitation, runoff, sediment discharge and periodic distribution in semi-arid loess area, based on the data during the period of 1957—2016, the Mann-Kendall trend analysis, mutation test, Morlet wavelet and regression analysis method were used to analyze the precipitation, runoff and sediment discharge change in the upper reaches of Zulihe River. The results showed that the precipitation, runoff and sediment discharge presented the decreasing trend year by year, and there was an obvious cyclical change of abundance-drought during the years; from 1957 to 1974, precipitation presented the increasing trend, which reached a significant level from 1963 to 1968 ($p < 0.05$), there was no significant increase or decrease in 1975—1994, showing a fluctuating change; from 1995 to 2016, it showed no significant decrease ($p > 0.05$); the variation of runoff and sediment discharge was similar to precipitation; runoff and sediment discharge presented the increasing trend from 1957 to 1974, and there was no significant decrease from 1975 to 1994, and significant decrease from 1995 to 2016 ($p < 0.05$). The annual precipitation had the average change periods of 3-year, 5-year, 13-year and 18-year; runoff had the average change periods of 3-year, 6-year and 18-year, and the sediment discharge had the average change periods of 3-year, 4-year, 5-year and 18-year. The response of runoff and sediment discharge to the change of precipitation gradually weakened, and the response of runoff and sediment discharge to soil and water conservation measures gradually enhanced.

Keywords: runoff and sediment characteristics; precipitation; Mann-Kendall test; Morlet wavelet; change trend

收稿日期:2019-06-03

修回日期:2019-07-05

资助项目:甘肃农业大学林学一级学科建设开放基金课题“不同措施下黄土丘陵沟壑区生态系统水土保持功能分析”(GSAU-XKJS-2018-105);甘肃中部不同尺度水保措施强度与蓄水保土效率研究(xz20190523)

第一作者:赵秀兰(1994—),女,甘肃陇南人,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:zhaoxl123@163.com

通信作者:张富(1961—),男,甘肃定西人,研究员,博士,研究方向为水土流失规律及水土保持措施研究。E-mail:fuzhang001@163.com

径流、输沙是河川径流重要的水文特征^[1],是衡量区域生态环境变化的重要指标。随着全球气候变化和人类活动对自然环境的影响加剧,陆地水文循环的时空格局也发生了改变。在自然状态下,降水是半干旱黄土区水资源的主要来源,对河川径流具有重要影响。径流作为水蚀的动力,其大小与输沙变化具有密切的关系。对降水与径流、输沙变化趋势及特征的研究,是做好水资源管理及流域生态建设的基础性工作。

21 世纪以来,受气候变化及人类活动的影响,黄河水沙特性发生巨大的变化,对当地社会的可持续发展造成严重影响^[2-3],水沙变化原因及规律成为研究热点。赵阳等^[4]对黄河流域水沙变化研究表明,在 1950—2016 年期间径流量和输沙量均呈显著减少趋势,径流量和输沙量的突变点分别发生在 1981 年、1999 年,突变后减幅分别为 17.93%~40.79% 和 46.74%。孙洋洋^[5]、李二辉^[6]等对黄河上中游径流量变化进行了分析,表明径流量在 1919—2013 年呈明显的枯(1919—1932 年)—丰(1933—1985 年)—枯(1986—2013 年)的阶段性变化,且在 1985 年以后呈显著减少趋势。赵广举等^[7]对黄河中游 1950—2009 年水沙变化进行研究,结果表明径流量和输沙量均呈减少趋势,且在 1970 年之后减少显著。潘彬等^[8]对黄河下游径流量变化研究表明,1962—2012 年降水量和径流量呈减少趋势,降水减少趋势并不显著,降水量、径流量突变时间分别为 1964 年和 1979 年;降水量和人为因素对径流影响作用分别达到 32% 和 68%。王蕊等^[9]对黄河上游湟水河小南川流域气候和土地利用变化对水沙运移关系的研究表明 1963—2013 年降水量逐渐增加,径流量和输沙量逐渐减少。Zhang 等^[10]对祖厉河流域 1955—2013 年降水量、径流量和输沙量变化特征进行研究,结果表明降水量、径流量和输沙量均逐年减少,降水量和径流量在 1995 年出现突变点,输沙量在 2000 年出现突变点。以上研究表明,区域尺度不同,不同时段水沙变化规律也不相同。同时研究多在较大尺度区域,而对于中小尺度区域水沙变化规律及周期变化特征研究较少。本研究基于祖厉河上游会宁水文站实测径流量、输沙量资料及雨量站降水资料,采用 M-K 突变检验和小波分析方法,对降水量、径流量和输沙量的变化特征、周期分布规律进行研究,以期为中小尺度区域合理开发保护流域水资源、水土流失治理及区域经济发展提供科学依据。

1 材料及方法

1.1 研究区概况

祖厉河是黄河一级支流,位于黄土高原丘陵沟壑区

第五副区,总面积 10 653 km²。在黄河上游面积超过 1 万 km² 的 6 条支流中,祖厉河年均径流量 1.086 亿 m³,泥沙量为 5 320 万 t,分别占入黄径流量、输沙量的 1.60%,39.6%,是黄河上游泥沙的主要来源。研究区位于祖厉河上游甘肃省会宁县南部,地理位置为 104°56′—105°23′E,35°22′—35°47′N,包括会宁、通渭两县的中川、新添、太平、华家岭(祖厉河的发源地)等 10 个乡镇,总流域面积 983.86 km²(图 1)。研究区丘陵起伏,沟壑纵横,地形破碎,地表被黄土覆盖,地势由南向北走向,平均海拔在 2 025 m。气候属半干旱区,年均气温 7.9℃,最高气温 37.5℃,最低气温 -26.5℃,降水较少且分布不平衡,年均降水量为 406.4 mm,年平均蒸发量为 1 800 mm。土壤主要是黄绵土、灰钙土和灰褐土为主,局部低洼地分布少量盐碱土。自然植被主要以冰草、针茅、蒿类等草本植物为主,粮食作物主要有小麦、马铃薯、玉米等。干旱是区域内主要的自然灾害,也伴有霜冻、冰雹、洪灾、病虫害等。土地利用类型以耕地、草地和灌木林地为主。据会宁水文站 1957—2016 年观测资料,研究区年均径流量为 1 227.4 万 m³,年均输沙量为 367.6 万 t。

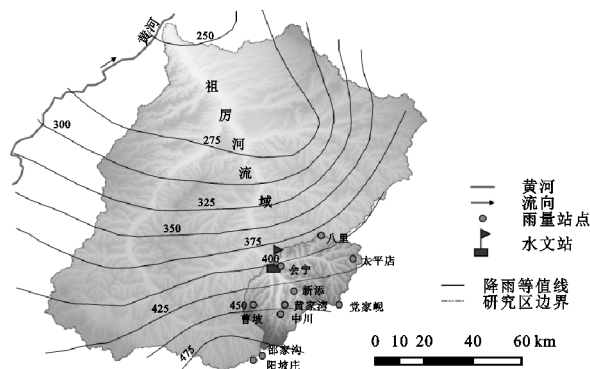


图 1 研究区地理位置

1.2 数据来源及方法

1.2.1 数据来源 本研究采用甘肃省水文水资源局提供的 1957—2016 年会宁水文站逐月径流量、输沙量及 10 个雨量站的降水观测数据。

1.2.2 研究方法 使用泰森多边形法对降水量观测数据进行预处理,计算平均降水量,通过 Excel 软件对径流量、输沙量原始资料进行整理。采用 M-K 趋势分析和突变检验法^[11],对研究区 1957—2016 年降水量、径流量和输沙量的变化趋势及突变进行研究;选取 Morlet 小波分析方法对降水量、径流量及输沙量时间尺度演变特性进行分析^[12-14],进行连续小波变换,得到小波系数的实部、方差信息,并对变化的主周期通过小波方差进行检验,计算平均周期;利用 SPSS 20 软件,通过线性回归及曲线估计方法,分析降水量、水土保持措施量与径流量、输沙量相互间的关系,建立关系式。

2 结果与分析

2.1 降水量、径流量及输沙量变化特征

2.1.1 降水量变化特征分析 根据气象资料统计,研究区 60 a(1957—2016 年)年均降水量为 406.4

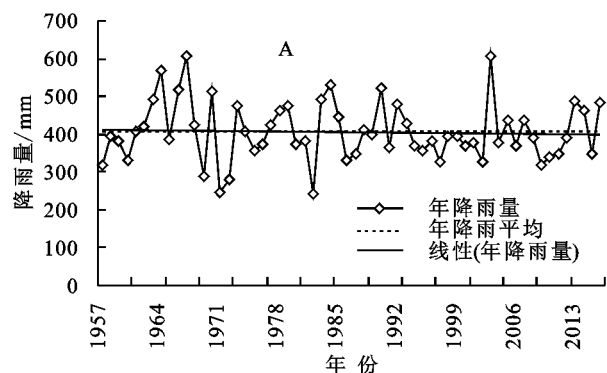


图2 降水量变化和 M-K 检验

由图 2B 可以看出,在 1957—1974 年(18 a)降水量有明显增加趋势,平均降水量 414.50 mm,其中 1963—1968 年(6 a)UF_k值达到显著水平($p < 0.05$),平均降水量 499.20 mm;1975—1990 年(16 a)平均降水量 410.13 mm,在均值附近波动;1991—2016 年(26 a),降水量呈减少趋势,平均降水量 398.51 mm;1975—2016 年降雨量无显著变化($p > 0.05$)。

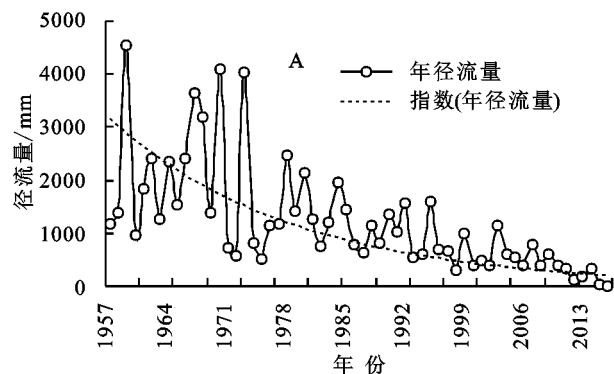
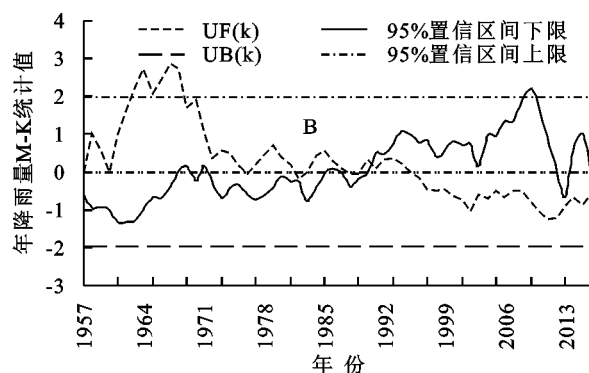


图3 年径流量变化和 M-K 检验

由图 3B 可知,在 1957—1974 年(18 a)径流量呈增加趋势,平均径流量 2 131 万 m³;在 1975—1999 年(26 a)径流量呈减少趋势,其中 1993—1999 年(7 a)达到显著水平($p < 0.05$),平均径流量 772 万 m³;在 2000—2016 年(17 a),径流量呈显著减少趋势($p < 0.05$),平均径流量 417 万 m³;同时 UF_k与 UB_k两条曲线在 2000 年出现了交点,说明突变点出现在 2000 年。

(2) 输沙量变化趋势分析。年输沙量变化趋势与径流量相似,总体出现波动下降的趋势(图 4A)。研究期年均输沙量为 367.6 万 t,其中 1973 年的输沙量最大(1 614.5 万 t),2016 年输沙量最小(1.3 万 t),最大年输沙量是最小年的 1 238 倍。年际间输沙量存在较为明显的波动。

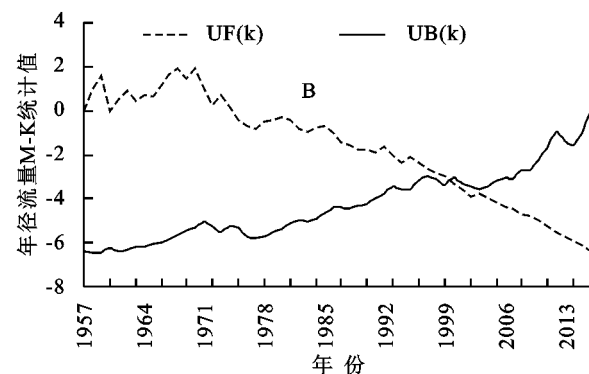
mm,其中 1967 年的降水量最大(607.2 mm),1982 年降水量最小(243.9 mm),两者相差 363.3 mm,最大降水量是最小降水量的 2.49 倍。1957—2016 年降水量变化趋势分析表明,年降水量略有降低的趋势,但总体未达到显著水平($p > 0.05$)(图 2A)。



2.1.2 径流量、输沙量变化特征

(1) 径流量变化趋势分析。根据观测数据,研究期年均径流量为 1 227.4 万 m³,年径流量总体出现波动下降的趋势(见图 3A)。

其中 1959 年的径流量最大(4 549.0 万 m³),2016 年径流量最小(3.0 万 m³),最大年径流量是最小年径流量的 1 516 倍。



由图 4B 可看出,在 1957—1974 年(18 a)输沙量呈增加趋势,平均输沙量 619.9 万 t;在 1975—2002 年(28 a)输沙量呈减少趋势,其中 1996—2002 年(7 a)输沙量达到显著水平($p < 0.05$),平均输沙量 180.5 万 t;在 2003—2016 年(14 a)输沙量呈显著减少趋势($p < 0.05$),平均输沙量 123.3 万 t;同时 UF_k与 UB_k两条曲线的相交于 2003 点,说明突变点出现在 2003 年。

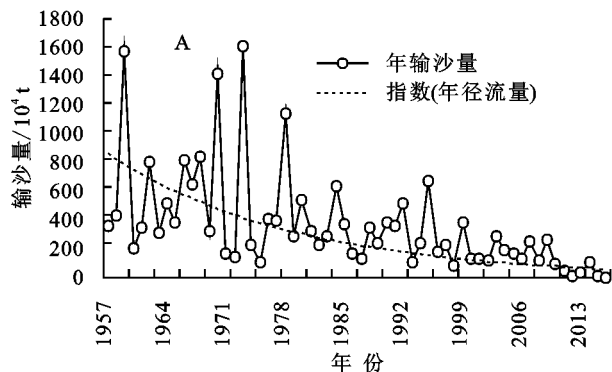
2.2 降水量、径流量和输沙量周期变化特征分析

2.2.1 降水量周期变化特征

(1) 时间尺度周期性分析。由图 5A 可知,年降水量存在 3 种尺度的周期变化:4~8 a,11~15 a 和 16~32 a,其中 16~32 a 和 4~8 a 周期内的“丰—

枯”交替变化较明显,贯穿整个时间序列。

小尺度4~8 a的周期性变化,主要以“枯—丰”周期变换为主,出现了13次震荡;中尺度11~15 a的周期性变化在1990年以前表现较明显,出现“丰—



枯”交替的4次振荡;而大尺度16~32 a周期中,降水量出现“枯—丰”交替的4次震荡,突变特性明显,且从图5A还可以看出,整个大尺度的周期变化占据了整个时间序列且状态比较稳定,具有全域性。

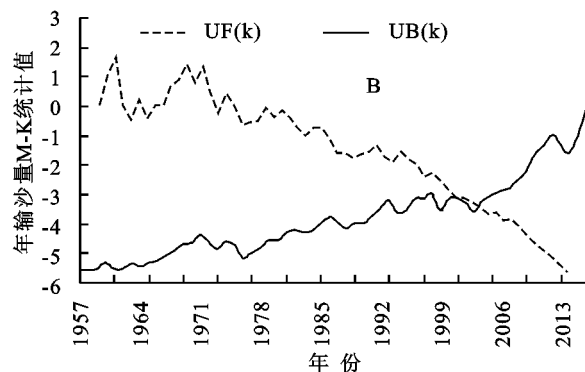
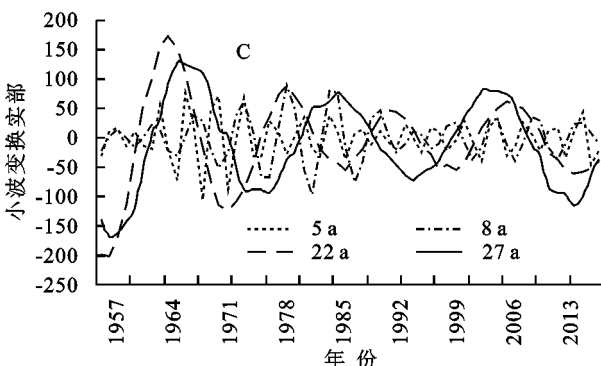
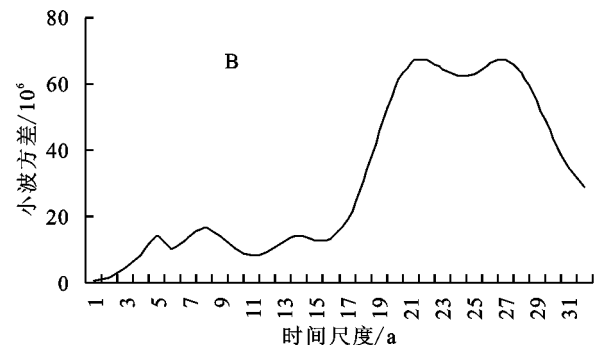
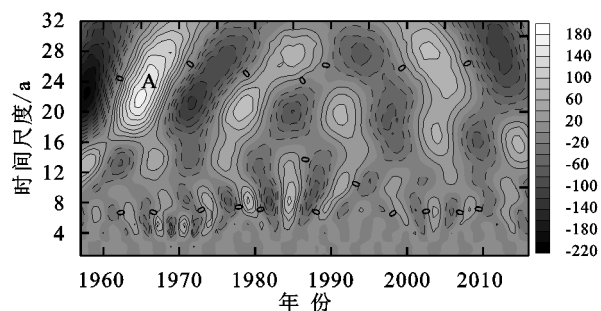


图4 年输沙量变化和M-K检验



注:图中黑色粗实线是小波系数零点等值线,代表突变线;细实线是小波系数正值等值线,图中浅色区域,代表降水量和径流量偏丰(输沙量多沙期);虚线是小波系数负值等值线,图中深色区域,代表降水量和径流量偏枯(输沙量少沙期)。

图5 年降水量小波系数实部等值线、小波方差和小波周期

(2) 不同周期变化分析。图5B中存在4个峰

值,分别对应5 a,8 a,22 a,27 a时间尺度,其中,27 a的周期振幅最大,为降水序列变化的第一主周期,则22 a,8 a,5 a为第2,3,4主周期。由图5C可知,降水序列在27 a时间尺度下,经历约3个波动周期,其平均变化周期约为18 a;降水量“枯—丰”的转变点在1963年、1981年和1999年。从周期变化可以预测降水量在27 a时间尺度(2017年左右)将由枯转丰。在22 a时间尺度下,约经历4个波动周期,其平均变化周期约为13 a。从变化趋势可以预测降水量在22 a时间尺度(2028年左右)将由枯转丰。降水序列在8 a和5 a时间尺度下,分别经历12个和18个周期波动,其平均变化周期分别约为5 a和3 a。从变化趋势来看,预测在8 a时间尺度下,2020年左右降水量由枯转丰,而5 a时间尺度下,2019年降水量由枯转丰。

2.2.2 径流量周期变化特征

(1) 时间尺度周期性分析。从图6A可以看出,年径流量存在3种尺度的周期变化:3~7 a,8~12 a和14~32 a,这3种尺度下径流量在整个时间序列丰、枯水期交替变化明显。小尺度3~7 a的周期性变化主要在1957—2010年表现得较为活跃,存在“枯—丰”交替的周期性变化。8~11 a尺度上的周期性变化主要在1957—2005年变化明显,存在“枯—丰”交替的8次震荡;在1985—2005年,14~24 a时间尺度上,径流量呈现“枯—丰—枯”的状态,但在14~32 a的尺度上来说,是处于枯水期;而大尺度14~32 a来看,随着时间序列的变化,径流表现出了“枯—丰”交替的3次震荡,具有明显的突变性,具体时间为1957—1966年为枯水期,1966—1975年为丰水期,1975—1984年为枯水期,1984—1993年为丰水期,1993—2002年为枯水期,2002—2012年为丰水期,

2012—2016年为枯水期,整个大尺度的周期变化占据了整个时间序列且状态比较稳定,具有全域性。

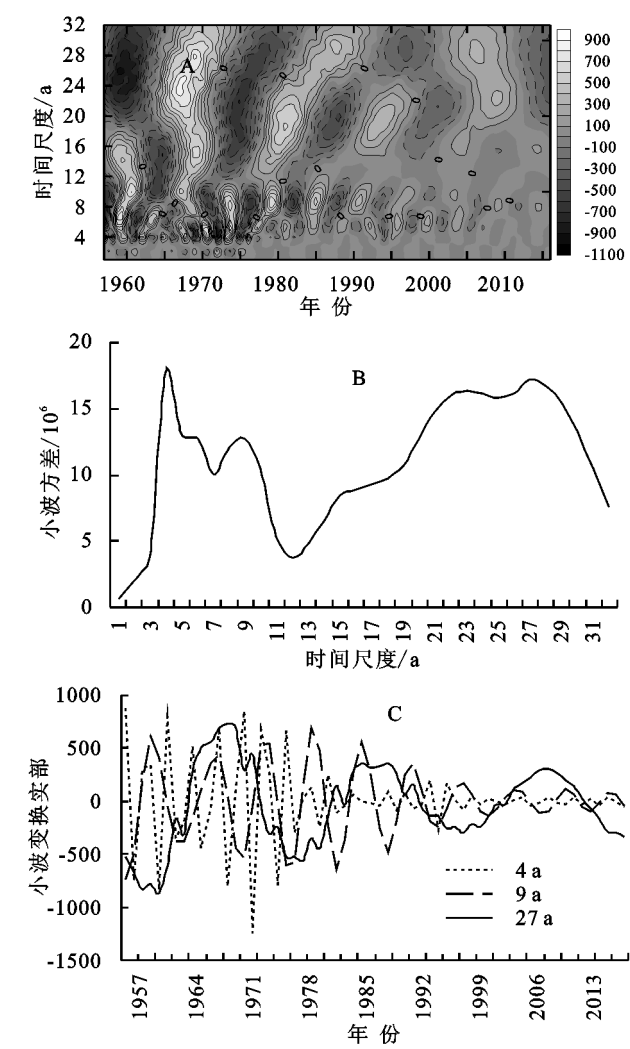


图6 年径流量小波系数实部等值线、小波方差和小波周期

(2) 不同周期变化分析。图 6B 中有 3 个峰值, 分别对应 4 a, 9 a, 27 a 时间尺度, 其中, 4 a 的周期振荡最强, 为径流序列变化的第一主周期, 则 27 a, 9 a 为第 2、3 主周期。由图 6C 可知, 在 27 a 时间尺度下, 径流序列经历约 3 个波动周期, 其平均变化周期约为 18 a, 径流量“枯—丰”的转变点在 1965 年、1982 年和 2003 年。1969 年处于 27 a 尺度下的偏丰极大值处。从周期变化可以预测径流量在 27 a 时间尺度 (2021 年左右) 将由枯变丰; 径流量在 9 a 和 4 a 时间尺度下, 分别经历 10 个和 22 个周期波动, 其平均变化的周期分别约为 6 a 和 3 a。从变化周期预测在 9 a 时间尺度下, 2020 年左右的径流量由枯变为丰, 而 4 a 时间尺度下, 2018 年左右的径流量由枯转丰。

2.2.3 输沙量周期变化特征

(1) 时间尺度周期性分析。年输沙量存在 3 种尺度的周期变化: 3~7 a, 8~12 a 和 14~32 a, 这 3

种尺度下输沙量在整个时间序列多、少沙期交替变化明显 (图 7A)。在小尺度 3~7 a 的周期, 主要在 1957—2003 年表现得较为活跃, 存在“多—少”交替的周期性变化。8~11 a 尺度上的周期变化主要在 1957—1997 年变化明显, 存在“少—多”交替变化的 7 次震荡; 在 1972—1990 年、14~24 a 时间尺度上, 输沙量呈现“少—多—少”的状态, 但在 14~32 a 的尺度上来说, 是处于少沙期; 而大尺度 14~32 a 来看, 随着时间序列的变化, 输沙量表现出了“少—多”交替变化的 3 次震荡, 存在明显的突变特性, 具体时间为 1957—1966 年为少沙期, 1966—1976 年为多沙期, 1976—1987 年为少沙期, 1987—1997 年为多沙期, 1996—2005 年为少沙期, 2005—2013 年为多沙期, 2013—2016 年为少沙期, 整个大尺度的周期变化占据了整个时间序列且状态比较稳定, 具有全域性。

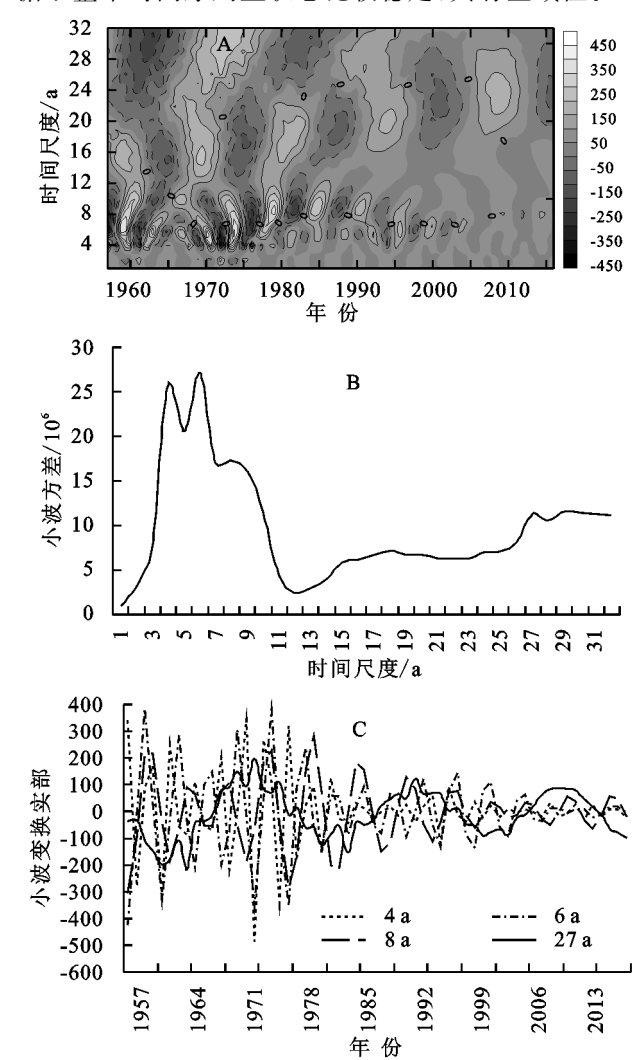


图7 年输沙量小波系数实部等值线、小波方差和小波周期

(2) 不同周期变化分析。图 7B 中有 4 个峰值, 分别对应 4 a, 6 a, 8 a, 27 a 时间尺度, 其中, 6 a 左右的周期振荡最强, 为输沙序列变化的第一主周期, 则

4 a,8 a,27 a 为第 2、3、4 主周期。由图 7C 可知,在 27 a 时间尺度下,输沙序列经历约 3 个波动周期,其平均变化周期约为 18 a;输沙量“少—多”的转变点在 1968 年、1987 年和 2005 年。从周期变化可以预测输沙量在 27 a 时间尺度(2021 年左右)将由少变多;在 8 a 的时间尺度下,输沙量经历 12 个周期波动;输沙量在 6 a 和 4 a 尺度下,分别经历 15 个和 22 个周期波动,其平均变化周期分别约为 4 a 和 3 a。从变化周期来看,6 a 和 3 a 时间尺度下,预测输沙量在 6 a 时间尺度下,2020 年左右由少变多,而 3 a 时间尺度下,2018 年左右输沙量由少变多。

对年降水量、径流量和输沙量比较可知,尽管径流量、输沙量和降水量的周期变化并不完全一致,但很相似,存在包含和部分包含的关系,如降水量的 16~32 a 的时间尺度包含于径流量和输沙量的大尺度 14~32 a 中,但径流量和输沙量的 3~7 a 和降水的 4~8 a 小尺度与只是部分包含。而径流量和输沙量的变化周期尺度一致,具有同步性。同时,从图中还可以发现,无论是降水量还是径流量、输沙量,都有一个大尺度下的丰水期(多沙期)或者枯水期(少沙期),存在小尺度下的丰—枯水期(多—少沙期)嵌套的现象,小尺度下的降水量和输沙量、径流量转变点要多于大尺度,且不同尺度下的转变点时间及个数都不相同。

2.3 影响水沙量变化的主要因素

2.3.1 降水量与径流量、输沙量的关系 影响径流量、输沙量的主要因素是降雨和以水土保持措施为主的人类活动^[15]。按照时间周期将降水量与径流量、

输沙量的时间序列划分为 4 个时间段,第 I 时段 1957—1974 年,第 II 时段 1975—1992 年,第 III 时段 1993—2010 年和第 IV 时段 2011—2016 年。不同时段降水量、径流量和输沙量平均值见表 1。由回归分析可知(表 2),在第 I 时段径流量、输沙量对降水量变化响应强烈,趋势协同性强,相关系数较高,降水量和径流量达到显著水平($p<0.05$),降水量对径流量的决定系数 R^2 为 0.482,降水量和输沙量未达到显著水平($p>0.05$),降水量对输沙量的决定系数 R^2 为 0.385,平均径流模数和输沙模数分别为 2.17 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 0.63 万 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;第 II 时段径流量、输沙量对降水量变化响应减弱,趋势协同性弱化,相关系数降低,降水量和径流量达到显著水平($p<0.05$),降水量对径流量的决定系数 R^2 为 0.398,降水量和输沙量未达到显著水平($p>0.05$),降水量对输沙量的决定系数 R^2 为 0.293,平均径流模数和输沙模数分别为 1.29 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 0.39 万 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;第 III 时段径流量、输沙量对降水变化的响应迅速衰减,趋势协同异化,降水量与径流量、输沙量均未达到显著水平($p>0.05$),降水量对径流量、输沙量的决定系数 R^2 分别达到为 0.114,0.012,平均径流模数和输沙模数分别为 0.65 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 0.21 万 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;说明在 1957—2010 年随时间延长,降雨对径流量和输沙量的影响逐渐降低;与其相比,径流量与输沙量相关关系趋势协同性强,略有减弱,但不明显,径流量对输沙量的决定系数 R^2 分别为 0.920,0.874,0.860,均达到极显著水平($p<0.01$)。

表 1 不同时段年降水量、径流量和输沙量平均值

特征值	I (1957—1974 年)	II (1975—1992 年)	III (1993—2010 年)	IV (2011—2016 年)
降水量/mm	414.50	411.50	388.78	419.72
径流量/ 10^4 m^3	2131.44	1265.94	640.39	160.75
输沙量/ 10^4 t	619.88	382.95	210.49	35.91

注:第 I, II 和 III 时段为 18 a 的完整周期,第 IV 时段是 6 a 的不完整周期。

表 2 不同时段年降水量与径流量、输沙量相关关系

相关关系	时段(年份)	模型	R	R^2	F	Sig.
降水量(x_1)—径流量(y_1)	I (1957—1974 年)	$y_1 = 0.041x_1^{1.781}$	0.694	0.482	14.877	0.010 *
	II (1975—1992 年)	$y_1 = 0.278x_1^{1.390}$	0.631	0.398	10.575	0.005 **
	III (1993—2010 年)	$y_1 = 0.657x_1^{0.985}$	0.338	0.114	2.049	0.172
降水量(x_1)—输沙量(y_2)	I (1957—1974 年)	$y_2 = 0.007x_1^{1.862}$	0.620	0.385	10.027	0.060
	II (1975—1992 年)	$y_2 = 0.028x_1^{1.263}$	0.541	0.293	6.639	0.020
	III (1993—2010 年)	$y_2 = 17.200x_1^{0.396}$	0.110	0.012	0.195	0.665
径流量(y_1)—输沙量(y_2)	I (1957—1974 年)	$y_2 = 0.108y_1^{1.121}$	0.959	0.920	183.352	0.000 **
	II (1975—1992 年)	$y_2 = 0.058y_1^{1.225}$	0.935	0.874	111.139	0.000 **
	III (1993—2010 年)	$y_2 = 0.125y_1^{1.143}$	0.927	0.860	97.973	0.000 **

注: x_1 为降水量; y_1 为径流量; y_2 为输沙量;* 为 $p<0.05$; ** 为 $p<0.01$ 。R 为相关系数; R^2 为贡献系数;F 为方差检验值,Sig. 为显著性检验值。

2.3.2 水土保持措施与径流量、输沙量的关系 根据祖厉河流域水利水土保持措施对入黄水沙变化的影响及发展趋势研究(1957—1989 年)^[15]、甘肃省水土保持综合治理措施效益研究(1979—2012 年)^[16]及甘肃省水土保持年报资料(2013—2016 年)会宁县历年水土保持措施保存面积资料,采用按比例分摊法,按照研究区面积占会宁县的比例,计算得到历年研究区水土保持措施面积。研究区按照水土流失治理速率,大体上可分为 1957—1984 年、1985—2000 年和 2001—2016 年 3 个阶段(图 8A)。1957—1984 年为分散零星治理阶段,治理速度小、措施比较单一,主要措施以造林和梯田为主体,至 1984 年底水土保持措施面积达到 1.09 万 hm²,其中梯田面积增加到 0.53 万 hm²,造林面积增加到 0.30 万 hm²,种草面积增加

到 0.14 万 hm²;1985—2000 年以小流域为单元综合治理阶段,这个时期实施的国家级、省级梯田建设工程、小流域治理项目较多,治理速度加快、措施质量提高,至 2000 年底水土保持措施面积达到 4.01 万 hm²,其中梯田面积由 0.53 万 hm²增加到 1.23 万 hm²,造林面积由 0.30 万 hm²增加到 1.16 万 hm²,种草面积由 0.14 万 hm²增加到 1.25 万 hm²;2001—2016 年,为稳定提高时期,此阶段除实施梯田、小流域综合治理项目外,开展了大规模退耕还林(草)工程,至 2016 年底水土保持措施面积达到 5.93 万 hm²,其中梯田面积由 1.23 万 hm²增加到 2.33 万 hm²,造林由 1.16 万 hm²增加到 1.51 万 hm²,种草面积由 1.25 万 hm²增加到 1.51 万 hm²,水土流失治理程度达到 60.31%。

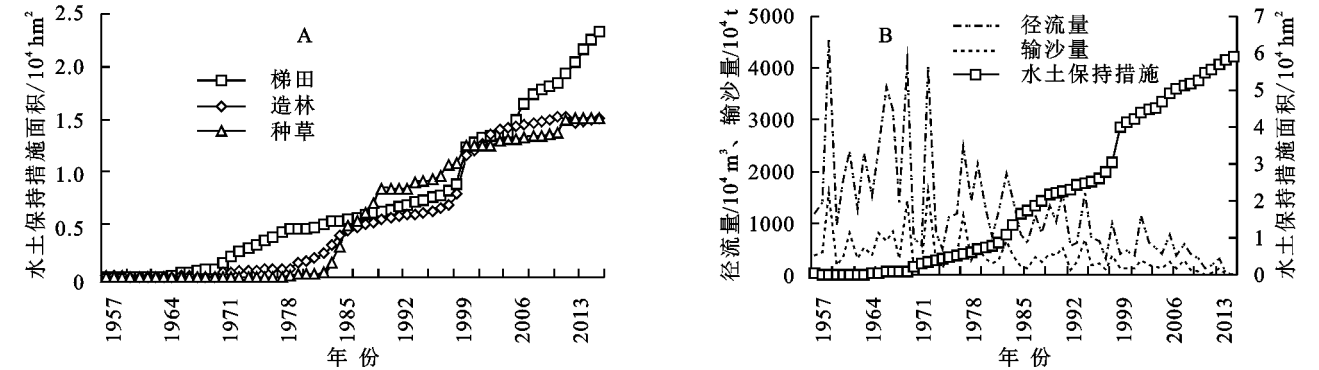


图 8 水土保持措施量(A)和径流量、输沙量变化(B)

由图 8B 可以看出,随着水土保持措施量的逐渐增加,径流量和输沙量呈现波动减少趋势。由回归分析可知(表 3),在 1957—1984 年,径流量、输沙量对水土保持措施量变化响应不强烈,都未达到显著水平($p > 0.05$),水土保持措施量对径流量的决定系数 R^2 为 0.076,对输沙量的决定系数 R^2 为 0.027。在 1985—2000 年,径流量对水土保持措施量变化响应强烈,达到显著水平($p < 0.05$),水土保持措施量对径流量的决定系数 R^2 为 0.309,对输沙量的决定系数 R^2 为 0.115。在 2001—2016

年,径流量、输沙量对水土保持措施量变化响应增强,分别达到极显著水平($p < 0.01$)和显著水平($p < 0.05$),水土保持措施量对径流量的决定系数 R^2 为 0.390,对输沙量的决定系数 R^2 为 0.352。平均径流模数和输沙模数分别由 1957—1984 年 1.90 万 m³/(km²·a)和 0.56 万 t/(km²·a),减少为 2001—2016 年 0.42 万 m³/(km²·a)和 0.13 万 t/(km²·a)。说明水土保持措施对径流量和输沙量的影响逐渐增大,随着水土保持治理措施增加,水土流失量迅速下降。

表 3 不同时段水土保持措施量和径流量、输沙量相关关系

相关关系	年份	模型	R	R ²	F	Sig.
水土保持措施量(x_2)—径流量(y_1)	1957—1984	$y_1 = -9.592x_2 + 21.662$	0.276	0.076	2.218	0.157
	1985—2000	$y_1 = -3.901x_2 + 18.543$	0.556	0.309	6.723	0.020 *
	2001—2016	$y_1 = -2.849x_2 + 18.314$	0.624	0.390	9.595	0.007 **
水土保持措施量(x_2)—输沙量(y_2)	1957—1984	$y_2 = -2.151x_2 + 6.230$	0.164	0.027	0.731	0.400
	1985—2000	$y_2 = -0.894x_2 + 5.082$	0.339	0.115	1.941	0.184
	2001—2016	$y_2 = -0.866x_2 + 5.539$	0.593	0.352	8.151	0.012 *

注: x_2 为水土保持措施量。

3 讨论

研究区与祖厉河流域相比,其上游(研究区)降水量、径流量和输沙量变化趋势,与韩通^[17]、张富^[11]等

对祖厉河流域 1957—2006 年及 1955—2013 年的研究结果一致,但祖厉河流域降水量呈显著减少趋势,在上游地区这种趋势没有达到显著水平;而径流量、输沙量均显示了相同的显著减少的变化趋势,但祖厉

河流域径流量、输沙量的突变点分别出现在 1995 年和 2000 年但上游分别出现在 2000 年和 2003 年,分别滞后了 5 a 和 3 a。黄维东^[18]在对祖厉河流域水沙变化研究中发现,降水对水沙减少量影响是 30%,人类活动影响占 70%。刘淑燕^[19]、李宜坪^[20]等对黄土丘陵沟壑区水土保持措施对径流输沙的影响进行研究,结果表明增加水土保持措施可有效的减少流域内径流输沙量,水沙关系受降水量、降水强度和土地利用变化的显著影响,并说明坡改梯是引起水沙变化的主要原因,坡面工程措施增加了地表形态。本研究中,降水对径流的决定系数 R^2 由 0.482 减为 0.114,水土保持措施量对径流量的决定系数 R^2 为由 0.076 增为 0.390;降水量对输沙量的决定系数 R^2 由 0.385 减为 0.012,水土保持措施量对输沙量的决定系数 R^2 由 0.027 增为 0.352,表明随着时间推移,水土保持治理措施的增加和治理程度的提高,对水沙变化的影响由降水量变为以水土保持治理措施为主的人类活动。

4 结论

(1) 研究区年降水量呈现波动的不明显减少趋势,年际存在明显的“丰—枯”周期性变化。最大年降水量是最小年降水量的 2.5 倍;年降水量存在 3 种尺度的周期变化,分别是 4~8 a, 11~15 a 和 16~32 a,有 5 a, 8 a, 22 a, 27 a 4 个变化主周期,存在 3 a, 5 a, 13 a, 18 a 平均变化周期。在 18 a 平均周期下,预测降水量将由枯转丰。

(2) 径流量、输沙量呈现相似的波动减少趋势,年际存在明显的“丰—枯(多—少)”周期性变化。最大年径流量是最小年径流量的 1 516 倍,最大年输沙量是最小年输沙量的 1 238 倍;同时径流量和输沙量分别在 2000 年和 2003 年出现突变点。年径流量和输沙存在 3 种相同尺度的周期变化,为 3~7 a, 8~12 a 和 14~32 a,径流量有 4 a, 9 a, 27 a 变化主周期,存在 3 a, 6 a, 18 a 平均变化周期;而输沙量有 4 a, 6 a, 8 a, 27 a 变化主周期,存在 3 a, 4 a, 5 a, 18 a 平均变化周期。在 18 a 平均周期下,预测径流在 2021 年左右将由枯变丰,输沙在 2021 年将由少变多。在平均周期为 18 a 的 3 个周期下,径流、输沙量对降水量变化响应的趋势协同性由强逐渐减弱,降水量对径流量的相关系数 R 由 0.69 减小为 0.34,水土保持措施量对径流量的相关系数 R 为由 0.28 增为 0.62;降水量对输沙量的相关系数 R 由 0.62 减小为 0.11,水土保持措施量对输沙量的相关系数 R 由 0.16 增为 0.59,说明对水沙变化的主要影响因素已由降水转变为人为活动。本文对降水量、径流量和输沙量都是以年为时间尺度进行研究,对于年内的变化和水土保持措施以外的人类活动对水沙变化的影响还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 冯德程,吴栋栋,赵玲玲,等.1952—2014 年饶河流域水沙变化特征及影响因素[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):53-59.
- [2] 刘伟,何俊仕,陈杨.浑河流域降水与径流变化特征及同步性分析[J].水土保持研究,2016,23(1):150-154.
- [3] 陈一明,何子杰,賁月,等.基于小波变换的径流与降水时频变化及相关性分析:以五郎河为例[J].中国农村水利水电,2017(10):13-17.
- [4] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.
- [5] 孙洋洋,穆兴民,高鹏,等.黄河上中游区径流量格局长期变化过程[J].水土保持研究,2017,24(3):59-64,69.
- [6] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,2014,25(2):155-163.
- [7] 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.
- [8] 潘彬,韩美,倪娟.黄河下游近 50 年径流量变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2017,24(1):122-127.
- [9] 王蕊,姚治君,刘兆飞.西北干旱区气候和土地利用变化对水沙运移的影响:以小南川流域为例[J].应用生态学报,2018,29(9):2879-2889.
- [10] Zhang F, Xing Z, Zhao C, et al. Characterizing long-term soil and water erosion and their interactions with various conservation practices in the semi-arid Zulihe basin, Dingxi, Gansu, China[J]. Ecological Engineering, 2017,106:458-470.
- [11] 张富,赵传燕,邓居礼,等.祖厉河流域降水径流泥沙变化特征研究[J].干旱区地理,2018,41(1):74-82.
- [12] 桑燕芳,王栋.水文序列小波分析中小波函数选择方法[J].水利学报,2008,39(3):295-300.
- [13] 刘锋,陈沈良,彭俊,等.近 60 年黄河入海水沙多尺度变化及其对河口的影响[J].地理学报,2011,66(3):313-323.
- [14] 郭高轩,辛宝东,朱琳,等.基于小波变换的北京地区 1724—2009 年降水量多尺度分析[J].水文,2012,32(3):29-33.
- [15] 汪岗,范昭.黄河水沙变化研究.第 1 卷[M].郑州:黄河水利出版社,2002.311-313.
- [16] 张富,姚进忠,雷升文,等.甘肃省水土保持综合治理措施效益研究[M].郑州:黄河水利出版社,2014.
- [17] 韩通,陈少勇,乔立.祖厉河流域近 50 a 降水变化及典型人类活动对降水的影响[J].干旱气象,2009,27(3):220-226,244.
- [18] 黄维东.跨流域引水工程对祖厉河流域径流的影响研究[J].干旱区地理,2008(5):743-749.
- [19] 刘淑燕,余新晓,信忠保,等.黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用变化对水沙关系的影响[J].地理科学进展,2010,29(5):565-571.
- [20] 李宜坪,郭慧莉,吴淑芳,等.黄土坡面水沙过程及水流阻力变化试验研究[J].泥沙研究,2017,42(5):36-43.