

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.01.04

1959 – 2011 年北洛河上游流域径流量及其组分 变化趋势和时间分配特征

晁智龙

(陕西省水文水资源勘测局, 陕西 西安 710068)

摘要: 以实测水文数据为基础,分析了区域水土保持措施实施和植被恢复背景下北洛河上游黄土丘陵沟壑区流域 1959 – 2011 年间径流和基流数量变化、时间分配规律和阶段特征,对流域水土保持和生态平衡、水资源保护和利用具有指导和借鉴意义。结果表明:志丹、吴起、刘家河 3 个水文站的年均径流深分别为 37.6、27.1、31.8 mm。年均地表径流量和基流量所占比例 3 站平均为 63.8% 和 36.2%。3 站的年径流量和地表径流量全部表现为极显著减少趋势 ($P < 0.001$),而且地表径流量决定了总径流量的变化程度。3 站基流量呈增加 ($P < 0.01$) (吴起站、刘家河站) 或稳定态势 (志丹站)。径流量及其组分年内分配均表现为“双峰型”。随时间推移,径流量月内分配不均匀性减弱,夏、汛期径流量占年径流量的比例急剧降低。3 站冬、春季枯水期基流量均为显著增加态势,而夏、秋季稳定。1959 – 2011 年在水土保持措施的实施和生态恢复背景下,流域径流及其组分的数量和时间分配发生了很大变化,流域水循环要素比例趋于合理。

关键词: 径流量; 径流组分; 变化趋势; 时间分配; 黄土丘陵区; 北洛河

中图分类号: TV121; P333.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0023-06

Trend and temporal distribution of streamflow and its components in the upper reaches of Beiluo River from 1959 to 2011

CHAO Zhilong

(The Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China)

Abstract: The trend of streamflow and base flow and their distribution pattern and phase characteristics were analyzed in the upper reaches of Beiluo River based on the survey data from 1959 to 2011. The test results can provide some reference for the implementation of soil and water conservation, ecological balance, and the protection and utilization of water resources in the study area. The results showed that the mean annual streamflow for Zhidan, Wuqi, and Liujiahe stations were 37.6, 27.1, and 31.8 mm, respectively. The average proportions of surface flow and baseflow of the three stations were 63.8% and 36.2%, respectively. Both the annual streamflow and surface flow of all three stations showed a significant decreasing trend ($P < 0.001$). The trend of surface flow dominated the reduction of streamflow. The baseflow for Wuqi and Liujiahe Stations showed a significant increasing trend ($P < 0.01$), whereas Zhidan Station showed a stable status. The distribution within a year of streamflow and baseflow showed a "double peak" style. The monthly distribution tended to be uniform and the proportion of streamflow in flood season in annual runoff dropped dramatically over time. The base flow in both winter and spring of the three stations showed a significant increasing trend, whereas it kept stable in summer and autumn. With the implementation of soil and water conservation and ecological restoration, the volume and temporal distribution of streamflow and its components changed greatly and the proportion of the hydrological elements was prone to become reasonable in the catchment from 1959 to 2011.

Key words: streamflow; streamflow component; trend; temporal distribution; loess hilly region; Beiluo River

收稿日期: 2019-04-28; 修回日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877083、41440012)

作者简介: 晁智龙 (1977-), 男, 陕西洛川人, 大学本科, 高级工程师, 研究方向为流域水文水资源。

1 研究背景

河川基流是维持生态平衡的基础水量,也是水资源的重要组成部分。受气候变化尤其是退耕还林草等重大生态工程的影响,近年来黄河中下游干流和主要支流的径流量明显减少^[1]。分析和掌握生态环境建设背景下流域内径流量及其组分的变化规律,对维护区域生态平衡、维持经济可持续发展以及合理利用水资源具有重要意义。

目前对基流的研究主要集中在以下几方面:(1)基流分割方法的研究。图解法是基本的基流分割法,其缺点是处理效率低^[2]。基流指数法、数字滤波法、平滑最小值法和时间步长等时间序列法,能快速有效得到连续的基流过程^[3]。运用水文模型,可以获取具有物理基础的分割结果,是发展的一个趋势^[4-5]。同位素法可以作为上述方法的对比验证^[3]。由于基流量不能实测获得,即使在同一区域也暂时得不到普遍认同的基流分割法^[6-12]。(2)基流变化特征及其驱动因素分析。刘柏君等^[4]和祖明娟等^[7]对海流兔河流域、亢小语等^[12]对黄土高原昕水河流域、白乐等^[13]对秃尾河流域等进行分析,均表明基流呈现显著减少趋势,植被覆盖变化、地下水开发、煤炭开采和水土保持措施等人类活动是基流变化的主要因素。顾磊等^[8]研究认为,黄土高原黄土区基流较风沙区更容易受到降雨和人类活动的影响。李娟等^[14]通过SWAT模拟认为,梯田等水土保持工程措施,具有滞洪补枯的作用。杨倩楠等^[11]认为,宁夏清水河流域基流量极显著减少,其减少与土地利用类型的空间配置和组成等关系密切。

北洛河上游流域位于黄土高原腹地的黄土丘陵沟壑区,沟壑纵横,植被稀疏,侵蚀剧烈,是黄河下游粗泥沙的主要来源区之一。国家历来非常重视这一区域的水土流失治理,1998年,受国家政策影响,该区吴起县在全国范围内率先开展退耕还林(草)工程,植被覆盖大幅度提高,生态环境得以改善^[15-16],成为研究植被恢复背景下流域水循环要素变化特征的典型区。目前集中在该研究区的主要研究方向有植被恢复情况^[15-16]、径流量、输沙量变化^[17-20]、模型模拟水沙时空变化^[21-22]和次洪水沙分析^[23]等方面。于艺鹏等^[9]在基流分割方法、基流量的时间变化特征等方面开展了初步研究,但更加深入的对比分析还比较少。本文选择北洛河上游为研究区,以长时间序列实测水文数据为基础,采用分割法分割基流估算基流量,分析河川地表、地下等径

流组分在年际、年内的分配规律和变化特征,丰富该区生态水文过程研究内容,并为该区水土保持规划和水资源合理利用等提供科学依据。

2 研究区概况

北洛河为黄河的二级支流,流域总面积 26 905 km²,在陕西大荔县三河口汇入渭河。上游刘家河水文站控制面积 7 325 km²,占流域总面积的近 1/3,为典型黄土丘陵沟壑地貌类型区。区内另有吴起和志丹水文站,控制面积分别为 3 408 km² 和 774 km²,如图 1 所示。流域内涉及定边、吴起、靖边、志丹等 4 个县域,86%以上人口为农村人口,经济发展水平落后。

该区地处半干旱、半湿润向干旱气候过渡区域,具有明显大陆性季风气候特征。多年平均降雨量 452 mm,以汛期(6-9月)为主,占全年降雨量的 74.5%,降雨过程具有历时短、雨量大的特点。土层厚度 50~100 m 不等,土壤类型主要有黄绵土、黑垆土和灰褐土,初育黄绵土分布广泛,占该区面积的 90%以上。流域相对切割深度 150~200 m,沟壑密度 2.86 km/km²^[15],山高坡陡,水土流失严重。植被区系具有森林向灌丛草原过渡的典型特征^[15]。在退耕还林(草)生态治理工程的作用下,该区植被覆盖度达到了 51.2%,多年输沙模数由退耕前的 15 000 t/(km²·a)降低到 2010 年后的 1 300 t/(km²·a),减少了约 90%^[23]。

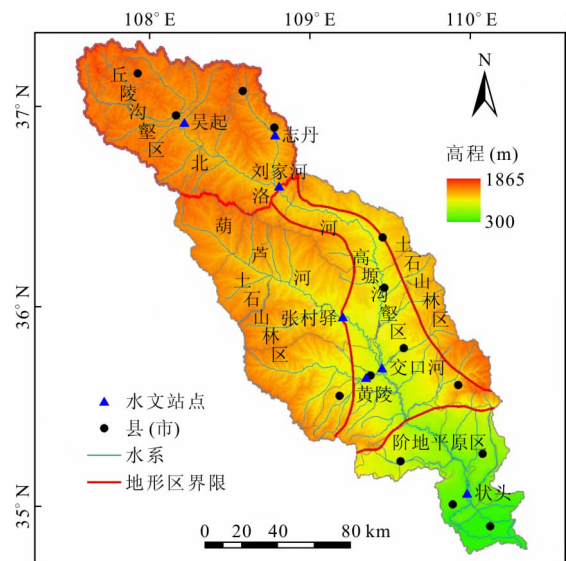


图1 北洛河流域位置图

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

收集整理了志丹、吴起、刘家河 3 个水文站

1959 - 2011 年的实测日径流数据。数据序列经过严格校验和检查,确保数据准确和可靠。基流数据采用了基流指数(BFI)法分割日径流得到。

3.2 基流分割方法

随着计算机技术的发展,可采用不同的基流分割法。选择哪种基流分割法视研究区包气带和降雨特点而定^[3]。

1980 年英国水文研究所(Institute of Hydrology)提出了基流指数法(base flow index, BFI)。BFI 法估算基流量时需要确定两个参数:(1)拐点检验因子 f (turning point test factor);(2)时间间隔 N ,即按 N 将年内日流量过程分割成 $365/N$ 个时间段,再根据最小流量选择原理,确定每个时间段(N)中流量最小值,然后与相邻时间段流量最小值进行比较。如果该流量的最小值与拐点检验因子的积小于相邻时间段最小流量值,则可确定该点为拐点^[24]。重复此过程,在流量过程线上确定出所有拐点,将拐点进行连线,分割连线下方即为全年基流量。经过试验, f 取值 0.97915、 N 取 4 时,BFI 法估算得到的基流过程线平稳,能客观地反映类似本研究区包气带很厚、暴雨历时短、降雨不能及时补给地下水的流量过程线退水段的物理规律^[16]。

3.3 Mann - Kendall 趋势检测

Mann - Kendall 法是一种非参数统计检验方法,在水文和气候变量数据序列趋势检验中广泛采用^[25],在 1998 年被世界气象组织(WMO)定为水文气象系列趋势检验的标准方法。M - K 趋势检验方法、显著性检验及时间序列上年均变率的确定等具体见文献[9]的应用。

3.4 年径流序列阶段划分

受人类活动阶段性特征影响,黄土高原流域年径流量普遍具有阶段性特征。在众多的水沙变化研究中,张胜利等^[26]、冉大川^[27]、姚文艺等^[28]、刘晓燕等^[29]认为,由于 20 世纪 70、80 年代水土流失综合治理工程的影响,可以确定 1979 年为流域径流量发生变化的突变时间。刘二佳等^[18]、Zhang 等^[23]的研究表明,吴起、志丹和刘家河水文站年径流量突变时

间分别发生于 2002、1996 和 1999 年,与退耕还林(草)重大生态工程实施时间(1999 年)基本吻合。考虑上述研究结果,本文以 1979、1999 年为时间节点,将时间序列划分为 3 个阶段,即 1979 之前、1980 - 1999 年之间和 2000 年之后,分别作为基准期(P1)、水土保持措施实施效应期(P2)和重大生态工程效应期(P3),来进一步分析径流及其组分的时间变化特征。

4 结果与分析

4.1 年径流量及其组分的变化趋势

1959 - 2011 年北洛河上游志丹、吴起、刘家河 3 站平均径流深分别为 37.6、27.1、31.8 mm,地表径流量多年均值分别为 26.6、17.2、18.2 mm,基流量分别为 11.0、9.9、13.6 mm,如表 1 所示。说明吴起站控制范围内单位面积产流能力较低,志丹站范围内单位面积产流能力较高。从径流组分看,3 站总径流量中均以地表径流为主,其比例均值为 57.2 ~ 70.7%,平均为 63.8%,而基流量所占比例不到总径流量的一半,为 29.3 ~ 42.8%,平均为 36.2%。说明研究区山高坡陡、沟壑纵横的地形地貌特征不利于土壤入渗补给地下水等过程的发生。

受气候变化和人类活动双重作用影响,1959 - 2011 年 3 个水文站年径流量均表现出显著减少趋势,如表 2 所示。刘家河站年均变率为 -0.29 mm/a,吴起和志丹两站年均变率分别为 -0.32、-0.69 mm/a,其年径流量减少程度较刘家河站大。

3 站地表径流量也均表现为显著地减少趋势,多年平均变率分别为 -0.33、-0.59、-0.31 mm/a。与总径流量年均变化幅度相比,地表径流量年均变化幅度占比接近 100%,说明总径流量的减少,是由地表径流量的减少来决定的。

由表 2 可看出,3 站基流深变化趋势具有差异,支流的志丹站为不显著的减少趋势,吴起站基流深表现出显著的增加趋势($P < 0.05$),两站年均变率分别为 -0.02、0.03 mm/a;刘家河站则表现出显著增加趋势($P < 0.01$),年均变率为 0.05 mm/a。

表 1 1959 - 2011 年北洛河上游 3 个水文站径流及其组分统计

水文站点	多年平均 径流深/mm	地表径流		基流	
		多年平均/mm	比例/%	多年平均/mm	比例/%
志丹	37.6	26.6	70.7	11.0	29.3
吴起	27.1	17.2	63.5	9.9	36.5
刘家河	31.8	18.2	57.2	13.6	42.8

表2 1959-2011年北洛河上游流域3个水文站径流及其组分年际变化趋势

水文 站点	径流深			地表径流深			基流深		
	统计量	显著性	年均变率	统计量	显著性	年均变率	统计量	显著性	年均变率
	Z	p	$\beta / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	Z	p	$\beta / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	Z	p	$\beta / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
志丹	-4.00	***	-0.69	-4.18	***	-0.66	-0.75	ns	-0.02
吴起	-3.27	**	-0.32	-3.63	***	-0.33	2.46	*	0.03
刘家河	-3.06	**	-0.29	-3.84	***	-0.31	2.83	**	0.05

注：“***”、“**”、“*”分别对应显著性水平0.001、0.01、0.05；ns表示没有显著性。

4.2 径流及其组分在年代际尺度上的分配特征

1959-2011年北洛河上游流域3个水文站年代际径流及其组分变化趋势见表3。由表3可看出,吴起、志丹和刘家河3站3个时期年均径流深均呈减小趋势。与P1相比,P2时期年均径流深表现出小幅减少态势,减少程度分别为9.5%、13.8%和4.2%;P3时期则大幅减少,减少比例达到42.7%、56.3%和38.7%。其影响因素有两个:从气候变化角度分析,降雨是径流来源,其任何小的变化都会反映在径流的变化中;另一方面是人类活动对流域下垫面剧烈地扰动和改造活动的影响。据刘二佳等^[18]、Zhang等^[30]通过对吴起站径流量减少影响因素的分析认为,P2时期的水土流失综合治理活动对该时期径流量减少贡献率约为40%,而P3时期继续实施重大生态工程的影响,人类活动贡献率提高到75%。

由表3还可以看出,3站径流深的变差系数大致表现为随时段呈减小趋势,说明年径流深数值上趋于平稳。而P2阶段变差系数较大,与这一期间发生的暴雨现象有关。20世纪90年代研究区内发生多场暴雨,特别是1994年8月发生了100年一遇特大暴雨,在这场暴雨中,吴起和刘家河站均产生了2.5~3倍于多年平均径流深的径流量。

3站地表径流深平均值均表现出逐时期减小趋势,其减少幅度大于总径流深。与基准期相比,3站P2时期地表径流深减少幅度分别为15.8%、17.9%、16.7%,P3时期减少幅度更大,分别达到64.7%、71.5%和61.8%。而变差系数表现出增大趋势,则可能与基流的变化趋势相关。

基流深的变化表现不同。与基准期相比,吴起站基流量呈小幅度的增加趋势,志丹站为P2阶段保持稳定,P3阶段减少,刘家河站则表现为P2阶段大幅增加,P3阶段保持增加但幅度降低,与表2中的年变化趋势特征吻合。随着时期推进,除了志丹站P3阶段,3站均表现出变差系数减小态势,说明年基流深的稳定性增强。

4.3 径流量及其组分年内分配特征

图2为研究区3个水文站不同时段径流和基流年内分配曲线。由图2可看出,受降雨和温度变化影响,径流和基流的年内分配均呈双峰型特征,其中流域径流峰值出现在3月和8月,形成春汛和夏汛。随着春季温度升高,地表积雪不断融化,河川径流量增加,形成春汛。夏季降雨量大且历时短,受丘陵起伏地形影响,容易形成地表径流,在8月份形成第2个峰,成为主汛期。基流量峰值出现在3月和10月,且3月基流量比10月份大。分析其原因,可能是由于春汛径流量较小,径流和积雪融化向地下水的补给作用较强,基流量增加,形成了基流的第1个峰值。夏季的降雨量主要以形成地表径流为主,同时植被生长旺盛,蒸腾蒸发作用强烈,加之土层深厚,导致7、8月降雨和径流对基流的补给作用出现一定的延迟。上述原因可能造成了基流的第2个峰值,且3月基流量大于10月的现象。这种现象与黄锡荃等^[31]对森林与地下水位关系的叙述相吻合。

分析图2可知,吴起、志丹和刘家河3站月均径流量,尤其在7-8月的夏汛期,随着时段进展下降趋势非常明显,表现出P3时期较P2下降更为突出的特点。相较于P1时期,P2时期3月的月均径流量3站平均下降10.7%(7.7%~16.3%),7-8月夏汛期的月均径流量平均下降了18.0%(6.9%~27.6%)。P3时期3月月均径流量3站平均下降21.8%(1.2%~45.5%),而7-8月月均径流量平均下降了65.2%(55.2%~71.1%)。相较于P1时期,吴起、志丹和刘家河3站月均基流量普遍表现出P2时期增加,P3时期减少的规律,与表3结论一致。而P1到P3总体上7-10月间基流量减少,平均降低8.9%(2.7%~14.8%),3月基流量变化不规律,枯水期11-12月和1月基流量有增加的特征。

由图2还可看出,北洛河流域上游黄土丘陵沟壑区3站的月内分配过程线随着时段进展趋于平缓,尖瘦陡峭峰型逐渐转变为矮胖平缓峰型,枯水期

基流量增加。对于吴起和刘家河站,枯水期基流量 的增加可能是年基流量显著增加的直接原因。

表 3 1959 - 2011 年北洛河上游流域 3 个水文站年代际径流及其组分变化趋势

水文 站点	项目	径流深			地表径流深			基流深		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
吴起	平均值/mm	31.6	28.6	18.1	22.1	18.6	7.8	9.5	10.0	10.2
	变差系数(C_V)	0.41	0.56	0.30	0.56	0.84	0.70	0.16	0.13	0.10
志丹	平均值/mm	47.1	40.6	20.6	35.8	29.4	10.2	11.3	11.3	10.4
	变差系数(C_V)	0.35	0.44	0.43	0.45	0.58	0.73	0.15	0.14	0.29
刘家河	平均值/mm	35.4	33.9	21.7	22.8	19.0	8.7	12.6	15.0	13.1
	变差系数(C_V)	0.32	0.35	0.22	0.47	0.62	0.50	0.13	0.08	0.08

注:“***”、“**”、“*”、“+”分别表示显著性水平 0.001、0.01、0.05 和 0.1。

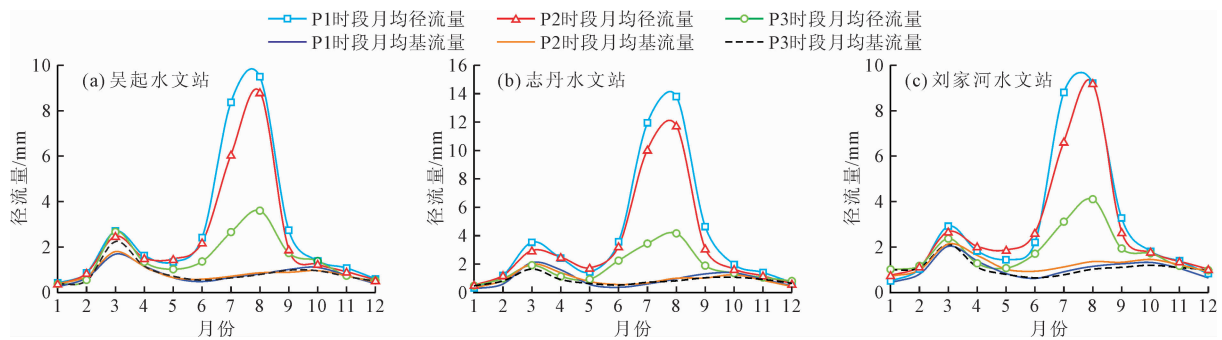


图 2 北洛河流域上游 3 个水文站不同时段径流量及其组分年内分配过程线对比

4.4 月基流量变化趋势

采用 M - K 方法检验了月和季节基流量在研究时段上的变化趋势,如表 4 所示。

表 4 M - K 检验北洛河上游 3 个水文站月和季节基流量年变化趋势 mm/a

月份与季节	吴起	志丹	刘家河
1	0.005**	0.006***	0.013***
2	-0.001	0.009*	0.008***
3	0.014**	-0.019+	0.004
4	-0.001	-0.022***	-0.003
5	0.002	0.002	0.001
6	0.002	0.004+	0.003+
7	0.000	0.004	0.002
8	0.000	0.001	-0.001
9	-0.001	-0.008*	-0.001
10	-0.003	-0.009+	-0.002
11	0.001	0.001	0.003
12	0.006**	0.005*	0.011***
春	0.012*	-0.021	0.017*
夏	0.004	0.010	0.005
秋	-0.001	-0.014	-0.006
冬	0.011*	0.016**	0.027***

注:表内数据的正负表示增加趋势和减少趋势;“***”、“**”、“*”、“+”分别表示显著性水平 0.001、0.01、0.05 和 0.1。

吴起、志丹和刘家河 3 站月基流量的时间变化趋势比较一致,均表现为冬、春枯水季节基流量显著增加,夏、秋基流量不显著变化的特征。3 站的 12 月和 1 月的基流量均为显著增加趋势,直接导致了春季和冬季基流量的显著增加。5 - 8 月总体上表现出不显著增加趋势,9 - 10 月为不显著减少趋势,直接导致夏、秋两季基流量变化不显著。

5 结 论

采用基流分割法,分析了黄土高原北洛河流域上游 1959 - 2011 年径流及其组分的变化趋势,以期为该区水土保持和生态环境建设对水文水资源的影响提供科技支持。结果表明:

(1) 北洛河上游吴起、志丹和刘家河 3 个水文测站建站至 2011 年多年平均径流深为 27.1、37.6、31.8 mm,多年地表径流深为 17.2、26.6、18.2 mm,多年平均基流量为 9.9、11.0、13.6 mm。年总径流量组分中地表径流量平均比值为 63.8%,基流量为 36.2%。

(2) 1959 - 2011 年 3 站年径流深和地表径流深均呈极显著减少趋势,年变率平均值均接近 -0.43 mm/a。地表径流量的变化量主导了总径流量的变化程度。吴起、刘家河站年基流量显著增加,

志丹站年基流量较为稳定。

(3) 径流量及其组分的月内分配均表现出3月和8月的双峰型特征。与1979年前比,1980-1999年间夏汛期平均年径流量降低18.0%,2000年后降低了65.2%。

(4) 3站均表现出冬、春枯水季节基流量显著增加,夏、秋基流量不显著变化的特征,由12月、1月的基流量显著增加以及5-8月和9-10月的稳定变化趋势所决定。

参考文献:

- [1] 刘昌明,张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报,2004,59(3):323-330.
- [2] 林学钰,廖资生,钱云平,等. 基流分割法在黄河流域地下水研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009,39(6):959-967.
- [3] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. 应用生态学报,2011,22(11):3073-3080.
- [4] 刘柏君,周广钰,雷晓辉,等. 海流兔河基流特征及其对气候变化和人类活动的响应分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):56-61.
- [5] 胡胜,杨冬冬,吴江,等. 基于数字滤波法和SWAT模型的瀛河流域基流时空变化特征研究[J]. 地理科学,2017,37(3):455-463.
- [6] 豆林,黄明斌. 自动基流分割方法在黄土区流域的应用研究[J]. 水土保持通报,2010,30(3):107-111+133.
- [7] 祖明娟,管仪庆,张丹蓉,等. 海流兔河近50年来基流变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(3):38-42.
- [8] 顾磊,张洪波,陈克宇,等. 陕北地区河川径流的时空演变规律[J]. 地球科学进展,2015,30(7):802-811.
- [9] 于艺鹏,杨亚辉,蔺鹏飞,等. 自动基流分割法在北洛河流域的适宜性对比[J]. 水土保持研究,2016,23(2):302-307.
- [10] 李瑞,张士锋. 两种自动基流分割方法在干旱半干旱地区的对比研究[J]. 地理科学进展,2017,36(7):864-872.
- [11] 杨倩楠,高海东,李占斌,等. 干旱区流域土地利用变化对基流的影响[J]. 水土保持研究,2018,25(3):317-322+331.
- [12] 亢小语,张志强,陈立欣,等. 自动基流分割方法在黄土高原昕水河流域适用性分析[J]. 北京林业大学学报,2019,41(1):92-101.
- [13] 白乐,李怀恩,何宏谋. 降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J]. 自然资源学报,2014,29(12):2078-2088.
- [14] 李娟,高建恩,张元星,等. 黄土高原泾河流域梯田对河道径流及生态基流影响[J]. 水土保持通报,2015,35(5):106-110+116.
- [15] 陈妮,李谭宝,张晓萍,等. 北洛河流域植被覆盖度时空变化的遥感动态分析[J]. 水土保持通报,2013,33(3):206-210+327.
- [16] 闫瑞,张晓萍,闫胜军,等. 1995-2014年北洛河流域植被恢复的地形分布特征[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(11):1598-1603.
- [17] 秦伟,朱清科,刘广全,等. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J]. 水利学报,2010,41(11):1325-1332.
- [18] 刘二佳,张晓萍,谢名礼,等. 生态恢复对流域水沙演变趋势的影响——以北洛河上游为例[J]. 生态学报,2015,35(3):622-629.
- [19] 葛芬莉. 北洛河上游区水沙特性变化分析研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(4):145-150.
- [20] 张亭亭,张建军,郭敏杰,等. 北洛河流域不同地貌和植被类型区径流演变特征及控制因素[J]. 水土保持学报,2014,28(4):78-84.
- [21] YAN Rui, ZHANG Xiaoping, YAN Shengjun, et al. Estimating soil erosion response to land use/cover change in a catchment of the Loess Plateau, China[J]. International Soil and Water Conservation Research,2018a,6(1):13-22.
- [22] YAN Rui, ZHANG Xiaoping, YAN Shengjun, et al. Spatial patterns of hydrological responses to land use/cover change in a catchment on the Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicator, 2018b,92:151-160.
- [23] ZHANG Xiaoping, LIN Pengfei, CHEN Hao, et al. Understanding land use/cover change impacts on runoff and sediment load at flood events on the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes. 2018,32(4):576-589.
- [24] 林学钰,廖资生,钱云平,等. 基流分割法在黄河流域地下水研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009,39(6):959-967.
- [25] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [26] 张胜利,李倬,赵文林,等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.
- [27] 冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J]. 资源科学,2006,28(1):93-100.
- [28] 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.
- [29] 刘晓燕. 黄河近年水沙锐减成因[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [30] ZHANG Jianjun, ZHANG Tingting, LEI Yongnan, et al. Streamflow regime variations following ecological management on the loess plateau, China[J]. Forests, 2016,7(1):1-18.
- [31] 黄锡荃,李慧明,金伯欣. 水文学[M]. 北京:高等教育出版社,1993.