

黄土高原森林/非森林流域径流 稳定性及其演变趋势对比

谢名礼¹, 张晓萍^{1,2}, 刘二佳^{2,3}, 陈妮¹, 张亭亭¹, 郭敏杰^{2,3}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用集中期、集中度等方法及 M—K, Pettitt 等非参检验法对比分析了黄土高原北洛河子午岭森林流域与相邻丘陵沟壑区非森林流域近 50 a 来的径流稳定性差异及演变趋势, 为黄土高原地区生态治理的水文效应分析提供参考和借鉴。结果表明, 黄土高原子午岭林区和非林区流域径流量年际尺度分布表现出一致的强变异性, 年内分布均为双峰型特征, 但林区峰型平缓, 非林区陡峭。林区流域年内分布较非林区流域均匀, 前者径流集中期较后者滞后 1 个月。近 50 a 来林区流域径流量无明显变化趋势, 而非林区流域年、夏、秋及汛期径流量表现出显著性减少趋势, 且有显著的跃变时间。无论径流过程或径流量年变化如何, 林区稳定性要明显优于非林区流域。非林区流域的生态环境仍需要长时期的建设和维护。

关键词: 径流量; 月分配; 年际趋势; 稳定性; 森林流域; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0149-05

中图分类号: S715

Stationarity and Change Trend of Streamflows in Forest and Less Forested Watersheds on Loess Plateau

XIE Ming-li¹, ZHANG Xiao-ping^{1,2}, LIU Er-jia^{2,3}, CHEN Ni¹, ZHANG Ting-ting¹, GUO Min-jie^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,
Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling,
Shaanxi 712100, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The stationarity of streamflows over the past 50 years were investigated for well/poorly forested watersheds in the Beiluohe River basin on the Loess Plateau, using concentration degree and concentration period methods. The change trend and change point were checked with nonparametric M—K, Pettitt and Rank-sum tests. Results show that all the five watersheds studied were characterized by the high fluctuation of annual streamflow and the double peaks of inner-annual hydrograph. Forested ones presented mild slopes and less forested ones, steep shapes. In contrast, the streamflows were better distributed in well forested watersheds where the concentration period was 1 month behind the poorly forested counterpart. Different components of the streamflow in forested watersheds did not show a significant trend or change point, while significant decrease and change points were detected in annual streamflow and the components in summer, fall and flood season for less forested watersheds in the past 50 years. In both annual and inner-annual scales, the streamflow in forested watersheds was considered more stable than that of the less forested, which implies that less forested watersheds still demands a long-term construction and conservation for the eco-environment to recover.

Keywords: streamflow; inner-annual distribution; annual trend; stationarity; forested watershed; Loess Plateau

收稿日期: 2012-12-25

修回日期: 2013-01-30

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“气候变化背景下黄土高原土地利用影响径流的空间尺度效应”(41230852); 国家自然科学基金项目“北洛河水沙动态过程及对退耕还林(草)响应机理”(41101265); 中国科学院重点部署项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03-03)

作者简介: 谢名礼(1987—), 男(壮族), 广西壮族自治区柳州市人, 硕士研究生, 主要研究方向为 GIS 在环境监测方面的应用。E-mail: thank18900000000@163.com。

通信作者: 张晓萍(1971—), 女(汉族), 河南省焦作市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持、土壤侵蚀、荒漠化防治及景观生态等方面研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn。

针对黄土高原剧烈的土壤侵蚀问题,近 50 a 年来中国政府持续不断地开展了区域范围的水土流失治理工作,尤其近 10 a 来实施了以生态建设为中心的退耕还林(草)政策,黄河中游出现了径流量和输沙量持续减少的综合效应。1970—1996 年,水土保持措施年均减少径流 $5.46 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均减沙 $2.24 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$,近 10 a 植被措施年均减水 $2.63 \times 10^8 \text{ m}^3$,减沙 $1.13 \times 10^8 \text{ t}^{[2]}$ 。作为治理水土流失的根本措施,在水土流失综合治理及大强度的生态建设条件下,下垫面覆被的恢复不仅改善了流域的水沙关系^[3],对增加流域枯水径流量也起到了一定作用^[4-5]。在黄土高原气候逐渐暖干化背景下,许多研究者还通过构建水文模型,建立流域产流和气候因子间的关系,估算了气候和人类活动对流域径流量和输沙量减少的贡献程度^[5-6],对理解黄土高原生态水文过程提供帮助。然而,黄土高原森林流域径流量的演变趋势和稳定性如何,与非林区流域径流量的演变和稳定性差异怎样,还没有确切的结论。因此,本文以北洛河子午岭林区流域与相邻丘陵沟壑区非林区流域为例,对比分析径流量年际与年内特征及变化,为黄土高原地区生态治理的水文效应分析提供参考和借鉴。

1 研究区概况

北洛河位于 $34.5^\circ\text{—}37.5^\circ\text{N}$, $107.5^\circ\text{—}110.5^\circ\text{E}$,是渭河的一级支流。其发源于陕西省定边县白于山郝庄梁,流经陕西省、甘肃省多县区,在陕西省大荔县注入渭河。北洛河干流长 680 km,流域面积 $26\,905 \text{ km}^2$,海拔在 $314\text{—}1\,886 \text{ m}$,地处暖温带大陆性季风区。流域降雨年际波动很大,年降雨在 368—

820 mm ,平均 542 mm ,降雨年内分配极不均匀,主要集中在 7—9 月。局部短历时、高强度的暴雨频发,连阴雨天气时常发生。

北洛河支流沮河和葫芦河发源于子午岭主脊,流经子午岭林区,以土石山林地貌为主,是北洛河流域植被保存最为良好的天然次生林区,森林覆盖在 80% 以上,水土流失轻微。其水文控制站分别为黄陵和张村驿站。而北洛河上游则属于典型的黄土丘陵沟壑区,植被稀疏,水土流失强烈。经过长期的水土保持治理,上游吴起、志丹等县的地表覆被有了很大改善,尤其是全国退耕还林示范县吴起,植被覆盖率从 1995 年的 20% 逐步恢复到了 2007 年的 66% 左右。其水文控制站分别为周河的志丹、洛河干流上的吴起及刘家河。研究流域水文站位置及基本情况见图 1 和表 1。

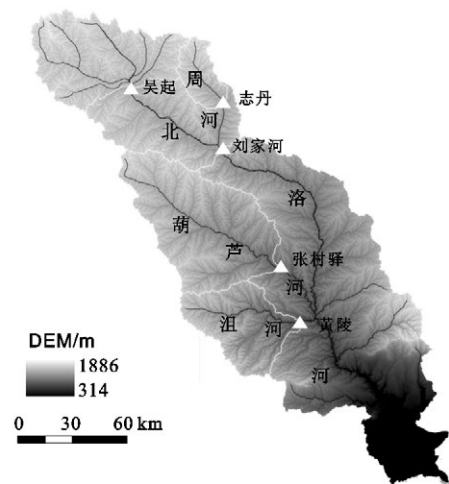


图 1 北洛河流域主要水文站分布

表 1 研究流域自然概况

水文站	控制面积/ km^2	地貌类型	植被覆盖度/ %	多年平均 降雨量/ mm	多年平均 径流深/ mm	数据系列
黄陵	2 266	土石山林区	85	570	46.8	1967—2009
张村驿	4 715	土石山林区	81	537	21.4	1958—2009
吴起	774	丘陵沟壑区	39	420	27.4	1963—2009
志丹	3 408	丘陵沟壑区	43	472	28.5	1964—2009
刘家河	7 325	丘陵沟壑区	42	447	31.9	1959—2009

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本文涉及的流域日径流量数据摘录于黄河流域水文年鉴,并经过了数据核实和质量检验,数据序列如表 1 所示。选取北洛河周边 15 个雨量站点(西峰镇、环县、西安、长武、铜川、商州、横山、定边、绥德、吴

旗、延安、洛川、隰县、临汾、运城),分布如图 1 所示,各站降雨资料源于中国气象局数据共享网,时序均为 1958—2009 年。在 ArcGIS 软件支持下,通过 Kriging 空间插值获得所研究流域的面降雨信息。

2.2 研究方法

2.2.1 集中性分析 集中期和集中度最初用于研究降雨量年内分布的不均匀性^[7],之后引入到径流量年

内分配的研究^[8]。集中度、集中期分析为全面分析水气象要素年内分配特征提供了实用工具。

把 1 a 内各月的径流量看作向量,月径流量的大小作为该月径流矢量的模,所处的月份(或日期)赋予一定的角度作为径流矢量的方向。不考虑大小月的存在,认为每个月等长 30 d,1,2,⋯,12 月径流向量中心位置定为 0°,30°,⋯,330°。于是,水平及垂直方向分量可分别由下述式(1),(2)计算;将一年中各月径流矢量求和,合矢量模与年径流的比值为年径流集中度(RCD_{year}),合矢量方向为年径流集中期(RCP_{year}),如(3),(4)式:

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} r_i \sin[(i-1)30^\circ] \quad (1)$$

$$R_y = \sum_{i=1}^{12} r_i \cos[(i-1)30^\circ] \quad (2)$$

$$RCD_{year} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} / R_{year} \quad (3)$$

$$RCP_{year} = \arctan(R_x / R_y) \quad (4)$$

式中:R_{year}——年径流量;R_x,R_y——合向量的水平、垂直分量;r_i——第 i 月的径流量;i——月序(i=1,2,⋯,12)。

2.2.2 趋势分析及突变检验 Mann—Kendall 秩相关分析法(M—K 法)是评价气象水文序列趋势显著性的常用方法^[9]。非参数 M—K 的优点在于对时间序列不作特定的分布特征要求,也不受少数异常值对原始序列的干扰^[10]。采用非参数检验法 Pettitt 检验^[11]与秩和检验^[12]相互验证确定序列的跃变时间。具体过程详见文献^[11—12]。

3 结果与分析

3.1 林区/非林区流域径流年际变化特征

林区黄陵及张村驿控制站多年平均径流量分别为 46.8,21.4 mm,非林区吴起、志丹及刘家河控制站多年平均径流量分别为 27.4,38.5 和 31.9 mm。张村驿站多年平均径流量明显较非林区站偏小,可能是植被蒸散量较大的缘故^[7],退耕还林示范县内的吴旗站长期平均径流量较其他非林区低印证了这个观点。而黄陵站不遵循上述一般规律而具有较高的平均径流量,可能是其水文地质条件与其他流域迥异的缘故。一方面,沮河流域内洛河含水岩组埋藏较浅,接受降水、地表水补给后,经过较短路径的循环,就近向河沟排泄;另一方面,环河含水岩组以泥岩、泥质粉砂岩为主,遇水易发生塑变形从而堵塞导水裂隙,形成相对隔水层,水分运移纵向受阻,侧向加强,排泄路径进而缩短^[13]。

流域径流量年际波动均很强烈(如表 2 所示)。林区流域年径流量极值比为 6.17~7.09,峰均比(即年际最大与多年均值的比值)在 2.82~3.25,变异系数为 0.460~0.613;非林区流域吴旗和志丹年径流量极值比在 7.30~8.70,峰均比为 2.19~3.24,变异系数在 0.485~0.505。尽管具有不同的地表覆被,林区和非林区流域年径流量均属于强度变异,可能与区域季风气候有关^[14]。刘家河流域年径流量极值比、峰均比和变异系数均偏小,可能是由于流域面积增大,对径流量的调节作用增强^[15]。

表 2 流域径流年际及年内分布特征统计

水文站	年际特征						年内特征					
	均值/ mm	最大值/ mm	最小值/ mm	极值比	峰均比	变异 系数	集中期	集中度	峰枯比	峰均比	汛期径流 深/mm	比例/ %
黄陵	46.8	132.0	18.6	7.09	2.82	0.61	8月23日	0.32	4.3	1.9	18.6	39.8
张村驿	21.4	63.8	7.5	6.17	3.25	0.46	8月15日	0.23	3.4	1.8	8.3	40.3
吴起	27.4	88.9	12.2	7.30	3.24	0.51	7月10日	0.48	20.3	3.4	15.9	58.1
志丹	38.5	84.3	9.7	8.70	2.19	0.49	7月12日	0.52	24.5	3.4	23.8	62.0
刘家河	31.9	54.5	16.8	3.25	1.74	0.33	7月13日	0.43	11.0	3.0	17.5	55.0

3.2 流域径流量年内分布特征

5 条流域径流量的多年平均月值如图 2 所示。各流域径流年内过程均呈双峰型,但峰的形状与起落时间存在明显差异。非林区流域一致于 3 月及 7,8 月骤起形成径流高峰,过程线瘦尖,峰期急促;林区流域一致表现出峰型矮胖,起伏平缓,峰期跨度长的特点。与非林区流域相比,林区流域径流峰期明显滞后。

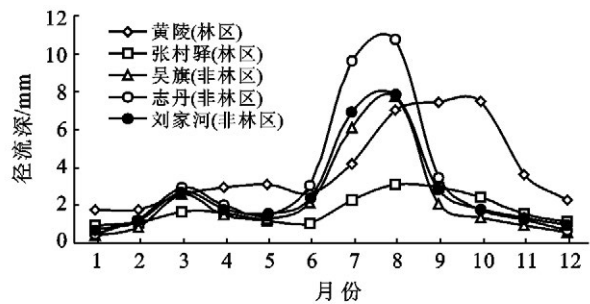


图 2 林区/非林区流域月均径流量对比

用集中度和集中期可以进一步表述林区和非林区流域年内径流分布特征如表 2 所示。林区流域集中期为 8 月中、下旬,集中度为 0.23~0.32,峰枯比 < 5,峰均比 < 2。而非林区流域径流集中于 7 月中旬,集中度为 0.43~0.52,峰枯比 > 10,峰均比 > 3。非林区流域超过 55% 的径流集中在 7—9 月汛期,其他月份径流量分布不到 45%,而林区流域汛期与非汛期径流分配约为 40% 和 60%。尽管刘家河站所辖集水面积较大,径流年内分布的调节作用使得上述指标有所缓和,相比林区其均匀程度仍有待改善。

3.3 流域径流量年际演变趋势及突变性

对流域年、四季、汛期/非汛期和各月等不同时期

的径流量近 50 a 来的演变趋势进行分析,结果如表 3 所示。林区 2 条流域表现为 6—7 月或 8 月份,1 或 2 月径流量呈增加趋势,季节及年尺度表现为下降趋势,但均为不显著水平。而非林区流域在 1—2 月和 12 月为增加趋势,其他月份尤其汛期 7—9 月均为显著性的减少趋势,年尺度表现为显著性的减少趋势。

林区流域年径流量呈微小减少趋势,与年降雨趋势一致,而 6—8 月径流量有增加趋势,很大程度上与区域夏暴雨特征有关^[16]。非林区流域 12 及 1—2 月枯水期径流量增加,可能是流域内水土流失综合治理措施有效拦蓄降雨,补给枯水径流的结果^[17],年径流量和汛期径流量显著减少与下垫面蒸散发量增加有关^[4]。

表 3 流域时段径流量演变趋势检验

时期	黄陵			张村驿			吴起			志丹			刘家河		
	Z	p	b	Z	p	b	Z	p	b	Z	p	b	Z	p	b
全年	-1.09/ ns / -0.273			-0.78/ ns / -0.041			-2.70/ ** / -0.260			-3.65/ *** / -0.642			-2.01/ ** / -0.208		
春季	-1.26/ ns / -0.049			-0.37/ ns / -0.007			-1.06/ ns / -0.011			-3.34/ *** / -0.081			-1.44/ ns / -0.022		
夏季	-0.42/ ns / -0.037			0.83/ ns / 0.023			-2.81/ ** / -0.224			-2.95/ ** / -0.420			-2.37/ * / -0.201		
秋季	-1.23/ ns / -0.132			-1.48/ ns / -0.039			-2.04/ * / -0.024			-3.75/ *** / -0.109			-1.87/ + / -0.030		
冬季	-0.06/ ns / -0.001			-0.15/ ns / -0.001			0.86/ ns / 0.005			1.51/ ns / 0.015			5.82/ *** / 0.030		
汛期	-1.07/ ns / -0.128			-0.93/ ns / -0.035			-2.59/ ** / -0.200			-3.26/ ** / -0.483			-2.79/ ** / -0.235		
非汛期	-0.13/ ns / -0.029			-0.26/ ns / -0.008			-2.27/ * / -0.049			-3.16/ ** / -0.155			-0.06/ ns / -0.002		
1月	0.64/ ns / 0.006			-0.24/ ns / -0.001			1.59/ ns / 0.004			3.08/ ** / 0.006			5.86/ *** / 0.015		
2月	-0.50/ ns / -0.003			0.23/ ns / 0.001			-0.88/ ns / -0.003			0.21/ ns / 0.002			1.82/ + / 0.006		
3月	-0.92/ ns / -0.009			-1.27/ ns / -0.005			-0.04/ ns / 0.000			-4.12/ *** / -0.044			-1.28/ ns / -0.014		
4月	-1.55/ ns / -0.021			-1.30/ ns / -0.008			-2.16/ * / -0.009			-4.20/ *** / -0.033			-1.72/ + / -0.009		
5月	-0.91/ ns / -0.017			-0.32/ ns / -0.002			-1.25/ ns / -0.005			-1.28/ ns / -0.010			-0.88/ ns / -0.004		
6月	1.36/ ns / 0.014			1.32/ ns / 0.006			-1.80/ + / -0.018			-1.87/ + / -0.027			-1.07/ ns / -0.009		
7月	0.21/ ns / 0.003			0.39/ ns / 0.003			-2.24/ * / -0.076			-2.58/ * / -0.160			-2.06/ * / -0.068		
8月	-0.96/ ns / -0.033			0.37/ ns / 0.005			-1.76/ + / -0.047			-2.82/ ** / -0.186			-2.27/ * / -0.078		
9月	-1.42/ ns / -0.060			-1.54/ ns / -0.023			-1.87/ + / -0.017			-3.07/ ** / -0.054			-2.42/ * / -0.025		
10月	-0.75/ ns / -0.025			-0.16/ ns / -0.002			-1.06/ ns / -0.004			-2.80/ ** / -0.020			-0.50/ ns / -0.002		
11月	-1.05/ ns / -0.023			-0.45/ ns / -0.003			-2.60/ ** / -0.006			-3.29/ ** / -0.013			-1.51/ ns / -0.004		
12月	-0.06/ ns / -0.001			-0.80/ ns / -0.004			1.54/ ns / 0.003			1.22/ ns / 0.004			3.51/ *** / 0.008		

注:春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月至翌年 2 月,汛期为 7—9 月,非汛期为其他月份; Z, p, b 分别表示 M-K 统计量,显著性及平均变量(mm/a); ns 表示不显著; +, *, **, *** 分别表示 $p < 0.1, 0.05, 0.01, 0.001$ 的显著性水平。下同。

采用 Pettitt 方法检验 5 条流域年、夏、秋及 7—9 月汛期径流量的突变性质,并用秩和检验法进行验证,突变结果如表 4 所示。2 条林区流域年、夏、秋、7—9 月汛期均没有表现出突变性质。吴起、志丹和刘家河控制的 3 条非林区流域年径流量分别在 2002, 1996, 1999 年发生跃变,夏、秋和汛期径流量的跃变时间不同程度地与年径流量突变一致,意味着夏、汛期涉及的 6—9 月径流量对全年影响巨大,符合季风气候区的一般特征^[18]。

长期的水土保持工程措施尤其是林草恢复,一方面明显改善了土壤渗透性,增加水分蓄渗^[19],另一方面黄土高原地区潜在蒸散极强,蓄留的水分转化为地下水前多以蒸散的形式损失^[15,20],都致使非林区流域出口的径流量显著减少,而冬季蒸散量骤降,净效应即表现为枯水径流增加。相对而言,林区流域林草覆盖良好,已具备较为稳定的森林水文循环过程^[21],一定程度上能够缓解气候波动及人类活动影响^[22]。因此,林区径流量维持在一定的稳定水平。

表4 流域时期径流量突变性判定

水文站	年		夏		秋		汛期	
	突变年	p	突变年	p	突变年	p	突变年	p
黄陵	—	—	—	—	—	—	—	—
张村驿	—	—	—	—	—	—	—	—
吴起	2002	<0.05	2002	<0.05	—	—	—	—
志丹	1996	<0.01	1996	<0.01	1994	<0.01	1996	<0.01
刘家河	1999	<0.05	2002	<0.05	—	—	1999	<0.05

4 结论

(1) 年际尺度上,林区和非林区流域均表现出较强的变异性,其极值比为6~8,峰均比为2~3,变异系数在0.5左右。

(2) 林区和非林区流域径流年内分布均表现出双峰型特征,但林区峰型矮宽、非林区尖瘦。林区流域峰枯比是非林区流域的1/5,径流分布集中度约是后者的1/2,径流集中期滞后1个月。林区流域7—9月汛期与非汛期径流量分布比例约为5.5:4.5,而非林区流域则为4:6。

(3) 近50 a来在流域降雨量无明显变化趋势背景下,林区流域年、四季、汛期/非汛期及各月的径流量均无显著性变化趋势。非林区流域年、夏、秋及汛期表现出显著性减少趋势,吴起、志丹和刘家河3条控制流域分别于2002,1996,1999年发生跃变。非林区流域枯水期径流有不程度增加趋势,可能与近50 a来持续开展的水土流失综合治理,尤其1999年以来退耕还林(草)生态环境建设所发挥的生态水文效应有关。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 王光谦, 张长春, 刘家宏, 等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J]. 泥沙研究, 2006, 4(2): 10-16.
- [3] 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的影响[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 972-981.
- [4] 信忠保, 余新晓, 甘敬, 等. 黄河中游河龙区间植被覆盖变化与径流输沙关系研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 1-7.
- [5] Gao Zhaoliang, Fu Yanling, Li Yonghong, et al. Trends of streamflow, sediment load and their dynamic relation for the catchments in the middle reaches of the Yellow River over the past five decades [J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2012, 16: 3219-3231.
- [6] 冉大川, 刘斌, 王宏. 黄河中游典型支流水土保持措施减洪减沙作用研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [7] 张录军, 钱永甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 622-630.
- [8] 刘贤赵, 李嘉竹, 宿庆, 等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学, 2007, 27(6): 791-795.
- [9] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [11] Pettitt A. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.
- [12] 谢平, 陈广才, 李德, 等. 水文变异综合诊断方法及其应用研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(2): 11-14.
- [13] 薛根良. 黄土地下水的补给与赋存形式探讨[J]. 水文地质工程地质, 1995, 22(1): 38-39.
- [14] 查小春, 延军平. 全球变化下秦岭南北河流径流泥沙比较分析[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 403-407.
- [15] 刘昌明, 钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析[J]. 地理学报, 1978, 33(2): 112-126.
- [16] 王毅荣, 林纾, 张存杰. 中国黄土高原区域性暴雨时空变化及碎形特征[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 373-379.
- [17] 姚文艺, 徐建华, 冉大川. 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.
- [18] 刘昌明, 郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 129-135.
- [19] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 1-6.
- [20] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.
- [21] Wood P J, Hannah D M, Sadler J P. Hydroecology and ecohydrology: past, present and future [M]. Wiley Online Library, 2008.
- [22] Wei Xiaohua, Sun Ge, Liu Shirong, et al. The forest-streamflow relationship in China: A 40-year retrospect [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(5): 1076-1085.