

近 50 年来甘肃省河西中部地区径流 变化特征及驱动因素

张立峰¹, 闫浩文¹, 段焕娥¹, 张明旺², 杨树文¹

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省张掖市国土资源局, 甘肃 张掖 734000)

摘要: [目的] 对近 50 a 来甘肃省河西中部地区径流变化特征及驱动因素进行分析, 为该地区生态建设和社会经济的可持续发展提供科学依据。[方法] 应用研究区径流数据, 以年际极值比和变差系数反映径流的年际变化特征, 运用数理统计方法开展研究。[结果] (1) 研究区内年径流呈单峰型, 夏季所占比例最高, 冬季最低; 该区径流以降水量补给为主。(2) 年均径流近年来呈减少趋势, 丰枯变化较小, 但与其海拔呈正相关; 从西至东由减少趋势逐渐减弱至增加趋势明显。(3) 年均径流突变性特征一致性较差, 年际变化具有多尺度循环振荡周期, 主要存在 8 和 24 a 明显准周期, 其中 8 a 波动最强, 其径流先后经历了“多—少—多—少……”13 次循环交替, 2010 年之后径流再次减少, 可能持续到 2018 年。(4) 气温升高和降水量增加对该区径流变化产生影响, 而人类活动对其影响微弱。[结论] 研究区径流以降水补给为主, 近 50 a 其丰枯变化较小, 从东到西由增加趋势转变为减少趋势, 突变性特征一致性较差, 具有 8 a 显著周期, 气温和降水主导径流变化。

关键词: 河西中部地区; 径流变化; 气候变化; 水文气象

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0057-08

中图分类号: TV121

文献参数: 张立峰, 闫浩文, 段焕娥, 等. 近 50 年来甘肃省河西中部地区径流变化特征及驱动因素 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 57-64. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.009; Zhang Lifeng, Yan Haowen, Duan Huane, et al. Variation Characteristics of Runoff and Its Driving Forces in Recent 50 Years in Middle Hexi Corridor of Gansu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 57-64. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.009

Variation Characteristics of Runoff and Its Driving Forces in Recent 50 Years in Middle Hexi Corridor of Gansu Province

ZHANG Lifeng¹, YAN Haowen¹, DUAN Huane¹, ZHANG Mingwang², YANG Shuwen¹

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. The Bureau of Land Resources Zhangye, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: [Objective] The variation characteristics of runoff and its driving factors in the past 50 years in the middle area of Hexi corridor in Gansu Province were analyzed to provide a scientific basis for the ecological construction and the sustainable development of social economy. [Methods] Based on runoff data in the study area, the characteristics of the inter-annual variability of runoff were reflected with annual extreme value ratio and coefficient of variation, and other statistics methods. [Results] (1) The distribution of the runoff showed an unimodal type in the middle area of Hexi region. The proportion was the highest in summer, and it was the lowest in winter. The runoff mainly was sourced from precipitation. (2) The runoff had a decreasing trend in recent years, and the change of hydrologic characteristic was positively correlated with elevation. The annual average runoff had a reducing trend and then gradually became an increasing trend from the west to the south. (3) The mutation characteristics of the annual runoff was poor consistent in the middle of the Hexi region and inter-annual variability of the annual runoff had a characteristic of multi-scale oscillation.

收稿日期: 2016-04-20

修回日期: 2016-09-20

资助项目: 甘肃省自然科学基金项目“基于 GIS 和 RS 的城市土地利用动态演化与模拟研究”(148RJZA028); 兰州交通大学青年科学基金项目(2013002)

第一作者: 张立峰(1982—), 男(汉族), 吉林省农安市人, 博士研究生, 研究方向为地理信息系统及其应用。E-mail: zhanglf@mail.lzjtu.cn。

The fluctuation had a quasi-cycle obviously in 8 a and 24 a, and the quasi-cycle in 8 a was more obvious, whereof 13 cycles as “much-less-much-less...” were observed. The runoff reduced after 2010, and might increase in 2018. (4) Runoff was both affected by the increase of temperature and precipitation, while was little affected by human activity. [Conclusion] Runoff is mainly supplied by precipitation in the study area. The changes were smaller in the past nearly 50 years. The annual average runoff had a reducing trend and then gradually became an increasing trend from the west to the south, and had a strongest quasi-cycle obviously in 8 a. Temperature and rainfall are the two main causes of runoff change.

Keywords: the middle area of Hexi region; runoff; climate change; hydro-meteorology

目前,全球气候变化是国际科学界最为关注的热点问题之一。径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的耦合作用,其演变过程不仅表现出一定的规律性,同时也伴随着强烈的随机性^[1]。近年来,随着全球变暖和人类活动影响的不断加剧,河川径流发生了显著的时空变化,直接影响到了水资源的配置、开发与利用,以及生态系统的物理、化学和生物过程^[2-3]。

IPCC(intergovernmental panel on climate change)第 4 次评估报告指出,全球持续变暖的大背景下,探索自然变化和人类活动影响下的水资源演变规律是一个新的水科学问题。从此,中国许多学者在这一方面做了大量的研究;侯钦磊等^[4]对近 50 a 渭河径流变化进行研究,并对人类活动和气候变化对径流的影响做了定量分析;凌红波等^[5]研究了叶尔羌河年径流量与降水量的集中性;Ma 等^[6]研究了石羊河流域气候变化和人类活动二元模式下径流的变化规律;Zhang 等^[7]对降水量变化和人类活动对径流的径流影响做出了区分。

河西地区河川径流主要靠冰川融水和降水补给,研究表明气温的上升将引起冰川消融^[8-9],因此,气候变化势必会导致河西地区水文水资源等方面的变化,从而影响河西地区本身及其周围的生态系统、人地关系系统、人类生存环境和经济社会发展。近年来,许多学者对河西地区的气候变化、水沙变化、土地利用变化等方面做了大量的研究工作,同时也得到了一些重要成果^[10-12]。河西中部地区主要集中于黑河流域中上游,水资源为该区的工业、农业和水利等各方面的建设提供了用水保证,也促进了该地区的经济社会发展。因此,全球变化的大背景下,研究河西中部地区的水文水资源变化及其驱动因子显得尤为重要。本文应用径流数据,以年际极值比和变差系数反映径流的年际变化特征,运用数理统计方法系统分析了河西地区径流的年内年际变化特征、径流的变化趋势和未来变化趋势,探讨了气候变化和人类活动两个因素对径流变化的影响。

1 数据来源与处理方法

1.1 研究区概况

河西地区位于甘肃省西北部,东起乌鞘岭,西与新疆交接,南至祁连山和阿尔金山主分水岭北坡,北到内蒙古自治区和蒙古国边界,地理范围在 37°17′—42°48′N,93°23′—104°12′E。按照地貌特征可分为南部祁连山地、中部走廊平原区和北部北山山地。祁连山是中国干旱、半干旱过渡区,内陆水系与外流水系交汇带,海拔 4 700 m 以上终年积雪,广泛发育现代冰川,是河西地区三大内陆河石羊河、黑河和疏勒河发源地,也是河西绿洲的重要水源地,制约着河西地区荒漠和绿洲生态系统发展。气候属温带大陆性气候,干旱少雨,蒸发强烈。降水量基本呈东南向西北逐渐减少的趋势,蒸发量自西北向东南递减,靠近祁连山地区最小。河西地区包括亚大陆性冰川和极大陆性冰川,面积 1 972.5 km²,冰储量 9.54×10¹⁰ m³,是河西地区水资源特殊的存贮形式。山区年平均总径流量中,冰川融水量约占 12%,加上自然降水量,出山径流量为河西地区总径流的 99%以上^[13]。河西中部地区属于黑河流域中上游,海拔一般在 2 300 m 以上,主要以人工农田、耕地、草地为主。

1.2 数据来源

1957—2010 年河西中部地区水文数据由中国科学院西北生态环境资源研究院提供,各水文站的地理位置详见表 1。气象数据由中国气象科学数据共享服务网提供(<http://sds.cma.gov.cn>),选取张掖和高台气象站用于分析径流变化的驱动因子。

表 1 河西中部区水文站和气象站的地理信息

项目	站点	经度(°)	纬度(°)	海拔/m
水文站点	札马什克	99.98E	38.23N	2 810.2
	莺落峡	100.18E	38.82N	1 700.4
	正义峡	99.47E	39.82N	1 280.0
	犁园堡	100.00E	38.97N	1 760.0
	红沙河	99.20E	39.18N	2 350.0
	新地	99.42E	39.57N	1 880.0
气象站点	张掖	100.26E	38.56N	1 482.7
	高台	99.50E	39.22N	1 332.2

2.3 处理方法

采用线性趋势法, 累计距平法^[14]分析河西中部地区年径流量的趋势性和阶段性(丰枯特征); 采用 Mann-Kendall 检验法^[15]检测其突变点, 揭示出径流的多尺度特征; 采用 Morlet 小波分析法^[16]分析年径流的周期性; 采用多元线性回归探讨气温和降水量对径流变化的影响。

根据径流丰枯等级的划分标准, 按距平百分率 p 来划分径流的丰枯等级, 其计算表达式为:

$$p = (\text{某年径流量} - \text{多年平均值}) / \text{多年平均值} \times 100\%$$

当 $p > 20\%$ 时为丰水; $10\% < p \leq 20\%$ 时为偏丰; $-10\% \leq p \leq 10\%$ 时为平水; $-20\% \leq p \leq -10\%$ 时为偏枯; $p < -20\%$ 时为枯水。

2 结果与分析

2.1 年内径流特征

河西中部地区径流主要受降水量的影响较大, 降水季节的差异性, 从而导致径流的年内分配也表现出很大的差异性。1957—2010 年河西中部地区各水文站年内径流分布基本呈单峰型(除正义峡水文站外), 各月径流量分布不均匀(图 1), 1—3 月径流量偏少, 4—5 月开始缓慢上升, 至 6 月急剧增加, 7 月, 8 月达到年内高值, 其中 7 月最高, 8 月次之, 9 月快速减少, 10 月继续减少, 11—12 月再次回归年内低值。春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月至翌年 2 月)以及汛期(6—10 月)径流分别占全年径流总量的比例不同, 其中夏季所占比例最高, 冬季最低, 这与叶尔羌河地区^[5]和讨赖河山区^[17]的研究结论相一致。但正义峡水文站表现出了差异性, 年内分配来看, 5 月径流量在年内达到最小值, 9 月达到最大值, 总体冬季(12 月至翌年 2 月)径流量占全年径流总量的比例最高, 正义峡水文站处于低海拔区, 可能受到人类活动等的影响, 差异性的详细解释将会在后文讨论。各气象站点降水量的年内分配也表现出了单峰性(图 2), 这种特征与各水文站点(除正义峡水文站外)径流量的年内分布特征相似, 说明该区径流受降水量的影响较大。

一般而言, 变差系数 C_v 与年际极值比(最大与最小径流量比值)能够反映径流年际变化的总体特征^[4]。河西中部地区各站点年际变化特征如表 2 所示。从表 2 可以看出, 各站点的径流年际极值比和 C_v 均较小, 说明河西中部地区丰枯变化小。这与渭河流域表现出差异性^[4]。西段水文站点径流年际极值比和 C_v 较高, 说明西段的丰枯变化较为剧烈, 西

段在水资源利用和管理上难度较大。其中正义峡水文站年际极值比和 C_v 值较其他水文站高, 可能是由于该水文站(海拔为 1 280 m)处于低海拔区, 其受到其他因素的影响。札马什克水文站的年际极值比和 C_v 值表现为最低值, 可能是该站点处于高海拔区(海拔为 2 810.2 m), 很难受到人类活动等的影响; 其次红沙河水文站值较小, 同样是海拔(2 350 m)较高, 受人类活动影响较小导致; 其他各水文站的年际极值比和 C_v 值较为接近。从而可以看出, 水文站的年际极值比和 C_v 值与海拔表现出正相关性。

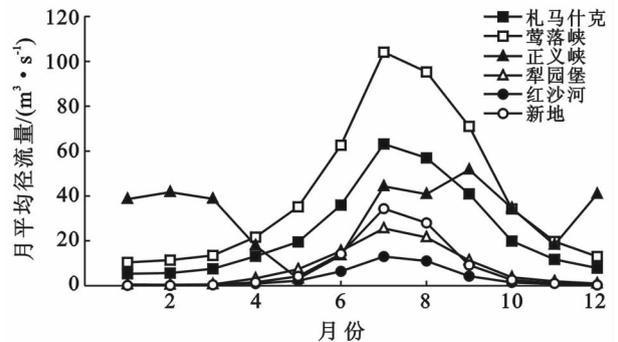


图 1 河西中部地区各水文站点年内径流量变化

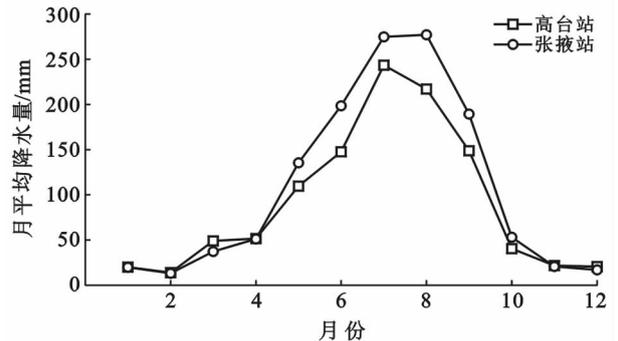


图 2 河西中部地区各气象站点年内降水量变化

河西中部地区 6 个水文站的年径流总量的线性趋势见下图 3, 可以看出札马什克和莺落峡水文站的年径流总量表现出增加的变化趋势, 其变化率分别为 1.995 和 3.296 $[\text{m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})]$, 这与疏勒河上游地区^[18]径流变化趋势相一致; 正义峡、红沙河和新地水文站年径流总量表现出递减的变化趋势, 犁园堡水文站整体变化趋势较微弱。5 a 滑动平均曲线显示, 各个水文站均表现出了明显的峰和谷。空间上可以看出, 河西中部地区年平均径流量也受地理位置的影响, 偏西地区的站点(正义峡、新地和红沙河)年均径流量总体呈减少的趋势, 偏东地区(札马什克、莺落峡和犁园堡)则呈相反的趋势。总体而言, 从西至东, 年平均径流量由减少趋势逐渐减弱至增加趋势明显。

表 2 河西中部径流年际变化特征值

站点	多年平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大值		最小值		年际 极值比	变差系数 C_v
		径流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	年份	径流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	年份		
札马什克	24.1	33.2	1958	16.7	1973	1.99	0.163
莺落峡	50.4	73.3	1989	32.4	1973	2.26	0.200
正义峡	32.1	49.8	1989	17.3	1992	2.88	0.245
犁园堡	7.76	11.9	1983	4.88	1991	2.44	0.221
红沙河	3.51	5.85	1958	2.22	2003	2.64	0.182
新地	8.05	12.4	1958	4.41	2003	2.82	0.220

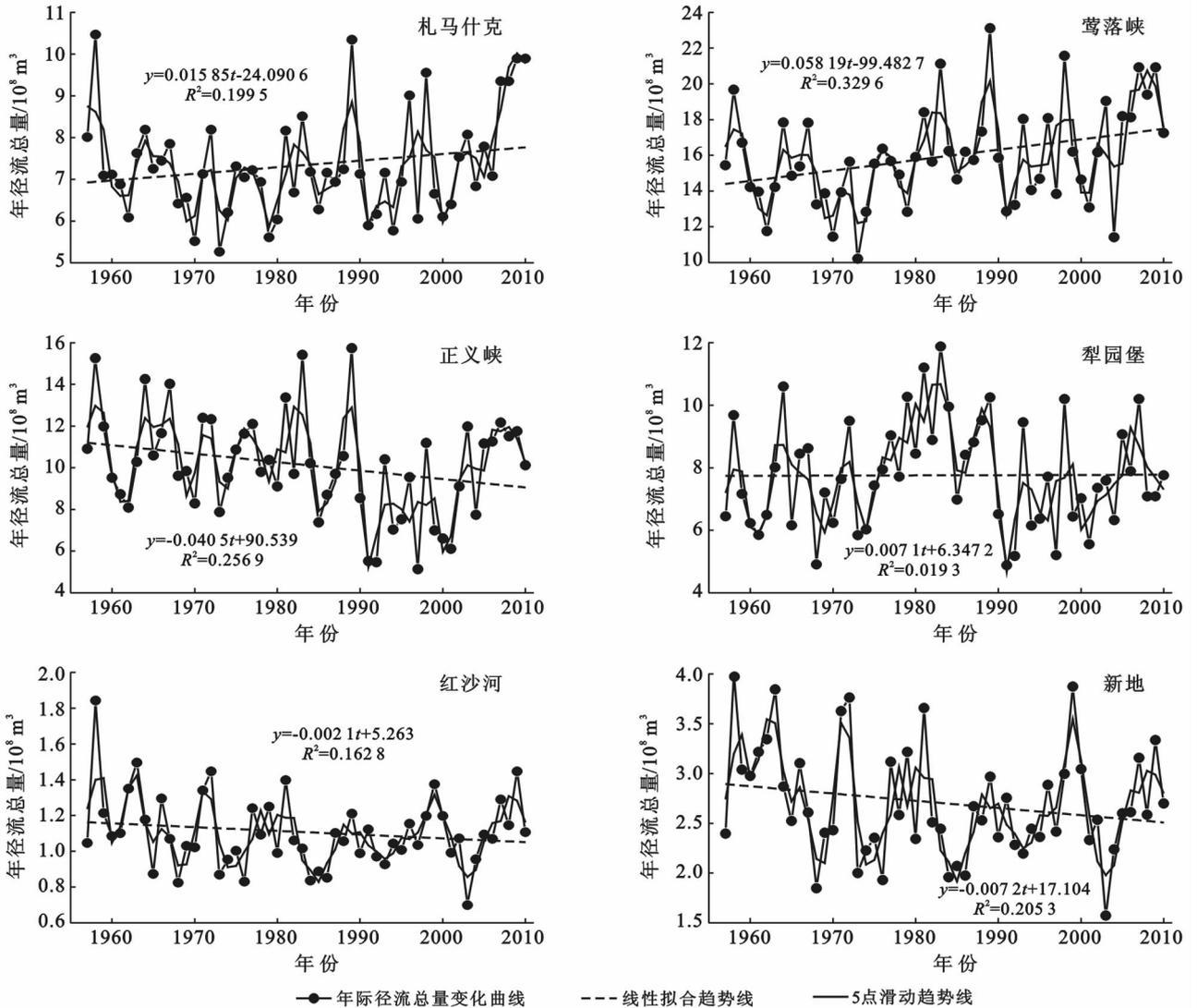


图 3 河西中部各水文站年径流总量变化趋势

本研究利用丰枯等级反映年际径流变化的长持续性特征,河西中部地区年径流丰枯年际变化曲线显示(图4),札马什克站和莺落峡站1959—1980年期间基本上处于丰水期,此后其余年间丰水期和枯水期波动频繁,时段历时较短,基本上仅有1~3a;正义峡站1957—1990年,丰水期和枯水期波动频繁,1990—

2005年基本处于丰水期,之后变为枯水期;犁园堡站主要经历了3次大的波动,丰(1960—1975年)—枯(1975—1989年)—丰(1989—2004年),枯水期历时较长,历时14a;红沙河站和新地站整体上丰水期和枯水期波动频繁;大多数站点都在2005年之后处于枯水期,说明了近年来该区径流量呈减少的趋势。

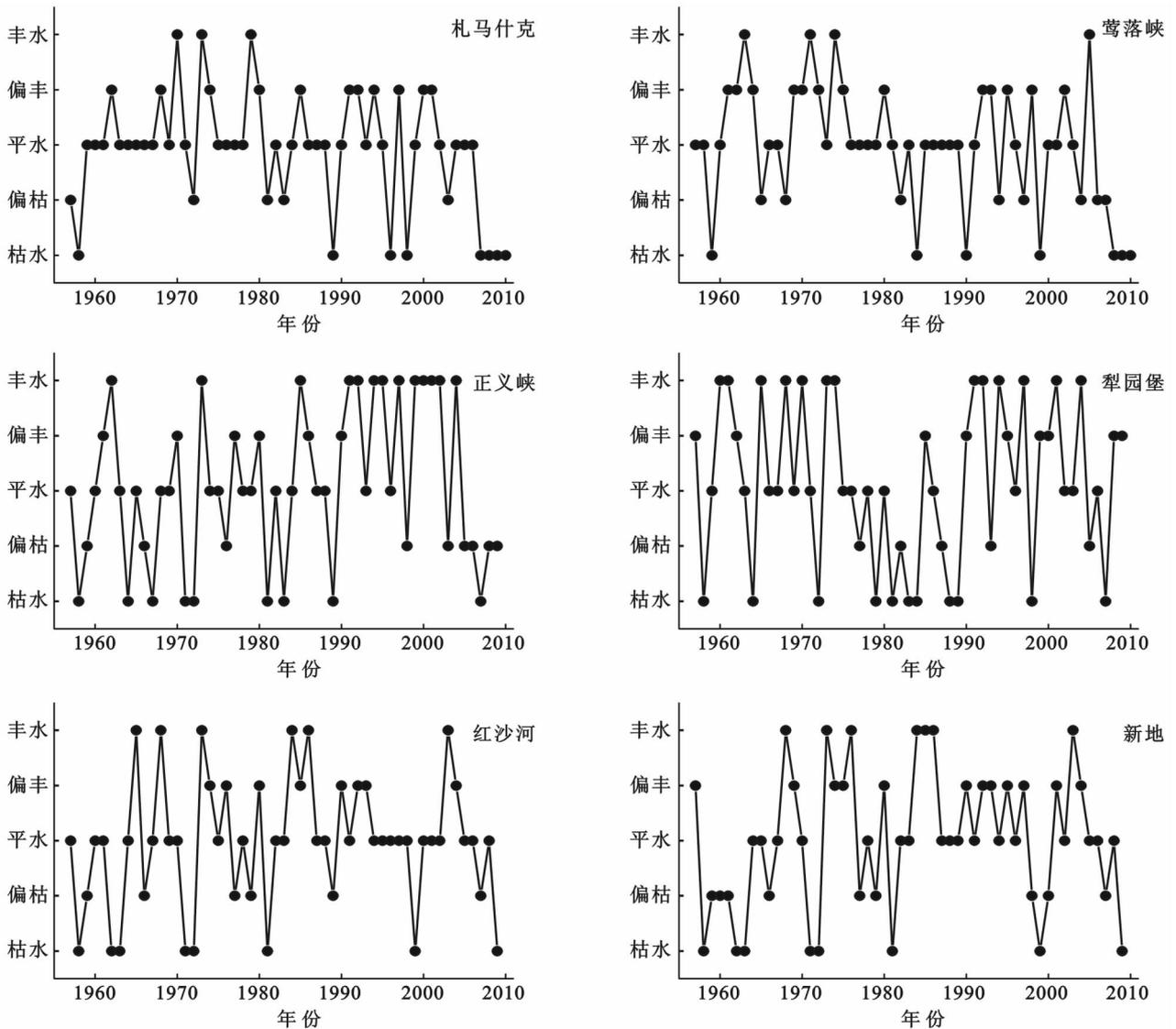


图 4 河西中部地区年径流丰枯年际变化

1957—2010 年河西中部地区各水文站点年径流突变性分析结果显示(图 5),扎马什克站 1957—2005 年径流呈波动中增加趋势,2005 年之后增加幅度变快,2009—2010 年存在突变点;莺落峡站年径流在 1957—1974 年呈减少趋势,之后呈稳定阶段,在 1990 年,2004 年发生突变;正义峡站年径流在 1957—1990 年呈减少趋势,之后呈显著增加趋势,没有检测到突变信息;犁园堡站年径流变化较为复杂,在 1957—1969 年呈减少趋势,1969—1984 年呈增加趋势,1984—2003 年呈减少趋势,之后呈显著增加趋势,在 1962 年存在突变点;红沙河和新地站年径流变化较为稳定,呈波动中减少趋势,均在 1964 年存在突变点。莺落峡水文站点表现出的特征与年径流总量变化特征相一致(图 3)。

河西中部地区 1957—2010 年径流的年际变化具有多尺度循环振荡周期特征(图 6)。各时间尺度径流

小波分析显示,扎马什克、莺落峡和正义峡站均存在波动最强的 24 a 明显准周期,其中扎马什克还存在主要的 4.8 a 的准周期,莺落峡存在 8 a 的准周期,正义峡存在主要的 6 a 准周期;犁园堡周期性较弱,主要存在 6 和 30 a 的准周期;红沙河和新地站点主要存在 8 和 18 a 的准周期,其中 8 a 周期波动最强,在 8 a 准周期下,径流先后经历了“多—少—多—少……”13 次循环交替,可以推算 2010 年之后径流再次偏少,并可能持续到 2018 年。各个水文站点径流特征的差异性表明了河西中部地区存在地貌与气候等的复杂性。

2.2 径流变化的影响因子分析

河西中部地区 1957—2010 年各站点径流量与气象要素的多元线性回归结果表明(表 3),各站点年径流与日照时数呈负相关,可能是由于随着日照时数增多,由此产生的蒸发量增大对年径流量的增加起到削弱作用^[19];扎马什克、莺落峡、红沙河以及新地站的

年径流量与年均气温和年均最高气温呈正相关,已有研究表明^[20],气温升高可能使流域冰雪融水增加,加大了径流中冰雪融水补给的成分,进而使径流中降水补给和冰雪融水补给的比例在一定程度上发生改变。气温升高引起的冰雪融水量大于蒸发量时,气温与径流呈正相关,反之,气温与径流呈负相关。扎马什克、莺落峡、红沙河以及新地站靠近祁连山区,祁连山冰川近年来大面积退缩^[21],冰雪融水对径流起到了补

给作用。正义峡和犁园堡站年径流量与年均气温和年均最高气温呈负相关,正义峡和犁园堡水文站较其它水文站距祁连山冰川区远,冰雪融水量的补给小于蒸发量,因此,表现出了负相关。各站点的降水量和相对湿度与年径流量均呈正相关,尤其正义峡和犁园堡站,达到显著正相关,说明主要以降水补给为主,局部较为湿润;各站点的年径流量与平均风速相关性较弱,表明平均风速对其影响较弱。

表 3 河西中部地区各站点径流与气象各要素的相关关系

水文站	日照时数	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	降水量	相对湿度	平均风速
札马什克	-0.311 3*	0.230 4*	0.117 3	0.353 5*	0.282 4*	0.122 1	-0.163 5
莺落峡	-0.092 3	0.313 5*	0.311 5*	0.291 3*	0.173 1	0.141 7	-0.292 7*
正义峡	-0.430 5*	-0.179 3	-0.320 6*	0.011 3	0.399 4*	0.297 3*	0.225 6*
犁园堡	-0.471 2*	-0.125 9	-0.226 1*	0.058 0	0.560 0*	0.474 8*	-0.087 0
红沙河	-0.168 2	0.209 7	0.193 2	0.285 5*	0.242 0*	0.003 9	0.003 4
新地	-0.116 4	0.195 8	0.196 2	0.257 9*	0.209 5	0.008 1	0.013 2

注: * 表示达到 0.1 显著性水平。

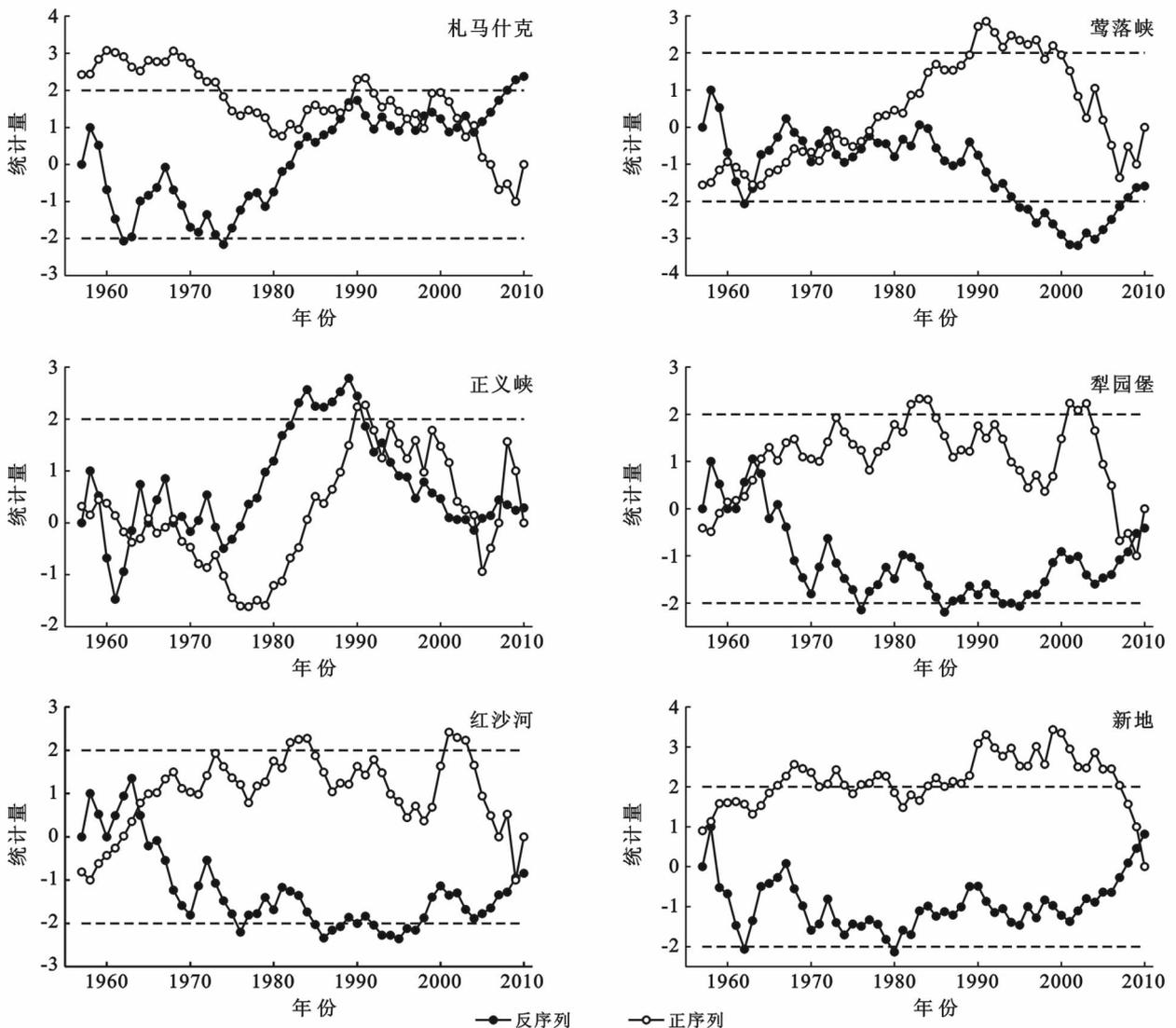


图 5 河西中部地区年径流突变性

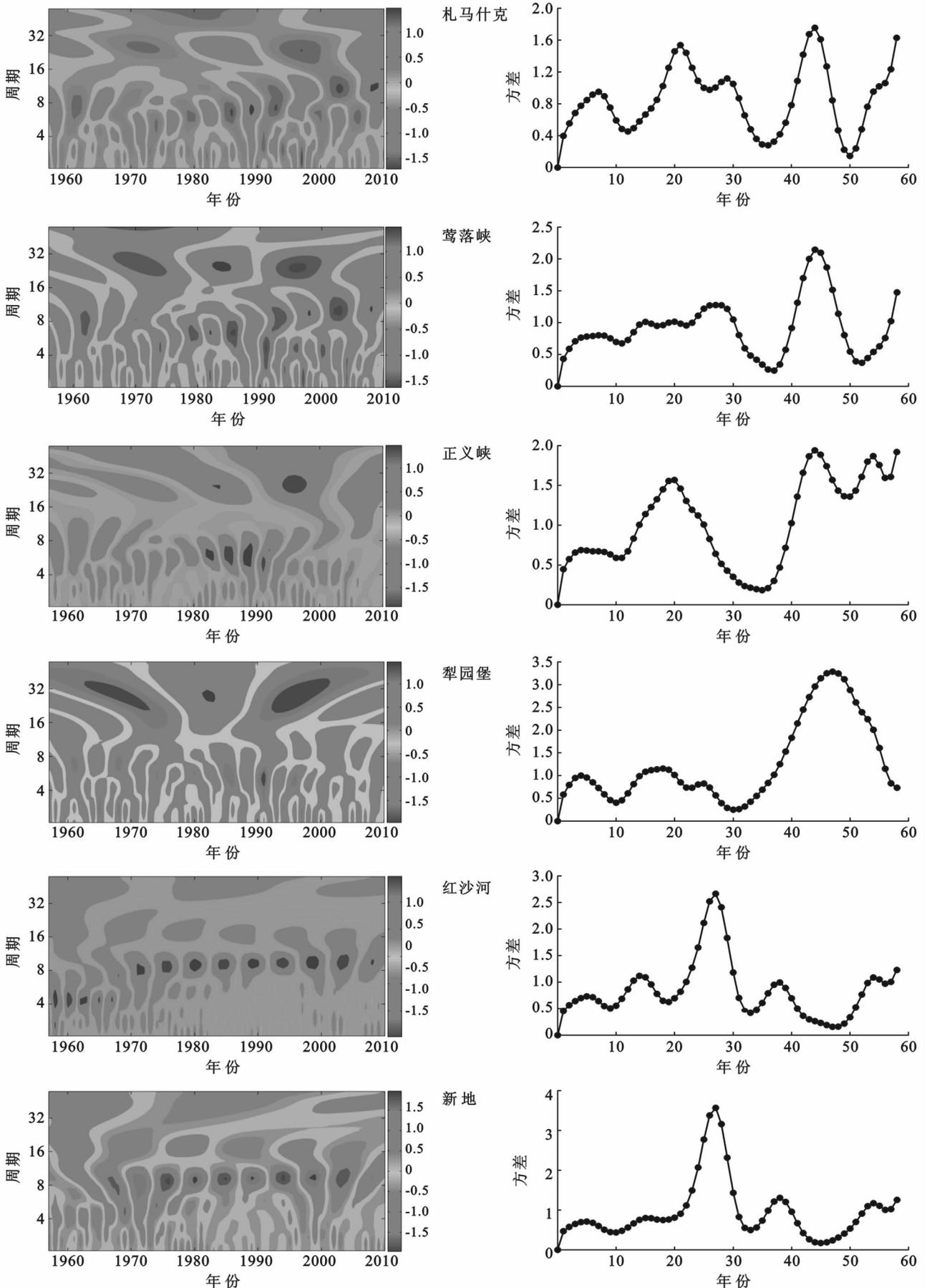


图 6 河西中部地区年径流小波系数实部和小波方差

双累积曲线法通常是用来分析时间序列的一种方法。基本理论是将两个变量按同一时间长度逐步累加,然后计算散点趋势,其拐点可作为分析变量阶段性变化的依据^[22]。当无其他因素影响时,同时忽略气温引起的融雪对降水量的补给,仅有降水量的变化,双累积曲线应为一一直线;当受到人类活动等其他因素影响时,曲线将会发生偏移,由此可根据双累积曲线发生偏移的年代确定受人类活动发生显著改变的时间点,偏移的程度反映人类活动影响的程度,因此,降水与径流的双累积曲线可以揭示人类活动对径流影响的阶段性变化。河西中部地区降水—径流双曲线如图 7 所示,可以看出,各个水文站点(正义峡站点除外)的降水—径流累积曲线无显著偏移,说明该地区河流径流量未受人类活动干扰或干扰很微弱;可能是由于水文站海拔较高,人类难以影响。正义峡水文站点的降水—径流累积曲线自 1990 年之后发生偏移,双累积曲线偏移之前的时段认为径流未受到人类活动的干扰,之后受到人类活动的影响,这应与该时期农业灌溉用水增加有关,还可能与该时期国家实施水利工程设施建设、退耕还林等措施有关,有待下一步更深层次的讨论。

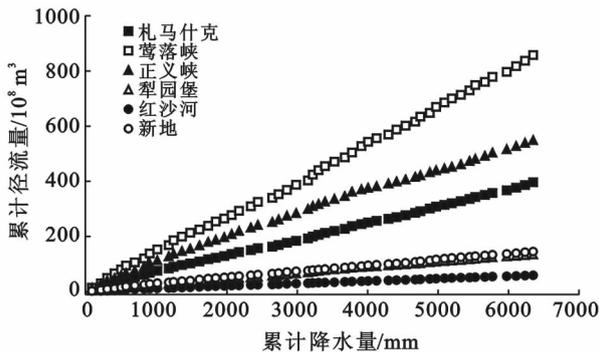


图 7 河西中部地区各水文站降水—径流双累积曲线

3 结论

(1) 全球变暖背景下,近 50 a 河西中部地区各水文站年内径流分布基本呈单峰型(除正义峡水文站外),各月径流量分布不均匀,夏季所占比例最高,冬季最低。低海拔的正义峡水文站表现出了明显的不同;5 月经流量在年内达到最小值,9 月达到最大值,冬季(12 月至翌年 2 月)径流量占全年径流总量的比例高于其他站,表明该区径流受到蒸发损耗和灌溉引水的影响。

(2) 河西中部地区丰枯变化较小,大多数水文站点均在 2005 年之后处于枯水期,说明了近年来该区径流量呈减少的趋势,同时发现水文站的丰枯变化特

征与其海拔存在正相关性。年平均径流量受地理位置的影响,偏西地区年均径流量总体有减少的趋势,偏东地区则有相反的趋势。总体而言,从西至东,年均径流量由减少趋势逐渐减弱至增加趋势明显。

(3) 河西中部地区年径流突变性特征一致性较差,各个水文站点的突变时间不一致;年径流的年际变化具有多尺度循环振荡周期特征,主要存在波动最强的 8 和 24 a 明显准周期,其中 8 a 周期波动最强,在 8 a 准周期下,径流先后经历了“多—少—多—少……”13 次循环交替,可以推算 2010 年之后径流量再次偏少,并可能持续到 2018 年。各个水文站点径流特征的差异性表明了河西中部地区存在地貌与气候等的复杂性。

(4) 气温升高和降水量增加对径流形成产生一定影响,而人类活动对其影响微弱。正义峡水文站点 1990 年之后将受到人类活动影响,径流量有所减少,这应与该时期农业灌溉用水增加有关。

[参 考 文 献]

- [1] 张强,李裕,陈丽华. 当代气候变化的主要特点、关键问题及应对策略[J]. 中国沙漠,2011,31(2):492-499.
- [2] 曹建廷,秦大河,罗勇,等. 长江源区 1956—2000 年径流量变化分析[J]. 水科学进展,2007,18(1):29-33.
- [3] 丁永建,叶柏生,韩添丁,等. 过去 50 年中国西部气候和径流变化的区域差异[J]. 中国科学:地球科学,2007,37(2):206-214.
- [4] 侯钦磊,白红英,任园园,等. 50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学,2011,33(8):1505-1512.
- [5] 凌红波,徐海量,张青青,等. 叶尔羌河年径流量与降水量的集中性及相关性分析[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1757-1764.
- [6] Ma Zhenmei, Kang Shaozhong, Zhang Lu, et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of north-west China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(3/4): 239-249.
- [7] Zhang Shurong, Lu X X. Hydrological responses to precipitation variation and diverse human activities in a mountainous tributary of the lower Xijiang, China[J]. Catena, 2009, 77(2):130-142.
- [8] 何毅,杨太保,陈杰,等. 1972—2013 年东天山博格达峰地区冰川变化遥感监测[J]. 地理科学,2015,35(7):925-932.
- [9] 何毅,杨太保,冀琴. 基于遥感资料的中亚阿拉套地区冰川变化及动因分析[J]. 山地学报,2015,33(2):148-156.
- [10] 梁治华,刘勇. 近 20 年来腾格里沙漠南缘土地利用/土地覆盖变化及其成因探讨:以甘肃省古浪县冰草湾地区为例[J]. 遥感技术与应用,2015,30(2):383-390.

(下转第 74 页)

- [20] 周联, 蒙古军, 齐杨, 等. 中国生态用地重要性及其格局优化研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 218-225.
- [21] 张景华, 封志明, 姜鲁光. 土地利用/土地覆被分类系统研究进展[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1195-1203.
- [22] 王玲, 吕新. 基于 DEM 的新疆地势起伏度分析[J]. 测绘科学, 2009, 34(1): 113-116.
- [23] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1: 100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724.
- [24] 张序强, 李华, 董雪旺. 旅游地阻力面理论初探: 以五大连池风景名胜区为例[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 241-244.
- [25] 周锐, 王新军, 苏海龙, 等. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 2003-2012.
- [26] 李谦, 戴靓, 朱青, 等. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究[J]. 地理科学, 2014, 34(6): 733-739.
- [27] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用: 以厦门为例[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 421-428.
- [28] 文博, 刘友兆, 夏敏. 基于景观安全格局的农村居民点用地布局优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 181-191.
- [29] 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. 地理学报, 2014, 69(4): 485-496.
- [30] 刘艳芳, 郭晓慧, 方然, 等. 基于景观生态安全格局的土地利用总体规划环境影响评价[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2015, 32(6): 120-126.
- [31] 俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型[J]. 地理学报, 1998, 53(12): 11-20.
- [32] 刘彦随, 杨子生. 我国土地资源学研究新进展及其展望[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 353-360.
- [33] 喻锋, 李晓兵, 王宏. 生态安全条件下土地利用格局优化: 以皇甫川流域为例[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3198-3210.
- [34] 孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟. 中国土地利用空间格局动态变化模拟: 以规划情景为例[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6440-6451.
- [35] 陈影, 张利, 何玲, 等. 基于多模型结合的土地利用结构多情景优化模拟[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5391-5400.
- [36] 蒙古军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [37] 张玉虎, 李义禄, 贾海峰. 永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价[J]. 干旱区理, 2013, 36(6): 1049-1057.

(上接第 64 页)

- [11] 林纾, 李红英, 党冰, 等. 甘肃河西走廊地区气候暖湿转型后的最新事实[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1111-1121.
- [12] 韩兰英, 万信, 方峰, 等. 甘肃河西地区沙漠化遥感监测评估[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 131-138.
- [13] 陈昌毓. 祁连山区水资源及其对河西走廊生态环境的影响[J]. 自然资源学报, 1995, 10(2): 104-114.
- [14] 侯钦磊, 白红英, 任园园, 等. 50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1505-1512.
- [15] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1955—2012 年南北疆气温、降水及相对湿度趋势分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 269-277.
- [16] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1960—2013 年南北疆风速变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 249-259.
- [17] 徐浩杰, 杨太保, 柴绍豪. 1961—2010 年讨赖河山区径流变化特征及其驱动因素[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 878-884.
- [18] 徐浩杰, 杨太保, 张晓晓. 近 50 年来疏勒河上游气候变化及其对地表径流的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 39-45.
- [19] 张彧瑞, 赵艳萍, 马金珠. 近 50 年来讨赖河流域气候变化分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(1): 31-33.
- [20] 李宝富, 陈亚宁, 陈忠升, 等. 西北干旱区山区融雪期气候变化对径流量的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1461-1470.
- [21] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近 50 年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414.
- [22] Sheng Yue, Paul Pilon, Bob Phinney. Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation[J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 48(1): 51-63.