

王生霞,王飞.河西内陆河流域绿洲面积对地表径流的响应[J].中国沙漠,2021,41(2):231-241.

河西内陆河流域绿洲面积对地表径流的响应

王生霞¹,王飞²

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室/冰冻圈科学国家重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.兰州财经大学,甘肃 兰州 730101)

摘要: 利用NASA AVHRR NDVI 3g遥感资料计算得出河西内陆河流域植被归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),将NDVI>0.20区域视为绿洲,通过计算绿洲区NDVI的变差系数和线性斜率分析1982—2013年绿洲面积变化,并进一步分析其对地表径流的响应特征。结果表明:河西内陆河流域绿洲整体呈扩张趋势,扩张区域主要在绿洲边缘区、河流两侧和尾间;小规模斑块绿洲的破碎度呈增加趋势,连片的绿洲核心区相对稳定;绿洲面积随着出山径流变化呈现出阶段性特征,山区降水量对绿洲变化的贡献率约为地表径流贡献率的一半,冰川融水对绿洲面积变化的贡献率自东向西依次增加,绿洲区降水的贡献率则依次减少。

关键词: 河西内陆河; 绿洲动态变化; 出山径流; 绿洲区降水; 响应

文章编号: 1000-694X(2021)02-231-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00138

中图分类号: P96

文献标志码: A

0 引言

内陆干旱区绿洲几乎集中了所有的社会、经济和生态要素,是干旱区自然条件的精华所在,具有最高的第一性生产力^[1]。干旱区绿洲承载的由社会经济发展和人口快速增长带来的压力明显高于其他地区^[2],水资源压力最显著^[3-4]。绿洲发展基本上取决于水资源量及其时空分布变化^[5-10],因绿洲扩张引发的水资源供给与绿洲耗水矛盾在最近几十年来日益凸显,进而推动了绿洲扩张过程中的水量平衡、能量(热量)平衡研究成为生态水文学及相关学科的研究焦点^[2-3]。

河西内陆河流域绿洲作为中国生态系统中重要性与脆弱性均十分突出的典型区域^[11],其动态演变过程一直是干旱区生态学关注的热点^[12]。从研究现状看,在干旱内陆河流域开展生态水文的研究焦点集中在:①宏观尺度上内陆河水资源和气候变化、生态环境之间的关系^[4,13-14],②中尺度层面地下水对植被生态的影响^[15]及河西内陆河流域绿洲面积动态变化的驱动因素^[16-19],③小尺度层面土壤水分和降水对区域植物种的影响机制^[20-22]。但鲜有研

究从空间大尺度分析年尺度的干旱内陆河流域绿洲面积变化特征,考虑冰川融水变化影响的绿洲面积变化研究更少。在内陆河流域山区,受气候变化影响,降水径流和冰川及其融水径流(简称“冰川径流”)发生了显著变化^[23-41]。同时,平原绿洲在自然和人类活动干预下规模和形态也发生了改变^[5,12,42-47],出山径流变化对绿洲规模的影响,是认识山区径流变化对绿洲系统影响的重要环节,也是干旱区水资源持续利用的主要科学依据。本文基于已有研究成果,围绕上述科学问题,通过遥感资料反演得到长时间序列年尺度绿洲面积数据,将山区径流和平原绿洲面积联系起来,从而将山区气候要素、冰川融水和平原绿洲作为一个整体进行全面分析。因河西内陆河流域地表径流主要由山区降水径流和冰川径流组成的出山径流与绿洲区降水构成,且研究区自东向西3个流域的冰川径流补给比例不同^[10,23,27],本文拟分析近30年研究区的绿洲面积对地表径流主要组分(绿洲区降水和出山径流的主要来源山区降水与冰川融水)的响应,为科学、合理利用水资源和绿洲适宜规模发展提供依据。

研究区的绿洲动态变化特征分析主要通过遥

收稿日期:2020-11-17; 改回日期:2021-02-28

资助项目:甘肃省自然科学基金项目(17JR5RA314); 国家自然科学基金项目(41501076)

作者简介:王生霞(1983—),女,河南卫辉人,博士,助理研究员,主要从事冰冻圈研究。E-mail: wangshxia@lzb.ac.cn

感反演计算得到的生长期植被归一化指数(NDVI)实现。NDVI作为表征植被状况最常用的指标,综合反映植被覆盖和生物量的变化情况^[48]。NDVI变化在长时间序列、大空间尺度上受气候条件控制,人类活动的影响可看做是叠加在其上的作用^[49],即NDVI是气候和人为因素共同作用的结果,是反映植被覆盖状况应用较广的指标。2000年以来部分学者通过NDVI遥感资料展开了气候和人为因素对植被覆盖变化的双重影响研究^[50-54],并在不同尺度上对植被覆盖变化与气候因子和人类活动之间的关系进行了研究^[55-56],亦有学者利用AVHRR NDVI遥感资料结合实地调查数据进行生物量估算^[57]和判别大尺度牧草地面积^[58],但利用该遥感数据估算空间大尺度绿洲面积的成果不多。本文基于学者们上述研究成果,结合近期的Landsat TM和Google Earth 高清遥感影像,利用AVHRR NDVI遥感资料反演得到的生长期NDVI来判别河西内陆河流域年尺度绿洲面积的动态变化特征。

1 研究区概况

河西内陆河流域地处中国西北干旱区,位于甘肃河西走廊一带,自东向西主要分为石羊河、黑河、

疏勒河三大内陆河流域(图1),流域面积约37 402 km²,1960—2013年的多年平均出山径流量为49.49亿m³,主要河流都源于祁连山北坡。属于典型的温带大陆性气候,山区多年平均气温为-1.30℃,远低于平原绿洲(约9.25℃),昼夜温差大;降水量少且时空分布不均,自山区到平原绿洲降水量骤减,山区的多年平均降水达363.16 mm,山前绿洲的多年平均降水仅104.75 mm,且大部分区域蒸发量超过1 500 mm。三大内陆河流域山区高寒气候孕育的冰川水资源和大量降水是主要河流出山径流的重要来源,但因气候系统影响和冰川覆盖面积不同,形成的出山径流量对气候和冰川变化的响应也有差异^[23-24,59-60]。

研究区内绿洲广布,分布于主要河流的出山口冲洪积扇三角洲地带,及伴随调蓄水等水利工程修建发展的人工绿洲。为了维持绿洲功能的完整性,石羊河流域和黑河流域的尾间在人工调水措施下维持了一定面积湿地。图1中的绿洲范围主要是结合近年来生长期高质量(云量少于5%)Landsat TM遥感资料和Google Earth 高清影像目视解译得到,绿洲范围解译过程中综合考虑了行政区划和流域水系的完整性及绿洲的集中连片。

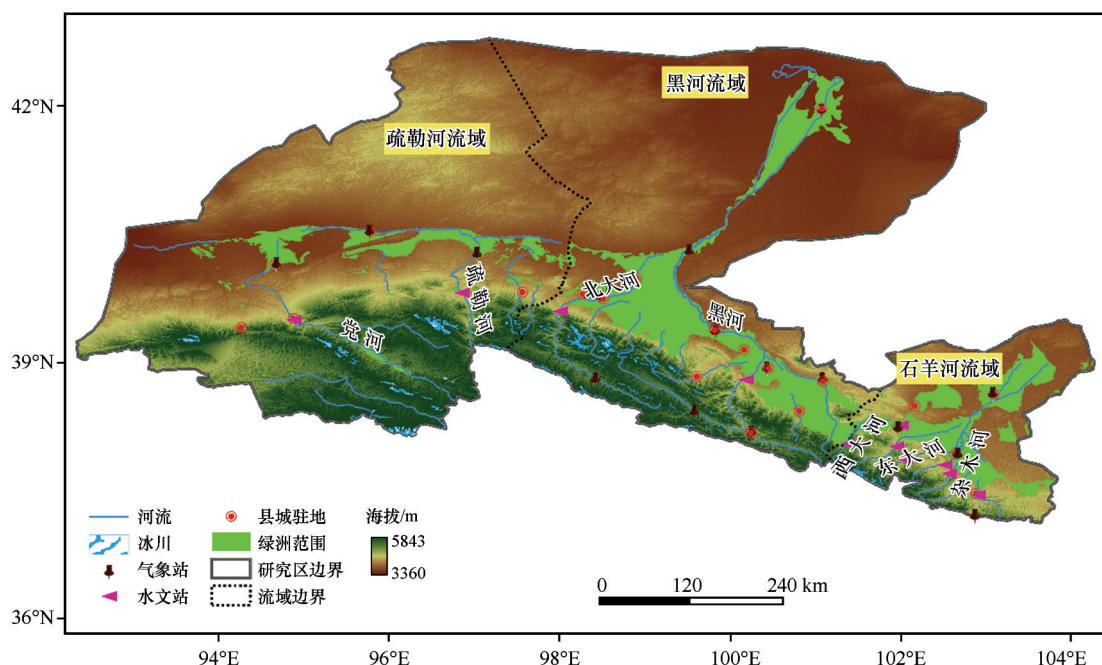


图1 河西内陆河流域水系、高程、水文站、气象站及冰川分布示意图

Fig.1 The diagram of river system, elevation, hydrological station, meteorological station and glacier distribution in Hexi inland river basin

河西内陆河流域上游的祁连山区为地表径流形成区,中游平原绿洲为径流利用区,下游荒漠区

为径流消耗区。截至2013年末,研究区内总人口483.31万,耕地面积59.99万hm²,农作物播种面积

52.31 万 hm^2 , 粮食产量 154.90 t, 分别相当于研究初期的 1.32、1.94、1.24、1.69 倍。河西内陆河流域绿洲以灌溉农业为主, 灌溉农业用水量占到总用水量的 85% 以上。

2 数据来源与研究方法

2.1 气象数据

年均气温和年降水数据来源于国家气象科学数据中心中国气象数据网(<https://data.cma.cn>)。下载的原始数据为日值的气温和降水, 年值气温和降水按月、年依次对日值气温和降水求算术平均得到。将平原绿洲区气象台站日值降水量小于 5 mm 的视为无效降水^[61], 本文绿洲区年降水量是按年份对生长期(3—10月)内日降水量大于 5 mm 的日值求算术平均得到。受限于遥感资料的时间序列和个别水文站的出山径流量数据获取困难, 气象数据的观测期统一为 1960—2013 年, 其中 1960—1981 年数据用于研究区气候背景分析, 1982—2013 年数据与水文、遥感资料保持一致。研究区内分布着 22 个气象台站, 各个台站观测资料的时间序列不同, 为便于研究分析, 基于已有研究成果^[62]对台站资料进行了以下处理: ①数据资料连续缺失 5 年以上的站点被剔除; ②位于荒漠区且远离绿洲的站点被剔除; ③数据连续缺失 3—6 个月的个别台站采用回归订正法进行插补。通过上述方法得到了研究区共计 16 个台站数据, 站点分别是乌鞘岭、武威、民勤、永昌、祁连、野牛沟、托勒、山丹、张掖、高台、鼎新、酒泉、额济纳旗、玉门镇、安西、敦煌。

2.2 水文数据

主要河流出山口年径流量资料来自甘肃省水文水资源勘测局的观测数据及 2006—2013 年的甘肃省水资源公报和石羊河流域水资源公报。因石羊河流域个别水文站点资料获取困难, 为保持与其他分析资料时间序列一致, 资料时间序列统一为 1960—2013 年。因出山水文站年径流资料受人类活动影响较小, 文中选取了插剑门(西大河)、沙沟寺(东大河)、四沟咀(西营河)、南营水库(金塔河)、杂木寺(杂木河)、黄羊水库(黄羊河)、古浪水库(古浪河)、大靖水库(大靖河)、冰沟(北大河)、莺落峡(黑河)、党城湾(党河)、昌马堡(昌马河)等 12 个主要河流出山水文站的年出山径流值作为流

域当年绿洲来水量。因径流形成区的地表径流均耗散于平原绿洲和维持尾间绿洲生态功能, 水量自产并全部耗散于各自流域, 故当年绿洲来水量等同于绿洲耗水量。绿洲区降水因不能直接形成径流通常在研究中忽略不计, 文中考虑到该部分有效降水对绿洲植被生长具有一定的生态功能, 故分析时将出山径流和绿洲区降水之和看作绿洲总耗水^[60], 其中折合计算得到的绿洲区降水径流是依据每年生长期的有效降水量与当年的绿洲面积乘积。本文主要分析绿洲面积对出山径流和绿洲区降水径流的响应, 暂不考虑地表径流蒸发、地下水等要素的影响。

年冰川融水径流数据使用的是高鑫等^[10]的模拟结果。模拟结果是基于第一次中国冰川编目资料和 90 m 分辨率的数字高程模型(DEM), 以国家气象台站的月降水量和月气温为驱动数据, 利用度日模型重建并进行对比验证得到。

2.3 遥感数据

使用的 NASA AVHRR NDVI 3g 遥感数据源于 <https://www.nasa.gov/nex>, 资料时间序列自 1982 年 1 月到 2013 年 12 月, 时间分辨率 15 d, 空间分辨率 8 km, 下载的原始产品通过 Matlab 转换成 GeoTiff 格式, 然后通过 ArcGIS 软件进行栅格数据处理。首先通过 MVC(最大值合成)法^[63]获得每月 NDVI, 然后求出每年生长期 3—10 月 NDVI 的算术平均值作为当年绿洲的 NDVI 值(后面统称为“NDVI”)。研究期内绿洲 NDVI 的动态变化特征主要通过多年平均值、变差系数和线性趋势线斜率^[63]来反映。而 NDVI 阈值的确定是文中绿洲面积计算的关键。借鉴学者们利用 NDVI 计算土地植被覆盖的已有成果^[7, 64–65], 顾娟等^[65]在黑河流域 NDVI 时序分析中将 NDVI 值 0.13 作为裸地和地表有植被覆盖的临界值, 金晓媚等^[66]在研究黑河流域天然植被面积变化中将 NDVI 值大于 0.30 视为地表有天然植被覆盖, 任立清等^[7]在研究石羊河流域植被面积变化时将 NDVI 值 0.20 作为区分植被面积与否的临界值。鉴于 NDVI 对土壤背景敏感度较大^[67], 特别是绿洲与荒漠、戈壁交错带, 土壤背景变化对 NDVI 值影响较大, 结合研究区农作区的实地勘查, 本文取 NDVI 值 0.20 作为判别阈值, 当 NDVI 值大于 0.20 时为绿洲。绿洲面积的计算是通过 ArcGIS 工具将 NDVI 值大于 0.20 的栅格转换成多边形格式, 然后计算

得到多边形面积即可。文中使用的绿洲面积计算方法不同于微观尺度的高空间分辨率计算分析,但其所反映的大范围绿洲宏观动态变化特征能够从长时间序列的年尺度弥补 Landsat TM(空间分辨率 30 m)等高空间分辨率遥感资料时间分辨率低的缺憾。

2.4 研究方法

2.4.1 滑动平均方法

滑动平均用确定时间序列的平滑值来显示变化趋势,是趋势拟合技术最基础的方法^[68]。对样本量为 n 的序列 x ,其滑动平均序列表示为:

$$\bar{x}_s = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k x_{i+j-1} \quad (j = 1, 2, \dots, n - k + 1) \quad (1)$$

式中: k 为滑动长度,通常取奇数,以使平均值可以加到时间序列中项的时间坐标上。本文 k 取值为 5。经过滑动平均后,序列中短于滑动长度的周期大大削弱,可显现出变化趋势。本文通过 5 年滑动平均法分析绿洲面积变化对出山径流的响应关系变化趋势。

2.4.2 双累积曲线方法

双累积曲线方法是检验两个变量间关系一致性及其变化的常用方法,是水文气象要素一致性或长期演变趋势分析中最简单、最直观、使用最广泛的方法。其基本原理是在直角坐标系中绘制的同期内一个变量的连续累积值与另一个变量连续累积值的关系曲线,基于在相同时段给定的两个数据成正比关系,则一个变量的连续累积值与另一个变量的连续累积值在直角坐标中为一条固定斜率的直线^[69]。通常参考变量为横坐标,被检验的变量则为纵坐标。若双累积曲线的斜率发生改变,则斜率发生突变所对应的时间即为两个变量累积关系出现突变的时间。文中通过出山径流-绿洲面积双累积曲线判断研究区绿洲面积对出山径流的响应程度,其中该累积曲线斜率为单位出山径流量所维持的绿洲面积。

2.4.3 相关分析方法

利用 Pearson 相关系数测定研究期内出山径流与气候要素(山区年均气温和年降水量、整个流域的年均气温和年降水量),及不同规模斑块的绿洲面积与气候要素(山区年均气温和年降水量)、出山径流量、冰川径流量和绿洲区降水量的相关关系紧密程度,以此反映绿洲动态变化对地表径

流不同组分的响应程度,相关系数越大,表明变量间的相关性越强;反之,相关性越低。对相关系数进行了双侧显著性检验。相关系数的数学表达式参见文献[70]。

3 结果

3.1 近 30 年河西内陆河流域绿洲面积变化

图 2 显示,NDVI 大于 0.20 的区域主要分布在石羊河和黑河两个流域的出山口冲洪积扇三角洲、疏勒河中下游的三大灌区(昌马、花海和双塔)和党河下游,石羊河流域下游河道东部灌区和金川区及黑河尾间。石羊河流域绿洲 NDVI 变化程度大的区域集中分布于古浪河出山口冲洪积扇三角洲、中游武威盆地、金川区和石羊河下游绿洲-荒漠过渡带,其余区域 NDVI 变化程度不大;黑河流域绿洲 NDVI 变化程度大的区域集中分布于黑河干流中游临泽-金塔一带和下游河道两侧与尾间湿地,及北大河下游的酒泉绿洲,NDVI 变化程度低的区域主要是北大河中游的嘉峪关盆地;疏勒河流域 NDVI 变化程度大的区域集中于疏勒河中下游的三大灌区和党河下游的敦煌,NDVI 变化程度小的区域主要在党河下游敦煌西部绿洲-荒漠过渡带。石羊河流域 NDVI 除中游武威盆地和下游民勤绿洲泉山灌区呈轻微减少趋势外,其余区域 NDVI 基本呈轻微增加趋势;黑河流域 NDVI 基本呈轻微增加趋势,小范围急剧增加区域位于北大河下游酒泉和金塔,东部山丹河出山口绿洲、黑河干流河道两侧绿洲等局部呈轻微减少趋势;疏勒河流域 NDVI 轻微减少趋势主要分布于流域中下游绿洲-荒漠过渡区,其他区域 NDVI 呈轻微增加趋势。

综合来看,研究区 NDVI 变化程度高且呈轻微增加趋势,空间上分布在主要河流中下游的河道两侧和绿洲-荒漠过渡区,而相对大范围连片绿洲 NDVI 呈减少趋势的区域分布在石羊河中游武威盆地,主要是在石羊河流域综合治理措施下,近些年来向下游民勤绿洲输水持续增加,但绿洲来水量变化不大,使得中游武威盆地可用水资源相对减少,当地于 2012 年后开始压缩灌溉耕地面积,发展设施农业以提高水资源利用效率和效益^[7],2014—2015 年连续两年在该流域开展的实地调研也验证了这点。

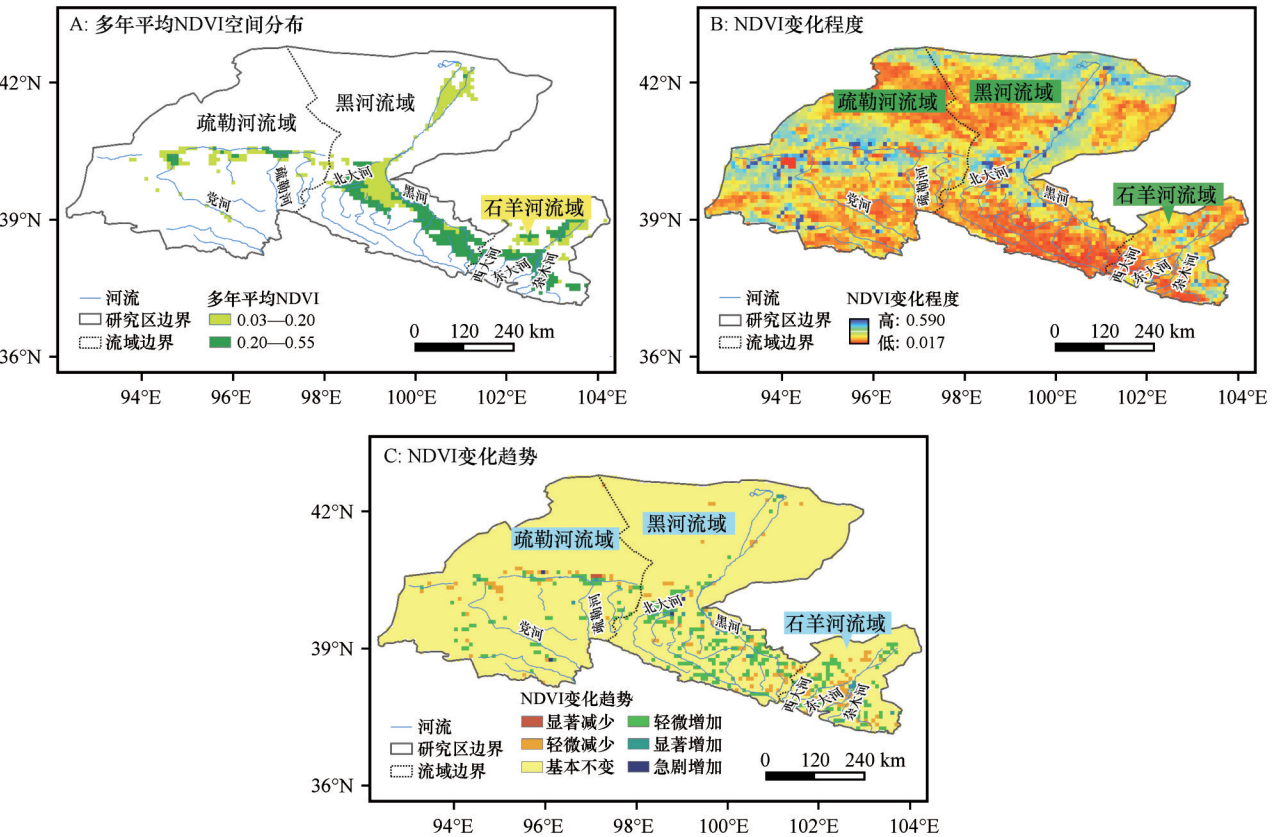


图2 1982—2013年河西内陆河流域绿洲时空动态变化

Fig.2 Temporal and spatial dynamic changes of oases in Hexi inland river basin in 1982–2013

3.2 河西内陆河流域不同规模绿洲面积变化

干旱区内陆河流域绿洲资源限制性、生态稳定性差、生境破碎化程度高,绿洲系统的发展和演替直接关系着区域经济社会的可持续发展^[64]。受水资源和以农业生产为主的经济社会双重约束是内陆河流域绿洲脆弱生态体系的共性,近30年的河西内陆河流域绿洲NDVI动态变化特征在一定程度上印证了该观点。自东向西从石羊河流域到疏勒河流域,多年平均最小斑块绿洲面积分别是68.53、73.47、67.68 km²,且变化都在1 km²以内;从最大斑块绿洲面积占流域绿洲面积比例来看,多年平均最大斑块绿洲面积占流域绿洲面积比例

自东向西分别是66.18%、59.51%、76.60%。以>1 000 km²的大规模绿洲为主,占比达3/4以上,除疏勒河流域外,<1 000 km²的小规模绿洲占比较少(表1)。

结合图3来看,石羊河流域>1 000 km²的斑块数量基本不变,1988—1996年以100—500 km²和500—1 000 km²的斑块之间的转换为主,1996年之后以100—500 km²和<100 km²的斑块之间的转换为主。黑河流域除1998—2000年以500—1 000 km²向100—500 km²的斑块的转换为主外,其余时段均以100—500 km²和<100 km²的斑块之间的转换为主。疏勒河流域主要是<100 km²和100—500 km²与>500 km²的斑块之间相互转换。

表1 不同规模斑块绿洲面积占流域绿洲面积的比例(%)

Table 1 Percentages of oasis in different scales to the total oases area in each sub-basins (%)					
绿洲斑块规模	< 100 km ²	100—500 km ²	500—1000 km ²	1000—5000 km ²	>5000 km ²
石羊河流域	2.71	8.11	4.77	18.23	66.18
黑河流域	2.87	6.69	0.87	30.06	59.51
疏勒河流域	11.60	11.80	76.60	—	—

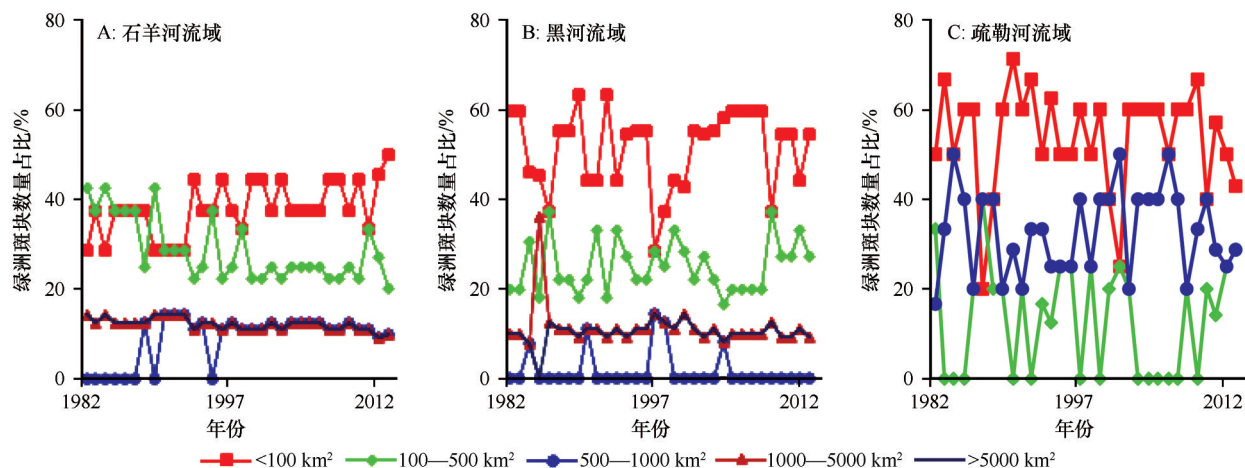


图3 河西内陆河流域不同规模绿洲斑块数量占比变化

Fig.3 Proportion changes of oasis patches in different scales in Hexi Inland river basin

3.3 河西内陆河流域绿洲面积对地表径流的响应

整个流域、最大斑块面积和 $>5\,000\text{ km}^2$ (其中疏勒河流域为 $500—1\,000\text{ km}^2$)绿洲面积与出山径流量正相关,自东向西相关系数递增(表2),最大斑块面积与出山径流量的相关系数在疏勒河流域显著正相关($r=0.37, P<0.05$)。其中,石羊河流域最小斑块面积和 $100—500\text{ km}^2$ 绿洲面积与出山径流量呈正相关,而与之临近的两个规模绿洲面积与出山径流量呈负相关,表明 $<1\,000\text{ km}^2$ 的3个规模绿洲随出山径流量变化存在着互相转换;黑河流域除 $<100\text{ km}^2$ 绿洲面积与出山径流量呈正相关外,其余均是负相关,某种程度上表明小斑块绿洲对出山径流的依赖性较强;疏勒河流域除最大斑块外的其余规模绿洲面积与出山径流量均呈负相关,说明小规模斑

块绿洲随出山径流量变化和大斑块之间存在转换。整个流域、 $<500\text{ km}^2$ 和 $1\,000—5\,000\text{ km}^2$ 绿洲面积与冰川径流量呈负相关,而最大斑块面积和 $500—1\,000\text{ km}^2$ 绿洲面积与其正相关(表2),表明冰川径流因其调峰补枯的调节功能对较大规模的绿洲稳定有一定的维护功能,但石羊河流域因冰川覆盖面积很少而表现不同^[23,27]。整个流域、最大斑块面积和 $>5\,000\text{ km}^2$ (其中疏勒河流域为 $500—1\,000\text{ km}^2$)绿洲面积与绿洲区年降水量呈正相关,黑河流域更是呈现出显著正相关,相关系数分别是 $0.47 (P<0.01)$ 和 $0.43 (P<0.05)$,疏勒河流域的相关系数则最小,这与不同流域年降水量自东向西递减密切相关,同时也表明绿洲区年降水对大斑块稳定绿洲起到了一定的水文支撑功能。总之,地表径流是不同

表2 河西内陆河流域不同规模绿洲面积与地表径流的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between oasis area of different scales and surface runoff in Hexi inland river basin

参数	流域	整个流域	最小斑块面积	最大斑块面积	$<100\text{ km}^2$ 绿洲面积	$100—500\text{ km}^2$ 绿洲面积	$500—1000\text{ km}^2$ 绿洲面积	$1000—5000\text{ km}^2$ 绿洲面积	$>5000\text{ km}^2$ 绿洲面积
出山径流量	石羊河	-0.01	0.06	0.09	-0.07	0.05	-0.11	-0.01	0.09
	黑河	0.17	-0.09	0.23	0.14	-0.21	-0.13	-0.10	0.21
	疏勒河	0.16	-0.33	0.37*	-0.02	-0.08	0.16	—	—
冰川径流量	石羊河	-0.26	0.13	-0.15	-0.22	-0.16	0.05	-0.27	-0.15
	黑河	-0.13	-0.22	0.10	-0.12	-0.34	0.22	-0.18	0.12
	疏勒河	-0.25	0.23	0.01	-0.20	-0.21	0.06	—	—
绿洲区年降水量	石羊河	0.24	-0.24	0.15	0.34	-0.05	0.11	0.13	0.15
	黑河	0.47**	0.07	0.43*	0.07	0.02	-0.33	-0.16	0.38*
	疏勒河	0.19	-0.15	0.03	-0.18	0.14	0.05	—	—

*, $P<0.05$; **, $P<0.01$ 。

规模绿洲面积变化的主要影响因素之一,这与已有结论^[4,12]基本一致。

由图4可知:①研究期内绿洲面积和出山径流量、绿洲区降水径流量大多呈增加趋势,其中绿洲面积和出山径流量二者的变化趋势大体一致。②石羊河流域绿洲变化对出山径流量的响应表现出四阶段特征:1982—1993年绿洲面积快速增加,绿洲区降水径流量也呈快速增加趋势,使得同期绿洲面积增加速率大于出山径流量;1994—2002年因退耕还林还草等生态政策的实施绿洲面积相对萎缩,同期的出山径流量和绿洲区降水径流量均呈减少趋势;2003—2006年受种植利益驱使绿洲面积减速增加,出山径流量相对前期呈增加趋势,绿洲区降水径流量则变化不大;2007年之后绿洲面积快速增加而同期的出山径流量减少,这与当地的

种植业结构调整和节水措施实施有关。③黑河流域绿洲变化对地表径流的响应表现出三阶段特征:1990年之前绿洲面积在出山径流相对丰富和绿洲区降水径流量增加影响下快速增加;1991—2005年绿洲面积波动增加,与同期出山径流量的变化基本一致(绿洲区降水径流量变化不大);2006年之后绿洲面积随出山径流量和绿洲区降水径流量的快速增加而增加。④疏勒河流域绿洲面积对出山径流量的响应表现出两阶段特征(因绿洲年降水量很小,此处对绿洲区降水径流量响应暂不考虑):1982—1998年绿洲面积与出山径流量均呈减少趋势,1998年之后,绿洲面积随着出山径流量的迅速增加而增加,波动变化趋势基本一致。这与学者们得出的水量是控制植被的最重要因素研究结果一致^[4,12,65-66]。

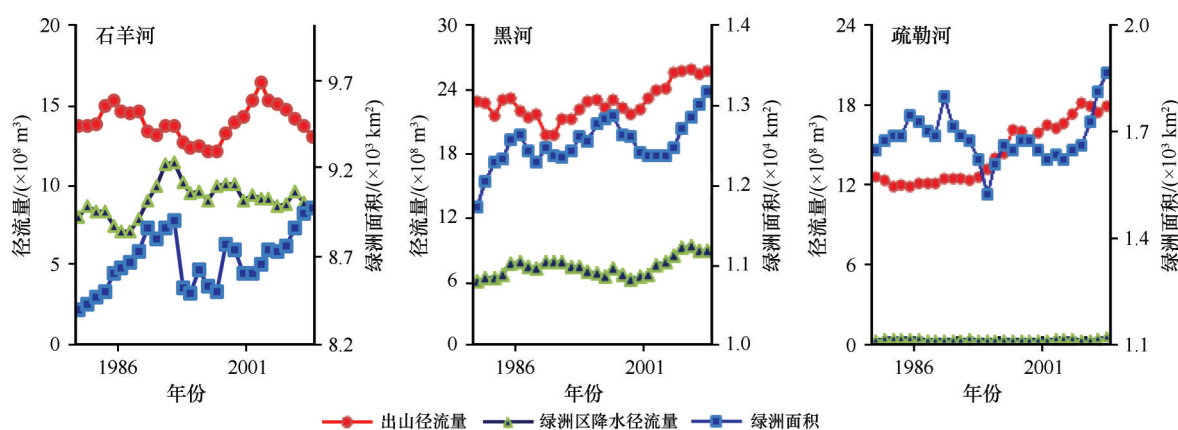


图4 河西内陆河流域绿洲面积、出山径流量和绿洲区降水径流量的5年滑动平均
Fig.4 The 5-year moving average variations of oasis area, runoff and oasis precipitation runoff in Hexi inland river basin in 1982–2013

由图5可知,双累积曲线斜率即维持单位绿洲面积所消耗的出山径流量自石羊河流域向西到疏勒河流域逐渐增加,其中石羊河流域和黑河流域维持一定绿洲面积所消耗的出山径流量小于河西内陆河流域的平均状态,疏勒河流域相对最大。从3个流域出山径流量-绿洲面积的时间序列看,二者关系突变点基本与滑动平均趋势表现一致,线性关系的斜率即维持单位绿洲所需消耗的出山径流量。

3个流域的绿洲单位耗水量自东向西依次为 16.04×10^4 、 18.47×10^4 、 $85.90 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$,考虑绿洲区降水的生态功能作用,3个流域的绿洲单位总耗水量自东向西分别为 26.39×10^4 、 24.43×10^4 、 $88.53 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ 。绿洲单位耗水量与绿洲单位总耗水量

之差即是绿洲区降水量对绿洲动态变化的贡献率。3个流域绿洲区降水量对绿洲面积变化的贡献率依次为39.20%、24.39%、2.98%。根据冰川融水补给比例计算得到地表径流中的冰川径流量对绿洲的贡献率依次为2.59%、10.47%、48.30%。若粗略地认为出山径流由山区降水径流和冰川融水径流两部分组成的话(不考虑地下水和基流等变化的影响),地表径流中山区降水部分对绿洲面积变化的贡献率则依次大约为58.21%、65.14%、48.72%。

4 讨论

AVHRR NDVI遥感资料时间序列长,空间分辨率中等,适于分析大范围年尺度的植被覆盖变化特征,弥补了其他高空间分辨率遥感资料因时间序列

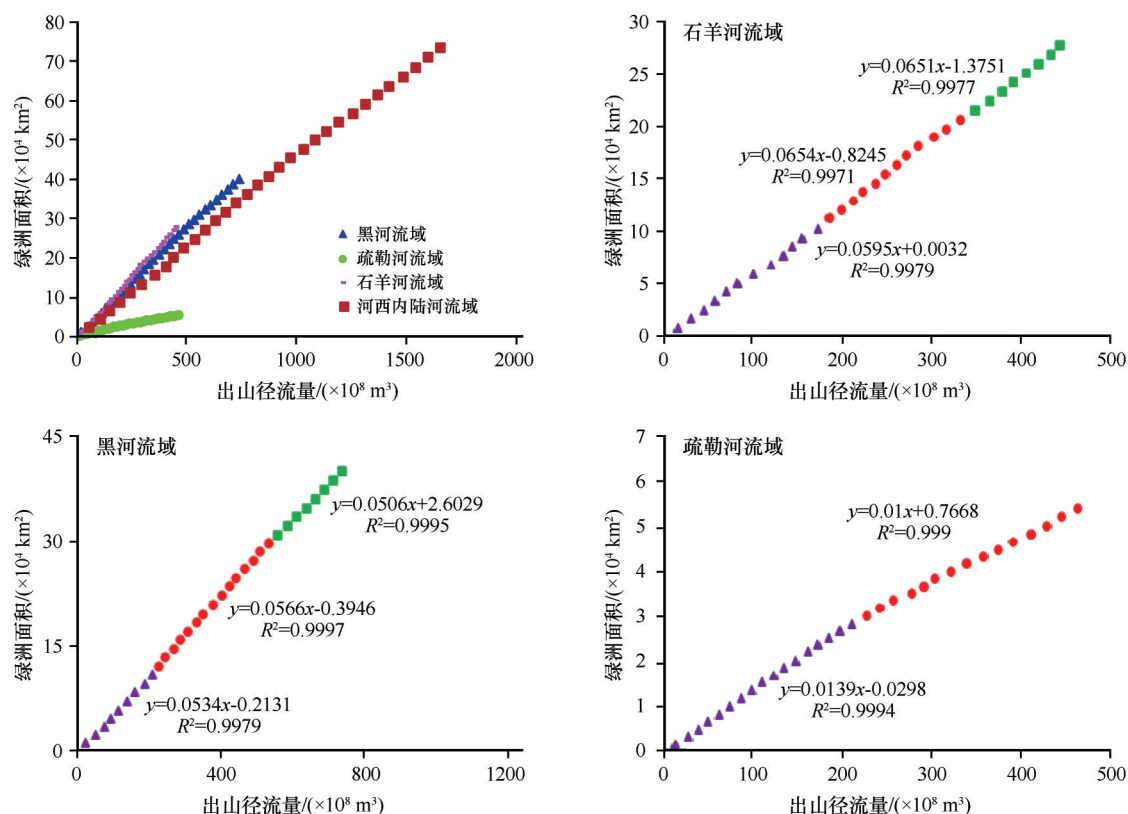


图5 河西内陆河流域出山径流量与绿洲面积双累积曲线及其线性关系

Fig.5 Double accumulation curves and their liner relations between runoff and oasis area in Hexi inland river basin

短导致信息遗漏的可能。首先,通过NDVI阈值分类判别绿洲的方法,是借鉴学者们在干旱内陆河流域绿洲已开展过的类似研究成果^[7,61,66],该方法既能满足大范围长时间序列植被覆盖状况研究的需要,又减少了传统人工目视解译和监督分类的工作量。其次,将本文得到的绿洲面积动态变化特征与学者们使用高空间分辨率得到的结果进行比对,以验证通过NDVI阈值识别绿洲计算绿洲面积方法在研究区的可行性。就石羊河流域而言,绿洲面积变化整体呈现三阶段特征,其中1997年之前呈快速扩张状态,1998—2006年绿洲萎缩,2006年之后绿洲又持续扩张,这与张建明^[44]基于TM、ETM遥感影像解译得到的石羊河流域绿洲面积变化趋势基本一致,其中1997年之前绿洲扩张主要是由于市场经济的推进,在加速地方经济发展、提高农民收益的前提下,大规模开发耕地,使靠近绿洲边缘、地下水条件相对较好地区被开发造成的,同时从某种程度上解释了同期绿洲面积与出山径流量变化速率不一致。1998—2006年绿洲萎缩主要受西部大开发以来的退耕还林政策和祁连山水源涵养林核心区的保护力度加强的影响,2006年之后绿洲扩张是出山径流

量相对增加前提下,石羊河流域综合治理的实施,当地种植结构调整和节水工程的实施,再加上农产品市场效益好转,绿洲向边缘区或有条件灌溉的地方扩张。

黑河流域绿洲以<100 km²和100—500 km²两个规模斑块之间的转换为主,这与赵晓囡^[45]利用当地县志、空间高分辨率遥感影像资料解译的绿洲空间布局变化结论一致,黑河流域绿洲主要沿东西河道两侧分布,破碎度较高,连片性相对差。从绿洲面积的年际变化趋势看,与赵晓囡^[45]基于多种数据源得出的绿洲面积变化趋势基本一致。绿洲面积变化一方面由暖湿气候转型带来的出山径流量增加引起,另一方面与2002年黑河分水政策的实施,及当地节水工程和保护生态恢复湿地有关。总之,自然和人为因素共同作用于水资源的量和时空分布,进而影响绿洲面积变化。

就疏勒河流域而言,1999年之后绿洲面积扩张速度大于之前,这与当地的移民、流域水资源管理、农业发展(压缩高耗水粮食作物,大力增加低耗水经济作物种植,畜牧方式由放牧调整为圈养等)和生态保护政策等的实施有关。1999年之前的绿洲

面积变化对当地水资源不能造成压力,影响其变化的主要是人为因素^[5]。值得注意的是:疏勒河流域因中下游大幅度沉降形成的一系列构造盆地,地表水与地下水之间存在多次转化关系^[71],可能在一定程度上影响了绿洲面积对地表径流的响应程度。

冰川径流补给比例不同,绿洲面积变化对地表径流的响应特征也不同。在全球变暖大背景下,研究期内三大内陆河流域变暖速率更是高于20世纪60年代以来的多年平均值,自疏勒河流域向东到石羊河流域变暖速率依次增大,依次是0.44、0.54、0.56 °C·(10a)⁻¹,分别高于自20世纪60年代以来的0.26、0.33、0.34 °C·(10a)⁻¹。同期,研究区内各流域的山区年降水量和整个流域年降水量均呈增加趋势,整体上暖湿的气候背景是绿洲扩张的前提。河西内陆河流域现有冰川面积976.59 km²,冰储量49.82 km³,以疏勒河流域冰川面积最大,其次是黑河干流、北大河,石羊河流域冰川面积最少,仅占研究区冰川面积的2.54%。近60年来河西内陆河各流域冰川面积呈退缩趋势,且冰川变化自西向东退缩速率呈加快态势,冰川面积共减少417.85 km²,冰储量损失20.16 km³,冰川加速消融带来的水资源通过水量和调峰补枯两方面影响绿洲变化^[24]。

本文以“绿洲单位耗水量”和“绿洲单位总耗水量”量化了绿洲面积变化对冰川径流量、绿洲区降水、山区降水的响应程度,有别于以往研究。关于绿洲区降水,文中考虑并剔除了绿洲无效降水值,但绿洲区降水对绿洲面积的贡献率因研究区蒸发量远大于绿洲区降水量仍可能被高估,下一步研究中可综合考虑水量平衡和水热平衡以增加修正值弥补该缺憾。其次,针对AVHRR NDVI 3g遥感资料空间分辨率相对不高,后续工作还可考虑同时使用MODIS NDVI和AVHRR NDVI两种遥感资料进行对比分析干旱区绿洲生态环境变化,探讨MODIS数据在研究区作为延长AVHRR NDVI资料时间序列补充数据源的可行性等。

5 结论

河西内陆河流域绿洲NDVI呈较快增加趋势,NDVI增加区域主要集中在三大内陆河主要河流的山前冲洪积扇绿洲和中下游区域,主要河道两侧的绿洲与荒漠过渡区NDVI呈相对快速的减少趋势。石羊河流域和黑河流域尾间绿洲NDVI在人工输水下呈明显好转态势。三大内陆河流域绿洲的大面

积集中连片核心绿洲区均较为稳定,其中疏勒河流域核心绿洲区持续扩张,且500 km²以下的小规模斑块绿洲相互之间转换较为频繁,这将直接影响不同流域的绿洲破碎度,其中黑河流域破碎度相对较高。

绿洲面积对地表径流不同组分的响应程度不同。其中大斑块绿洲面积对出山径流量和绿洲区降水呈正向响应,与冰川径流量呈负向响应。地表径流的组分比例构成也将影响绿洲面积。地表径流是三大内陆河流域绿洲发展的根本水源保证。从石羊河流域向西到疏勒河流域,绿洲面积变化对绿洲区降水的响应程度递减,对冰川径流的响应程度递增。

参考文献:

- [1] 赵文智,郑颖,张格非.绿洲边缘人工固沙植被自组织过程[J].中国沙漠,2018,38(1):1-6.
- [2] 陈曦,罗格平.干旱区绿洲生态研究及其进展[J].干旱区地理,2008,31(4):487-495.
- [3] 程国栋,肖洪浪,傅伯杰,等.黑河流域生态-水文过程集成研究进展[J].地球科学进展,2014,29(4):431-437.
- [4] 常学礼,李秀梅,白雪莲,等.荒漠绿洲交错区绿洲扩张与主要水文过程[J].中国沙漠,2019,39(4):204-211.
- [5] 齐敬辉.疏勒河流域绿洲生态演变研究[D].兰州:兰州大学,2017.
- [6] 周俊菊,雷莉,石培基,等.石羊河流域河川径流对气候与土地利用变化的响应[J].生态学报,2015,35(11):3788-3796.
- [7] 任立清,冉有华,任立新,等.2001-2018年石羊河流域植被变化及其对流域管理的启示[J].冰川冻土,2019,41(5):1244-1253.
- [8] 葛晓光,薛博,万力,等.黑河下游径流量与额济纳绿洲NDVI的滞后模型[J].地理科学,2009,29(6):900-904.
- [9] 何旭强,张勃,孙力炜,等.气候变化和人类活动对黑河中游径流量变化的贡献率[J].生态学杂志,2012,31(11):2884-2890.
- [10] 高鑫,张世强,叶柏生,等.河西内陆河流域冰川融水近期变化[J].水科学进展,2011,22(3):344-350.
- [11] 傅伯杰,刘国华,孟庆华.中国西部生态区划及其区域发展对策[J].干旱区地理,2000,23(4):289-297.
- [12] 王新源,刘世增,陈翔舜,等.河西走廊绿洲面积动态及其驱动因素[J].中国沙漠,2019,39(4):212-219.
- [13] 陈亚宁,李红卫,陈亚鹏,等.新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J].生态学报,2007,27(2):538-545.
- [14] 苏培玺,赵爱芬,张立新,等.荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J].西北植物学报,2003,23(1):11-17.
- [15] 赵文智,常学礼,何志斌.额济纳荒漠河岸林分布格局对水文过程响应[J].中国科学(D辑:地球科学),2003,33(增刊):21-30.
- [16] 白洁,王学贵,赵成章.河西走廊绿洲生态经济系统协调发展能力评价[J].干旱区地理,2010,33(1):130-135.

- [17] 李森, 颜长珍. 近 20 年来河西走廊人工绿洲演变及人为因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 92-98.
- [18] 高振荣, 刘晓云, 杨庆华, 等. 河西走廊荒漠-绿洲区气候环境演变特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(1): 31-38.
- [19] 李晓婧, 白艳萍, 李萌, 等. 河西走廊水资源变化与生态环境时空关联分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 1-8.
- [20] 李彦, 许皓. 梭梭对降水的响应与适应机制: 生理、个体与群落水平碳水平衡整合研究[J]. 干旱区研究, 2008, 31(3): 313-323.
- [21] 刘冰, 赵文智. 荒漠绿洲过渡带怪柳和泡泡刺光合作用及水分代谢的生态适应性[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 101-107.
- [22] 赵成义, 王玉朝. 荒漠-绿洲边缘区土壤水分时空动态研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19: 124-127.
- [23] 康世昌, 郭万钦, 吴通华, 等. “一带一路”区域冰冻圈变化及其对水资源的影响[J]. 地球科学进展, 2020, 35(1): 1-17.
- [24] 高永鹏, 姚晓军, 刘时银, 等. 1956-2017 年河西内流区冰川资源时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1313-1325.
- [25] Yao T D, Xue Y, Chen D, et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.
- [26] Ding Y J, Zhang S Q, Zhao L, et al. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost [J]. Science Bulletin, 2019, 64: 245-253.
- [27] 丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对于干旱区水安全的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 23-32.
- [28] 李龙, 姚晓军, 刘时银, 等. 近 50 年丝绸之路经济带中国境内冰川变化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1506-1520.
- [29] 邓振镛, 张强, 王润元, 等. 河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1267-1275.
- [30] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰, 等. 河西走廊三大内陆河流域出山径流变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 66-72.
- [31] 李育鸿, 李计生, 孙超, 等. 甘肃河西石羊河流域出山径流分析及来水预测[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 651-659.
- [32] 康建琪. 甘肃省石羊河流域径流多年变化特性研究[J]. 地下水, 2020, 42(1): 158-160.
- [33] 周俊菊, 师玮, 石培基, 等. 石羊河上游 1956-2009 年出山径流量特征及其对气候变化的响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 27-34.
- [34] 郭巧玲, 杨云松, 畅祥生, 等. 1957-2008 年黑河流域径流年内分配变化[J]. 地理科学进展, 2011, 30(5): 550-556.
- [35] 程建忠, 陆志翔, 邹松兵, 等. 黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 123-129.
- [36] 李常斌, 李文艳, 王雄师, 等. 黑河流域中、西部水系近 50 年来气温、降水、径流变化特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(4): 7-12.
- [37] 刘浏, 刘丽丽, 索滢. 近 53 a 黑河流域水文气象要素时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 465-478.
- [38] 蓝永超, 胡兴林, 肖生春, 等. 近 50 年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1636-1644.
- [39] 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.
- [40] 刘静, 龙爱华, 李江, 等. 近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 10-17.
- [41] 李斐, 刘苗苗, 王水献. 2001-2013 年开都河流域上游积雪时空分布特征及其对气象因子的响应[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1160-1168.
- [42] 贾珍珍, 巩杰, 张影. 近 35 a 来疏勒河中下游绿洲化-荒漠化时空变化[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1294-1302.
- [43] 刁伟杰, 赵勇, 翟家齐, 等. 1987-2017 年民勤绿洲面积时空演变规律及驱动因素解析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 106-113.
- [44] 张建国. 石羊河流域土地利用/土地覆被变化及其环境效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [45] 赵晓园. 近 60 年黑河流域绿洲时空变化特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [46] 张展赫, 来凤兵, 陈蜀江. 新疆和田河中游和-墨-洛绿洲时空变化特征研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(8): 220-222.
- [47] 刘斯文, 刘海隆, 王玲. 开都河流域土地利用/覆被变化对径流的影响[J]. 人民黄河, 2018, 40(7): 22-26.
- [48] Beck P S A, Atzberger C, Hogda K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 99: 321-334.
- [49] 马启民, 贾晓鹏, 王海兵, 等. 气候和人为因素对植被变化影响的评价方法综述[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 48-55.
- [50] 黄珊, 周立华, 冯起, 等. 内陆河流域治理政策的生态环境效果评价: 以民勤绿洲为例[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 580-586.
- [51] Xu H J, Wang X, Zhang X. Impacts of climate change and human activities on the aboveground production in alpine grasslands: a case study of the source region of the Yellow River, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10: 17.
- [52] Liu H, Zhang A, Jiang T, et al. Response of vegetation productivity to climate change and human activities in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, China [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46: 1081-1092.
- [53] 孙建国, 王涛, 颜长珍. 气候变化和人类活动在榆林市荒漠化过程中的相对作用[J]. 中国沙漠, 2012, 32: 625-630.
- [54] Liu Y, Li Y, Li S, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human factors [J]. Remote Sensing, 2015, 7: 13233-13250.
- [55] Jarlan L, Tourre Y M, Mougin E, et al. Dominant patterns of AVHRR NDVI interannual variability over the Sahel and linkages with key climate signals (1982-2003) [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(4): L04701.
- [56] Mutiibwa D, Irmak S. AVHRR-NDVI-based crop coefficients for analyzing long-term trends in evapotranspiration in relation to changing climate in the U.S. High Plains [J]. Water Resources

- Research, 2013, 49(1): 231–244.
- [57] Lokupitiya E, Lefsky M, Paustian K. Use of AVHRR NDVI time series and ground-based surveys for estimating county-level crop biomass [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(1): 141–158.
- [58] Bédard F, Crump S, Gaudreau J. A comparison between Terra MODIS and NOAA AVHRR NDVI satellite image composites for the monitoring of natural grassland conditions in Alberta, Canada [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2006, 32(1): 44–50.
- [59] Zhang S Q, Gao X, Zhang X W. Glacial runoff likely reached peak in the mountainous areas of the Shiyang River basin, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(2): 382–395.
- [60] Chen R S, Wang G, Yang Y, et al. Effects of cryospheric change on alpine hydrology: combining a model with observations in the upper reaches of the Hei River, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123: 3414–3442.
- [61] 王文玉. 半干旱地区蒸发量及有效降水的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [62] 赵传成, 姚淑霞, 刘君, 等. 基于信息熵的天山山区降水时空变化特征 [J]. *草业科学*, 2016, 33(4): 645–654.
- [63] Jie W, Bai S Y, Feng J L, et al. Variations of NDVI over elevational zones during the past two decades and climatic controls in the Qilian Mountains, northwestern China [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2011, 43(1): 127–136.
- [64] 武磊, 李常斌, 王刘明, 等. 基于ESA-LUC和MODIS-NDVI的西北干旱荒漠-绿洲体系分类阈值及应用 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 139–150.
- [65] 顾娟, 李新, 黄春林. 基于时序MODIS NDVI的黑河流域土地覆盖分类研究 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 317–326.
- [66] 金晓媚, 胡光成, 李文梅. 中国西北地区额济纳绿洲植被盖度与黑河流量的滞后效应研究 [J]. *地学前缘*, 2008, 15(4): 198–203.
- [67] 申广荣, 王人潮. 植被光谱遥感数据的研究现状及展望 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2001, 27(6): 682–690.
- [68] 李苹, 余晔, 赵素平, 等. 2015—2017年中国近地面O₃污染状况与影响因素分析 [J]. *高原气象*, 2019, 38(6): 1344–1353.
- [69] 冷曼曼, 张志强, 于洋, 等. 听水河流域径流变化及其对气候和人类活动的响应 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 113–119.
- [70] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江流域植被NDVI与气候因子的相关性分析 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1425–1435.
- [71] 杨春利. 不同气候情景下疏勒河流域水资源承载力研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.

Response of oasis area to the surface runoff in Hexi inland river basin of China

Wang Shengxia¹, Wang Fei²

(1. CAS Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin / State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730101, China)

Abstract: This paper calculated NDVI in Hexi inland river basin by using NASA AVHRR NDVI3g data, and took the region where NDVI value is larger than 0.20 in growing period as oasis, and calculated variation coefficient and linear slope of oasis NDVI to analyze characteristics of oasis dynamic change in 1982–2013 and its response to surface runoff. The results showed that oasis in the study area expanded in recent 30 years, and expansion regions were mainly concentrated in oasis fringe area, both sides and terminal of river; the fragmentation of small patch oasis increased and contiguous oasis core area was relatively stable; the contribution rate of precipitation in mountain area to oasis changes was nearly half of the surface runoff, the contribution rate of glacier melt water to oases changes increased from east to west, and the contribution rate of precipitation in oasis region decreased from east to west. The results will provide scientific understanding for analyzing the impact of glacier melt water resources on social economy in Hexi inland river basin.

Key words: Hexi inland river; oasis dynamic change; mountain runoff; oasis precipitation; response