

罗晓玲,丁思聪,杨梅,等.气候变化对石羊河流域生态环境的影响分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(4):49-56.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



气候变化对石羊河流域生态环境的影响分析

罗晓玲¹,丁思聪²,杨 梅¹,李岩瑛^{1,3},刘明春¹

(1.武威市气象局,甘肃 武威 733000;2.东北农业大学资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150006;

3.中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃 兰州 730020)

摘 要:利用石羊河流域 1959—2018 年气象、水文和卫星遥感资料,采用线性倾向率、滑动 t 检验和相关系数(Pearson)等方法,分析石羊河流域内生态环境因素的变化事实及相互关系,得到气候变化对流域生态环境的影响程度。结果表明:石羊河流域气温呈显著上升趋势,增温速度为下游 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ >中游 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ >上游 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,近 10 a 增温最显著,较 20 世纪 60 年升高了 $1.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。四季气温均呈显著上升趋势,增温速度为冬季>秋季>春季>夏季。降水呈缓慢增加趋势,增幅为上游 $8.3\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ >中游 $7.0\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ >下游 $4.1\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,近 10 a 增加最显著,较 20 世纪 60 年代增加了 17%。四季降水呈弱增加趋势,增加幅度为夏季>春季>秋季>冬季。河流流量基本持平,植被覆盖面积和归一化植被指数(NDVI)显著增大。近 20 a 流域气候暖湿化较显著,气候变化有利于增加本地水资源总量、提高地表植被覆盖率,对生态环境改善有积极作用。

关键词:石羊河流域;气候变化;生态环境;水资源;植被覆盖

中图分类号:P468

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)04-0049-08

近年来,温室气体的大量排放使得全球气候逐渐变暖。气候变暖加剧了干旱、海平面上升和极端风暴以及异常气候与极端事件的频发,近年来变暖速度明显加快,中国近百年来温度升高了 $0.5\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],这种变暖的特征在全球都明显^[2],近 100 a 来北半球中纬度干旱区增温是全球陆地增温的 2~3 倍^[3],尤以中高纬度四季都变暖、冬季增暖更明显^[4]。石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,地形复杂,气候差异大,是全球气候变化的敏感区,诸多学者对该流域 1960—2009 年气候变化进行了分析^[5-8]。随着时间序列延长,特别是近 10 a 各气候要素均发生了较明显的变化。施雅风等^[9-11]指出中国西北地区、河西走廊气候由暖干向暖湿转型,石羊河流域气候是否和全

球、中国西北地区同步,是本文研究的内容之一,时空变化特征及气候转型的具体时间节点及程度大小,是研究的重点问题。气候变化不仅影响自然系统和人类生存环境,也将影响世界经济发展和社会进步^[12-14]。马锋等^[15]认为降水量增多对榆林植被生态恢复起到了促进作用,刘引鸽等^[16]研究表明气候要素与水文要素的变化有较强相关性。姚俊强等^[17-20]提出西北干旱区近几十年来气候暖湿化趋势明显,从而导致冰川强烈消融退缩,严重影响干旱区水资源和生态环境建设。孙家仁等^[21]探讨了气候变化对空气质量的影响,但总体缺乏生态环境要素对气候变化响应的定量阐述,特别是有关气候变化对石羊河流域生态环境影响的文章较少,因此,本文在深入研究该流域气候要素和环境要素变化特征的基础上,分析生态环境要素对气候变化的响应,及气候变化对生态环境的影响程度,为流域生态环境保护与建设、水土资源合理利用与管理、农业结构调整、防灾减灾提供科学依据,具有重要的现实意义。

收稿日期:2021-08-25;修回日期:2021-11-18

基金项目:武威市市列科技计划项目(WW2101102);国家自然科学基金面上项目(41975015)

作者简介:罗晓玲(1966—),女,高级工程师,主要从事天气气候预报预测和气候变化研究。E-mail:qxjxl@yeah.net

1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,乌鞘岭以西,101°41′~104°16′E,36°29′~39°27′N,流域主要行政区分属武威、金昌两市,总面积4.16×10⁴ km²。其水系发源于祁连山,是甘肃省三大内陆河流域之一,自西向东有西大河、东大河、西营河、金塔河、杂木河、黄羊河、古浪河、大靖河8条较大河流及多条小沟小河组成,8条河流出山口均有水文站(图1)。天祝、古浪位于流域上游,凉州、永昌位于流域中游,民勤位于流域下游。流域地处黄土高原与戈壁荒漠的交汇带,为半干旱气候与干旱气候的交界区,也是高原气候和沙漠气候的共同影响区。流域内地形复杂,气候差异大,其所在区域包括了绿洲农田、荒漠、荒漠湿地、荒漠湖泊和沙漠等多种生态系统。石羊河流域地表植被覆盖度低,上游南部祁连山拥有森林、草地和浅山灌丛,植被茂密;中游石羊河水灌溉地区为绿洲,植被适中;下游大部地区为半荒漠、荒漠和沙漠,植被稀疏。海拔为1 300~5 000 m,年降水量为110~600 mm,气候特点是,随海拔的升高,从西南向东北气温逐渐升高、降水逐渐减少、沙尘暴逐渐增多。

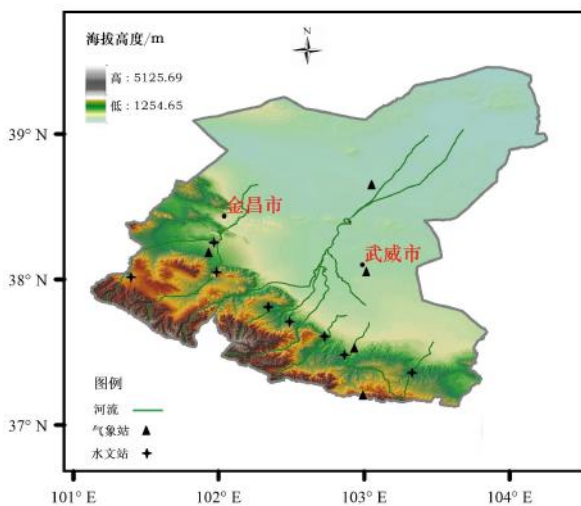


图1 石羊河流域地理位置、地形、气象站及水文站

2 资料与方法

2.1 资料来源与说明

所用气象要素数据来源于1959—2018年石羊河流域内5个气象站(凉州、民勤、永昌、古浪、乌鞘岭)观测资料,观测站位于101°~104°E,36°~39°N,海拔1 300~3 100 m。

河流流量资料由武威市水文局提供,包括8个水文站(插剑门、沙沟寺、四沟嘴、南营水库、杂木寺、

黄羊河水库、大靖峡水库、古浪)1959—2018年逐月实测数据。水文站均为出山口站,位于101°~104°E,37°~39°N,海拔1 600~3 100 m。用8条较大河流的平均流量作为石羊河流域流量进行对比分析。

卫星遥感数据取自武威荒漠生态与农业气象试验站监测数据。采用HJ-1B/CCD卫星数据产品,时间序列为2009—2018年,时间分辨率为4 d,空间分辨率为30 m×30 m,用遥感影像近红外波段反射率和红外波段反射率,通过公式计算出NDVI值。计算公式为:

$$N_{DVI} = \frac{(N_{IR} - R)}{(N_{IR} + R)} \quad (1)$$

式中, N_{DVI} 为归一化植被指数, N_{IR} 为近红外波段的反射率值, R 为红波段的反射率值。基于武威市边界裁剪出研究区 N_{DVI} 数据,因数据有可能受到云遮挡和大气的影响,对预处理的数据采用最大值合成法得到月最大值 N_{DVI} 合成影像,再利用平均值合成法折算为年 N_{DVI} 数据^[22]。植被覆盖面积为像元个数×分辨率的平方。本文用7—9月 N_{DVI} 和植被覆盖面积平均值代表当年植被生长最旺盛时期的数据进行分析。归一化植被指数 N_{DVI} 也称为生物量指标变化,可使植被从水和土中分离出来,是检测植被生长状态、植被覆盖度的最佳指示因子,被广泛运用在植被覆盖度研究中^[23-27]。 N_{DVI} 与植物的蒸腾作用、太阳光的截取、光合作用、地表净初级生产力有关。

2.2 统计与分析方法

采用石羊河流域(上游—天祝、古浪,中游—凉州、永昌,下游—民勤)5个观测站1959—2018年的气温、降水量年序列资料,利用气候倾向率方法进行气候要素变化趋势分析后,通过滑动 t 检验方法检验是否存在突变。

使用气候倾向率、概率统计方法分析流域河流年流量和植被覆盖状况的变化趋势,在此基础上,利用相关系数(Pearson)法,分析气温和降水与他们之间的关系,探讨其变化对生态环境的影响程度。

通过Excel 2007、SPSS 22.0、Vb 6.0等软件,对资料进行统计、处理和分析。

3 结果与分析

3.1 气温变化特征

3.1.1 年际变化特征

石羊河流域近60 a气温变化(图2a)显示,年平均气温呈显著上升趋势,下游增温速度最快,为0.42 °C·(10 a)⁻¹($P < 0.001$),中游为0.36 °C·(10 a)⁻¹($P < 0.001$),上游为0.32 °C·(10 a)⁻¹($P < 0.001$)。

0.001),上游最慢,为 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($P<0.001$),远远高于中国和西北干旱区的增温速度^[28-29],呈现由南向北即流域上游向下游增速逐渐加大的趋势。气温年代际变化(图 2b)显示,20 世纪 70—80 年代有所下降,70 年代降幅较大,较 60 年代流域上、中、下游分别下降了 0.15、0.28、0.14 $^{\circ}\text{C}$,20 世纪 90 年代—2018 年为持续上升阶段,进入 21 世纪以来,增温迅速,近 10 a 最为显著,较前 10 a 上、中、下游分别上升了 0.37、0.35、0.49 $^{\circ}\text{C}$ 。整体来看,全流域年平均气温近 20 a 升温明显,近 10 a 最显著,较 20 世纪 60 年代升高了 1.67 $^{\circ}\text{C}$ 。

滑动 t 检验监测显示^[30],流域气温在 1967 和 2013 年发生了显著突变($P<0.05$)。突变点,下游为 1967 年,中、上游为 2013 年。

3.1.2 季节变化

四季气温均呈显著上升趋势,增温速度为冬季>秋季>春季>夏季。冬季增温速度最大,年际倾向率为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($P<0.001$),20 世纪 60 年代后期下降,1968 年为最低值 ($-11.2\text{ }^{\circ}\text{C}$),之后迅速上升,2008、2012 年短暂下降,总趋势为波动上升,近 10 a 升温最显著。春季年际倾向率为 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($P<0.001$),20 世纪 70、80 年代略有下降,90 年代开始呈持续升温状态,近 10 a 升温最显著。夏季增温速度最小,年际倾向率为 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($P<$

0.001),20 世纪 70 年代后期—80 年代略有下降,90 年代开始持续升温,近 10 a 升温最显著。秋季年际倾向率为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($P<0.001$),20 世纪 60 年代后期出现短暂下降,迅速下降到最低值(1967 年的 3.4 $^{\circ}\text{C}$),之后波浪式上升,近 10 a 升温最显著。

3.2 降水变化特征

3.2.1 年际变化

近 60 a 降水变化(图 3a)显示,流域降水量呈缓慢增加趋势,上游增幅最大,为 $8.3\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($P<0.1$),中游为 $7.0\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($P<0.05$),下游最小,为 $4.1\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($P<0.1$),呈现由南向北即流域上游向下游增幅逐渐减小的趋势。年代际变化(图 3b)表明,20 世纪 60 年代是降水最少期,上游 70—80 年代较 60 年代降水有所增加,80 年代较明显,比 60 年代增加了 11%,20 世纪 90 年代—21 世纪前 10 a 较 20 世纪 80 年代又有下降,90 年代较 80 年代减少了 3%,近 10 a 是降水最多期,较 20 世纪 60 年代增加了 16%;中游 20 世纪 70 年代—21 世纪前 10 a 降水持续增加,21 世纪前 10 a 较 20 世纪 60 年代增加了 19%,近 10 a 较前 10 a 略有减少,减少了 3%;下游降水是 20 世纪 70 年代为最多期,80 年代—21 世纪前 10 a 持续增加,21 世纪前 10 a 比 20 世纪 60 年代增加了 24%,近 10 a 较前 10 a 略有减少,减少了 1%。整体来看,全流域降水近 20 a 增加

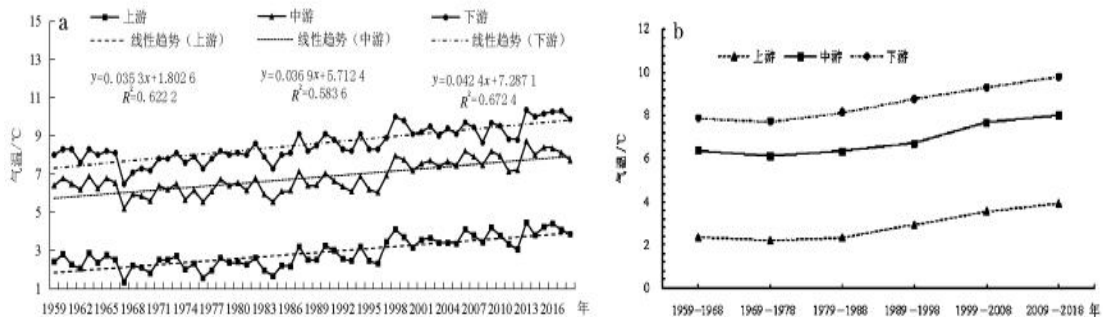


图 2 石羊河流域近 60 a 平均气温变化趋势

(a 为年序列, b 为年代际)

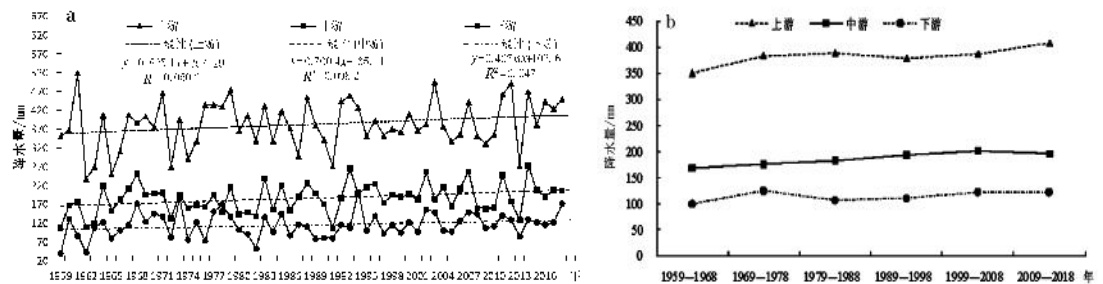


图 3 石羊河流域近 60 a 降水量变化趋势

(a 为年序列, b 为年代际)

明显,近10 a最显著,较20世纪60年代增加了17%。

经滑动 t 检验可知,流域降水缓慢上升,在1962和1991年发生了显著突变($P<0.05$)。上游从1959年开始急剧上升到最高点(1961年),之后迅速下降到最低点(1962年),期间发生了突变,突变点为1961和1962年,1963年开始呈波动式上升;中游从1959年开始波动式下降到最低点(1991年),从1992年开始波动式上升到最高点(2014年),期间发生了突变,突变点为1991和2014年;下游从最低点(1959年)开始上升1 a后,剧烈下降到次低点(1962年),之后逐渐上升到次高点(1973年),然后呈波动式上升到最高点(1994年),期间发生了突变,突变点为1959、1962、1973、1994年。

3.2.2 季节变化

四季降水均呈弱增加趋势,增幅为夏季>春季>秋季>冬季。冬季的降水量年际倾向率为 $0.43 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($P>0.05$),波动较大,最大值(2006年的18.3 mm)和最小值(1971年的1.2 mm)相差17.1 mm,20世纪70年代是降水最少期。总趋势是近10 a增加最明显,较70年代增加了55%。春季降水量年际倾向率为 $1.6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($P>0.05$),20世纪70年代是降水最少期,20世纪90年代是降水最多期,进入21世纪变化不明显,基本和20世纪90年代持平。夏季降水量年际倾向率为 $4.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($P>0.05$),20世纪60年代是降水最少期,20世纪70年代和21世纪前10 a是次少期,20世纪80年代是最多期,近10 a是次多期。秋季降水量年际倾向率为 $0.63 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($P>0.05$),20世纪80年代是降水最少期,70年代和21世纪前10 a是最多期。

综合气温和降水变化特征,流域气候暖湿化趋势近20 a较显著,近10 a气温升高和降水增加均为60 a来最大。

3.3 气温、降水变化对生态环境的影响

3.3.1 对水资源的影响

石羊河流域地表水资源主要产于祁连山区,其径流补给主要来源为天然大气降水和高山冰雪融水。有研究表明^[31]内陆河流流量的丰枯主要受祁连山区汛期降水的影响,汛期流量的稳定性主要是源于祁连山区降水稳定,非汛期降水形成的冰雪消融也起到了一定的调节作用。流域内有8条较大河流和60多条小沟小河,均发源于祁连山冷龙岭、乌鞘岭、毛毛山北麓。

绘制石羊河年平均流量时间变化曲线发现(图

4),近60 a该区流量变化不大,基本在平均值上下波动,2003年最大,为 $7.76 \text{ m}^3/\text{s}$;1991年最小,为 $3.94 \text{ m}^3/\text{s}$ 。年代际表现为1969—1978年和1989—1998年是流量最小期,2009—2018年是次小期,1959—1968年是最大期,1979—1988年和1999—2008年是次大期。年河流流量的大小与年降水量的大小有较好的对应关系,降水量较大年份相应的河流流量也较大,反之亦然。如2003年降水量(328 mm)最大,流量($7.76 \text{ m}^3/\text{s}$)也最大;1991年流量($3.94 \text{ m}^3/\text{s}$)最小年份对应降水量(180.6 mm)为次小,表明降水是本地河流主要补给来源,流域天然降水量的变化对河流流量贡献较大。

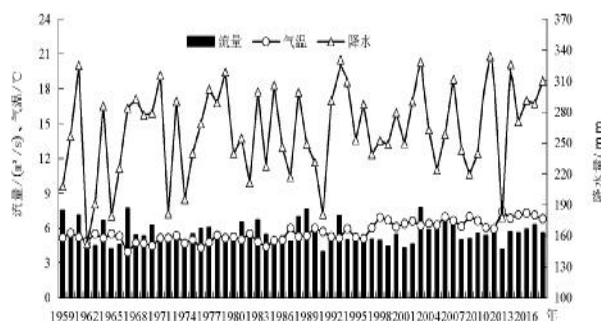


图4 石羊河流域近60 a河流流量、气温、降水量变化趋势

利用相关系数法分析流量与气温、降水的关系(表1)可知,年平均流量与年平均气温、四季气温呈弱负相关,表示气温升高,蒸发加剧,水分散失量加大,流量减少。年平均流量与年降水量、春季、夏季、冬季降水量呈显著正相关,与降水($P<0.01$)的相关性高于气温。降水量的变化是影响河流流量的主要因素之一,本地天然降水量的大小直接影响着河流流量的丰枯,关乎水资源的合理利用与管理。

表1 石羊河流域河流流量与各影响因子相关系数

	年平均	春季	夏季	秋季	冬季	年	春季	夏季	秋季	冬季
	气温	气温	气温	气温	气温	降水	降水	降水	降水	降水
年流量	-0.16	-0.14	-0.17	-0.05	-0.14	0.49**	0.36**	0.37**	0.02	0.44*

注:**、* 分别表示通过0.01、0.05的显著性检验。

综合以上可以得出,60 a来石羊河流域气温显著升高、降水量缓慢增加,河流流量基本维持不变,气候变化对流域河流流量的贡献远远大于人类活动对流量的影响,气候因子的综合作用是石羊河流域流量变化的根本原因。天然降水的增加有利于增加本地水资源总量,改善生态环境。

3.3.2 对地表植被的影响

地球表面植被覆盖的变化能够影响地表水分、能量和辐射的分配及平衡,同时影响水文过程、水循环和区域气候的改变,植被退化能引起水土流失、冻土退化和土地沙漠化等严重后果^[32-34]。石羊河流域主要有山地、绿洲和荒漠,其对气候变化响应尤其敏感,在流域整体暖湿化和区域性年代际变化的影响下,该区域植被演变特别关键。

据 HJ-1B/CCD 卫星植被遥感监测资料显示,石羊河流域多年植被覆盖面积为 4 589.4 km²,植被指数(NDVI)为 0.47。近 10 a 流域平均气温每年升高 0.168 ℃,平均降水量每年增加 5.554 mm,暖湿化程度更为明显,该区植被覆盖面积(图 5a)和归一化植被指数(NDVI)(图 5b)也呈显著增大趋势,植被覆盖面积和 NDVI 分别以每年 188.6 km² ($P<0.01$)和 0.008 4($P<0.05$)的速度增加,变化趋势几乎与降水的变化一致。2009—2012 年植被覆盖度迅速增大,2012 年为近 10 a 次大,之后波动增加,2018 年达到最大。降水量与植被覆盖度的对应关系好于与气温的对应关系,如 2014 年降水量为近 10 a 最大,植被覆盖面积和 NDVI 均为近 10 a 次大。

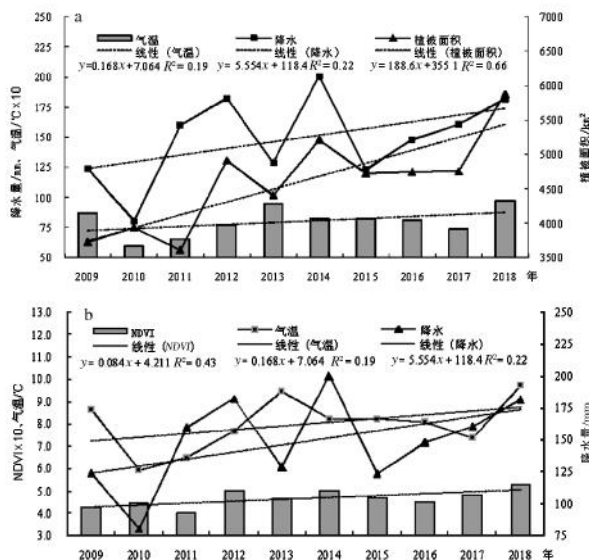


图5 石羊河流域近 10 a 植被和温湿变化趋势

利用相关系数法分别分析植被覆盖面积和植被指数(NDVI)与气温、降水的关系(表 2)发现,植被覆盖面积、NDVI 与植被生长季降水的相关性高于气温。均与春季气温呈正相关,表示春季气温升高,有利于植被生长发育;与夏季降水量($P<0.05$)、年降水量呈显著正相关,夏季正是植被需水高峰期和关键期,降水量多,植被长势就好,植被覆盖度随之增大。

表 2 石羊河流域植被与各影响因子相关系数

	年平均	春季	夏季	秋季	冬季	年	春季	夏季	秋季	冬季
	气温	气温	气温	气温	气温	降水	降水	降水	降水	降水
植被面积	0.15	0.56	-0.06	-0.1	-0.13	0.43	0.09	0.63*	-0.32	0.23
植被指数	0.08	0.52	-0.16	-0.22	-0.06	0.3	-0.03	0.57	-0.38	-0.01

注:**、* 分别表示通过 0.01、0.05 的显著性检验。

干旱区内陆河流域的自然植被变化主要与可用水资源量(降水、径流和地下水)的变化和人类开发强度密切相关,通过以上分析可知,流域内天然降水量的变化是影响自然植被变化的主要因素之一,同时通过上游保护涵养水源、中游修复生态环境、下游抢救民勤绿洲的具体举措,对石羊河流域进行综合治理后,自然植被逐渐恢复,生态环境得到有效改善。

气候暖湿化有利于增加本地水资源总量,提高地表植被覆盖率,抑制沙尘暴的发生,改善生态环境和大气环境质量。

4 讨论

在气候变暖背景下,石羊河流域气象要素时空分布发生了显著变化,特别近 10 a 尤为明显,气温呈显著升高趋势,降水呈缓慢增加趋势,与赵福年等^[6]的研究结论基本一致,倾向率不同是与资料长短有关。流域河流流量基本持平,与邓振镛等^[35]的“年径流总体呈明显下降趋势”不同,究其原因因为缺少近 10 a 资料所致;流量与年平均气温、四季气温呈弱负相关,与春季、夏季、冬季降水量和年降水量呈显著正相关,与降水的相关性高于气温,降水量的变化是影响河流流量的主要因素,这一结论与李玲萍等^[36]的“流量与降水量呈显著的正相关”研究一致。近 10 a 石羊河流域植被覆盖面积和植被指数呈显著增大,这一结论与李丽丽等^[37-39]的研究基本一致。植被覆盖面积和 NDVI 与春季气温、夏季降水量、年降水量呈正相关,与降水的相关性高于气温,流域气候暖湿化,植被覆盖率整体提高,这一结果与叶培龙等^[32]的研究“植被覆盖对降水量变化的响应大于气温变化”相一致。选取石羊河流域 5 个气象站的常规观测资料讨论气候变化对石羊河流域生态的影响,虽然在一定程度上能够较为清晰地反映生态环境对气候变化的响应,但石羊河流域处于不同气候区的交汇过渡带,天气特征和气候变化规律复杂,由于研究区内气象区域站资料时间较短、部分资料不完整,仅用该地区 5 个气象站资料分析存在

站点稀少、分布不均、网格较粗的弊端。另外卫星遥感资料年代较短,对研究结论有一定局限性。因此在之后的研究中需要增加更多的气象区域站观测资料 and 不同区域的精细化遥感数据,结合石羊河流域地形地貌、地理位置以及人类活动信息,进一步详细分析石羊河流域气象要素对生态环境的影响程度。

5 结论

(1)近 60 a 石羊河流域气温呈显著升高趋势,升温速度为下游>中游>上游,近 10 a 增温最显著,全流域年平均气温较 20 世纪 60 年代升高了 1.67℃。中上游在 2013 年、下游在 1967 年发生了显著突变。四季气温均呈显著上升趋势,增温速度为冬季>秋季>春季>夏季。

(2)近 60 a 石羊河流域降水呈缓慢增加趋势,增幅为上游>中游>下游。近 10 a 增加最显著,全流域年平均降水量较 20 世纪 60 年代增加了 17%。在 1962 和 1991 年流域降水发生了显著突变。四季降水呈弱增加趋势,增加幅度为夏季>春季>秋季>冬季。

(3)近 60 a 石羊河流域河流流量基本维持不变,年平均流量与年平均气温、四季气温呈弱负相关,与春季、夏季、冬季降水量和年降水量呈显著正相关。降水量变化是影响河流流量的主要因素。

(4)近 10 a 石羊河流域植被覆盖面积和植被指数呈显著增大趋势,植被覆盖面积和 *NDVI* 分别以平均每年 188.6 km² 和 0.008 4 的速度增加。植被覆盖面积和 *NDVI* 均与春季气温、夏季降水、年降水呈正相关。气候暖湿化是流域植被好转的主要影响因素之一。

(5)石羊河流域气候暖湿化趋势近 20 a 比较明显,随着暖湿化进程的加快,近 10 a 流域气候变化最为显著,气温为 60 a 来最高、降水最多、沙尘暴最少。这些变化有利于增加本地水资源总量,提高流域植被覆盖率,对生态环境和大气环境质量改善有积极作用。

参考文献:

[1] 沈永平,王国亚.IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1070.

[2] 叶金印,黄勇,张春莉,等.近 50 年淮河流域气候变化时空特征分析[J].生态环境学报,2016,25(1):84-91.

[3] ZUO JINQING, WANG JICMIN, HUANG JIANPING, et al.Estimation of ground heat flux and its impact on

the surface energy budget for a semi-arid grassland[J]. Sciences in Cold and Arid Regions,2011,3(1):41-50.

[4] 赵宗慈,罗勇,黄建斌.回顾 IPCC 30 年(1988—2018 年)[J].气候变化研究进展,2018,14(5):540-546.

[5] 周俊菊,石培基,师玮.1960—2009 年石羊河流域气候变化及极端干湿事件演变特征[J].自然资源学报,2012,27(1):143-152.

[6] 赵福年,王莺,张龙.1960—2009 年石羊河流域气候变化特征[J].气象与环境学报,2014,30(5):131-140.

[7] 王素萍,宋连春,韩永翔,等.近 50 年河西走廊地区降水均值突变特征分析 [J]. 高原气象,2011,30(5):1286-1293.

[8] 姚玉璧,李耀辉,李俭峰,等.近 50 年石羊河流域陆地表层干湿状况变化特征及其影响因素 [J]. 生态环境学报,2013,22(1):31-39.

[9] 施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003(2):152-164.

[10] 任国玉,袁玉江,柳艳菊,等.我国西北干燥区降水变化规律[J].干旱区研究,2016,33(1):1-19.

[11] 张亚宁,张明军,王圣杰,等.气候变化对河西走廊主要农作物的影响 [J]. 生态环境学报,2017,26(8):1325-1335.

[12] 丁一汇,王会军.近百年中国气候变化科学问题的新认识[J].科学通报,2016,61(10):1029-1041.

[13] 曹娟,邵怀勇,李波,等.气候和人为因素对草地变化的响应研究:以川西北若尔盖县为例[J].环境科学与技术,2017,40(2):13-18.

[14] 李倩,林毅,侯依玲,等.气候变化对辽宁严寒地区南界及采暖节能的影响 [J]. 环境科学与技术,2016,39(8):199-205.

[15] 马锋,卢静,何慧娟,等.陕西省榆林市植被生态演变及其驱动机制[J].水土保持通报,2020,40(5):257-261.

[16] 刘引鸽,郑润禾,龙颜,等.渭河中游气候变化及其对水文要素的影响[J].水土保持研究,2021,28(2):108-117.

[17] 姚俊强,杨青,陈亚宁,等.西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J].生态学杂志,2013,32(5):1283-1291.

[18] 刘赛艳,王义民,刘登峰,等.青藏高原大通河流域气候干湿状况时空分布研究 [J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):108-114.

[19] 王文涛,田斌,李静.新疆东部地区气候变化及对生态环境的影响[J].水土保持研究,2014,21(5):250-254.

[20] 刘明哲,魏文寿.南疆近 60 年来的气候变化及其对沙尘暴发生条件的影响[J].干旱区地理,2005(4):63-67.

[21] 孙家仁,许振成,刘煜,等.气候变化对环境空气质量影响的研究进展[J].气候与环境研究,2011,16(6):805-814.

[22] 任荣仪,贺中华,梁虹,等.贵州省 *NDVI* 时空变化及其

- 对温度和降水变化的响应 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 118-129.
- [23] 易雪, 杨森, 刘鸣彦, 等. 辽宁省植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应 [J]. 干旱气象, 2021, 39(2): 252-261.
- [24] WANG BIN, XU GUOCE, LI PENG, et al. Vegetation dynamics and their relationships with climatic factors in the Qinling Mountains of China [J]. Ecological Indicators, 2020(108): 105719.
- [25] 史尚渝, 王飞, 金凯, 等. 黄土高原地区植被指数对干旱变化的响应[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 1-13.
- [26] 叶骏菲, 陈燕丽, 莫伟华, 等. 典型喀斯特区植被变化及其与气象因子的关系——以广西百色市为例[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(5): 106-113.
- [27] 敖泽建, 王建兵, 蒋友严, 等. 2000—2017 年甘南牧区植被变化特征及其影响因子[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 95-100.
- [28] REN G Y, XU M Z, CHU Z Y, et al. Changes of surface air temperature in China during 1951–2004 [J]. Clim Environ Res, 2005, 10(4): 717-727.
- [29] LI B, CHEM Y, SHI X. Why does the temperature rise faster in the arid region of northwest China [J]. J Geophys Res, 2012(117): D16115.
- [30] 罗晓玲, 李岩瑛, 杨梅, 等. 河西走廊东部近 60 年气候时空变化特征[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(1): 32-36.
- [31] 冯建英, 李栋梁. 甘肃省河西内陆河流量长期变化特征[J]. 气候与环境研究, 2001(4): 478-484.
- [32] 叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980—2018 年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 967-979.
- [33] 邴龙飞, 邵全琴, 刘纪远. 近 30 年黄河源头土地覆被变化特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(3): 289-296.
- [34] 张懿锂, 刘林山, 摆万奇, 等. 黄河源地区草地退化空间特征[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 3-14.
- [35] 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.
- [36] 李玲萍, 刘明春. 石羊河流域出山口河流流量的变化趋势及特性分析[J]. 水土保持学报, 2011, 27(1): 58-63.
- [37] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应 [J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108-1118.
- [38] 何航, 张勃, 侯启, 等. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 70-80.
- [39] 罗晓玲, 杨梅, 李岩瑛, 等. 基于 NDVI 的石羊河流域植被演变特征及其对沙尘暴的影响分析 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 84-91.

Impact of Climate Change on the Ecological Environment of the Shiyang River Basin

LUO Xiaoling¹, DING Sicong², YANG Mei¹, LI Yanying^{1,3}, LIU Mingchun¹

(1.Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei 733000, China;

2.School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150006, China;

3.Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

Abstract Using meteorology, hydrology and satellite remote sensing data from the Shiyang River Basin during 1959–2018, by means of linear trend rate, moving t test and Pearson correlation coefficient methods, the changing facts and correlations of ecological environment factors were analyzed. The results showed that the temperature had a significant upward trend, with a warming rate of $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ in downstream, $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ in midstream, and $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ in upstream, respectively. The most significant warming occurred in the last 10 years, in which it was $1.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ higher than the 1960s. The seasonal temperature showed a significant upward trend, and the warming rate was the fastest in winter, followed by autumn, spring and summer. The precipitation increased slowly, which was $8.3\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ in upstream, $7.0\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ in midstream and $4.1\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ in downstream, respectively. Precipitation in the last 10 years was 17% more than that in the 1960s. The increasing rate of seasonal precipitation was the fastest in summer, followed by spring, autumn and winter. The river flow was basically stable and the vegetation coverage and the normalized difference vegetation index (NDVI) increased significantly. The significant warming and humidification in the basin in the past 20 years was conducive to enhancing the total amount of local water resources, increasing the coverage of surface vegetation, and improving the ecological environment.

Key words Shiyang River Basin; climate change; ecological environment; vegetation coverage; water resources