

文章编号:0559-9350(2020)09-01048-11

黄河流域近40年气候变化的时空特征

黄建平^{1,2}, 张国龙¹, 于海鹏³, 王闪闪², 管晓丹^{1,2}, 任钰²

(1. 西部生态安全省部共建协同创新中心, 兰州大学, 甘肃 兰州 730000;

2. 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州大学, 大气科学学院, 甘肃 兰州 730000;

3. 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 黄河流域是我国主要的气候敏感区之一, 气候变化对其生态环境演变与经济社会发展有显著影响。本文利用欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料分析了黄河流域过去40年的温度、降水、水汽通量散度、蒸散和荒漠化风险等的演变特征, 结果发现: 1979—2019年黄河流域四季均呈现明显增温趋势, 其中春季增温最为明显; 季节性降水的变化差异显著, 春季和夏季降水呈现下降趋势, 秋季降水增加; 黄河流域空中水汽以辐合为主, 过去40年黄河流域上游水汽辐合年际波动最小, 中游次之, 下游最大; 黄河流域蒸散整体呈现减少趋势, 其中增加趋势集中在上游地区; 黄河流域荒漠化风险整体处于中等风险以上, 呈现由南向北加剧的空间分布, 1982—2014年黄河流域荒漠化风险呈现下降趋势。本研究厘清了全球气候变化背景下黄河流域蒸散、水汽输送和降水等水循环过程的变化规律, 能够为维护黄河流域地区生态安全、防范重大气象灾害风险提供科学依据。

关键词: 黄河流域; 温度; 降水; 水汽通量散度; 蒸散; 荒漠化风险; 变化趋势

中图分类号: P467

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200603

1 研究背景

黄河流域是我国生态安全战略格局的重要组成, 横跨我国东中西三大区域, 覆盖9省区, 其上、中、下游的地形地貌、植被类型、气候等的自然分异性, 形成生态系统的区域差异。黄河流域横跨多个气候区, 大部分属于干旱、半干旱地区, 总体上表现为西部干旱, 东部湿润, 是中国主要的气候敏感区之一。受流域内不同气候、地形、人为活动等影响, 流域内水资源的分布很不均匀。随着各个城市社会经济的快速发展壮大, 对黄河水资源的开发力度日益提高, 黄河的水资源状况不断恶化, 湿地、湖泊和沼泽地面积日益趋于萎缩, 生态环境恶化趋势加剧^[1-2]。特别是近20年来, 黄河水资源总量明显减小, 洪涝灾害更加频繁, 干旱灾害更加严重, 极端气候事件明显增多^[3]。

黄河中上游地区被半干旱与半湿润地区的400 mm年降水量线所贯穿, 对气候变化的响应十分敏感。黄河流域中50%以上的水量来自黄河上游, 中游是我国重要的能源基地, 同时是我国主要的缺水地区。在全球变暖的背景下, 气候变化不仅会引起水资源在时空上的重新分配, 而且加剧了洪涝、干旱等灾害的发生频率, 进而影响到区域生态环境、乃至人类的生存环境。同时随着我国经济开发发展向中西部的战略转移, 黄河中上游水资源势必成为影响社会经济发展的制约因素。加之由于产业布局不合理和企业生产事故等原因, 近年来黄河中上游重大突发性水污染事件频发^[4], 这给沿岸人民的生命和财产安全造成了重大威胁, 进一步严重影响了我国北方地区经济的可持续发展。黄

收稿日期: 2020-08-05; 网络首发时间: 2020-09-08

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200907.0947.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41991231); 甘肃省引导科技创新发展专项资金项目(2019ZX-06); 兰州大学中央高校基本科研业务费项目(lzujbky-2020-kb31)

作者简介: 黄建平(1962-), 博士, 教授, 主要从事半干旱气候变化研究。E-mail: hjp@lzu.edu.cn

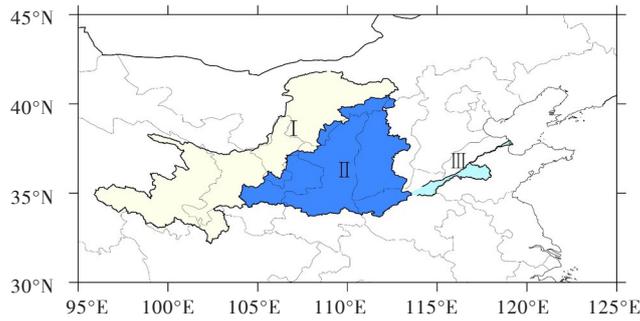


图1 黄河流域上游(I), 中游(II)和下游(III)划分范围

河流域气候发生变化, 将会对中下游的径流量产生影响, 例如从1990年代起黄河源区和上游的径流量大幅减少, 严重影响着黄河中、下游的径流量, 致使1990年代黄河下游发生断流, 从而严重影响华北地区的水资源^[5]。

综上, 黄河作为我国主要的径流之一, 在北方干旱半干旱地区的生活生产发挥了重要的作用, 明晰近40年黄河流域气候变化和水循环要素的变化特征对于维护黄河流域地区生态安全、防范重大气象灾害风险具有重要的意义。

2 研究数据和方法

2.1 研究区域概况 黄河流域地处30°N—45°N, 95°E—120°E之间, 包含我国9省370多个县, 流域内地势高低起伏显著, 气候包含干旱、半干旱、半湿润等类型, 流域总面积约为79.5万km²。流域东西跨度距离长, 全长约为5464 km, 自西至东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原4个地貌单元。为了研究黄河流域气候变化的区域特征, 本文将黄河流域具体划分为上中下游3个区域, 具体划分范围见图1。

2.2 数据来源 ERA5再分析资料是由欧盟资助、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)运营的哥白尼气候变化服务(Copernicus Climate Change Service, C3S)在ERA-Interim再分析资料的基础上升级之后的最新一代再分析资料, 其被广泛应用于天气和气候变化的研究, 在中国有关温度、降水、水汽以及云特性等的可靠性通过卫星资料、站点观测等方式得到验证^[6-11]。本文使用的是1979—2019年ERA5再分析资料月平均温度、降水、蒸散以及整层水汽通量散度(vertically integrated moisture divergence, VIMD)。整层水汽通量是散度指大气水资源的辐合辐散状况:

$$VIMD = \Delta \frac{1}{g} \int_{P_i}^{P_s} qVdp \quad (1)$$

式中: q 为比湿; P 为气压; P_s 为地表气压; P_i 为大气层顶气压; g 为重力加速度。

水汽通量散度的意义是单位时间内单位体积中水汽的净流失量, 因此, 整层VIMD为正值, 表示有水汽流失; 整层VIMD为负值, 表示有水汽积聚。故当VIMD突然出现很大负值(大量水汽辐合)时, 说明该地区将出现强降水甚至洪涝灾害。

2.3 方法介绍 本文利用分段线性趋势和线性趋势分析黄河流域各物理要素的时间变化趋势, 利用Huang等提出荒漠化脆弱性指数分析黄河流域上中下游地区荒漠化的风险分布^[12]。增温趋势是表征气候变化的重要参量之一, 植被生长受气候变化的影响, 反过来植被生态系统通过呼吸作用和蒸腾作用等影响地球系统的能量平衡和物质循环, 所以该评估框架利用归一化之后的温度异常、叶面积指数和干燥度指数构建了气候环境指数, 用于反映气候变化和生态环境状况。一般而言, 二氧化碳和国内生产总值能够反映当地经济发展状况和经济结构, 且人口数量能够反映人类社会对自然环境的直接压力, 故该评估框架利用归一化的二氧化碳排放、国内生产总值、人口密度和增长速度构建人

类活动强度指数，用于表征人类活动对生态环境的影响强度。最终将气候环境指数和人类活动强度指数相乘，构建了首个综合考虑气候变化和人类活动的荒漠化脆弱性指数。荒漠化脆弱性指数值越大，表示该区域发生荒漠化的风险越高，反之亦然。根据指数的概率密度函数将荒漠化风险划分为低、中、高和非常高4个等级，该指数在荒漠化风险评估方面取得较好的结果，具体细节详见Huang等^[12]。

3 结果分析

3.1 黄河流域温度和降水变化 图2为黄河流域1979—2019年温度年代际变化趋势，黄河流域气温整体呈现上升趋势，这与马守存等的研究结果相一致^[13]。以10年为时间段，分段计算温度年代际变化特征，发现1990年代和21世纪初增温最为明显(图2(c)和图2(e))，这与前人指出1980年代以后整个流域的气温呈上升趋势，1990年代升温明显加快，2000年以来的平均气温比1950年代普遍升高1℃以上的结果相一致^[14-15]。从季节变化来看，黄河流域四个季节的温度变化均呈现上升趋势(图3)，但是不同季节增温趋势存在显著差异，其中春季的增温趋势最为明显，很多区域均超过0.05 K/a。夏季和秋季上游地区增温最为显著(图3)，下游增温相对较小。冬季增温趋势小于春季增温，马雪宁等指出黄河流域冬季气温倾向率最大^[16]，这与本研究存在差异，可能是由于研究时段不同导致。

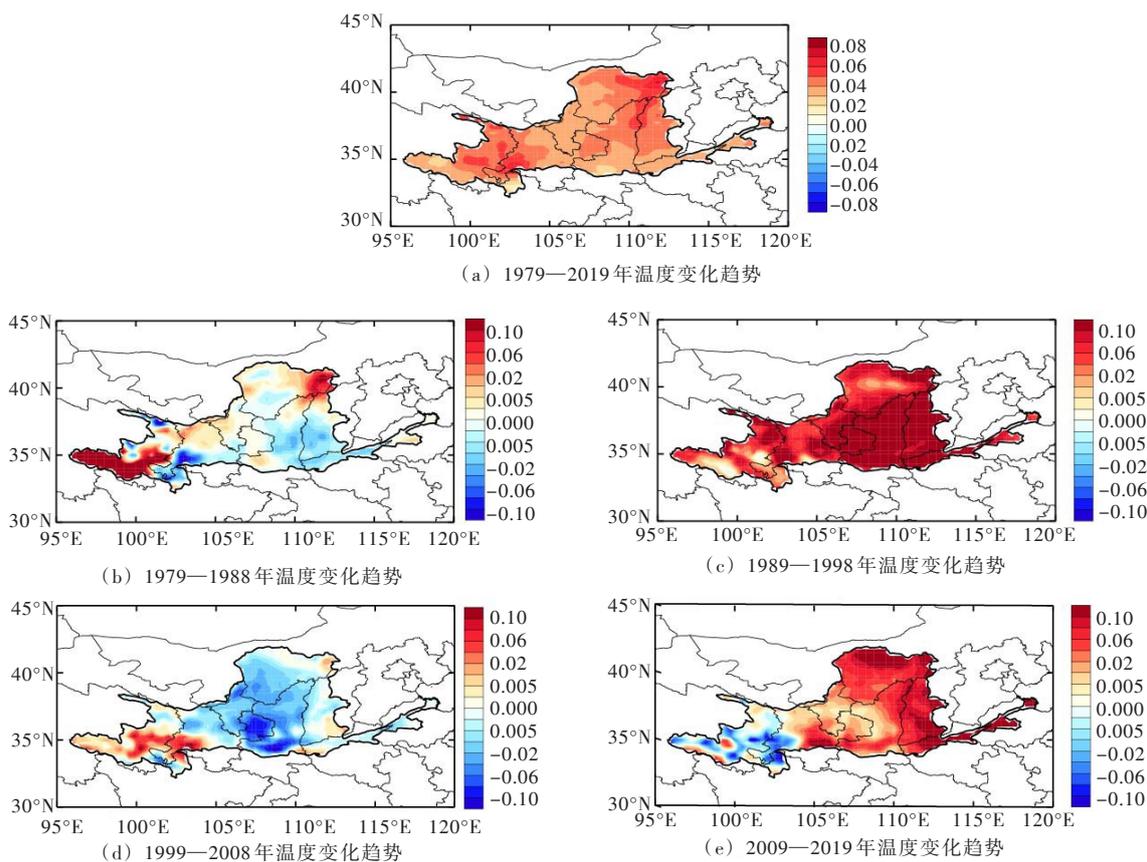
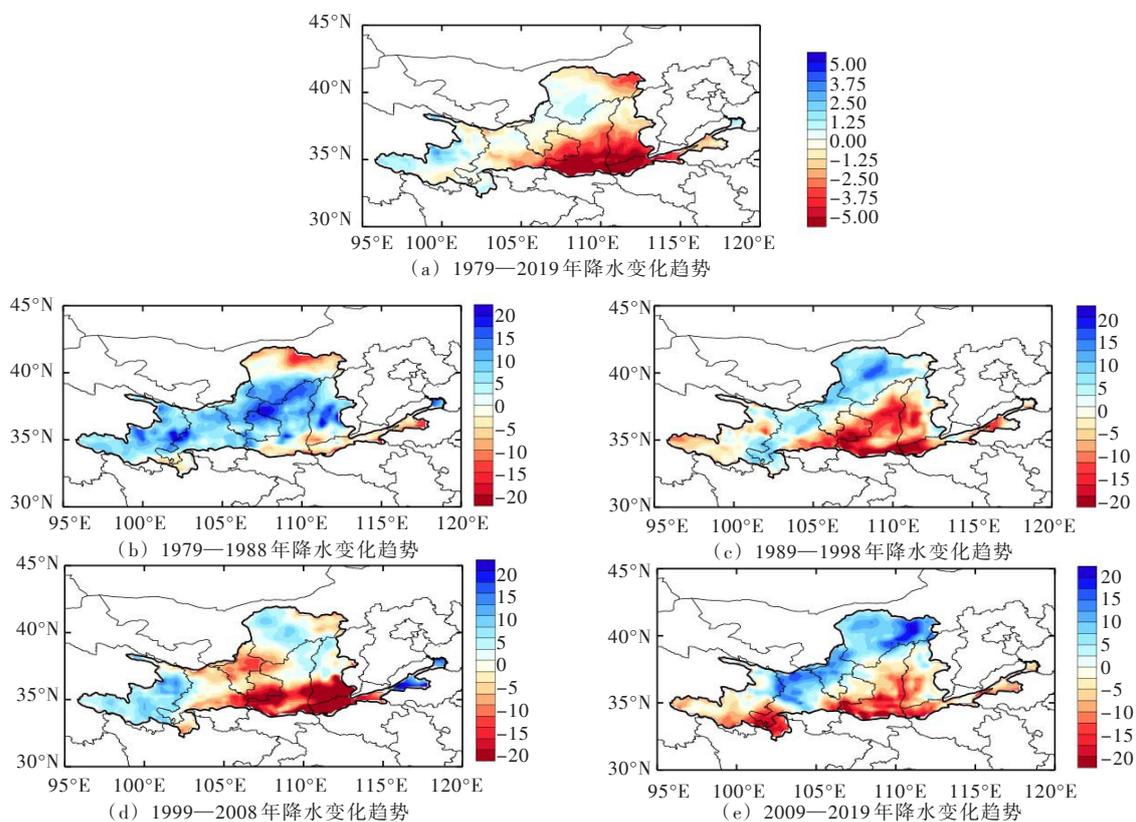
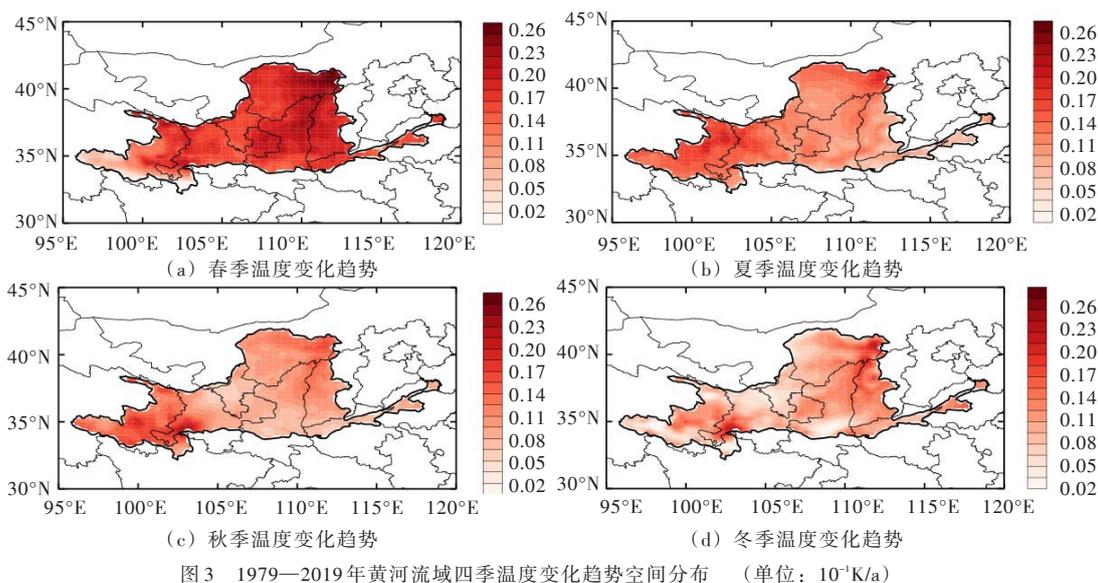


图2 黄河流域温度变化趋势空间分布(单位: $10^{-1}K/a$)

图4为1979—2019年黄河流域降水的变化趋势，可以发现降水变化趋势具有明显的空间差异性。其中上游地区降水有所增加，其最大值超过1 mm/a；中游地区降水显著减小，其中陕西和山西南部地区降水量减少达到4 mm/a。以10年为时间段计算降水的变化趋势，1980年代黄河流域降水整体呈增加趋势；1990年代北部降水增加，南部降水呈下降趋势；21世纪河套地区降水显著增加。马



雪宁等也指出1960年代黄河上游降水量较多,之后逐渐减少,2000年以来又显著增加^[16]。季节性降水变化差异显著(图5),其中春季和夏季以减少为主,且减少区域主要集中陕西和山西地区。秋季降水以增加为主,河套地区的降水增加最为明显,部分地区超过0.5 mm/a。冬季降水变化较小,主要变化区分布在黄河流域中游区域。

3.2 黄河流域水汽散度变化特征 图6给出黄河流域1979—2019年多年平均水汽散度季节分布特征。黄河流域空中水汽以辐合为主,且辐合最强时期主要集中在6—9月,其中上游地区主要集中在夏季。7月的水汽辐合最为剧烈,其它月份表现为弱辐合或辐散,这与实测探空资料计算结果^[17]以及李进等研究结果相一致^[18]。此外,黄河流域的水汽辐合(散)空间差异明显。上游地区和中游地区水

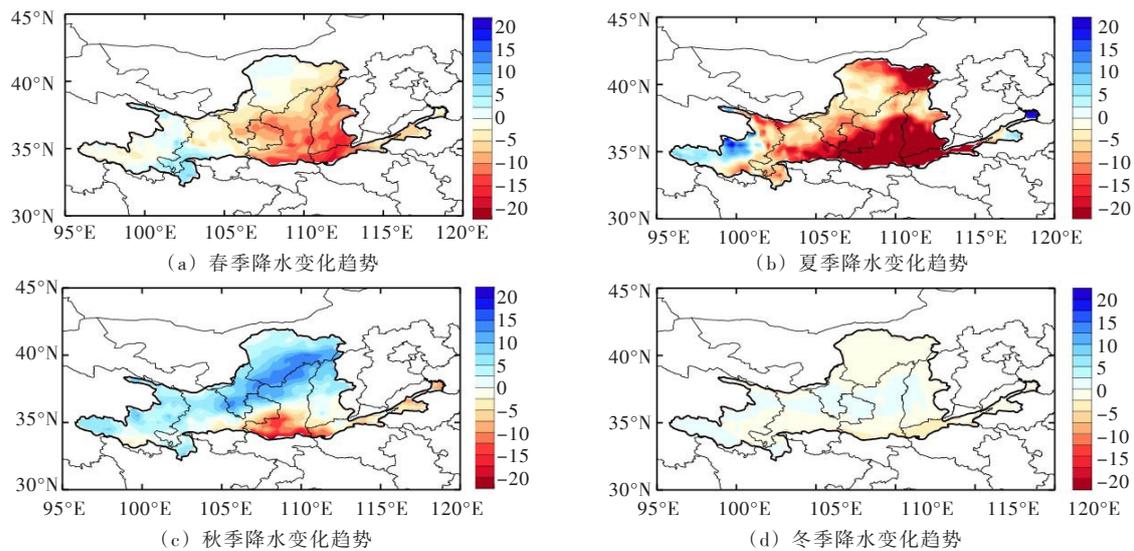


图5 1979—2019年黄河流域四季降水变化趋势空间分布 (单位: 10^{-1} mm/a)

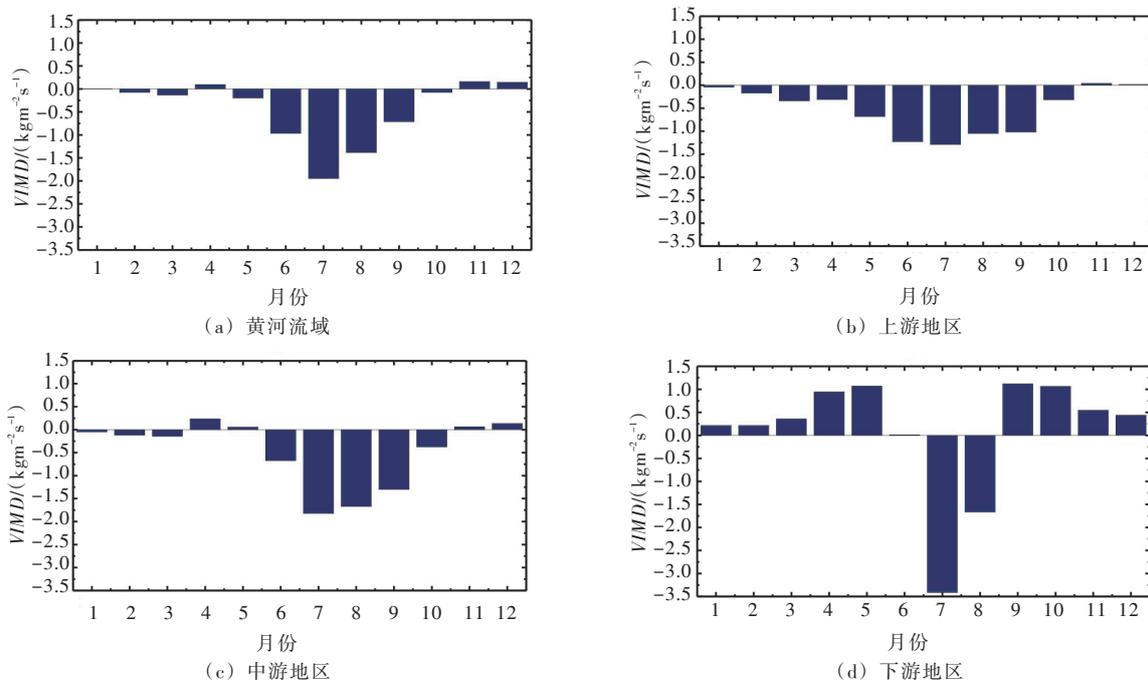
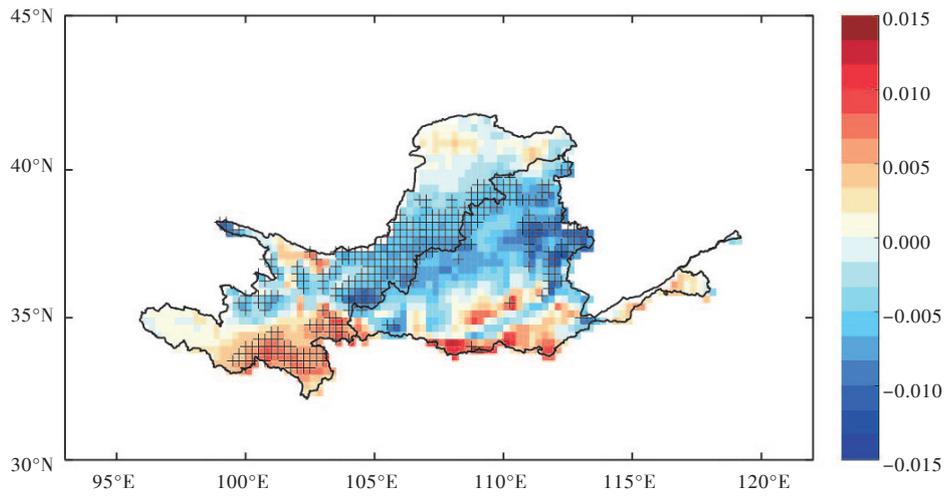


图6 1979—2019年多年平均不同区域整层水汽通量散度(VIMD)的季节分布

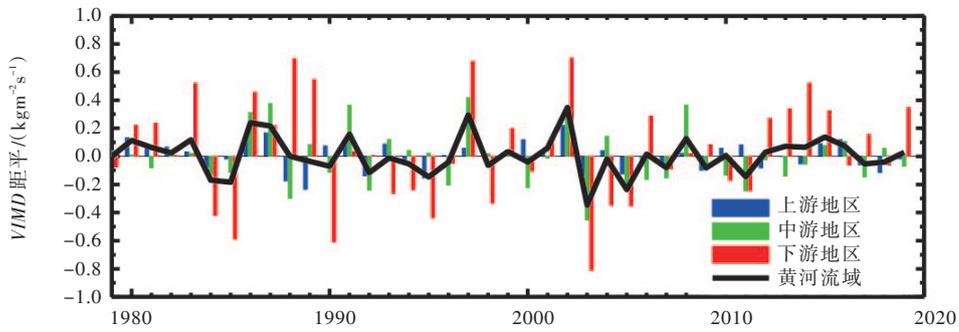
汽多为辐合积聚,但上游地区从3月开始就表现为较为明显的水汽辐合,一直持续到10月,而中游地区从6月才表现出明显的水汽辐合。下游地区季节的水汽辐合(散)变化最为剧烈,夏季7、8月水汽出现强烈的辐合,其它月份则以辐散流失为主。

近40年(1979—2019年)黄河流域的VIMD趋势变化具有明显的区域性差异(图7(a)),上游水源地区表现为显著的增加趋势,水汽主要是辐散流失为主,表征该地区的大气呈干旱化趋势,但是该区域降水呈现增加趋势。整体来看,整个黄河流域的VIMD无明显变化趋势(图7(b));从上中下游分区来看黄河下游地区的年际波动最大,极易发生旱涝灾害,其次是中游地区,上游的年际波动最小。

除了区域差异,黄河流域的VIMD还具有显著的季节差异(图8)。其中,夏季的VIMD趋势主导了全年的VIMD趋势变化,二者在空间分布上相似,这也与黄河流域地区主要降水发生在夏季相一致;春季,整个黄河流域水汽呈辐散增强趋势,特别是在上游地区;秋季的VIMD趋势变化与春季相反,水汽以辐合增强为主;秋季的VIMD整体呈现减小趋势,主要在上游地区和中游地区的北部出现了显

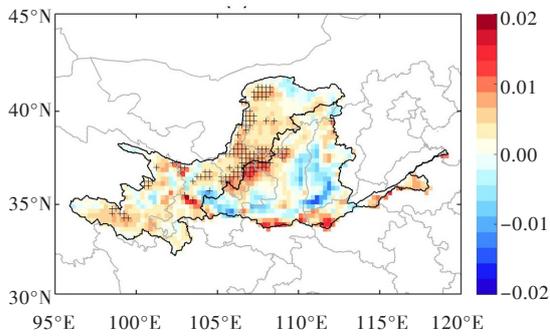


(a) 黄河流域整层水汽通量散度变化趋势空间分布 (+表示通过了95%的显著性检验, 单位: $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{a}^{-1}$)

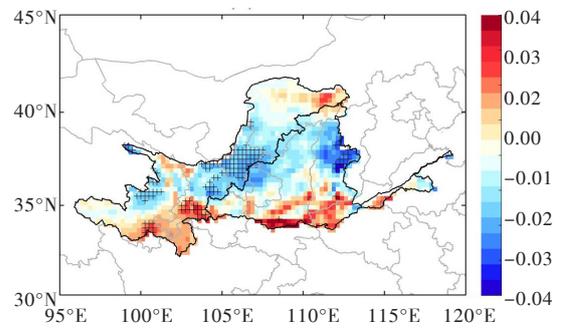


(b) 黄河流域整层水汽通量散度距平随时间变化序列

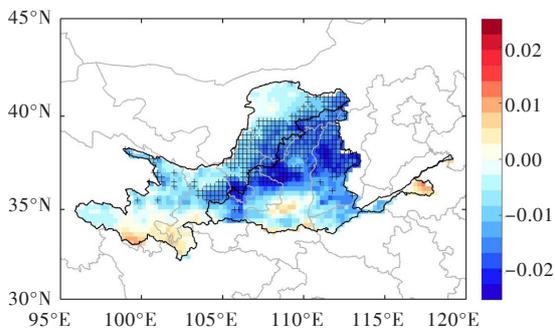
图7 1979—2019年黄河流域整层水汽通量散度变化趋势空间分布及其距平随时间变化序列



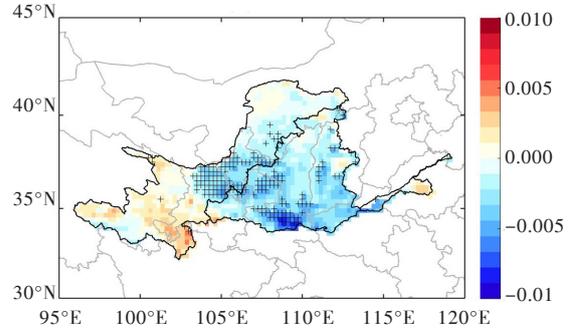
(a) 春季水汽通量散度变化趋势空间分布



(b) 夏季水汽通量散度变化趋势空间分布



(c) 秋季水汽通量散度变化趋势空间分布



(d) 冬季水汽通量散度变化趋势空间分布

图8 1979—2019年不同季节黄河流域水汽通量散度变化趋势空间分布 (+表示通过了95%的显著性检验, 单位: $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{a}^{-1}$)

著的辐合增强区。河套地区秋季 *VIMD* 显著减小, 辐合增强(图 8(c)), 这与本文研究结果河套地区秋季降水显著增加相一致(图 5(c))。

3.3 黄河流域蒸散变化特征 从流域内年蒸散量变化趋势的空间分布(图 9(a))可以看出, 黄河流域整体呈蒸散减少趋势^[19], 但是流域升温显著, 这说明黄河流域也存在“蒸散悖论”现象^[16], 其中蒸散增加趋势主要集中在黄河上游源区。这主要是由于黄河流域大部分处于干旱半干旱区, 其蒸散主要是受水分限制, 蒸散量取决于降水量和灌溉, 本文和前人的研究结果均显示黄河流域上游地区降水增加^[20], 这还与黄河上游随着温度升高和饱和差, 草地的蒸散量也随之增大有关^[21]; 中游地区, 蒸散量明显降低。从区域平均看, 上中下游蒸散量气候均值约为 400 mm/a、600 mm/a、800 mm/a; 从年际变化可见(图 9(b)), 上游和下游地区在 20 世纪八九十年代先增加、21 世纪后呈减少趋势; 中游地区整体呈减少趋势。

从各季节变化趋势的空间分布(图 10)可见, 夏季黄河流域蒸散量减少最为显著, 春季次之, 这与前人利用多源数据的研究结论相一致^[22-23], 风速降低可能是蒸散下降的主要原因。秋季上游地区蒸散量有所增加, 但是中下游地区呈现下降趋势; 冬季与秋季变化相反, 上游地区蒸散量减小占主导, 中下游地区蒸散增加。从时间变化序列来看, 黄河流域上游地区夏季蒸散量波动较小, 冬季有所增大; 中游地区春夏两季蒸散量持续性下降, 秋季波动较小, 冬季有所增加; 下游地区以夏季蒸散量减小且年际波动增大为主要特征(图 11)。

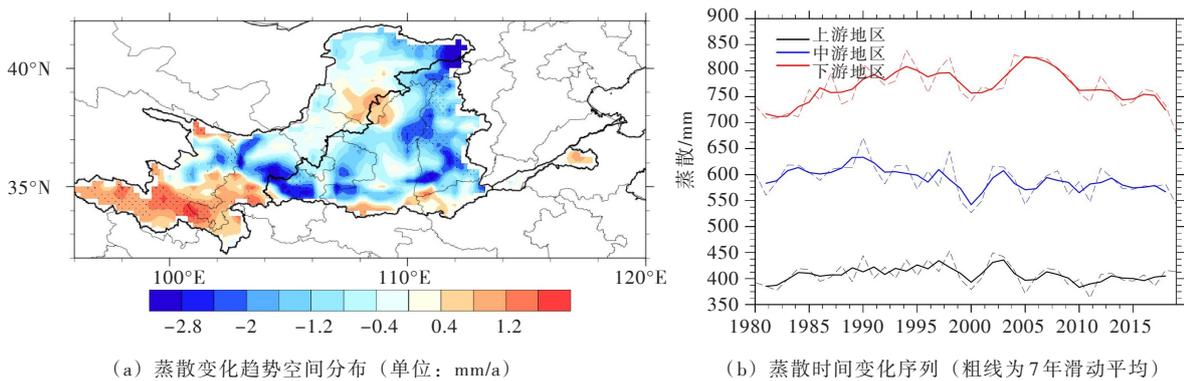


图 9 1979—2019 年黄河流域蒸散变化趋势空间分布和时间变化序列

3.4 黄河流域荒漠化脆弱性分析 从空间分布来看, 黄河流域荒漠化整体处于中等风险以上, 呈现由南向北荒漠化风险依次加剧的空间分布(图 12), 这与前人研究指出黄河流域荒漠化主要集中在流域西北部的结论相一致^[24]。从上中下游划分来看, 黄河上游地区荒漠化风险高, 主要集中在内蒙古、甘肃和宁夏部分区域, 而此区域正好接近腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠和毛乌素沙漠, 下游以中等荒漠化风险为主。由于黄河流域上游地区生态脆弱, 荒漠化风险高, 上游地区的荒漠化防治对于保障黄河流域生态安全具有重要的意义。

从时间变化序列来看, 1982—2014 年黄河上中下游三地荒漠化脆弱性指数均呈现下降趋势, 说明黄河流域荒漠化风险有所降低, 这可能与黄河流域近年来植被绿化有关。从年代际变化来看, 在 20 世纪八九十年代黄河上中游地区荒漠化脆弱性指数有所增加, 前人研究指出在 2000 年以前黄河流域荒漠化面积有所扩张^[24]。有观测事实表明, 1980 年代以来黄河上游流域的日照时数、气温及空气饱和差不断增加导致土地蒸散量升高加剧, 蒸散量的增大直接影响到了黄河上游径流量减少和草地荒漠化扩大^[25]。但是进入 21 世纪黄河流域植被覆盖度增加, 荒漠化风险降低。上游、中游至下游荒漠化脆弱性指数平均值依次减小, 这也说明荒漠化风险在上游最大, 中游次之, 下游最小(图 13)。

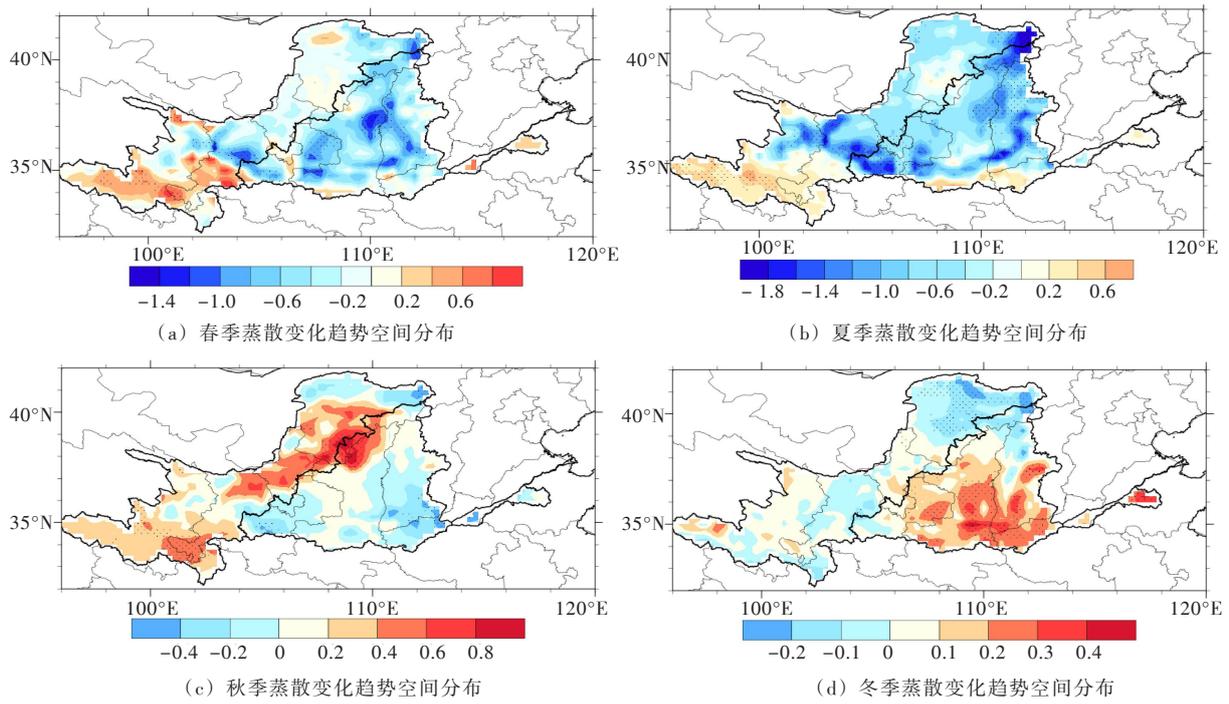


图10 1979—2019年黄河流域四季蒸散的线性趋势空间分布 (单位: mm/a)

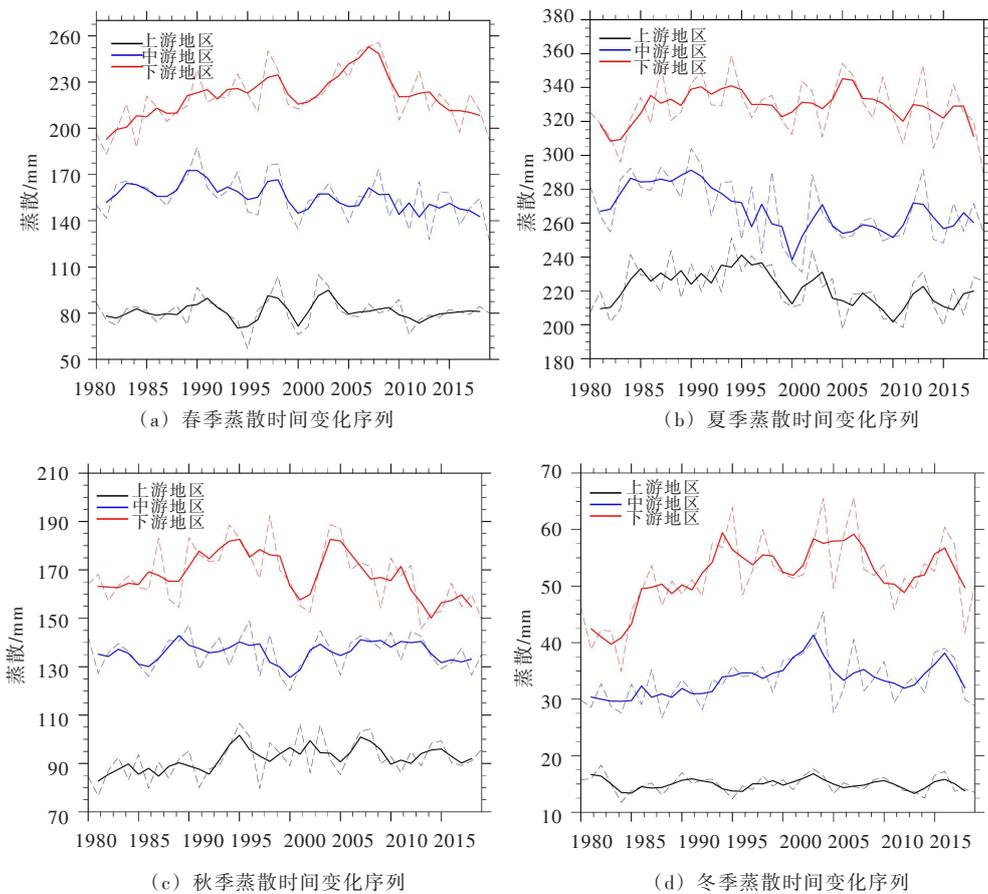


图11 1979—2019年黄河流域四季蒸散时间变化序列 (图中粗线为7年滑动平均, 单位: mm)

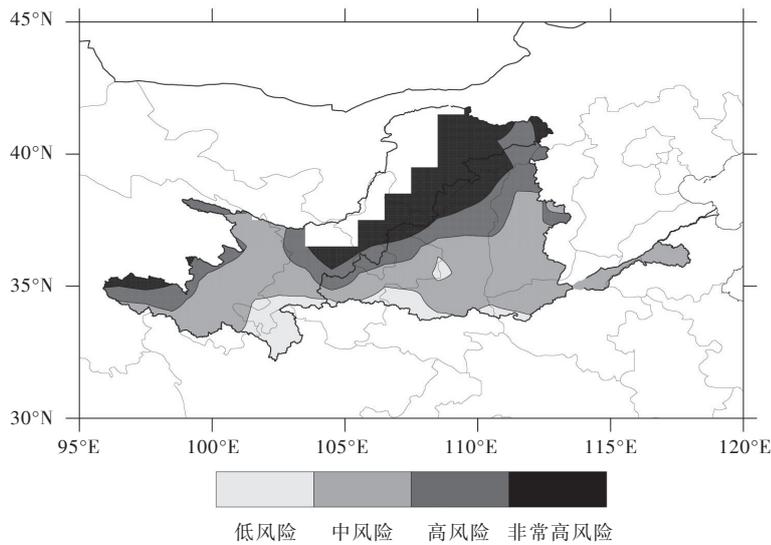


图12 2000—2014年黄河流域荒漠化脆弱性指数等级空间分布

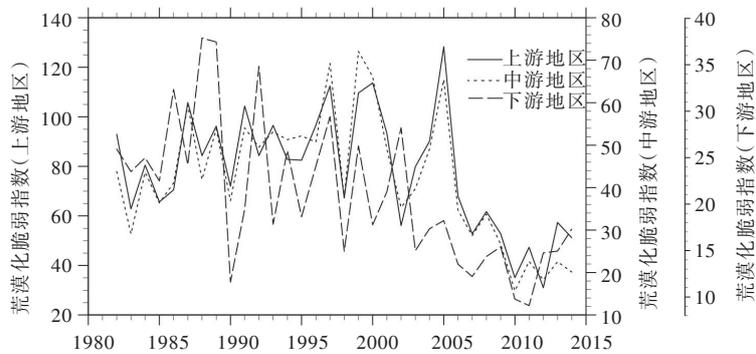


图13 1982—2014年黄河流域上中下游三地荒漠化脆弱性指数变化

4 讨论与总结

黄河流域不同区域径流对温度和降水的响应不尽相同。有研究指出径流对降水变化的响应较对气温变化的响应显著，中游地区较上游地区对气候变化敏感^[26]。受降水减少、气温上升、蒸散增强和下渗增加的影响，黄河上游各断面来水量在1960—2002年都有不同程度的递减趋势^[27]。张建云等采用MK秩次相关检验法与线性回归方法得出了黄河中游径流量呈显著的减少趋势的结论，径流对降水变化十分敏感，而气温对径流的影响随降水的增加被进一步放大^[28]。而Liu和Cui做了进一步的研究，发现在湿润区径流对降水的敏感性大于干旱区，在干旱区径流对蒸散更为敏感^[29]。本文研究表明，1979—2019年黄河流域四季均呈现明显增温趋势，其中春季增温最为明显，季节性降水的变化差异显著，流域蒸散整体呈现下降趋势，增加区域主要集中在上游地区。在此气候变化背景下，黄河流域不同区域径流也将随之变化。

此外春季增温有利于植被生长季的提前，加之春季和夏季降水下降趋势，二者共同影响将加剧黄河流域干旱半干旱区夏季植被对水资源的缺乏程度，对黄河流域水资源利用和农田灌溉增加了新的挑战。过去40年黄河流域空中水汽以辐合为主，其中上游地区水汽辐合年际波动最小，中游次之，下游波动最大。下游空中水汽散度的较大年际波动将造成下游地区极端降水事件发生几率增加，对下游防洪产生重要影响。综上，在以全球变暖为主要特征的气候变化背景下，黄河流域气候和水循环也随之发生重要变化，为了维护黄河流域地区生态安全、防范重大气象灾害风险，未来有

必要进一步系统分析黄河流域气候的时空变化规律, 预估黄河流域地区未来气候的变化趋势及其对水循环过程的影响。

参 考 文 献:

- [1] 王根绪, 沈永平, 程国栋. 黄河源区生态环境变化与成因分析[J]. 冰川冻土, 2000(3): 200-205.
- [2] 陈利群, 刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 559-565.
- [3] 何霄嘉. 黄河水资源适应气候变化的策略研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 44-48.
- [4] 刘伟江, 张震宇. 《黄河中上游流域水污染防治规划》解读[J]. 环境保护, 2009(10): 14-15.
- [5] 黄荣辉, 周德刚. 气候变化对黄河径流以及源区生态和冻土环境的影响[J]. 自然杂志, 2012(34): 1-9.
- [6] HUANG J, ZHANG G, ZHANG Y, et al. Global desertification vulnerability to climate change and human activities[J]. Land Degradation Development, 2020(31): 1380-1391.
- [7] LI Z, YAN Z, ZHU Y, et al. Homogenized daily relative humidity series in China during 1960-2017[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2020, 37(4): 318-327.
- [8] XUE C, WU H, JIANG X. Temporal and spatial change monitoring of drought grade based on ERA5 analysis data and BFAST method in the Belt and Road area during 1989-2017[J]. Advances in Meteorology, 2019(428): 1-10.
- [9] YAO B, LIU C, YIN Y, et al. Evaluation of cloud properties from reanalyzes over East Asia with a radiance-based approach[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020(13): 1033-1049.
- [10] 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 91-99.
- [11] 孙赫, 苏凤阁, 黄敬恒, 等. 第三极西风和季风主导流域源区降水呈现不同梯度特征[J]. 科学通报, 2020, 65(1): 91-104.
- [12] 叶梦姝. 中国大气再分析资料降水产品在天气和气候中的适用性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [13] 马守存, 保广裕, 郭广, 等. 1982—2013年黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2018, 36(2): 73-80.
- [14] 徐宗学, 隋彩虹. 黄河流域平均气温变化趋势分析[J]. 气象, 2005, 31(11): 7-10.
- [15] 杨特群, 饶素秋, 陈冬伶, 等. 1951年以来黄河流域气温和降水变化特点分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(10): 76-77.
- [16] 马雪宁, 张明军, 黄小燕, 等. 黄河上游流域近49a气候变化特征和未来变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 17-23.
- [17] 赵瑞霞, 吴国雄. 黄河流域中上游水分收支以及再分析资料可用性分析[J]. 自然科学进展, 2006(3): 316-324.
- [18] 李进, 李栋梁, 张杰. 黄河流域冬、夏季水汽输送及收支特征[J]. 高原气象, 2012(31): 342-350.
- [19] WANG G, PAN J, SHEN C, et al. Evaluation of evapotranspiration estimates in the Yellow River Basin against the water balance method[J]. Water, 2018(10): 1884.
- [20] 王永强, 刘志明, 袁喆, 等. 气候变化对黄河流域地表水资源量的影响评估[J]. 人民黄河, 2019, 41(8): 57-61, 67.
- [21] 夏军, 彭少明, 王超, 等. 气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 1-4, 15.
- [22] 廖晓芳, 钱胜, 彭彦铭, 等. 蒸发皿蒸发和潜在蒸散发对气候变化的响应[J]. 人民黄河, 2010, 32(11): 42-44, 152.
- [23] 柳春, 王守荣, 梁有叶, 等. 1961—2010年黄河流域蒸发皿蒸发量变化及影响因子分析[J]. 气候变化研究进展, 2013(9): 327-334.
- [24] 孙永军, 周强, 杨日红. 黄河流域土地荒漠化动态变化遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2008, 20(2): 74-78, 121.
- [25] 李林, 张国胜, 汪青春, 等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究[J]. 地球科学进展, 2000(3): 256-259.
- [26] 王国庆, 王云璋, 康玲玲. 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析[J]. 应用气象学报, 2002, 13(1):

118–122.

- [27] 蓝永超, 林舒, 李州英, 等. 近 50a 来黄河上游水循环要素变化分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 849–854.
- [28] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153–158.
- [29] LIU Q, CUI B. Impacts of climate change/variability on the streamflow in the Yellow River Basin, China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2): 268–274.

Characteristics of climate change in the Yellow River basin during recent 40 years

HUANG Jianping^{1, 2}, ZHANG Guolong¹, YU Haipeng³,
WANG Shanshan², GUAN Xiaodan^{1, 2}, REN Yu²

(1. Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions,

Northwest Institute of Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Yellow River basin is one of the main climate sensitive areas in China, and climate change has a significant impact on ecological environment evolution and socioeconomic development. In this paper, the evolution characteristics of temperature, precipitation, moisture flux divergence, evapotranspiration, and desertification risk in the Yellow River basin in the past 40 years are analyzed by using ERA5 reanalysis data of the European Centre for Medium Range Weather Forecast. The results show that the Yellow River Basin has a significant warming trend in the four seasons from 1979 to 2019, with the most obvious in spring. Different with temperature, the seasonal precipitation showed a decreasing trend in spring and summer, and increasing trend in autumn. In the past 40 years, annual fluctuation of water vapor convergence in the upper reaches of the Yellow River basin is the smallest, followed by the middle reaches, and the lower reaches. Meanwhile, the evapotranspiration in the Yellow River Basin showed a decreasing trend, with little increasing trend in the upper reaches. The desertification risk of the Yellow River Basin is above the medium level as a whole, with a spatial distribution increasing from south to north, and decreasing trend from 1982 to 2014. In the context of global climate change, the change rules of the water cycle such as evapotranspiration, vapor transport and precipitation in the Yellow River basin are clarified, which can provide scientific basis for maintaining the ecological security of the Yellow River basin and preventing the risk of major meteorological disasters.

Keywords: Yellow River basin; temperature; precipitation; moisture flux divergence; evapotranspiration; desertification risk; trends

(责任编辑: 李福田)