

王有恒,谭丹,韩兰英,等.黄河流域气候变化研究综述[J].中国沙漠,2021,41(4):235-246.

## 黄河流域气候变化研究综述

王有恒<sup>1</sup>,谭丹<sup>2</sup>,韩兰英<sup>1</sup>,李丹华<sup>1</sup>,王鑫<sup>1</sup>,卢国阳<sup>1</sup>,林婧婧<sup>1</sup>

(1.兰州区域气候中心,甘肃兰州730020;2.兰州中心气象台,甘肃兰州730020)

**摘要:**黄河流域从西到东跨越多省,地形复杂,作为中国生态安全战略格局的重要组成部分,是中国气候变化敏感区和生态环境脆弱区。本文主要综述了在气候变暖背景下,黄河流域气候变化特征、影响以及成因和对策建议的最新研究进展:(1)近60年黄河流域气温呈上升趋势,平均升温速率为0.30℃/10a,上游升温速率最大,下游次之,冬季升温趋势最显著,夏季最小,降水量上游地区增多,中下游地区减少,蒸散量呈减少趋势。(2)在气候变化和人类活动影响下,黄河流域径流量整体呈下降趋势,源区冰川积雪消融加剧,冻土严重退化,流域植被覆盖整体呈好转趋势,上游脆弱区和中游产沙区水土流失加重,对农业影响利弊皆存,流域病虫害加剧;流域气候变暖,极端天气气候事件增多,对文化遗产安全保存带来巨大挑战。(3)黄河流域气候系统随时间演变的过程不仅受自身内部的动力、热力影响,也受大气环流、海温、青藏高原等外部强迫因子的影响,人类活动造成的大气成分和土地利用覆盖的变化是影响黄河流域局地气候的重要因子。(4)未来黄河流域气温持续上升,降水波动增加,极端天气事件将更加频繁。应对气候变化,重点在于加强黄河流域气候变化科学研究,提升极端天气气候事件的预报预警能力,联合多部门建立气象、水文、生态与数值预报及防控一体化的灾害预报预警系统,同时加强流域水资源的管理调配和有效利用,加强流域生态环境保护,制定科学合理的农业发展战略,推动黄河流域高质量发展。

**关键词:**气候变化;影响;成因;应对;黄河流域

**文章编号:** 1000-694X(2021)04-235-12

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00086

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

### 0 引言

黄河流域是中华民族文明的发源地,也是中国生态安全战略格局的重要组成,连接着青藏高原、黄土高原、华北平原生态廊道,拥有多个国家公园和国家重点生态功能区,对中国北方社会经济的可持续发展有重大影响<sup>[1]</sup>。黄河流域地处干旱、半干旱与半湿润过渡地区,集水面积大,跨度长,地理环境复杂,生态环境脆弱,水资源不足,降水是黄河主要水源<sup>[2]</sup>。随着社会经济的快速发展,对黄河水资源的需求量越来越大的同时,人类社会对黄河的污染也越来越严重,再加上气候变暖引起的一系列变化,黄河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<sup>[3]</sup>。尤其是近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<sup>[4]</sup>。2019年9月18日,习近平总书记在主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上讲话时强调,黄河流域是中国重要的生态屏障和重要的经济地带,要加强生态环境保护,推动黄河流域生态保护和高质量发展,坚持不懈开展退耕还林还草,推动荒漠化治理。

气候变化问题是21世纪各国可持续发展面临的重大课题,气候变化对水资源、水文系统、物种迁移以及粮食产量等产生一系列影响<sup>[5-6]</sup>。IPCC第五次评估报告表明,全球性气候变暖特征日益显著,1951—2012年每10年地表温度升高0.12℃,北半球1981—2012年很可能是过去800年里最暖的30年<sup>[7]</sup>。中国受全球气候变暖的影响更严重,升温的幅度超出同期全球平均值<sup>[5]</sup>。黄河流域作为气候变

收稿日期:2021-05-26; 改回日期:2021-07-15

资助项目:国家自然科学基金项目(41605090,41705062);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J054,CXFZ2021J044);甘肃气象局科研项目(Ms2021-16)

作者简介:王有恒(1984—),男,青海贵德人,高级工程师,主要从事气候变化与灾害风险评估研究。E-mail: lz\_wyh@163.com

通信作者:谭丹(E-mail: lz\_tdian@163.com)

化和生态环境的“敏感区”,受到气候变化和人类活动的双重影响,特别是近年来,流域气候及其生态环境发生了深刻的变化。因此,本文基于黄河流域142个气象观测站1961—2020年气候观测资料,分析了流域气温、降水变化趋势,综合回顾了黄河流域气候变化事实及其对水资源、生态环境和农业等的影响,探讨了流域气候变化成因,分析了未来气候变化趋势及可能影响,并提出了气候变化的适应对策与措施,对黄河流域气候变化研究和生态文明建设以及推动黄河流域高质量发展都具有重要的参考价值。

## 1 黄河流域气候变化特征

### 1.1 黄河流域地理区域

黄河是中国第二大河,发源于青藏高原巴颜喀拉山脉,穿越黄土高原及黄淮海平原,注入渤海,全长5 464 km,水面落差4 480 m,流域总面积79.5万 $\text{km}^2$ 。黄河流域包括青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东9个省(自治区)的370多个县市(图1),地形差别很大,地势高低起伏显著,气候包含干旱、半干旱、半湿润等类型<sup>[3,8-10]</sup>。

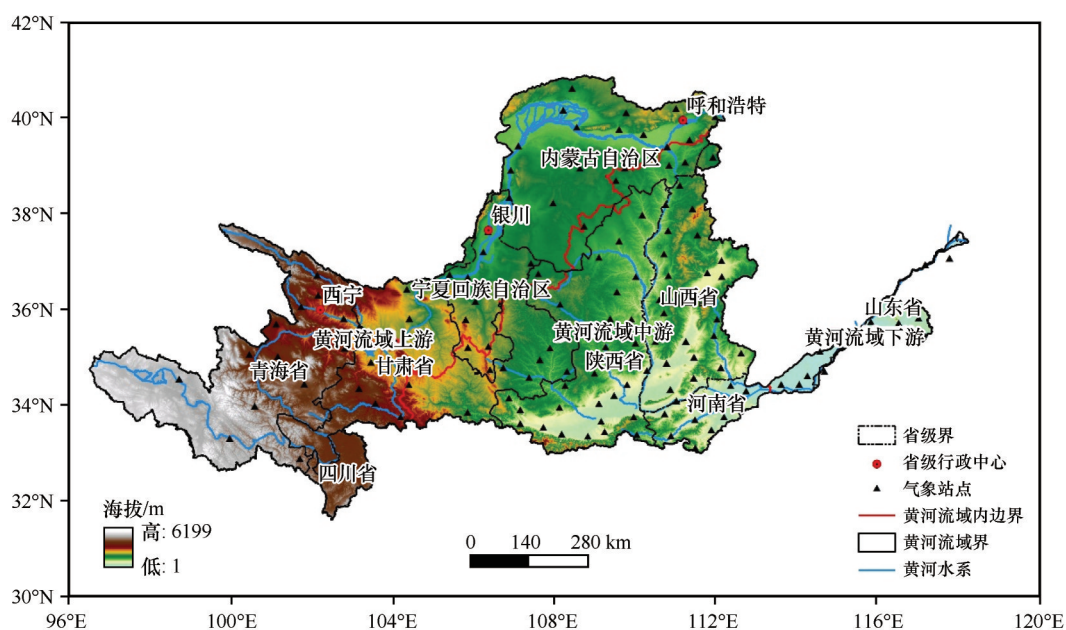


图1 黄河流域地形

Fig. 1 The distribution of Yellow River Basin

黄河属太平洋水系,干流多弯曲,素有“九曲黄河”之称。自河源至内蒙古自治区托克托县河口镇为黄河上游,河道长3 472 km,落差3 464 m,流域面积42.8万 $\text{km}^2$ ;河口镇至河南郑州的桃花峪为黄河中游,区间长1 206 km,落差895 m,流域面积34.4万 $\text{km}^2$ ;桃花峪以下至河口为黄河下游,河道长786 km,流域面积2.3万 $\text{km}^2$ ,仅占全流域面积的3%<sup>[11]</sup>。

### 1.2 黄河流域气温和降水变化

黄河流域多年平均气温9.4 $^{\circ}\text{C}$ ,在全球变暖背景下,1961—2020年黄河流域气温整体呈现上升趋势(图2A),平均升温速率为0.30 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (通过99.9%信度检验),高于全国的升温速率,这与已有研究结论一致<sup>[3-4,10,12-14]</sup>。流域平均气温在1984年之前变化平稳,其后升温明显,平均升温速率达0.43 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,特

别是1997年以来升温最为明显,1997—2020年比1961—1996年平均升高了1.14 $^{\circ}\text{C}$ ,近年来出现增暖趋缓的迹象。近60年上游升温速率最大(0.39 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ),高于整个流域升温速率,下游次之(0.26 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ),中游(0.25 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )略低于下游。从季节变化来看,黄河流域4个季节温度变化均呈上升趋势,但是不同季节升温趋势存在显著差异,其中冬季升温趋势最为显著,达0.44 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,对全年气温的升高贡献最大,其次为春季(0.37 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )和秋季(0.28 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ),夏季升温幅度最小,为0.17 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,这与马雪宁等<sup>[4]</sup>、赵建华等<sup>[14]</sup>研究结果一致,与黄建平等<sup>[3]</sup>指出春季增温趋势最为明显的结果存在差异,这可能是由于研究时段不同导致。黄河流域自西向东海拔落差大,平均气温空间分布差异较大。由图2C可以看到,流域各站点平均气温呈一致升温趋势,这与

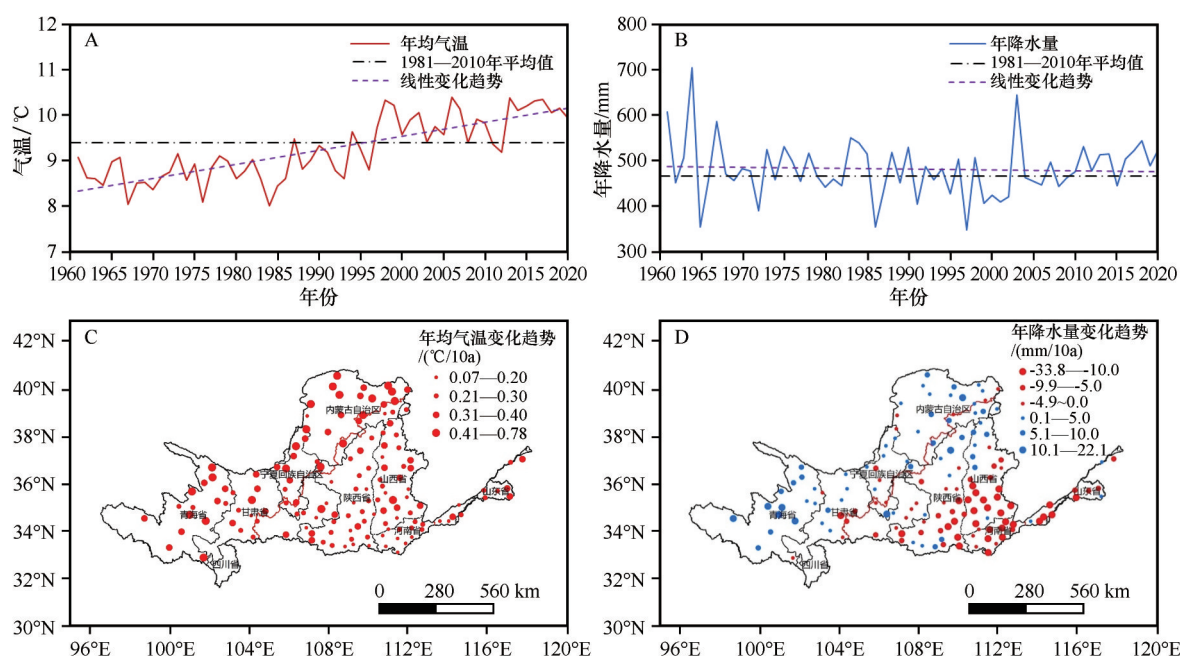


图2 1961—2020年黄河流域年平均气温和年降水量变化

Fig.2 Variation of average temperature and precipitation in the Yellow River Basin during 1961—2020

黄建平等<sup>[3]</sup>、马柱国等<sup>[12]</sup>研究结果一致。升温最快的地区集中在黄河上游,其中源区东北部及内蒙古地区升温最为显著,为 $0.41\text{—}0.78\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,升温较慢的地区集中在陕西、山西、河南及山东,在 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以下。

黄河流域降水受季风影响明显,多年平均降水量为 $466.6\text{ mm}$ ,空间分布差异显著,自西北向东南逐渐增加,最大值和最小值之间相差近6倍<sup>[1,15]</sup>;1961—2020年降水总体呈减少趋势(图2B),这与马柱国等<sup>[12]</sup>、肖风劲等<sup>[16]</sup>研究结果一致。从年代际变化来看,20世纪60年代降水量最多,之后呈波动减少趋势,90年代最少,2000年以来又呈波动增加趋势。近60年上游地区年降水量呈增多趋势,增速为 $4.1\text{ mm}/10\text{a}$ ;中游( $-3.8\text{ mm}/10\text{a}$ )和下游( $-6.5\text{ mm}/10\text{a}$ )地区呈减少趋势。从季节变化来看,春季和夏季降水以减少为主,且减少区域集中在陕西和山西地区。秋季以增加为主,河套地区增加最为明显,部分地区超过 $5\text{ mm}/10\text{a}$ 。冬季变化较小,主要变化区分布在中游区域<sup>[3,13-15]</sup>。空间上,流域降水量变化趋势具有明显差异性(图2D),上游和中游北部地区呈明显增多趋势,其中黄河源区增多最为明显,最大达 $22.1\text{ mm}/10\text{a}$ ;中游的东南部地区和下游地区呈明显减少趋势,其中陕西东部、山西南部、河南和山东减少最为明显,减少速率 $10.0\text{—}33.8\text{ mm}/10\text{a}$ 。

### 1.3 黄河流域极端气候变化

黄河流域年最低和最高气温呈现显著增加趋势。年最高气温和年最低气温增幅分别为 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,均通过了99.9%的信度检验。日最低气温极大(小)和日最高气温极大(小)值分别以 $0.25(0.40)\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.18(0.27)\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率上升<sup>[13]</sup>,日最低气温的变幅明显高于日最高气温。气温日较差以 $-0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ( $P<0.05$ )的趋势减少,空间上73%的站点呈减少趋势,呈相反趋势的站点多分布于河源区<sup>[17]</sup>。张克新等<sup>[9]</sup>利用66个气象站的资料分析了1960—2017年黄河流域极端温度的变化,指出黄河流域各季节极端高温天气日数呈现显著增加趋势,冬季增幅最大,春季最小;极端低温天气日数呈减少趋势,冬季减幅最大,夏季最小。刘彩红等<sup>[18]</sup>指出黄河源区极端气候事件频率和强度增加,平均暖夜、暖日、冷夜及冷日阈值均呈显著增大趋势,而霜冻日数呈显著减少趋势。

近50年黄河流域及上、中、下游年日最大降水量都具有不显著的减少趋势,减少速率 $0.24\text{—}0.36\text{ mm}/10\text{a}$ <sup>[10]</sup>。上游极端降水量整体呈增加趋势,其中1985—2006年极端降水量虽较少,持续干期长,但降水量仍呈缓慢增长趋势,2006年之后极端降水量增加趋势明显,降水强度增加,这也反映了变暖背景下水循环时间尺度上更强的非均匀性<sup>[2]</sup>。刘勤等<sup>[8]</sup>根据黄河流域1961—2013年102个气象站点数



据,选用相对湿润度指数作为干旱指标,发现黄河流域上游旱情比中下游地区偏重,各季节和全年尺度的相对湿润度指数均呈从西北到东南递增的变化趋势。马柱国等<sup>[12]</sup>、王芸等<sup>[19]</sup>指出黄河流域气候呈现暖干化趋势,极端降水过程正趋于增加,将对流域水资源系统产生重要影响。

#### 1.4 黄河流域蒸散变化

蒸散是陆地表面的液态水转化为水汽的过程,对区域水文循环过程具有重要的意义。蒸发量对气温的响应表现出负相关,在全球气候变暖的背景下,中国蒸散呈现减少的趋势<sup>[20-21]</sup>,存在“蒸散悖论”现象<sup>[22]</sup>。大量研究表明,1961—2019年,黄河流域年蒸散量总体上呈减小趋势<sup>[3,15]</sup>,平均减少趋势为 $-60.4\text{ mm}/10\text{a}$  ( $P<0.05$ ),但流域升温显著,黄河流域也存在“蒸散悖论”现象<sup>[23-24]</sup>。流域不同区域的增减趋势不同,同一区域不同时段增减趋势也有差异,蒸散量增加趋势集中在黄河上游源区<sup>[3]</sup>。郑子彦等<sup>[25]</sup>指出,1951年以来,黄河源区的潜在蒸散发以 $2.29\text{ mm}/10\text{a}$  ( $P<0.05$ )的速率显著增加,尤其是2000年以后,增加趋势更为明显,高达 $6.01\text{ mm}/10\text{a}$ 。上游和下游地区蒸散量在20世纪80—90年代增加,21世纪后呈减少趋势;中游地区整体呈减少趋势<sup>[26-30]</sup>。上游蒸散主要受能量供应条件限制影响,而中下游受水量供应条件限制影响较大<sup>[26,31]</sup>。从各季节变化趋势来看,1961—2019年,黄河流域四季蒸散量均呈减少趋势,其中夏季减少最为显著,达 $-24.5\text{ mm}/10\text{a}$ ,对全年蒸散量变化趋势起主导作用,春季次之( $-12.7\text{ mm}/10\text{a}$ ),秋季上游地区有所增加,但是中下游地区呈现下降趋势;冬季减少趋势不明显,上游地区蒸散量减少占主导,中下游地区蒸散量增加<sup>[3,24]</sup>。

蒸散的变化受气候因素复杂相互作用的影响,不同地区和时间段的蒸散量变化的主导因素不同<sup>[32]</sup>。黄建平等<sup>[3]</sup>、马雪宁等<sup>[23]</sup>、柳春等<sup>[33]</sup>指出风速明显减少是导致黄河流域蒸散量减少的主要原因,而卓莹莹等<sup>[24]</sup>研究表明年均气温日较差、年日照时数和年降水量是黄河流域蒸散量变化的主要影响因子。值得注意的是,已有研究表明,植被生长在调节黄河流域季节性蒸散中有关键作用,说明正在进行的黄河流域植被恢复和治理将对流域季节水循环起到重要作用<sup>[34]</sup>。

## 2 气候变化对黄河流域的影响

### 2.1 对流域水资源的影响

黄河年径流量为574亿 $\text{m}^3$ ,平均径流深度为79 mm。黄河流域利津断面以上水资源总量为638.37亿 $\text{m}^3$  (1956—2000年),其中地表水资源量534.78亿 $\text{m}^3$ ,与地表水资源不重复的地下水资源量103.59亿 $\text{m}^3$ <sup>[1]</sup>。研究表明,近60年,黄河流域的径流量整体呈下降趋势,大约以每年0.721亿 $\text{m}^3$ 的速率下降,上游、中游和下游分别占减少水量的28.4%、40.5%和31.1%,中游径流量减少最显著<sup>[12,16,35-37]</sup>。对于目前黄河流域径流量变化的主要因素存在不同观点,有研究认为降水量是黄河径流量变化的主导因子<sup>[16,38-39]</sup>,也有研究认为人类活动是主要因素<sup>[37,40-41]</sup>,另外由于气候变暖,温度和蒸散对径流量的影响也在增大<sup>[42]</sup>。王永强等<sup>[43]</sup>将气候变化对黄河径流量的影响做了定量评估,结果表明,若降水条件不变,气温每升高1℃,地表径流深减小6.8%;若气温条件保持不变,降水每增大10%,会导致地表径流深增大21.3%。此外,人类活动是引起黄河上中游径流量减少的主要因素<sup>[37]</sup>。未来黄河上中游径流量将延续减少的趋势,但减少的趋势趋于稳定<sup>[44]</sup>。

积雪融水是黄河流域水资源的重要补给来源,多年平均年总雪水当量约为123.18亿 $\text{m}^3$ ,约占黄河利津站总径流量的23%。黄河流域多年平均积雪面积为6.17万 $\text{km}^2$ ,约占黄河流域面积的8%,最大积雪面积达10.75万 $\text{km}^2$ ,占黄河流域面积的14%。1978—2016年,由于气候转暖黄河源区呈积雪初日推迟、终日提前、积雪期缩短、积雪日数减少的趋势<sup>[45]</sup>。近40年来,黄河源区年均雪深总体没有明显的变化趋势,但从21世纪以来年均雪深呈上升趋势<sup>[45-46]</sup>,这可能与气候变暖导致的区域大气水汽含量变化有关<sup>[47]</sup>。在全球变暖的大背景下,未来气温升高对黄河源区积雪的影响将逐渐赶上并超过降水增加的影响,从而使积雪的年际变化趋势发生转折,甚至导致部分地区终年无积雪出现<sup>[48]</sup>。

冰川融水对黄河年补给量约3.9亿 $\text{m}^3$ ,占黄河出山径流的1.9%<sup>[1]</sup>。受气候变暖的影响,黄河上游地区的冰川消融加速,面积退缩,主体冰川面积均退缩,退缩幅度在8%—13%。阿尼玛卿山是黄河源区冰川分布比较集中的区域,其变化对黄河流域水资源变化具有重要影响<sup>[49]</sup>,2000年以来阿尼玛卿

山地区冰川总体面积持续退缩,其中退缩最大的冰川长度缩短了900 m,温度升高是阿尼玛卿山冰川退缩的主要原因<sup>[50-51]</sup>。冰川积雪消融加剧,冰川持续退缩,引起大范围的湖泊扩张和径流增加,这严重降低了冰川融水的调节径流和稳定生态的作用,对黄河流域水资源以及生态系统产生着重要的影响<sup>[15,25,49]</sup>。

黄河流域多年冻土区面积约 $8.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占黄河流域面积的11.3%,活动层厚度范围为100—550 cm,季节冻土区土壤最大冻结深度变化于10—250 cm<sup>[1]</sup>。黄河源区处于大片连续多年冻土向季节冻土的过渡区,多年冻土、高寒生态、水文径流等的相互作用十分强烈。黄河源区冻土变化分为不同阶段,1972—1992年部分季节性冻土变为多年冻土,多年冻土面积增加323 km<sup>2</sup>,1983年开始源区气候转暖,1998年以来气温急剧上升<sup>[52]</sup>,源区多年冻土呈区域性退化趋势,由片状分布逐渐变为岛状、斑状分布,多年冻土层变薄,冻土面积缩小,融区范围扩大,部分多年冻土岛完全消失变为季节冻土<sup>[16,53-54]</sup>。盛乃宁等<sup>[55]</sup>指出源区冻土周期长以8 d/10a的速率缩短,最大冻深以5.7 cm/10a的速率变浅。杨建平等<sup>[56]</sup>研究表明在黄河源区多年冻土的边缘地带,垂向上生成了不衔接冻土和融化夹层,多年冻土分布下界提升了50—70 cm。多年冻土退化导致黄河源区占主导地位的高寒草甸失水向沙漠化草地和“黑土滩”型次生裸地退化<sup>[57]</sup>。未来40年,多年冻土区的冻土退化将从低温多年冻土向高温多年冻土转化,活动层增厚,多年冻土变薄<sup>[58-59]</sup>。冻土退化削弱了冻土的生态环境地质功能,并由此带来一系列水文地质及生态环境问题。

## 2.2 对流域生态环境的影响

黄河流域上、中、下游分属不同气候区,地形、植被类型自然分异性造成生态系统的区域差异。21世纪以来黄河流域植被覆盖呈好转趋势,植被改善的区域大于退化的区域,而且黄河中游和下游的归一化植被指数(NDVI)增长大于上游<sup>[60-63]</sup>。刘昌明等<sup>[64]</sup>认为,目前黄河中游植被状况与水热条件基本达到了平衡状态,植被恢复的效应趋于稳定。黄河源区位于青藏高原腹地,是黄河流域上游最重要的产流区和水源涵养区,其植被覆盖的变化,对于整个黄河流域生态系统的演变有非常重要的影响。草地是黄河源区地表最重要的植被覆盖,占整个源

区面积比重高达80%<sup>[65]</sup>。20世纪70年代至2000年代初期黄河源区草地面积减小、草场质量下降和荒漠化<sup>[66-67]</sup>,源区中高覆盖草地减少了16.3%,尤其是黄河源区西南部和东部地区。2000年代中期以来,黄河源区大部分地区的植被覆盖有好转趋势,这主要得益于源区气候进入暖湿周期,降水不断增多,其次生态建设工程等举措的实施也起到了重要作用<sup>[68-71]</sup>。

黄土高原水土流失面积广阔,是黄河流域潜在危害最大的生态环境灾害之一,其水土流失面积占流域水土流失面积的89.21%,严重的水土流失造成河道泥沙淤积,加剧了荒漠化发展和伴生灾害发生以及下游洪水威胁,严重制约了流域经济社会发展<sup>[72-73]</sup>。降雨是土壤侵蚀过程中起主导作用的因子之一。1961—2017年黄河流域龙羊峡以上、河口镇至龙门、龙门至三门峡年降雨侵蚀力略有增加,易造成上游生态脆弱区和中游产沙区水土流失增加。相对1986—2005年基准期,黄河流域2046—2065年和2080—2099年的年降雨侵蚀力分别增加21.7%和29.5%,大部分地区呈增加趋势且确定性大<sup>[74]</sup>,这可能导致黄河流域水土流失加重。

## 2.3 对流域农业的影响

黄河流域是中国重要粮食生产基地,主要的农业形式包括雨养农业和灌溉农业,前者在黄土高原的农业生产中占据重要地位,后者主要分布于年降水量200 mm以下的区域,高度依赖于地下水和地表径流<sup>[3]</sup>。气候变化对黄河流域主要粮食作物的种植面积、种植界限、产量和品质有明显影响。

就黄河上游而言,气候变暖导致西北地区东部冬小麦、马铃薯、油菜、棉花等主要作物的可种植区北移西扩明显,种植区上限海拔提高约100—200 m,春小麦、玉米、冬小麦生长期缩短,棉花、马铃薯生长期延长,冬小麦和棉花等农作物增产,马铃薯减产,棉花、葡萄、玉米等喜温和喜热作物品质提高。温度升高对作物水分利用效率有负效应,随着温度升高,玉米、春小麦、冬小麦水分利用效率有所减小<sup>[75-76]</sup>。气候变化背景下,黄河流域中下游的黄淮海地区冬小麦生育期总体呈缩短趋势,夏玉米生育期整体呈延长趋势。1992—2013年,夏玉米-冬小麦周年单产呈上升趋势,温度升高和降水增加对产量的影响存在区域差异,整个区域平均来看升温使夏玉米减产,冬小麦增产;降水增加有利于黄淮



海北部地区夏玉米的产量形成,对南部地区夏玉米产量则存在不利影响,而对黄淮海大部分地区冬小麦的产量形成不利<sup>[77-78]</sup>。

气候变化引起的气温升高、降水波动、相对湿度增加等,可能使黄河流域内病虫害进一步加剧<sup>[10]</sup>。气候变暖有利于病虫害的安全越冬,越冬虫源、菌源基数增加,起始发育时间提前、发育加快,发育历期缩短、繁殖力增强、虫害越冬界限北移、迁飞危害范围扩大,病虫害为害时间延长、范围扩大、程度加重;但也有一些对高温敏感的病虫害呈减弱趋势<sup>[75,79]</sup>。

## 2.4 对流域文物的影响

黄河流域遗存有大量文化遗产,仅世界遗产就有5处,这些文化遗产历史跨度大,类型多样,历史、科学、艺术价值高,是凝聚中华民族认同和国家认同的文化基础,是中华民族伟大历史的表现。黄河流域文物分布区域复杂,许多位于山区、河流、湖泊、沟谷区域,受自然地质灾害影响较大。在全球气候变暖背景下,极端天气气候事件增多,给流域内文化遗产安全保存带来巨大的挑战。

全球变暖背景下,气温上升,破坏了文物原有的温、湿平衡,缩短了文物“寿命”,不利于文物长期保存<sup>[80]</sup>。研究表明,温度升高,化学反应速度增加<sup>[81]</sup>,虫霉的生产繁殖迅速,导致文物老化变质加速<sup>[82]</sup>。降水增加,引起空气湿度增大、水汽增多,易引起壁画类文物病害<sup>[83]</sup>;此外,过高的湿度会导致丝织类文物发生虫害、霉变,使纸质类文物的抗张强度、耐折度等急剧下降,石质类文物表面、古建筑类的构件材料出现风化,金属性文物更容易出现腐蚀生锈<sup>[80,84]</sup>。

近年黄河流域频发的极端降水天气及其所引发的次生灾害,冲刷文物表面,引发崖面冲沟,造成部分洞窟出现渗漏现象,直接影响文物本体安全;强降雨使洞窟微环境温度、湿度出现较大的波动,容易激活盐分的迁移,导致壁画及塑像病害的深度恶化<sup>[85-86]</sup>。

## 3 黄河流域气候变化归因分析

黄河流域气候受到西风带环流、高原季风和东亚季风影响,其气候系统随时间演变的过程不仅受自身内部的动力、热力影响,也受外部强迫因子的影响,还受人类活动的影响。大气圈中的环流异

常、海洋圈中 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 循环、青藏高原的动力、热力作用的综合作用等,都会引起一定程度的气候变化,同时人类活动造成的大气成分和土地利用覆盖的变化是影响局地气候的重要因子。

### 3.1 外强迫信号对黄河流域气候变化产生影响

#### 3.1.1 大气环流异常的影响

东亚季风。位于季风活动边缘地带的包括黄河源区在内的北方地区夏季旱涝的分布与夏季风的强弱和进退亦有密切的关系。华北降水的80年振荡与东亚夏季风强度的长期变化有很好的对应关系<sup>[87]</sup>,并且东亚夏季风强度变化可以解释黄河流域河口镇与龙门区间72%的径流变化<sup>[88]</sup>,东亚夏季风强度的减弱和人口的增长导致黄河下游径流干枯情景频发<sup>[89]</sup>。根据张存杰等<sup>[90]</sup>的分析,东亚季风对包括黄河源区在内的西北地区气候的影响十分显著,强的冬季风会给西北地区带来寒冷少雨的天气,使冬、春、夏季降水持续减少;而强的夏季风会使西北地区东南部夏季多雨,中部偏西大部分地区少雨。

副热带高压。西太平洋副热带高压是影响中国夏季降水最重要的环流系统之一,当副高偏南时,导致西南季风偏南,冷空气南下至江淮流域,梅雨锋主要位于该区域,副高外围的暖湿气流也主要输送至此,导致江淮流域降雨易偏多,黄河流域降雨易偏少;反之副高偏北时,西风带扰动偏北,梅雨锋主要位于华北、黄河流域,副高外围的暖湿气流主要输送至华北和黄河流域,江淮流域降水易偏少,黄河流域降水正常或偏多<sup>[91-93]</sup>。黄河上中游夏季降水受副高影响显著,西太副高脊点位置的相对稳定阶段及大幅度东缩西伸突变与季风雨带关系密切,黄河上中游秋雨是副高南撤期副高明显西伸的产物<sup>[94]</sup>,副热带高压外围的西南气流输送水汽,配合中低空其他天气系统的影响是黄河上中游降水过程产生的重要原因<sup>[95]</sup>。

西风环流。西风带的水汽输送为黄河上中游大部分地区提供了基本的水汽来源,西风变化对其水汽输送通量散度年际变化有直接的作用。近百年来,干旱区受西风环流影响呈现显著的增暖趋势<sup>[96]</sup>,西风指数与西北干旱区气温存在显著的正相关关系,20世纪80年代中后期后,由于西风减弱使得东亚季风携带水汽更容易向西和西北输送,并与

南亚季风水汽输送东线汇合,对黄河上游干旱半干旱区降水增加有一定影响。

### 3.1.2 海温的影响

厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)是迄今为止人们认识到的地球系统中影响气候变化最强的信号,它的发生、发展会引起全球大气环流和世界气候的异常,但不同地区,其影响的方式、强度及稳定性不同,表现出明显的区域性差异。ENSO事件对黄河上游地区气温变化的影响大于对降水的影响,黄河中游和下游地区ENSO事件强度与降水量呈显著的负相关性,强度增大时降水量下降,减弱时降水量上升。ENSO事件强度与气温呈显著的正相关性,其中厄尔尼诺对气温有抬高的趋势,拉尼娜对气温有降低的趋势<sup>[97-98]</sup>。ENSO暖事件对流域日最高、最低气温极小值有抬升作用,ENSO冷事件对日最高、最低气温极小值有降低作用,对日最高、最低气温极大值的作用与其极小值相反,流域内不同季节极端气温均与ENSO存在不同时段不同频率的共振周期<sup>[9]</sup>。

太平洋年代际涛动(The Pacific Decadal Oscillation, PDO)位相的变化对黄河流域河套地区的气候变化有一定的影响。张雯等<sup>[99]</sup>指出当PDO正位相作为背景场时,会增强夏季中东赤道太平洋海温的异常程度,从而促进厄尔尼诺的发展,同时会通过中高纬度的海温异常加强东亚大陆与西北太平洋高度场及海平面气压场异常,西北太平洋日本以东出现的气旋性异常在一定程度上促进了东亚沿岸的北风异常,最终会导致夏季华北及河套地区降水显著偏少,PDO正位相背景使厄尔尼诺发展年中国北方降水偏少的可能性增大,同时,拉尼娜年梅雨偏少,在PDO处于负位相时可能性也趋向升高。

### 3.1.3 青藏高原的影响

青藏高原大地形作用不但是形成中国气候格局的重要原因,同时,对黄河流域上中游的气候也有重要影响,主要表现在几个方面,一是高原感潜热变化会对黄河流域气候产生影响,二是高原季风会产生一定的影响,三是高原隆升有所影响。

春季高原地表感热加热的年际变化与同期中国西北地区东部降水的年际变率存在负相关关系,春季高原感热加热偏强的年份,西北地区东部上空的对流层总体上呈现高层辐合、中下层辐散的环流结构,这种环流结构易导致中国西北地区东部春旱的发生<sup>[100-103]</sup>。

青藏高原季风对西北地区气温和降水有一定的影响,陕甘宁蒙处于高原季风东北部的东南风和东亚季风的西南风的辐散区中<sup>[104]</sup>。夏季,高原季风越强,高原上云越多,长波辐射越小,对应干旱区辐散效应越强,有利于增温;冬季高原和干旱区共处于亚洲冷高压控制下,因此其气候变化的一致性较高,当低纬度波导偏强时,青藏高原、中国西北地区气温偏低,青藏高原中东部、中国西北地区南部降水偏多。高原季风与中国西北干旱区气候相关性显著,强高原季风年高原北部边缘水汽条件和抬升条件更有利于降水,而弱高原季风年,高原北部边缘水汽条件和抬升条件偏差,对应降水较常年同期偏少。

高原隆升前,西北地区年降水量比现在偏多大约150 mm;随着高原隆升西北地区年降水逐步减少,到高原隆升至临界高度时,西北地区降水比高原隆升前约减少了77 mm,但仍比现在多约73 mm。高原隆升前,降水与现在相比变化最大的是冬季,其次是夏季,秋季最少;高原隆升至临界高度时,降水与现在相比变化最大的是冬季和春季,而夏季降水已经基本上与现在相当<sup>[105-106]</sup>。

## 3.2 人类活动对黄河流域气候产生影响

人类活动也是流域气候变化的一个重要原因,城市化、气溶胶增加、大气化学成分变化、土地利用类型改变、水资源开发利用等都可能对区域气候变化产生影响。IPCC第五次评估报告<sup>[7]</sup>指出,自1750年以来,化石燃料燃烧、土地利用及水泥制造等导致大气中温室气体尤其是二氧化碳的浓度持续增加,人类活动对气候变化的驱动因素占据了更加主导地位。而黄河流域人口众多,是中国重要的经济发展地带,近60年来随着人口增长,城镇化、工业化、农业现代化的快速发展,流域大气成分和土地利用覆盖等发生了明显变化,人类活动成为影响黄河流域局地气候的重要因子。

人类活动对区域水储量有间接影响,主要体现在各种人类活动导致区域内的土地利用类型和植被覆盖率发生变化,人口增加和经济发展带来引黄用水量剧增,进而影响到陆地水储量的正常状态。大规模的基础建设活动和生态环境保护工程会在一定程度上引起流域内的土地利用类型和植被覆盖率发生较大改变,进而影响到整个流域水文循环交互过程<sup>[107-108]</sup>。流域内长期的“退耕还林”生态环



境保护工程会显著提高流域的植被覆盖率,造成流域蒸散量增加,并最终导致流域内的水储量序列呈现显著下降趋势,而流域内实施的植树造林等生态保护措施则在流域水储量变化过程中发挥着不可忽视的重要作用<sup>[109]</sup>。

## 4 未来气候变化趋势及应对举措

### 4.1 未来气候变化趋势

通过CMIP5多模式的模拟,在不同碳排放情景下,未来黄河流域气温持续上升,降水总体可能增多,但对降水变化预估的不确定性较大,蒸发量增加,相对于1971—2010年,未来30年黄河流域气温将上升1.2—1.5℃,降水增幅在6%左右<sup>[110-111]</sup>;最高、最低气温上升1.0、1.6℃,日最高气温、日最低气温、暖昼天数呈现增加趋势,极端降水事件发生概率相对增加且强降水概率增加较大的地区在黄河中游<sup>[112-113]</sup>。黄河源头及宁夏内蒙古河段升温幅度较大;黄河源头降水以增多或减少幅度较小为主,中游下段及下游地区降水以减少为主<sup>[114]</sup>。

未来黄河流域湿润事件的影响范围和重现期大于干旱事件,流域遭受涝灾的可能性较大;流域发生极端湿润事件的频率较高,将由低旱易涝状态转变为低旱低涝状态<sup>[115]</sup>。未来一段时间(2040—2060年),唐乃亥、头道拐、三门峡、利津等水文站的径流量均呈增加趋势,洪涝灾害发生的概率有增加的趋势,但增加幅度随着时间推移逐渐减小,长期呈现下降趋势。土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change,LUCC)在现状持续情景下会增加未来发生洪涝灾害的可能性,春季径流量比例呈下降趋势,增加了春季干旱的风险,冬季径流量比例有增大的趋势<sup>[113,116]</sup>。曹丽娟等<sup>[117]</sup>指出,流域径流年变率增大,月变率减小,日变率在头道拐站以上流域减小,以下流域增大。中游地区发生流域洪水的风险在夏季月份减少,其余月份均增大。黄河流域未来水资源量可能会略微偏少,流域水资源供需矛盾可能进一步加剧;黄河上游地区未来气候和水文变化趋势与黄河流域基本一致,但未来年径流量变幅低于黄河流域,相对比较稳定<sup>[110-111]</sup>。

未来黄河上游气温升高、降水增多,将对冰川、积雪、冻土、生态系统等产生重要影响,并将进一步影响径流、水资源及生态环境的变化。中游气温持续升高,强降水增加,水土流失防治难度艰巨。下

游气温继续升高、干旱加剧,极端强降水增多。

### 4.2 应对气候变化的举措

#### 4.2.1 提高黄河流域气象灾害的预报预警能力

气象灾害的发生并不是某个因素造成,而是由于受到综合因素的作用,多种因素造成地质灾害问题的产生,而降水是当前造成中国地质灾害问题的一个重要因素,所以要加强黄河流域极端强降水的预报预警能力,在发展黄河流域数值预报模式的同时,不断探究其产生的机理。单纯的降水并不是引发地质灾害问题的唯一因素,这就需要在不断提高气象灾害预报工作质量的同时,建立跨部门、跨行业、上中下游协调统一的黄河流域气象、水文、生态、冻土、地质、环境观测与数值预报预警及防控一体化的灾害预报预警系统,提升气象灾害风险管理能量。

#### 4.2.2 加强流域水资源的管理调配和有效利用

黄河流域水资源量仅占全国的2%,却承担全国12%的人口供水、全国15%的耕地面积用水任务,水资源供需矛盾极为突出。在这种严峻形势下,迫切需要加强流域水资源保护与水土流失治理,加大节水型社会建设力度,加强洪水风险管理,严格水资源管理制度,提高水资源利用效率和效益。其次,打造流域上中下游云水资源统筹协调开发区,缓解水资源压力。加强黄河流域人工影响天气能力建设,实施流域云水资源综合协调开发利用工程,合理开发利用空中云水资源,增加流域降水量,突破黄河流域生态保护和高质量发展中的水资源短缺瓶颈。

#### 4.2.3 加强流域生态环境保护,严守生态红线

加强生态环境保护,要把尊重气候规律、适应气候变化、保护气候环境融入生态文明理念中。严守生态红线,保护稀缺资源,加强黄河流域自然保护区、森林草原保护区、水源涵养区和湿地保护区实施重大生态保护修复和建设工程,保护森林草原植被,提升水源涵养能力;加快传统畜牧业发展方式转变,全面推行禁牧休牧轮牧、以草定畜等制度,防治草场退化,加大草原综合治理和重点区段沙漠化防治力度,提升水源涵养能力,防治土壤侵蚀,加大对生态文化旅游业的扶持力度,促进牧区经济发展、生态与经济深度契合,实现生态修复和建设可持续发展。



## 5 结论

近60年,黄河流域气温呈现明显上升趋势,上游升温速率最大,冬季升温最为显著,降水上游地区增多,中下游地区减少,流域秋季降水增加,春、夏季减少,蒸散量总体呈下降趋势,增加区域集中在上游地区。

受气候变化和人类活动的共同影响,近60年来,黄河流域径流量整体呈下降趋势,源区冰川积雪消融加剧,冻土严重退化,流域植被覆盖整体呈好转趋势,上游脆弱区和中游产沙区水土流失加重,对农业的影响利弊皆存。流域气候变暖,极端天气气候事件增多,对文化遗产安全保存带来巨大挑战。

黄河流域气候系统随时间演变的过程不仅受自身内部的动力、热力影响,也受外部强迫因子的影响,大气圈中的环流异常、海洋圈中ENSO循环、青藏高原的动力、热力作用的综合作用等,都会引起一定程度的气候变化,同时人类活动造成的大气成分和土地利用覆盖的变化是影响黄河流域局地气候的重要因子。

未来黄河流域气候变化趋势依然复杂,气温继续上升,降水波动增加,极端天气事件发生更加频繁,将对冰川、积雪、冻土、生态系统等产生重要影响,并将进一步影响径流、水资源及生态环境的变化。

未来对黄河流域的研究,一方面需关注黄河流域和典型区域气候变化的研究及影响评估,另一方面随着中国极端天气气候事件的增多,针对流域极端事件的研究还不多见,需加强流域极端天气气候发生机理、风险评估与应对研究,减轻极端事件带来的危害。同时也要关注全球变暖背景下,黄河流域各区域对气候变化的响应,加强地表过程对区域气候和水循环多尺度影响及流域生态脆弱性的研究。

## 参考文献:

- [1] 张镭,黄建平,梁捷宁,等.气候变化对黄河流域的影响及应对措施[J].科技导报,2020,38(17):42-51.
- [2] 马佳宁,高艳红.近50年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析[J].高原气象,2019,38(1):124-135.
- [3] 黄建平,张国龙,于海鹏,等.黄河流域近40年气候变化的时空特征[J].水利学报,2020,51(9):1048-1058.
- [4] 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.
- [5] Ding Y.Sustainable management and action in China under the increasing risks of global climate change [J]. Engineering, 2018,4(3):301-305.
- [6] 孟宪红,陈昊,李照国,等.三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J].高原气象,2020,39(6):1133-1143.
- [7] IPCC.Climate change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge,UK:Cambridge University Press,2013.
- [8] 刘勤,严昌荣,何文清.黄河流域干旱时空变化特征及其气候要素敏感性分析[J].中国农业气象,2016,37(6):623-632.
- [9] 张克新,董小刚,廖空太,等.1960-2017年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与ENSO的相关性分析[J].水土保持研究,2020,27(2):185-192.
- [10] 王建国.黄河流域气候变化评估报告[M].郑州:河南科学技术出版社,2021.
- [11] [http://www.yrcc.gov.cn/hhyl/hhgk/hd/lyfw/201108/t20110814\\_103452.html](http://www.yrcc.gov.cn/hhyl/hhgk/hd/lyfw/201108/t20110814_103452.html)
- [12] 马柱国,符淙斌,周天军,等.黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J].中国科学院院刊,2020,35(1):52-60.
- [13] 刘勤,严昌荣,张燕卿,等.近50年黄河流域气温和降水量变化特征分析[J].中国农业气象,2012,33(4):475-480.
- [14] 赵建华,刘翠善,王国庆,等.近60年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):1-5.
- [15] 常军,王永光,赵宇,等.近50年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J].高原气象,2014,33(1):43-54.
- [16] 肖凤劲,徐雨晴,黄大鹏,等.气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策[J].人民黄河,2021,43(1):10-14,52.
- [17] 吴灿,赵景波,王格慧.黄河流域极端气温指数的气候演变特征分析[J].中国农业气象,2015,36(5):525-535.
- [18] 刘彩红,王朋岭,温婷婷,等.1960-2019年黄河源区气候变化时空规律研究[J].干旱区研究,2021,38(2):293-302.
- [19] 王芸,赵鹏祥.黄河流域极端气候事件的时空变异特征研究[J].西北农林学报,2021,36(3):190-196.
- [20] 左洪超,李栋梁,胡隐樵,等.近40a中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系[J].科学通报,2005,50(11):1125-1130.
- [21] 李明,孙洪泉,苏志诚.中国西北气候干湿变化研究进展[J].地理研究,2021,40(4):1180-1194.
- [22] Roderick M L, Farquhar G D.The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 2002, 298 (5597): 1410-1411.
- [23] 马雪宁,张明军,王圣杰,等.“蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J].地理学报,2012,67(5):645-656.
- [24] 卓莹莹,赵慧霞,魏敏,等.近59a黄河流域蒸发量变化规律及影响因素[J].人民黄河,2021,43(7):28-34.
- [25] 郑子彦,吕美霞,马柱国.黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J].中国科学院院刊,2020,35(1):61-72.
- [26] 童瑞,杨肖丽,任立良,等.黄河流域1961—2012年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J].水资源保护,2015(3):

- 16–21.
- [27] Ma X, Zhang M, Li Y, et al. Decreasing potential evapotranspiration in the Huanghe River Watershed in climate warming during 1960–2010[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(6): 977–988.
- [28] 刘勤, 严昌荣, 赵彩霞, 等. 黄河流域日潜在蒸散量变化及气象敏感要素分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17): 157–166.
- [29] She D, Xia J, Zhang Y. Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in the middle reaches of Yellow River Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 1151.
- [30] 郭梦瑶, 余敦先, 张利平, 等. 渭河流域潜在蒸散量变化的气候归因[J]. *资源科学*, 2020, 42(5): 907–919.
- [31] 李林, 申红艳, 戴升, 等. 黄河源区径流对气候变化的响应及未来趋势预测[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1261–1269.
- [32] 周德刚, 黄荣辉. 黄河源区水文收支对近代气候变化的响应[J]. *科学通报*, 2012, 57(15): 1345–1352.
- [33] 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(5): 327–334.
- [34] Pei T, Wu X, Li X, et al. Seasonal divergence in the sensitivity of evapotranspiration to climate and vegetation growth in the Yellow River Basin, China: sensitivity of Evapotranspiration[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(1): 103–118.
- [35] Kong D, Miao C, Wu J, et al. Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River Basin from 1951 to 2012[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 566–573.
- [36] Chang J, Wei J, Wang Y, et al. Precipitation and runoff variations in the Yellow River Basin of China[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2016, 19(1): 138–155.
- [37] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 155–163.
- [38] 孙卫国, 程炳岩, 李荣. 黄河源区径流量与区域气候变化的多时间尺度相关[J]. *地理学报*, 2009, 64(1): 117–127.
- [39] 胡娟萍. 黄河中游径流量演变特征及其对气候变化的响应[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [40] 潘彬, 韩美, 倪娟. 黄河下游近50年径流量变化特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 122–127.
- [41] 刘希胜, 李其江, 段水强, 等. 黄河源径流演变特征及其对降水的响应[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1721–1730.
- [42] 侯冰飞. 黄河源区气候变化与径流补给的关联性分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [43] 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): 57–67.
- [44] 贾昊, 穆兴民, 赵广举, 等. 不同频率黄河上中游径流量变化特征及其趋势预测[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 60–65.
- [45] 刘晓娇, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 黄河源区积雪变化特征及其对春季径流的影响[J]. *高原气象*, 2020, 39(2): 16–23.
- [46] 王婷, 李照国, 吕世华, 等. 青藏高原积雪对陆面过程热量输送的影响研究[J]. *高原气象*, 2019, 38(5): 920–934.
- [47] Qin D H, Liu S Y, Li P J. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in Western China[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(9): 1820–1833.
- [48] 李丽, 郝振纯, 王加虎. 黄河河源区积雪变化及影响因素分析[J]. *人民黄河*, 2009, 31(5): 72–73, 76.
- [49] 蒋宗立, 刘时银, 郭万钦, 等. 黄河源区阿尼玛卿山典型冰川表面高程近期变化[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 231–237.
- [50] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应[J]. *山地学报*, 2004, 22(3): 278–285.
- [51] 金姗姗, 付姣. 基于多时相 Landsat TM/ETM 的阿尼玛卿山冰川变化监测[J]. *北京测绘*, 2013(1): 20–23.
- [52] 马帅, 盛煜, 曹伟, 等. 黄河源区多年冻土空间分布变化特征数值模拟[J]. *地理学报*, 2017, 72(9): 1621–1633.
- [53] 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 10–17.
- [54] 李静, 盛煜, 吴吉春, 等. 黄河源区冻土分布制图及其热稳定性特征模拟[J]. *地理科学*, 2016, 36(4): 588–596.
- [55] 盛乃宁, 鞠琴, 顿珠加措, 等. 黄河源区冻土变化特征及其与温度的关系[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210629.1351.006.html>.
- [56] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应[J]. *山地学报*, 2004, 22(3): 278–285.
- [57] 张森琦, 王永贵, 赵永真, 等. 黄河源区多年冻土退化及其环境反映[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(1): 1–6.
- [58] 张中琼, 吴青柏. 气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 505–511.
- [59] 王莺, 李耀辉, 孙旭映. 气候变化对黄河源区生态环境的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(4): 539–551.
- [60] 颜明, 贺莉, 王随继, 等. 基于NDVI的1982–2012年黄河流域多时间尺度植被覆盖变化[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(3): 86–94.
- [61] 张亚玲, 苏惠敏, 张小勇. 1998–2012年黄河流域植被覆盖变化时空分析[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 597–602.
- [62] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000–2010年黄河流域植被覆盖时空变化分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798–7806.
- [63] 张佳琦, 张勃, 马彬, 等. 三江平原NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(3): 206–213.
- [64] 刘昌明, 李艳忠, 刘小莽, 等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. *人民黄河*, 2016, 38(10): 7–12.
- [65] 张懿铨, 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.
- [66] 胡光印, 金会军, 董治宝, 等. 黄河源区土地利用/覆盖变化(LUCC)研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 573–581.
- [67] 杨一鹏, 郭烁, 黄琦, 等. 黄河源头地区土地覆盖的时空变化特征[J]. *生态科学*, 2013(1): 98–103.
- [68] 刘启兴, 董国涛, 景海涛, 等. 2000–2016年黄河源区植被NDVI变化趋势及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 92–98.
- [69] 杜际增, 崔保山, 隋皓辰. 气候变化背景下青藏高原核心区植被变化的时空特征[J]. *环境生态学*, 2019, 1(8): 10–20.

- [70] 裴志林, 杨勤科, 王春梅, 等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2019(3): 546-555.
- [71] 张艳芳, 吴春玲, 张宏运, 等. 黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征[J]. 山地学报, 2017(2): 142-150.
- [72] 何爱平, 安梦天. 黄河流域高质量发展中的重大环境灾害及减灾路径[J]. 经济问题, 2020(7): 1-8.
- [73] 高云飞, 张栋, 赵帮元, 等. 1990-2019年黄河流域水土流失动态变化分析[J]. 中国水土保持, 2020, 10: 64-67.
- [74] 高歌, 韩振宇, 殷水清, 等. 黄河流域1961~2017年降雨侵蚀力特征与未来变化预估[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 575-590.
- [75] 张强, 邓振镛, 赵映东, 等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [76] 王润元. 中国西北主要农作物对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [77] 孙新素, 龙致炜, 宋广鹏, 等. 气候变化对黄淮海地区夏玉米-冬小麦种植模式和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2476-2487.
- [78] 余卫东, 赵国强, 陈怀亮. 气候变化对河南省主要农作物生育期的影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(1): 9-12.
- [79] 霍治国, 李茂松, 王丽, 等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1926-1934.
- [80] 杨菁. 气象环境监测与室外文物保护[C]. 中国文物保护技术协会学术年会.
- [81] 白玛央宗, 珠杰桑布, 何蓓蓓. 简述几种气象因素对札达县文物保护的影响[J]. 农家参谋, 2020(12): 189, 214.
- [82] 田金英. 气象因素温湿度对文物影响的探讨[J]. 故宫博物院院刊, 1996(3): 89-91.
- [83] 秦华赟. 莫高窟洞窟湿度特征分析及预测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [84] 谢娜. 潮湿环境下古文化遗址保护措施研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [85] 刘乃君, 王立, 芦维忠, 等. 麦积山风景名胜区水土流失防治探讨[J]. 中国水土保持, 2013(11): 35-37, 38.
- [86] 王江丽, 闫增峰. 强降雨天气下的莫高窟洞窟环境调控方案初步研究[J]. 建筑与文化, 2014(3): 62-65.
- [87] 朱锦红, 王绍武, 慕巧珍. 华北夏季降水80年振荡及其与东亚夏季风的关系[J]. 自然科学进展, 2003, 13(11): 1205-1209.
- [88] Xu J X. Temporal variation in summer monsoon intensity since 1873 and its influence on runoff in the drainage area between Hekouzen and Longmen, Yellow River basin, China [J]. Climate Change, 2012, 112(2): 283-938.
- [89] Xu J X, Ma Y X. Response of the hydrological regime of the Yellow River to the changing monsoon intensity and human activity [J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54(1): 90-100.
- [90] 张存杰, 谢金南, 李栋梁, 等. 东亚季风对西北地区干旱气候的影响[J]. 高原气象, 2002, 21(2): 193-198.
- [91] 赵汉光, 吕灿九. 盛夏副高脊线位置的变化规律及其成因分析[J]. 气象, 1992, 21(5): 3-8.
- [92] 张素琴, 林学椿. 副高持续异常对长江中下游夏季降水的影响[J]. 气象, 2000(5): 27-31.
- [93] 王秀荣, 王维国, 刘还珠, 等. 北京降水特征与西太副高关系的若干统计[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 822-829.
- [94] 俞亚勋, 王式功, 钱正安, 等. 夏半年西太副高位置与东亚季风雨带(区)的气候联系[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1510-1525.
- [95] 海显莲, 祁得兰, 扎西才让. 2005年秋季青海东部两次连阴雨天气对比分析[J]. 青海气象, 2007, 1(1): 26-28.
- [96] 王劲松. 近100年来中东干旱区对全球变暖的区域气候响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [97] 周丹, 张勃, 安美玲, 等. 黄河流域不同时间尺度干旱对 ENSO 事件的响应[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 753-762.
- [98] 杨东, 王慧, 程军奇, 等. 近50年青海省气候变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 547-553.
- [99] 张雯, 董啸, 薛峰. 2020. 不同 PDO 位相下 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风的季节内变化[J]. 大气科学学报, 44(2): 390-406.
- [100] 周俊前, 刘新, 李伟平, 等. 青藏高原春季地表感热异常对西北地区东部降水变化的影响[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 845-853.
- [101] 白玛央宗, 奚凤, 扎西央宗. 青藏高原地面感热异常对西北地区东部夏季降水的影响[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(2): 17-22.
- [102] 李潇, 李栋梁, 王颖. 中国西北东部汛期降水对青藏高原东部春季感热在准3a周期上的响应[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 737-748.
- [103] 李栋梁, 谢金南, 赵仲莲, 等. 中国西北夏季气温变化及其对青藏高原地面感热异常响应的诊断与数值试验[J]. 气候与环境研究, 1997(4): 56-65.
- [104] 陈少勇, 王劲松, 邢晓宾, 等. 青藏高原 OLR 异常与中国西北干旱区气温的关系[J]. 干旱气象, 2011, 29(3): 276-282.
- [105] 范广洲, 程国栋. 青藏高原隆升对西北干旱气候形成影响的模拟(II): 水汽收支及高原动力、热力作用的影响[J]. 高原气象, 2003(增刊1): 58-66.
- [106] 范广洲, 程国栋. 青藏高原隆升对西北地区降水量变化的影响[J]. 高原气象, 2003, 32(增刊1): 67-74.
- [107] 王昊. 水资源约束下黄河流域主体功能实现的多目标优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [108] 谢京凯. 气候变异和人类活动对黄河流域水储量变化的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [109] Lv M X, Ma Z G, Li M X, et al. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the grain for green program in the Yellow River Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(3).
- [110] 康丽莉, Leung L. Ruby, 柳春, 等. 黄河流域未来气候-水文变化的模拟研究[J]. 气象学报, 2015, 73(2): 382-393.
- [111] 王国庆, 乔翠平, 刘铭璐, 等. 气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 1-8.
- [112] 温跃修. 黄河流域未来极端气候变化及对中游洪水事件的影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [113] 魏洁, 畅建霞, 陈磊. 基于 VIC 模型的黄河上游未来径流变化



- 分析[J].水力发电学报,2016,35(5):65-74.
- [114] 王国庆,张建云,金君良,等.基于RCP情景的黄河流域未来气候变化趋势[J].水文,2014,34(2):8-13.
- [115] 张瑞涵,高涵.气候变化条件下黄河流域的旱涝特征[J].西安理工大学学报,2020,36(3):323-329.
- [116] Ji G, Lai Z, Xia H, et al. Future runoff variation and flood disaster prediction of the Yellow River Basin based on CA-Markov and SWAT[J]. Land, 2021, 10: 421.
- [117] 曹丽娟,董文杰,张勇.未来气候变化对黄河和长江流域极端径流影响的预估研究[J].大气科学,2013,37(3):634-644.

## Review of climate change in the Yellow River Basin

Wang Youheng<sup>1</sup>, Tan Dan<sup>2</sup>, Han Lanying<sup>1</sup>, Li Danhua<sup>1</sup>, Wang xin<sup>1</sup>, Lu Guoyang<sup>1</sup>, Lin Jingjing<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China; 2. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** The Yellow River Basin is an important part of ecological security strategy in China, and it is a sensitive area of climate change and a vulnerable area of ecological environment. This paper mainly analyzes and reviews the latest research progress on the characteristics, impacts, causes and countermeasures of climate change in the Yellow River Basin: (1) In recent 60 years, the temperature shows an upward trend, with an average warming rate of 0.30 °C per decade, and the trend of temperature rise is the most significant in winter and the smallest in summer. The precipitation in the upstream increased, while that in the middle-stream and lower-stream decreased significantly. (2) In recent years, under the joint influence of climate change and human activities, a series of problems have appeared in the Yellow River Basin, such as the reduction of runoff, the degradation of glaciers and frozen soil, the improvement of vegetation coverage, the increase of soil erosion in the ecological fragile areas of upstream and sand-producing areas of the middle-stream. The impact of climatic change on the crops is not only of advantageous aspects but also of disadvantageous, and the pests and diseases increase. The climate warming and the increase of extreme events have brought great challenges to the safe preservation of cultural heritage. (3) The evolution process of climate system in the Yellow River Basin is not only affected by its own internal power and heat, but also by external forcing factors such as atmospheric circulation, sea surface temperature and Qinghai Tibet Plateau. The change of atmospheric composition and land use/cover caused by human activities is an important factor affecting the local climate. (4) In the future, the temperature will still show an upward trend, the precipitation fluctuation will increase, and extreme weather events will occur more frequently in the Yellow River Basin. It is necessary and urgent to take adaptive measures to deal with climate change. These measures mainly include strengthening the scientific research on the impact of climate change and extreme events, improving the ability of forecasting and early warning of extreme weather events, establishing a disaster forecasting and early warning system integrating meteorology, hydrology, ecology, numerical prediction, prevention and control, strengthening the management, allocation and effective utilization of water resources, strengthening the protection of ecological environment, formulating scientific and reasonable agricultural development strategy, and promoting the high-quality development of the Yellow River Basin.

**Key words:** climate change; impact; cause; response; Yellow River Basin