

# 气候变化对黄河流域的影响及应对措施

张镭<sup>1,2</sup>, 黄建平<sup>1,2\*</sup>, 梁捷宁<sup>1</sup>, 于海鹏<sup>1</sup>, 管晓丹<sup>1</sup>, 马金珠<sup>3</sup>, 沈禹颖<sup>4</sup>, 邓建明<sup>5</sup>, 黄宁<sup>6</sup>, 孟兴民<sup>7</sup>, 王澄海<sup>1</sup>, 李常斌<sup>3</sup>, 牟翠翠<sup>3</sup>, 巩杰<sup>3</sup>, 张帆宇<sup>6</sup>

1. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000
2. 兰州大学西部生态安全省部共建协同创新中心, 兰州 730000
3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000
4. 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730000
5. 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000
6. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000
7. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000

**摘要** 分析了全球气候变化对黄河流域区域气候、水资源量、生态格局、农业牧业生产、地质灾害、文物保护的影响, 阐述了应对研究的主要进展及存在的主要问题, 探讨了气候变化对黄河流域影响的未来趋势, 提出了进一步研究工作的建议: 即统筹建设黄河流域气象、水文、环境、地质灾害观测和预报预警系统; 厘清多因素影响下的流域水资源时空过程, 提升流域水资源效能; 调整坡耕地和生态用地, 加强流域水源涵养能力; 加强植物生理生态适应性研究, 优化流域农业和草业布局; 修订文化遗产赋存环境区划, 进行预防性保护技术研发; 加强流域黄土滑坡加固新材料和生态修复协同技术研究。

**关键词** 黄河流域; 气候变化; 影响和应对; 水资源; 生态格局

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓, 海拔高度 4500 m 的约古宗列盆地, 全长 5464 km, 是中国第二长河。黄河流域是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道, 拥有多个国家公园和国家重

点生态功能区。黄河流域在中国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。新中国成立后, 中国共产党领导人民开创了治黄事业新篇章, 创造了黄河岁岁安澜的历史奇迹。习近平总书记

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-07-13

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(41521004); 国家发改委地区司委托专题

作者简介: 张镭, 教授, 研究方向为大气物理与大气环境, 电子信箱: zhanglei@lzu.edu.cn; 黄建平(通信作者), 教授, 研究方向为气候变化, 电子信箱: hjp@lzu.edu.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.17.004

2019年9月在河南省考察期间的重要讲话,深刻阐明黄河流域生态保护和高质量发展的重大意义,做出加强黄河治理保护、推动黄河流域高质量发展的重大部署。黄河流域生态保护和高质量发展成为重大国家战略。为保障该战略的实施,亟需厘清全球气候变化对黄河流域影响,探索应对措施。

对在全球气候变化对黄河流域区域气候、水资源量、生态格局、农业牧业生产、地质灾害、文物保护的影响及其应对相关问题,国内外已经有一些不同程度的研究,但是总体而言,针对性和深度都不够。特别是气候变暖导致黄河上游冰川退缩、冻土融解、草原退化,进而对生态系统特别是地表径流量的影响等方面研究仍存在不足。

黄河流域大部分属于干旱、半干旱区,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。在全球气候变化背景下,黄河流域区域气候、水资源量、生态格局、农业牧业生产、地质灾害、文物保护受到哪些影响,应如何应对?气候变暖导致黄河上游冰川退缩、冻土融解、草原退化,进而对生态系统特别是黄河流域水量的影响如何?一系列问题值得进一步深入研究。

## 1 黄河流域气候变化影响研究背景和现状

### 1.1 全球气候变暖背景下的黄河流域气候变化

在全球增温的背景下,近百年来干旱半干旱区的增温最为显著,不同气候区的增温存在显著差异<sup>[1-3]</sup>。通过量化不同气候区温度变化在全球增温中的表现,发现北半球中高纬度干旱半干旱地区的增温在全球温度变化中最为明显,其对全球增温的贡献近50%。通过追踪过去百年不同季节的变化特征,发现1901—2009年北半球中高纬地区在全年、暖季及冷季的增温分别为1.33、0.85、1.89℃,表明干旱半干旱区在冷季的增温最为显著。不同典型干旱半干旱区的增温差异显著,欧洲、亚洲和北美中高纬度半干旱区的暖季增温分别为0.95、0.68、1.05℃,冷季增温分别为1.41、2.42、1.50℃,可见亚洲半干旱区的冷季增温大于北美半干旱区,呈

现出更为显著的增温趋势。

伴随着全球增温背景<sup>[4-5]</sup>,陆地降水也发生显著变化,且存在显著区域差异。过去半个世纪,非洲和东亚地区的降水显著减少,北美和欧洲部分地区降水则呈现增加趋势<sup>[6]</sup>;中国东部呈现南涝北旱,北方呈现西部降水增多、东部降水减少的空间格局。中国西北干旱半干旱地区正由暖干型向暖湿型转变,年降水和季节降水显著增加<sup>[7-8]</sup>,但温度升高削弱了这种变湿趋势<sup>[9-10]</sup>。

近年来,随着人口增加和灌溉面积扩大,中国干旱半干旱区地下水系统被长期超采并表现出明显的不可持续特征<sup>[11]</sup>。其中,石羊河流域的补给主要靠降水,地下水位自1971年以来总体加速下降,19世纪80年代平均地下水埋深为13.8 m,21世纪初达18.9 m<sup>[12]</sup>;1980—2000年民勤绿洲地下水埋深下降了6.6 m<sup>[13]</sup>;黑河流域地下水位1980—1990年、1991—2000年和2000—2010年分别下降了0.55、1.43、1.4 m<sup>[14]</sup>;疏勒河流域地下水持续下降,且湿地萎缩、植被退化严重<sup>[15]</sup>。新疆的塔里木河、马阿斯河、渭干河-库车河、艾比湖等流域均有类似的变化特征。

黄河流域内多年平均气温7℃,空间分布总体特征是东高西低,南高北低。气温以0.32℃/10a的倾向率升高:19世纪50—70年代,黄河流域气温比较稳定,19世纪80年代以后整个流域的气温呈上升趋势,19世纪90年代升温明显加快,1990—2010年比1961—1989年平均温度升高0.9℃。全流域各季节平均气温均呈显著增加趋势,其中冬季升温最明显,升温速率为0.52℃/10 a,冬季有暖湿化趋势,春季上游有暖湿化趋势,而秋季中游则出现暖干化趋势<sup>[16]</sup>。

黄河流域多年平均降水量约为440 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;降水量总体以-10.7 mm/10 a的趋势减少,中游减少最为显著,在山西、陕西和河南境内减少速率达-20.0~45.9 mm/10 a,而上游降水量增加;除冬季外,春、夏和秋季的降水量都呈减少趋势,特别在秋季减少最显著<sup>[16-17]</sup>;从年代际尺度来看,21世纪以来,黄河上游兰州以上、石

嘴山到龙门区间、渭河流域等的降水量高于多年均值,降水转丰<sup>[18]</sup>。

## 1.2 气候变化对黄河流域水资源量的影响

黄河源于青藏高原的巴颜喀拉山,干流贯穿了9个省区。流域面积75万km<sup>2</sup>,年径流量为574亿m<sup>3</sup>,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m<sup>3</sup>(1956—2000年),其中地表水资源量534.78亿m<sup>3</sup>,与地表水资源不重复的地下水资源量103.59亿m<sup>3</sup>。2001—2017年水资源总量比多年平均值(1956—2000年平均值)减少了8.7%,天然径流量比多年平均值减少了13.9%。其中,中游径流量减少最显著,尤其是2000—2010年的径流量不到1919—1985年平均径流量的35%<sup>[19]</sup>。2002—2012年径流量波动增加,增加速率约为3.2亿m<sup>3</sup>/a。

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m<sup>3</sup>,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km<sup>2</sup>,约占黄河流域面积的8%,最大积雪面积达10.75万km<sup>2</sup>,占黄河流域面积的14%。2008—2016年流域内积雪范围以6000 km<sup>2</sup>/a的速率显著减少。自1992年以来,黄河流域年总雪水当量在以5.77亿m<sup>3</sup>/a的速度减少,相当于每年减少黄河利津站年径流量的1.1%,即1992年以来积雪融水总减少量相当于黄河利津水文站的多年平均径流量的3.2倍。

1960—2010年,整个黄河流域冰川面积从171.2 km<sup>2</sup>减少到126.7 km<sup>2</sup>,冰川面积减少了26.0%;冰储量从113亿m<sup>3</sup>减少至85亿m<sup>3</sup>,减少了24.8%。其中冷龙岭地区退缩较为剧烈,1972—2016年,冰川面积减少39.8%,并伴随着大量小冰川的消失,冷龙岭地区冰川将在21世纪中期消亡80%以上<sup>[20]</sup>。冰川融水对黄河年补给量约3.9亿m<sup>3</sup>,占黄河出山径流的1.9%,而在冰川集中发育的切木曲和曲什安河,冰川融水占整个径流量的74%,冰川退缩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。

黄河流域多年冻土区面积约 $8.6 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,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介于10~250 cm。多年冻土地下冰对黄河年补给量约25.8亿m<sup>3</sup>(30 mm/a),占黄河利津站年总径流量(按534.78亿m<sup>3</sup>计算)的4.8%。黄河流域季节性冻土变化明显,表现为多年冻土区活动层厚度以0.83 cm/a速率加深和季节冻土区土壤冻结深度以0.58 cm/a速率降低。冻土退化导致了高寒草地、高寒草甸与沼泽湿地大面积的退化,同时影响地表径流产流和汇流过程,加速土壤侵蚀过程,严重影响黄河流域水资源与安全。

黄河流域大部分地域雨水同季,气候变化对流域水资源的形成、分布和转化影响显著,流域水资源的时空分配不均,决定了当前和未来一段时期,黄河流域将仍以水资源“三生”体系的有效支撑统筹各项发展。在气候变暖背景下,增温促进流域蒸散发强度提高,对河川径流形成抑制效应;降水时空变化对流域水资源的形成起关键作用。

## 1.3 气候变化对黄河流域生态格局变化的影响

黄河流域上、中、下游分属不同气候区,地形地貌、植被类型自然分异性造成生态系统的区域差异。在气候变暖背景下,源区出现增温变干趋势,植物需水量增加,同时冻土退化,土壤含水量下降,高寒草地由于水分胁迫加剧而发生退化<sup>[21]</sup>。自1969年起,黄河源区(以达日县吉迈水文站为界)高寒草地退化格局已基本形成,1980年代后期退化速率大幅上升,2000年以来退化速率降低。退化主要表现为覆盖度降低,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。气候变暖影响下的水土流失加重和鼠害猖獗,更加剧了高寒草地退化问题<sup>[21]</sup>。草地重心呈现北移趋势,在北半球尤其明显<sup>[22]</sup>,也将对中国畜牧业产生深远影响。

## 1.4 气候变化对黄河流域农牧业生产的影响

黄河流域日照时间长、平均日照率高、太阳总辐射量多且光热资源充足,农业生产发展潜力大。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 and 地表径流。2015年数据显示,流域内共有

耕地 15.5 万 km<sup>2</sup>, 下游流域外引黄灌区土地面积 6.6 万 km<sup>2</sup>, 有效灌溉面积约 2.5 万 km<sup>2</sup>。其中, 汾渭平原、河套平原和黄淮海平原是《国家主体功能区规划》划定的全国重要粮食主产区。

1980 年以来黄河流域气温总体上升, 冬季尤为突出, 对地区主要粮食作物的分布、种植面积和界限影响明显。对冬小麦生产影响最为显著, 与 1951 年相比, 1981 年冬小麦(尤其是强冬性品种)种植北界在宁夏-甘肃区域北移达 200 km, 种植面积增加 36.24 km<sup>2</sup>, 仍继续不同程度北移, 而由 ≥0℃ 积温界定的作物一年一熟区和一年两熟区边界在陕西省境内较之 1950 年北移约 130 km<sup>[23-24]</sup>。旱作春小麦最优生育期也普遍延长 10 d 以上, 使得该区域可种植生育期更长的晚熟品种, 小麦单产潜力可能提高 10% 以上。气候变化下旱作玉米潜在产量的变异系数高达 0.83, 提升空间可以达到 11909 kg/hm<sup>2</sup>; 若增温 2℃, 旱作豌豆生育期可能将缩短 3~17 d, 产量将减少 6.3%~17.5%, 春小麦-马铃薯轮作系统作物生育期可能将缩短 11~42 d, 产量将减少 3.2%~9.4%。作为区域内广泛种植的多年生深根系优良牧草, 紫花苜蓿具有较强的耐旱能力, 旱作产量随降水量增加而增加, 仅当年降水量低于 300 mm 时才会导致生产力显著降低, 但随气温升高, 其产量呈降低趋势<sup>[25]</sup>。

气候变化造成的降水年际和年内波动是影响黄河流域粮食生产安全的不确定因素。气温升高可降低草地生态系统物种多样性, 降水增多使植物物候期提前, 生长季延长, 并提高草地初级生产力。气候变化对上游天然草地生态系统生产力的影响存在平均为期 2 年的滞后期<sup>[26]</sup>, 而对于干旱半干旱区作物的滞后影响具有更大的不确定性<sup>[27]</sup>。

### 1.5 气候变化对黄河流域文物保护的影响

黄河流域遗存有大量文化遗产, 仅世界遗产就有 5 处, 全国重点文物保护单位 800 余处, 省市级重点文物保护单位更是数量众多。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, 是实现中华民族伟大复兴的历史依据。在全球气候变暖背

景下, 极端天气气候事件增多, 黄河流域中上游降水增多, 沙尘暴、洪水、地下水位、物种入侵、苔藓地衣繁殖等文物风险源发生显著恶化, 进而引起文化遗产赋存环境的改变, 加速文物风化, 给流域内文化遗产安全保存带来巨大的挑战。

### 1.6 气候变化对黄河流域地质灾害影响

黄河中上游是中国地质灾害高发区, 上游地处青藏高原东北缘, 活动断裂分布密集, 新构造运动频繁且剧烈, 加上生态环境脆弱, 使得区域内滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害种类多样、分布范围广、孕成灾机制复杂、发生频率高、危害极为严重, 已占据了我国 1/3 的地质灾害。黄土节理发育、疏松多孔、湿陷性强, 遇水易软化, 是一种极易发生地质灾害的特殊土质, 黄土高原是中国地质灾害分布最广、发生频率极高、危害最严重的区域之一。伴随黄土高原大规模的工程活动扰动, 黄土重大工程潜在的灾变加剧了地质灾害风险。近年来, 在黄河上、中游高山峡谷区修建了大量水电站, 这些地区地质条件复杂, 加上工程对地质环境的扰动, 使水电工程区成为地质灾害的高发区, 地质灾害不仅严重影响水电工程的安全运营, 还成为黄河流域泥沙的重要来源。此外, 水库移民安置对地质环境平衡造成了严重影响, 不断发生重大地质灾害, 例如黄河刘家峡、盐锅峡和八盘峡的黑方台移民安置区, 已产生了 100 多次滑坡灾害, 大量泥沙进入黄河。黄土高原典型沟壑地貌, 滑坡灾害极易形成链生灾害效应, 堵塞沟谷与河道形成堰塞湖, 溃坝对下游产生高的洪水灾害的风险。随着黄土高原极端气候的频发, 更增加了重大地质灾害发生的可能性。

## 2 黄河流域气候变化应对存在的问题

黄河流域横跨多个气候区, 下垫面、植被差异显著, 气象灾害、地质灾害多发, 导致严重经济损失。为了防汛抗旱、防灾减灾, 需要完善黄河流域气象、水文、生态、冻土、地质、环境观测数据资料, 目前这方面资料不能满足需要, 资料同时同地性差, 站点密度不足, 同时缺乏完善的预报预警及防控体系。

### 2.1 气候变暖加剧黄河流域水资源量变化,增加了精确测算的难度

黄河源头水源补给形式主要是高山冰雪融水。由于全球气候变暖,源区冰川退缩、积雪消融、冻土退化等现象十分明显,对区域水源涵养功能构成了严重威胁。同时,近年来由于一系列人为原因,人口大量增长和迁移加重了土地沙化、加快了积雪冰川消融。例如黄河源阿尼玛卿山冰川快速退缩,导致冰川失衡,近10年来发生了3次大规模冰川灾害,严重威胁下游牧民群众的生命和财产安全。

但是目前还不能精确测算黄河流域积雪融水总量、冰川融水和多年冻土区地下冰储量。利用卫星遥感资料估算仍然存在很大的不确定性,还需大量野外实地观测资料验证遥感算法,提高估算精度,为流域水资源估算提供可靠数据支撑,进而解决精确估算积雪、冰川和多年冻土每年能为黄河流域提供多少水资源这个关键核心问题。

季节冻土对地表水文过程和土壤水分有着复杂的影响。地表土层土壤冻结几乎完全隔断了大气与下覆土壤的水分交换,使土壤水分向大气的蒸发减少。近地表土壤冻结层可使下覆土壤水分向冻结层底板迁移并冻结成冰,起到土壤保墒效应。春季积雪融化,由于季节冻土的隔水效应,融雪水不能下渗,使更多的融雪水产生径流。黄河流域内季节冻土厚度的减小和土壤冻结日数的减少使冬季农田土壤保墒效应减弱,直接影响春耕和农牧业产量。如何根据季节冻土的冻融深度变化采取不同的耕作方式,并分析对土壤保墒效应及牧场草原质量和农牧业的可持续发展是重要的实际问题,也是科学问题。

### 2.2 气候变化和流域开发极大影响着黄河流域生态系统格局

近30年来黄河流域呈现明显增温、降雨减少、实际蒸发量增大,中下游径流减少等气候变化特征。快速城镇化、生态保护与修复、水资源开发、农业开发、自然灾害和气候变暖等因素正在影响着黄河流域生态系统格局。目前气候变化对黄河流域生态系统格局的影响研究主要侧重于湿地,涉及其他生态系统类型的研究报道较少。2006年黄河流

域湿地总面积为25134 km<sup>2</sup>,其中,河流、湖泊、沼泽、滨海及人工湿地面积分别占该流域湿地总面积的36.2%、8.0%、45.0%、3.9%、6.9%。流域湿地对气候变化和人类活动的影响反应强烈,随着气候干燥度的增加,湿地率呈明显递减趋势。在气候变化和流域开发影响下,黄河流域湿地退化显著,流域的许多重要生态问题如土地沙化、干支流断流、环境恶化等现象都与湿地退化有关<sup>[28]</sup>。

### 2.3 气候变化对黄河流域农牧业的影响复杂多样

降水年际、年内波动和极端气候的影响,加剧了黄河流域旱作农业生产的脆弱性,播种面积和产量出现较大的变异,当作物产量变异大于20%时,其影响通过市场价格波动放大,对区域粮食安全造成较大潜在威胁。气温上升、CO<sub>2</sub>含量增加联合影响,可以加快作物发育进程,增加经济产量和生物产量,但是这种影响对不同作物表现不同:冬小麦和棉花品质呈良性变化,玉米品质可能下降,大豆品质影响不明显<sup>[29]</sup>。区域暖湿化趋势显著影响农牧产品品质、产量和产值,但对流域的总体影响和局部影响仍有待深入量化评估,以利于区域农牧产业更好地适应和应对气候变化。

### 2.4 气候变化对黄河流域文物保护的影响研究亟待加强

世界各国高度重视气候变化给文物保护带来的挑战,并提出了政策性和技术性的应对方案。相对于国外遗产保护强国(如意大利、英国、德国等),中国在气候变化对区域性文物保护影响的研究工作还处于萌芽状态,尚未提出相应的应对方案和措施。目前对于整个黄河流域的文物分布、数量、类型、保存现状、赋存环境等家底尚未查明,气候变化对整个黄河流域文物保护的影响及其应对研究亟待开展。

### 2.5 气候变化影响下黄河流域地质等灾害防护面临挑战

黄河流域地质灾害存在的主要问题为:(1)重大滑坡灾害活动与气候变化、重大工程活动关系尚不明晰;(2)针对大型滑坡灾害隐患点的早期识别和临灾应急处置技术体系尚未形成;(3)崩、滑、流、陷等地质灾害监测预警研究尚处于初步阶段;

(4) 黄土加固技术和大面积黄土滑坡治理技术比较落后;(5) 缺乏针对黄河流域地质灾害(链)的临灾应急处置技术体系。以上不足严重制约着黄河流域地质灾害减灾防灾的成效与应急抢险救灾的效率,使当前黄河流域的地质灾害研究、生态环境保护 and 长治久安面临着严峻挑战。

### 3 气候变化对黄河流域影响的未来趋势分析

在全球气候变化和人类活动共同影响下,气候总体变暖趋势将持续,区域不均匀性更明显,极端天气、气候事件出现频率增加。至2050年,黄河流域未来地面气温呈升高趋势,变率为 $0.28\sim 0.45^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,冬季升温最明显;黄河流域降水增加约6%,季节差异显著<sup>[30-31]</sup>。例如,黄河潼关以上地区沿岸的降水未来30年总体变化不大,部分站有小的增加趋势,但年内的季节分配变化较大,大多站秋季和冬季降水增加,春季和夏季降水减少,估计未来春旱、春末夏初旱会增加<sup>[32]</sup>。

#### 3.1 气候变化对黄河流域水资源量影响的未来趋势

未来黄河流域内平均径流量呈先增加后减小的趋势。至2050年,平均径流量随时间增加,增幅随时间推移逐减小;长期来看,至2100年随着蒸发量的增加,平均径流量呈下降趋势。如花园口水文站的平均径流量至2050年增加3.4%~7.4%,至2100年则减少3.3%~5.3%。就年内分配来看,径流在冬春季分别增加3.2%~5.8%和13.3%~17.1%,夏季则减少1.3%~5.4%<sup>[31]</sup>。黄河源区的汛期径流量在未来呈下降趋势,至2045年,黄河源区汛期径流年平均减少0.25%,即3.7亿 $\text{m}^3/10\text{ a}$ <sup>[33]</sup>。流域内未来干旱强度和频度都有减弱趋势,其中西北部干旱程度2031—2040年较2021—2030年明显减轻,但黄河流域供水的供需矛盾依然存在<sup>[34]</sup>,黄河中游的中部区域未来缺水风险增加<sup>[35]</sup>。

#### 3.2 气候变化对黄河流域生态、农牧业影响的未来趋势

气候变暖改变了作物生理生态习性,增加了田

间能量输入,提高了黄土高原地区的热量资源,农业生产有效积温提高,部分高海拔山区不仅能种植生育期短的早熟品种,也可以种植中晚熟品种;提高了复种指数,从过去的一年一季,提高到一年两季,有些地区还推动了间套作的发展。随着热量资源的增加,喜温作物及林果药材适宜种植纬度北移。预计2030—2050年,一年一熟制大约可向北推移200~300 km,一年二熟和一年三熟制的北界也将向北推移500 km左右。气候变暖使农田耕作层土壤微生物活性增强,可能会导致土壤有机养分分解速度加速,氮肥分解提高30%,导致地力下降,同时土壤水分蒸发量增加也可能加重土壤盐碱化程度。

在气候变化背景下,受多种社会经济、政策、自然因素、多元文化等共同影响,黄河流域生态系统格局复杂,但目前相关研究报道很少,亟待开展有针对性、系统性、宏观层面、多学科交叉的深入研究。

#### 3.3 气候变化对黄河流域文物保护、地质灾害防护影响的未来趋势

黄河流域内分布有大量珍贵的文化遗产,历史跨度从史前到近现代,这些文化遗产承载着中华民族的发展演变进程,蕴含着生生不息的中华文明。这些文物多为土、木材料所建造,材质脆弱且多已步入老年期,对于气候变化异常敏感,很容易产生损害。如近年来甘肃永靖炳灵寺石窟近年来面临的泥沙严重淤积诱发河水倒灌石窟、青海明长城多次被洪水冲毁以及本体加速风化、石窟落石灾害频发等现象就是突出的反映。

受气候变化影响,黄河流域集中强降雨较多,崩、滑、流、陷等地质灾害发生频率增高,且更易发生各种大型、大范围地质灾害。尤其是在黄土高原地区,地质环境极其脆弱,在气候变化-地质灾害-人类工程活动的共同影响下,极易改变区域的水文环境条件,诱发更多、更广、更大的地质灾害,这必然增加灾害风险与水土流失,导致黄河流域各种水力水电工程的承载力和安全性面临更大的考验。

## 4 气候变化影响的应对建议

### 4.1 应对黄河流域气候变化, 统筹建设黄河流域气象、水文、环境和地质灾害观测与预报预警系统

建议建立跨部门、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平台。针对黄河流域气象灾害、地质灾害多发, 导致经济损失严重的问题, 统筹建设黄河流域气象、水文、环境和地质灾害预报预警系统。整合、补充和完善黄河流域水、土、气、生等监测网络, 全方位、一体化进行气象、水文、冻土、生态和环境要素的观测, 增强数据资料同时同地性, 提高数据资料空间、时间分辨率, 构建完整的和具支撑意义的数据库体系; 发展黄河流域数值预报模式, 通过模式训练不断提高预报预警能力, 开展未来 50 年黄河流域极端天气、气候频率预估; 进行黄河流域强降水和暴雨灾害的暴露度、脆弱性和风险评价; 对黄河流域可能发生的暖干化做出预判; 为流域防洪防旱、防灾减灾提供水文、气象等方面的切实保障, 更好地服务于国家战略。

### 4.2 应对气候变暖对黄河流域水资源量改变, 厘清多因素影响下的流域水资源时空过程, 提升流域水资源效能

加强气候变化与陆地水文过程之间影响-反馈的循环性耦合机理及其对天然水资源形成转化的研究, 厘清多因素影响下的流域水资源时空过程。加强多部门合作和流域水资源综合管理, 通过水资源总体控制和综合开发, 推广包括滴灌和水肥一体化的节水技术, 采取有效措施鼓励农民科学生产, 针对农村土地撂荒问题发展农村专业合作社和特色农业, 保障以粮食体系为核心的流域经济-生态系统安全。充分发挥农业科研院所的作用, 实现节水与开源协调, 以水资源的高效利用引导流域水资源向农牧产品产量效率高的区域配置, 不断提升气候变化背景下流域水资源效能及应对能力。

### 4.3 应对气候变化对黄河流域生态格局的影响, 调整坡耕地和生态用地, 加强流域水源涵养能力

黄河流域雨养型农业占地广, 在退耕还林还草

背景下, 坡耕地和生态用地的调整对坡面产汇流过程的影响, 以及它们对流域水沙过程的正负效应和由此导致的一系列生态环境问题, 关乎流域可持续健康发展, 亟待深入研究。未来气候变化背景下, 陆表生态系统改良和确保一定数量的河川径流之间协同发展, 具体涉及丘陵坡耕地的削减及林草、湿地、水域等生态防护型用地的扩张, 通过有效遏制水土流失和改善区域小气候等增强流域生态系统稳定性, 同时使流域水文过程的下垫面调节朝着有利于区域水源涵养能力稳定和提升的方向发展。

### 4.4 应对气候变化对黄河流域农牧业生产的影响, 加强植物生理生态适应性研究, 优化流域农业和草业布局

加强作物对气候变化和生态环境的生理生态适应性研究。充分利用气候变化给作物生长带来的有利因素, 发挥草类植物营养体生产应对气候变化生态位宽的优势, 在黄河上游开展以草类植物为主的生态环境整理, 进行相适应的作物栽培技术和动植物育种等方面的研究; 改变作物耕作制度和种植方式, 优化农业和草业区域布局, 结合国家“粮改饲”政策, 改变农区传统单一作物耕作制度和种植方式, 引草入田, 采用多元种植系统, 分摊气候变化给作物单一种植模式带来的影响; 减少规模化养殖场的饲养密度, 调整畜牧业结构、发展节粮型的草食家畜。

既关注极端天气灾害对农牧业生产的短期影响, 又重视气候变暖长期影响。针对区域降水和温度变化趋势, 提前制定应对预案, 选育新品种并加强病虫害防治, 促进优势农牧产品向优势产区集中, 降低气候灾害损失。

### 4.5 应对气候变化对黄河流域文物保护的影响, 修订文化遗产赋存环境区划, 进行预防性保护技术研发

气候变化背景下, 洪涝、干旱、地质等灾害发生的广度和频度提升, 适应性文物保护和抢救愈显紧迫。建议全面梳理黄河流域文化遗产分布、类型、保护利用和管理现状, 修订黄河流域文化遗产赋存环境区划; 基于气候脆弱指数评估文化遗产风险程度与趋势, 制定相应区划; 结合气候变化影响评估

成果,开展极端天气气候、大气污染驱动下的自然灾害链(如强降雨-崩塌、滑坡、泥石流等)对文化遗产影响及其治理研究,开展岩土质不可移动文物的加速劣化机制及控制技术研究,开展各类馆藏文物的预防性保护技术研发;编制气候变化背景下文化遗产风险转移的短期与长期规划报告。

#### 4.6 应对气候变化对黄河流域地质灾害防护的影响,加强流域黄土滑坡加固新材料和生态修复协同技术研究

在气候变化背景下,极端天气事件增多,加上人为影响,各类地质灾害相应增多。黄河流域中下游以黄土类沉积为主,建议加强对湿陷性黄土和黄土滑坡加固新材料和生态修复协同技术的研究,建立黄土地质灾害(链)监测预警和应急处置技术体系,为黄河流域防灾减灾,特别是临灾应急应对和抢险救灾提供科学依据和技术支持。

## 5 结论

分析了全球气候变化对黄河流域区域气候、水资源量、生态格局、农业牧业生产、地质灾害、文物保护的影响及其应对研究方面,目前的主要进展和存在问题,探讨了气候变化对黄河流域影响的未来趋势,提出进一步开展研究工作的建议。

黄河流域横跨多个气候区,下垫面、植被差异显著,气象灾害、地质灾害多发导致的经济损失严重,存在的主要问题为:(1)所需的气象、水文、地质等数据资料,同时同地性差,站点密度不足,缺乏完善的观测和预报预警及防控体系;(2)气候变暖影响加剧了黄河流域水资源量改变,增加精确测算的困难;(3)气候变化和流域开发增强,极大影响着黄河流域生态系统格局;(4)气候变化对黄河流域农牧业的影响表现形式复杂多样;(5)气候变化对黄河流域文物保护的影响研究亟待加强;(6)气候变化影响下黄河流域地质等灾害防护面临严峻挑战。

开展进一步研究的建议为:(1)统筹建设黄河流域气象、水文、环境和地质灾害观测和预报预警系统;(2)厘清多种因素影响下的流域水资源时空

过程,提升流域水资源效能;(3)调整坡耕地和生态用地,加强流域水源涵养能力;(4)加强植物生理生态适应性研究,优化流域农业和草业布局;(5)修订文化遗产赋存环境区划,进行预防性保护技术研发;(6)加强流域黄土滑坡加固新材料和生态修复协同技术研究。

**致谢:**在调研中,赵庆云、刘玉芝、王闪闪、田鹏飞、张飞民、张廷军、高琳琳、曹泊、彭小清、王一博、马景永、叶建圣、张峰、张景科、张毅、吴小丹、鲁霞、张国兴、田文寿、勾晓华、潘保田等同志提供了部分资料和讨论意见!

## 参考文献(References)

- [1] Huang J, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12: 5391-5398.
- [2] Ji F, Wu Z, Huang J and Eric P. Evolution of land surface air temperature trend[J]. *Nature Climate Change*, 2014, doi: 10.1038/nclimate2223.
- [3] Guan X, Huang J, Guo R, et al. The role of dynamically induced variability in the recent warming trend slowdown over the Northern Hemisphere[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12669.
- [4] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis by IPCC WG I[M]. Cambridge University Press, 2007: 785.
- [5] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis by IPCC WG I[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013:1535.
- [6] 马柱国,符淙斌. 20世纪下半叶全球干旱化的事实及其大尺度背景的联系[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(2): 222-214.
- [7] 李栋梁,魏丽,蔡英,等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 135-142.
- [8] Li H, Dai A, Zhou T, et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950-2000[J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34: 501-514.
- [9] 马柱国,符淙斌. 1951~2004年中国北方干旱化的基本事实[J]. *科学通报*, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [10] 马柱国,符淙斌. 中国干旱和半干旱带的10年际演变特征[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 519-525.



- [11] 王思佳, 刘鹤, 赵文智, 等. 干旱、半干旱区地下水可持续性研究评述[J]. 地球科学进展, 2019, 34(2): 210-223.
- [12] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493.
- [13] Hao Y, Xie Y, Ma J, et al. The critical role of local policy effects in arid watershed groundwater resources sustainability: A case study in the Minqin oasis, China[J]. The Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 1084-1096.
- [14] Mi L, Xiao H, Zhang J, et al. Evolution of the groundwater system under the impacts of human activities in middle reaches of Heihe River Basin (Northwest China) from 1985 to 2013[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24(4): 971-986.
- [15] 王有权. 河西走廊疏勒河流域地下水资源开发利用的环境效应[J]. 地下水, 2012, 34(2): 48-50.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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(3): 1-5.
- [19] 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): 155-162.
- [20] 李振林, 秦翔, 王晶, 等. 2004—2015年祁连山脉东部冷龙岭冰川遥感监测[J]. 测绘科学, 2018, 43(6): 45-51, 57.
- [21] 杜际增, 王根绪, 李元寿. 近45年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析[J]. 草业科学, 2015, 24(6): 5-15.
- [22] 刚成诚, 王钊齐, 杨悦, 等. 近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应[J]. 草业科学, 2016, 25(11): 1-14.
- [23] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响: VI. 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1562-1570.
- [24] Yang X, Liu Z, Chen F. The possible effect of climate warming on Northern Limits of cropping system and crop yield in China[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(4): 585-594.
- [25] 韩德梁, 王彦荣. 紫花苜蓿对干旱胁迫适应性研究进展[J]. 草业科学, 2005, 14(6): 7-13.
- [26] Arnone III J A, Verburg P S J, Johnson D W, et al. Prolonged suppression of ecosystem carbon dioxide uptake after an anomalously warm year[J]. Nature, 2008, 455(7211): 383-386.
- [27] 刘鹏伟. 气候变异与气候变化对黄土高原果农生计脆弱性的影响研究——基于价格波动的中介效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [28] 黄翀, 刘高焕, 王新功, 等. 黄河流域湿地格局特征、控制因素与保护探讨[J]. 地理研究, 2012, 31(10): 1764-1774.
- [29] 王春乙, 潘亚茹, 白月明, 等. CO<sub>2</sub>浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究[J]. 气象学报, 1997, 55(1): 86-94.
- [30] 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.
- [31] 康丽莉, Ruby L L, 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.
- [32] 王澄海, 李健, 李小兰, 等. 近50a中国降水变化的准周期性特征及未来的变化趋势[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 1-10.
- [33] 张昂. 黄河源区汛期径流模拟与预测[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [34] 方宏阳. 黄河流域多时空尺度干旱演变规律研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
- [35] 周帅, 王义民, 郭爱军, 等. 黄河流域未来水资源时空变化[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 28-39.

## Impact of climate change on the Yellow River basin and respons

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, HUANG Jianping<sup>1,2\*</sup>, LIANG Jiening<sup>1</sup>, YU Haipeng<sup>1</sup>, GUAN Xiaodan<sup>1</sup>, MA Jinzhu<sup>3</sup>, SHEN Yuying<sup>4</sup>,  
DENG Jianming<sup>5</sup>, HUANG Ning<sup>6</sup>, MENG Xinmin<sup>7</sup>, WANG Chenghai<sup>1</sup>, LI Changbin<sup>3</sup>, MU Cuicui<sup>3</sup>, GONG Jie<sup>3</sup>, ZHANG Fanyu<sup>6</sup>

1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
2. Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
4. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
5. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
6. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
7. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Abstract** This paper analyzes the main progress and existing problems in the research of impacts of the global climate change on regional climate, water resources, ecological pattern, agricultural and animal husbandry production, geological disasters, cultural relic protection and its human responses in China. It also discusses the future trend of the impact of climate change on the Yellow River basin and puts forward suggestions for research on the following aspects: to establish a meteorological, hydrological, environmental and geological disaster observation, forecast and early warning system for the Yellow River basin; clarify the space-time process of basin water resources under the influence of multiple factors and improve the efficiency of basin water resources; adjust sloping farmland and ecological land to strengthen the capacity of water conservation in the river basin; strengthen the study of plant physiological and ecological adaptability and optimize the distribution of agriculture and grass industry in the river basin; revise the environmental zoning of cultural heritage and carry out the research and development of preventive protection technology; strengthen the research on new materials for loess landslide reinforcement and the cooperative technology of ecological restoration.

**Keywords** Yellow River basin; climate change; impact and response; water resources; ecological pattern ●



(责任编辑 刘志远)