

文明的 温度

气候变化对中国西北地区
生态、产业及文化遗产
系统性影响评估

鸭先知
气候响应台

DUCK KNOWS
CLIMATE RADIO

响应西北



张掖，金塔寺石窟。（李隽辉摄影）

中国西北地区深居欧亚大陆腹地，位于贺兰山—乌鞘岭以西，祁连山—昆仑山以北，包括新疆和河西走廊地区的广大西北内陆干旱区¹。脆弱的生态本底条件，干旱和半干旱的气候特征，深居内陆的地理区位，相对落后的经济发展水平、产业结构和基础设施建设，是西北地区的社会经济及生态系统风险应对能力薄弱的关键原因。

西北地区特殊的地理位置和气候条件，使其成为了中国关键的生态安全屏障，发挥着孕育大江大河，影响季风界限，阻挡沙尘东进、滋养绿洲农业、调节水气交换、改善局地气候的重要作用，是中国维护生态安全格局，实现可持续发展的关键区域²。

与此同时，地处欧亚大陆中心的西北地区，自古是沟通中亚、连接欧洲的重要陆路通道，并因此孕育了丰富繁荣的文明。贯穿西北地区的丝绸之路沿线，保存着大量形式各异、艺术精美的石窟、壁画等物质文化遗产，具有珍贵的历史和艺术价值。

然而，全球气候变化正给西北地区带来的新挑战。中国西北地区，是对全球气候变化最为敏感的区域之一。1960年以来，西北地区年平均气温增速约为 $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ ³，约为同期全球平均升温水平的两倍。西北地区的降水量以 $9.3\text{ mm}/10\text{年}$ 的速率呈增加趋势，但降水变化具有明显的空间差异性，且增量不足以使西北地区整体干旱半干旱的气候发生根本性的转变⁴。



气候变化引起的气温升高和降水时空分布的改变，不仅影响了区域内水循环过程，导致极端天气气候事件的频次和强度增加⁵，同时也让高度依赖气候条件的西北地区生态系统稳定性、经济产业发展可持续性和物质文化遗产的存续面临更严峻的挑战。

本报告以甘肃省为典型案例，选取具有典型性的生态系统，传统产业及物质文化遗产案例进行考察和分析。本报告旨在以案例区域气候变化特征、趋势、风险分析及应对措施研究为抓手，客观地呈现西北地区生态系统、社会经济系统，乃至文化历史遗迹已经经历的和即将面临的复杂挑战，激发更多跨学科的气候变化风险研究和应对行动。

¹ 丁永建. 西北地区生态变化评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.

² 冯起, 白光祖, 李宗省, 等. 加快构建西北地区生态保护新格局 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(10): 1457-1470.

³ 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望 [J]. 科学通报, 2023, 68: 1814-1828.

⁴ 同上.

⁵ 王澄海, 张晟宁, 张飞民, 等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题 [J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980-989.

甘肃省气候变化基本特征及趋势

位于中国西北地区的甘肃省，自东南向西北跨越了北亚热带湿润区、青藏高原高寒区、西北干旱区三大自然地理分区。独特的地理位置和自然条件赋予了甘肃省格局分明、多样的生态环境。作为“两屏三带”中国生态安全战略格局中的重要组成部分，甘肃省的生态质量决定着西北地区和青藏高原地区的生态安全。

甘肃省气候变暖特征明显，**年平均气温、平均最高及最低气温均呈明显增加趋势**。在过去的60年里（1961-2021），甘肃省年平均气温增速达到 $0.28^{\circ}\text{C}/10$ 年，显著快于全球平均水平。

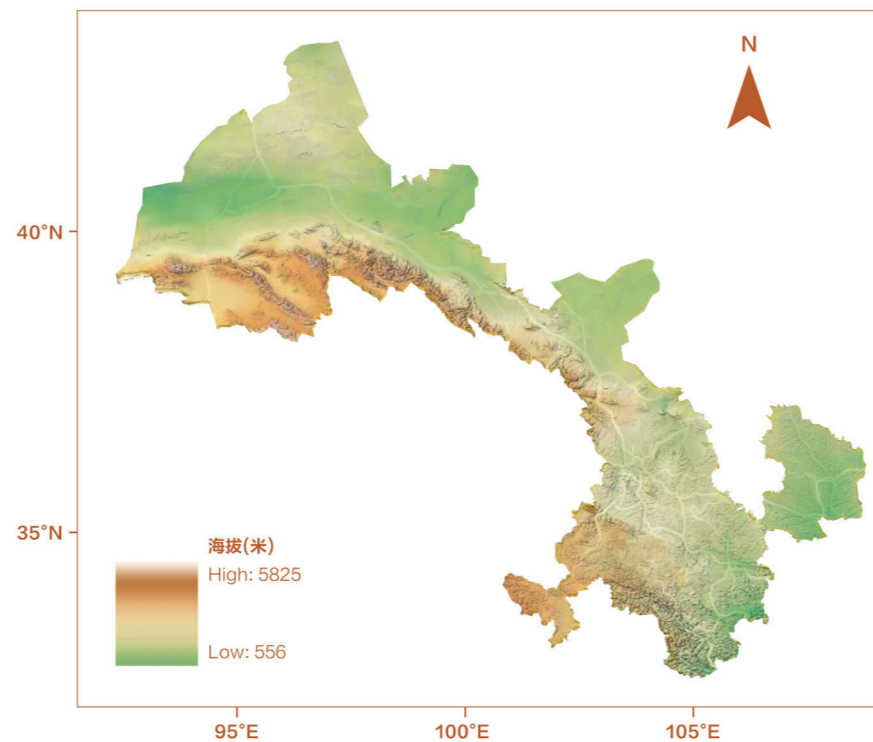


图1 甘肃省区位与地形图

甘肃省年降水量在过去60年间，呈现先减后增的趋势，**特别是2000年以后，年降水量显著增加**，然而降水日数却明显减少，这表明极端降水事件可能增加。并且降水变化时空分布不均，西部地区尤其是中部地区降水增加，而东部地区降水减少。

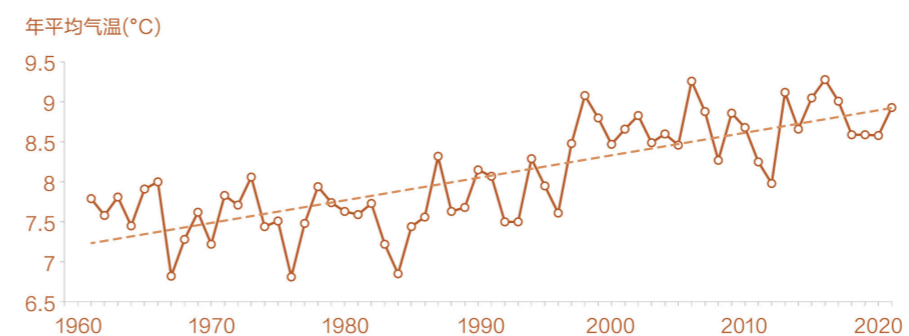
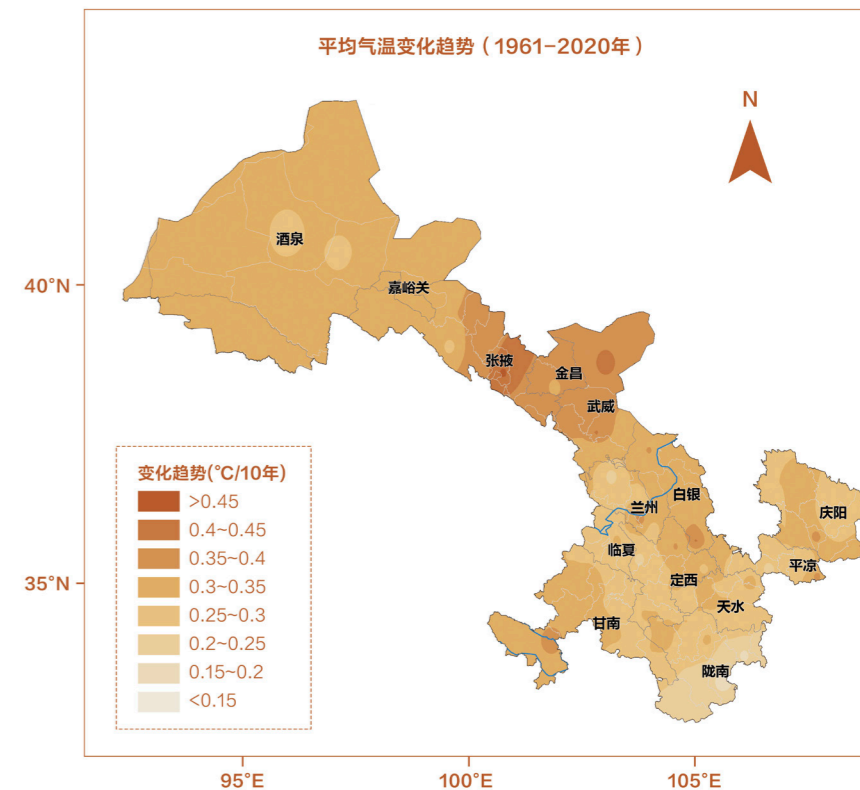


图2 1961-2021年甘肃省年平均气温历年变化及变化趋势空间分布



21 世纪初以来，**甘肃省平均最高气温和极端高温日数显著增加，极端高温日数较 2000 年以前增加了约 5.5 天**。甘肃省极端降水量呈增加趋势，大部分地区极端降水量均有所增加，特别是**陇东和陇南地区极端降水量增加显著**。极端高温事件和极端降水事件增加，为甘肃省社会和生态稳定性带来挑战。

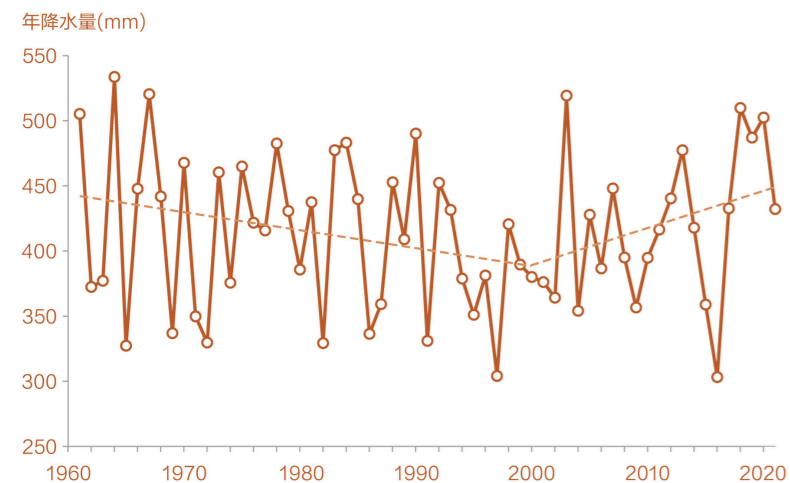
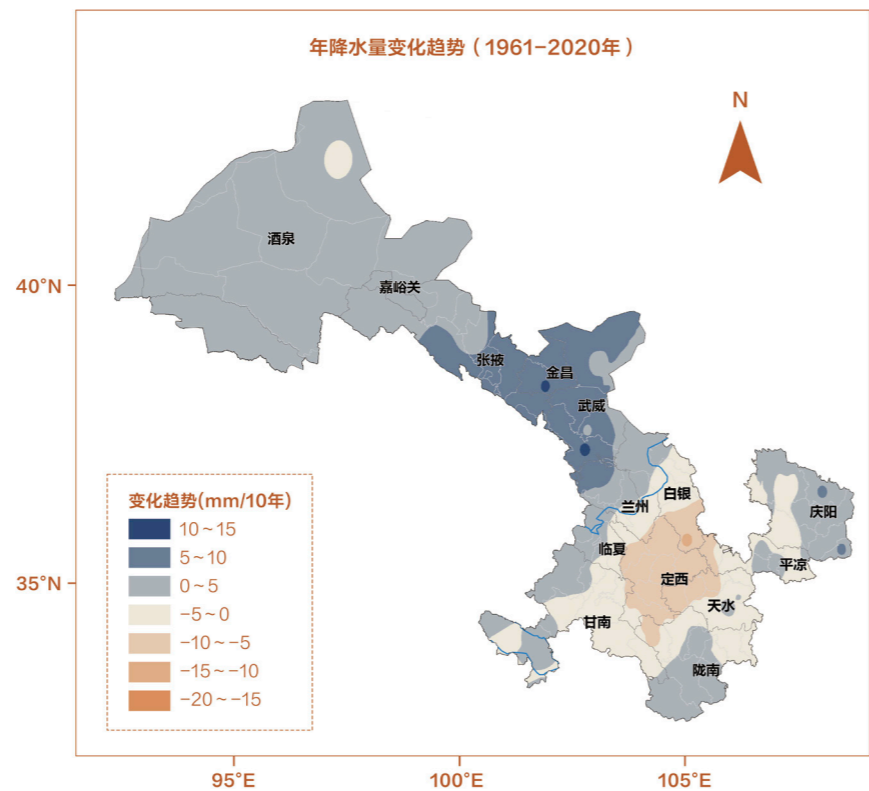


图 3 甘肃省年降水量历年变化与变化趋势的空间分布



气候变化对以石羊河为代表的典型干旱半干旱区水资源和生态的影响

以石羊河为代表的干旱半干旱区内陆河流域孕育了西北地区繁荣的绿洲经济。水资源是限制西北地区绿洲经济发展和生态修复的关键因素。西北干旱和半干旱区生态系统对气候变化和人类活动敏感性高。对石羊河流域研究显示，气候变化带来的温度和降水变化和以生态补水、农业灌溉为主的区域水资源调配、退耕还林等人类活动共同塑造了生态环境和水资源变化。

承载了大量人口、工业和农业产业石羊河流域是河西走廊人口最集中、水资源使用程度最高的地区。随着社会经济发展对水资源需求的快速增长，以及水资源管理不利，石羊河流域内水资源曾被严重过度开发利用，导致下游民勤生态恶化，沙漠化加速扩张。2007 年，《石羊河流域重点治理规划》开始实施，通过综合治理，集中修复，石羊河流域水资源使用效率提升，生态环境质量改善。

自 21 世纪以来，石羊河平均径流量由 4.48 m³/s（2001–2010 年）增加到 9.19 m³/s（2011–2020 年），武威中部绿洲，下游民勤青土湖水位均稳定上升。2021 年对比 2010 年，流域内植被生态质量改善显著。

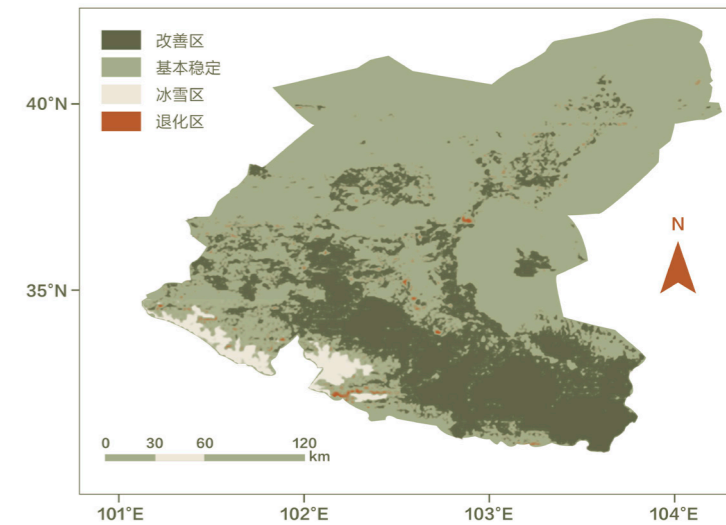


图 4 2021 年与 2010 年石羊河流域植被指数差值图



图 5 民勤县青土湖在多年积极的水资源管理和调控下水位上升，再现水草丰茂的场景。（李隽辉摄影）

生态环境的改善也是曾经肆虐石羊河流域下游沙尘暴数量显著降低的原因之一。石羊河流域下游一带，是腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠的交汇地带，极易受大风、沙尘天气影响，曾是中国四大沙尘暴源地之一⁶。1961-2021年，石羊河流域沙尘暴出现频次呈明显的减少趋势，平均每10年减少11.2站次。沙尘暴的形成受气象条件、沙源地土壤和植被条件等多重作用共同影响。2003年起，石羊河流域开展了农业种植结构调整、压沙造林、移民搬迁、落实“五禁”等一系列生态治理措施，取得了显著成果，有效减少了地表沙源地暴露，为局地沙尘天气减少奠定了基础。

随着气候变化的加剧，石羊河流域的生态修复和水资源可持续利用也面临着更严峻的挑战。自1961年以来，**石羊河流域年平均气温呈显著上升趋势，平均每10年升高0.38℃**；流域平均年降水量呈增加趋势，平均每10年增加6.9mm，年平均相对湿度为51.2%，呈缓慢下降趋势。

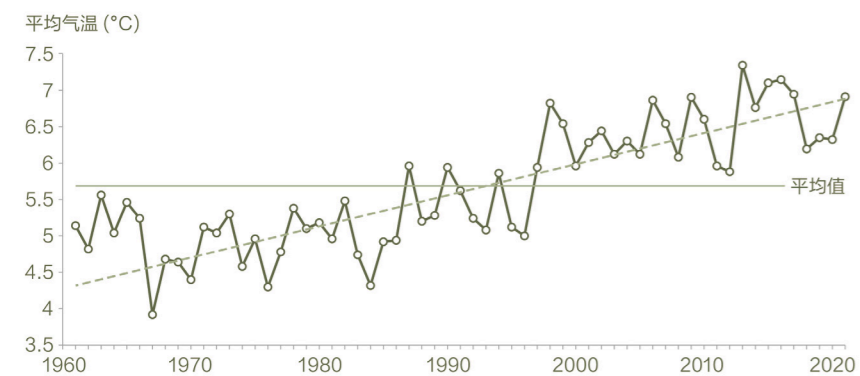


图6 1961-2021年石羊河流域年平均气温变化

气候变化带来的温升和降水模式变化，导致了石羊河流域极端高温和降水事件加剧。1961-2021年，流域内**极端最高气温呈明显升高趋势，升温速率为0.32℃/年**。日降水量≥10mm日数增加趋势较为明显，增加速率为0.27d/10a。2021年，石羊河流域日降水量≥10mm日数为11.4天，与1991-2020年平均值（8.8天）相比偏多2.6天。对于西北干旱区域而言，这样的极端降水并不能被有效利用。而平均相对湿度的减少和关键生长期季节性干旱的发生对植被生长和农业生产带来更多压力。

在未来流域持续升温、极端天气气候事件趋多趋强的情景下，干旱事件仍是生态恢复面临的严峻考验。与此同时，承载了大量人口及产业的绿洲区域内生产、生活及生态用水的需求量大幅上升，水资源矛盾凸显。气候变化对水资源的影响，将对地区社会经济高质量发展和生态治理产生更加显著、深远的威胁。



图7 民勤县通过种植梭梭等方式防沙固沙（李隽辉摄影）

气候变化对以酿酒葡萄种植为代表的西北特色产业的影响

西北地区葡萄种植有悠久的历史。史书记载张骞将西域葡萄引入中国，在唐代和元代甚至普及到民间。“葡萄美酒夜光杯”的诗句，折射出中国悠久的葡萄酒文化。甘肃省河西走廊地区是近现代中国葡萄酒重要的产区之一，特别是在河西及天水产区，葡萄种植面积和产量在全国名列前茅。虽然拥有悠久的历史和文化积淀，气候和环境条件也较为适宜，但当地发展现代葡萄酒产业的历史较短，且面临潜在的气候变化风险，作为地方特色产业的机遇与挑战并存。

甘肃省土地资源丰富，气候冷凉干燥，光照充足，气候条件总体而言较适宜葡萄生长。在全球变化的大背景下，酿酒葡萄种植相关的各项气候指标也随之出现变化，影响酿酒葡萄气候品质。灾害性天气事件发生频次的变化，以及因冬季负积温变化引发的病虫害风险，是影响甘肃酿酒葡萄产量的重要因素。

图8 张掖市高台县祁连酒厂，位于地下存储葡萄酒的橡木桶。（李隽辉摄影）



⁶ 中国政府网. 石羊河流域下游大气降尘量十余年来大幅减少 [N/OL]. (2018-03-08). https://www.gov.cn/xinwen/2018-03/08/content_5272190.htm

通过对酿酒葡萄气候品质的多项关键指标的研究显示，气候变化对甘肃省酿酒葡萄种植的影响呈现复杂性和非线性的特征。生长期内有效积温及水热值变化等指标，在一定阈值内的增长有利于酿酒葡萄品质的提升，而超过一定阈值则产生负面影响，降低酿酒葡萄的气候品质。

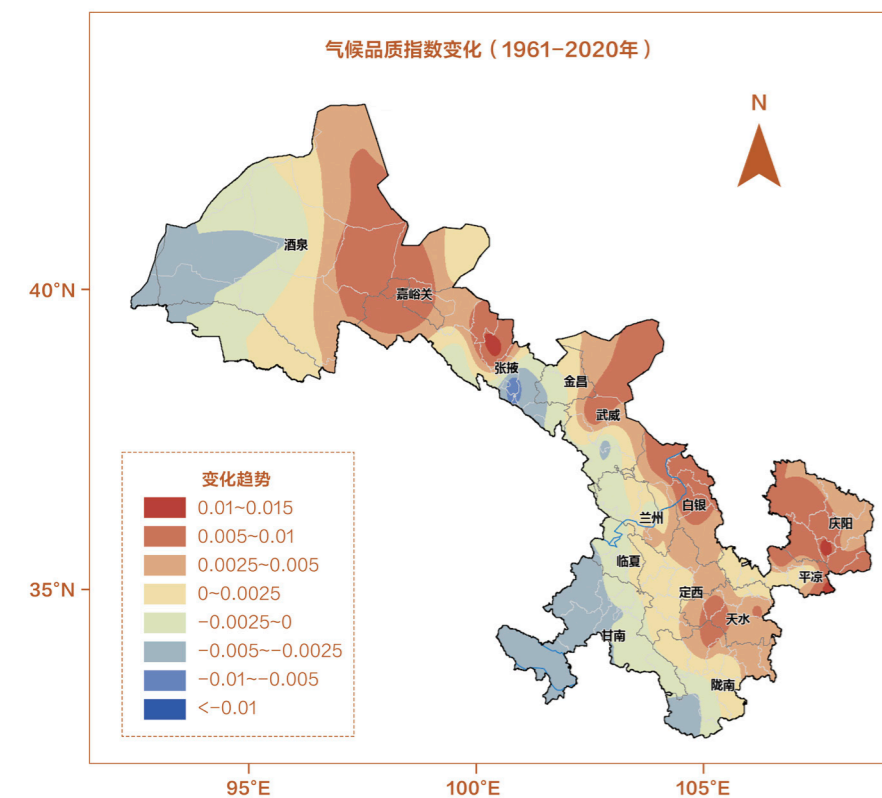


图 9 1961-2020 年甘肃省酿酒葡萄气候品质指数变化趋势及空间分布

除了影响气候品质的长期变化趋势外，短期极端气象灾害也是影响酿酒葡萄产量、品质和收益的重要因素。

对于酿酒葡萄种植而言，在冬季休眠期相对寒冷的气候条件，有利于抑制病虫害的发生。然而，气候变化正带来越来越温暖的冬季。近 60 年来，甘肃省负积温呈现波动上升的趋势，特别是张掖、金昌、武威等主要酿酒葡萄产区，负积温增长超过 $50^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C} / 10$ 年。负积温的增加将有利于虫害的发生，对酿酒葡萄的生长带来威胁。



图 10 张掖市高台县祁连酒厂葡萄酒种植园，附近村民在农闲时来葡萄园工作。（李隽辉摄影）

全球变暖的背景下，气温的极端性增强，极端偏暖和极端偏冷的程度均有增加。生长季低温冷害对酿酒葡萄产量的影响尤为显著，单次灾害对植株的影响持续时间可达数年，而应对低温冷害需要投入大量人力和资金，也导致生产成本大幅增加。造成生育期低温冷害频次增加的主要原因是极端低温的变化，甘肃省平均的生育期低温发生频次在 1990 年以后显著上升。酒泉东北部、嘉峪关、张掖西部增加趋势明显。对萌芽 - 开花期的晚霜冻的分析发现，**进入 2000 年后，甘肃省晚霜冻的发生频次有一个跃变式增长，1981-2000 年晚霜冻发生频次的均值为 0.53 次 / 年，2001-2020 年则增加为 0.82 次 / 年。**

甘肃省不同地区的气候和环境条件、气候变化趋势有较大差异，对酿酒葡萄产业而言，复杂非线性的变化趋势，以及稀缺的水资源都对保障产业安全发展带来严峻挑战。随着气候变化进一步加强，科学精确的分析产区相关气候指标，选育耐受当地气候条件和环境条件的品种将是保障产业发展的关键。



马蹄寺石窟外景。(李隽辉摄影)

气候变化 对以石窟为代表的 西北物质文化遗产的影响

西北地区干旱稳定的气候条件使具有多元民族、文化、宗教特色的珍贵文物得以留存。甘肃省被誉为中国的“石窟之乡”，根据甘肃省石窟寺专项调查报告 2021 年的统计，全省现有石窟寺（含摩崖造像）219 处，文物点 236 个，包括石窟寺 229 个，摩崖造像 7 个。其中，世界文化遗产有 3 处：敦煌莫高窟、麦积山石窟、炳灵寺石窟。全国重点文物保护单位有 18 处（34 个文物点）。

由于石窟群等文化遗产长期处在大自然环境中，气候变化对露天文物是一个无形的潜在破坏因素。无论是石窟群的岩体风化、风蚀及雨蚀破坏，还是洞窟内外的壁画、泥塑、石刻等文物产生的各种病害，都是由气候变化的长期影响引起的。**气候变化对于文物遗迹的直接作用可以分为长期缓慢的变化和由极端天气气候事件带来的灾害影响两类。**

石窟温湿度的频繁变化是石窟酥碱、壁画脱落等病害的重要影响因素。壁画保存的高风险湿度区间是 60%–65%⁷。在一定温度范围内，洞窟空气湿度的波动能够驱动岩体盐分向壁画地仗层迁移，不断地溶解、结晶，进行恶性循环，从而产生了严重的返碱、酥碱病害，被称为壁画、彩塑“癌症”。在相对湿度较高的环境中，砂砾岩易风化，泥质胶结物中的黏土矿物反复吸水膨胀，也会导致砂砾的胶结结构破坏，导致洞窟壁画的空鼓病害。洞窟内温湿度与当地降雨过程密切相关⁸。**降水量及其它与湿度相关的变量（如湿度循环和潮湿期）增加，叠加更温暖的气温条件，将会加速腐蚀、生物降解、风化和盐析等病害进程⁹。**

莫高窟第 85 窟是石窟区南区中段下层的大型洞窟，窟内壁画地仗严重酥碱、空鼓、脱落；颜料层起甲、粉化多种病害并存，尤其西壁、北壁西侧和南壁西侧特别严重。敦煌研究院（与美国盖蒂保护所）合作环境监测项目，建立起洞窟空气温湿度变化与壁画病害的关联，成为此后数十个洞窟的环境监测的理论框架。

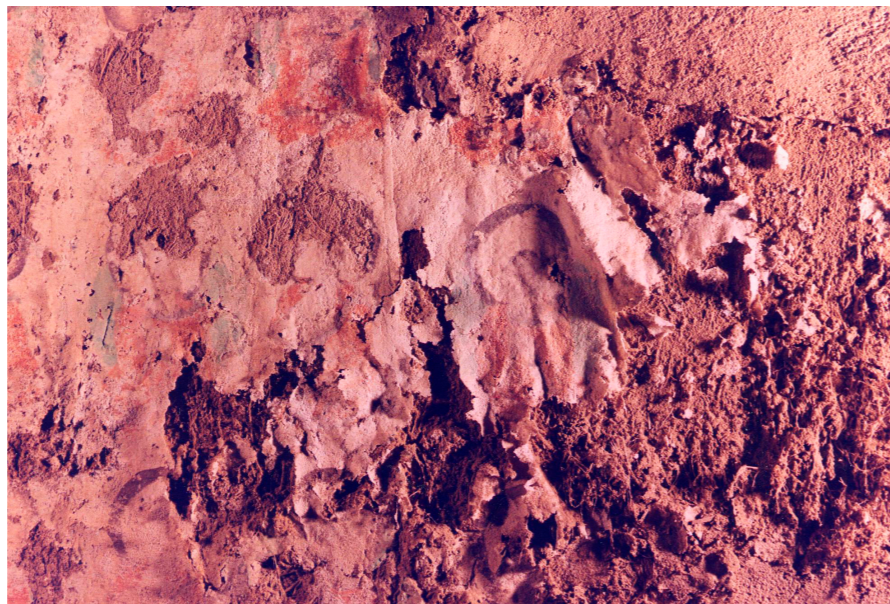


图 11 敦煌莫高窟第 85 窟地下水汽侵蚀造成壁画酥碱脱落（报告作者供图）

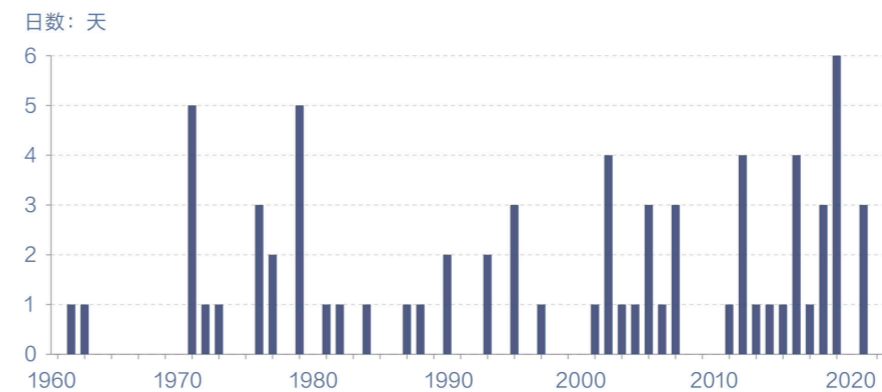


⁷ 王进玉. 敦煌莫高窟第 85 窟壁画保护工程 [M]. 中国文物信息咨询中心. 文物保护工程典型案例 (第 1 辑). 北京: 科学出版社, 2006:98–121.

⁸ 侯文芳, 薛平, 张国彬, 等. 莫高窟第 217 窟微环境监测分析 [J]. 敦煌研究, 2007, (5): 93–97.

⁹ Sesana, E., Gagnon, A., Ciantelli, C. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review[J]. WIREs Clim Change, 2021, 12:e710.

1961–2022年敦煌站历年日降水超过10mm的日数



1961–2022年敦煌站历年日降水超过25mm的日数

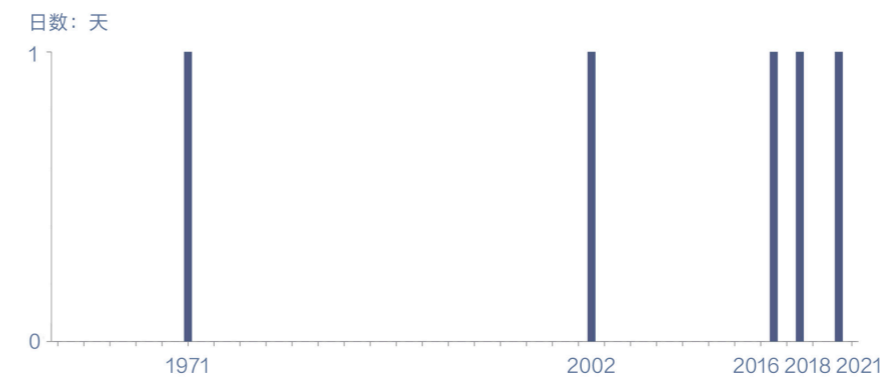


图 12 1961–2022 年敦煌站历年日降水量超过 10mm 及超过 25mm 日数显著增加

气候变化引起的突发性极端事件对文物安全的影响意义重大。**特别是强降雨等灾害性事件及其由此引起的滑坡、泥石流、洪水等对文物本体及载体的危害极大。**

敦煌莫高窟石窟群位于干旱少雨的地区，全年降水日数平均不足 20 天。对 1961–2022 年敦煌气象站数据分析显示日降水量 10mm 和 25mm 短期强降雨日数自 2000 年以来显著增加。突发的暴雨会引起莫高窟顶层洞窟的渗水，形成诸如壁画地仗层酥碱等病害，还有可能在山顶形成汇流，向下冲蚀崖体，导致崖壁上部、中部洞窟崩塌¹⁰。



¹⁰ 姚鲁烽, 彭金章. 敦煌大泉河的河床演变及其对莫高窟崖体的影响 [J]. 敦煌研究, 2007, 105: 87–92.

莫高窟开凿于大泉河西岸的崖面上¹¹。近年来，大泉河洪水愈发频繁，近40多年中，就发生了近20次不同流量的洪水。由于莫高窟北区石窟崖体就是大泉河的河床，每次洪水都直接冲刷洞窟的下部崖体。2012年6月4日的降雨导致大泉河发生洪水泥石流，对莫高窟北区洞窟造成严重影响。

金塔寺石窟位于张掖市肃南裕固族自治县，是马蹄寺石窟群的重要组成部分。金塔寺石窟开凿在海拔2800米的祁连山北麓山前地带的红沙崖壁上。石窟地处茂密的森林腹地，年降雨量在500毫米左右，主要集中在7-8月，占全年降雨量的40%。

1961-2022年数据显示，民乐站年均降水量持续增长，降水日数波动较大。金塔寺的降水量和降水频次较平原区高，洞窟内实测年均相对湿度与气象站数据相比更高，石窟受降水和温湿度变化影响的风险比气象站数据反映的情况更严峻。



图13 莫高窟前大泉河的洪水泥石流冲刷北区洞窟，冲毁河堤、树木和金属防护栏。（孙志军摄影）



图14 金塔寺东窟窟顶壁画脱落处（张掖市文物保护研究所供图）

2022年8月以来，马蹄寺石窟群由于阴雨天气造成洞窟产生险情及文物本体受到威胁。金塔寺东窟险情较为严重，中心柱北侧甬道顶部产生宽0.3cm-0.5cm东西贯通裂隙，并在东端有裂隙渗水现象，在窟顶平棋部位有0.8平方米壁画脱落。金塔寺东窟西北角窟壁下部岩体剥落，严重影响洞窟立壁的稳定性和对石窟安全产生威胁。



图15 金塔寺脱落壁画（张掖市文物保护研究所供图）



¹¹1980年以来，敦煌文物研究所在大泉河西侧修筑防洪堤，沿河堤西侧修筑了滨河马路。



图 17 金塔寺东窟西北角窟壁下部岩体剥落（张掖市文物保护研究所供图）

气候变化对全球文化遗产正在产生多重影响。2007 年，联合国教科文组织世界遗产委员会通过了“气候变化对世界遗产影响的政策文件”，旨在搭建世界遗产和《联合国气候变化框架公约》之间的联系¹²。2021 年，在福州召开的第 44 届世界遗产大会上，世界遗产委员会更新了关于气候变化对世界遗产影响的政策文件，并通过了《福州宣言》，提出携手应对气候变化带来的世界遗产保护新挑战¹³。

环境气象监测工作是分析文物病害机制、科学展开文物保护和修复的第一步，可以及时为保护、管理、修缮等提供非常重要的资料和信息，保证工作和决策的科学性、正确性。当前随着气候变化趋势日益显著，相关极端天气事件频发，长期环境监测将为文化遗产地应对气候风险提供坚实的科学基础，有助于我们制定相应的风险应对策略。与此同时，开展专项科研和实验是中国大量隶属不同地理和气候分区、材料和结构各异的不可移动物质文化遗产保护应对气候变化风险的科学保障。

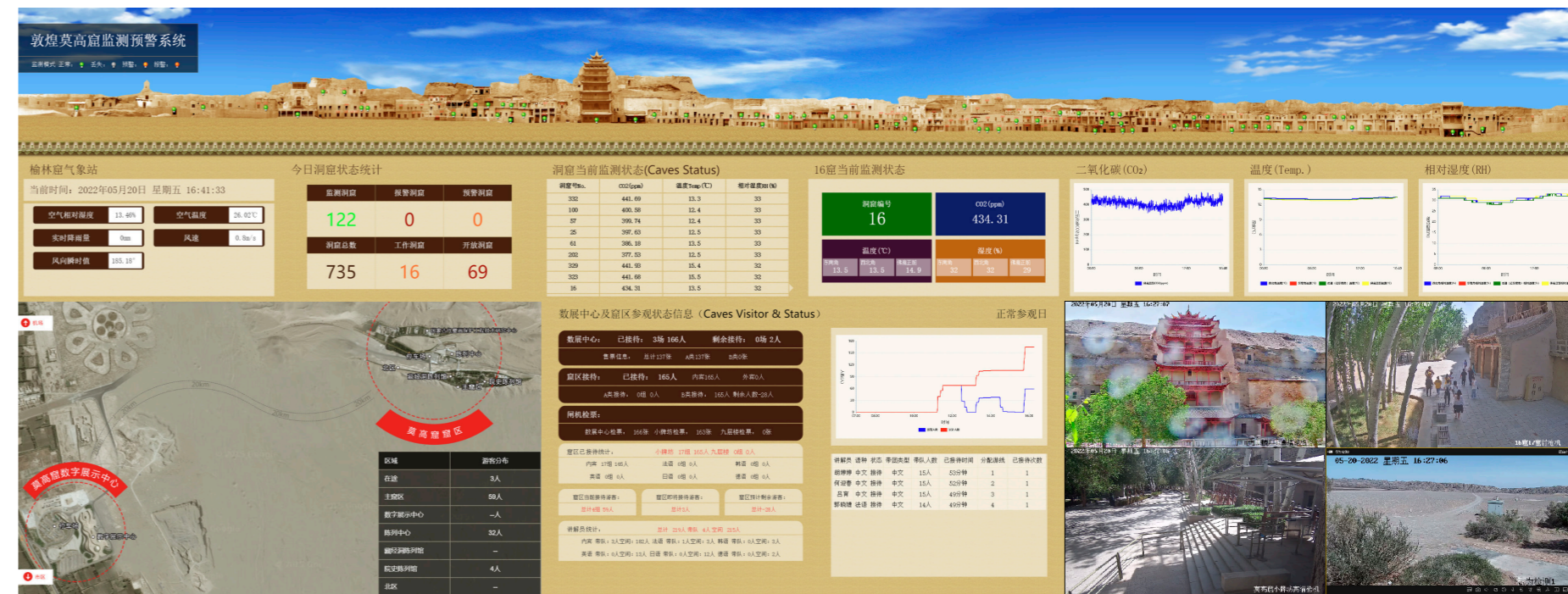


图 18 敦煌莫高窟监测预警系统能实时反映每个洞窟内环境变化（敦煌研究院供图）

当前文博部门、基金会和研究机构已投入大量的科研力量和经费用于重点文物的环境监测、修复和修缮，获得的理论和实践经验将有助于气候风险的应对。然而大量保护等级较低的文物，由于资金和人力的不足，尚未得到恰当的保护和修缮。当前人类活动导致的气候变化将加速文物病害进程、加剧结构性损毁风险，是西北地区文物保护面临的前所未有的新危机。



¹² 宋新潮. 遗产保护与气候变化 [N/OL]. 人民日报海外版, 2022-04-18(11). http://paper.people.com.cn/rmrbhwb/html/2022-04/18/content_25913332.htm

¹³ 刘晓宇. 第 44 届世遗大会通过《福州宣言》 [N/OL]. 人民日报, 2021-07-19(07). <http://politics.people.com.cn/n1/2021/0719/c1001-32161292.html>

关注生态脆弱区气候风险 全面提升自然和社会经济系统气候风险应对能力

气候变化带来增温与降水趋势的变化，以及由此产生的复合型、级联型风险正在快速上升。对于广袤的西北地区而言，其脆弱、敏感的生态系统，发展水平不均、韧性较差的产业经济，以及在原本冷、干、稳定的气候条件下得以保存的文化遗产都正在遭遇严峻的风险挑战。气候变化正成为阻碍西北地区实现绿色转型和高质量发展的新威胁。

01 科学评估西北地区气候风险 关注脆弱区域、产业及人群

对西北地区典型生态系统、传统产业及文化遗产的研究显示，气候变化对西北地区的影响呈现复杂性、复合性及非线性的特征。

推进针对西北地区气候变化的跨学科跨领域研究，因时因地的开展气候风险的科学量化评估，是西北地区建立健全气候风险应对机制的首要任务。对生态本底较差，水资源短缺，以人口及经济高度集中的绿洲经济为主的西北地区而言，关注脆弱区域、产业及人群应当成为推进气候风险评估和应对工作的重中之重。

02 建立健全气候变化监测体系 因时因地落实风险管理机制

在加速推进适应气候变化的基础设施改善之外，西北地区亟需建立健全气候变化监测评估体系，针对不同承灾主体和灾害风险等级加强应急响应机制建设，强化水资源及生态系统管理等措施，形成系统有机的、因时因地的风险管理机制。

03 加强对西北气候脆弱区域 的政策、资金和机制支持

西北地区是中国关键生态安全屏障和实现全面小康社会的关键区域。面对日益严峻的气候风险挑战，应当加强对西北地区应对生态、气候风险政策、资金、技术和机制支持和能力建设，保障西北地区加速绿色转型，实现更具韧性的社会、经济及生态协同发展。

报告研究团队

王进玉 敦煌研究院 研究员

任玉玉 国家气候中心 正研级高级工程师

吴 萍 国家气候中心 高级工程师

刘君言 绿色和平气候与能源项目经理

李 朝 绿色和平调研部 资深研究员

王丽岩 北京华风创新网络技术有限公司 高级工程师

报告首席科学家

朱定真 中国气象局公共气象服务中心气象服务首席专家

报告评阅专家

潘家华 中国社会科学院学部委员、北京工业大学生态文明研究院院长

王 谋 中国社会科学院生态文明研究所研究员、可持续发展研究中心秘书长

吴晓东 中国科学院西北生态环境资源研究院 研究员

司 东 中国科学院大气物理研究所 研究员

项目指导专家

田成川 生态环境部宣传教育中心主任

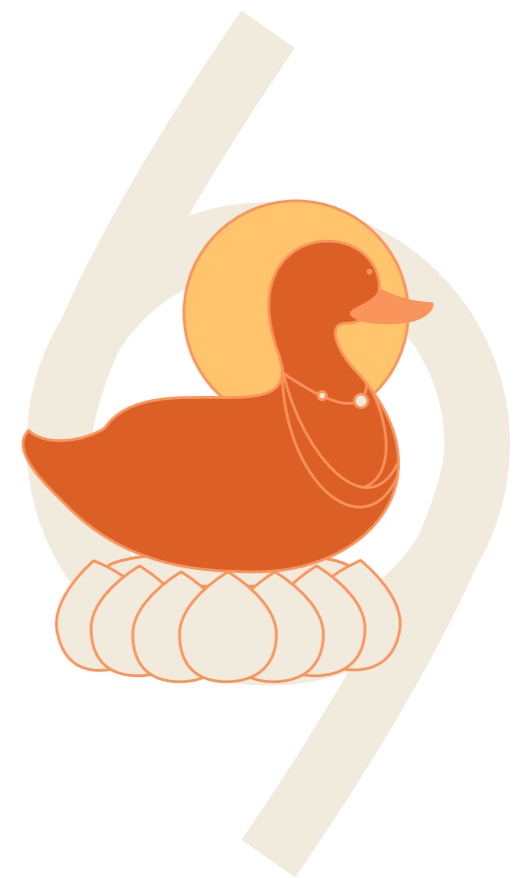
指导单位

生态环境部宣传教育中心

致谢

我们对研究过程中来自各位专家和同事的指导及支持深表感谢。
(排名不分先后)

- 张 硕** 北京华风创新网络技术有限公司 总经理
丁文魁 武威市国家气候观象台站长
刘明春 武威市气象局研究员
胡兴才 武威市民勤县气象局局长
张世虎 武威市民勤县林草局高级工程师
徐志龙 张掖市气象局局长
殷雪莲 张掖市气象局生态站站长
漆录平 甘肃省南华生态建设管护中心基地负责人
魏居灿 甘肃省南华生态建设管护中心技术员
王卫东 张掖市文物研究管理所副所长
杨 斌 马蹄寺文物研究管理所副所长
刘国虎 马蹄寺文物研究管理所文保员
杨 俊 生态环境部宣传教育中心社会宣传室主任
周恋彤 生态环境部宣传教育中心社会宣传室气候传播部部长
金 昕 生态环境部宣传教育中心社会宣传室项目主管
韩晓牧 生态环境部宣传教育中心社会宣传室项目主管
冯朋娟 生态环境部宣传教育中心社会宣传室项目主管
王 珏 绿色和平气候公众与文化项目专家
李小溪 绿色和平传播主任
韦 毅 绿色和平传播主任
袁 媛 绿色和平气候与能源项目主任



GREENPEACE
绿色和平



华风创新
HUAFENG INNOVATION

