



水利水电国际资讯摘要

IWHR International Digest

中国水利水电科学研究院 主编: 蒋云钟 执行主编: 王妍炜 责编: 何鑫 李桐

2025
12
总370期

智能大坝与数字孪生:
人工智能时代的水利基础设施重构

山地环境中的海拔依赖型
气候变化 (一)



智能大坝与数字孪生： 人工智能时代的水利基础设施重构

2025年10月

引言

一直以来,大坝都在满足社会需求方面发挥着至关重要的作用,包括供电、灌溉、供水和防洪。然而,大坝现今正面临更加复杂的情况,例如气候变化、人口增长,以及对环境和社会责任的更高期望。

作为应对之策,水电行业正在积极建造“智能大坝”,即融合土木工程与数字创新的大坝工程。这些创新发展能够改变工程实践,提高运行效率和安全性,但也会带来新的合同、监管和风险分配问题。

这些发展趋势还突出了抽水蓄能(PSH)项目的机遇。这类项目对于维持可再生能源电网的稳定运行至关重要,但由于规模、环境足迹和对复杂数字控制系统的依赖,它们也带来了独特的法律和财务挑战。

定义智能大坝

智能大坝是一种通过数字手段强化的大坝系统,利用传感器、实时监测、自动化、人工智能(AI)和云计算等一系列技术,优化性能、降低风险,支持可持续发展目标。

与依赖人工检查和静态程序的传统大坝不同,智能大坝根据降雨、河流流量、地震活动和其他环境变量的实时数据进行动态调整。

智能大坝的功能包括实时结构和环境监测、溢洪道和涡轮机组自动化控制、预测性维护和风险预测,并使用数字孪生技术(即大坝的虚拟模型,可模拟大坝运行并指导决策)。这些功能提高了大坝的安全性和运行效率,但需要在治理、责任和跨境监管方面采用新的方法。

数字孪生的作用

数字孪生基于实时传感器数据、设计记录和历史性能,在虚拟环境中复制物理基础设施,能够实现预测性维护、模拟升级改造和优化性能。

对于建筑工程项目,可利用数字孪生技术在破土动工前对风险进行测试。然而,数字孪生技术也会引发重要的法律和合同问题,例如模型的所有权、预测错误时的责任归属;以及在处理争议时数字记录的可采性。正如法律评论员关于ISO建筑信息模型(BIM)的评论所指出,合同必须与时俱进,涵盖知识产权、互操作性和数据权利。

智能大坝的益处和法律复杂性

智能大坝为国际基础设施项目带来了机遇和挑战。它们展示了数字工具如何减轻环境风险和提高运行效率,同时也暴露了治理、数据所有权和网络韧性方面的新漏洞。

水电项目对推动可再生能源转型越来越重要,而随着这些技术在水电项目中的广泛应用,对健全法律框架的需求也愈发迫切。水电行业往往依赖于复杂的、多司法辖区重叠管辖的水资源与能源监管体系,导致责任归属、环境合规和跨境数据治理等问题尤为紧迫。

对于项目发起人和贷款人,特别是对与电力市场紧密关联的抽水蓄能项目,关键的法律问题在于谁拥有且可能依赖数据、如何管理和解释自动化决策,以及如何在供应链中划分跨境监管义务。

中国的长江流域

中国水利部长江水利委员会对长江干支流上的 31 座大坝进行统筹管理,凸显了流域为单位的集中管理带来的整体效益。大坝运营者可利用物联网(IoT)传感器、卫星数据和人工智能预测,模拟洪水事件并采取前瞻性行动。据报告,2020 年,中国在人工智能辅助预测降低了洪水影响,改进了水电调度优化。然而,集中管理也意味着风险集中,一个网络安全漏洞就可能影响数百万人。从法律专业人士的角度来看,这凸显了划分数据保护责任和跨境风险防范责任的重要性。

澳大利亚沃勒甘巴大坝

沃勒甘巴大坝将 100 多个传感器整合至一个人工智能驱动的洪水模型中。该项目减少了检查需求,改进了预警体系,但也暴露了隐私和数据留存法律方面的漏洞。这个案例说明,国家立法可能落后于数字创新,给项目发起人带来不确定性。

瑞士 - 意大利蓬特多加尔坝

蓬特多加尔坝采用数字孪生技术增强了大坝的地震韧性,延长了资产寿命,但研究人员指出,瑞士和意大利两国在数据使用上存在监管冲突。该案例表明,跨境基础设施不仅需要在工程标准上保持一致,还需要在数据法和责任机制上保持一致。

英格兰伯恩霍普水库

伯恩霍普水库使用倾斜传感器和卫星验证技术,标志着项目向持续监测的转变。虽然项目的安全性得到提高,但也引发了关于英国 1975 年《水库法案》如何适用于自动化监测的问题。该案例突出了对法律进行改革,以涵盖数字证据和自动警报的必要性。

威尔士迪诺威克电站

威尔士的迪诺威克电站是欧洲最大的抽水蓄能电站之一。它建于 20 世纪 70 年代,旨在支持快速响应,维持电力系统稳定运行。它于近期采用了更多先进的数字监测和控制系统,以便更有效地与偏重可再生能源的电网实现集成。这些升级改造增强了预测性维护,优化了涡轮机运行,并减少了非计划停电。

从法律和合同的角度来看,迪诺威克电站突出了长期资产现代化的复杂性——最迫切、最核心的问题是数据所有权和与遗留系统的互操作性,以及在预测模型结果与实际表现不匹配时的责任归属问题。该项目还突出了国家能源监管框架与环境许可之间的紧张关系,由于抽水蓄能项目的规模及其景观影响,它们往往要接受更严格的环境评估。

与其他类型的水电项目不同,以固定价格出售电力并不是抽水蓄能项目的主要创收方式。相反,它主要是为电网提供服务,比如储存多余电力,并在需求高峰期迅速放水发电。这使得这类项目的长期财务成功高度依赖于电力市场规则和政

府政策的变化。

从合同的角度来看,开发商必须确保用于控制电站的数字系统能够快速响应,保障电站与国家和区域电网运营者保持可靠连接,并以恰当方式确保项目获得环境和社区认可。项目还需要解决跨境水库或跨境运营中的水权和数据共享问题。

另一项挑战在于对数字孪生等计算机预测模型的依赖。一旦这些模型的结果与现实世界的表现不匹配,就可能出现关于电站是否履行其职责的争议。因此,明确的测试和验收程序在最大限度地减少冲突、保护投资人与运营者方面发挥着至关重要的作用。

法律、监管和合同方面的考量

智能大坝为国际基础设施项目带来了机遇和挑战。它们展示了数字工具如何减轻环境风险和提高运行效率,同时也暴露了治理、数据所有权和网络韧性方面的新漏洞。

国际项目合同需要将数字风险作为核心内容,而不仅仅是作为技术附表中的事后补充内容。项目协议应当明确规定数据的所有权和准许用途,为数字系统设定可衡量的性能标准,建立明确的升级迭代和技术变更管理程序,明确项目业主和贷款人对系统进行审计的权利,以及在发生故障或事故时要求采取纠正措施的权力。

智能大坝项目会带来的新风险,必须在合同中予以谨慎处理:

数据所有权和完整性

智能大坝项目会产生大量运行和环境数据。合同必须明确规定传感器、数字孪生体和AI系统所产生的数据归谁所有,以及谁有权在项目施工期间和项目移交之后访问、使用或共享这些数据。

合同条款应明确运营者或资产所有权发生变化时的数据管理问题,并设定关于数据准确性、完整性和及时性的标准。为保证承包商或技术提供商所提供数据的完整性,可能需要制定保修或赔偿条款,并应当建立争议解决机制,以解决关于数据质量或解释的分歧。

合同还应制定一个明确的计划,清晰地解释数据归谁所有,数据的准许使用方式(例如是否可用于训练AI系统),以及谁有权在项目易手时审查、复制或获取数据。合同还应确保数据符合商定的质量标准,并指定一位独立专家,负责解决关于数据准确性的分歧。

软件许可、更新和互操作性

鉴于智能大坝项目依赖于专有软件,合同应明确规定相关软件的许可事项,包括使用、修改或转让软件的权利,并对软件持续更新,提供补丁和技术支持,特别对网络安全做出规定。合同应通过托管等方式对软件过时或供应商破产等情况做出安排,还应要求新数字系统与遗留基础设施之间实现互操作性,并明确规定接口要求、测试协议和集成失败时的风险分担方式。

合同应确保即便技术提供商倒闭停业,项目仍可访问所需软件和工具。合同还应要求供应商在一定年限内提供安全更新和修复服务,确保系统可顺利与其他技术实现连接,并明确测试阶段。合同应规定,如果系统性能不及预期,将对供应商予以经济处罚或者要求其以服务信用形式提供补偿。

网络安全

虽然网络安全的重要性已得到广泛认可,但合同应进一步深入,对在施工和运行期间实施和维护网络安全措施的责任进行划分。合同应当明确规定发生网络安全事件时的通知要求和响应协议,以及因承包商或供应商疏忽而导致的网络安全漏洞造成的损害的赔偿责任。

合同应当单独设置一个关于网络安全的章节,明确规定谁对哪些事项负责、必须采取的最基础保护措施、在何种情况下允许对系统进行变更、要求的问题报告速度,以及如何告知并修复安全漏洞。合同还应规定在数据泄露影响第三方利益的情况下,应当由谁负责,并将这些责任与项目保险公司的要求进行关联。

变更管理

鉴于技术更新迭代的速度非常快,合同应建立相关机制来管理整个项目生命周期中的数字系统更新迭代或变更,以及如何在避免造成不当延迟或成本上升的前提下纳入新兴技术或新的监管要求。

合同应包括处理数字变更(例如软件更新或新增数据来源)的明确流程,解释何时可实施变更、如何评估其影响,以及如何在各方之间公平地分摊这些变更,的成本或者共享其节省的成本。

培训和知识转移

智能大坝的运行需要新的技能。合同应要求承包商或技术提供商向项目业主的员工提供培训,并提供相应文件、手册和持续支持,以确保有效的知识转移。合同条款还应就在项目竣工或提前终止后,向项目业主转移数字资产、软件许可和数据,以及退出项目的承包商或供应商安全删除敏感数据等问题做出规定。

合同应要求操作人员接受适当的培训和认证,项目期间充分完成知识转移,且正常运行的模型和模拟等数字工具在项目竣工时完成移交。合同还应确保承包商退出项目时安全删除所有敏感数据,并提供已完成此操作的证据。

保险、风险分担和跨境合规

智能大坝项目带来了新的可保风险,例如网络威胁、数据丢失和系统故障。除传统的建设风险之外,合同还应明确数字和网络风险的保险要

求,并谨慎划分数字系统故障造成的损失责任。

对于国际项目,合同应涵盖遵守数据本地化法律、跨境数据传输限制和相关隐私法规等问题。合同应确保保险覆盖网络攻击和技术故障等数字风险,以及系统故障造成的延迟或损失。合同还应详细规定项目数据的存储地点、跨境数据传输方式,并确保任何参与处理的第三方都遵守相同的规则。

环境和社会影响法

实时环境监测能够提升透明度,但也会使运营者接受更严格的审查,并且可能因未遵守规定面临法律诉讼。自动化系统必须遵守监管要求,人工智能系统也应具有可审计性和可解释性。英国1975年《水库法案》要求开展定期检查,但智能系统要求从业者确保新的数据形态在法律上是可接受和可验证的。

合同应规定,项目应确保自动化系统能够解释其做出特定决定的原因,留存清晰记录以供监管机构审查,并设置手动覆盖和分步式响应计划等备用安全措施,以降低传感器或计算机模型出现故障时造成伤害的风险。

挑战

智能大坝前景可观,但它们的建设也伴随着诸多重大挑战。

其中一项主要挑战是,许多现有大坝在设计时并未考虑数字化改造,这使得数字集成在技术上相当复杂,且会造成沉重的财政负担。增加传感器、通信系统和自动化层通常会产生模拟和数字组件的混合配置。如果未能谨慎管理互操作性,这种安排可能会导致效率低下和操作风险。

欧洲最大的抽水蓄能电站之一——威尔士迪诺威克电站充分体现了这一挑战。迪诺威克电站建于20世纪80年代,最初目的是支持快速响应的能源平衡能力,而非数字集成。虽然近期

的升级改造引入了更先进的监测和控制系统,但对如此规模的遗留设施进行改造,仍突显了推动老旧基础设施向全方位集成转型、实时智能运行所面临的持续障碍。

与此同时,智能大坝会产生大量数据,但管理数据所有权、访问权和可采性的法律和监管框架仍较为落后。关于这些运行数据是属于大坝业主、运营者、承包商还是监管机构的问题仍未明确。这些不确定性增加了关于数据完整性、发生差错时的责任归属,以及在合同或监管程序中使用数字记录作为证据时发生争议的可能性。

澳大利亚新南威尔士州的沃勒甘巴大坝试点项目就是一个明显的例子。虽然集成 100 多个传感器大大提高了洪水预报和维护效率,但同时也暴露了澳大利亚水相关法规在数据留存和隐私义务方面的空白。

网络安全是一个同样紧迫的问题。世界银行和欧盟网络安全局警告称,更高程度的互联互通增加了对恶意攻击的脆弱性,这些攻击可能会破坏系统运行,并造成物理伤害。中国长江流域的 31 座大坝由一个中央指挥中心统一管理,联动控制提高运行效益的同时,也凸显了集中式、数据驱动型治理固有的系统性风险。

风险缓解措施包括架构隔离、基于分工的访问控制,以及与合同补救相关的常规红队测试。然而,大多数司法辖区的法律和监管框架尚未就网络安全事件设立明确的最低标准、强制性报告要求和责任划分机制。全球范围内 AI、物联网和网络安全领域的专业人员短缺也加剧了这一法律空白,这些技能对于数字赋能基础设施的安全运行日益不可或缺。

财务方面的问题也不容忽视。数字化涉及重大资本支出,若不采用公私伙伴关系和气候相关融资等创新融资模式,水安全领域的“数字鸿沟”可能会不断深化。较为富裕的地区可能能够成功部署预测性、技术驱动的监测体系,但资源较为匮乏的司法辖区可能仍然依赖于定期人工检查。蓬特多加尔坝的数字孪生项目突显了这一数字

鸿沟。虽然该项目延长了大坝的结构寿命,增强了大坝的地震韧性,但建造和维护此等系统的成本高昂,流程复杂,这表明不那么富裕的国家难以负担复制数字孪生项目的成本。

最后,提升监测的透明度虽然具有价值,但也带来了独特挑战。根据国际水电协会的观察,实时环境数据能够强化问责机制,但也可能加剧与当地社区和监管机构的冲突。

因此,自动化系统必须在效率与生态或社会影响之间实现谨慎平衡。必须对提前泄洪和流量调节等调度行为进行严格校准,以避免对下游生态系统或社区造成意外伤害。伯恩霍普水库项目采用基于云技术的监测手段进行近实时诊断,既增强了安全性,也凸显了推动新技术与法律框架(如英国 1975 年《水库法案》)适配,以确保水库项目的合规性随着技术创新不断演进的迫切需要。

前景

制定关于实施数字孪生、数据交换协议和互操作性的国际标准,有望降低合同复杂性并促进跨境协作。蓬达尔加尔大坝的监管挑战已证明,这对跨界河流流域尤其重要。

机器学习技术的进步预计将推动大坝运行从被动模式转变为预测模式,从而实现早期干预和更高效的风险管理。与此同时,未来的项目可能会将零信任安全框架和 AI 驱动的威胁检测系统作为核心设计原则,并充分体现网络韧性日益增长的重要性。

融资环境预计也将发生变化。各国政府、多边开发银行和私营部门技术提供者可能会采用创新伙伴关系模式来分担成本和风险,并分享专业知识。与此同时,法律和监管体系必须迅速做出调整,为数据主权、数字资产所有权、自动化决策责任,以及合同和监管程序中数字记录的证据效力等相关关键问题提供明确解释。

伦理监督问题也将更加突出。越来越多的监管机构要求披露 AI 系统的决策方式。这一举措的目的是确保自动化流程不会成为不透明的“黑匣子”，而是提供工程师、运营者和受影响社区都能够理解的决策解读。在实践中，这意味着生成并保存决策日志，以显示支持决策的数据输入和模型版本。

最后，随着气候变化导致水文极端事件日益频发、强发，智能大坝可能成为增强气候适应力和韧性不可或缺的工具。全球知识共享平台可能借此兴起，助力运营者、工程师和政策制定者交流经验和最佳实践，这与航空和核能等行业的共享安全制度类似。通过将技术创新融入健全治理，水电行业能够确保智能大坝践行其增强安全性、可持续性和运行效率的承诺，同时增强法律确定性和公众信任度。

结语

智能大坝融合工程、数据科学和治理技术，标志着水利基础设施的范式转变，在增强大坝安全、可持续性和运行效率方面具有广阔前景。然而，创新也带来了相应的责任。利益相关者（工程师、政策制定者、监管机构和社区）必须开展合作，确保这些系统不仅采用先进技术，还具有健全的法律框架，且实现环境公正和运行安全。

智能大坝的未来将取决于适应性法律、监管和伦理框架的发展情况。这些框架在支持创新的同时，也能保护公共安全、隐私和生态完整性。在建造未来大坝时，我们还必须为公共工程中的数字基础设施构建法律和伦理基础，确保治理手段与技术协同发展。

©2025 大成律师事务所。大成律师事务所是一家全球性律师事务所，通过其会员公司和分支机构为全球客户提供服务。本出版物并不旨在提供任何法律或其他建议，您不应基于本文的任何内容采取或不采取行动。相关法律声明请参阅 dentons.com。

山地环境中的海拔依赖型气候变化 (一)

摘要

在人为导致的全球变暖影响下,山地区域的环境变化尤为迅速。这些变化的速率常随海拔高度呈现分层特征,形成所谓的海拔依赖型气候变化(EDCC)。本综述系统评估了气温和降水(包括降雪)在垂直剖面上的变化证据。在全球尺度上,基于对 1980-2020 年期间可用网格化数据集的平均分析显示,山地与低地在气温、降水及降雪趋势方面的差异分别为每世纪升高 0.21°C (山地变暖更显著)、每世纪减少 11.5 毫米(山地干燥加剧)及每世纪减少 25.6 毫米(山地积雪损失加剧)。区域尺度的分析则有时呈现出与上述全球平均相反的变化趋势。

这种海拔依赖型气候变化主要由地表反照率、比湿及大气气溶胶浓度的变化驱动。纵观整个 21 世纪,大多数模式预估山地变暖加剧的趋势仍将持续(约为每世纪升高 0.13°C),但降水变化的不确定性则更大。在这些全球背景趋势的叠加下,不同山地区域的 EDCC 表现可能存在显著差异。相较其它区域,落基山脉和青藏高原的变化模式与全球平均趋势更为一致。由于山地原位观测多集中在较低海拔,对 EDCC 的认识也偏向中纬度地区,因此亟需相关研究,以弥补观测数据分布不均的不足,并提升山地过程模型在时空上的分辨率,从而更全面地评估 EDCC 对生态和水文系统的影响。

引言

尽管自前工业化时期以来,全球平均气温已上升约 1.1°C ,但人为导致的全球变暖速率在空间上高度不均。尤其是北极地区,由于受到冰 – 反照率、雪 – 反照率以及植被 – 大气反馈等作用影响,其变暖幅度已达到全球平均的 2–4 倍,这一过程被称为“北极放大效应”。由于高海拔和山地区域与极地地区在热力属性方面具有诸多共同特征,它们往往也表现出高于全球平均水平的变暖速率,但这种现象受到地形驱动的微气候影响而呈现一定复杂性。尽管不同昼夜时段、不同季节、不同地点间存在较大差异,正向的海拔依赖型变暖(EDW)已在历史尺度以及更长时间尺度上有所体现,自 1950 年来,高海拔地区平均变暖速度约比全球平均快 50%。

然而,海拔依赖性不仅限于气温。更广义的 EDCC 已日益显现(图 1),其涵盖大气含湿量、降水、积雪覆盖与地表反照率、辐射与能量平衡以及风况等方面。事实上,网格化数据集显示,降水与降雪趋势随海拔呈现系统性变化。

EDCC 将在局地、区域乃至全球尺度产生显著影响。例如,超过 10 亿人口至少部分依赖于山地积雪与冰川作为水资源储备,因此对气温和降水格局变化高度敏感。相应地,积雪与冰川的减少使得融雪主导型地区降水增加且更趋急促,从而更难以预测,并提高洪水与干旱风险。EDCC

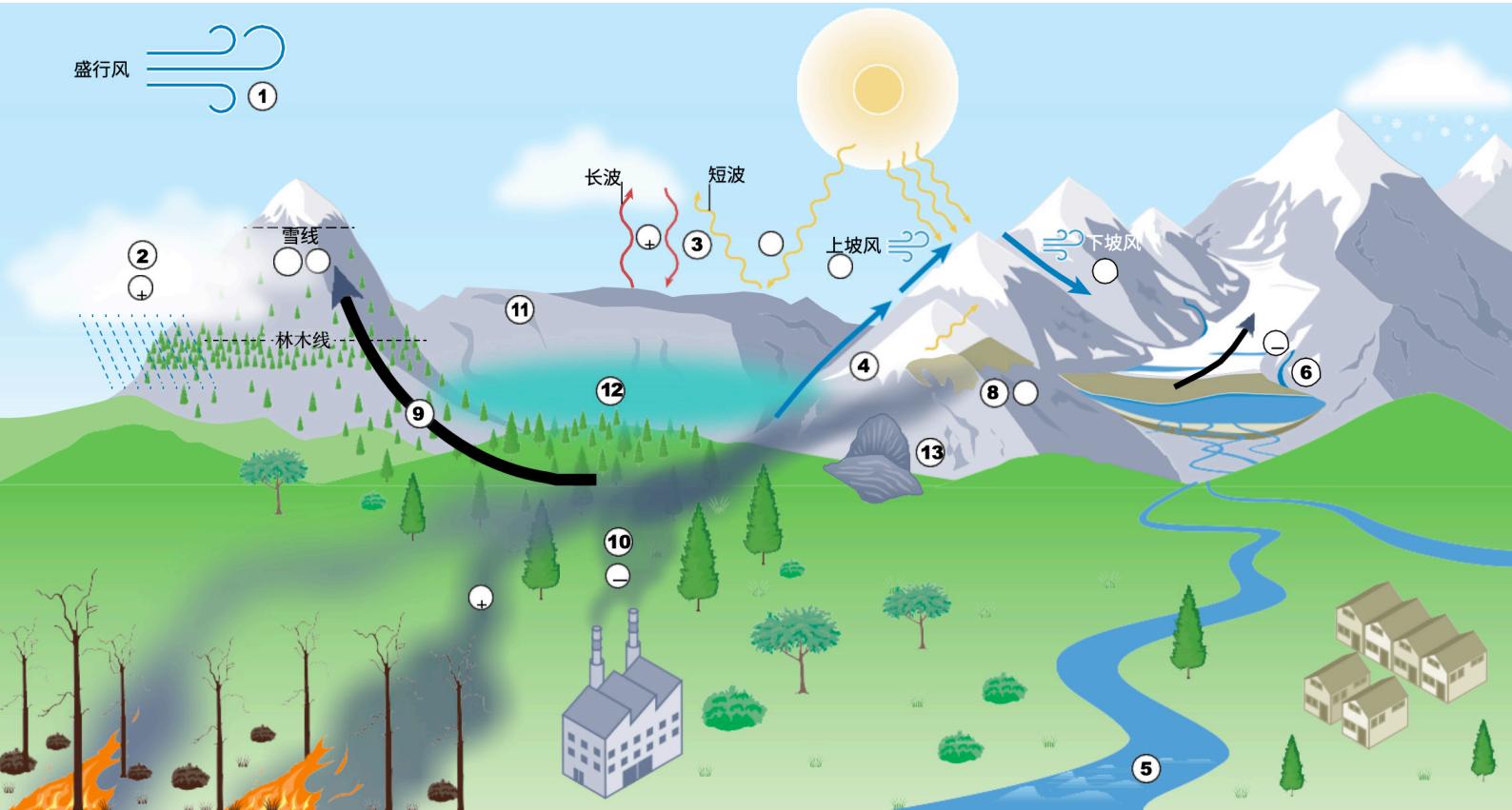


图1 山地环境中与海拔依赖型气候变化相关的因素与过程

该示意图概括了与海拔依赖型气候变化相关的、由其引发的或对其产生贡献的主要过程。对于变化方向以单一趋势为主的要素，分别以“+”和“-”表示正向和负向变化。

1. 高空主导风与山地的相互作用。盛行风在山地迎风坡与背风坡形成的效应具有不同的梯度分布。
2. 云底高度与大气水汽的变化，伴随强降水过程及云雾林分布高度的改变。
3. 云层特性与比湿的变化，使入射太阳短波辐射减弱，但向下长波辐射增强。
4. 上坡风增强，下坡风减弱。
5. 径流极值与变率的增加。
6. 冰川退缩对下游河流流域与栖息地的影响。
7. 雪线高度上移，以及雪线以上积雪场的变化。

还将改变山地灾害的潜在发生条件，如滑坡、岩崩、雪崩，以及冰湖溃决洪水(GLOFs)。它也可能加剧山地区域极端事件，包括热浪、雨雪叠加事件、森林火灾、洪涝以及虫害暴发，这些事件均影响各不相同。然而，尽管EDCC潜在影响巨大，迄

8. 积雪反照率降低。
 9. 植被带向高海拔迁移，以及植被带可能的扩张或收缩，同时伴随植被组成变化(包括由野火引发的变化)。
 10. 人为气溶胶浓度下降，但野火气溶胶增加。
 11. 高海拔高原产生“高原热力效应”，削弱自由大气过程的影响。
 12. 山谷地区气温逆温层与冷空气池形成频率的变化。
 13. 多年冻土退化引发质量耗散。
- 这些过程中的许多因素倾向于放大山地环境变化，而非抑制其发展。

今仍缺乏对其开展的研究。

本综述汇集关于EDCC的现有认知，涵盖多类气候变量。我们首先介绍基于物理机制的EDCC视角，重点讨论气温与降水(包括与积雪相关的变量)。随后记录山地范围内已观测到的

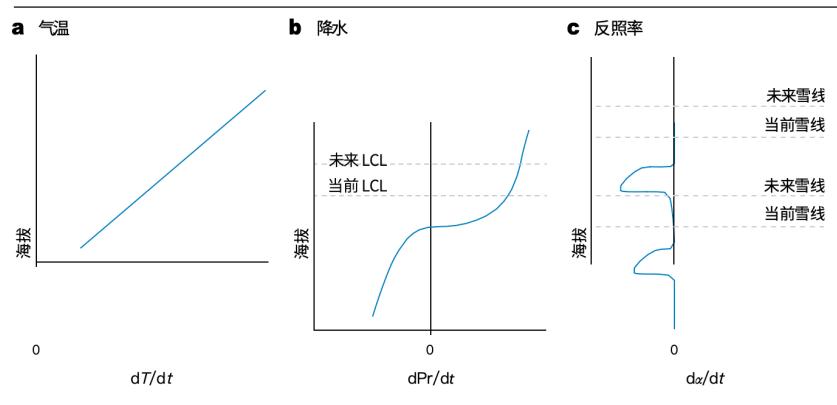


图2 气候变暖背景下山地关键变量的预期垂直剖面特征

- a. 空气温度T随时间t变化的速率在不同海拔高度和变暖情况下的最佳估计。该剖面代表全球平均状况；由于局地情况不同，不同区域的实际剖面可能存在差异。图示未按实际比例绘制。
- b. 与图a相同，但展示的是降水量Pr的变化特征。
- c. 与图a相同，但展示的是反照率 α 的变化特征。不同变量表现出的垂直变化剖面呈现显著不同。LCL表示抬升凝结高度 (lifting condensation level)。

历史 EDCC 空间格局，并进一步探讨模型对未来变化的预测，最后提出未来研究的重点方向。

基于物理机制的EDW与 EDCC 视角

EDCC 指的是气候相关变化趋势沿海拔梯度呈现出的任何系统性变化，因此这一概念具有较强的普适性。此处所指的海拔梯度是沿山地坡面的高度变化，而非自由大气中的垂直高度。EDCC 既可用于评估“响应变量”（如气温或降水），也可用于分析其驱动因素（如积雪反照率或向下长波辐射）；由于缺乏统一的界定标准，响应变量与驱动因素之间的界线并不清晰（例如，地表反照率既可被视为驱动因素，也可被视为响应变量，取决于分析视角）。

在此，我们基于专家综述并从基本原理出发，对气温、降水及积雪（通过反照率变化体现）——即目前最常被评估的变量——的预期变化特征进行分析（图 2）。各个案例中展示的剖面均代表一般性的预期变化趋势，同时认识到在复杂的山

地环境中，局地条件可能导致当地情况与总体趋势不同。对于每一个参考剖面，相关变量均使用在山地地表（沿海拔梯度）的数值进行评估。尽管现有文献中的分析主要集中于气温和降水，但其他气候与环境变量同样有可能表现出 EDCC 的特征。

气温

地表气温在高海拔地区的升温速度预计将快于低海拔地区，体现为正向的海拔依赖型增暖（EDW）（图 2a）。通常可预期两类主要的 EDW 剖面形态：一是增暖速率随海拔整体递增；二是在某一特定海拔带内出现增暖速率峰值；亦或两者的组合。观察显示，当多年平均气温接近 0°C 时，增暖速率尤为显著。鉴于 0°C 等温线在空间上大体对应多年平均雪线高度，这种增强的增暖现象支持将积雪减少（或积雪反照率反馈，简称 SAF）视为 EDW 的主导驱动机制，尤其在接近冰点的温度条件下。随着积雪老化与融化，SAF 将发挥重要作用。

相对而言,向下长波辐射(DLR)与比湿之间存在非线性依赖关系,DLR 的增加预计将进一步促进高海拔地区的增暖。同时,气溶胶负荷降低可增加到达地表的太阳辐射通量。尽管气溶胶有时可被输送至高海拔地区,但其影响通常在低海拔地区更为显著;因此,气溶胶减少往往导致低海拔地区的增暖幅度加大。

由于地表反照率、比湿以及其他相关变量变化之间的平衡关系在不同地区和不同时段存在差异,气温变化趋势随海拔变化的曲线形态在空间和时间尺度上均可能表现出显著差异。

降水

理论上,多年平均降水量在气候变暖背景下总体呈增加趋势(图 2b)。在理想化的对流系统中,平均降水量(气候态)通常在抬升凝结高度(LCL)附近达到峰值。若山地抬升或对流抬升发生在该高度之上,则会形成降水,但在 LCL 以上,地表记录到的降水量会随海拔升高而逐渐减少。相反,在 LCL 以下,并非所有气团都能够获得足够的抬升以达到 LCL 并形成降水,因此降水量同样呈下降趋势。

尽管 LCL 在日尺度上存在显著变化,但在气候平均意义上,大多数地区均可定义一个代表性的 LCL,其高度大体对应山地坡面降水量最大的海拔位置。仅从气温升高的影响来看,水汽将在更高的高度发生凝结,从而抬升多年平均 LCL。这一变化将导致新 LCL 以上(以及其正下方)区域降水量增加,而旧 LCL 以下(以及其正上方)区域降水量减少。然而,气温升高同时还会增加整个空气柱中的可降水量,使降水变化曲线更多地向“降水增加”的方向偏移(图 2b)。

降水由减少转为增加的具体海拔高度,取决于两方面因素的平衡:一是近地层湿润气团达到新 LCL 的频率降低;二是大气中可利用的总可降水量增多,从而具备产生更大的最大降水量的潜力。上述物理机制在热带地区尤为适用,因为该区域的大部分降水由具有强烈垂直抬升的对流过程所产生。相比之下,在中高纬度地区,坡面降水受强水平平流影响,变化更加复杂,迎风坡与背风坡之间的显著差异还会受到天气尺度环流型变化的影响。

此外,上坡风的变化(其有助于将湿润空气抬升至远高于 LCL 的高度)以及下坡风的变化(其通过强迫下沉运动抑制降水)也进一步增加了降水变化的复杂性。

(未完待续)



欢迎关注中国水科院微信公众号
地址：北京市海淀区复兴路甲一号
本刊联系方式：中国水科院国际合作处
联系邮箱：dic@iwhr.com
2025年12月25日