深度不确定性下沿海洪水气候变化适应决策方法述评

田展¹, 吴文娟¹, 刘俊国^{1*}, Laixiang Sun²

1. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055;

2. Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

* 联系人, E-mail: liujg@sustech.edu.cn

2021-11-22 收稿, 2022-03-01 修回, 2022-03-02 接受, 2022-03-07 网络版发表

国家重点研发计划(2019YFE0124800)和国家自然科学基金(51761135024)资助

摘要 深度不确定性下适应气候变化的稳健决策是当前决策者和科学家共同面临的难题. 以往基于气候模式预估结果进行风险评估和决策规划的局限性日益凸显, 模型参数、预测结果等多方面不确定性组成的深度不确定性给决策带来的风险远超一般不确定性. 近年来, 研究者将稳健决策理论、适应路径方法、工程选择分析等运用于气候变化适应决策研究, 它们能够系统化筛选处理深度不确定性, 从而更好地把握不确定性对气候变化决策的影响. 本文以沿海城市洪水适应气候变化为例, 综述稳健决策、适应路径、工程选择分析3种方法的特点和相互联系. 稳健决策方法结合了传统控制理论与现代管理决策理论, 专注于未来场景生成、适应措施的成本-效益比较、巨量场景-适应措施的比较静态筛选. 适应路径方法更关注时间维度上的场景-适应措施选择, 但对未来场景缺乏充分考量. 工程选择分析方法基于适应路径方法框架, 专注于具体工程设计, 但缺乏应用经验. 如何将3种决策方法综合应用, 以期服务于面向多个决策目标、构建多个未来场景、组合多种应对措施决策过程, 促进科学家、政策制定者和其他利益相关者在决策中的持续有效对话的“知识共创”过程是开展深度不确定性下气候变化适应决策的新趋势.

关键词 深度不确定性, 气候变化适应, 沿海洪水风险, 稳健决策方法, 适应路径, 工程选择分析

1 不确定性的来源及分类

人类的认知过程存在局限性, 即便对自然、经济和社会制度等各方面有充分了解, 但也会存在着各种“认识不足”的问题, 正确认识并处理这些“未知部分”对于决策过程非常重要. 早在20世纪初期, Knight^[1]对“未知部分”进行了划分和定义: 他认为可以通过事件发生概率乘以事件造成的损失来计算的“未知部分”是“风险”, 是所有未知部分中的可控制部分, 而剩余的、无法计算的、无法控制的“未知部分”则是“不确定性”. 由于风险可被定义为事件影响和事件发

生概率的函数^[2], 它大致可被分为低概率-低影响、低概率-高影响、高概率-低影响以及高概率-高影响4个级别(图1)^[3], 但在实际风险管理中更关注高影响的风险(图1中III、IV部分). 虽然“能否定量分析”一直被认为是区分“风险”和“不确定性”的重要评判标准^[4], 但不确定性的概念可以包括风险. Walker等人^[5]认为对于一个事件来讲, 如果它不是“百分之百发生”或“不可能发生”的, 那么这个事件便具有不确定性. 在这个不确定性的定义下, 风险也可被认为是能够通过衡量影响和计算发生概率来量化的低水平不确定性. 但在实际决策过程中, 如何区分和处理风险与不确定性取决于决

引用格式: 田展, 吴文娟, 刘俊国, 等. 深度不确定性下沿海洪水气候变化适应决策方法述评. 科学通报, 2022, 67: 2638–2650

Tian Z, Wu W X, Liu J G, et al. A review of decision-making methods for climate change adaptation under deep uncertainty: With a focus on flooding control in coastal cities (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 2638–2650, doi: 10.1360/TB-2021-1218

图 1 风险影响和概率矩阵

Figure 1 Risk impact and probability matrix

策的过程及决策者的背景^[4]。

不确定性为决策过程带来了很大挑战。大多数决策者以及提供决策支持的科学家往往能够理解并认识到决策中存在着不确定性,但对于不确定性的维度、特征、相对规模及处理方法很难形成完整认识。为更好地认识和处理决策中的不确定性,相关研究者依据未来预测状况、系统模型和系统输出,将不确定性进行了分级(图2)^[5]。一到三级不确定性属于基于概率统计的一般不确定性(也可被认为是风险),有很多量化分析的方法。而四、五级不确定性属于深度不确定性。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)海洋与冰冻圈特别报告^[6]综合了Lempert等人^[7]及Marchau

等人^[8]的观点后给出了“深度不确定性”的定义,即为专家和利益相关者不能就以下问题达成一致的情况:(1)可以恰当描述系统中各变量关系的概念模型;(2)模型中关键参数不确定性的概率分布;(3)评估解决方案可靠性的方法。这些由系统的不确定性、模型参数的不确定性、决策结果的不确定性等多方面不确定性共同组成的深度不确定性,既不能通过概率预测解决,又无法通过收集更多信息而减少。IPCC第6次评估第一工作组报告指出“低可能性-高影响事件”具有高不确定性,它们往往与极端气候事件相关^[9]。“低可能性”并不意味着发生概率低而是由于知识匮乏从而无法很好地认知和把握。换言之,这类事件的罕见性和相关数据获取的有限性使得估计其发生概率十分困难,比如2011年日本海啸、2021年中国河南郑州极端降水,人们事先对它们几乎完全未知。且历史气象观测数据仅有几十年或百余年的记录,可以在事件发生后进行场景重现,但很难通过历史数据进行统计概率预测。因此,深度不确定性的存在为实际决策过程带来了巨大的挑战。

2 深度不确定性下的气候变化适应决策进展

气候变化在当今世界是决策者和科学家共同关心的热点问题。它涉及科学、经济、社会、政治、道德和伦理问题的许多方面,属于全球普适性的问题,且在未来几十年乃至几个世纪都将一直存在。适应和减缓

图 2 不确定性的分类. 改编自文献^[5]

Figure 2 Classification of uncertainty. Adapted from Ref. [5]

是当今国际社会应对气候变化的两条主要战略路径,通过减少CO₂排放量的减缓措施见效慢且效果无法保证,对于已经发生的气候变化影响作用不大;而适应气候变化显然能尽可能预防、减少气候变化影响及损害,因此主动适应气候变化则更紧迫、更现实^[10]。

对决策者而言,“如何适应气候变化”已转换为“如何处理与气候变化相关的深度不确定性”这一难题。气候变化机制的复杂性、未来气候场景的不可预测性、决策方案和决策结果的巨量可能性等构成了气候变化决策的深度不确定性,而气候变化恰恰是这些不确定性的根源^[11]。气候变化是不同时空尺度的多个因子(如自然变化和人类活动)共同作用的后果,科学界对于不同尺度因子相互作用的科学机制认识尚浅^[12]。目前,对于未来气候变化场景的模拟分析主要是通过气候系统模式,而气候系统模式本身具有不确定性。尽管降尺度技术可以提供更加详细的空间分布信息,但技术本身就存在不确定性^[13]。因此,基于气候系统模式预估结果的风险评估和决策规划受制于深度不确定性,从而给决策方案形成和决策后果带来了很大的不确定性。

深度不确定性下的气候变化适应决策面临模型参数、预测结果、决策实施过程等多方面的不确定性。传统的基于概率统计的“先预测后行动”的方法,在生成未来场景时,只是对未来气候已知范围内的一小部分进行了采样,相关工作仍侧重于通过收集和处理大量数据来减少信息缺乏带来的不确定性或通过统计分析解决不确定性的随机问题^[14]。传统方法仅适用于不确定性小、决策方案简单的系统,无法应对深度不确定性。近年来,相关研究越来越关注支持决策者制定气候适应策略并在各个策略之间进行权衡分析^[15]。研究重点从关注难以理解和量化的不确定性转向关注以解决方案为导向、通过反溯迭代决策过程来减少决策不确定性的气候变化适应行动。这为气候适应决策中“解决深度不确定性”问题提供了新的思路。因此,设计有效的气候适应策略,以应对目前存在的各种难以量化的深度不确定性已经成为气候变化适应研究领域新的发展趋势^[7,16]。

3 气候变化下沿海城市洪水适应决策案例

洪水是当今沿海城市面临的最具挑战性的问题之一^[17,18]。当前沿海城市可能承受着来自于海洋^[19,20]、陆地降水以及降水引发的河流洪水^[21,22]等单一或复合致灾因素带来的洪水风险。但在未来气候变暖的大背景

下,多项致灾因素的变化状况难以准确预估。一是大陆冰川与极地冰盖的热膨胀及融化等将推动平均和极端海平面上升^[19],可能会阻碍河流正常重力排放或引发海水倒灌^[23,24]。Horton等人^[25]的研究显示,到2100年全球海平面将上升0.5~1.0 m,但由于南极冰盖消融速度的不稳定性,IPCC(2021)报告认为相较于1900年,2100年全球平均海平面上升幅度可能达到2.0 m甚至更高^[9]。二是气候变暖导致的大气水分含量增加将为全球大多数沿海地区带来更强烈的极端降水^[25,26],为城市排水系统带来了更大挑战。三是气候变暖也为台风和龙卷风等极端天气事件提供能量与物质来源,未来极端天气事件也将增多。未来沿海城市将承受更为严重的洪水侵袭^[27~29],如何设计和评估短期及长期适应策略是一个复杂而富有挑战性的过程^[30]。未来海平面实际上升状况、极端降水增加的幅度和频率都难以准确预估,极端天气事件也完全无法预测,这些致灾因素是深度不确定性的重要来源。在深度不确定下进行沿海城市应对未来洪水的适应规划为决策者的政策制定过程和政策实施过程带来了巨大挑战,而降低洪水风险、适应未来洪水频率的过程通常需要持续、大量的资本投资,这对适应规划者和决策者提出了更高的要求。

近年来,相关研究者探索了许多处理深度不确定性的决策方法。主要包括Lempert等人^[31]提出的稳健决策理论(robust decision making, RDM)、Walker^[32]及Kwakkel等人^[33]提出的动态适应规划方法(dynamic adaptive planning, DAP)、Haasnoot等人^[34]提出的适应路径方法(adaptation pathways, AP),以及Haasnoot等人^[35]融合了动态适应规划方法及适应路径方法后提出的动态自适应政策路径方法(dynamic adaptive policy pathways, DAPP)。此外,实质选择权分析(real options analysis, ROA)、工程选择权分析(engineering options analysis, EOA)、信息差距论(info-gap decision theory, IG)等决策工具也已被证实在适应气候变化规划决策领域具有实用价值。本文着重关注稳健决策理论、适应路径方法和工程选择分析3种决策方法在沿海洪水适应决策中的应用。

3.1 稳健决策理论

近年来,基于稳健决策思路的理论方法在国际上得以运用,它为解决气候变化带来的不确定性提供了新思路。传统的风险评估与适应决策方法一般是“先预

测后行动”，试图找到对于未来场景的“最佳”预测。而RDM是一种反溯迭代、可量化的决策支持方法。它基于情景数据挖掘技术，对于不同维度产生的不确定性，生成海量的未来可能场景而不只是“最佳”的预测场景，模拟各种适应措施在未来各种可能场景下的实施情况，帮助决策者识别稳健且满足目标的适应措施，以规避未来气候变化的不确定性。

RDM方法的核心是构建XLRM决策矩阵，即在 2×2 矩阵中列举所有潜在外源不确定性因素(exogenous uncertainties, X)，厘清适应措施(policy levers, L)，构建关系模型(models and relationships, R)并提出评价标准(metrics, M)。以沿海洪水适应决策为例，RDM方法的应用思路如图3所示。将影响未来沿海洪水的外部不确定性来源(X)分为气候因素和社会经济两类，在由不确定性的可能变化范围框定的海量未来情景空间内进行拉丁超立方体抽样(Latin hypercube sampling, LHS)以抽取未来情景的代表性样本；考虑所有可能有效的灰色和绿色工程性适应措施(L)；构建一系列的水文水动力模型、投资-效益模型等关系模型(R)；通过利益相关

方的探讨得出针对沿海洪水淹没深度、范围以及不同适应措施有效性的评判标准(M)。通过模型模拟未来情景代表性样本下各类适应措施提高适应气候变化的能力，判定各政策措施是否达到评价标准，最终运用帕累托前沿(Pareto Front)优选法(或其他优选法)选出符合短期、长期利益的稳健性策略或策略组合。

目前，RDM已被广泛应用于适应海平面上升、城市内涝和风暴潮等造成的未来沿海洪水风险的研究，美国、英国等国家已经依据RDM制定了行之有效的适应未来洪水的战略方案。美国洛杉矶港的规划设计^[36]是使用RDM方法进行海平面上升适应性规划的典型案例。为应对海平面上升及暴雨频率增加，洛杉矶港决定加固其基础设施以抵御未来极端洪水，规划者使用成本效益分析方法进行投资节点规划，以帮助决策者判断这些投资决策在未来场景下是否具备合理性。实际上，在提议的决策时间点之前尽早实施相关措施，可以提高与海平面上升相关适应性决策的稳健性，而监测和后续研究也能帮助决策者更好地了解控制海平面变化的关键物理过程，从而更好地做出适应性决策。上海

图3 RDM方法实施框架图

Figure 3 Implementation framework of robust decision making

基于RDM决策框架进行了针对深度不确定性下城市内涝问题的长期规划,对于极端降水增加、城市雨岛效应、城市排水能力下降3个不确定因素构建未来复合场景并评估了不同措施组合的防洪效益和经济效益,最终给出稳健的决策建议^[37]。但RDM方法在决策过程中主要生成比较静态策略,如需获得下一步行动方案需要进行新一轮RDM研究,不够灵活。此外,该方法往往生成巨量的场景-措施组合,计算成本比较高,且对决策人员专业要求比较高,应用相对比较困难。

3.2 适应路径方法

适应气候变化作为一个动态的、长期变化的过渡过程,决策者需要在这个过程中不断地随变化作出决策。动态自适应政策路径方法是Haasnoot等人^[35]结合了动态适应规划以及适应路径方法提出来的综合性方法。

DAP方法专为支持实施长期计划而开发。它强调初始计划需随时间推移而不断变动,规划人员通过监视系统运行和调整适应措施来使系统尽量朝向预期目标发展。DAP主要分为设计计划(设计动态自适应计划、监视程序以及各种政策实施前后的行动)和实施计划(监视计划实施进程并在必要时采取新的自适应措施)两个阶段。其主要步骤为:(1)分析系统的现有条件并明确未来目标;(2)制定基本计划;(3)通过各种行动使基本计划更稳健;(4)监视系统运行;(5)触发响应。

而当外部环境变化很大以致当前策略不能实现原本目标时,需要采取新的行动以使原本或调整的预期目标得以实现。需要进行行动转换的时间即为适应策略转折的临界点(adaptive tipping point, ATP),在未来变化场景下寻找适应策略转折的临界点是适应路径方法的核心(图4),在不同临界点进行适应措施转换则构成适应路径。AP方法鼓励决策者考虑未来的状况及相关措施的有效性,并随着时间的推移做出适应策略的转折决策,具有动态灵活性^[38]。DAPP方法基于DAP方法的框架,同时融入AP方法中适应策略转折的临界点概念和可视化的适应路径,其本质仍为AP方法。它提供了一系列可供实施的适应方案框架,在完成临界点分析后以决策树或类似地铁路线图的形式展示出来,任何一个可连通路便为一个动态自适应实施路径。

在适应决策方法中,稳健决策方法侧重于发现未来不同的场景,而适应路径方法通过临界点分析来发出适应政策转换的信号,更具动态性,相关案例如图4所示。气候变化将为沿海城市带来更严重的洪水事件,可能会超出当前防洪设施所能承受的范围(临界点)。如果不采取任何适应措施,那灾害风险将会超过临界水平并造成难以预估的损失;但若在临界点到来之前加强防洪措施(如建设新泵站、管径扩张、加固增高大坝等灰色措施以及铺设绿色屋顶、雨水花园等绿灰色措施),便可分阶段增强适应未来沿海洪水威胁的能力。在每个新的适应临界点到来之前进行新的适应措施规

图4 适应路径方法在未来沿海城市洪水适应决策中的应用

Figure 4 Application of adaptation pathways method in future coastal flood adaptation decision making

划、组合以及实施,以保证灾害风险一直处于临界点以下,系统能够保持稳健运行.最终形成可视化的适应路径图(图5).

目前,适应路径方法在沿海城市洪水适应决策方法中应用较为广泛,发达国家对于该类方法的探索走在前列.英国泰晤士河口2100(TE2100)项目采用AP方法为泰晤士河口制定了一项考虑极端气候变化影响的洪水管理方案,并为2010~2170年间的洪水管理提供了适应性策略^[39,40].新西兰借鉴了英国泰晤士河口2100项目的相关经验,将DAPP方法纳入了赫特河的洪水风险管理规划中^[41].荷兰研究人员使用DAPP方法来探索各种可能的政策响应,以确保荷兰莱茵河三角洲持续有效的洪水管理^[42].此外,澳大利亚湖泊入口的海岸规划^[43]、美国纽约城市适应未来飓风和风暴潮风险^[44]等案例都描述了适应路径方法如何在面对深度不确定性时帮助决策者进行更明智的决策.近年来,发展中国家在沿海地区防洪适应规划中也应用了适应路径方法.越南湄公河三角洲的芹苴市^[45]在考虑了自身应对能力后,确定了一系列分阶段的适应行动,希望在未来变化环境下能够有效防洪,为其他发展中国家的防洪适应规划提供了可借鉴性.总之,这类方法并不执着于对不确定性进行全面量化,而是更强调因时制宜,即随时间变化更改行动方案以减少不确定性对决策过程及结果的影响,从而保证决策的稳健性.

3.3 工程选择分析

与稳健决策方法、适应路径方法相似,工程选择

分析(engineering options analysis, EOA)也可以用来解决气候变化带来的深度不确定性,为适应气候变化决策服务. EOA方法与其他两种方法都遵循深度不确定性下的决策制定思路,具体实施流程如图6所示. EOA方法在“框架分析”阶段与稳健决策方法中的“问题公式化”过程类似,即寻找现在系统中存在的问题、明确最终要达成的目标以及建立高效的系统分析模型. “不确定性分析”阶段与其他两种方法类似,都是评估预先生成的政策措施在未来深度不确定性场景下的表现,并通过权衡分析挑选合适的政策措施组合. 它与适应路径方法相似,决策集更关注措施组合在时间维度上的变化,根据短、长期决策目标挑选决策实施路径,制定可实行的监控计划并不断调整政策路径以达到原本设定的目标. 总的来说,EOA方法基于计算机来模拟可能存在的的海平面不确定性,检验一系列气候变化可能导致的环境改变(例如海平面的上升速度),以及合理的应对措施选择(例如何时安装新泵站来应对海平面上升)在不同未来环境下的作用效果,最终得到一系列可能的结果范围,来帮助决策者进行更好的决策.

目前,EOA方法已被应用于停车场规划^[46]、澳大利亚液化天然气厂规划^[47]等. 在未来沿海洪水适应决策规划案例中,荷兰使用EOA方法进行了北海运河艾默伊登泵站的防洪规划设计^[48]. 艾默伊登泵站作为欧洲最大的泵站,日常扮演着防汛、调节水位等多种角色. 而随着它的初始设计寿命接近尾声,新一代泵站结构设计迫在眉睫. 该案例集中关注泵站抵御北海洪水以及调节内陆水位的功能,使用EOA方法来探索替换

图5 可视化的适应路径图

Figure 5 A visual adaptation pathways diagram

图 6 EOA方法实施框架

Figure 6 Implementation framework of engineering options analysis

艾默伊登泵站的具体工程设计(图7)。针对海平面上升和极端降水增加这两大主要不确定因素来源,设计2种海平面上升场景和4种极端降水增加场景,并根据防汛标准设置了3种设计方案。通过对固定式、被动式和主动灵活式3种设计方案的能效对比和经济评估,发现主动灵活式的设计思路在应对未来不确定性时更具优势。初始设计为后期改动留有余地,气候变化大背景下对于降水及海平面变化的长期监测也能够确保决策者在长期投资计划中适时、适当地采取下一步措施。总体来说,相较于RDM和AP两种方法,EOA方法更深入关注工程技术系统,期望从工程角度进行成本效益分析从而减少未来施工成本,其实施要求特定的高级工程技术专长人员。

4 3种决策方法述评

本文对RDM、AP、EOA三种方法的应用案例进行了对比总结,如表1所示。在气候变化下沿海城市洪水适应决策案例中,EOA方法相较于RDM、AP等决策方法应用案例较少,成熟度有欠缺。RDM方法将传统控制理论与现代管理决策理论相结合,长于未来场景的

图 7 艾默伊登泵站设计规划图。改编自文献[48]

Figure 7 Ijmuiden Pump Station design diagram. Adapted from Ref. [48]

表 1 3种决策方法对比

Table 1 The comparison of three decision methods

决策方法	决策目标人群	优点	缺点	案例
稳健决策理论	政府决策者、利益相关方	准则由专家确定,具备一定的权威性;在发现场景方面具备优势	本质上属于比较静态分析,如需获得下一步行动方案需要进行新一轮RDM研究;场景较多时计算成本比较大	美国加州水资源管理计划 ^[49] 美国南加州水资源适应性管理规划 ^[50] 越南胡志明市洪水管理 ^[51]
适应路径方法	政府决策者、利益相关方	强调时间维度上适应措施的灵活组合,将因时制宜纳入决策考虑范畴	情景分析中未能全面考虑气候经济社会等不确定性	荷兰莱茵河三角洲假设案例“Waas”适应洪水路径规划 ^[34] 荷兰鹿特丹雨水系统适应气候变化规划 ^[52] 荷兰莱茵河三角洲水资源管理真实案例 ^[42] 英国泰晤士河TE2100项目 ^[40] 越南芹苴市防洪适应路径规划 ^[45] 越南胡志明市适应海平面上升 ^[53] 中国上海市防洪适应路径规划 ^[54] 澳大利亚Entrance湖泊适应未来洪水风险规划 ^[43]
工程选择分析	工程实施人员	深入关注工程技术系统,与其他决策方法互补;进一步拓展决策空间,决策行动有针对性	对相关人员的专业技术要求较高,相对微观具体	荷兰北海运河艾默伊登泵站设计 ^[48]

全方位生成,但本质上属于比较静态分析,缺乏因时制宜的灵活性。AP方法更进一步,在时间维度上为决策者提供可供选择的适应路径,但相较于RDM方法来说缺乏对未来场景的充分考量。工程选择分析方法采用AP方法的灵活决策框架,但更关注具体的工程设计,并希望从工程角度出发进行成本效益分析从而更好地节约成本,然而目前仍缺乏大尺度的考量应用且熟知气候变化不确定性的专业工程技术人员较少,实际应用较为困难。RDM和AP方法总体更关注相对宏观水平上“是否以及何时采取措施”以完成更好的决策规划,而EOA方法更关注相对微观水平上“适应政策如何落实”这样的具体问题,可以给技术施工人员具体指导从而更好地解决工程实施过程中的路径选择问题。

适应气候变化的决策过程主要解决“如何处理深度不确定性”这一问题。本文中提到的稳健决策理论、适应路径方法、工程选择分析方法都是“主动”适应气候变化并能较好地处理深度不确定性的决策方法。这3种方法相对独立,但又相互依存,适应路径方法是稳健决策理论的动态应用,工程选择分析方法则是适应路径方法的工程应用。这些方法基于3个关键思想:(1)探索性建模;(2)自适应规划;(3)决策支持。探索性建模通过建立大量未来场景的数据集,系统地探索并比较不确

定性影响下各种备选措施的未来表现。RDM方法是进行“探索性建模”的利器。比如在上海市应对未来极端复合洪涝事件的研究中,Hu等人^[37]对于雨岛效应、未来极端降雨以及排水能力减少这个三维不确定性空间进行拉丁超立方体抽样生成了100个代表性未来场景,以避免对未来场景范围预测不足,有效地把握了未来场景的不确定性。而“自适应规划”强调随未来情景的实际变化对初始规划进行调整,具备很强的因时制宜的灵活性,从而规避了部分初始计划由于未来场景预测的不确定性产生的预测偏差问题。在深度不确定性下,决策过程致力于各方共同商议后作出决定,从而尽可能减少决策过程的不确定性对决策结果的影响。总之,在适应气候变化的决策过程中,这些决策方法最大限度地规避了“未知”带来的不确定性,是主动适应未来沿海洪水事件以及其他气候变化导致的灾难的重要工具。

5 未来展望

5.1 针对不同决策问题开展多种决策方法组合运用

气候变化适应决策的多种方法虽实施思路相似,但各有所长。近年来,各国研究者在探求各种方法的优

缺点及不同方法结合应用上进行了许多尝试。Hall等人^[55]和Matrosov等人^[56]比较了信息差距决策理论与稳健决策理论,认为两种方法通过不同的分析途径,都能得到相当但不完全相同的结果。Kwakkel等人^[57]比较了DAPP和RDM,认为两种方法的结合可以获得更稳健的效果,其中DAPP主要为自适应方案提供了系统的结构,而RDM为自适应方案的设计提供了一个清晰的基于上溯迭代模型的过程。Gersonius等人^[58]比较了实质选择权分析和适应临界点分析^[59],建议两种方法可以同时应用。多种方法的结合应用是未来气候变化适应决策研究的发展方向。

在气候变化下沿海城市洪水适应决策中,本文中的RDM、AP和EOA方法可以优化组合。基于RDM方法框架及AP方法分阶段灵活决策的思路,进行未来场景生成,并探索不同类型的措施(如加高提防、提高泵站抽水能力、修建大坝等)在不同未来场景下的有效期以及行动步骤的不同顺序所产生的影响,寻找适应临界点并最终生成可视化的适应路径图。EOA方法在工程上提供技术支持,例如如何更科学地设计大坝(如在大坝附近保留土地方便日后加高)能够获得最佳的成本效益比。未来可进一步探索在RDM和AP方法结合的基础上,融入EOA方法,使适应决策过程更加科学和实用。

5.2 建立多情景、多措施、多目标的稳健决策体系

在表1汇总的决策案例研究中,绝大多数仅仅面向“应对海平面上升”“雨洪管理”这种单一决策目标,对于未来场景的规划也相对单一,但实际情况往往复杂得多。这导致适应决策过程对于未来的不确定性预估不足,决策可信度大打折扣。科学家面对复杂的未来环境,需进行面向多目标的决策实践过程,将不确定性的来源考虑清楚,对不确定性因素进行明确划分,量化可通过概率量化的部分,并通过探索性建模完成对未来情景的完善探索及多种措施灵活组合的适应规划来规避不可量化的部分,最终形成多情景、多措施、多目标的适应决策方案,提供更科学的决策结果。

5.3 开展多方利益相关者共同决策实现“知识共创”

面对“深度不确定性”的决策在复杂程度上远高于一般决策,需要科学家、决策者、工程师和其他利益相关者之间进行持续且有意义的对话,并最终产生可靠的决策结果^[60,61]。针对“沿海防洪除涝”这一问题,科

学家需要通过决策部门讨论、走访专家和民众等方式寻找当前防护标准下防洪系统的关键漏洞及可能有效的政策措施;基于不同评价角度(如成本效益、生态价值等)的决策方案集也需要各利益相关方共同参与制定;决策者需要结合财政状况、工程施工难度等实际情况进行最终方案的偏向选择。整个决策过程通过整合各利益相关方的认知以及学科专业知识(气候学、气象学、水文学、工程学、经济学、决策科学等)来产生新的知识,尽量减少“知识不足”所带来的“不确定性”对决策过程及决策结果的影响。多方共同决策实现“知识共创”是未来决策研究的发展趋势。

5.4 3种决策方法综合运用案例——上海

本文选取沿海洪水成因复杂的上海市作为案例,以文献[37]中RDM方法为基础框架,融入AP方法和EOA方法,提出了3种决策方法综合运用的决策支持系统框架,以期帮助上海市解决未来的“防洪除涝”问题,如图8所示。文献[37]将上海市中心城区城市洪水防治面临的关键问题分为3个不确定性因子(X):未来极端降水量增加 α (7%~18%)、城市雨岛效应 β_1 (城市地区降雨量增加10%~20%)和 β_2 (少部分农村地区降雨量减少0.038%~0.076%)以及地面沉降、海平面上升所导致的排水能力下降 γ (0%~50%),并用拉丁超立方体抽样方法在 10^8 个不确定性因子组合中抽取100个具备代表性的未来场景集。同时,针对关键问题提出4个政策措施(L),即增加绿地面积、管网更换、修建深隧及增设泵站,并识别不同措施的适应临界点。最终通过计算机大数据计算、模拟、选择,生成多组政策措施组合的适应路径集供决策者进行选择(AP方法)。针对工程层面施工较为复杂的修建地下深隧及增设泵站等适应措施,可在深隧干管周围预留空间以便增设其他城市地下设施或更换更大直径的干管来满足日益增长的排涝需求,泵站地基也需要为后期能新增泵留有余地(EOA方法)。

决策过程的每一个环节由科学家、决策者、工程师及其他利益相关者商讨完成,以便充分探索未来代表性场景;采取多项适应措施来应对未来极端降水、海平面上升等导致的“防洪除涝”问题,最终形成多情景、多措施、多目标的稳健决策框架,实现“知识共创”过程。该决策框架不仅可运用于上海、深圳、广州这些洪水状况成因复杂的沿海城市,也可运用于其他沿海城市。

图 8 适应决策案例框架——上海

Figure 8 Adaptive decision framework—A case study of Shanghai

参考文献

- 1 Knight F H. Risk, Uncertainty and Profit. Boston: Houghton Mifflin, 1921
- 2 Curtis P, Carey M. Risk Assessment in Practice. Technical Report. Deloitte and Touche LLP, 2012
- 3 Rose K H. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)-Fifth Edition. Project Manage J, 2013, 3: e1
- 4 Park K F, Shapira Z. Risk and uncertainty. In: Augier M, Teece D, eds. The Palgrave Encyclopedia of Strategic Management. London: Palgrave Macmillan, 2017
- 5 Walker W E, Lempert R J, Kwakkel J H. Deep uncertainty. In: Gass S I, Fu M C, eds. Encyclopedia of Operations Research and Management

- Science. Boston: Springer, 2013
- 6 Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al. The ocean and cryosphere in a changing climate. In: Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al., eds. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 2019
 - 7 Lempert R J, Popper S W, Bankes S C. Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative Long-term Strategy Analysis, Monograph Reports MR-1626-RPC. Santa Monica: The RAND Pardee Center, 2003
 - 8 Marchau V A W J, Walker W E, Bloemen P J T M, et al. Decision Making Under Deep Uncertainty: From Theory to Practice. Cham: Springer, 2019
 - 9 Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
 - 10 Pan J H, Zheng Y. Analytical framework and policy implications on adapting to climate change (in Chinese). China Popul Resour Environ, 2010, 20: 1–5 [潘家华, 郑艳. 适应气候变化的分析框架及政策涵义. 中国人口资源与环境, 2010, 20: 1–5]
 - 11 Heal G, Kriström B. Uncertainty and climate change. *Environ Resour Econ*, 2002, 22: 3–39
 - 12 Wang J, Tan J K. Understanding the climate change and disaster risks in coastal areas of China to develop coping strategies (in Chinese). *Prog Geogr*, 2021, 40: 870–882 [王军, 谭金凯. 气候变化背景下中国沿海地区灾害风险研究与应对思考. 地理科学进展, 2021, 40: 870–882]
 - 13 Xu Z F, Han Y, Yang Z L. Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 365–375 [徐忠峰, 韩瑛, 杨宗良. 区域气候动力降尺度方法研究综述. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 487–498]
 - 14 Walker W, Haasnoot M, Kwakkel J. Adapt or perish: A review of planning approaches for adaptation under deep uncertainty. *Sustainability*, 2013, 5: 955–979
 - 15 Maru Y T, Smith M S. GEC special edition—Reframing adaptation pathways. *Glob Environ Change*, 2014, 28: 322–324
 - 16 Wise R M, Fazey I, Stafford Smith M, et al. Reconceptualising adaptation to climate change as part of pathways of change and response. *Glob Environ Change*, 2014, 28: 325–336
 - 17 Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, et al. Future flood losses in major coastal cities. *Nat Clim Chang*, 2013, 3: 802–806
 - 18 Woodruff J D, Irish J L, Camargo S J. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*, 2013, 504: 44–52
 - 19 Voudoukas M I, Mentaschi L, Voukouvalas E, et al. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat Commun*, 2018, 9: 2360
 - 20 Hinkel J, Lincke D, Vafeidis A T, et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 3292–3297
 - 21 Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change 2013: Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
 - 22 Winsemius H C, Aerts J C J H, van Beek L P H, et al. Global drivers of future river flood risk. *Nat Clim Chang*, 2016, 6: 381–385
 - 23 Xu H, Ma C, Lian J, et al. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China. *J Hydrol*, 2018, 563: 975–986
 - 24 Castrucci L, Tahvildari N. Modeling the impacts of sea level rise on storm surge inundation in flood-prone urban areas of Hampton Roads, Virginia. *Mar Technol Soc J*, 2018, 52: 92–105
 - 25 Horton R, Herweijer C, Rosenzweig C, et al. Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L02715
 - 26 Pfahl S, O’Gorman P A, Fischer E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nat Clim Chang*, 2017, 7: 423–427
 - 27 Zheng F, Westra S, Sisson S A. Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone. *J Hydrol*, 2013, 505: 172–187
 - 28 Wahl T, Jain S, Bender J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. *Nat Clim Chang*, 2015, 5: 1093–1097
 - 29 Karamouz M, Zahmatkesh Z, Goharian E, et al. Combined impact of inland and coastal floods: Mapping knowledge base for development of planning strategies. *J Water Resour Plann Manage*, 2015, 141: 04014098
 - 30 Hinkel J, Aerts J C J H, Brown S, et al. The ability of societies to adapt to twenty-first-century sea-level rise. *Nat Clim Chang*, 2018, 8: 570–578
 - 31 Lempert R J, Groves D G, Popper S W, et al. A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios. *Manage Sci*, 2006, 52: 514–528
 - 32 Walker W E, Rahman S A, Cave J. Adaptive policies, policy analysis, and policy-making. *Eur J Oper Res*, 2001, 128: 282–289
 - 33 Kwakkel J H, Walker W E, Marchau V. Adaptive airport strategic planning. *Eur J Transp Infrast*, 2010, 10: 249–273
 - 34 Haasnoot M, Middelkoop H, Offermans A, et al. Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment. *Clim Change*, 2012, 115: 795–819
 - 35 Haasnoot M, Kwakkel J H, Walker W E, et al. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain

- world. *Glob Environ Change*, 2013, 23: 485–498
- 36 Sriver R L, Lempert R J, Wikman-Svahn P, et al. Characterizing uncertain sea-level rise projections to support investment decisions. *PLoS One*, 2018, 13: e0190641
 - 37 Hu H, Tian Z, Sun L, et al. Synthesized trade-off analysis of flood control solutions under future deep uncertainty: An application to the central business district of Shanghai. *Water Res*, 2019, 166: 115067
 - 38 Jeuken A, Reeder T. Short-term decision making and long-term strategies: How to adapt to uncertain climate change. *Water Gov*, 2011, 1: 29–35
 - 39 Hall J W, Harvey H, Manning L J. Adaptation thresholds and pathways for tidal flood risk management in London. *Clim Risk Manag*, 2019, 24: 42–58
 - 40 Reeder T, Ranger N. How Do You Adapt in An Uncertain World? Lessons from the Thames Estuary 2100 Project. World Resources Report, Washington DC, 2011
 - 41 Lawrence J, Haasnoot M, McKim L, et al. Dynamic adaptive policy pathways (DAPP): From theory to practice. In: Marchau V A W J, Walker W E, Bloemen P J T M, et al., eds. *Decision Making under Deep Uncertainty*. Cham: Springer, 2019. 187–199
 - 42 Haasnoot M, van Deursen W P A, Middelkoop H, et al. An integrated assessment metamodel for developing adaption pathways for the Rhine Delta in the Netherlands. In: Seppelt R, Voinov A A, Lange S, et al., eds. *The 6th International Congress on Environmental Modelling and Software*. Leipzig: International Environmental Modelling and Software Society, 2012. 1743–1751
 - 43 Barnett J, Graham S, Mortreux C, et al. A local coastal adaptation pathway. *Nat Clim Chang*, 2014, 4: 1103–1108
 - 44 Rosenzweig C, Solecki W. Hurricane Sandy and adaptation pathways in New York: Lessons from a first-responder city. *Glob Environ Change*, 2014, 28: 395–408
 - 45 Radhakrishnan M, Nguyen H Q, Gersonius B, et al. Coping capacities for improving adaptation pathways for flood protection in Can Tho, Vietnam. *Clim Change*, 2018, 149: 29–41
 - 46 de Neufville R, Smet K, Cardin M A, et al. Engineering options analysis (EOA): Applications. In: Marchau V A W J, Walker W E, Bloemen P J T M, et al., eds. *Decision Making under Deep Uncertainty*. Cham: Springer, 2019. 223–252
 - 47 Cardin M A, Ranjbar-Bourani M, de Neufville R. Improving the lifecycle performance of engineering projects with flexible strategies: Example of on-shore LNG production design. *Syst Eng*, 2015, 18: 253–268
 - 48 Smet K S M. Engineering options: A proactive planning approach for aging water resource infrastructure under uncertainty. Doctor Dissertation. Boston: Harvard University, 2017
 - 49 Groves D G, Lempert R J. A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. *Glob Environ Change*, 2007, 17: 73–85
 - 50 Lempert R J, Groves D G. Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west. *Technol Forecast Soc Chang*, 2010, 77: 960–974
 - 51 Lempert R, Kalra N, Peyraud S, et al. Ensuring robust flood risk management in Ho Chi Minh City. Policy Research Working Paper, World Bank, 2013. WPS6465
 - 52 Gersonius B, Nasruddin F, Ashley R, et al. Developing the evidence base for mainstreaming adaptation of stormwater systems to climate change. *Water Res*, 2012, 46: 6824–6835
 - 53 Scussolini P, Tran T V T, Koks E, et al. Adaptation to sea level rise: A multidisciplinary analysis for Ho Chi Minh City, Vietnam. *Water Resour Res*, 2017, 53: 10841–10857
 - 54 Ke Q, Haasnoot M, Hoogvliet M. Exploring adaptation pathways in terms of flood risk management at a city scale—A case study for Shanghai city. *E3S Web Conf*, 2016, 7: 21002
 - 55 Hall J W, Lempert R J, Keller K, et al. Robust climate policies under uncertainty: A comparison of robust decision making and info-gap methods. *Risk Anal*, 2012, 32: 1657–1672
 - 56 Matrosov E S, Woods A M, Harou J J. Robust decision making and info-gap decision theory for water resource system planning. *J Hydrol*, 2013, 494: 43–58
 - 57 Kwakkel J H, Haasnoot M, Walker W E. Comparing robust decision-making and dynamic adaptive policy pathways for model-based decision support under deep uncertainty. *Environ Model Softw*, 2016, 86: 168–183
 - 58 Gersonius B, Ashley R, Jeuken A, et al. Accounting for uncertainty and flexibility in flood risk management: Comparing real-in-options optimisation and adaptation tipping points. *J Flood Risk Manag*, 2015, 8: 135–144
 - 59 Kwadijk J C J, Haasnoot M, Mulder J P M, et al. Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: A case study in the Netherlands. *Wiley Interdiscip Rev-Clim Chang*, 2010, 1: 729–740
 - 60 Clark W C, van Kerkhoff L, Lebel L, et al. Crafting usable knowledge for sustainable development. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 4570–4578
 - 61 Liu J, Bawa K S, Seager T P, et al. On knowledge generation and use for sustainability. *Nat Sustain*, 2019, 2: 80–82

Summary for “深度不确定性下沿海洪水气候变化适应决策方法述评”

A review of decision-making methods for climate change adaptation under deep uncertainty: With a focus on flooding control in coastal cities

Zhan Tian¹, Wenxian Wu¹, Junguo Liu^{1*} & Laixiang Sun²

¹ School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;

² Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

* Corresponding author, E-mail: liujg@sustech.edu.cn

Robust decision-making for climate change adaptation under deep uncertainty is a common challenge faced by policymakers and scientists in the world. In recent years, the limitations of risk assessment and adaptation planning based on the prediction results of climate models have become increasingly acknowledged. The uncertainties embodied in the model specifications, model parameterizations, prediction results, decision implementation process, and context changes bring significant risks to decision-making far beyond the general recognition of uncertainty drawn from historical data. Such combined and future-looking uncertainty is termed deep uncertainty. Researchers have applied robust decision-making (RDM) theory, adaptation pathways (AP) method, and engineering options analysis (EOA) method to climate change adaptation decision-making research. These theories and techniques can help scientists and policy makers to couple systematic analysis with thoughtful deliberation, typically in coordination with stakeholders, to consider the implications of choices under likely and unlikely future conditions, and thus to better grasp the impact of deep uncertainty on climate change decision-making. The literature on RDM, AP, and EOA is huge and in this review paper, we focus on their advancements and applications in the field of coastal flood control, and review the main strengths and interconnections of these three methods. The RDM method combines the traditional control theory with modern management decision-making theory, focuses on future scenario generation, cost-benefit comparisons of multiple adaptation measures under different future scenarios, and conducts the comparative static screening of the large numbers of scenarios-adaptation measure combinations. The AP method pays more attention to the most plausible scenario-adaptation measure combinations as time goes towards the future, rather than giving the full consideration of all future scenarios, and promotes the consideration of solutions that are adaptable through time. The EOA method is based on the framework of the AP method, with a focus on the specific engineering design. As a consequence, it may lack consideration for larger-scale application and implications. This paper considers how these three methods can be integrated to serve the decision-making process which is characterized by multiple decision goals, large number of plausible future scenarios, and large number of feasible mitigation and adaptation measures. A demonstrative case study of Shanghai is presented for this purpose. This case study proposes a framework to serve the mission of dynamic adaptation planning and engineering designs by combining the strengths of RDM, AP and EOA. We expect that the integration can help researchers to identify “low-regret” and even “no-regret” solutions that are beneficial over a broad set of potential future situations. Because the integration must depend on the continuous and effective dialogues among scientists, policymakers, local experts, and other stakeholders, it is bound to be a co-production process of the decision-making knowledge and such a process has the potential to improve public confidence on the proposed policies and solutions. Finally, we argue that the integrated application of these three methods and the process of “knowledge co-creation” in the integration process are the key direction for future development in the field of climate change adaptation decision-making under the context of deep uncertainty.

deep uncertainty, climate change adaptation, coastal flood risk, robust decision making, adaptation pathways, engineering options analysis

doi: [10.1360/TB-2021-1218](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1218)