

气候变化风险的新型分类

张月鸿^{1,2}, 吴绍洪¹, 戴尔阜¹, 尹云鹤¹, 刘登伟³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 水利部发展研究中心, 北京 100038)

摘要: 风险分类是对气候变化风险进行系统风险评估和管理的前提和基础。本文首先按部门和领域识别了主要的气候变化风险, 然后采用国际风险管理理事会 (International Risk Governance Council, IRGC) 的新型风险分类体系 (简单风险、复杂风险、不确定风险和模糊风险) 进行分类: 提出以“不确定性”作为分类依据; 把 IPCC 第四次评估报告中描述不确定性的主要术语——“信度”和“可能性”作为分类特征参数, 分别构建了四类风险的模糊隶属函数, 根据最大隶属度原则从定量角度对气候变化风险进行分类; 同时利用 IPCC 的两个定性指标“达成一致的程度上和证据量”对定量分类方法进行补充, 初步建立了气候变化风险的分方法体系。获得的气候变化风险分类的初步结果, 可以为风险管理机构选择不同类别的评估和管理方法进行风险研究提供科学依据。

关键词: 气候变化; 风险分类; 不确定性

文章编号: 1000-0585(2008)04-0763-12

1 引言

IPCC 第四次评估报告指出: 近 100 年全球平均气温升高了 0.74℃, 最近 50 年有加速之势, 未来全球仍将表现为明显的增温, 极端天气气候事件及其引发的气象灾害可能更加严重^[1]。许多证据表明气候变化已经对自然生态和社会经济系统造成了巨大的影响和威胁: 加剧水资源短缺, 影响农业生产, 引起洪水和海平面上升, 生物多样性减少, 影响某些传染病的传播过程等^[2-4], 甚至还可能导致严重的经济危机和社会动荡。因此, 必须尽快采取措施来管理和控制这些气候变化衍生的风险。对于气候变化潜在的社会、环境影响, 尽管以地理学为核心的一些学科已经开展了大量研究^[5,6], 但是考虑到风险管理方法对于决策的各种优势 (不确定性管理的方法、利益相关者的参与、政策选择的方法评估、多学科研究的综合等), IPCC 在第四次气候变化评估报告中特别强调要在风险管理框架下, 采用更为系统的风险评估和管理方法开展气候变化影响研究^[4]。本文进行的风险分类是对气候变化风险这种复杂的系统性问题进行风险评估和管理的基本前提和必要基础。

当前, 国际上对气候相关风险的分类, 主要包括根据对危险度的粗略统计 (如临危人口, 货币花费)、地理范围 (如局地, 区域, 全球)、时间范畴 (如可逆的或不可逆的)、风险结果在各种人群中的分布 (如区域, 收入) 等进行的分类^[7-9]。不同的分类体系有不同的目的和作用^[10], 并没有好坏之分。本文采用国际风险管理理事会 (IRGC) 提出的新

收稿日期: 2008-04-10; 修订日期: 2008-04-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAD20B05)

作者简介: 张月鸿 (1979), 女, 山西人, 博士研究生。主要从事环境整治与风险研究。

E-mail: zhangyuhong_05b@igsnrr.ac.cn

型风险分类体系（简单、复杂、不确定和模糊风险）^[11] 进行分类，主要因为它是一个以解决问题为导向的分类体系，有助于解决我国当前气候变化风险管理面临的问题。

首先，对气候变化进行 IRGC 分类有助于提高风险管理的效率。气候系统具有内在混沌的特性，目前对其运作方式和反馈机制尚未完全了解，科学家对气候变化的许多过程及其可能影响的认识还存在高度的不确定性和争议性，许多气候变化风险还处于灰箱、甚至是黑箱状态。在尽量从科学层面认识这些未知因素的同时，也需要针对其特点，分别采取不同的措施来应对和管理这些不同状态的风险。本文认为 IRGC 的分类体系可以用来区分气候变化风险中不同层次的白箱、灰箱、黑箱，而且 IRGC 还分别为各类风险提供了不同的风险评价、评估和风险综合治理的策略和方法^[11]。不同种类的风险运用不同的方法和策略可以把各种风险纳入到系统化的框架里，简化风险管理的程序，有利于提高风险管理的效率。而我国当前进行的一些气候变化风险研究，主要是由气候相关的脆弱性研究和灾害研究发展而来，延续了分部门和分领域的管理模式，各部门更关注的是各自领域内的研究内容，对于复杂程度和确定程度不同的各种气候变化风险都笼统地采用同一套方法或模式进行管理，风险管理效率较低，有必要进行分类管理。

同时，采用 IRGC 的风险分类体系还可以促进气候变化风险评估的科学性，当前风险评估采用的主要是风险管理领域已经建立的一些科学方法，包括专家评判法、各种形式的科学实验和模拟、概率和统计理论、成本效益理论和决策分析以及贝叶斯和蒙特卡罗方法等，这些传统方法虽然已经为风险决策提供了一定基础^[12]，但是由于它们都是基于两个基本参数——可能发生的事件（危害或结果）及与其联系的概率（可能性）来表达的^[13]，只适用于那些发生概率可以根据历史数据或是严密模型推导出来的^[14]、“严格”意义上的风险，对于气候变化风险这种具有不同确定程度和复杂程度的系统性风险，不考虑风险信息的可获取性、确定程度和争议程度，直接采用这种简约式的、“严格”的风险评估方法，是不合理的、不科学的、甚至是具有误导性的^[13]。因此，针对这些问题，亟需要区分出哪些风险可以用传统方法评估，哪些风险需要采用另外的方法。而 IRGC 分类本身就是对复杂程度、确定程度以及争议程度不同的风险的划分，并分别提出了相应的评估和管理的方法策略，可以有效解决这些问题。因此，采用 IRGC 的新型风险分类体系对气候变化风险进行分类，为采用不同方法和策略进行分层次、分类别的风险评价和管理奠定科学基础，可以提高风险管理的效率，增强风险评估的科学性。

2 气候变化风险的界定与识别

对气候变化风险进行界定和识别是风险分类以及风险评估与管理的基础。目前科学界对于气候变化风险的定义还没有形成统一的看法，本文根据多数学者认可的风险定义以及气候变化的特征，提出气候变化风险是气候系统变化对自然生态系统和人类社会系统造成影响的可能性，尤其是造成损失、伤害或毁灭等负面影响的可能性。

风险识别是查找、列出和描述风险事件、风险源、风险后果等风险要素的过程。气候变化的风险事件指的是气候变化可能对自然生态系统和社会经济系统造成的各种具体（负面）影响，本文识别的气候变化风险事件不仅包括洪水、风暴等常见的气候相关的突发性事件，也包含了一些低概率事件以及变化幅度和速率较小的蠕变性（creeping）^[15, 16] 风险事件（如生态系统结构和功能的改变，土壤盐碱化）。气候变化风险源主要包括两个方面：一是平均气候状况（气温、降水、海平面上升）；二是极端气候变化（热带气旋、风暴潮、

表 1 气候变化风险的识别

Tab 1 The identification of climate change risks

部门领域	气候变化风险	风险源(气候变化)	可能风险结果
农业	农作物及其市场价格波动	气温升高, CO ₂ 浓度增加, 干旱, 洪水, 热浪频率的增加	除少数地区外, 大多数地区会产生负面影响, 作物减产; 作物市场价格可能会产生波动。
	灌溉需水量增加	气温升高, 干旱,	增加农业灌溉用水量, 加剧水资源供需矛盾。
	农作物病虫害增加	气温升高, 热日增多, CO ₂ 浓度增加, 极端气候事件增加	增加许多主要农作物害虫和杂草的数量、生长速度和地理分布的范围。
森林、草原和渔业	森林生产力与木材市场	气温升高, 干旱, 病虫害	气温升高一般增加森林生产力, 干旱、病虫害会降低生产力, 木材供给的变化会影响市场。
	草场与畜产量变化	气温升高, 干旱, 病虫害,	温带地区升温有利于草原生产力和畜产量的提高, 但季节性干旱和热带地区相反, 病虫害和干旱会带来负面影响。
	森林草原火灾	气温升高, 干旱, 热浪	世界各地发生森林火灾的次数增加, 规模扩大。
	渔业和水产业风险	水温升高, 海平面上升, 极端天气事件	影响鱼类种群数量种类和分布范围的变化, 并最终影响到渔业资源的数量、质量及其开发利用, 导致某些鱼种灭绝。
水文与水资源	供水短缺	气温升高, 干旱、热浪、降水变化, 海平面上升	气候变化对径流量和地下水补给量的影响在不同地区和不同模式下是不同的, 主要依赖降水变化情况而定。
	水质恶化	较高的水温和变率, 海平面上升, 降水减少和变率增加, 干旱等极端气候事件	河流的水温升高和变率加大可能促进藻类、细菌和真菌繁殖, 高强度的降雨将导致土壤中的污染物流入水体, 在河口和内河段流量可能减少, 导致水体盐度增加。
	冰川消融	气温升高, 降水变率增加	大多数冰川加速融化, 许多小冰川可能消失。
	洪涝与干旱	气温升高, 降水变率增加, 海平面上升, 热带气旋、风暴潮等极端事件增加	干旱和洪涝等极端事件发生的频率和强度都可能增大。
海岸带	海岸侵蚀	海平面上升, 热带气旋, 风暴潮	提高海岸侵蚀率, 导致海岸退化。
	沿岸低地的淹没	海平面上升, 热带气旋, 风暴潮	淹没沿岸土地, 造成严重社会经济损失。
	盐水入侵(河口、地下水)	海平面上升, 风暴潮, 洪水	地表水和地下水的盐水入侵都可能恶化, 严重影响供水。
	沿海湿地、珊瑚礁等生态系统的退化	气温升高, 海平面上升, 热带气旋, 风暴潮, 海水酸化	沿海湿地退化、珊瑚礁白化, 甚至消失, 进而影响相关生态系统的结构和功能。
	热带气旋、风暴潮灾害风险	气温升高, 海平面上升	热带和副热带地区热带气旋强度可能会增加, 路线可能改变, 风暴潮强度可能增加, 进而造成严重的社会经济和环境影响。
自然生态系统	生境的丧失和物种的灭绝	气温升高, 干旱, 野火, 病虫害	引起生境变化, 甚至是毁灭性破坏, 加剧生物多样性损失, 物种灭绝的风险增加。
	陆地生态系统结构、功能破坏	气温升高, CO ₂ 浓度增加, 极端气候事件	生态系统结构、范围发生变化(有向两极移动的趋势), 提供的物质和服务功能降低。
	海洋酸化对海洋生物的风险	气温升高, CO ₂ 浓度增加	导致海洋生物死亡, 珊瑚礁生态系统破坏, 生物多样性丧失。
生存环境	城市大气污染	气温升高, CO ₂ 浓度增加	加重臭氧污染, 同时加剧城市已有的空气污染。
	城市热岛效应	气温升高, CO ₂ 浓度增加, 极端气候	热岛效应在气候变暖的背景下可能加剧。
	土壤盐碱化和沙漠化	气温升高, 海平面上升, 降水变率的增加, 干旱等极端气候	在主要的干旱和半干旱区, 沙漠化土地面积可能增大, 土壤盐碱化可能加剧。
	沙尘暴	气温升高, 降水变率的增加, 干旱等极端气候	气候变化对沙尘暴的影响还不确定, 可能加剧, 减弱, 也可能无影响。
人类健康	极端天气事件导致的疾病、伤亡	气温升高, 极端气候	使某些疾病死亡率、伤残率、传染病的发病率上升, 并加大社会心理压力。
	媒介传染病(血吸虫、疟疾、登革热、流行性出血热)	气温升高, 极端气候	血吸虫的分布和种群数量可能会变化; 气候变化对疟疾有不同的影响, 有些区域感染区域和季节将会扩展, 有些区域将缩减; 对登革热与流行性出血热的影响机制还不太明确。
	空气质量引起的呼吸系统疾病	气温升高, 极端气候	造成心肺呼吸系统、免疫系统的损伤。

续表 1

重要基础设施与产业风险	大型水利工程	气温升高,洪水,火灾,风暴,长期干旱等极端气候事件	危害大坝安全,可能产生滑坡、泥石流灾害,并可能诱发地震,气温升高与长期干旱导致水利工程发电和运营风险。
	交通和传输系统	气温升高;极端气候事件,如洪水,滑坡,火灾,风暴等	道路变形、毁坏,供水系统、食物供给以及能源输送系统,信息系统,废物处理系统可能受到影响或破坏。
	金融保险业风险	海平面上升,极端气候事件,如洪水,滑坡,火灾,风暴等	各种灾害的增加,尤其是一些极端气候灾害可能提高巨灾风险评估中保险精算的不确定性,导致保险费用增加以及保险覆盖面的降低;考虑到巨灾风险成本可能增加,再保险公司也可能持保守观望态度,整个保险业可能受到抑制。
	旅游业风险	气温升高,海平面上升,极端气候	可能是直接或间接的,主要为负面影响,降低旅游资源的吸引力、对旅游者安全和行为将产生影响,降低旅游经济收入。
	能源需求风险	气温升高	影响能源的消费和生产,取暖需求会降低,制冷耗会增加,能源的成本也可能提高。

极端降水、河流洪水、热浪与寒潮、干旱)^[4]。气候变化风险的后果主要包括经济损失,生命威胁,各种系统的产出、特性以及系统本身的变化等^[17]。本文从农业、森林、草原和渔业,水文与水资源,海岸带,自然生态系统,生存环境,人类健康,重要基础设施与产业风险等分部门、分领域的角度,识别了主要的气候变化风险事件,并对其风险源和结果进行了较为系统的描述和总结^[2~4, 18~43](表 1)。

从表 1 可以看出,气候变化风险体系由大量具体风险构成,涉及到自然、社会、经济、政治和生活的许多层面,是复杂多样的系统性风险^[44]。由于人类目前科学技术发展水平尚未能完全认识气候变化及其产生的风险,该系统内不同风险相对于我们的知识水平来说,就表现出不同的复杂程度和确定程度。如果所有风险都笼统的、不分类别的采用传统风险评估和管理方法,不仅效率较低,而且可能会导致错误的结果。因此,需要在识别这些气候变化风险的基础上,按照风险相关知识和信息的复杂性、不确定性以及争议程度对气候变化风险进行分类,从而为开展风险的综合评价和管理提供科学基础。

3 IRGC 的风险分类体系与气候变化风险分类标准

国际风险管理理事会(IRGC)针对全球性、系统性、复杂性、不确定性风险问题构建的新

表 2 IRGC 四类风险的定义与特性描述

Tab 2 The definition and characterization of risk categories of IRGC

类别	定义与特点	范 例
简单风险	指那些因果关系清楚,并且已达成共识的风险,但简单风险并不等同于小的和可忽略的风险,关键是其潜在的负面影响十分明显,所用的价值观是无可争议的,不确定性很低。	车祸、已知的健康风险
复杂风险	那些很难识别或者很难量化风险源和风险结果之间的因果关系,往往有大量潜在的风险因子和可能结果,可能是由风险源各个因子之间复杂的协同作用或对抗作用、风险结果对风险源的滞后、干扰变量(Intervening Variables)等引起的。	大坝风险、典型传染病
不确定风险	指那些影响因素已经明确,但其潜在的损害及其可能性未知或高度不确定,对不利影响本身或其可能性还不能准确描述的风险,由于其相关知识是不完备的,其决策的科学和技术基础缺乏清晰性,在风险评估中往往需要依靠不确定的猜想和预测。	地震、新型传染病
模糊风险	解释性模糊 指对于同一评估结果的不同解释,比如对是否有不利影响(风险)存在争议。 标准性模糊 存在风险的证据已经无可争议,但对于可容忍的或可接受的风险界限的划分还存在分歧。	电磁辐射 转基因食物、 核电

注:据 IRGC 风险管理白皮书^[11]整理

型风险分类体系(简单风险、复杂风险、不确定风险和模糊风险,见表2),从风险的本质出发,根据风险相关知识、信息的状态和质量进行分类,把复杂性和确定程度不同的风险区分开来管理,并对不同风险类别提供了不同的风险评价、评估和风险综合管理的策略和方法^[11]。但IRGC的分类只是一个概念体系,没有提出明确或定量的分类标准和方法,只是主张建立一个包括科学家、不同风险的评估者、管理者和重要利益相关者等在内的“分类筛选小组”,通过共同协商获得比较折衷的意见。而在实际研究中,该“小组”在人员选择、组织管理,意见协调与经费支持等方面都有很大的问题^[11],从机制、组织和管理等方面来看,这种工作方法不易实现,必须设法在其定性类别描述的基础上构建一种定量/半定量的、可操作的分类方法。

通过对四类风险定义的分析,发现该风险分类与风险相关知识的“不确定性”关系密切。不确定性本身是一个多维的概念,这里指的不确定性反映的是对事物缺乏确切认识的程度,在某种完全确定到几乎完全缺乏可信度的范围内变化^[45]。而气候变化风险中这种不确定程度的变化十分明显。气候变化风险的不确定性可能是由于无知、偶然性、随机性、观测的不精确、无法进行充分测量、缺乏知识或模糊不清引起的,从这种广义的理解来看,不同程度的“不确定性”基本可以用来表征简单风险、复杂风险、不确定风险以及模糊风险的梯级变化。如果所了解的信息和知识非常充分,已经有了深入的研究和既定的方法,剩余的不确定性很低,则属于简单风险;如果信息和知识充分,剩余的不确定性较低,但是由于风险的机制比较复杂、干涉变量比较多,则归为复杂风险;如果对一个风险目前所知还不多,知识和信息比较缺乏,不确定性较高,就属于不确定风险;如果对一个风险所知非常少甚至对于它是否会导致不利影响都不太明确,或者是对其可容忍度和可接受程度的界限划分产生争议时,将其归为模糊风险。

因此,气候变化风险的分类就是要区分出各种风险相关的知识和信息,尤其是风险源、可能风险结果及其因果关系信息的不确定程度,根据不确定性将其归类。需要注意的是这里的“不确定性”是一种抽象的度量,而IRGC分类中的“不确定风险”只是通过其度量的一种风险类别,二者是两个维度上的概念。

4 气候变化风险的分类方法与结果

4.1 定量分类方法

IRGC 风险分类本身具有模糊性,类别之间很难划出一条明确的界线,各类别并不是相互抵触和排斥的——分类的实质是要确定某个风险所属的主导类别^[46]。而模糊数学的隶属度反映的就是处于过渡状态的事物对于差异一方的倾向程度,因此可以用隶属度和模糊子集来描述IRGC风险分类的这种模糊的类属特性。把气候变化风险设定为论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 简单风险 R_1 、复杂风险 R_2 、不确定风险 R_3 、模糊风险 R_4 , 看作是论域 U 中的模糊子集。论域上的元素(各种风险 x_1, x_2, \dots, x_n)都在一定程度上属于每个模糊子集(风险类别),关键在于元素属于各集合的程度(隶属度)不同。隶属度是通过各特征参数的隶属函数 $\mu_{R_i}(x)$ 来计算的,其取值范围是 $[0, 1]$, 表达了论域 U 中的某一风险 x 属于模糊子集 R_i 的程度,隶属度越高,元素属于集合的程度越大, $\mu_{R_i}(x) = 1$ 表示 x 完全属于集合 R_i , $\mu_{R_i}(x) = 0$ 则表示 x 完全不属于集合 R_i 。通过最大隶属度原则就可以确定风险 x 所属的类别。定量分类方法主要分为三步:特征参数的抽取;建立四个风险类别模式的隶属函数;根据最大隶属度原则进行分类。

4 1 1 分类特征参数的抽取 特征参数的抽取是指从风险 x 中提取与分类有关的特征,并确定 x 在各个特征上的具体数据。如前所述,可以把风险相关知识的不确定程度作为其分类的主要特征。对于气候变化的不确定性问题,IPCC 的历次评估报告都提出了相应的处理方法,尤其是第四次评估报告对其做了进一步的完善,其中第二工作组重点关注气候变化对不同的部门、系统、区域所产生的影响及其所表现出来的脆弱性,其不确定性描述是以支持风险分析为目的^[47],因此,可以直接利用其表述不确定性的定量术语——信度(confidence)和可能性(likelihood)^[48]作为分类的特征参数,建立它们与风险类别之间的对应关系,从定量角度对气候变化风险进行分类。

信度 (Confidence) 是指根据相关研究结果以及 IPCC 作者的专业判断对某个问题现有知识水平可信程度的理解和评估,按可信程度分为 5 级:非常高(至少 9 成是正确的),高(约 8 成正确),中等(约 5 成正确),低(约 2 成正确),非常低(少于 1 成正确)。可能性(Likelihood)表述了自然界某一事件或结果的发生概率,它是由专家判断估算出来的,这与传统风险评估中事件发生的严格意义上的频率或概率不同^[44],是一种包含专家主观判断的较为广义的理解。因此,它不仅可以用来描述比较确定的事件,也可以用来表达对不确定的、甚至是模糊风险发生概率的主观判断。可能性分为 7 个级别:几乎确定(99% 以上的概率),很可能(90%~99% 的概率),可能(66%~90% 的概率),中等可能(33%~66% 的概率),不可能(10%~33% 的概率),很不可能(1%~10% 的概率),几乎不可能(小于 1% 的概率)^[48,49]。

对于不确定性的表述,“可能性”侧重的是结果的概率,而“信度”侧重于对一个问题理解达成一致的程度,不应该将两者混淆^[47]。IPCC“描述气候变化科学不确定性以支持风险分析和选择分析”研讨会^[47]提供了区别可能性与信度这两个概念的方法。如图 1 所示,两个分离的轴分别向上和向右增加,代表着可能性和信度的增加,阴影区内灰度越大就可以越明确的表述。低信度一般对应中等可能性,因为在信度很低的科学领域,设定的任何可能性都应该是适中的,若预期某种结果有很高或很低的可能性,都不合逻辑,像图 1 中所标注的 A 和 B 这种低信度却设定了高或低可能性的极端情况

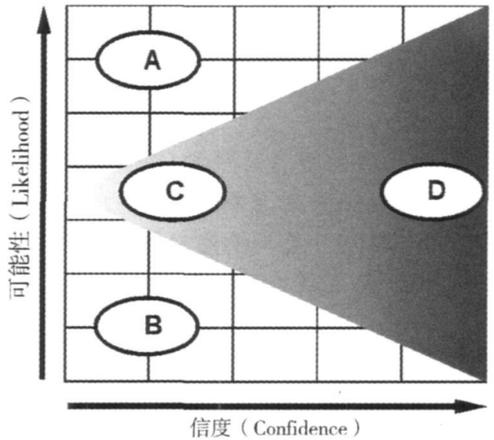


图 1 可能性与信度的相互关系 (Manning, 2006)
Fig 1 Schematic depicting inter-relationship between likelihood and confidence

一般不会发生。而高信度对应高中低可能性的情况都存在,尤其是高信度与中等可能性对应(如对于抛硬币正面朝上概率大约为 50% 的结果具有很高的信度,如图 1 中 D)与因缺乏知识和低信度而不得不指定一个中等可能性的情形(图 1 中 C)是完全不同的^[49]。因此,信度和可能性在不确定性描述中是互补的^[47~49],两者结合起来可以更全面的描述气候变化风险的不确定性。按照前文识别的风险源与风险结果,在 IPCC 第四次评估报告中可以查找出各种气候变化风险对应的信度水平和可能性级别,从而确定这两个特征参数的数值。

4 1 2 构建风险类别模式的隶属函数 本文以信度(C)和可能性(L)作为特征参数来构建四类风险的隶属函数。根据四类风险以及信度与可能性的定义,可以大致确定它们之间的关系:信度水平越高,毫无疑问确定程度也越大,随着信度水平的降低,应该逐次对应简单风

险、复杂风险、不确定风险和模糊风险;可能性的两个极端(几乎确定、几乎不可能)本身暗含着较高的确定程度^[14],由于基于过去的经验对高概率事件的认识一般较为充分,因此,可能性大的一端的不确定性一般比小的一端要低;而“中等可能性”,在信度较高时,其不确定程度介于两个极端之间,在信度较低的情况下,往往因为缺乏知识一般不得不指定一个居中的可能性,其不确定性往往高于两端。因此,可以分别根据信度与可能性这两个特征参数建立四类风险大致的隶属函数关系(如图 2)。

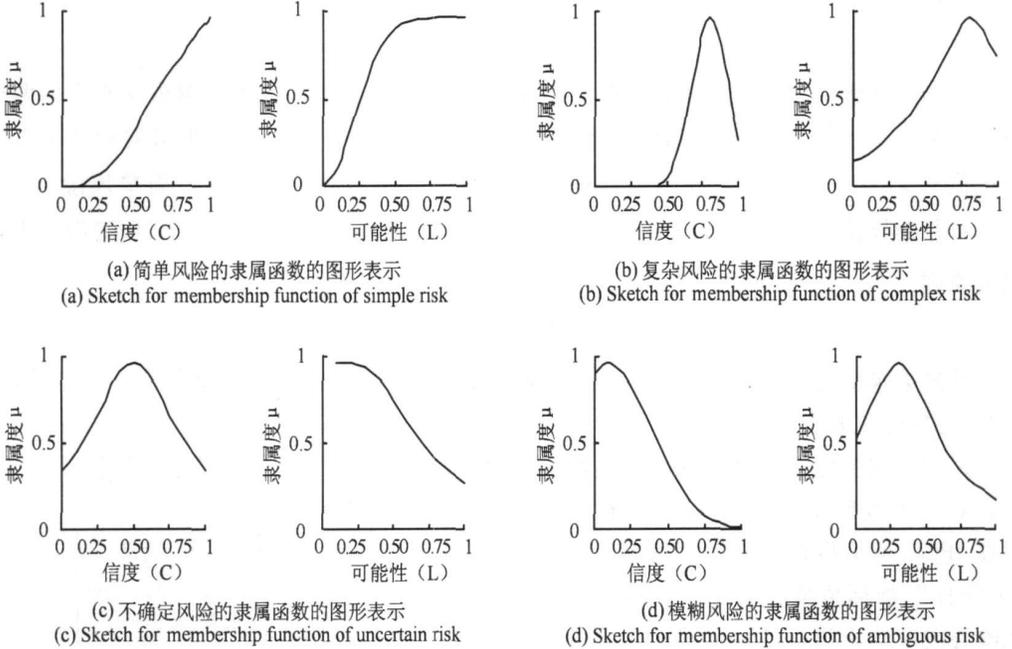


图 2 信度、可能性的四类风险隶属关系的图形表示

Fig 2 Schematic depicting the membership function of four risk categories by ‘ Confidence’ and ‘ Likelihood’

隶属函数计算得出的分类结果不应与公认的经验知识相矛盾,而且任何风险只能划归为唯一确定的类型。本文根据图 2 中四类风险的隶属函数随信度与可能性的变化趋势,参考黄崇福等总结的常用隶属函数与其图形表示的对应关系^[50],可以确定其大致的隶属函数类型,最后经过多次试算分别确定了四类风险的信度和可能性的分隶属函数。

1) 简单风险的隶属函数: 信度 C 的分隶属函数: $\mu_{R_1}(C) = 2.72e^{-\frac{1}{C}} (C \neq 0)$ (1)

可能性 L 的分隶属函数: $\mu_{R_1}(L) = 1 - e^{-\left(\frac{L}{0.8}\right)^2}$ (2)

通过以上分析发现,与可能性相比,信度与风险类别的划分更直接相关,根据信度与可能性的相互关系和试算给定了两者的权重分别为 0.6 和 0.4, 得出了简单风险的总隶属函数:

$$\mu_{R_1} = 0.6 \left(2.72e^{-\frac{1}{C}} \right) + 0.4 \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{0.8}\right)^2} \right) \quad (3)$$

2) 类似的,定义了复杂风险的隶属函数:

$$\mu_{R_2} = 0.6 \left(e^{-33(C-0.8)^2} \right) + 0.4 \left[\frac{1}{1 + 9(L - 0.8)^2} \right] \quad (4)$$

$$3) \text{ 不确定风险的隶属函数: } \mu_{R_3} = 0.6 \left[\frac{1}{1 + 7(C - 0.5)^2} \right] + 0.4(1 - e^{-(\frac{0.6}{L})^2}) \quad (L \neq 0) \quad (5)$$

$$4) \text{ 模糊风险的隶属函数: } \mu_{R_4} = 0.6(e^{-6(C-0.1)^2}) + 0.4 \left[\frac{1}{1 + 9(L - 0.3)^2} \right] \quad (6)$$

4.1.3 根据最大隶属度原则进行分类 把风险 x 的信度和可能性值, 分别代入四类风险的隶属函数, 求出四个隶属度值, 根据最大隶属度原则确定风险 $x(C, L)$ 的类别, 将风险 x 归入具有最大隶属度的风险类型 R_i 。

$$\mu_{R_i}(x) = \max_{1 \leq j \leq 4} \mu_{R_j}(C, L) \quad (7)$$

例如海洋酸化对海洋生物的风险, 从 IPCC 第二工作组第四次评估报告中查出的两个特征参数——“信度”和“可能性”分别为“中等信度”和“可能”, 取其对应数值范围的中值 0.5, 78%, 根据隶属函数分别计算其对于四类风险的隶属度, 简单风险 $\mu_{R_1} = 0.56$; 复杂风险 $\mu_{R_2} = 0.33$; 不确定风险 $\mu_{R_3} = 0.83$; 模糊风险 $\mu_{R_4} = 0.55$ 。则根据最大隶属度原则:

$$\mu_{R_3} = \max_{1 \leq j \leq 4} \mu_{R_j}(C, L) = 0.83 \quad (8)$$

其最大隶属度的风险类型为 R_3 ——不确定风险, 因此, 将该风险划归为不确定风险。

4.2 定性分类方法

采用气候变化风险分类的定量方法可以对大多数气候变化风险进行分类, 但在 IPCC 评估报告中提取“信度”和“可能性”指标值的过程中, 发现一些风险并没有给出指标值, 或只给出了其中一个, 其原因可能是 IPCC 作者表述习惯造成的, 但也有些不确定程度和模糊程度高的风险确实无法用定量结果来表示, 比如对于标准性模糊风险, 需要斟酌具体风险的可容忍与可接受的界限是否明确, 很难划分定量级别, 这就需要根据“达成一致的程​​度和证据量 (Level of agreement & amount of evidence)”这两个 IPCC 描述不确定性的定性指标来分析, 它们是从相对意义上对一个问题理解程度的科学判断, 或对于无法进一步定量评估的结果的不确定表达^[48]。图 3 根据风险类别的定义设定了 IRGC 风险分类与达成一致的程​​度和证据量的简单对应关系。采用此方法我们对没有给出信度和可能性指标的风险进行了补充分类。

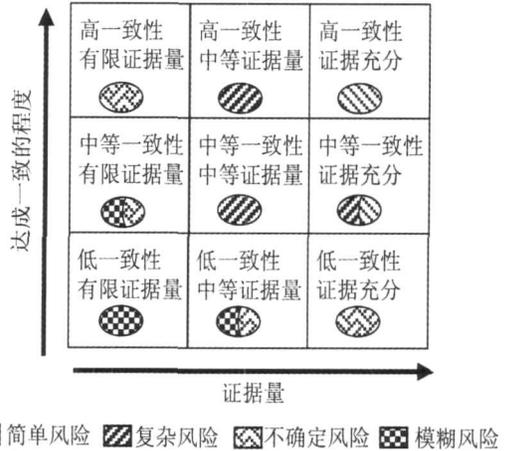


图 3 风险类别与达成一致的程​​度、证据量的定性关系

Fig. 3 Schematic depicting the qualitative relationship of four risk categories with “the level of agreement and amount of evidence”

4.3 分类结果

按照以上方法, 对识别出的绝大部分气候变化风险进行了归类, 获得了初步的分类结果 (如表 3)。但对少数 IPCC 第四次评估报告没有进行定量或定性的不确定性描述的风险, 暂时还没有进行分类, 没有包含在表 3 的分类结果中。如何对这些风险进行不确定性

评估和分类, 还需要将来进一步研究。对已经归类的风险, 可以将其分别纳入 IRGC 为各个类别风险提供的方法流程^[11] 中进行评价和管理。

表 3 气候变化风险的分类结果

Tab 3 The risk classification results of climate change

风险类别	气候变化风险事件
简单风险	冰川消融; 海岸侵蚀; 沿岸低地的淹没; 沿海湿地、珊瑚礁等生态系统的退化; 生境的丧失和物种的灭绝; 媒介传染病 (血吸虫、疟疾)
复杂风险	农业灌溉需水量增加; 森林草原火灾; 农作物病虫害增加; 供水短缺; 水质恶化; 洪涝与干旱; 盐水入侵 (河口、地下水); 生态系统结构、功能受损; 土壤盐碱化和沙漠化; 极端天气事件导致的疾病、伤亡; 交通和传输系统风险
不确定风险	农作物产量; 森林生产力; 草场与畜产量变化; 渔业和水产业风险; 风暴潮; 海洋酸化对海洋生物的风险; 城市大气污染; 海洋酸化对海洋生物的风险; 空气质量引起的呼吸系统疾病; 大型水利工程风险; 金融保险业风险; 旅游业风险
模糊风险	农作市场价格波动; 森林木材市场; 热带气旋; 媒介传染病 (登革热)

5 结论与讨论

本研究识别出了气候变化可能引起或加重的主要风险, 并应用 IRGC 提出的新型风险分类体系, 对识别出的气候变化风险进行了系统分类, 获得了气候变化风险的初步分类结果。根据分类结果, 采用 IRGC 提供的不同方法和策略来评估和管理气候变化风险, 可以提高风险管理的效率, 增强风险评估的科学性, 并为气候变化风险综合治理奠定良好的基础。但是研究中还存在一些问题, 将来应该重点在以下几方面进一步深入研究:

(1) 气候变化相关的风险复杂多样, 很难全部识别和覆盖, 因此本文的分类只是尽可能地识别了相关的主要风险, 并不一定全面和相互独立。对少数 IPCC 没有给予定量和定性的不确定性指标的风险暂时没有指定类别, 将来还需要构建或寻找与 IPCC 理念一致的评估不确定性的替代方法。

(2) IPCC 第四次评估报告中才开始把信度和可能性结合起来进行不确定性评估, 还不太成熟, 此外由于专家的主观认识和描述的非严格性导致这两个指标进行不确定性的评估中可能有矛盾的地方, 这可能会影响分类方法的准确性。此外, 隶属函数的构建以及其中分隶属函数权重的确定都具有一定的主观性, 气候变化风险的分类方法还不是很完善, 还需要进一步研究。

(3) 本文对气候变化风险进行分类只获得了一个非常初步的结果, 不仅因为其分类方法还需进一步完善, 而且是由其分类的不确定本质决定的。在后续的风险分析中, 由于新的数据和信息的加入, 不确定程度可能会有变化, 需要根据新获取的信息和遇到的具体问题对该分类进行调整。

(4) 采用 IRGC 新型风险管理理念对气候变化风险进行综合管理, 并不是要摒弃传统风险领域研究中已经取得的成果, 而是对传统风险评价和管理方法的扩展。但是 IRGC 为各类风险提供的评价与管理方法只是对于一般风险建立的一个普适的标准, 比较抽象和概括, 在以后的研究中应该结合气候变化的减缓和适应对策, 针对气候变化风险各类别的特点, 建立专门的气候变化风险分类评价与管理的策略方法体系。

(5) 气候变化的影响随时空尺度的不同而不同, 尺度不同, 采取的风险管理策略也

不同。IPCC 认为在区域尺度上分析气候变化及其未来的影响可能会比全球水平的不确定程度更高^[47]，但是从区域时空分布的角度分析气候变化风险，比起纯粹全球气候变化风险的估计，可能获取的信息更具体、充分，风险的描述更准确，而且气候变化风险的适应和防御措施在局地 and 区域水平上可能更有效^[51]。总之，气候变化风险的分类，乃至综合评估与管理必须考虑区域尺度问题，尤其是我国地形地貌复杂、区域跨度大、气候背景复杂，更需要尽快进行气候变化风险分类与管理的区域案例研究。

致谢：衷心感谢中国科学院地理科学与资源研究所杨勤业研究员的指导和帮助。

参考文献：

- [1] IPCC Climate Change 2007: The Physical Science Basis-Working Group I Contribution to IPCC Fourth Assessment Report London: Cambridge University Press, 2007
- [2] IPCC Climate Change 1995: Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change, working group II report London: Cambridge University Press, 1995
- [3] IPCC Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability of Climate Change, working group II report London: Cambridge University Press, 2001
- [4] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability- Working Group II Contribution to IPCC Fourth Assessment Report London: Cambridge University Press, 2007
- [5] National Research Council Rediscovering Geography: New Relevance for Science and Society. Washington, D C: National Academy Press, 1997
- [6] Demeritt D The construction of global warming and the politics of science Annals of the Association of American Geographers, 2001, 91(2): 307~ 337
- [7] Oppenheimer M. Defining Dangerous Anthropogenic Interference: The Role of Science, the Limits of Science Risk Analysis, 2005, 25(6): 1399~ 1407
- [8] Patwardhan A, Schneider SH, Semenov S M. Assessing the science to address UNFCCC Article 2: A concept paper relating to cross cutting theme number four Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change Available at: <http://www.ipcc.ch/activity/cet3.pdf>, 2003
- [9] Oppenheimer M, Peterson A. Article 2 of the UNFCCC: Historical origins, recent interpretations Climatic Change, 2005, 73: 195~ 226
- [10] Morgan M G, Florig H K, Michael L D Categorizing risks for risk ranking Risk Analysis, 2000, 20(1): 49~ 58
- [11] Renn O White paper on risk governance: Towards an integrative approach White paper No. 1 of the International Risk Governance Council Available at: www.irgc.org, 2005
- [12] Byrd D M, Cothorn C R Introduction to risk analysis: A systematic approach to science-based decision making Rockville, M D, USA: Government institutes 2000
- [13] Stirling A. Risk, precaution and science: Towards a more constructive policy debate European Molecular Biology Organization Reports, 2007, 8(4): 309~ 315
- [14] Risbey J S, Kandlikar M. Expressions of likelihood and confidence in the IPCC uncertainty assessment process Climatic Change, 2007, 85: 19~ 31
- [15] Van Aalst M. Mainstreaming climate risk management into development planning The Global Forum on Sustainable Development (GFSD), OECD, 2004
- [16] Glantz M H. Creeping environmental problems and sustainable development in the Aral Sea Basin. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- [17] Roger N J When do POETS become dangerous? IPCC workshop on describing scientific uncertainties in climate change to support analysis of risk and of options, 2004
- [18] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007
- [19] 陈宜瑜, 丁永建, 余之祥, 等. 中国气候与环境演变评估(II): 气候与环境变化的影响与适应、减缓对策. 气候变

- 化研究进展, 2005, 1(2): 51~ 57
- [20] 吴绍洪, 尹云鹤, 赵慧霞, 等. 生态系统对气候变化适应的辨识. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 115~ 118
- [21] 李克让, 曹明奎, 於琍, 等. 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评估. 地理研究, 2005, 24(5): 653~ 663
- [22] Obersteiner M, Azar C, Kauppi P, *et al.* Managing climate risk. *Science*, 2001, 294(5543): 786~ 787
- [23] Kleinen T, Petsche-Held G. Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change. *Climatic Change*, 2007, 81: 283~ 312
- [24] Lenton R. Water and climate variability: Development impacts and coping strategies. *Water Science and Technology*, 2004, 49: 1~ 24
- [25] Arajo M B, Whittaker R J, Ladle R J. Reducing uncertainty in projections of extinction risk from climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14: 529~ 538
- [26] Boisvenue C, Running S W. Impacts of climate change on natural forest productivity: Evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 2006, 12: 862~ 882
- [27] Kleypas J A, Buddemeier R W, Archer D, *et al.* Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 1999, 284: 118~ 120
- [28] Lin Erda, Xiong Wei, Ju Hui, *et al.* Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2005, 360: 2149~ 2154
- [29] Ziska L H. Evaluation of yield loss in field-grown sorghum from a C₃ and C₄ weed as a function of increasing atmospheric carbon dioxide. *Weed Science*, 2003, 51: 914~ 918
- [30] Nicholls R J, Tol R S J. Impacts and responses to sea-level rise: A global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2006, 364: 1073~ 1095
- [31] Webster P J, Holland G J, Curry J A, *et al.* Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 2005, 309: 1844~ 1846
- [32] McInnes K L, Walsh K J E, Hubbert G D, *et al.* Impact of sea-level rise and storm surges on a coastal community. *Natural Hazards*, 2003, 30: 187~ 207
- [33] Agnew M, Viner D. Potential impact of climate change on international tourism. *Tourism and Hospitality Research*, 2001, 3: 37~ 60
- [34] Gomez Martin B. Weather, climate and tourism: A geographical perspective. *Annals of Tourism Research*, 2005, 32(3): 571~ 591
- [35] Morris C J G, Simmonds I. Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(15): 1931~ 1954
- [36] Reiter P, Thomas C J, Atkinson P, *et al.* Global warming and malaria: A call for accuracy. *The Lancet Infectious Diseases*, 2004, 4(6): 323~ 324
- [37] Gagnon A S, Bush A B G, Smoyer-Tomic K E. Dengue epidemics and the El Niño Southern Oscillation. *Climate Research*, 2001, 19: 35~ 43
- [38] Hopp M J, Foley J A. Worldwide fluctuations in dengue fever cases related to climate variability. *Climate Research*, 2003, 25: 85~ 94
- [39] 慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响. *地学前缘*, 2002, 9(2): 287~ 294
- [40] 田晓瑞, 王明玉, 舒立福. 全球变化背景下的中国林火发生趋势及预防对策. *林火研究*, 2003, (3): 32~ 34
- [41] 马丽萍, 陈联寿, 徐祥德. 全球热带气旋活动与全球气候变化相关特征. *热带气象学报*, 2006, 22(2): 147~ 154
- [42] 周启星. 气候变化对环境与健康影响研究进展. *气象与环境学报*, 2006, 22(1): 38~ 43
- [43] 杨坤, 王显红, 吕山, 等. 气候变暖对中国几种重要媒介传播疾病的影响. *国际医学寄生虫病杂志*, 2006, 33(4): 182~ 187
- [44] OECD. Emerging systemic risks. Final report to the OECD futures project. OECD: Paris, 2003
- [45] Sayers P B, Gouldby B P, Simm J D, *et al.* Risk, performance and uncertainty in flood and coastal defense: A review, DEFRA/Environment Agency—flood and coastal defense R&D programme, Wallingford, 2002
- [46] Bunting C. Applying the IRGC risk governance framework: What we have learned about risks and about the IRGC framework ESOF, Munich www.irgc.org, 2006
- [47] Manning M R, Petit M, Easterling D, *et al.* IPCC workshop on describing scientific uncertainties in climate

change to support analysis of risk and of options <http://www.ipcc.ch/>, 2004

- [48] IPCC The guidance notes for lead authors of the IPCC Fourth Assessment Report on addressing uncertainties. Geneva, Switzerland: IPCC <http://www.ipcc.ch/activity/uncertaintyguidancenote.pdf>, 2005
- [49] Manning M R. The treatment of uncertainties in the fourth IPCC assessment report. *Advances in climate change research*, 2006, 2 (Suppl. 1): 13~ 21.
- [50] 黄崇福, 王家鼎. 模糊信息分析与应用. 北京: 北京师范大学出版社, 1992
- [51] Gary Yohe, Kenneth Strzepek. Adaptation and mitigation as complementary tools for reducing the risk of climate impacts. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2007, 12: 727~ 739

New classification method of climate change risks

ZHANG Yue-hong^{1,2}, WU Shao-hong¹, DAI Er-fu¹, YIN Yun-he¹, LIU Deng-wei³

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Development Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Climate change risk can be defined as the possibility of impacts on natural ecosystems and socio-economic systems resulted from or aggravated by climate change, particularly the negative aspects. Many disciplines, particularly Geography have been heavily involved in the scientific assessment of climate change and its potential social and environment impacts. However, it still needs to be studied further using more systematic methods of risk assessment and management, while appropriate risk categorization is their prerequisite and foundation. In this paper, we first identify the main risks induced from climate change by sectors, in which not only the traditional abrupt risks are included, but some “low-probability” events and creeping hazards are also contained. And then, these risks are categorized into four risk categories applying a new risk categorization system brought forward by Ortwin Renn in a framework of IRGC: first, we propose that uncertainty of the risk-related knowledge and information could be treated as the classifying criteria. Then, we use IPCC’s quantitative terms of expressing uncertainties—confidence and likelihood—as the feature parameters to construct membership function for the four categories respectively, and according to the maximum principle we identify the type that a certain risk should belong to. Given that not all impacts are assigned with confidence and likelihood in IPCC report, level of agreement & amount of evidence is applied to form a qualitative classification method as a supplement. Thus a preliminary semi-quantitative risk categorization system for climate change has been established. Finally, the categorization results of climate change risks have been acquired. Thus, we can assess and manage climate change risks with different approaches and strategies, which will improve the efficiency of risk management, enhance the scientific nature in risk assessment and lay a good foundation for the integrated risk governance of climate change risks.

Key words: climate change; risk classification; uncertainty