胡义明，温骐宇，王静，等. 欧美亚典型发达国家洪水标准及应对气候变化策略[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(3)：605-617. HU Y M, WEN Q Y, WANG J, et al. Flood standards and coping strategies for climate change in typical developed countries in Europe, America, and Asia[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 605-617. (in Chinese)

欧美亚典型发达国家洪水标准及应对气候变化策略

胡义明[1]，温骐宇[1]，王静[2]，曹子恒[1]，彭安帮[3]，梁忠民[1]

（1. 河海大学水文水资源学院，南京 210098；2. 中国水利水电科学研究院，北京 100038；3. 南京水利科学研究院，南京 210029）

摘要：针对洪水标准选用及应对气候变化适应性政策制定问题，系统调研欧美亚典型发达国家在该领域的研究及应用成果，从工程设计洪水标准和流域洪水管理标准等角度综述美国、荷兰、英国和日本洪水标准的制定政策，从气候变化对设计暴雨/洪水的影响角度分析总结英国和日本在应对气候变化上的适应性对策。建议在洪水标准及气候适应对策研究中抛弃单纯依据大坝尺寸确定洪水标准的方式，基于动态发展及整体-局部互馈关联视角，兼顾气候变化对暴雨洪水的影响，从洪水潜在危害及风险角度出发，制定相应的政策规范。本综述可为我国新时期洪水标准选用规则及适应气候变化策略的制定提供参考。

关键词：洪水标准；气候变化；适应性对策；美国；荷兰；英国；日本

中图分类号：TV122　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0062

设计洪水是水利水电工程规划、设计和运营管理的重要依据，其标准大小的确定受工程规模、经济社会状况、人口数量及工程建设效益、成本等诸多因素的综合影响[1-4]。在设计防洪工程时，选用过大的设计洪水虽然可偏于安全，但会增加建设成本；反之，虽然可降低建设成本，但可能偏于不安全。因此，在确定设计洪水标准时，需要综合考虑其安全性和经济性[5-6]。

随着经济社会的发展及人口规模的增加，流域防洪安全要求不断提高；伴随各种新理论新技术的发展以及对洪水危害及其风险认识的深入，世界各国在洪水标准确定规则的制定及标准大小的选用方面也发生了变化，以适应新形势下的洪水管理要求[7-9]。美国联邦应急管理局于 2013 年发布的《大坝入库设计洪水选择和适应》指南推荐了 4 种用于确定大坝入库设计洪水的方法，包括基于大坝潜在危险分类系统方法（prescriptive approach）、增量后果分析方法（incremental consequence analysis）、风险信息决策方法（risk-informed decision making）和特定位置 PMP 分析方法（site-specific PMP studies）[7]。前 3 类方法均侧重于从洪水的潜在危害及其风险层面确定洪水标准，并建议停止使用基于大坝尺寸的任何分类系统确定入库设计洪水，认为大坝尺寸并不能充分反映大坝故障产生的潜在后果，也不应作为评估水文设计要求的基础。荷兰在 2015 年左右公布了全国洪水风险分析结果，对所有主要洪水易发地区的失效概率、后果和风险水平提供了详细的信息。随后，荷兰政府以该成果为基础用于确定新的防洪安全标准，从原来的以年超过概率（风险率）为标准过渡到了以洪水风险为标准的新阶段[8]。此外，针对气候变化对区域极值暴雨洪水事件的影响，如何将气候变化因素纳入设计暴雨洪水分析中以指导具体的工程实践，也是国际社会关注的焦点[10-11]。如英国基于气候预估项目（UK climate projections, UKCP18）研制的未来不同时期气候预估数据，确定了未来不同时期设计暴雨和设计洪水的变化幅度（附加值）供全国使用[10]。英国环境署和地方洪水主管部门使用该成果提供关于洪水风险和排水的建议，且环境署还建议风险管理当局在申请支持经费用于与洪水相关的新项目和新计划时使用该成果作为指导。

本文系统梳理美国、荷兰、英国和日本等欧美

收稿日期：2023-10-11　　**修回日期：**2024-04-14　　**网络出版时间：**2024-05-28
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240527.0924.009
基金项目：国家自然科学基金项目（42371045；52379007）
作者简介：胡义明（1986—），男，江苏宿迁人，副教授，博士，主要从事水文水资源方面研究。E-mail: yiming.hu@hhu.edu.cn
通信作者：梁忠民（1962—），男，辽宁凤城人，教授，博士，主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

亚典型发达国家在确定洪水管理标准方面的发展动态,总结归纳英国和日本在应对气候变化对设计暴雨/洪水影响方面的适应性政策,以期为我国洪水标准选用规则及适应气候变化策略的制定提供借鉴。

1　典型发达国家洪水管理标准

1.1　典型发达国家洪水管理标准的发展历程

1.1.1　美国

美国大坝建造早期,大坝设计洪水的拟定主要基于经验和工程判断,采用历史观测的最大洪水或将历史最大洪水进行放大推求设计洪水。直到 1964 年,美国陆军工程兵团(United States Army Corps of Engineers, USACE)溢洪道设计洪水工作组成员 Franklin Snyder[12] 提出了一个大坝初步分类标准,根据大坝高度、蓄水量和溃坝潜在危害,给出了溢洪道设计洪水的设计标准,但提供的设计标准较为粗略,更多的是定性化描述,而关于设计重现期的量化不足。

随后于 1979 年,USACE 根据水坝规模(蓄水能力和大坝高度)及溃坝潜在危害(生命损失和经济损失程度)分别开发了一个大坝分类系统(表 1)和潜在危害等级分类系统,并基于大坝分类系统和潜在危害分类系统,制定了更为详细的水库溢洪道洪水设计标准(表 1)[13]。在大坝分类系统中,将大坝规模分为小型、中型和大型 3 类,其中:小型坝的蓄水容量为 61 674~1 233 481 m^3,坝高在 7.62~12.19 m;中型坝的蓄水容量为 1 233 481~61 674 092 m^3,坝高在 12.19~30.48 m;大型坝的蓄水容量大于 61 674 092 m^3,坝高大于 30.48 m。在潜在危害等级分类系统中,将危害等级分为低(low)、重大(significant)和高(high)3 类,其中:“低”指的是无人员伤亡和经济损失极小;“重大”指的是有若干人员(few)伤亡和相当多的(appreciable)经济损失;“高”指的是有较多人员伤亡(more than a few)和过多的(excessive)经济损失。

表 1　USACE 溢洪道设计标准(USACE,1979)

Tab. 1　USACE spillway design criteria (USACE,1979)

危险等级分类	大坝规模		
	大型	中型	小型
高	PMF	PMF	1/2 PMF至PMF
重大	PMF	1/2 PMF至PMF	100年至1/2 PMF
低	1/2 PMF至PMF	100年至1/2 PMF	50—100年

1963—1999 年,美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)编制并更新了一系列水文气象报告,确定美国大部分地区的可能最大降水量(PMP)估计值[14]。在过去的几十年,NOAA 的 PMP 成果被广泛应用于工程的设计洪水计算。1979 年,美国联邦应急管理局和大坝安全委员会发布了《联邦大坝安全指南》,为大坝业主提供了第一份国家指南[15]。该指南指出,对于可能发生生命损失或重大财产损失的大坝,溢洪道设计标准是一种几乎不可能超过的设计洪水。一些工程师、业主和州监管机构认为这是可能最大洪水(PMF)标准,而另一些人则认为,尽管 PMF 很容易计算,但它不是基于风险的。1986 年,美国联邦应急管理局发布了《大坝入库设计洪水选择和适应联邦指南》,作为《联邦大坝安全指南》的补充,为联邦机构在制定入库设计洪水标准方面提供指导,以促进全国范围内标准应用的一致性[16]。

1998 年,美国联邦应急管理局发布了《大坝入库设计洪水选择和适应》的初始版本[17]。该版本允许联邦机构使用增量后果分析或其他风险分析方法来选择合适的设计洪水。联邦机构采用的风险分析方法是评估大坝安全的有效方法,其要求大坝业主详细调查潜在的失效模式和后果,以确定最大的风险。在估算设计洪水时,基于大坝规模和潜在危害分类确定设计洪水标准是一种保守方法,其易于理解、评估成本相对较低,仍然是各州采用的主流方法。2013 年,美国联邦应急管理局对 1998 年的《大坝入库设计洪水选择和适应》进行了修订[18],认为对于现有的数千座大坝或计划修建的大坝而言,大坝情况各异,没有哪一种单一的设计洪水确定方法是普适的,需要根据大坝的具体特点选用合适的方法。2013 年的指南建议采用以下方法来推求设计洪水,以适应实践中可能遇到的复杂情况。

(1)基于大坝潜在危险分类系统方法。根据大坝的潜在危害分类系统,确定待建大坝的设计标准或评估已建大坝标准是否安全。这种方法是保守的,分析成本较低,同时可为公众安全提供合理的保证。

(2)增量后果分析方法。不利的增量后果是指在特定洪水事件中,由于大坝故障而产生的负面影响与在没有故障情况下产生的负面后果之间的差异(增量后果)。增量后果分析考虑了人员生命损失和经济损失的可能性,也可以考虑生命线中断和环

境影响等后果。通过增量后果的分析，可以识别大坝破坏的潜在后果（不利影响），以选择合适的设计洪水。潜在危险并不表明大坝本身的结构完整性，而是表明大坝发生故障的后果。对于具有潜在高风险的水坝，使用增量后果法分析估算的入库设计洪水的建议下限为 0.2% 年超越概率洪水，具有重大危险隐患的水坝的建议下限为 1% 年超越概率洪水。

（3）风险信息决策方法。需要对不利事件的发生概率及工程失效的社会、经济和环境后果进行综合评估。对水文事件发生概率及损害后果的各个组成部分进行评估，以选择合理的入库设计洪水过程，确保不超过给定的“可容忍风险”水平。该方法可用于分析平衡多种不同失效模式下风险降低的资本投资以及优先采取的风险降低行动。

（4）特定位置 PMP 分析方法。该方法是对规定性方法的改进，建议采用当前技术进行特定区域/地点的 PMP 和 PMF 的详细分析，以获得工程所在位置更合理的 PMF 估算值。在规定性方法中，对于高风险大坝 PMF 的计算，采用的是 NOAA 发布的区域 PMP 成果数据。该数据通常是较大区域范围的 PMP 值，而不是具体位置的 PMP 值，且数据大多没有更新以反映当前最先进的知识和技术水平。

鉴于许多州和联邦机构的资源有限，以及它们管辖范围内有数百或数千座水坝，因此使用基于潜在危害的大坝分类系统来确定入库设计洪水依然是主要方法。《联邦大坝安全指南》定义的大坝 3 类潜在危险等级为高、重大和低，对应的入库设计洪水标准分别为 PMF、1 000 年和 100 年（或者通过合理性论证的更小洪水）。

（1）高危险性等级。被归类为高危险性等级的大坝是那些失效或误操作可能导致人员伤亡的大坝（可能有经济损失、环境损害或生命线设施中断，但对于此分类不是必需的）。

（2）重大危险性等级。被归类为重大危险性等级的大坝是指那些失效或误操作不会导致人员伤亡，但会造成经济损失、环境破坏、生命线设施中断或可能影响其他问题的大坝。具有重大危险性的水坝通常位于农村或农业地区，但也可能位于有人口和重要基础设施的地区。

（3）低危险性等级。被归类为低危险性等级的大坝是指那些失效或误操作不会导致人员伤亡和低经济和/或环境损失的大坝。损失主要限于大坝业主的财产。

2013 年发布的《大坝入库设计洪水选择和适应》指南关于大坝入库设计洪水的拟定提出了如下建议：

（1）建议在入库设计洪水确定时，可以基于对水文事件的风险评估或基于潜在危险分类系统。

（2）建议将潜在危险分类系统用作设计洪水选择的基础，并停止使用基于大坝尺寸的任何分类系统确定入库设计洪水。认为大坝尺寸并不总是表明由于故障而产生的潜在后果，也不应作为评估水文设计要求的基础。

（3）新大坝或正在进行重大改造的大坝的入库设计洪水确定，应综合考虑当前条件和预期发展状况。如上游流域内的开发可能导致径流和洪峰流量增加，而下游淹没区内的开发则可能改变潜在危害分类和水文事件后果的估计。

（4）建议停止使用任意选择的综合指标（如某一频率事件和可能最大事件的部分量的综合）或水文事件百分比（如 0.5 倍的可能最大洪水）等确定入库设计洪水。

（5）建议停止对所有现有老旧大坝不加区分地应用不太严格的规定性设计标准。

（6）当增量后果分析法、特定位置 PMP 分析法或风险信息决策法等的执行成本过高时，建议采用高危险性、重大危险性和低危险性的大坝分类方式确定入库设计洪水标准。

在洪水风险管理方面，美国联邦应急管理局于 2015 年发布了《联邦洪水风险管理标准》[19]。该标准鼓励联邦机构考虑和管理当前、未来的洪水风险，要求各机构做好准备，保护联邦资助的建筑和项目免受洪水风险。更具体地说，要求各机构确定具体的联邦建筑或项目规模，即建筑或项目的高度、宽度和扩展程度，以管理和缓解任何当前或潜在的洪水风险。该标准提供了 3 种不同的方法以确定洪水风险管理的水位高程及洪水危险区域，并要求各机构选择 3 种方法中的一种，以确定项目选址、设计、施工所用的洪水高程（“多高”）和相应的洪水危险区（“多宽”）。3 种方法分别是：

① 气候-信息科学方法（climate-informed science approach）。利用现有最佳、可操作的水文和水力学方法，结合现有的水文气象数据及未来的气候情景数据以分析当前和未来的洪水变化。

② 安全余量值法（Freeboard）。在基准洪水水

位(100 年一遇)高程基础上加上一定的超高值,具体为:对于非关键区域,在基础水位高程上再增加 0.610 m;对于关键区域,在基础洪水高程上再增加 0.914 m,由此进行洪泛区识别。

③ 采用 500 年一遇洪水位,以受 500 年一遇洪水影响的区域为洪泛区。

1.1.2　荷兰

荷兰在 20 世纪 50 年代经历了一次防洪管理范式的转变,其直接导火线是 1953 年的风暴潮灾难。该场风暴潮灾难造成 1 853 人死亡、75 万人受灾,触发了防洪管理范式的转变[20]。荷兰开始采用年超越概率法进行洪水位的设计,本质上是一种基于设计荷载的方法。总体来看,荷兰南部沿海人口稠密的堤防圈内的防洪安全标准为 1/10 000 年超过概率。对于潜在损害较小的其他区域,安全标准从 1/1 250 年超过概率到 1/4 000 年超过概率不等。Meuse 河沿岸一些较小堤坝环区(通过主要防洪设施或高地免受外部水体侵袭的区域)的安全标准为 1/250 年超过概率。

过去几十年来,荷兰在防洪系统风险和可靠性分析方法方面取得了重大进展。在 2015 年左右,荷兰公布了全国洪水风险分析成果,对所有主要洪水易发地区的失效概率、后果和风险水平提供了详细信息[21-21]。全国风险评估成果已被荷兰政府作为基础用于新的安全标准的确定。促使这种转变的动机主要有两个:一是洪水多发地区的保护价值和人口规模迅速增长;二是在过去几十年的洪水风险和堤防可靠性研究中,对防洪堤的失效机制和失效概率有了新的认识。

使用全国洪水风险评估成果来确定新的安全标准,即可接受的失效概率(或等效可靠性),包含个人风险标准、社会风险标准和经济风险标准,原则上,使用 3 个标准中最严格的标准作为建议的安全标准[17]。

(1)个人风险。政府建议个人风险高于 10^{-5} 不够安全。对于这些区域,堤防的安全标准更高,因此需要加固(或其他形式的风险降低)。

(2)社会风险。没有明确给出表征社会风险大小的数值。作为替代,调查了哪些地区在国家层面上对社会风险的贡献最大。对于国家层面上对社会风险贡献最大的系统,建议采用更高的保护级别。

(3)经济风险/成本效益风险。针对每个防洪系统,确定了最佳保护水平。该方法考虑了作为失效概率函数的加固成本增加和风险降低。由于成本和风险都是用货币表示的,因此可以在两者之和最小的情况下确定最优值。

基于全国洪水风险评估成果及相应原则,产生了新的防洪安全标准。与之前的旧标准相比,新标准的变化主要体现在两个方面:第一,新标准指的是防洪系统的最大可接受失效概率,而旧标准指的则是超过设计荷载的概率[8]。这意味着,对于新标准,需要在设计和安全评估中纳入多个失效机制以及系统内多个元件和堤防段的作用。第二,新标准考虑了全国的保护水平和分布。在旧的安全标准中,荷兰西部的保护水平最高(南荷兰为 1/10 000 年超过概率)。新的安全标准也为河岸地区指定了高保护级别。荷兰将在未来数年将新的安全标准纳入堤防加固和安全评估中。受到关注的一个重要问题是,如何通过堤防加固和其他系统干预来满足这些新标准。为了设计和安全评估堤防,有必要将目标失效概率与防洪设计特征(如高度、宽度等)联系起来。因此,需要将标准(失效概率)转换为各种(岩土)失效机制的设计规范和规则,且需要考虑各种机制和防洪系统长度这一维度的目标失效概率分布。所谓的长度效应是指均质的堤坝段的失效概率在统计上随其长度增加而增加的现象。需要通过深入研究确定一般适用的局部安全系数[21]。

防洪系统的失效概率计算非常复杂,该系统可由多个分段组成,分段可以是堤坝段、沙丘段或水工结构,需要在设计和安全评估中纳入多个失效机制以及系统内多个元件和堤防段的作用。系统内的任何部分如果发生故障,则会发生防洪系统故障。由于多种失效机制的综合作用,防洪系统可能会失效。主要包括[22]:

(1)水力负荷模型,描述系统中不同位置出现相关水力负荷(水位、波浪和水流)的概率;

(2)失效机理模型,描述在何种荷载条件下防洪系统失效;

(3)概率计算模型,量化防洪系统失效概率,即系统中某个地方的水力负荷超过防洪抗力的概率。

也即失效概率计算包括如下主要环节:(1)确定系统中所有单个部件的失效概率;(2)组合各个部件的失效概率,得出整个系统的失效概率,各个部件的组合形式有并联、串联和混合型。具体计算过程可参阅文献 [22]。

1.1.3　英国

在英国，水库工程分为 A、B、C 和 D 等 4 类，防洪设计标准是根据溃坝危险性和水库泄流初始状态综合确定。英国土木工程协会在 1978 年制定了《洪水与水库安全》指南，在该指南中，水库工程被分为 4 类（A、B、C 和 D）[23]。随后于 1996 年，英国土木工程协会对 1978 年版本的指南进行了修订，发布了第三版《洪水与水库安全》指南，该指南中同样将水库工程分为 4 类（A、B、C 和 D），并给出了各等级水坝的设计洪水标准，见表 2[24]。

表 2　不同坝型的洪水、风浪标准（1996）

Tab. 2　Flood, wind and wave standards by dam category（1996）

大坝类别	大坝决口的潜在影响	初始蓄水条件标准	水库设计入流量		同时期风速和最小波浪超载允许值
			一般情况	最低标准（如果可以容忍超过）	
A	决口可能危及社区人员生命	溢出长期平均流入量	PMF	10 000年一遇	年均最大小时风速
B	决口可能危及不在社区内的人员生命或 可能导致广泛的损害	恰好完全储存（无溢出）	10 000年一遇	1 000年一遇	波浪超载允许值不低于0.6 m
C	决口对生命造成的风险可以忽略不计并造成有限的损害	恰好完全储存（无溢出）	1 000年一遇	150年一遇	年均最大小时风速；波浪超载允许值不低于0.4 m
D	决口不会造成生命损失，并且只会造成非常有限的额外水灾损失	溢出长期平均流入量	150年一遇	不适用	年均最大小时风速；波浪超载允许值不低于0.3 m

相比于 1978 年指南，1996 年版指南发生了重大变化。1996 年版指南不再使用 PMF 的分量（如 0.5 PMF）作为设计洪水。虽然指南提供了 PMF 分量与重现期间的对应关系（10 000 年一遇对应 0.5 PMF、1000 年一遇对应 0.3 PMF、150 年一遇对应 0.2 PMF），但其强调使用 PMF 分量代替指定重现期的设计洪水仅是一种快速评估方法。对于复杂或非常规水库或集水区，如水库梯级系统或由城市排水系统供水的水库，不建议使用 PMF 分量代替指定重现期的设计洪水。

在洪水风险管理方面，英国将 100 年一遇洪水淹没区称为洪泛区，洪泛区内又分为行洪区、25 年一遇洪水淹没区和稀遇洪水区，不同区域采取不同的政策[25]。在 100 ~ 500 年一遇洪水淹没区内，建筑物地板高程可低于 500 年一遇洪水位 30 cm，但要高于 100 年一遇洪水位；在 50 ~ 100 年一遇洪水淹没区内，楼房的底层要采取隔水、防水措施；在 25 ~ 50 年一遇洪水淹没区内，楼房的底层要考虑允许洪水进入；在行洪区只允许搭盖季节性工棚和临时住宅。

1.1.4　日本

日本水库工程设计防洪标准的确定主要是采用年超过概率（重现期）方式，设计洪水推求主要是通过设计暴雨与产汇流模型相结合方式。早期最高的设计防洪标准是 100~200 年一遇，校核防洪标准通过附加值确定[26]。表 3 为通商产业省（The Ministry of International Trade and Industry, MITI）于 1957 年发布的《大坝工程设计条例》以及农林水产省（The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, MAFF）于 1965 年发布的修订版。

表 3　日本水库工程防洪标准

Tab. 3　Flood control standard for reservoir engineering in Japan

分类	1957年MITI标准		1965年MAFF标准	
	混凝土坝	土石坝	混凝土坝	土石坝
设计洪水［重现期（年）］	100	200	100	120
校核洪水	设计洪水重现期×120%			

1978 年颁布的《大坝工程设计条例》对水库工程防洪设计标准进行了修改，规定：混凝土坝应按 200 年一遇洪水或历史上最大洪水设计；土坝和堆石坝的设计洪水应比混凝土坝大 20%[26]。

日本的流域（约 5 300 个）分为一级流域 109 个、二级流域 2 711 个和其他地方管理的流域。每条河流的设计洪水标准根据河流的重要性及其他因素综合确定。这些因素包括流域范围、区域的社会和经济重要性、潜在损害的数量和质量等，根据河流的重要性等级（A、B、C、D 或 E）确定河流防洪重现期[27]。例如，东京、大阪和名古屋等主要大都市所在的 Tone 河、Yodo 河和 Kiso 河三角洲被指定为 A 级河流，其重现期设定为 200 年。大都市所在的其他河流，如 Shinano、Ishikari 和 Shira，被指定为 B 类河流，重现期为 150 年[28]。

随着经济社会发展，日本的防洪政策在不断变

化及更新。在经济社会发展的不同阶段,根据流域的城市化和发展状况,对设计洪水标准进行了修订[28]。经过第一个 5 年收入倍增计划后,“第二个五年国家防洪计划”于 1965 年启动。在该计划中,“重要河流”的设计洪水重现期设定为 50 年,其他河流在流域开始观测后,为历史上第二大洪水。1968 年,日本政府宣布了“第三个五年国家防洪规划”,“重要河流”的洪水重现期提高到 100~200 年,其他河流则提高到 50 年。1976 年,修订了《河道工程技术标准》,重现期改为 A 级河流 200 年以下,B 级河流 100~200 年,C 级河流 50~100 年,D 级河流 10~50 年,E 级河流 10 年以下。1997 年,继 1964 年最后一次修订之后,首次修订了《河流法》,考虑到城市化和经济快速增长的变化,审查了所有河流的洪水风险预防计划。2004 年发布的《河道工程技术标准》中,重现期改为 A 级河流 200 年以上,其他级河流的重现期与 1976 年版本一致。不同时期的防洪标准见表 4。

表 4　日本设计洪水重现期和河流重要性的变化

Tab. 4　Transition of return period of design floods and importance of rivers in Japan

河流工程技术标准	河流重要性及相应重现期/年				
当前河流工程技术标准(自 2004 年起)	A类	B类	C类	D类	E类
	>200	100~200	50~100	10~50	<10
1976年河道工程技术规范	A类	B类	C类	D类	E类
	<200	100~200	50~100	10~50	<10
1968年第三个五年全国防洪计划	重要河流		其他河流		
	100~200		50		
1965年第二个五年全国防洪计划	重要河流		其他河流		
	50		历史上第二大洪水		
1958年河道工程技术规范	A类		B类		
	80~100		50~80		

1.2　典型发达国家的洪水标准对比分析

纵观上述各国的设计洪水标准确定规则,大体上经历了最早以典型历史洪水或放大典型历史洪水为标准到以洪水频率 P 为标准和以 PMP/PMF 为标准阶段,再到以风险为标准的新发展阶段。

美国目前推荐了 4 类不同方法进行大坝设计洪水确定,包括基于大坝潜在危险分类系统、增量后果分析法、风险信息决策方法和特定位置 PMP 分析法确定设计洪水。在实际工作中,鉴于方法的操作复杂程度、大坝数量众多的现实及联邦机构的资源限制,基于大坝潜在危险分类系统确定设计洪水依然是主要方法,其综合考虑了人员伤亡、经济损失、环境损害、生命线设施中断等要素影响。对于因失效或误操作可能导致人员伤亡的大坝,无论其他方面损失如何,都必须采用 PMF 标准,可见其设计标准较高。另外,针对新建大坝或正在进行重大改造的大坝,在确定其入库设计洪水标准过程中,建议应综合考虑当前条件和预期的未来发展状况,如流域未来经济社会发展引起的水力条件、经济社会、人口规模等的变化,以便更具前瞻性地确定合理的洪水标准。荷兰在 2015 年以后采用了全国洪水风险成果作为新的防洪标准,从原来的以年超过概率为标准过渡到以洪水风险为标准的新阶段。风险标准包含个人风险标准、社会风险标准和经济风险标准,原则上,使用 3 个标准中最严格的标准作为建议的防洪安全标准。对于新标准,需要在设计和安全评估中确定系统中所有单个部件(如堤坝段、沙丘段或水工结构)的故障概率,在此基础上,通过并联、串联或混联方式组合各个元件的故障概率,计算整个系统的故障概率。此外,需要将目标失效概率与防洪设计特征(如高度、宽度等)联系起来,以便考虑如何通过堤防加固和其他系统干预来满足新的设计标准。整体而言,荷兰的以风险为标准的理念较为先进,据此制定的防洪标准较高,但风险计算过程十分复杂,实践操作难度很大。英国在设计洪水标准确定时考虑了大坝破坏对生命及经济社会的潜在影响,且不再使用 PMF 的分量作为设计洪水。对于可能存在人员伤亡的大坝工程,其设计标准不低于 10 000 年一遇。日本设计洪水采用设计暴雨与产汇流模型相结合方式,最高的设计防

洪标准为 100~200 年一遇。设计标准值的确定受筑坝材料（土石坝和混凝土坝）的影响，在相同条件下，土石坝的标准要高于混凝土坝的标准。此外，日本的洪水标准考虑了设计洪水标准和校核洪水标准。

整体而言，各国设计洪水标准确定规则存在差异（表 5），但洪水的潜在危害（可能导致的人口伤亡、社会经济损失等）都是其关键依据。洪水风险的计算较为复杂，但以风险为指标确定洪水标准将成为重要的发展趋势。在防洪标准确定中，美国、荷兰只考虑设计洪水标准，日本考虑了设计洪水标准和校核洪水标准，而英国则提供了最低容忍标准和一般情形标准供选择，类似于提供了设计洪水标准的区间范围（上下限）。美国、荷兰、英国在设计标准确定时，没有考虑大坝材质的影响，而日本考虑了不同大坝材质下的标准差异，在相同条件下，日本土石坝的标准要高于混凝土坝的标准。美国、荷兰、英国等的洪水设计标准较高，美国对于可能出现人员伤亡情况的设计标准为 PMF、英国不低于 10 000 年一遇标准。此外，除了美国外，其余国家在防洪标准指定过程中主要还是关注当前各类要素条件对标准选用的影响，未能充分考虑到流域未来经济社会发展引起的水力条件、经济社会、人口规模等的变化对标准的影响。如何运用动态发展观点及从整体-局部互馈关联视角统筹不同区域的洪水标准是未来洪水标准制定中需要重点关注的问题。

表 5　不同国家洪水标准选用关键性差异点对比总结

Tab. 5　Comparison and summary of key differences in the selection of flood standards in different countries

项目	美国	荷兰	英国	日本
洪水标准表征方式	年超过概率/重现期和PMF	洪水风险值大小	年超过概率/重现期和PMF	年超过概率
洪水标准类型	设计标准	风险标准	最低容忍标准、一般标准	设计标准、校核标准
是否考虑坝体材质对洪水标准选用的影响	否	否	否	土石坝的标准要高于混凝土坝的标准
对于可能出现人员伤亡情况时的洪水标准选用	PMF	未明确	不低于10 000年一遇	未明确
是否考虑流域未来经济社会发展的动态变化对洪水标准选用的影响	建议考虑	未考虑	未考虑	未考虑
是否考虑工程所处位置地形对洪水标准选用的影响	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑

2　典型发达国家应对气候变化策略

通过详细搜索查阅美国、荷兰、英国和日本等近 15 个国家在应对气候变化对设计暴雨洪水影响方面的政策文件，经系统梳理后发现，仅英国和日本的政策文件较为丰富、规范且完整可靠。为此，仅分析总结英国和日本在应对气候变化上的适应性对策。

2.1　英国

为了提高对洪水发生和海岸变化的抵御能力，需要在洪水风险评估中考虑气候变化的影响。英国实施了一项气候预估项目，该项目提供了未来百年时间尺度不同情景下多种时空分辨率的气候预估数据，展示了英国气候未来可能发生的变化[10]。UKCP 18 使用了新的天气和气候观测，包括来自世界各地的最新一代气候模型，以及英国气象局最新的全球和区域气候模型（HadGEM3-GC3.05）。UKCP 18 提供的未来预报数据包括更新的概率预估数据、全球模式预估数据和区域模式预估数据，可分析未来不同情景下降雨、洪水的变化程度。英国环境署建议在进行洪水风险评估时采用气候变化附加值方法（allowance），该附加值反应了未来不同时期降雨、洪水、海平面的变化幅度情况。

2.1.1　集水区降雨峰值变化幅度预估

基于 UKCP 18 提供的所有情景的气候预估数据，以 1981—2000 年作为基准水平，采用 2 种分位数（central 和 upper end）量化了年超过概率为 3.3% 和 1.0% 的极值降雨峰值在未来不同时期的变化幅度情况[29]。

Central：所有可能情景方案中，位于 50% 概率对应的值，即有一半的情景超过该值。该情景作为

项目设计层面的建议值,以帮助理解气候变化对设计方案的影响。

Upper end: 所有可能情景方案中,位于 95% 概率对应的值,即有 5% 的情景超过该值。该情景用于检验在更极端的气候变化条件下推荐决策方案的表现,展示极端气候变化的影响,为制定社区复原力计划提供帮助。

按照 Central 和 Upper end 形式,提供了英国不同集水区域在现今—2060 年和 2061—2125 年 2 个不同代表时期降雨峰值的变化幅度情况以供全国使用。环境署和地方洪水主管部门会使用该成果以提供关于洪水风险评估和排水的建议。表 6 为部分区域年超过概率为 3.3% 和 1.0% 的降雨峰值在未来不同时期的变化幅度情况。更多区域的降雨峰值变化预估信息可查阅文献 [30]。

2.1.2　流域洪水峰值变化幅度预估

基于 UKCP 18 提供的所有情景的气候预估数据,以 1981—2000 年作为基准水平,采用 3 种分位数(Central、Higher central 和 Upper end)量化洪水峰值在未来不同时期的变化幅度情况,以供全国使用[29]。环境署作为洪水风险评估和战略洪水风险评估的法定咨询机构,将该成果作为其提供建议的基准。此外,环境署还建议风险管理当局在申请洪水和海岸侵蚀风险管理补助金以支持新项目、新计划和新战略时,使用该成果作为指导。

Central: 所有可能情景方案中,位于 50% 概率对应的值,即有一半的情景超过该值。该情景的意义同上。

表 6　区域年超过概率为 3.3% 和 1.0% 的降雨峰值在未来不同时期的变化幅度

Tab. 6　Variation range of rainfall peaks with 3.3% and 1% annual excess probability in different periods in the future

%

集水区名称	超过概率	现今—2060年		2061—2125年	
		Central	Upper end	Central	Upper end
Witham	3.3	20	35	25	35
	1.0	20	40	25	40
Dove	3.3	20	35	25	35
	1.0	25	40	30	40
Dee	3.3	20	35	30	40
	1.0	25	40	30	45

Higher central: 所有可能情景方案中,位于 70% 概率对应的值,即有 30% 的情景超过该值。该情景用于分析项目对更高气候变化的敏感性,如风险如何变化,以及需要采取哪些额外的措施去应对不利影响等。

Upper end: 所有可能情景方案中,位于 95% 概率对应的值,即有 5% 的情景超过该值。该情景意义同上。

表 7 给出了部分区域在未来不同时期的变化幅度情况。更多区域的洪水峰值变化预估信息可查阅文献 [31]。

表 7　洪峰值在未来不同时期的变化幅度

Tab. 7　Variation range of flood peak value in different periods in the future

%

集水区名称	2015—2039年			2040—2069年			2070—2125年		
	Central	Higher Central	Upper end	Central	Higher Central	Upper end	Central	Higher Central	Upper end
Witham	9	14	27	8	15	32	21	32	57
Dove	13	17	28	18	24	39	31	40	62
Dee	12	16	26	14	19	32	22	30	50

2.1.3　海平面上升幅度预估

基于 UKCP 18 提供的所有情景的气候预估数据,以 1981—2000 年作为基准水平,采用 2 种分位数(Central 和 Upper end)量化海平面在未来不同时期的变化幅度情况以供全国使用[29]。

Higher central: 所有可能情景(RCP 8.5)方案中位于 70% 概率对应的值,即有 30% 的情景超过该值,该情景意义同上。

Upper end: 所有可能情景(RCP 8.5)方案中,位于 95% 概率对应的值,即有 5% 的情景超过该值,该情景意义同上。

表 8 给出了部分区域在不同时期、不同情形下的每一年的海平面上升值(以 1981—2000 年为基准)。以表中的 Anglian 流域为例,在 Higher central 情景下,2000—2035 年,每年的增加值是 5.8 mm。如假设基准期水位为 10 m,则 2001 年为 10 m+

5.8 mm=10.005 8 m，2002 年为 10 m+2×5.8 mm=10.011 6 m 等。在 2000—2035 年这一时期共累计增加 203 mm，更多区域的海平面上升变化预估信息可查阅文献 [29]。

表 8　水位在未来不同时期的变化幅度

Tab. 8　Variation range of water level in different periods in the future

单位：mm/a

区域	2000—2035		2036—2065年		2066—2095年		2096—2125年	
	Higher Central	Upper end	Higher Central	Upper end	Higher Central	Upper end	Higher Central	Upper end
Anglian	5.8	7.0	8.7	11.3	11.6	15.8	13.0	18.1
Humber	5.5	6.7	8.4	11.0	11.1	15.3	12.4	17.6
North West	4.5	5.7	7.3	9.9	10.0	14.2	11.2	16.3

2.2　日本

为了应对气候变化对洪水产生的影响，2018 年 4 月和 2019 年 10 月，日本国家土地开发委员会河流小组委员会分别成立了洪水管理规划技术工作组和考虑气候变化与水相关的灾害风险减少政策工作组，以修订防洪规划并制定新的洪水管理政策[32]。

考虑到 2015 年《巴黎协定》设定的目标是将全球变暖限制在工业前水平以上 2 ℃，且当前许多河流的防洪安全水平低于目标水平，技术工作组将 RCP 2.6 情景确定为未来防洪规划的主要场景[32]。在规划其他关键性项目和计划时，可使用 RCP 8.5 情景作为附加参考，如检查防洪计划的改进方案、洪水风险评估以及制定减灾措施等。鉴于日本目前的防洪计划主要基于第二次世界大战后（1945 年后），技术工作组使用 1951—2010 年的成果来确定当前的气候条件。关于未来气候条件的设定，考虑到基于 RCP 2.6 情景的预测显示 2040 年后的温度将很大程度地保持在相同水平，选用了截至 2040 年的数据表征未来气候条件。技术工作组将日本划分为 15 个气候区，在各分区中，通过对比分析现在和未来气候条件下的暴雨事件（年超过概率为 1%）以确定降雨变化倍率[11]。

表 9 为 RCP 2.6 和 RCP 8.5 情景下降雨持续历时大于和小于 12 h 各个分区对应的降雨变化倍率。

根据 RCP 2.6 情景，确定了北海道、九州西北部的变化倍率为 1.15，而其他地区的变化倍率为 1.10。在确定上述变化率时，除了对气候变化预测数据进行数值比较外，还考虑了以下物理特性：高纬度地区的温度上升率；北海道夏季平均气温区的饱和水蒸气压力随温度变化的增加率大于日本其他地区；综合计算中使用的各种海面温度模式显示北海道周围海面温度增长率都较大。

表 9　RCP 2.6 和 RCP 8.5 情景下降雨量变化倍率

Tab. 9　The multiplier of rainfall change under RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios

温升情景及不同区域		降雨持续时长大于12 h	降雨持续时长小于12 h
上升4 ℃ (RCP 8.5)	暂定值	1.30	1.40
	北海道、九州西北部	1.40	1.50
	其他地区	1.20	1.30
上升2℃ (RCP 2.6)	暂定值	1.10	1.10
	北海道、九州西北部	1.15	1.15
	其他地区	1.10	1.10

这些结果于 2019 年 7 月编纂为政策建议草案，于同年 10 月暂时公布，并于 2021 年 4 月定稿，标题为“气候变化下防洪规划的政策建议”[11]。

此外，根据气温与饱和水蒸气量的关系，也提供了不同目标时期的变化倍率值 (表 10)。

表 10　根据总控目标设定的不同时期降雨量变化倍率

Tab. 10　The multiplier of rainfall change in different periods set according to the overall control target

目标年	变化率为1.15倍情形	变化率为1.10倍情形
2011—2020年	1.08	1.05
2020—2030年	1.10	1.07
2030—2040年	1.12	1.09
2040—2050年	1.15	1.10

根据上述不同区域不同时期的降雨变化倍率，可以分析对应的流量变化倍率。国土交通省成立了由专家组成的“气候变化下治水计划相关技术研讨会”，对降雨情景和洪水特征将来会增加到何种程度进行了分析[11]。结果显示，全球平均地面气温上升 4 ℃ 时，与 20 世纪末相比，21 世纪末全国一级水系的降雨量变化倍率约为 1.30 倍，治水计划中目标区域的洪水流量平均值约为 1.40 倍，洪水发生频率平均值约为 4 倍。另外，与产业革命之前相比，全

球平均地面气温控制在 2 ℃(巴黎协定的目标),与 20 世纪末相比,2040 年左右全国的一级水系统中治水计划区域的降雨量变化倍率约为 1.10 倍,治水计划中目标区域的洪水流量平均值约为 1.20 倍,洪水发生频率平均值约为 2 倍。上述各分区的降雨量变化倍率值也适用于二级水系和支流小流域。

英国和日本在制定应对气候变化的适应性措施时主要依据未来气候预估数据。英国利用世界各地的气候模型和英国的 HadGEM3-GC3.05 模型结果,研制了未来百年时间尺度不同情景下多种时空分辨率的气候预估数据,评估了未来不同情景下英国暴雨洪水的可能变化特征,量化了未来不同时期设计暴雨、设计洪水及海平面变化幅度供全国使用。在实践应用中,英国环境署建议采用该成果进行洪水风险管理相关工作。日本以 RCP 2.6 情景作为未来防洪规划的主要场景,将全国划分为 15 个气候区,确定了 1.0% 年超过概率降雨在不同分区、未来不同时期的变化倍率,并分析了相应的流量变化倍率,为修订防洪规划和制定新的洪水管理政策提供支撑。同时也强调,在规划其他关键性项目和计划时,可使用 RCP 8.5 情景作为附加参考。

总的来看,合理利用未来气候预估数据是分析未来暴雨洪水变化形势的资料基础,也是制定气候变化适应性措施的关键。采用未来气候预估数据与水文水动力模型耦合方式进行气候变化背景下的洪水影响分析将是一种有效途径,但这一过程中存在的诸如未来气候预估数据、模型结构、模型参数等不确定性问题需要谨慎处理,以保证分析结果的合理可靠。

3　总 结

(1)梳理了美国、荷兰、英国和日本在工程设计洪水标准制定方面的规则。整体而言,各国设计洪水标准确定规则存有差异,但主要还是从洪水潜在危害(不利影响)及洪水风险角度确定洪水标准。美国在防洪标准制定过程中建议综合考虑当前条件和预期未来发展状况,以使标准选用更具前瞻性,而其他各国主要还是关注当前条件对标准选用的影响,未能充分考虑流域未来社会经济发展变化对洪水标准的影响。

(2)调研了英国和日本在制定应对气候变化的适应性策略,其均为基于未来气候的预估数据,分析未来气候变化带来的降雨变化以及引起的洪水变化,并以此作为制定相应政策的依据。由此看来,合理利用未来气候预估数据是制定气候变化适应性措施的关键。

(3)各国在洪水标准选用及应对气候变化适应性政策制定方面的研究及应用成果,可为我国新时期洪水管理及适应气候变化策略的制定提供借鉴。

①强化基于现代风险理念的防洪标准研究及应用。风险是事故发生的可能性(概率)及其导致的后果(不利影响)的综合度量。水利工程的风险不仅取决于工程失事的可能性大小,还取决于失事后造成洪灾损失的大小(包括生命、经济和环境损失等)。我国现行防洪工程以防御设计洪水作为设计依据,认为工程失事的风险就是设计洪水被超过的可能性。在此框架下,两个具有相同设计标准的工程,不管工程失事后引起的损失差异多大,其承担的风险是相同的,这显然不甚合理。另外,工程是否失事不仅与洪水有关,还与工程的防洪能力或承载能力有关,工程的事故风险率并不等同于洪水的发生概率。因此,我国现行防洪工程的设计标准并不能确切反映工程所应承担的实际风险,需要强化基于现代风险理念的防洪标准研究。尽管风险计算过程相对复杂,实践操作难度很大,但荷兰的实践经验可为基于风险理念的防洪标准研究及应用提供重要借鉴。

②运用动态发展的观点,更具前瞻性地确定洪水标准。流域未来经济社会的发展可能会引起保护对象规模、工程重要性及失事后果等的变化,进而导致防洪标准的变化。如 20 世纪 80 年代修建的大坝工程,其对应的防洪标准适应于 80 年代的经济社会状况,对于当下的 2024 年而言,由于下游这些年的经济社会发展,其破坏导致的后果发生了巨大变化,进而使得 80 年代的防洪标准将不能满足现状条件下的防洪安全要求。因此,防洪标准制定需要兼顾经济社会、人口等多要素的未来发展状况,以便更具前瞻性地确定合理的洪水标准。

③从整体-局部互馈关联视角,协调统筹不同区域的洪水标准。在有多个防洪区域构成的整体性防洪系统中,各区域间洪水是相互影响的,个别区域防洪能力的变化会导致系统中其他区域或系统整体性防洪能力的变化。如某沿江区域加高沿江堤防高度,提高了该区域的防洪能力,这会导致在遭遇大洪水时,原本要漫过该区域的洪水将不再漫过堤防,而是向下游区域传播,进而会增加下游区

域的防洪风险。为此，在系统性防洪标准确定中，需要协调统筹不同区域防洪能力和系统整体性防洪能力，以尽可能降低“风险转移”效应产生的不利影响。

④综合利用未来长期气候预估数据，科学评估未来暴雨洪水可能发生的变化，依此制定应对气候变化适应性政策。尽管未来长期气候预估数据的精度及可靠性存在较大不确定性，但其是目前能够用于分析未来气候形势的关键资源。利用世界各地最新气候模型提供的不同情景下的气候预估数据，经时空降尺度及误差订正后，结合水文水动力模型，兼顾未来气候预估数据、模型结构、模型参数等不确定性的影响，合理分析未来不同情景下暴雨洪水的变化程度，量化未来不同时期相对于基准期的变化幅度，以此作为制定气候变化适应性政策的重要依据。

参考文献：

[1] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程等级划分及洪水标准: SL 252—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.

[2] 周祥林, 杨百银, 王正发, 等. 国内外水库工程防洪标准分析[J]. 水力发电, 2011, 37(3): 72-74, 82. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2011.03.023.

[3] 赵鹏强, 张福然, 唐振华. 水利水电工程等级和洪水标准选择探究[J]. 水利规划与设计, 2023(4): 23-26, 33. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2023.04.005.

[4] 肖昌虎, 黄建和, 周琴. 对《水利水电工程等级划分及洪水标准》修订的认识[J]. 人民长江, 2018, 49(10): 1-5. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.10.001.

[5] 梁忠民, 李国芳, 王军. 水文分析与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.

[6] 王府义, 张志红, 王国安, 等. 水工程设计洪水标准确定原则和方法[J]. 人民黄河, 2011, 33(7): 17-18,21. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2011.07.008.

[7] FEMA64. Federal guidelines for dam safety: Emergency action planning for dams[S]. Washington: American Federal Emergency Management Agency, 2013.

[8] JONKMAN S N, VOORTMAN H G, KLERK W J, et al. Developments in the management of flood defences and hydraulic infrastructure in the Netherlands[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(7): 895-910. DOI: 10.1080/15732479.2018.1441317.

[9] COULBOURNE W L, KRIEBEL D L, BEHM R L, et al. Guide for design of flood-resistant buildings [S]. National Research Council of Canada: Ottawa, ON, Canada, 2021.

[10] LOWE J A, BERNIE D, BETT P, et al. UKCP18 science overview report [J]. Met Office Hadley Centre: Exeter, UK, 2018: 1-73.

[11] BUREAU H. Ministry of land, Infrastructure, Transport and tourism. The first session of the committee on energy saving measures for houses and buildings for a decarbonized society[R]. 2021. (in Japanese).

[12] SNYDER F F. Hydrology of spillway design: Large structures – adequate data[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1964, 90(3): 239-259. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0001045.

[13] USACE. Recommended guidelines for safety inspection of dams [R]. Engineering Regulation ER 1110-2-106. Vicksburg, Mississippi, 1979.

[14] NOAA. Current NWS probable maximum precipitation (PMP) documents and related studies [EB/OL]. 2011. http://www.weather.gov/oh/hdsc /studies/pmp.html.

[15] FEMA 93. Federal guidelines for dam safety [S]. Washington: American Federal Emergency Management Agency, 1979.

[16] FEMA 94. Federal guidelines for selecting and accommodating inflow design floods for dams [S]. Washington: American Federal Emergency Management Agency, 1986.

[17] FEMA 94. Federal guidelines for dam safety: selecting and accommodating inflow design floods for dams [S]. Washington: American Federal Emergency Management Agency, 1998.

[18] FEMA P-94. Selecting and accommodating inflow design floods for dams [S]. Washington: American Federal Emergency Management Agency, 2014.

[19] FEMA P-1025. Federal guidelines for dam safety risk management[S]. Washington: American Federal Emergency Management Agency, 2015.

[20] JONKMAN S N, SCHWECKENDIEK T. Developments in levee reliability and flood risk analysis in the Netherlands[M]//Geotechnical safety and risk V. IOS Press, 2015: 50-60. DOI: 10.3233/978-1-61499-580-7-50.

[21] VERGOUWE R. The national flood risk analysis for the Netherlands[M]. Rijkswaterstaat VNK Project Office, 2016.

[22] DIERMANSE F, ROSCOE K, IJMKER J, et al. Hy-

dra-Ring: A computational framework to combine failure probabilities[J]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013.

[23] The institution of civil engineers. floods and reservoir safety [M]. 1st ed. London, Thomas Telford Services Ltd, 1978.

[24] The institution of civil engineers. floods and reservoir safety [M].3rd ed. London, Thomas Telford Services Ltd, 1996.

[25] 陈卫宾, 曹廷立, 武见. 国内外防洪标准及确定方法研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(7): 24-26. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2011.07.011.

[26] REN M, HE X, KAN G, et al. A comparison of flood control standards for reservoir engineering for different countries[J]. Water, 2017, 9(3): 152. DOI: 10.3390/w9030152.

[27] KANAZAWA H, YOSHITANI J, SHINTAKU S. The Japanese ministry of land, infrastructure, transport and tourism technical criteria for river works: practical guide for planning[J]. Technical Note of NILIM, 2009 (519).

[28] NAKAMURA S, OKI T. Paradigm shifts on flood risk management in Japan: Detecting triggers of design flood revisions in the modern era[J]. Water Resources Research, 2018, 54(8): 5504-5515. DOI: 10.1029/2017WR022509.

[29] Gov. uk. Flood risk assessments: Climate change allowances[EB/OL]. https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-assessments-climate-change-allowances.

[30] Environment Agency. Climate change allowances: rainfall[EB/OL]. https://environment.data.gov.uk/hydrology/climate-change-allowances/rainfall.

[31] Environment Agency. Climate change allowances: river flow[EB/OL]. https://environment.data.gov.uk/hydrology/climate-change-allowances/river-flow.

[32] KOIKE T. Evolution of Japan's flood control planning and policy in response to climate change risks and social changes[J]. Water Policy, 2021, 23(S1): 77-84. DOI: 10.2166/wp.2021.287.

Flood standards and coping strategies for climate change in typical developed countries in Europe, America, and Asia

HU Yiming[1], WEN Qiyu[1], WANG Jing[2], CAO Ziheng[1], PENG Anbang[3], LIANG Zhongmin[1]

(1. *College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*; 3. *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: Designing flood standard is crucial in the planning, design, and operational management of water resources and hydropower engineering. The determination of the standard is influenced by various factors such as the socio-economic conditions, the population size, and the scale and efficiency of engineering construction. With the intensification of climate change and the advancement of new theories and technologies, the international community began to explore new flood standard selection criteria and climate change adaptation policies to meet the requirements of flood management. Some typical developed countries such as the United States, the Netherlands, the United Kingdom, and Japan had taken a series of measures to address the challenges posed by climate change on the design of extreme rainfall and floods. They had also formulated corresponding policies and standards, which could provide valuable experiences for other countries.

The research findings and current application status of flood standard selection and climate change adaptation policies in several typical developed countries, including the United States, the Netherlands, the United Kingdom and Japan, were systematically reviewed. The policy formulation process and standard selection methods of these countries were comprehensively analyzed from two perspectives: engineering design flood standards and basin flood management standards. Moreover, the specific strategies and measures adopted by the United Kingdom and Japan in response to climate change impacts on extreme rainfall and floods were summarized. The main results were as follows:

Federal Emergency Management Agency (FEMA) in the United States had proposed multiple methods for determining flood standards, including prescriptive approach, incremental consequence analysis, risk-informed decision making and site-specific PMP studies. It emphasizes the importance of considering flood potential hazards

and risks rather than simply relying on dam size. The Netherlands, through a national flood risk analysis, had transitioned its flood safety standards from being based on exceedance probabilities per year to being based on flood risk. Similarly, the United Kingdom has moved away from using components of the Probable Maximum Flood (PMF) in determining flood standards. Instead, it emphasizes considerations related to potential loss of life, setting high design standards accordingly, often no less than a 10,000-year return period for dam projects with such risks. Meanwhile, in Japan, flood standards are determined through a combination of design rainfall and runoff models. The highest standard ranges from 100 to 200 years, with variations influenced by the dam's material, such as earth and rockfill versus concrete. The United Kingdom and Japan had taken proactive measures to establish comprehensive regulations to address climate change, utilizing future climate projection data to determine the magnitude of changes in design rainfall and floods, and incorporating this information into governmental decision-making and planning processes.

In summary, the formulation of engineering design flood standards were mainly reviewed in the United States, the Netherlands, the United Kingdom, and Japan. Additionally, the adaptive strategies formulated by the United Kingdom and Japan in response to climate change were also researched. Based on the analysis and summary of experiences from these countries, the following recommendations were proposed. Firstly, research and application of flood standards was strengthened based on modern risk concepts to make them more scientifically sound. Secondly, a dynamic perspective was adopted to determine flood standards more proactively, considering changes in future socio-economic development. Thirdly, a holistic approach was adopted to coordinate and integrate flood standards across different regions to avoid adverse "risk transfer" effects. Finally, long-term future climate projection data was comprehensively utilized to scientifically assess changes in extreme rainfall and floods and formulate adaptive policies to address climate change. These recommendations can provide valuable insights for the formulation of flood management and climate change adaptation strategies in China's new era, promoting sustainable development in water resources and hydropower engineering.

Key words: flood standard; climate change; adaptive countermeasure; the United States; the Netherlands; the United Kingdom; Japan

背景图所有权属《南水北调与水利科技（中英文）》编辑部