

多因素协同作用下混凝土坝性能退化机理研究进展

徐镇凯,王 锋,魏博文,蒋水华

(南昌大学建筑工程学院,江西 南昌 330031)

摘要:针对混凝土坝服役期间长期受到荷载与环境多因素的协同作用,导致其筑坝材料出现不同程度的老化、结构性能退化等问题,对多因素协同作用下混凝土坝性能退化问题的研究进行归纳总结。由于环境与荷载等因素是通过驱动材料性能演化来影响大坝服役性能的,故主要从荷载效应和结构抗力角度综述了混凝土坝系统性能退化机理,着重阐述了多因素作用下大坝结构与材料退化研究的现状和不足,并指出混凝土坝结构服役性能机理研究亟待解决的几个科学问题。

关键词:混凝土坝;性能退化;多因素协同作用;荷载效应;结构抗力;研究进展

中图分类号:TV33 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)04-0080-09

Research progress of performance degradation for in-service concrete dam under multi-factor synergism//XU Zhenkai, WANG Feng, WEI Bowen, JIANG Shuihua (School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Under the effect of load and environmental factors, concrete dam materials appear different degrees of aging and the performance of dam structures degrades during the service period. With regard to this problem, studies on performance degradation mechanism under the coupling effect of multiple factors were summarized in this paper. Since the performance of the in-service dam affected by the environment and load factors is mainly driven by the evolution of material properties, the performance degradation of concrete dam system was studied from the aspect of load and structural resistance, with emphasis on research status and technical challenges of the degradation mechanism of dam structures and materials under multiple factors synergy. Finally, some key scientific problems needed to be urgently solved on the performance of in-service concrete dams are pointed out.

Key words: concrete dam; performance degradation; multiple factors synergy; load effect; structural resistance; research progress

我国在建混凝土坝数量和高度均居世界首位,其长效服役性能关系到整个水利水电工程的安危。混凝土坝服役期间不仅要承受各种荷载作用,还要承受恶劣环境的侵蚀和腐蚀,其服役性能受到设计、施工、运行、管理等多方面因素的影响,随着一批混凝土坝服役设计基准期的临近,部分大坝已出现了不同程度的老化、病害征兆,将会导致大坝性能衰退,进而造成大坝系统失效。大坝性能退化是由材料到结构的渐进过程,其退化过程包括微观结构的演变,裂缝的发展乃至整体结构的失效。据不完全统计^[1],大约有 40% 的大坝失事是由坝基失稳引起,另有 34% 是由于渗流控制不当引起。受材料、环境以及荷载等因素的影响,混凝土坝服役性能提前退化乃至失稳的事件历史上屡见不鲜^[2-4],如

1928 年美国圣佛兰西斯重力拱坝因坝体材料老化及水体渗漏造成上部坝肩风化砾岩中的静水压力升高导致大坝失事破坏^[5],1954 年法国马尔帕赛拱坝由于坝肩材料性能退化造成坝肩失稳破坏,1969 年我国佛子岭连拱坝由于坝基材料老化与洪水漫顶导致大坝严重受损。外界环境因素的影响造成大坝钢筋混凝土材料的侵蚀以及材料老化,导致混凝土坝服役性能退化,加上荷载作用(坝体自重、水荷载等),将进一步引起坝体滑动、变形以及开裂,加速大坝服役性能的退化。由此可见,在多因素(如环境和荷载等)协同驱动下,混凝土坝服役性能将会提前退化,从而引起大坝破坏和失效,极大地缩短了大坝的服役寿命。

尽管国内外学者在混凝土坝服役性能退化方面

进行了大量有益的室内外试验、数值仿真模拟与理论研究^[6-10],建立了相应的抗冻融、碳化、钢筋锈蚀、氯离子侵蚀等多种预测模型,但实际工程中混凝土坝在其服役过程中坝体材料损伤与性能退化往往受多种因素的协同作用,而不是仅受荷载或环境等单一因素作用,且随着库区及近坝区的大气、水质和土壤的污染越发严重^[11-13],混凝土坝服役环境日益恶化。因此,研究多因素协同驱动下混凝土坝退役性能对大坝安全实时监测与管理,及时补强加固和提升大坝服役性能具有重要的现实意义。

1 荷载效应和结构抗力作用下混凝土坝性能退化机理

混凝土坝是由坝体、坝基和库水及其相互作用组成的综合体系。在混凝土坝正常运行期间,之所以其性能逐渐退化,无法继续满足大坝安全性、适用性以及耐久性功能要求,一个重要的原因是长期受到荷载、环境以及材料等因素的影响。图1给出了基于时变规律的混凝土坝服役性能的退化与提升过程线,图中曲线I表示设计工况下多因素作用下大坝服役期性能退化的变化趋势,但在实际工程中,大坝还可能受到不确定荷载的作用而造成其性能的突然恶化,为延长大坝健康服役寿命,通常会进行人为补强加固,可在一定程度上提高大坝服役性能,如曲线II所示。尽管造成混凝土坝性能退化的驱动因素是多方面的^[14-15],但总体上可以概括为荷载效应和结构抗力两个因素。为此,首先从荷载效应和结构抗力角度揭示混凝土坝性能退化机理。

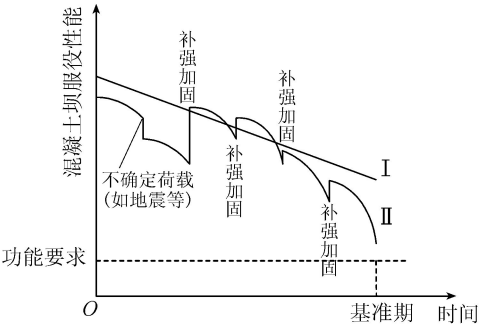


图1 混凝土坝性能退化与提升分析示意图

荷载是造成混凝土坝服役性能退化的重要因素,荷载作用可能造成大坝结构变形、开裂或坝基失稳等^[16]。荷载一般可分为静态荷载(坝体自重、静水压力、扬压力以及泥沙压力等)和动态荷载(温度荷载、地震荷载以及水下爆炸冲击荷载等)。当静态荷载作用于混凝土坝体系时,大坝系统长期受荷载效应影响其承载力会降低,挠度和裂缝开度均会增大,大坝变形越来越严重,当荷载效应达到一定值

时,混凝土坝系统性能退化,可能会造成大坝坝基失稳破坏^[17-18]。此外,混凝土坝在其服役期间还可能受到动态荷载的作用,如当混凝土坝受到地震荷载^[19]或水下爆炸冲击荷载^[20-21]等动态荷载的作用时,荷载效应会突然增大,坝基或坝身产生突发性的贯穿裂缝,造成大坝服役性能退化乃至失稳破坏。

在结构抗力方面,一般从大坝构件结构方面(如构件截面承载力、材料刚度以及截面的抗裂等)研究混凝土坝在材料或环境等因素作用下的性能退化问题。随着大坝服役时间的延长,坝体混凝土材料在长时间外界环境(氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、碳化作用、溶蚀作用以及冻融作用等)中,其内部成分和强度等均会发生不同程度的变化,内设钢筋力学性能发生退化^[22]。另外,坝基基岩内部结构受长期水流渗漏溶蚀作用^[23-24]的影响,其力学性能严重衰减,抗压强度降低,基岩承载力急剧减小。

此外,在各种外界环境因素作用下,若大坝结构性能已经退化,大坝系统同时受到持续静态荷载和动态荷载的共同作用,将导致荷载效应急剧增大,当荷载效应大于结构抗力时,会加速混凝土坝的失稳破坏。多因素作用下混凝土坝性能退化过程如图2(图中 P_f 为失效概率, μ_z 为平均值, β 为可靠指标, σ_z 为标准差)所示,仅在荷载作用下,混凝土坝结构抗力 R 大于荷载效应 S ,坝体材料性能和构件性能满足各项功能要求,大坝正常服役;由于同时受到各种环境因素影响,造成混凝土坝结构的荷载效应逐渐增大,在荷载与环境因素长期耦合作用下,混凝土坝服役性能将发生退化,坝体材料和结构性能可能无法满足各项功能要求,荷载效应一旦超过其结构抗力,大坝将会发生失稳破坏。

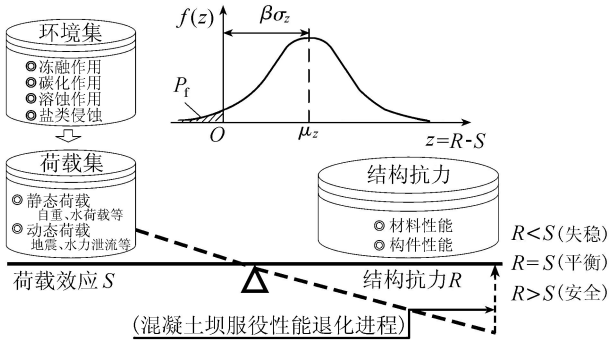


图2 多因素作用下混凝土坝性能退化过程

2 单一因素作用下混凝土坝性能退化机理

目前在单一因素驱动下混凝土坝服役性能的性能退化机理研究取得了可喜的进展^[25-28]。我国大坝混凝土普遍呈现出一种南锈北冻的现象,影响钢筋混凝土材料性能退化的因素较复杂,主要包括荷载、冻

融、溶蚀、碳化、盐类侵蚀等。混凝土受冻融作用破坏的代表性理论有静水压力理论^[29]、冻融破坏机理^[30]等。混凝土坝冰冻破坏机理与其内部复杂孔隙结构密切相关^[31],大坝冻融破坏机理通常以水结冰体积膨胀 9% 为基本前提^[32]展开研究。溶蚀会导致坝体钙离子的流失,混凝土水化产物失去胶凝性,微观孔隙结构增加。黄蓓等^[33]研究表明氢氧化钙是造成混凝土早期溶蚀质量损伤的主要原因,混凝土溶蚀后有害孔数增加会对混凝土的耐久性产生不利影响。碳化是混凝土坝中混凝土的一种常见化学性病害,肖佳等^[34]研究表明大坝混凝土碳化速度和深度主要受材料因素、环境因素及施工因素影响。硫酸盐对大坝混凝土的侵蚀主要是由于硫酸根离子与水泥水化产物发生化学反应,生成膨胀性的侵蚀产物(石膏和钙矾石),导致混凝土胀裂^[35]。Zhu 等^[36]研究表明氯盐侵蚀容易造成大坝混凝土与钢筋交界面的 pH 值迅速降低,交界面处的钝化膜将逐渐受到破坏。图 3 给出了冻融^[37]、溶蚀^[38]、碳化^[39]和盐类侵蚀^[40]4 种单一环境因素作用下坝体混凝土材料内部微观结构,可见在不同单一因素作用下混凝土微观结构破坏前后形态有着明显的差异。

3 多因素作用下混凝土坝性能退化机理

实际工程中混凝土坝在其服役过程中,不是仅受到单一因素的作用,而往往是受环境和荷载等多因素的长期协同作用,混凝土坝服役期间坝体材料和结构性能均发生退化,混凝土材料老化、钢筋锈蚀,大坝结构性能退化表现为弹性模量和抗压强度减小、裂缝开度扩展等。例如在沿海地区,大坝除了承受荷载带来的破坏,还受到氯离子和二氧化碳的

长期侵蚀;在我国北部,大坝可能受到荷载、冻融和氯盐侵蚀 3 种因素的协同作用。由于环境因素的复杂多变,仅仅模拟研究单一因素下混凝土坝服役性能退化过程难以符合工程实际情况,应当从多因素协同作用方面研究大坝服役性能,如坝体整体稳定性、大坝变形、裂缝开度以及耐久性问题。

多因素协同作用造成混凝土坝服役性能退化一般认为是在某一因素的驱动下,材料内部微观结构首先出现退化或损伤,进一步受到其他因素的作用,材料损伤加速扩展,直至大坝结构宏观失效破坏。在各类环境因素作用下,坝体混凝土材料和基岩孔结构性能退化,产生微裂缝,坝体内部钢筋锈蚀,形成坝体微观结构破坏,这种破坏是局部的,再加上荷载因素作用,微裂缝将会汇集,最后形成宏观裂缝^[41-42],导致坝体混凝土开裂,大坝服役性能发生退化,大坝的破坏也由微观、局部的破坏发展成宏观、整体的破坏。混凝土坝性能退化一般首先是从局部开始,大坝局部性能退化造成附近局部区域产生应力集中从而导致大坝局部失效,在多因素的持续耦合作用下,大坝局部性能的进一步退化可能引发大范围的损伤与整体失效,导致混凝土坝结构整体服役性能发生退化。因此,对于多因素协同作用下混凝土坝服役性能退化机理的研究,应当从微观和宏观等多尺度展开,并遵循从局部性能退化向整体性能退化转变的机制。

3.1 多种环境因素协同作用

在我国北方特别是东北地区服役的混凝土坝受严寒气候的影响,大坝冻融破坏现象时有发生^[43-45]。充水饱和大坝混凝土在冻融作用下极易发生开裂剥落等物理性损伤破坏,溢洪道、坝体上游面的水位变化区等最容易遭受冻融作用。冻融与其

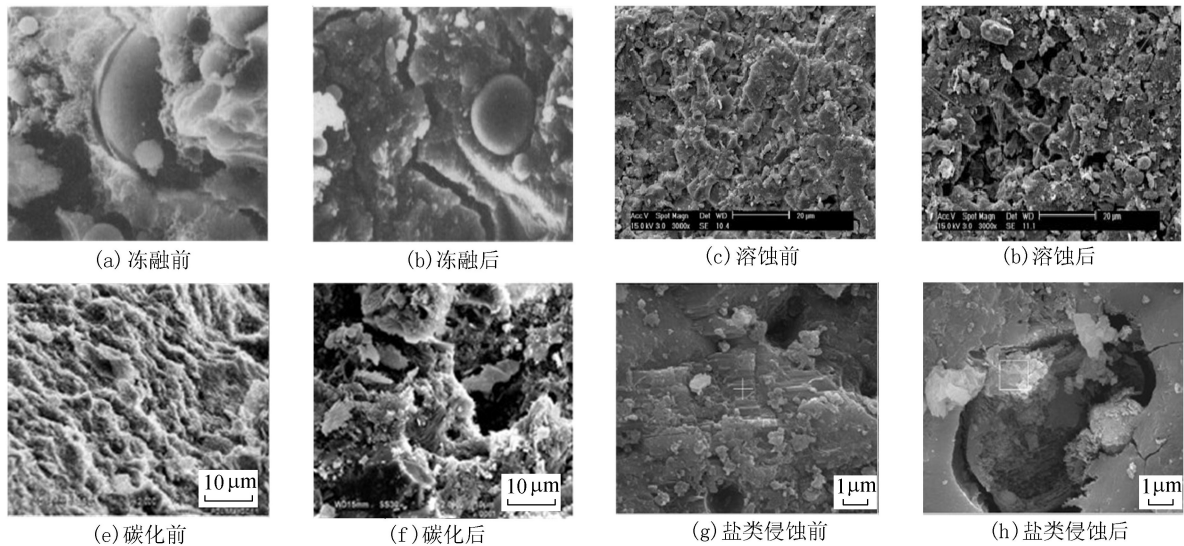


图 3 单一环境因素作用下坝体混凝土破坏前后内部微观结构

他因素的协同作用会加速混凝土坝的破坏,大坝系统受冻融作用时,其内部微观孔隙将连通并形成微裂缝,微裂缝在反复冻融作用下将扩展成宏观裂缝,裂缝的形成将加速其他因素对大坝的侵蚀,导致坝体结构力学性能、弹性模量和抗压强度等的降低。下面以冻融和氯盐侵蚀组合、冻融和碳化作用组合为例,简要介绍目前在多种环境因素协同作用下的混凝土坝性能退化机理方面的研究工作。

在冻融-氯盐环境中,坝体内部渗透压力会增大,饱水程度提高且在受冻时产生结晶压,造成混凝土受冻破坏加剧,同时大坝冻融损伤引起坝体内部微裂纹和有害孔数量增多,促使氯离子向混凝土内部侵入^[46-47]。Colleparidi 等^[48-49]最早提出了基于 Fick 第二定律的氯离子扩散系数计算方法,随后余红发等^[50]分别推导了考虑多因素作用下的混凝土表面剥落氯离子扩散理论模型、混凝土冻融循环氯离子扩散理论模型和混凝土损伤氯离子扩散理论模型。余红发等^[51]进一步研究了冻融和腐蚀等多因素作用下的混凝土损伤问题,采用损伤初速度和损伤加速度等退化参数,建立了不同破坏条件下的混凝土统计损伤模型。杜鹏等^[52]研究了冻融循环和盐冻这两种因素作用下的混凝土残余应变增长规律,建立了以残余应变表征冻融损伤程度的数学模型,并通过试验数据拟合得出模型参数和变量,其阻滞模型为

$$\varepsilon_r(N)=\frac{\varepsilon_m}{1+\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{r0}-1}\right)e^{-\lambda N}}\tag{1}$$

式中: $\varepsilon_r(N)$ 为循环 N 次后的残余应变; ε_m 为残余应变最大值; ε_{r0} 为初始残余应变; λ 为残余应变增长率,即单位时间内 $\varepsilon_r(N)$ 的增量与 $\varepsilon_r(N)$ 的比例系数; N 为循环次数。

赵高升等^[53]研究表明在冻融和碳化交替作用早期,碳化有利于提高混凝土的抗冻耐久性,但后期碳化作用将加速混凝土的冻融破坏。朱方之等^[54]通过冻融循环试验和加速碳化试验研究了冻融与碳化因素协同作用下混凝土性能退化过程,表明当碳酸钙含量达到一定程度时,混凝土胶凝性将逐渐减弱^[55-56],并加速混凝土构件的老化^[57]。于琦等^[58]基于 Papadakis 碳化模型数值模拟了冻融环境下混凝土的碳化过程,并建立了冻融环境下混凝土碳化深度预测模型,其表达式为

$$x_f=k_{w/c}k_ck_{RH}k_{CO_2}x\tag{2}$$

式中: x_f 为冻融作用下混凝土的碳化深度; $k_{w/c}$ 为水灰比; k_c 为水泥用量; k_{RH} 为环境相对湿度; k_{CO_2} 为二氧化碳浓度影响系数; x 为混凝土碳化深度。

冻融作用产生的过大拉压应力会造成混凝土内部微裂缝的产生,严重时将造成混凝土开裂或剥落,从而加快二氧化碳进入混凝土内部的速率。冻融循环次数越多,碳酸钙的含量就越高,混凝土的碳化深度也就越大。

3.2 环境与荷载因素耦合作用

荷载作用下混凝土坝性能的退化在微观方面主要表现为孔隙结构变化,内部产生微裂缝;在宏观方面主要表现为大坝系统材料老化,产生宏观裂缝等。这些微裂缝、宏观裂缝等进一步为其他环境因素对大坝的侵蚀提供了通道^[59],加剧了大坝系统材料的老化,造成各种力学性能衰减,大坝承载力降低,服役性能退化。下面以荷载-氯盐侵蚀组合、冻融循环-氯盐侵蚀-荷载组合、荷载-硫酸盐侵蚀组合以及荷载-干湿交替-硫酸盐侵蚀组合为例,简要介绍目前在荷载与环境因素耦合作用下混凝土坝服役性能退化机理方面的研究工作。

Francois 等^[60]采用喷洒盐雾的方法,研究了钢筋混凝土梁荷载与氯离子扩散性之间的关系,发现氯离子渗透与荷载引起的微裂缝有关。施锦杰等^[61]研究了氯盐侵蚀与外荷载耦合作用下的钢筋锈蚀机理,并预测了混凝土保护层开裂时间。金伟良等^[62]研究表明氯盐侵蚀和持续荷载耦合作用下保护层厚度范围内的氯离子质量会随着持续荷载水平的提高而增大,钢筋截面发生不均匀锈蚀。蒋金洋等^[63]研究了弯曲荷载作用下结构混凝土抗氯离子扩散性能,并指出随着疲劳损伤所产生的残余应变的增大,氯离子在混凝土中的扩散系数逐渐增大。王阵地等^[64]研究了钢筋混凝土在冻融循环、氯盐侵蚀与弯曲荷载三因素作用下的质量损失、动弹性模量和混凝土应变等参数的变化过程,为预测多因素影响下混凝土坝服役寿命积累了数据。冻融循环-氯盐侵蚀-荷载作用下,盐冻循环是造成混凝土表面剥蚀破坏的主要因素,然而高应力比时混凝土破坏主要受外部弯曲荷载影响。在冻融环境中,大坝内部会形成微裂缝^[65],荷载作用将加剧微裂缝的产生和扩展,为氯离子向混凝土内部的渗透提供了便利通道,从而加速了混凝土材料的老化以及大坝服役性能的退化。

Schneider 等^[66-67]研究了普通混凝土、高性能混凝土在弯曲荷载与硫酸盐侵蚀耦合作用下的耐久性。Živica 等^[68]研究了压应力作用下水泥基复合材料的抗硫酸盐腐蚀性,表明混凝土的抗腐蚀性受不同级别拉压应力的影响。陈拴发等^[69]研究表明疲劳荷载与硫酸盐腐蚀耦合作用会导致混凝土产生大量的微裂缝,并对疲劳荷载作用下混凝土材料有效

扩散系数采用基体扩散系数与裂缝扩散系数进行了有效表征,计算表达式为

$$D_t = \left(1 + 0.785\xi_1 \frac{D_c}{D_m} - 0.785\xi_1 \right) D_m \quad (3)$$

式中: D_t 为混凝土材料有效扩散系数; D_m 为混凝土材料基体扩散系数; D_c 为裂缝扩散系数; ξ_1 为裂缝因子。

余振新等^[70]研究了弯曲荷载-干湿交替-硫酸盐侵蚀三因素协同作用下的混凝土损伤退化过程,表明弯曲荷载和干湿循环均会加剧混凝土在硫酸盐溶液中的损伤程度,相比之下,干湿循环的加速损伤作用更加明显。Bassuoni 等^[71]研究了干湿循环与弯曲荷载协同作用下硫酸盐腐蚀对自密实混凝土力学性能的影响,并评价了损伤后的混凝土可靠度与抗压强度。Gao 等^[72]研究了恒定荷载与干湿循环协同作用下混凝土受硫酸钠溶液侵蚀的机理,并探讨了硫酸根离子在混凝土中的传输规律。

4 混凝土坝性能退化机理研究的不足

服役期间混凝土坝性能退化问题逐渐得到了工程界和科学界的广泛重视,许多学者对此开展了相应的研究工作,并取得了一定的研究成果^[73-75],但是多因素协同作用下的混凝土坝性能退化机理研究尚处于初步阶段,研究内容的系统性和试验方法的规范性均有待完善,主要存在以下不足:

a. 由于各地区环境条件的复杂多变,对大坝服役性能退化机理的研究还不能完全符合工程实际,同时对多因素作用下混凝土坝服役性能退化机理的研究受到当前试验条件、建模条件和研究理论的限制。因此,如何科学而又准确地评价多因素作用下混凝土坝服役性能退化机理依然存在一定的难度。

b. 鉴于混凝土材料退化因素的复杂性和技术限制,现阶段还无法采用试验和理论分析相结合的方法根据混凝土微观结构对混凝土材料进行力学性能分析。另外,材料和结构研究进展的不同步造成了材料和结构研究的脱节,给研究多因素作用下混凝土坝服役性能退化机理带来一定的困难。

c. 现行结构设计与耐久性研究未充分考虑多种复杂环境因素的影响,对混凝土坝性能退化机理的研究也未充分考虑环境因素作用,导致所建立的数学、力学模型不够完善。荷载与环境等多因素作用下混凝土坝性能退化机理较为复杂,多因素作用下混凝土坝材料性能时空劣化规律研究还存在诸多不足。

d. 混凝土坝在荷载和环境因素耦合作用下其服役性能退化速度加快,但是目前对混凝土坝的安

全监测力度不够,在这方面仅仅开展了初步研究工作^[76-77]。此外,为了给大坝服役性能提升、大坝安全管理和运行提供依据,亟须制定合理的安全监测指标,实时且及时地了解混凝土坝系统服役性能,而目前对变形、渗流、应力和应变以及裂缝开度等安全监测指标的研究还相对较少。

5 结语与展望

a. 多因素作用下混凝土坝服役性能退化机理极为复杂,应综合考虑荷载或环境因素影响,从荷载效应和结构抗力角度分析大坝服役性能退化机理,从而为预测混凝土坝服役寿命提供参考。

b. 多种环境因素协同作用以及环境与荷载等因素的耦合作用将加速大坝服役性能退化进程。混凝土坝在荷载作用下形成的微裂缝为环境因素对大坝体系统的侵蚀提供了通道,各种环境因素对大坝结构的侵蚀又加剧了裂缝的扩展。

c. 从微观到宏观、局部到整体阐述了目前在多因素作用下混凝土坝服役性能退化机理方面的研究进展,并在微观层面揭示了混凝土坝破坏机理与宏观性能退化之间的定量关系。

d. 目前亟须在荷载和环境侵蚀等多因素耦合作用下混凝土坝的损伤演化特征方面进行研究,分析大坝结构的失效路径、破坏前兆及损伤对结构响应的影响,建立多因素耦合作用下大坝结构力学性能演化与诸多影响因素间的关联模型,为混凝土坝服役性能退化机理研究奠定理论基础。

参考文献:

- [1] 马永锋,生晓高. 大坝失事原因分析及对策探讨[J]. 人民长江, 2001, 32(10): 53-66. (MA Yongfeng, SHENG Xiaogao. Analysis on the cause of dam failure and countermeasures[J]. Chinese Journal of Yangtze River, 2001, 32(10): 53-66. (in Chinese))
- [2] GUPTA H K. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India [J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58(3): 279-310.
- [3] CALAYIR Y, KARATON M. Seismic fracture analysis of concrete gravity dams including dam-reservoir interaction [J]. Computers & Structures, 2005, 83(19): 1595-1606.
- [4] DUFFAUT P. The traps behind the failure of Malpasset Arch Dam, France, in 1959 [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(5): 335-341.
- [5] MULDER T, ZARAGOSI S, JOUANNEAU J M, et al. Deposits related to the failure of the Malpasset Dam in 1959: an analogue for hyperpycnal deposits from

- jökulhlauþs[J]. Marine Geology, 2009, 260(1): 81-89.
- [6] 曹明莉, 丁言兵, 郑进炫, 等. 混凝土碳化机理及预测模型研究进展[J]. 混凝土, 2012(9): 35-46. (CAO Mingli, DING Yanbing, ZHENG Jinxuan, et al. Research progress of concrete carbonization mechanism and prediction model[J]. Chinese Journal of Concrete, 2012(9): 35-46. (in Chinese))
- [7] 宋玉普, 冀晓东. 混凝土冻融损伤可靠度分析及剩余寿命预测[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 259-263. (SONG Yupu, JI Xiaodong. Concrete freeze-thaw damage reliability analysis and remaining life prediction[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 259-263. (in Chinese))
- [8] 韩宇栋, 张君, 高原. 混凝土抗硫酸盐侵蚀研究评述[J]. 混凝土, 2011(1): 52-61. (HAN Yudong, ZHANG Jun, GAO Yuan. Recital of concrete resistance to sulfate erosion research[J]. Chinese Journal of Concrete, 2011(1): 52-61. (in Chinese))
- [9] 刘冬梅, 方坤河, 阮燕. 水工混凝土抗软水接触性溶蚀试验研究[J]. 混凝土, 2006(8): 5-7. (LIU Dongmei, FANG Kunhe, RUAN Yan. The experimental study of soft water contact dissolution hydraulic concrete[J]. Chinese Journal of Concrete, 2006(8): 5-7. (in Chinese))
- [10] 韩建国, 阎培渝, 郝卫增. 混凝土荷载-挠度曲线拟合方法[J]. 混凝土, 2012(3): 1-3. (HAN Jianguo, YAN Peiyu, HAO Weizeng. Load and deflection curve fitting method of concrete[J]. Chinese Journal of Concrete, 2012(3): 1-3. (in Chinese))
- [11] 苗得雨, 周孝德, 程文, 等. 中国环境污染现状分析及防治管理措施[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(11): 751-753. (MIAO Deyu, ZHOU Xiaode, CHENG Wen, et al. The present situation analysis of environmental pollution and its control management in China[J]. Chinese Journal of Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12(11): 751-753. (in Chinese))
- [12] ISLAM M S, AHMED M K, RAKNUZZAMAN M, et al. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country[J]. Ecological Indicators, 2015, 48: 282-291.
- [13] DONG L, LIANG H. Spatial analysis on China's regional air pollutants and CO₂ emissions: emission pattern and regional disparity[J]. Atmospheric Environment, 2014, 92: 280-291.
- [14] 邢林生, 聂广明. 我国水电站混凝土建筑物耐久性分析[J]. 水力发电, 2003, 29(2): 27-31. (XING Linsheng, NIE Guangming. Analysis on durability of concrete structure of hydropower stations in China[J]. Chinese Journal of Water Power, 2003, 29(2): 27-31. (in Chinese))
- [15] 朱伯芳. 论混凝土坝的使用寿命及实现混凝土坝超长期服役的可能性[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 1-9. (ZHU Bofang. On the expected life span of concrete dams and the possibility of endlessly long life of solid concrete dams[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 1-9. (in Chinese))
- [16] LOBOVSKÝ L, BOTIA-VERA E, CASTELLANA F, et al. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 48: 407-434.
- [17] BRETAS E M, LÉGER P, LEMOS J V. 3D stability analysis of gravity dams on sloped rock foundations using the limit equilibrium method[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 44: 147-156.
- [18] WANG S, GU C, BAO T. Safety Monitoring index of high concrete gravity dam based on failure mechanism of instability[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(3): 1-14.
- [19] SHI Z, NAKANO M, NAKAMURA Y, et al. Discrete crack analysis of concrete gravity dams based on the known inertia force field of linear response analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 115: 122-136.
- [20] ZHANG S, WANG G, WANG C, et al. Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36: 49-64.
- [21] 张社荣, 王高辉, 王超, 等. 水下爆炸冲击荷载作用下混凝土重力坝的破坏模式[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5): 501-507. (ZHANG Sherong, WANG Gaohui, WANG Chao, et al. Failure mode analysis of concrete gravity dam subjected to underwater explosion[J]. Chinese Journal of Explosion and Shock Wave, 2012, 32(5): 501-507. (in Chinese))
- [22] ZHAO Y, DONG J, WU Y, et al. Steel corrosion and corrosion-induced cracking in recycled aggregate concrete[J]. Corrosion Science, 2014, 85: 241-250.
- [23] SUGIYAMA T, RITTHICHAUY W, TSUJI Y. Experimental investigation and numerical modeling of chloride penetration and calcium dissolution in saturated concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(1): 49-67.
- [24] TRAPOTE-BARREIRA A, CAMA J, SOLER J M. Dissolution kinetics of C-S-H gel: flow-through experiments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2014, 70/71: 17-31.
- [25] 韩建德, 孙伟, 潘钢华. 混凝土碳化反应理论模型的研究现状及展望[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1143-1153. (HAN Jiande, SUN Wei, PAN Ganghua. Recent development on theoretical model of carbonation reaction of concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8): 1143-1153. (in Chinese))
- [26] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Mechanism of sulfate attack: a fresh look; part 1 summary of experimental results[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(6): 915-921.
- [27] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Mechanism of

- sulfate attack; a fresh look; part 2 proposed mechanisms [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33 (3): 341-346.
- [28] 于贺. 高寒地区混凝土大坝冻融破坏机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [29] POWER T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete [J]. Journal of American Concrete Institute, 1945, 16(4): 245-272.
- [30] SETZER M J. A new approach to describe frost action in hardened cement paste and concrete[C]//Proceedings of the Conference on Hydraulic Cement Paste; Their Structure and Properties. Sheffield: British Cement and Concrete Association, 1976; 312-325.
- [31] WITTMANN F H, ZHANG P, ZHAO T. Influence of combined environmental loads on durability of reinforced concrete structures [J]. Restoration of Buildings and Monuments, 2006, 12(4): 349-362.
- [32] 侯云芬, 吴越恺. 多因素耦合作用下混凝土劣化机理研究现状[J]. 北京建筑工程学院学报, 2013, 29(1): 1-6. (HOU YunFen, WU Yuekai. Research status of degradation mechanism of concrete affecting by multi-factors[J]. Chinese Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013, 29(1): 1-6. (in Chinese))
- [33] 黄蓓, 钱春香. 溶蚀混凝土的表征及应力-应变关系[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 87-91. (HUANG Bei, QIAN Chunxiang. Characterization and stress-strain relationship of leached concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(1): 87-91. (in Chinese))
- [34] 肖佳, 勾成福. 混凝土碳化研究综述[J]. 混凝土, 2010(1): 40-52. (XIAO Jia, GOU Chengfu. Overview of the research for concrete carbonation[J]. Chinese Journal of Concrete, 2010(1): 40-52. (in Chinese))
- [35] 左晓宝, 孙伟. 硫酸盐侵蚀下的混凝土损伤破坏全过程[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(7): 1063-1067. (ZUO Xiaobao, SUN Wei. Full process analysis of damage and failure of concrete subjected to external sulfate attack[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(7): 1063-1067. (in Chinese))
- [36] ZHU Q, JIANG L, CHEN Y, et al. Effect of chloride salt type on chloride binding behavior of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 512-517.
- [37] 汪在芹, 李家正, 周世华, 等. 冻融循环过程中混凝土内部微观结构的演变[J]. 混凝土, 2012(1): 13-14. (WANG Zaiqin, LI Jiazheng, ZHOU Shihua, et al. In the process of freezing and thawing cycle inside the concrete microstructure evolution[J]. Chinese Journal of Concrete, 2012(1): 13-14. (in Chinese))
- [38] 刘琦, 卢耀如, 张凤娥, 等. 温度与动水压力作用下灰岩微观溶蚀的定性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 149-154. (LIU Qi, LU Yaoru, ZHANG Feng'e, et al. Qualitative analysis of limestone dissolution under the action of temperature and micro dynamic water pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 149-154. (in Chinese))
- [39] 元成方, 牛获涛, 陈娜, 等. 碳化对混凝土微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(4): 687-707. (YUAN Chengfang, NIU Ditao, CHEN Na, et al. The micro structure of the carbonation of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(4): 687-707. (in Chinese))
- [40] 陈晓斌, 唐孟雄, 马昆林. 地下混凝土结构硫酸盐及氯盐侵蚀的耐久性实验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2803-2812. (CHEN Xiaobin, TANG Mengxiong, MA Kunlin. Underground concrete structure durability experiment under sulphate and chloride salt erosion[J]. Journal of Central South University (Natural Sciences), 2012, 43(7): 2803-2812. (in Chinese))
- [41] 包腾飞, 周扬. 混凝土坝裂缝失稳扩展判据[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 683-688. (BAO Tengfei, ZHOU Yang. A fracture criterion for cracks in concrete dams [J]. Chinese Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(5): 683-688. (in Chinese))
- [42] 朱伯芳. 论混凝土坝的几个重要问题[J]. 中国工程科学, 2006, 8(7): 21-29. (ZHU Bofang. On some important problems about concrete dams [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2006, 8(7): 21-29. (in Chinese))
- [43] 李守巨, 刘迎曦, 陈昌林, 等. 混凝土大坝冻融破坏问题的数值计算分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 190-194. (LI Shouju, LIU Yingxi, CHEN Changlin, et al. Numerical computation and analysis of fracturing problems of concrete dam owing to freezing and thawing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 190-194. (in Chinese))
- [44] HAMZE Y. Concrete durability in harsh environmental conditions exposed to freeze thaw cycles [J]. Physics Procedia, 2014, 55: 265-270.
- [45] VANCURA M, MACDONALD K, KHAZANOVICH L. Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(10): 1080-1085.
- [46] ANGST U, ELSENER B, LARSEN C K, et al. Critical chloride content in reinforced concrete: a review [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(12): 1122-1138.
- [47] TORRES-LUQUE M, BASTIDAS-ARTEAGA E, SCHOEFS F, et al. Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: state-of-the-art and future challenges [J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 68-81.
- [48] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZIANI R. The kinetics of penetration of chloride ions into the concrete [J]. Il Cemento, 1970, 67(4): 157-164.

- [49] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZIANI R. Penetration of chloride ions into cement pastes and concrete [J]. Journal the American Ceramic Society, 1972,55(10):534-535.
- [50] 余红发,孙伟,麻海燕,等. 混凝土在多因素作用下的氯离子扩散方程[J]. 建筑材料学报,2002,5(3):240-247. (YU Hongfa, SUN Wei, MA Haiyan, et al. Diffusion equations of chloride ion in concrete under the combined action of durability factors[J]. Chinese Journal of Building Materials,2002,5(3):240-247. (in Chinese))
- [51] 余红发,孙伟,麻海燕,等. 冻融和腐蚀因素作用下混凝土的损伤劣化参数分析[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(4):1-8. (YU Hongfa, SUN Wei, MA Haiyan, et al. Analysis of damage degradation parameters of concrete subjected to freezing-thawing cycles and chemical attack [J]. Chinese Journal of Architecture and Civil Engineering,2011,28(4):1-8. (in Chinese))
- [52] 杜鹏,姚燕,王玲,等. 冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土的损伤模型[J]. 硅酸盐通报,2014,33(4):841-852. (DU Peng, YAO Yan, WANG Lin, et al. Damage model of concrete subject to freeze-thaw cycles coupled with chloride attack [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2014,33(4):841-852. (in Chinese))
- [53] 赵高升,何真,杨华美. 冻融循环和碳化交替作用下的混凝土耐久性[J]. 武汉大学学报(工学版),2013,46(5):604-609. (ZHAO Gaosheng, HE Zhen, YANG Huamei. Study of concrete durability under alternative effect of carbonation and freeze-thaw cycles [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2013,46(5):604-609. (in Chinese))
- [54] 朱方之,赵铁军,张卫东. 冻融和其他因素复合下混凝土的耐久性研究进展[J]. 材料导报,2011,25(10):143-146. (ZHU Fangzhi, ZHAO Tiejun, ZHANG Weidong. Research progress on the concrete durability under combined action of freeze-thaw and other factors [J]. Chinese Journal of Materials Review,2011,25(10):143-146. (in Chinese))
- [55] SILVA A, NEVES R, de BRITO J. Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Composites,2014,50:73-81.
- [56] JI Y, WU M, DING B, et al. The experimental investigation of width of semi-carbonation zone in carbonated concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 67-75.
- [57] KUOSA H, FERREIRA R M, HOLT E, et al. Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life [J]. Cement and Concrete Composites,2014,47:32-40.
- [58] 于琦,牛荻涛,屈锋. 冻融环境下混凝土碳化深度预测模型[J]. 混凝土,2012(9):3-8. (YU Qi, NIU Ditao, QU Feng. Model for predicting carbonation depth of concrete in freezing-thawing circumstance [J]. Chinese Journal of Concrete,2012(9):3-8. (in Chinese))
- [59] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete [J]. Cement and Concrete Research,2008,38(6):877-883.
- [60] FRANCOIS R, MASO J C. Effect of damage in reinforced concrete on carbonation or chloride penetration [J]. Cement and Concrete Research,1988,18(6):961-970.
- [61] 施锦杰,孙伟. 弯曲荷载与氯盐耦合作用下混凝土中钢筋锈蚀程度评估[J]. 硅酸盐学报,2010,38(7):1201-1208. (SHI Jinjie, SUN Wei. Evaluation of steel corrosion in concrete under simultaneous flexural load and chloride attacks[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2010,38(7):1201-1208. (in Chinese))
- [62] 金伟良,王毅. 持续荷载与氯盐作用下钢筋混凝土梁力学性能试验[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(2):221-227. (JIN Weiliang, WANG Yi. Experimental study on mechanics behaviors of reinforced concrete beams under simultaneous chloride attacks and sustained load [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2014,48(2):221-227. (in Chinese))
- [63] 蒋金洋,孙伟,王晶,等. 弯曲疲劳荷载作用下结构混凝土抗氯离子扩散性能[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010,40(2):362-366. (JIANG Jinyang, SUN Wei, WANG Jing, et al. Resistance to chloride diffusion of structural concrete under bending fatigue load[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2010,40(2):362-366. (in Chinese))
- [64] 王阵地,姚燕,王玲. 冻融循环-氯盐侵蚀-荷载耦合作用下混凝土中钢筋的锈蚀行为[J]. 硅酸盐学报,2011,39(6):1022-1027. (WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Lin. Corrosion behavior of steel bar embedded in concrete subject to freeze-thaw cycles-chloride attack-flexural load [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2011,39(6):1022-1027. (in Chinese))
- [65] 王文龙,姜青山. 水工混凝土冻融破坏的机理研究[J]. 灌溉排水学报,2006,25(3):63-65. (WANG Wenlong, JIANG Qingshan. The mechanism and preventive treatments to avoid frozen dissolved damage in the hydraulic concrete [J]. Chinese Journal of Irrigation and Drainage,2006,25(3):63-65. (in Chinese))
- [66] SCHNEIDER U, CHEN S W. The chemomechanical effect and the mechanochemical effect on high-performance concrete subjected to stress corrosion [J]. Cement and Concrete Research,1998,28(4):509-522.
- [67] SCHNIEDER U, CHEN S W. Behavior of high-performance concrete (HPC) under ammonium nitrate solution and sustained load [J]. ACI Materials Journal, 1999,96(1):47-51.
- [68] ŽIVICA V, SZABO V. The behaviour of cement composite under compression load at sulphate attack [J]. Cement and Concrete Research,1994,24(8):1475-1484.
- [69] 陈拴发,李华平,李祖仲,等. 交变荷载对硫酸盐侵蚀混

- 凝土扩散系数影响的表征[J]. 中外公路, 2011, 31(5): 201-204. (CHEN Shuanfa, LI Huaping, LI Zuzhong, et al. Characterization of sulfate attack of concrete diffusion coefficient of alternating loads [J]. Journal of Foreign Highway, 2011, 31(5): 201-204. (in Chinese))
- [70] 余振新, 高建明, 宋鲁光, 等. 荷载-干湿交替-硫酸盐耦合作用下混凝土损伤过程[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(3): 487-491. (YU Zhenxin, GAO Jianming, SONG Luguang, et al. Damage process of concrete exposed to sulfate attack under drying-wetting cycles and loading [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(3): 487-491. (in Chinese))
- [71] BASSUONI M T, NEHDI M L. Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(3): 206-226.
- [72] GAO R, LI Q, ZHAO S, YANG X. Deterioration mechanisms of sulfate attack on concrete under alternate action[J]. Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 2010, 25(2): 355-359.
- [73] WANG Z, ZENG Q, WU Y, et al. Relative humidity and deterioration of concrete under freeze-thaw load [J]. Construction and Building Materials, 2014, 62: 18-27.
- [74] WANG Z, ZENG Q, WANG L, et al. Corrosion of rebar in concrete under cyclic freeze-thaw and chloride salt action [J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 40-47.
- [75] SUN W, ZHANG Y M, YAN H D, et al. Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(9): 1519-1523.
- [76] de SORTIS A, PAOLIANI P. Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring [J]. Engineering Structures, 2007, 29(1): 110-120.
- [77] CHENG L, ZHENG D. Two online dam safety monitoring models based on the process of extracting environmental effect [J]. Advances in Engineering Software, 2013, 57: 48-56.
- (收稿日期: 2015-06-16 编辑: 骆超)
- +++++
- (上接第 30 页)
- [6] 张学成, 可素娟, 潘启民, 等. 黄河冰盖厚度演变数学模型[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 203-205. (ZHANG Xuecheng, KE Sujuan, PAN Qimin, et al. Mathematical model of ice cover thickness evolution in the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 203-205. (in Chinese))
- [7] 冀鸿兰, 卞雪军, 徐晶. 黄河内蒙古段流凌预报可变模糊聚类循环迭代模型[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 14-17. (JI Honglan, BIAN Xuejun, XU Jing. Variable fuzzy clustering loop iteration model for ice-run forecast in Inner Mongolia Reach of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 14-17. (in Chinese))
- [8] 卞雪军, 冀鸿兰, 姜新华, 等. 黄河内蒙古段冰情预报系统的开发[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(4): 62-65. (BIAN Xuejun, JI Honglan, JIANG Xinhua, et al. Development and application analyze of forecasting system of ice conditions in Inner Mongolia Reach of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 62-65. (in Chinese))
- [9] 王祚, 李畅游, 冀鸿兰, 等. 基于 GIS 的黄河内蒙古段冰下河床三维可视化方法与应用[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 80-84. (WANG Zuo, LI Changyou, JI Honglan, et al. Three-dimensional visualization method and its application on riverbed under ice of Yellow River in Inner Mongolia based on geographic information system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 80-84. (in Chinese))
- [10] ABUDU Shalamu, CUI Chunliang, SAYDI Muattar, et al. Application of snowmelt runoff model (SRM) in mountainous watersheds: a review [J]. Water Science and Engineering. 2012, 5(2): 123-136.
- [11] 滕晖, 邓云, 黄奉斌, 等. 水库静水结冰过程及冰盖热力变化的模拟试验研究[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 720-726. (TENG Hui, DENG Yun, HUANG Fengbin, et al. Experimental study on the simulation of freezing processes in calm waters and thermal changes on reservoir ice cover [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 720-726. (in Chinese))
- [12] 李志军, 杨宇, 彭旭明, 等. 黑龙江红旗泡水库冰生长过程现场观测数据的剖析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 270-274. (LI Zhijun, YANG Yu, PENG Xuming, et al. The analysis of the field observation data of fresh ice growing Process in Hongqipao Reservoir of Heilongjiang [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(3): 270-274. (in Chinese))
- [13] 练继建, 赵新. 静动水冰厚生长消融全过程的辐射冰冻度-日法预测研究[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1261-1267. (LIAN Jijian, ZHAO Xin. Radiation degree-day method for predicting the development of ice cover thickness under the hydrostatic and non-hydrostatic conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1261-1267. (in Chinese))
- (收稿日期: 2015-09-23 编辑: 郑孝宇)