

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222032

盐冻循环对混凝土力学性能的影响及寿命预测

徐存东^{1,2,3}, 王海若¹, 陈家豪^{1,2}, 李 准^{1,2}, 徐 慧¹, 訾亚辉¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310018; 3. 河南省水工结构安全工程技术研究中心, 河南 郑州 450045)

摘要: 针对西北寒旱灌区混凝土结构因遭受盐离子侵蚀与冻融耦合作用导致耐久性快速劣化及服役可靠性降低的问题, 基于室内快速冻融试验, 研究以清水、3% NaCl 溶液、5% Na₂SO₄ 溶液为介质在冻融过程中的力学性能变化, 同时建立冻融损伤模型分析了3种不同冻融介质下混凝土试块相对动弹性模量的损伤度, 并采用威布尔寿命预测模型预测试块寿命。研究表明, 3种不同冻融介质中的混凝土试块, 其质量损失、抗压强度及动弹性模量的损伤度大小为3% NaCl > 5% Na₂SO₄ > 清水; 根据威布尔寿命预测模型得到拟合参数 b 、 C 的值且相关系数 R^2 均在 0.9 以上, 模型寿命预测结果与不同工况下混凝土试块力学性能试验结果相一致, 3种冻融介质下混凝土质量损失、抗压强度及动弹性模量寿命预测表现为清水 > 5% Na₂SO₄ > 3% NaCl。可见, 在冻融侵蚀环境下, SO₄²⁻ 侵蚀比 Cl⁻ 侵蚀程度大, 清水侵蚀程度最小, 研究成果可为寒旱灌区混凝土力学性能特征研究及后期维护提供理论依据。

关键词: 盐冻; 混凝土; 力学性能; 威布尔模型; 寿命预测

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0134-05

1 引言

在我国西北寒旱灌区, 服役建筑物受特殊的气候条件和盐离子侵蚀等环境因素影响, 建筑物结构的力学性能和耐久性能均会遭受不同程度的加速损伤与破坏^[1]。特别是在冬季反复冻融作用下, 混凝土建筑物表面易出现冻融破坏和表面裂缝, 盐离子通过这些损伤裂缝进入到混凝土内部并发生二次化学反应, 进一步加剧结构损伤, 从而造成混凝土结构的快速损伤破坏。为探究混凝土在不同冻融介质下的耐久性能, 针对混凝土在不同服役环境下的力学性能变化的研究成果已较丰富, 但现有研究大多基于室内试验, 由于试验条件限制, 所得结果也具有一定差异, 有必要对比分析这些结构的时序连续性和系统性, 以评价混凝土结构在复杂条件的服役状态, 并预测其服役年限。鉴此, 本文以清水、3% NaCl 溶液、5% Na₂SO₄ 溶

液作为试验介质, 通过室内快速冻融试验, 分析混凝土试件在盐冻复合作用下试块的质量损失、相对动弹性模量和抗压强度等性能指标的劣化规律; 基于损伤力学理论分析, 构建结构相对动弹性模量损伤程度评估模型, 分析了3种不同冻融介质条件下的混凝土损伤程度; 建立威布尔寿命预测模型, 耦合预测分析不同介质冻融下的混凝土材料性能劣化与结构寿命退化过程。研究结果可为寒旱灌区混凝土力学性能特征分析及后期维护提供参考。

2 试验方案

2.1 试验原材料与混凝土配合比

本次试验选用标号为 P. O42.5 的水泥, 物理参数和各项性能指标见表 1。粗骨料是粒径大小为 5~25 mm 的碎石; 细骨料选用天然砂, 细度模数为 2.74; 清水选用郑州市自来水, pH 值为 6.5。

收稿日期: 2022-09-28, **修回日期:** 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579102); 河南省高校科技创新团队支持计划(19IRTSTHN030); 中原科技创新领军人才支持计划(204200510048); 河南省科技攻关项目(212102310273); 河南省高等学校重点科研项目计划(20A570006); 浙江省重点研发计划(2021C03019)

作者简介: 徐存东(1972-), 男, 博士、教授, 研究方向为水工结构优化设计和耐久性, E-mail: xcundong@126.com

表 1 P. O42. 5 水泥强度指标

Tab. 1 P. O42. 5 cement strength index





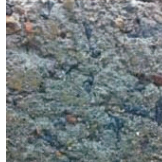
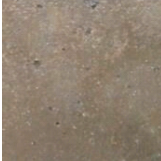


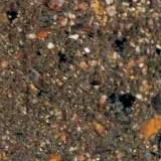






| 龄期 /d | 抗压强度/MPa | | 抗折强度/MPa | |
|----------|----------|------|----------|-----|
| | 标准值 | 实测值 | 标准值 | 实测值 |
| 3 | ≥17.0 | 26.2 | ≥3.5 | 5.6 |
| 28 | ≥42.5 | 45.7 | ≥6.5 | 7.9 |

2.2 试验方法

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB 50082-2009) ASTM 快速冻融法^[2],设置混凝土试块尺寸(长×宽×高)分别为 100 mm×100 mm×400 mm(测动弹性模量及质量损失)、100 mm×100 mm×100 mm(测抗压强度)。在整个冻融循环试验过程中温度控制在-10~5℃,每 4 h 为一个冻融周期,间隔 25 次测混凝土试块的抗压强度、质量损失和动弹性模量,试验数据均取平均值。冻融循环超过 300 次、质量损失率大于 5%、相对动弹性模量低于 60%,

表 3 不同冻融介质混凝土材料表观损伤变化

Tab. 3 The apparent damage changes of concrete materials of different freeze-thaw media

| 冻融介质 | 冻融 0 次 | 冻融 50 次 | 冻融 100 次 | 冻融 150 次 | 冻融 200 次 |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 清水 |  |  |  |  |  |
| 5%Na ₂ SO ₄ |  |  |  |  |  |
| 3%NaCl |  |  |  |  |  |

在 5%Na₂SO₄ 溶液工况下,冻融 50 次后,试块表面的胶凝材料开始出现少量大小不均的侵蚀孔洞,随着冻融循环试验持续进行,混凝土试件表层胶凝材料逐渐大部分裸露在外,试块表面侵蚀孔洞逐渐增大,能看到细骨料剥落流失,隐约能看到少量粗骨料。

在 3%NaCl 溶液工况下,冻融循环 50 次后,混凝土试块表面开始出现胶凝材料大量剥落,能看到较多细骨料;当试验进行到 100 次时,试块内部的粗骨料逐渐显露;次数超过 150 次时,越来越多的粗骨料裸露出来,可认为达到侵蚀破坏。即从相同冻融次数不同侵蚀介质下混凝土试块表观现象可以看出,混凝土试块在 3 种不同工况下的侵蚀破坏程度为清水<5%Na₂SO₄<3%NaCl。

其中任何一个条件满足时,试验停止;混凝土试块的配合比见表 2。

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Concrete mix ratio

| 编号 | 水胶比 | 水泥 /(kg·m ⁻³) | 水 /(kg·m ⁻³) | 细骨料 /(kg·m ⁻³) | 粗骨料 /(kg·m ⁻³) |
|----|------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| A1 | 0.40 | 365 | 188 | 662 | 1 182 |
| A2 | 0.45 | 323 | 188 | 622 | 1 208 |
| A3 | 0.50 | 278 | 188 | 622 | 1 236 |

3 试验结果与分析

3.1 冻融作用下混凝土材料表观变化

如表 3 所示,在冻融循环前,混凝土试块表面无侵蚀现象。在清水工况下,100 次冻融循环后,混凝土试件表面材料仅出现轻微掉落现象;当达到 200 次冻融循环时,试块细骨料开始掉落,部分内部粗骨料裸露在外面。

3.2 质量损失分析

如图 1(a)所示,在冻融循环 100 次之前,不同冻融工况下试块质量损失不明显,其中 3%NaCl 溶液工况下的质量损失最高,5%Na₂SO₄ 溶液中混凝土质量在前 50 个循环内还有所增加,原因在于试验初始阶段硫酸根晶体在混凝土试块表面吸附;当冻融循环 100 次后,3%NaCl、5%Na₂SO₄、清水中的混凝土试块质量损失明显增加,其中 3%NaCl 溶液工况下的混凝土试块质量损失最大,主要是因为在水压和渗透压作用下,盐水渗透到混凝土表层,砂浆脱落,粗骨料外露,且混凝土内部裂缝增大,内部冻胀破坏力逐渐增大,从而导致混凝土质量损失增加,加速混凝土解体;清水溶液冻融下试块质量损失最慢,原因是清水

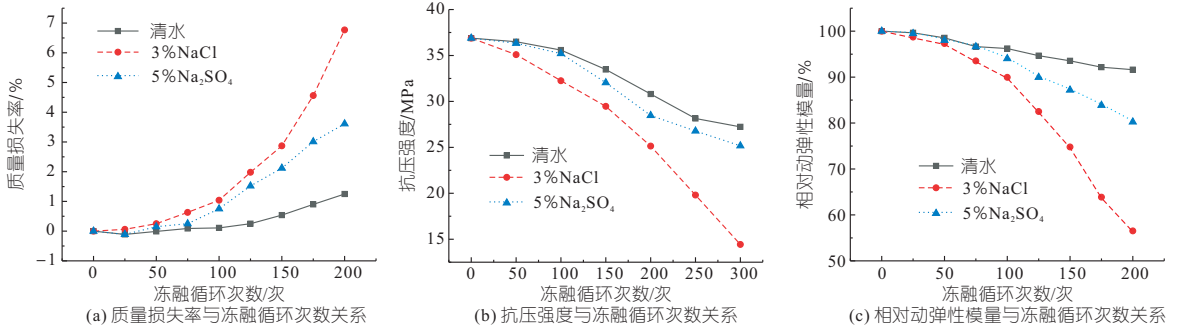


图 1 质量损失率、抗压强度、相对动弹性模量与冻融循环次数关系

Fig. 1 Relationship between the mass loss rate, compressive strength, relative dynamic elastic modulus and the number of freeze-thaw cycles

溶液中仅有水压,对混凝土破坏较轻;5%Na₂SO₄溶液冻融介质下试块的质量损失介于两者之间。随着冻融循环不断进行,3%NaCl溶液冻融介质下的混凝土试块质量损失逐渐增大;当冻融循环超过200次后,3%NaCl冻融介质中的混凝土试块质量损失率超过5%,此时结束试验。

3.3 抗压强度分析

由图1(b)可知,随着冻融循环次数的增加,清水、3%NaCl、5%Na₂SO₄3种冻融介质下的混凝土试块的抗压强度均呈不断减小趋势。超过100次后,3%NaCl溶液冻融工况下混凝土试件下降比较迅速,主要原因是盐离子进入混凝土内部,孔隙率不断变大,并与外界溶液形成渗透压,导致混凝土内部结构损伤加剧,抗压强度下降;冻融循环150次时,清水介质中混凝土试块抗压强度从最初的37.6MPa下降到33.8MPa,损失10.1%,5%Na₂SO₄冻融介质中混凝土试块抗压强度从37.6MPa下降到31.2MPa,损失17.02%,3%NaCl溶液中的混凝土抗压强度从37.6MPa降至29.3MPa,损失22.07%;冻融循环300次时,3%NaCl溶液中试件抗压强度下降率达到清水中的2.7倍、5%Na₂SO₄溶液中的2.1倍,说明清水工况下混凝土试块抗压强度下降最慢,5%Na₂SO₄溶液的次之,3%NaCl溶液中混凝土试块抗压强度下降最快。混凝土试块在3种不同工况下抗压强度的衰减速率为3%NaCl>5%Na₂SO₄>清水。

3.4 相对动弹性模量分析

由图1(c)可知,在冻融循环前期,清水、5%Na₂SO₄冻融介质下的混凝土试块相对动弹性模量下降程度不明显,且趋势基本相同;当冻融次数大于150次后,3%NaCl溶液中的混凝土试块动弹性模量开始快速下降,5%Na₂SO₄溶液中试块的动弹性模量下降速度慢于3%NaCl溶液,但快于清水中的值,且3%NaCl溶液中相对动弹性模

量衰减速率逐渐增大,这是因为在盐冻过程中,盐离子会从混凝土缝隙中掺入,在冻融过程中降低了水的冰点,当盐冻次数不断增加,混凝土骨料间的粘结力减弱,混凝土内部密实度下降,后期更容易损伤,因此加速混凝土相对动弹性模量下降;当冻融次数超过200次后,3%NaCl溶液中混凝土试块的相对弹性模量小于60%,清水、5%Na₂SO₄溶液中试块的相对弹性模量一直保持在80%以上。故混凝土试块在3种不同溶液冻融循环下相对动弹性模量衰减速率为清水<5%Na₂SO₄<3%NaCl。

4 混凝土损伤模型建立及寿命预测

4.1 损伤模型建立

建立损伤模型可有效预测混凝土破坏程度。损伤度D的表达式为:

$$D = 1 - E_t/E_0 \tag{1}$$

式中, E_t 为剩余动弹性模量; E_0 为初始动弹性模量。

令相对动弹性模量 $E_r = E_t/E_0$, 则有:

$$E_r = c + aN + bN^2 \tag{2}$$

式中, a 、 b 、 c 均为参数; N 为冻融循环次数。

当循环次数 $N=0$ 时, 初始动弹性模量也即 $E_r=1$, $c=1$, 代入式(2)可得:

$$E_r = 100 + aN + bN^2 \tag{3}$$

4.2 损伤结果分析

通过对不同复合盐溶液侵蚀—冻融循环作用下混凝土相对动弹性模量数据进行非线性回归拟合, 可得到3种不同冻融介质影响因素变量条件下对应的参数 a 、 b 值, 根据抛物线损伤演化方程拟合出的参数, 得到清水、3%NaCl、5%Na₂SO₄3种介质下冻融损伤演化方程及相关系数 R^2 均大于0.9904, 模型精度较高, 能够反映出相对动弹性模量与冻融循环次数之间的关系, 具体数值见表4。

表 4 方程拟合参数

Tab. 4 Equation fitting parameters

| 类别 | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>R</i> ² |
|-----------------------------------|----------|----------|-----------------------|
| 清水 | 0.026 1 | -0.001 8 | 0.994 1 |
| 3%NaCl | -0.067 3 | -0.002 2 | 0.996 7 |
| 5%Na ₂ SO ₄ | -0.039 4 | -0.002 3 | 0.990 4 |

由冻融损伤理论值与实际值拟合曲线(图 2)可知,冻融循环前期清水工况下的混凝土表现出优于 3%NaCl、5%Na₂SO₄ 冻融介质中混凝土的抗冻性,清水溶液中冻融损伤曲线上升斜率也明显低于 3%NaCl、5%Na₂SO₄ 溶液中冻融损伤曲线上升斜率,在整个冻融循环过程中,3%NaCl 介质中混凝土冻融损伤度均大于相同循环次数下清水和 5%Na₂SO₄ 溶液损伤度,与试验结果相符,同一冻融循环次数 3 种不同工况下混凝土试块侵蚀破坏程度为 3%NaCl>5%Na₂SO₄>清水。

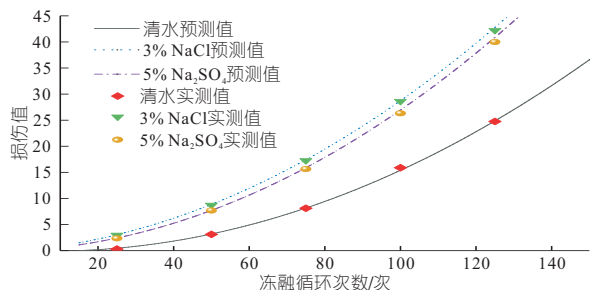


图 2 混凝土损伤度理论值和实际值拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of the theoretical values and practical values of the concrete damage degree

4.3 威布尔寿命预测模型

威布尔可靠性函数 $R(n)$ 为:

$$R(n) = 1 - F(n) = \exp[-(n/p)^q] = 1 - D(n) \quad (4)$$

式中, $F(n)$ 为混凝土材料耐久性寿命分布函数; n 为混凝土冻融循环次数; p 、 q 分别为混凝土材料耐久性寿命的尺度参数、形状参数; $D(n)$ 为混凝土损伤度。

令 $Y = \ln\{\ln[1/R(n)]\}$, $X = \ln n$, $C = -b \ln p$, 则式(4)可变化为:

$$Y = Y(X) = qX + C \quad (5)$$

混凝土结构的使用寿命 t 为:

$$t = eN/M \quad (6)$$

式中, e 为冻融比例系数,一般取 12; N 为混凝土室内冻融循环次数; M 为混凝土结构在实际环境中一年经历的冻融次数。

4.4 模型结果分析

将不同冻融介质和添加剂条件下的混凝土试块进行相关性分析,并用 origin 对试验结果进行拟合,可得到威布尔参数 q 、 C 的具体值,拟合值 R^2 均在 0.9 以上,说明模拟结果良好(图 3)。当

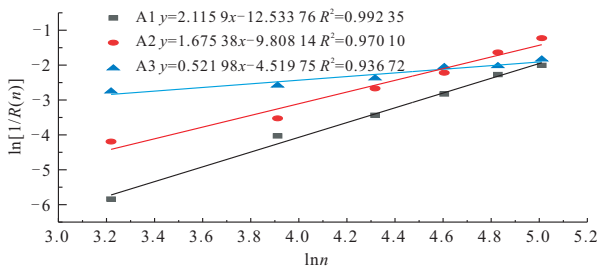


图 3 不同冻融介质下混凝土耐久性回归直线图

Fig. 3 Line diagram of concrete durability regression under different freeze-thaw media

动弹性模量达到初始值的 60% 时,认为混凝土已经失效,将 $R(n)=0.6$ 代入寿命预测回归直线方程,可求出不同冻融介质下混凝土室内冻融循环次数 N ,然后通过式(6)及模拟曲线可预测出清水、3%NaCl 溶液、5%Na₂SO₄ 溶液下混凝土试块的寿命,即不同工况下混凝土损伤程度为清水<5%Na₂SO₄<3%NaCl。

基于所得冻融条件下混凝土材料的威布尔寿命预测模型,结合室内冻融循环次数之间的关系,可得盐冻融循环作用下混凝土试块的预测使用寿命年限,具体数值见表 5。选用相对弹性模量作为混凝土试块损伤失效的评判指标,模型预测结果显示,在 3 种冻融介质下,清水组混凝土试块预测寿命最长,5%Na₂SO₄ 溶液中试块预测寿命次之,3%NaCl 溶液中试块预测寿命最短,模型预测结果与试验结果较吻合,预测方法可靠性较好。

表 5 使用寿命预测值

Tab. 5 Service life forecast values

| 冻融介质 | 编号 | 快速冻融次数/次 | 使用寿命 |
|-----------------------------------|----|----------|------|
| 清水 | A1 | 1 475 | 150 |
| | A2 | 758 | 78 |
| | A3 | 390 | 40 |
| 3%NaCl | A2 | 273 | 28 |
| 5%Na ₂ SO ₄ | A2 | 234 | 24 |

5 结论

a. 随着冻融次数的增加,混凝土试块抗压强度、相对动弹性模量不断下降,下降速率与冻融次数、冻融介质有关,在整个冻融循环过程中,3%NaCl 溶液中混凝土试块质量损失率最先达到 5%,相对动弹性模量最早低于 60%,混凝土试块在 3%NaCl 溶液中的损伤程度最高可达清水中的 2.7 倍、5%Na₂SO₄ 溶液的 1.9 倍。混凝土试块在 3 种不同工况下冻融循环后的损伤程度为清水<5%Na₂SO₄<3%NaCl。

b. 以相对动弹性模量作为评价指标建立二次抛物线损伤模型,在 3 种不同冻融介质下混凝土试块损伤值均随着冻融循环次数的增加呈增长

趋势,且不同冻融介质下损伤值大小为 3%NaCl>5%Na₂SO₄>清水。

c. 建立威布尔寿命预测模型,预测分析 3 种介质下混凝土寿命,其中清水组混凝土预测寿命远大于 3%NaCl 溶液和 5%Na₂SO₄ 溶液中混凝土预测寿命,寿命预测模型较合理。

Influence of Salt Freezing Cycle on Mechanical Properties of Concrete and Its Life Prediction

XU Cun-dong^{1,2,3}, WANG Hai-ruo¹, CHEN Jia-hao^{1,2}, LI Zhun^{1,2}, XU Hui¹, ZI Ya-hui¹

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Hydropower, Zhengzhou 450046, China; 2. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China; 3. Henan Provincial Hydraulic Structure Safety Engineering Research Center, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In view of the problem of rapid durability deterioration and the service reliability reduction of concrete structure caused by saline ions erosion and freeze-thaw coupling in cold and drought irrigation area in northwest China, based on the rapid indoor freeze-thaw test, mechanical property change of clean water, 3%NaCl solution, 5%Na₂SO₄ solution was studied in the process of freeze-thaw. The freeze-thaw damage model was established to analyze the damage degree of relative dynamic elastic modulus of concrete block for three kinds of freeze-thaw mediums. The Weibull life prediction model was used to predict the life of test specimen. The results show that the mass loss, compressive strength and dynamic elastic modulus of the concrete mass damage sizes are 3%NaCl>5%Na₂SO₄>clean water; According to Weibull life prediction model, the fitting parameters *b* and *C* were obtained, and the correlation coefficient *R*² is above 0.9; The prediction results of model life are consistent with the mechanical performance test results at different operating conditions; The mass loss, compressive strength and dynamic elastic modulus life prediction of concrete under three freeze-thaw mediums are clear water>5%Na₂SO₄>3%NaCl. It can be seen that in the environment of freezing-melting and thawing erosion, SO₄²⁻ erosion degree is greater than Cl⁻ erosion, and the clean water erosion degree is minimal. The research results can provide a theoretical basis for the mechanical performance characteristics research and later maintenance of concrete in cold and drought irrigation areas.

Key words: salt freeze; concrete; mechanical properties; Weibull model; life prediction

(上接第 54 页)

参考文献:

[1] 梁雅莉,秦科源,郁娇山,等. 计及小水电的配电网电压调节策略研究[J]. 中国农村水利水电,2019(5):184-187,190.

[2] 杨亚铃,刘金涛,杨爽,等. 基于物理相似法的山丘

参考文献:

[1] 孙刚锋,缙彦强. 冻融循环及硫酸盐侵蚀对混凝土耐久性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):140-144.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T50082-2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

区流域水文分类及模型参数移用方法[J]. 水电能源科学,2022,40(4):23-27.

[3] 李赫,赵燕,米玛次仁,等. 西江上游水库群联合蓄水优化调度研究[J]. 水电能源科学,2020,38(6):30-33,79.

Reservoir Operation Based on Runoff Forecast Considering Output Characteristics of Regional Small Hydropower

SONG Xing-rong¹, ZHANG Hong-qiang^{1,2}, TIAN Hai-ping^{1,2}, LONG Yuan-nan³, SONG Xin-yi³, TANG Ying³

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Changsha 410007, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Efficient & Clean Generation Technology, Changsha 410007, China; 3. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: As an important part of rural energy, small hydropower plays an important role in driving rural economic development and promoting energy saving and emissions reduction. However, there is a lack of scientific guidance in the process of optimal operation of small hydropower stations in most areas. This paper takes the Mengdong River basin as an example to establish a cascade optimal operation model of small hydropower stations based on runoff simulation. The Xinanjiang (XAJ) model is combined with Manning's formula to establish a semi-distributed hydrological model for simulating the influence of reservoir operation on runoff. The successive approximation dynamic programming method is used to achieve optimal operation by considering the actual operating characteristics of small hydropower stations. The results demonstrate that the semi-distributed hydrological model has a good performance in the river basin. The changing pattern of simulated and measured runoff processes is basically consistent, and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and coefficient of determination between the measured and simulated series are 0.86. The optimal operation model can reduce the spillage water effectively, which improves the utilization efficiency of water energy. Meanwhile, the optimal operation can match the actual intra-day features of small hydropower, indicating its feasibility in applications.

Key words: small hydropower; semi-distributed hydrological model; optimal operation; operating characteristics