

# 气候变化对中原地区桥梁碳化寿命影响研究

赵娟, 李倍

(上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418)

**摘要:** 针对气候变化背景下的混凝土碳化问题,以郑少高速南水北调大桥辅线桥为研究对象,依据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新研究报告,建立郑州地区在高、低两种碳排放情景下气候边界模型.基于该模型研究了温度、大气湿度以及二氧化碳浓度在未来 100 年间的发展规律,以此来预测辅线桥主梁和桥墩的碳化寿命,最后通过与恒定气候参数下的碳化寿命计算结果进行对比.结果表明:气候变化将在一定程度上影响中原地区桥梁碳化进程,高排放情景下主梁和桥墩的碳化寿命较之于低排放情景将缩短 13% 左右.

**关键词:** 气候变化;桥梁;混凝土;碳化;边界模型

**中图分类号:** TU528.1

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.021

## 0 引言

桥梁工程一直是国家重要的基础建设工程,而钢筋腐蚀是导致混凝土桥梁性能劣化的主要根源之一.在一般内陆环境下,钢筋腐蚀主要由混凝土碳化引起,混凝土碳化进程不仅与混凝土原材料、施工因素有关,很大程度上受气候环境条件的影响.

混凝土碳化耐久性一直是研究热点,然而在气候变化日趋显著的背景下,针对气候变化可能给混凝土耐久性带来的影响的研究较少<sup>[1]</sup>.Yoon<sup>[2]</sup>第一次考虑了气候变化对混凝土碳化的影响,建立了 CO<sub>2</sub> 浓度变化的碳化模型,但并未将显著影响混凝土碳化系数的温湿度因素考虑在内.Talukdar 等人<sup>[3]</sup>依据 IPCC 气候研究报告预测了不同碳排放模式下加拿大混凝土结构物的碳化深度,但其假设环境相对湿度是恒定不变的.Has-san<sup>[4]</sup>以月平均温度及相对湿度代表实际气候条件,研究表明:在混凝土耐久性评估中考虑实际气候条件非常重要.

笔者以实际工程郑少高速南水北调大桥辅线桥为依托,根据最新 IPCC 气候研究报告对 21 世纪全球气候变化的预测,模拟郑州地区 21 世纪气候条件发展趋势并建立随时间变化的混凝土碳化气

候边界模型,采用文献[5]建议的碳化模型预测出该桥梁主梁及桥墩的碳化寿命,分析探讨气候变化给我国中原地区桥梁碳化寿命产生的影响.

## 1 中原地区气候预测模型

郑州市地处华中地区,是我国中部重要城市,中原经济区核心,交通发达,地理位置重要.辅线桥连接郑州市航海路和郑少高速公路,是郑州市西南方向的出口,于 2013 年建成通车.就气候条件而言,郑州市位于大陆性暖温带,具备典型的中原地区气候特点,四季分明,冷暖适中,依据近十年郑州市气候记录数据,其年平均气温 15.4℃,相对湿度 67%.

### 1.1 温度模型

最新发布的 IPCC 第五次评估报告<sup>[6]</sup>从多方面进一步证实和支持了全球气候变暖这一毋庸置疑的结论.报告针对未来社会经济发展、能源改善状况等因素提出了 4 种具有代表性的气候排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)及其对 21 世纪全球气候的影响规律.其中 RCP8.5 和 RCP2.6 分别代表高、低排放情景;RCP4.5 和 RCP6.0 介于两者之间.研究表明,郑州地区年平均气温变化与全球气温变化趋势一致,即总体呈上升趋势,年平均最高气温及最低气温均有所上

收稿日期:2016-06-19;修订日期:2016-09-01

基金项目:上海市教委创新项目(14YZ142);国家自然科学基金资助项目(51408361)

作者简介:赵娟(1977—),女,河南开封人,上海应用技术大学副教授,博士,主要从事混凝土耐久性研究,E-mail:zhaojuan\_sit@163.com.

升.图 1 为基于 RCP2.6 和 RCP8.5 两种排放情景下郑州市 21 世纪气温发展曲线.从图中可以看出,在最环保的 RCP2.6 排放情景下,气温上升幅度平缓,到本世纪末气温比世纪初上升 1.2℃左右;在高排放情景下,气温上升较明显,到世纪末将会有接近 4℃的温度增幅,两种情景都不同程度地区别于本世纪初的温度平均水平.

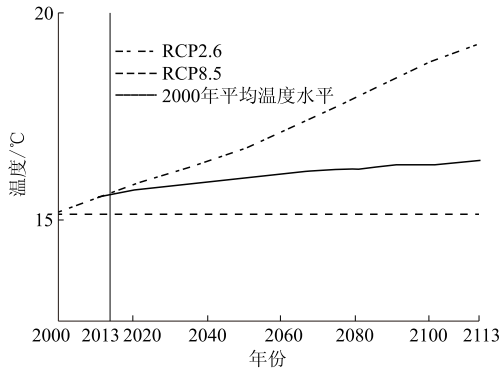


图 1 21 世纪郑州市年平均温度发展曲线  
Fig.1 The average temperature development curve of zhengzhou in the 21st century

依据郑州市 21 世纪年均温度的发展曲线,针对辅线桥的服役周期,建立该区域 2013~2113 年 100 年间的温度边界模型,见式(1).

RCP2.6 情景:

$$T(t)=4.44\text{E-}07t^3-1.39\text{E-}04t^2+0.02t+15.53. \tag{1a}$$

RCP85 情景:

$$T(t)=6.51\text{E-}07t^3+2.40\text{E-}05t^2+0.03t+15.54. \tag{1b}$$

式中: $T(t)$ 为年平均温度; $t$ 为时间.

1.2 湿度模型

环境相对湿度对混凝土碳化速率同样有显著影响<sup>[7]</sup>.相对湿度较高或较低,会使碳化速率变慢,环境相对湿度在 50%~70%时,混凝土碳化速率最快.目前,科研人员尚未对气候变化引起的 21 世纪一百年间环境相对湿度发展趋势达成共识,Vuille 等<sup>[8]</sup>预测环境相对湿度将会以每 10 年 0%至 2.5%的速度上升.而文献<sup>[9]</sup>通过分析加拿大历年相对湿度变化发现,1950~2000 年全国平均相对湿度下降了 6%,由此可见,环境相对湿度在不同区域呈现不同的变化规律.

陈彬彬<sup>[10]</sup>通过分析河南省 1960~2004 年相对湿度的变化特征及蒸发量的变化特征指出:河南全省 45 年间平均相对湿度呈上升趋势,以 0.417%/10a 的速率递增,且进入本世纪初后,增

湿趋势明显.从全省分布来看,相对湿度减少的区域主要集中在南部及西北部地区,郑州市位于河南省中部,中部和东部地区增湿显著,相对湿度增加的中心值 45 年来达到了 5%~6%.

基于上述研究,假设郑州市年均相对湿度线性增长,以 2013 年相对湿度均值为基础,建立该区域 2013~2113 年相对湿度边界模型如下:

$$RH(t)=0.0417\%t+66\%. \tag{2}$$

式中: $RH(t)$ 为年平均相对湿度,%; $t$ 为时间,a.

1.3 CO<sub>2</sub> 浓度模型

IPCC 第五次评估报告给出了 4 种气候排放情景下 21 世纪全球 CO<sub>2</sub> 浓度的发展趋势,报告预测全球 CO<sub>2</sub> 浓度将从 2000 年的 725 增加到 2100 年的 1 838,并极可能会达到 1 964.图 2 为基于报告数据模拟的高低两种排放情景下 21 世纪全球 CO<sub>2</sub> 浓度发展曲线.在最好的低排放情景下,由于能源结构调整,温室气体排放减少,清洁高效资源技术的采用等有利因素下,全球 CO<sub>2</sub> 浓度将在 2060 年达到峰值后缓慢下降;在高排放情景下,全球 CO<sub>2</sub> 浓度上升趋势明显,到本世纪末的 CO<sub>2</sub> 浓度将是世纪初的 2.5 倍.

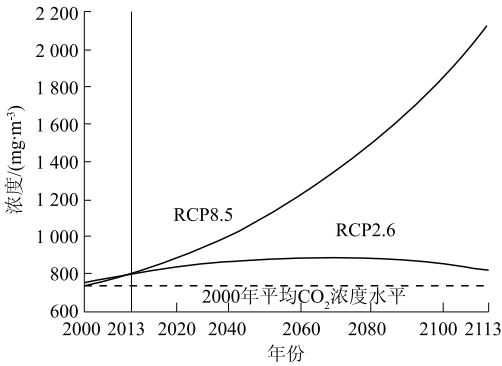


图 2 21 世纪全球 CO<sub>2</sub> 浓度发展趋势  
Fig.2 Global CO<sub>2</sub> concentration trends in the 21 century

此外,环境 CO<sub>2</sub> 浓度受场地及周边环境的影响显著,停车场、公路路面等地 CO<sub>2</sub> 浓度一般较高,市区 CO<sub>2</sub> 浓度高于郊区,因此引入修正系数  $k_{\text{site}}$ <sup>[11]</sup>来体现其之间的差异:

$$k_{\text{site}}=\frac{\text{具体区域 CO}_2\text{浓度值}}{\text{同时期全球 CO}_2\text{浓度基准值}}. \tag{3}$$

表 1 为国内外根据城市、郊区和农村地区 CO<sub>2</sub> 浓度记录计算出的三类地区  $k_{\text{site}}$  的统计值.对于城市高速桥梁来说,其主要桥面因长期受到汽车尾气排放的不利影响,碳化威胁及程度是大于桥墩的,因此结合实际情况,此处主梁  $k_{\text{site}}$  取 1.10,桥墩  $k_{\text{site}}$  取 1.07.

表 1  $k_{\text{site}}$  统计数据<sup>[11]</sup>  
Tab.1 Statistical parameters for  $k_{\text{site}}$

地点	样本大小	平均值
全球平均值测点	—	1.00
农村	3	1.05
郊区	5	1.07
城市	8	1.14

基于全球 CO<sub>2</sub> 浓度变化值,建立高低两种排放情景下适用于碳化预测模型的 CO<sub>2</sub> 浓度边界条件,时间为 2013~2113 年,见式(4)~(5)。

$$C_{\text{CO}_2}(t) = k_{\text{site}} \cdot \varphi_{\text{CO}_2}(t).$$
 (4)

RCP2.6 情景:

$$\varphi_{\text{CO}_2}(t) = 6.05\text{E-}04t^3 - 0.1t^2 + 4.93t + 803.4.$$
 (5a)

RCP8.5 情景:

$$\varphi_{\text{CO}_2}(t) = 18.9\text{E-}05t^3 + 0.06t^2 + 5.01t + 802.4.$$
 (5b)

式中: $C_{\text{CO}_2}(t)$  为 CO<sub>2</sub> 浓度,mg/m<sup>3</sup>;  $k_{\text{site}}$  为修正系数;  $\varphi_{\text{CO}_2}(t)$  为全球平均 CO<sub>2</sub> 浓度,mg/m<sup>3</sup>;  $t$  为时间,a。

2 案例计算

郑少高速南水北调大桥辅线桥位于郑州市航海路连接线与南水北调总干渠相交处,为大跨径预应力混凝土连续-刚构组合桥梁,全长 310.2 m,设计基准期为 100 a,于 2013 年建成通车。辅线桥主梁采用 C55 高性能混凝土,保护层厚度为 30 mm,桥墩采用 C40 混凝土,保护层厚度为 45 mm。

文献[5]提出混凝土保护层厚度、碳化残量 and 碳化速度表示的混凝土碳化模型如下:

表 2 混凝土碳化残量平均值/标准差

Tab.2 Average values and standard deviation of concrete carbonation residual values							mm
服役时间 $t/a$	文献[12]		RCP2.6 情景		RCP8.5 情景		
	主梁碳化残量	桥墩碳化残量	主梁碳化残量	桥墩碳化残量	主梁碳化残量	桥墩碳化残量	
25	22.5/2.0	29.2/3.0	22.5/2.0	29.2/3.0	22.5/2.0	29.2/3.0	
30	22.5/2.0	29.2/3.0	22.5/2.0	29.2/3.0	22.5/2.0	29.2/3.0	
35	22.5/2.0	29.2/3.0	22.8/2.0	29.6/3.0	22.8/2.0	29.6/3.0	
40	22.5/2.0	29.2/3.0	22.8/2.0	29.6/3.0	22.8/2.0	29.6/3.0	

表 3 混凝土碳化深度平均值/标准差

Tab.3 Average values and standard deviation of concrete carbonation depth values							mm
服役时间 $t/a$	文献[12]		RCP2.6 情景		RCP8.5 情景		
	主梁碳化深度	桥墩碳化深度	主梁碳化深度	桥墩碳化深度	主梁碳化深度	桥墩碳化深度	
25	3.8/2.0	8.7/3.8	3.5/1.9	7.9/3.5	3.8/2.0	8.4/3.7	
30	4.2/2.2	9.5/4.1	3.9/2.1	8.6/3.8	4.2/2.3	9.4/4.1	
35	4.5/2.4	10.3/4.5	4.2/2.2	9.1/4.0	4.6/2.5	10.3/4.5	
40	4.8/2.6	11.0/4.8	4.4/2.3	9.7/4.3	5.1/2.7	11.3/5.0	

$$\Omega_c = \{c - x_0 - X(t) \geq 0\}.$$
 (6)

式中: $\Omega_c$  为混凝土碳化寿命预测模型; $c$  为混凝土保护层厚度,mm;  $x_0$  为碳化残量,mm;  $X(t)$  为混凝土碳化深度,mm。

当碳化残量与碳化深度之和大于混凝土保护层厚度时即认为混凝土已达到碳化寿命。

文献[5]将徐善华模型<sup>[12]</sup>和牛荻涛模型<sup>[13]</sup>分别用于计算辅线桥主梁和桥墩的碳化残量及碳化深度的均值和方差并代入式(6)的碳化模型。结果表明:辅线桥主梁和桥墩将分别在服役 28 a 及 30 a 后碳化寿命结束,即钢筋开始腐蚀。

在文献[5]的研究计算过程中,碳化模型中的气候参数(温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度)均取郑州地区的气候平均值。但根据前文所述,气候条件将在未来几十年发生较大幅度的变化,影响混凝土桥梁碳化进程,故笔者采用模拟真实气候条件参数的数值模型计算桥梁碳化寿命将更加符合实际情况,更具有参考价值。

表 2、表 3 为采用本文建立的气候模型替代气候均值计算的辅线桥主梁及桥墩碳化残量和碳化深度值以及文献[12]计算结果数值;表 4 为辅线桥主梁及桥墩最终碳化寿命。

结果表明:在考虑气候条件随时间变化的前提下,低排放情景下的辅线桥主梁及桥墩将分别在服役 31 a 和 36 a 后碳化寿命结束,钢筋开始腐蚀;而高排放情景下,主梁和桥墩的碳化寿命较之于低排放情景缩短 13%,可见气候变化将给我国中原地区桥梁碳化寿命带来一定程度的影响。

表 4 主梁及桥墩碳化寿命  
Tab.4 Carbonation life for beam and pier a

预测模型	主梁碳化寿命	桥墩碳化寿命
文献[12]	28	30
本文 RCP2.6	31	36
本文 RCP8.5	27	31

此外,RCP8.5 情景下计算结果和文献[5]计算结果几乎相同,本文气候模型中 RCP8.5 情景下的气候参数均是随时间变化的变量,温湿度取值均比文献[5]中的确定参数有所提高,导致两者的最终预测寿命相近的原因在于:文献[5]的碳化模型中 CO<sub>2</sub> 浓度影响系数  $k_{CO_2}$  取值偏大,统一选取了最不利取值 1.4,而在 CO<sub>2</sub> 浓度随时间增长较快的 RCP8.5 情景下, $k_{CO_2}$  值在前期仅为 1.33 左右,后期才达到或者超越 1.4,进而导致两种计算结果较为相近;然而对于 CO<sub>2</sub> 浓度增长较缓的 RCP2.6 情景, $k_{CO_2}$  值在整个计算过程中均未超过 1.3,致使最终碳化寿命比文献[8]的计算结果延缓了数年,从而进一步体现出本气候模型对不同气候发展情况的精确响应。

因此,在全球气候变化的大背景下,综合评估气候变化条件下的桥梁碳化寿命更为合理,文献[5]中的计算结果虽与气候政策中最不利 RCP8.5 情景计算结果相近,但用于评价环保型气候发展模式下的混凝土碳化寿命则过于保守。

3 结论

(1) 在气候变化大背景下,结合最新气候预测报告以及郑州市实际气候条件,建立了该市考虑未来气候发展的混凝土碳化边界模型. 该气候模型具有普适性,可以依据不同区域的实际气候条件建立不同区域气候边界模型,为研究该区域混凝土碳化进程提供边界条件。

(2) 以实际工程郑少高速南水北调大桥辅线桥为依托,应用笔者提出的考虑气候变化的气候边界模型计算其主梁及桥墩的碳化寿命,并与气候参数恒定条件下的计算结果进行对比,结果表明:气候变化将较大程度影响以辅线桥为代表的我国中原地区混凝土桥梁碳化进程,在不同的气候发展模型下,桥梁碳化寿命将有明显区别,因此为准确评估不同气候政策下混凝土桥梁碳化寿命,建议应用笔者提出的基于气候变化综合碳化边界模型。

参考文献:

[1] TALUKADR S, BANTHIA N, GRACE J R. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change-part 1; Experimental results and model development [J]. Cement & concrete composites, 2012(34):924-930.

[2] YOON I S, COPUROGLU O, PARK K B. Effect of global climate change on carbonation progress of concrete [J]. Atmos environ, 2007,41(34):7274-7285.

[3] TALUKADR S, BANTHIA N, GRACE J R, et al. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change-part 2; Canadian urban simulations [J]. Cement & concrete composites, 2012(34):931-935.

[4] HASSAN J E, BRESSOLETTE P, CHATEAUNEUF, et al. Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress [J]. Engineering structure, 2010,32(90):3279-3287.

[5] 江莹莹. 预应力混凝土桥梁剩余使用寿命预测[D]. 郑州:郑州大学土木工程学院,2014.

[6] IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report, climate change 2013:The physical science basis: summary for policymakers [R/OL]. [2013-10-28]. [http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5SPM\\_Approved27Sep2013.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5SPM_Approved27Sep2013.pdf).

[7] 闫宏生. 混凝土碳化因素敏感性研究[J]. 工业建筑, 2014,44(1):94-97.

[8] VUILLE M, BRADLEY R S, WERNER M, et al. 20th century climate change in the tropical Andes; observations and model results [J]. Climate change, 2003,59(1/2):75-99.

[9] WIJINGAARDEN W A, VINCENT L A. Examination of discontinuities in hourly surface relative humidity in Canada during 1953—2003 [J]. Geophys Res,2005, 110:D22102.

[10] 陈彬彬. 河南省气候变化及其与木本植物物候变化相互关系研究[D]. 南京:南京信息工程大学环境科学与工程学院,2007.

[11] 彭里政俐, MARK G S. 气候变化对中国钢筋混凝土基础设施碳化腐蚀及破坏风险的影响[J]. 土木工程学报,2014,47(10):61-69.

[12] 徐善华. 混凝土结构退化模型与耐久性评估[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院, 2003.

[13] 牛获涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学出版社, 2003.