中国工程建设标准化协会

《混凝土结构环境作用与区划标准》

Standard of environmental action and zonation for concrete structures

T/CECS XXX-2022

征求意见稿

主编单位：同济大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2022 年 XX 月 XX 日

前　言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发（2018 年第一批协会标准制订、修订计划）的通知》（建标协字[2018]015 号）的要求，同济大学会同有关单位经认真调查研究、总结实践经验、参考国内外有关标准，广泛征求行业内各方面的意见，制定本标准。

本标准共分 6 章，9 个附录。主要内容是：总则、术语与符号、环境类别、环境区划、环境作用代表值、环境作用效应。

本标准由中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会归口管理，由同济大学负责技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请寄送解释单位（地址：上海市四平路 1239 号土木工程学院建筑工程系，邮政编码：200092）。

本 标 准 主 编 单 位：　同济大学

本 标 准 参 编 单 位：　西安建筑科技大学
河南工业大学
浙江工业大学
中交四航工程研究院有限公司
中国二十冶集团有限公司
上海同瑞土木工程技术有限公司

本标准主要起草人员：　顾祥林　张伟平　姜　超（以下按姓氏笔划排序）
王　艳　刘西光　余倩倩
张庆章　范志宏　徐　宁
黄庆华　商登峰　蒋志律

本标准主要审查人员：

目　次

1　总　则.....1
2　术语与符号.....2
　2.1　术语.....2
　2.2　符号.....4
3　环境类别.....8
4　环境区划.....10
　4.1　一般规定.....10
　4.2　一般环境.....11
　4.3　冻融环境.....12
　4.4　海洋环境.....12
5　环境作用代表值.....14
　5.1　一般规定.....14
　5.2　一般环境.....15
　5.3　冻融环境.....17
　5.4　海洋环境.....18
　5.5　其他环境.....20
6　环境作用效应.....22
　6.1　一般规定.....22
　6.2　一般环境.....23
　6.3　冻融环境.....23
　6.4　海洋环境.....23
　6.5　其他环境.....24
附录 A 环境区划方法.....25
附录 B 一般环境区划图.....27
附录 C 冻融环境区划图.....28
附录 D 海洋环境区划图.....29
附录 E 一般环境作用代表值计算参数.....33
附录 F 海洋环境作用代表值.....41
附录 G 碳化深度计算模型.....44
附录 H 冻融损伤程度计算模型.....45
附录 J 临界氯离子含量侵蚀深度计算模型.....47
本标准用词、用语说明.....50
引用标准名录.....51
条文说明.....52

Contents

1 General Provisions ····· 1
2 Terms and Symbols ····· 2
2.1 Terms ····· 2
2.2 Symbols ····· 4
3 Classification of Environments ····· 8
4 Zonations of Enviroments ····· 10
4.1 General Requirements ····· 10
4.2 Atmospheric Environment ····· 11
4.3 Freeze-thaw Environment ····· 12
4.4 Marine Environment ····· 12
5 Representative Values of Environmental Actions ····· 14
5.1 General Requirements ····· 14
5.2 Atmospheric Environment ····· 15
5.3 Freeze-thaw Environment ····· 18
5.4 Marine Enviroment ····· 19
5.5 Other Environments ····· 20
6 Effects of Environmental Actions ····· 22
6.1 General Requirements ····· 22
6.2 Atmospheric Environment ····· 23
6.3 Freeze-thaw Environment ····· 23
6.4 Marine Enviroment ····· 23
6.5 Other Environments ····· 24
Appendix A Methods for Zonations of Environments ····· 25
Appendix B Zonation of Atmospheric Environment ····· 27
Appendix C Zonation of Freeze-thaw Environment ····· 28
Appendix D Zonation of Marine Environment ····· 29
Appendix E Parameters for Atmospheric Envionmental Actions ····· 33
Appendix F Representative Values of Marine Environmental Actions ····· 41
Appendix G Calculation Model for Carbonation Depth ····· 44
Appendix H Calculation Model for Freeze-thaw Damage ····· 45
Appendix J Calculation Model for Penetration Depth of Critical Chloride Ion Content ····· 47
Explanation of Wording in This Standard ····· 50
List of Quoted Standards ····· 51
Explanation of Provisions ····· 52

1 总　则

1.0.1　为适应混凝土结构服役性能评定和预期寿命设计的需要，制定本标准。

1.0.2　本标准适用于各种自然环境下建筑、桥梁、隧道等基础设施与一般构筑物中普通混凝土结构及其构件的环境作用等级定性评价与环境作用及其效应的定量计算。

1.0.3　混凝土结构服役性能评定与预期寿命设计中涉及的环境作用及其效应的定量计算与环境作用等级定性评价，除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 环境作用 environmental action

温度、湿度、二氧化碳、氧、酸、盐等引起混凝土结构性能退化的环境气候作用和环境侵蚀介质作用。

2.1.2 环境作用代表值 representative value of an environmental action

计算环境作用效应采用的环境作用量值，定义为规定空间尺度和规定时间尺度上环境作用的特征值。

2.1.3 环境作用效应 effect of environmental action

环境气候和侵蚀介质共同作用引起的混凝土材料和结构性能的变化。

2.1.4 环境作用等级 grade of effect of environmental action

表征环境作用效应的严重程度。

2.1.5 环境区划 environmental zonation

以环境作用等级为指标，将国土划分为不同环境作用效应严重程度的区域。

2.1.6 一般环境 atmospheric environment

无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用的混凝土结构或构件的暴露环境，本标准特指一般大气环境。

2.1.7　冻融环境 freeze-thaw environment

混凝土结构或构件经受反复冻融作用的暴露环境。

2.1.8　海洋环境 marine environment

混凝土结构或构件受到海洋氯盐侵入作用并引起内部钢筋锈蚀的暴露环境，包括海洋环境大气区、浪溅区、潮汐区及淹没区。

2.1.9　除冰盐等其他氯化物环境 deicing salt environment

混凝土结构或构件受到除冰盐等非海洋环境氯化物侵入作用并引起内部钢筋锈蚀的暴露环境。

2.1.10 化学腐蚀环境 chemical environment

混凝土结构或构件受到自然环境中化学物质腐蚀作用的暴露环境，具体包括水、土中化学腐蚀环境和大气污染腐蚀环境。

2.1.11 临界氯离子含量 critical chloride ion content

导致混凝土中钢筋钝化膜破坏、钢筋开始锈蚀的氯离子含量（占混凝土质量百分比）。

2.1.12 临界氯离子含量侵蚀深度 ingress depth of critical chloride ion content

混凝土中临界氯离子含量所在位置离暴露表面的最大距离。

2.2 符号

C_n —— 第 n 年的大气二氧化碳浓度代表值（ppm）；

D_{ref} —— 参考龄期 t_{ref} 的混凝土扩散系数（m^2/s）；

E_0 —— 混凝土的初始弹性模量（MPa）；

E_{t} —— 应变为 ε_t 时混凝土的切线模量（MPa）；

EA —— 环境作用代表值变量；

EA_i —— t_i 时刻环境作用代表值, i=0,1,2,…；

$F(\cdot)$ —— 恒定环境作用下环境作用效应计算模型；

$F^{-1}(\cdot)$ —— 恒定环境作用下环境作用效应计算模型反函数；

K —— 孔隙溶液在水泥浆中的渗透系数（m^2）；

$\overline{L}$ —— 平均气孔间隔系数（m）；

N_n —— 服役至 n 年的冻融循环次数代表值；

ΔN_i —— i 年年冻融循环次数代表值；

Q_i —— 对应于 t_i 时刻的环境作用效应值, i=0,1,2,…；

RH_0 —— 基准年的年均大气相对湿度值（100%）；

ΔRH_0 —— 基准年的干湿岛强度值（100%）；

RH_n —— 第 n 年的大气相对湿度代表值（100%）；

T_0 —— 基准年的年均大气温度值（℃）；

ΔT_0 —— 基准年的热岛强度值（℃）；

T_n —— 第 n 年的大气温度代表值（℃）；

$\overline{T_n}$ —— n_0 至 n 年温度代表值的平均值（℃）；

T_{ref} —— 参考温度（℃）；

$T_{n,\max}^{\mathrm{day}}$ —— n 年日最大温度值（℃）；

$T_{n,\min}^{\mathrm{day}}$ —— n 年日最小温度值（℃）；

$T_{i,\min}^{\mathrm{mon}}$ —— i 年最冷月月均气温代表值（℃）；

$X_{c,n}$ —— 服役至 n 年的碳化深度（mm）；

X —— 经度（°）；

Y —— 纬度（°）；

Z —— 海拔高度（m）。

a —— 龄期系数；

b —— 每单位体积（1 m^3）混凝土的胶凝材料用量（kg/m^3）；

c —— 单位体积（1 m^3）混凝土中水泥用量（kg/m^3）；

c_0 —— 混凝土内部初始氯离子含量（100%）；

c_{crit} —— 临界氯离子含量（100%）；

$\overline{c_{s,n}}$ —— n_0 至 n 年混凝土表面氯离子含量代表值的平均值（100%）；

$c_{s,stl}$ —— 钢筋表面处氯离子含量（100%）；

d_0 —— 混凝土的初始损伤程度（100%）；

d_n —— 服役至 n 年的混凝土冻融损伤程度（100%）；

dw_f/dT —— 单位温度降下、单位体积水泥浆体内结冰的孔溶液体积（m^3/m^3/℃）；

$\mathrm{erf}(\cdot)$ —— 误差函数；

$\mathrm{erf}^{-1}(\cdot)$ —— 误差函数的反函数；

$f(\cdot)$ —— 混凝土碳化系数函数；

k_{RH} —— 年均大气相对湿度的年变化率（1/年）；

k_{RH+} —— 考虑负温的大气相对湿度修正系数；

$k_{\Delta RH}$ —— 干湿岛强度的年变化率（1/年）；

k_{t+} —— 考虑负温影响的时间修正系数；

k_T —— 年均大气温度的年变化率（℃/年）；

k_{T+} —— 考虑负温的大气温度修正系数；

$k_{\Delta T}$ —— 热岛强度的年变化率（℃/年）；

k'_c —— 混凝土养护条件影响系数；

k'_e —— 环境条件影响系数；

k'_t —— 修正系数；

n —— n 年年份；

n_0 —— 基准年年份；

q —— 活化常数（K）；

r_b —— 气孔半径（m）；

t —— 时间；

t_0 —— 计算时变环境作用下混凝土结构的非线性环境作用效应的初始时刻；

Δt —— 时间间隔；

t_i —— 距初始时刻 i 个时间间隔的时刻, i=0,1,2,…；

Δt_i* —— 对应于 t_i 时刻的等效暴露时间, i=0,1,2,…；

t_{ref} —— 参考龄期（天）；

w —— 单位体积（1 m^3）混凝土中水用量（kg/m^3）；

x_{cov} —— 钢筋的混凝土保护层厚度（mm）；

x_{crit} —— 临界氯离子含量侵蚀深度（mm）；

α —— 材料参数；

β —— 材料参数；

ε_t —— 混凝土发生损伤局部化之前的最大应变；

η —— 孔隙溶液的动力粘滞系数（Pa ·h）；

θ —— 降温速率代表值（℃/h）；

θ_n —— n 年降温速率代表值（℃/小时）；

λ —— 材料参数；

σ_t —— 混凝土受拉应力-应变曲线上应变为 ε_t 时的应力（MPa）；

σ_{max} —— 一个冻融循环内由混凝土孔溶液冻结产生的最大静水压力（MPa）；

Φ —— 与气孔半径和平均气孔间隔系数相关的函数；

3 环境类别

3.0.1 混凝土结构的暴露环境类别根据其劣化机理可按表 3.0.1 的规定确定。

表 3.0.1 环境类别、劣化机理、环境作用及环境作用效应

类别		名称	劣化机理	环境作用	环境作用效应
A		一般环境	混凝土碳化引起钢筋锈蚀	大气温度、大气相对湿度、大气二氧化碳浓度等	混凝土碳化深度
B		冻融环境	反复冻融导致混凝土损伤	累积冻融循环次数、年冻融循环次数、降温速率等	混凝土冻融损伤程度
C	Ca	海洋环境：大气区	氯盐侵入引起钢筋锈蚀	大气温度、大气相对湿度、混凝土表面氯离子含量等	钢筋表面处氯离子含量/临界氯离子含量侵蚀深度
	Cb	海洋环境：浪溅区	氯盐侵入引起钢筋锈蚀	大气温度、大气相对湿度、混凝土表面氯离子含量等	钢筋表面处氯离子含量/临界氯离子含量侵蚀深度
	Cc	海洋环境：潮汐区	氯盐侵入引起钢筋锈蚀	大气温度、水温、大气相对湿度、混凝土表面氯离子含量等	钢筋表面处氯离子含量/临界氯离子含量侵蚀深度
	Cd	海洋环境：淹没区	氯盐侵入引起钢筋锈蚀	水温、混凝土表面氯离子含量等	钢筋表面处氯离子含量/临界氯离子含量侵蚀深度
D		除冰盐等其他氯化物环境	氯盐侵入引起钢筋锈蚀	温度、相对湿度、混凝土表面氯离子含量等	钢筋表面处氯离子含量/临界氯离子含量侵蚀深度
E	Ea	化学腐蚀环境：土壤中和水中的化学腐蚀环境	硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀	土壤/水中温度、混凝土表面硫酸根离子等化学物质浓度/含量等	化学物质侵蚀深度/混凝土损伤程度
	Eb	化学腐蚀环境：大气污染环境	酸雨等化学物质对混凝土的腐蚀	大气温度、相对湿度、混凝土表面硫酸根离子等化学物质浓度/含量等	化学物质侵蚀深度/混凝土损伤程度
	Ec	化学腐蚀环境：盐结晶环境	硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀	环境温度、相对湿度、混凝土表面硫酸根离子等化学物质浓度/含量等	化学物质侵蚀深度/混凝土损伤程度

	Ed	化学腐蚀环境：工业腐蚀环境	工业环境中酸、盐、碱等化学物质对混凝土的腐蚀以及二氧化硫、硫化氢等化学物质侵入混凝土引起的钢筋锈蚀	环境温度、相对湿度以及混凝土表面硫酸根离子、二氧化硫、硫化氢等化学物质浓度/含量等	化学物质侵蚀深度/混凝土损伤程度

3.0.2　当同时存在多种劣化机理时，混凝土结构的暴露环境应归为多种类别，且各环境类别下环境作用及其效应计算应符合下列要求：

1 条件许可时，考虑多种环境类别下不同环境作用之间的耦合效应及其对各环境类别下环境作用效应的影响；

2 条件不许可时，分别针对每种环境类别考察环境作用及其效应。

4 环境区划

4.1 一般规定

4.1.1 当进行混凝土结构的预期寿命设计时，应先根据其服役环境类别下的环境区划图确定其环境作用等级。当环境作用等级为 1~3 级时，混凝土结构的预期寿命满足要求，无需定量计算其环境作用及其效应。当环境作用等级为 4~8 级时，应按本标准第 5、6 章规定定量计算混凝土结构的环境作用及其效应。

4.1.2 对服役于除冰盐等其他氯化物环境或化学腐蚀环境中的混凝土结构，应按本标准第 5、6 章规定定量计算其环境作用及其效应。

4.1.3 对服役于一般环境、冻融环境及海洋环境中的混凝土结构，可采用本标准提供的基准混凝土结构的环境区划图确定其环境作用等级，且应符合下列规定：

1 当混凝土结构同时位于多个环境类别时，宜分别按各环境类别下的环境区划图确定其环境作用等级，且以最严重的环境作用等级作为结果；

2 当混凝土结构的水胶比与表 4.1.3 所示基准混凝土不一致时，宜按本标准附录 A 规定制作该混凝土结构的环境区划图并确定其环境作用等级，或可按本标准第 4、5 章规定定量计算其环境作用及其效应；

3 当混凝土结构的水胶比小于表 4.1.3 所示基准混凝土时，可按本标准提供的环境区划图确定其环境作用等级。

表 4.1.3 基准混凝土参数

参数	水胶比	胶凝材料用量（kg/m^3）
取值	0.45	400

4.1.4　各环境类别下的环境作用等级划分，应符合表 4.1.4 的规定。

表 4.1.4 环境作用等级

等级 / 类别		1 可忽略	2 轻微	3 轻度	4 中度	5 严重	6 很严重	7 非常严重	8 极端严重
A		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
B		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
C	Ca	Ca1	Ca2	Ca3	Ca4	Ca5	Ca6	Ca7	Ca8
	Cb	Cb1	Cb2	Cb3	Cb4	Cb5	Cb6	Cb7	Cb8
	Cc	Cc1	Cc2	Cc3	Cc4	Cc5	Cc6	Cc7	Cc8
	Cd	Cd1	Cd2	Cd3	Cd4	Cd5	Cd6	Cd7	Cd8
D		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
E	Ea	Ea1	Ea2	Ea3	Ea4	Ea5	Ea6	Ea7	Ea8
	Eb	Eb1	Eb2	Eb3	Eb4	Eb5	Eb6	Eb7	Eb8
	Ec	Ec1	Ec2	Ec3	Ec4	Ec5	Ec6	Ec7	Ec8

4.2 **一般环境**

4.2.1　当服役年限为 50 年时，基准混凝土结构的一般环境作用等级可按附录 B 一般环境区划图确定，且应按表 4.2.1 规定调整。

表 4.2.1 一般环境作用等级调整

项编号	等级调整	环境条件	示例
1)	－1	不淋雨干燥环境或室内干燥环境	长期干燥，且处于低湿常温环境中的室内混凝土构件
2)	＋1	满足以下条件之一：年均 CO_2 浓度大于 400 ppm； 干湿交替频繁	水泥工业区中二氧化碳气体直接排放区构件；汽车尾气直接喷射构件；淡水环境中水位变动区的构件
3)	＋1	年均 CO_2 浓度为 300~400 ppm，且同时满足以下条件之一：室外淋雨环境；长期湿润环境	处于降雨频繁地区的室外淋雨构件； 长期处于接近水面上方的构件
4)	＋2	同时满足以下两个条件：年均 CO_2 浓度大于 400 ppm；干湿交替频繁	水泥工业区中受高浓度二氧化碳气体直接喷射，且干湿循环频繁

注：1、若混凝土中无配筋，则任何碳化环境等级均可认为 A2 级；2、等级＋1 表示在碳化环境区划结果（附

录 B）上将作用等级提升 1 级，如区划图上原定为 A2 级，提升 1 级则变为 A3 级；3、若等级调整后低于 A2 级，则定为 A2 级；4、若等级调整后高于 A8 级，则定为 A8 级。

4.2.2　当服役年限大于 50 年时，基准混凝土结构的一般环境作用等级应在按 4.2.1 条确定的等级上再增加一级。

4.3 冻融环境

4.3.1　当服役年限为 50 年时，基准混凝土结构的冻融环境作用等级可按附录 C 冻融环境区划图确定，且应按表 4.3.1 规定调整。

表 4.3.1 冻融环境作用等级调整

项编号	等级调整	环境条件
1)	B1	满足以下条件之一： ——干燥或较干燥的一般大气环境； ——常年浸泡于海水中的构件。
2)	－2	偶尔潮湿的大气环境。
3)	－1	经常潮湿的大气环境。
4)	＋1	构件位于盐水水位变动区或由于吸附盐水而饱和。

注：若等级调整后低于 B1 级，则定为 B1 级；若等级调高后高于 B8 级，则定为 B8 级。

4.3.2　当服役年限大于 50 年时，基准混凝土结构的冻融环境作用等级应在按 4.3.1 条确定的等级上再增加一级。

4.4 海洋环境

4.4.1　基准混凝土结构的海洋环境作用等级可按附录 D 海洋环境区划图确定，且应按下列规定调整：

1 海洋环境潮汐区和淹没区环境作用等级可不做调整；

2 海洋环境大气区环境作用等级按表 4.4.1-1 的规定调整；

3 海洋环境浪溅区环境作用等级按表 4.4.1-2 的规定调整。

表 4.4.1-1 海洋环境大气区环境作用等级调整

项编号	等级调整	环境条件
1)	－1	处于海水上空，且距平均水位高度大于 15m
2)	－1	距离海岸线超过 100m
3)	－2	距离海岸线超过 180m
4)	＋1	混凝土表面干湿循环频繁

注：1、等级调整后低于 Ca1 级时，仍以 Ca1 级作为最低级别；2、等级调整后高于 Ca8 级时，仍以 Ca8 作为最高级别。

表 4.4.1-2 海洋环境浪溅区环境作用等级调整

项编号	等级调整	环境条件
1)	－1	海水盐度小于 15

注：1、等级调整后低于 Cb1 级时，仍以 Cb1 级作为最低级别；2、等级调整后高于 Cb8 级时，仍以 Cb8 作为最高级别。

4.4.2 当服役年限大于 50 年时，基准混凝土结构的海洋环境作用等级应在按 4.4.1 条确定的等级上再增加一级。

5 环境作用代表值

5.1 一般规定

5.1.1 各类环境下需考虑的环境作用应按表 3.0.1 确定。

5.1.2 各类环境下各种环境作用，其代表值所依据的空间尺度、时间尺度以及所采用的特征值应根据具体情况具体分析，且条件许可时应考虑其代表值随规定时间尺度的变化性。

5.1.3 确定环境作用代表值的空间尺度应符合下列要求：

1 空间尺度类别按表 5.1.3 规定确定；

2 条件许可时，空间尺度优先选择构件表面环境尺度；

3 条件不许可时，空间尺度选择工程环境尺度、地区环境尺度或全局环境（宏观环境）尺度，优先级依次降低。

表 5.1.3 环境的空间尺度类别

类别	空间尺度	环境作用影响因素
全局环境也称宏观环境	大于 1000 km 地域范围	气候带、气候区等
地区环境	100～1000 km 的地域范围	经度、纬度、海拔等
工程环境	1～100 km 的地域范围	城市热岛、干岛、湿岛效应等
构件表面环境	以米甚至毫米计的尺度，一般小于结构的最大尺寸	构件本身朝向、邻近构件的遮阳作用、构件本身距离地面高度等

5.1.4 确定环境作用代表值的时间尺度应符合下列要求：

1 时间尺度类别包括时、日、月、季、年以及混凝土结构累计或预期服役年限；

2 条件许可时，时间尺度选择时、日、月、季或年尺度；

3 条件不许可时，时间尺度选择混凝土结构累计或预期服役年限尺度。

5.1.5　环境作用代表值应根据具体环境类别及相应的环境作用取规定空间尺度和规定时间尺度上的平均值或累积值。

5.1.6　当在规定空间尺度和规定时间尺度上有确切可靠实测数据时，环境作用代表值应优先采用实测数据按本标准 5.1.2~5.1.5 条规定确定；当无确切可靠实测数据时，环境作用代表值可按本标准 5.2~5.5 节规定确定。

5.2　一般环境

5.2.1　一般环境下大气温度代表值可采用考虑负温修正的工程环境尺度上的年均值，且考虑其年变化性，并按下式计算：

$$T_n = k_{\mathrm{T+}} \cdot \left[T_0 + \Delta T_0 + k_{\mathrm{T}} \cdot (n - n_0) + k_{\Delta\mathrm{T}} \cdot (n - n_0)\right] \tag{5.2.1}$$

式中：　n_0 —— 基准年年份，取为 1976；

n —— 服役至 n 年年份；

T_0 —— 工程环境尺度上基准年的年均大气温度值（℃），按本标准第 5.2.2 条规定确定；

ΔT_0 —— 基准年的热岛强度值（℃），按附录 E 中表 E.0.2 采用；

k_{T} —— 年均大气温度的年变化率（℃/年），按附录 E 中表 E.0.1 采用；

$k_{\mathrm{T+}}$ —— 考虑负温的大气温度修正系数，按附录 E 中表 E.0.4 采用；

$k_{\Delta T}$ —— 热岛强度的年变化率（℃/年），按附录 E 中表 E.0.3 采用。

5.2.2　一般环境下工程环境尺度上基准年的年均大气温度值可考虑经度、纬度及海拔高度的影响，并按下式计算：

$$T_0 = 45.256 - 0.065X - 0.721Y - 0.003Z \tag{5.2.2}$$

式中：　X —— 经度（°）；

Y —— 纬度（°）；

Z —— 海拔高度（m）。

5.2.3　一般环境下大气相对湿度代表值可采用考虑负温修正的工程环境尺度上的年均值，且考虑其年变化性，并按下式计算：

$$RH_n = k_{\mathrm{RH+}} \cdot \left[RH_0 + \Delta RH_0 + k_{\mathrm{RH}} \cdot (n - n_0) + k_{\Delta \mathrm{RH}} \cdot (n - n_0) \right] \tag{5.2.3}$$

式中：　n_0 —— 基准年年份，取为 1976；

n —— n 年年份；

RH_0 —— 工程环境尺度上基准年的年均大气相对湿度值（100%），按 5.2.4 条规定确定；

ΔRH_0 —— 基准年的干湿岛强度值（100%），按附录 E 中表 E.0.2 采用；

k_{RH} —— 年均大气相对湿度的年变化率（1/年），按附录 E 中表 E.0.1 采用；

$k_{\mathrm{RH+}}$ —— 考虑负温的大气相对湿度修正系数，按附录 E 中表 E.0.4 采用；

$k_{\Delta \mathrm{RH}}$ —— 干湿岛强度的年变化率（1/年），按附录 E 中表 E.0.3

采用。

5.2.4　一般环境下工程环境尺度上基准年的年均大气相对湿度值可考虑经度、纬度及海拔高度的影响，并按下式计算：

$$RH_0 = 49.568 + 0.534X - 1.201Y - 0.002Z \tag{5.2.4}$$

式中：　X —— 经度（°）；

Y —— 纬度（°）；

Z —— 海拔高度（m）。

5.2.5　一般环境下大气二氧化碳浓度代表值取值应符合下列规定：

1 条件许可时，大气二氧化碳浓度代表值采用工程环境尺度上的年均值，且考虑其年变化性；

2 条件不许可时，大气二氧化碳浓度代表值可采用全局环境尺度上的年均值，且考虑其年变化性，按下式计算：

$$C_n = \begin{cases} 358.996 & n < 1994 \\ 358.996 + 2.041(n - 1994) & 1994 \le n \le 2060 \\ 493.682 & 2060 < n \end{cases} \tag{5.2.5}$$

式中：　n —— n 年年份；

C_n —— n 年大气二氧化碳浓度代表值（ppm）。

5.3　冻融环境

5.3.1　冻融环境下冻融循环次数代表值应采用工程环境尺度上混凝土结构累积或预期服役年限内冻融循环次数的累积值，并按下式计算：

$$N_n = \sum_{n_0}^{n} \Delta N_i \tag{5.3.1}$$

式中： n_0 —— 基准年年份，取混凝土结构开始服役当年；

n —— n 年年份；

N_n —— 服役至 n 年的冻融循环次数代表值；

ΔN_i —— i 年年冻融循环次数代表值。

5.3.2 冻融环境下年冻融循环次数代表值应采用工程环境尺度上年累积值，且应考虑其年变化性，并按下式计算：

$$\Delta N_i = 56.9 - 4.33 T_{i,\min}^{\mathrm{mon}} \tag{5.3.2}$$

式中：$T_{i,\min}^{\mathrm{mon}}$ —— i 年最冷月月均气温代表值（℃）；

ΔN_i —— i 年年冻融循环次数代表值；

5.3.3 冻融环境下降温速率代表值应采用工程环境尺度上考虑正负温交替修正的降温速率年均值，且应考虑其年变化性，并按下式计算：

$$\theta_n = \frac{T_{n,\max}^{\mathrm{day}} - T_{n,\min}^{\mathrm{day}}}{12} \tag{5.3.3}$$

式中： θ_n —— n 年降温速率代表值（℃/小时）；

$T_{n,\max}^{\mathrm{day}}$ —— n 年日最大温度值（℃）；

$T_{n,\min}^{\mathrm{day}}$ —— n 年日最小温度值（℃）。

5.4 海洋环境

5.4.1 海洋环境下大气温度代表值应符合下列规定：

1 条件许可时，大气温度代表值应取工程环境尺度上的年均值，且应考虑其年变化性；

2 条件不许可时，大气温度代表值可取混凝土结构累计或预期服役年限内的平均值，可按附录 F 图 F.0.1 确定。

5.4.2 海洋环境下大气相对湿度代表值应符合下列规定：

1 条件许可时，大气相对湿度代表值应取工程环境尺度上的年均值，且应考虑其年变化性；

2 条件不许可时，大气相对湿度代表值可取工程环境尺度上混凝土结构累计或预期服役年限内的平均值，可按附录 F 图 F.0.2 确定。

5.4.3 海洋环境下表层海水水温代表值应符合下列规定：

1 条件许可时，表层海水水温代表值应取工程环境尺度上的年均值且应考虑其年变化性；

2 条件不许可时，表层海水水温代表值可取工程环境尺度上混凝土结构累计或预期服役年限内的平均值，可按附录图 F.0.3 确定。

5.4.4 海洋环境下混凝土结构表面氯离子含量代表值应符合下列规定：

1 条件许可时，表面氯离子含量代表值采用构件表面环境尺度上的年均值，且应考虑其年变化性；

2 条件不许可时，表面氯离子含量代表值采用构件表面环境尺度上混凝土结构累计或预期服役年限内的平均值，按表 5.4.4 的规定确定。

表 5.4.4 表面氯离子含量代表值

区域	大气区	浪溅区	潮汐区	淹没区
表面氯离子含量代表值	0.375%	0.85%	0.8%	0.85%

注：表中数据为占混凝土质量百分比。

5.5 其他环境

5.5.1 除冰盐等其他氯化物环境作用代表值应符合下列规定：

1 当混凝土结构同时位于“一般环境”中时，温度作用代表值、相对湿度作用代表值按本标准 5.2.1~5.2.4 条规定确定；

2 当混凝土结构同时位于“海洋环境：大气区”时，温度作用代表值、相对湿度作用代表值分别按本标准附录 F 图 F.0.1、图 F.0.2 确定；

3 当不符合上述 1 和 2 款时，温度和相对湿度作用代表值采用实测数据按本标准第 5.1 节规定确定；

4 表面氯离子含量代表值采用构件表面环境尺度上的实测数据按本标准第 5.1 节规定确定。

5.5.2 化学腐蚀环境作用代表值取值应符合下列规定：

1 当混凝土结构同时位于“一般环境”中时，温度作用代表值、相对湿度作用代表值按本标准 5.2.1~5.2.4 条规定确定；

2 当混凝土结构同时位于“海洋环境：大气区”时，温度作用代表值、相对湿度作用代表值分别按本标准附录 F 图 F.0.1、图 F.0.2 确定；

3 当混凝土结构同时位于“海洋环境：淹没区”时，温度作用代表值按本标准附录 F 图 F.0.3 确定；

4 当不符合上述 1、2 和 3 款时，温度和相对湿度作用代表值采用实测数据按本标准第 5.1 节规定确定；

5 表面硫酸根离子等化学物质含量代表值采用构件表面环境尺度上的实测数据按本标准第 5.1 节规定确定。

6 环境作用效应

6.1 一般规定

6.1.1 各类环境下混凝土结构应考虑的环境作用效应应按表 3.0.1 确定。

6.1.2 混凝土结构的环境作用效应计算，应符合下列规定：

1 当混凝土结构服役于单一环境类别时，环境作用效应计算应同时考虑该环境类别下多项环境作用及其时变性的影响，且条件许可时，可考虑该环境类别下多项环境作用之间的耦合效应及其对环境作用效应的影响；

2 当混凝土结构同时服役于多个环境类别时，应分别计算每类环境类别下的环境作用效应，且条件许可时，可考虑不同环境类别下不同环境作用之间的耦合效应对各环境类别下环境作用效应的影响。

6.1.3 时变环境作用下混凝土结构的非线性环境作用效应应按下列步骤计算：

1 以初始时刻 t_0 环境作用代表值 EA_0 和时间间隔 Δt 代入恒定环境作用下环境作用效应计算模型 $F(EA;\ t)$，计算下一时刻 $t_1=t_0+\Delta t$ 的环境作用效应值 $Q_1 = F(EA_0;\ \Delta t)$；

2 以 $t_1=t_0+\Delta t$ 时刻的环境作用代表值 EA_1 和第 1 步计算的 $t_1=t_0+\Delta t$ 时刻环境作用效应值 $Q_1 = F(EA_0;\ \Delta t)$代入恒定环境作用下混凝土碳化深度计算模型 $F(EA;\ t)$，反算等效暴露时间 $\Delta t_1{*}=F^{-1}(EA_1;\ Q_1)$；

3 以 $t_1=t_0+\Delta t$ 时刻的环境作用代表值 EA_1 以及 $\Delta t_1{*}+\Delta t$ 代入恒定

环境作用下环境作用效应计算模型 $F(EA;\ t)$，计算 $t_2=t_1+\Delta t$ 时刻的环境作用效应值 $Q_2 = F(EA_1;\ \Delta t_1{*}+\Delta t)$；

4 重复上述第 2、3 步，直至 t 达到预期或累计服役年限，获得环境作用效应值随服役时间的变化规律。

6.2 一般环境

6.2.1 一般环境下环境作用效应为混凝土碳化深度，需考虑的环境作用应包括大气温度、大气相对湿度以及大气二氧化碳浓度。

6.2.2 一般环境下混凝土碳化深度应考虑环境作用的时变性，按第 6.1.3 条规定确定。

6.2.3 恒定环境作用下混凝土碳化深度计算模型应考虑负温的影响，可按附录 G 的规定确定。

6.3 冻融环境

6.3.1 冻融环境下环境作用效应为混凝土的冻融损伤程度，需考虑的环境作用应包括冻融循环次数、年冻融循环次数以及降温速率。

6.3.2 冻融环境下混凝土的冻融损伤程度可按附录 H 规定确定。

6.4 海洋环境

6.4.1 海洋环境下环境作用效应为临界氯离子含量侵蚀深度或钢筋

表面处氯离子含量，需考虑的环境作用应包括温度、相对湿度和表面氯离子含量。

6.4.2　海洋环境下混凝土的临界氯离子含量侵蚀深度或钢筋表面处氯离子含量，应符合下列规定：

1　条件许可时，宜考虑环境作用时变性，按 6.1.3 条规定确定；

2　条件不许可时，可不考虑环境作用时变性，按附录 J 的规定确定。

6.5 其他环境

6.5.1　除冰盐等其他氯化物环境作用效应为临界氯离子含量侵蚀深度或钢筋表面处氯离子含量，可采用按本标准第 5.5 节确定的环境作用代表值，按本标准第 6.4 节相关规定确定。

6.5.2　化学腐蚀环境作用效应为化学物质侵蚀深度或混凝土损伤程度，可采用按本标准第 5.5 节确定的环境作用代表值，按《既有混凝土结构耐久性评定标准》（GB/T 51355-2019）附录 E 的规定确定。

附录 A 环境区划方法

A.0.1 混凝土结构的一般环境、冻融环境和海洋环境区划应按下列步骤进行：

1 按本标准第 3 章规定，确定环境类别、需考虑的环境作用及其效应；

2 按本标准第 5 章规定，计算需考虑的环境作用代表值；

3 选取基准混凝土，采用第 2 款确定的环境作用代表值，按本标准第 6 章规定，计算基准混凝土的环境作用效应值；

4 根据环境作用效应值的大小，按表 A.0.1、A.0.2 及 A.0.3 条规定确定环境作用等级；

5 根据环境作用等级，将我国国土划分为不同环境作用程度的区域；

6 在不同区域内根据当地不同的工程环境情况，对环境作用等级进行调整。

表 A.0.1 一般环境作用等级

一般环境作用等级	混凝土碳化深度区间（mm）	定性描述
A1	0~5	可忽略
A2	5~15	轻　微
A3	15~25	轻　度
A4	25~35	中　度
A5	35~45	严　重
A6	45~55	很严重
A7	55~65	非常严重
A8	＞65	极端严重

表 A.0.2 冻融环境作用等级

冻融环境作用等级	混凝土冻融损伤程度区间	定性描述
B1	0%	可忽略
B2	0%~5%	轻　微

B3	5%~15%	轻　度
B4	15%~25%	中　度
B5	25%~40%	严　重
B6	40%~60%	很严重
B7	60%~80%	非常严重
B8	60%~100%	极端严重

表 A.0.3 海洋环境作用等级

环境类别	海洋环境作用等级	临界氯离子含量侵蚀深度区间（mm）	定性描述
Ca	Ca1	$25 \le x_{crit} \le 35$	可忽略
	Ca2	$35 < x_{crit} \le 45$	轻微
	Ca3	$45 < x_{crit} \le 55$	轻度
	Ca4	$55 < x_{crit} \le 65$	中度
Cb	Cb2	$35 \le x_{crit} \le 45$	轻微
	Cb3	$45 < x_{crit} \le 55$	轻度
	Cb4	$55 < x_{crit} \le 65$	中度
	Cb5	$65 < x_{crit} \le 85$	严重
Cc	Cc5	$65 \le x_{crit} \le 85$	严重
	Cc6	$85 < x_{crit} \le 105$	很严重
	Cc7	$105 < x_{crit} \le 125$	非常严重
Cd	Cd4	$55 \le x_{crit} \le 65$	中度
	Cd5	$65 < x_{crit} \le 85$	严重
	Cd6	$85 < x_{crit} \le 105$	很严重

附录 B 一般环境区划图

B.0.1 2011 年至 2060 年服役 50 年基准混凝土结构的一般环境区划图可按图 B.0.1 采用。

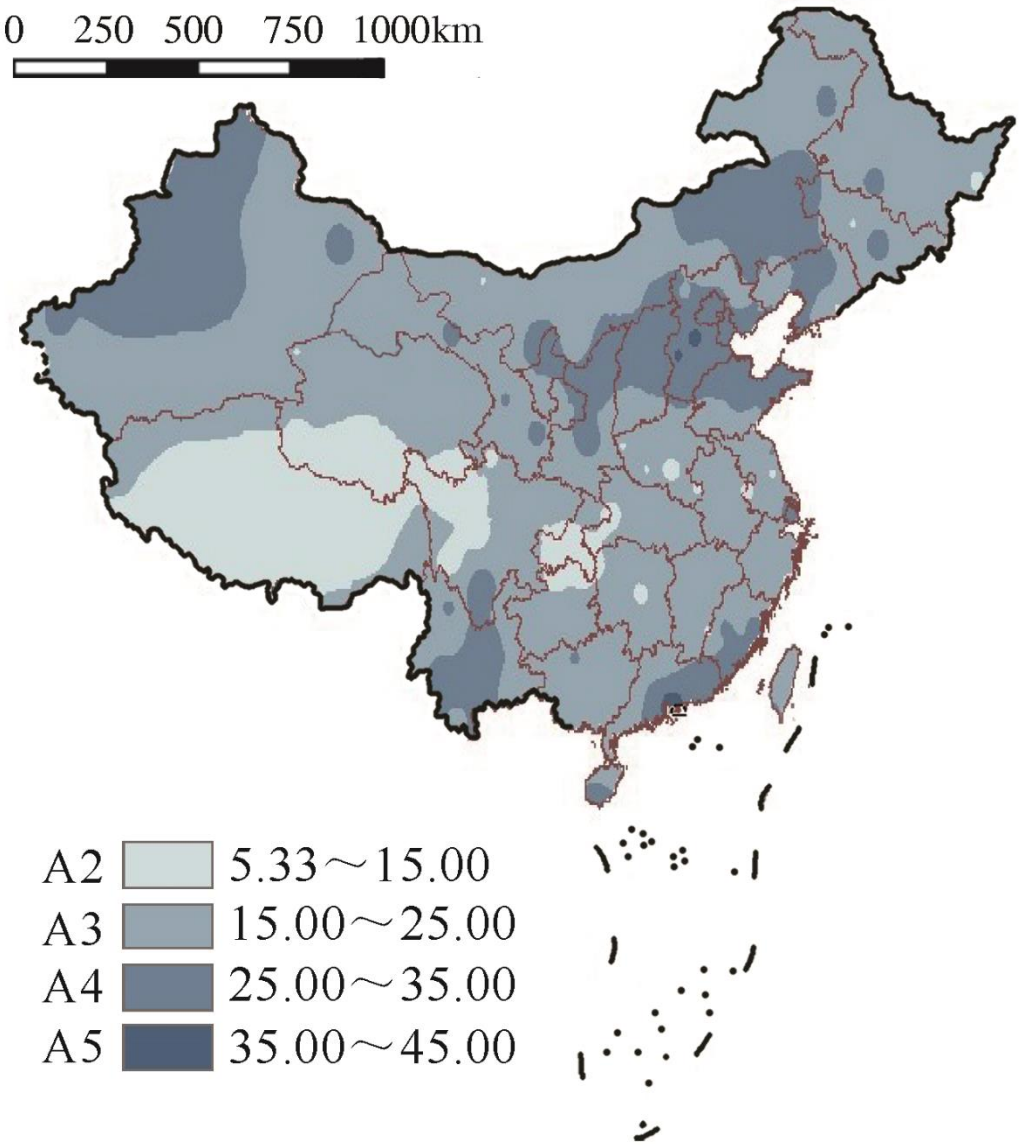

图 B.0.1 2011 年至 2060 年基准混凝土结构的一般环境区划图（50 年）（单位：mm）

附录 C 冻融环境区划图

C.0.1 服役 50 年基准混凝土结构的冻融环境区划图可按图 C.0.1 采用。

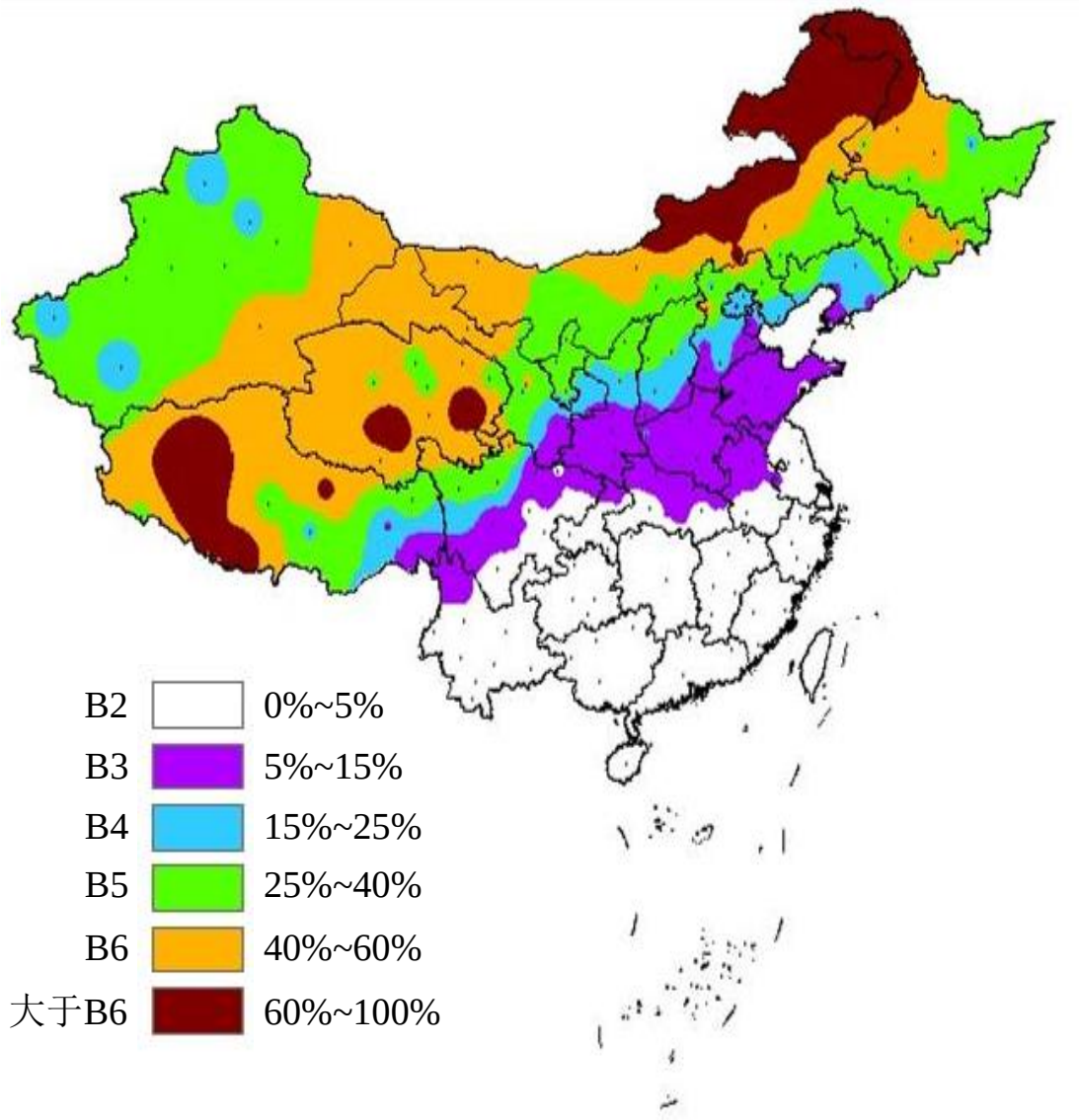

图 C.0.1 基准混凝土结构的冻融环境区划图（50 年）

附录 D 海洋环境区划图

D.0.1 2011 年至 2060 年服役 50 年基准混凝土结构的中国近海海洋环境大气区区划图可按图 D.0.1 采用。

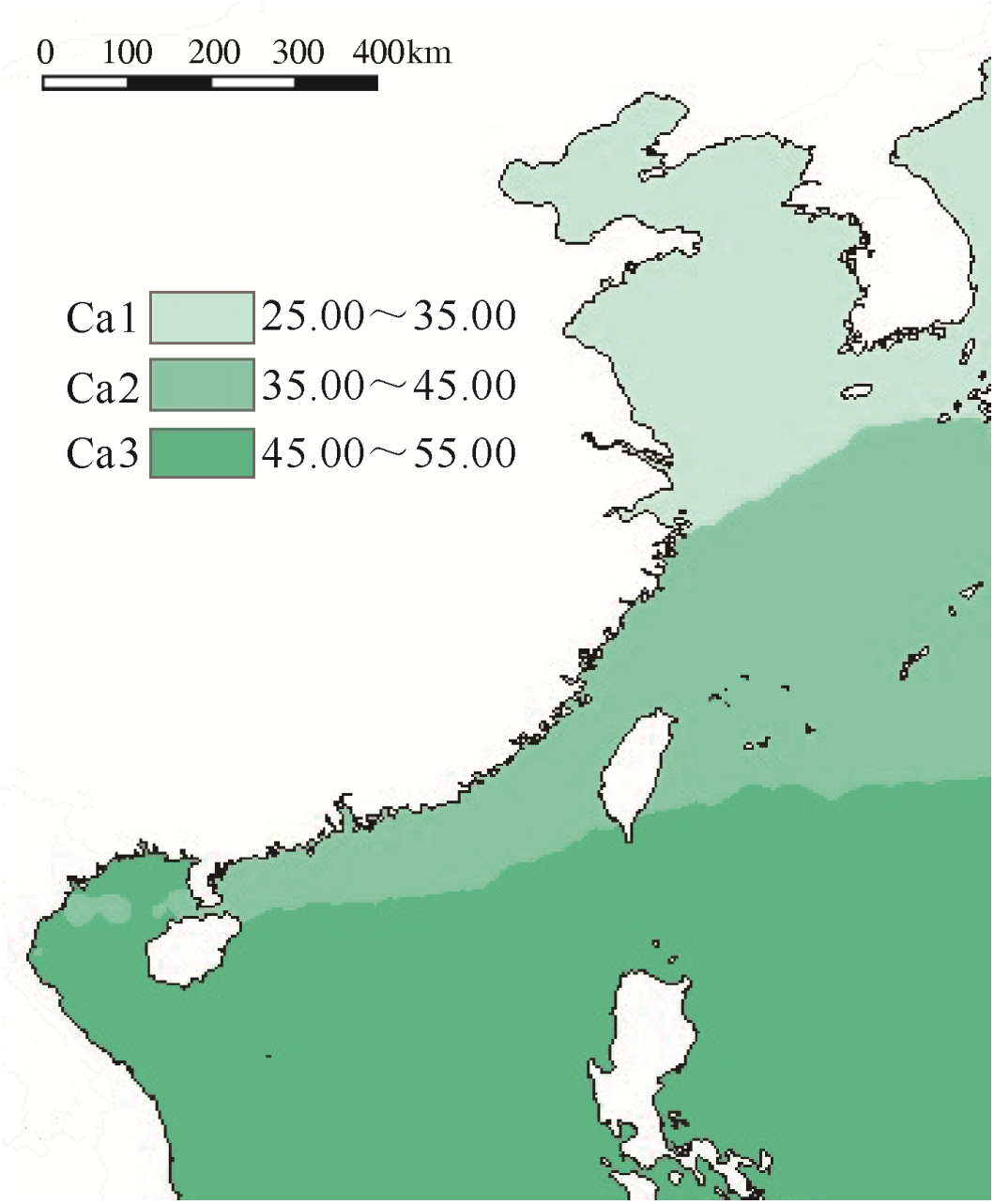

图 D.0.1 2011 年至 2060 年基准混凝土结构的中国近海海洋环境大气区区划图（50 年）（单位：mm）

D.0.2　2011 年至 2060 年服役 50 年基准混凝土结构的中国近海海洋环境浪溅区区划图可按图 D.0.2 采用。

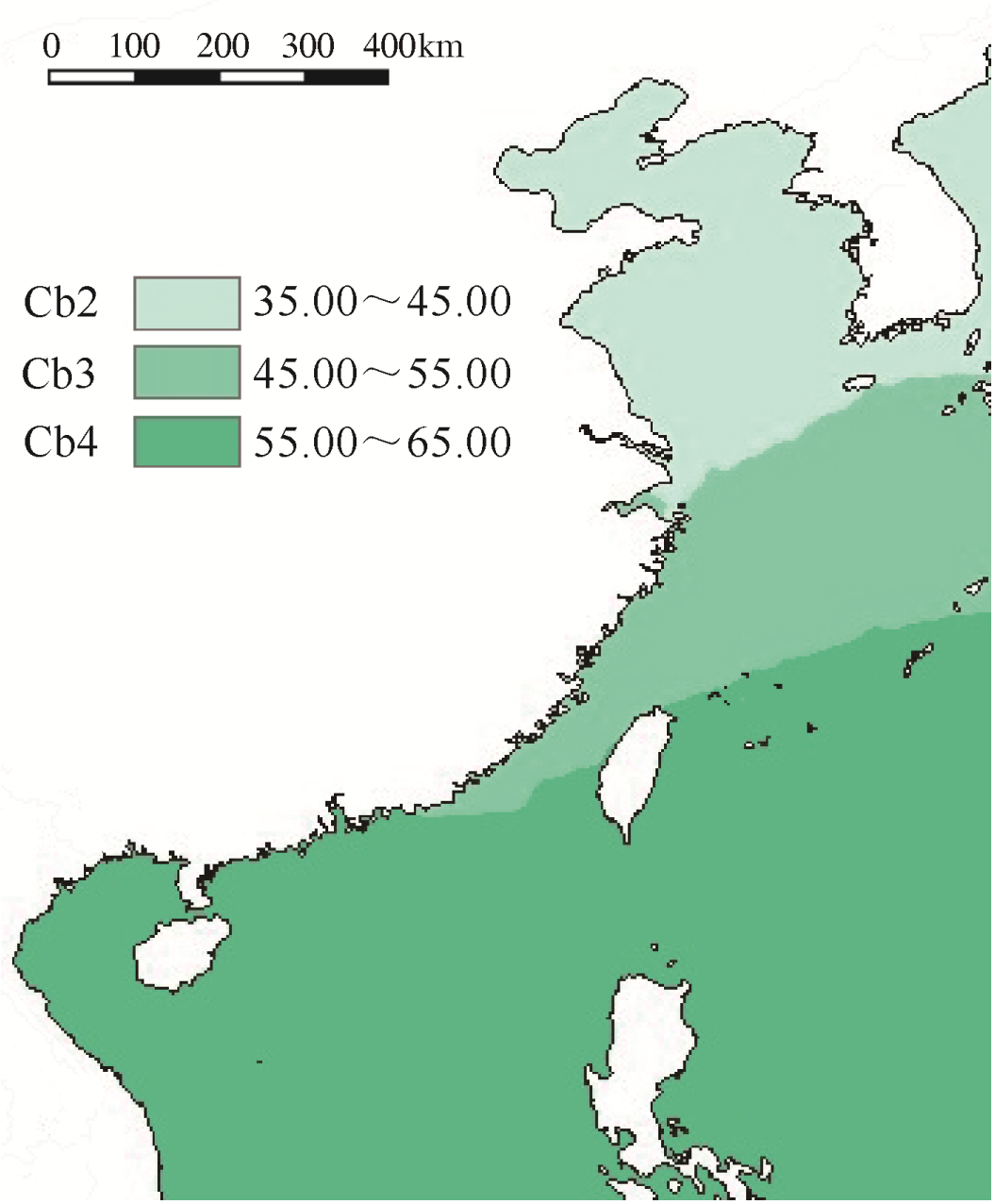

图 D.0.2 2011 年至 2060 年基准混凝土结构的中国近海海洋环境浪溅区区划图（50 年）（单位：mm）

D.0.3　2011 年至 2060 年服役 50 年基准混凝土结构的中国近海海洋环境潮汐区区划图可按图 H.0.3 采用。

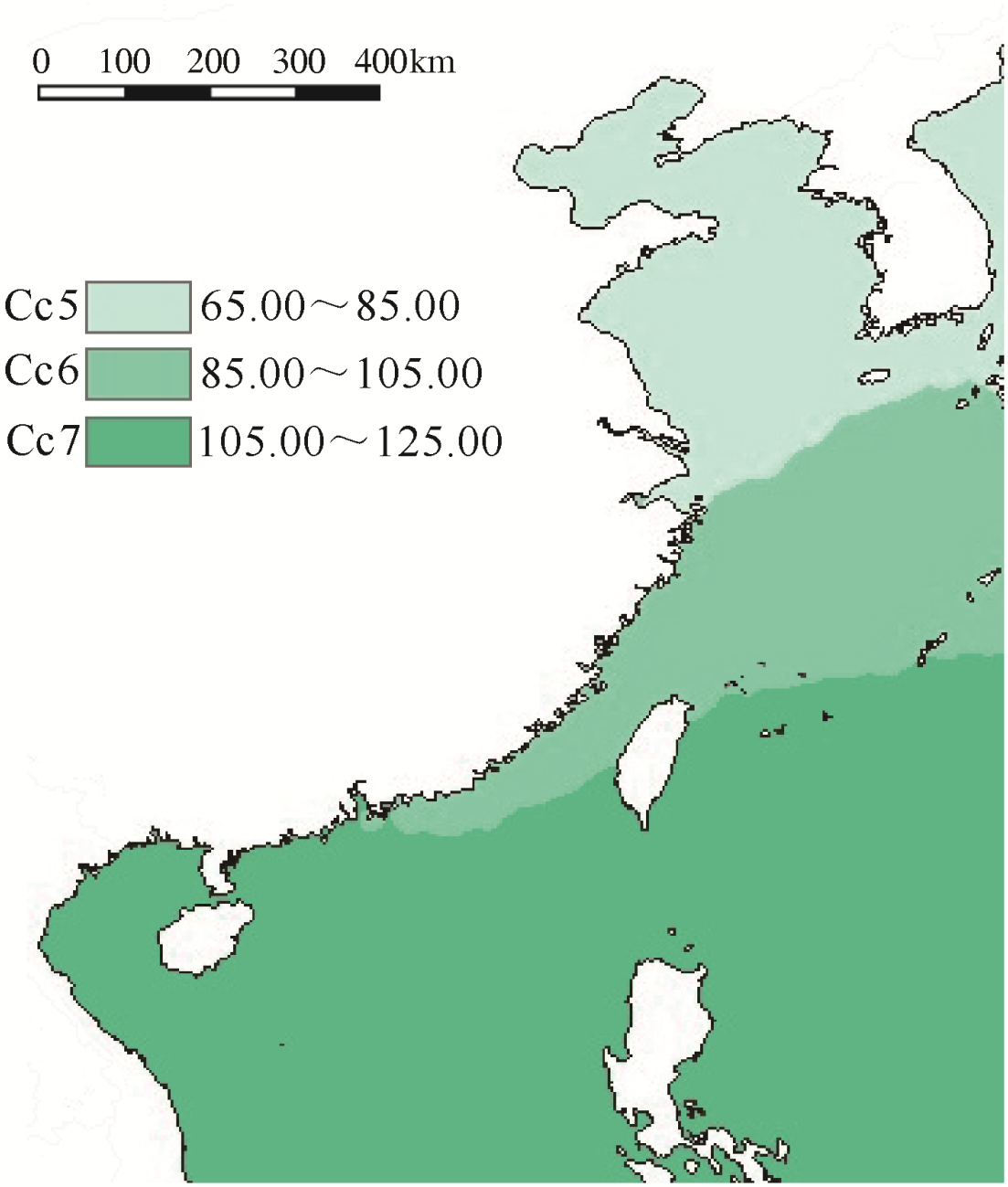

图 D.0.3 2011 年至 2060 年基准混凝土结构的中国近海海洋环境潮汐区区划图（50 年）（单位：mm）

D.0.4　2011 年至 2060 年服役 50 年基准混凝土结构的中国近海海洋环境淹没区区划图可按图 H.0.4 采用。

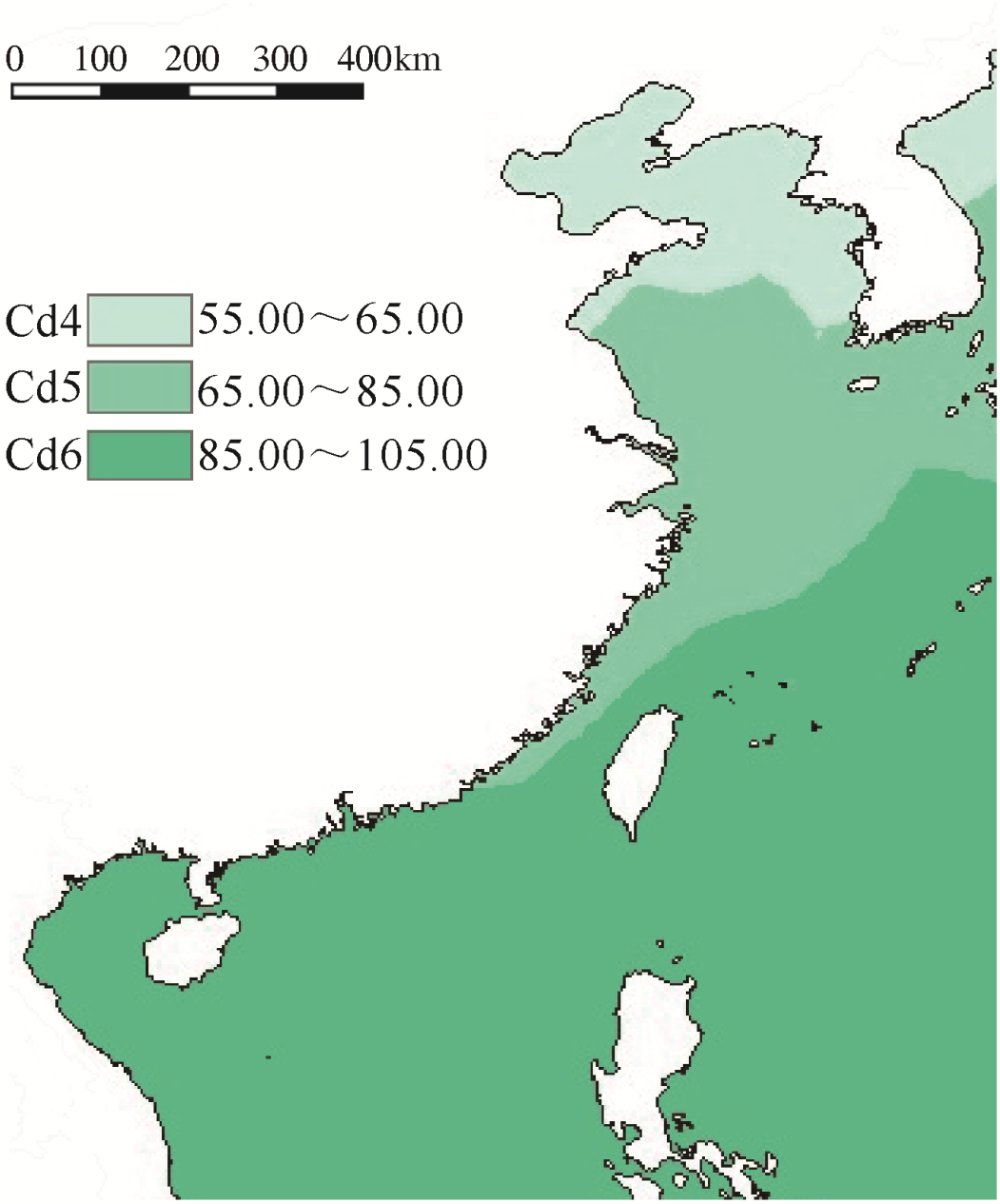

图 D.0.4 2011 年至 2060 年基准混凝土结构的中国近海海洋环境淹没区区划图（50 年）（单位：mm）

附录 E 一般环境作用代表值计算参数

表 E.0.1 我国主要城市 1976 年温度、相对湿度年均值及其年变化率

城市	所在省	T_0 (°C)	k_T (°C/年)	RH_0 (%)	k_{RH} (1/年)	城市	所在省	T_0 (°C)	k_T (°C/年)	RH_0 (%)	k_{RH} (1/年)
亳州	安徽	14.2	0.044	69	0.088	二连浩特	内蒙古	3.5	0.061	49	-0.067
安庆	安徽	16.3	0.049	74	0.071	朱日和	内蒙古	4.4	0.06	46	-0.007
合肥	安徽	15.5	0.039	74	0.049	锡林浩特	内蒙古	1.9	0.062	57	-0.037
蚌埠	安徽	14.9	0.05	70	0.102	多伦	内蒙古	1.5	0.07	60	0.031
密云	北京	10.1	0.061	61	-0.127	东乌珠穆沁旗	内蒙古	0.7	0.067	58	-0.018
长汀	福建	17.8	0.034	80	0.035	满洲里	内蒙古	-1.5	0.072	62	-0.009
邵武	福建	17.1	0.055	83	-0.117	林西	内蒙古	3.6	0.081	52	-0.118
漳州	福建	20.6	0.055	79	-0.157	新巴尔虎左旗	内蒙古	-0.6	0.069	61	0.071
福州	福建	19.1	0.059	77	-0.105	赤峰	内蒙古	6.7	0.052	49	0.024
福鼎	福建	17.9	0.047	79	-0.007	海拉尔	内蒙古	-1.8	0.079	65	0.124
永安	福建	18.5	0.063	81	-0.18	开鲁	内蒙古	5.4	0.082	56	-0.191
瓜州	甘肃	8	0.062	37	0.191	博克图	内蒙古	-1.4	0.067	63	0.049
张掖	甘肃	6.3	0.075	49	0.11	乌兰浩特	内蒙古	3.7	0.099	54	-0.102
合作	甘肃	1.4	0.073	65	-0.083	小二沟	内蒙古	-1.8	0.113	63	0.164
兰州	甘肃	8.3	0.114	59	-0.296	拐子湖	内蒙古	7.8	0.101	33	-0.095
天水	甘肃	9.9	0.085	68	-0.115	银川	宁夏	8.1	0.074	56	-0.022
电白	广东	22.4	0.058	82	-0.055	固原	宁夏	5.3	0.083	61	0.03
韶关	广东	19.8	0.036	77	-0.002	茫涯	青海	1.3	0.117	31	-0.056
深圳	广东	21.5	0.084	80	-0.29	托托河	青海	-4.2	0.019	52	0.076
梅县	广东	20.7	0.045	79	-0.108	冷湖	青海	1.9	0.065	26	0.193
汕头	广东	20.7	0.071	82	-0.207	小灶火	青海	3.1	0.065	30	0.099
百色	广西	21.6	0.027	75	0.076	杂多	青海	0.4	0.025	55	0.1
龙州	广西	21.7	0.037	80	-0.022	曲麻莱	青海	-2.7	0.044	53	0.115
河池	广西	19.8	0.055	77	-0.085	都兰	青海	2.3	0.063	39	0.005
南宁	广西	21.1	0.039	80	-0.034	玛多	青海	-3.9	0.028	61	-0.211
北海	广西	21.9	0.055	82	-0.099	刚察	青海	-1.1	0.057	54	0.024
桂林	广西	18.2	0.047	77	-0.1	班玛	青海	2.3	0.037	63	-0.113
梧州	广西	20.4	0.043	79	-0.027	西宁	青海	5.3	0.038	53	0.201
盘县	贵州	14.3	0.045	78	-0.067	兴海	青海	0.5	0.061	51	-0.003
毕节	贵州	12	0.051	84	-0.139	青岛	山东	11.7	0.066	73	-0.133
桐梓	贵州	14	0.038	80	-0.034	兖州	山东	13	0.041	67	0.115
独山	贵州	14.3	0.045	84	-0.12	济南	山东	13.8	0.052	57	0.009
三亚	海南	25.3	0.045	78	-0.037	沂源	山东	11.4	0.057	62	0.016
海口	海南	23.4	0.06	85	-0.117	威海	山东	11.6	0.065	69	-0.243

石家庄	河北	12.4	0.077	63	-0.128	离石	山西	8.3	0.069	59	-0.045
蔚县	河北	6.2	0.079	57	-0.108	太原	山西	9	0.072	61	-0.125
张家口	河北	7.6	0.085	51	-0.202	大同	山西	6	0.07	51	0.031
南宫	河北	12.5	0.049	66	-0.075	运城	山西	13.3	0.056	59	0.113
承德	河北	8.6	0.02	55	0.094	汉中	陕西	13.6	0.056	79	-0.027
乐亭	河北	9.6	0.079	67	-0.085	西安	陕西	12.8	0.078	72	-0.251
保定	河北	11.9	0.075	63	-0.132	延安	陕西	8.9	0.079	63	-0.206
卢氏	河南	11.8	0.045	69	0.122	榆林	陕西	7.4	0.074	57	-0.138
南阳	河南	14.4	0.038	71	0.12	安康	陕西	15.1	0.031	72	0.121
郑州	河南	13.7	0.052	64	0.093	上海	上海	15.2	0.092	78	-0.201
驻马店	河南	14.6	0.029	68	0.226	巴塘	四川	12.9	-0.007	45	0.168
安阳	河南	13.2	0.051	66	-0.007	甘孜	四川	5.5	0.018	56	0.121
固始	河南	14.9	0.048	74	0.091	康定	四川	6.4	0.044	76	-0.08
漠河	黑龙江	-5.6	0.089	66	0.211	马尔康	四川	8.3	0.019	61	0.052
齐齐哈尔	黑龙江	2.8	0.085	58	0.057	西昌	四川	16.5	0.032	63	-0.071
大兴安岭	黑龙江	-1.8	0.082	66	0.108	若尔盖	四川	0.4	0.052	71	-0.155
嫩江	黑龙江	-0.2	0.057	61	0.231	成都	四川	15.4	0.061	82	-0.082
克山	黑龙江	1.3	0.054	57	0.38	平武	四川	13.9	0.049	72	0.023
哈尔滨	黑龙江	3.3	0.082	64	0.011	内江	四川	17	0.04	79	0.062
黑河	黑龙江	-0.4	0.072	65	0.012	稻城	四川	4.2	0.028	54	0.076
铁力	黑龙江	0.8	0.079	66	0.198	天津	天津	11.7	0.061	62	0.022
鹤岗	黑龙江	2.9	0.048	58	0.191	狮泉河	西藏	0.3	0.036	31	0.11
绥芬河	黑龙江	2	0.063	65	0.099	普兰	西藏	3.8	-0.009	43	0.245
虎林	黑龙江	2.9	0.047	67	0.144	改则	西藏	-0.1	0.019	32	0.125
巴东	湖北	17.1	0.012	67	0.236	定日	西藏	2.7	0.023	39	0.224
老河口	湖北	14.9	0.054	75	-0.01	申扎	西藏	0.1	0.009	37	0.405
荆州	湖北	15.9	0.049	79	-0.105	那曲	西藏	-1.2	0.025	47	0.436
广水	湖北	15.2	0.049	73	-0.006	波密	西藏	8.5	0.021	73	-0.023
武汉	湖北	16	0.064	77	-0.078	昌都	西藏	7.5	0.009	49	0.2
桑植	湖南	15.7	0.034	79	-0.011	察隅	西藏	11.8	0.012	70	-0.063
零陵	湖南	17.2	0.041	79	-0.049	喀什	新疆	11	0.064	53	-0.049
双峰	湖南	16.6	0.031	80	0.022	和田	新疆	12.1	0.046	43	-0.034
芷江	湖南	16.1	0.031	81	-0.045	阿克苏	新疆	9.4	0.07	60	-0.072
岳阳	湖南	16.7	0.042	77	-0.009	伊宁	新疆	8	0.077	69	-0.191
长春	吉林	4.5	0.086	65	-0.165	民丰	新疆	10.9	0.058	40	0.057
通化	吉林	4.7	0.067	68	-0.019	库车	新疆	10.5	0.039	46	0.175
延吉	吉林	4.6	0.058	65	0.004	克拉玛依	新疆	7.3	0.08	49	0.019
南京	江苏	15	0.05	75	-0.007	库尔勒	新疆	10.6	0.07	44	0.135
射阳	江苏	13.2	0.064	78	-0.05	若羌	新疆	10.9	0.059	40	0.053
东台	江苏	14	0.053	78	0.018	吐鲁番	新疆	12.6	0.125	46	-0.286
赣州	江西	18.7	0.044	77	-0.092	哈密	新疆	9.1	0.054	41	0.268

吉安	江西	17.8	0.044	78	0.036	阿勒泰	新疆	3.6	0.059	57	0.138
南昌	江西	17.1	0.045	76	0.038	塔什库尔干	新疆	3.8	0.004	37	0.217
景德镇	江西	16.7	0.06	77	-0.027	腾冲	云南	14.6	0.043	81	-0.204
玉山	江西	17	0.038	79	-0.051	临沧	云南	16.9	0.049	74	-0.183
朝阳	辽宁	7.9	0.09	55	-0.236	大理	云南	14.6	0.021	69	-0.017
大连	辽宁	9.8	0.079	66	-0.11	丽江	云南	12.3	0.031	66	-0.165
营口	辽宁	8.5	0.07	67	-0.11	景洪	云南	21.9	0.036	81	-0.097
沈阳	辽宁	7.6	0.054	64	-0.09	元江	云南	23.3	0.028	70	-0.06
丹东	辽宁	8.2	0.053	68	0.044	昆明	云南	14.1	0.077	74	-0.211
额济纳旗	内蒙古	7.8	0.084	33	0.016	文山	云南	17.4	0.05	77	-0.059
海力素	内蒙古	4.1	0.076	40	0.055	丽水	浙江	17.4	0.054	76	-0.048
鄂托克旗	内蒙古	5.9	0.087	47	-0.031	杭州	浙江	15.9	0.054	76	-0.017
乌拉特中旗	内蒙古	4.3	0.077	49	-0.022	玉环	浙江	16.3	0.058	79	0.045
呼和浩特	内蒙古	5.6	0.09	58	-0.307	定海	浙江	15.7	0.056	79	0
酉阳	重庆	14.4	0.031	79	0.04	涪陵	重庆	17.6	0.029	79	0.057

表 E.0.2 1976 年全国 31 个省会城市-郊区年均热岛强度值与干湿岛强度值

省市区	城区、郊区	ΔT_0 (°C)	ΔRH_0 (%)	省市区	城区、郊区	ΔT_0 (°C)	ΔRH_0 (%)
北京	北京、密云	0.67	1.58	河南	郑州、中牟	0.01	-2.67
天津	天津、武清	0.38	-0.42	湖北	武汉、黄陂	0.00	0.58
上海	徐家汇、宝山	0.01	-0.92	湖南	长沙、望城	0.09	1.33
重庆	沙坪坝、北碚	0.03	1.50	广东	广州、花都	0.05	0.17
安徽	合肥、长丰	0.63	0.75	广西	南宁、武鸣	0.02	1.75
吉林	长春、九台	0.25	-3.00	海南	海口、琼山	0.01	0.02
辽宁	沈阳、新民	0.48	0.25	四川	成都、温江	0.2	-1.92
江西	南昌、安义	0.49	-3.83	贵州	贵阳、修文	1.65	-5.58
河北	石家庄、平山	0.28	-2.75	云南	昆明、呈贡	-0.44	0.17
山西	太原、阳曲	0.86	1.75	西藏	拉萨、当雄	6.06	-9.00
江苏	南京、六合	0.23	-3.17	陕西	西安、临潼	-0.23	6.17
浙江	杭州、富阳	0.06	-4.08	甘肃	兰州、榆中	2.50	-5.00
福建	福州、闽侯	0.14	-3.33	青海	西宁、大通	3.08	-14.00
山东	济南、长清	0.65	-5.42	宁夏	银川、永宁	0.00	-3.33
内蒙古	呼和浩特、武川	3.46	1.42	新疆	乌鲁木齐、小渠子	4.15	2.33
黑龙江	哈尔滨、阿城	0.31	-3.33				

表 E.0.3 我国主要城市-郊区热岛及干湿岛强度年变化率

省市区	城区、郊区	$k_{\Delta T}$	$k_{\Delta RH}$	省市区	城区、郊区	$k_{\Delta T}$	$k_{\Delta RH}$
北京	北京、密云	0.0455	-0.2957	河南	郑州、中牟	0.0058	-0.0125
天津	天津、武清	-0.0071	0.0728	湖北	武汉、黄陂	0.0342	-0.1388
上海	徐家汇、宝山	0.0154	-0.0533	湖南	长沙、望城	-0.0054	0.0188
重庆	沙坪坝、北碚	0.0080	-0.1351	广东	广州、花都	-0.0011	-0.0328
安徽	合肥、长丰	-0.0002	-0.1028	广西	南宁、武鸣	-0.0139	0.0297
吉林	长春、九台	0.0053	-0.0018	海南	海口、琼山	0.0060	-0.0319
辽宁	沈阳、新民	-0.0263	0.0926	四川	成都、温江	0.0172	-0.0464
江西	南昌、安义	0.0143	-0.0046	贵州	贵阳、修文	-0.0201	0.0011
河北	石家庄、平山	0.0202	-0.0401	云南	昆明、呈贡	0.0459	-0.1148
山西	太原、阳曲	-0.0005	-0.0972	西藏	拉萨、当雄	0.0199	-0.2450
江苏	南京、六合	0.0049	0.0425	陕西	西安、临潼	0.0418	-0.3859
浙江	杭州、富阳	0.0072	0.0881	甘肃	兰州、榆中	0.0524	-0.2316
福建	福州、闽侯	0.0036	0.0182	青海	西宁、大通	-0.0676	0.4110
山东	济南、长清	-0.0086	0.0412	宁夏	银川、永宁	0.0018	0.1603
内蒙古	呼和浩特、武川	0.0219	-0.2368	新疆	乌鲁木齐、小渠子	0.0302	-0.3848
黑龙江	哈尔滨、阿城	0.0049	0.0660				

注：南宁、沈阳、天津站由于站点迁移或区站号变动，热岛强度数据在 30 年中存在突变情况，在制作全国热岛强度和干湿岛强度分布图时予以剔除。

表 E.0.4 各城市考虑负温修正系数

城市	所在省	k_{RH+}	k_{T+}	k_{t+}
亳州	安徽	67.79/67.46	17.06/15.88	342.6/365
蚌埠	安徽	70.92/70.69	17.05/16.17	348/365
合肥	安徽	74.11/73.97	17.36/16.75	353.6/365
安庆	安徽	74.82/74.87	18.24/17.95	359.8/365
密云	北京	60.27/57.09	16.76/11.72	278/365
酉阳	重庆	77.25/77.28	15.79/15.53	359.8/365
涪陵	重庆	76.61/76.61	18.68/18.68	365/365
长汀	福建	77.21/77.20	19.04/19.03	364.8/365
邵武	福建	77.27/77.26	18.41/18.40	365/365
漳州	福建	70.91/70.91	21.96/21.96	365/365
福州	福建	69.48/69.48	20.70/20.70	365/365
福鼎	福建	74.49/74.49	19.34/19.34	365/365
永安	福建	73.62/73.62	20.03/20.03	365/365
合作	甘肃	69.58/64.57	8.68/3.33	232.6/365
张掖	甘肃	47.21/49.93	14.75/8.65	261.4/365
瓜州	甘肃	38.83/43.70	16.32/9.83	263.3/365
兰州	甘肃	52.22/52.71	14.66/10.92	294/365
天水	甘肃	62.93/62.59	13.93/11.89	323/365
电白	广东	80.30/80.30	23.43/23.43	365/365

城市	所在省	k_{RH+}	k_{T+}	k_{t+}
韶关	广东	75.60/75.60	20.64/20.64	365/365
深圳	广东	70.95/70.95	23.22/23.22	365/365
梅县	广东	73.76/73.76	21.91/21.91	365/365
汕头	广东	74.15/74.15	22.54/22.54	365/365
桂林	广西	71.89/71.91	19.69/19.67	364.8/365
百色	广西	73.93/73.93	22.32/22.32	365/365
龙州	广西	89.73/89.72	22.75/22.75	365/365
河池	广西	73.26/73.26	20.82/20.82	365/365
南宁	广西	77.40/77.40	21.70/21.70	365/365
北海	广西	78.62/78.62	23.06/23.06	365/365
梧州	广西	77.05/77.05	21.58/21.58	365/365
毕节	贵州	79.66/79.89	13.88/13.48	355.8/365
独山	贵州	80.20/80.33	15.79/15.48	358.7/365
盘县	贵州	74.65/74.96	14.74/14.46	359/365
桐梓	贵州	75.89/75.94	15.51/15.35	361.8/365
三亚	海南	76.55/76.55	25.38/25.38	365/365
海口	海南	79.53/79.53	24.49/24.49	365/365
承德	河北	61.64/58.47	15.41/8.35	251.7/365
蔚县	河北	53.11/53.10	15.23/8.47	256.3/365
张家口	河北	46.94/45.55	15.73/9.45	261.5/365
乐亭	河北	66.55/63.66	15.96/11.80	288.2/365
南宫	河北	62.05/6131	17.18/13.84	304.3/365
石家庄	河北	55.73/55.58	17.02/14.54	318.3/365
安阳	河南	67.27/66.70	16.56/13.95	315.2/365
卢氏	河南	69.08/68.24	14.93/12.81	320.7/365
郑州	河南	59.48/59.24	16.91/15.63	340/365
驻马店	河南	67.59/67.77	16.78/15.80	345.8/365
南阳	河南	69.24/69.17	16.57/15.69	347.3/365
固始	河南	74.49/74.65	16.67/15.90	349.7/365
嫩江	黑龙江	60.32/61.68	14.43/1.37	205.7/365
克山	黑龙江	62.79/64.98	14.84/2.56	211.5/365
铁力	黑龙江	68.99/69.84	14.72/2.55	215.8/365
漠河	黑龙江	69.95/67.28	11.76/-3.86	180.8/365
鹤岗	黑龙江	59.68/57.73	14.42/4.49	149/365
虎林	黑龙江	72.39/70.87	14.39/3.99	221.7/365
齐齐哈尔	黑龙江	57.09/58.49	15.65/4.55	222/365
哈尔滨	黑龙江	61.38/62.28	15.65/5.53	229.2/365
广水	湖北	69.47/69.54	16.93/16.31	308.5
老河口	湖北	72.93/72.91	16.65/16.24	356.7/365
荆州	湖北	75/75.04	17.29/17.01	359.5/365
武汉	湖北	71.07/71.03	18.00/17.84	360.2/365
巴东	湖北	71.98/71.99	17.62/17.59	364.5/365

城市	所在省	k_{RH+}	k_{T+}	k_{t+}
双峰	湖南	74.03/74.11	17.92/17.66	360.2/365
桑植	湖南	77.30/77.31	16.73/16.55	361.7/365
岳阳	湖南	73.25/73.36	18.31/18.09	361/365
永州	湖南	72.13/72.27	18.74/18.54	361.5/365
芷江	湖南	73.14/73.16	17.35/17.17	361.7/365
延吉	吉林	66.31/61.85	14.07/5.99	235.5/365
长春	吉林	60.22/60.43	15.68/6.48	235.2/365
通化	吉林	65.99/64.43	14.36/6.23	241/365
射阳	江苏	76.02/75.01	15.96/14.99	345.2/365
东台	江苏	79.35/78.76	16.39/15.49	346.8/365
南京	江苏	70.91/70.62	17.18/16.61	353.8/365
南昌	江西	70.21/70.25	18.79/18.69	363.2/365
景德镇	江西	72.89/72.87	18.46/18.53	364/365
玉山	江西	73.58/73.60	18.46/18.42	364.3/365
吉安	江西	79.36/79.37	19.21/19.19	364.8/365
赣州	江西	68.85/68.85	19.88/19.88	365/365
沈阳	辽宁	68.45/66.98	15.78/8.22	252.5/365
朝阳	辽宁	58.30/54.30	16.38/9.57	258.2/365
营口	辽宁	70.27/67.78	15.84/10.01	269.3/365
丹东	辽宁	76.87/71.84	14.54/9.42	272.3/365
大连	辽宁	70.59/67.65	14.80/11.34	299.2/365
博克图	内蒙古	61.79/61.48	12.44/0.09	193.2/365
满洲里	内蒙古	51.83/58.79	13.99/0.16	195.5/365
海拉尔	内蒙古	52.92/58.64	14.09/-0.12	196.2/365
新巴尔虎左旗	内蒙古	49.46/58.65	14.72/1.20	202.2/365
小二沟	内蒙古	62.73/62.02	13.80/0.87	203.2/365
林西	内蒙古	46.61/46.24	14.96/5.65	226.8/365
二连浩特	内蒙古	35.55/43.31	16.07/5.70	228.3/365
乌兰浩特	内蒙古	48.99/48.59	15.69/5.89	227.5/365
朱日和	内蒙古	38.67/44.21	15.37/6.03	230.7/365
海力素	内蒙古	34.53/42.81	15.06/5.92	232.8/365’
乌拉特中旗	内蒙古	27.02/33.32	17.61/10.04	259.5/365
开鲁	内蒙古	50.67/49.11	16.40/7.45	237.5/365
赤峰	内蒙古	48.50/46.49	15.80/8.16	246.8/365
呼和浩特	内蒙古	44.91/46.71	15.27/8.10	251.5/365
鄂托克旗	内蒙古	43.38/45.17	14.64/8.01	255.2/365
拐子湖	内蒙古	25.59/32.98	18.04/10.07	257.7/365
额济纳旗	内蒙古	27.02/33.32	17.61/10.04	259.5/365
东乌珠穆沁旗	内蒙古	44.39/51.43	14.87/2.75	209.5/365
锡林浩特	内蒙古	46.35/52.70	13.50/3.41	215.8/365
多伦	内蒙古	55.30/56.85	12.94/3.24	219.2/365
固原	宁夏	58.09/58.14	12.84/7.93	266.3/365

城市	所在省	k_{RH+}	k_{T+}	k_{t+}
银川	宁夏	48.15/49.95	15.11/10.29	279.2/365
班玛	青海	62.13/56.41	8.22/3.77	238.8/365
西宁	青海	59.09/56.84	11.26/6.14	354.5/365
兴海	青海	58.81/49.90	8.61/2.19	215.5/365
冷湖	青海	27.80/30.97	11.65/3.65	216/365
都兰	青海	43.04/41.27	9.84/3.72	227/365
茫涯	青海	43.04/41.27	9.84/3.72	227/365
小灶火	青海	32.40/33.46	11.88/5.27	236.2/365
刚察	青海	61.23/52.30	7.94/0.72	195.7/365
杂多	青海	59.68/51.75	7.77/2.04	210/365
沂源	山东	63.09/61.15	15.87/13.02	310.2/365
兖州	山东	88.63/85.27	16.18/14.08	324/365
济南	山东	57.25/56.47	17.01/14.78	324.5/365
威海	山东	65.08/64.34	15.18/13.16	323.7/365
青岛	山东	71.85/70.21	15.00/13.22	326.8/365
大同	山西	50.71/50.79	14.88/7.90	252.3/365
离石	山西	53.20/53.27	15.11/10.29	279.2/365
太原	山西	55.00/54.14	15.46/11.28	287.5/365
运城	山西	59.96/59.21	16.56/14.29	322/365
榆林	陕西	49.99/51.01	14.62/9.43	269.5/365
延安	陕西	56.70/55.85	15.06/11.07	289.8/365
西安	陕西	58.91/58.78	16.58/15.21	338.3/365
汉中	陕西	79.59/79.51	15.57/15.36	360.5/365
安康	陕西	73.40/73.33	16.10/15.98	362.5/365
宝山	上海	69.79/69.64	17.73/17.57	362/365
徐家汇	上海	72.29/72.26	18.04/18.01	365/365
若尔盖	四川	69.60/64.81	7.63/2.29	221.2/365
稻城	四川	57.29/53.05	8.43/5.59	273/365
甘孜	四川	57.81/53.61	11.61/6.62	286.3/365
康定	四川	70.09/70.49	9.88/7.81	304.3/365
马尔康	四川	59.97/58.49	10.43/9.23	329/365
平武	四川	70.62/70.58	15.22/15.13	363.3/365
巴塘	四川	43.24/43.20	13.59/13.55	364.2/365
西昌	四川	57.92/57.92	17.74/17.74	365/365
天津	天津	60.13/17.02	17.02/13.07	294.3/365
那曲	西藏	57.47/47.96	7.09/0.41	189.3/365
狮泉河	西藏	33.60/31.85	9.39/1.80	194.2/365
申扎	西藏	52.30/43.68	7.12/1.12	194.5/365
改则	西藏	40.58/34.29	8.41/1.49	195.2/365
定日	西藏	44.43/37.82	8.18/4.02	240/365
普兰	西藏	47.85/44.86	8.80/4.48	245.3/365
昌都	西藏	48.92/46.83	10.15/8.57	317.7/365

城市	所在省	k_{RH+}	k_{T+}	k_{t+}
波密	西藏	67.62/67.21	10.25/9.67	346.8/365
察隅	西藏	62.62/62.62	12.62/12.62	365/365
阿勒泰	新疆	49.41/57.43	14.83/4.95	230.3/365
塔什库尔干	新疆	37.71/42.57	17.33/10.77	268.8/365
克拉玛依	新疆	37.98/49.03	18.35/9.22	252.7/365
哈密	新疆	37.71/42.57	17.33/10.77	268.8/365
伊宁	新疆	56.95/61.38	15.09/10.34	283.2/365
若羌	新疆	35.81/40.03	17.86/12.49	282.2/365
库车	新疆	46.17/51.65	16.38/11.11	280.8/365
阿克苏	新疆	47.13/52.13	16.74/11.81	284.2/365
库尔勒	新疆	38.70/44.37	17.87/12.72	284.7/365
吐鲁番	新疆	31.17/35.03	21.2/15.93	291.5/365
民丰	新疆	33.71/37.51	17.06/12.74	293/365
喀什	新疆	40.43/45.57	17.41/13.28	295.5/365
和田	新疆	33.86/37.46	17.66/14.09	305.5/365
腾冲	云南	73.59/73.59	15.95/15.95	365/365
临沧	云南	67.28/67.28	18.37/18.37	365/365
大理	云南	64.79/64.79	15.68/15.68	365/365
丽江	云南	60.51/60.51	13.53/13.52	365/365
景洪	云南	76.60/76.60	22.91/22.1	365/365
元江	云南	65.62/65.62	24.14/24.14	365/365
昆明	云南	67.69/67.69	16.24/16.24	365/365
文山	云南	69.90/69.90	15.38/15.38	365/365
杭州	浙江	70.79/70.75	17.92/17.88	363.5/365
定海	浙江	75.21/75.16	17.25/17.21	364.3/365
丽水	浙江	68.80/68.81	19.09/19.08	364.8/365
玉环	浙江	78.18/78.16	17.96/17.94	364.8/365

附录 F 海洋环境作用代表值

F.0.1　中国近海大气温度代表值可按图 F.0.1 采用。

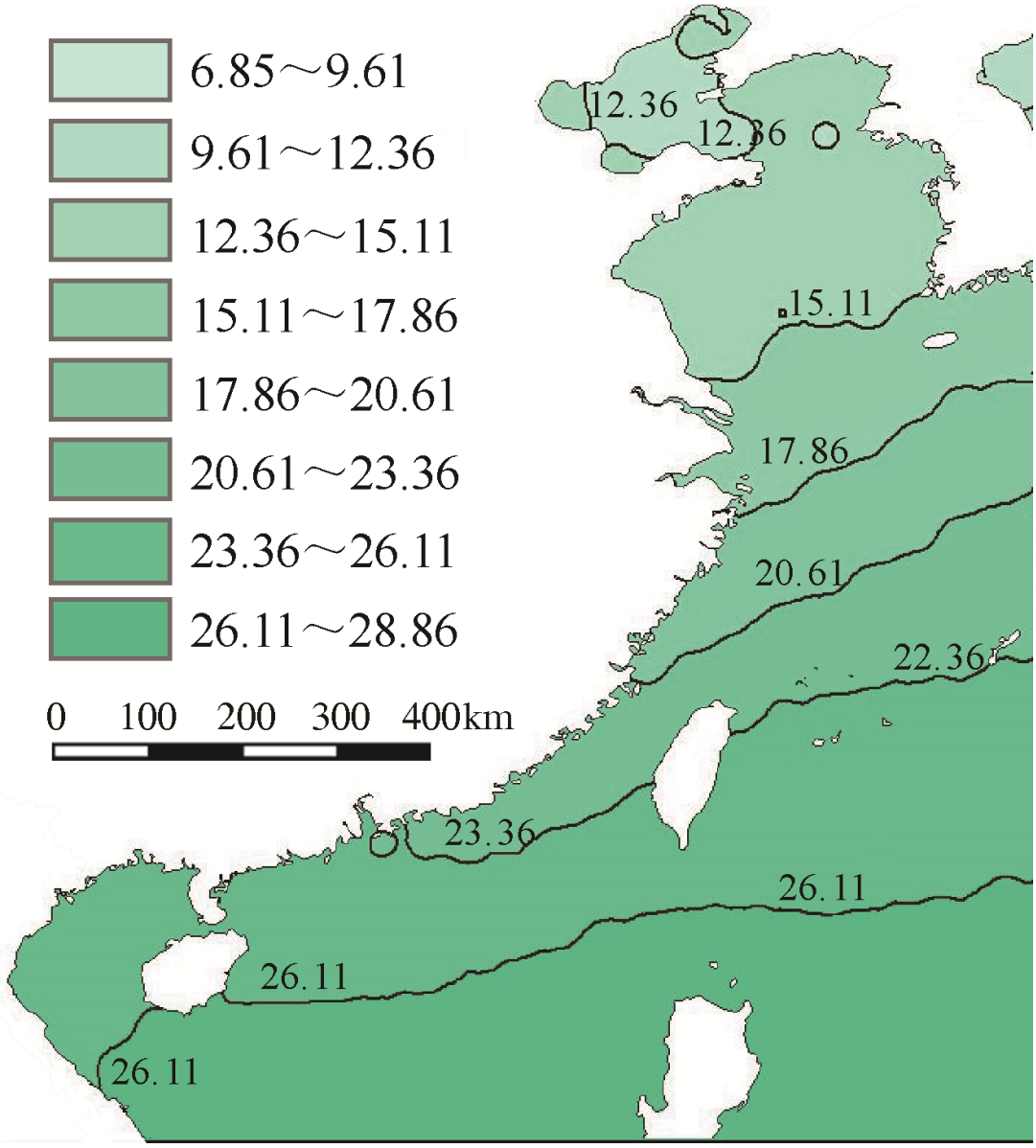

图 F.0.1 中国近海大气温度代表值分布（单位：℃）

F.0.2　中国近海大气相对湿度代表值可按图 F.0.2 采用。

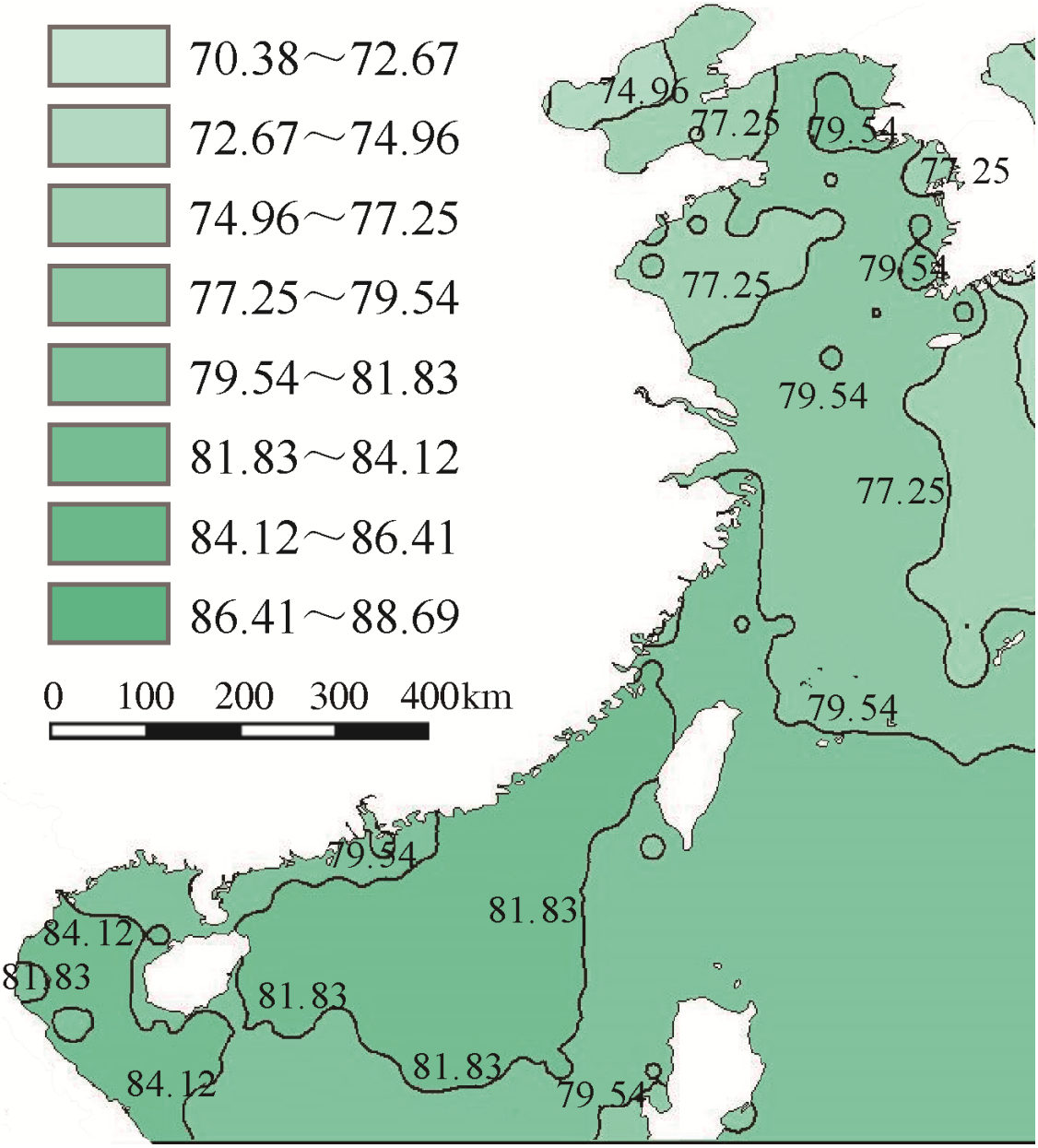

图 F.0.2 中国近海大气相对湿度代表值分布（单位：%）

F.0.3　中国近海表层水温代表值可按图 F.0.3 采用。

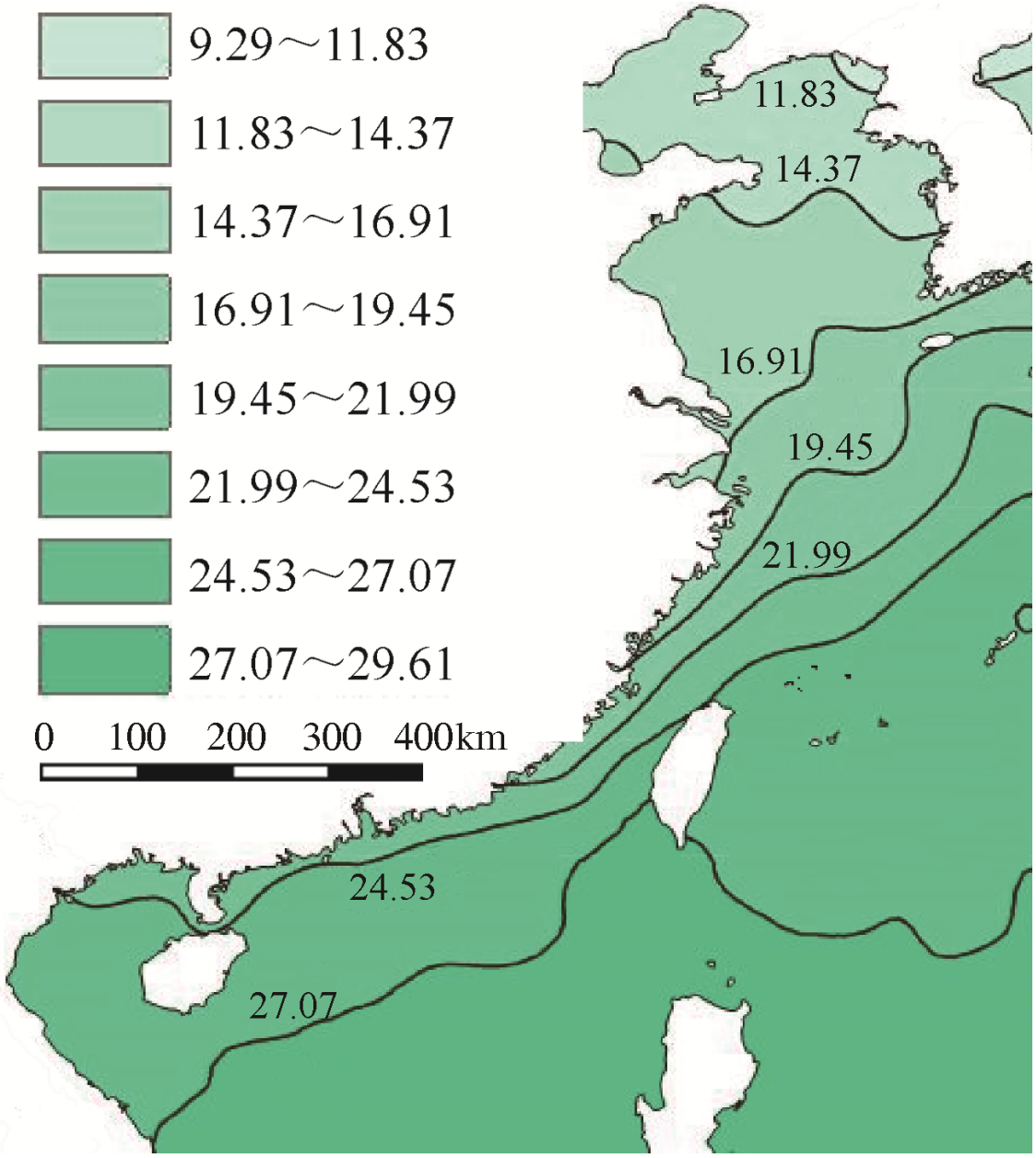

图 F.0.3 中国近海表层水温代表值分布（单位：℃）

附录 G 碳化深度计算模型

G.0.1 恒定环境作用下混凝土碳化深度可按下式计算：

$$X_{c,n} = f(T_n, RH_n, C_n) \cdot \sqrt{n - n_0}$$
$$= \begin{cases} 1.949 \cdot T_n \cdot (1 - RH_n)^{1.1} \cdot \sqrt{\dfrac{w/c - 0.34}{c}} \cdot \sqrt{C_n} \cdot \sqrt{k_{t+}} \cdot \sqrt{n - n_0}, & RH_n \geq 55\% \\ 1.471 \cdot T_n \cdot RH_n \cdot \sqrt{\dfrac{w/c - 0.34}{c}} \cdot \sqrt{C_n} \cdot \sqrt{k_{t+}} \cdot \sqrt{n - n_0}, & 0 < RH_n < 55\% \end{cases} \quad \text{(G.0.1)}$$

式中： n_0 —— 基准年年份（年），取混凝土结构开始服役当年；

n —— 服役至 n 年年份（年）；

w —— 单位体积（1 m^3）混凝土中水用量（kg/m^3）；

c —— 单位体积（1 m^3）混凝土中水泥用量（kg/m^3）；

k_{t+} —— 考虑负温影响的时间修正系数，按附录 E 附表 E.0.4 规定确定；

$X_{c,n}$ —— 服役至 n 年的碳化深度（mm）；

T_n —— 第 n 年的大气温度代表值（℃）；

RH_n —— 第 n 年的大气相对湿度代表值（100%）；

C_n —— 第 n 年的大气二氧化碳浓度代表值（ppm）；

$f(\cdot)$ —— 混凝土碳化系数函数。

附录 H 冻融损伤程度计算模型

H.0.1 冻融环境下混凝土的损伤程度可按下式计算：

$$d_n = 1 - \left[\left(1 - d_0\right)^{\beta+1} - \frac{\alpha(\beta+1)\sigma_{\max}^{\beta}}{E_0^{\beta}} N_n \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \tag{H.0.1}$$

式中： d_n —— 服役至 n 年的混凝土冻融损伤程度（100%）；

d_0 —— 混凝土的初始损伤程度（100%）；

β —— 材料参数，取$(\lambda-E_t/E_0)/(1-d_0-\lambda)$；

α —— 材料参数，取$(1-d_0-\lambda)/\varepsilon_t^{\beta}$；

λ —— 材料参数，取 $\sigma_t/(E_0\ \varepsilon_t)$；

σ_t —— 混凝土受拉应力−应变曲线上应变为 ε_t 时的应力（MPa）；

ε_t —— 混凝土发生损伤局部化之前的最大应变，对普通和高强混凝土，分别取为 80%和 90%抗拉强度对应的应变；

E_0 —— 混凝土的初始弹性模量（MPa）；

E_t —— 应变为ε_t时混凝土的切线模量（MPa）；

$\sigma_{\max}$ —— 一个冻融循环内由混凝土孔溶液冻结产生的最大静水压力（MPa）。

H.0.2 混凝土孔溶液冻结产生的最大静水压力可按下式计算：

$$\sigma_{\max} = 0.03 \cdot \theta \cdot \frac{\mathrm{d}w_{\mathrm{f}}}{\mathrm{d}T} \cdot \frac{\eta}{K} \cdot \Phi \tag{H.0.2}$$

式中： θ —— 降温速率代表值（℃/h）；

$\mathrm{d}w_{\mathrm{f}}/\mathrm{d}T$ —— 单位温度降下、单位体积水泥浆体内结冰的孔溶液体积（m^3/m^3/℃）；

η —— 孔隙溶液的动力粘滞系数（Pa·h）；

K —— 孔隙溶液在水泥浆中的渗透系数（m^2）；

r_b —— 气孔半径（m）；

$\bar{L}$ —— 平均气孔间隔系数（m）；

Φ —— 与气孔半径和平均气孔间隔系数相关的函数。

H.0.3 与气孔半径和平均气孔间隔系数相关的函数可按下式计算：

$$\Phi(r_b,\bar{L})=\left(\frac{\bar{L}^3}{r_b}+\bar{L}^2+\frac{5}{6}(\bar{L}+r_b)^2+\frac{1}{3}r_b^2-\frac{(\bar{L}+r_b)^3}{\bar{L}}\ln\frac{\bar{L}+r_b}{r_b}\right) \qquad \text{(H.0.3)}$$

式中： r_b —— 气孔半径（m）；

$\bar{L}$ —— 平均气孔间隔系数（m）。

附录 J 临界氯离子含量侵蚀深度计算模型

J.0.1　海洋环境下混凝土结构的临界氯离子含量侵蚀深度可按下式计算：

$$x_{\mathrm{crit}}=2\sqrt{\frac{k_{\mathrm{t}}'k_{\mathrm{c}}'k_{\mathrm{e}}'D_{\mathrm{ref}}\cdot\overline{T_n}\cdot t_{\mathrm{ref}}^{a}}{(1-a)\cdot T_{\mathrm{ref}}}e^{q\cdot\left(\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}+273}-\frac{1}{\overline{T_n}+273}\right)}\cdot\left(365\cdot\left(n-n_0\right)\right)^{1-a}}\cdot\mathrm{erf}^{-1}\left(\frac{c_{\mathrm{crit}}-c_0}{\overline{c_{\mathrm{s},n}}-c_0}\right)\quad(\mathrm{J.0.1})$$

式中：　n_0 —— 基准年年份（年），取混凝土结构开始服役当年；

n —— 服役至 n 年年份（年）；

a —— 龄期系数，按附录 J 表 J.0.1-1 规定确定；

c_0 —— 混凝土内部初始氯离子含量（占混凝土质量）（100%）；

c_{crit} —— 临界氯离子含量（占混凝土质量）（100%）；

$\overline{c_{\mathrm{s},n}}$ —— n_0 至 n 年混凝土表面氯离子含量代表值的平均值（100%）；

k_{t}' —— 修正系数，取为 1；

k_{c}' —— 混凝土养护条件影响系数，按附录 J 表 J.0.1-2 规定确定；

k_{e}' —— 环境条件影响系数，按附录 J 表 J.0.1-3 规定确定；

q —— 活化常数（K），按附录 J 表 J.0.1-4 规定确定；

t_{ref} —— 参考龄期（天），取为 28 天；

x_{crit} —— 临界氯离子含量侵蚀深度（mm）；

D_{ref} —— 参考龄期 t_{ref} 的混凝土扩散系数（m^2/s）；

T_{ref} —— 参考温度（℃），取为 20 ℃；

$\overline{T_n}$ —— n_0 至 n 年环境温度代表值的平均值（℃）；

$\mathrm{erf}^{-1}(\cdot)$ —— 误差函数的反函数。

表 J.0.1-1 龄期系数 a

胶凝材料 海洋环境	硅酸盐水泥	硅酸盐水泥+粉煤灰	硅酸盐水泥+矿渣	硅酸盐水泥+硅粉
水下区	0.3	0.69	0.71	0.62
潮汐、浪溅区	0.37	0.93	0.60	0.39
大气区	0.65	0.66	0.85	0.79

表 J.0.1-2 混凝土养护条件影响系数 k'_{c}

养护时间（天）	1	3	7	28	28 天以上
k'_{c}	2.08	1.50	1	0.79	0.79

表 J.0.1-3 环境条件影响系数 k'_{e}

胶凝材料/环境	硅酸盐水泥				矿渣			
	水中	潮汐区	浪溅区	大气区	水中	潮汐区	浪溅区	大气区
k'_{e}	1.32	0.92	0.27	0.68	3.88	2.70	0.78	1.98

表 J.0.1-4 活化常数 q

水胶比	0.4	0.5	0.6
活化常数 q（K）	6000	5450	3850

J.0.2　海洋环境下混凝土结构中钢筋表面处氯离子含量可按下式计算：

$$c_{\mathrm{s,stl}} = c_0 + (\overline{c_{\mathrm{s},n}} - c_0)\mathrm{erf}\left(\frac{x_{\mathrm{cov}}}{2\sqrt{\dfrac{k'_{\mathrm{t}}k'_{\mathrm{c}}k'_{\mathrm{e}}D_{\mathrm{ref}}\cdot\overline{T_n}\cdot t_{\mathrm{ref}}^{a}}{(1-a)\cdot T_{\mathrm{ref}}}e^{q\cdot\left(\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}+273}-\frac{1}{\overline{T_n}+273}\right)}\cdot\left(365\cdot(n-n_0)\right)^{1-a}}}\right) \quad \text{(J.0.2)}$$

式中：　$c_{\mathrm{s,stl}}$ —— 钢筋表面处氯离子含量（100%）；

x_{cov} —— 钢筋的混凝土保护层厚度（mm）；

erf(·) —— 误差函数。

J.0.3　参考龄期的混凝土扩散系数可按下式确定：

$$D_{\mathrm{ref}} = 10^{-12.06+2.4(w/b)} \tag{J.0.3}$$

式中：　w —— 每单位体积（1 m^3）混凝土的水用量（kg/m^3）；

b —— 每单位体积（1 m^3）混凝土的胶凝材料用量（kg/m^3）。

J.0.4　临界氯离子含量取值宜符合下列规定：

1 对于海洋环境大气区、浪溅区及潮汐区，临界氯离子含量取为0.07%；

2 对于海洋环境淹没区，临界氯离子含量取为 0.16%。

J.0.5　钢筋的混凝土保护层厚度应符合《混凝土结构设计规范》（GB 50010-2010）第 8.2.1 条以及《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476-2019）第 4.3.1 条规定。

本标准用词、用语说明

1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2）表示严格，在正常情况下均应该这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3）表示允许稍有选择，在条件允许时首先应该这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《混凝土结构设计规范》（GB50010-2015）

《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476-2019）

《既有混凝土结构耐久性评定标准》（GB/T 51355-2019）

《混凝土结构耐久性设计与施工指南》（CCES 01-2005）

条文说明

1 总 则

1.0.1 环境作用下混凝土结构会出现性能退化。评定结构的性能退化过程或状况，常称为耐久性评定。设计一结构能有效抵抗外部环境作用最大限度地维持使用，常称为耐久性设计。当前《混凝土结构设计规范》（GB50010-2015）、《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T50476-2019）及《既有混凝土结构耐久性评定标准》（GB/T 51355-2019）等标准或规范对混凝土结构耐久性评定及耐久性设计仍多基于经验方法。实际上，从定量分析的角度，“耐久性评定”和“耐久性设计”两个术语均不科学。到底耐多久？这个问题不回答无法做定量分析。故本标准采用“结构的服役性能评定”和“预期寿命的结构设计”来分别代替“耐久性评定”和“耐久性设计”。从定量分析的角度，要实现混凝土结构“服役性能评定”和“预期寿命设计”，环境作用及其效应的定量计算是前提。为实现这一初衷，编制本标准。

1.0.2 本条确定本标准的适用范围。当前对各类自然环境下普通混凝土结构的环境作用及其效应的认识相对深入，编制基础较好。对各类自然环境下轻骨料混凝土、纤维混凝土、蒸压混凝土等特种混凝土的环境作用及其效应的研究和认识相对较少，本标准暂未纳入。本标准不涉及工业环境下普通混凝土与特种混凝土结构的环境作用及其效应的计算。

1.0.3 本条明确了本标准与其他相关标准的关系。本标准主要制定了服役于一般环境、冻融环境、海洋环境、除冰盐等其他氯化物环境以及化学腐蚀环境中混凝土结构可能遭受的环境作用及其效应的确定

原则和定量计算方法，并同时提供了前三类环境的区划图，可实现这三类环境下混凝土结构遭受环境作用严重程度的定性评价。本标准没有覆盖到的环境作用，应执行其他相关标准。混凝土结构服役性能评定与预期寿命设计中涉及的环境作用及其效应的定量计算与环境作用等级定性评价，除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 《既有混凝土结构耐久性评定标准》（GB/T 51355-2019）将环境作用定义为：温度、湿度、二氧化碳、氧、酸、碱、盐等环境因素对结构的作用。《混凝土结构耐久性设计标准》（GBT50476-2019）将环境作用定义为：温、湿度及其变化以及二氧化碳、氧、盐、酸等环境因素对结构或材料性能的影响。这两种定义在一定程度上都包含了环境作用下结构内部的响应。类比荷载作用与荷载作用效应，本标准将环境作用与环境作用效应区分开来，因此将环境作用定义为引起混凝土结构性能退化的环境气候作用和侵蚀介质作用本身，不包含环境作用下混凝土结构或构件内部的响应。后者实际上是环境作用效应。

2.1.2 本术语旨在定义用于计算环境作用效应的环境作用量值。环境作用实际上具有明显的时间、空间变化性。对不同环境类别下不同尺寸的混凝土结构，为反映实际情况，环境作用应采用的时间尺度和空间尺度并不一样。例如，对于服役于化学腐蚀环境中的超长混凝土结构隧道，其化学腐蚀环境作用沿隧道纵深可能差异明显。因此，为考虑该差异，化学腐蚀环境作用代表值应基于构件表面尺度确定。对服

役于一般大气环境中的混凝土结构，在工程环境尺度上其遭受的环境作用较为一致。因此，混凝土结构的一般环境作用代表值可基于工程环境尺度确定，有必要时且条件许可时可对该值进行修正以考虑构件表面尺度上相关因素的影响。另外一方面，不同环境类别下，确定环境作用代表值所依据的时间尺度也不一致。例如，对于服役于一般环境中的混凝土结构，当环境作用效应计算考虑环境作用年变化性时，温度代表值可取年均值；当环境作用效应计算不考虑环境作用年变性时，温度代表值可取开始服役至今的年均温度值的平均值。对于服役于冻融环境中的混凝土结构，其冻融循环次数代表值应取服役至今的逐年累积值。综上，不同环境类别下，混凝土结构的环境作用代表值所依据的空间尺度和时间尺度并不统一，需具体情况具体分析。

2.1.3 本术语给出环境作用效应的定义。本标准定义的环境作用效应只包括引起混凝土材料和结构性能变化的环境作用响应。不同于荷载作用效应可与荷载作用一一对应，每个环境类别下的环境作用效应通常是该类别下多个环境气候和侵蚀介质共同作用的结果。例如，一般环境下的环境作用效应为混凝土碳化深度，通常是温度、相对湿度和二氧化碳浓度共同作用的结果。

2.1.5 本条术语定义，参考《中国地震动参数区划图》（GB 18306-2015）中关于“地震动参数区划”的定义。

2.1.11 当混凝土中钢筋表面氯离子含量达到一定量值时，钢筋的钝化膜脱钝，钢筋开始锈蚀。该氯离子含量定义为临界氯离子含量。

2.1.12 当有干湿交替时，对于氯离子外部侵入的情况，混凝土的氯离子含量由表及里可能先增加后降低。因此，临界氯离子含量既可能存在于上升段，也可能同时存在于下降段。亦即，可能同时存在两个临界氯离子含量位置。本条规定旨在取临界氯离子含量对应的较深位

置距离暴露表面的距离为临界氯离子含量侵蚀深度。

3　环境类别

3.0.1　表 3.0.1 中环境类别、名称及劣化机理参考《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476-2019）表 3.2.1、《混凝土结构耐久性设计与施工指南》（CCES01-2004）等标准确定。工业环境中化学物质种类多、浓度高、腐蚀性大，导致工业环境中混凝土结构的劣化问题亦非常普遍。为此，本标准在化学腐蚀环境中增设了一小类“化学腐蚀环境：工业腐蚀环境”。该小类的劣化机理为工业环境中酸、盐、碱等化学物质对混凝土的腐蚀以及二氧化硫、硫化氢等化学物质侵入混凝土引发的钢筋锈蚀。

3.0.2　当同时存在多种劣化机理时，应将混凝土结构暴露环境归为多类。当条件许可时，应该考虑多种环境类别下不同环境作用之间的耦合效应及其对各环境类别下环境作用效应的影响。当条件不许可时，应分别按各类环境考虑其环境作用及其效应。例如，对于西北地区的某混凝土结构，其可能同时遭受一般大气作用引起钢筋锈蚀和除冰盐中氯盐侵入引起钢筋锈蚀，其环境类别应归为一般环境和除冰盐等其他氯化物环境两类。当有成熟的考虑碳化影响的氯离子侵蚀深度计算模型时，在除冰盐等其他氯化物环境下，该混凝土结构的临界氯离子含量侵蚀深度计算应考虑一般环境下二氧化碳侵入引起的混凝土碳化的影响。当无成熟的考虑碳化影响的氯离子侵蚀深度计算模型时，应分别计算一般环境下主要环境作用及其效应和除冰盐等其他氯化物环境下主要环境作用及其效应。

4　环境区划

4.1　一般规定

4.1.1　环境区划图通常按照环境作用等级来划分，本标准将环境作用等级 1~3 级（“轻度”及以下）规定为仅需要按构造设计的情况，将环境作用等级 4~8 级（“严重”及以上）规定为需要定量计算环境作用及其效应的情况。

4.1.2　除冰盐等其他氯化物环境和化学腐蚀环境中的环境作用代表值依赖于具体工程实际环境情况，并不一定具有显著的地域分布特征，因此这两类环境的环境作用代表值应按实测数据确定，不便进行环境区划。

4.1.3　一般环境、冻融环境及海洋环境的环境作用有明显的地域分布特征，且相应的环境气候作用有较全面的历史数据，可方便制作这三类环境区划图。环境作用效应通常都是多个环境作用共同作用的结果，且并非简单的线性叠加。因此，仅依据环境作用代表值本身，无法对各环境类别下的环境作用严重程度进行区划。本标准采用环境作用效应值来进行环境作用严重程度区划。而环境作用效应与混凝土材料本身密切相关。为此，以水胶比为 0.45、胶凝材料用量为 400 kg/m^3 的混凝土为基准混凝土，根据附录 A 所述方法，本标准制定了一般环境、冻融环境和海洋环境下基准混凝土结构的环境作用区划图，用于混凝土结构环境作用等级的定性评价。

由于环境区划依赖于基准混凝土，当待建或待评价结构的混凝土与基准混凝土不一致时，严格意义上基于基准混凝土的环境区划图并不适用于待建或待评价混凝土结构，需根据附录 A 所述方法重新制

作环境区划图实现环境作用等级评定，或者直接计算其环境作用及其效应。但是，当待建或待评价结构的混凝土的水胶比比基准混凝土小时，前者的耐久性通常比后者要好，将基于基准混凝土的环境区划图应用于待建或待评价混凝土结构是偏安全的做法。

4.1.4 本条将环境作用按其对混凝土结构的影响程度定性地划分成8个等级，用数字1~8表述。对每类环境，其环境作用等级采用“类别符号”+“数字”表示。例如，环境作用等级A3，表示一般环境作用对混凝土结构的影响程度为“轻度”。

4.2 一般环境

4.2.1、4.2.2 本标准给出的附录B一般环境区划图是针对服役50年的基准混凝土结构。当服役年限大于50年时，基准混凝土结构的一般环境作用等级应在按服役年限50年确定的等级上再增加一级，且应根据环境条件按表4.2.2规定进行调整。

4.3 冻融环境

4.3.1、4.3.2 本标准给出的附录C冻融环境区划图是针对服役50年的基准混凝土结构。按附录C确定的基准混凝土结构的环境作用等级尚应按表4.3.1规定调整。当服役年限大于50年时，基准混凝土结构的冻融环境作用等级应在按服役年限50年确定的等级上再增加一级。

4.4 海洋环境

4.4.1、4.4.2 本标准给出的附录D冻融环境区划图是针对服役50年

的基准混凝土结构。按附录 D 确定的基准混凝土结构的环境作用等级尚应按表 4.4.1-1、4.4.1-2 规定调整。当服役年限大于 50 年时，基准混凝土结构的冻融环境作用等级应在按服役年限为 50 年确定的等级上再增加一级。

5　环境作用代表值

5.1　一般规定

5.1.1　表 3.0.1 按环境类别规定了混凝土结构所需考虑的环境作用。各环境作用会同时影响混凝土结构的环境作用效应。因此，针对每类环境，总结出环境作用，便于考察每类环境下混凝土结构的环境作用效应。

5.1.2　环境作用具有显著的空间和时间变化性。混凝土结构的环境作用代表值应该采用一定空间尺度和时间尺度上的特征值。但是，对不同环境类别下的不同环境作用，其代表值所依据的空间尺度、时间尺度以及所采用的特征值都并不完全相同，需根据具体情况具体分析。

5.1.3、5.1.4　环境作用具有显著的空间和时间变化性。理论上，环境作用的尺度越精细环境作用效应预测越准确。然而，一方面，尺度越精细环境作用越难获得或预测；另外一方面，环境作用采用越精细的尺度，环境作用效应计算模型的要求越高。因此，确定环境作用的规定空间尺度和规定时间尺度应考虑该尺度上环境作用的可获得性或可预测性，且应同时考虑采用该尺度确定的环境作用代表值与其相应环境作用效应计算模型或方法的匹配性。

5.1.5　不同环境类别下不同环境作用对混凝土结构产生的作用效应

机理并不完全相同。因此，不同环境作用代表值应取的空间尺度和时间尺度上的特征值并不一致。例如，对于冻融环境下的冻融循环次数代表值应取规定时间尺度上的累积值，对一般环境下的温度代表值应取规定时间尺度上的平均值。

5.1.6 实测数据最真实反映混凝土结构所遭受的环境作用。当有确切可靠实测数据时，环境作用代表值应根据实测数据确定。当无实测数据时，本章 5.2 至 5.5 节给出了各类环境下环境作用代表值的取值原则或方法。

5.2 一般环境

5.2.1 n 为 n 年年份数字，例如，2019、2020、2021 等。

5.2.1、5.2.2 大气环境温度作用具有显著的空间和时间变化特征。同济大学顾祥林教授团队通过统计我国 1976 年~2005 年 30 年间历史数据，提出了大气温度作用代表值计算方法，如式(5.2.1)和式(5.2.2)所示。该方法通过经度、纬度、海拔高度及热岛效应考虑空间变化性，通过温度作用年均值的年变化率、热岛强度年变化率考虑时间变化性。自 1976 年以来，全国气象站点累积数据全面，可方便用于环境作用分析与计算，因此本标准将环境作用基准年选为 1976 年。基于中国气象科学数据共享服务网（http://cdc.cma.gov.cn/），统计我国间距为 100 km 以上的 180 个气象站点 1976 年年平均气温值，回归分析得到 1976 年 a_0、a_1、a_2、a_3 的取值以及我国主要城市/郊区 T_0 和 ΔT_0 取值。统计全国 180 个城市及其郊区 1976~2005 年 30 年大气温度年均值变化规律，得到 k_{T} 和 $k_{\Delta\mathrm{T}}$ 的取值。为方便取用，以 1976 年为基准年的环境大气温度代表值计算参数列于附录 E 表 E.0.1~表 E.0.3 中。

（参考资料：

[1]徐宁,张伟平,顾祥林,黄庆华.混凝土结构空间多尺度环境作用研究[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(02):159-166.
[2]顾祥林,徐宁,黄庆华,张伟平.混凝土结构时间多尺度环境作用研究[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(01):1-7.
[3]徐宁,顾祥林,黄庆华,张伟平,金贤玉. 工程环境尺度上混凝土结构环境作用研究[A]. 中国土木工程学会、中国工程院土木水利与建筑工程学部、国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、北京工业大学.低碳经济与土木工程科技创新——2011 中国（北京）国际建筑科技大会论文集卷III[C].中国土木工程学会、中国工程院土木水利与建筑工程学部、国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、北京工业大学:中国土木工程学会,2010:8.
[4]徐宁,顾祥林,黄庆华,张伟平.混凝土结构环境作用研究方法[J].结构工程师,2010,26(02):162-167.）

5.2.3、5.2.4 *n* 为 *n* 年年份数字，例如，2019、2020、2021 等。大气环境相对湿度作用具有显著的空间和时间变化特征。同济大学顾祥林教授团队通过统计我国 1976 年~2005 年 30 年间历史数据，提出了大气相对湿度作用代表值计算方法，如式(5.2.3)和式(5.2.4)所示。该方法通过经度、纬度、海拔高度及干湿岛效应考虑空间变化性，通过温度作用年均值的年变化率、热岛强度年变化率考虑时间变化性。自 1976 年以来，全国气象站点累积数据全面，可方便用于环境作用分析与计算，因此本标准将环境作用基准年选为 1976 年。基于中国气象科学数据共享服务网（http://cdc.cma.gov.cn/），统计我国间距为 100 km 以上的 180 个气象站点 1976 年年平均相对湿度值，回归分析得到 1976 年 b_0、b_1、b_2、b_3 的取值以及我国主要城市/郊区 RH_0 和 ΔRH_0 取值。统计全国 180 个城市及其郊区 1976~2005 年 30 年大气相对湿度年均

值变化规律，得到 k_{RH} 和 $k_{\Delta RH}$ 的取值。为方便取用，以 1976 年为基准年的环境大气相对湿度代表值计算参数列于附录 E 表 E.0.1~表 E.0.3 中。

（参考资料：

[1]徐宁,黄庆华,张伟平,顾祥林.混凝土结构空间多尺度相对湿度值[J].土木建筑与环境工程,2012,34(01):35-41.

[2]徐宁,张伟平,顾祥林,黄庆华.混凝土结构空间多尺度环境作用研究[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(02):159-166.

[3]顾祥林,徐宁,黄庆华,张伟平.混凝土结构时间多尺度环境作用研究[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(01):1-7.

[4]徐宁,顾祥林,黄庆华,张伟平,金贤玉. 工程环境尺度上混凝土结构环境作用研究[A]. 中国土木工程学会、中国工程院土木水利与建筑工程学部、国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、北京工业大学.低碳经济与土木工程科技创新——2011 中国（北京）国际建筑科技大会论文集卷III[C].中国土木工程学会、中国工程院土木水利与建筑工程学部、国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、北京工业大学:中国土木工程学会,2010:8.

[5]徐宁,顾祥林,黄庆华,张伟平.混凝土结构环境作用研究方法[J].结构工程师,2010,26(02):162-167.）

5.2.5 *n* 为 *n* 年年份数字，例如，2019、2020、2021 等。虽然近些年来对大气中二氧化碳浓度关注度越来越高，但是工程环境尺度以及构件表面环境尺度上二氧化碳浓度数据依然匮乏。因此，本标准近似采取全局环境尺度下的二氧化碳浓度年均值作为二氧化碳浓度代表值。为此，根据中国青藏高原瓦里关大气本底基准观象台 1994 至 2014 年实测年均二氧化碳浓度数据，拟合得到式(5.2.5)。考虑到我国“双碳”

战略实施，近似假定 2060 年大气环境中二氧化碳浓度达到峰值，2060 年之后进入平台期。此外，因 1994 年以前相关数据缺乏，1994 年以前的大气二氧化碳浓度年均值取为与 1994 年一致。

（数据来源：吴昊.1990-2016 年瓦里关二氧化碳浓度瓶采样数据. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(www.ncdc.ac.cn), 2019.）

5.3 冻融环境

5.3.1 *n*、*i* 为 *n*、*i* 年年份数字，例如，2019、2020、2021 等。

5.3.2 *i* 为 *i* 年年份数字，例如，2019、2020、2021 等。依据自然冻融循环定义的方法来计算冻融次数工作量较大，且部分地区的逐时气象数据缺乏。同济大学李晔博士在铺面混凝土冻融环境量化研究中，利用气象资料中与冻融循环次数最密切的气温和日照辐射的逐时气象数据，对年冻融循环次数与最冷月平均气温及年平均日照辐射进行回归统计分析。分析表明，冻融循环次数与年日照平均辐射热相关性很小，与月均最小温度相关性显著。由此，获得年冻融循环次数与最冷月月均温度的关系，如式(5.3.2)所示。

（参考资料：

[1]李晔, 姚祖康, 孙旭毅等. 铺面水泥混凝土冻融环境量化研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 1408-1412.

[2]李晔. 铺面水泥混凝土抗冻设计指标研究[D]. 上海: 同济大学博士学位论文, 2003.）

5.3.3 *n* 为 *n* 年年份数字，例如，2019、2020、2021 等。降温速率代表值理论上应该先计算日降温速率值，然后计算日降温速率的年平均值。最后，考虑正负温交替对前一步计算的年均值进行修正。或者，找出每年的正负温交替日，计算日降温速率，然后对这些日降温速率

取平均值作为该年的降温速率代表值。为简化计算，本标准近似采用某年的日最大温度值和日最小温度值之差除以 12 小时作为该年的降温速率代表值。因此，这样计算的降温速率是偏大的，由此计算的冻融损伤程度也是偏大的。

5.4 海洋环境

5.4.1~5.4.3 根据国家海洋科学数据共享中心（http://mds.nmdis.org.cn）提供的我国近海累年逐季数据（数据计算点为 0.5°方区），应用 ArcGIS 地理信息处理软件，采用反距离权重插值方法，分别制作出我国近海年均大气温度分布图（附录 F 图 F.0.1）、年均大气相对湿度分布图（附录 F 图 F.0.2）以及年均表层海水水温分布图（附录 F 图 F.0.3）。

5.4.4 表面氯离子含量与外部环境条件以及混凝土本身材料孔隙等因素有关，各国学者都进行了相应的研究，并提出了许多参考值。当有可靠实测数据时，表面氯离子含量代表值应采用混凝土结构构件表面环境尺度上的年均值，且应考虑其年变化性。当无可靠实测数据时，可按表 5.4.4 确定。本标准表 5.4.4 中大气区表面氯离子含量代表值取为日本土木学会建议值 0.375%、Bamforth 建议值 0.25%和 DuraCrete 建议值 0.193%的最大值，即 0.375%。

浪溅区表面氯离子含量代表值可取为 Sagues 等建议值 0.75%、Bamforth 建议值 0.75%、Amey 等建议值 0.85%、欧洲 DuraCrete 建议值 0.582%、Bentz 等建议值 0.8%的最大值，即 0.85%。

潮汐区表面氯离子含量代表值可取为 Sagues 等建议值 0.75%、Bamforth 建议值 0.75%、Bentz 等建议值 0.8%的最大值，即 0.8%。

淹没区表面氯离子含量代表值可取为 Amey 等建议值 0.85%、欧洲 DuraCrete 建议值 0.77%的最大值，即 0.85%。

表 5.4.4 建议的表面氯离子含量代表值偏大，且未考虑年变化性，当用其进行环境作用效应计算时，将获得偏大的结果。

（参考资料：

[1] CCES01-2004. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

[2] MANGAT P S, MOLLOY B T. Prediction of long term chloride concentration in concrete [J]. Materials and Structures, 1994,27(7): 338-346.

[3] DuraCrete. Modelling of Degradation, EU-Project(Brite EuRam III) No. BE95-1347, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Strutures[R], vol. 4-5, 1998.

[4] THOMAS M D A, BENTZ E C. Life-365: Computer program for prediction the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides[M]. 2001.

[5] STEPHEN L A, DWAYNE A J, MATTHEW, et al. Predicting the service life of concrete marine structures:an environmental methodology[J]. ACI Structural Journal, 1998,95(1): 27-36.

[6] 钟丽娟. 混凝土盐雾加速侵蚀试验的相似性研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2010.

[7] THOMAS M D A， BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag[J]. Cement and Concrete Research, 1999(29): 487-495.

[8] 范志宏,杨福麟,黄君哲,等. 海工混凝土长期暴露试验研究[J]. 水运工程, 2005(9): 45-48,57.

[9] SAGUES A A, KRANC S C, PRESUEL-MORENO F, et al. Corrosion forecasting for 75-year durability design of reinforced structure [R]. Final Report No. BA502, Florida Department of Transportation, Talahasee, FL, USA, 2001.

[10] AMEY S L, JOHNSON D A, MILTENBERGER M A, et al., Predicting the service life of concrete marine structure: an environmental methodology [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(2): 205-214.

[11] BAMFORTH P. Definition of exposure classes for chloride contaminated environments. In: Page CI, Pbamforth, Figg J. eds [A]//Proceedings of the 4th SCI Conference on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction [C]. Cambridge: RSC for SCI, 1996, 176-190.

[12] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.

[13] 赵筠. 钢筋混凝土结构的工作寿命设计—针对氯盐污染环境[J]. 混凝土, 2004, (1): 3-21.

[14] 王伟. 氯离子环境下混凝土结构耐久性设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学土木建筑工程学院, 2006.

[15] 赵尚传. 基于混凝土结构耐久性的海潮影响区环境作用区划研究[J]. 公路交通科技, 2010,27(7): 61-64,75.

[16] 王命平,王冰,赵铁军,等. 沿海混凝土结构的环境盐雾分区研究[J]. 青岛理工大学学报, 2007,28(4): 1-6,10.

[17] 钟丽娟,黄庆华,顾祥林,等. 盐雾环境下混凝土中氯离子侵蚀加速试验的综述[J]. 结构工程师, 2009,25(3): 144-149.

[18] MCGEE R. Modeling of durability performance of tasmanian bridges[C]//Applications of Probability and Statistics Proceedings of the ICASP8 Conference. Rotterdam, 1999(1): 297-306.）

5.5 其他环境

5.5.1、5.5.2 当混凝土结构位于除冰盐等其他氯化物环境或化学腐蚀环境中时，如其同时位于“一般环境”、“海洋环境：大气区”或“海洋环境：淹没区”，那么温度和相对湿度作用代表值可按这些环境中相应规定取值。其他工况时，温度和相对湿度作用代表值应根据实测数据确定。表面化学物质含量代表值应该根据实测数据确定。

6 环境作用效应

6.1 一般规定

6.1.1 本标准定义的环境作用效应是指环境气候条件和侵蚀介质共同作用下可导致混凝土材料和结构性能变化的效应。根据劣化机理，表 3.0.1 总结了各类环境下混凝土结构的环境作用效应。环境作用效应值的大小可方便用于评价环境作用的严重程度或确定环境作用等级。

6.1.2 不同于荷载作用效应通常可与荷载作用一一对应，每个环境类别下的环境作用效应通常是该类别下多个环境作用的综合作用结果。

因此，计算单个环境类别下混凝土结构的环境作用效应时，应同时考虑该环境类别下多项环境作用。同一环境类别下或不同环境类别下，不同环境作用之间可能存在耦合效应，该耦合效应可对环境作用产生影响。例如，大气温度和湿度作用下的热-湿耦合效应可影响混凝土碳化过程，冻融循环次数导致的混凝土损伤也可影响混凝土碳化过程。当有成熟的可考虑不同环境作用之间耦合效应的环境作用效应计算模型时，可考虑该耦合效应对环境作用效应的影响。本标准 6.2~6.5 节分别给出了各类环境下混凝土结构环境作用效应的确定方法，但并未考虑不同环境作用之间的耦合效应。

6.1.3 本条给出了考虑环境作用代表值时变性的环境作用效应计算的一般方法。

（参考资料：

[1] Jiang C, Gu X L*, Huang Q H, Zhang W P. Carbonation depth predictions in concrete bridges under changing climate conditions and increasing traffic loads [J]. Cement and Concrete Composites, 2018(93):140-154.）

6.2 一般环境

6.2.3 本条给出了存在负温天数时一般环境下混凝土碳化深度计算方法。

（参考资料：

[1] 徐宁,张伟平,顾祥林,黄庆华.混凝土结构空间多尺度环境作用研究[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(02):159-166.

[2] 顾祥林,徐宁,黄庆华,张伟平.混凝土结构时间多尺度环境作用研究[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(01):1-7.

[3] DOU X J, HUANG Q H, GU X L, et al. A practical model to predict carbonation depth of concrete[C]. Proceedings of International Conference on Durability of Concrete Structures, Hangzhou, China, 2008: 308-312.）

6.3 冻融环境

6.3.1、6.3.2 冻融损伤模型取自清华大学蔡昊的学位论文。

气孔半径和平均气孔间隔系数应按 ASTM C 457-06 硬化混凝土气孔参数微观测试方法标准测试。

（参考资料：

蔡昊. 混凝土抗冻耐久性预测模型研究[D]. 北京: 清华大学, 1998.）

6.4 海洋环境

6.4.1 根据海洋环境下混凝土结构的劣化机理，提出临界氯离子含量侵蚀深度这个概念。根据临界氯离子含量侵蚀深度和钢筋的混凝土保护层厚度之间的相对大小，可方便评价海洋环境作用严重程度或评估海洋环境作用等级。

6.4.2 美国 ACI365 委员会（使用寿命预测委员会）组织开发的 Life-365 计算程序中，建议 28 天龄期的普通硅酸盐水泥混凝土的渗透系数可近似按式(J.0.3)计算。

（参考资料：

[1] THOMAS M D A, BENTZ E C. Life-365: Computer program for prediction the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides[M]. 2001.）

混凝土表面氯离子含量与临界氯离子含量是随外部环境条件以及混凝土本身材料孔隙等因素的变化而变化的，各国学者都进行了相应的研究，并提出了许多参考值。第 E.0.4 条给出的临界氯离子含量取值，是综合考虑 DuraCrete、洪定海、赵筠、王伟、赵尚传等人的建议值确定的。

（参考资料：

[1] DuraCrete. Modelling of Degradation, EU-Project(Brite EuRam III) No. BE95-1347, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Strutures[R], vol. 4-5, 1998.

[2] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.

[3] 赵筠. 钢筋混凝土结构的工作寿命设计－针对氯盐污染环境[J]. 混凝土, 2004(1): 3-21.

[4] 王伟. 氯离子环境下混凝土结构耐久性设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学土木建筑工程学院, 2006.

[5] 赵尚传,贡金鑫,水金锋. 氯离子环境下既有钢筋混凝土桥梁耐久性的概率分析[J]. 公路交通科技, 2006,23(7): 82-91.）