第 54 卷第 2 期
2026 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 2
February，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20250326

# 气候变化下强干燥地区混凝土收缩开裂损伤风险分析与区划

胡乔松，邹笃建，杨佳智，阙子超，张 明，刘铁军

(哈尔滨工业大学(深圳)智能学部，广东 深圳 518055)

**摘 要**：在全球气候变化背景下，高原等强干燥地区混凝土收缩开裂问题日益复杂。本工作利用气候模拟数据分析了全国温度–湿度–气压的耦合演化特征，在综合分析 4662 组混凝土收缩试验数据的基础上引入气压对湿度的影响，建立了考虑温度–湿度–气压耦合作用的 FIP 混凝土结构模型规范 2010 混凝土收缩修正模型，分析了全国混凝土收缩变形的时空演化特征，并以桥墩混凝土为例模拟研究了其应变–应力–损伤演化过程，形成了收缩开裂损伤风险的空间动态区划图。伴随着未来强干燥地区温度上升和湿度持续下降，混凝土收缩开裂损伤风险明显加剧，预计 2050 年中国强干燥地区中高风险区域扩大 15%以上。

**关键词**：气候变化；混凝土收缩；耐久性；强干燥地区；风险区划
**中图分类号**：TU528.57　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0700–19
**网络出版时间**：2026–01–23

混凝土作为现代基础设施的核心承重材料，其耐久性退化已成为制约工程服役寿命的关键因素[1, 2]。特别是在中国西部高原地区，极端干燥环境(RH <40%)、剧烈温度波动与低气压条件(<60 kPa)形成独特的多场耦合作用，基础设施混凝土呈现显著的收缩效应，导致开裂损伤加剧。在 $CO_2$ 浓度升高、全球变暖的背景下，混凝土结构的耐久性问题变得日益复杂，环境参数的时空演化可能会进一步加速混凝土结构的耐久性退化。因此，研究气候变化背景下混凝土收缩开裂损伤风险，可更好保障混凝土结构的长期稳定性和安全性[3–7]。

混凝土收缩作为非均匀体积变形过程，其物理机制涉及水化反应进程、孔隙结构演化与内部应力重分布的多尺度耦合作用[8–11]。在西部高原地区极端服役环境下，该过程具有显著的时变特性，低气压环境引发的孔隙水迁移加速效应以及与强干燥条件协同作用，导致混凝土收缩速率较平原地区提升 2 倍以上[12–17]。尤其当环境相对湿度降至 40%以下时，混凝土内部水分的蒸发加剧，孔隙中毛细管压力的下降，进而引发显著的体积收缩效应[18–20]。微观层面，收缩受限产生的拉伸应力超过混凝土极限抗拉强度，诱发界面过渡区微裂纹贯通[21–23]；宏观层面，构件累积收缩变形将导致预应力损失率超过限值，开裂损伤显著降低结构的疲劳寿命与荷载重分布能力[24–28]。因此，西部高原及周边等相对湿度低于 40%的地区可认为是典型的强干燥地区，混凝土的收缩开裂损伤最为严重。当前主流的混凝土收缩经验模型，如 FIP 混凝土结构模型规范 2010 (CEB-FIP 2010)、ACI 209-82 及 Eurocode 2 等，通过材料特性和环境条件，预测混凝土的收缩幅度及其发展进程[29]，然而多数模型未考虑温度、湿度及气压对混凝土收缩开裂的耦合影响，捕捉材料属性与收缩行为之间非线性关系，在高原工程应用中存在显著局限性。

全球气候正在发生显著变化[30]，极端天气事件发生频率与强度均呈现上升趋势，政府间气候变化专门委员会(IPCC)记录了全球气候趋势及其潜在影响[31]，IPCC 报告指出，2100 年全球平均气温可能会上升 1.5~4.5 ℃。强干燥地区环境温湿度的变化显著加速水分迁移的速率，从而影响混凝土的微观结构及其对外部环境的响应机制[32–35]。气候变化正重塑混凝土材料的耐久性损伤时空分布[36, 37]，进一

收稿日期：2025–04–23。　修订日期：2025–10–16。
基金项目：国家自然科学基金联合基金项目(U23A20658)；国家杰出青年科学基金(52025081)；国家自然科学基金面上项目(52378228)。
第一作者：胡乔松(1999—)，男，博士研究生。
通信作者：刘铁军(1976—)，男，博士，教授。

**Received date:** 2025–04–23.　**Revised date:** 2025–10–16.
**First author:** HU Qiaosong (1999–), male, Doctor candidate.
**E-mail:** 17371871656@163.com
**Correspondent author:** LIU Tiejun (1976–), male, Ph.D., Professor.
**E-mail:** liutiejun@hit.edu.cn

步加剧了高原交通设施混凝土的收缩损伤风险[38, 39]，使得混凝土收缩行为的预测更加困难和复杂[40−42]，必须充分考虑在未来长期服役期间，环境因素对混凝土收缩可能产生的影响。数值模型基于温度或湿度等要素建立相关影响系数，未纳入气压影响的修正项，尤其在高海拔地区低气压将显著加快孔隙水的蒸发速率，增大混凝土的收缩；此外模型的建立依赖历史数据和简化假设，往往只考虑环境因素的平均值或稳定变化趋势，忽视了温度和湿度在月度乃至年度尺度上的动态演化，其有效性在应对气候变化条件时受到限制[43, 44]；另外，针对相对湿度低于 40%的强干燥环境特性[45−50]，无法准确模拟混凝土收缩的实际情况。亟须在现有收缩模型基础上考虑更大环境参数范围。

本文基于气候变化背景，分析未来中国特别是强干燥地区的环境因素变化趋势及相互关系，考虑温度–湿度–气压的耦合作用对混凝土收缩性能影响，评估并改进 CEB-FIP 2010 混凝土收缩模型，计算中国 2020—2050 年混凝土收缩应变及其分布演化趋势，研究了在变化气候条件下典型桥墩混凝土的收缩开裂风险及其空间区划。研究框架如图 1 所示：1) 分析高原地区混凝土温度–湿度–气压耐久性关键参数的耦合变化特征；2) 结合气候和材料参数，评估并改进混凝土收缩模型；3) 构建有限元模型分析不同收缩状态下桥梁混凝土的应力及损伤模式，建立气候变化背景下混凝土收缩风险区划并分析其演化趋势。通过结合气象数据、混凝土性能指标和统计方法，本工作旨在为更准确评估收缩对混凝土开裂影响提供有效方案。

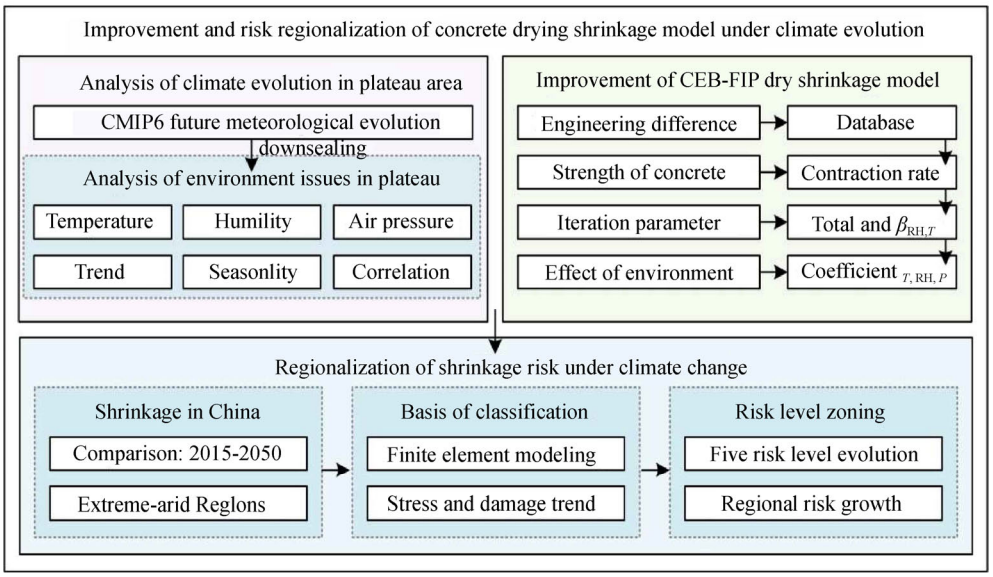



图 1　研究框架

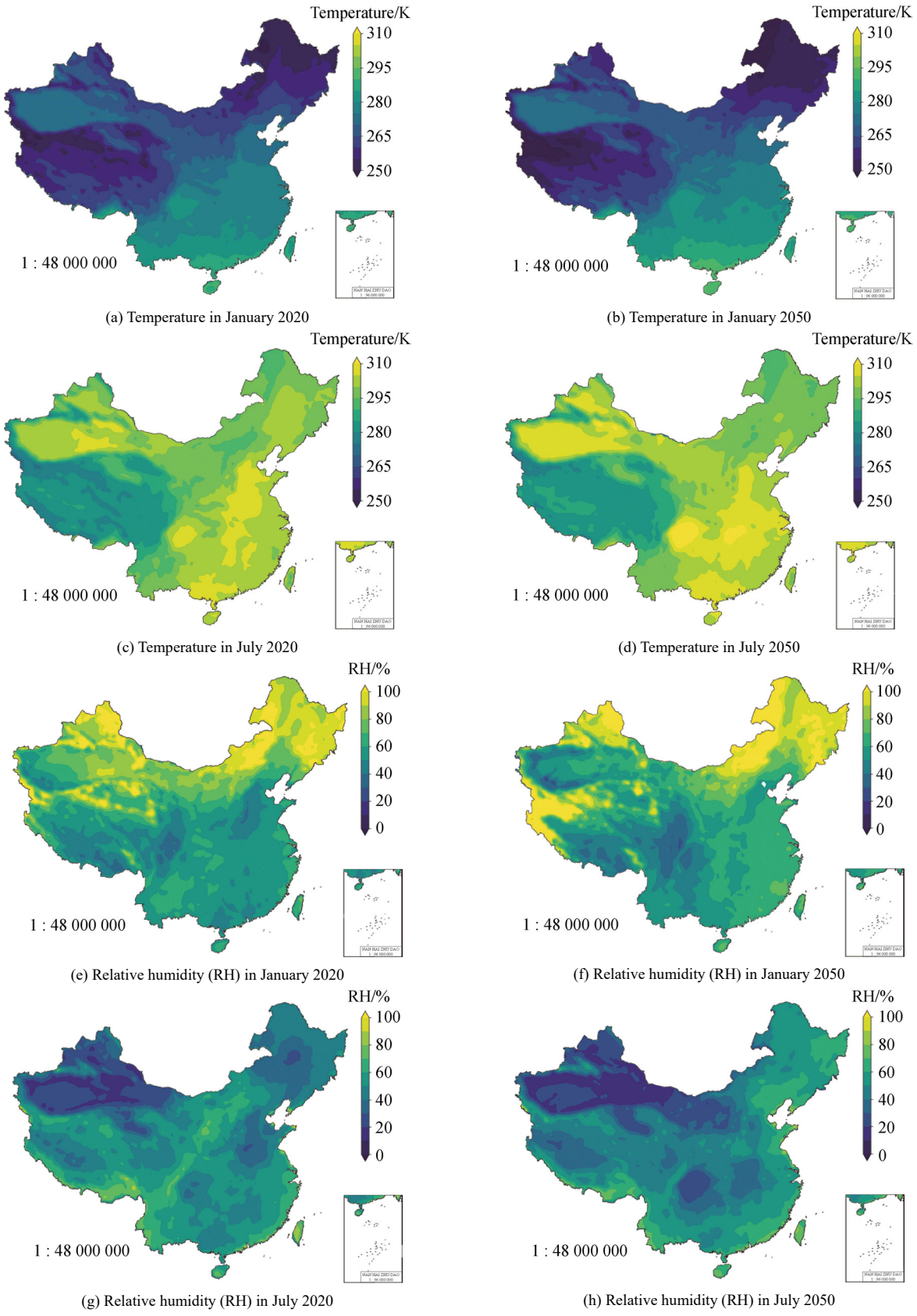
Fig. 1　Research Framework

# 1　气候演化分析

## 1.1　温湿度变化趋势

耦合模式比较计划第 6 阶段 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6，CMIP6)作为当前最权威的全球气候模式体系，为气候变化预测提供了可靠的科学基础[51]。该计划指出，全球气温预计将在 21 世纪继续升高，高纬度地区和高原区域温度上升尤为显著。与温度相比，湿度的变化具有更多的不确定性，但整体趋势表明，热带和亚热带地区的湿度会随着降雨增多而升高，而部分干燥地区夏季可能面临更加严峻的湿度降低局势。因此，高原等强干燥地区将面临温度升高和湿度降低的耦合效应，并且高海拔地区气压较低，加速水分蒸发效应，造成更严重的混凝土收缩问题。本工作首先结合中国气候模式，对影响混凝土收缩最明显的近地温度、相对湿度与大气压强 3 类环境要素的耦合演化进行分析。

为提高气候变化预测的精度和考虑温度–湿度–气压协同作用，采用中国科学院大气物理研究的高分辨率海表温度月度预测模型(CASFGOALS-f3-HhighresSST-futurer1i1p1f1Amon)[52]，构建 0.25°的高分辨率大气和陆地网格数据，假设高强迫温室气体排放路径(RCP)，模拟海洋与大气之间的相互作用。选择近地表温度、相对湿度与气压 3 个环境参数时空演化信息，对数据进行异常值剔除和平滑处理。采用三次插值(Cubic Interpolation)[53]对数据在




(a) Temperature in January 2020

(b) Temperature in January 2050

(c) Temperature in July 2020

(d) Temperature in July 2050

(e) Relative humidity (RH) in January 2020

(f) Relative humidity (RH) in January 2050

(g) Relative humidity (RH) in July 2020

(h) Relative humidity (RH) in July 2050

图 2 中国地区 2020 年与 2050 年温湿度分布图(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制，地图批准号：GS (2016)1595，底图未变动)

Fig. 2 Temperature and humidity distribution maps of China in 2020 and 2050 (Based on a map of the People's Republic of China by the State Bureau of Surveying and Mapping Standard Map Service Website, Map Approval Number: GS (2016)1595. The base map remains unaltered)

空间上进行连续性处理，其函数表达式如式(1)所示，对于给定的插值区间，通过解线性方程组求解。三次插值相较于线性插值，具有更好的平滑性，提高了数据的空间分辨率，确保其能够与更精细的地理模型对接，更适用于具有连续变化的气候时空演化数据集。此外，应用基于正态分布核函数的高斯滤波[54]对数据进行加权平均，去除数据中的噪声和异常值，保持整体趋势和预测的一致性。建立具有钟形曲线的权重函数作为高斯核，由标准差($\sigma$)控制形状。对于空间分布的二维数据，定义高斯核函数如式(2)，对于给定的输入数据 $d(x, y)$，通过卷积运算式(3)进行高斯滤波，将高斯核 $g(x, y)$与数据 $d(x, y)$在整个数据范围内进行加权平均来得到平滑后的结果 $d'(x, y)$，由于气象数据以离散网格点形式分布，修改卷积形式以式(4)表示。处理后的中国近地面温湿度变化的 30 年预测结果如图 2 所示。

$$f(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \tag{1}$$

$$g(x,y) = \exp[-(x^2 + y^2) / (2\sigma^2)] / \sqrt{2\pi\sigma^2} \tag{2}$$

$$d'(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(i,j) \times d(x-i, y-j)\mathrm{d}i\mathrm{d}j \tag{3}$$

$$d'(x,y) = \sum_{i=-N}^{N}\sum_{j=-N}^{N} g(i,j) \times d(x-i, y-j) \tag{4}$$

式中：$f(x)$是 3 次插值的函数表达式，$a_0$、$a_1$、$a_2$、$a_3$ 为多项式系数；$x$、$y$ 是函数自变量，应用中为地理空间信息数据；$i$ 是当前位置的索引；$j$ 是与当前位置 $i$ 相邻的数据点；$N$ 是滤波器的半宽度。

与 2020 年冬季和夏季的情况相比，2050 年整体气温显著上升，北部寒冷地区的范围缩小。2050 年 7 月，部分地区气温甚至超过 305 K(32 ℃)，显示出更为极端的高温趋势。未来冬季，南部和中部地区相对湿度略有上升，而西部与北部的干燥地区向周边扩展。未来夏季，气温上升引起的大气水汽蒸发加剧，相对湿度相较于冬季略有下降。如表 1 所示，2020 年与 2050 年温湿度的南北季节变化对比表明，未来 30 年内，温湿度的相互作用可能加剧干燥、热浪等极端天气事件，尤其是在强干燥地区。

**表 1　不同时间和季节的温湿度比较**

**Table 1　Comparison of temperature and humidity at different times and seasons**

| Time | Area | Temperature | Relative humility |
|---|---|---|---|
| 2020.01 | North | 250–270 K (–23 – –3 ℃) | <50% |
| | South | 275–290 K (2–17 ℃) | High |
| 2050.01 | North | Generally rise 2–5 K than 2020 | Areas'<40% increased |
| | South | | Increased than 2020 |
| 2020.07 | North | 290–300 K (17–27 ℃) | < 50% |
| | South | >300 K (>27 ℃) | High |
| 2050.07 | North and South | Rise, some' > 305 K (above 32 ℃) | Dry areas expanded |

### 1.2　温湿度耦合演化分析

通过对全国近地温度与相对湿度气象预测数据的分析表明，中国高纬度及高海拔地区呈现出显著的强干燥气候特征，常年相对湿度长期处于较低状态，且随时间湿度更加降低。除结冰状态(相对湿度> 100%)外，大部分地区的相对湿度常年低于 60%，部分区域甚至低于 40%。混凝土的收缩行为受水分蒸发速率、温度波动以及湿度变化的综合影响，当相对湿度长期低于 40%时，混凝土表面水分的再吸湿能力受到严重抑制，从而加剧了干燥收缩的发生。在中国高原地区，30 年时间尺度上温度升高，不仅直接加速了水分蒸发的物理过程，还间接导致环境相对湿度的进一步下降，形成温湿度联动作用，加剧混凝土的收缩效应。

为探究温湿度的关联特征，本研究采用皮尔逊相关系数[55]、斯皮尔曼相关系数[56]和互信息[57] 3 种统计方法，分别通过式(5)、式(6)和式(7)计算，衡量温度与湿度之间的线性关系、单调关系及非线性依赖程度。结果如表 2 所示，在强干燥区域，皮尔逊和斯皮尔曼相关系数均接近 –0.9，表明温度与湿度之间存在极强的负线性及单调关系，而互信息值接近 0.9，进一步验证了两者之间高度的统计依赖性。相较而言，中部和南部地区的相关系数和互信息值略低，这可能与地形复杂性和局部季风气候调节效应有关。然而，总体趋势表明，气温升高会导致湿度急剧下降，尤其是在高原地区。未来气候变化可能进一步加剧这些区域的湿度失衡，使强干燥地区扩增，收缩值增大。

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \tag{5}$$

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n\times(n^2-1)} \tag{6}$$

$$I(X;Y) = \sum_{x\in X}\sum_{y\in Y} p(x,y)\times\log\left[\frac{p(x,y)}{p(x)\times p(y)}\right] \tag{7}$$

式中：$r_{xy}$是皮尔逊相关系数，用于衡量变量 $x$ 与 $y$ 之间的线性相关程度；$r_s$ 是斯皮尔曼相关系数，用于评估两变量之间的单调关系强度；$I(X;Y)$是互信息，反映变量 $X$ 与 $Y$ 之间的非线性统计依赖程度；$x_i$ 和 $y_i$ 分别是变量 $X$ 与 $Y$ 在第 $i$ 个样本点的观测值；$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 是 $X$ 与 $Y$ 的样本均值；$d_i$ 是在样本点 $i$ 处的排名差；$n$ 是样本数量；$p(x,y)$是变量的联合概率分布；$p(x)$、$p(y)$分别是变量的边缘概率分布。

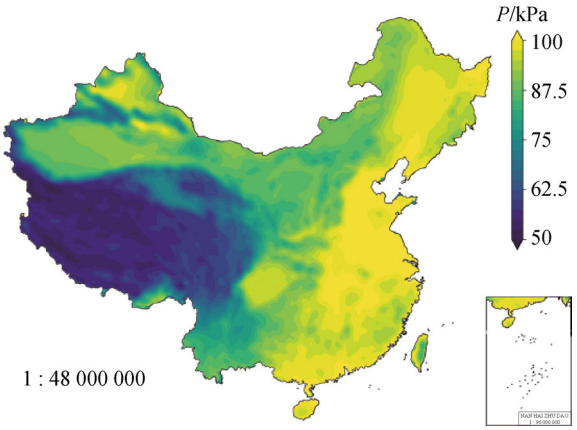
**表 2 温度和湿度演变的相关分析**

**Table 2 Correlation analysis of temperature and humidity evolution**

| Statistical Tool | North of 45°N | Central and Southern | Description |
|---|---|---|---|
| Pearson correlation | –0.9 | –0.6 – –0.7 | Strong negative correlation |
| Spearman correlation | –0.9 | –0.6 – –0.7 | Strong negative correlation |
| Mutual information | 0.9 | 0.6 – 0.7 | Very strong dependency |

### 1.3 大气压强变化趋势

与温度和湿度表现出显著的年际和季节性变化不同，大气压强的空间分布在时间尺度上呈现较高的稳定性，更多受到地形和气候系统影响的显著作用，如图 3 所示。2020—2050 年间，中国地表气压预测值大部分时间维持在 50~100 kPa 的范围内，且各年份之间气压分布模式高度一致。青藏高原地区因地势高耸，气压值始终维持在 50~60 kPa 区间。西北干旱区(如塔里木盆地)气压值稳定在 75~85 kPa，与东部沿海地区(85~100 kPa)形成鲜明对比。年际变化幅度普遍小于 5%，表明长期气候变化对地表气压的直接影响有限。气压分布的核心差异源于地形与气候系统的耦合作用，青藏高原作为全球海拔最高的区域，持续表现为低气压中心；西北干旱区则受到西风带下沉气流的影响，形成稳定的高气压带；东部沿海则由于海陆热力差异呈现梯度分布。大气压强在中国强干燥地区表现出“高空间分异性、低时间波动性”的特征。




*P* is pressure.

图 3 中国地表气压时空分布(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制，地图批准号：GS (2016)1595，底图未变动)

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of surface pressure in China (Based on a map of the People's Republic of China by the State Bureau of Surveying and Mapping Standard Map Service Website, Map Approval Number: GS (2016)1595. The base map remains unaltered)

## 2 收缩模型改进

### 2.1 模型对比

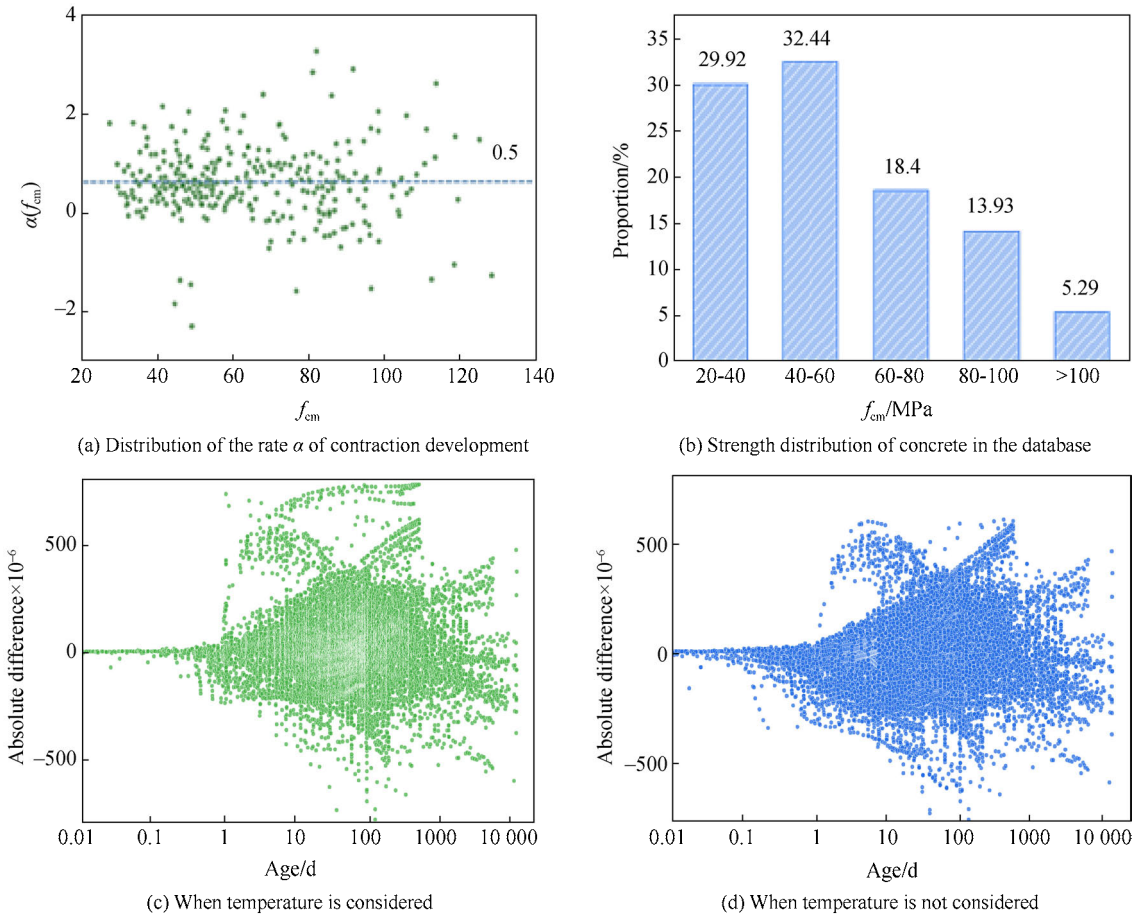
在高原这一典型的强干燥地区，桥梁工程普遍采用设计使用寿命长、强度等级高的混凝土材料。现有的收缩经验模型主要基于实验室条件下的一般混凝土强度和标准温湿度环境下的试验数据，在预测强干燥地区高强度桥梁混凝土的长期收缩行为时存在显著的偏差。为更准确地评估该环境下混凝土结构的收缩应变，必须系统考虑环境适应性、材料特性等因素的影响。在现有的收缩预测模型中，CEB-FIP 2010[58]相较于 ACI209[59]、RILEM B3[60]、GL2000 [61]和 AASHTO[62]等收缩模型，侧重于在计算中考虑更多环境因素影响，如表 3 所示。这一特点使其在评估不同环境条件下混凝土收缩性能时表现优越，尤其适用于研究温湿度变化对桥梁混凝土期收缩的影响[63]。然而，现有收缩模型普遍未考虑气压对混凝土性能的潜在影响，在高原强干燥环境中低气压可能会进一步加剧混凝土的水分蒸发与微观孔隙演变，影响其收缩行为。

在现行 CEB-FIP 2010 模型中，收缩发展速率参数($\alpha$)通常被设定为固定值 0.5。然而，这种固定值的设定并未充分考虑混凝土材料特性的变化，尤其是在高强度混凝土结构中，收缩速率随抗压强度的提高呈现出一定的变化。如图 4a 所示收缩发展速率与混凝土强度关系，通过分析最新的 Bazant 收缩试验数据库以及部分高原环境混凝土收缩试验数据[64]，以 $\alpha(f_{cm})$取 0.5 为界的上下侧数据分布并非呈现出一致性趋势。此外，从图 4b 所示的数据库混凝土强度分布情况来看，随着更多高强度混凝土试验数据的引入，$\alpha$ 和混凝土抗压强度($f_{cm}$)之间表现出明显

表 3　收缩模型的参数对比

**Table 3　Comparison of the parameters of the contraction model**

| Condition | Influencing factors | CEB-FIP 2010 | ACI209 | RILEM B3 | GL 2000 | AASHTO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Internal | Type of cement | | | | | |
| | Aggregate-cement ratio | | | | | |
| | Content of cement | | √ | | | |
| | Density of concrete | | | | | |
| | Fine aggregate | | | | | |
| | Content of air | | √ | | | |
| | Water consumption | | | √ | | |
| | Degree of slump | | √ | | | |
| | Component shape | √ | √ | √ | √ | √ |
| External | Age of loading | | | | | |
| | Age of drying | | √ | √ | | |
| | Age of contraction | √ | √ | √ | √ | √ |
| | Loading stress level | | | | | |
| | Loaded strength | √ | | | | √ |
| | 28 days strength | | | √ | √ | |
| | Thickness | √ | √ | √ | | √ |
| | Modulus of elasticity | | | | | |
| | Relative humidity | √ | √ | √ | √ | √ |
| | Ambient temperature | √ | | | | |




(a) Distribution of the rate $\alpha$ of contraction development

(b) Strength distribution of concrete in the database

(c) When temperature is considered

(d) When temperature is not considered

Note: $\alpha(f_{cm})$ is the development rate parameter of shrinkage; $f_{cm}$ is compressive strength of concrete.

图 4　试验数据集与现有 CEB-FIP2010 模型分析

Fig. 4　Analysis of the test data set and the existing CEB-FIP 2010 model

的负相关。进一步分析原始模型预测值与实际测量值之间的误差，如图 4c 和图 4d 所示，现有 CEB-FIP 2010 模型在收缩预测方面存在显著的高估倾向，高估比例多于低估 10%左右。这一现象与模型在高强度混凝土条件下采用较高的固定收缩发展速率值相一致。此外在考虑温度影响时，高估现象更加明显，表明现行模型未能准确刻画温度对收缩发展的调制效应。为提升模型预测精度，有必要对相关参数进行迭代优化，调整温度影响权重。

### 2.2 收缩发展速率改进

为提高收缩模型对高原桥梁混凝土的预测准确性，首先参考 Pan 等[65]提出的改进策略，对收缩发展速率参数 $\alpha$ 进行优化调整。基于最新的试验数据库，从 4662 个试验样本中筛选出符合环境条件与材料特性要求的数据。选取的 $f_{cm}$ 范围为 20~140 MPa，相对湿度(RH)控制在 20%~100%，涵盖了中国沿海至高原地区的典型环境与材料工况。在此基础上，通过分析不同条件下混凝土的实测收缩值及相应收缩龄期，计算每个试验样本的 $\alpha(f_{cm})$。为了进一步定量描述 $\alpha(f_{cm})$关系式，采用式(8)所示的线性回归方法进行拟合，并基于 CEB-FIP 规范构建改进的收缩模型，其数学表达式如式(9)所示，该模型假设总收缩应变由自收缩应变和干燥收缩应变 2 部分组成。

$$\alpha(f_{cm})= \alpha \times f_{cm} + b \tag{8}$$

$$\varepsilon_{sh}(t,t_s) = \varepsilon_{auto}(t) + \varepsilon_{dry}(t,t_s) \tag{9}$$

$$\varepsilon_{dry}(t,t_s) = [(220+110\alpha_{ds1})\times\exp(-\alpha_{ds2}f_{cm})]\times \beta_{RH}\times\left[\frac{(t-t_s)}{0.035h^2+(t-t_s)}\right]^{\alpha(f_{cm})}\times10^{-6} \tag{10}$$

$$\varepsilon_{auto}(t) = -\alpha_s\times\left(\frac{f_{cm}}{0.6+f_{cm}}\right)^{2.5}\times\left(1-e^{-0.2\sqrt{t}}\right) \tag{11}$$

$$h = \frac{2A}{U} \tag{12}$$

$$\beta_{s1} = \min\left[\left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0.1},1\right] \tag{13}$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55\times\left[1-\left(\dfrac{RH}{100}\right)^3\right] & (RH < 99\times\beta_{s1}) \\ 0.25 & (RH \geqslant 99\times\beta_{s1}) \end{cases} \tag{14}$$

式中：$a$、$b$ 为线性回归计算式系数；$\varepsilon_{auto}$、$\varepsilon_{sh}$、$\varepsilon_{dry}$ 分别是自收缩、总收缩机干燥收缩；$\alpha_{ds1}$ 和 $\alpha_{ds2}$ 为材料相关系数，具体取值见 CEB-FIP 2010 规范；$t$、$t_s$ 分别为总时间与养护时间(d)，两者差值作为干燥收缩产生时间；$\beta_{RH}$ 为湿度相关系数；$h$ 为几何参数，定义有效厚度，mm；$A$ 为构件截面积，mm²；$U$ 为暴露周长，mm；$\beta_{s1}$ 表征水泥活性影响。

通过考虑 $f_{cm}$、$h$、RH 和时间 $t$，计算其收缩应变，并通过实验数据中的收缩值计算出 $\alpha$。认为干燥收缩试验值 $\varepsilon_{dry_test}$ 收缩试验值 $\varepsilon_{test}$ 与 $\varepsilon_{auto}$，如式(15)所示，通过变化得到 $\alpha$ 表达式如式(16)所示。

$$\varepsilon_{dry_test} = \varepsilon_{test} - \varepsilon_{auto}(t) \tag{15}$$

$$\alpha = \frac{\ln\left[\left|\dfrac{\varepsilon_{dry_test}}{(220+110\alpha_{s1})\times\exp(-\alpha_{s2}f_{cm})\times\beta_{RH}}\right|\right]}{\ln\left(\dfrac{t-t_s}{0.035h^2+t-t_s}\right)} \tag{16}$$

分析数据库中试验值的 $\alpha$ 分布，如图 5a 所示，$\alpha$ 的计算值呈现出较大的波动，未表现出明显规律。这种离散性可能源于实验条件的差异、材料组成的变化以及环境因素的影响。为提高数据的可靠性，剔除异常值并计算实验数据的平均值，减少其他非关键因素所导致的波动，经过数据处理后 $\alpha$ 随着 $f_{cm}$ 的变化呈现出有规律趋势。如图 5b 所示，$\alpha(f_{cm})$ 分布更加集中，大部分数据点落在–1~3 的范围内，表明 $\alpha$ 与 $f_{cm}$ 主要趋势呈现一定线性关系，基于线性回归分析，$\alpha(f_{cm})$关系如式(17)所示。该拟合结果表明，随着混凝土抗压强度的提高，收缩发展速率参数 $\alpha$ 呈下降趋势，即高强混凝土的干燥收缩速率较低。

$$\alpha(f_{cm}) = -0.0013f_{cm} + 0.64 \tag{17}$$

Pan 等[65]针对收缩速率参数的改进模型尚未明确考虑温度影响。然而，温度变化对混凝土内部与外部相对湿度的波动以及抗压强度的演化具有显著作用，因此在收缩预测中忽略这一因素可能导致偏差。鉴于此，在改进模型时需进一步引入温度修正，以提高其适用性和预测精度。结合当前 CEB-FIP 2010 规范模型，在模型中增加温度修正后的湿度相关系数( $\beta_{RH,T}$ )、温度修正后的抗压强度[ $f_{cm}(T)$ ] (0 ℃≤ $T$ ≤ 80 ℃)，调整基本收缩应变 $\varepsilon_{auto}$ 和时间函数，通过式(18)~式(21)计算温度修正后的收缩发展速率系数 $\alpha_T(f_{cm})$，$\Delta t_i$ 为第 $i$ 步的小时间步长。最终，拟合得到的温度修正后收缩发展速率参数表达式如式(22)所示，其离散点分布如图 5(c)所示。

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH}\times\beta_T = \beta_{RH}\times\left(1+\frac{4}{103-RH}\times\frac{T-20}{40}\right) \tag{18}$$

$$f_{cm}(T) = f_{cm}\times(1.06-0.003\times T) \tag{19}$$

$$\varepsilon_{auto}(t) = -\alpha_s\times\left(\frac{f_{cm}}{0.6+f_{cm}}\right)^{2.5}\times(1-e^{-0.02t}) \tag{20}$$

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \times \exp\left\{\frac{13.65 - 4000/[273 + T(\Delta t_i)]}{273 + T(\Delta t_i)}\right\} \quad (21)$$

$$\alpha_T(f_{cm}) = -0.0013 \times f_{cm} + 0.656 \quad (22)$$

在未考虑温度影响的情况下，如图 5d 所示，改进后的模型能够更加均衡地反映实际测量值与理论预测值之间的偏差，正负偏差比例的差距控制在 2%以内，特别是在正向与负向偏差的分布上趋于对称。当考虑温度影响后，模型的预测精度显著提升，并更符合强干燥地区的实际服役环境。如图 5e 所示，原始模型在混凝土早期龄期的收缩预测高估现象得到有效抑制，显著减少了初始阶段的误差。图 5f 所示的试验数据分布表明，调整后的经验模型能够较好地补充高强混凝土在不同服役时间下的收缩表现，数据点分布均匀，高低估比例各占 51%和 49%，进一步验证了模型的适用性。当龄期较大时，式(10)中的时间项逐渐趋近于 1，使得长期收缩预测中时间项指数 $\alpha(f_{cm})$的影响逐渐减弱。然而，在考虑温度因素后，模型在极端温度情况下会出现正偏差，尤其是在环境温度超过 80 ℃时，超过了温度修正的范围，偏差上升至超过 500 微应变。

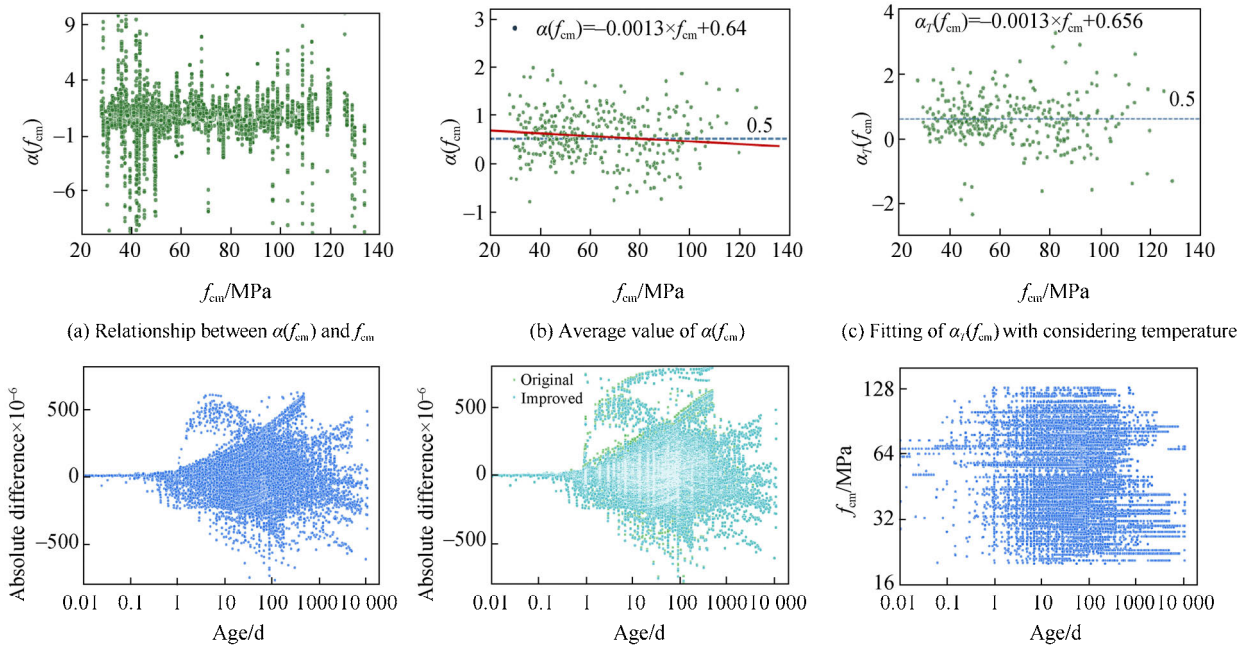



图 5　$\alpha(f_{cm})$计算值分布与模型偏差对比图

Fig. 5　Distribution of the calculated values $\alpha(f_{cm})$ and comparison of model deviations

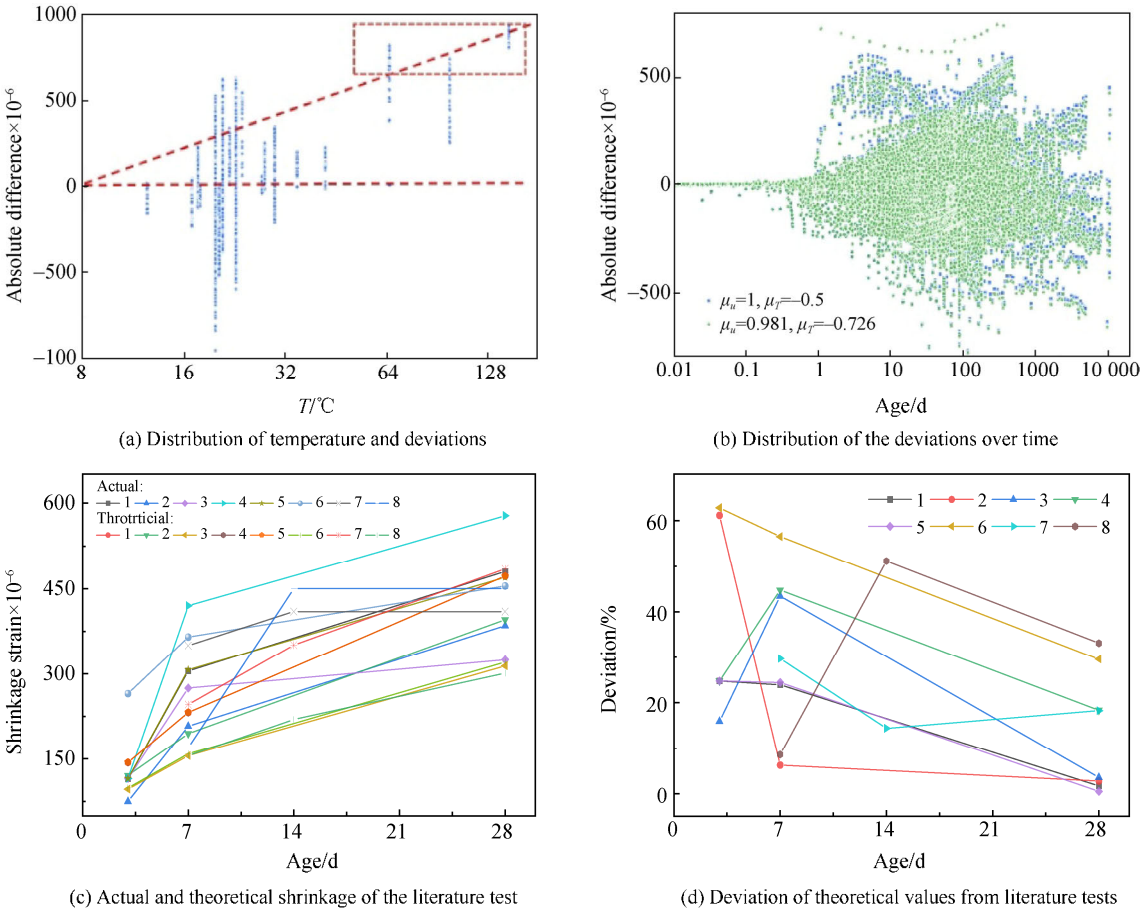
### 2.3　温度–湿度–压强环境系数修正方法

为进一步优化收缩模型并减少高温条件下的计算偏差，基于大数据方法对模型的关键参数进行迭代调整，以更精确地映射混凝土的实际收缩特性。强干燥地区的近地表温度对环境相对湿度具有显著影响，高温条件下模型对湿度系数及收缩应变的预测存在系统性高估，如图 5e 和图 6a 所示，在环境温度超过 60 ℃时，模型的收缩应变预测值明显偏高，红色点画线表明随温度升高，偏差区域增大，当温度大于 60 ℃偏差已超过 500 微应变。因此，有必要对温度作用下的湿度系数进行进一步校准，以提高模型在气候变化背景下对收缩演化趋势的适应性。首先，对混凝土长期服役过程中的自收缩与干燥收缩行为进行优化。针对干燥收缩和自收缩的极限状态，引入全局收缩修正系数($\mu_u$)，以校正基于收缩发展速率的改进模型在长时间尺度上精度下降的问题，改进模型能够合理表征收缩应变的极限发展过程。其次，针对湿度与温度作用下的时间增长因子进行修正，以进一步调节收缩发展速率。为修正该偏差，本研究调整了模型中收缩的时间增长项，使收缩曲线能够更准确地反映温湿度变化对收缩演化的影响。通过引入温度修正因子($\mu_T$)，并重新定义温度影响下的湿度系数 $\beta_{RH,T}$，考虑温度对湿度影响的耦合作用，如式(23)和式(24)所示。

$$\varepsilon_{sh} = \mu_u[\varepsilon_{dry}(t) + \varepsilon_{auto}(t)] \quad (23)$$

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH}\left(1 + \mu_T \times \frac{T - 20}{103 - RH}\right) \quad (24)$$

图 6b 展示了经过迭代改进后的模型偏差随时间的分布情况。统计结果表明，修正后模型预测偏差在 150 微应变内的数据占比超过 70%，小于 200 微应变的累计比例达到 80%以上，显著优于初始模型的离散分布特征。迭代后温度系数的调整显著减少了湿度对收缩的影响，$\mu_u$ =0.981 及 $\mu_T$ =–0.726 时，高估和低估的比例接近 1 : 1，能够代表一般条件下混凝土的收缩行为。尤其是在高温条件下，改进模型更准确地反映了湿度和温度对收缩的共同影响。偏差分布的标准差从初始模型的 800 微应变以上降至 250 微应变左右，证明改进模型对温度–湿度耦合效应的表征精度显著提升。在混凝土的低龄期，更好地捕捉到早期收缩的变化趋势，收缩预测结果接近实验数据。尽管在混凝土大龄期时偏差略大，但新模型通过合理的校准因子和温度修正，减少了长期收缩预测的偏差。




(a) Distribution of temperature and deviations

(b) Distribution of the deviations over time

(c) Actual and theoretical shrinkage of the literature test

(d) Deviation of theoretical values from literature tests

Note: The numbers 1 to 8 indicate different groups of experimental data.

图 6 偏差分布

Fig. 6 Distribution of deviations

高原地区低气压分布与强干燥环境高度重合，因此针对该严酷环境下的混凝土收缩研究，需要在已有的理论模型中考虑气压影响。道尔顿蒸发定律表明，气压降低会直接增大水分蒸发通量，从而增强干燥收缩的驱动力[66]。Ge 等[67]的修正模型显示，当 RH 为 60%时，气压每降低 0.1 标准大气压，湿度影响系数将增加 18.7%。这种非线性放大效应在 40%~80%的中等相对湿度区间尤为显著，因此，气压与温湿度场的耦合作用需纳入到混凝土收缩模型的修正框架中，以提升风险预测的系统性。采用 Ge 等[68]的气压环境系数[$k_{(h,\ P)}$]，修正原始环境相对湿度有关系数来预测混凝土的收缩值($k_h$)，如式(25)和式(26)所示。

$$k_{(h,\ P)} = \beta_{RH} \times k_{(P)} \tag{25}$$

$$k_{(P)} = \begin{cases} -0.426P' + 1.424 & (RH = 20\%) \\ -0.796P' + 1.778 & (RH = 60\%) \end{cases} \tag{26}$$

式中：$k_{(P)}$为气压系数；$P'$为实际气压与标准气压的比值；$\beta_{RH}$ 为现有收缩模型中定义的原始环境相对湿度系数，对于其他气压下相对湿度环境采用插值方法简化计算模型。

最终改进模型相较于原始 CEB-FIP 2010 模型，干燥收缩应变计算式中强度有关的时间相关项以式(27)和式(28)形式改进，温度与气压影响下的相对湿度影响系数通过式(29)修正，最终收缩发展应变由式(30)折减。对比部分混凝土强干燥与低气压收缩的试验值与理论计算值[69, 70] [交叉试验条件：RH=30%~75%，气压($P$)为 10~100 kPa]，如图 6c 和图 6d 所示，耦合气压的改进模型能真实反映混凝土随时间的收缩变形趋势，初期由于养护条件及收缩较小，真实偏差接近(图 6c)但相对偏差较大(图 6d)。随时间增大模型偏差更小，28 d 收缩结果基本相似，大部分偏差在 20%以下。

$$\varepsilon_{\mathrm{dry}}(t,t_{\mathrm{s}})=[(220+110\alpha_{\mathrm{ds1}})\times\exp(-\alpha_{\mathrm{ds2}}f_{\mathrm{cm}})]\times\beta_{\mathrm{RH}}\times\left[\frac{(t-t_{\mathrm{s}})}{0.035h^2+(t-t_{\mathrm{s}})}\right]^{\alpha}\times10^{-6} \tag{27}$$

$$\alpha_T(f_{\mathrm{cm}})=-0.0013\times f_{\mathrm{cm}}+0.656 \tag{28}$$

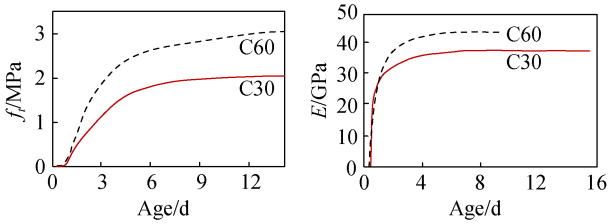
$$\beta_{\mathrm{RH},T,P}=\beta_{\mathrm{RH}}\times\left(1-0.726\times\frac{T-20}{103-\mathrm{RH}}\right)\times k_{(P)} \tag{29}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{total}}=0.98[\varepsilon_{\mathrm{dry}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{auto}}(t)] \tag{30}$$

## 3　损伤风险区划

### 3.1　收缩程度演化

在不同的气象条件和材料尺寸下，混凝土构件所承受的收缩拉应力存在显著差异。当前主流的混凝土收缩预测模型通常基于历史气候的平均数据，默认未来气候条件与过去保持一致。然而，随着极端气候事件的频率上升及全球气候模式的不确定性增加，这种基于历史数据的预测方法逐渐暴露出明显的偏差和局限，尤其在长期混凝土工程设计中，难以准确刻画未来环境的动态变化。因此，引入动态气候模式能够更精准地模拟未来环境对混凝土收缩行为的影响。气候变化主要通过调控环境因子(如温度、湿度)影响混凝土的收缩及开裂演化。在高温、低湿的强干燥环境下，混凝土的收缩应变增大，相应的拉应力增加，开裂风险系数随之升高。若假设混凝土的抗拉强度和弹性模量在龄期内的增长规律保持不变，则可基于此预测混凝土在早期阶段的收缩开裂损伤演化。根据刘加平团队研究[71]，混凝土的抗拉强度和弹性模量随着龄期的增加而逐渐提高，并在一定龄期后趋于稳定，如图 7 所示。此外，混凝土的最大拉应力随浇筑长度的增加而减小，然而对于高原地区的大型基础设施(如混凝土桥梁结构)，其浇筑长度远大于常规混凝土构件，因此更易产生较高的收缩应变梯度，并面临更大的开裂风险及耐久性隐患。




(a) Development curves of tensile strength　(b) Development curves of the elastic modulus

$f_t$ is tensile strength of concrete; $E$ is modulus of elasticity of concrete.

图 7　混凝土早期力学性能发展曲线

Fig. 7　Development curves of early mechanical properties of concrete

基于 CEB-FIP 2010 混凝土收缩模型，本研究结合降尺度及平滑处理后的月均气象预测数据，并以典型桥梁混凝土强度 C30~C60 的构件力学性能发展模式为基础，模拟 2020—2050 年期间全国 7 月(全年最高温月份)的桥梁混凝土收缩应变时空演化特征。研究揭示了气候变化背景下温–湿–气压耦合作用对混凝土收缩的影响机制，并绘制了不同气象条件下的全国混凝土收缩预测分布图。选取 15 年为时间尺度，以 2020 年、2035 年及 2050 年的桥梁混凝土构件收缩应变预测结果为例，如图 8 所示，应变介于 0~1.3×$10^{-3}$，且在龄期到达 1~2 月后基本发展稳定。从全国范围来看，不同区域混凝土的收缩演化趋势存在明显空间差异。在高原强干燥地区，未来混凝土的月度收缩应变逐渐增大，且受影响范围不断扩展，而在沿海地区，该变化趋势则相对平缓。收缩的空间分布特征表明，其区域差异性与季风气候范围密切相关。2020—2035 年间，非季风区，尤其是高原地区，在高温低湿主导作用下，其收缩应变峰值超过 1×$10^{-3}$。而到 2035—2050 年，尽管收缩应变的增长速率有所减缓，但区域分异程度进一步加剧，高收缩中心仍位于高原地区，并呈向外扩展趋势，这一结果与主流研究结论一致。

从材料强度角度分析，C60 混凝土相较于 C30 表现出显著的收缩抑制效果。在高原强干燥地区，C60 混凝土收缩应变为 1050 微应变，较 C30 混凝土的 1350 微应变下降达 22.2%；在华中典型地区，C60 收缩应变为 750 微应变，较 C30 的 900 微应变降低 16.7%。这种差异主要源于：C60 混凝土水胶比(0.32)较 C30(0.48)降低 33.3%，有效减少可蒸发水含量；高强混凝土骨料体积分数提升，石英岩骨料的弹性模量(80 GPa)对收缩形变产生更强约束；C60 混凝土更为密实，孔隙结构的细化降低了湿度扩散系数。

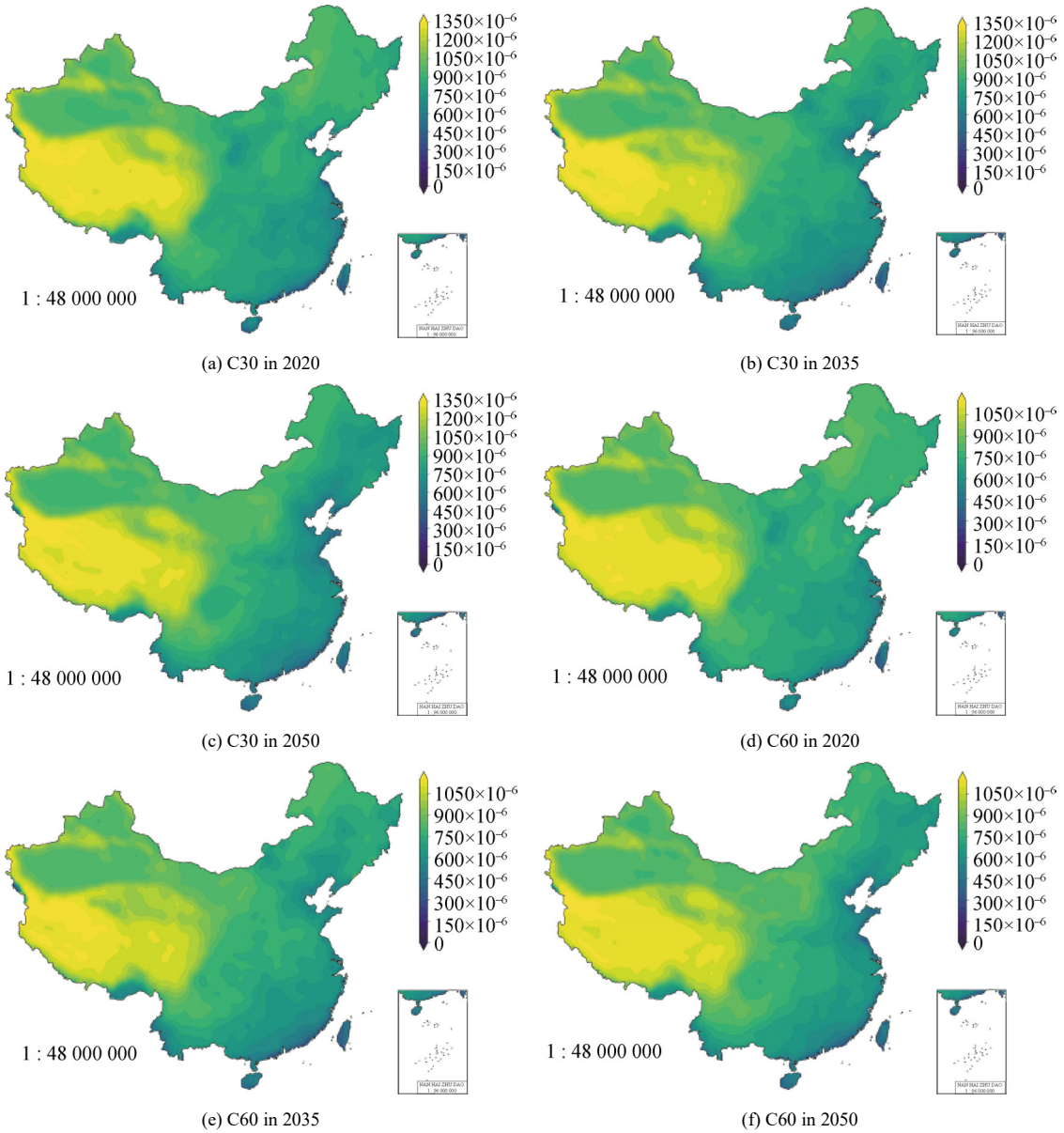



图 8 收缩发展预测值(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制，地图批准号：GS (2016)1595，底图未变动)

Fig. 8 The predicted value of the shrinkage development (Based on a map of the People's Republic of China by the State Bureau of Surveying and Mapping Standard Map Service Website, Map Approval Number: GS (2016)1595. The base map remains unaltered)

### 3.2 应力与损伤发展

为分析混凝土构件收缩应变–应力–损伤的协同发展与互相作用关系，采用有限元方法对典型桥墩构件在强干燥环境下的收缩行为进行数值模拟。结合刘加平团队关于混凝土力学性能发展的研究成果，重点分析混凝土桥墩在不同收缩应变水平下的应力分布及裂缝演化特征。数值模拟基于 Python 编程语言，在 Linux 操作系统环境下调用 FEniCS 有限元库，实现桥墩模型的构建、网格划分及求解计算。模型应变采用环境因素的耦合作用下的混凝土收缩应变值，并建立合理的本构关系表征材料的非线性力学特性。为确保计算结果的准确性，模拟过程中引入自适应网格加密技术，提高裂缝应力集中区域的计算精度。此外，模拟结果通过 ParaView 软件进行可视化处理，以直观呈现桥墩构件在不同收缩应变水平下的应力分布、裂缝扩展及损伤演化模式。有限元模型及后处理逻辑如下：

1) 材料参数，定义桥墩、板的几何参数(长度 10 m、截面 3 m × 3 m)，设置混凝土和钢筋的材料属性(钢筋弹性模量 $E_{steel}$=2.0×10$^{11}$ Pa、配筋率

$\rho_{steel}=0.02$)。采用材料力学应力应变关系如式(31)，分析应变引起的应力作用，根据混凝土和钢筋的弹性模量 $E_{concrete}$ 和 $E_{steel}$ 以及配筋率计算钢筋承担应变的折减系数($r_{steel}$)，如式(32)，反映钢筋对混凝土收缩应变的约束作用。

2) 创建网格，对桥墩、基础板和顶板进行细致网格划分，通过调整板梁的 $z$ 坐标确保结构的正确定位。将墩体与板梁的网格进行了合并，形成了用于整体分析的单一网格系统。

3) 构建函数空间和变分问题，定义向量函数空间($\boldsymbol{V}$)和张量函数空间($\boldsymbol{T}$)，构建用于计算应变和应力的函数，并考虑收缩效应，引入收缩应变张量 $e_{shrinkage}$，定义收缩应变张量[$\sigma(e)$]、拉梅常数($\lambda$)和剪切模量($\mu$)，$\lambda$ 计算式由泊松比($v$)和弹性模量($E$)决定，如式(33)和式(34)所示。$e(v)$为试探函数 $v$ 对应的应变张量，用于变分形式的构建；tr($e$)为应变张量 $e$ 的迹（即体积应变），反映单位体积变化。

4) 变分形式和边界条件，通过定义双线性形式($a$)和线性形式($f$)，如式(35)~式(37)所示，形成变分问题的核心框架，$e(u)$为位移场 $u$ 对应的应变张量，表示结构变形引起的应变；$w$ 为线性应变算子。$\Omega$ 为积分区域，表示桥墩结构的整体几何域。$\sigma(e_{shrinkage})$为收缩应变 $e_{shrinkage}$ 对应的应力张量，反映非力学荷载引起的内部应力。底部边界条件设为固定接触，顶部允许在垂直方向自由变形，模拟实际工程中混凝土桥墩的自 由收缩状态。

5) 分析求解和结果计算，通过求解变分问题获得桥墩的位移场，并进一步计算应力场及投影处理。调整应力和裂缝标记函数，完成应力状态分布和裂缝的识别。

$$\sigma=\varepsilon_{total}\times r_{steel} \tag{31}$$

$$r_{steel}=E_{concrete}/(E_{concrete}+\rho_{steel}\times E_{steel}) \tag{32}$$

$$\sigma(e)=\lambda\times\mathrm{tr}(e)\times I+2\mu\times w \tag{33}$$

$$\lambda=E\times v/[(1+v)\times(1-2v)] \tag{34}$$

$$\mu=E/[2(1+v)] \tag{35}$$

$$a=\int_{\Omega}\mathrm{inner}\{\sigma[e(\mu)],e(v)\}\mathrm{d}x \tag{36}$$

$$f=\int_{\Omega}\mathrm{inner}[\sigma(e_{shrinkage}),e(v)]\mathrm{d}x \tag{37}$$

图 9 展示了 C30 混凝土构件在不同收缩应变水平下的内部应力分布及裂缝损伤演化。参考主流损伤阶段模型，将损伤阶段分为初始损伤阶段、稳定损伤

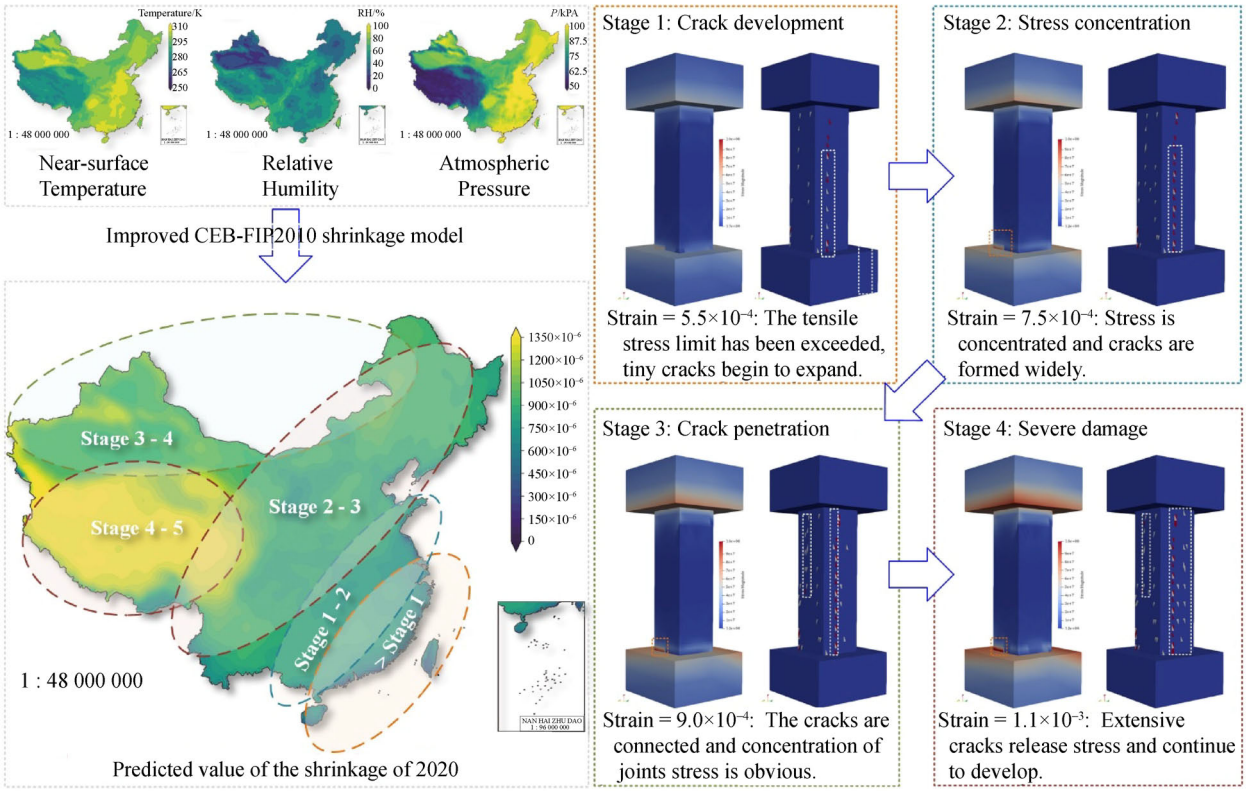



图 9　混凝土收缩的有限元模拟结果(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制，地图批准号：GS (2016)1595，底图未变动)

Fig. 9　Results of finite element simulation of concrete shrinkage (Based on a map of the People's Republic of China by the State Bureau of Surveying and Mapping Standard Map Service Website, Map Approval Number: GS (2016)1595. The base map remains unaltered)

扩展阶段，不稳定扩展阶段和裂缝贯通阶段[72]。结合有限元模拟下的不同力学响应，重点探讨 4 个临界应变阈值阶段应力–裂缝关联发展现象。

1) 当收缩应变达到 $5.5\times10^{-4}$ 时，构件内部应力超过素混凝土的抗拉强度极限，但裂缝规模较小。此阶段，钢筋约束和两端边界条件有效抑制了收缩变形的进一步发展，使裂缝仅在局部区域稀疏分布，并未形成贯穿性损伤。

2) 当应变增至 $7.5\times10^{-4}$ 时，应力集中现象在桥墩顶部和底部逐渐显现，裂缝数量增多且分布趋于均匀，表明结构内部拉应力已足以驱动裂缝扩展。此时，竖向裂缝的产生反映了混凝土构件收缩变形对整体应力分布的影响。

3) 当收缩应变达到 $9.0\times10^{-4}$ 时，应力集中进一步加剧，尤其在桥墩连接处，裂缝密度趋于稳定，并沿着高应力区域扩展，竖向裂缝逐渐贯通，并扩展新的裂缝损伤。此时裂缝扩展不稳定且快速。

4) 在应变进入 $1.1\times10^{-3}$ 阶段后，应力增长速率放缓，但底板拉应力显著增加，表明裂缝已广泛发展并释放部分应力。在此应变水平下，出现多条裂缝并持续扩展。此阶段，混凝土构件表面裂缝的发展对结构耐久性构成严重威胁，易引发离子侵蚀及力学性能降低。

由于混凝土的材料组成受地域影响的复杂性，根据《混凝土结构设计规范 GB 50010——2010》[73]中不同混凝土强度等级力学性能的规定，对于 C30 至 C60 强度构件的各阶段临界应变阈值，将不同强度等级混凝土的风险应变界限进行标准化换算，以 C30 混凝土应变阈值为基准值，通过 $E$ 和抗拉强度($f_t$)的比值权值($\zeta$)，保持不同强度混凝土的拉应力–强度比一致，从而确保裂缝发展的等效性，如式(38)和式(39)所示。

$$\frac{E_{30}\times\varepsilon_{30}}{f_{t,30}}=\frac{E_c\times\varepsilon_c}{f_{t,c}} \tag{38}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{risk},c}=\varepsilon_{\mathrm{risk},30}\times\eta\times\left(\frac{f_{t,c}}{f_{c,30}}\right)\times\left(\frac{E_{30}}{E_c}\right)=\varepsilon_{\mathrm{risk},30}\times\zeta \tag{39}$$

式中：$\varepsilon_c$ 和 $\varepsilon_{30}$ 分别为待求强度为 $c$ 的混凝土及 C30 混凝土的应变；$\varepsilon_{\mathrm{risk},c}$ 为待求混凝土(强度等级为 $c$)的损伤应变阈值，$\varepsilon_{\mathrm{risk},30}$ 为 C30 混凝土的已知收缩阈值；$f_{t,c}$ 和 $E_c$ 分别为强度等级为 $c$ 的混凝土的抗拉强度与弹性模量，$f_{t,30}$ 和 $E_{30}$ 分别为 C30 混凝土的抗拉强度与弹性模量。对 C40~C80 混凝土，规范建议引入脆性损伤因子($\eta$)修正应变阈值，对 C40 取 1.00，对高强混凝土 C80 取 0.87，中间按线性插值。

### 3.3 风险等级划分

结合混凝土收缩有限元模拟结果，以应力分布和裂缝发展特征为基础，参考结构设计中的地震烈度分布图方法，构建混凝土收缩开裂损伤风险区划体系，以不同混凝土强度为控制指标，各等级风险的混凝土收缩应变界限分别为 $5.5\zeta\times10^{-4}$、$7.5\zeta\times10^{-4}$、$9.0\zeta\times10^{-4}$、$1.1\zeta\times10^{-3}$，可得不同强度下风险区划分布。分析不同应力分布模式和损伤状态对混凝土结构的影响，将中国混凝土收缩开裂损伤风险划分为 5 个等级。特别需要重点关注强干燥地区的风险演变趋势，以准确评估混凝土耐久性问题。图 10 展示了以 C30 及 C60 混凝土强度的全国范围收缩开裂损伤风险区划结果，以 C30 混凝土为例分析各地区开裂损伤风险程度。

1) 无风险区：该区域主要分布于沿海地区，由于较高的环境湿度，混凝土的干燥收缩效应较弱，收缩对结构整体性能的影响较小。相比之下，氯离子侵蚀、碳化及冻融循环等耐久性问题更为突出。因此，在此类区域，可采用标准混凝土配合比，并通过适当的养护措施减少早期收缩效应。同时，建议在表面施加封闭涂层，以降低水分蒸发速率，从而进一步减缓收缩影响。

2) 小风险区：该区域主要涵盖严寒地区及部分沿海省份，处于裂缝扩展的过渡阶段。此类地区的气候特征使得混凝土结构易受干燥收缩和冻融循环的复合影响，因此需采取措施降低水灰比，避免因水灰比过高而加剧自收缩和干燥收缩。此外，施工期间应加强湿养护，以降低表面水分蒸发速率。

3) 低风险区：该区域包括华中和东北地区，此处应力集中现象较为明显，裂缝分布广泛且趋于均匀，结构关键节点附近可能出现较为明显的裂缝。对于长期服役的重要混凝土结构，应优先选用抗裂性能优良的混凝土，并在配合比设计时考虑掺入矿物掺合料(如粉煤灰、硅灰)和高效减水剂，以优化混凝土的工作性能并降低收缩影响。

4) 中风险区：该区域主要位于非季风气候区及部分西北、西南、东北地区，收缩诱发裂缝较为显著，对混凝土的耐久性和抗力产生一定程度的影响。对于该类区域的大型结构，应在设计阶段充分考虑收缩效应，并采取适当的结构优化策略，例如预应力设计、采用低收缩混凝土，或掺入膨胀剂以补偿收缩。此外，为提升结构长期耐久性，可采用全过程补偿收缩技术，并通过精细化施工工艺降低收缩裂缝风险。

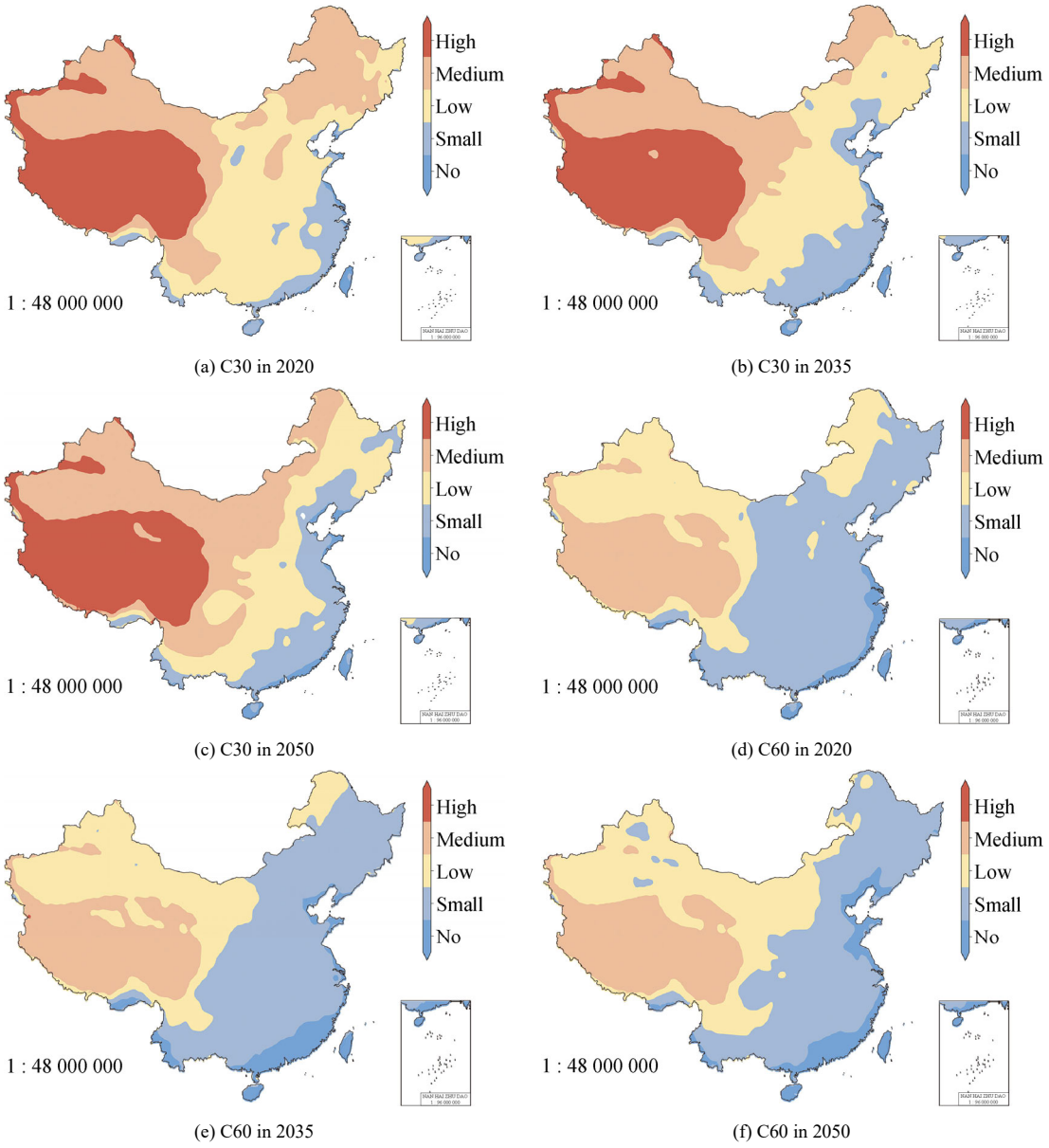



图 10　收缩开裂损伤风险区划(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制，地图批准号：GS (2016)1595，底图未变动)

Fig. 10　Zoning of shrinkage-crack damage risk(Based on a map of the People's Republic of China by the State Bureau of Surveying and Mapping Standard Map Service Website, Map Approval Number: GS (2016)1595. The base map remains unaltered)

5) 高风险区：该区域主要分布在中国西部高原及部分西北强干燥气候区，由于极端干燥环境，混凝土的收缩损伤几乎难以避免。工程设计时，必须将收缩对混凝土结构耐久性的影响作为核心关注点，并采用高抗裂性能混凝土，以降低开裂风险。此外，优化混凝土配合比设计，加入抗裂纤维、减缩剂等功能性材料，可有效提升结构的抗裂能力。

通过分析 2020—2050 年中国混凝土收缩风险等级的时空分布特征，揭示了不同时间各地区混凝土收缩程度的变化趋势。结果表明，混凝土收缩风险在空间和时间上呈现显著的区域差异，并呈现随时间上升趋势，尤其是在强干燥地区，高中风险区域的扩张最为明显，滨海地区小风险地区也明显增大，全国范围内低风险地区减少，两极分化严重。2020 年 C30 混凝土强度混凝土收缩高风险区域面积占比为 26.4%，中风险区域占比为 34.1%，低风险区域占比为 31.5%。到了 2050 年，高风险区域扩大至 27.0%，而低风险区域占比下降至 23.4%。从空间分布来看，青藏高原的高风险和中风险区域向外扩展明显，而沿海地区的低风险区域则在逐步向内陆收缩。东北地区在 2035 年由于湿度增加，中风险区域占比有所下降，但西北和高原地区的中风险区

域占比从 2020 年的 22.9%上升至 25.0%，到了 2050 年更是增长至 34.2%，增长比例接近 50%。高原地区是高风险区域最集中的地区，向周边区域辐射增长比例接近 5%。因此，强干燥地区的收缩风险仍在持续增长，耐久性问题更加突出。

面对未来气候变化带来的混凝土收缩风险上升，现有的混凝土耐久性设计标准和材料规范可能难以满足极端气候条件下的需求。特别是在西部高原及周边地区，2020—2050 年中高风险区域面积占比共增加中国总面积的 8.3%，增长比例高达 16.8%。这一趋势表明周边地区传统的混凝土材料和施工技术可能无法有效应对未来的环境变化，更多强干燥地区及周边区域的混凝土裂缝损伤开展将更为严重。另外，对比 C30 和 C60 强度混凝土的风险区划范围，可得出当采用更高强度混凝土，可显著降低各风险等级的收缩应变阈值。相较于 C30 混凝土，C60 混凝土在相同环境条件下可将风险等级整体降低约 1 个级别，其高抗拉强度与弹性模量有效抑制了微裂缝的萌生与扩展，因此对于强干燥地区的桥梁结构，可采用更高强度混凝土以降低风险等级。然而，区域风险的空间分布趋势并未因材料强度提升而发生根本性改变，高原等强干燥气候带仍为收缩开裂损伤风险最严重区域，且风险面积呈现随时间持续向外辐射扩展的特征。

结合风险区划及演化，以不同风险的实际工程说明区划的应用流程，并提出未来可参考的混凝土施工方案。首先依据气候演化模型，得到工程建设时空环境参数，包括近期温度、相对湿度、大气压强等，以环境及工程材料参数作为输入，基于改进的收缩模型计算所需时间尺度下的混凝土收缩应变值，并根据应变所处的 5 个开裂损伤状态，得到工程采用的混凝土强度下的风险区划等级。在无详细设计参数的情况下，也可根据地理信息参考图 10 区划作为风险等级。

除通过提升混凝土强度以降低风险等级外，参考刘加平院士等的著作《现代混凝土早期变形与收缩裂缝控制》[71]，研究实际工程应用中的收缩裂缝控制。对于中高风险区域兰新铁路第二双线的工程应用，对于在近地表温度>40 ℃、湿度<30%的低气压环境下混凝土浇筑后易出现表面结壳开裂的问题，采取塑性阶段 2 次喷洒水分蒸发抑制剂(浇筑后、收平后各 1 次)结合养护剂覆盖技术，可抑制塑性裂缝并减少表面龟裂[74]。另外，结合高性能土木工程材料国家重点实验室屋面板工程实施分阶段全过程养护，当表层孔隙负压达 2 kPa 时施加蒸发抑制剂，使空气渗透系数降低至历来的$\frac{1}{3}\sim\frac{1}{2}$，可显著抑制早期塑性开裂。参照乌东德水电站工程位于金沙江河谷，年均温 21.7 ℃、湿度 63%，按 1 : 4 和 1 : 2 稀释比例喷洒蒸发抑制剂，将孔隙负压达到 10 kPa 的时间延缓 1~2 h，可缓解水分蒸发问题[75]。对于原材料，结合规范及常州轨道交通站点的裂缝控制方法，总碱含量不超过 0.6%、比表面积控制在 350 $m^2$/kg 以内，优先选用低活性 $C_3A$(≤8.0%)的国标硅酸盐水泥[76, 77]；严禁 C 类粉煤灰，仅采用氧化钙≤10%、烧失量≤5%的II级及以上 F 类粉煤灰；矿渣粉选择 S95 级及以上(比表面积≤450 $m^2$/kg)[78]；粗骨料含泥量≤1.0%、针片状颗粒≤15%且符合 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准(附条文说明)》级配要求；细骨料使用细度模数 2.3~3.0、II 区级配中砂(含泥≤3.0%)[79]；减水剂以坍损低、收缩率比≤100%的聚羧酸系为主，需兼具高减水率与水泥相容性，通过协同控制材料性能减少收缩开裂[80, 81]。上述实践验证，针对不同风险区划，可通过材料配比优化(如强度提升、收缩抑制组分调控)与主动养护技术(蒸发抑制剂时序控制、养护剂强化)实现裂缝防控，为未来极端环境下的混凝土施工提供可参考方案。

## 4 结论

本工作针对全国范围内气象演变进行了系统分析，利用 CMIP6 气候模拟数据，探讨了温度、湿度与气压的演化及相关性，考虑了低气压对混凝土收缩的增大效应。通过改进 CEB-FIP 2010 收缩模型，量化评估全国范围内混凝土构件的收缩程度，分析了西部高原等强干燥地区混凝土收缩随时间演化的特殊性。采用有限元方法模拟典型混凝土构件在收缩应变作用下的应力分布和裂缝扩展模式，并构建了混凝土收缩开裂损伤风险区划框架。主要研究结论如下：

1) 基于 CMIP6 气候预测数据，揭示了未来 30 年中国气候演变趋势及其对混凝土收缩的影响。研究表明，强干燥地区温度持续上升，而相对湿度显著下降，两者变化呈高度耦合关系，共同加剧了混凝土的收缩现象。此外，全国范围内的气压变化相对稳定，但西部高原及干旱区的低气压环境进一步增强了混凝土的收缩程度。

2) 引入强度相关变量及温度–湿度–气压影响

参数，对 CEB-FIP 2010 收缩模型进行修正。改进后的模型能够更准确地反映强干燥环境下混凝土的收缩行为。收缩预测值的分布更加均匀，高估和低估比例接近 1 : 1，使模型的预测误差进一步降低，提升了其在高温低湿低压环境下的适用性和可靠性。28 d 收缩结果接近试验值，大部分偏差在 20%以下。

3) 基于未来气候演变情景，利用有限元方法模拟桥墩在不同收缩应变下的应力分布与裂缝发展状态。当收缩应变达到 $5.5\zeta\times10^{-4}$ 时，构件已出现开裂迹象；在 $7.5\zeta\times10^{-4}$ 时，节点区域产生应力集中现象；$9.0\zeta\times10^{-4}$ 时，表面裂缝发展贯通；而当收缩应变达到 $1.1\zeta\times10^{-3}$ 时，裂缝持续扩展并释放应力。发展过程反映出不同应变水平下混凝土构件的破坏机制。

4) 结合气候演变趋势与混凝土结构性能评估，根据不同收缩阶段的桥梁混凝土响应，构建了全国范围内的混凝土收缩风险区划框架。研究表明，2020—2050 年，以强干燥地区为核心的 C30 桥梁混凝土构件收缩开裂损伤中、高风险区域面积占比向外扩张约中国总面积的 8.3%，增长比例达 16.8%，未来强干燥地区气候对混凝土开裂的威胁将持续加剧，当采用合理措施降低开裂风险等级。

**参考文献**:


[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2025[J]. 中国公路学报, 2025, 38(12): 1–153.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. China J Highw Transp, 2025, 38(12): 1–153.

[2] SOMAIYA P, BHOGAYATA A. A systematic conditional assessment of strength and durability damage of concrete structures in marine environments[J]. Mater Today Proc, 2023

[3] LI W J, GUO L. Peridynamic investigation of chloride diffusion in concrete under typical environmental factors[J]. Ocean Eng, 2021, 239: 109770.

[4] CHEN D S, GUO W H, WU B, et al. Service life prediction and time-variant reliability of reinforced concrete structures in harsh marine environment considering multiple factors: A case study for Qingdao Bay Bridge[J]. Eng Fail Anal, 2023, 154: 107671.

[5] GE B X, YANG Y Z, KIM S. Time-dependent multi-hazard seismic vulnerability and risk assessment of deteriorating reinforced concrete bridges considering climate change[J]. Structures, 2023, 55: 995–1010.

[6] MALAMI S I, VAL D V, SURYANTO B, et al. Probabilistic approach to the sustainability assessment of reinforced concrete structures in conditions of climate change[J]. Struct Saf, 2024, 107: 102428.

[7] TIAN W, YAN M H, HUANG W R, et al. Study on durability of concrete under alternating positive and negative temperature curing in plateau area[J]. Constr Build Mater, 2024, 436: 137008.

[8] BIAN H B, CHAI L J, LIU Y Z, et al. Prediction model for time-dependent drying shrinkage of recycled coarse and fine aggregate concrete based on internal relative humidity[J]. Constr Build Mater, 2024, 439: 137426.

[9] 张晓闯, 王俊礼, 陈波, 等.考虑粗骨料因素的 UHPC 干燥收缩性能[J/OL].水电能源科学, 2026, 02: 105–108+83 [2026–01–15]. https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251545.
ZHANG Xiaochuang, WANG Junli, CHEN Bo, et al. Water Resour Power, 2026, 02: 105–108+83 [2026–01–15]. https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251545.

[10] LURA P, VAN BREUGEL K, MARUYAMA I. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(12): 1867–1872.

[11] LI Z, LIU J P, XIAO J Z, et al. Drying shrinkage of mortar manufactured with recycled fine aggregate at vary initial saturation degree[J]. Constr Build Mater, 2020, 264: 120621.

[12] WANG J H. Test and simulation of concrete surface factor under different wind speeds[J]. Constr Build Mater, 2021, 300: 124019.

[13] LONG G C, CHEN Y, TANG Z, et al. Drying shrinkage behavior of cement mortar under low vacuum conditions[J]. Constr Build Mater, 2023, 374: 130933.

[14] JIA Z J, YANG Y Y, YANG L Y, et al. Hydration products, internal relative humidity and drying shrinkage of alkali activated slag mortar with expansion agents[J]. Constr Build Mater, 2018, 158: 198–207.

[15] DEYSEL R C, BOSHOFF W P, SMIT M S. Implementing capillary pressure control measures to prevent plastic shrinkage cracking in concrete[J]. Constr Build Mater, 2023, 397: 132407.

[16] WANG Y L, ZHU J S, GUO Y B, et al. Early shrinkage experiment of concrete and the development law of its temperature and humidity field in natural environment[J]. J Build Eng, 2023, 63: 105528.

[17] HAN Y D, ZHANG J, LUOSUN Y, et al. Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage of high strength concrete slabs[J]. Constr Build Mater, 2014, 61: 41–49.

[18] GALLÉ C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(10): 1467–1477.

[19] MIAO Y C, WANG H, ZHANG Y J, et al. A numerical model for predicting the drying shrinkage behavior of concrete under ultra-low relative humidity[J]. Constr Build Mater, 2024, 411: 134459.

[20] GAO P, CHEN Y, HUANG H L, et al. Effect of relative humidity on drying-induced damage in concrete: A comparative study of digital image correlation and lattice modelling[J]. Mater Des, 2020, 196: 109128.

[21] ZHANG J, HOU D W, HAN Y D. Micromechanical modeling on autogenous and drying shrinkages of concrete[J]. Constr Build Mater, 2012, 29: 230–240.

[22] REZVANI M, PROSKE T, GRAUBNER C A. Modelling the drying shrinkage of concrete made with limestone-rich cements[J]. Cem Concr Res, 2019, 115: 160–175.

[23] CHOI S. Internal relative humidity and drying shrinkage of hardening concrete containing lightweight and normal-weight coarse aggregates: A comparative experimental study and modeling[J]. Constr Build Mater, 2017, 148: 288–296.

[24] ZHANG G H, LI Z L, ZHANG L F, et al. Experimental research on drying control condition with minimal effect on concrete strength[J]. Constr Build Mater, 2017, 135: 194–202.

[25] SAKATA K. A study on moisture diffusion in drying and drying shrinkage of concrete[J]. Cem Concr Res, 1983, 13(2): 216–224.

[26] GAMAGE J C P H, AL-MAHAIDI R, WONG M B. Integrity of

CFRP-concrete bond subjected to long-term cyclic temperature and mechanical stress[J]. Compos Struct, 2016, 149: 423–433.

[27] REN G P, GUO Y C, SHEN A Q, et al. Effects of cellulose fiber on shrinkage, anticrack performance, and mechanical properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2024, 451: 138824.

[28] DU J, TAN X, WANG Y H, et al. Reducing the cracking potential of ultra-high-performance concrete (UHPC) with the prewet expansive agent[J]. Constr Build Mater, 2024, 431: 136597.

[29] ZHANG L F, DU Y, MA R, et al. Identification of indexes that could reflect early drying shrinkage of high strength concrete with minerals[J]. Constr Build Mater, 2024, 420: 135594.

[30] VU T M, MISHRA A K. Nonstationary frequency analysis of the recent extreme precipitation events in the United States[J]. J Hydrol, 2019, 575: 999–1010.

[31] 孙博, 李驰, 戴永玲, 等. 2024/2025 年前冬北半球季风区严重干旱事件特征及机理[J/OL]. 大气科学学报, 1–12 [2026–01–15]. https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20251105009.
SUN Bo, LI Chi, DAI Yongling, et al. Trans Atmos Sci, 1–12 [2026–01–15]. https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20251105009.

[32] RAMANI V, ZHANG L M. Impacts of climate change on long-term reliability of reinforced concrete structures due to chloride ingress[J]. Constr Build Mater, 2022, 354: 129091.

[33] KÖLIÖ A, PAKKALA T A, LAHDENSIVU J, et al. Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing climate[J]. Eng Struct, 2014, 62–63: 42–52.

[34] STEWART M G, WANG X M, NGUYEN M N. Climate change adaptation for corrosion control of concrete infrastructure[J]. Struct Saf, 2012, 35: 29–39.

[35] WANG M, LIU M, ZHANG D Q, et al. Assessing and optimizing the hydrological performance of Grey-Green infrastructure systems in response to climate change and non-stationary time series[J]. Water Res, 2023, 232: 119720.

[36] WANG J Y, CAO S Q, TSE T K T, et al. A novel life-cycle analysis framework to assess the performances of tall buildings considering the climate change[J]. Eng Struct, 2025, 323: 119258.

[37] YANG W Y, ZHAO Z Y, PAN L P, et al. Integrated risk analysis for urban flooding under changing climates[J]. Results Eng, 2024, 24: 103243.

[38] 杨海涛. 复杂环境下混凝土的使用寿命影响因素分析[J]. 水泥, 2026, 1: 99–101.
YANG Haitao. Cement, 2026, 1: 99–101.

[39] 张明, 邹笃建, 刘铁军, 等. 高原地区混凝土特殊服役环境时空特性分析与区划[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(11): 3444–3459.
ZHANG Ming, ZOU Dujian, LIU Tiejun, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(11): 3444–3459.

[40] ZHU X C, WANG D F, ZHANG Y S, et al. Study on sulfate diffusion test and mathematical model of manufactured sand concrete under typical freeze-thaw environment in Northwest China[J]. Constr Build Mater, 2024, 419: 135559.

[41] ZHANG R L, LONG Z F, LONG G C, et al. Mechanism of graphene oxide concrete macro-micro properties evolution under large temperature difference freeze-thaw action[J]. Constr Build Mater, 2024, 415: 135019.

[42] RONG H, WANG B S, HUANG J B, et al. The mechanical properties of concrete exposed to harsh and complex environments of plateaus at early ages[J]. J Build Eng, 2024, 97: 110808.

[43] SHANG Y H, NIU F J, LI G Y, et al. Application of a concrete thermal pile in cooling the warming permafrost under climate change[J]. Adv Clim Change Res, 2024, 15(1): 170–183.

[44] SEN S, LI H R, KHAZANOVICH L. Effect of climate change and urban heat islands on the deterioration of concrete roads[J]. Results Eng, 2022, 16: 100736.

[45] CHU I, KWON S H, AMIN M N, et al. Estimation of temperature effects on autogenous shrinkage of concrete by a new prediction model[J]. Constr Build Mater, 2012, 35: 171–182.

[46] SHURBERT-HETZEL C, DANESHVAR D, ROBISSON A, et al. Data-enabled comparison of six prediction models for concrete shrinkage and creep[J]. Case Stud Constr Mater, 2023, 19: e02406.

[47] WANG J Q, LIU H, SUN J B, et al. Research on concrete early shrinkage characteristics based on machine learning algorithms for multi-objective optimization[J]. J Build Eng, 2024, 89: 109415.

[48] VANDERMEER D, AHN I S. *In situ* measurement of concrete creep and shrinkage in ambient subarctic weather[J]. Int J Civ Eng, 2022, 20(4): 475–485.

[49] GE X, GE Y, LI Q F, et al. Effect of low air pressure on the durability of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 187: 830–838.

[50] CHEN X, LIU X, FENG Y R, et al. Microstructures and properties of concrete surfaces under different exposure conditions in complex natural environments of high-altitude regions[J]. J Build Eng, 2023, 72: 106663.

[51] EYRING V, BONY S, MEEHL G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. Geosci Model Dev, 2016, 9(5): 1937–1958.

[52] 包庆. 全球高分辨率模拟的全球大气–海洋数据集(2015–2050)[R]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2022.

[53] CLEMENTS J C. Convexity-preserving piecewise rational cubic interpolation[J]. SIAM J Numer Anal, 1990, 27(4): 1016–1023.

[54] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1990, 12(7): 629–639.

[55] KARL P. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space[J]. Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci, 1901, 2(11): 559–572.

[56] SPEARMAN C E. The measurement of the association between two variables[J]. Biometrika, 1904, 1: 1–10.

[57] KRASKOV A, STÖGBAUER H, GRASSBERGER P. Estimating mutual information[J]. Phys Rev E, 2004, 69(6): 066138.

[58] PAN Z F, ZHANG H P, ZENG B, et al. Statistical evaluation of CEB-FIP 2010 model for concrete creep and shrinkage[J]. Materials, 2023, 16(4): 1576.

[59] ACI Committee 209. Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures[S]. In ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Detroit, MI, USA, 1999.

[60] Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3[J]. Mater Struct, 1995, 28(6): 357–365.

[61] GARDNER N J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete [J]. ACI Mater J, 2001, 98: 159–167.

[62] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. 4th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): Washington, DC, USA, 2007.

[63] USIBE B E. Prediction of creep deformation in concrete using some design code models[J]. IOSR J Mech Civ Eng, 2012, 4(3): 49–53.

[64] BAZANT Z P, LI G H. Comprehensive database on concrete creep and shrinkage[J]. Aci Mater J, 2008, 105(6): 635–637.

[65] PAN Z F, LI B, LU Z T. Re-evaluation of CEB-FIP 90 prediction models for creep and shrinkage with experimental database[J]. Constr Build Mater, 2013, 38: 1022–1030.
[66] 朱岗崑. 自然蒸发的理论及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
[67] 葛昕. 高原气候条件对混凝土性能及开裂机制影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
GE Xin. The research on effect of plateau climatic conditions on concrete perfromance and cracking mechanism [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
[68] GE X, GE Y, DU Y B, et al. Effect of low air pressure on mechanical properties and shrinkage of concrete[J]. Mag Concr Res, 2018, 70(18): 919–927.
[69] RONG H, WANG B S, HUANG J B, et al. Role of coupled environmental factors on shrinkage properties of concrete at high altitude[J]. J Build Eng, 2025, 99: 111560.
[70] WANG X L, CHANG H L, LI S W, et al. Influence of low vacuum and high temperature condition on moisture transport and dry shrinkage of mature concrete[J]. J Build Eng, 2024, 95: 110262.
[71] 刘加平, 田倩. 现代混凝土早期变形与收缩裂缝控制[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
[72] 马芹永. 混凝土结构基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
[73] 中华人民共和国住房和城乡建设部组织.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[M].中国建筑工业出版社, 2014.
[74] 李华, 王育江, 高南箫, 等. 混凝土减缩抗裂外加剂的研究与应用进展[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(12): 1101–1111.
LI Hua, WANG Yujiang, GAO Nanxiao, et al. J Build Mater, 2024, 27(12): 1101–1111.
[75] 鹿永久, 王瑞, 王伟, 等. 水分蒸发抑制剂对乌东德水电站混凝土强度的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(10): 8–11.
LU Yongjiu, WANG Rui, WANG Wei, et al. New Build Mater, 2018, 45(10): 8–11.
[76] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. GB 175—2023 通用硅酸盐水泥[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
[77] 中国土木工程学会. CCES 01—2004 混凝土结构耐久性设计与施工指南(2005 年修订版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025.
[78] 中国建筑材料科学研究总院, 上海宝田新型建材有限公司, 嘉华建材(香港)有限公司, 中冶节能环保有限责任公司, 厦门艾思欧标准砂有限公司. GB/T 18046—2017 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
[79] 中国建筑科学研究院. JGJ 52—2006 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准(附条文说明)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
[80] 中国建筑材料科学研究总院, 江苏省建筑科学研究院, 浙江五龙化工股份有限公司. GB 8076—2008 混凝土外加剂[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
[81] 中国建筑科学研究院. GB 50119—2013 混凝土外加剂应用技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

# Risk Analysis and Zonation of Concrete Shrinkage Cracking in Extreme-Arid Regions under Climate Change

*HU Qiaosong*, *ZOU Dujian*, *YANG Jiazhi*, *QUE Zichao*, *ZHANG Ming*, *LIU Tiejun*
(College of Artificial Intelligence, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

## Extended Abstract

**Introduction** The shrinkage cracking of concrete structures in arid regions such as plateaus becomes increasingly complex under the context of global climate change. This study utilized climate simulation data to analyze the coupled evolution characteristics of temperature, humidity, and atmospheric pressure across China. Based on a comprehensive analysis of 4662 sets of concrete shrinkage test data, the influence of atmospheric pressure on humidity was introduced and a modified CEB-FIP 2010 concrete shrinkage model was proposed that incorporated temperature-humidity-pressure coupling effects. The spatiotemporal evolution patterns of concrete shrinkage deformation nationwide were investigated. For a bridge pier concrete, the strain-stress-damage evolution process was simulated, and spatiotemporal dynamic zoning maps for shrinkage-induced cracking damage risks were developed. A risk of concrete shrinkage cracking damage by 2050 was projected to intensify significantly, with medium- to high-risk zones expanding by over 15% compared to current levels with increasing temperatures and decreasing humidity in arid regions.

**Methods** The CMIP6 climate model was used to predict future temperature and humidity trends, with data spatially smoothed using cubic interpolation and the Gaussian filtering. The coupling relationship between temperature and humidity was analyzed by the Pearson correlation coefficients, Spearman correlation coefficients, and mutual information. The CEB-FIP 2010 model was improved *via* introducing a linear relationship between concrete strength and shrinkage development rate, combined with a barometric correction factor. The FEniCS finite element library was used to simulate stress and crack propagation in typical concrete components under different shrinkage strains, thus establishing a risk zonation framework for climate change scenarios.

**Results and discussion** According to the CMIP6 climate model predictions, the average temperature in northwest China will rise significantly over the next 30 a, especially in summer, with some areas exceeding 305 K (*i.e.*, 32 ℃). Simultaneously, the relative humidity will decrease markedly, with some regions of humidity below 40% increasing in the north. These trends will intensify concrete drying shrinkage, particularly in arid regions. The analysis using the Pearson and Spearman correlation coefficients and mutual information reveals a negative correlation between temperature and humidity. In the north of 45°N, the correlation coefficients both approach –0.9, and the mutual information values approach 0.9, indicating a negative linear and monotonic relationship. This coupling will exacerbate concrete shrinkage effects.

Based on 4662 sets of concrete shrinkage experimental data, the CEB-FIP 2010 model is refined *via* introducing a linear relationship between concrete strength and shrinkage development rate, along with a barometric correction factor. The improved model shows an enhanced prediction accuracy, with a nearly 1:1 ratio of overestimation to underestimation, particularly in high-temperature and high-strength concrete scenarios. The results of finite element simulations using the FEniCS library show that concrete cracking initiates at a shrinkage strain of 5.5 $\zeta$ $\times10^{-4}$, with stress concentration at nodes at 7.5 $\zeta$ $\times10^{-4}$, stable surface crack development at 9.0 $\zeta$ $\times10^{-4}$, and widespread crack propagation at 1.1 $\zeta$ $\times10^{-3}$. Based on climate change scenarios, China is divided into five risk zones for concrete shrinkage and cracking damage. From year 2020 to year 2050, medium- and high-risk areas centered on arid regions show a significant outward expansion. By year 2050, the medium- and high-risk zones in the northwest plateau region are notably larger than in year 2020, more than 15%, demanding priority crack-resistant measures to ensure a long-term concrete structural stability.

**Conclusions** Future temperature in arid regions could increase, while relative humidity decreased significantly, with highly coupled temperature and humidity changes that would an exacerbate concrete shrinkage. Atmospheric pressure changes nationwide could be relatively stable, but the low-pressure environment in northwest arid regions could further increase a concrete shrinkage. The improved shrinkage model showed a significant enhancement in prediction accuracy, with a more uniform distribution of shrinkage values and a nearly 1:1 ratio of overestimation to underestimation. Concrete cracking occurred at a shrinkage strain of 5.5 $\zeta$ $\times10^{-4}$, with stress concentration at nodes at 7.5 $\zeta$ $\times10^{-4}$, stable surface crack development at 9.0 $\zeta$ $\times10^{-4}$, and widespread crack propagation at 1.1 $\zeta$ $\times10^{-3}$. China, could be divided into five risk zones, with medium- and high-risk areas centered on arid regions significantly expanding more than 15% outward from year 2020 to year 2050.

**Keywords** climate change; concrete shrinkage; durability; extreme-arid region; risk zoning