

## 高原地区混凝土特殊服役环境时空特性分析与区划

张 明, 邹笃建, 刘铁军, 周 傲, 李 烨

(哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 高原地区特殊环境作用对重大基础设施的长效服役形成了严重挑战。确定工程服役环境是开展混凝土结构耐久性分析与设计的前提, 然而现有腐蚀环境作用研究尚处起步阶段。通过系统分析高原地区气象、水文、地质等环境参数时空演化, 确定代表性城市关键环境参数的概率密度分布, 揭示 大温差、强干燥、高频冻融、低气压、超盐侵蚀 等典型环境作用特征, 并给出用于指导设计室内模拟试验的代表值, 最终形成一个智能、高效的多功能腐蚀环境参数查询与区划系统, 以期高原地区特殊环境下工程结构的耐久性分析与长寿命设计提供技术支持。

**关键词:** 混凝土耐久性; 高原地区; 环境作用; 区划; 时空特性

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)11-3444-16

网络出版时间: 2024-08-23



中国幅员辽阔、跨纬度广、不同区域气候差异显著。随着“一带一路”等国家政策的实施, 重大基础设施建设向中国西部高原地区快速推进。例如, 在建的川藏铁路、青藏高速公路等国家重大交通工程均位于海拔 3 800 m 以上的高原地区。西部高原地区深居内陆, 高原山地对海洋气流的天然阻挡导致沙漠和戈壁广布, 大部分地区为温带大陆性气候, 正负温频繁交替、干旱少雨、多风且风速大、气压低、氧气总量少且盐渍土/盐湖分布广泛等是高原地区典型的环境特征<sup>[1]</sup>。上述高原特殊环境不但导致工程施工与运维困难, 而且要求混凝土结构必须具备优良的抗冻、抗蚀、保水等性能, 以确保其长期稳定的服役。

相较于地震、台风等极端荷载作用研究的日益完善, 针对混凝土长期环境作用的研究尚处起步阶段。金伟良等<sup>[2]</sup>提出了环境区划的概念, 建立了一般大气、氯盐环境和冻融作用下混凝土结构耐久性环境区划; 顾祥林等<sup>[3]</sup>采用多尺度研究方法对环境作用进行定量描述, 建立了碳化和氯盐环境作用区划; 余红发等<sup>[4-5]</sup>建立了基于水冻和盐冻的混凝土冻融作用等级区划, 为机场道面混凝土在盐冻环境下

的耐久性设计提供了区划参考。欧进萍等<sup>[6-7]</sup>研究了疲劳风速、冻融作用和温度作用等关键参数的概率密度分布特征, 并初步建立了上述环境作用的全国区划。牛荻涛等<sup>[8-10]</sup>利用粗糙集理论, 将模糊聚类分析与信息熵相结合, 计算了区域耐久性指标的权重, 建立了广东省、深圳市、陕西省等不同地区混凝土结构耐久性环境作用区划, 并给出了耐久性设计的建议。然而, 现有混凝土长期环境作用研究大多从“环境”而非“工程”的角度来探讨分析环境要素的演变规律, 缺乏便于实际工程应用的环境作用分析工具。此外, 尽管对于混凝土的耐久性问题已开展了大量的试验研究, 但是实际工程服役环境与实验室加速环境间的不一致可能会直接导致混凝土劣化速率及损伤机制存在差异, 将实验室加速条件下测试得到的混凝土性能指标用于实际工程混凝土的预期寿命设计存在明显误差, 缺乏高原混凝土长期环境作用模型成为制约混凝土结构耐久性量化设计的关键。

基于上述问题, 本工作聚焦中国高原地区, 重点针对高原地区“大温差、强干燥、低气压、高频冻融和超盐渍土”的典型环境作用, 深入分析高原

收稿日期: 2024-03-28。 修订日期: 2024-04-17。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFF0500801); 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)。

第一作者: 张 明(1997—), 男, 博士研究生。

通信作者: 刘铁军(1976—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-03-28. Revised date: 2024-04-17.

First author: ZHANG Ming (1997—), male, Doctoral candidate.

E-mail: zhangmingchina@163.com

Correspondent author: LIU Tiejun (1976—), male, Ph.D, Professor.

E-mail: liutiejun@hit.edu.cn

混凝土关键环境参数的时空分布特性, 给出用于指导实验室模拟试验设计建议, 并开发一套辅助于实际工程应用的高原腐蚀环境参数查询与区划平台。研究成果力图开展工程结构的耐久性分析与量化设计提供技术支持。

## 1 数据来源与分析方法

### 1.1 研究范围

高原是指海拔 1 000 m 以上, 地形开阔, 周边

以明显陡坡为界, 比较完整的大面积隆起地区。中国有 4 大高原: 青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和云贵高原。按照行政区划, 中国地势自西向东可被划分为 3 个梯队, 如图 1 所示, 其中第 1 梯队平均海拔 4 000 m 以上, 主要为青藏高原地区; 第 2 梯队平均海拔 1 000~2 000 m, 主要指除青藏高原外的其他 3 大高原地区; 第 3 梯队海拔多低于 500 m, 主要以平原和丘陵为主。本工作重点针对高原地区, 也就是图 1 中第 1 和第 2 梯队所在区域。

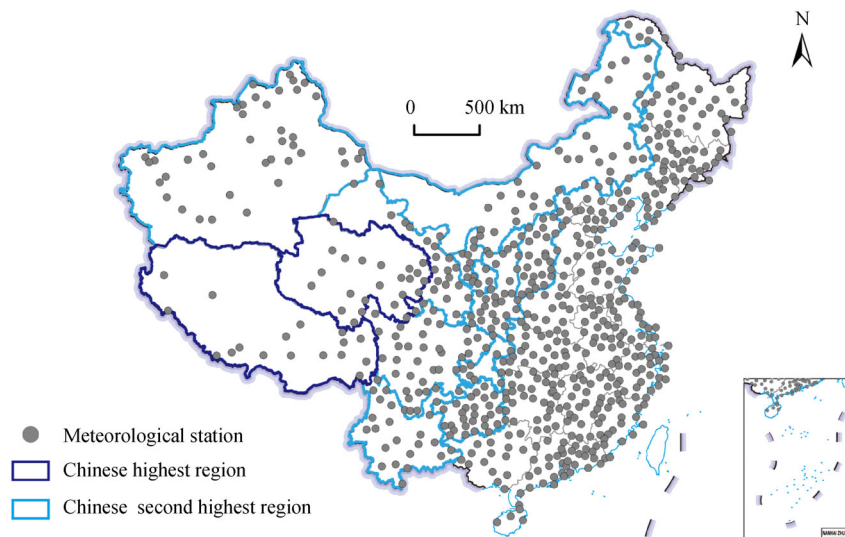


图 1 高原地区(按行政区划划分)及部分气象站点分布(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制, 地图批准号: GS(2019)1673, 底图未变动)

Fig. 1 Location of Chinese plateau (by administrative division) and distribution of meteorological stations. (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 (2019) 1673. The base map remains unaltered)

### 1.2 数据来源

**1.2.1 气象数据** 本工作使用的气象数据为国家气象信息中心 2000~2020 年共 21 年 687 个地面气象站点(如图 1 所示)的日值数据, 包括日最高温度、日最低温度、日平均温度、日平均相对湿度和日平均大气压力等。原始气象数据通过 Python 进行数据分析与处理, 转换为以气象要素命名的逐日数据, 并剔除数据中存在的异常值和缺失值, 对于少量日期数据缺失的站点, 采用上下填补法进行填充。

**1.2.2 盐湖水化学成分数据** 本工作采用的盐湖水化学成分数据来源于中国盐湖资源与环境科学数据库<sup>[11]</sup>。该数据库包含了中国面积超过 1 km<sup>2</sup> 的盐湖基础数据, 包括盐湖名称、地理位置、盐湖面积、水化学类型、盐湖湖表卤水侵蚀性离子类型和浓度等。采用 Python 对数据进行整理和归纳。本工作共使用中国 396 个盐湖的化学成分数据进行后续分析。

### 1.3 数据分析方法

**1.3.1 空间插值方法** 插值是指通过一组具有  $z$  值的离散点, 生成估计表面, 用于估算未采样位置的值并评估估算结果的不确定性。本工作采用普通 Kriging 插值法绘制关键环境参数的区域分布图, 该方法是一个多步骤的过程, 包括数据的统计分析、变异函数建模、表面创建以及可选的变异表面等。工作采用的地理坐标系为 World Geodetic System 1984, 投影坐标系为 Albers。

**1.3.2 数理统计方法** 在数学中, 均值、标准差、分位值等描述性统计方法通常用来总结和描述数据的基本特性, 而概率密度函数(PDF)是用来描述连续性随机变量在某个确定取值点附近的可能性的函数<sup>[12]</sup>。本工作根据各环境要素的时空分布特点选取对应的代表值确定方法。其中概率密度函数采用 Python 中的 distfit 包<sup>[13]</sup>对常用的函数进行自动拟合。

**1.3.3 Kolmogorov-Smirnov 检验** Kolmogorov-Smirnov

Smirnov 检验(K-S 检验)是一种非参数统计方法,用于检验一个样本数据集是否符合特定的理论分布。首先,提出零假设,即假设样本数据服从特定的理论分布。然后,通过比较样本数据的理论分布的累积分布函数(CDF)与经验累积分布函数(ECDF)之间的最大差值和计算得到的  $P$  值,来判断是否拒绝零假设。通常,如果  $P$  值小于预先设定的显著性水平(一般为 0.05),则可以拒绝零假设,表明样本数据与特定分布不相符。

**1.3.4 K-means 聚类算法** 聚类指的是通过数据之间的内在关系将样本划分为若干个类别,使得同类样本之间的相似度高,不同类别之间样本的相似度低,是一种常用的无监督学习方法。 $K$ -means 聚类通过迭代寻找  $K$  个簇,使得聚类结果对应的损失函数最小,并给出每个样本数据对应的中心点。 $K$ -means 聚类方法具有高效的可伸缩性,收敛速度快,可解释性较强。然而该方法受初始值和异常点影响,聚类结果可能不是全局最优,聚类数  $K$  需按经验进行选择。

## 2 高原地区气候环境时空特征分析

### 2.1 大温差

混凝土材料的导热性极差<sup>[14]</sup>。当环境温度剧烈变化时,混凝土构件表面和内部之间的温度梯度会形成较大的温度应力。当温度应力超过混凝土材料本身的极限应力时便会产生裂缝<sup>[15]</sup>。裂缝的存在和扩展不仅引起应力的释放、转移和重新分布<sup>[16]</sup>,还会造成传热性能和传热路径的变化进而改变温度场分布,加剧混凝土的损伤劣化<sup>[17–18]</sup>。研究表明,青藏高原环境下桥梁墩台混凝土的收缩拉应力是一般环境下的 2 倍,已经超过了混凝土的极限抗拉强度<sup>[19]</sup>。大温差是导致混凝土材料开裂的主要原因,尤其是对混凝土的早期性能的影响<sup>[20]</sup>。此外,大温差环境还会降低混凝土的耐磨性和抗冲击性<sup>[21]</sup>。

**2.1.1 大温差聚类及区域分布** 环境大温差作用通常指昼夜环境温度最高值和最低值之差对混凝土产生的温度应力。通常以日较差(日振幅)来评估某地区大温差作用的严酷程度。此外,大温差作用下混凝土内部的温度应力还与环境的日极值温度有关。因此,本工作以 687 个气象站点的累年平均日平均温度和累年平均日温差为指标,采用  $K$ -means 聚类算法,将中国 687 个站点聚类为 6 类,如图 2a 所示。通过对比图中各聚类的聚集程度及中心坐标可以看出,不同聚类的大温差评估指标区别明显。

进一步,通过地理信息处理软件 ArcMap,根据各气象站点的经纬度将聚类结果展示在地图上,并采用普通 Kriging 插值法,将全国大温差作用划分为 6 个分区,如图 2b 所示。由图 2b 可见,区划结果与聚类结果基本吻合。其中,高原地区的大温差作用普遍处于分区 5 和分区 6,其所在站点的累年平均日温差的均值约  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。尤其是对于分区 6,由于所在站点的累年平均日均大气温度的均值为  $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再加上较大的日温差,所以该区域可能存在严重的冻融作用。整体上来看,区域的大温差作用程度与其地势关系密切,西部高原地区大温差作用显著强于东部平原地区,大温差作用最严重的区域主要分布在青藏高原地区和中国的最北部。

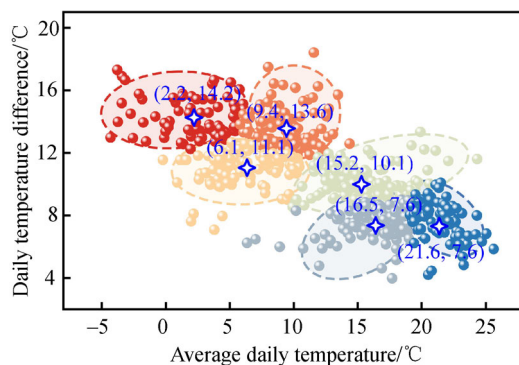
值得注意的是,仅以某地区累年平均日温差作为耐久性设计指标可能会低估环境作用的严酷程度。因此,对于每个站点,本工作首先将累月平均日温差的极大值所在的月份作为“主要月份”。然后通过普通 Kriging 插值法,得到了主要月份累月平均日温差的全国区划,如图 3 所示。由图 3 可见,西藏、新疆、四川、青海、黑龙江等部分地区的累月平均日温差极大值可达  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时,可以直观的对比出高原地区整体的日温差远高于平原地区。

#### 2.1.2 代表城市日温差概率密度分布及代表值

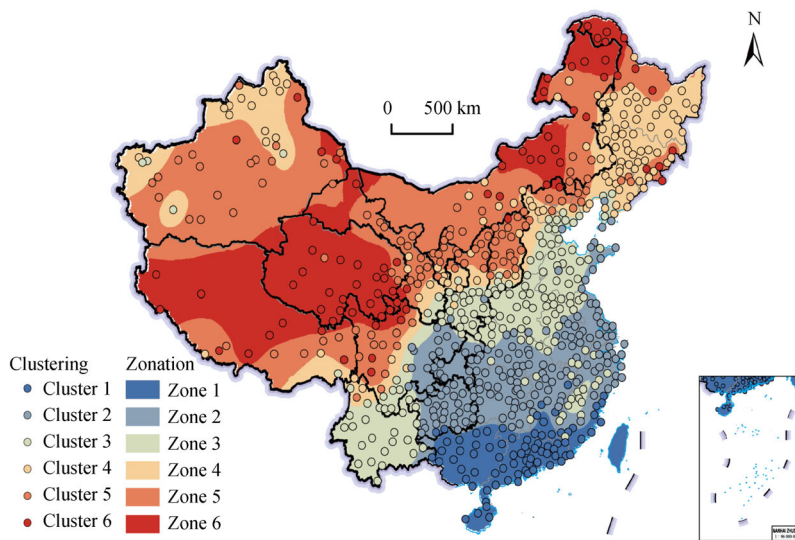
先前的研究常采用环境作用的均值、极值等作为耐久性设计的指标,忽略了不同区域环境参数分布的随机性。与传统混凝土结构材料寿命预测方法不同,基于概率可靠性建模方法主要利用分布函数和随机过程函数对混凝土结构材料荷载和抗力进行定量化。

本工作利用 Python 中 distfit 包对环境数据进行 PDF 拟合<sup>[13]</sup>,其中 distfit 中包含了 11 种在可靠度计算领域广泛应用的函数,能够适应多种不同类型的分布形式,分别为正态分布、指数分布、Weibull 分布、Gamma 分布、Beta 分布、T 分布、Pareto 分布、极值分布等。

为了确定不同环境参数的最优拟合函数,首先使用残差平方和(RSS)评估上述 11 个 PDF 的拟合精度,如图 4a 所示,RSS 越小表示模型拟合结果越好;其次,选择 RSS 最小的 PDF 进行 K-S 检验,通过比较样本数据的 ECDF 与 CDF 之间的最大差值和计算得到的  $P$  值,来判断是否拒绝零假设;最后,绘制频次分布图和 Quantile–Quantile 图(Q–Q 图)对比最佳理论分布函数与样本数据之间的拟合效果,如图 4b~图 4c 所示。



(a) Clustering results of large temperature fluctuations based on K-means clustering algorithm



(b) Zonation of large temperature fluctuations (Provinces with black outlines are the main regions where the Chinese plateau is located)

图 2 全国大温差聚类与区划图 (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 (2019)1673, 底图未变动)

Fig. 2 Clustering and zonation of large temperature fluctuations. (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 (2019)1673. The base map remains unaltered)

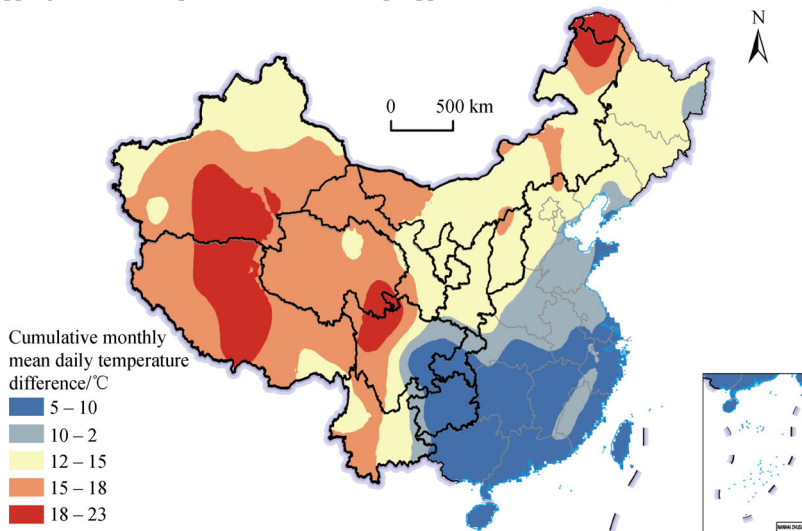
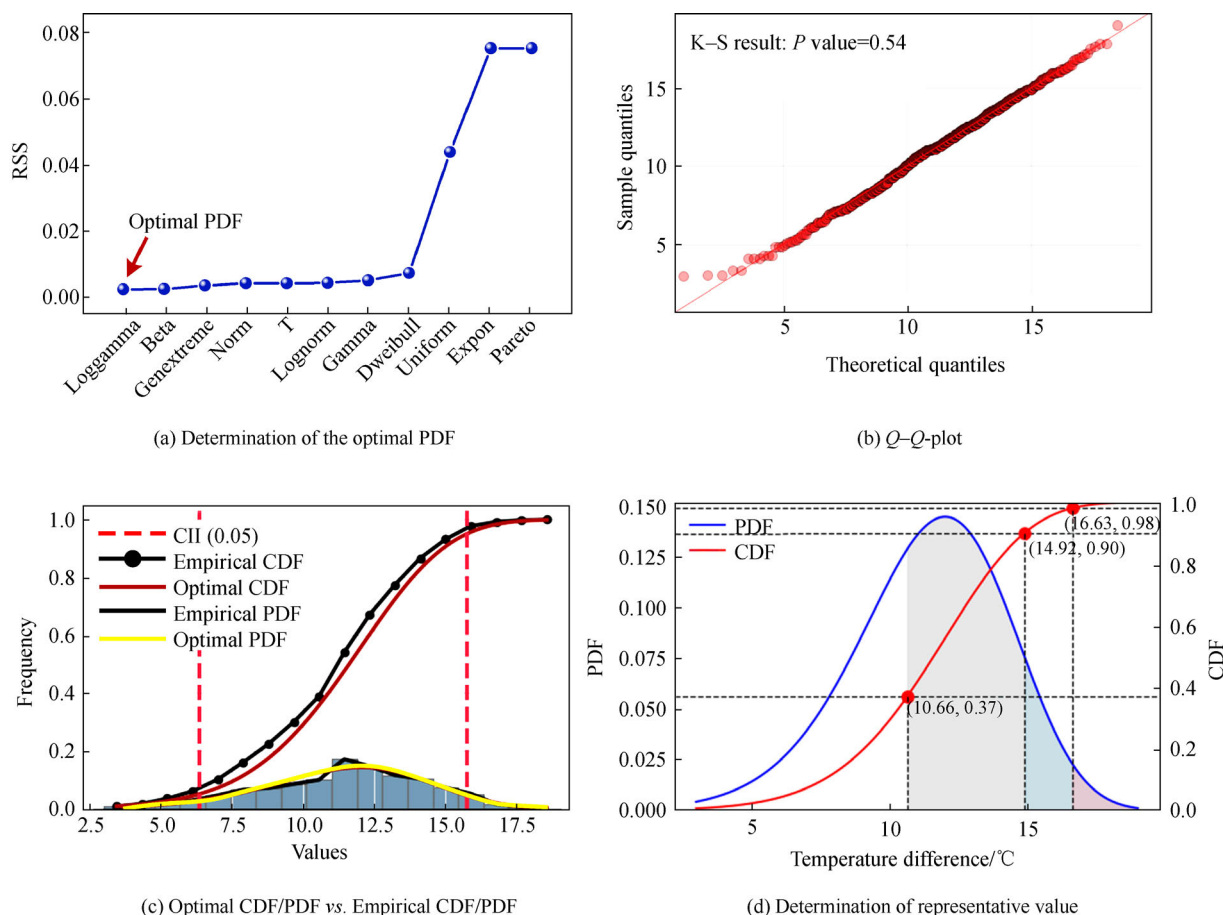


图 3 主要月份累月平均日温差分布(黑线包围区域为高原地区) (依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制, 地图批准号: GS(2019)1673, 底图未变动)

Fig. 3 Distribution of cumulative monthly mean daily temperature difference for the major month. (Provinces with black outlines are the main regions where the Chinese plateau is located.) (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 (2019)1673. The base map remains unaltered)



RSS is residual sum of squares. Q-Q is quantile-quantile. CDF is cumulative density function. PDF is probability density function.

图4 日温差概率密度分布及代表值确定方法(以乌鲁木齐地区为例)

Fig. 4 Determination of PDF and representative values of daily temperature difference (Taking Urumqi as an example)

本工作选取呼和浩特、那曲、酒泉、西宁、银川、乌鲁木齐作为高原地区代表性城市,对代表城市的主要月份日温差频次分布进行拟合分析。各代表城市的最佳拟合PDF及其参数如表1所示, $P$ 值均大于0.05。表明高原地区代表性城市的主要月份日温差频次分布可以通过常见的PDF进行拟合,且主要以Beta分布和对数Gamma分布为主。此外,最佳PDF的不同也反映出高原气候的多样性和复杂性。

在上述研究结果的基础上,为了给出用于指导

室内模拟试验的日温差代表值,本工作参考GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》<sup>[22]</sup>中地震作用代表值的确定方法,分别以50年设计基准期内的常遇值(50年一遇,超越概率63%)、中遇值(475年一遇,超越概率10%)和罕遇值(2000年一遇,超越概率2%)作为代表值,如图4d所示,即选取累计概率密度为37%、90%和98%所对应的温差,从而得到了如表2所示的高原地区典型城市主要月份的日温差代表值。

表1 代表城市主要月份日温差概率密度分布

Table 1 Probability density distribution of daily temperature difference for the major month in representative cities

| Representative city | Optimal PDF | Parameters of PDF          | RSS     | $P$ value |
|---------------------|-------------|----------------------------|---------|-----------|
| Hohhot              | Beta        | (4.00, 3.38, 1.56, 23.24)  | 0.001 6 | 0.35      |
| Nagqu               | Log-gamma   | (0.90, 20.25, 3.34)        | 0.001 4 | 0.45      |
| Jiuquan             | Beta        | (8.30, 6.82, -0.94, 28.29) | 0.001 2 | 0.52      |
| Xining              | Beta        | (3.73, 2.66, -0.24, 29.11) | 0.000 9 | 0.09      |
| Yinchuan            | Beta        | (3.32, 3.44, 2.78, 22.92)  | 0.000 8 | 0.49      |
| Urumqi              | Log-gamma   | (5.14, 1.86, 6.21)         | 0.002 5 | 0.54      |

Note: In the column Parameters of PDF (shape, loc, scale), loc, scale, and shape refer to the location, scale, and shape parameters (some functions have two shape parameters), respectively.

表 2 代表城市主要月份日温差代表值

Table 2 Representative values of daily temperature difference for major months in representative cities

| Representative city | Frequent occurrence value/°C | Medium occurrence value/°C | Rare occurrence value/°C |
|---------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Hohhot              | 12.79                        | 19.42                      | 21.71                    |
| Nagqu               | 17.10                        | 22.79                      | 24.63                    |
| Jiuquan             | 13.43                        | 19.14                      | 21.44                    |
| Xining              | 15.05                        | 23.59                      | 26.19                    |
| Yinchuan            | 12.53                        | 19.57                      | 22.10                    |
| Urumqi              | 10.66                        | 14.92                      | 16.63                    |

## 2.2 极端干燥

环境湿度也是引起混凝土非荷载破坏的重要环境参数之一。混凝土的耐久性很大程度上取决于混凝土初始养护阶段水泥的水化程度<sup>[23]</sup>。高原地区混凝土初始养护阶段需保证良好的湿度环境,以提高混凝土的抗收缩开裂能力。对于大体积混凝土,短时期内环境湿度主要影响表层位置,当表层位置开裂后,混凝土的整体性能随之受到影响而产生劣化,最终造成严重开裂和混凝土材料失效<sup>[24-25]</sup>。研究表明<sup>[26-28]</sup>,在大温差和低湿度等自然养护条件下,高原地区混凝土抗裂性能和力学性能更差,并且混凝土的孔结构呈粗化和劣化的趋势,混凝土的抗渗性能大幅降低。

2.2.1 全国干燥程度区域统计 通过前期对 687 个气象站点 21 年的日、月、季、年际相对湿度数据

的分析发现,大气相对湿度受降雨影响显著,且具有明显的季节差异性。仅以年均相对湿度为指标会严重低估部分地区环境的干燥程度。

以各月份累月平均相对湿度最小值所在月份作为该地区的“最干燥月份”,采用普通 Kriging 插值法绘制得到了中国最干燥月份累月平均相对湿度分布图,如图 5 所示。由图 5 可见,累月平均相对湿度低于 30% 的地区大多位于中国西部高原地区,如新疆、西藏、甘肃、内蒙古和青海。此外,累月平均相对湿度呈现从东南沿海向西北内陆逐渐递减的趋势,大部分高原地区的累月平均相对湿度小于 40%。高原地区和平原地区在相对湿度分布上表现出截然不同的特征,主要受地形对气流、云层分布以及地面蒸发等过程的影响。

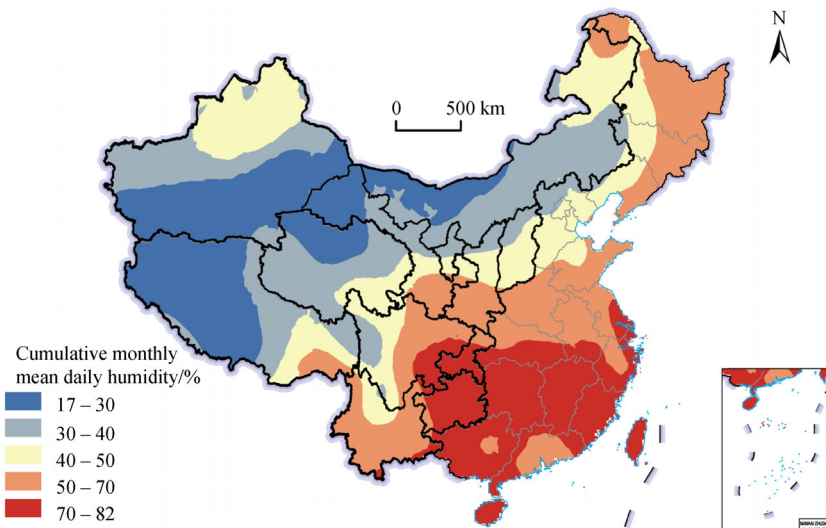


图 5 最干燥月份累月平均相对湿度分布(黑线包围区域为高原地区)(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制,地图批准号: GS(2019)1673,底图未变动)

Fig. 5 Distribution of cumulative monthly mean relative humidity for the major month (Provinces with black outlines are the main regions where the Chinese plateau is located.) (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 (2019) 1673. The base map remains unaltered.)

2.2.2 代表城市相对湿度概率密度分布及代表值 参考 2.1.2 节,采用常用的概率密度函数对最干燥月份相对湿度的频次分布进行拟合,最佳拟合结果如

表 3 所示。由表 3 可知,高原地区代表城市主要月份相对湿度的频次分布主要满足对数正态分布、广义极值分布和 Beta 分布。值得注意的是,中国并非

所有地区最干燥月份的相对湿度频次分布都能够采用常见的概率密度分布函数进行拟合, 主要原因在于大气湿度受季风、降雨等因素的影响显著, 局部的气象条件可能导致相对湿度的分布模式出现非典型的特征。

参考 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》<sup>[22]</sup>, 与 2.1 节大温差代表值的确定方法不同的是, 环境相对湿度越低, 其对混凝土早期施工养护和长期耐久性能影响越大。因此, 如图 6 所示, 应当选取累积概率密度分别为 63%、10%和 2%时对应的相对湿度值作为强干燥环境作用的代表值, 如表 4 所示。

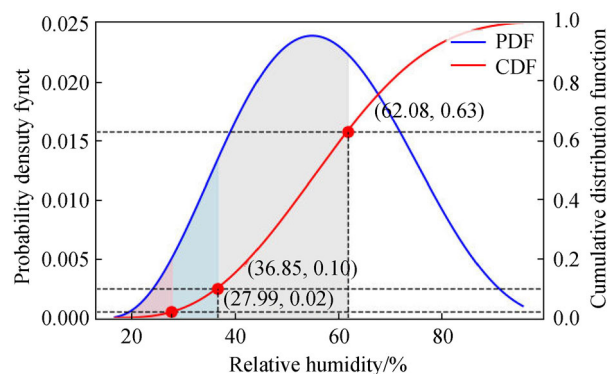


图 6 相对湿度代表值确定方法(以乌鲁木齐地区为例)  
Fig. 6 Determination of representative values of relative humidity (Taking Urumqi as an example)

表 3 代表城市主要月份相对湿度概率密度分布

Table 3 Probability density distribution of relative humidity for the major month in representative cities

| Representative city | Optimal PDF               | Parameters of PDF          | RSS    | P value |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|--------|---------|
| Hohhot              | Log-normal                | (0.54, 4.20, 24.18)        | 0.0001 | 0.74    |
| Nagqu               | Gamma                     | (2.41, 8.68, 9.80)         | 0.0001 | 0.02    |
| Jiuquan             | Generalized extreme value | (-0.14, 24.57, 9.80)       | 0.0003 | 0.43    |
| Xining              | Beta                      | (2.29, 3.86, 13.91, 80.72) | 0.0001 | 0.15    |
| Yinchuan            | Generalized extreme value | (-0.14, 26.44, 10.01)      | 0.0003 | 0.10    |
| Urumqi              | Beta                      | (3.72, 4.66, 14.78, 94.83) | 0.0001 | 0.38    |

Note: In the column Parameters of PDF (shape, loc, scale), loc, scale, and shape refer to the location, scale, and shape parameters (some functions have two shape parameters), respectively.

表 4 代表城市主要月份相对湿度代表值

Table 4 Representative values of relative humidity for major months in representative cities

| Representative city | Frequent occurrence value/% | Medium occurrence value/% | Rare occurrence value/% |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Hohhot              | 33.13                       | 16.40                     | 12.24                   |
| Nagqu               | 34.16                       | 16.11                     | 12.06                   |
| Jiuquan             | 32.64                       | 16.91                     | 12.46                   |
| Xining              | 48.33                       | 25.45                     | 19.26                   |
| Yinchuan            | 34.66                       | 18.57                     | 14.08                   |
| Urumqi              | 62.08                       | 36.85                     | 27.99                   |

## 2.3 高频冻融

高频冻融是高原混凝土面临的主要环境作用之一。胶凝材料中液态水和冰晶之间的化学势差驱动了冻结和融化过程<sup>[29]</sup>。冻结过程中的有害应力可由水力压力、冰结晶压力、冰固两相热效应不匹配等因素引起<sup>[30]</sup>。冻融循环会导致混凝土材料的微观孔隙率变化和宏观变形<sup>[31]</sup>。由于残余变形, 胶凝材料的孔隙率、孔隙形态、孔径分布等微观结构发生劣化, 从而导致混凝土力学性能退化<sup>[32–34]</sup>。影响混凝土抗冻性能的因素除了混凝土材料参数如孔结构特征、含气量外<sup>[35]</sup>, 还包括混凝土饱水度、最低冰冻温度、降温速率、冻融频次等<sup>[36–39]</sup>。高原地区的气温变化剧烈, 正负温度的频繁变化会加剧混凝土

的冻融循环破坏, 严重影响混凝土结构的安全和使用寿命<sup>[40]</sup>。

2.3.1 冻融判定及冻融严酷程度分析 孔隙尺寸、分布、形状和孔隙率是决定混凝土内部孔隙溶液冰点和结冰量的决定性因素<sup>[35]</sup>。混凝土内部的结冰程度还与孔隙水饱和度、侵蚀介质浓度以及材料的固有特性有关。目前, 学界尚未对混凝土内部的冰-水相变点达成共识<sup>[41]</sup>。参考 Kelvin 方程中凝固点与毛细孔隙弯月面半径之间的关系<sup>[42–43]</sup>, 可以推断出对于直径约为 100 nm 的混凝土内毛细孔, 内部孔隙冰点大约在 -3 °C。此外, Chen 等<sup>[44]</sup>试验研究结果表明不同饱和度下混凝土内部水分结冰温度为 -4.8 °C 至 -2.5 °C, 融化温度始终为 0 °C, 且混凝土

砂浆温度的测试结果与大气温度吻合良好。因此, 本工作假设日最高大气温度高于  $0^{\circ}\text{C}$  且日最低大气温度低于  $-3^{\circ}\text{C}$  为 1 次冻融循环。

根据 2021 年中国 687 个站点的大气温度数据, 按照上述冻融循环判定标准, 统计得到了各站点累年平均冻融循环次数。然后, 采用普通 Kriging 插

值法, 绘制了全国范围的累年平均冻融循环次数分布图, 如图 7 所示。通过对比可以发现, 西部高原地区的年均冻融循环次数明显高于东部平原地区, 年均冻融次数最高的省份为西藏, 最高可达 188 次。其次为青海, 远远高于黑龙江、吉林等东北地区和河北、山东等华北地区。

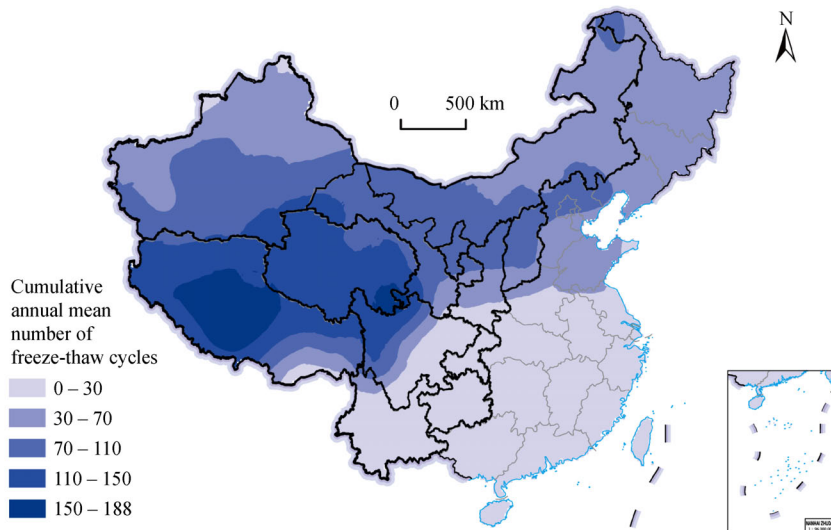


图 7 累年平均冻融循环次数分布(黑线包围区域为高原地区)(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制, 地图批准号: GS(2019) 1673, 底图未变动)

Fig. 7 Distribution of cumulative annual mean number of freeze-thaw cycles (Provinces with black outlines are the main regions where the Chinese plateau is located.) (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 (2019)1673. The base map remains unaltered)

**2.3.2 全国冻融作用等级三参数区划** 开展混凝土冻融耐久性定量设计是实现寒冷地区工程结构预期服役寿命的关键, 耐久性定量设计的前提在于厘清不同区域独特的环境作用条件<sup>[45-46]</sup>。区划图将一个整体区域划分为具有相同环境特征子区域, 有助于对比突出实际工程服役环境的共性和差异<sup>[47]</sup>。然而, 针对混凝土长期冻融作用的区划研究尚处于起步阶段, 大部分区划研究仅通过单一冻融指标(如最低冰冻温度、年均冻融次数等)对不同地区冻融作用程度进行划分, 没有明确给出各地区冻融试验参数的取值, 不利于实际工程应用推广<sup>[4-7]</sup>。

本工作以冻融温差、最低冰冻温度和冻融次数作为确定某地区冻融作用的关键参数。首先提取各站点的累年平均冻融循环次数和主要冻融月份的平均日最低温度和平均日温差。经过统计分析发现, 在年均冻融循环次数  $< 15$  次的区站点中, 有 143 个站点年均冻融次数为 0 次, 141 个站点年均冻融次数介于 1~15 次, 这些站点主要冻融月份平均日最低温度大多高于  $0^{\circ}\text{C}$ , 这表明了这些地区冻融作用发生幅值小、频次低且具有偶然性。且这些站点分布

区域性显著, 大多分布在中国气候温和的东南地区。为了对冻融环境作用进行合理评估, 本工作将年均冻融循环次数 15 次作为 1 个阈值, 对于年均冻融次数低于 15 次的站点, 忽略其冻融作用。然后采用 K-means 聚类算法, 对存在冻融循环的 403 个区站点进行聚类。

图 8a 为 403 个存在冻融作用的站点的冻融聚类三维散点图<sup>[48]</sup>, 图中显示了各聚类散点聚集程度高, 且各聚类的年均冻融循环次数范围呈现明显的梯度, 证明了聚类方法的有效性, 同时也反映了中国各地区冻融作用存在明显的区域差异性。

为了建立全国范围内冻融作用等级区划, 基于普通 Kriging 插值法, 以累年平均冻融循环次数为指标进行区划, 将全国冻融作用划分为 6 个区域, 并分别定义为无冻融区、微冻融区、轻度冻融区、中度冻融区、严重冻融区、极端冻融区。全国冻融作用等级分区及区站点所属聚类结果如图 8b 所示<sup>[48]</sup>。表 5 为图 8b 中冻融区划指标及各冻融聚类的站点数量和中心坐标(关键冻融设计参数)。值得注意的是, 图 8b 和表 5 属于冻融环境区划的 2 种形式, 2 类区划息息相关, 互为补充。

其中，图 8b 主要从宏观层面上展示了中国冻融环境作用的区域分布特性。而表 5 中关键冻融设计参数能明显区分不同作用等级的冻融环境的严酷程度，其更加便于工程应用。

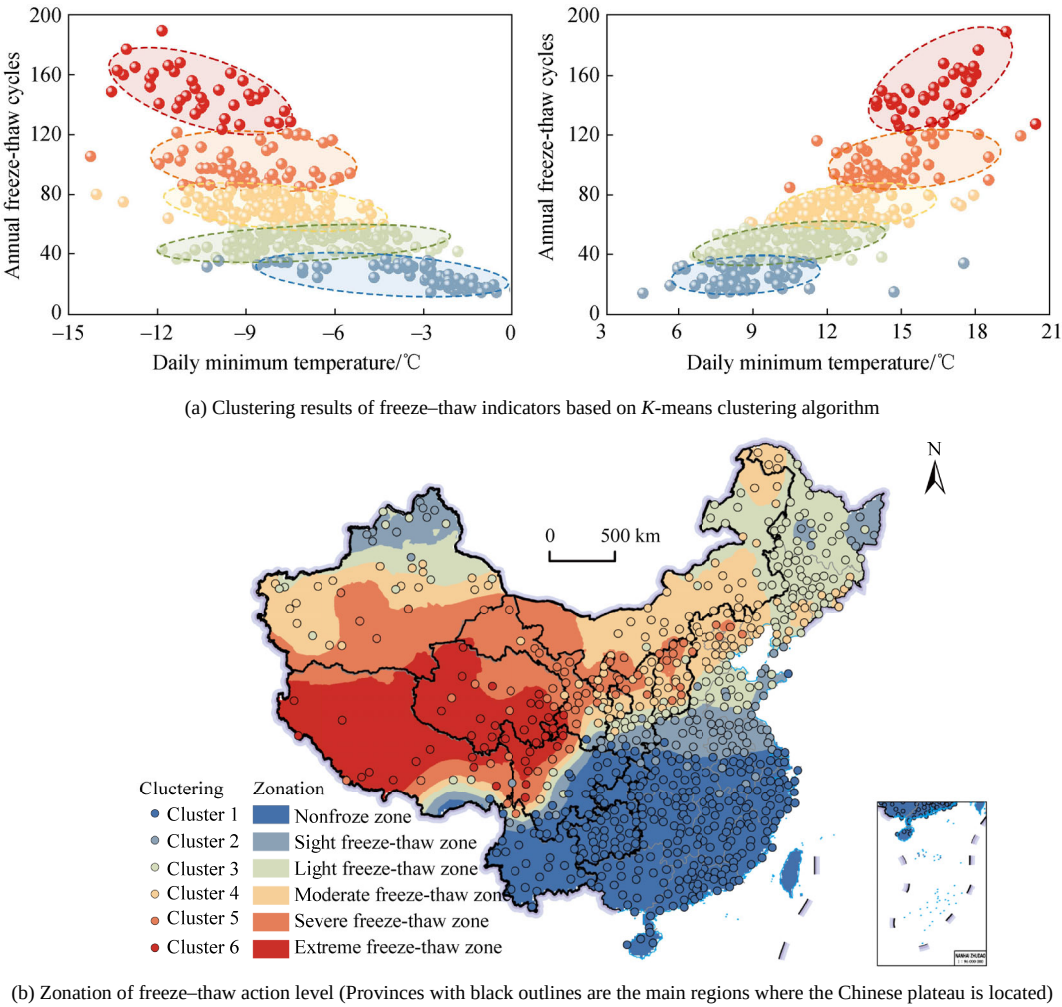


图 8 全国冻融作用等级区划(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制，地图批准号：GS (2019) 1673，底图未变动)

Fig. 8 Zonation of freeze-thaw action levels. (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 (2019)1673. The base map remains unaltered)

表 5 各冻融作用等级下关键设计参数

| Table 5 Critical parameters for each freeze-thaw actions level |                                                                  |                |                              |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------|
| Freeze-thaw action level                                       | Zonation indicator (average annual number of freeze-thaw cycles) | Station number | Key parameters of each level |
| Nonfrozen zone                                                 | < 15                                                             | 284            |                              |
| Sight freeze-thaw                                              | 15–40                                                            | 78             | (26, −3.2, 8.7)              |
| Light freeze-thaw                                              | 40–60                                                            | 118            | (49, −6.6, 10.6)             |
| Moderate freeze-thaw                                           | 60–80                                                            | 111            | (71, −8.0, 12.3)             |
| Severe freeze-thaw                                             | 80–120                                                           | 58             | (97, −8.8, 14.4)             |
| Extreme freeze-thaw                                            | ≥ 120                                                            | 38             | (147, −10.4, 16.4)           |

Note: The last column ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) in this table is the center coordinate of each cluster, where  $a$  indicates the average annual number of freeze-thaw cycles at the corresponding station,  $b$  represents the average daily minimum temperature during the primary freeze-thaw months at the corresponding station, and  $c$  denotes the average daily temperature difference during the primary freeze-thaw months at the corresponding station.

2.4 低气压

高原地区海拔较高，大气稀薄，大气压力随海拔的升高会逐渐降低<sup>[49]</sup>。低气压环境对混凝土含气量和

气泡稳定性有显著的影响<sup>[50]</sup>，低压环境下液体界面特性会发生改变(表面张力增大)，气泡的液膜变薄，膜强度的降低致使其更容易发生破裂，导致引气剂的引

气能力和稳泡能力被削弱<sup>[51-52]</sup>。研究表明低气压环境会影响混凝土拌合物的工作性能<sup>[53]</sup>, 并且在低气压环境下混凝土的力学性能远低于标压环境下, 伴随出现了较大的收缩应变<sup>[54]</sup>。此外, 低气压会促使混凝土表面水分更快地蒸发, 加速内部水分向表面迁移, 使得气泡逸出和破裂, 进一步降低了含气量<sup>[55]</sup>。

通过前期对各站点 21 年的日、月、季、年际大气压力数据的分析发现, 大气压力呈现明显的季节变化特性, 在夏季气压普遍较高, 冬季气压较低,

主要原因在于大气压力会受环境温度的影响, 大气温度较高时气体膨胀, 使得压力降低。相反, 大气温度较低时气体收缩, 导致压力升高。此外, 不同地区的年值大气压力变异性较小, 数据分布较为集中, 因此在进行室内模拟试验设计时建议以各地区均值为指标。图 9 展示了以大气压力均值为指标绘制的中国大气压力分布图。有图 9 可以看出, 气压分布与中国地势相似呈现阶梯状。青藏高原地区气压最低, 最低大气压力不足 600 hPa。

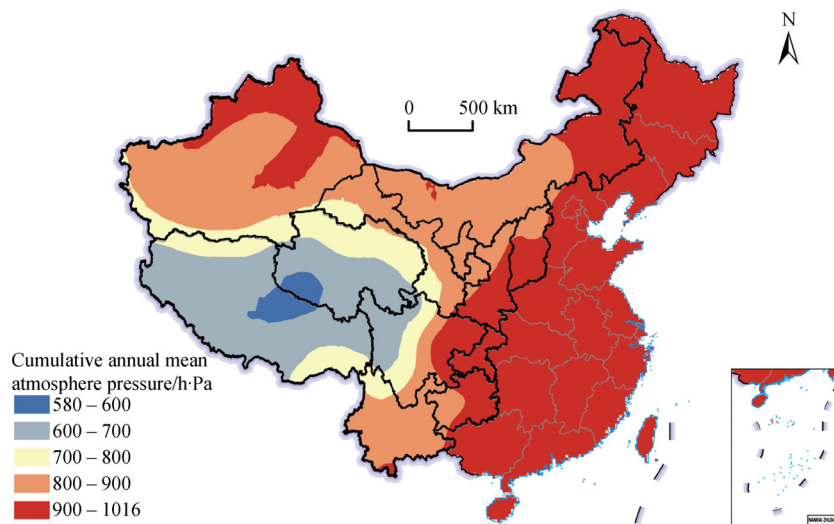


图 9 累年年均大气压力分布(黑线包围区域为高原地区)(依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制, 地图批准号: GS (2019) 1673, 底图未变动)

Fig. 9 Distribution of cumulative annual mean atmosphere pressure. (Provinces with black outlines are the main regions where the Chinese plateau is located.) (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 (2019) 1673. The base map remains unaltered)

### 3 盐侵蚀介质分布与试验配制建议

#### 3.1 高原地区盐侵蚀介质分布

盐渍土种类繁多, 分布面积广泛, 全球盐渍土面积达 10 亿公顷。在中国, 盐渍土主要分布在内陆干旱和半干旱以及滨海地区, 面积超过 20 万  $\text{km}^2$ , 占全国可用土体的 5% 左右<sup>[56]</sup>。受各类盐分的溶解度差异的影响, 不同的地理、地貌、工程地质和水文地质环境下, 盐渍土的宏观分布是有一定规律的。根据国家地球系统科学数据中心土壤分中心盐渍土数据, 如图 10 所示, 中国盐渍土大致可分为 8 大区域<sup>[57]</sup>: 滨海湿润半湿润海水浸渍盐渍区、东北半湿润半干旱草原盐渍区、黄淮海半湿润半干旱耕作盐渍区、内蒙古高原干旱半荒漠盐渍区、黄河中上游半干旱半荒漠盐渍区、甘新蒙干旱荒漠盐渍区、青新极端干旱荒漠盐渍区和西藏高寒荒漠盐渍区。

盐湖的形成和分布严格受到地理环境和气候条件的控制, 具有明显的区域性和地带性特点。根据

中国盐湖资源与环境数据库中盐湖水化学成分数据, 中国盐湖可划分为 4 个区域, 如图 10 所示, 分别为青藏高原盐湖区、西北部盐湖区、东北部盐湖区和东部分散盐湖区。其中, 中国盐湖分布最多的省份为新疆、西藏、内蒙古和青海<sup>[58]</sup>。碳酸盐型盐湖主要分布在内蒙古高原, 其次是西藏和新疆等地方。内蒙古鄂尔多斯盆地天然碱湖密集成群, 是中国乃至世界碳酸盐型盐湖数量最多分布最为集中的地区。硫酸盐型盐湖(含硫酸钠亚型和硫酸镁亚型)在中国分布最为普遍, 数量也最多, 在每个省区的盐湖成盐区均有分布。氯化物型盐湖在中国数量不多, 仅在青海柴达木盆地和新疆少数地区有所分布。

#### 3.2 侵蚀溶液配制建议

调研发现, 目前中国盐渍土大面积普查数据相对匮乏, 已有文献中提及的盐渍土易溶盐成分数据仅覆盖极少地点<sup>[59-63]</sup>, 并且这些数据之间存在较大的离散性。尽管中国腐蚀与防护网中可以查询到部分混凝土土壤腐蚀数据, 然而, 该数据库仅包含格

尔木、库尔勒、拉萨等约 10 个试验地点的不同试验时间和采样深度的盐渍土数据，难以开展侵蚀介质的区域分析。尽管全国第 3 次土壤普查中已纳入易溶盐成分测试项目，但由于该项目刚刚启动，目前尚未发现可用的完整的数据库<sup>[64]</sup>。

从盐渍土和盐湖的分布来看，如图 10 所示，盐渍土区域往往与盐湖存在密切的关系，尤其在中国西部和北部的高原地区。盐渍土和盐湖作为特定地质和水文环境下的侵蚀环境，其侵蚀性离子类型和浓度具有密切相关性。首先盐湖和盐渍土均处于包含富含盐类矿物的地质构造中，使得它们在地质过程和成分来源上存在相似性，进而影响了水体中侵蚀性离子的类型和浓度。其次，盐湖中的水分可以

通过水文循环进入周围的土壤，形成盐渍土，从而导致两者之间水体化学特性的相互影响。盐湖中的离子浓度相对恒定，同时具有代表性，参考盐湖卤水的易溶盐数据进行侵蚀溶液的配制是合理且有效的方法。

本工作采用中国盐湖资源与环境数据库中 396 个盐湖的水化学成分数据。首先分析了各离子的频次分布情况，发现离子浓度分布不存在明显的规律性，不同盐湖之间离子浓度差异明显，且大多盐湖中离子浓度偏低。其中镁离子浓度均值为 2.3 g/L，方差为 6.8 (g/L)<sup>2</sup>；氯离子浓度均值为 37.6 g/L，方差为 61.3 (g/L)<sup>2</sup>；硫酸根浓度均值为 10.9 g/L，方差为 19.8 (g/L)<sup>2</sup>。

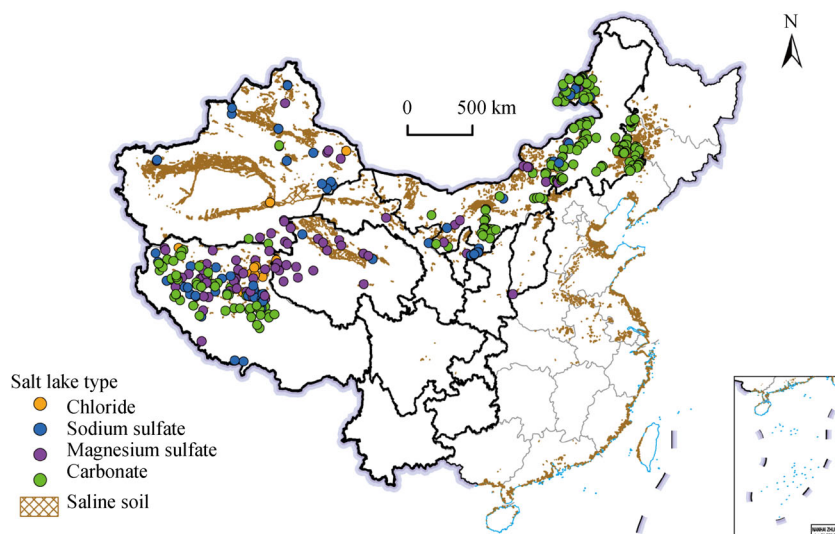


图 10 部分盐湖和盐渍土分布(黑线包围区域为高原地区) (依据国家测绘局标准地图服务网中华人民共和国地图进行绘制，地图批准号：GS (2019) 1673，底图未变动)

Fig. 10 Distribution of partially salt lakes and saline soils. (Provinces with black outlines are the main regions where the Chinese plateau is located.) (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 (2019)1673. The base map remains unaltered)

为了能在实验室内模拟真实服役环境下离子侵蚀情况，以最小欧式距离为标准，选取最接近 3 个单一离子浓度代表值(95%分位值、第三四分位值、中位值和均值)的真实盐湖湖表卤水浓度。欧式距离公式如下所示：

$D =$

$$\sqrt{(c_{\text{Mg(T)}} - c_{\text{Mg(R)}})^2 + (c_{\text{Cl(T)}} - c_{\text{Cl(R)}})^2 + (c_{\text{SO}_4\text{(T)}} - c_{\text{SO}_4\text{(R)}})^2} \quad (1)$$

式中： $c_{\text{Mg(T)}}$ 、 $c_{\text{Cl(T)}}$ 、 $c_{\text{SO}_4\text{(T)}}$ 分别代表实际盐湖中镁离子、氯离子和硫酸根的浓度； $c_{\text{Mg(R)}}$ 、 $c_{\text{Cl(R)}}$ 、 $c_{\text{SO}_4\text{(R)}}$ 分别代表通过统计分析得到的镁离子、氯离子和硫酸根的浓度代表值； $D$ 表示欧式距离，当  $D$  最小时对应的盐湖为代表性盐湖。表 6 为典型

侵蚀性离子浓度代表值及计算得到的代表性盐湖。以 95%分位值为例，经计算可得出所有盐湖中最具代表性的盐湖为位于内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗的吉兰泰盐湖，其镁离子浓度为 16.5 g/L，氯离子浓度为 173.7 g/L，硫酸根浓度为 46.3 g/L。该盐湖密度为 1.22 g/cm<sup>3</sup>，因此，实验室复合侵蚀溶液配制建议为镁离子质量分数为 1.4%，氯离子质量分数为 14.3%，硫酸根质量分数为 3.8%。

#### 4 腐蚀环境参数查询与区划系统

针对现场调研发现的混凝土劣化现象，及时结合当地气象、水文等腐蚀环境信息，快速判断劣化原因并提出切实有效的解决措施至关重要，然而，

目前尚未发现可直接应用于快速获取工程服役环境参数的平台或工具。本部分通过对气象、水文等腐蚀环境参数的统计分析,开发了一款名为“腐蚀环境参数区划”微信小程序,通过输入或定位目标位置,便可快捷地查询目标站点及其周围站点的腐蚀环境

信息,为工程结构的耐久性分析与设计提供较大的便利性。

小程序主要集成了定位与检索、基本参数查询、冻融作用分析、环境参数区划等功能,开发流程图如图 11 所示:

表 6 代表性盐湖主要侵蚀离子浓度

Table 6 Concentrations of major aggressive ions in representative salt lakes

| Representative value | Representative values of major aggressive ion concentrations/(g·L <sup>-1</sup> ) |          |         | Representative salt lake | Actual aggressive ion concentrations in salt lakes /(g·L <sup>-1</sup> ) |          |         |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------|---------|
|                      | Magnesium                                                                         | Chloride | Sulfate |                          | Magnesium                                                                | Chloride | Sulfate |
| 95%                  | 12.9                                                                              | 180.1    | 54.0    | Jilantai Salt Lake       | 16.5                                                                     | 173.7    | 46.3    |
| 75%                  | 1.1                                                                               | 49.2     | 13.2    | Pengyancuo Salt Lake     | 0.1                                                                      | 45.6     | 8.0     |
| 50%                  | 0.0                                                                               | 4.0      | 1.8     | Haolaoba Salt Lake       | 0.0                                                                      | 4.2      | 1.4     |
| Mean                 | 2.3                                                                               | 37.6     | 10.9    | Laguercuo Salt Lake      | 1.4                                                                      | 33.8     | 13.2    |

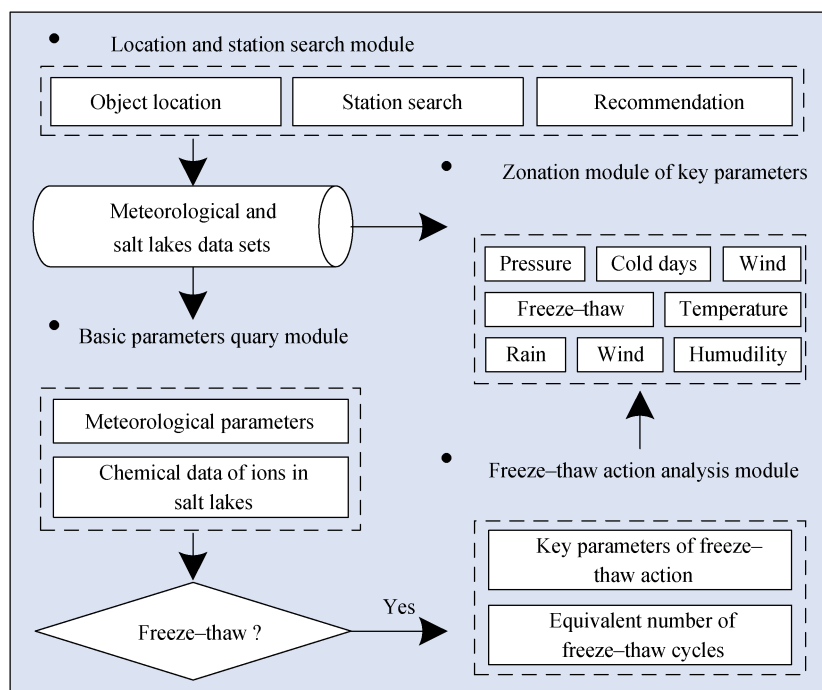


图 11 小程序开发流程图

Fig. 11 Process of WeChat mini program development

1) 定位与检索模块(见图 12a)集成地图服务,分别布设气象站点、栅格站点和盐湖站点,通过点击即可快速查询目标位置处腐蚀环境基本参数,同时开发了定位和地图搜索功能,通过获取用户所在位置,推荐附近站点并计算距离;

2) 基本参数查询模块(见图 12b)读取用户待检索的气象站点、栅格站点或盐湖站点名称或位置,匹配数据库中对应的气象环境参数信息或盐湖水质化学参数信息,并将获取结果返回到用户输入界面中;

3) 冻融作用分析模块(见图 12c)可获取包括年均冻融次数、冻融频次最高月份及主要冻融月份平

均日最低温度和平均日温差等基本冻融作用参数,以及冻融作用等级、冻融作用区划及各区划等级下关键冻融指标,同时可以得到不同水灰比、含气量和水泥浆体体积分数等材料参数下目标站点的等效冻融循环次数;

4) 环境参数区划模块(见图 12d)提供了年均大气温度、年均冻融次数、年均风速、年均大气压力、年均日照时数、年均相对湿度、年均累计降雨量、年均低于-10℃天数、年均大气温度和年均地表温度等基本环境参数的区划图,便于用户了解环境参数的分布特性和区域差异。

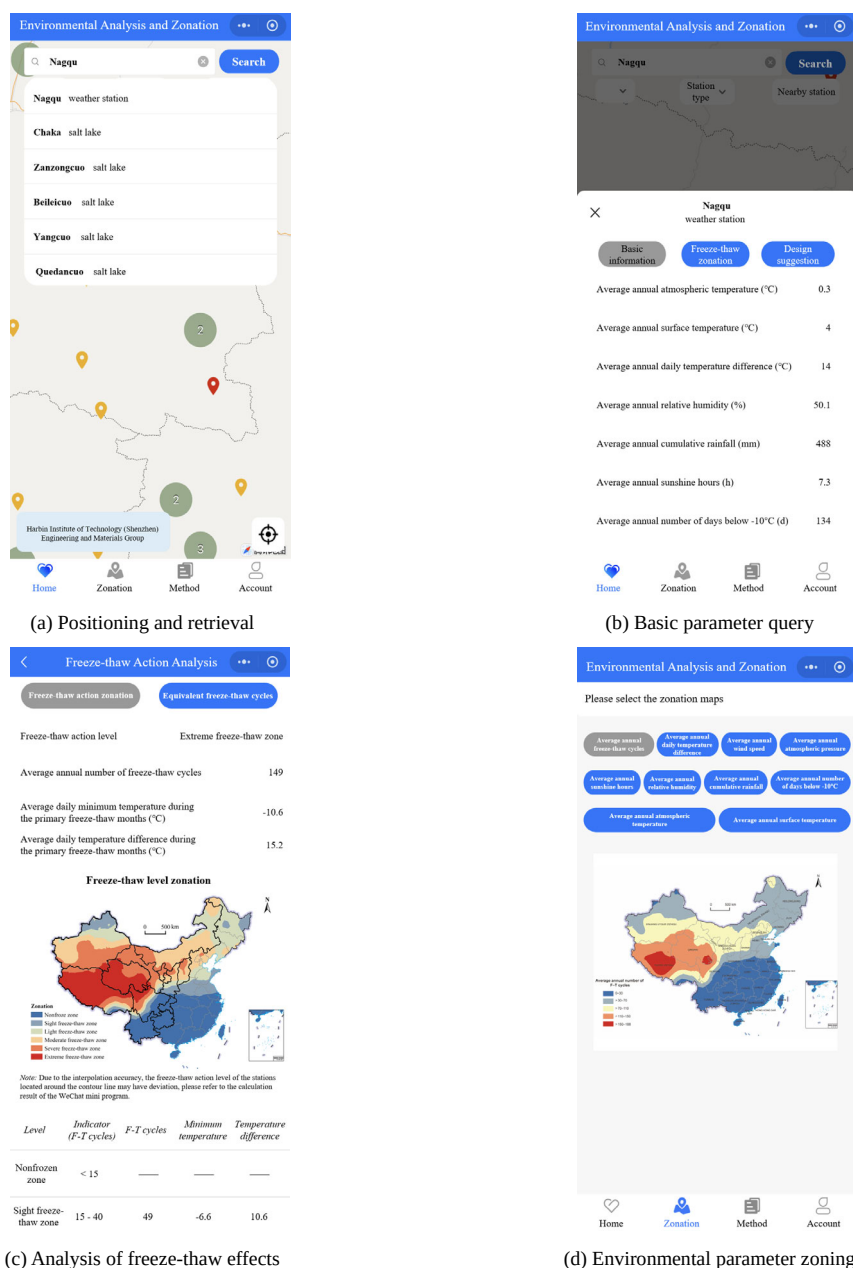


图 12 小程序主要功能展示  
Fig. 12 Main functions of WeChat mini program

## 5 结论

本工作系统分析了我国高原地区气象水文等混凝土特殊服役环境参数的时空演化和分布情况，揭示了高原地区“大温差、强干燥、高频冻融、低气压、超盐渍土”等典型环境作用特征，同时基于聚类分析和普通 Kriging 插值等数理统计方法给出了用于指导室内模拟试验设计的代表值，综合上述研究成果，最终建立了一个智能、高效的多功能腐蚀环境参数查询与区划小程序，具体研究成果如下：

1) 大温差、强干燥、高频冻融、低气压等影响混凝土耐久性的特殊服役环境作用在青藏高原地区

最为剧烈。我国不同区域环境作用差异显著，即使对于相同省份的不同城市间也不能一概而论，建议参考本研究的统计分析结果，因地制宜地开展室内模拟试验制度设计。

2) 表征服役环境冻融作用程度的指标包括冻融温差、最低冰冻温度和冻融次数，通过对不同地区冻融指标的聚类发现，中国不同地区冻融作用等级区别明显，尤其是年均冻融次数呈现明显的梯度差异，以年均冻融次数为指标得到的冻融作用区划与三参数聚类结果基本吻合。

3) 盐渍土与盐湖的成因与分布关系密切。通过对不同盐湖中侵蚀性离子浓度的综合分析发现，不

同区域离子浓度变异性强,建议依据统计结果设置浓度梯度。此外,实验室复合侵蚀溶液配制建议为镁离子质量分数为1.4%,氯离子质量分数为14.3%,硫酸根质量分数为3.8%。

4) 搭建了一个微信端集定位与检索、基本参数查询、冻融作用分析、环境参数区划等于一体的腐蚀环境快速查询系统,可有效提升实时获取目标工程位置附近腐蚀环境信息的效率。

#### 参考文献:

- [1] 葛昕, 葛勇, 杜渊博, 等. 高原气候条件下混凝土力学性能的研究[J]. 混凝土, 2020(3): 1-4.  
GE Xin, GE Yong, DU Yuanbo, et al. Concrete, 2020(3): 1-4.
- [2] 武海荣. 混凝土结构耐久性环境区划与耐久性设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
WU Hairong. Environmental zonation on design methodology for durability of concrete structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [3] 顾祥林. 混凝土结构的环境作用[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 191-231.
- [4] YU H F, MA H X, YAN K. An equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete and a model for predicting the service life[J]. Constr Build Mater, 2017, 137: 104-116.
- [5] ZHAO P, LEI Q, ZHANG X, et al. Durability and life prediction of Chinese traditional black bricks under freezing and thawing conditions[J]. Rev Rom Mater, 2019, 49(1): 157-166.
- [6] LIN C, OU J P. Analysis of harbin's freeze-thaw action for life-cycle structure design[J]. Appl Mech Mater, 2011, 105-107: 804-809.
- [7] LIN C, OU J P. Study and application of China's freeze-thaw action spectrums for life-cycle structure design[J]. Appl Mech Mater, 2011, 105-107: 777-783.
- [8] LUO D M, DONG H, NIU D T. Geographic division of exposure environment for concrete structure based on fuzzy clustering-rough set information entropy[J]. Struct Concr, 2023, 24(1): 485-503.
- [9] LUO D M, WANG Y, NIU D T. Durability environmental regionalization for concrete structures[J]. Math Probl Eng, 2013: 482641.
- [10] LUO D M, WANG Y, ZHANG S H, et al. Application of fuzzy and rough sets to environmental zonation for concrete durability: A case study of Shaanxi Province, China[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 3128.
- [11] 中国科学院青海盐湖研究所. 中国盐湖资源与环境数据库 [DB/OL]. [2024-01-04]. <http://yhzyhj.isl.ac.cn>
- [12] SOONG T T. Fundamentals of probability and statistics for engineers [M]. S.I.: John Wiley & Sons, 2004.
- [13] TASKESSEN E. Distfit-Probability density fitting [JB/OL]. [2022-12-30]. <https://pypi.org/project/distfit/0.1.2>
- [14] ASADI I, SHAFIGH P, BIN ABU HASSAN Z F, et al. Thermal conductivity of concrete—A review[J]. J Build Eng, 2018, 20: 81-93.
- [15] 王树和, 水中和, 玄东兴. 大温差环境条件下混凝土表面裂缝损伤[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(S2): 122-125.  
WANG Shuhe, SHUI Zhonghe, XUAN Dongxing. J Southeast Univ Nat Sci Ed, 2006, 36(S2): 122-125.
- [16] 郭献戎, 安明喆, 王月, 等. 大温差循环作用下混凝土温度响应及损伤模拟[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(8): 845-852.  
GUO Xianxu, AN Mingzhe, WANG Yue, et al. J Build Mater, 2023, 26(8): 845-852.
- [17] ZHANG Y X, PAN J W, SUN X J, et al. Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions[J]. Eng Struct, 2021, 230: 111721.
- [18] SHEIBANY F, GHAEMIAN M. Effects of environmental action on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam[J]. J Eng Mech, 2006, 132(5): 532-544.
- [19] 仲新华, 李化建, 叶阳升, 等. 青藏铁路桥梁混凝土裂缝成因及防治技术[C]//青藏铁路运营十周年学术研讨会论文集. 拉萨, 2016: 45-56.
- [20] 胡锐鹏, 张戎令, 王滕诗, 等. 大温差戈壁地区高速铁路无砟轨道混凝土开裂研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 2042-2047.  
HU Ruipeng, ZHANG Rongling, WANG Mengshi, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2018, 37(6): 2042-2047.
- [21] 林兴刚, 容树俭, 郝伟, 等. 大温差地区水泥混凝土道面耐久性研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(5): 119-122.  
LIN Xinggang, RONG Shujian, HAO Wei, et al. Sichuan Build Sci, 2013, 39(5): 119-122.
- [22] 中国建筑科学研究院. GB 50223—2008 建筑工程抗震设防分类标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [23] 李福海, 文涛, 唐慧琪, 等. 干寒大温差下早龄期混凝土收缩特性及防裂技术[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(6): 1405-1412.  
LI Fuhai, WEN Tao, TANG Huiqi, et al. J Southwest Jiaotong Univ, 2023, 58(6): 1405-1412.
- [24] KHATIB J M, MANGAT P S. Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(11): 1743-1753.
- [25] PATEL R G, PARROTT L J, MARTIN J A, et al. Gradients of microstructure and diffusion properties in cement paste caused by drying[J]. Cem Concr Res, 1985, 15(2): 343-356.
- [26] 李强, 王起才, 张戎令, 等. 干寒大温差环境下混凝土的抗裂性能、力学性能及气孔结构分析[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9): 2880-2885.  
LI Qiang, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2017, 36(9): 2880-2885.
- [27] 何锐, 王铜, 陈华鑫, 等. 青藏高原气候环境对混凝土强度和抗渗性的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 29-41.  
HE Rui, WANG Tong, CHEN Huaxin, et al. China J Highw Transp, 2020, 33(7): 29-41.
- [28] 徐洪国, 李志平, 毕福珍, 等. 干燥大温差气候下混凝土孔结构研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(9): 101-103.  
XU Hongguo, LI Zhiping, BI Fuzhen, et al. J Wuhan Univ Technol, 2007, 29(9): 101-103.
- [29] ERIKSSON D, WAHLBOM D, MALM R, et al. Hygro-thermo-mechanical modeling of partially saturated air-entrained concrete containing dissolved salt and exposed to freeze-thaw cycles[J]. Cem Concr Res, 2021, 141: 106314.
- [30] LIU L, SHEN D J, CHEN H S, et al. Analysis of damage development in cement paste due to ice nucleation at different temperatures[J]. Cem Concr Compos, 2014, 53: 1-9.
- [31] GUO W Q, WANG F J, WU Y, et al. A non-equilibrium micromechanics-based thermo-hydro-mechanical model for

- freezing/thawing in saturated cementitious materials: From elasticity to elastic-plasticity[J]. *Cem Concr Res*, 2023, 173: 107267.
- [32] SUN Z H, SCHERER G W. Pore size and shape in mortar by thermoporometry[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(5): 740–751.
- [33] GUO W Q, HAN F Y, JIANG J Y, et al. A micromechanical framework for thermo-elastic properties of multiphase cementitious composites with different saturation[J]. *Int J Mech Sci*, 2022, 224: 107313.
- [34] XU W X, ZHANG Y F, JIANG J Y, et al. Thermal conductivity and elastic modulus of 3D porous/fractured media considering percolation[J]. *Int J Eng Sci*, 2021, 161: 103456.
- [35] CAI H, LIU X. Freeze-thaw durability of concrete: Ice formation process in pores[J]. *Cem Concr Res*, 1998, 28(9): 1281–1287.
- [36] ZHANG P, WITTMANN F H, VOGEL M, et al. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2017, 100: 60–67.
- [37] ZHAO H B, HU Y, TANG Z, et al. Deterioration of concrete under coupled aggressive actions associated with load, temperature and chemical attacks: A comprehensive review[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 322: 126466.
- [38] WU R J, XIA J, CHEN K Y, et al. Spatiotemporal interpolation of surface chloride content for marine RC structures based on non-uniform spatiotemporal Kriging interpolation method[J]. *Struct Saf*, 2023, 103: 102329.
- [39] WANG R J, HU Z Y, LI Y, et al. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze–thaw environment[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 321: 126371.
- [40] WANG Y Z, YANG W C, ZHANG A, et al. Investigating icing behavior in cementitious material during freeze–thaw using low-temperature low-field NMR[J]. *Cem Concr Res*, 2024, 175: 107378.
- [41] FARNAM Y, TODAK H, SPRAGG R, et al. Electrical response of mortar with different degrees of saturation and deicing salt solutions during freezing and thawing[J]. *Cem Concr Compos*, 2015, 59: 49–59.
- [42] CHAI M T, ZHANG J M, ZHANG H, et al. A method for calculating unfrozen water content of silty clay with consideration of freezing point[J]. *Appl Clay Sci*, 2018, 161: 474–481.
- [43] MITROPOULOS A C. The Kelvin equation[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2008, 317(2): 643–648.
- [44] CHEN L C, TYLER LEY M, GHANTOUS R M, et al. Measuring damaging freeze–thaw cycles in the field[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 387: 131660.
- [45] MARDANI-AGHABAGLOU A, ANDIÇ-ÇAKIR Ö, RAMYAR K. Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method[J]. *Cem Concr Compos*, 2013, 37: 259–266.
- [46] SHAH H A, YUAN Q, ZUO S H. Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete—A review[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 274: 121835.
- [47] LIU J, ZHAI P M. Changes in climate regionalization indices in China during 1961–2010[J]. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31(2): 374–384.
- [48] LIU T J, ZHANG M, ZOU D J, et al. Analysis and zonation of freeze–thaw action in the Chinese Plateau region considering spatiotemporal climate characteristics[J]. *Engineering*, 2024: j.eng.2024.04.016.
- [49] LI X, FU Z. Effect of low atmospheric pressure of plateau environment on air content and bubble stability of air-entrained concrete[J]. *Tran Chinese Soc Agricult Eng*, 2015, 31(11): 165–172.
- [50] ZHANG P, LIU G G, PANG C M, et al. Influence of pore structures on the frost resistance of concrete[J]. *Mag Concr Res*, 2017, 69(6): 271–279.
- [51] ZENG X H, LAN X L, ZHU H S, et al. Investigation on air-voids structure and compressive strength of concrete at low atmospheric pressure[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 122: 104139.
- [52] YUAN J, WU Y, ZHANG J K. Characterization of air voids and frost resistance of concrete based on industrial computerized tomographical technology[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 168: 975–983.
- [53] HUO J Y, WANG Z J, CHEN H X, et al. Impacts of low atmospheric pressure on properties of cement concrete in plateau areas: A literature review[J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1384.
- [54] 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.
- [55] RATH S, OUCHI M, PUTHIPAD N, et al. Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the mix viscosity and air entraining agent dosage[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 148: 531–537.
- [56] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837–845.  
YANG Jinsong. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45(5): 837–845.
- [57] 盐渍土地区建筑规范. GB 50942—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [58] 郑喜玉, 张明刚, 李秉孝, 等. 中国盐湖志[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [59] 王永献, 杜卫东, 董新光. 新疆阿瓦提灌区土壤盐渍化状况的主成分分析[J]. *中国农村水利水电*, 2007(1): 43–47.  
WANG Shuixian, DU Weidong, DONG Xinguang. *China Rural Water Hydropower*, 2007(1): 43–47.
- [60] 张文, 张卫红. 青藏高原盐渍土的含盐特征及分布规律研究[J]. *岩土工程界*, 2004(10): 74–76.  
ZHANG Wen, ZHANG Weihong. *Geol Explor Non Ferr Met*, 2004(10): 74–76.
- [61] 罗友弟. 青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(4): 116–120.  
LUO Youdi. *Hydrogeol Eng Geol*, 2010, 37(4): 116–120.
- [62] LI S Y, MAN D, LI G D. Ecological study of deterioration performance for concrete in saline soil environment[J]. *Ekoloji*, 2018, 27: 659–666.
- [63] 杨保存. 南疆盐渍土路基盐—冻胀变形特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
YANG Baocun. Study on salt-frost heave deformation characteristics of saline soil subgrade in southern Xinjiang [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [64] 全国土壤普查办平台工作组. 全国土壤普查平台工作 2023 年重点任务[J]. *中国农业综合开发*, 2023(4): 8–11.  
National Soil Survey Office Platform Working Group. *Agric Compr Dev China*, 2023(4): 8–11.

## Analysis and Zonation of Spatiotemporal Characteristics for the Special Service Environments of Concrete in the Chinese Plateau

ZHANG Ming, ZOU Dujian, LIU Tiejun, ZHOU Ao, LI Ye

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

### Extended Abstract

**Introduction** With the implementation of national policies like the ‘Belt and Road Initiative’, major infrastructure projects are rapidly advancing into the western plateau regions. These regions, nestled deep inland, exhibit typical plateau environmental characteristics, including frequent temperature fluctuations, low precipitation, strong winds with high velocities, low atmospheric pressure, limited oxygen levels, and widespread saline soil/salt lakes, which pose serious challenges to the long-term serviceability of major infrastructure. Determining the service environment is a prerequisite for conducting durability analysis and design of concrete structures. However, compared to the increasingly mature research on extreme loads such as earthquakes and typhoons, research on the long-term environmental actions suffered by concrete is still in its infancy. Most existing studies analyzed environmental factors from the ‘environmental’ rather than the ‘engineering’ perspective, lacking suitable environmental analysis tools for actual engineering applications. Furthermore, although extensive experimental research has been conducted on concrete durability, the inconsistency between the actual service environment and laboratory accelerated tests can lead to significant discrepancies in concrete deterioration rates and damage mechanisms. Using performance indicators obtained under laboratory accelerated conditions to design the expected service life of concrete in actual engineering projects will result in significant errors. The absence of a long-term environmental action model for concrete is a key challenge to the quantitative design of concrete durability.

**Methods** Based on 21 years of meteorological data from 687 weather stations and chemical composition data from 396 salt lakes, using ordinary kriging (OK) interpolation method, with the geographic coordinate system as World Geodetic System 1984 and the projected coordinate system as Albers, regional distribution maps of key environmental parameters were created. Python's distfit library was used to fit the best probability density function (PDF) of environmental data. The Kolmogorov–Smirnov (K–S) test, a non-parametric statistical method, was employed to determine if the sample data sets conformed to the theoretical PDF. Environmental data were categorized using the unsupervised learning method K-means clustering. An intelligent and efficient WeChat mini program was developed to provide technical support for durability analysis and longevity design of engineering structures under special environmental action in the Chinese plateau regions.

**Results and discussion** The action levels of temperature differences in China were divided into six zones, closely related to the terrain. The temperature differences in the western plateau regions were significantly greater than that in the eastern plain regions. In cities such as Xizang, Xinjiang, Sichuan, Qinghai, and Heilongjiang, the maximum cumulative monthly average temperature difference reached 23 °C. The cumulative monthly average relative humidity gradually decreased from the southeast coast to the northwest inland, with most Chinese plateau regions having an average relative humidity of less than 40%. The frequency of freeze-thaw cycles differed significantly between the Chinese plateau and plain regions, with Xizang experiencing the highest annual average of up to 188 times. Taking freeze-thaw (F–T) temperature amplitude, the lowest freezing temperature and the annual freeze-thaw cycles as indicators, the F–T action levels in China were divided into six zones, nonfrozen zone, slight F–T zone, light F–T zone, moderate F–T zone, severe F–T zone, and extreme F–T zone, each showing significant differences in annual average freeze-thaw cycles. The variability of annual average atmospheric pressure was relatively small across regions, exhibiting a step-like pattern similar to China's terrain.

For regions with large temperature differences and strong aridity, the month with the most severe environmental action was considered the primary month, and representative values such as frequent occurrence, moderate occurrence, and rare occurrence were provided. For high-frequency freeze-thaw cycles, basic environmental parameters and key design parameters for different regions were provided. Given the relatively small variability of annual average atmospheric pressure across different regions, the mean value of each region was recommended. For hypersaline attack, representative values such as the 95th percentile, third quartile, median, and mean were provided, and it was suggested to set concentration gradients according to representative values.

**Conclusions** The main conclusions of this paper are summarized as follows. Special service environments affecting concrete durability, such as large temperature fluctuation, strong dryness, high-frequency freeze-thaw cycles, and low atmospheric pressure, have the most severe impact in the Qinghai-Xizang Plateau. There are significant differences in environmental actions across different regions of China, and even within the same province, it is not appropriate to summarize different cities in one group. Indicators characterizing the action level of freeze-thaw cycles include freeze-thaw temperature amplitude, lowest freezing temperature, and annual freeze-thaw cycles. There are distinct differences in freeze-thaw action levels in different regions of China, especially evident in the clear gradient differences in annual average freeze-thaw cycles. The formation and distribution of saline-alkali soils and salt lakes are closely related. A comprehensive analysis of aggressive ion concentrations in different salt lakes reveals strong variability, suggesting the setting of concentration gradients based on statistical results. A rapid query mini program for special environments has been developed on the WeChat platform, integrating meteorological data query, freeze-thaw action analysis, and environmental parameter zonation, offering technical support for improving the efficiency of obtaining real-time information on the special environment near the project location.

**Keywords** concrete durability; Chinese plateau; environmental actions; zonation; spatiotemporal characteristics