

变化条件下水工混凝土特性

陆采荣 戈雪良 梅国兴 著

BIANHUA
TIAOJIAN XIA
SHUIGONG
HUNNINGTU
TEXING



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

014035876

TV431
04

变化条件下水工混凝土特性

陆采荣 戈雪良 梅国兴 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TV431/04



北航

C1723262

015032878

内 容 提 要

本书阐述了气候变化条件下冻融、持续低温、干旱等气候事件对水工混凝土的力学、抗冻、干缩变形与抗裂性等宏观性能, 气泡参数、水化体系结构与微裂缝、孔结构等微观、亚微观性能演变的影响规律以及水工混凝土在气候变化条件下的抗裂性评估方法。并对水工混凝土应对低温、干旱等事件的防护措施与工程实例以及未来气候变对水利工程可能产生的影响进行了探讨。

本书包括了变化条件下水工混凝土力学、抗冻、变形与抗裂、微观特性的相关基础理论与大量翔实的试验资料和工程应用资料, 可作为从事混凝土设计、科研、施工、管理等技术人员的参考书, 也可供高等院校水工材料专业的师生参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

变化条件下水工混凝土特性 / 陆采荣, 戈雪良, 梅国兴著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 3
ISBN 978-7-5170-1850-6

I. ①变… II. ①陆… ②戈… ③梅… III. ①水工材料—混凝土—特性—研究 IV. ①TV431

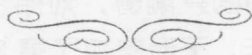
中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第058405号

书 名	变化条件下水工混凝土特性
作 者	陆采荣 戈雪良 梅国兴 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	160mm×235mm 16开本 12印张 150千字
版 次	2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言



《气候变化国家评估报告》指出：“气候变化不仅代表气候平均值的变化，还包括变化幅度或距平值的变化，这两种变化都会使小概率的天气与气候事件的出现频率增加，也会使原来未曾出现的天气气候事件出现”。我国各类水利工程面广量大，已建成各类水库 98000 多座，总库容 9323 多亿 m^3 ，且分布在多个不同气候条件带，水工混凝土作为这些水利工程建设的大宗建筑材料，其对气候变化更为敏感与脆弱。近些年，发生在我国的极端低温冻害、突发寒潮、长历时高温干旱等极端气候事件对水利工程的影响，以及由此产生的重大经济损失已经印证了水利工程是易受气候事件冲击的薄弱环节。

水利部公益性行业科研专项“气候变化对中国水安全影响及适应对策研究”、国家自然科学基金“变冻融温度下水工混凝土抗冻演变行为及寿命预测”资助开展了冻融、干旱等变化条件对水工混凝土的影响的应用基础研究，以进一步提高水利工程应对极端气候事件的能力，保障工程的安全和耐久性。本书总结了极端气候对水工建筑材料的影响的主要成果，以及该项成果在水电站、调水工程、抽水蓄能电站工程应对冻融、极端低温、干旱等事件中成功应用的经验。

本书在基础理论、室内试验与工程实践的基础上，论述了变化条件下水工混凝土的特性。全书共分 7 章，第 1 章主要介绍了近些年发生在我国的极端气候事件，以及由此对水利工程产生影响的事实，并对与气候变化相关的水工混凝土的主要特性进行了阐述。第 2~第 5 章，分别介绍了变温冻融、持续低温、干旱对水工混凝土力学、抗冻、变形与抗裂性以及微观特性演变的影响规律。第 6 章主要介绍了变化条件下水工混凝土

的抗裂性评估方法，第7章为水利工程应对气候变化的具体措施与相应成果在水电站、调水工程、抽水蓄能工程中应用的介绍，并对未来气候变化影响水利工程的情况进行了探讨。本书由陆采荣、戈雪良、梅国兴编著，刘伟宝参加了第1章、第3章、第5章的编写工作，王珩参加了第2章、第4章、第7章的编写工作，杨虎参加了第6章的编写工作。

本书得到了南京水利科学研究院出版基金的资助，书中还参考了国内外混凝土科研工作者的相关文献，在此一并表示感谢。由于作者水平有限，不妥之处恳请广大读者批评指正。

著者

2013年12月

目 录



前言

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 背景	1
1.1.2 水利工程调研	3
1.1.3 极端气候事件	7
1.2 水利工程与气候变化	11
1.2.1 寒潮事件对水利工程的影响	11
1.2.2 冻融事件对水利工程的影响	12
1.2.3 干旱事件对水利工程的影响	14
1.3 水工混凝土的特性	15
1.3.1 水工混凝土的力学特性	15
1.3.2 水工混凝土的抗冻特性	19
1.3.3 水工混凝土的变形特性	27
第2章 变温冻融条件下水工混凝土的抗冻与力学特性	32
2.1 变温冻融对水工混凝土抗冻性的影响	32
2.1.1 未作抗冻设计水工混凝土的抗冻性	32
2.1.2 中、低抗冻设计水工混凝土的抗冻性	36
2.1.3 高抗冻设计水工混凝土的抗冻性	41
2.2 变温冻融对水工混凝土力学性能的影响	43
2.2.1 未作抗冻设计水工混凝土的力学特性	43
2.2.2 中、低抗冻设计水工混凝土的力学特性	45
2.2.3 高抗冻设计水工混凝土的力学特性	50
2.3 变温冻融与水工混凝土抗冻耐久性	51
2.3.1 冻融温度、抗冻设计等级与冻融循环的关系	51

2.3.2 基于气候分区的水工混凝土冻融寿命预测模型	53
第3章 持续低温条件下水工混凝土的抗冻与力学特性	58
3.1 持续低温对水泥基材料抗冻性的影响	58
3.1.1 水泥基材料的冻胀变形	58
3.1.2 不同因素对冻胀变形的影响	59
3.2 持续低温对水泥基材料力学特性的影响	63
3.2.1 养护条件对持续低温下水泥基材料力学特性的影响	63
3.2.2 含水条件对持续低温下水泥基材料力学特性的影响	64
3.2.3 冻/融状态对持续低温下水泥基材料力学特性的影响	66
3.2.4 持续低温程度对水泥基材料力学特性的影响	70
3.2.5 粉煤灰对持续低温下水泥基材料力学特性的影响	72
3.3 持续低温对水工混凝土抗冻与力学特性的影响	73
3.3.1 持续低温对渡槽混凝土的抗冻与力学特性的影响	73
3.3.2 持续低温对面板混凝土的抗冻与力学特性的影响	77
第4章 干旱条件下水工混凝土的力学、变形与抗裂特性	81
4.1 干旱对水泥基材料性能特性的影响	81
4.1.1 极端干旱对水泥基材料特性的影响	81
4.1.2 干旱历时对水泥基材料特性的影响	86
4.1.3 干旱温度对水泥基材料特性的影响	89
4.2 长历时高温干旱对渡槽混凝土特性的影响	94
4.2.1 渡槽混凝土力学性能的变化	94
4.2.2 渡槽混凝土干缩变形与抗裂性能的变化	96
4.3 长历时高温干旱对面板混凝土特性的影响	98
4.3.1 面板混凝土力学性能的变化	98
4.3.2 面板混凝土干缩变形与抗裂性能的变化	100
4.4 长历时干旱温度对已建水工建筑物的影响	102
第5章 变化条件下水工混凝土的微观特性	105
5.1 变温冻融条件下水工混凝土的气泡参数	105
5.1.1 气泡参数测试原理	105
5.1.2 不同抗冻设计等级水工混凝土的气泡参数特性	107

5.2	低温条件下水工混凝土的微观特性	111
5.2.1	冻融循环作用后水工混凝土的微观特性	111
5.2.2	极端低温作用后水工混凝土的微观特性	113
5.2.3	低温作用后水工混凝土的孔结构特性	115
5.3	干旱条件下水工混凝土的微观特性	118
5.3.1	干旱作用后水工混凝土的微观特性	118
5.3.2	干旱作用后水工混凝土的孔结构特性	120
第6章	变化条件下水工混凝土抗裂性评估方法	122
6.1	平板法	122
6.1.1	平板法原理	122
6.1.2	平板法抗裂性评估	124
6.2	圆环法	126
6.2.1	圆环法原理	126
6.2.2	圆环法抗裂性评估	127
6.3	约束诱导开裂法	130
6.3.1	约束诱导开裂法原理	130
6.3.2	约束诱导开裂法抗裂性评估	132
6.4	环境参数模拟法	134
6.4.1	环境参数模拟法原理	134
6.4.2	环境参数模拟法抗裂性评估	142
6.5	温度应力试验机法	144
6.5.1	温度应力试验机法原理	144
6.5.2	温度应力试验机法抗裂性评估	149
第7章	变化条件下水工混凝土的防护	154
7.1	水工混凝土应对低温事件的防护	154
7.1.1	固态保温材料防护	154
7.1.2	液固型保温材料防护	157
7.2	水工混凝土应对干旱事件的防护	160
7.2.1	外表面涂层防护	160
7.2.2	内养护防护	163
7.3	应对冻融作用的工程实例	166

7.3.1	冻融应对措施	166
7.3.2	应对冻融事件工程实例	167
7.4	应对极端低温的工程实例	169
7.4.1	极端低温应对措施	169
7.4.2	应对极端低温事件工程实例	170
7.5	应对干旱的工程实例	172
7.5.1	干旱事件应对措施	172
7.5.2	应对干旱事件工程实例	173
7.6	未来气候变化对水利工程的影响分析	174
参考文献		179

第1章 绪论

气候变化已是不争的事实，随之而来的突发性极端事件出现的随机性增大。我国各类水利工程面广量大，且分布在多个不同气候条件带，是易遭受极端气候条件作用的薄弱环节，而水工混凝土作为水利工程的最大宗建筑材料，其对变化条件更为敏感与脆弱。本章主要阐述近些年发生在我国的极端气候事件，以及冻融、寒潮、干旱等气候事件对我国水利工程已产生的影响，并介绍易受变化条件影响的水工混凝土的主要特性，包括力学、抗冻、变形、抗裂等，水工混凝土在变化条件下的上述性能演变特征直接影响水利工程的安全与耐久性。

1.1 概述

1.1.1 背景

我国部分大江大河的干流尚未得到有效治理，部分江河缺少控制性骨干工程；沿海仍有超过三成的重点海堤没有达标；全国有3万多座病险水库，威胁着百姓的生命安全，全球气候变化让水利工程体系更显薄弱，安全问题更加突出（陈雷，2009）^[1]。中国已建成各类水库98002座，总库容9323.12亿 m^3 ^[2]，全球变暖将增加极端气候在局部区域出现的频次（张建云，2009）^[3]，20世纪50~60年代期间我国寒潮灾害发生频繁，90年代以来全球变暖加剧，但我国剧烈降温的寒潮灾害却仍时有发生（魏凤英，2008）^[4]。全球气候变暖，不仅使全球平均温度升高，而且使得高温、干旱、寒潮、暴雪、暴雨等极端天气发生的概率增加。相应之，突发性的极端冷事件出现的随

机性增大,产生的风险自然也会增加,原来可能百年不遇的极端低温可能在几十年内就会发生(丁一汇,2010)^[5]。

根据《气候变化国家评估报告》^[6],区域气候模式预估我国在21世纪20年代、30年代和50年代平均气温分别升高约 $1.1\sim 2.1^{\circ}\text{C}$ 、 $1.5\sim 2.8^{\circ}\text{C}$ 和 $2.3\sim 3.3^{\circ}\text{C}$,这将对我国水利工程混凝土结构物受冻融破坏作用程度的区域划分产生严重影响,大体上将导致南北分界线北移,现有分界线处以及北方地区的年平均冻融循环次数有可能显著增加,从而加速这部分地区的水工混凝土结构物冻融破坏。另外,气候变暖导致极端气候出现的频次增加,如2008年初,我国南方大部分地区出现了罕见的持续低温冻害天气,由于这部分地区水利工程混凝土的抗冻设防等级偏低,甚至有的工程未考虑抗冻要求,在遭受低温冻害后,该部分地区水利工程受损较严重;另外,我国北方地区近年来出现的低温已突破有记录以来的极端最低气温。因此,气候变化将使我国南方地区水利工程遭受超设计限制低温条件的冻害,其抗冻耐久性问题也不容乐观;而极端低温甚至是突破历史极值的低温又使我国北方地区考虑了抗冻设计的水工混凝土的抗冻耐久性面临新问题。

2011年中央水利工作会议上明确指出“强调加快水利改革发展,……,是应对全球气候变化、增强抵御自然灾害综合能力的迫切需要”。2011年中央1号文件多次提到加强“应急预案”和“应急能力建设”,强调“加强水资源配置工程建设”、“提高防汛抗旱应急能力”、“加强防洪薄弱环节建设”等^[7]。《中国应对气候变化科技专项行动》^[8,9]已将气候变化对重大工程的影响及应对措施研究列为需重点开展的工作之一,另外《中国应对气候变化国家方案》^[10]中明确提出了“大力推广高性能混凝土,提高高性能混凝土的应用比重,延长建筑物的寿命”的方要求。党的“十八大”报告明确指出“要加快水利建设,增强城乡防洪抗旱排涝能力。加强防灾减灾体系建

设,提高气象、地质、地震灾害防御能力……同国际社会一道积极应对全球气候变化。”

目前,美国、欧盟、日本等国家在气候变化影响评价、如何减缓气候变化等领域开展了较多有益的研究工作,但针对极端气候条件对水工建筑材料影响的研究较少,因此,研究极端气候对水工建筑材料的影响,特别是对水工混凝土的影响属于前沿研究领域,混凝土是最广泛使用的建筑材料,它已成为水利、公路、桥梁和城市交通设施建设的大宗材料。本书结合我国水利工程的特点,阐述变化条件下水工混凝土材料的特性。

1.1.2 水利工程调研

水工混凝土是水利工程建设最大宗的建筑材料之一,以我国长江中下游六省一市(湘、鄂、赣、皖、苏、浙、沪)和西南四省(桂、渝、川、黔)大部分地区的大坝为典型水利工程,进行水泥品种、掺和料类型、砂石骨料等混凝土原材料情况的调研工作,调研结果如表1-1所示。

表 1-1 南方地区部分水利工程的调研情况

类别 名称	水泥	掺和料	砂	石	位置
东 江	525 号中热硅	粉煤灰	河砂	砂卵石	湖南
江 垭	525 号中热硅	粉煤灰	人工砂	白云岩	湖南
皂 市	525 号中热硅	粉煤灰	人工砂	白云岩/灰岩	湖南
五强溪	525 号中热硅	粉煤灰	人工砂	碎石	湖南
碗米坡	42.5 普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	湖南
三 峡	525 号中热硅/ 低热矿渣水泥	粉煤灰	人工砂	花岗岩	湖北
葛洲坝	425 号矿渣水泥	—	河砂	砂卵石	湖北
隔河岩	525 号中热硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	湖北
水布垭	525 号中热硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	湖北
白莲滩	42.5 中热硅	粉煤灰	河砂	碎石	湖北
龙 滩	525 号中热硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	广西

续表

类别 名称	水泥	掺和料	砂	石	位置
百色	525 号中热硅	粉煤灰	人工砂	辉绿岩	广西
岩滩	525 号普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	广西
天生桥二级	525 号普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	广西
平班	42.5 低热普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	广西
百龙滩	525 号普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	广西
乐滩	42.5 普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	广西
光照	42.5 普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	贵州
大花水	42.5 普硅	粉煤灰	人工砂	人工	贵州
索风营	42.5 普硅	磷渣粉	人工砂	灰岩	贵州
乌江渡(扩建)	42.5 普硅	—	人工砂	灰岩	贵州
构皮滩	42.5 中热硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	贵州
沙沱	42.5 普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	贵州
思林	42.5 中热 42.5 普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	贵州
彭水	42.5 中热硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	重庆
滕子沟	525 号中热硅	粉煤灰	人工砂	砂岩	重庆
石堤	32.5 复合硅	粉煤灰	人工砂	碎石	重庆
沙牌	专用水泥	粉煤灰	人工砂	花岗岩	四川
锦屏一级	42.5 中热硅	粉煤灰	人工砂	大理岩	四川
宝珠寺	525 号中热硅	粉煤灰	河砂	白云岩	四川
溪洛度	中热硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	四川
向家坝	普硅	粉煤灰	人工砂	灰岩	四川
官地	42.5 中热	粉煤灰	人工砂	玄武岩	四川
万安	425 号普硅	粉煤灰	河砂	沙砾料	江西

注 中热硅=中热硅酸盐水泥, 普硅=普通硅酸盐水泥。

从表 1-1 的调研情况来看, 我国南方地区以大坝为代表的水利工程使用的水工混凝土一般以普通硅酸盐水泥和中热硅酸盐水泥为主, 也有少量工程使用了矿渣水泥、硅酸盐水泥或

其他特制专用水泥；在掺和料方面以粉煤灰为主，极少数工程使用了磷渣粉等其他种类的掺和料；细骨料一般以人工砂为主，河砂也较常用，粗骨料一般以人工骨料为主，骨料岩性有灰岩、花岗岩、大理岩、白云岩、辉绿岩等多种，也有工程以天然砂卵石为粗骨料。在表 1-2 中所涉水利工程中混凝土强度等级以 C30 为主，C15、C20 强度等级的混凝土也有使用，混凝土的抗冻等级从 F50 的低抗冻设计等级到 F300 的高抗冻设计等级均有涉及。

对我国北方的五大流域（黑龙江流域、黄河、辽河、淮河、海河）的部分水利工程，进行水泥品种、矿物掺和料类型、外加剂、砂石骨料等原材料及混凝土强度、抗冻等级等设计指标的调研工作，调研结果如表 1-2 所示。

表 1-2 北方地区部分水利工程的调研情况

类别 名称	水泥	矿物 掺和料	细骨料	粗骨料	外加剂	强度 等级	抗冻标 号/等级	多年全年平 均气温(℃)
莲花	42.5 硅酸 盐大坝水泥	—	河砂	天然石	SK 引气减 水剂	C30	F300	3.2
丰满	P·O	—	人工砂	人工石	—	—	—	5.3
白山	P·MH 42.5	硅粉	天然砂	灰岩	SKY 高效引 气减水剂、普通 泵送剂、UEA 膨胀剂	C35	D400	4.3
小山	42.5 硅酸 盐大坝水泥	—	天然砂	人工石	SK 引气减 水剂	C30	F200/ F300	3.4
两江	P·MH 42.5	—	天然砂	人工石	SK 引气减 水剂	—	—	—
公伯峡	P·MH 42.5	粉煤灰	天然砂	天然石	JM-A 高效 减水剂、DH ₉ 引气剂	C25	F200	8.5

续表

类别 名称	水泥	矿物 掺和料	细骨料	粗骨料	外加剂	强度 等级	抗冻标 号/等级	多年全年平 均气温(℃)
小浪底	P·O 42.5	Ⅱ级粉煤 灰、硅粉	人工砂	天然 河卵石	木钙减水剂、 松香热聚物 PC-2引气剂	C25	F50	12.4~14.3
万家寨	P·MH 42.5	Ⅰ级粉煤 灰、硅粉	人工砂	灰岩	TMS 减水 剂、AE引气剂	C25	D200	—
李家峡	P·MH 42.5	Ⅰ级粉 煤灰	天然砂	砂岩	SP-1 减水剂	C25	D100	7.8
龙羊峡	42.5 硅酸 盐大坝水泥	粉煤灰	天然砂	人工石	DH3 减水 剂、SP169 破 乳剂、松香热 聚物引气剂	C25	D100	5.8
潘家口	P·O 42.5	粉煤灰	天然砂	砾石	木钙减水剂	C30	D100	10.1
参窝	42.5 硅酸 盐大坝水泥	—	天然砂	天然石	木钙减水剂、 引气剂	C20	D100	7.3
观音阁	42.5 大坝 水泥	粉煤灰	天然砂	天然 卵石	木钙减水剂	C15	D50	6~8
大伙房	P·O 42.5	Ⅰ级 粉煤灰	河砂	卵石	RB 高效减水 剂、速凝剂	C25	F100	5~9
佛子岭	P·O 42.5	Ⅰ级粉煤 灰、硅粉	天然砂	花岗岩	高效减水膨 胀剂、速凝剂	—	—	15.1

从表 1-2 的调研情况来看,我国北方地区部分水利工程使用的胶凝材料一般以普通硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥、硅酸盐水泥为主;在掺和料方面以粉煤灰为主,极少数工程使用了硅粉等其他种类的掺和料;细骨料一般以人工砂为主,河砂也较常用,粗骨料中人工骨料及天然卵石都有使用。混凝土强

度等级以 C25 及以上等级为主。F100 中抗冻设计等级及 F200 以上的高抗冻设计等级混凝土使用较多。

1.1.3 极端气候事件

从 20 世纪 80 年代开始,我国华北地区气候持续偏旱,进入 20 世纪 90 年代,干旱气候从华北平原向黄河中上游地区(陕、甘、宁),汉江流域,淮河上游,四川盆地扩展(陈志恺, 2002)^[11], 2006 年我国重庆地区出现了百年一遇的持续干旱气候,由于降水严重偏少,气温持续偏高,地面蒸发损失增大,使重庆地区 1200 多座大小水库出现了不同程度的开裂^[12], 2010 年我国西南五省和直辖市出现了长历时的干旱、特大干旱,使得大量蓄水水库的库底直接暴露在干旱温度条件下,给当地的民生水利设施造成了严重的影响,威胁到人民的生命与财产安全, 2011 年春夏,我国长江中下游地区发生了持续干旱等。由此可见,在持续干旱气候条件下,水工混凝土的性能演变问题也必须引起重视。

21 世纪以来,我国已出现低温冻害、极端干旱、突破历史极值的极端低温等事件,如 2008 年初我国南方地区遭遇的历史罕见的低温、雨雪和冰冻灾害对水利行业的民生工程造成重大破坏; 2009 年 12 月 1 日至 2010 年 1 月 12 日期间,我国东北大部、内蒙古中东部以及北疆东部的极端低温达到 $-30\sim-40^{\circ}\text{C}$, 内蒙古局部地区在 -45°C 以下,我国华北等地共 25 站日最低气温超历史极值; 2006 年川渝地区发生百年一遇的特大干旱; 2008~2009 年冬春期间,我国北方 15 省发生百日无雨雪的大面积干旱; 2009~2010 年西南五省再次发生极端干旱, 2011 年春夏长江中下游地区发生了持续干旱等。在气候变化条件下,极端寒潮、超低温冻害、持续干旱等气候条件已经对我国的现有水利工程产生了较大影响。

根据国家气象信息中心气象资料室完成的中国地面气候示意图图集(1971~2000 年)资料,我国南方地区最冷月(1

月)的平均气温如表1-3所示。从表中可知我国南方地区最冷月平均气温一般在 0°C 以上,属于气候温和区域。以我国长江中下游六省一市(湘、鄂、赣、皖、苏、浙、沪)和西南四省(桂、渝、川、黔)为调研对象,对该11个省市区域在最冷月(1月)间(1971~2000年)的月极端最低气温进行了调研统计,结果如表1-3所示。从表中的数据统计结果看,以长江中下游六省一市及西南四省市为代表的我国南方地区的最冷月(1月)极端最低气温平均值为 -8.4°C 。

表 1-3 我国南方地区最冷月(1月)极端最低气温

类别 区域	地区	极端最低气温($^{\circ}\text{C}$)	极端最低气温 平均值($^{\circ}\text{C}$)
湖南	常德	-13.2	-9.2
	长沙	-4.9	
	零陵	-7.0	
	芷江	-11.5	
湖北	鄂西	-12.3	-14.4
	老河口	-17.2	
	武汉	-18.1	
	宜昌	-9.8	
江西	赣州	-3.4	-5.9
	吉安	-5.5	
	景德镇	-7.9	
	南昌	-6.9	
安徽	安庆	-9.0	-13.3
	蚌埠	-12.5	
	亳州	-14.3	
	霍山	-17.4	