

ICS XX.XXX

CCS X XX

T/CAP

中国公园协会团体标准

T/CAP XXX—20xx

适应气候变化的公园绿地优化指南

Guidelines for Optimizing Park Green Space for Climate Change Adaptation

（征求意见稿）

20xx-XX-XX 发布

20xx-XX-XX 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
5 气候风险评估	4
6 优化目标设定	6
7 城市层级公园绿地植被覆盖格局优化	7
8 场地层级公园绿地植被空间分布优化	8
9 物种层级气候韧性植物优选	10
附录 A（资料性） 气候风险评估示例	13
附录 B（资料性） 城市层级公园绿地植被覆盖格局优化示例	15
附录 C（资料性） 场地层级公园绿地植被空间分布优化示例	20
附录 D（资料性） 物种层级气候韧性植物优选示例	24

前 言

为落实《国家适应气候变化战略 2035》和《城市适应气候变化行动方案》，指导城市公园绿地更好地应对高温热浪等气候危害，减轻其对居民健康和园林植物的影响，提升公园绿地的韧性水平和服务能力，制定本文件。

地方性是本文件的基本导向，适应性是地方性的重要基础。地方性景观是在长期适应当地自然与气候条件的过程中形成的，提升公园绿地适应气候变化的能力，是维护和塑造地方性景观的重要途径。本文件据此立足城市与公园绿地的地方特征，提出适应气候变化的公园绿地优化方法。

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。本文件的主要技术内容包括：1 范围；2 规范性引用文件；3 术语和定义；4 总则；5 气候风险评估；6 优化目标设定；7 城市层级公园绿地植被覆盖格局优化；8 场地层级公园绿地植被空间分布优化；9 物种层级气候韧性植物优选。

本文件由中国公园协会负责管理。

本文件主编单位：xxx、xxx。

本文件参编单位：xxx、xxx。

本文件主要起草人：xxx、xxx、xxx、xxx、xxx、xxx、xxx、xxx、xxx。

本文件主要审查人：xxx、xxx

适应气候变化的公园绿地优化指南

1 范围

本文件规定了适应气候变化的城市公园绿地优化的总则、气候风险评估、城市层级的公园绿地植被覆盖格局优化、场地层级的单个公园绿地植被空间分布优化、物种层级的气候韧性植物优选等技术内容。

本文件适用于城市公园绿地的优化，包括综合公园、社区公园、专类公园、游园等，其他公园可参照执行。

本文件重点适用于应对高温热浪气候风险的城市公园绿地优化，其他气候危害（如极端降水、干旱、寒潮等）的城市公园绿地优化可参照本文件的方法框架执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注明日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注明日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 50420-2007	城市绿地设计规范
GB 51192-2016	公园设计规范
GB/T 24091-2024	适应气候变化 脆弱性、影响和风险评估指南
GB/T 51346-2019	城市绿地规划标准
CJ/T 512-2017	园林植物筛选通用技术要求
ISO 14090-2019	Adaptation to climate change — Principles, requirements and guidelines

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

适应气候变化 adaptation to climate change

调整以适应实际或预期气候及其影响的过程。

[来源：ISO 14090:2019, 3.1]

3.2

危害 hazard

潜在的伤害来源。潜在伤害可能是生命损失、伤害或其他健康影响以及财产、基础设施、生计、服务供应、生态系统和环境资源的破坏和损失。在本文件中，该术语通常指与气候有关的物理事件、趋势或其物理影响。危害包括缓慢发生（例如，长期温度上升）和迅速发生的极端气候（例如，热浪）或变异性增加。

[来源：GB/T 24091]

3.3

暴露度 exposure

人类、生计、物种或生态系统、环境功能、服务、资源、基础设施、经济、社会或文化资产处于有可能受到影响的位置与环境中。暴露度可能随时间而发生变化，例如土地利用变化。

[来源：ISO 14090:2019, 3.6]

3.4

脆弱性 vulnerability

受到不利影响的倾向性。脆弱性由各种概念和要素组成，包括对伤害的敏感性或易感性以及缺乏应对和适应的能力。

[来源：ISO 14090:2019, 3.15]

3.5

风险 risk

脆弱性、暴露度和危害互相作用的产物。

[来源：GB/T 24091]

3.6

公园绿地 park green space

向公众开放，以游憩为主要功能，兼具生态、景观、文教和应急避险等功能，有一定游憩和服务设施的绿地。

[来源：GB/T 51346]

3.7

公园绿地优化 park green space optimization

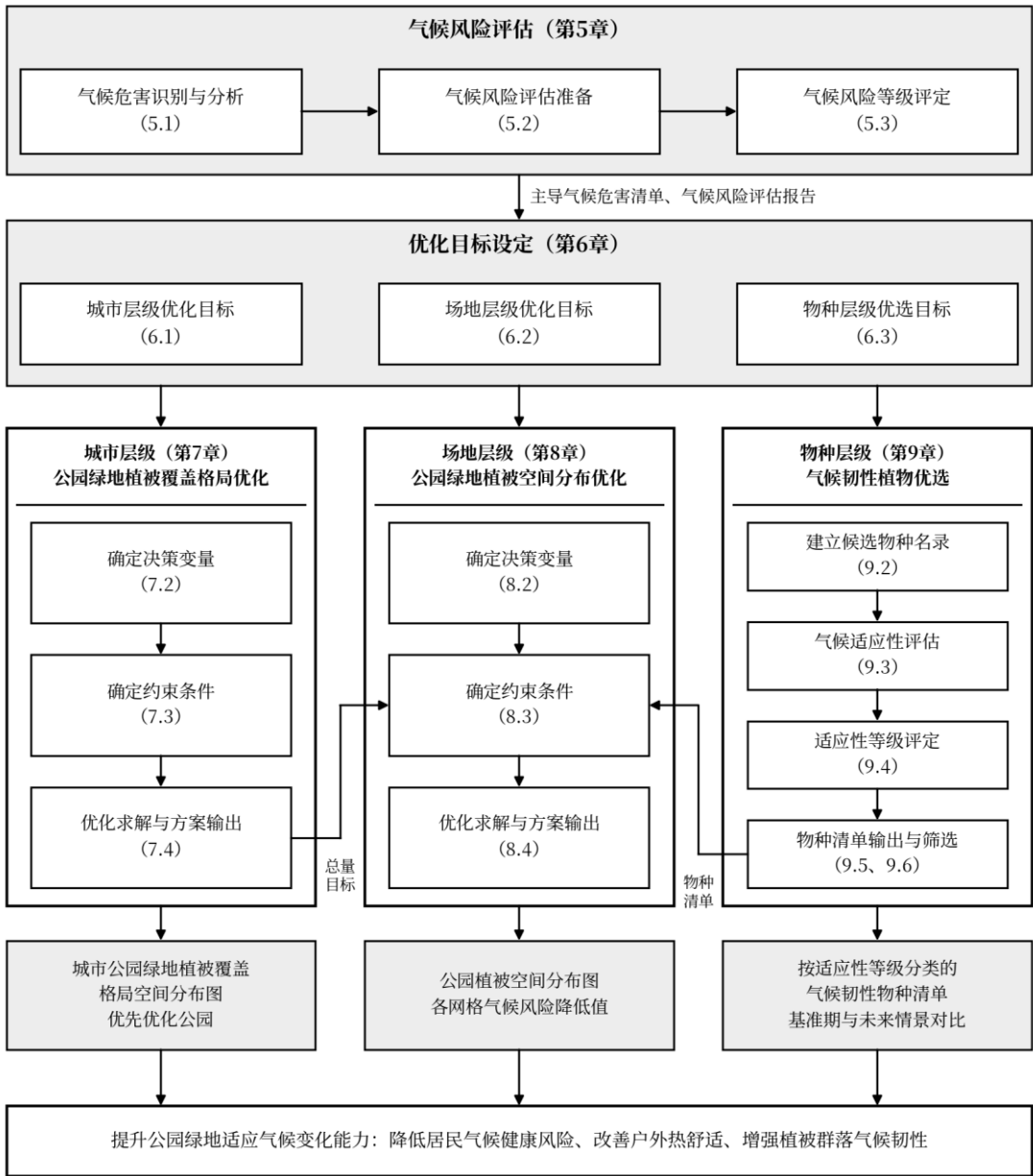
以适应气候变化为目标，在既有公园绿地系统的基础上进行的多层级系统性改进，包括城市层级的公园绿地植被覆盖格局优化、场地层级的单个公园绿地植被空间分布优化、物种层级的气候韧性植物优选。

4 总则

4.1 优化程序

适应气候变化的城市公园绿地优化遵循先评估后优化的程序，根据气候风险评估结果设定优化目标。

具体优化可按照城市、场地和物种三个层级逐级进行，也可单独就某个层级开展。优化程序见图 1。



注：城市、场地、物种三个层级可逐级进行，也可单独就某个层级开展。

图 1 适应气候变化的公园绿地优化程序

4.2 基本原则

4.2.1 风险导向

公园绿地优化宜基于气候风险评估结果开展，根据 5.1.2 识别的主导气候危害确定优化目标、决策变量等，不宜脱离风险评估开展笼统化的气候适应优化。

4.2.2 多维适用

本文件提供的公园绿地优化措施具有多维适用性，可根据项目的具体层级、建设阶段及实际需求，单独应用城市层级、场地层级或物种层级的相关条款，亦宜鼓励开展跨层级协同应用以发挥系统性优化效益。

4.2.3 方法可选

公园绿地优化宜优先采用本文件第 5 章～第 9 章推荐的方法。在数据条件、技术能力或时间资源受限的情况下，可采用定性、半定量评估替代定量计算，以适应不同数据条件城市的实施能力。

常见的替代方法包括但不限于：

—— 气候风险评估：可参考 GB/T 24091—2024 第 6.4 条的汇总方法，采用定性、半定量评估替代本文件 5.3.1 的定量计算。

—— 物种层级优化：可参考 CJ/T 512 开展植物筛选，但宜在筛选指标中显著强化气候适应性维度（如增加耐高温、耐涝、耐旱、耐寒等气候耐受性指标的权重）。

4.2.4 数据可获

本文件所需数据宜优先采用覆盖全国或全球的开源数据集，如气象再分析数据、全球气候投影数据集、物种分布数据库与遥感影像等。附录所列示例均基于此类开源数据完成，各城市无需依赖本地长期地面观测即可开展。

5 气候风险评估

5.1 气候危害识别与分析

5.1.1 气候危害筛选

气候风险评估宜识别对公园绿地及公园服务范围内居民具有潜在不利影响的气候危害因子。重点识别因子包括但不限于：高温热浪、极端降水、持续干旱、寒潮、低温冻害、台风、大风、冰雹、沙尘暴、雷电、海平面上升等。

宜根据城市所在气候区的气候特征选择适用的气候危害因子，不宜不加区分地全部纳入评估。

5.1.2 主导气候危害识别与分析

主导气候危害识别宜基于场地及周边区域近 30 年的气象观测数据，分析 5.1.1 所列重点危害因子的发生频率、强度与持续时间，识别对项目所在城市影响最显著的主导气候危害。

宜参考《中国气候变化蓝皮书》、国家或区域气候变化预估成果，分析至 2035 年或 2050 年的趋势变化，识别强度可能增加或频率可能上升的潜在主导气候危害。

基于主导气候危害识别与分析，形成按优先顺序排列的主导气候危害清单，作为 5.2 因子库建立的依据。[示例参见附录 A.1]

5.2 气候风险评估准备

5.2.1 因子库建立

针对 5.1.2 识别出的主导气候危害，宜分别建立由危害因子、暴露因子、脆弱性因子构成的本地化因子库。不同主导气候危害对应的因子库内容差异较大，宜分别构建因子库。[示例参见附录 A.2]

5.2.2 数据收集和要求

数据收集宜覆盖 5.2.1 所建因子库中各因子所需的全部数据。

数据的空间分辨率宜高则高，并与评估目的相匹配；评估单元宜采用行政单元或规则网格。

数据的时间范围宜满足：历史观测数据不少于 30 年；未来气候预估数据至少覆盖至 2035 年或 2050 年。

5.3 气候风险等级评定

5.3.1 气候风险计算

综合气候风险宜采用以下简化模型计算： $R = H \times E \times V$ 式中： R —— 气候风险综合值； H —— 气候危害综合值； E —— 气候暴露度综合值； V —— 气候脆弱性综合值。

计算宜按以下步骤进行：

a) 因子标准化：采用标准化方法（如极差法、Z 分数法等）将 5.2.1 因子库中各因子的原始数据统一为可比尺度。正向因子（数值越大风险越高）与负向因子（数值越大风险越低）宜分别处理。

b) 因子加权：确定各因子在所属成分（ H 、 E 、 V ）内的相对重要性。常用赋权方法包括：专家打分法、层次分析法（AHP）、熵权法等。具体赋权方法宜根据项目数据条件、专家资源与精度要求选择。同一项目内宜采用统一的赋权方法。

c) 成分合成与归一化：将各成分内部加权求和后，再分别对 H 、 E 、 V 三个成分进行归一化处理，使三者处于同一可比尺度，以保证后续相乘运算的数学合理性。[示例参见附录 A.3]

d) 综合风险计算：按公式 $R = H \times E \times V$ 计算各评估单元的综合气候风险值。对于数据条件充分或复杂项目，可参考 GB/T 24091—2024 第 6 章影响链方法进行更精细的评定。

5.3.2 气候风险评估结果输出

气候风险评估结果包括两项：

a) 主导气候危害因子：以按优先顺序排列的主导气候危害清单，呈现 5.1.2 识别出的对项目所在城市影响最显著的气候危害类型。

b) 气候风险评估报告：以风险区划图为核心，呈现 5.3.1 综合气候风险的计算结果。该报告作为本文件第 7 章城市层级优化的定量基础，用于识别居民气候风险较高的区域并开展针对性优化。

6 优化目标设定

结合城市规模和公园绿地特点，可设定城市、场地和物种三个层级的优化目标。

6.1 城市层级的优化目标

城市层级优化的目的是通过优化城市公园绿地植被覆盖格局，降低居民面临的气候健康风险，增强城市应对气候危害的整体韧性。

城市层级优化目标对应 5.1.2 识别出的主导气候危害，宜以最小化对应的气候风险为优化目标。优化目标的数学表达（目标函数）宜以 5.3.1 的气候风险计算公式（ $R = H \times E \times V$ ）为基础，针对相应的主导气候危害类型构建。

例如，高温热浪场景下以最小化高温健康风险为优化目标；极端降水场景下以最小化雨洪健康风险为优化目标，按 5.3.1 公式针对降水危害构建相应表达。优化目标可为单一目标，也可在面对多种主导气候危害时设定为多目标。

优化目标的计算依赖于决策变量与目标之间的响应关系，宜根据数据条件采用经验模型或数值模拟方法确定。例如，高温热浪场景下树冠覆盖率与降温效应的响应关系可基于遥感地表温度与树冠覆盖数据通过统计模型构建；极端降水场景下植被滞蓄能力与径流削减的响应关系可基于水文模型数值模拟确定。[示例参见附录 B.1]

6.2 场地层级的优化目标

场地层级优化的目的是通过优化单个公园绿地的植被空间分布，改善公众在公园中的户外环境舒适度与游憩安全水平。

场地层级优化目标同样对应 5.1.2 识别出的主导气候危害。例如：将“降低本公园高温时段的热不舒适程度”作为优化目标，常用平均通用热气候指数（UTCI）等指标衡量。

优化目标的确定方法、数学表达方式、多目标设定原则与响应关系的构建逻辑可按 6.1 执行。

场地尺度可采用更精细的数值模拟方法构建响应关系。例如，高温热浪场景下植被空间布局与户外热舒适的响应关系可基于 ENVI-met、Ladybug 等微气候数值模拟构建，输出指标可采用通用热气候指数（UTCI）、生理等效温度（PET）等；极端降水场景下植被空间布局与场地积水的响应关系可基于场地尺度水文模型（如 SWMM）模拟确定。[示例参见附录 C.1]

6.3 物种层级的优选目标

物种层级优选的目的是通过优选气候适应性植物，提升城市公园绿地植被群落的气候韧性与生态稳定性。

物种层级气候韧性植物优选的目标是从城市现有和可能引种的植物中，挑选出在当前和未来气候下都能良好生长的物种，供第 8 章场地层级选用。与城市层级和场地层级采用优化算法求最优解不同，物种层级优选是将多种数据和判断综合起来进行评估。

7 城市层级公园绿地植被覆盖格局优化

7.1 优化思路和程序

城市层级公园绿地植被覆盖格局优化包括确定空间优化问题（决策变量、约束条件）、优化算法求解和优化方案输出等环节，具体可归纳为以下三步（见图 2），可按步骤依次开展：

第一步 依据设定的优化目标（见 6.1）确定决策变量（可调整的内容）。例如：以各地块（空间单元）的乔木树冠覆盖增加量作为调整对象；

第二步 确定约束条件（限制条件）：首先，确定空间约束。例如：哪些地块可以增绿；其次，确定总量约束。例如：全市或各区总共要增加多少树冠覆盖；

第三步 求解并输出：用优化算法对决策变量进行计算，并输出优化方案。例如：用优化算法算出每个地块该增加多少树冠覆盖，形成全市植被覆盖格局分布图，据此确定每个公园的覆盖增加目标，并筛选出需要优先改造的公园。

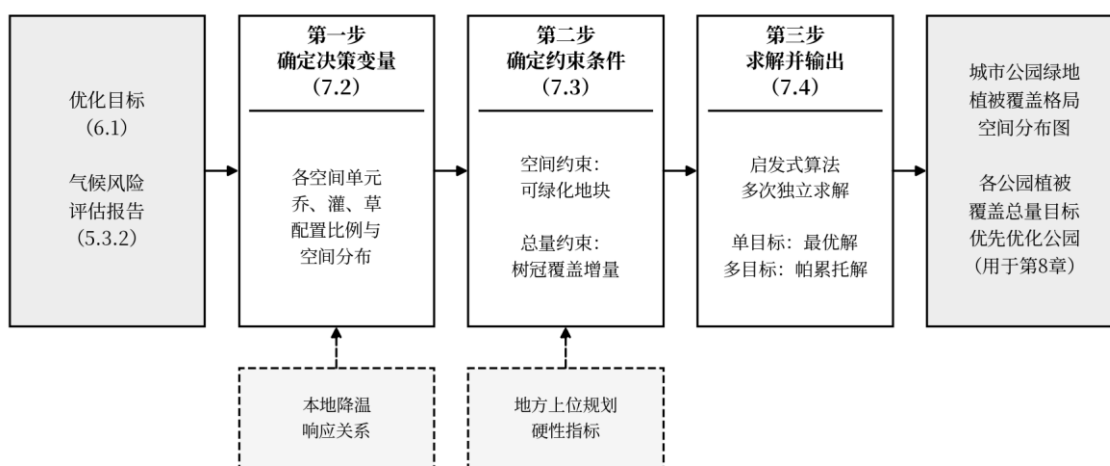


图 2 城市层级公园绿地植被覆盖格局优化程序

7.2 确定决策变量

决策变量为公园绿地植被覆盖格局，包括乔、灌、草在各空间单元的配置比例与空间分布。例如，高温热浪场景下乔木的冠层遮阴与蒸腾对降温起主导作用，宜以乔木覆盖增量为主要决策变量；极端降水场景下乔灌复层结构与渗透性绿地对滞蓄径流起主导作用，宜以复层结构与渗透性绿地的面积比例为主要决策变量。

空间单元的划定宜与城市规划管理尺度相匹配，单元边界宜采用既有路网或行政区划，单元划定宜与 5.2.2 数据收集的空间分辨率相协调。[示例参见附录 B.2]

7.3 确定约束条件

约束条件指对决策变量取值的限定，类型因主导气候危害的不同而异，常见包括空间约束与总量约束两类。

约束条件的设定宜以国土空间总体规划、城市绿地系统规划、防灾避险专项规划及气候适应型城市建设等相关上位规划确定的硬性指标为底线，如永久基本农田、生态保护红线、目标树冠覆盖率、目标绿地率等。例如，高温热浪场景的空间约束为上位规划划定的可绿化土地范围，总量约束为目标树冠覆盖率与现状的差值；极端降水场景的空间约束为可下渗或滞蓄绿地范围，总量约束为上位规划设定的滞蓄容积目标。[示例参见附录 B.3]

7.4 优化求解与方案输出

7.4.1 优化求解

求解方法宜根据优化目标的数量、问题规模、目标函数复杂度与数据条件选择。单目标优化常用方法包括确定性算法与启发式算法。城市层级优化决策变量多、目标函数非线性，宜优先采用启发式算法（如演化算法、模拟退火、粒子群算法等），其输出为单一最优方案。多目标优化宜采用多目标启发式算法（如 NSGA-II、NSGA-III、MOEA/D 等），其输出为一组帕累托最优解。

宜对同一优化问题进行多次独立求解，取多次结果的最优方案或一致性较高的方案作为最终方案输出。

7.4.2 方案输出

城市层级优化方案为城市公园绿地植被覆盖格局空间分布图。以各空间单元为载体，分级表达植被覆盖格局的优化结果，用于确定第 8 章场地层级优化中各公园的植被覆盖总量目标，并识别优先开展场地层级优化的公园。[示例参见附录 B.4]

8 场地层级公园绿地植被空间分布优化

8.1 优化思路和程序

场地层级公园绿地植被空间分布优化依据设定的优化目标（见 6.2）开展，具体可归纳为以下三步（见图 3），可按步骤依次开展：

第一步 确定决策变量（可调整的内容）。例如：公园内每个网格种不种、种什么，即乔木、灌木、草地的具体物种和种植位置；

第二步 确定约束条件（限制条件）。例如：种植要符合现行规范的间距要求、只在可种植区域内种、同一层植物之间不冲突、乔灌木各自的总量不超过城市层级下达的目标、物种从第 9 章输出的气候韧性物种清单中选取；

第三步 求解并输出：用优化算法对决策变量进行计算，并输出优化方案。例如：用优化算法排布植物，输出公园植被空间分布图（作为施工图设计依据）和各处高温风险的降低量。

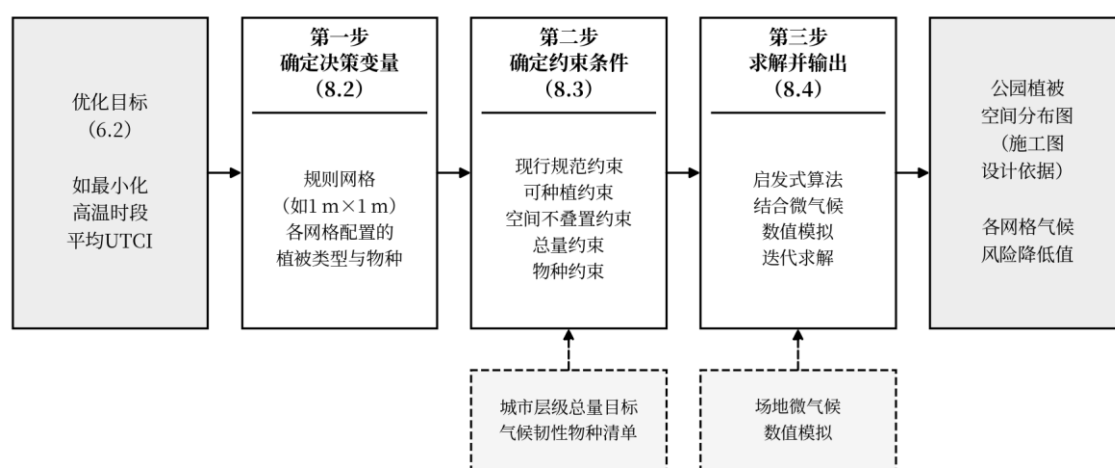


图 3 场地层级公园绿地植被空间分布优化程序

8.2 确定决策变量

场地层级优化的决策变量为公园内各空间单元的植被配置，包括种植位置以及乔木层、灌木层、地被层各层的具体物种。同一空间单元宜允许乔灌木多层复合配置以形成复层群落结构。

决策变量的空间载体宜采用规则网格抽象（如 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 网格），每个网格宜作为一个决策单元，决策内容为该网格上配置的植被类型与物种（空植网格表示该位置不种植）。网格分辨率宜根据公园规模、优化精度需求与数值模拟（见 6.2）的空间分辨率综合确定，不宜机械套用固定尺寸。[示例参见附录 C.2]

8.3 确定约束条件

场地层级的约束条件可包括以下五类：

- a) 现行规范约束：植物种植宜符合 GB 50420、GB 51192 等现行国家标准关于植物与建筑物、构筑物、各类管线、园路、铺装、间距的要求。
- b) 可种植约束：限定各网格能否种植以及能种植的植被类型。不可种植网格包括铺装、水体、园路、地下管线上方、古树名木保护范围等；不同植被类型的可种植网格宜根据网格条件（如土层厚度、光照、地下空间等）分别确定。
- c) 空间不叠置约束：限定同一植被层内相邻网格的种植组合，避免同层物种在冠层或根系上的水平物理冲突；不同植被层之间允许在同一空间单元内垂直复合配置。
- d) 总量约束：本公园乔、灌、草各自的覆盖总量以 7.4.2 输出的本公园植被覆盖总量目标为依据。
- e) 物种约束：可选物种限定在第 9 章气候韧性植物优选输出的物种清单内。[示例参见附录 C.3]

8.4 优化求解与方案输出

8.4.1 优化求解

场地层级决策变量为离散变量（每个网格上选择的植被类型与物种），且涉及物种间的空间不叠置约束，求解问题属于组合优化范畴，宜采用启发式算法（如遗传算法、模拟退火、禁忌搜索等）；多目标情形宜采用多目标启发式算法（如 NSGA-II、NSGA-III 等）。稳健性要求按 7.4.1 执行。算法参数宜根据问题规模与目标数量经预试验确定，具体设置可参照附录 C 示例。

8.4.2 方案输出

优化方案的输出包括两项：

- a) 公园植被空间分布图：以网格为载体，表达每个网格上配置的植被类型与具体物种，作为公园施工图设计的依据。
- b) 各网格的气候风险降低值：即优化方案下各网格相比现状的风险降低量，用于检验优化方法的有效性。[示例参见附录 C.4]

9 物种层级气候韧性植物优选

9.1 优选思路和程序

物种层级气候韧性植物优选的核心思路是：在传统的植物选择工具（气候安全裕度）基础上，加入本地专家经验和引种记录，再用机器学习把有限的评估结果推广到全部候选物种和未来气候情景。

物种层级气候韧性植物优选的整个过程可归纳为以下四步（见图 4），可按步骤依次开展：

第一步 建立候选物种名录：整合地方植物名录、本地文献与图谱、引种记录等多源数据，建立候选物种名录；

第二步 气候适应性评估：计算每个物种的气候安全裕度，衡量其对气候变化的敏感程度；

第三步 适应性等级评定：结合专家共识和引种记录，把部分物种评定为骨干、一般、不适宜三个等级，再用机器学习推广到全部物种和未来情景；

第四步 气候韧性物种清单输出：结合本地栽培经验校核后，输出气候韧性物种清单。

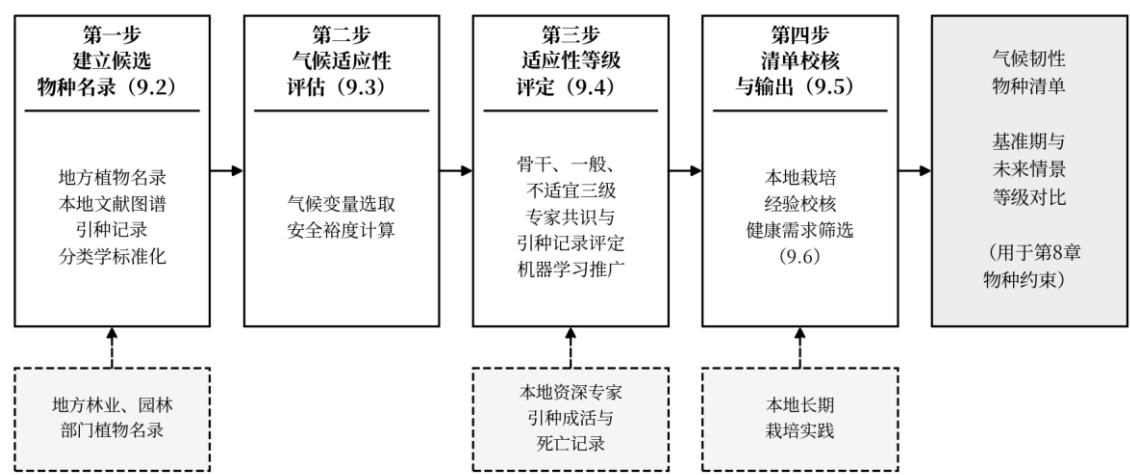


图 4 物种层级气候韧性植物优选程序

9.2 建立候选物种名录

候选物种名录宜整合多源数据建立，常用来源包括地方林业主管部门发布的植物名录、本地园林与生态学领域的代表性文献、本地植物图谱与数据库、城市植物引种记录等。物种名称宜进行分类学标准化，宜参考 iPlant 植物智、Catalogue of Life 中国节点等权威分类数据库，统一中文名与拉丁学名，剔除同物异名与重复记录。

9.3 气候适应性评估

气候适应性评估可包括气候变量选取和安全裕度计算两个环节。

9.3.1 气候变量选取：宜在影响植物存活的基础气候变量（温度类、降水类及温湿组合类）的基础上，结合 5.1.2 识别出的主导气候危害，增加与该危害对应的气候变量。基础变量常用年均温、最热月最高温、最冷月最低温、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量等；针对主导气候危害的补充

变量例如：高温热浪场景下增加极端高温频次与持续天数，极端降水场景下增加短时强降水频次，干旱场景下增加干旱日数与降水变异性等。气候数据宜采用 CHELSA、WorldClim 等高分辨率全球气候数据集，时间范围宜覆盖基准期与未来情景。

9.3.2 安全裕度的计算：以物种全球分布记录确定其气候耐受阈值（如取第 5 与第 95 百分位），与城市气候条件相比，差值即为该物种在该气候变量下的安全裕度。安全裕度用来衡量一个物种离它能承受的气候极限还有多远：安全裕度越大，说明物种越“游刃有余”、越能适应；安全裕度越小甚至为负，说明它已接近或超出耐受极限、越脆弱。物种全球分布数据宜采用 GBIF、中国数字植物标本馆（CVH）等权威生物多样性数据库，单个物种的有效分布记录数不宜少于 20 条。[示例参见附录 D.2]

9.4 适应性等级评定

物种的气候适应性宜分为骨干、一般、不适宜三个等级：骨干——适应性强、管理简单，可在本市大范围露天环境中普遍种植和推广的物种；一般——适应性稍弱，只在小范围特定小环境下适宜露天种植，且需要针对性养护才能推广的物种；不适宜——本地引种或栽培实践表明，当前或未来气候下都难以适应、不宜作为本市露天环境常规配置的物种。

等级评定宜综合两方面依据：一是本地资深植物专家的共识意见，宜选择长期从事本市园林植物管理、实践经验丰富并具备相关专业背景的专家，专家先分别评估、再通过集中讨论达成共识，剔除分歧较大的物种；二是城市植物引种记录中的成活与死亡数据，特别是历年引种失败（死亡）的记录，可用于识别不适宜物种。

由于专家共识和引种记录能覆盖的物种数量有限，且只反映当前气候下的判断，宜采用机器学习方法，把已评定物种所包含的规律推广到尚未评定的物种以及未来气候情景：以已评定物种的各项安全裕度作为输入特征、以其适应性等级作为标签，训练分类模型（常用随机森林、XGBoost 等），再用于预测未评定物种的等级以及现有物种在未来气候下的等级变化。[示例参见附录 D.3]

在专家共识与引种记录均难以获取的情况下，可按 4.2.3 采用替代方法。

9.5 气候韧性物种清单输出

气候韧性物种清单输出前，宜结合本地栽培实践经验对评定结果作综合校核，避免因单一数据源或单一模型误判物种适应性。对于经评定为不适宜、但本地长期栽培实践证明可通过特定微环境或针对性养护良好生长的物种，宜单独标注说明，不作简单排除。

气候韧性物种清单的输出包括两项：

a) 按适应性等级分类的物种清单：包括骨干、一般、不适宜三类物种名录，每类物种宜标注中文名、拉丁学名、生活型（乔木、灌木、地被等）及关键气候耐受指标。

b) 基准期与未来情景下的等级对比：标识在未来气候情景下适应性等级发生变化的物种，作为长期物种配置规划的参考依据。[示例参见附录 D.4]

气候韧性物种清单的输出作为第 8 章场地层级优化中物种约束的依据。

9.6 物种清单的进一步筛选

气候韧性物种清单宜结合居民健康需求进行进一步的调整或标注。宜重点标注对人体健康有负面影响的树种，如致敏花粉源（如悬铃木属、杨柳类）和飞絮源（如杨柳雌株等），在植物选配时予以控制。相关信息可参考本地园林绿化林业部门的名录、行业标准，以及疾控部门的过敏原监测数据等。

附录 A

（资料性）

气候风险评估示例

A.1 主导气候危害的确定

按 5.1.1 与 5.1.2 的要求，对北京中心城区的气候危害进行识别。基于近 30 年（1995—2024 年）国家气象观测数据，北京中心城区主要气候危害的近期演变趋势如下：

—— 高温热浪：年均高温日数（日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ）由 1990 年代的约 7.5 天上升至近 10 年的约 14.2 天，2023 年达到历史峰值 28 天；高温热浪事件的强度、频率与持续时间均呈显著上升趋势；—— 极端降水：年极端降水事件频次有上升趋势，2012 年“7·21”与 2023 年“7·29—8·2”等极端降水事件造成显著的城市内涝与社会经济损失；—— 持续干旱：春季干旱风险长期存在，但近年因夏季降水增多有所缓解；—— 寒潮、沙尘暴：发生频率较 1990 年代显著下降。

参考《中国气候变化蓝皮书 2024》及北京市气候变化预估成果，至 2050 年高温热浪事件预计在强度、频率与影响范围上进一步加剧。

综合考虑，确定本附录以**高温热浪**作为主要示例气候危害。

A.2 因子库建立与数据收集

按 5.2.1 的方法，针对 A.1 确定的主导气候危害（高温热浪），整合多源数据，建立面向北京中心城区的因子库。本示例因子库的构成见表 A.1。表 A.1 中“与维度相关性”列以“+”表示该指标值越大、对应维度（危害、暴露或脆弱性）越高，以“-”表示该指标值越大、对应维度越低，用于后续因子标准化时确定正负向处理方向。

表 A.1 高温热浪气候风险评估因子库

维度	指标	数据	来源	与维度相关性
风险	危害	高温天气强度	ECOSTRESS, Landsat NASA (https://ecostress.jpl.nasa.gov/) USGS (https://www.usgs.gov/)	+
	暴露	人口密度	WorldPop WorldPop (https://hub.worldpop.org/)	+
	脆弱性	女性人口密度	WorldPop WorldPop (https://hub.worldpop.org/)	+
		65岁以上人口密度	WorldPop WorldPop (https://hub.worldpop.org/)	+
		社会经济水平	NPP-VIIRS-like NTL 国家地球系统科学数据共享平台 (http://nnu.geodata.cn/)	-
		医疗服务可达性	POI Open street map (https://www.openstreetmap.org/)	-

A.3 气候风险等级评定

按 5.3.1 的步骤，对 A.2 因子库中的各因子进行标准化、加权与归一化处理，分别计算高温危害指数（HHI）、高温暴露指数（HEI）与高温脆弱性指数（HVI），按公式 $R = HHI \times HEI \times HVI$ 合成北京中心城区高温风险指数（HRI）。计算结果见图 A.1。HRI 评估结果作为第 7 章城市层级优化的定量基础。

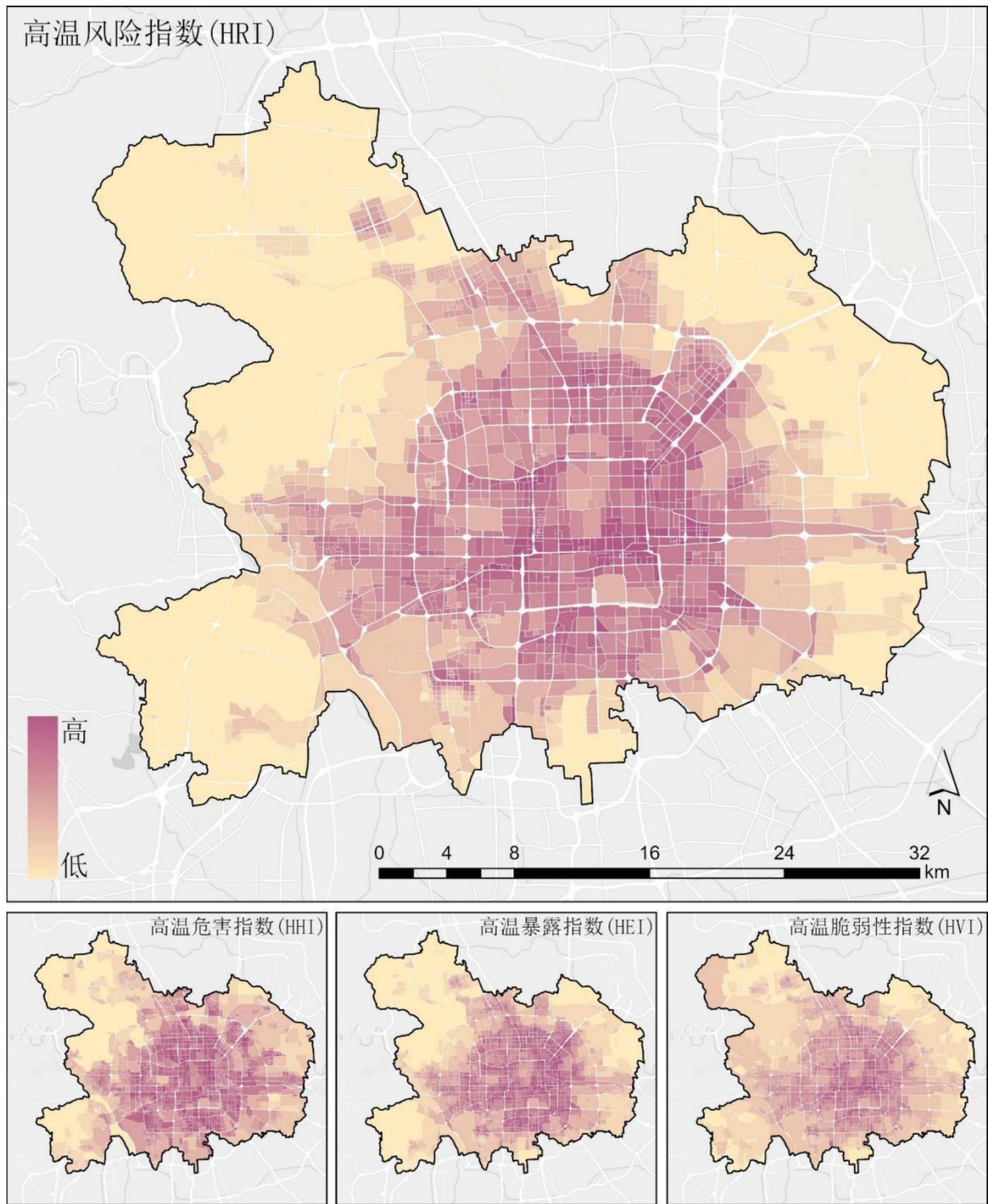


图 A.1 高温风险及其危害、暴露、脆弱性评估结果

附录 B

(资料性)

城市层级公园绿地植被覆盖格局优化示例

B.1 优化目标的确定

按 6.1 的方法，结合附录 A 已识别的主导气候危害（高温热浪）与高温风险评估结果（图 A.1），以最小化北京中心城区高温健康风险为本示例的优化目标。

优化目标的数学表达按公式（B.1）构建：

$$\min \sum_{i=1}^n \left(HHI_i - \int_{TCR_i}^{ETCR_i} f(TCR) dTCR \right) \times HEI_i \times HVI_i \times A_i \quad (B.1)$$

式中：

n —— 评估区内空间单元数量；

HHI_i —— 空间单元 i 的高温危害指数（来源于 A.2 因子库与 A.3 评估输出）；

HEI_i —— 空间单元 i 的高温暴露指数；

HVI_i —— 空间单元 i 的高温脆弱性指数；

TCR_i —— 空间单元 i 的现状树冠覆盖率；

$ETCR_i$ —— 空间单元 i 优化后的树冠覆盖率，作为决策变量；

$f(TCR)$ —— 树冠覆盖率与降温效率的响应关系，按公式（B.2）确定；

A_i —— 空间单元 i 的面积。

公式（B.1）的物理含义为：通过优化各空间单元的树冠覆盖率，使评估区内累计的高温健康风险降低量最大化。

树冠覆盖率与降温效率的响应关系按公式（B.2）确定：

$$CE = f(TCR) = -0.0125 \times \log(TCR) + 0.12986477 \quad (B.2)$$

式中：

CE —— 降温效率（℃/%），表示每提升 1% 树冠覆盖率所带来的地表温度降低值；

TCR —— 树冠覆盖率（%）。

公式 (B.2) 的具体形式来源于前沿文献的统计拟合成果, 反映了树冠覆盖率与降温效率之间的非线性递减关系: 随着 TCR 上升, 单位树冠覆盖率增量带来的降温效率下降。响应关系曲线见图 B.1。

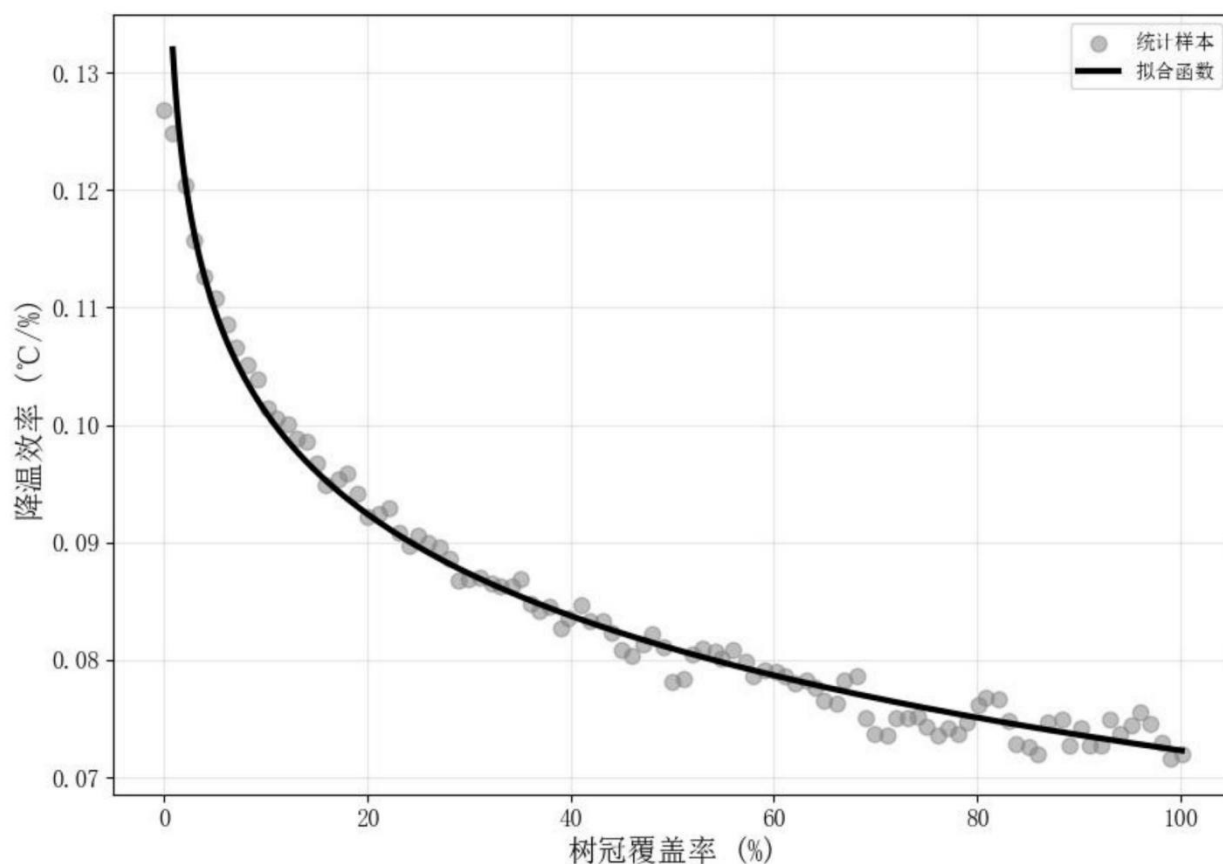


图 B.1 树冠覆盖率 (TCR) 与降温效率 (CE) 的响应函数

B.2 确定决策变量

按 7.2 的方法, 确定本示例的决策变量与空间单元如下:

决策变量: 各空间单元的树冠覆盖增量 (ΔTCR), 即优化后的树冠覆盖率 (ETCR) 与现状树冠覆盖率 (TCR) 之差, 单位为百分比 (%)。本示例聚焦高温热浪场景, 乔木的冠层遮阴与蒸腾对降温起主导作用, 因此以乔木树冠覆盖率作为决策变量。

空间单元: 以北京中心城区既有的城市街区为基本空间单元, 与气候风险评估 (附录 A) 的空间分辨率相协调。各空间单元的 ΔTCR 取值受 B.3 约束条件限定。

B.3 确定约束条件

按 7.3 的方法, 确定本示例的约束条件包括以下两类:

a) 空间约束: 可用于增加树冠覆盖的土地范围由现状草地、裸地、空地三类土地聚合得到, 并扣除永久基本农田保护范围。各空间单元 i 的允许绿化面积 (Allowable Greening Area, AGA_i) 按公式 (B.3) 计算:

$$AGA_i = (A_{grass\ i} + A_{bare\ i} + A_{vacant\ i} - A_{farmland\ i})/A_{block\ i} \quad (B. 3)$$

式中：

$A_{grass\ i}$ —— 空间单元 i 的草地面积；

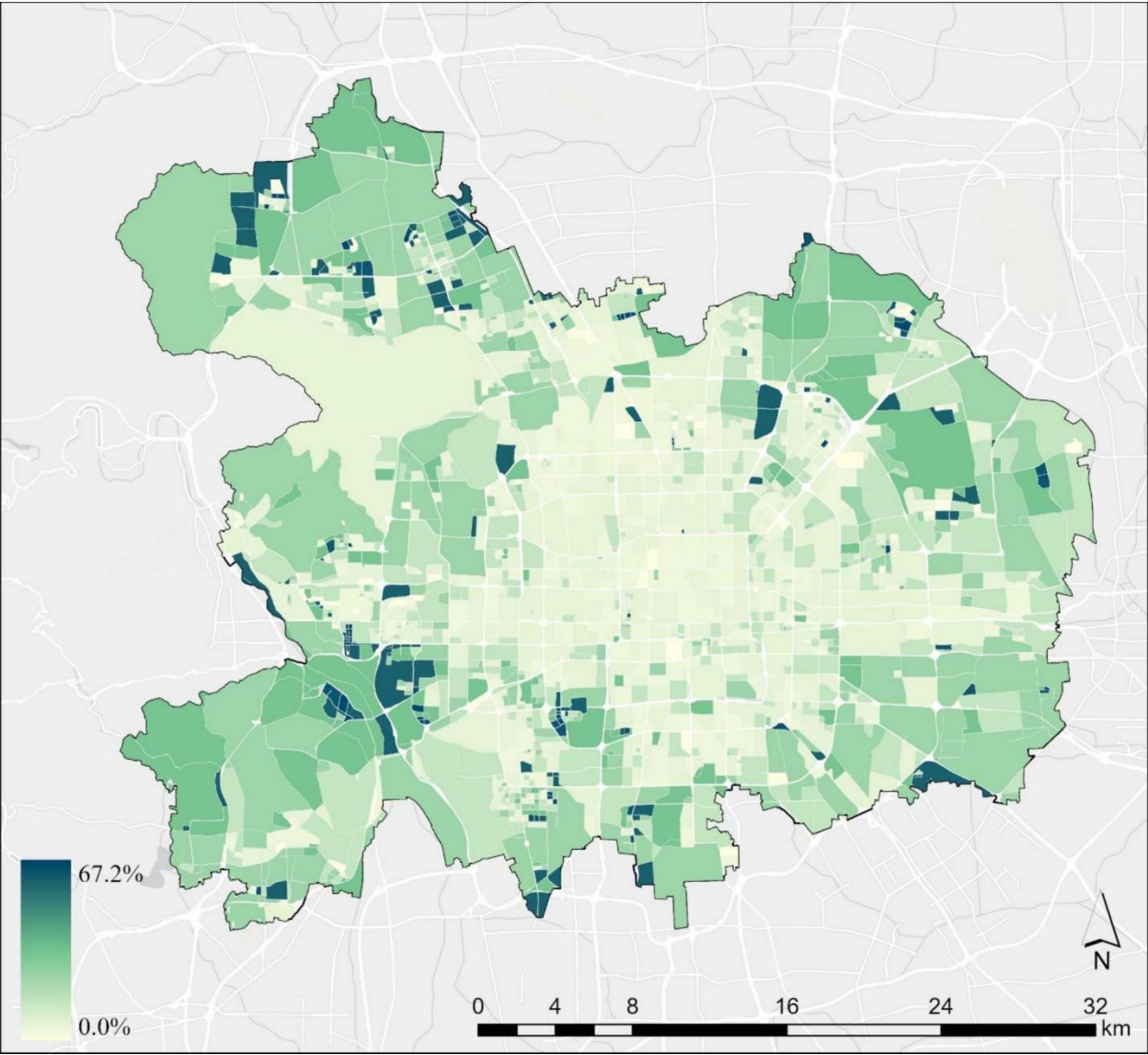
$A_{bare\ i}$ —— 空间单元 i 的裸地面积；

$A_{vacant\ i}$ —— 空间单元 i 的空地面积；

$A_{farmland\ i}$ —— 空间单元 i 的永久基本农田面积；

$A_{block\ i}$ —— 空间单元 i 的总用地面积。

各空间单元的 AGA 作为该单元决策变量 $ETCR$ 取值的上限。各空间单元 AGA 的空间分布见图



B. 2
图 B. 2 空间约束（允许绿化面积）的空间分布

b) 总量约束：北京中心城区树冠覆盖增量总目标取自国土空间规划设定的目标树冠覆盖率与现状树冠覆盖率的差值，按各行政区分别设定。各行政区的总量约束数值见表 B. 1。

表 B.1 北京中心城区各行政区总量约束

指标	核心区	朝阳区	丰台区	石景山区	海淀区
目标树冠覆盖率 (%)	6.61	35.00	35.00	33.00	37.00
现状树冠覆盖率 (%)	4.65	24.76	27.99	31.39	35.56
约束总量 (%)	1.96	10.24	7.01	1.61	1.44
约束总量 (hm ²)	181.38	4656.95	2145.06	138.04	620.31

B.4 优化求解与方案输出

按 7.4.1 的方法, 本示例采用单目标启发式算法求解。具体采用基于 DEAP 库 (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) 的进化算法。该算法适用于本示例所涉及的非线性、连续、高维空间优化问题。为提高结果稳健性, 优化过程独立运行 10 次以上, 取最优解作为最终结果。多次独立运行的最优解波动幅度小于 2 %, 表明算法收敛稳定。算法的收敛曲线见图 B.3。

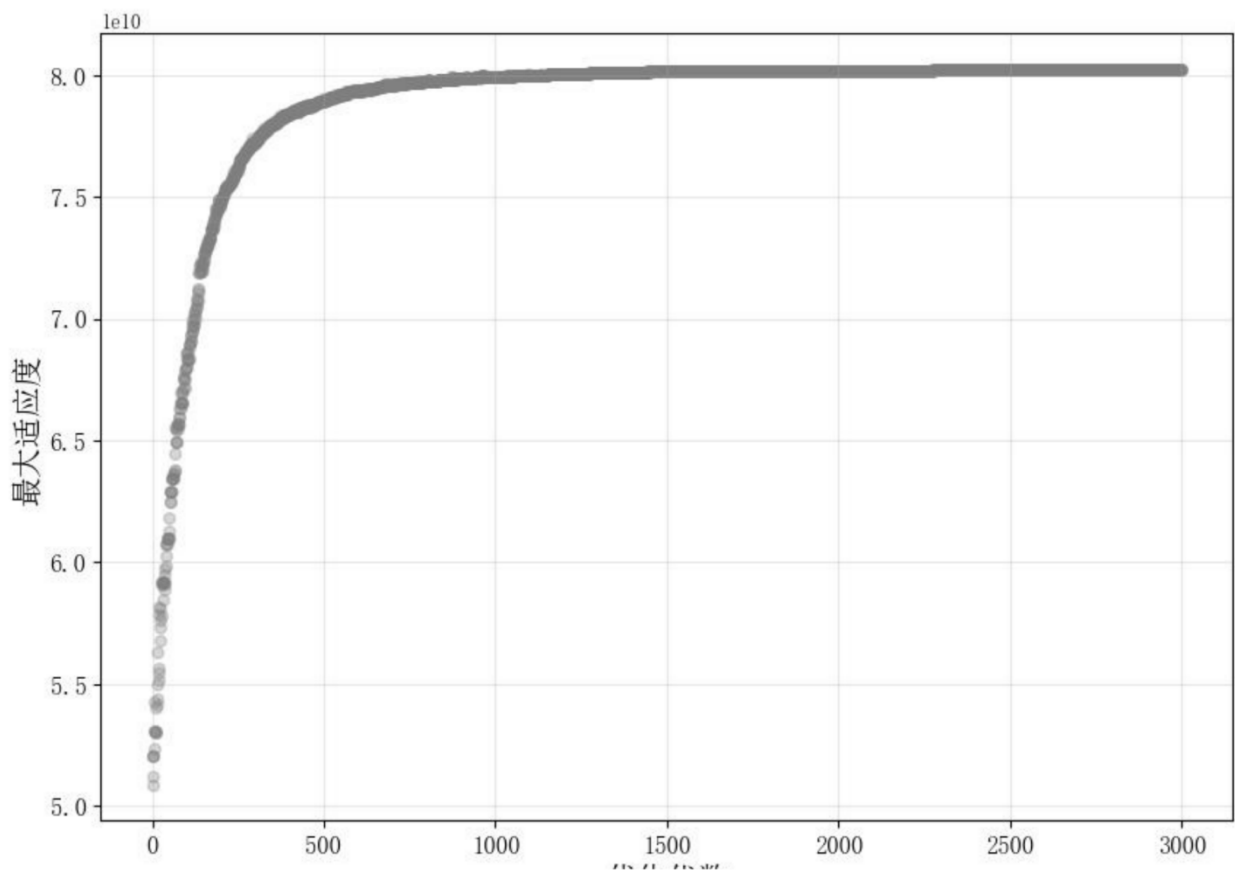
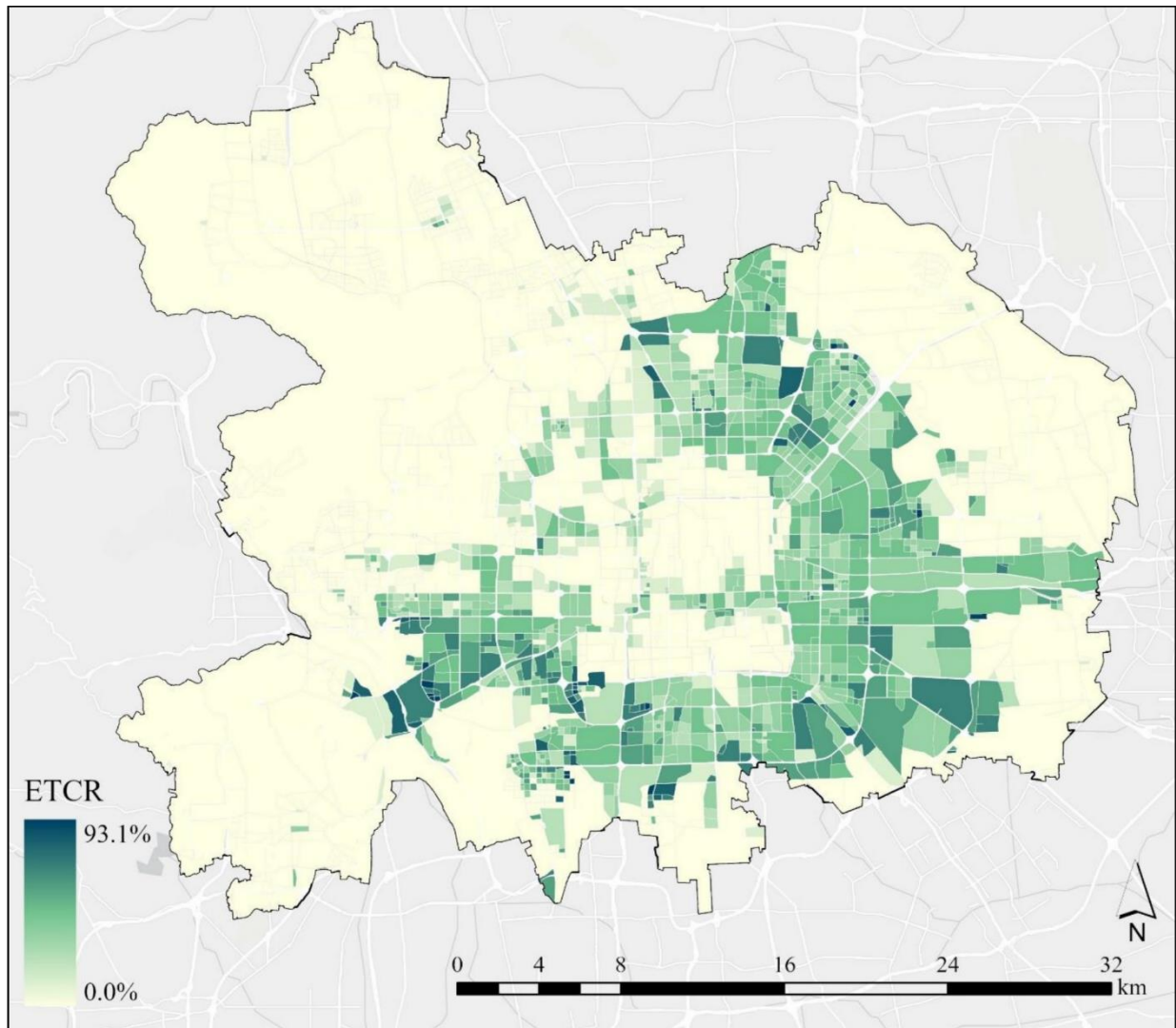


图 B.3 优化过程的收敛曲线

本示例的优化方案输出：植被覆盖格局空间分布图：以各空间单元 i 的优化后树冠覆盖率（ETCR_i）为表达内容，见图 B. 4。该图用于确定第 8 章场地层级优化中各公园的植被覆盖总量目标，



并识别优先开展场地层级优化的公园
图 B. 4 最优方案的空间分布

附录 C

（资料性）

场地层级公园绿地植被空间分布优化示例

C.1 优化目标的确定

按 6.2 的方法，本示例选取北京市二环外东侧某小型公园绿地作为研究对象，场地面积约 1.87 ha，紧邻中高密度居住区。该场地在夏季高温情境下的平均通用热气候指数（UTCI）达 34.47℃，呈现较高的高温健康风险。

以最小化场地高温时段平均 UTCI 为本示例的优化目标，目标函数按公式（C.1）构建：

$$\min \overline{\text{UTCI}}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \quad (\text{C.1})$$

式中：

$\overline{\text{UTCI}}(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ —— 在种植点位 $\mathbf{x}$ 与树种选择 $\mathbf{s}$ 条件下，全场域 UTCI 栅格的高温时段平均值；

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ —— 新增 M 棵树木的种植坐标；

$\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_M)$ —— 新增树木的树种编号。

UTCI 综合反映空气温度、平均辐射温度、风速与相对湿度对人体热应激的耦合作用，按公式（C.2）计算：

$$\text{UTCI} = f(T_a, T_{\text{mrt}}, v_{10\text{m}}, \text{RH}) \quad (\text{C.2})$$

式中：

T_a —— 空气温度（℃）；

T_{mrt} —— 平均辐射温度（℃）；

$v_{10\text{m}}$ —— 10 m 高度处风速（m/s）；

RH —— 相对湿度（%）。

UTCI 的具体计算由 Grasshopper 平台 Ladybug 工具完成，模拟时段取高温日 14:00—17:00。

C.2 确定决策变量

按 8.2 的方法，将场地以 1 m × 1 m 间隔划分为规则网格，构建离散候选格点集。决策变量包括两部分：各候选格点是否种植（0/1）；若种植，所选择的树种编号 $s_j \in \{1, 2, \dots, 12\}$ ，对应表 C.1 中的树种序号。

本示例所采用的北京气候韧性植物名录见表 C.1 与图 C.1。该名录中的物种在基准期与未来气候情景下均评定为骨干或一般等级，作为本示例物种约束的依据。各树种的几何参数（胸径、冠幅、植株高度等）主要来源于 TRY Plant Trait Database，对于 TRY 数据稀缺的物种，补充参考《中国植物志》。

表 C.1 北京代表性气候韧性植物名录

序号	中文名	拉丁学名	树冠半径 (m)
1	银杏	Ginkgo biloba L.	6.51
2	槐	Styphnolobium japonicum (L.) Schott	6.03
3	朴树	Celtis sinensis Pers.	8.44
4	柿	Diospyros kaki Thunb.	8.02
5	铅笔柏	Juniperus virginiana L.	4.73
6	五角槭	Acer pictum subsp. mono (Maxim.) Ohashi	6.29
7	网脉丁香	Syringa reticulata (Blume) H. Hara	4.45
8	花楸树	Sorbus pohuashanensis (Hance) Hedl.	5.02
9	紫荆	Cercis chinensis Bunge	3.72
10	盐麸木	Rhus chinensis Mill.	3.47
11	西府海棠	Malus × micromalus Makino	3.04
12	桃	Prunus persica (L.) Batsch	3.86

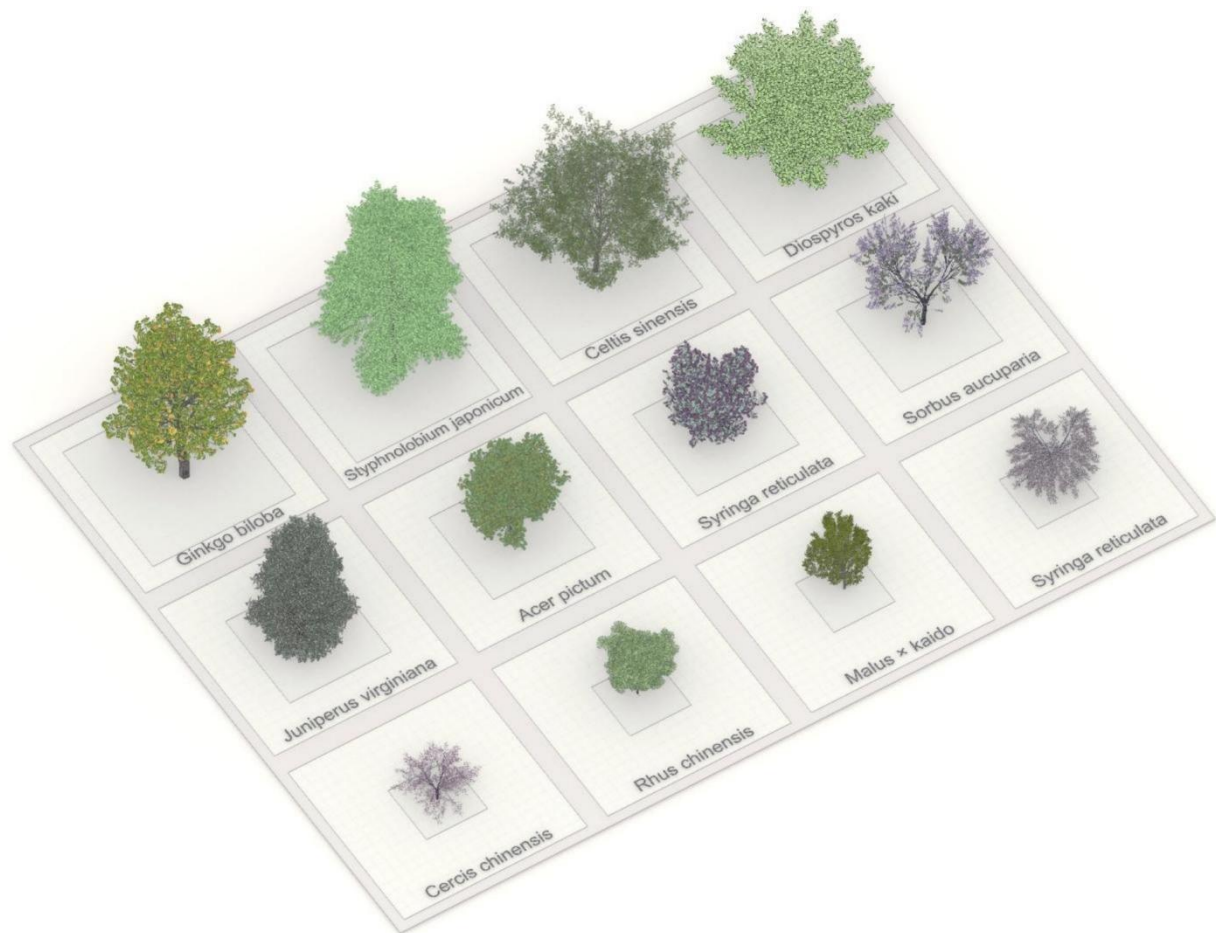


图 C.1 北京代表性气候韧性植物几何模型

C.3 确定约束条件

按 8.3 的方法，本示例的约束条件包括以下四类：

a) 现行规范约束：植物种植符合 GB 50420、GB 51192 等现行国家标准关于植物与建筑物、构筑物、各类管线、园路与铺装的间距要求。

b) 可种植约束：候选种植格点位于场地内可绿化区域（草地等可种植空间）内。场地内的可种植区域基于高分辨率遥感影像解译并结合现场调查确定，剔除道路、硬质铺装等不可种植要素，本示例的可种植区域总面积约 6 359 m²。

c) 空间不叠置约束：新增树木之间、新增树木与既有建筑、新增树木与既有树木之间的树心距离不小于其树冠半径之和，避免冠层与根系的物理冲突，按公式（C.3）表达：

$$\sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \geq r_{sj} + r_{sk} \quad \forall j \neq k$$

(C.3)式中：

$\sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2}$ —— 第 j 棵与第 k 棵树心之间的欧氏距离（m）；

r_{sj} 、 r_{sk} —— 第 j 棵与第 k 棵树的树冠半径（m），由表 C.1 确定。

d) 总量约束：本场地的新增树冠覆盖总面积上限来源于附录 B 城市层级优化的输出（见 B.4），按公式（C.4）表达：

$$\sum_{j=1}^M \pi r_{sj}^2 \leq 2180 \text{ m}^2 \quad (\text{C.4})$$

式中：

M —— 新增树木总数。

C.4 优化求解与方案输出

按 8.4.1 的方法，本示例采用启发式算法求解。具体采用基于 DEAP 库的进化算法，个体采用四元组实值染色体编码 (x_j, y_j, r_{sj}, s_j) ，约束条件通过 DeltaPenalty 包装器进行管理。降温效应模拟由 Grasshopper 平台 Ladybug 工具完成，模拟结果回传至 Python 进化算法作为目标函数值，用于方案迭代与优选。为提高结果稳健性，优化过程独立运行 10 次以上，取最优解作为最终结果。算法的收敛曲线见图 C.2

本示例的优化方案输出包括两项：

a) 场地植被空间分布图：以网格为载体，表达每个网格上配置的树种与种植位置，见图 C.3。该图作为公园施工图设计的依据。

b) 场地热环境改善指标：即优化方案下场地平均 UTCI 相比现状的降低量，用于检验优化方法的有效性。

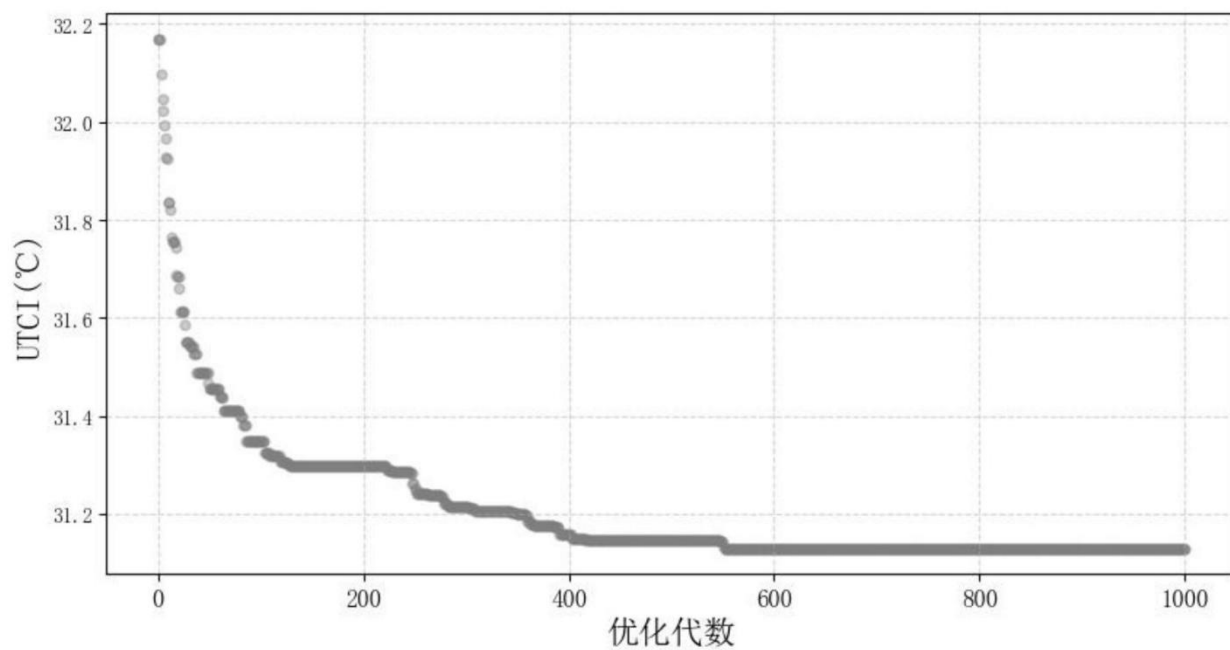


图 C.2 优化过程的收敛曲线

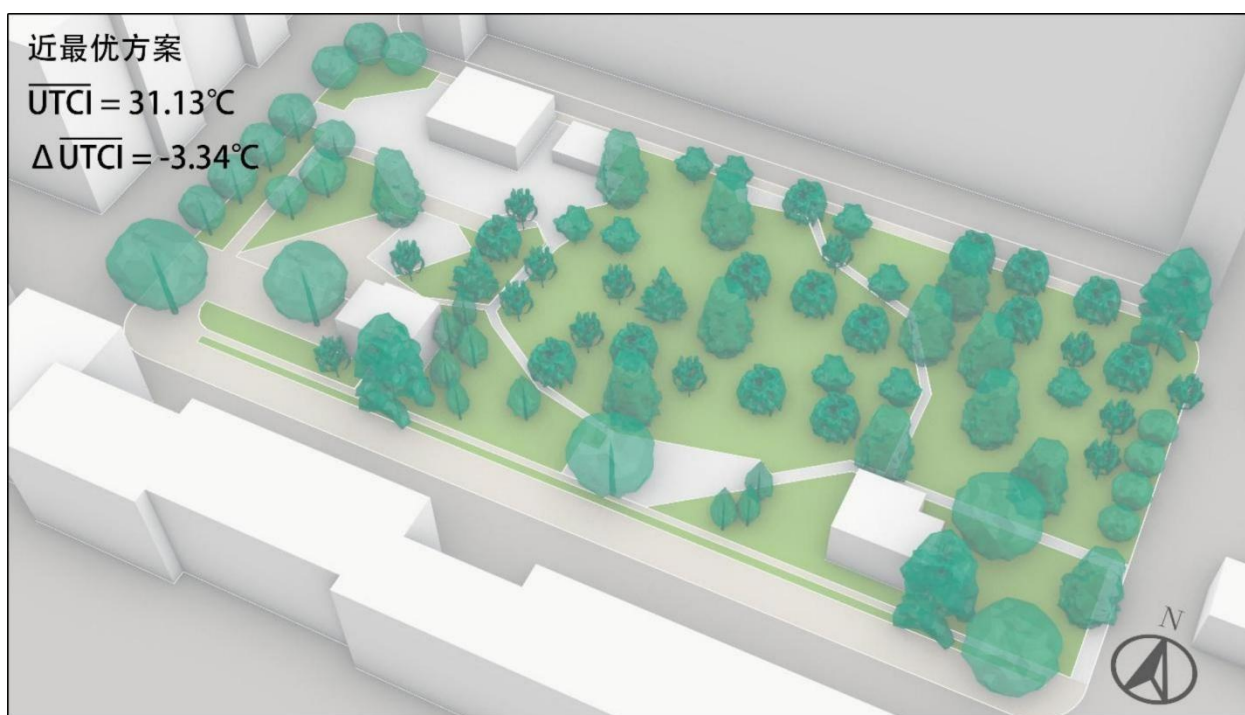


图 C.3 最优方案的空间分布及其绩效

附录 D

(资料性)

物种层级气候韧性植物优选示例

D.1 建立候选物种名录

按 9.2 的方法，整合北京地区园林部门发布的植物名录、生态与园林学领域代表性文献、本地植物图谱与数据库、城市植物引种记录等多源数据，建立候选物种名录。经分类学标准化清理后，本示例所建立的候选物种名录共包含 1 070 种植物，覆盖北京地区现状栽培及历史引种过的主要植物物种。

D.2 气候适应性评估

按 9.3 的方法，针对北京中心城区的主导气候危害（高温热浪），选取以下 8 个气候变量作为气候适应性评估的关键变量：

- 温度类：年均温（bio1）、最热月最高温（bio5）、最冷月最低温（bio6）；
- 降水类：年降水量（bio12）、最湿季降水量（bio16）、最干季降水量（bio17）；
- 温湿组合类：bio518（最热季降水量 bio18 与 bio5 的组合，反映夏季高温高湿条件）、bio619（最冷季降水量 bio19 与 bio6 的组合，反映冬季寒冷高湿条件）。

气候数据采用 CHELSA 全球高分辨率气候数据集，时间范围覆盖基准期（1981—2010 年）与未来情景（2041—2070 年）。物种全球分布数据采用 GBIF 全球生物多样性数据库。

物种气候安全裕度按公式（D.1）与公式（D.2）计算：

$$S_{\text{Baseline}} = \begin{cases} T_{\text{species}}^{(i)} - C_{\text{baseline}} & (\text{bio1, bio6, bio12, bio17, bio619}) \\ C_{\text{baseline}} - T_{\text{species}}^{(i)} & (\text{bio5, bio16, bio518}) \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

$$S_{\text{Future}} = \begin{cases} L_{\text{species}}^{(i)} - C_{\text{future}} & (\text{bio1, bio6, bio12, bio17, bio619}) \\ C_{\text{future}} - L_{\text{species}}^{(i)} & (\text{bio5, bio16, bio518}) \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

式中：

S_{Baseline} 、 S_{Future} —— 物种在基准期与未来情景下的气候安全裕度；

T_{species}^i —— 物种基于全球分布记录确定的气候耐受值，正向变量取第 5 百分位，负向变量取第 95 百分位；

$L_{\text{species}}^{(i)}$ —— 物种在未来情景下的气候耐受极限；

C_{baseline} 、 C_{future} —— 北京中心城区在基准期与未来情景下的气候值。

安全裕度数值越大，表明物种对该气候变量的耐受能力越强，气候脆弱性越低；数值越小，表明物种越接近其气候耐受边界，气候脆弱性越高。

D.3 适应性等级评定

按 9.4 的方法，整合地方资深植物专家的共识性评估与北京城市植物引种记录中的存活与死亡数据，将 247 种已知物种评定为骨干、一般、不适宜三个适应性等级。

针对未直接评估的物种以及未来气候情景下的等级预测，采用机器学习方法将上述等级知识泛化至 1070 种候选物种与未来气候情景。

D.4 气候韧性物种清单输出

按 9.5 的方法，输出北京中心城区气候韧性物种清单，包括基准期与未来情景下各物种的适应性等级与对比结果。详见图 D.1。

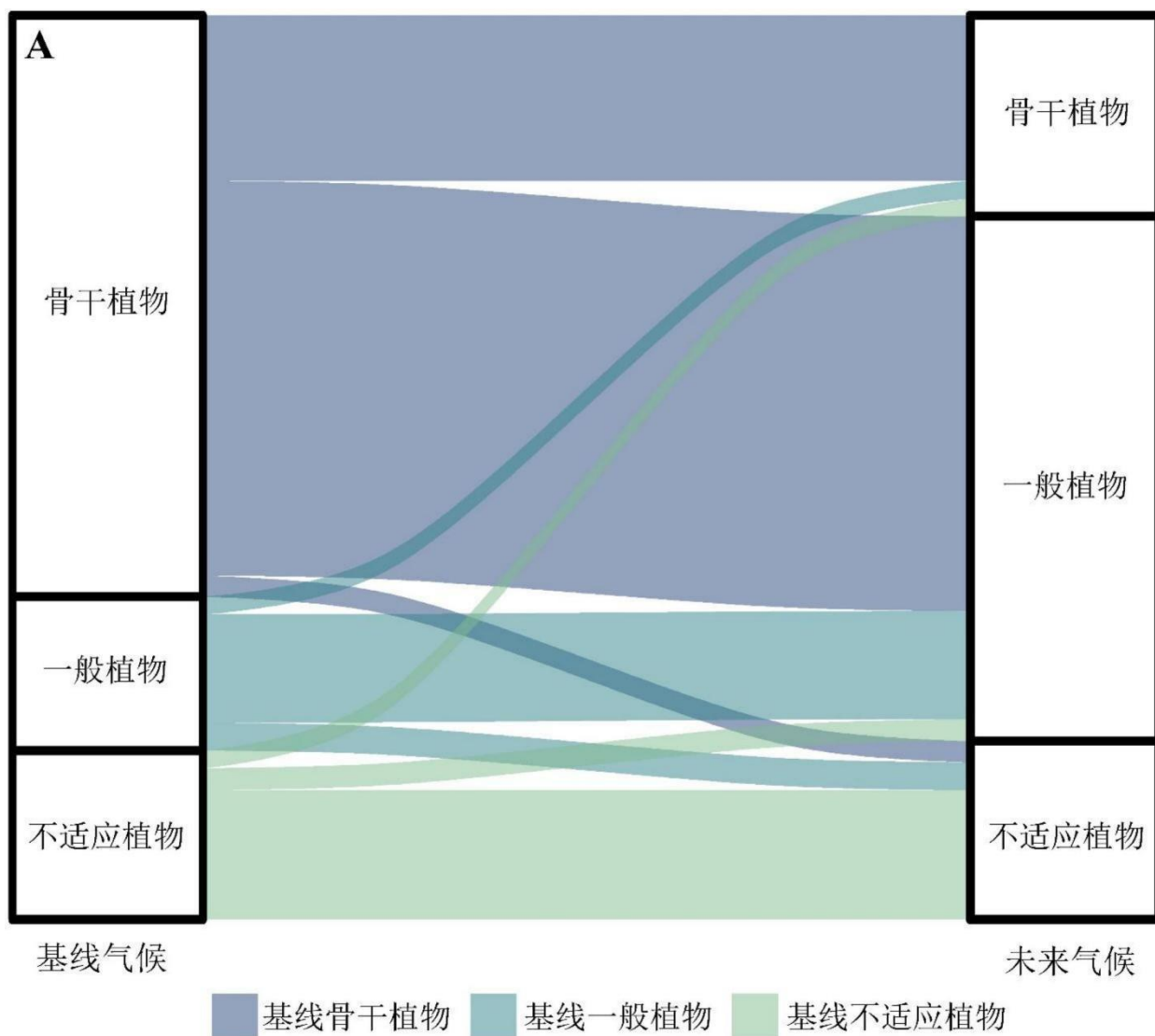


图 D.1 植物气候适应性等级变化桑基图