

应对气候变化的城市绿色空间韧性—减碳—增汇协同范式与设计策略

Synergic Paradigm and Design Strategies of Urban Green Spaces on Responding to Climate Change

丁 戎¹ 栾 博^{2*} 罗珈柠² 祝明建³
DING Rong¹ LUAN Bo^{2*} LUO Jianing² ZHU Mingjian

(1.中国城市规划设计研究院, 北京 100044; 2.北京大学深圳研究院, 深圳 518057; 3.华南理工大学, 广州 510006)
(1. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing, China, 100044; 2. Peking University Shenzhen Institute, Shenzhen, Guangdong, China, 518057; 3. South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, China, 510006)

文章编号: 1000-0283(2023)01-0016-09
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2023. 01. 0016. 003
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-11-10
修回日期: 2022-12-08

摘 要

绿色空间有助于城市在应对气候变化中提高韧性与减排增汇能力, 目前缺乏增进协同增效的有效设计途径。通过对国内外理论和实践的研究综述, 探究基于自然的解决方案的绿色空间韧性—降碳协同范式与设计策略, 提出全周期迭代演进的动态适应性范式和七项原则性策略, 应用具体案例进行实证分析, 并对城市绿地应对气候变化的发展前景提出建议与展望。研究结果发展了城市绿地规划设计理论方法, 为发挥绿色空间应对气候变化的积极作用、推进城市高质量绿色发展、提升城市安全韧性水平提供支撑。

关键词

基于自然的解决方案; 绿色基础设施; 协同范式; 减排增汇; 城市韧性

Abstract

Green space is important for urban resilience, as well as carbon reduction and carbon sinks. However, there is no effective approach to green space construction coping with climate change. Through a literature review of relative theories and practices, the paper proposes the synergic paradigm and design strategies of green space within the framework of Nature-based Solutions, including a dynamic adaptive paradigm and seven principle strategies. The paper uses a specific case as an empirical analysis to illustrate the paradigm and strategies. Suggestions and prospects of urban green space for climate adaptation are concluded ultimately. This paper develops the theories and methods of urban green space planning and design, which effectively support urban green space to respond to climate change.

Keywords

nature-based solution; green infrastructure; synergic paradigm; carbon reduction and carbon sinks; urban resilience

丁 戎

1983年生/女/湖南益阳人/硕士/高级工程师/研究方向为绿地系统规划、风景名胜
区规划

栾 博

1983年生/男/北京人/博士/绿色基础设施研究所所长、高级工程师/研究方向为绿色基础设施与韧性低碳景观

罗珈柠

1988年生/女/广西梧州人/硕士/助理研究员/研究方向为城市生态

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: luanbo@pku.edu.cn

IPCC 第六次评估报告确认人类活动及排放导致全球升温, 引发暴雨、台风、洪涝等极端气候灾害^[1]。减排、增汇的减缓策略和增强韧性的适应策略是气候变化响应的主要

途径, 不同策略的协同增效是影响应对气候变化有效性的关键。中国高度重视气候变化问题, 2020年9月习近平主席在第七十五届联合国大会宣布了中国实现碳达峰、碳中和

基金项目:

国家自然科学基金项目“海岸带城市绿色空间的韧性驱动机制研究——以粤港澳大湾区为例”(编号: 52078004); 广东省基础与应用基础研究基金项目“粤港澳大湾区城市绿色基础设施韧性减灾效应与驱动机制研究”(编号: 2021A1515012246); 深圳市科技计划库“一河一湾生物栖息地修复和生态韧性构建技术研发”(编号: KCXFZ20211020164205009); 国家自然科学基金项目“粤港澳大湾区适应海平面上升和快速城市化的生态保护格局优化研究”(编号: 32271735)

的战略目标。2022年10月16日党的二十大报告指出促进人与自然和谐共生是中国式现代化的本质要求之一，进一步明确提出“协同推进减污、降碳、扩绿、增长”的生态优先、绿色低碳发展要求。协同气候响应及环境治理的相关政策相继出台，2021年1月生态环境部发布《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》，确立以“双碳”目标为牵引，统筹融合气候变化与生态环境保护工作的基本路径；2022年6月住房和城乡建设部和发改委印发《城乡建设领域碳达峰实施方案的通知》，针对城市绿色空间提出加强绿色廊道、滨水空间的固碳增汇要求，以及留足城市河湖生态空间和防洪排涝空间灾害适应的要求。

2021年中国城镇化水平已近65%，城市成为人口、基建与经济活动的高密度聚集地，是受气候变化影响的敏感区。绿色空间以有生命的自然要素为构成主体，可利用自然生命体的自适应性和自组织性有效应对不确定性^[2]，帮助城市提升韧性和降碳增汇能力。提升生态碳汇能力、强化降温减排效果，是城市绿色空间在主动减缓气候变化方面的主要贡献；增强城市生态韧性应灾能力，是绿色空间在被动适应气候影响方面的重要作用。本文旨在阐释国内城市绿色空间应对气候变化的关键问题，探讨绿色空间韧性、降碳、增汇的协同范式与设计原则，并对新时代高质量推进城市绿色空间提出建议与展望。

1 城市绿色空间应对气候变化的功能与价值

城市绿色空间在响应气候变化的缓解与适应两类途径中均有重要作用，是改善城市脆弱性的重要措施。全球很多国家政府和组织已认识到由灰色基础设施建设转向绿色基础设施对于增强城市韧性的必要性与重要

性，积极开展行动^[3]。中国在生态文明建设的时代需求下，也开展城市“双修”、气候适应性城市、海绵城市等实践。近期很多实证研究表明绿色基础设施能够减缓和适应气候变化影响，主要在于固碳减排、减缓热岛、削减洪峰、改善水质和空气质量等方面^[4-5]。一方面，绿色空间是响应气候变化的适应性措施，利用绿色屋顶、植草沟、雨水花园等技术设施控制地表径流总量和峰值流量，缓解洪涝压力^[6]，同时实现径流污染的削减^[7]。绿色空间的植被所提供的绿荫和蒸散发具有降温作用，有效改善城市热环境^[8-9]。另一方面，绿色基础设施也是缓解气候变化的主动性途径，具有直接增汇与间接降碳作用。植物吸收CO₂的光合作用和土壤的固碳作用是其缓解气候变化的直接方式^[10-11]。绿色空间降温致使城市能耗降低^[12]，实现温室气体减排是其间接作用^[10,13]。

绿色空间在响应气候变化中的作用机制成为研究前沿^[2]。其作用机制可以概况为：城市在可持续性发展过程中始终承受着气候变化与环境资源约束等持续性压力，面临着

各类突发性极端灾害扰动。绿色空间对城市韧性的作用，体现在全周期过程中具备的常态压力缓解和应急扰动适应能力。其中，常态效益是指绿色空间在“灰犀牛”式的长期压力中发挥的缓解作用，主要表现为气候变化减缓、环境、社会、经济等方面绩效，是城市可持续发展的基本保障。应急响应能力是指在小概率、高风险的“黑天鹅”事件中绿色空间对维护城市基本安全的贡献，包括对洪水、暴雨等自然灾害的缓解和适应。绿色空间的全周期韧性响应可视为一系列循环过程（图1）：（1）在演进中缓解持续性压力；（2）吸收抵御极端扰动；（3）从急性扰动中适应恢复到原状态或学习转变到新状态；（4）继续在演进中缓慢性压力，更具韧性的绿色空间能够在压力和扰动中驱动正向演进以达到更佳可持续性状态。

2 国内城市绿地应对气候变化的现状问题识别

近年来，全国城市绿地规模与质量不断提升，降碳增汇潜力巨大。截至2020年

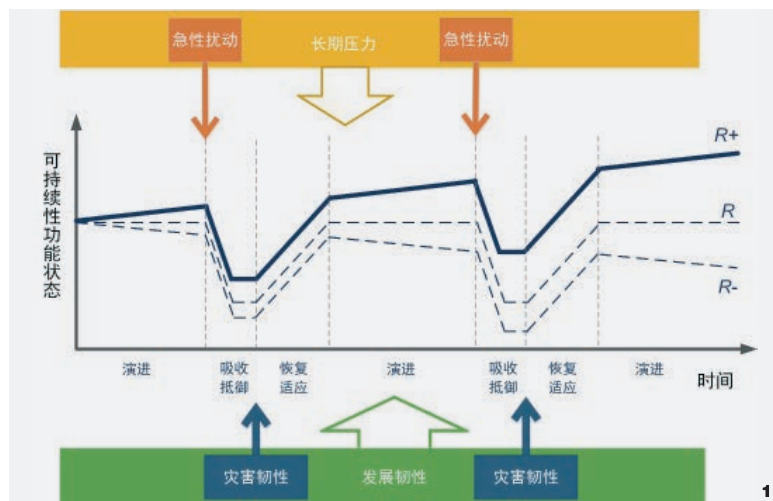


图1 应对不确定性扰动的韧性作用模式
Fig. 1 A resilience model responding to uncertain disturbances

底，城市绿地面积为 $331.2\times10^4\text{ hm}^{2[14]}$ ，到2025年，全国城市建成区绿地率将从2020年的38.24%提升到40%，城市绿地面积预计将超过 $341\times10^4\text{ hm}^{2[15]}$ 。据相关文件，成都公园城市建设使得生态系统年固碳量超过 $200\times10^4\text{ t}^{[16]}$ ，北京2025年森林覆盖率可达45%，全市林地绿地年碳汇量将增加到 $1\,000\times10^4\text{ t}^{[17]}$ 。目前国内城市园林绿化废弃物每年产生量约 $4\,000\times10^4\text{ t}$ ，是城市生活垃圾量的15%，园林绿化废弃物的生物炭资源化的固碳减排空间较大。

对标国内双碳战略需求和气候变化响应，高质量发展城市绿地还存在一些不足，主要有以下几点关键问题：

（1）城市绿地直接碳汇能力有限。与城市当前总排放量相比，城市绿地碳储量与年固定量较小。国内外代表性城市年均碳抵消比例仅在0.27% ~ 2.37%（表1）。研究团队先期研究成果显示，2012年深圳城市绿色空间系统（森林、绿地、红树林）土壤与植被的总碳储量为 $702.9\times10^4\text{ t}$ ，年均碳固定量（ $17\times10^4\text{ t}$ ），仅占深圳当年碳排放总量的0.57%。国内城市绿地已占到城市建设用地1/3以上，扩绿增量空间有限。各城市绿色空间碳储量基数相对固定，如何在存量绿色空间

提质增效中提高碳汇效率和潜力是未来重点。

（2）城市绿地碳汇量摸底不清。城市绿地碳汇计算缺少基础数据，绿地相关统计年鉴中仅统计城市绿地面积、建成区覆盖率及人均绿地面积等，很难反映绿地具体植物种类、群落结构，无法准确支撑绿地碳汇核算^[27]。城市绿地具有高度异质性、多样性、复杂性等特征，城市绿地碳汇核算方法不明确，目前林业碳汇方法不适用于城市绿地碳汇核算。

（3）绿地的间接减排能力不容忽视。间接减排主要是指绿地对城市降温产生的节能减排效益。据美国研究表明，城市树木降温作用的年减排量可能是其年固碳量的0.3 ~ 4倍。Sacramento市不同排放因子条件下城市树木的年减排量与其年固碳量比值可为1：3至1：1^[28]。有研究预测 1×10^8 棵城市树木未来50年间的碳减排量（ $2.86\times10^8\text{ t}$ ）可达其碳储量（ $0.77\times10^8\text{ t}$ ）的4倍左右^[29]。

（4）绿地全周期的降碳减排需引起重视。在原材料获取、运输、建设与养护过程中的化石能源消耗会产生大量碳排放，有研究表明绿色空间在生命周期过程中（30年）产生的碳排放量可占总固碳量的9.7% ~ 17.4%^[30]，另有研究指出大多数城市绿地中的乔灌木在

10年后才逐渐从碳源转为碳汇，而草坪一直为碳源^[31]。运营不当的绿化养护管理可能会释放土壤或植物中的CO₂。美国芝加哥有研究表明由于景观养护和分解作用，每年大约有58% ~ 65%的碳吸收被释放回大气。因为修剪，树木和灌木每年损失15%的碳汇，草地因割草的碳释放是碳吸收的1.5倍^[32]。

（5）绿地生态韧性能力不足。从国际经验来看，绿色空间设计的资源错配会导致多绩效目标间的权衡冲突或造成生态系统反服务（Ecological Disservices），不利于发挥生态韧性效益^[33-35]。当前的绿地景观以静态化控制设计为主导方法，不利于自然系统发挥自我调节机制，削弱了应对不确定扰动的能力^[36]，一旦设计配置不当不仅会降低生态韧性，甚至造成环境负担^[33,37]。

3 基于自然解决方案的绿色空间韧性—减碳—增汇协同范式与设计策略

3.1 绿色空间基于自然解决方案的范式创新必要性

近年来，在欧盟、IUCN和世界银行等国际组织的推动下，基于自然的解决方案成为应对气候变化和增强韧性的有效框架^[38-40]。其强调通过保护、管理或新建生态系统，辅助并利用自然生命体发挥功能，以成本效益最佳的适应性方式有效应对复杂社会挑战^[38-39]。该理念逐渐得到国内重视，2020年作为指导原则纳入财政部、自然资源部、生态环境部联合发布的《山水林田湖草生态保护修复工程指南（试行）》。

城市绿色空间是基于自然的解决方案在城市尺度下的主要结构性措施，强调通过保护、修复和管理城市生态系统帮助提升城市韧性能力。基于自然解决方案导向的绿色空间设计亟需方法创新。长期以来，绿色空间

表1 国内外代表性城市绿色空间年均碳抵消比例

Tab.1 Annual average carbon offset ratio of representative cities at home and abroad

城市 City	碳排放/（10 ⁴ t/a） Carbon emissions	碳固定/（10 ⁴ t/a） Carbon sequestration in urban green space	碳抵消比重/% Carbon offset proportion
深圳	2 998.44 （2012） ^[18-19]	17.00 （2012）	0.57
上海	19 470.99 （2016） ^[18-19]	59.42 （2016） ^[20]	0.31
广州	8 744.50 （2005-2010） ^[18-19]	65.87 （2005-2010） ^[21]	0.75
北京	9 212.05 （2005） ^[18-19]	63.05 （2005） ^[22]	0.68
杭州	5 606.49 （2011） ^[18-19]	132.82 （2010） ^[23]	2.37
纽约	1 422.82 （2008） ^[24]	3.84 （2002） ^[25]	0.27
芝加哥	987.27 （2005） ^[26]	4.01 （2002） ^[25]	0.41

注：深圳市、上海市碳固定核算范围为城市绿地生态系统碳汇，其余城市碳固定核算范围为城市森林地上部分碳汇；同一城市碳排放及碳固定数据选用相同或相近年份统计值或同时期年均值。

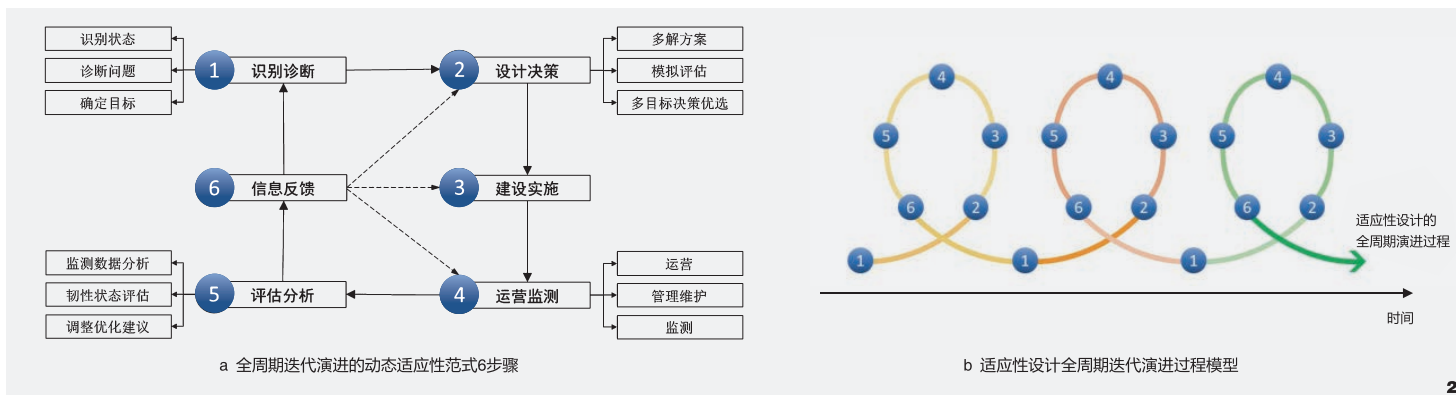


图2 适应性设计全周期迭代演进的步骤和过程模型
Fig. 2 A life cycle process model for adaptive design

以确定性工程控制式设计为主导方法，缺乏生态系统资源管理方法的融合介入，不符合基于自然解决方案的要求。其一，绿色空间不同于城市建筑空间，生命体自身复杂的自适应性和自组织性是绿色空间系统吸收、适应和学习外部扰动的前提。基于自然的解决方案强调通过动态适应性的全过程管理促进自然演进、辅助自然做功来应对不确定性挑战，而目前静态化控制性方法会削弱景观系统的韧性能力。其二，基于自然的解决方案是涵盖设计和管理的整合性途径，自然系统的减碳增汇需要全过程监测、评估、反馈和调整，以往绿色空间仅强调终极蓝图式“确定解”，缺乏对生态资源的动态管理和迭代优化。因此，绿色空间设计需要从生态系统管理中借鉴符合基于自然解决方案理念的有效方法，创新设计范式，实现最优化、动态化、精细化资源调控。

3.2 协同韧性—减碳—增汇的动态适应性范式

适应性管理是基于自然的解决方案的主要方法。该方法由Holling在1978年首次提出，旨在通过动态调控促进生态系统自调节、自

适应与自组织能力，有效应对生态系统内在复杂性、不可预测性和不确定性^[41]，规避基于控制论和静态平衡原理的传统生态管理方法的缺陷。21世纪以来，适应性管理开始用于利用自然系统响应气候变化等外部不确定性扰动。基于自然的解决方案中发展了适应性管理方法，世界银行借鉴CEDA的方法提出计划、设计、实施、监测、评估、适应调整的6步循环过程模型^[42]，Raymond提出以监测评估为中心的循环式NBS评估框架^[43]，Nesshover以平衡环境、社会、经济为目标构建整合多领域的NBS设计实施动态过程框架^[44]。

随着城市面临的气候灾害风险加剧，绿色空间适应性探索逐步增多，但仍缺乏有效方法范式。目前以气候灾害应对为主要目标的实践探索多以确定性的静态成果来适应扰动，欠缺在变化中学习演进和动态修正，也欠缺对缓解气候变化和减碳增汇的协同^[45-47]。针对这些不足，动态适应性方法成为前沿热点，强调将不确定性扰动和变化作为促进创新的机会^[48]。理论研究方面，Kato和Aherm针对景观规划提出不同于传统线型过程的“边学边做”（learning by doing）的优化循环模式，将不确定性作为学习创新的机会，通过及时

的监测评估促进修正调整^[49]。Aherm发展用于实验型设计的适应性途径，包括设定目标计划、优选目标、设计实验、确定测量指标、监测评估和应用成果方案^[50]。在实践方面，美国旧金山湾盐沼修复、纽约新生命公园、瑞士艾尔河修复、中国西沙鸭岛等案例中探索应用动态适应性方法^[51-53]。这些动态适应性研究尚处于初步探索阶段，有待更多范式研究完善理论共识，也需更多实证案例检验其有效性。

本文提出全周期迭代演进的动态适应性范式，具有三点特征：一是强调过程管理和动态优化，而非结果控制；二是强调全过程监测评估，实时反馈；三是强调迭代循环和学习演进，而非线性过程。每个循环周期分6个步骤（图2-a）：

（1）识别城市应对气候变化的风险性，对场地进行评估诊断，设定绿色空间气候响应的初始目标。（2）设计决策：针对问题和初始目标提出绿色空间规划或设计的多解方案，并对各方案进行模拟评估，通过多目标决策方法进行综合决策优选。（3）建设实施：建设实施优选方案，制定绿地空间的运营管理和监测计划。（4）运营监测：建成后

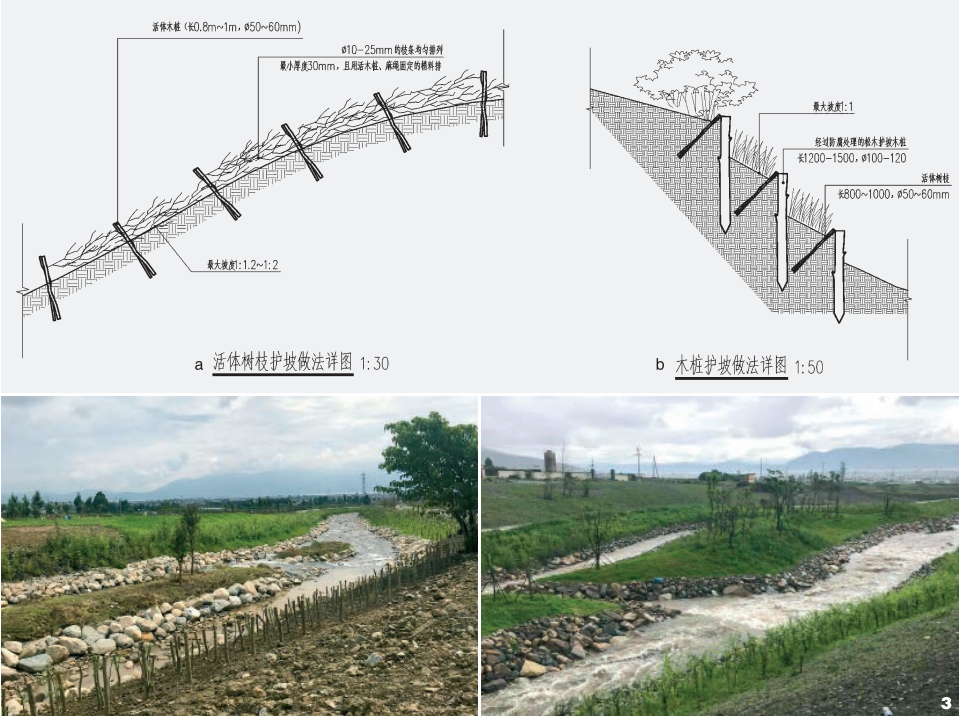


图3 有生命材料构成的生物型护岸
Fig. 3 Biological bank protection of living materials

运营管理, 同时持续开展监测。监测内容为绿色空间应对气候变化的适应能力, 具体包括: 绿色空间或场地发展韧性所涉及的气候变化减缓增汇减排能力, 灾害韧性所涉及的长期气候变化适应能力、突发灾害事件应对能力等。(5) 评估分析: 对监测数据进行分析, 及时评估绿色空间或场地的韧性—降碳协同绩效和生态系统服务, 制定促进适应性演进的资源配置优化建议。持续监测评估是适应性设计中最重要的一环, 决定适应性循环中动态优化调整的及时性与有效性。(6) 信息反馈: 将评估信息与建议反馈, 重新进行识别诊断和目标, 重启新一轮周期。也可将优化信息直接反馈至规划、设计、实施或运营阶段进行简易调整优化。

以上6步骤在时间维度上循环迭代形成绿色空间应对气候变化全周期过程管理(图

2-b)。与线性过程不同, 绿色空间系统在循环中得以不断学习演进, 实现动态优化的韧性提升和全周期增汇减排, 从而更为有效协同地应对各类扰动和压力, 趋近可持续性状态。此概念模型尚为理论探索, 未来需要通过更多完整的实例设计应用进行检验、修正和完善。

3.3 原则性策略

3.3.1 基于自然原则

城市绿色空间是为城市居民提供自然服务的绿色基础设施, 基于自然设计尤为重要。具有三层含义: (1) 以自然恢复为主, 尽可能利用自然生命要素的自适应性增强整体系统韧性。包括使用有生命的材料或可供生命有机体生长的技术措施(图3), 如活体柳条树桩、生物性护岸、潜表流湿地、雨水

花园、可呼吸生态墙、绿色屋顶等。(2) 亲自然性, 指尽可能为人们创造接触、体验和感知自然的机会, 满足人们亲近自然的天性。包括利用和借鉴自然的物质要素(阳光、水、风等)、材料、形式、状态等。(3) 近自然方法可提升生物多样性, 能够促进景观系统在胁迫和干扰中更具耐受力, 这是绿色空间发挥生态系统服务、发挥生态韧性的基础。

3.3.2 动态演进原则

在变化和扰动中动态学习演进是城市绿色空间作为自然解决方案的韧性能力体现。通过全过程的动态管理可以促进绿色空间的学习演进, 更好地辅助和引导自然做功, 将外界扰动转化为创新机会。设计建构是引导自然力的“舞台”, 而非不可改变的确定性结果; 自然扰动也不再是不利因素, 而是促进动态演进的机会。人与自然力量共同作用, 逐渐塑造景观。

3.3.3 固碳增汇原则

通过设计配置与管理养护方法促进生态系统固碳增汇能力, 主要包括植物、土壤的固碳增汇。植物增汇主要通过促进生态系统恢复、增加植被面积、合理配置群落物种等生境和植被恢复措施, 构建高生物量、高碳汇型和高稳定性的植被群落, 增加植被光合碳吸收和固定。土壤固碳主要是抑制土壤有机碳矿化分解, 提高土壤/沉积物碳封存能力, 减少土壤CO₂排放。

3.3.4 降碳减排原则

在绿地的原材料获取、运输、建设、运营维护的全周期过程中的减排降碳十分重要。主要有减量化和去碳化两方面实现近零碳或零碳排放。(1) 减少化石能源使用量, 降低

资源消耗，提升资源循环再生。绿地建设、维护管理过程中能源资源的减量与循环是源头减碳的关键，也是提高资源能源使用效率的重要途径。(2) 能源的无碳化替代，尽可能用太阳能、风能、绿色电能等非碳能源替代化石能源，减少非必要的化石能源消费。

3.3.5 刚柔并济原则

刚柔并济原则是指刚性防御和柔性吸收并举，在整体适应性中创造局部确定性空间。柔性自然是持续演进、适应扰动的基

3.3.6 弹性兼容原则

弹性兼容是指绿色空间应能够兼容多种时态的不同需求和功能。在常态下，城市绿色空间可提供多种生态服务，兼顾经济、社会和环境效益；在应急响应中，绿色空间不仅可减缓、吸收和消纳洪水等自然过程扰动，还可作为地震、疾病等突发灾害的应急避难及救援空间。如深圳四马岭河道生态修复(图5)，通过协同设计兼顾常态服务与应急响应。日本的城市公园中均配有完善的应急救援设施，成为兼顾防灾避灾与日常休闲的典范。

3.3.7 成本效益原则

低成本、高效益是基于自然解决方案的最大优势。首先，低成本、节约型绿色空间建设是前提。更多使用自然有生命技术材料比人工建材更具成本效益优势。其次，绿地



图4 杭州江洋畈生态公园(左)和哈尔滨群力湿地(右)将刚性防洪和生态驳岸相结合
Fig. 4 Hangzhou Jiangyangqi Ecological Park and Harbin Qunli Wetland combine rigid flood control with ecological barges

图5 深圳四马岭河道生态修复的协同设计兼顾常态服务与应急响应
Fig. 5 The collaborative design of ecological restoration of Simaling River takes into account normal services and emergency response

应是生产者而非消费者，主要体现在两方面：(1) 绿色空间应提供丰富多样的生态服务和生态产品，如利用湿地净化尾水，提升水环境质量，供给再生水资源。(2) 适度增强绿地生产性，如欧洲、英美及日本的份地花园或社区花园。

4 实证案例分析

以陕西渭柳湿地设计(图6)为例说明动态适应性范式的应用。该设计以促进动态演进为前提，按照动态适应性6步骤实现了

整体景观在生命周期中学习和演进。首先，对场地进行定量与定性相结合的问题分析和诊断，随后将问题具体化、目标指标化；其次，由各专业工程师对各目标分解进行技术论证，并提出可比选的技术方案；通过空间设计统筹各专项技术，提出绿色基础设施的综合设计方案并开展实施。最后，在2017年5月工程竣工后，持续两年开展后续监测评估，分别对环境、社会、经济效益的达标情况进行检验，评估结果反馈用于方案的进一步修正与工程改造。此项目成为应



图6 陕西渭柳湿地从2017-2018年通过模拟本土湿地群落实现自然学习演进
Fig. 6 The evolution of natural learning in the Weiliu Wetland realizes natural learning by simulating native wetland communities

对气候变化的全球示范案例，获得2020年IFLA亚太中东区杰出奖、2021年德国设计奖金奖、2019年美国建筑大师奖（AMP）等国际荣誉。

渭柳湿地韧性修复案例较完整地体现了原则性策略。（1）基于自然原则与动态演进原则：利用原状自然条件修复生物栖息地，保留滩地原有旱柳和楝树，补植柿树、樱桃、杏树等乡土乔灌木以吸引鸟类，利用芦苇、荷花、芦竹、菖蒲等乡土水生植物修复和营造水生动物及水禽的繁衍、觅食和庇护场所，引导自然动态演进。建成两年后，自然系统自适应优化演进，其中生物多样性Shannon-Wiener指数方面，草本群落提升至1.57~1.91，乔木群落提升至2.11~2.33^[47]。（2）弹性兼容和刚柔并济原则：在适应性防洪体系构建方面，通过对易淹没泛洪浅滩补植芦苇、菖蒲，进行保护修复，增强在泛洪时缓

冲能力；通过扦插活体木桩（柳枝）结合抛石的方式对原有土堤进行填筑改造，形成应对10年一遇洪水的第一道生态护堤；采用抛石的方式对原控导工程加固改造，形成抵御20年一遇洪水的第二道护堤，有效保护高阶休闲公园区的相对安全。公园在日常情况下提供不同层次的自然休闲体验，在极端时可充分韧性应对洪水，如2018年7月10日渭河发生近30年第二大洪水（流量达4 210 m³/s），场地以适应性方式有效应对并快速恢复。（3）固碳增汇与降碳减排原则：场地中合理配置群落物种，种植乡土乔木，有效提高生物量和碳汇能力，在原材料获取、运输、建设、运营维护全过程中以能源和资源低消耗为导向。（4）成本效益原则：渭柳湿地公园建成后开展环境监测和绩效评估。工程建设成本仅为当地同类型滨河公园的1/3。环境效益上，水质较建设前分别实现COD削减89.6%、

氨氮削减98.4%、总磷削减96.6%，总氮削减79.6%，废水资源化再生240万m³/年。社会效益上，场地从荒滩变为具有丰富自然体验的公园。通过462份有效使用者问卷调查显示，公园建成后市民总体满意度达到94%。

5 结论与展望

党的二十大报告提出，促进人与自然和谐共生是中国式现代化的本质要求。风景园林自古秉承天人合一的核心理念，在新时代新征程中，如何基于自然理念协同提升绿色空间的减碳、增汇与韧性能力，是未来高质量推进城市绿色空间建设的关键任务。本文总结了国内绿地建设在气候应对方面的现状问题，提出设计、建设、运营的全周期过程应遵循的协同范式和6步骤动态适应性设计方法，归纳基于自然、固碳增汇、降碳减排、动态演进、刚柔并济、弹性兼容、成本效益

的7项原则性策略,以渭柳湿地案例实证分析表明范式方法的可行性。

未来,国内城市建设模式将发生三方面变化:一是城市发展模式从增量扩张到存量提升的转变;二是城市建设方式由刚性向韧性的转变;三是城市空间运行管理模式(建筑、交通、用地等)由高碳排放到近零碳的转变。应对新形势,国内城市绿色空间建设将有以下三方面重点工作:

(1) 加强基础数据支撑,推进存量提质增效。建立科学合理的城市绿地碳汇计算方法,摸清碳汇家底和韧性能力。在新一轮国土空间规划确定“三区三线”的基础上,存量空间的提质增效成为城市绿色空间建设的首要任务。强化自然修复为主,减少过度人工干预,利用自然的学习演进能力,在城市更新中增强绿地减碳能力和韧性水平。

(2) 改进规划建设方法,强化气候指标引导。将响应气候变化理念融入绿地规划、建设、管理全过程,在绿地系统规划中增加气候响应指标,保证绿色空间跨尺度发挥韧性、增汇、减排作用。如在城市群尺度协同推进大型生态廊道建设,在城市尺度加强绿色廊道、绿楔、绿心建设,在街区尺度促进绿色空间均衡布局、结构完整、连接畅通。

(3) 建立生命周期精细化管理,协同提升降碳韧性能力。运用人工智能、大数据技术,加强绿地在规划、设计、施工、养护管理全过程的精细化、动态化管理水平,促进减碳韧性协同增效。推广节能环保、可循环再生的新技术、新材料、新产品,推广清洁能源应用,研发绿地土壤改良与固碳技术,推动园林绿化垃圾源头分类和减量,提高绿化废弃物生物质资源化水平,探索在堆肥回用、生物肥料、有机覆盖物、土壤基质改良、园路铺装等领域的应用。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). Sixth Assessment Report,AR6[R]. 2022. <https://www.ipcc.ch/>
- [2] LUAN B DING R, WANG X, et al. Exploration of Resilient Design Paradigm of Urban Green Infrastructure[J/OL]. Landscape Architecture Frontiers, 2020, 8(6): 94-105. <https://doi.org/10.15302/J-LAF-0-030001>
- [3] 彭震伟, 颜文涛, 王云才, 等. 海岸城市的韧性城市建设: 美国纽约提升城市韧性的探索[J]. 人类居住, 2018, 02: 58-61.
- [4] M, ORRU K, HEIDRICH O, et al. Mitigating and Adapting to Climate Change: Multi-functional and Multi-scale Assessment of Green Urban Infrastructure[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2014, 146: 107-115.
- [5] LAFORTEZZA R, CHEN J, VAN DEN BOSCH C et al. Nature-based Solutions for Resilient Landscapes and Cities[J/OL]. Environmental Research, 2018, 165: 431-441.
- [6] DEMUZERE M, ORRU K, HEIDRICH O et al. Mitigating and Adapting to Climate Change: Multi-functional and Multi-scale Assessment of Green Urban Infrastructure[J/OL].Journal of Environmental Management, 2014, 146: 107-115.
- [7] DAVIS A P, HUNT W F, TRAVER R G, et al. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(3): 109-117.
- [8] CAMERON R W F, BLANUSA T, TAYLOR J E, et al. The Domestic Garden-its Contribution to Urban Green Infrastructure[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2012, 11(2): 129-137.
- [9] BOWLER D E, BUYUNG-Ali L, KNIGHT T M, et al. Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence[J/OL]. Landscape and Urban Planning, 2010, 97(3): 147-155.
- [10] HAINES-YOUNG R, POTSCHEIN M. The Links Between Biodiversity, Ecosystem Services and Human Well-being[M]//RAFFAELLI D G, CHRISTOPHER L J F, eds. Ecosystem Ecology: A New Synthesis. Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 110-139.
- [11] POUYAT R V, YESILONIS I D, NOWAK D J. Carbon Storage by Urban Soils in the United States[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1566-1575.
- [12] CHENG C Y, CHEUNG K K S, CHU L M. Thermal Performance of a Vegetated Cladding System on Facade Walls[J/OL]. Building and Environment, 2010, 45(8): 1779-1787. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.005>
- [13] AKBARI H. Shade Trees Reduce Building Energy Use and CO₂ Emissions from Power Plants[J/OL]. Environmental Pollution, 2002, 116(S1): 119-126. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00264-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00264-0)
- [14] 国家统计局. 中国城市建设统计年鉴-2021年[M]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- [15] 住房和城乡建设部, 国家发展改革委. “十四五”全国城市基础设施建设规划[R]. 北京: 住房和城乡建设部, 2022.
- [16] 成都市人民政府. 成都市绿色低碳发展报告(2020)[R]. 成都: 成都市人民政府, 2021.
- [17] 北京市园林绿化局. 关于“十四五”时期北京市园林绿化行业落实“双碳”目标的工作指导意见[R]. 北京: 北京市园林绿化局, 2022.
- [18] SHAN Y, GUAN Y, HANG Y, et al. City-level Emission Peak and Drivers in China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(18): 1910-1920.
- [19] SHAN Y, GUAN D, LIU J, et al. Methodology and Applications of City Level CO₂ Emission Accounts in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 1215-1225.
- [20] 韩玉洁, 孙文, 张文文. 基于分布式测算方法的上海市城市森林生态系统服务功能评估[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2019(02): 147-155.
- [21] 周健, 肖荣波, 庄长伟, 等. 城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5865-5873.
- [22] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京市森林碳储量及其动态变化[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 117-120.
- [23] ZHAO M, KONG Z, ESCOBEDO F J, et al. Impacts of Urban Forests on Offsetting Carbon Emissions from Industrial Energy Use in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(4): 807-813.
- [24] Inventory of New York City Greenhouse Gas Emissions[M]. DIANE Publishing, 2007.
- [25] NOWAK D J, CRANE D E. Carbon Storage and Sequestration by Urban Trees in the USA[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 381-389.
- [26] City of Chicago. Chicago Climate Action Plan[R]. Chicago, 2008.
- [27] 朱凯, 张倩倩, 武鹏飞, 等. 城市绿地碳汇核算方法及其研究进展[J]. 陕西林业科技, 2015(4): 34-39.
- [28] MCPHERSON E G. Atmospheric Carbon Dioxide Reduction by Sacramento's Urban Forest[J]. Journal of Arboriculture. 1998, 24(4): 215-223.

- [29] NOWAK D J. Atmospheric Carbon Reduction by Urban Trees[J]. Journal of Environmental Management, 1993, 37(3): 207-217.
- [30] 栾博. 城市绿色基础设施多维度协同效应研究[D]. 北京: 北京大学, 2019.
- [31] 张颖. 基于生命周期法的城市绿地优势种碳收支研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2022.
- [32] JO H K, MCPHERSON G E. Carbon Storage and Flux in Urban Residential Greenspace[J]. Journal of Environmental Management, 1995, 45(2): 109-133.
- [33] VON DÖHREN P, HAASE D. Ecosystem Disservices Research: A Review of the State of the Art with a Focus on Cities [J/OL]. Ecological Indicators, 2015, 52: 490-497.
- [34] DOBBS C, ESCOBEDO F J, ZIPPERER W C. A Framework for Developing Urban Forest Ecosystem Services and Goods Indicators[J/OL]. Landscape and Urban Planning, 2011,99(3-4): 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.11.004>.
- [35] SCHAUBROECK T. Nature-based Solutions: Sustainable? [J/OL]. Nature, 2017, 543(7645): 315-315. <https://doi:10.1038/543315c>
- [36] AHERN J. Urban Landscape Sustainability and Resilience: the Promise and Challenges of Integrating Ecology with Urban Planning and Design[J/OL]. Landscape Ecology, 2012, 28(6): 1203-1212.
- [37] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展[J/OL]. 生态学报, 2017(15): 5246-5261.
- [38] EUROPEAN COMMISSION. Towards an EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-based Solutions & Re-naturing Cities[R/OL]. Brussels: European Commission, 2015: 4.
- [39] COHEN-SHACHAM E, WALTERS G, JANZEN C, et al. Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges. Gland[M/OL], 2016.
- [40] BROWDER G, OZMENT S, REHBERGER BESCOS I, et al. Integrating Green and Gray: Creating Next Generation Infrastructure[M]. Washington, DC: World Bank and World Resources Institute, 2019.
- [41] HOLLING C S. Adaptive Environmental Assessment and Management[R]. International Institute for Applied Systems Analysis, 1978.
- [42] WORLD BANK. Implementing Nature-based Flood Protection: Principles and Implementation Guidance[M]. Washington, DC: World Bank, 2017.
- [43] RAYMOND C M, FRANTZESKAKI N, KABISCH N, et al. A Framework for Assessing and Implementing the Co-benefits of Nature-based Solutions in Urban Areas[J/OL]. Environmental Science & Policy, 2017, 77: 15-24.
- [44] NESSHOVER C, ASSMUTH T, IRVINE K N, et al. The Science, Policy and Practice of Nature-based Solutions: An Interdisciplinary Perspective [J/OL]. Science Total Environment, 2017, 579: 1215-1227.
- [45] 朱黎青, 彭菲, 高翹. 气候变化适应性与韧性城市视角下的滨水绿地设计——以美国哈德逊市南湾公园设计研究为例[J/OL]. 中国园林, 2018, 34(04): 41-46.
- [46] 陈崇贤. 河口城市海岸灾害适应性风景园林设计研究[D/OL]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [47] 栾博, 王鑫, 金越廷, 等. 场地尺度绿色基础设施的协同设计——以咸阳渭柳湿地公园生态修复设计为例[J]. 景观设计学, 2017(05): 26-43.
- [48] CHAPIN F S III, CARPENTER S R, KOFINAS G P, et al. Ecosystem Stewardship: Sustainability Strategies for a Rapidly Changing Planet[J/OL]. Trends in Ecology and Evolution, 2010, 25:241–249.
- [49] KATO S, AHERN J. ‘Learning by Doing’: Adaptive Planning as a Strategy to Address Uncertainty in Planning[J/OL]. Journal of Environmental Planning and Management, 2008, 51(4): 543-559.
- [50] AHERN J, CILLIERS S, NIEMELÄ J. The Concept of Ecosystem Services in Adaptive Urban Planning and Design: A Framework for Supporting Innovation[J/OL]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 254-259.
- [51] 李雅. 重建沿海韧性——旧金山湾盐沼修复及其启示[J]. 风景园林, 2020, 27(01): 115-120.
- [52] BAJC K, STOKMAN A. Design for Resilience: Re-Connecting Communities and Environments[J/OL]. Landscape Architecture Frontiers, 2018, 6(4): 14-31.
- [53] 王敏, 彭唤雨, 汪洁琼, 等. 因势而为: 基于自然过程的小型海岛景观韧性构建与动态设计策略[J/OL]. 风景园林, 2017(11): 73-79.