


数字景观

——中国第五届数字景观国际论坛

成玉宁 杨锐 主编

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

主编

副主编

编委会

编委会

数字景观

——中国第五届数字景观国际论坛

成玉宁 杨锐 主编

主办单位：东南大学

支持单位：中国风景园林学会

承办单位：东南大学建筑学院

东南大学出版社

·南京·

图书在版编目(CIP)数据

数字景观：中国第五届数字景观国际论坛 / 成玉宁, 杨锐主编. — 南京：东南大学出版社, 2021.10

ISBN 978-7-5641-9682-0

I. ①数… II. ①成… ②杨… III. ①数字技术—应用—景观设计—文集 IV. ①TU986.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 187481 号

数字景观——中国第五届数字景观国际论坛

SHUZI JINGGUAN——ZHONGGUO DI-WU JIE SHUZI JINGGUAN GUOJI LUNTAN

出版发行：东南大学出版社

社 址：南京市四牌楼 2 号 邮编：210096

出 版 人：江建中

责任编辑：朱震霞

网 址：<http://www.seupress.com>

电子邮箱：press@seupress.com

经 销：全国各地新华书店

印 刷：广东虎彩云印刷有限公司

开 本：889 mm×1 194 mm 1/16

印 张：26.5

字 数：810 千字

版 次：2021 年 10 月第 1 版

印 次：2021 年 10 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 978-7-5641-9682-0

定 价：175.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830

编委会名单

建成环境蓝绿空间耦合发展

主 编:成玉宁 杨 锐

编 委 会(按姓氏笔画排序):

万 敏	王良桂	王 浩	王磐岩	车生泉	田大方
白玉兵	包志毅	兰思仁	朱育帆	朱 玲	刘东生
刘庆华	刘 晖	刘滨谊	许大为	牟 江	孙 喆
杜春兰	李迪华	李炜民	李 雄	苏晓毅	肖建忠
吴桂昌	何志方	张大玉	张延龙	张启翔	张青萍
张 浪	张 斌	陈发棣	陈其兵	邵 健	林广思
金荷仙	周蕴薇	郑文俊	郑晓笛	孟祥彬	赵泽生
赵晓龙	赵 琦	俞 晖	夏宜平	高大伟	高素萍
高 翹	郭青俊	曹 磊	董建文	韩 锋	

主办单位:东南大学建筑学院

教育部高等学校建筑类风景园林学科专业指导分委员会

全国风景园林专业学位研究生指导委员会

国务院学位委员会风景园林学科评议组

中国风景园林学会教育工作委员会

中国风景园林学会信息专业委员会

《中国园林》杂志社

江苏省土木建筑学会

支持单位:中国风景园林学会

承办单位:东南大学建筑学院

绿色与蓝色空间作为建成环境中最主要的两大生态体系,影响

不仅在城市环境中占据一定的份额,彼此之间的关联性也最为密切。

建成环境蓝绿空间耦合发展

十九大以来,生态文明建设成为发展中国特色社会主义的基本方略的重要组成部分,是党中央在全局层面对中国未来社会发展方向的基本判断。保护生态、坚持人与自然和谐共生成为全国各行各业的基本共识。风景园林事业直接贡献国家生态文明建设的方方面面,更聚焦人居环境绿色空间的建设、更新与管控。

城市作为建成环境的代表,是在自然基础上人工组建的人居环境,不仅需要满足人类活动的诉求,同时也受制于自然规律。人类文明经历了数千年的发展,城市功能不断完善的同时规模也在扩大,城市的空间环境也变得日趋复杂;与此同时城市的自然属性正在逐渐逝去,城市与自然渐行渐远。为此,人类花费了大量的人力、物力与财力去重构城市中的第二自然,大量的人工绿地建设具有一定的生态与美化效应,但不可否认的是,人工绿地分布在依据功能秩序建设的城市环境之中,改变了构成要素的自然属性与有机关联。如何保护城市中自然的蓝绿空间、加以人工补缀使其具有类自然的属性与效应,已成为当代必须重新审视的课题。在强调生态文明的今天,反思城市发展的内生动力,研究探讨城市生态系统修复与增效迫在眉睫。在城市存量发展的模式下,建成环境中存在着大量破碎、低质、低效的蓝绿空间,如何通过结构的调整,优化建成环境中各要素及其关系,从而推动建成环境生态系统的高效运行,实现存量时代城市生态环境的提质增效,是建成环境生态系统研究的关键之一。

绿色与蓝色空间作为城建环境中最主要的两大生态体系,它们不仅在城市环境中占据一定的份额,彼此之间的关联性也最为密切。

城市绿地可以涵养水源,但同时也是水资源重要的消耗者之一。将有限的蓝绿空间加以统筹,在建成环境条件下,促进其形态上融合、生态关系优化,已经成为推动城市生态环境提质的抓手,通过统筹建成环境中的蓝绿资源及其空间分布,使之更加高效地协同做功,从而优化和提升既有的环境资源和生态系统质量,满足城乡人居环境高质量发展要求,探索城市生态系统优化的新范式。

本届数字景观大会以“数字技术支持下建成环境蓝绿空间耦合发展”为主题,聚焦存量时代下的建成环境生态系统增效提质,围绕低影响开发下的城市绿地规划、建成环境蓝绿空间可持续发展以及数字景观相关议题展开研讨,以期推动风景园林事业对人居环境生态系统的理论研究与相关实践。

中国第五届数字景观国际论坛

成玉宁

2021.9.9 于江宁

目 录

· 蓝绿耦合发展 ·

城市绿地格局优化模型与算法及其低影响效应·····	成玉宁 王雪原(1)
耦合贝叶斯学习和长期效度分析的低影响开发投资策略·····	王 墨 张 宇 郑颖生 成玉宁(12)
西北干旱半干旱区域城市蓝绿耦合问题及空间机制 ·····	刘 晖 刘 永 许博文 曹 朔 左 翔(23)
城市合流制排水系统雨天溢流对苏州河水质的影响 ——基于在线监测数据的Sen趋势分析·····	车 越 丁 磊 吴阿娜 汤 琳 杨 凯(36)
数字技术支持下的建成区山地海绵系统研究 ——以南京市李家山为例·····	甘 宇 徐雨涵 谢绮宁 沈雨晴 殷 悦 袁畅洋(44)
基于最小累积阻力模型的湿地公园鸟类栖息适宜性评价研究 ——以广州海珠湿地公园为例·····	向碧辉 马佳星(58)
基于城市水景观开发的河流健康分析模型研究 ——以广西百色市右江为例·····	朱 江 靳聪聪 毛 锋(69)
基于水陆两域生态系统服务的国土空间优先保护区识别研究 ——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例·····	魏家星 倪雨淳 张昱镇(76)
基于Xpdrainage模拟的绿地雨水源头调蓄系统定量设计与评估 ——以上海共康绿地为例·····	谢长坤 王哲栋 于冰沁 车生泉(87)
基于文献计量分析的绿色基础设施研究进展·····	李涵璟 王 苗 许 涛 贺玺桦 邵 彤(96)
绿色基础设施生态系统服务价值的结构影响因素分析 ——以浙江省嘉兴市为例·····	刘 頔 谌诺君(106)
蓝绿空间格局对城市降温的影响及其边际效应 ——基于地表温度反演算法·····	王 敏 朱 雯(116)
十堰老城区滨河道景观特征的多维度识别与分类·····	陈照方 王云才(125)
基于代偿调蓄下的海绵城市设计指标响应 ——以西安空港企业总部商务中心为例·····	刘 永 刘 晖(134)
· 生态景观组构 ·	
基于相邻木迭代优化的近自然植物群落设计算法研究·····	刘 喆 唐达维 郑 曦(144)
景园复合式植物群落形态量化研究 ——以杭州城市公园为例·····	樊益扬 成玉宁(152)
基于排放因子法的乡村景观碳系统特征及测度模型研究	

- 以江宁黄龙岷村为例……………李哲 袁福甜 王立亚 朱统一(160)
- 乡村三生景观空间形态演进量化及优化研究……………赵天逸 成玉宁(171)
- 数字技术在我国乡村景观研究与实践的应用进展
……………曾昱璇 何子琦 李欣 章莉 张炜(184)
- 基于恢复性环境理论的绿道空间要素量化研究……………王菁 张清海(193)
- 采煤塌陷地 LIM 地表模拟及景观规划应用
——以山东彭湖音乐小镇规划为例……………郭湧(200)
- 基于 CiteSpace V 的土地利用/土地覆盖变化研究进展……………袁轶男 金云峰 谢子杰(211)
- 科学规划蓝绿空间的树种成分,增强风景园林生态系统韧性
……………张德顺 陈莹莹 孙力 刘鸣 李玲璐 姚鳗卿(219)
- 风景园林信息模型在城市低碳植物景观营造中的应用策略探索
……………王晶懋 刘晖 韩都 齐佳乐 罗宜帆(231)
- 基于行为特征分析的城市公园滨水空间景观规划设计
——以成都浣花溪公园为例……………丁宇辉 王薛 廖红渡 李玉叶 陈佩(237)
- 数字景观进展 ·
- 基于多源数据和权重系数法的城市建筑功能分类方法研究……………陈珏 李艳霞 石邢(244)
- Evaluation of Pavilion's Sitting Preferences and Mental Restorations based on Virtual Reality Scenes:
A Case Study of Urban Parks in Tokyo, Japan
……………Luo Shixian, Shi Jiaying, Lu Tingyu, Furuya Katsunori(253)
- 数字景观技术背景下的遗址公园空间完形研究……………杨静 成玉宁(276)
- 基于手机信令的南京城市公园绿地活力测度与评价……………谭瑛 冯雅茹 朱芯彤(283)
- 基于点云数据的高校老建筑周边景观地形优化设计策略研究……………习羽 成玉宁(294)
- 基于数字足迹视觉感知分析的城市线性文化景观空间价值评估……………周详 刘子玥(302)
- 数字场景营造
——数字媒介艺术在场地尺度历史文化景观中的应用研究……………曹凯中(319)
- 基于注意力理论的虚拟现实复愈性景观对情绪压力缓解作用研究……………魏卓桡 陈翼(325)
- “人工智能”背景下风景园林“图”的方法及应用……………邵继中 刘冠 张雨 张晓思(333)
- 江南私家园林叠山数字化测绘与 3D 打印……………张青萍 董芊里(342)
- 基于神经网络的语义分割技术的城市滨水环境水绿要素提取研究……………刘曦 李辰琦 陈宇(350)
- 基于多元对应分析的我国地质遗迹景观游客关注度等级分类研究……………李发明(358)
- 地质遗迹景观数字化阐释前沿技术评述……………程安祺 杨晨 韩锋(366)
- 多源大数据对城市景观规划设计的支撑……………翟宇佳(375)
- 计算机科学技术介入风景园林规划设计的技术语汇转译框架研究
——以 GIS 系统为例……………岳邦瑞 陆帷仪 丁禹元(382)
- 基于 Landsat 影像的夏热冬冷地区城市绿地冷岛效应年周期变化特征研究……………李峻峰 陆峥妍(389)
- 基于 SD 法的校园非功能多义性空间使用后评价研究
——以华东理工大学奉贤校区 A、B 教学楼为例……………陈嘉会(398)
- SMART OPEN SPACE INVESTIGATION AND OPTIMAL DESIGN STRATEGY IN HANGZHOU
……………Nchimunua Kazimete Kamboni, Rikun Wen, Hexian Jin, Jie Zhao(405)

· 蓝绿耦合发展 ·

城市绿地格局优化模型与算法及其低影响效应

成玉宁 王雪原

摘要 建成环境改变自然降水的时空分布,土地的快速开发加剧了雨洪灾害、绿地缺水等城市环境问题。本文基于低影响理念,探讨提升城市韧性的水绿耦合方法。研究解析绿地格局调控雨洪的机制,提出了水绿规模与分布平衡的逻辑模型,在此基础上搭建水绿分布统调的算法模型,构建“汇水分区与产汇流计算—水绿规模与分布统调—绿地格局优化—植被类型及组合选择—代偿性措施配置”的算法路径,系统优化绿地布局,实现可持续的雨洪调控与降水资源利用。

关键词 绿地格局;雨洪模型;水绿耦合;系统优化;代偿措施

1 引言

近十年来,随着我国城市的快速发展,城市雨洪问题频发,已造成严重灾害,其中2012年7月21日北京及其周边地区,遭遇61年来最强暴雨及洪涝灾害;2021年7月20日,郑州大暴雨来袭,全市多路段积水尤其是地下空间洪涝严重。类似问题远不至于上述两座城市。国际上流行的低影响、韧性、水敏等涉水规划设计理念无一不是基于建成环境的特征而提出。一方面城市的发展不可避免地改变了自然本底,另一方面,建成环境往往由于某一构成要素的瓶颈效应,而导致系统问题频发,譬如大量的地表水经由管网排出城市,从而导致城市地下及土壤出现严重的缺水现象。针对性的“补丁思维”模式在一定程度上可以缓解矛盾,然而为了彻底解决城市雨洪问题,不仅仅需要统筹城市中涉水子系统规划建设,更应从优化城市环境生态系统出发,突出系统协同做工效应,重构低成本、高效益、运行可靠的类自然生态体系。

2 低影响理念下的水绿耦合及其意义

2.1 城市雨洪灾害及其对策

雨洪是指由较大强度的降雨而形成的洪水,

引起江河水量迅速增加并伴随水位急剧上升,以及城市内部快速积涝的现象。雨洪的强度主要取决于暴雨状况,同时也受下垫面条件的约束。城市雨洪灾害的影响远大于自然区域,其中对于城市地下空间的冲击尤为显著,由此产生的灾害和次生灾害其规模与损失甚至会大于地表;此外,雨洪灾害后期处理及恢复,较之于地上通常更为困难。因此,城市雨洪管控重点不仅在于暴雨带来的地表及地下积涝,更在于系统地优化城市下垫面及其构成,增强城市下垫面的滞蓄及调节雨洪的能力。通过绿地的合理布置,实现洪峰延迟效应,对于内涝风险较高、季节性降雨集中的城市较为重要,延迟洪峰的时间能够缓减降水管网系统、湖泊调度系统的管控压力。

2.2 低影响发展提升城市韧性

高密度的城市开发建设大规模地改变了下垫面,连同不合理的排水系统,导致了建成环境普遍存在着非旱即涝的系列次生灾害。传统的低影响开发,是指通过低影响开发技术措施的实施,使开发后城市水文和生态环境得以与开发前相对一致^[1]。近几十年的发展使低影响开发理念与实践不断扩充,以提升城市韧性为前提的低影响开发,强调提升城市所有地表系统的韧性。在雨洪韧性提升方面,综合利用城市中的绿色及灰色基础设施,来应对强降雨带来的对城市正常生活的影响与冲击。

系统提升城市韧性的方法,核心在于通过模

拟自然水文过程,梳理与优化水绿环境,通过解读城市复合生态系统的运行规律及其与客观环境、人类活动之间的相关联系,根据客观规律进行拟自然的规划设计,顺应自然过程并将人工建造的干扰降到最低,实现城市的韧性提升及可持续发展。

2.3 绿地格局与雨洪调控

我国城市建设工作的重心已由“增量”转变为“提质”,通常城市具有30%~40%的绿地率,如何充分发挥城市绿地的综合效应、有效地缓解旱涝矛盾是绿地提质增效工作的重点。绿地作为在城市用地中最主要的渗透型下垫面,可使降水直接进入参与自然的水文循环,具有下渗与储水的海绵效应,其涵养水源、支持生命系统等功能在雨洪调蓄方面具有特殊价值。绿地在城市中的分布与结构对雨洪的调节过程与效率至关重要,因此城市绿地系统格局与降水调控相结合,是生态环境高质量发展的重要组成。我国土地资源稀缺,在有限的城市空间中,合理地规划绿地的结构与分布,选择适宜的规模以及植被类型,对于削减城市雨洪及其次生灾害、节约用水具有重大意义。

2.4 水绿耦合响应多重需求

城市绿地需要消耗大量的水资源,在我国东部每平方米绿地年均需灌溉用水约1.2~1.5吨,进一步加剧了城市用水的负担。建成环境中,硬化的下垫面及灰色系统,一方面加大了地表径流与水资源的流失,同时也割裂了降水与绿地的关联,另一方面大量产汇流也导致了雨洪形成。人为改变的水文过程使得城市旱涝问题愈加突出。

有效地利用降水,包括通过一定的工程技术措施来将强降雨加以收集、缓冲并适度地利用,不仅解决雨洪灾害,同时也极大地解决了绿地对水资源的消费,缓解城市对水资源利用的矛盾与困难。另外,对降水的直接利用、避免过度使用洁净水,也是实现低碳的措施之一。

系统认知城市绿地分布与降水径流、蓄滞、利用的内在关联,通过建立城市地表径流系统与城市绿地系统的匹配关系,均衡并分散地表径流、建立降水资源与植被需求相契合的绿地植被结构,可系统解决城市蓝绿空间生态问题。

3 低影响理念下水绿耦合的逻辑模型

基于低影响理念水绿耦合模型的构建逻辑主要包括四个层级,即“厘清绿地格局调控城市雨洪的机制”“水绿规模与分布平衡的逻辑模型”“水绿分布统调的算法模型”“绿地植被蓄用平衡的测算”,据此建构低影响理念下绿地规划的方法途径、模型框架、技术路线与算法流程。

3.1 绿地格局调控城市雨洪的机制

基于城市绿地的格局优化以实现雨洪的延时、消减与调控是基本的认知逻辑。绿地是城市雨洪承载与消纳的有效空间,合理地调配绿地分布、结构,对于雨洪进程的管控、降水资源的利用、城市生态问题的综合应对有着重要价值。城市绿地与雨洪过程相互作用,二者并不是单向的线性促进或抑制关系,绿地在空间位置、功能类型与覆被结构方面的不同带来渗透、径流、汇集、蓄滞、净化等水文过程的差异,进而影响甚至改变雨洪进程。

解析建成环境中客观的绿地格局对城市雨洪过程影响关系与作用机制,是实现低影响理念下绿地系统规划的基础,进而建立城市水文过程与绿地空间的匹配关系,统调水绿分布,实现降水资源的均衡分配,将洪涝风险转化为可利用的水资源。

3.2 水绿规模与分布平衡的逻辑模型

水绿规模与分布平衡的逻辑模型建构,旨在通过解析降水资源的时空分布特征,来调整绿地的分布与规模,最大限度地实现绿地滞洪与用水的平衡。

水绿平衡首先体现在地域性降水与绿地蓄用水间的数量关系,即水绿规模的耦合。根据地域性城市降水特征调节水绿规模配比,以达到降水与绿地利用或需求的平衡。我国地域广袤,降水呈现地带性与季节性的差异特征,植被对降水的利用需求差异同样显著。因此,不同区域城市的降水决定了植被的类型以及绿地的规模,进而在绿地量一定的情况下,结合城市的地表径流分区及水量分布,通过优化绿地格局实现对降水的就

近吸纳与使用。

水绿的分布平衡是低影响绿地系统格局建立的基本原则。在绿地规模、数量一定的前提下,根据城市竖向特征所形成的汇水区划、产汇流,调整绿地的整体分布与结构,在均好性的原则下优化绿地布局,实现降水的源头控制与资源利用。考虑不同的降雨情景下地表径流的空间分布,匹配相应的绿地分布与规模。日常降雨情景中,径流时间相对较短,径流分配较为均衡。基于不同的下垫面特征计算汇水面积、汇水量,以合理分配和调节绿地的分布与规模;极端降雨情景以应对洪涝风险为核心目标,竖向特征、径流路径与汇水空间识别与组织是实现雨洪控制的关键,建立合理的绿地分布格局、水绿规模配比,尽可能实现降水的层级引导与均衡分配、汇水分区与绿地格局的匹配、旱涝矛盾的缓解与调控。

3.3 水绿分布统调的算法模型

在逻辑模型确定的基础上建立水绿分布统调的算法模型,其核心包含:一是基于地表产汇流效能来匹配绿地规模与分布,通过绿地数量与分布的统筹配置实现降水在建成环境中的合理分配;二是通过代偿性措施辅助建立水与绿的蓄用平衡。

3.3.1 结合地表产汇流,统调绿地规模与分布

实现地表产汇流与绿地分布统调的算法模型需要兼顾两方面:一是绿地的分布与规模与城市降水、产汇流相互匹配,实现地表产汇流与绿地分布的耦合,就近消纳降水,避免产汇流加剧矛盾引发洪涝;二是降水资源的均衡分配,以水定绿、优化绿地分布,为资源化利用降水奠定基础。

水绿分布统调的算法模型首先通过提取城市汇水分区、统计产流总量以及现状绿地的可调蓄水量,作为绿地平衡雨洪的基础并初步形成调配方案;其次基于城市的竖向特征来识别降水在城市的分布格局,基于均衡分配原则,计算绿地的规模与分布;在实现水绿统调的基础上,通过优化绿地连通性、聚集度等,促进绿地的格局特征具有复合的生态效应;据此初步形成绿地的格局,明确绿地的分布与规模、待消纳降水量。在此基础上通过选择适宜的植被类型及组合,并结合灰色基础设施优化城市水文过程,实现绿地与降水的耦合。

3.3.2 代偿性措施辅助水与绿的蓄用平衡

由于下垫面的复杂性以及客观条件限制,水

绿耦合过程,往往还需要辅助一定的代偿性工程措施。首先,通过构建水绿调蓄机制让自然充分做工;其次,当受制于客观条件,可以结合工程措施辅助建立供需及平衡机制,缓解部分蓄滞压力或针对性地满足特殊供水需求。主要包括以下两类:其一,为了提升汇水区内绿地蓄滞能力,如设置下沉式绿地、蓄水装置等,不仅可以增加绿地的蓄滞能力,同时也可以配合需水量大的植被群落;其二,通过管、涵等调节不同汇水区间水量分配,合理调配水资源。首先计算同一汇水区域内的绿地蓄滞能力,其次评价相邻区域的蓄滞潜力,在水绿耦合基础上建立灰色协同代偿机制。

从建设环境的类型来看,新城区可通过生态优先的规划策略,充分优化蓝绿生态格局,实现各汇水分区的蓄滞能力最大化;而对于老城区,绿地增量受到限制,因此可通过水绿统调来优化绿地的分布与结构,同时配合相应的植被类型。当无法通过绿地的增量及结构优化来实现水绿耦合,灰色代偿机制的使用也是老城区改造中不可或缺的方式。

3.4 绿地植被类型与耗水量测算

不同的植被类型对于水资源的需求差异极大,在同一气候带,通常阔叶林远大于针叶林,林相结构复杂的群落大于纯林、灌丛大于草甸……因此,研究绿地持水能力与植被类型的匹配关系、选择植被类型及组合模式,对于水绿蓄用平衡的建立同样有重要的意义。

在明确绿地规模、空间布局的前提下,绿地植被类型决定了对水资源的需求,以及对产汇流过程影响的差异。因此,测算与评价绿地植被的蓄用工况,是选择植被类型及组合模式的基础。基于降水资源供给与植被消耗的匹配,充分考虑植物自身耐淹、耐旱、耐污等性状,结合绿地所处环境和功能定位,选择适宜的植被类型与组合模式,在确保绿地功能的同时,满足植物群落的生长需求。充分发挥不同植被对降水的滞蓄、净化和消费能力,合理用于源头消减、过程控制和末端治理等。

4 水绿耦合的算法模型及其应用

水绿耦合的核心在于实现产汇流与绿地分布

与规模之间的协同,同时辅助不同植被以及工程代偿措施,以实现水绿的融合发展。基于逻辑模型生成算法模型,构建“产汇流量核算—水绿分布统调—绿地结构优化—植被选择组合—代偿设施配置”技术路径。

4.1 汇水分区与产汇流量计算

4.1.1 基于城市竖向特征的汇水分区识别

区别于传统的排水单元划分,水绿耦合在于统调城市绿地布局与水文单元。基于城市的竖向特征,梳理水文过程与汇水区域。由于待建区域以自然地貌为主,应以生态为本、蓝绿统筹先行,因此规划区别于以往城市行政区、街道以及路网的控制单元划分方法,应基于自然特征划分生态管控单元(图1)。

在建成区域,径流通道识别与汇水分区单元划分需要相对准确的地面标高。建立表达真实城市竖向特征的高程模型,是水文模拟与径流识别的关键。结合GIS与civil 3D将与城市水文相关的城市地貌要素分为地块、道路和水系3个大类,将高程赋值于三大类城市地貌要素,形成建成区的数字高程模型(UDEM),作为径流识别的基础^[2]。基于UDEM运用ArcGIS中的水文分析工具依次实现径流识别与汇水分区、单元等划分。

4.1.2 基于下垫面的产流总量计算

(1) 应对不同降水强度的策略

鉴于降水分作常年情景与极端情景两类,常年情景由中小雨以及相对高频次暴雨构成,这些雨量通常达到了年降水量的90%,因此笔者认为基于常年情景作为水绿耦合的基本条件,符合城市特征。根据日常雨强来进行绿地与降水的匹配耦合,最大化发挥其源头促渗的功能,延时洪峰效应。为了应对极端的降水情景,则需要充分发挥蓝、绿、灰三大系统的协同效应,如暴雨期来临时腾空湖泊库容,降低河道水位,甚至于特定时段综合利用、错峰利用城市的地下空间等,形成行洪廊道、滞洪空间,通过时间差来减少雨洪对于城市的冲击。

(2) 不同降水强度的设计取值

在构建绿地网络系统之前,首先需要确定城市的设计雨强与径流控制目标量等。年径流总量控制率与降水重现期有对应关系。采用统计学方法,基于地带性特征确定合理的年径流总量控制率,计算对应的降水强度。选取反映长期的降水规律和近年气候变化的日降水资料,扣除 ≤ 2 mm的降水总量,将降水量日值按雨量由小到大进行排序,统计小于某一降雨量的降雨总量在总降雨量中的比率,到达此比率(即年径流总量控制率)对应的降雨量(日值)即为设计降雨量^[3]。极端情

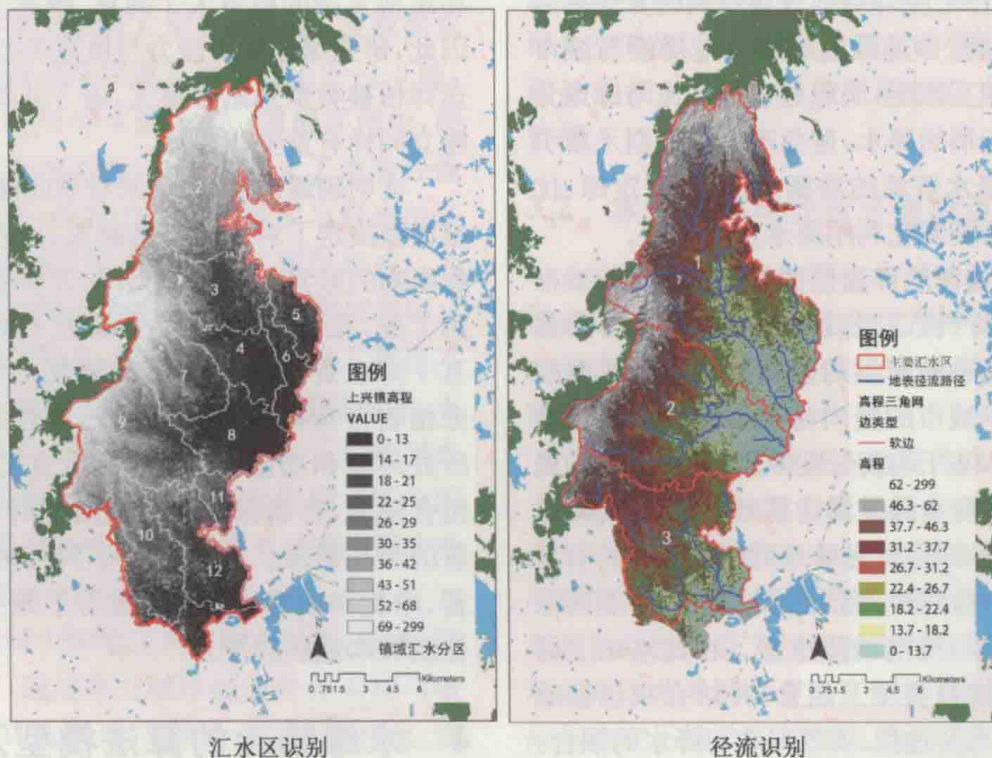


图1 溧阳经济开发区汇水区与径流识别

景可采用暴雨公式法,根据各地的暴雨强度经验公式来计算极端情景下的设计降雨量。

(3) 不同降水情景下的产流计算

产流计算模型主要包括经验模型和试验模拟模型。在区域或城市尺度下,可采用 SCS-CN 模型,其原理为通过下垫面渗透系数的经验统计值估算径流量^[4],以反映下垫面条件对降水产流的影响,用地类型、土壤类型、土壤湿润条件等因素都能通过参数体现在模型中,计算公式如下:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} & P \geq I_a \\ Q = 0 & P < I_a \end{cases}$$

$$I_a = 0.2 S$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

式中: P 为降雨总量; I_a 为初损,主要指截流、表层蓄水、下渗等; Q 为径流量; S 为可能最大滞留量; CN 值由径流系数计算得到。

以下垫面的径流系数为基础,以溧阳经济开发区为例,计算常年情景(36.6 mm)与极端情景(20 a 重现期 231 mm、35 a 重现期 283.8 mm、100 a 重现期 325.6 mm)下的产流量,可进一步应

用于各类分析场景(图 2、图 3)。

4.1.3 绿地的滞蓄水量计算

绿地滞蓄水量是水绿耦合分布统调的基础。绿地的蓄滞水量计算主要包括植被截留、土壤渗透、下凹绿地蓄滞三部分。植被截留计算方面,植物的冠层、根系及地表落叶覆盖物均可实现降水的截留,不同类型绿地的冠层蓄水、壤中流、蒸散发均有差异,使用经验公式及概化模型加以计算;土壤渗透方面,在降水入渗达到土壤饱和,受重力作用继续渗透,可基于降水土壤渗透的重力公式来计算;下凹绿地指竖向形成的洼地,其容水量基于表面模型精细统计各洼地的容量之和。

4.1.4 待消解水量计算

通过增加绿地面积、设置下凹空间、跨单元传输三类方式来消解一定区域范围内的地表径流,其计算方法包括以下。

(1) 绿地容水量的估算

当某汇水单元的产流量大于绿地蓄滞水量时,优先通过在适宜区域增加绿地来消纳富余的地表产流。待消解水量决定了新增绿地的规模。新增绿地的单元蓄滞能力与原有绿地的单元蓄滞能力一致,采用概化模型估算绿地总蓄滞水量。

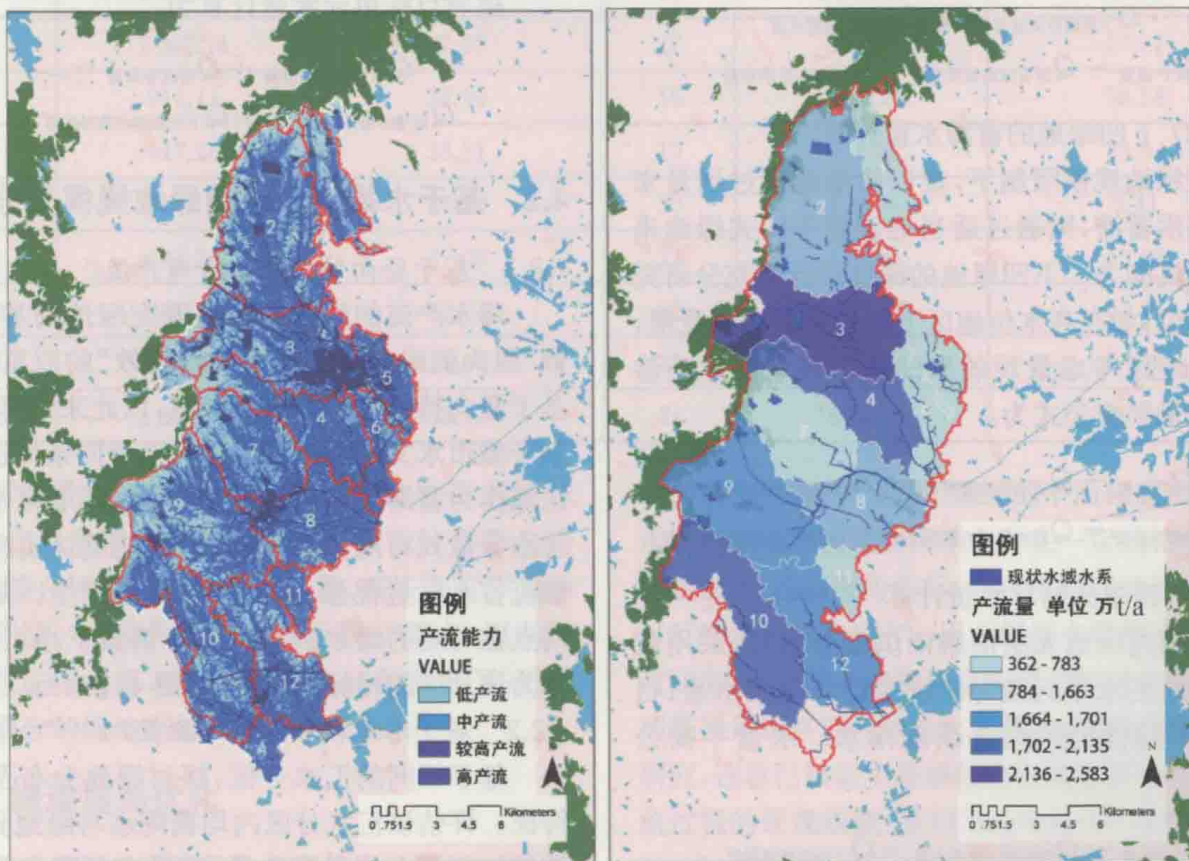


图 2 溧阳经济开发区常年降水情景下的产流计算

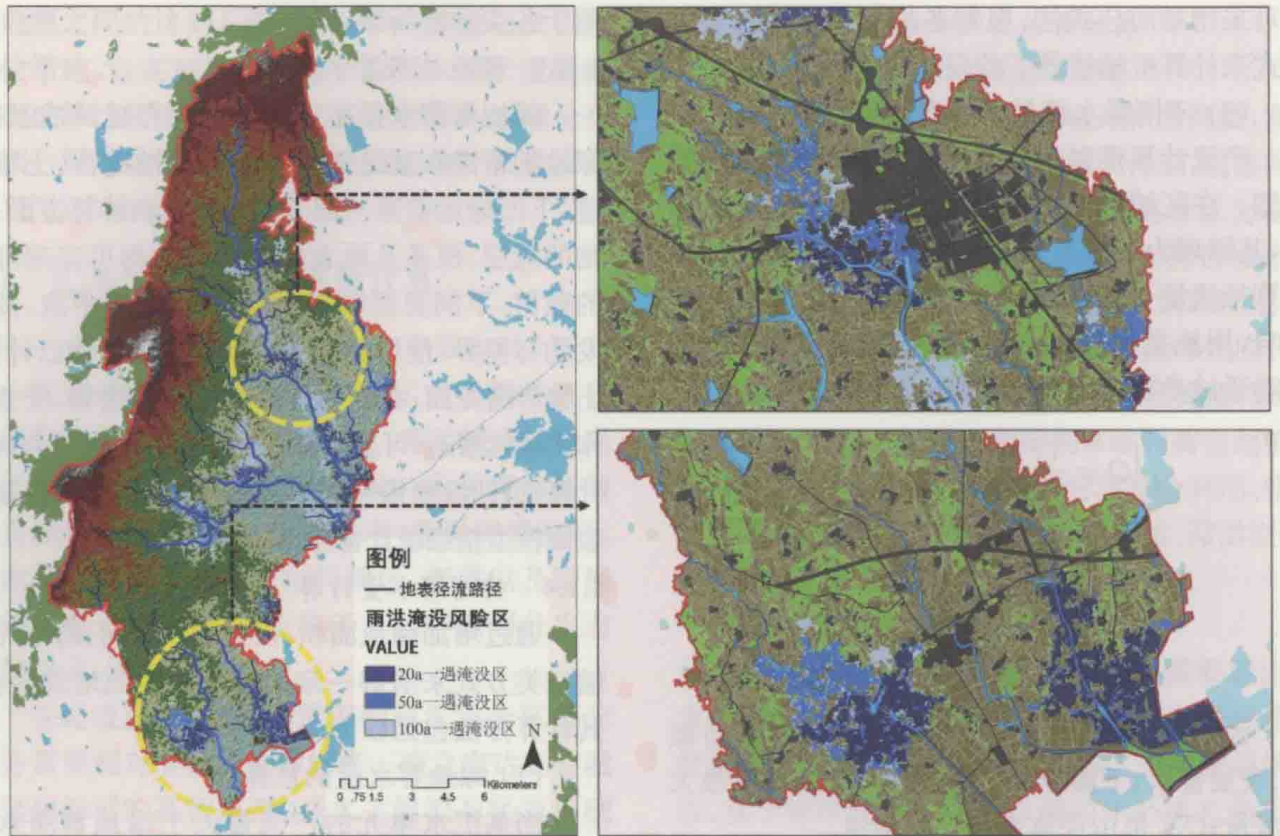


图3 溧阳经济开发区极端降水情景下的淹没范围

水量平衡公式为：

$$Q_{\text{最大规模绿地蓄滞水量}} > Q_{\text{产流量}},$$

$$Q_{\text{下垫面待消解量}} = Q_{\text{新增绿地的蓄滞水量}}$$

$$Q_{\text{产流量}} - Q_{\text{原有绿地蓄滞水量}} = Q_{\text{下垫面待消解量}}$$

(2) 下凹绿地的蓄滞水量计算

在绿地规模限制下,难以简单地通过增量来实现雨洪蓄滞,则通过适当地设置下凹式绿地来增加滞洪能力。下凹绿地的深度设计需充分研究地下水位,如在高水位地区下凹绿地的深度受限,在干旱地区考虑景观效果的同时还应注意防渗漏。水量平衡公式为:

$$Q_{\text{产流量}} - Q_{\text{原有绿地蓄滞水量}} = Q_{\text{下垫面待消解量}}$$

$$Q_{\text{下垫面待消解量}} = Q_{\text{新增绿地的蓄滞水量}} + Q_{\text{下凹绿地的蓄滞库容}}$$

(3) 跨单元转移水量计算

当通过绿地无法消解雨洪富余水量,采用就近原则跨汇水单元疏导。统筹计算富余水量、目标单元可消减量,综合调配雨水。水量平衡公式为:

$$Q_{\text{产流量}} - Q_{\text{原有绿地蓄滞水量}} = Q_{\text{下垫面待消解量}}$$

超出蓄滞能力单元的水量计算为:

$$Q_{\text{下垫面待消解量}} = Q_{\text{新增绿地的蓄滞水量}} +$$

$$Q_{\text{下凹绿地的蓄滞库容}} + Q_{\text{待疏导水量}}$$

疏导目标单元水量计算为:

$$Q_{\text{下垫面待消解量}} + Q_{\text{待疏导水量}} =$$

$$Q_{\text{新增绿地的蓄滞水量}} + Q_{\text{下凹绿地的蓄滞库容}}$$

4.2 基于水绿耦合统调绿地规模与分布

4.2.1 基于竖向特征均衡分布产流

降水产流的均衡分布是调配绿地的基础,兼顾“源头削减水量”“绿地集约高效”的双重目标,基于竖向特征来均衡分配产流,以此来化解矛盾。基于城市水文过程,径流、汇流及竖向条件适合的区域作为蓄滞型绿地,类似的方法,沿着汇水区域采取分散式布局,通过连续的绿地斑块实现分片截流蓄水就近促渗,从而避免洪涝产生。某一倾泻点对应的集水区域内常年情景下净汇水量,作为该片区的目标调节水量(图4,表1)。

4.2.2 基于水绿耦合的绿地配置

基于不同的汇水分区,探讨绿地分布及规模特征。评估该汇水分区内均衡降水与绿地分布在数量与空间上的匹配关系,定量表征降水规模分布与城市绿地规模分布间的匹配程度。通过测度

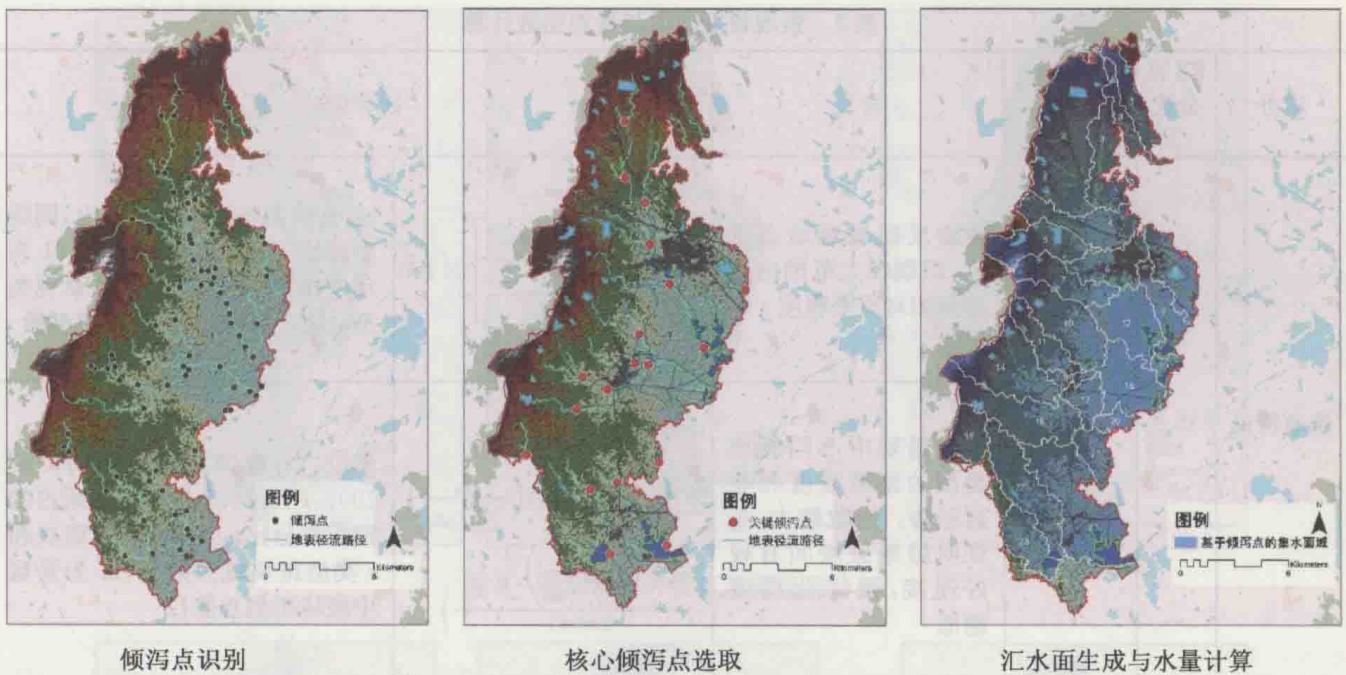


图4 溧阳经济开发区基于竖向特征的水量分配计算

表1 年径流85%截蓄消纳目标下的倾泻点目标调节水量

倾泻点	年径流量/万 m ³	目标调节水量/万 m ³	倾泻点	年径流量/万 m ³	目标调节水量/万 m ³
1	708.40	25.65	13	190.09	6.88
2	2 975.79	107.74	14	1 632.60	59.11
3	1 028.76	37.25	15	239.16	8.66
4	1 180.17	42.73	16	1 208.26	43.75
5	1 048.14	37.95	17	485.22	17.57
6	911.11	32.99	18	1 626.31	58.88
7	917.26	33.21	19	661.07	23.94
8	1 478.12	53.52	20	259.85	9.41
9	748.28	27.09	21	539.40	19.53
10	1 445.40	52.33	22	1 476.11	53.45
11	719.39	26.05	23	2 349.36	85.06
12	1 208.91	43.77	24	811.45	29.38

降水特征量与绿地特征量,揭示汇水分区的水绿关系:评估常年情景的降水蓄存分布计算降水特征量,综合评估绿地的斑块面积、斑块密度作为绿地特征量。根据评价结果分析耦合需求,识别绿地的选址与规模,在绿地总量一定的前提下,形成水绿耦合的绿地布置方案。

4.3 绿地格局优化

传统的绿地系统优化主要是根据服务半径、形态来优化布局,如长期以来通过点、线、面来描述绿

地的结构,实则只反映了绿地的平面构成形式。而水系与绿地在构成的体系上存在一定的相似性,即斑块密度、连通度等指标,既可反映绿地的格局,也可反映水系的构成^[5-6],因此根据水绿耦合法则,通过调节、优化绿地的格局来实现消解城市雨洪。参照既往景观格局与绿地水文绩效、调蓄功能的相关研究,选取已被证实能够较为有效地影响城市产汇流过程的景观指数,采用 fragstats 4.0 软件进行计算,通过主成分分析识别并归类主要特征,来确定绿地结构优化的目标形式与调控指标(表2)。

表2 景观特征归类与景观指数计算

成分	R2 百分比 /%	指数	含义	计算公式
连通特征	35.9	连接度指数	直接反映景观动态变化,识别较大范围内连接的相对重要程度	$\text{CONNECT} = \frac{\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ijk} \right]}{\left[\sum_{i=1}^m \frac{n_i(n_i-1)}{2} \right]} \times 100$ <p>c_{ijk} 为给定连接距离阈值内,同类型斑块 j 和 k 之间的连接 (1 表示连接, 0 不连接); n_i 为景观类型 i 的斑块数, m 为斑块类型数</p>
		蔓延度指数	描述景观中不同斑块类型的团聚程度和蔓延趋势。指数越大,越证明绿地斑块间有较好连接,破碎化程度越低	$\text{CONTAG} = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \ln(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \right\} \times 100$ <p>单位: %, 范围: $0 < \text{CONTAG} \leq 100$。 P_i 表示 i 类型斑块所占的面积百分比, g_{ik} 为 i 类型斑块和 k 类型斑块毗邻数目, m 为景观中斑块类型总数目</p>
聚集特征	17.8	聚集度指数	反映斑块聚集程度,景观中的同类型斑块被最大程度地离散分布时,其聚集度为 0;景观中的同类型斑块被聚合成一个单独的、结构紧凑的斑块时,聚集度为 100	$\text{AI} = \left[\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] \times 100$ <p>范围: $0 \leq \text{AI} \leq 100$。 g_{ii} 为景观类型 i 的斑块之间的邻接数量; $\max \rightarrow g_{ii}$ 为景观类型 i 的斑块之间最大邻接数值</p>
		景观分割指数	当景观中仅有 1 个斑块时,景观分离度指数为 0,景观分离度指数值越大,表明景观内斑块组成越破碎、景观越复杂	$\text{DIVISION} = 1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_j}{A} \right)^2$ <p>范围: $0 \leq \text{DIVISION} < 1$。 a_j 为景观中某类斑块 j 的面积; A 为景观总面积</p>
均匀特征	15.0	香农均匀度	表示景观中不同景观类型的分配均匀程度。当 SHEI 趋近于 1 时,景观斑块分布的均匀程度趋于最大	$\text{SHEI} = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i) / \ln m$ <p>范围: $0 \leq \text{SHEI} \leq 1$。 P_i 为第 i 种景观类型在景观里的面积比例; m 为景观要素的类型总数</p>
		破碎度指数	能够度量斑块间的连接性和分布格局。IJI 取值小时表明斑块类型 i 仅与少数几种其他类型相邻接; IJI = 100 表明各斑块间比邻的边长是均等的,即各斑块间的比邻概率是均等的	$\text{IJI} = \frac{- \sum_{i=1}^m \sum_{k=i+1}^m \left[\left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \times \ln \left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \right]}{\ln(0.5[m(m-1)])}$ <p>单位: %, 范围: $0 < \text{IJI} \leq 100$。 E 为斑块边缘总长度, e_{ik} 为景观类型 i 和景观类型 k 之间的斑块边缘总长度, m 是斑块类型总数</p>
		斑块密度	用于判定绿地的分布密度以及破碎化程度	$\text{PD} = \frac{n_j}{A}$ <p>n_j 为 j 类景观的斑块总数量; A 为景观总面积</p>

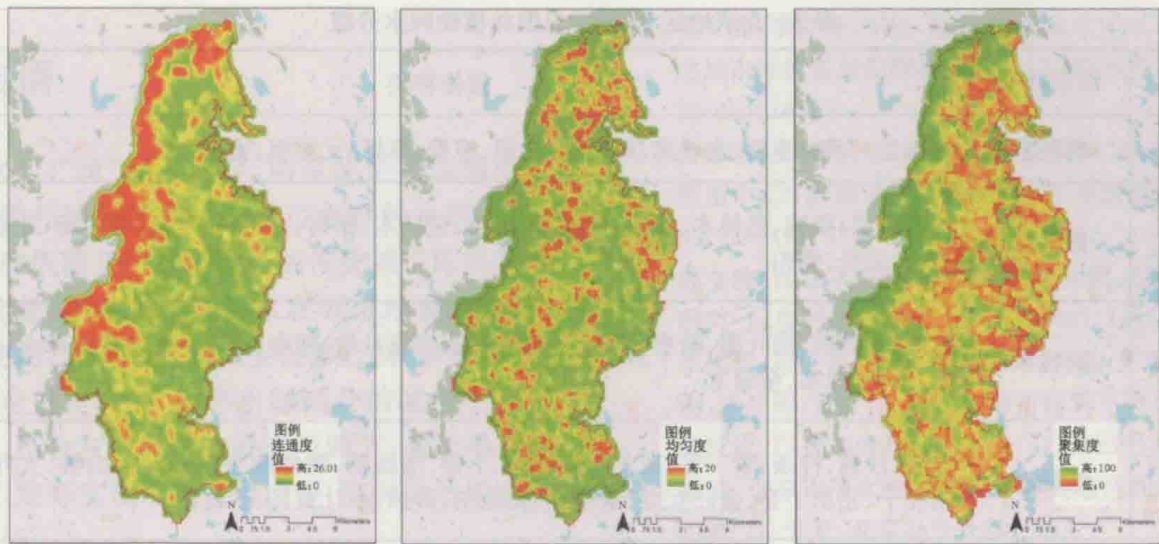


图5 溧阳经济开发区蓝绿格局分析

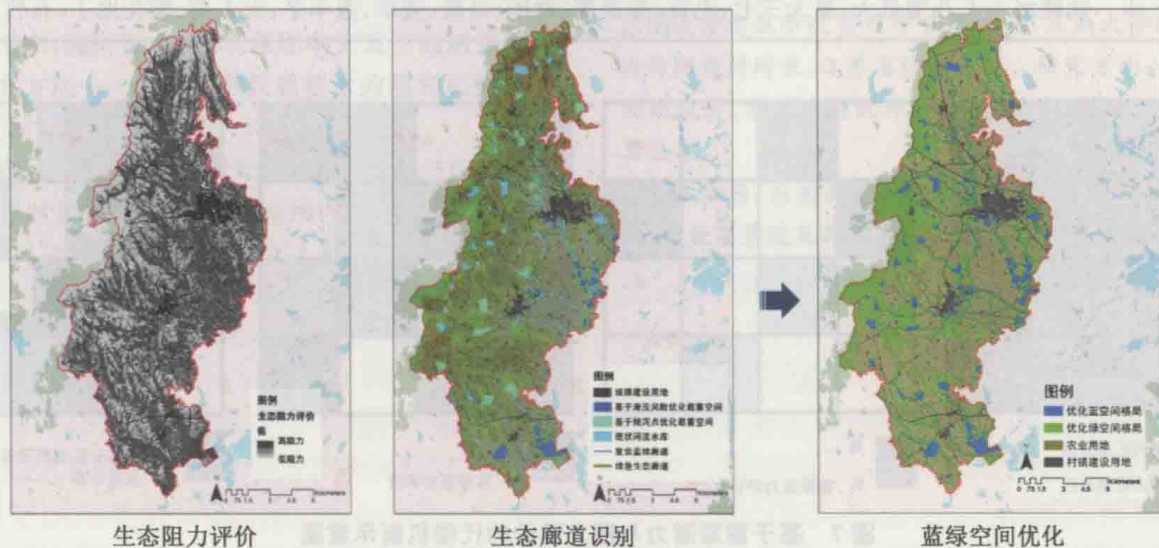


图6 溧阳经济开发区蓝绿连通性优化

以溧阳经济开发区蓝绿空间规划为例,格局优化过程中分析其连通特征、均匀特征、聚集特征(图5)。选择连通性作为蓝绿格局优化的导向,通过识别生态源地、评估综合生态阻力、建立生态廊道优化蓝绿格局(图6)。

4.4 绿地植被类型及组合选择

评估特定城市各种植被类型的蓄滞能力并建立基础植被数据库,是基于蓄滞需求选择植被类型与组合的基础。相同覆被模式的绿地,在不同地域性特征的城市,其植被蓄滞能力与土壤蓄水能力差异较大,这与植物自身生长习性相关,如“银杏+紫叶小檗+玉簪”的植被组合在北部、南部、中部地区的蓄滞水量均有所有不同。城市范围各类植被、土壤及其不同组合模式的蓄滞能力测量可采用两类方法,其一为实地测量,其二为遥

感解译来反演截流量。

植被蓄滞能力的实地测量需要对目标绿地依次进行林冠降水测定、穿透降水测定、树干茎流测定,基于冠层水量平衡公式计算冠层截流量:

$$I = P - T - S$$

式中: I 为林冠截留量(mm), P 为林外降水量(mm), T 为穿透水量(mm), S 为干流量(mm)。

基于遥感反演的植被林冠截流量可采用 A.P.J. De Roo 等构建的植被冠层截留模型,选择雨中或雨后的遥感影像解译叶面积指数 LAI 进行计算:

$$W_h = 0.935 + 0.498 \times \text{LAI} - 0.00575 \times \text{LAI}^3$$

建立本地植被及组合的蓄滞能力数据库,按蓄滞能力及需水能力进行等级划分,以北京地区为例,测度 75 种常见园林植物耗水情况并建立等