

城市生态空间冲突分析与系统优化方法

苏伟忠¹, 马丽雅^{1,2}, 陈爽¹, 杨桂山¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 为适应国土空间整合理论方法的迫切需求, 建立由冲突源、冲突区、冲突影响组成的城市生态空间冲突分析框架, 其案例应用表明: 城市生态空间的社会经济第一冲突源并不突出, 政策驱动力构成首要冲突源; 城市汇水区渗透性能下降, 产流增加, 汇流速度加快, 形成上游高地型、中下游沿岸型、下游低洼型及沿山型等 4 种冲突类型, 采用城市雨洪模型(SWMM)辨识出 4 种内涝区及分布类型; 针对冲突源、空间优化核心和末端排水建立城市生态空间系统优化目标体系, 重点提出“点线面”结合的空间优化核心路径。研究为国土空间整合提供理论与方法支撑, 并涵盖国际雨洪管理演替过程, 有助于对当前大规模土地开发转型及海绵城市建设理念的本土认识。

关键词: 城市生态空间; 冲突分析; 系统优化; 国土空间整合; 快速城市化地区

区域生态问题与城市化引起的土地利用变化, 尤其是与城市蔓延密切相关。1958 年美国怀特提出的城市蔓延概念描述了城市新区扰乱周边自然生态空间这一现象^[1], 城市化地区自然生态空间保护备受关注。在城乡规划领域, 霍华德 1898 年提出的田园城市建立了健康自然并促进经济发展的城乡结合体^[2], 麦克哈根^[3]《设计结合自然》提出协调城市增长与生态保护的区域土地利用适宜性评价方法, 环境影响评价预测随后也快速兴起^[4]。欧洲国家提出紧凑城市、城市密集化、城市集约化等概念, 这些概念面向城市生态系统管理提倡高密度混合土地利用开发模式^[5]。北美尤其美国则形成精明增长模式, 划定城市增长边界, 保留开敞空间、农田及自关键环境区域^[6]。在生态与环境管理领域, 1982 年布朗^[7]提出环境安全概念, 指出来自人与自然关系的安全威胁要远大于国家间军事能力的威胁; 欧阳志云等^[8]认为城市生态系统辨识包括系统结构、功效和过程, 把城市总体规划建立在城市生态综合战略规划之上; 1996 年俞孔坚^[9]从格局优化角度提出生态安全格局优化方法。实际早在 20 世纪 50 年代以绿色廊道运动为代表的生态网络规划^[10], 如欧洲的绿色廊道、生态网络、生境网络、洪水缓冲区等概念^[11,12]和亚洲新加坡的绿色廊道规划^[13]及 90 年代的生态(绿色)基础设施概念^[14], 都是广泛意义上的生态空间优化工具。另外, 气候变化和土地利用变化背景下城市化与生态环境变化的相互作用也成为了研究热点^[15], 例如景观破碎度、农田损失^[15,16]、水量和水质平衡^[17]、空气质量和地表温度^[18]、暴雨径流^[19]、生态系统服务功能^[20]等生态环境响应和经济增长、城市化水平及城市建成区或不透水性^[21,22]等城市化驱动, 以及 70 年代不透水性阈值用作城市环境影响的定量研

收稿日期: 2019-01-02; 修订日期: 2019-03-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1100101); 国家自然科学基金项目(41571511)

作者简介: 苏伟忠(1977-), 男, 山东莱芜人, 博士, 研究员, 主要从事城市土地可持续利用研究。

E-mail: wzs@niglas.ac.cn

究工具^[23]和常用规划指标^[24,25]。围绕城市发展与生态保护平衡系统强调生态安全框架下的城市开发空间指引逐渐形成共识^[26-32]，但无论是定量适宜性评价方法，还是指标最优化规划方法，城市发展与生态环境变化的相互作用研究仍然零碎而缺乏突破，尤其结合实际地区特点对各类空间博弈（冲突）关系、格局—过程（功能）互作机制、关键空间要素识别及重要阈值确定等关键问题解析不足^[15,33,34]。

人地关系演变的实质是人地要素之间围绕发展空间的博弈过程。国内20世纪90年代人地关系地域系统理论在学科发展和国家重大战略制定中发挥了导向支撑，主体功能区划是其中典型^[35,36]。国际上1999年人与自然耦合系统CHANS（Coupled Human-environment Systems）概念也是以揭示人文—环境相互作用及反馈机制为主旨的综合科学框架，2007年CHANS动力学计划正式在美国国家自然科学基金会创立^[37-39]。土地利用是人地关系表现最为具体的物质载体，未来地球背景下GLP（Global Land Project）计划从土地利用视角辨识CHANS变化特征、结构和原因及其对生态系统服务的影响，维护CHANS的可持续和韧性发展。目前中国大规模的土地城市化成为中国城市发展模式的组成部分，城镇不断挤占大量的耕地和生态空间。2014年《国家新型城镇化规划（2014-2020年）》概括了国内外城市化经验和教训，将生态文明理念融入城镇化过程，从区域整体角度强调人与自然的平衡，实施以国土空间整合为核心的多规合一，而2017年组建自然资源部为统筹优化各类空间提供了体制保障。由此，本文重点从支撑国土空间整合理论方法视角，探析适应中国快速城市化地区本土发展特点的城市生态空间系统优化方法。

1 研究方法 with 数据来源

快速城市化进程中城市发展空间与生态保护空间的博弈集中体现为冲突。城市生态空间协调优化以冲突分析为前提，在系统揭示冲突过程及成因基础上提出系统优化路径。

1.1 研究区概况

研究区位于南京南部新城牛首河流域，近年城市空间大规模扩张，城市内涝问题突出。2018城市生态空间现状如图1所示。1992年、2002年、2010年和2018年城市空间比例分别为7.68%、16.22%、48.07%和56.11%，增长阶段概况为起步、缓速成型、加速增密和减速转型。1992年案例区是以旱地水田为主的农业区域，中下游沿牛首河和九龙湖地区雨季低洼水淹现象突出，上游翠屏山—将军山—牛首祖堂丘陵山地地势较高，雨水水淹情况少。从2003年开始，尤其在2007-2013年间雨季内涝事件频发且分布较广。

1.2 城市生态空间冲突分析方法

首先城市生态空间系统要素解构：从CHANS的景观或土地组成角度，自然要素（N）指山水林田湖草生命共同体（生态空间或非建设用地），人文要素（H）指城市生产生活空间（城市空间或建设用地）。城市化成为全球主要变化驱动过程的四大驱动力之一，地理学研究逐渐形成格局—过程—机制—效应的范式，并呈现单要素到地理—生态过程与资源环境效应转变^[40]。社会系统对生态（环境）系统的压力和影响也形成了驱动力—压力—状态—影响—响应（DPSIR）分析框架^[41]。快速城市化地区城市空间高速增长且呈现高强度高密度利用特征，与生态空间的冲突过程主要从冲突源、冲突区、冲突影响等三个方面分析：冲突源是指城市空间增长的驱动力，是生态空间变化的源头动因，包括社会、经济和制度系统的变化，主要驱动力是社会经济活动（表现为GDP、人



图1 研究区现状

Fig. 1 The study area

口规模结构、能耗等增长变化)，次要驱动力是政策（经济与人口发展规划、污染控制法规等）；在冲突源动力下城市空间变化对生态空间形成压力，包括社会经济活动的空间利用、物质（污染物）排放、物理和生物的动力因素（土壤改良、硬化、生物技术）和资源利用等，在此压力下诱发生态空间结构与功能状态发生冲突变化，变化要素及其分布作为冲突区；冲突要素及冲突区产生各种城市生态功能（过程）的后果，包括城市内涝积水、热岛、水污染、土壤肥力下降、健康和社会团结等冲突影响。本文针对研究区突出的洪涝积水问题，提取了1992年与2018年建设用地、水面低洼地、土壤植被等主要城市生态空间要素，这些空间要素分别对应了地表径流、储蓄、渗透等关键雨洪调蓄功能（图1、图2）。

案例区冲突分析与系统优化的思路如下：（1）解析快速土地城市化进程的冲突源及土地利用行为；（2）揭示城市空间压力与生态空间状态之间的冲突区及其形成机制；（3）通过城市雨洪模型（SWMM）模拟城市生态空间变化的内涝积水影响；（4）分别对应冲突源、冲突区和冲突影响提出城市生态空间系统优化方法。案例研究数据有：城市空间数据由1992年、2002年、2010年和2018年的Landsat TM影像及结合土地利用现状图提取，对应的不透水面数据利用线性光谱混合模型SPOT 5影像并结合土地利用现状图提取；自然汇水区界和自然汇流通道利用ArcGIS水文分析模块和30 m分辨率DEM数据获取，其中地势平坦地区与实际河网及水利片区综合分析确定汇水区；城市空间与生态空间叠加形成研究末期汇流通道和城市汇水区；采用地形图、实地勘测及文献分析方法，按照汇流通道组成和形态划分为人工地下管网、人工明渠、自然型河流和牛首河下游自然型河道等四类^[29]（图3a）；城市汇水区是城市功能分区规划框架下形成的面、线、点要素，包括128个汇水区、223个长度为361 km的主要汇流路径（管渠）和239个主要汇流节点，汇水区收集的雨水最终汇入牛首河（接纳水体）^[42]。根据不透水面率（IR/%）把城市汇水区划分为五类（图3b）。

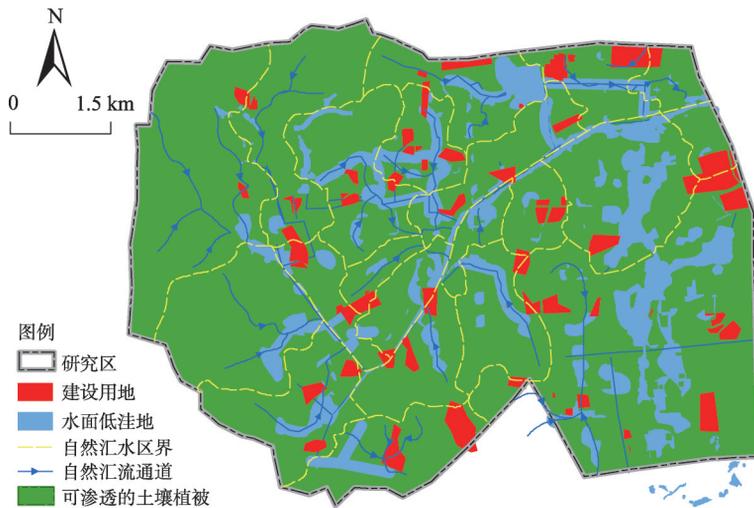


图2 1992年城市生态空间

Fig. 2 Urban ecological spaces in 1992

2 结果分析

2.1 城市生态空间冲突源及其土地利用行为

首先,设立开发区国家政策激励。1992年原江宁县成立江宁开发区,1996年规划建设起步,1999年升级为国家级经济技术开发区。由于距南京主城较远,县城自身内需动力不足,招商引资主要借助低地价优势缓慢增长,土地城市化进程缓慢。其次,2000年县改区行政调整。土地性质由农村集体土地纳入城市规划区范围,通过房地产、工业区及大学城等形式城市空间加速扩张,流域路网和土地开发框架成型并进入加速增密阶段,但经济和人口城市化水平跟进不足。然后,2008年后外部经济低迷环境下政府推出过度优惠刺激政策。推行住房与土地市场优惠刺激政策,提升内部交通可达

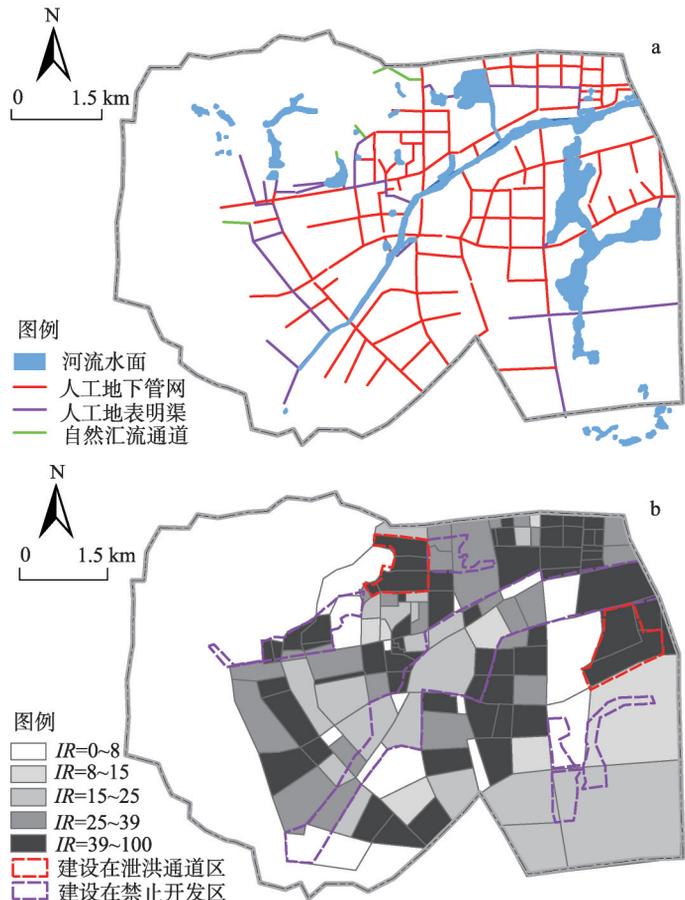


图3 城市汇流通道与汇水区不透水率IR

Fig. 3 Urban channels and catchments imperviousness IR

性与人居环境条件, 加上南京城区高房价外部推动, 研究区房地产市场迅速发展, 进入新一轮加速发展阶段。最后, 2012年成立的南京南部新城(南京三大新城之一)赋予了研究区新的发展动力。多条境内地铁通车及南京南站落成, 南京市新一轮规划修编增加建设用地指标, 城市空间进一步扩展但速度放缓。综上所述, 城市空间开发的社会经济活动第一驱动力并不突出, 而是政策驱动力构成了主要驱动, 贯穿在整个开发过程: 地方政府低成本征收农业用地, 低价格转让工业用地, 高价格出让商住用地, 巨额的土地出让收入用于征地和拆迁补偿、土地开发、城市建设、基础设施建设, 成为研究区经济发展的内生逻辑, 同时也成为生态空间变化的主要冲突源。

2.2 城市生态空间冲突区及冲突机制

规划是落实政府政策的工具, 规划综合环境、交通、区位、地质和水文等开发适宜性因素, 确定土地用途空间布局。(1) 路网是用地布局的基础框架。研究区主干道走向由区域节点城市(南京主城、江宁县城、溧水县城)经济联系早期形成, 除建设工程条件外, 规划道路网络在地形(坡度、高程、水网)因子干扰下呈现不规则形态, 道路与地形关系基本呈现两种: 一种平行等高线, 近似垂直于流域主干河流, 沿线地势起伏, 低洼有桥梁, 高地或建隧道或环绕; 一种垂直等高线, 近似平行于流域主干河流^[41]。(2) 路网框架下根据规划要求、区位、市场、自然条件等因素, 明确城市土地利用功能分区及其边界。满足人工环境城市土地利用功能区主导下的排水单元需要, 形成城市汇水区(图3b), 与自然汇水区的冲突表现在: 城市汇水区不透水率高, 渗透性能下降, 产流量显著增加; 改变了汇流路径自然特征, 人工汇流路径大量增加, 汇流速度快; 流域上下游城市汇水区及汇流通道之间空间不协调, 例如位于上游的人工排水渠洪水流速快, 加剧下游排洪压力, 中下游人工管网排水压力巨大。城市汇水区与自然汇水区形成冲突, 改变了自然流向(图4a), 包括4个类型: 一是上游高地冲突型, 流域上游高地自然汇水区交汇处是工业区的优选地, 人为形成的汇水区割裂了自然汇水单元, 但地势梯度明显, 内涝现象不突出; 二是中下游沿岸冲突型, 牛首河中下游沿岸滨水低地, 由于人造地势适应滨水景观开发需要导致汇流路径冲突, 流入牛首河的自然汇流转向将军大道, 进而汇入排水泵站, 将军大道沿线汇流集中、流向紊乱、泵站依赖性强; 三是下游低洼冲突型, 低洼自然汇水面交叉区地势平缓而城市汇水区界限模糊, 地表流向极易紊乱, 超过一定降雨量最易造成普遍积水问题; 四是下游沿山冲突型, 自然汇水区交汇处开发强度大, 顺势而下的地表径流迅速流入以截洪快排为主的主干渠道(将军大道和佛城西路), 低洼地内涝风险最大^[41]。现实内涝常发在第二、第四类地区。(3) 实际建设管理过程对规划合理性要素的挑战。规划执行率不足, 这些地区主要表现在: 城市空间布局违规加密, 使得许多规划的泄洪通道和蓄洪区(禁止和限制开发区)被占(图3b), 城市空间违规布局、扩建在大量低洼泄洪区。

2.3 城市生态空间冲突影响

采用SWMM 5模拟各种城市汇水区冲突格局的水文过程^[43], 辨识冲突影响程度和分布区。汇水区地表产流模拟的主要输入参数为^[42]: 基于Horton公式计算渗透率, 其中最大渗透速率、最小渗透速率和衰减常数分别为76.2 mm/h、3.18 mm/h和0.0006; 不透水(不透水面)和透水汇水区的洼地库容值、曼宁糙率分别是5 mm、0.015和7 mm、0.030; 汇水区的坡度值来自排水系统规划数据, 宽度值直接从模型获得。在路径汇流过

程中,分人工管网和天然草质渠道两种,它们的曼宁糙率分别为0.017和0.03。排水管一律统一按雨水管道形式,管径数据来自规划数据,研究区的管径大小在300~1500 mm。另外气象数据采用基于暴雨强度公式 $i=2989.3(1+0.6711gT)/(t+13.3)^{0.8}$ 和芝加哥方法的暴雨强度时间序列,时间步长为5分钟,设计出暴雨雨型图,直接模拟输出流速、流深等参数,获取积水区域(溢流节点和区域)。模拟结果显示,内涝区(包括溢流节点和满载管渠两类)主要分布在一湖四带地区,最严重的是佛城与将军大道交叉口,分为四类(图4b):一是将军路南自南向北顺地势正交型内涝,在下游低洼区产生的水锤现象;二是自将军山上游流向下游汇至将军路北和佛城西截流干道的平行型内涝,地势平缓而这些沿线内涝点众多;三是中下游牛首河一防洪大坝沿岸滨水地带内涝型,人造地势道路积水以及牛首河自身溢满回流到两岸造成内涝积水;四是九龙湖四周低洼型内涝,流向极易紊乱,内涝积水现象明显。

这些地区与城市生态空间变化直接相关(表1):规划道路与城市空间密集开发、强度大,雨水储蓄功能下降,下游产水量大量增加;城市空间与生态空间形成冲突区,自然汇流路径方向、组成和形态人工改变,流向紊乱;城市空间格局过度集中,尤其上游高强度城市空间面积大且连片集中,人工化的汇流路径流速加快,而下游尤其在将军大道—诚信大道之间开发强度大,地势低洼,汇流集中;从外部空间关系看,研究区接纳河流的牛首河所属秦淮河支流,秦淮河上下游近30年开发面积也迅速增加,秦淮河排水能力雨季超警戒水位现象时有发生,例如2017年6月9日夜间8时至10日,暴雨造成秦淮河河道水位一天猛涨1 m多,超警戒水位0.5 m,牛首河受秦淮河水流顶托,河水向其两岸回流而发生内涝积水问题。

2.4 城市生态空间系统优化

城市生态空间在地理格局上的冲突和再分配是城市内涝形成的直接原因,传统内涝

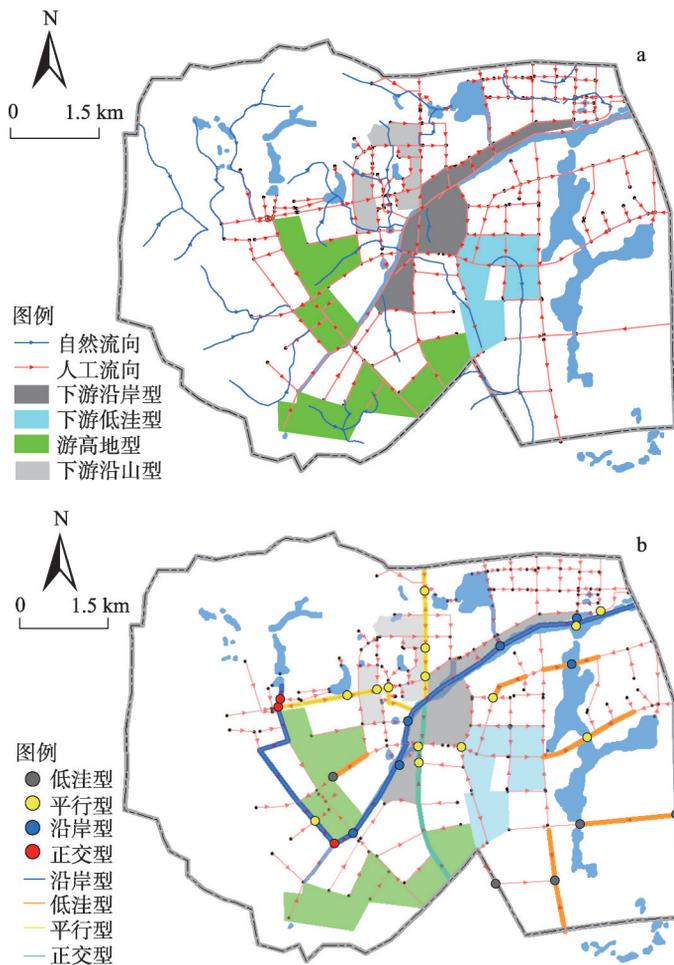


图4 冲突区与内涝类型

Fig. 4 Urban ecological conflict areas and flood areas

表1 流域视角主要内涝区成因分析

Table 1 Contributing factor of flooding areas

因素	城市空间布局	生态空间变化	产流变化	汇流速度变化	汇流方向变化	内涝类型	系统优化目标
将军路北一带	西侧上游低密度规划但实际中高密度建设	局部占用、人工化改造	产流增加, 沿线量大	西侧上游地势差大、来水迅速	自然流向改变, 新的平行式路径沿线起伏, 排水设计能力预期不足	排水不畅, 倒灌沿线小区	提升上游调蓄渗透功能, 自身排水路径扩容
佛城路西一带	北侧上游低密度规划但实际中高密度建设	局部占用、人工化改造	产流增加, 沿线量大	北侧上游地势差大且为人工渠道, 来水迅速	自然流向改变, 新的平行式路径沿线起伏, 排水设计能力预期不足	排水不畅, 倒灌沿线小区	提升上游调蓄渗透功能, 自身排水路径扩容
将军路南一带	中高密度开发且布局在许多低洼地区	局部占用	产流较大, 下游集中	汇流迅速且集中	自然流向改变, 地势梯度明显, 影响小	下游排水不畅	排水能力提升, 排水管渠/泵站格局优化
牛首河一带	沿线上下游布局密度都高	上游通道人工化, 下游低洼占用	产流量大, 上下游均大	上游人工渠道来水迅速, 下游坡缓流速慢	流向集中低洼, 受秦淮河洪水回流的顶托	下游受纳水体排洪压力大	河流上下游生态调蓄功能格局整体优化
九龙湖一区一湖	城市空间分布散	大量占用	产流增加, 分布分散	流速缓	流向紊乱	排水不畅, 产生倒灌	控制城市开发, 增加储存空间

治理主要针对雨水的末端快排^[44]。城市生态空间系统优化 (IUES) 面向雨洪管理基于水力联系单元的流域视角, 以流域城市生态空间—产汇流过程联合调控为核心, 分别对城市生态空间冲突源、冲突区及冲突影响等全要素整合。

2.4.1 系统优化的目标

传统内涝控制目标针对末端积水, 通过建设排水设施来提高排水效率 (表1)。然而, 核心目标应该是针对形成积水的核心成因——城市生态空间变化冲突区, 具体包括在开发之前山水林田湖草等生态调蓄空间的源保护、城市空间强度与布局的开发控制、开发之后城市空间微尺度的综合调蓄管理设施 (LID-IMPs) 或海绵城市微观建设。其中, IUES的核心概念是调蓄功能, 调蓄是维持自然水文循环和城市良性水文循环极关键的环节, 是低影响开发和海绵城市概念的核心功能, 以“径流总量控制、削减洪峰值”为核心目标, 具体包括渗透、储蓄、传输与调节。渗透指雨水通过可渗透的土壤和植被补给地下水, 其中LID-IMPs有透水砖、绿色屋顶、凹型绿地等; 储蓄是通过雨水储存、滞留或蓄渗达到削减径流排放量目的, 包括湿塘、蓄水池、低洼透水面; 传输指延长雨水集流时间的汇流路径, 如各类植草沟、渗管/渠等天然河流; 调节是指在暴雨期间对峰值径流量进行暂时性的储存或者延缓流速, 降雨结束后或峰值流量过后再逐渐排放, 例如调节塘。根本冲突源动力来自形成城市生态空间格局的制度、政策及规划动力建设, 因此系统优化的源头目标针对的是冲突源。

2.4.2 系统优化核心目标: 空间优化

针对主要淹没区成因及其调蓄功能优化目标, 辨识关键城市生态空间要素和主导功能优化区域 (图5a)。(1) 源头渗透储蓄主导区A。从类型特征上分两类: 上游未开发以植被为主的渗透主导区A1, 提升植被质量和渗透储蓄容量; 上游有一定强度开发的渗透储存区A2, 提升植被质量, 控制土地开发强度, 开发地区可作为海绵城市建设试点, 保

证开发前后径流系数的平衡。重点城市生态空间功能优化要素有：面向提升渗透性能的植被质量维护；面向综合调蓄功能提升的水库与水敏感通道（河流）自然型生态化建设；面向调蓄功能优化的淹没区、淹没点的开发控制与绿地建设；面向重点小流域（冲突区及沿线上游小流域，低密度建设区）的海绵城市综合调蓄功能提升。（2）中端快排主导区B。从类型特征上分两类：开发强度大的内涝风险最大地区B1，排水能力提升紧迫；开发整体成型的排水综合优化地区B2，优化排水网络通达性，局部地区利用绿地率和地形扩大储存容量。重点城市生态空间功能优化要素有：关键通道（淹没地区）排水能力建设，管网口径扩容及泵站维护；关键点（低洼坑塘）低洼绿化调节；提升区域网络综合优化关键区（小流域，低密度地区，汇流集中地区）的海绵吸附能力。（3）末端综合排蓄主导区C。从类型特征上分两类：受纳水体（牛首河）排水能力综合优化区C1；牛首河沿线和九龙湖周边低洼低密度开发及易淹区C2，后者再开发利用与海绵城市建设的协调作为重点。重点城市生态空间功能优化要素有：诚信大道以南地区牛首河疏浚扩大储存容量，提高坡降比以增强排水能力，沿线利用九龙湖、高湖等调节周边来水；诚信大道上游牛首河沿线开发强度较低，利用低洼坑塘提高储存渗透能力，辨识主要工业居住区实施微尺度海绵城市建设，增强上游水库的调

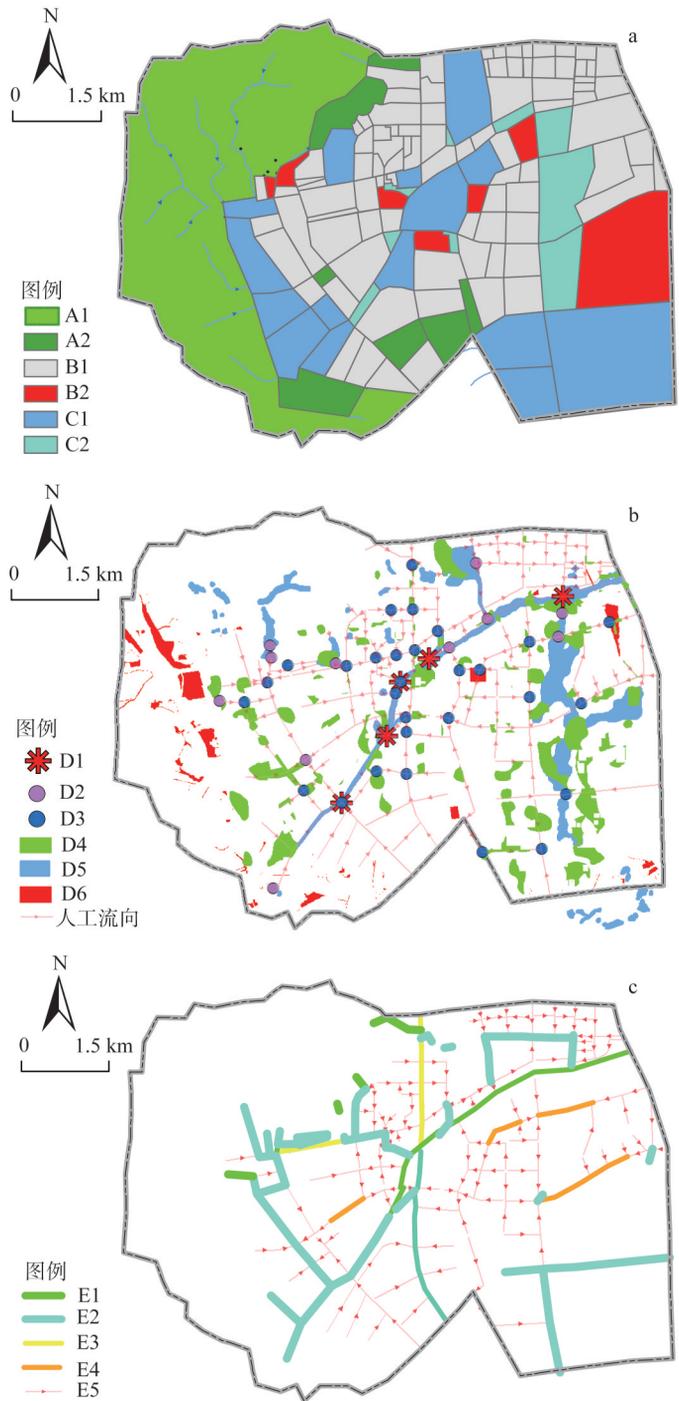


图5 城市生态空间系统优化

Fig. 5 Urban ecological space system optimization

蓄能力，辨识主要工业居住区实施微尺度海绵城市建设，增强上游水库的调

节作用。

基于不同优化主导功能区域,提出系统优化的关键点D和通道E(图5b、图5c)。具体优化点建议如下:牛首河回流区设闸及泵站扩容综合控制点D1;新增低洼排水泵站或扩大容量的关键点D2;雨季设置闸门控制水位失控,而降雨之前放闸排水增加蓄洪量的控制点D3;对目前低洼绿地进行下凹式绿地建设以增加调蓄容量D4;主要蓄水水体D5;其他是渗透功能区域内重点控制和微观尺度生态调蓄能力提升的城市空间D6。具体优化廊道建议有:自然型路径E1,扩大蓄水容量,提高排水能力;人工渠道E2是自然河流流经之地,以两岸生态建设为主,减少两岸产流量;排水能力提升为主的路径E3;扩大排水能力为主的低洼廊道E4,开发密度低,恢复两岸自然生态特征;其余管网关键点为排、截、拦综合调控点E5。

2.4.3 系统优化源头目标:动力保障

形成地方政府土地利用行为、规划与管理过程的源头动力来自各种外生的政策与制度激励。首先是投资型和增长型政府职能向服务型政府的转变,落实新型城镇化与生态文明建设,以建设美丽中国为目标,树立发展和保护相统一的理念,按照生态系统的整体性、系统性及其内在规律,统筹考虑经济社会与自然生态各要素:首要的是对地方政府实施绿色发展考核,2016年印发《绿色发展指标体系》与《生态文明建设考核目标体系》强化了地方政府生态文明建设的主体责任,环境因素的考核首次置于比GDP更重要的位置;核心是约束“土地财政”,根据不同发展阶段和空间区位,组合使用不同模式,把城市分为已完成城市化原始资本积累的存量部分和还没有完成的增量部分,但尽快将不动产分为投资和消费两个独立的市场,并在不同市场分别达成不同的经济目标;重点是完善土地制度建设,包括政府供地方式、征地制度、补偿标准、土地流转试点等进行重大改革;关键是规划体制保障,我国众多的规划因为规划编制和实施权分属不同的政府部门,人为割裂了自然资源之间的有机联系,2018年自然资源部的组建是落实“多规合一”改革的第一步。本文为具体开展“多规合一”改革、建立科学空间管制性规划提供理论方法依据和实践验证。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文从国土空间整合理论方法需求视角,探索适应中国快速城市化地区本土发展特点的城市生态空间系统优化方法。(1)首先基于CHANS的景观或土地组成角度,解构城市生态空间系统要素为生态空间和城市空间,然后建立包括冲突源、冲突区、冲突影响等三方面组成的城市生态空间冲突分析过程框架:冲突源指城市空间增长的驱动力,生态空间变化的源头动因;冲突源动力下城市空间变化对生态空间形成压力并诱发形成生态空间冲突区;冲突要素及冲突区产生各种城市生态功能(过程)的后果;在系统诊断冲突过程及成因基础上提出系统优化途径。(2)快速城市化案例区研究表明:城市生态空间冲突的社会经济活动第一冲突源并不突出,政策驱动力构成了主要冲突源并贯穿激励在整个冲突过程;通过路网和用地布局规划过程分析揭示了城市汇水区与自然汇水区的4种冲突区类型及冲突机制;采用SWMM模型模拟辨识出4种内涝类型区及关键成因。(3)由此分别针对冲突源、冲突区及冲突影响构建了城市生态空间系统优化目标体

系：传统优化目标针对末端积水的排水过程，核心目标针对形成积水的城市生态空间变化和空间重构，根本目标是针对城市生态空间变化的制度、政策及规划动力建设。针对案例区建立了三类优化主导功能区域、六类关键点和五类关键通道等城市生态空间优化路径。本文冲突分析框架和系统优化方法为国土空间整合研究提供参考，案例研究整体涵盖了国际雨洪管理的演替过程，有助于对当前大规模土地开发转型及海绵城市建设理念的本土认识。

3.2 讨论

城市生态空间冲突分析框架的合理性和意义。首先，人地关系与CHANS概念是系统优化前提，人地关系空间博弈需要深化人地关系及其演进的系统认知和综合视角^[35]。其次，构建的冲突分析框架从城市空间开发的源头动力—生态空间变化及其压力—内涝影响来理解城市内涝形成机理，然后对应提出系统响应措施。这顺应了国际雨洪管理研究的趋势，即20世纪60年代集中在排水过程，对地表径流通过末端管网设计实施快排，70年代拓展到产流过程对不透水面阈值实施控制，90年代深入到源头的微观工程建设过程（如低影响开发），提升已开发土地的雨洪调蓄能力，2000年后雨洪管理延伸至土地利用的决策与规划过程^[42]。

城市生态空间系统优化的适宜性与应用。首先，案例选取雨洪管理及生态调蓄功能视角，其他例如水污染、粮食生产力等管理问题也可适用这一思路。而同一管理问题因为尺度不同、对象不同而涉及的因素也有差异：国家（区域、流域）尺度考虑宏观经济社会及生态因子，例如制度、体制、政策以及温度、降水、地貌、生态系统类型；城市尺度关注经济社会及生态因子，例如城市类型、等级、区位、历史、人口以及地形、水系；城市内部功能区（异质地块组合）关注规划与经济因子，例如规划标准、区位、市场、经济效益、环境质量等；而对于建筑或单一功能地块主要涉及技术与管理，例如需求、技术可行、景观效果、建设与维护成本等。本案例区为城市尺度。其次，案例区为快速城市化地区，与农业区、生态区和老城区主导功能类型不同，对应的管理问题及生态功能要求也有不同。

本文基于冲突分析框架和优化体系整体涵盖了国际雨洪管理的演替过程，有助于对当前大规模土地开发转型及海绵城市建设新理念的全面认识。分析结论看出，案例区并非所有地区都适合实施海绵城市建设，与美国人口少、土地开发强度低的语境不同，案例区（特别是优化主导功能B类区域）开发强度普遍大，微观的源头结构性设施（海绵城市）没有充足空间来消纳径流，必须以已有排水管网快排提升为主。本文基于城市空间开发与雨洪调蓄空间的相互作用关系，并从流域角度提出不同关键区域（A/B/C）。这与主体功能区划（优化、重点、限制、禁止）、城市规划分区（适建区、限建区、禁建区）、土地利用总体规划（允许建设区、有条件建设区、限制建设区、禁止建设区）等协调发展与保护关系的差别化措施一致。但本文更加强化两者关系的冲突分析和系统优化方法，为多规合一要求下国土空间整合提供参考和验证。

参考文献(References):

- [1] ZHANG T W. Community features and urban sprawl: The case of the Chicago Metropolitan Region. *Land Use Policy* 2001, 18(3): 221-232.
- [2] 金经元. 再谈霍华德的明日的田园城市. *国际城市规划*, 1996, (4): 31-36. [JIN J Y. Talking about Howard's tomorrow.]

- row's rural city. *International Urban Planning*, 1996, (4): 31-36.]
- [3] MCHARG I L. *Design with Nature*. England: John Wiley Sons Inc, 1992.
- [4] ORTOLAND L. *Environmental Regulation and Impact Assessment*. Chichester: Wiley, 1997.
- [5] DAVID S, OLIVIER S. Investigating the application of the European Spatial Development Perspective (ESDP) to regional planning in the United Kingdom. *Town Planning Review*, 2003, 74(1): 31-50.
- [6] CAMAGNI R, CAPELLO R. Regional innovation patterns and the EU regional policy reform: Towards smart innovation policies. *Growth & Change*, 2013, 44(2): 355-389.
- [7] BROWN L R. *Building a sustainable society*. Society, 1982, 19(2): 75-85.
- [8] 欧阳志云, 王如松. 生态规划的回顾与展望. *自然资源学报*, 1995, 10(3): 203-215. [OUYANG Z Y, WANG R S. The review and prospect ecological planning. *Journal of Natural Resources*, 1995, 10(3): 203-215.]
- [9] YU K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36: 1-17.
- [10] AHERN J. Greenways as a planning strategy. *Landscape & Urban Planning*, 1995, 33(1-3): 131-155.
- [11] HAAREN C V, REICH M. The German way to greenways and habitat networks. *Landscape & Urban Planning*, 2006, 76 (1-4): 7-22.
- [12] JONGMAN R H G, KULYIK M, KRISTIANSEN I. European ecological networks and greenways. *Landscape & Urban Planning*, 2004, 68(2-3): 305-319.
- [13] TAN K W. A greenway network for Singapore. *Landscape & Urban Planning*, 2006, 76(s1-s4): 45-66.
- [14] BENEDICT M A, MCMAHON E T. Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 2002, 20(3): 12-17.
- [15] SU W Z, GU C L, YANG G S, et al. Measuring the impact of urban sprawl on natural landscape pattern of the Western Taihu Lake watershed, China. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1): 61-67.
- [16] SU W, YE G. Differences of soil fertility in farmland occupation and supplement areas in the Taihu Lake watershed during 1985-2010. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(6): 5598-5612.
- [17] SAMANIEGO L, BARDOSSY A. Simulation of the impacts of land use/cover and climatic changes on the runoff characteristics at the mesoscale. *Ecological Modelling*, 2006, 196(1): 45-61.
- [18] SU W Z, GU C L, YANG G S, et al. Assessing the impact of land use/land cover on urban heat island pattern in Nanjing city, China. *Journal of Urban Planning and Development*, 2010, 136(4): 365-372.
- [19] MEJIA A I, MOGLEN G E. Impact of the spatial distribution of imperviousness on the hydrologic response of an urbanizing basin. *Hydrological Processes*, 2010, 24(23): 3359-3373.
- [20] 李锋, 叶亚平, 宋博文, 等. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变: 以常州市为例. *生态学报*, 2011, 31(19): 5623-5631. [LI F, YE Y P, SONG B W, et al. Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: A case study in Changzhou city, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [21] PAULEIT S, ENNOS R, GOLDING Y. Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change: A study in Merseyside, UK. *Landscape and Planning*, 2005, 71(2-4): 295-310.
- [22] NUISSL H, HAASE D, LANZENDORF M, et al. Environmental impact assessment of urban land use transitions: A context-sensitive approach. *Land Use Policy*, 2009, 26(2): 414-424.
- [23] BRABEC E A. Imperviousness and land use policy: Toward an effective approach to watershed planning. *Journal of Hydrology Engineer*, 2009, 14: 425-433.
- [24] SHUSTER W D, BONTA J, THURSTON H, et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2005, 2(4): 263-275.
- [25] SCHUELER T R, FRALEY-MCNEAL L, CAPPIELLA K. Is impervious cover still important?: Review of recent research. *Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 309-315.
- [26] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局. *自然资源学报*, 2018, 33 (8): 1351-1362. [ZHANG Q D, WEI W, CHEN L D, et al. Spatial variation of soil moisture and species diversity patterns along a precipitation gradient in the grasslands of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1351-1362.]

- [27] 孔繁花, 尹海伟, 刘金勇, 等. 城市绿地降温效应研究进展与展望. 自然资源学报, 2013, 28(1): 171-181. [KONG F H, YIN H W, LIU J Y, et al. A review of research on the urban green space cooling effect. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(1): 171-181.]
- [28] 蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. 生态学报, 2012, 32(21): 6755-6766. [MENG J J, ZHU L K, YANG Q, et al. Building ecological security pattern based on land use: A case study of Ordos, Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6755-6766.]
- [29] 苏伟忠, 杨桂山, 陈爽, 等. 城市增长边界分析方法研究: 以长江三角洲常州市为例. 自然资源学报, 2012, 27(2): 322-331. [SU W Z, YANG G S, CHEN S, et al. Analysis method of urban growth boundary of the Changzhou city in the Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(2): 322-331.]
- [30] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133. [WU J S, ZHANG L Q, PENG J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4125-4133.]
- [31] 高吉喜, 邹长新, 王丽霞. 划定生态保护红线深化环境影响评价. 环境影响评价, 2014, (4): 11-14. [GAO J X, ZOU C X, WANG L X. Deepening environmental impact assessment by delimitating red line of ecological protection. *Environmental Impact Review*, 2014, (4): 11-14.]
- [32] 苏伟忠, 陈维肖, 郭葳, 等. 太湖流域城乡用地扩张对河网的空间占用机制初探. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1289-1301. [SU W Z, CHEN W X, GUO W, et al. The occupation of river network by urban-rural land expansion in Taihu Basin, China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1289-1301.]
- [33] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [34] PULLINGER M G, JOHNSON C J. Maintaining or restoring connectivity of modified landscapes: Evaluating the least-cost path model with multiple sources of ecological information. *Landscape Ecology*, 2010, 25(10): 1547-1560.
- [35] 刘毅. 论中国人地关系演进的新时代特征: “中国人地关系研究”专辑序言. 地理研究, 2018, 37(8): 1477-1484. [LIU Y. Preface to the special issue on Chinese man-land relationships in a New Era. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1477-1484.]
- [36] 吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统. 经济地理, 1991, 11(3): 1-6. [WU C J. The core of geography: Man-earth relationship area system. *Economic Geography*, 1991, 11(3): 1-6.]
- [37] ROZENFELD A F, SOPHIE A H, EMILIO H G, et al. Network analysis identifies weak and strong links in a metapopulation system. *PNAS*, 2008, 105(48): 18824-18829.
- [38] SHEPPARD E, MCMASTER R B. Scale and geographic inquiry: Nature, society, and method. *Scale & Geographic Inquiry Nature Society & Method*, 2004, 47(7): 1-22.
- [39] LIU J G, DIETZ T, CARPENTER S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [40] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059. [FU B J. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1052-1059.]
- [41] MAXIM L, SPANGENBERG J, O'CONNOR M. The DPSIR framework for biodiversity assessment. *Ecological Economics*, 2009, 69(1): 12-23.
- [42] SU W Z, YE G B, YAO S M, et al. Urban land pattern impacts on floods in a new district of China. *Sustainability*, 2014, 6(10): 6488-6508.
- [43] LOWE S A. Sanitary sewer design using EPA Storm Water Management Model (SWMM). *Computer Applications in Engineering Education*, 2010, 18(2): 203-212.
- [44] 苏伟忠. 都市密集区城镇土地格局的环境效应与适应研究. 北京: 科学出版社, 2016. [SU W Z. Study on Environmental Effect and Adaption of Urban Land Pattern in the Metropolitan Area. Beijing: Science Press, 2016.]

Conflict analysis and system optimization of urban ecological space

SU Wei-zhong¹, MA Li-ya^{1,2}, CHEN Shuang¹, YANG Gui-shan¹

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: On the basis of the needs of national land space integration theory and method, the paper explores the system optimization method of urban ecological space adapting to the local development characteristics of China's rapidly urbanized areas. (1) Firstly, from the perspective of landscape or land composition based on CHANS (coupled human and nature system), the elements of urban ecological space system are deconstructed as ecological space and urban space. Then, the process framework of urban ecological space conflict analysis is established, which includes three aspects: conflict source, conflict area and conflict impact. The conflict source refers to the driving force of urban spatial growth and the source of ecological spatial change. The pressure of urban spatial change on ecological space results in the formation of ecological spatial conflict area under the conflict source. The consequences of various urban ecological functions (processes) are caused by conflict factors and conflict areas. Lastly, the way of system optimization is proposed based on the systematic diagnosis of conflict process and causes. (2) The case study of rapid urbanization shows that the first conflict source of social and economic activities in urban ecological space conflict is not prominent, and the policy driving force constitutes the main conflict source and runs through the whole conflict process. Through the analysis of road network and land layout planning process, the type and conflict mechanism of conflict area between urban and natural catchment areas are revealed, and the SWMM model is used to simulate and identify four flooding types and key causes. (3) Therefore, the system optimization objectives of urban ecological space are constructed respectively for conflict sources, conflict areas and conflict impact. The traditional optimization objectives aim at the drainage process and facilities formed by end-conflict impacts, and the core objectives aim at the key causes of formation of flooding areas, i.e. the enhancement of storage function and reconstruction of spatial elements in conflict areas of urban ecological space change. The fundamental optimization objectives aim is to change system, policy and planning of urban ecological space. The spatial optimization framework consisting of three types of main functional optimization areas, six types of key points and five types of key channels is identified for the case area. The framework of conflict analysis and the method of system optimization in the paper provide reference for the study of national land spatial integration. The case study covers the succession process of international stormwater management as a whole, which is helpful for the local understanding of the current large-scale land development transformation and the concept of sponge city construction.

Keywords: urban ecological space; conflict analysis; system optimization; national land integration; rapid urbanization