

# 生态城市规划方法启示下的海绵城市规划工具建立 ——基于敏感性和适宜度分析的海绵型场地选址模型\*

Urban Planning Tool for Sponge City Enlightened by Ecological Planning: Identifying Sites for Sponge Space in Changchun Based on the Evaluation of Sensitivity and Suitability

赵宏宇 解文龙 赵建军 王浩锋 ZHAO Hongyu, XIE Wenlong, ZHAO Jianjun, WANG Haofeng

**摘要** 生态城市规划领域中较为成熟的量化分析方法能够为海绵城市规划研究提供重要借鉴。在提炼生态城市规划和灾害威胁下建设用地规划研究框架的基础上,以长春为例,从多层筛选的视角探索基于敏感性和适宜度分析的海绵型场地选址研究方法。以TOPMODEL模型为核心进行水文敏感性的指数化计算,划定水文敏感区和水文低敏感区;通过综述国内外雨洪管理体系内涵与目标的发展历程,选定人口密度、空间整合度和城市蓝绿系统3个适宜度评价影响因子,并基于GIS的多因子加权分析法进行海绵型场地适宜度评价,将建设区域分为最适宜、较适宜等5类用地;最后将敏感性与适宜度分析进行叠加,选取具有最高敏感性和最高、较高适宜度的区域为海绵型场地选址区。以安全、社会、经济、生态等多价值提升为目标构建可视化的海绵型场地选址研究方法,为海绵城市在城市规划层面的实现提供了新思维。

**Abstract** The scientific quantitative analysis methods coming from ecological planning can be reference for sponge city. Taking Changchun as the research object, we explore the research method of identifying sites for sponge space based on analysis of sensitivity and suitability from multi-level filtering perspective. TOPMODEL is chosen to analyze hydrological sensitivity which is based on calculation of topographic index. Through reviewing development process of connotation and objective of rain-flood management system, three factors of population density, spatial integration and urban green system are ultimately selected for suitability evaluation. Based on analysis of sensitivity and suitability, we identify the areas with highest sensitivity and highest, higher suitability as the sites for sponge space. The visualized model of identifying sites for sponge space has been built, providing city managers with scientific and quantitative analysis.

**关键词** 海绵城市 | 生态规划 | 水文敏感性分析 | 适宜度评价 | 选址

**Keywords** Sponge city | Ecological planning | HSAs | Suitability evaluation | Identifying sites

文章编号 1673-8985 (2018) 03-0017-08 中图分类号 TU981 文献标志码 A

## 作者简介

### 赵宏宇

吉林建筑大学建筑与规划学院  
城乡规划系系主任,副教授  
寒地城市设计研究中心 副主任

### 解文龙

哈尔滨工业大学建筑学院  
博士研究生

### 赵建军

东北师范大学地理科学学院  
副教授,博士

### 王浩锋

深圳大学建筑与城市规划学院  
副教授,博士

## 0 引言

快速的城市化进程给城市生态系统带来一定的伤害,并产生了一系列生态环境问题,水生态问题就是其中重要的一部分。2013年以来我国已逐步确定在30座城市开展海绵城市试点工作,重点解决城市建设中的水生态安全问题。然而2016年7月特大暴雨给武汉、南京等城市带来的巨大损失揭示了海绵城市建设体系的病灶,即海绵城市规划决策的无证可循、无据可依,导致城市管理者在进行海绵城市建设时仍旧过度依赖传统的雨水管网建设。如武汉市近3

年投入近200亿进行城市排水系统的改造却收效甚微。这也与“坚持规划引领”的海绵城市建设基本原则相违背。借助大数据和智慧手段,依据已有的科学模拟方法,研究城市内涝的时空变化特征和海绵体的适宜建设场地,辅助制定相关规划政策,缓解现在无据可依的尴尬局面,将成为今后一段时间内有关海绵城市与生态城市研究的热点。

从目前已有的研究来看,海绵型场地选址问题由于受地形地貌、场地水文状况、人口分布、建造成本、可达性等多种因素影响,复杂程

\*基金项目:国家社会科学基金项目“我国北方传统村落生态治水智慧文化遗产的挖掘与保护”(编号16BH130)、住建部软科学研究项目“寒地城市老旧公园海绵体空间的绩效评价与建构策略研究”(编号2017-K4-028)、吉林省科技发展计划项目基金“寒地城市绿地空间海绵体提升机制研究”(编号20170101080JC)、吉林省社科基金“吉林省城市雨洪管理体系建设现状与发展对策研究”(编号2016B121) 资助。吉林省高等教育教学改革研究课题(JYT201601):基于供给侧的城乡规划专业课外实践教学平台模式研究。

度较高。我国海绵城市的研究和建设处于初期阶段,有关海绵型场地的选址研究也处在起步阶段;若直接借鉴国外SUSTAIN、SWMM等复杂模型,时间和金钱成本较高。

因此,本文在基于敏感性和适宜度分析的量化分析研究方法的启示下,通过借鉴灾害威胁下建设用地规划基于危险性和适宜度分析的研究方法,探索生成适用于中国本土的海绵型场地<sup>①</sup>选址模型研究框架,并从多层筛选的思维视角下构建了一种基于敏感性和适宜度分析的海绵型场地选址研究方法。本文选取长春市区作为研究对象,基于TOPMODEL模型进行水文敏感性分析,基于GIS的多因子加权分析法进行海绵型场地的适宜度评价,通过叠加敏感性与适宜度分析来确定海绵型场地的建设选址,构建一个可视化的海绵型场地选址模型。

## 1 基于敏感性和适宜度分析的海绵型场地选址研究框架构建

海绵城市建设的重点是强化规划的引领作用,本文基于城市规划、生态城市学、灾害学的相关理论,以交叉研究的方法出发,从多层筛选的思维视角尝试建立基于敏感性和适宜度分析的海绵型场地选址研究框架。

### 1.1 基于生态敏感性和生态适宜度分析的生态城市规划研究框架构建

基于已有海绵城市理论的研究<sup>[1-2]</sup>,海绵城市的目标是以生态基础设施、灰色基础设施等为核心,解决干旱、洪涝、水污染等灾害问题。同时作为海绵型场地核心组成的生态基础设施,属于生态城市领域的研究范畴。因此,本文尝试对生态城市规划领域中较为成熟的基于生态敏感性和生态适宜度分析的量化分析研究框架进行解析,为海绵型场地选址研究框架的生成提供参考。

敏感性和适宜度分析的研究方法是生态城市规划中用地评定的核心内容,作为生态城市规划的基础分析和重要规划依据已被广泛应用于实践。针对生态城市规划的敏感性分析,需要通过探讨生态敏感性分析因子、分析方法和指

标体系的构建等,划定城市发展中的最敏感区、次敏感区、弱敏感区和不敏感区。该分析可反映区域发生生态环境问题的难易程度,即敏感性高的地域在进行开发时需提升保护力度,降低开发强度。用地适宜度分析是在敏感性分析的基础上进行的,其分析评议区域为敏感性分析结果中的次敏感区及弱敏感区<sup>[3-4]</sup>,并针对某类特定用途划分适宜度等级(图1)。

### 1.2 基于灾害危险性和用地适宜度分析的建设用地规划研究框架构建

由于海绵型场地致力于解决的城市干旱、洪涝问题属于自然灾害学领域的研究范畴。本文借鉴灾害威胁下,建设用地规划中基于灾害危险性和用地适宜度分析的研究框架;以此增强海绵型场地选址研究方法的科学性。

在灾害威胁下的建设用地规划方法研究中,最为普遍的是基于灾害危险性区划与用地适宜度评定的工作方法。由于自然灾害的种类繁多,本文以地质灾害中基于危险性区划和适宜度分析的研究方法为例进行研究方法与工作程序的提炼。地质灾害危险性区划着重从自然灾害角度出发,基于危险性指标划定高危险区、较高危险区、中等危险区、较低危险区和低危险区,而用地适宜度分析是在危险性分析的基础上进行,其分析评议区域为城乡建设用地的低危险区及较低危险区。在此基础上,为寻求最佳的可行用地布局方案,对土地利用的适宜度大小进行评议,生成城乡建设用地的适宜度分布图(图1)<sup>[5-6]</sup>。

### 1.3 多层筛选视角下的海绵型场地选址研究框架构建

从多层筛选的视角来看生态城市规划中的敏感性、适宜度分析,基于灾害威胁下建设用地规划中的危险性区划和适宜度来分析研究框架。首先是第一级别的危险性或敏感性分析筛选工作,包括:危险性或敏感性分析评价因子的选择,评价因子权重的确定,分析模型的构建,不同程度危险区或敏感区的划分。其次是基于危险性或敏感性分析结果进行第二级别的用地

适宜度分析筛选工作,包括:适宜度分析评价因子的选择,评价因子权重的确定,适宜度分析模型的构建,针对特定功能划定适宜度等级。最后是进行危险性或敏感性和适宜度分析的筛选结果叠加,对相应的规划目标和对策进行研究。

针对海绵型场地的选址研究,首先需要针对问题区域进行识别,即根据水文敏感性分析及水文敏感区的划定标准,找到潜在的水文威胁区,然后基于筛选出的问题区域进行适宜度分析评价得到不同海绵型场地的适宜度等级,选取具有最高敏感性和最高、较高适宜度的区域为海绵型场地选址区域,最终构建了基于敏感性和适宜度分析的海绵型场地选址研究框架(图1)。

## 2 模型操作方法的选择和研究范围的选定

### 2.1 敏感性分析模型的选取: TOPMODEL 水文模型

目前,国内外涌现出大量有关城市水文模拟分析的研究模型,如SWMM、LISFLOOD-FP、TOPMODEL、HSPF、CREAMS、GLEAMS、ANSWERS等。这些研究模型主要集中在关注水量问题和水质问题上,但适用领域、优劣势、特点等各有不同<sup>[7-11]</sup>。通过对比可以发现,基于地形指数的TOPMODEL模型相较于其他模型的优势为:(1)将分析结果指数化,符合水文敏感性分析按照敏感程度进行排序的需要;(2)基于径流产生的变动产流面积理论,符合海绵城市的源头控制原则;(3)地形指数的含义同时包含产生径流量和污染的潜力;(4)模型结构简单,优选参数少,可操作性强。因此本文选取TOPMODEL水文模型来计算地形指数(地形指数的计算是TOPMODEL模型的核心<sup>②</sup>),以此得到研究区域的水文敏感性分析,继而划定水文敏感区(HSAs)<sup>[12-13]</sup>。

针对地形指数( $\lambda$ )的计算方法,目前常用的计算公式有 $\lambda = \ln(a/\tan\beta)$ 与 $\lambda = \ln(a/\tan\beta) - \ln(KsD)$ 两种,本文采用高度简化的地形指数计算公式,即 $\lambda = \ln(a/\tan\beta)$ <sup>[12]</sup>。其中a为通过单位等高线长度的进入栅格单

注释 ①海绵型场地是对应海绵城市而提的,是指能够将70%的降雨就地消纳和利用的场地。

②在同一研究区域内,具有相同地形指数值的点对降雨具有相同的水文响应,且具有较大地形指数值的点,将首先趋于饱和,暗示着潜在的产流面积。

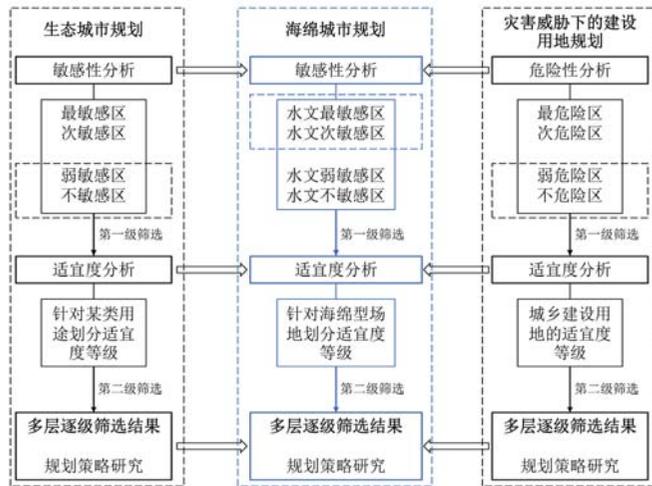


图1 基于敏感性和适宜度分析的海绵型场地选址研究框架  
资料来源:笔者自绘。

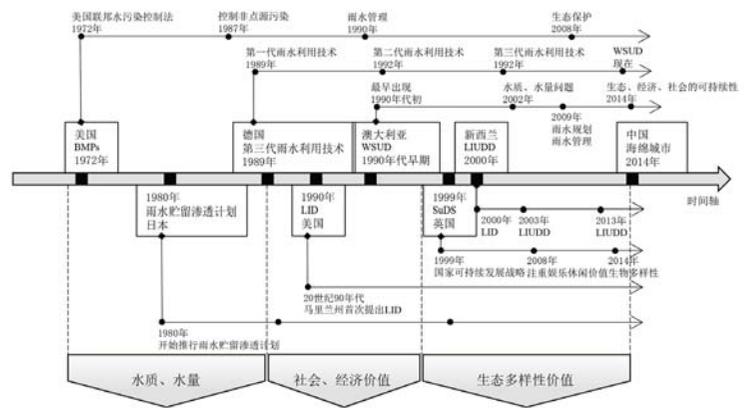


图2 国内外雨洪管理体系的内涵与目标发展逻辑图  
资料来源:笔者自绘。

表1 长春市不同土壤类型的渗透系数

土壤类型	黑土	草甸土	草甸黑土	水稻土	石灰性草甸土
土壤渗透系数 $K_s$ (m/D)	0.123	0.117	0.119	0.069	0.069
不透水层深度 (cm)	181.000	120.000	161.000	111.000	111.000

资料来源:中国土壤数据库。

元的汇水面积 ( $\text{km}^2$ ),  $\tan \beta$  为栅格单元的坡度,  $K_s$  为土壤的渗透系数 (m/D),  $D$  为土壤不透水层深度 (cm)。主要基于 (1) 长春市不同土壤类型的土壤渗透系数 ( $K_s$ ) 与不透水层深度 ( $D$ ) 差别极小, 其土壤分布构成极为单一, 主要为暗棕壤和黑土, 且其主要的土壤类型黑土、草甸土、草甸黑土的土壤渗透系数相差不大, 对地形指数的差异性影响小 (表1); (2) 土壤参数  $\ln(K_s D)$  与地形指数  $\ln(a/\tan \beta)$  的数量级差距巨大, 黑土、草甸土等均属黏质土壤, 土壤渗透率低, 将土壤渗透系数与不透水层深度参与地形指数的计算中, 发现  $\ln(K_s D)$  值仅为  $\ln(a/\tan \beta)$  值的千分之一, 土壤性能参数对地形指数的影响可以忽略不计。

## 2.2 海绵型场地适宜度评价方法的构建： 因子加权图层叠加

叠加分析方法是生态城市规划中最常用的进行适宜度分析的方法, 具体分为直接叠加法、因子加权评分法和因子组合法3种类型, 本文选择基于GIS的因子加权图层叠加法作为海

绵型场地的适宜度分析方法。主要原因是因子加权分析法克服了直接叠加法中等权相加的缺点, 充分考虑各种因子对土地特定利用方式的影响程度之间的差异, 计算结果更加准确; 同时, 与因子组合法相比, 加权求和法在保证较高结果准确性的同时, 可操作性较强。

### 2.2.1 海绵型场地建设目标的确定与评价 因子的选择

针对城市洪涝、干旱、水污染等问题, 国外很早就开始探索相应的解决途径, 其中最具有代表性的包括起源于北美的最佳管理实践 (BMPs)、美国在BMPs基础上推行的低影响开发 (LID)、英国的可持续城市排水系统 (SUDS) 等。这些理念虽然称谓、侧重点与发展阶段不同, 但其内涵与目标的过程发展逻辑具有内在的一致性: 初期关注水质、水量等直接危害人类生命和财产安全的问题, 中期关注解决水质、水量问题过程中所带来的经济和社会价值的提升, 现阶段大多以生物多样性的保护和提升作为建设成功与否的标准 (图2) [14-16]。

从国内外雨洪管理体系内涵与目标的过

程发展逻辑来审视海绵城市的建设与发展, 海绵型场地建设的首要目标应是解决城市中突出的水质、水量问题, 从而消除造成巨大人民生命、社会经济财产损失的水安全问题。其次需重视海绵型场地建设所带来的周围地区社会、经济价值的提升。最后需重视海绵型场地建设对生态多样性价值的保护和提升作用 (图3)。根据海绵型场地建设安全保障与价值提升目标层的要求, 将其分别用可操作的城市空间要素进行体现, 并最终选择人口密度、空间整合度、蓝绿系统3个评价因子进行海绵型场地的适宜度评价 (图4)。

#### (1) 人口密度评价因子的选定

人口密度因子被用来表征“人的生命安全”这一价值目标。人的生命安全始终是城市规划建设首先需要考虑的要素, 通常来说人口越稠密的地区发生灾难时受到的生命损失也越多, 同时人口密度高的区域受到灾害影响时容易产生连锁反应从而影响更加广泛的区域。这就意味着在海绵城市的建设过程中, 人口越稠密的地区越需要进行海绵化的提升与改造, 能最大程度、最高效率地减少损失。

#### (2) 空间整合度评价因子的选定

空间整合度因子作为“社会经济价值提升”“社会经济财产的安全”等目标的综合表征, 并且空间整合度越高的地区越需要进行海

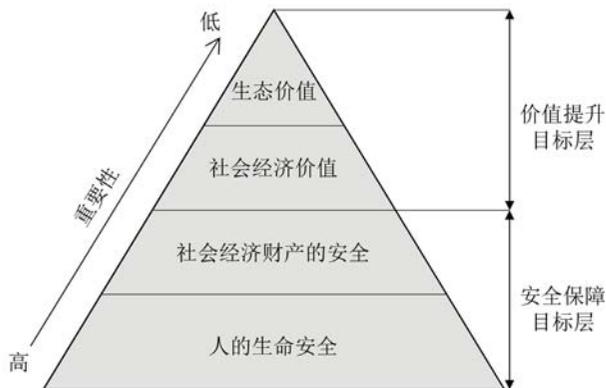


图3 海绵型场地建设的目标层级图  
资料来源:笔者自绘。

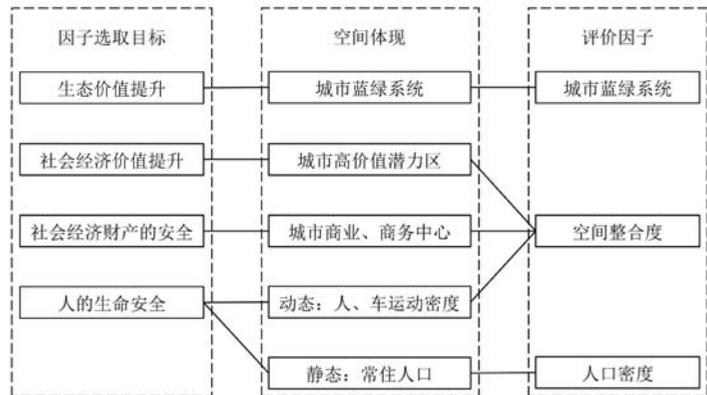


图4 海绵型场地适宜度评价因子的选择图  
资料来源:笔者自绘。

海绵型场地的建设。在目前已有的空间整合度研究中,整合度高的区域标志着城市中的高价值潜力区、城市的商业与商务中心或人流车流高度聚集区域等<sup>[17-18]</sup>。而这3类城市空间的海绵型场地建设对于实现社会经济价值的提升、社会经济财产安全的保障以及人生命安全的保障具有关键性的作用。

①高价值潜力区

部分学者利用空间句法的整合度计算来挖掘城市中具有成为社会经济高价值区潜力的区域,来辅助实现老城区、棚户区等城市更新项目的规划决策,并获得了成功。我国的海绵城市建设需要结合老城区、棚户区、老旧小区有机更新等进行,充分发挥海绵型场地建设对于城市生态活力和人气吸引力的注入过程中的重要作用。

②城市的商业商务中心

城市的商业商务中心一般都是其社会经济价值最高的地区,对安全性的要求也最高。如2012年10月29日袭击纽约曼哈顿的桑迪飓风,导致纽约证券交易所连续两天关闭休市,直接导致美国国内的股票和期权交易的停止交易,直接和间接损失高达50亿美元。对中国来说亦是如此,在高社会经济价值区和高人流车流运动密度区建设海绵型场地来保障其水安全至关重要。

③人流车流高度聚集区域

人流车流越稠密的地区发生灾难时受到的生命损失也就越高,同时由于高密度地区往往是城市的中心区域,灾害发生会直接破坏城

表2 专家问卷

	人口密度	空间整合度	蓝绿系统
人口密度	1	—	—
空间整合度	—	1	—
蓝绿系统	—	—	1

资料来源:笔者自制。

表3 影响因子相对权重值

影响因子	权重 (wi)
人口密度	0.5695
空间整合度	0.3331
蓝绿系统	0.0974

资料来源:笔者自制。

市中心人流车流通过性最高的路径,大量的人流车流将会难以进行逃生,从而产生巨大损失与灾害的连锁反应。如2015年12月至2016年1月的英国洪涝事件后,英国政府开启了基于空间句法的伦敦防洪研究,其主要目的即是分析伦敦的街道网络受灾后的运转情况,并用于灾害管理和重建规划。

而从空间整合度分析在应对洪涝灾害的应用来看,英国的吉尔 (Gil), 斯坦巴赫 (Steinbach) 等人在2008年即利用空间句法对洪涝造成的城市街道网络影响进行可视化分析和研究<sup>[19]</sup>。2015年12月至2016年1月的英国洪涝事件使得空间句法公司再次开启伦敦的防洪研究,分析表明当空间网络中的一个或多个连接性道路因遭遇洪水而造成损失时,这些损失带来的影响与这些连接性道路在整个空间网络结构层次中的重要程度成正比,并且该模型被证明适用于灾害管理和重建规划。因此,本文选择将基于空间句法的空间整合度指标作为海绵型场地选址适宜度评价的影响因子之一。

(3) 蓝绿系统评价因子的选定

依托城市现有蓝绿系统来建设海绵型场地

有利于快速实现“生态价值提升”的目标。蓝绿系统作为城市中现有最大的生态系统要素,是海绵城市建设的重要载体,同时海绵城市的规划目标和建设目的又对城市的蓝绿系统提出了更加复合、多元、全面的要求<sup>[20]</sup>。蓝绿系统与海绵城市虽在空间功能结构布局上存在差异,但两者在规划与建设过程中可以进行相互反馈与指导,城市蓝绿系统在海绵城市体系中担任主力角色。

2.2.2 评价因子权重的确定

本文选取层次分析法进行评价因子权重的计算,邀请15名专家在互不知情、各自独立的情况下对各个因素进行两两比较 (表2),并通过综合比较得到最终比较结果。将影响因子间两两比较的数据输入软件Yaahp中,得到各个因子的相对权重值,作为后续计算依据 (表3),同时验证其一致性,经计算其整合度 (C.I.值) 为0.037,满足小于0.1的基本标准。

2.3 研究范围的选定

本文以长春市绕城高速为边界作为研究对象范围 (图5),面积约523 km<sup>2</sup>,研究

区域包含几乎全部的建成区,占建成区总面积的80%以上,其中建成区的绿化覆盖率达41.5% (2014年长春市园林绿化局统计)。

### 3 以长春为例的模型模拟结果分析

#### 3.1 水文敏感性分析及其结果的有效性验证

##### 3.1.1 地形指数计算

地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 的计算主要包括汇水面积 $a$ 和坡度 $\tan\beta$ 的计算。采用30 m分辨率的DEM单流向算法对研究区域的径流路径进行计算,结合GIS水文工具包对DEM高程数据进行处理,得到 $a$ 的计算结果(图6)<sup>[12]</sup>。坡度的计算受到径流路径算法的影响,根据汇水面积中单向流法的计算结果,通过水文工具包对



图5 研究对象范围

资料来源:《长春市城市总体规划2011—2020年》。

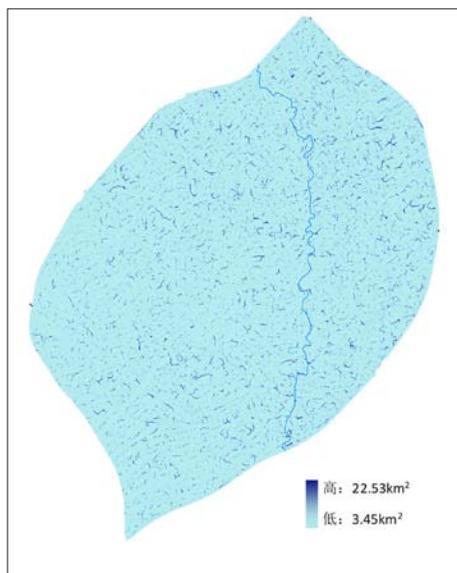


图6 汇水面积图

资料来源:笔者自绘。

DEM高程数据再次处理,得到 $\tan\beta$ 的计算结果(图7)。根据 $a$ 和 $\tan\beta$ 的计算结果,利用地形指数的计算公式得到地形指数的计算结果(图8)。将网格单元的地形指数看作随机变量,经统计分析可得地形指数的分布。研究区的地形指数最高值为16.93,最低值为3.54,平均值为7.61。

##### 3.1.2 水文敏感区划定

本文主要关注水文敏感区的分布情况,即具有最高地形指数值的单元集。为了确定可操作数量的水文敏感区域,本文参考切尔西(Chelsea)、柯尔斯顿(Kirsten)等人划定水文敏感区的地形指数取值划分方法,选取研究区内具有最高地形指数值(即大于等于1.5倍平均值)的单元作为水文敏感区,即取值在11.42—16.93的单元集,共计12 868个栅格单元,约占研究区域的2.21%;具有较低地形指数值(即小于1.5倍平均值)的单元作为水文低敏感区,即取值在3.54—11.42的单元集,共计567 157个栅格单元,约占研究区域的97.79%。经划分不同地形指数区间,将长春市划分为水文敏感区和水文低敏感区2类(图9)。

##### 3.1.3 分析结果灾害拟合度检验

为了验证长春市水文敏感性分析的准确性,本文将2016年6月召开的长春市城区防汛工

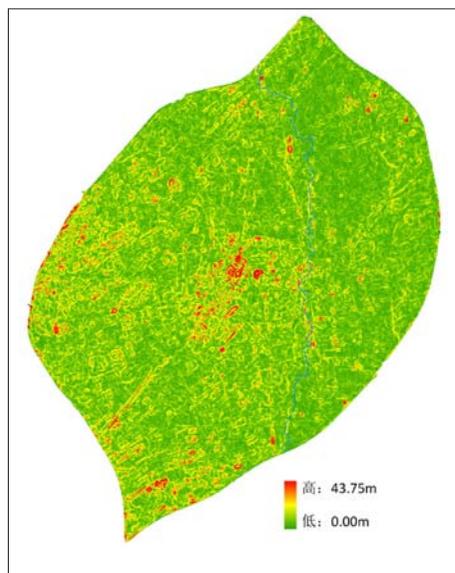


图7 坡度图

资料来源:笔者自绘。

作会议上公布的66处暴雨天气易涝点数据与水文敏感性分析结果进行匹配。其中59个易涝点与水文敏感性的分析结果相吻合,7个易涝点与分析结果不吻合,分析结果的灾害拟合度高达89.4% (图10)。由此证明,水文敏感性分析能够在很大程度上准确模拟城市的内涝产生与形成机制,从而判别出水文敏感区的分布区域,有效指导长春海绵城市建设。

#### 3.2 海绵型场地适宜度评价及其结果分析

根据上文确定的适宜度评价因子,针对各个因子的原始信息进行等级化、数量化评价。本次适宜度评价以最适宜建设海绵型场地为目标,将等级确定为最适宜、较适宜、适宜、较不适宜、不适宜5个等级,对应数值由高到低分别为4, 3, 2, 1, 0, 最适宜建设海绵型场地为4分,最不适宜建设海绵型场地的为0分。依据单因子评级,运用GIS软件绘制单因子分析图,建立基础空间数据库,为权重计算及划分适宜度等级提供数据基础<sup>[21-22]</sup>。

##### 3.2.1 人口密度因子评价图的绘制

本文的研究区域为以长春市绕城高速为边界,包括5个城区和4个开发区,共下辖276个街道社区和44个村(乡)镇。以2012年长春市范围内开展的街道社区、镇(乡)村为单元

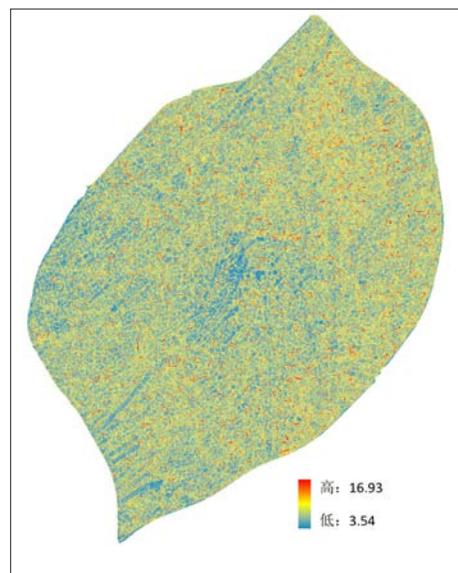


图8 地形指数分布图

资料来源:笔者自绘。

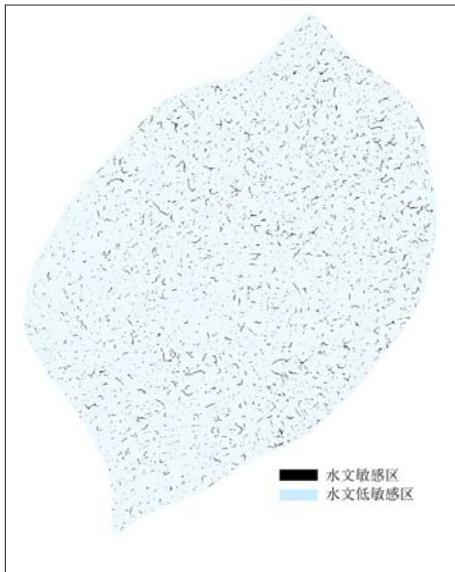


图9 水文敏感性分析评价图  
资料来源:笔者自绘。

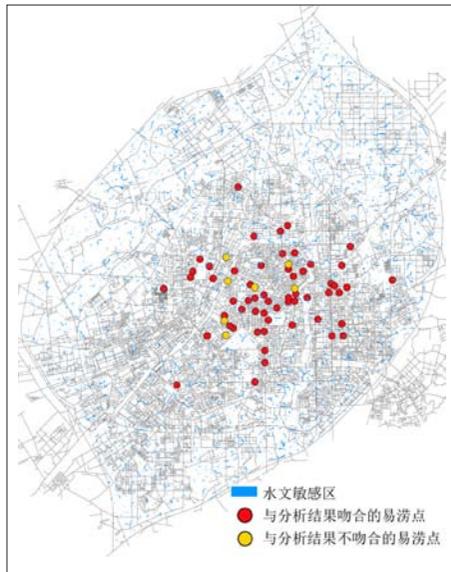


图10 拟合度检验图  
资料来源:笔者自绘。

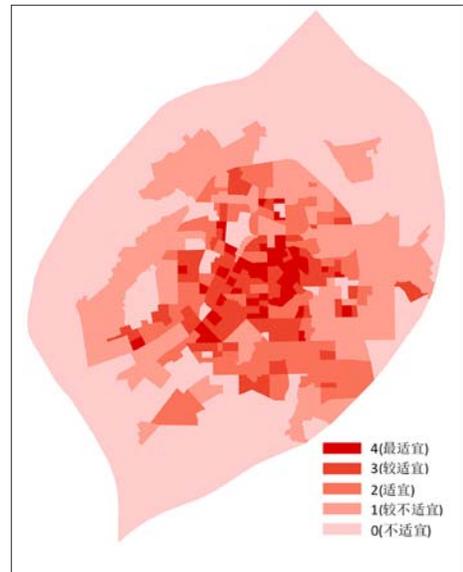


图11 长春市人口密度因子评价图  
资料来源:笔者自绘。

的人口数据调查与统计工作作为基础,结合各单元的界限,借助GIS技术对长春市的人口密度指标进行定量分析,其中各单元的人口数据大致可分为20个级别。将20个级别的人口密度数据分布图按照涵盖等量街道社区个数的方式划分成5类:选取人口密度值在322—4 108人/hm<sup>2</sup>范围内的区域为最适宜区域,包含67个街道社区;人口密度值在165—321人/hm<sup>2</sup>范围内的区域为较适宜区域,包含62个街道社区;人口密度值在73—164人/hm<sup>2</sup>范围内的区域为适宜区域,包含60个街道社区;人口密度值在12—72人/hm<sup>2</sup>范围内的区域为较不适宜区域,包含57个街道社区;人口密度值在0—11人/hm<sup>2</sup>范围内的区域为不适宜区域,包含64个街道社区。运用GIS技术按照分类标准进行重分类处理,得到人口密度因子评价图(图11)。

### 3.2.2 空间整合度因子评价图的绘制

空间句法模型对于不同尺度的整合度分析,可以判断出不同尺度空间潜力值的分布状况,尤其可以识别出高发展潜力的地区。因此本文运用Depthmap软件对长春市的轴线模型进行1 000 m(代表社区级别的高价值区域)、5 000 m(代表区域级别的高价值区域)、10 000 m(代表城市级别的高价值区域)3个不同半径大小的整合度分析<sup>[23-24]</sup>。基于GIS

表4 整合度分析图重分类标准

分析半径	重分类标准	最适宜	较适宜	适宜	较不适宜	不适宜
R=1 000 m	整合度的高低	254—317	190—253	127—189	63—126	0—62
	重分类赋值	4	3	2	1	0
R=5 000 m	整合度的高低	2 253—2 813	1 691—2 252	1 130—1 690	568—1 129	6—567
	重分类赋值	40	30	20	10	0
R=10 000 m	整合度的高低	5 472—6 834	4 109—5 471	2 746—4 108	1 382—2 745	18—1 381
	重分类赋值	400	300	200	100	0

资料来源:笔者自制。

分别对不同半径的轴线模型整合度分析结果进行栅格转点的处理,再执行克里金指令即可得到呈现连续性分布的整合度分析结果,然后对其分别进行相等间隔的重分类(表4)。

对重分类后的半径为1 000 m、5 000 m、10 000 m的整合度分析图直接进行栅格叠加计算,并对计算后的结果进行综合性的重分类处理。其中将计算结果数值为444、344、224、114等包含的数字最大值为4的区域划分为最适宜区域;将计算结果为333、231、113等包含的数字最大值为3的区域划分为较适宜区域;将计算结果为222、122、12等包含的数字最大值为2的区域划分为适宜区域;将计算结果为111、100、1等包含的数字最大值为1的区域划分为较不适宜区域;将计算

结果数值为0的区域划分为不适宜区域。运用GIS重分类后,即可得到长春市整合度因子评价图(图12)。

### 3.2.3 蓝绿系统因子评价图的绘制

蓝绿系统作为城市最大的生态系统要素,是海绵城市建设的重要载体。本文以2012年的长春市总体规划用地现状为基础,提取长春市绿地区域和水体系统的矢量图层。同时考虑到河湖滨岸缓冲带对于防止面源污染、防洪排涝、改善河湖生境方面的重要作用,在GIS中对水体系统进行赋予其两侧各30 m缓冲区的操作,将水体系统及其缓冲区都纳入考虑范围之内<sup>[25]</sup>。最后将绿地系统图层和水体系统及其缓冲区图层进行合并,并对其赋值。其中将蓝绿系统范围内的区域定义为最适宜区域,将蓝绿系统范围

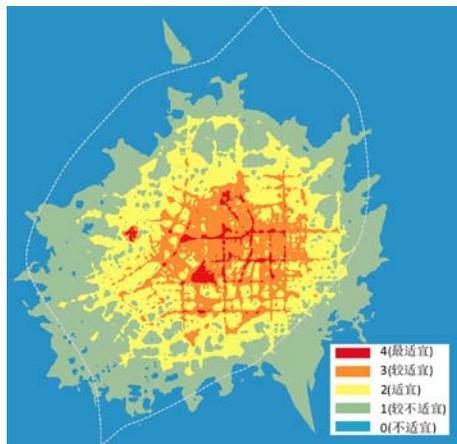


图12 长春市区空间整合度因子评价图  
资料来源:笔者自绘。

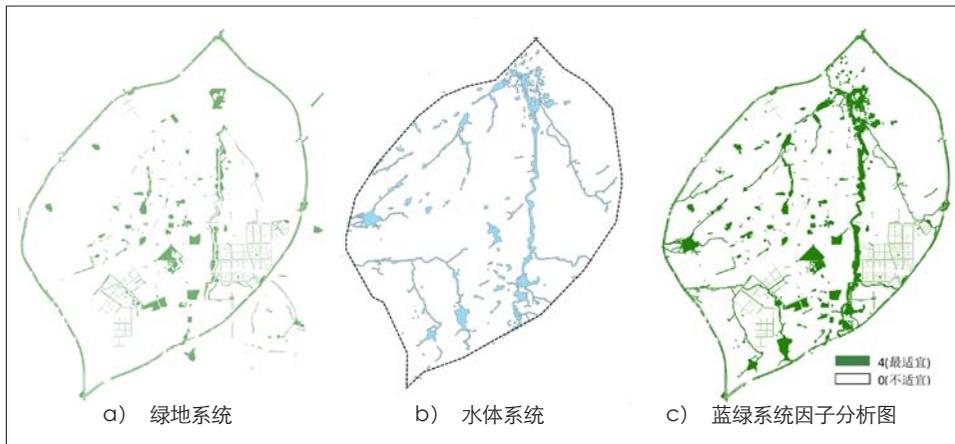


图13 长春市区蓝绿系统因子评价图  
资料来源:笔者自绘。

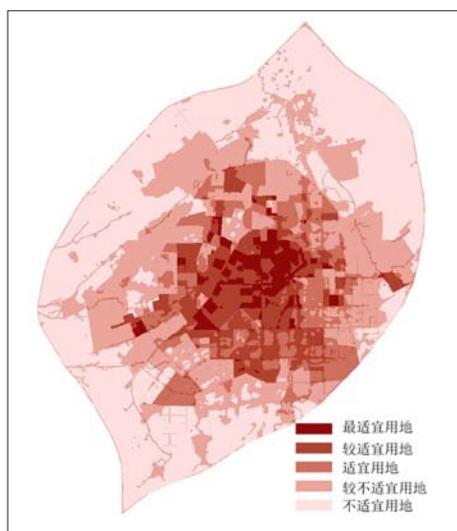


图14 海绵型场地适宜度评价图  
资料来源:笔者自绘。

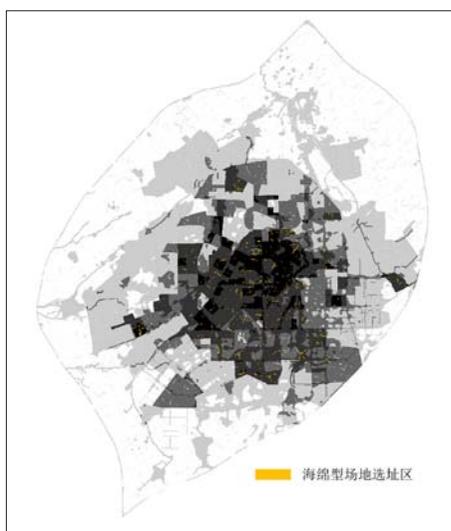


图15 长春市区海绵型场地选址图  
资料来源:笔者自绘。

之外的区域定义为不适宜区域,重分类之后生成长春市区蓝绿系统因子评价图(图13)。

### 3.2.4 多因子加权叠加的适宜度评价及适宜等级的划定

基于上文确定的各评价因子权重值,运用GIS对上述单因子评价图进行多因子加权叠加的适宜度评价分析后得出:研究区海绵型场地的适宜度评价价值(SL)在0.00—4.00之间变化,用自然间断点分级法取0.00—0.38—1.29—2.04—2.76—4.00区段作为适宜度分级评价标准,即最适宜用地的评价价值区间为 $2.76 < SL \leq 4.00$ ,较适宜用地的评价价值区间为 $2.04 < SL \leq 2.76$ ,适宜用地的评价价值区间为

$1.29 < SL \leq 2.04$ ,较不适宜用地的评价价值区间为 $0.38 < SL \leq 1.29$ ,不适宜用地的评价价值区间为 $0.00 < SL \leq 0.38$ 。经划分不同评价价值区间,将海绵型场地建设适宜区域分为5类,其适宜度评价结果如图14所示。

## 3.3 敏感性与适宜度分析的叠加与海绵型场地选址的确定

### 3.3.1 敏感性与适宜度分析的叠加

对水文敏感性分析评价图与海绵型场地适宜度评价图分别进行重分类并赋值。将水文敏感区赋值为2,水文低敏感区赋值为1;将最适宜用地赋值为50,较适宜用地赋值为40,适宜用地

赋值为30,较不适宜用地赋值为20,不适宜用地赋值为10。将重分类之后的敏感性与适宜度分析图直接进行叠加,其评价结果如表4所示。

### 3.3.2 海绵型场地选址的确定

从基于敏感性和适宜度分析的研究方法出发,选择海绵型场地建设最适宜区域与较适宜区域中的潜在高水文敏感区作为长春市区海绵型场地的选址区域,对应到海绵型场地选址综合评价图上,即为综合评价值为52和42的研究区域。其中综合评价值为52的栅格单元有425个,综合评价值为42的栅格单元有1 250个,共计1 675个 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的栅格单元(表5),约占研究区域的0.31%。这些区域具有最高的水文敏感性和最适宜的海绵型场地建设条件,是长春市区进行海绵型场地建设的选址区域(图15)。

## 4 结语

海绵城市的建设能够快速实现生态城市建设目标中的水生态安全问题,而海绵城市建设的关键原则是坚持规划的引领作用,作为海绵城市建设先行军的30个国家级试点城市在规划决策过程中亟需科学的量化分析技术进行支撑。本文以长春市区为例,从多层筛选的思维视角提出了基于敏感性与适宜度分析进行海绵型场地选址的研究方法,并对水文敏感性分析进行了灾害拟合度验证,证明其本土化应用的可行性和有效性。可视化的海绵型场地选址模型的构建,是运用智慧城市的定量分析手段从规

表5 综合评价值得分表

综合评价值	代表含义	栅格单元数量
52	水文敏感区与最适宜用地	425
51	水文低敏感区与最适宜用地	20 833
42	水文敏感区与较适宜用地	1 250
41	水文低敏感区与较适宜用地	55 707
.....	.....	.....
11	水文低敏感区与不适宜用地	227 320

资料来源:笔者自制。

划引领的角度为海绵城市规划决策提供科学而有效依据的创新性尝试,为海绵城市在城市规划层面的实现提供了新思维和新视角,极大地拓展了生态城市规划研究方法的应用范畴。

## 参考文献 References

- [1] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015(6):26-36.  
YU Kongjian, LI Dihua, YUAN Hong, et al. Sponge city: theory and practice[J]. City Planning Review, 2015(6): 26-36.
- [2] 车伍,赵杨,李俊奇,等.海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J].中国给水排水,2015(8):1-5.  
CHE Wu, ZHAO Yang, LI Junqi, et al. Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: basic concepts and comprehensive goals [J]. China Water & Waste Water, 2015(8): 1-5.
- [3] 李昂,赵天宇.基于生态敏感性评价的严寒地区林业村镇景观生态安全格局研究[J].中国园林,2016(3):85-89.  
LI Ang, ZHAO Tianyu. Research on the landscape ecological security pattern of forestry villages and towns in cold regions based on ecological sensitivity evaluation[J]. Chinese Landscape Architecture, 2016(3): 85-89.
- [4] RENGHER R, CIMIETTA A. Geographical information system as an evaluation tool[J]. The American Journal of Evaluation, 2002, 23(4): 469-479.
- [5] 闫艳.北京延庆新城规划区地质灾害及其危险性区划研究[D].北京:中国地质大学北京,2011.  
YAN Yan, Research of geological hazards and risk division for new town planning of Beijing Yanqing[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [6] 王晨懿.地质灾害威胁下山地农村居民点用地规划适宜性评价及空间模拟研究[D].成都:四川农业大学,2011.  
WANG Chenyi, Suitability evaluation and spatial simulation of mountainous residential area planning against geological hazards[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2011.
- [7] COLLINS M, STEINER F, RUSHMAN M. Land-use suitability analysis in the United States: historical development and promising technological achievements[J]. Environmental Management, 2001, 28(5): 611-621
- [8] 刘勇,张韶月,柳林,等.智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述[J].地理科学进展,2015(4):494-504.  
LIU Yong, ZHANG Shaoyue, LIU Lin, et al. Research on urban flood simulation: a review from the smart city perspective[J]. Progress in Geography, 2015(4): 494-504.
- [9] 丁雨淋.水文变化驱动的暴雨—洪涝灾害主动模拟方法[D].武汉:武汉大学,2014.  
DING Yulin, Hydrological changes driven flood disaster simulation method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [10] RENGHER R, CIMIETTA A. Geographical information system as an evaluation tool[J]. The American Journal of Evaluation, 2002, 23(4): 469-479.
- [11] COLLINS K, LAWRENCE. Opportunities and challenges for managing nitrogen in urban storm water: a review and synthesis. Ecological Engineering, 36(11): 1507-1519.
- [12] MARTIN C, BEURS K, JULIAN J, et al. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed[J]. Landscape & Urban Planning, 2015(140): 29-41.
- [13] AGNEW L, GÉRARD-MARCHANT P, COLLINS V, et al. Identifying hydrologically sensitive areas: bridging the gap between science and application[J]. Journal of Environmental Management, 78(1): 63-76.
- [14] 车伍,吕放放,李俊奇,等.发达国家典型雨洪管理体系及启示[J].中国给水排水,2009(20):12-17.  
CHE Wu, LYU Fangfang, LI Junqi, et al. Typical stormwater and flood management systems in developed countries and their inspiratio[J]. China Water & Waste Water, 2009(20): 12-17.
- [15] 车伍,闫攀,赵杨,等.国际现代雨洪管理体系的发展及剖析[J].中国给水排水,2014(18):45-51.  
CHE Wu, YAN Pan, ZHAO Yang, et al. Development and analysis of international updated storm water management systems[J]. China Water & Waste Water, 2014(18): 45-51.
- [16] 程江,徐启新,杨凯,等.国外城市雨水资源利用管理体系的比较及启示[J].中国给水排水,2007(12):68-72.  
CHENG Jiang, XU Qixin, YANG Kai, et al. Comparison of foreign urban rainwater resource utilization management systems and some inspiration[J]. China Water & Waste Water, 2007(12): 68-72.
- [17] HILLIER B. Cities as movement of economies[J]. Urban Design International 1996(1): 41-60.
- [18] READ S. Flat city: a space syntax derived urban movement network model[C]//A.v.Nes (ed.) the 5th Space Syntax Symposium Proceedings. Delft: Delft University Press, 2005.
- [19] GIL J, STEINBACH P. From flood risk to indirect flood impact: evaluation of street network performance for effective management, response and repair[C]//1st International Conference on Flood Recovery Innovation and Response (FRIAR). 2008.
- [20] 胡楠,李雄,戈晓宇.因水而变——从城市绿地系统视角谈对海绵城市体系的理性认知[J].中国园林,2015(6):21-25.  
HU Nan, LI Xiong, GE Xiaoyu. Change with water: the rational cognition of sponge city system from the perspective of urban green space[J]. Chinese Landscape Architecture, 2015(6): 21-25.
- [21] 杨柳.生态适宜度评价在城市规划中的应用——以上海南桥新城总体规划为例[J].上海城市规划,2012(6):35-39.  
YANG Liu. Application of ecological suitability assessment in urban planning: a case study on master plan of Nanqiao, Shanghai[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2012(6): 35-39.
- [22] 石垚,张微,任景明,等.生态敏感区旅游开发适宜性评价及生态制图方法[J].生态学报,2015(23):7887-7898.  
SHI Yao, ZHANG Wei, REN Jingming, et al. Ecological suitability assessment and eco-mapping for tourism development in an Eco-sensitive region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7887-7898.
- [23] 肖扬, CHIARADIA A, 宋小冬.空间句法在城市规划中应用的局限性及改善和扩展途径[J].城市规划学刊,2014(5):32-38.  
XIAO Yang, CHIARADIA A, SONG Xiaodong. A discussions on implementing space syntax method in urban planning[J]. Urban Planning Forum, 2014(5): 32-38.
- [24] 伍敏,杨一帆,肖礼军.空间句法在大尺度城市设计中的运用[J].城市规划学刊,2014(2):94-104.  
WU Min, YANG Yifan, XIAO Lijun. The usage of space syntax in general urban design[J]. Urban Planning Forum, 2014(2): 94-104.
- [25] 侯利萍,何萍,钱金平,等.河岸缓冲带宽度确定方法研究综述[J].湿地科学,2012(4):500-506.  
HOU Liping, HE Ping, QIAN Jinping, et al. A review on determination methods for width of riparian buffer[J]. Wetland Science, 2012(4): 500-506.