

城市雨水管理

# 基于 GIS 的雨水花园建设适宜性评价方法研究

缪遇虹<sup>1,2</sup>, 张质明<sup>1,2</sup>, 张胜雷<sup>3,4</sup>

(1. 北京建筑大学 北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 3. 中国城市科学研究会 数字城市专业委员会, 北京 100835; 4. 中国城市科学研究会 数字城市工程研究中心, 北京 100835)

**摘要:** 为了通过优化选址来提高当前海绵城市的源头控制效果,缓解用地紧张,同时降低建设难度、减少成本,以雨水花园为例,提出了一种基于 GIS 水文分析和叠加分析的建设用地适宜性评价方法,可用于识别和提取适合建设或改造雨水花园的区域。采用该方法,以镇江市某区域为例进行分析,结果表明,适宜雨水花园的建设用地面积约占总面积的 19.4%;适宜用地主要以林地和草地为主,约占 80%,主要分布在古运河入河口及岸边的带状绿地、研究区东部和东南部等未开发用地以及研究区中心地带政府办公用地内部绿地,主道路两旁区域分布也较多。利用 GIS 软件在优化指标和权重的基础上可较准确、快速地发掘场地特性,进行雨水花园的建设适宜性评价分析,将分析结果进行可视化和指数化呈现,为海绵城市规划建设的选址提供一定支持。

**关键词:** 海绵城市; 雨水花园; 建设适宜性; GIS; 空间分析

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)03-0102-07

## Evaluation Method of Rainwater Garden Construction Suitability Based on GIS

MIAO Yu-hong<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Sheng-lei<sup>3,4</sup>

(1. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Digital City Specialized Committee, China Urban Scientific Research Society, Beijing 100835, China; 4. Digital City Engineering Research Center, China Urban Scientific Research Society, Beijing 100835, China)

**Abstract:** In order to improve the source control effect of sponge city, alleviate the shortage of land, reduce the construction difficulty and cost by optimizing the site selection, a method for evaluating the suitability of construction land based on hydrologic analysis and overlay analysis of GIS was proposed in rainwater garden construction, which could be used to identify and extract the area suitable for construction or transformation of rainwater garden. The method was applied in an area of Zhenjiang City. It was found that the suitable construction area of rainwater garden accounted for about 19.4% of the total

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8154044); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X18244); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202006)

通信作者: 张质明 E-mail: zhangzhiming@bucea.edu.cn

area. The suitable land was mainly woodland and grassland, accounting for about 80%, mainly distributed in the ribbon green space in the estuary and on the bank of the ancient canal, the undeveloped land in the east and southeast, the green space inside the government office area in the central area of the study area, and the area on both sides of the main roads. On the basis of optimizing the index and weight, GIS software could be used to accurately and quickly explore the site characteristics, evaluate and analyze the suitability of rain garden construction, visualize and index the analysis results, and provide some support for the site selection of sponge city planning and construction.

**Key words:** sponge city; rainwater garden; construction suitability; GIS; spatial analysis

雨水源头控制是海绵城市的重要理念,住建部出台的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》为各城市的海绵城市建设提供了技术指导,而雨水花园是处理城市雨洪灾害且与生态景观设计相结合的一种有效措施,对中小降雨具有较好的源头控制效果,可以起到削峰延时、净化水质等作用<sup>[1]</sup>,在多个城市雨洪管理实践中起到了积极的作用<sup>[2]</sup>。

雨水花园一般建在人工挖掘或自然形成的浅凹绿地或是大型公共建筑的附属绿地、公园和居住区内。多项研究表明,低影响开发设施的建设选址是决定其效果的最重要因素<sup>[3]</sup>。除了雨水径流控制效果之外,设施建设前期涉及的基建投资、建设效率以及后期的安全性、稳定性均受低影响开发建设区位的影响较大。而雨水花园建设区位研究还处在起始阶段,通常依靠专家评议、实地调研等传统方法,存在人为判别模糊性、低时效性、低精度性及高成本性等方面的局限,很难体现决策的准确性。

由于当前建成区域往往用地紧张,需要采用“见缝插针”的方式进行海绵城市改造。通过地理信息系统(GIS)对源头控制设施的建设用地进行适宜性评价,可在最大程度上挖掘区域的建设潜力,并提高设施的效果。事实上目前GIS的建设适宜性分析已大量应用于住宅区、商业区及公共服务设施的选址<sup>[4-5]</sup>,但将其应用于雨水源头控制设施中的研究仍然较少。鉴于此,笔者在建立适宜性评估体系的基础上,以镇江市某区域的雨水花园建设为例,利用GIS的空间分析功能,对建设用地的适宜性进行了评价,识别出最适宜建设雨水花园的空间位置,该方法可为雨水源头控制设施的选址提供一定支持。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域概况

镇江市地处长江下游南岸,属亚热带湿润气候,

降雨丰富且水网密集,年平均降雨量约为1 100 mm,其中夏、秋季的降雨量约占全年降雨总量的70%。在汛期,由于城市不透水面积大而容易导致出现内涝问题,另外,降雨面源污染也容易破坏河流、湖泊水质,因此解决内涝和水污染问题对于镇江市至关重要。作为第一批海绵城市试点城市,镇江市在国家海绵城市建设试点验收标准的基础上,提出了“3+2”的创新性目标:有效应对30年一遇降雨、面源污染削减率达到60%、年径流总量控制率达到75%<sup>[6]</sup>。本次研究区域属于镇江市润州区内部,西、北、东三面被运河包围,地势自南向北降低,南部为南山,7月—9月为雨季,面积约为27.7 km<sup>2</sup>,高程范围在3~180 m。土地利用类型有裸地、林地、草地、广场、水域、耕地、房屋建筑、交通运输用地和其他用地,面积分别为1.41、8.62、3.34、0.14、0.99、0.47、6.29、6.28、0.17 km<sup>2</sup>,占比分别为5.10%、31.10%、12.06%、0.49%、3.56%、1.71%、22.70%、22.65%、0.63%。

### 1.2 雨水花园空间适宜性评价体系构建

本研究将雨水花园空间适宜性水平通过建设可行性和建设需求性两个方面来表达,建设可行性主要包括地形条件及周边环境;建设需求性区域则是通过对研究区域地表的水文模拟分析,并结合用地类型等信息所得到的城市汇流累积量大的区域。

#### 1.2.1 建设可行性指标的选取

##### ① 土地利用类型

参考北京市《城市雨水利用工程技术规程》(DB11/T 685—2009)中的规定“雨水花园宜设置在面积大于100 m<sup>2</sup>的块状绿地内”,面积和设施深度(包括蓄水层和填料层)是影响储水体积的重要因素,面积越大、设施深度越深,则储水体积越大,对径流量的削减能力越强<sup>[1]</sup>,根据镇江市降雨特点与径流量削减目标,在土地利用类型中选择占地面积较

大的裸地、林地、草地以及广场等闲置土地或者可改造区域作为雨水花园建设适宜用地,可排除与自然遗产保护区、考古或历史资源保护区以及濒危物种保护区的冲突。

### ② 高程

雨水花园一般建在地势较低区域。研究区域选择标高为0~25 m、地形低于周围环境、在雨天易形成积水的场地。

### ③ 坡度

场地的建设最终都要落于场地的地形上,坡度越大则建设成本和难度就越大,因此坡度因子对于建设适宜性分析至关重要。坡度在0~15°有利于雨水下渗,且坡度越缓,地表径流流速越低,对污染物的截留和净化效果就越好<sup>[7]</sup>,同时地势较平坦便于施工和维护,适宜建造雨水花园。

### ④ 坡向

坡向差异会导致太阳辐射、日照时间、温度和蒸发量的差异,筛选光照充足的朝南、东南、西南、东、西坡向为建造雨水花园的较适宜区域,而偏北朝向,由于山体遮挡,采光不足,会阻碍雨水花园内植物的生长,同时不利于水分的蒸散而容易导致植物烂根,为不适宜区域。

### ⑤ 与建筑物的间距

由于雨水花园要发挥海绵的作用,具有一定的“蓄水池”功能,因此要与城市建筑保持一定的距离,《城市雨水利用工程技术规程》中规定:下渗型雨水花园距离建筑物边缘应不小于3 m以防浸泡地基,以此条件建立缓冲区进行分析。

### ⑥ 土壤环境

《城市雨水利用工程技术规程》中规定:用土壤入渗时,土壤的渗透系数应大于 $10^{-6}$  m/s。土壤环境对于雨水花园中雨水的下渗速度有重要影响,下渗速度较慢,不利于雨水花园充分发挥作用,会使雨水长时间积聚在雨水花园中而导致严重污染,对植物生长不利,同时又容易滋生蚊虫,所以雨水花园的土壤质地应选择渗透率较高的黏土和壤土。因研究区域范围较小,土壤大多为相同类型,故在此不作筛选分析。

## 1.2.2 基于层次分析法的建设可行性指标权重

根据层次分析法(AHP)指标体系构建的科学性、代表性、可操作性等原则,确定了高程、坡度、坡向、土地利用类型和与建筑物的间距5项指标来表

征雨水花园的建设可行性,并建立了相应的指标体系框架。

采用数字1~9及其倒数作为标度对各因子的重要性进行排序,标度方法如下:在计算中选取调研数据和专家打分法的平均值作为标度,构造出雨水花园建设可行性评价指标体系中准则层对目标层的比较判断矩阵。

准则层对目标层的判断矩阵标度及其定义如下:①标度 $a_{ij}=1$ ,表示*i*因子与*j*因子同等重要;②标度 $a_{ij}=3$ ,表示*i*因子比*j*因子稍微重要;③标度 $a_{ij}=5$ ,表示*i*因子比*j*因子比较重要;④标度 $a_{ij}=7$ ,表示*i*因子比*j*因子非常重要;⑤标度 $a_{ij}=9$ ,表示*i*因子比*j*因子极端重要;⑥标度 $a_{ij}=2,4,6,8$ ,表示为上述判断的中间值;⑦标度 $a_{ij}$ =上述数值的倒数,表示若*j*因子与*i*因子比较,得到判断值为 $a_{ji}=1/a_{ij}$ ,定义 $a_{ii}=1$ 。

准则层对目标层的判断矩阵如表1所示。

表1 目标层各因子相对重要性的判断矩阵

Tab.1 Judgment matrix of relative importance of each factors in target layer

项 目	坡向	坡度	高程	土地利用类型	与建筑物的间距
坡向	1	1/6	1/2	1/3	1/2
坡度	6	1	4	3	4
高程	2	1/4	1	1/2	1
土地利用类型	3	1/3	2	1	1/2
与建筑物的间距	2	1/4	1	2	1

经过计算,该判断矩阵的 $\lambda_{\max}=5.1944$ ,权重向量为 $\omega_1=(0.0663,0.4844,0.1197,0.1629,0.1667)^T$ 。一致性指标 $I_{Cl}=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=0.0486$ ,五阶矩阵随机性指标 $I_{Rl}=1.1$ ,随机一致性比率 $I_{CR}=I_{Cl}/I_{Rl}=0.0442<0.10$ ,认为该判断矩阵具备可以接受的一致性,所以上面所求的近似特征向量可以作为5个因子的权重。

## 1.2.3 建设可行性指标的评价分级

各个可行性评价指标对场地建设适宜性的影响程度不同,例如最适宜建设、比较适宜建设、一般适宜建设和禁止建设等。为了便于计算,可以将具有描述性的等级信息转变成建设适宜性指数数值,并建立相应的等级评价体系,具体结果如表2所示,即适宜区域计为100分,比较适宜区域计为80分,一般适宜区域计为60分,不适宜区域不计入叠加分析的范围。



表 2 雨水花园建造的适宜性评价指标体系

Tab.2 Framework of suitability level assessment of rain garden construction

项 目	适宜性范围及赋值			
	最适宜 (100)	比较适宜 (80)	一般适宜 (60)	不适宜 (不可行区域)
用地类型	林地、 草地	裸地、 广场		水域、耕地、房 屋建筑、交通 运输用地、其 他用地
高程/m	0 ~ 5	5 ~ 15	15 ~ 25	> 25
坡度/(°)	0 ~ 3	3 ~ 6	6 ~ 15	> 15
坡向	南、东南、 西南	东、西	东北、 西北	北
与建筑物 的间距/m	≥3			0 ~ 3

1.2.4 建设需求性区域提取

雨水花园的空间适宜性水平不仅体现在其可行性上,也体现在其需求性上,雨水花园只有建在汇流累积量大的区域时才能有效利用雨水,最大化地发挥其对洪峰流量和径流总量的削减作用。

进行区域提取需要利用 ArcGIS 中的水文模块,提取流域水文特征,模拟地表水文过程,并结合数字用地信息,绘制径流通路和低洼易涝处,对城市汇流

累积区进行近似分析<sup>[8]</sup>,划分雨水花园建设需求的优先级。先运用单流向 D8 算法对水流进行流向分析,接着进行汇流分析,与此同时输入各土地利用类型下的径流系数权重栅格数据(林地和草地的径流系数均取 0.1,耕地、裸地、广场和水域的径流系数分别取 0.15、0.25、0.4、1,房屋建筑、交通运输和其他用地的径流系数均取 0.9),最后精确计算得到各个栅格的地表汇流累积量。汇流累积量的数值代表了此栅格上游有多少个栅格的水流方向汇流经过此处,因此汇流累积量的数值越大,表示该栅格区域越容易形成地表径流。最后充分结合研究区域的现有地形、道路网、水系以及用地描述进行分析,通过多次试验和校核方法来确定雨水花园建设需求性大的区域。

2 结果与讨论

2.1 可行性指标评价结果分析

除去不可行区域,根据土地利用类型、高程、坡度、坡向和与建筑物的间距这 5 个可行性指标的赋值分数进行加权叠加分析,最后按照自然间断点分级法重分类得到雨水花园建设可行性指标的评价分析成果图,各个指标的筛选条件以及评价结果如图 1 所示。

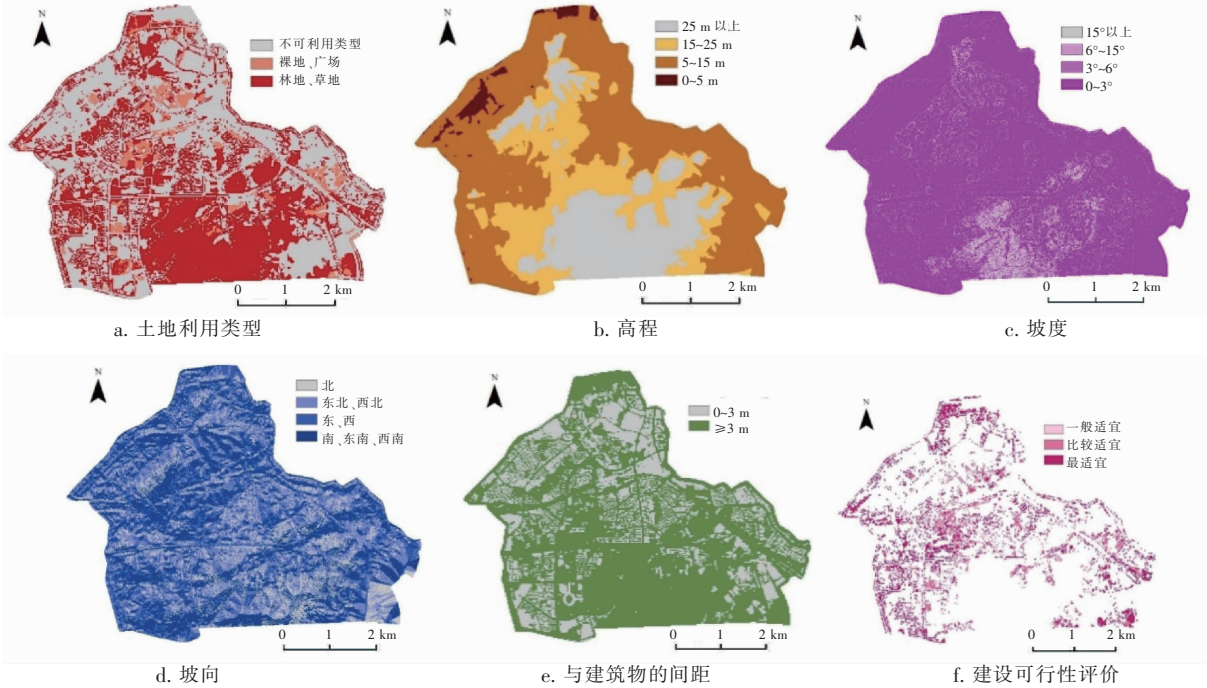


图 1 建设可行性指标评价结果

Fig.1 Evaluation results of construction feasibility indicators

在土地利用类型方面,林地、草地、裸地和广场 4 种适宜建设类型面积占总面积的 48.75%,其中最

适宜建设区域即林地、草地,大量分布在南部南山风景区和各房屋建筑周边,水域、耕地、房屋建筑、交通运输用地和其他用地等不适宜建设类型主要分布在古运河沿岸;在高程方面,研究区域地势自南向北降低,标高在0~25 m的适宜建设区域面积占总面积的76.8%,主要分布在北、东、西三面的居民区和基础设施区,0~5 m高程为最适宜建设区域,主要分布在北部西津渡沿河景区和西北部居民区,5~15 m高程为比较适宜建设区域,主要分布在古运河沿岸,15~25 m高程为一般适宜建设区域,主要分布在研究区域中心地带,25 m以上高程为不适宜建设区域,主要分布在南部南山风景区,研究区域中部林地和草地也有部分在25 m以上;在坡度方面,因研究区域属于华东平原地区,坡度变化不大,在0~15°坡度的适宜建设区域面积占总面积的88.7%,0~3°坡度为最适宜建设区域,大面积分布在研究区域内,3°~6°坡度为比较适宜建设区域,6°~15°坡度为一般适宜建设区域,均零散分布在研究区内,15°坡度以上为不适宜建设区域,主要分布在西北部西津渡林地风景区和南部南山风景区;在坡向方面,南、东南、西南坡向为适宜建设区域,其面积占总面积的33.2%,东、西坡向为比较适宜建设区域,东北、西北坡向为一般适宜建设区域,这些适宜建设区域面积占总面积的81.5%,而北坡向为不适宜建设区域;在与建筑物的间距方面,与建筑物的间距 $\geq 3$  m为适宜建设区域,其面积占总面积的71%,而与建筑物的间距在0~3 m为不适宜建设区域;另外,研究区的土壤质地包括中壤土、中黏土、轻壤土、轻黏土、重壤土和砂壤土等,完全沙质的土壤较少,基本均可用于建设雨水花园。

从图1可以看出,适宜建设区域占研究区域总面积的19.4%,主要分布在北部西津渡沿河景区、中部各政府用地内部绿地、东南部居民区和各道路及运河沿线。总体而言,研究区域地形地貌和土壤条件较好,可用于区域级雨水花园建设的土地较多。

## 2.2 需求性指标评价结果分析

图2展示了在GIS中依据DEM和径流系数权重栅格数据生成的研究区汇流累积量的空间分布情况。可以看到,汇流累积量大的区域主要分布在古运河西侧的黄山南路和官塘桥路等地,且黄山南路附近存在商业聚集区,对于该地雨水的控制和利用更具实际意义,雨水花园的建设需求性更大。

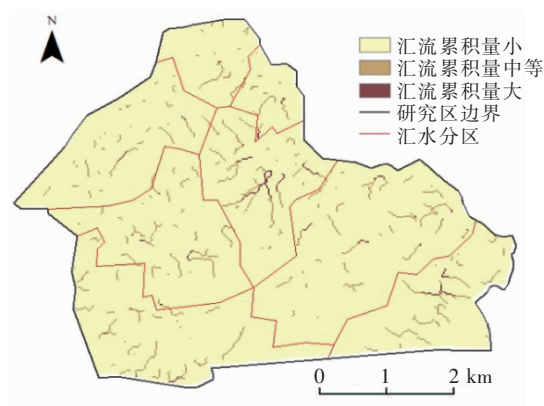


图2 研究区域的汇流累积量空间分布

Fig. 2 Confluence accumulation map of study area

## 2.3 雨水花园建设适宜度综合评价

经过建设可行性和建设需求性图层的综合叠加分析,最终得到研究区域的雨水花园建设适宜度综合评价结果,如图3所示,排除不适宜建设用地,按自然间断点分级法重分类,分为一般适宜、比较适宜和最适宜3个等级。与此同时加入镇江市城市排水规划雨水分区图(2011年—2020年版)所划分的部分子汇水区,以此更精确地表达雨水花园建设适宜区域的位置情况。

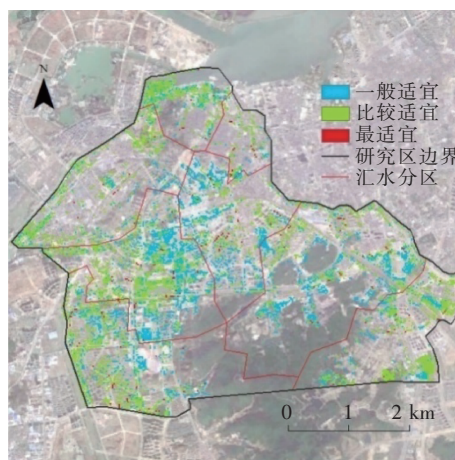


图3 雨水花园建设适宜度综合评价结果

Fig. 3 Suitability comprehensive evaluation results of rainwater garden construction in study area

### 2.3.1 适宜建设用地面积分析

对雨水花园建设适宜度综合评价结果量化分析得出:①适宜建设用地面积约占研究区总面积的19.4%。②林地和草地为适宜建设用地的主体,其中林地大面积均匀分布,约占适宜建设用地面积的43%;草地大部分位于研究区域西部,约占适宜建设



用地面积的37%;裸地零散均匀分布在研究区域内,约占适宜建设用地面积的18%;广场集中在居民聚居地中央,约占适宜建设用地面积的2%。总体来说,通过可行性和需求性指标筛选分析得到的研究区雨水花园适宜建设用地较多,其中林地和草地为适宜建设用地的主体。

### 2.3.2 适宜建设用地分布分析

可用于雨水花园建设的土地在研究区域整体分布不均匀,主要分布在古运河入河口和岸边条带状绿地,研究区域东部、东南部等未开发用地,以及研究区域中心地带政府办公用地内部绿地,主道路两旁区域分布也较多。适宜建设区域主要分布在人少的地方,而居民区、商业区等人口集中的区域内少有分布。由此看来,将原有绿地改建成雨水花园是最可行的方法。由图3可以看出,研究区域北部古运河入河口及岸边绿地是适宜改造用地,再结合指标体系中各单项影响因子,发现该地区平均高程为5 m,地势平坦,坡向以朝南居多,汇流累积量虽不大但地处汇流上游地区,可在源头处拦截降雨,非常适宜建设雨水花园,可改造成条带状雨水花园;研究区东部、东南部闲置用地可建造成大型雨水公园,供市民游览休憩;研究区中心地带即镇江市政府与周边各部门内部是适宜改造用地,再结合指标体系中各单项影响因子,发现该区域土地利用类型主要为绿地、广场和裸地,平均高程为15 m,地势较平坦,坡向以朝南居多且汇流累积量较大,非常适宜建设雨水花园,可将其中裸地、广场及绿地改建成雨水花园,既可在源头控制雨水,又可在城区塑造充足的自然景观;主道路两旁的绿化带可改造成小面积规整嵌入式雨水花园;其余一般级别适宜度的建设用地可根据需求“见缝插绿”。

本研究提出的雨水花园建设适宜性评估方法所建立的指标体系,在建设可行性评估方面充分考虑安全性、合理性、效益性,选取了对雨水花园影响较大的因子;在建设需求性评估方面,因未涉及繁琐、复杂的排水管网动态数据,而是采用地表水文情况的快速近似分析法得到建设需求性大的区域,一方面,解决了管网建模中普遍存在的水文、水力数据缺失的问题,另一方面,由于简化/忽略了城市地下管网系统对地表径流的考虑,对于降雨重现期高、管网完备城市的地表径流分析存在一定的偏差,因此更适用于管网条件较弱地区的雨水花园建设需求性评

估。通过GIS加权叠加分析评估方法,既充分考虑了各种因子对雨水花园建设适宜程度的影响的明显差异,又能够将最后的分析结果进行可视化和指数化呈现,使得选址结果更加科学、理性。

### 3 结论

根据土地利用类型、地形、坡度、坡向、土壤环境、与建筑物的间距和汇流累积量等数据进行分类筛选,再通过GIS水文分析和空间加权叠加分析得到土地利用类型、地形地貌、土壤质地、与建筑物的间距等条件都适合建设雨水花园的区域分布情况,结合镇江市的实例分析,得到以下结论:

① 利用AHP方法,依据重要程度对各因子权重进行赋值,其中坡度的权重最大,然后依次是与建筑物的间距、土地利用类型、高程和坡向。

② 利用GIS软件在优化指标和权重的基础上可准确、快速地发掘场地特性,进行雨水花园的建设适宜性评价分析,将分析结果进行可视化和指数化呈现,为海绵城市规划建设的选址提供一定支持。

③ 研究区通过可行性和需求性指标分析得到的适宜建设用地面积约占总面积的19.4%,即有较多适宜建设雨水花园的可利用土地,林地和草地为适宜建设用地的主体,占到了80%。

④ 适宜建设及改造成区域尺度雨水花园的土地主要分布在古运河入河口及岸边条带状绿地、研究区东部和东南部等未开发用地以及研究区中心地带政府办公用地内部绿地,主道路两旁区域分布也较多,可运用点(建筑周边)、线(城市道路)、面(公园尺度)3种形态的景观策略进行雨水花园的建设推广。

### 参考文献:

- [1] 王建军,李田. 雨水花园设计要点及其在上海市的应用探讨[J]. 环境科学与技术,2013,36(7):164-167. Wang Jianjun, Li Tian. Discussion on design essentials of rain gardens and its application in Shanghai [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(7): 164-167 (in Chinese).
- [2] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 雨水花园对暴雨径流的削减效果[J]. 水科学进展,2015,26(6):787-793. Tang Shuangcheng, Luo Wan, Jia Zhonghua, et al. Effect of rain garden on storm runoff reduction [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 787-793 (in Chinese).
- [3] Martin-Mikle C J, de Beurs K M, Julian J P, et al.

- Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 140: 29–41.
- [4] Suárez-Vega R, Santos-Penate D R, Dorta-González P. Location models and GIS tools for retail site location [J]. *Applied Geography*, 2012, 35(1/2): 12–22.
- [5] Cheng E W L, Li H, Yu L. A GIS approach to shopping mall location selection [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(2): 884–892.
- [6] 赵宝康, 刘绪为, 刘世泽, 等. 镇江海绵城市试点区工程建设可行性及 PPP 模式研究 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(4): 1–5.
- Zhao Baokang, Liu Xuwei, Liu Shize, *et al.* Feasibility and PPP model of sponge city pilot area construction in Zhenjiang [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(4): 1–5 (in Chinese).
- [7] 王敏, 吴建强, 黄沈发, 等. 不同坡度缓冲带径流污染净化效果及其最佳宽度 [J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4951–4956.
- Wang Min, Wu Jianqiang, Huang Shenfa, *et al.* Effects of slope and width of riparian buffer strips on runoff purification [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4951–4956 (in Chinese).
- [8] 周倩倩, 王和平, 许苗苗, 等. 基于 GIS 的栅格水文建模法快速评估内涝风险 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31(21): 109–113.
- Zhou Qianqian, Wang Heping, Xu Miaomiao, *et al.* A simplified GIS-based hydrological modeling approach for rapid flood risk assessment [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(21): 109–113 (in Chinese).



作者简介: 缪遇虹 (1995 – ), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化影响与水环境模拟。

E-mail: myh7913@163.com

收稿日期: 2019-07-08

(上接第 101 页)

- [12] Lin W S, Huang M B, Gu A Z. A seawater freeze desalination prototype system utilizing LNG cold energy [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(29): 18691–18698.
- [13] Wang H, Wang Y H. The flow and heat transfer characteristics of supercooled water based on the nano-superhydrophobic surface [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2018, 55(2): 413–420.
- [14] Wang H, Feng R Z, Duan H L, *et al.* Study on sub-cooler based on the characteristics of the superhydrophobic surface [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 76: 205–210.
- [15] 陈栋, 荣宏伟, 张朝升. 一种电镀废水的处理方法 [P]. 中国专利: 201610974262, 2018-11-16.
- Chen Dong, Rong Hongwei, Zhang Chaosheng. A Treatment Method for Electroplating Wastewater [P]. China: 201610974262, 2018-11-16 (in Chinese).



作者简介: 陈栋 (1979 – ), 男, 广东茂名, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为工业水处理。

E-mail: chendong0220@163.com

收稿日期: 2019-06-22