

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.020

景观指数评价小区 LID 设计方案效果的适用性研究

杨 进¹, 宫永伟¹, 李新建², 陈 磊³

(1. 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; 2. 北京建工
土木工程有限公司, 北京 100015; 3. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

摘 要: 构建某小区 SWMM 模型, 基于年径流总量控制率计算小区低影响开发 (LID) 设施总调蓄容积, 并按不同比例分配至 LID 设施, 形成多套 LID 设计方案, 模拟计算设计方案在不同降雨情景下的场次降雨径流控制效果。选取 6 种景观指数, 分析其与设计方案场次降雨径流控制率的相关关系, 探讨景观指数评价 LID 设计方案效果的适用性。结果表明, 香农多样性指数、香农均匀度指数与场次降雨径流控制率有较强的正相关性, 斑块密度、分割度、最大斑块指数、斑块面积变异系数在特定情形下与场次降雨径流控制率有相关性, 该结论可为小区尺度 LID 设计方案径流控制效果的简易预测提供参考。

关键词: 低影响开发; SWMM 模型; 景观指数; 径流控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0110-07

Applicability of Landscape Index for Assessing Performance of Low Impact Development Schemes

YANG Jin¹, GONG Yong-wei¹, LI Xin-jian², CHEN Lei³

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. BCEG Civil Engineering Co. Ltd., Beijing 100015, China; 3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The SWMM model of a residential area was established. The total storage capacity of low impact development (LID) facilities in the residential area was calculated based on the volume capture ratio of annual rainfall. The storage capacity was distributed to the LID facilities in different proportions, and thus different LID design schemes were developed. The event rainfall runoff control effects of the design schemes under different rainfall scenarios were simulated. Six landscape indexes were selected to analyze their correlation with the event rainfall runoff control rate of the corresponding design schemes. The applicability of landscape index to evaluate the performance of the LID design scheme was explored. The Shannon diversity index and Shannon evenness index had strong positive correlations with the event rainfall runoff control rate in different cases, and the patch density, division, largest patch index and patch size coefficient of variation had correlations with the event rainfall runoff control rate in specific cases. The conclusion provided a reference for the prediction of runoff control

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(41530635); 北京市属高校高水平教师队伍建设支持计划青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201704055)

通信作者: 宫永伟 E-mail: gongyongwei@163.com

effect of the residential area scale LID design scheme.

Key words: low impact development; SWMM; landscape index; runoff control

城市水文过程是城市景观与水质响应机制的核心,景观格局的空间分布影响着径流、蒸散等水文过程^[1]。随着城市不透水地表面积的增加,下渗量减少,径流总量和洪峰流量增加^[2-4],而雨水径流是地表污染物迁移转化的主要驱动力,可在一定程度上造成城市水体质量下降^[5]。海绵城市建设影响了城市生态格局的演变方向^[6],低影响开发(LID)设施是影响景观生态格局演变的重要载体^[7],是景观格局演变与生态过程的纽带。在城市景观类型中,建筑小区占城市建设总用地的 40%~50%^[8],是海绵城市建设系统中源头控制的主要场所,控制其源头径流对改善水环境具有重要意义^[9],因此有必要结合 LID 设施对雨水径流的控制机理,运用景观指数对建筑小区的 LID 设施格局进行分析,建立景观格局与水文响应之间的联系,分析不同景观指数与降雨径流控制效果的关系。笔者以北京市某小区为研究对象,结合景观生态学方法,量化分析小区尺度 LID 设施布设方案的场次降雨径流控制效果,研究 LID 设施场次降雨径流控制率与景观指数的相关关系,探讨景观指数评价 LID 设施设计方案径流控制效果的适用性,以期在景观层面为 LID 方案设计提供一种评价方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和模型构建

研究区为北京市海绵城市建设试点区内某小区,多年平均降水量为 535.9 mm,汛期(6 月—8 月)降水量占全年降水量的 80% 以上。小区面积为 $10.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,现状绿化率为 33%,建筑密度为 20%,用地类型分布如图 1 所示;地形整体呈北高南低、东高西低的特点,与周边区域相比地势较低。

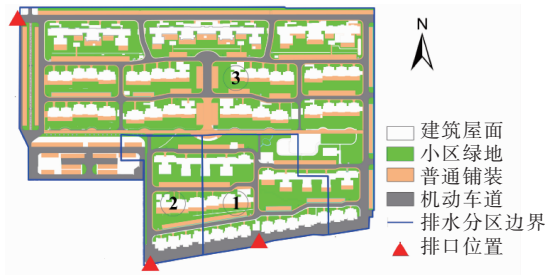


图 1 小区用地类型分布

Fig. 1 Land use of the residential area

小区的排水体制为雨污分流制,有 3 个雨水外排口,其中排口 1 和 2 分别位于小区南面东西侧,管径均为 DN500;排口 3 位于小区西北方向,管径为 DN100。根据小区地形和雨水管网分布情况,将其模拟概化为 71 个排水分区。

对小区的降雨量和管道水位进行监测,用 2018 年 8 月 8 日的监测数据率定模型参数,用 8 月 12 日的监测数据验证模型,采用纳什效率系数 R_{NS} (表征径流过程拟合情况,并侧重平均水位的比较^[10])、判定系数 R^2 (衡量模拟值与监测值的相关程度) 对模型精度进行评价。

1.2 设计降雨

设计降雨采用北京市《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB11/T 969—2016) 中暴雨分区 II 区设计雨型分配过程,降雨历时采用 2 h,设计重现期 P 分别为 3、5、10、20 年,雨峰系数 r 为 0.45,降雨量分别为 58.59、67.61、79.85 和 92.10 mm,降雨过程如图 2 所示。

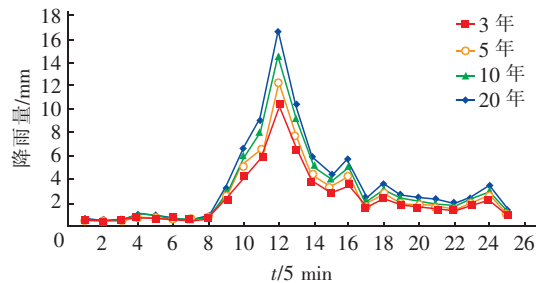


图 2 不同重现期 2 h 降雨过程线

Fig. 2 2 h rainfall process for different return periods

1.3 LID 设计方案

根据年径流总量控制率计算 LID 设施总调蓄容积,不同设施的总容积按总调蓄容积的不同比例进行分配。依据当地的海绵城市专项规划,确定此小区年径流总量控制率为 75%,对应设计降雨量为 23 mm。本研究仅选用生物滞留池和下沉式绿地两种 LID 设施,二者具有一定的蓄渗能力,其中生物滞留池的调蓄深度和下渗能力均高于下沉式绿地。LID 设计方案 1~7 中生物滞留池+下沉式绿地比例分别为 80%+20%、70%+30%、60%+40%、50%+50%、40%+60%、30%+70%、20%+80%。

考虑每种方案中单个设施面积和设施数量因素,将以上方案分为3种情形:情形一,每种方案中单个设施的容积都不变,设施总量变化;情形二,每种方案中单个设施的总量都不变,容积变化;情形三,每种方案中单个设施的容积都变化,设施总量也变化。对上述3种情形下的设施布设方案进行模拟,并计算不同情形下方案的景观指数,分析不同情形下方案的场次降雨径流控制率与景观指数的关系,探讨景观指数评价方法在确定年径流总量控制率目标时LID设施布设效果的适用性。

1.4 景观指数

景观指数是一种定量描述地理现象空间形态和格局的指标体系^[11],能够高度浓缩景观格局信息,可反映其结构组合和空间配置方面的特征^[12],用以评价景观格局对生态过程的影响^[13]。根据景观指数的生态学意义,本研究选取香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)、斑块密度(PD)、分割度(DIVISION)、最大斑块指数(LPI)、斑块面积变异系数(PSCV)进行研究^[14-19]。SHDI反映景观结构的复杂性,其值越大表明景观中各类型斑块的结构越复杂,多样性程度越高;SHEI反映景观组成的均匀度和优势度,其值越大表明各类型斑块分布越均匀,多样性程度越高;PD反映单位面积上的斑块数,其值越大表明斑块破碎化程度越高;DIVISION反映景观中斑块之间分布的分割程度,其值越大表明斑块破碎化程度越高;LPI反映某一类型的最大斑块在整个景观中所占的比例,其值越大表明设施斑块面积的差异化越大;PSCV反映景观斑块的离散化程度,其值越大表明景观斑块的差异性越大。

2 结果与分析

2.1 模型率定与验证结果

对比模型模拟结果与监测数据,经计算,模型率定的 R_{NS} 为0.85, R^2 为0.75;模型验证的 R_{NS} 为0.66, R^2 为0.68。率定和验证的径流过程与实测径流过程曲线拟合较好,模型精度满足要求,可用于后续模拟分析。模型主要参数的率定结果如下:不透水区曼宁系数(N-Imperv)的初始值为0.025,率定值为0.02;透水区曼宁系数(N-Perv)的初始值为0.5,率定值为0.25;不透水区洼蓄量(Dstore-Imperv)的初始值为2.5 mm,率定值为2.5 mm;透水区洼蓄量(Dstore-Perv)的初始值为5 mm,率定值为7 mm;无洼蓄不透水区所占比例(%Zero-Imperv)的初始值为25%,率定值为25%;最大入渗速率(Max. Infil. Rate)的初始值为80 mm/h,率定值为75 mm/h;最小入渗速率(Min. Infil. Rate)的初始值为5 mm/h,率定值为6 mm/h;衰减系数(Decay Constant)的初始值为 2 h^{-1} ,率定值为 3 h^{-1} ;干燥时间(Drying Time)的初始值为4 d,率定值为5 d;管道粗糙系数(Roughness)的初始值为0.013,率定值为0.014。根据模拟结果,统计不同方案的场次降雨径流控制率,分析其与景观指数的相关关系。

2.2 模拟结果与分析

在不同设计重现期下,对各LID方案的场次降雨径流控制效果进行模拟,结果见图3。与情形二和情形三相比,情形一中LID设施布设方案的场次降雨径流控制率略高,表明在确定年径流总量控制率目标的情况下,单个设施容积不变的布设方案,其降雨径流控制效果比单个设施容积变化的布设方案要好,即LID设施均匀布设的效果更好。

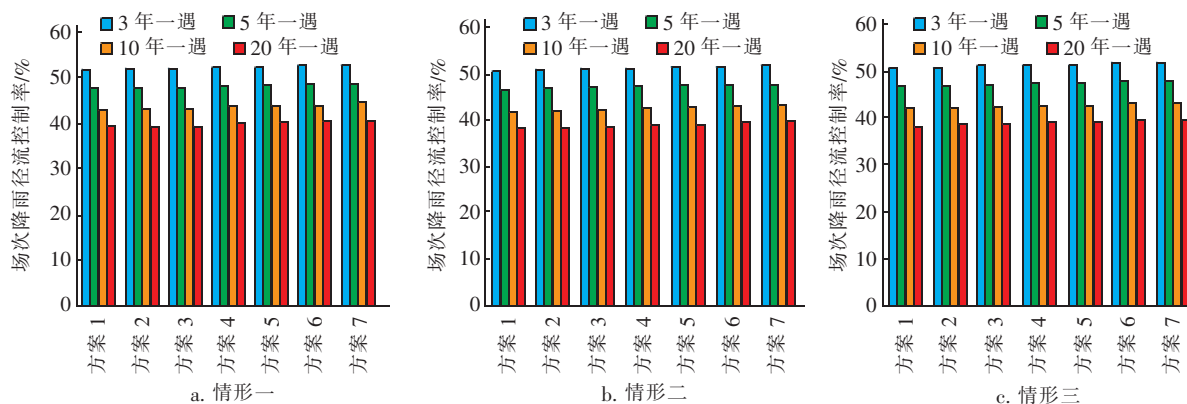


图3 不同方案情形的场次降雨径流控制率

Fig.3 Rainfall runoff control rate in different scenarios

2.3 相关性分析

2.3.1 场次降雨径流控制率与景观水平指数

不同LID设施布局方案情形的景观水平指数计

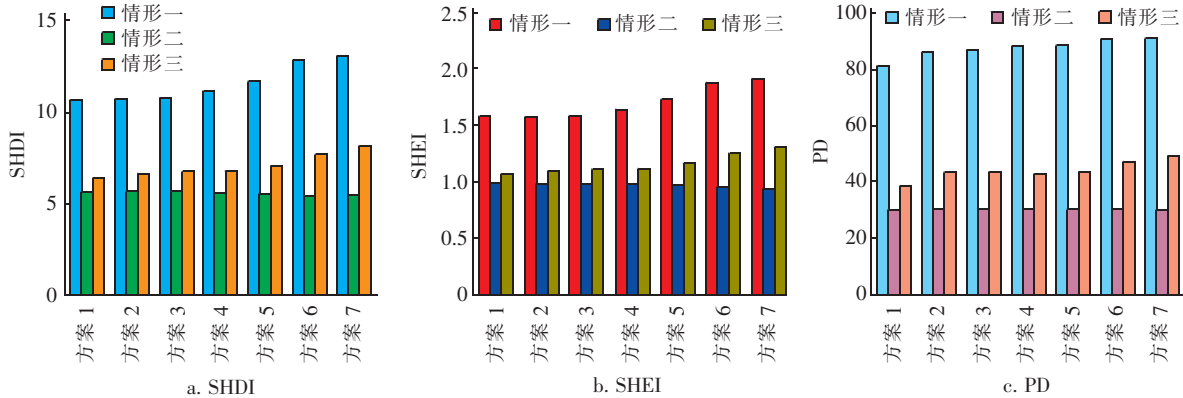


图4 不同方案情形的景观水平指数计算结果

Fig. 4 Calculation results of landscape level index for different scenarios

表1 场次降雨径流控制率与景观水平指数的相关关系

Tab. 1 Correlation between rainfall runoff control rate and landscape level index

项 目	景观 指数	Pearson 相关系数			
		$P=3$ 年	$P=5$ 年	$P=10$ 年	$P=20$ 年
情形一	SHDI	0.940 **	0.942 **	0.944 **	0.944 **
	SHEI	0.929 **	0.931 **	0.933 **	0.934 **
	PD	0.944 **	0.943 **	0.942 **	0.942 **
情形二	SHDI	-0.987 **	-0.989 **	-0.988 **	-0.989 **
	SHEI	-0.987 **	-0.989 **	-0.988 **	-0.989 **
	PD	a	a	a	a
情形三	SHDI	0.942 **	0.944 **	0.945 **	0.946 **
	SHEI	0.938 **	0.941 **	0.942 **	0.943 **
	PD	0.903 **	0.903 **	0.903 **	0.903 **

注: **表示在0.01水平上显著相关;a表示由于有一个变量为常量,无法进行计算。

算结果如图4所示。不同设计降雨重现期条件下,各LID方案情形的场次降雨径流控制率与景观水平指数的Pearson相关关系分析结果如表1所示。

在情形一和情形三中,不同方案的SHDI、SHEI、PD与场次降雨径流控制率呈现显著正相关($p=0.01$),表明在此情形下SHDI、SHEI、PD的变化与场次降雨径流控制效果存在显著关联;在情形二中,不同方案的SHDI、SHEI与场次降雨径流控制率呈显著负相关($p=0.01$),由于情形二中设施数量未变化,故不同方案的PD为常数。研究结果表明,SHDI、SHEI对3种不同情形的LID布局方案均有评价意义,而PD只适用于情形一和情形三,即当方案中设施斑块数量不为常数时可用PD评价。

2.3.2 场次降雨径流控制率与斑块类型水平指数

不同方案情形的设施斑块类型水平指数计算结果如图5和图6所示,场次降雨径流控制率与设施斑块类型水平指数的Pearson相关关系见表2。

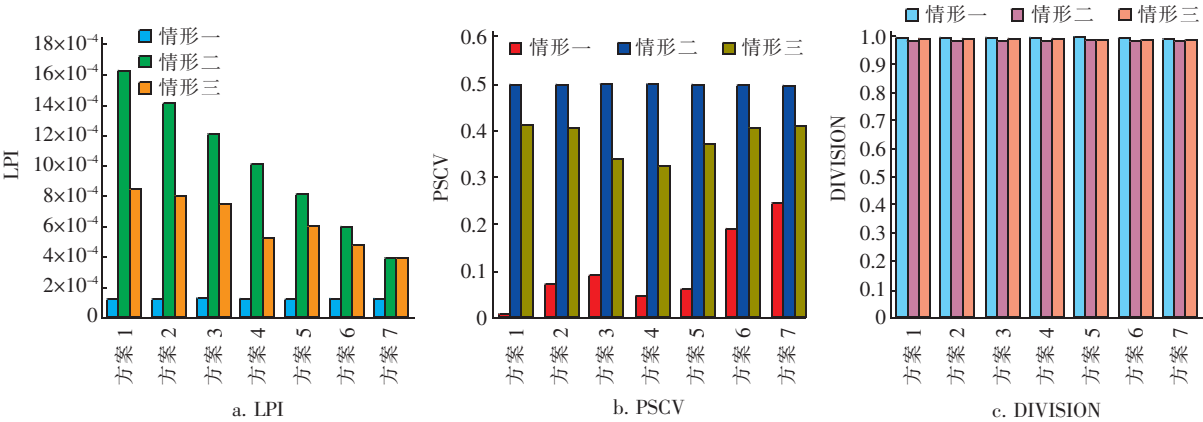


图5 不同方案情形下生物滞留池的斑块类型水平指数计算结果

Fig. 5 Calculation results of patch type level index for bioretention pools in different scenarios

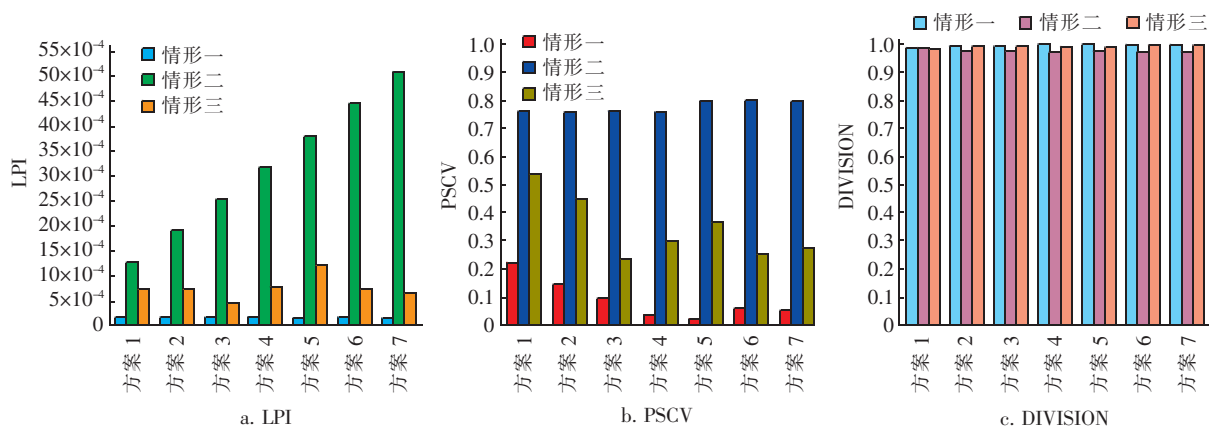


图6 不同情形下沉式绿地斑块类型水平指数计算结果

Fig.6 Calculation results of patch type level index for sunken green land in different scenarios

表2 场次降雨径流控制率与设施斑块类型水平指数的 Pearson 相关系数

Tab.2 Pearson correlation coefficient between rainfall runoff control rate and facility patch type level index

项 目	设施	景观指数	Pearson 相关系数			
			$P=3$ 年	$P=5$ 年	$P=10$ 年	$P=20$ 年
情形一	生物滞留池	LPI	a	a	a	a
		DIVISION	-0.908 **	-0.916 **	-0.919 **	-0.919 **
		PSCV	0.825 *	0.828 *	0.833 *	0.834 *
	下沉式绿地	LPI	a	a	a	a
		DIVISION	0.902 **	0.900 **	0.898 **	0.898 **
		PSCV	-0.822 *	-0.818 *	-0.814 *	-0.814 *
情形二	生物滞留池	LPI	-1.000 **	-1.000 **	-1.000 **	-1.000 **
		DIVISION	a	a	a	a
		PSCV	a	a	a	a
	下沉式绿地	LPI	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **
		DIVISION	a	a	a	a
		PSCV	a	a	a	a
情形三	生物滞留池	LPI	-0.956 **	-0.956 **	-0.956 **	-0.956 **
		DIVISION	-0.918 **	-0.920 **	-0.922 **	-0.922 **
		PSCV	0.047	0.055	0.059	0.061
	下沉式绿地	LPI	0.198	0.197	0.196	0.196
		DIVISION	0.875 **	0.872 *	0.870 *	0.869 *
		PSCV	-0.725	-0.720	-0.718	-0.717

注: **表示在0.01水平上显著相关; *表示在0.05水平上显著相关; a表示由于有一个变量为常量,无法进行计算。

在情形一中,生物滞留池的 DIVISION 与场次降雨径流控制率呈显著负相关($p=0.01$),下沉式绿地的 DIVISION 与场次降雨径流控制率呈显著正相关($p=0.01$),表明生物滞留池的分割程度越小、下沉式绿地的分割程度越大,场次降雨径流控制效果越显著。生物滞留池的 PSCV 与场次降雨径流控制率呈显著正相关($p=0.05$),下沉式绿地的 PSCV 与场次降雨径流控制率呈显著负相关($p=0.05$),表明生物滞留池离散程度越大、下沉式绿地离散程

度越小,场次降雨径流控制效果越好。

在情形二中,生物滞留池的 LPI 与场次降雨径流控制率呈显著负相关($p=0.01$),下沉式绿地的 LPI 与场次降雨径流控制率呈显著正相关($p=0.01$),表明生物滞留池面积差异性越小、下沉式绿地面积差异性越大,场次降雨径流控制效果越好。

在情形三中,生物滞留池的 LPI 与场次降雨径流控制率呈显著负相关($p=0.01$),表明生物滞留池面积差异性越小,场次降雨径流控制效果越好。

生物滞留池的 DIVISION 与场次降雨径流控制率呈显著负相关($p=0.01$),下沉式绿地的 DIVISION 与场次降雨径流控制率呈显著正相关($p=0.05$),表明生物滞留池的分割程度越小、下沉式绿地的分割程度越大,场次降雨径流控制效果越好。

3 结论

① 在确定年径流总量控制率设计目标的情况下,场地内 LID 设施不同的布置情形会对场次降雨径流控制效果产生显著影响,其中,单个设施容积不变方案的场次降雨径流控制效果优于单个设施容积变化方案,故在设计阶段宜将 LID 设施的布置趋于均匀化,以提高径流控制效果。

② SHDI、SHEI 与 3 种情形下的场次降雨径流控制率存在显著相关性,在情形一和情形三中,SHDI 和 SHEI 与场次降雨径流控制率呈显著正相关,在情形二中,SHDI 和 SHEI 与场次降雨径流控制率呈显著负相关,故 SHDI、SHEI 对 3 种情形方案均有较好的评价意义。PD 只在特定情况下有较好的评价意义,即不同方案之间的设施斑块数量不为常数时可用 PD 作为评价指标。

③ LPI、DIVISION、PSCV 在 3 种情形中的评价能力不一致,在情形一中,DIVISION 和 PSCV 表现出较好的评价能力,能力强弱程度:DIVISION > PSCV;在情形二中,仅 LPI 表现出较好的评价能力;在情形三中,生物滞留池的 LPI、DIVISION 和下沉式绿地的 DIVISION 表现出较好的评价能力。利用设施斑块类型水平指数评价 LID 设施布置效果时,应根据相应情形选择对应指数。

参考文献:

- [1] Roberts A D. The effects of current landscape configuration on streamflow within selected small watersheds of the Atlanta metropolitan region [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016, 5: 276 – 292.
- [2] Valtanen M, Sillanpää N, Setälä H. Effects of land use intensity on stormwater runoff and its temporal occurrence in cold climates [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 2639 – 2650.
- [3] Guan M, Sillanpää N, Koivusalo H. Modelling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(13): 2880 – 2894.
- [4] Sillanpää N, Koivusalo H. Impacts of urban development on runoff event characteristics and unit hydrographs across warm and cold seasons in high latitudes [J]. J Hydrol, 2015, 521: 328 – 340.
- [5] 戴莹,陈磊,沈珍瑶. 城市景观的水环境响应及景观调控研究综述 [J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2016, 52(6): 696 – 704.
Dai Ying, Chen Lei, Shen Zhenyao. Water environment effects of urban landscape pattern and landscape regulation: a review [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2016, 52(6): 696 – 704 (in Chinese).
- [6] 刘陈鸿. 基于景观格局及海绵城市构建的城市新区水环境保护研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.
Liu Chenhong. Study on Water Environment Protection of Urban New Area Based on Landscape Pattern and Sponge City Construction [D]. Nanning: Guangxi University, 2017 (in Chinese).
- [7] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等. “海绵城市”理论与实践 [J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26 – 36.
Yu Kongjian, Li Dihua, Yuan Hong, et al. “Sponge city”: theory and practice [J]. City Planning Review, 2015, 39(6): 26 – 36 (in Chinese).
- [8] 王建廷,魏继红. 基于海绵城市理念的既有居住小区绿化改造策略研究 [J]. 生态经济, 2016, 32(7): 220 – 223.
Wang Jianting, Wei Jihong. Research on the greening strategy of the existed residential communities based on the concept of sponge cities [J]. Ecological Economy, 2016, 32(7): 220 – 223 (in Chinese).
- [9] 冯一帆. 老城区建筑小区海绵化改造效果模拟研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.
Feng Yifan. Study on the Simulation of the Performance of Old Building Estate Sponge Modification [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018 (in Chinese).
- [10] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于 Sobol 方法的 SWMM 模型参数敏感性分析 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 59 – 68.
Chang Xiaodong, Xu Zongxue, Zhao Gang, et al. Sensitivity analysis on SWMM model parameters based on Sobol method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 59 – 68 (in Chinese).
- [11] 王杰,李鹏,高海东,等. 丹江上游土地利用/景观指数与水质关系初探 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 383 – 389.

- Wang Jie, Li Peng, Gao Haidong, *et al.* Preliminary study on the relationship between land use/landscape index and water quality in the upper reaches of Danjiang River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(6):383-389(in Chinese).
- [12] 刘洋,关庆锋. 景观指数的并行计算方法[J]. *地球信息科学学报*,2017,19(4):457-466.
- Liu Yang, Guan Qingfeng. A parallel algorithm for landscape metrics [J]. *Journal of Geo-Information Science*,2017,19(4):457-466(in Chinese).
- [13] 陈文波,肖笃宁,李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. *应用生态学报*,2002,13(1):121-125.
- Chen Wenbo, Xiao Duning, Li Xiuzhen. Classification, application, and creation of landscape indices [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2002,13(1):121-125(in Chinese).
- [14] Arnaiz-Schmitz C, Schmitz M F, Herrero-Jáuregui C, *et al.* Identifying socio-ecological networks in rural-urban gradients: Diagnosis of a changing cultural landscape[J]. *Sci Total Environ*,2018,612:625-635.
- [15] 杨晓红,张双双,汪鑫. 基于地理国情数据的土地利用景观格局分析[J]. *地理空间信息*,2019,17(10):32-36,40.
- Yang Xiaohong, Zhang Shuangshuang, Wang Xin. Land use landscape pattern analysis based on geographical conditions data [J]. *Geospatial Information*, 2019, 17(10):32-36,40(in Chinese).
- [16] Bin L, Xu K, Xu X, *et al.* Development of a landscape indicator to evaluate the effect of landscape pattern on surface runoff in the Haihe River Basin[J]. *J Hydrol*, 2018,566:546-557.
- [17] 刘玉琦. 基于遥感技术的流域多尺度景观格局与水质关系研究[D]. 北京:中国科学院大学,2018.
- Liu Yuqi. A Study on the Relationships between Landscape Patterns and Water Quality Across Multiple-scales in Basin Based on Remote Sensing Technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2018(in Chinese).
- [18] Li H, Peng J, Yan X L, *et al.* Urbanization impact on landscape patterns in Beijing City, China: A spatial heterogeneity perspective [J]. *Ecological Indicators*, 2017,82:50-60.
- [19] Zhou Z X, Li J. The correlation analysis on the landscape pattern index and hydrological processes in the Yanhe watershed, China[J]. *J Hydrol*,2015,524:417-426.



作者简介:杨进(1993-),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,研究方向为城市雨洪控制与利用。

E-mail:593111701@qq.com

收稿日期:2020-02-10

节水优先、空间均衡、
系统治理、两手发力