

城市雨水管理

降雨特征对低影响开发停车场径流控制效果的影响

宫永伟^{1,2}, 傅涵杰¹, 印定坤², 王文海², 李俊奇³, 师洪洪³

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 水环境国家级实验教学示范中心, 北京 100044; 3. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要: 低影响开发设施可有效削减雨水径流总量,而降雨特征是重要的影响因素之一。以北京市某停车场为研究区域构建 SWMM 模型,采用相关性分析法探究降雨特征对雨水径流总量控制效果的影响。结果表明:各降雨特征共同影响雨水设施的径流控制效果,雨水设施的径流控制效果随中小降雨总雨量占年降雨量的比例(中小雨量占比)、降雨间隔、降雨历时的增加而升高,随暴雨总雨量占年降雨量的比例(暴雨量占比)、降雨量的增加而降低;暴雨量占比和降雨量是影响雨水设施径流控制效果最主要的降雨特征,降雨量与暴雨量占比之间存在较强的相关关系;降雨间隔和降雨历时与雨水径流控制效果存在正相关关系,但相对于其他降雨特征其影响程度较小。

关键词: 低影响开发; 雨水径流控制; 降雨特征; SWMM; 相关性分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0119-07

Effect of Rainfall Characteristics on Runoff Volume Reduction of Low Impact Development Parking Lot

GONG Yong-wei^{1,2}, FU Han-jie¹, YIN Ding-kun², WANG Wen-hai², LI Jun-qi³,
SHI Hong-hong³

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Water Environment Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Low impact development facilities can effectively reduce the total amount of stormwater runoff. Rainfall characteristics are one of the key factors affecting runoff capture. A stormwater management model (SWMM) was developed for a parking lot in Beijing, and the Spearman correlation method was used to explore the influence of rainfall characteristics on the runoff volume reduction. The results showed that all of the rainfall characteristics affected the runoff control efficiency of the stormwater facilities. The effect of runoff control of stormwater facilities increased with the increase of annual total volume of the small and medium rainfall, rainfall intervals, and rainfall durations, while decreased with the in-

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(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); 北京建筑大学金字塔人才培养工程资助项目

crease of total rainstorms and rainfall volume. The proportion of rainstorms and rainfall volume were the most important characteristics affecting the runoff control efficiency of stormwater facilities, and a strong correlation was exhibited between the rainfall volume and the proportion of rainstorms. Both rainfall intervals and rainfall durations demonstrated positive correlation with the effect of rainfall control of stormwater facilities, although not as significant as other rainfall characteristics.

Key words: low impact development; runoff volume reduction; rainfall characteristics; SWMM; correlation analysis

传统城市雨水管理模式导致水环境恶化、水生态破坏等一系列问题,严重制约我国城市的发展。2014年10月住房城乡建设部印发的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,提出了适合我国城市发展的低影响开发(LID)雨水管理模式^[1]。雨水年径流总量控制率是海绵城市建设的重要指标,以24 h降雨资料为统计数据,统计得出的年径流总量控制率与设计降雨量关系曲线为雨水设施规模设计提供了理论依据。然而,设计降雨量的选取受各地气候特征、水资源禀赋情况、城市开发强度、雨水资源化利用与排水防涝需求、土壤地质条件及经济条件等因素影响^[2],需要因地制宜,科学、合理地确定低影响开发设计目标。

低影响开发的实际运行效果受内部因素(设施规模、类型等)和外部因素(降雨特征等)共同影响,在汇水面特征及设施特征一定的情况下,降雨特征成为影响低影响开发设施总量控制效果的关键因素^[3]。Emerson^[4]和Muthanna^[5]等研究表明,不同气象条件下雨水设施的径流控制效果差异较大。为了研究降雨特征对低影响开发场地雨水径流总量控制效果的影响作用,统计分析了北京市30年的降雨特征。以年降雨量、年平均场次降雨量、年平均降雨间隔、年平均降雨历时、暴雨雨量占年总降雨量比例(暴雨量占比)、中小降雨雨量占年总降雨量比例(中小雨量占比)等6个降雨因素表征年降雨特征。同时,构建北京地区某低影响开发停车场SWMM模型,模拟计算各年降雨情况,分析各降雨特征与雨水径流总量控制效果之间的关系,重点探究了长历时降雨条件下,降雨特征对低影响开发场地径流控制效果的影响规律。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域选取北京经济技术开发区某低影响开发停车场工程,1983年—2012年区域内多年平均降

雨量为509.3 mm,年最大降雨量为791.7 mm,年最小降雨量为253.5 mm(见图1)。统计数据显示,1983年—2012年间降雨呈现年际变化大、年内集中的特点,汛期为6月—9月,占全年降雨量的83.3%。区域地质情况属于洪积冲积平原地区,为第四系沉积物,表面岩性多为各种砂壤土与粘性土层,地下水埋深在25 m以下。

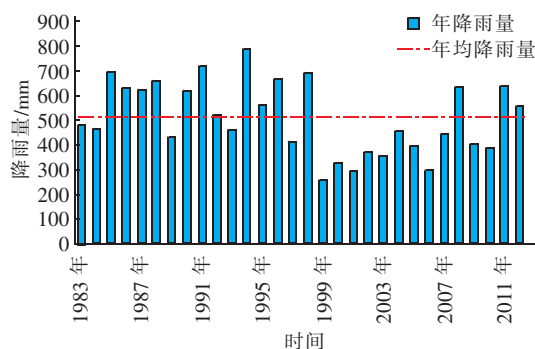


图1 1983年—2012年北京地区的年降雨量

Fig.1 Annual rainfall in Beijing from 1983 to 2012

停车场遵循LID理念,用分散的小规模生态设施通过调蓄、渗透、净化等方式减少雨水径流排放量,结合场地竖向条件以及停车场外围绿化带和内部绿化规划,进行雨水生态措施布置,降低径流污染负荷、延缓降雨峰值流量、补充地下水资源。选取北京市30年的日降雨数据,扣除 ≤ 2 mm的不产流日降雨量,统计得出年径流总量控制率曲线对应的设计降雨量曲线。停车场设计年径流总量控制率目标为85%,对应的设计降雨量为33.6 mm。

1.2 模型构建

1.2.1 研究区域概化

低影响开发停车场占地面积为 2.08 hm^2 ,其中硬化面积为 1.6 hm^2 ,主要为硬化铺装和道路,不透水率为77%,停车场平面布局见图2。根据研究区域的土地利用现状以及排水管网分布情况,停车场可划分为东、西两个排水分区,利用SWMM构建雨

水模型。停车场可概化为 87 个子集水区、20 个雨水管段、14 个检查井、2 个雨水管排口。在 SWMM 模型中,LID 雨水设施的处理方式可分为两种:①在子集水区内放置一种或者多种控制,取代等量的子集水区内非 LID 设施部分;②创建新的子汇水区作为单一的 LID 雨水设施。因为该低影响开发停车场的区域面积较小,而且雨水设施易于单独划分,故本研究采用第 2 种方法将独立子集水区布置为 LID 雨水设施。

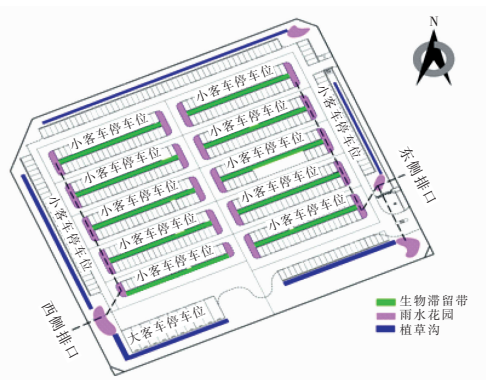


图2 停车场平面布局

Fig.2 Layout of LID parking lot

1.2.2 模型参数的率定和验证

为了评估低影响开发停车场的运行效果,于 2016 年 6 月—10 月期间对停车场进行了降雨、径流监测工作。流量监测采用 Hach FL900 型流量计,监测点位于停车场东、西两侧雨水管外排口;降雨监测采用 Hobo U30 型气象站,监测点位于距停车场 2 km 处的某办公楼屋顶。

选取 2016 年 7 月 25 日和 8 月 12 日两场监测数据较完整的降雨事件用于停车场模型的水文水力参数率定和验证。率定、验证过程选用 NSE 效率系数 E_{NS} 和相关系数 R^2 作为模拟结果吻合程度的评价指标,模型率定、验证结果分别见图 3 和图 4。

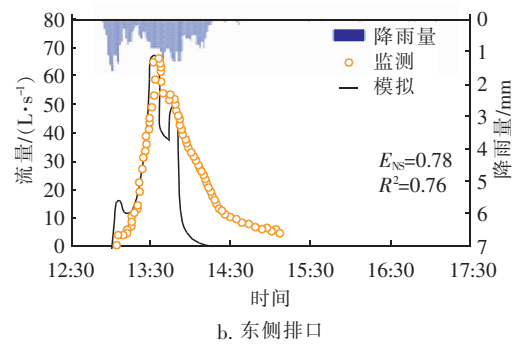
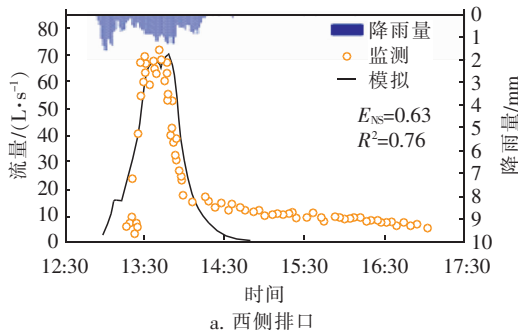
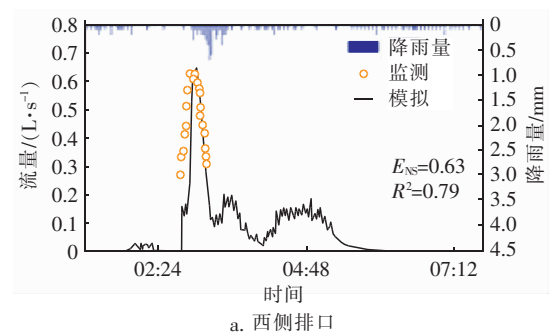
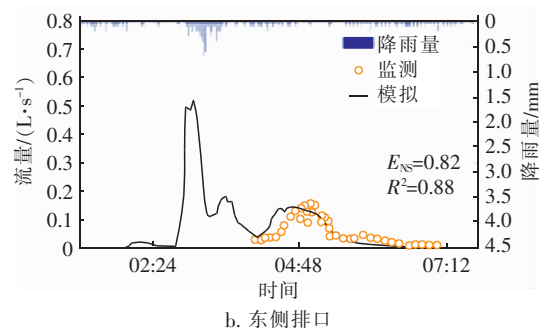


图3 研究区域模型的水文水力率定结果
(2016 年 8 月 12 日)

Fig.3 Parameter calibration of parking lot SWMM model
(August 12, 2016)



a. 西侧排口



b. 东侧排口

图4 研究区域模型的水文水力验证结果
(2016 年 7 月 25 日)

Fig.4 Parameter validation of parking lot SWMM model
(July 25, 2016)

由图 3、4 可知,2016 年 8 月 12 日和 7 月 25 日两场降雨的 E_{NS} 和 R^2 分别在 0.6 和 0.7 以上,模拟结果与实际监测数据拟合较好,构建的模型可用于本研究。

SWMM 模型的主要参数如下:不透水区和透水区的注蓄量分别为 2、12 mm,不透水区和透水区的曼宁系数分别为 0.013、0.25,管道曼宁系数为 0.012;最大入渗率为 116.83 mm/h,最小入渗率为

36 mm/h,衰减系数为4;生物滞留带和雨水花园的蓄水层深度分别为200、150 mm,土壤层厚度为900 mm,孔隙率为0.5,导水率为36 mm/h;植草沟表层深度为250 mm,宽为1 400 mm,边坡为0.5。

2 不同降雨特征下 LID 工程的径流控制效果

2.1 区域降雨特征分析

降雨特征是对实际降雨过程的反映,由历史降雨资料统计分析得出。分析降雨特征首先需要划分降雨场次,场雨的划分依据最小降雨间隔。Adams 等人^[6]研究表明,最小降雨间隔取值在1~6 h之间,且随着最小降雨时间间隔的增大,实际应用性较强。我国《给水排水设计手册》规定无雨标准为持续时间超过120 min且雨强小于0.1 mm/min,作为两场雨的划分标准。

本研究以2 h作为最小降雨间隔,对降雨资料进行处理,划分独立降雨场次,同时扣除降雨量<2 mm不产流的降雨场次,统计年降雨量、年平均场次降雨量、平均降雨间隔、平均降雨历时、暴雨量占比、中小雨量占比等6个降雨特征因素,探析不同降雨特征对低影响开发场地雨水径流总量控制效果的影响。其中,为避免冬、春无雨季节对研究结果的影响,降雨间隔的统计时段为每年雨季5月—10月。暴雨及中小降雨根据国家气象局降雨强度等级划分标准(暴雨:24 h降水总量≥50 mm,中小降雨:24 h降水总量<25 mm)确定。

统计结果如下:北京年平均场次降雨量为8.2~36.98 mm;年平均降雨间隔为103.81~211.68 h,多年平均降雨间隔为139.65 h;年平均降雨历时范围为3.48~19.53 h,多年平均降雨历时为7.31 h;暴雨量占比范围为0~51.32%,其中1989年、1999年、2002年、2005年和2006年的暴雨量占比均为零;中小雨量占比范围为18.64%~87.36%。

2.2 降雨特征对径流总量控制效果的影响

选取30年实测分钟降雨数据,对停车场进行长历时模拟,分析各年的径流控制效果。研究以各年雨水量控制比例作为评价场地径流控制效果的指标,与“年径流总量控制率”指标不能简单等同,前者是一年的雨水径流控制效果,后者是多年平均的雨水径流控制效果。30年各年雨水量控制比例范围为78.81%~96.77%。

为验证各降雨特征与雨水径流控制效果间的相关关系,采用IBM SPSS 22软件,分析降雨特征对场地雨水径流控制效果的影响程度。应用斯皮尔曼(Spearman)相关系数法,以相关系数 r 值作为评判标准:① $r>0$ 表示两变量正相关, $r<0$ 表示两变量负相关;②当 $|r|\geq 0.8$ 时,可以认为两变量间高度相关;③当 $0.5\leq|r|<0.8$ 时,可以认为两变量中度相关;④当 $0.3\leq|r|<0.5$ 时,可以认为两变量相关度低;⑤当 $0\leq|r|<0.3$ 时,说明相关程度弱。结果见表1。

表1 不同降雨特征条件与年雨水量控制比例相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of rainfall capture ratio with different rainfall characteristics

项 目		年雨水量 控制比例	年降 雨量	年平均场 次降雨量	平均降 雨间隔	平均降 雨历时	暴雨 占比	中小雨 量占比
年雨水量 控制比例	相关系数	1.000						
	显著性(双尾)							
年降雨量	相关系数	-0.660**	1.000					
	显著性(双尾)	0.000						
年平均场 次降雨量	相关系数	-0.750**	0.792**	1.000				
	显著性(双尾)	0.000	0.000					
平均降 雨间隔	相关系数	0.366*	-0.733**	-0.393*	1.000			
	显著性(双尾)	0.047	0.000	0.032				
平均降 雨历时	相关系数	0.175	-0.024	0.121	0.315	1.000		
	显著性(双尾)	0.354	0.898	0.524	0.090			
暴雨量占比	相关系数	-0.844**	0.545**	0.703**	-0.273	0.065	1.000	
	显著性(双尾)	0.000	0.002	0.000	0.145	0.732		
中小雨 量占比	相关系数	0.552**	-0.483**	-0.762**	0.164	-0.146	-0.719**	1.000
	显著性(双尾)	0.002	0.007	0.000	0.388	0.442	0.000	
注:“**”表示在置信度(双测)为0.01时,相关性是显著的;“*”表示在置信度(双测)为0.05时,相关性是显著的。								

2.2.1 降雨间隔对径流控制效果的影响

根据多年平均降雨间隔与年雨水量控制比例统计结果,两者间存在雨水量控制效果随降雨间隔的增大而增加的趋势(见图5)。相关性分析结果也表明,降雨间隔与设施雨水径流控制效果的相关系数为0.336*,存在一定的正相关关系。然而,由于存在其他降雨特征因素的影响,雨水径流总量控制效果呈波动上升现象。以1984年为例,该年平均降雨间隔为171.94 h,处于较高水平,但其场地雨水量控制比例仅为78.81%,处于较低水平。究其原因,该年较高的暴雨量占比(49%)是导致径流削减效果不理想的主因。

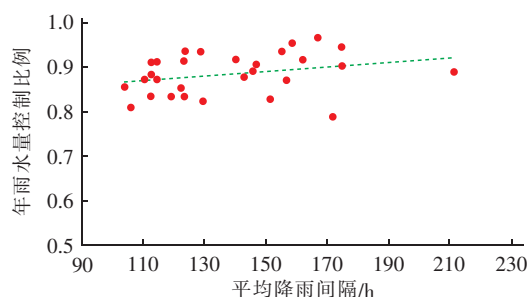


图5 平均降雨间隔与年雨水量控制比例的关系

Fig.5 Relationship between rainfall capture ratio and rainfall interval

降雨间隔对雨水设施径流总量的削减效果主要体现在两个方面:①降雨间隔是影响土壤含水率的主要因素之一。已有研究表明,降雨间隔越大,土壤含水量越低,其滞留雨水和下渗的能力就越强。在降雨量及其他降雨特征因素相近的年份,场地雨水设施对径流总量的控制效果取决于降雨间隔,降雨间隔越大,则雨水设施的径流控制效果就越好。②在降雨频繁的雨季,雨水设施需要应对持续、间隔时间短的降雨事件,如果雨水设施未及时排空,其剩余的调蓄空间不足以应对下一场降雨的冲击,则雨水设施的径流控制效果会受到一定的影响。

2.2.2 降雨历时对径流控制效果的影响

降雨历时是影响低影响开发场地径流控制效果的另一个降雨特征因素。由平均降雨历时与年雨水量控制比例的关系可知,降雨历时越长,则场地雨水径流总量控制效果越好(见图6)。相关分析表明,降雨历时与场地雨水径流控制效果的相关系数仅为0.175,存在正相关关系,但是相关性程度弱,相对于其他降雨特征而言,降雨历时对径流控制效果的影

响程度较低。

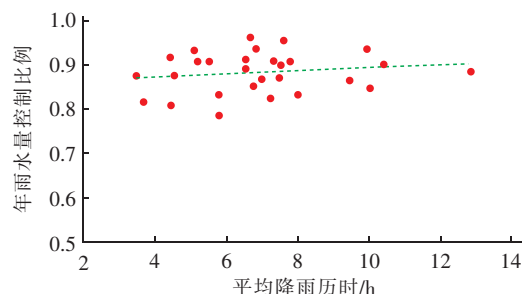


图6 平均降雨历时与年雨水量控制比例的关系

Fig.6 Relationship between rainfall capture ratio and rainfall duration

地表产流规律受降雨强度影响,而相同降雨量条件下,降雨历时长意味着平均降雨强度低,导致场地产流量降低,入渗量增加,相对而言,场地的雨水径流总量控制效果就越好。此外,针对低影响开发渗透雨水设施,其调蓄容积按照《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》的推荐方法进行计算(设施进水量与渗透量差值),其中渗透量为降雨过程中设施的入渗径流量,渗透历时取值不大于降雨历时,指南中推荐渗透时间取2 h。根据多年降雨历时统计结果显示,多年平均降雨历时为7.3 h,高于指南中推荐的2 h渗透历时。因此,降雨历时影响设施规模的确定,对径流控制效果存在不同程度的影响,需要在后续研究中进一步详细讨论。

2.2.3 暴雨量占比和中小雨量占比的影响

暴雨量占比和中小雨量占比是影响低影响开发设施径流控制效果的另两个重要降雨特征因素,低影响开发强调源头径流雨水控制,主要针对城市中小降雨,而对暴雨事件的控制效果较差,暴雨量占比越大,雨水设施的径流控制效果就越低(见图7)。在暴雨量占比为零的年份,年雨水量控制比例均高于0.9,对雨水径流的控制效果显著。暴雨量占比和中小雨量占比与年雨水量控制比例的相关系数分别为-0.761**、0.508**,暴雨量占比与径流控制效果的相关性大于中小雨量占比,表明雨水设施径流总量控制效果更易受到暴雨的影响。暴雨事件或者极端大暴雨事件的降雨量较大,且降雨强度高,其产生的径流总量远远超过设施的设计能力,多数径流通过溢流排入市政管网,严重影响雨水设施的径流总量控制效果。

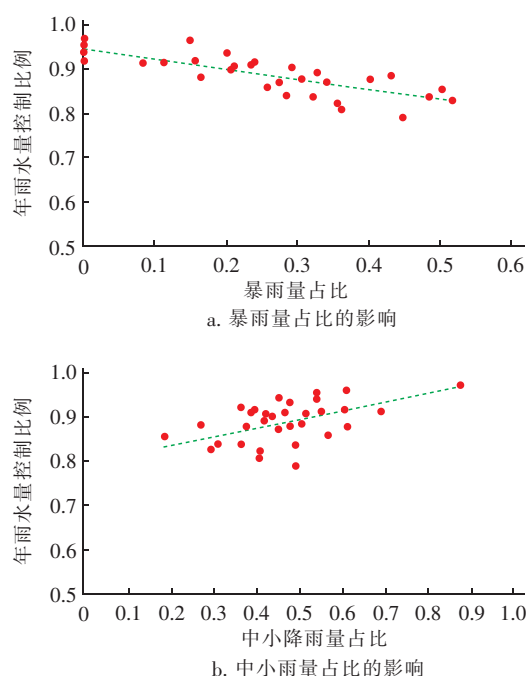


图7 暴雨量占比/中小雨量占比与年雨水量控制比例的关系

Fig.7 Relationship between rainfall capture ratio and small and medium rainfall events/rainstorms

场地雨水设施实际运行效果和全国各城市设计降雨量与年径流总量控制率统计规律一致,设计降雨量与全年降雨特征分布存在一定相关性:强降雨(如日降雨量 ≥ 50 mm的暴雨)的雨量占年总降雨量的比例越大,或中小降雨(日降雨量 < 25 mm的降雨)的雨量占年总降雨量的比例越小,则设计降雨量越大^[2]。因此,针对暴雨频繁的地域,需要合理制定年径流总量控制率目标。

2.2.4 降雨量对径流控制效果的影响

降雨量包括年降雨量与年平均场次降雨量,模拟结果显示,年降雨量和年平均场次降雨量与年雨水量控制比例均大致呈幂指数相关性,径流控制效果随降雨量的降低而增大(见图8)。相关性分析结果显示,年降雨量和平均场次降雨量与场地径流控制效果的相关系数分别为 -0.660^{**} 、 -0.750^{**} ,相关度较高;降雨量越大,则场地雨水设施对雨水径流的控制效果就越低。年降雨量与暴雨量占比、中小雨量占比、年平均场次降雨量等降雨特征有较弱的关系,年降雨量与暴雨量占比、年平均场次降雨量的相关系数分别为 0.792^{**} 、 0.545^{**} ,表明:年降雨量大的年份,暴雨场次数量也相应较多,场地径流

控制效果易受到较大的影响。

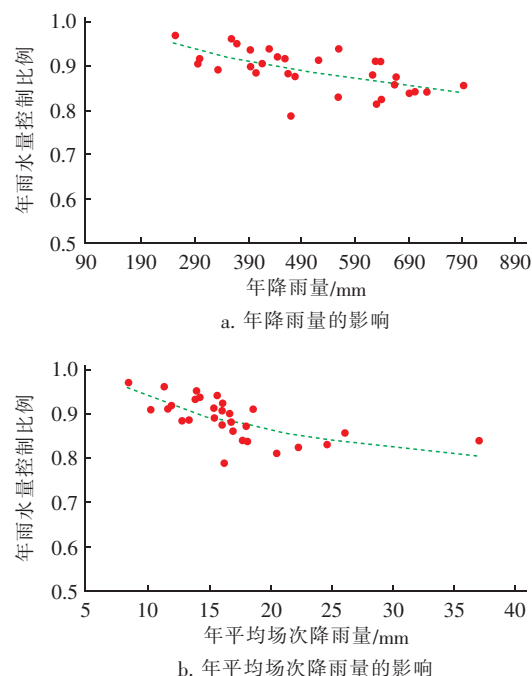


图8 年降雨量/年平均场次降雨量与年雨水量控制比例的关系

Fig.8 Relationship between rainfall capture ratio and rainfall depth

根据多年降雨特征与年雨水量控制比例关系的模拟分析结果,场地径流控制效果是多个降雨特征因素共同影响的结果,各因素的影响程度各不相同。年降雨量、年平均场次降雨量、暴雨量占比与径流控制效果之间存在负相关,平均降雨间隔、平均降雨历时、中小雨量占比与径流控制效果之间存在正相关;与径流控制效果的相关性程度由高到低依次为暴雨量占比、平均场次降雨量、年降雨量、中小雨量占比、平均降雨间隔、平均降雨历时,其中暴雨量占比和降雨量是影响设施径流控制效果的主要降雨特征。

3 结论

① 年降雨量、年平均场次降雨量、年平均降雨间隔、年平均降雨历时、暴雨量占比、中小雨量占比等各降雨特征共同影响雨水设施的径流控制效果,雨水设施的径流控制效果随中小雨量占比、降雨间隔、降雨历时的增加而升高,随暴雨量占比、降雨量的增加而降低,各降雨特征与径流控制效果之间的相关性程度由高到低依次为暴雨量占比、平均场次降雨量、年降雨量、中小雨量占比、平均降雨间隔、平

均降雨历时。

② 降雨量特征包括年降雨量和年平均场次降雨量,其与暴雨量占比是影响雨水设施径流控制效果的最主要降雨特征,且降雨量与暴雨量占比之间存在较强的相关关系。

③ 降雨间隔和降雨历时与雨水径流控制效果之间存在正相关关系,但相对于其他降雨特征其影响程度较小。

参考文献:

- [1] 车伍,赵杨,李俊奇. 海绵城市建设热潮下的冷思考[J]. 南方建筑,2015,(4):104-107.
Che Wu,Zhao Yang,Li Junqi. Considerations and discussions about sponge city[J]. South Architecture,2015,(4):104-107(in Chinese).
- [2] 李俊奇,王文亮,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水,2015,31(8):6-12.
Li Junqi,Wang Wenliang,Che Wu,et al. Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: regional division for total rainfall runoff volume capture target[J]. China Water & Wastewater,2015,31(8):6-12(in Chinese).
- [3] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 雨水径流总量控制目标确定与落地的若干问题探讨[J]. 给水排水,2016,42(10):61-69.
Wang Wenliang,Li Junqi,Che Wu,et al. Discussion on

some problems in the determination and realization of total rainfall runoff flow rate control[J]. Water & Wastewater Engineering,2016,42(10):61-69(in Chinese).

- [4] Emerson C H,Traver R G. Multiyear and seasonal variation of infiltration from storm-water best management practices[J]. J Irrig Drain Eng,2008,134(5):598-605.
- [5] Muthanna T M,Vikler M,Thorolfsson S T. Seasonal climatic effects on the hydrology of a rain garden[J]. Hydrol Process,2010,22(11):1640-1649.
- [6] Adams B J,Fraser H G,Howard C D D,et al. Meteorological data analysis for drainage system design[J]. J Environ Eng,1986,112(5):827-848.



作者简介:宫永伟(1982-),男,山东即墨人,博士,副教授,研究方向为城市雨洪控制与利用。

E-mail:gongyongwei@bucea.edu.cn

收稿日期:2018-01-12

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命