

雨洪管理措施的水环境效应差异

——基于Meta的中国案例分析

邓金玲¹, 尹海伟², 仇 是², 朱 捷², 陈佳宇¹, 费 凡², 孔繁花¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023; 2. 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093)

摘要: 雨洪管理措施的应用可有效控制雨水径流量及其污染物, 系统分析雨洪管理措施对径流及其污染物的影响有助于理解雨洪管理的水环境效应。本文基于Meta方法整理国内已发表的文献案例, 通过提取雨洪管理措施的类型、应用尺度、降雨特征及径流量和污染物削减率等信息, 综述了雨洪管理措施应用后径流量和污染物的变化。结果表明: (1) 不同雨洪管理措施所产生的水环境效应存在差异, 样本中屋顶绿化的径流削减能力最强, 透水铺装的径流污染物削减效果最佳; (2) 雨洪管理措施对水环境的影响具有尺度效应, 大尺度区域内雨洪管理措施对径流量削减作用较弱, 而小尺度区域内径流污染物削减作用较弱; (3) 雨洪管理措施对径流量及其污染物的削减能力随降雨量增加呈下降趋势。结合案例数据, 系统分析了雨洪管理措施在径流量及其污染物控制效果上的差异及成因, 可为径流调控与污染治理等实践提供理论参考。

关键词: 雨洪管理措施; 径流量; 水质; Meta

城市化发展导致不透水面面积增加, 绿地、河湖等蓄水景观逐渐减少且日益破碎化^[1,2], 进而影响地表径流的形成过程。已有研究表明, 城市发展引起的不透水面空间格局演变会阻碍地表径流排放至绿地、河湖等透水面, 削弱乃至切断景观组分间在汇流过程中的水文联系, 对径流的截留和污染物的削减等产生不利影响^[3,4], 从而引发场地内涝积水和地表水污染等问题^[5]。为有效改善城市内涝和缓解径流污染等水环境问题, 多个国家形成了各具特色的雨洪管理体系, 如美国的最佳管理措施 (Best Management Practices, BMPs) 和低影响开发措施 (Low Impact Development, LID)、澳大利亚的水敏性城市设计 (Water Sensitive Urban Design) 和英国推行的可持续城市雨水系统 (Sustainable Urban Drainage System, SUDS) 等^[6], 旨在通过植草沟、雨水桶、绿色屋顶、下凹式绿地、透水铺装和生物滞留池等生态化的工程措施截留地表径流和削减径流污染物, 以恢复自然水文过程^[7]。与部分发达国家相比, 我国的城市雨洪管理工作起步较晚, 但近年来全国多地积极开展海绵城市试点, 雨洪管理措施的实践应用及其研究得到快速推进。

雨洪管理措施对水文过程的影响复杂多变, 其对径流量及其污染物的削减效果与地区气候条件、水文条件和场地环境等因素密切相关^[8-10]。随着人们对水环境治理问题重要性的认知加强, 大量研究探讨了屋顶绿化、雨水花园和生态植草沟等雨洪管理措施对径流量和径流污染物的削减作用^[11-13]。已有个案研究采用实地监测方法、模型模拟或两者结

收稿日期: 2019-08-22; 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31670470, 51878328); 国家重点研发计划项目 (2017YFE0196000)

作者简介: 邓金玲 (1995-), 女, 广东罗定人, 硕士, 研究方向为生态水文学。E-mail: gamlingdang@163.com

通讯作者: 孔繁花 (1975-), 女, 山东日照人, 博士, 教授, 研究方向为景观生态与人居环境健康。

E-mail: fanhuakong@163.com

合的方法来阐明雨洪管理措施的应用后径流量及其污染物的变化。Gregoire等^[14]以美国康涅狄格大学为研究对象,通过定点监测数据发现屋顶绿化对径流量平均削减率为51.4%,但屋顶绿化对径流污染物总磷(Total Phosphorus, TP)没有产生削减作用;Carpenter等^[15]在纽约州雪城卓越中心(CoE)对87场次降雨事件进行监测,研究结果表明屋顶绿化的平均径流削减率高达96.8%,从非生长季节到生长季节的转变中,屋顶绿化对TP的削减率均值由97.6%下降至74.5%。陈莎等^[16]以佛山市某小区为研究对象,通过SWMM模型模拟雨洪管理措施对径流量和污染物的削减效果,结果表明在屋顶绿化基础上组合布设雨水花园和透水铺装可以有效削减径流量及污染物,降雨重现期为1年背景下径流量和TP的削减率均高于60%。然而,各研究案例在气候背景和分析方法等方面存在差异,致使已有的研究结论不尽相同,而且个案研究的数据样本量有限,约束了雨洪管理措施对水环境效应影响的科学解释。

为突破个案研究的局限性,国内外学者常采用Meta分析方法整合多项研究的实验数据并以定量化方式识别变量之间的关系^[17]。Meta方法作为有效的文献综述与分析工具,最初主要应用在心理学、医学领域,目前在生态学、环境科学、地理学等学科中也得到广泛的应用^[18-20]。国外学者曾整合研究案例综述雨洪管理措施对水文和水质的影响特征,如Akther等^[21]通过整理不同地区的屋顶绿化案例数据,论证了径流量及其污染物削减率差异受气候区的影响。相对于传统的定性综述方法,该方法通过比较多项数据,有效分析屋顶绿化对径流量控制和水质净化的贡献差异及其成因。然而,除地区气候外,雨洪管理措施种类多样,应用尺度不一,其对水文、水质贡献差异还受场次降雨事件特征的影响,这些因素在雨洪管理措施的水环境效应分析中较少得到关注。此外,国内雨洪管理发展晚于部分发达国家,基于案例系统分析雨洪管理措施对水环境影响的研究有待发展。

基于此,本文通过梳理国内雨洪管理措施及其水环境效应相关的研究案例,采用量化方法从措施类型、尺度效应和降雨条件三个角度探讨雨洪管理措施的水环境效应差异,分析雨洪管理措施应用情景下径流量和径流污染物的变化特征及其成因,并对现有研究的内容、分析框架及其实际应用工作进行评述和展望,尝试为国内水环境效应研究和雨洪管理工作提供理论参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 数据来源

本文基于中国知网文献数据库,分别以“LID”“低影响开发”“雨洪管理措施”“绿色基础设施”“景观”“径流调控”“水质”为关键词进行文献检索。考虑到研究的时效性,检索时文章发表时间设定在2010—2019年。先通过阅读摘要,获得92篇符合主题的文献。然后,对获取的文献作进一步筛选:通读文章,确保文章记录有雨洪管理措施类型、径流量数据、水质污染物类型、水质评价指标、降雨数据等有效信息,以保证文献符合数据分析的要求。为保障数据的真实性和有效性,若采用模型模拟方法但缺乏实测数据作为参数率定依据的案例,则从样本中剔除。通过筛选,最终获取符合研究要求的文献共计35篇。在此基础上,以降雨事件为单位对数据进行整理,共计获取621个样本量,文献基本信息描述如表1所示。

表1 样本文献获取信息描述

Table 1 Information obtained from the sample papers

编号	研究区描述	样本量/个	降雨类型	雨洪管理措施 ¹	水环境效应 ²
01 ^[22]	北京市, 12个1 m×1 m的屋顶绿化模块	9	自然降雨	a	V
02 ^[23]	天津市, 4个2 m×2 m×0.96 m的透水铺装土槽	8	模拟降雨	d	V
03 ^[24]	扬州市, 4 m×1 m的下凹绿地实验场地	48	模拟降雨	e	V
04 ^[25]	嘉兴市, 1 m×0.5 m的透水铺装实验装置	6	模拟降雨	d	P
05 ^[26]	温岭市, 汇水面积约1625 m ² 的低位绿地采样点	15	自然降雨	e	V; P
06 ^[27]	上海市, 5条2 m×0.4 m×0.6 m的植草沟	15	模拟降雨	b	V
07 ^[28]	西安市, 2个3 m×4 m×0.85 m的雨水花园	28	自然降雨	f	V
08 ^[29]	深圳市, 汇水面积为35 m ² 的道路区域采样点	20	自然降雨	c; d	P
09 ^[30]	深圳市, 2.4 m×1.2 m×0.6 m的下凹绿地实验装置	32	模拟降雨	e	P
10 ^[31]	嘉兴市, 0.5 m×0.5 m×1 m的透水铺装实验装置	12	模拟降雨	d	P
11 ^[32]	北京市, 25 m×2 m的试验植草沟	8	模拟降雨	b	V
12 ^[33]	常州市, 污水厂1000 m×0.3 m×0.4 m的植草沟	12	自然降雨	b	P
13 ^[34]	北京市, 占地22.5 hm ² 公园区域内的汇水分区	9	自然降雨	d; f	P
14 ^[35]	保定市, 280 m ² 的径流场, 配置有12 m ² 的滞留池	18	自然降雨	c	P
15 ^[36]	北京市, 10个0.3 m×0.3 m×0.7 m的生物滞留单元	3	模拟降雨	c	P
16 ^[37]	天津市, 3个0.61 m×0.61 m×0.85 m的渗透路面	18	模拟降雨	d	V
17 ^[38]	北京市, 直径1 m、高0.8 m的下凹式绿地实验装置	4	模拟降雨	e	P
18 ^[39]	北京市, 390 m ² 的汇流区, 配置12 m ² 的雨水花园	18	自然降雨	f	P
19 ^[40]	云南省, 2个3 m×0.5 m×0.5 m的植草带试验装置	45	模拟降雨	b	V; P
20 ^[41]	深圳市, 9个1.5 m×1.2 m×0.3 m的植草沟试验槽	9	模拟降雨	b	V
21 ^[42]	北京市, 0.8 m×0.8 m×0.3 m的屋顶绿化试验装置	4	模拟降雨	a	V
22 ^[43]	宜兴市, 4.46 hm ² 的中心城区区域	6	设计降雨	d	V
23 ^[44]	宜兴市, 4.68 hm ² 的中心城区区域	15	设计降雨	c	V; P
24 ^[45]	天津市, 中心城区及环城四区内的9个子流域	36	设计降雨	c; d	V
25 ^[46]	济南市, 海绵城市试点区内5.66 km ² 的小流域	3	设计降雨	a; d; e	V
26 ^[47]	广州市, 荔湾区内43.29万m ² 的社区	90	设计降雨	a; d; e	V; P
27 ^[48]	宜兴市, 4.68 hm ² 的中心城区区域	30	设计降雨	c; d; f	V; P
28 ^[49]	保定市, 河南农业大学内占地2.02 hm ² 的研究区域	5	设计降雨	d	V
29 ^[50]	南昌市, 某廉租房区内约2 hm ² 的研究区域	22	设计降雨	a; b; d; e	V; P
30 ^[51]	西安市, 西安市某排水片区, 面积约16.46 km ²	15	设计降雨	f	V; P
31 ^[52]	长汀县, 汀州镇及大同镇部分地区, 共19.77 km ²	3	设计降雨	d; e; g	V
32 ^[53]	北京市, 海淀区一典型城市社区, 面积约2.46 hm ²	8	设计降雨	c; d; e	V
33 ^[54]	深圳市, 民治河流域, 集雨面积为19.23 km ²	15	设计降雨	d; e	V
34 ^[55]	宜兴市, 4.73 hm ² 的中心城区区域	20	设计降雨	f	V; P
35 ^[56]	北京市, 大红门排水片区, 面积约130 km ²	12	设计降雨	a; d; f	V

注: 1. 雨洪管理措施类型: a=屋顶绿化; b=生态植草沟; c=滞留池; d=透水铺装; e=下凹式绿地; f=雨水花园; g=雨水桶。2. 水环境效应: V表示径流量 (Runoff volume); P表示径流污染物 (Runoff pollution)。

研究样本中, 编号01~21的文献采用实地监测方法, 样本占比为55%; 编号22~35的文献采用模型模拟方法, 样本占比为45%。实地监测的研究区多为小尺度实验样地, 而模型模拟的研究区以大中尺度区域为主, 模拟案例中采用的模型或方法主要包括SWMM、PCSWMM、FRAS和元胞自动机。研究样本的降雨数据来源于实测降雨和依据地区暴雨公式的设计降雨, 实测降雨包括自然降雨和人工模拟降雨, 其中8篇文献的降雨数据源于自然降雨事件, 共计129场次; 13篇文献的降雨数据源于人工模拟降雨事件, 共计212场次; 14篇文献的降雨数据源于设计降雨, 共计280场次。研究样本对水环境效应的分析包括径流量和径流污染物两项指标, 其中同时分析径流量与径流污染物的文献共8篇, 共计252个样本; 单独分析径流量变化的文献有17篇, 共计235个样本; 单独分析径流质量的文献有10篇, 共计134个样本。为统一径流质量的评价指标, 本文选取化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)、悬浮物 (Suspended Solids, SS)、总磷TP和总氮 (Total Nitrogen, TN) 作为水环境污染物质量的评价对象。本次分析中涉及的雨洪管理措施包括屋顶绿化、透水铺装、下凹式绿地、生态植草沟、雨水花园、雨水桶和生物滞留池7种, 采用单一种类雨洪管理措施的样本占比为62.6%, 采用两种及两种以上雨洪管理措施的样本占比为37.4%。

1.2 研究方法

采用单因素ANOVA方法和Kruskal-Wallis检验方法 (非参数检验) 测量雨洪管理措施的水环境效应差异。水环境效应的测量涵盖水质和水量两个方面, 指标包括径流削减率和污染物削减率, 根据措施类型、尺度效应和降雨条件, 检验径流及其污染物削减率指标是否存在差异。首先, 根据雨洪管理措施类型进行样本分类, 对不同雨洪管理措施应用后的径流量和径流污染物变化率进行分析。其次, 依据面积和场地属性, 样本案例中的研究区域被划分为: 小尺度区域 ($<30 \text{ hm}^2$), 以实验样地为主; 中尺度区域 ($30\sim1000 \text{ hm}^2$), 以汇水片区为主; 大尺度区域 ($>1000 \text{ hm}^2$), 以城市流域为主, 然后对比不同尺度区域背景下两个水环境效应指标的差异。最后, 以降雨事件为划分依据, 分析不同降雨条件下雨洪管理措施与水环境效应之间的关系。样本文献中实测自然降雨事件和部分人工降雨事件主要提供降雨量和降雨时长信息, 依据国家气象局的划分标准, 该类样本的降雨事件被划分为小雨 ($<10 \text{ mm}$)、中雨 ($10\sim25 \text{ mm}$)、大雨 ($25\sim50 \text{ mm}$) 和暴雨 ($>50 \text{ mm}$) 四类, 而部分人工降雨和依据地区暴雨公式的设计降雨主要提供降雨重现期信息, 依据降雨重现期, 该类样本的降雨事件被划分为小于一年一遇、一年一遇至十年一遇和大于十年一遇三类。整合多个研究案例的数据, 可识别雨洪管理措施的应用带来的水环境效应变化及其成因, 同时可从环境因素角度阐明雨洪管理措施对水环境的影响规律。

2 结果分析

2.1 雨洪管理措施类型对水环境效应的影响

基于雨洪管理措施的类型进行亚组分析, 从表2中的各类型雨洪管理措施的水环境效应统计结果可以看出: 不同类型雨洪管理措施与径流量削减效果之间存在显著差异 ($P<0.01$), 但不同类型雨洪管理措施与径流污染物削减效果之间的差异在统计水平上不显著。研究案例中, 雨洪管理措施对径流量的平均削减率为45.51%, 其中屋顶绿化的径

流量削减能力最强，透水铺装的径流量削减能力最弱。由于研究样本中雨水桶与其他雨洪管理措施组合使用，缺乏单一使用方式下的径流量和径流污染物统计信息。因此，除雨水桶外，其余六种措施的径流量削减能力排序为：屋顶绿化>下凹式绿地>生态植草沟>雨水花园>透水铺装>滞留池，平均径流量削减率依次为：58.13%、55.03%、46.59%、37.64%、36.27%和28.48%。在径流污染物方面，雨洪管理措施对径流污染物的平均削减率为35.77%，其中透水铺装的污染物净化能力最强，雨水花园的污染物净化能力最弱。除去缺乏统计数据的屋顶绿化和雨水桶，其余五种措施的径流污染物削减能力排序为：透水铺装>下凹式绿地>生态植草沟>滞留池>雨水花园，平均径流量削减率依次为：47.86%、42.02%、36.28%、29.81%和28.32%。

对于具体的径流污染物而言，雨洪管理措施对COD的控制作用最强，对TP的控制作用最弱，四类污染物COD、SS、TN和TP的平均削减率依次为49.42%、43.50%、34.89%和23.93%（图1）。其中，生态植草沟对SS表现出较强的削减能力，对TP的削减能力最弱，径流中SS和TP的平均削减率分别为68.43%和22.46%。滞留池、透水铺装和雨水花园对COD都表现出较强的削减能力，径流中COD的平均削减率分别为54.65%、55.03%和48.00%。滞留池对SS的净化能力最弱，径流中SS的平均削减率仅为9.61%。下凹式绿地对SS表现出较强的削减能力，径流中SS的平均削减率达61.34%。

雨洪管理措施在对污染物处理时表现出来的“源”“汇”作用强弱不一（图2）。样本数据中，透水铺装对径流污染物主要起到“汇”效应，而与透水铺装不同，除“汇”效应外，生态植草沟、滞留池、下凹式绿地和雨水花园均出现不同程度的“源”效应，其中下凹式绿地的“源”效应最为显著。雨洪管理措施可以作为“源”或“汇”对径流污染物产生正向或负向的作用，出现“源”效应的

表2 雨洪管理措施类型下径流量与污染物
削减率的描述统计

Table 2 Statistics of reduction rate of runoff and pollutants
corresponding to stormwater management measures (%)

雨洪管理 措施	径流量		径流污染物	
	均值	标准差	均值	标准差
屋顶绿化	58.13	23.52	—	—
生态植草沟	46.59	28.17	36.28	44.14
滞留池	28.48	31.77	29.81	37.88
透水铺装	36.27	19.68	47.86	24.04
下凹式绿地	55.03	20.14	42.02	55.59
雨水花园	37.64	22.15	28.32	31.21
均值	45.51	24.23	35.77	42.31

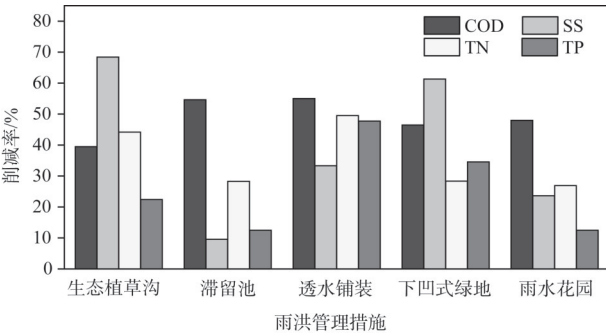


图1 雨洪管理措施类型对四种污染物的平均削减率

Fig. 1 Average reduction rate of four pollutants corresponding to stormwater management measures

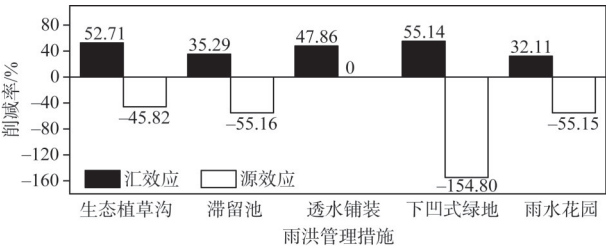


图2 雨洪管理措施类型对径流污染物的源汇效应统计

Fig. 2 Results of the source-sink effects of runoff pollutants corresponding to stormwater management measures

样本文献编号为05、12、13、14、18和19。样本中TP的“源”效应最为明显,出现“源”效应时TP削减率范围约为-213%~-6%。依据案例研究者的解释,雨洪管理措施对径流污染物的净化过程较为复杂,受径流冲刷、降雨间隔、前次降雨溶解污染物残留等的影响,污染物去除效果波动较大,污染物削减率会出现负值情况。值得注意的是,产生“源”效应的样本均为实测案例,模型模拟方法下径流污染的“源”“汇”效应未显现。

2.2 雨洪管理措施应用尺度对水环境效应的影响

雨洪管理措施的应用对水环境产生的影响具有尺度效应(图3),雨洪管理措施对径流量削减效果在三种尺度区域之间存在显著差异($P < 0.01$)。从样本数据来看,三种尺度区域中径流量的平均削减率依次为46.02%、47.60%和34.77%。随尺度的增大,雨洪管理措施对径流量的控制作用总体呈下降趋势,中小尺度区域间的径流量削减率差异较小,而大尺度研究区域内雨洪管理措施对径流量的削减作用较中小尺度区域弱。如

编号为07和30的案例,在采用同一类型雨洪管理措施背景下,两个案例的径流量削减范围分别约为26%~42%和10%~86%,平均径流量削减率分别为41.77%和32.97%。这是由于前者研究区域以小尺度的实验样地为主,雨洪管理措施所服务的汇流面积比例较高,而后者为大尺度的流域片区,受城市建设、建筑物布局等影响,雨洪管理措施的实施面积有限,占比仅为2%,约束了雨洪管理措施的径流控制能力。

在径流污染物控制方面,三种尺度区域中雨洪管理措施对径流污染物的平均削减率依次为35.92%、40.96%和40.69%。尽管径流污染物削减效果在三种尺度区域之间的差异在统计水平上不显著,与径流量控制作用相似,大尺度区域的径流污染物削减率较中尺度区域低。小尺度区域的径流污染物削减率均值略低于大中尺度区域,这是由于样本中雨洪管理措施的“源”效应主要出现在小尺度区域。此外,在小、中、大三种尺度区域之间,径流量削减效果的平均变化幅度较径流污染物的大,前者为15.19%,而后者为7.35%,这表明径流量削减效果对雨洪管理措施应用尺度的变化更为敏感。

2.3 降雨情景下雨洪管理措施对水环境效应的影响

雨洪管理措施对水环境效应的影响与降雨事件特征相关(图4、图5)。整体上看,随着降雨类型从小雨到暴雨的转变($P < 0.1$)和降雨重现期的增大($P < 0.01$),平均径流量和径流污染物削减率呈递减趋势。基于降雨类型统计的径流量和径流污染物平均削减率为46.17%和37.35%,基于降雨重现期统计的径流量和径流污染物平均削减率为41.95%和37.13%。相对于降雨量较大的事件,在小雨降雨事件和小于一年一遇的降雨事件中,雨洪管理措施可产生较显著的径流量削减效果,而在暴雨事件和大于十年一遇的降雨事件中,径流量的平均削减率分别为42.12%和32.97%,径流污染物的平均削减率分

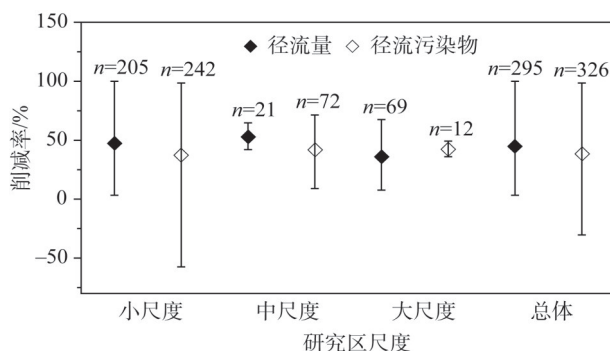


图3 不同研究区尺度下雨洪管理措施对径流量和径流污染物的平均削减率

Fig. 3 Average reduction rate of runoff and pollutants corresponding to stormwater management measures on different scales

别为 18.17% 和 24.87%，均低于总体平均水平。以编号为 19 样本为例，在污染物浓度逐渐增加的试验背景下，随着降雨强度和降雨量的增大，雨洪管理措施的径流削减率从 59.81% 下降至 8.18%，TN 的削减率从 82.98% 下降至 28.29%，TP 的削减率从 73.97% 下降至 -30.26%。这是因为降雨情景的变化影响雨洪管理措施的入渗，继而降低对径流的削减作用，而且降雨量的增加使累积在地表景观中的污染物被冲刷至径流中，造成径流中污染物浓度和含量提高的现象。值得注意的是，样本数据中小雨事件所对应的雨洪管理措施以滞留池和雨水花园为主，受雨洪管理措施属性的影响，这类集雨型雨洪管理措施对径流污染物的净化作用较低，这使得小雨事件中雨洪管理措施对径流污染物的平均削减率低于中雨和大雨事件，但仍高于暴雨事件。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于 Meta 方法对国内已有研究进行梳理，从雨洪管理措施的类型、应用尺度和降雨特征三方面解释雨洪管理措施对水环境的影响。通过应用文献案例数据来评估雨洪管理措施对径流量及其污染物的影响，能有效揭示雨洪管理与水环境效应之间的联系。雨洪管理措施影响着径流量和径流污染物的削减效果，在单一使用方式的雨洪管理措施中，屋顶绿化的径流量削减能力最强，透水铺装的径流污染物削减效果最佳。雨洪管理措施对水环境的影响具有尺度效应，径流量削减效果对雨洪管理措施应用尺度的变化更为敏感。降雨事件特征会影响雨洪管理措施对径流量及其污染物的削减能力，降雨情景的变化如降雨强度和降雨量等会影响雨洪管理措施的功能状态，表现为：降雨量越大或降雨重现期越大，雨洪管理措施对径流量的截流能力和对污染物的净化能力有所降低。

3.2 讨论

3.2.1 不确定分析

由于雨洪管理措施对水环境的效应受到多种因素的综合影响，本文的研究结论尚有不不确定性。就数据本身而言，气候变化和城市开发方向以及这些变化对雨洪措施发挥径

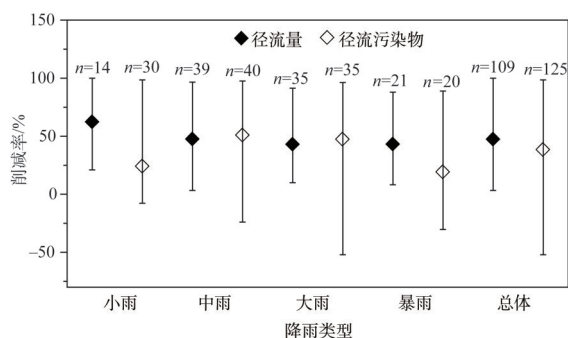


图4 不同类型降雨下雨洪管理措施对径流量和径流污染物的平均削减率

Fig. 4 Average reduction rate of runoff and pollutants corresponding to stormwater management measures in different rainfall events

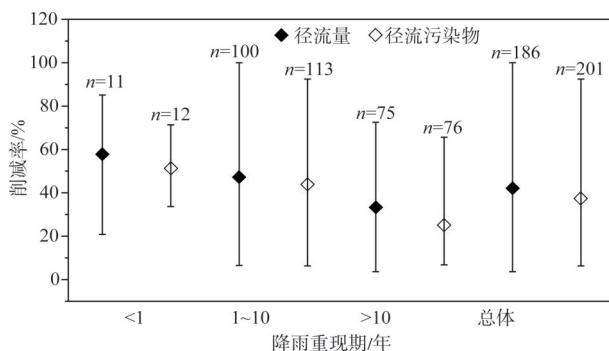


图5 不同降雨重现期背景下雨洪管理措施对径流量和径流污染物的平均削减率

Fig. 5 Average reduction rate of runoff and pollutants corresponding to stormwater management measures in different rainfall return periods

流量与污染物削减作用的影响, 都是不确定的。本文对雨洪管理措施的水环境效应差异的研究进展进行综述, 研究数据来源于国内2010—2019年间发表的文献案例, 由于样本文章筛选时要求数据完整呈现, 而且受国内雨洪管理试点城市的影响, 本次分析的文献案例数量和来源有限。因此, 在未来的研究中, 有必要扩大样本数量和提高数据代表性以获取更为全面的分析结果。

其次, 本文着重分析措施类型、应用尺度和降雨条件背景下雨洪管理措施对径流量和径流污染物的影响, 但径流水文和水质也与雨洪管理措施布设密度、组合方式和场地应用环境等密切相关, 这些因素与地区气候变化、植被盖度、水文条件、土壤性质等环境因子以复杂的方式综合影响着雨洪管理措施的功能。此外, 雨洪管理措施的水环境效应会因季节和汛期变化、场地景观空间格局等产生时空差异。在同一场次降雨的不同时间节点, 雨洪管理措施对径流量、径流峰值和径流污染物浓度的控制作用差异较大。在长时间的生命周期内, 雨洪管理措施径流量及其污染物控制能力具有衰变性特点, 而且受维护管理及材质等的影响。因此, 为进一步理解雨洪管理工作与水环境系统之间的联系, 有必要对这些潜在影响因素加以讨论。

3.2.2 研究展望

本文的研究结论表明, 雨洪管理措施的径流量和径流污染物削减效果受措施类型及其应用尺度、降雨特征的影响, 这与Ahiablame等^[57]在文献综述中探讨LID效用的研究结果相吻合。通过系统分析已有的研究个案, 可整体把握我国雨洪管理措施的研究进展, 也可以识别以往研究中具体雨洪管理措施与水环境效应之间的影响规律, 这将为雨洪管理措施对水环境效应的定量分析提供研究支撑, 也可雨洪管理措施的实践应用提供理论参考。为了使雨洪管理措施更好地发挥对水环境影响的正向效应, 提出以下展望: 首先, 国内雨洪管理的水环境效应研究仍处于起步阶段, 相关研究偏重于现象描述, 这需要建立起有效的量化分析框架, 对雨洪管理措施应用前后径流量和径流污染物的变化进行深入的影响机理分析。其次, 雨洪管理措施对径流量及其污染物的影响在时间和空间尺度上存在着差异性, 这需要依托长期的观测平台和监测数据, 开发雨洪管理模型对水环境效应进行模拟和预测, 为雨洪管理措施的实践应用提供研究基础。最后, 雨洪管理措施对水文过程的影响较为复杂, 而且与地区地理环境、气候、水文等因素相关, 这需要因地制宜形成管理系统体系, 综合分析评价各种影响因素, 为雨洪管理工作提供科学的依据, 并通过科学合理的规划方案提高雨洪管理的综合生态环境效益。

参考文献(References):

- [1] PALLA A, GNECCO I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 361-368.
- [2] MOGLEN G E. Hydrology and impervious areas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 303-304.
- [3] JACOBSON C R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1438-1448.
- [4] MORÁN-TEJEDA E, CEBALLOS-BARBANCHO A, LLORENTE-PINTO J M. Hydrological response of Mediterranean headwaters to climate oscillations and land-cover changes: The mountains of Duero River Basin (Central Spain). *Global and Planetary Change*, 2010, 72(1): 39-49.
- [5] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化LID模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 719-731. [LIU C M, ZHANG Y Y, WANG Z G, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water

- cycle in urbanized area: A preliminary study of planning and techniques for sponge city. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 719-731.]
- [6] KONG F, BAN Y, YIN H, et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 132-142.
- [7] FLETCHER T D, SHUSTER W, HUNT W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 2015, 12(7): 525-542.
- [8] PYKE C, WARREN M P, JOHNSON T, et al. Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 166-173.
- [9] NEWCOMER M E, GURDAK J J, SKLAR L S, et al. Urban recharge beneath low impact development and effects of climate variability and change. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1716-1734.
- [10] ZELLNER M, MASSEY D, MINOR E, et al. Exploring the effects of green infrastructure placement on neighborhood-level flooding via spatially explicit simulations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016, 59: 116-128.
- [11] LEE J Y, LEE M J, HAN M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. *Journal of Environmental Management*, 2015, 152: 171-176.
- [12] RICHARDS P J, FARRELL C, TOM M, et al. Vegetable raingardens can produce food and reduce stormwater runoff. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(3): 646-654.
- [13] MANGANGKA I R, LIU A, EGODAWATTA P, et al. Performance characterisation of a stormwater treatment bioretention basin. *Journal of Environmental Management*, 2015, 150: 173-178.
- [14] GREGOIRE B G, CLAUSEN J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 2011, 37(6): 963-969.
- [15] CARPENTER C M G, TODOROV D, DRISCOLL C T, et al. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 664-672.
- [16] 陈莎, 陈晓宏. 城市雨水径流污染及LID控制效果模拟. *水资源保护*, 2018, 34(5): 13-19. [CHEN S, CHEN X H. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development. *Water Resource Protection*, 2018, 34(5): 13-19.]
- [17] LIGHT R, SMITH P. Accumulating evidence: Procedures for resolving con-tradictions among different research studies. *Harvard Education Review*, 1971, 41: 429-471.
- [18] LAGANIERE J, ANGERS D A, PARE D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 439-453.
- [19] ILSTEDT U, MALMER A, VERBEETEN E, et al. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(1-2): 45-51.
- [20] 张学珍, 赵彩杉, 董金玮, 等. 1992—2017年基于荟萃分析的中国耕地撂荒时空特征. *地理学报*, 2019, 74(3): 411-420. [ZHANG X Z, ZHAO C S, DONG J W, et al. Spatio-temporal pattern of cropland abandonment in China from 1992 to 2017: A Meta-analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 411-420.]
- [21] AKTHER M, HE J, CHU A, et al. A review of green roof applications for managing urban stormwater in different climatic zones. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2864.
- [22] 葛德, 张守红. 不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响. *环境科学*, 2018, 39(11): 5015-5023. [GE D, ZHANG S H. Impacts of vegetation on hydrological performances of green roofs under different rainfall conditions. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5015-5023.]
- [23] 张曼, 周可可, 张婷, 等. 城市典型LID措施水文效应及雨洪控制效果分析. *水力发电学报*, 2019, 38(5): 57-71. [ZHANG M, ZHOU K K, ZHANG T, et al. Hydrological responses and stormwater control effects of typical urban LID measures. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(5): 57-71.]
- [24] 赵庆俊, 丛海兵, 汪智霞, 等. 高渗透下凹绿地对城市降雨径流的削减作用研究. *水利水电技术*, 2018, 49(9): 41-48. [ZHAO Q J, CONG H B, WANG Z X, et al. Study on urban rainfall runoff reduction effect of high permeable concave-down green space. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(9): 41-48.]
- [25] 王俊岭, 张智贤, 秦全城, 等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区的水质控制试验. *水资源保护*, 2019, 35(3): 63-68, 75. [WANG J L, ZHANG Z X, QIN Q C, et al. Water quality control test of modified permeable pavement in weak per-

- meable soil quality area. *Water Resources Protection*, 2019, 35(3): 63-68, 75.]
- [26] 贺文彦, 谢文霞, 赵敏华, 等. 海绵城市试点区域内面源污染发生过程及其对水体污染负荷贡献评估. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1586-1597. [HE W Y, XIE W X, ZHAO M H, et al. The contribution of urban diffuse pollutants to water pollution in a sponge city pilot area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1586-1597.]
- [27] 沈子欣, 阚丽艳, 车生泉. 生态植草沟结构参数变化对降雨径流调蓄净化效应的影响. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2015, 33(6): 46-52. [SHEN Z X, KAN L Y, CHE S Q. Effects of grass swales structure parameters on storage and pollutant removal of rainfall runoff. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2015, 33(6): 46-52.]
- [28] 唐双成, 罗纳, 贾忠华, 等. 填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 73-78, 102. [TANG S C, LUO W, JIA Z H, et al. Effects of filler and rainfall characteristics on runoff reduction of rain garden and achieving the goal of sponge city construction. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 73-78, 102.]
- [29] 宫曼莉, 左俊杰, 任心欣, 等. 透水路面—生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估. *环境科学*, 2018, 39(9): 4096-4104. [GONG M L, ZUO J J, REN X X, et al. Evaluation of effect of urban non-point source pollution control on porous asphalt-bio-retention combined roads. *Environment Science*, 2018, 39(9): 4096-4104.]
- [30] 张晓菊, 董文艺. 下凹式绿地径流污染控制与径流量消减影响因素分析. *环境科学与技术*, 2017, 40(2): 113-117. [ZHANG X J, DONG W Y. Influential factors of runoff pollutant control and volume reduction for low-lying grassland. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(2): 113-117.]
- [31] 王俊岭, 张亚琦, 秦全城, 等. 一种新型透水铺装对雨水径流污染物的去除试验研究. *安全与环境学报*, 2019, 19(2): 643-652. [WANG J L, ZHANG Y Q, QIN Q C, et al. Removing efficiency of pollutants from rainwater runoff via new permeable pavement. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(2): 643-652.]
- [32] 郭凤, 陈建刚, 杨军, 等. 植草沟对北京市道路地表径流的调控效应. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 176-181. [GUO F, CHEN J G, YANG J, et al. Regulatory effect of grassed swales on road surface runoff in Beijing city. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(3): 176-181.]
- [33] 戈鑫, 杨云安, 管运涛, 等. 植草沟对苏南地区面源污染控制的案例研究. *中国给水排水*, 2018, 34(19): 134-138. [GE X, YANG Y A, GUAN Y T, et al. A case study on control of non-point source pollution by grassed swales in South Jiangsu. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(19): 134-138.]
- [34] 赵松婷, 李新宇, 戴子云, 等. 集雨型绿地雨水净化功能效果评估: 以北京望和公园为例. *北京农学院学报*, 2019, 34(1): 82-86. [ZHAO S T, LI X Y, DAI Z Y, et al. Purification effect evaluation of rainwater harvesting green space on rainfall-runoff pollution: Taking Wanghe Park as an example. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2019, 34(1): 82-86.]
- [35] 米秋菊, 米勇. 生物滞留技术去除污染物效果的试验研究. *水土保持应用技术*, 2014, (1): 4-6. [MI Q J, MI Y. Experimental study on removal of pollutants by biological retention technology. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2014, (1): 4-6.]
- [36] 郭娉婷, 王建龙, 杨丽琼, 等. 生物滞留介质类型对径流雨水净化效果的影响. *环境科学与技术*, 2016, 39(3): 60-67. [GUO P T, WANG J L, YANG L Q, et al. Effect of bioretention media on pollutions removal from stormwater runoff. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(3): 60-67.]
- [37] 凌莉, 赵新华, 卢玉迪. 透水路面结构对雨水持蓄及污染控制的影响. *环境工程学报*, 2016, 10(12): 6956-6962. [LING L, ZHAO X H, LU Y D. Influence of permeable pavement structures on rainwater retention and pollution prevention. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(12): 6956-6962.]
- [38] 王闪, 张立秋. 下凹式绿地对模拟道路径流中磷削减效果研究. *环境科学与技术*, 2015, 38(9): 119-122. [WANG S, ZHANG L Q. The cutting effect of phosphorus in simulated road runoff by concave herbaceous field. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(9): 119-122.]
- [39] 李俊奇, 向璐璐, 毛坤, 等. 雨水花园蓄渗处置屋面径流案例分析. *中国给水排水*, 2010, 26(10): 129-133. [LI J Q, XIANG L L, MAO K, et al. Case study on rain garden storage-infiltration system for disposal of roof runoff. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(10): 129-133.]
- [40] 王帅兵, 王克勤, 李秋芳, 等. 植草带对红壤坡耕地面源污染物输出的削减效果. *水土保持通报*, 2013, 33(1): 1-7. [WANG S B, WANG K Q, LI Q F, et al. Reduction effects of grass planting belt on non-point source pollutants from

- crop land in red soil sloping area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(1): 1-7.]
- [41] 袁丽丽, 吴冠仑, 樊波, 等. 植草沟草种选择对降雨径流调蓄效应的影响. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(1): 137-143. [YUAN L L, WU G L, FAN B, et al. Effect of grass species selection for grass swales on runoff regulation. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(1): 137-143.]
- [42] 单进, 戴子云. 北京常用草坪式屋顶绿化轻型基质对屋面雨水径流控制影响研究. *北方园艺*, 2019, (20): 86-91. [SHAN J, DAI Z Y. Study on influence of different growing mediums of lawn green roofs for roof runoff control in Beijing. *Northern Horticulture*, 2019, (20): 86-91.]
- [43] 崇佳文, 徐乐中, 李翠梅, 等. 渗透铺装对降雨径流水文水质调控效果分析. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 115-121. [CHONG J W, XU L Z, LI C M, et al. Simulation of regulation effect of permeable pavement on hydrology and water quality of rainfall runoff. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(2): 115-121.]
- [44] 薛天一, 徐乐中, 李翠梅, 等. 生物滞留池水文水质效应模拟分析. *水利水电技术*, 2018, 49(1): 121-127. [XUE T Y, XU L Z, LI C M, et al. Simulative analysis on hydrological and water quality effects of bioretention pond. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(1): 121-127.]
- [45] 李婉亭, 孙冬梅, 冯平. 低影响开发措施(LID)对天津市暴雨径流影响模拟研究. *自然灾害学报*, 2017, 26(3): 156-166. [LI W T, SUN D M, FENG P. Simulation study on influence of low impact development measures on rainstorm runoff in Tianjin Municipality. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(3): 156-166.]
- [46] 李娜, 孟雨婷, 王静, 等. 低影响开发措施的内涝削减效果研究: 以济南市海绵试点区为例. *水利学报*, 2018, 49(12): 1489-1502. [LI N, MENG Y T, WANG J, et al. Effect of low impact development measures on inundation reduction: Taking Jinan pilot area as example. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(12): 1489-1502.]
- [47] 黄国如, 麦叶鹏, 李碧琦, 等. 基于PCSWMM模型的广州典型社区海绵化改造水文效应研究. *南方建筑*, 2017, (3): 38-45. [WANG G R, MAI Y P, LI B Q, et al. Study on hydrological effect of typical community sponge transformation based on PCSWMM in Guangzhou. *South Architecture*, 2017, (3): 38-45.]
- [48] 孙志康, 李翠梅, 程桂, 等. 基于SWMM的LID组合措施水文水质模拟效果研究. *中国农村水利水电*, 2017, (12): 109-114. [SUN Z K, LI C M, CHENG G, et al. Research on the effect of LID combined measures on hydrology and water quality simulation based on SWMM. *China Rural Water and Hydropower*, 2017, (12): 109-114.]
- [49] 赵沛, 程伍群, 庞立军, 等. 基于SWMM的透水铺装系统的水文效应研究. *水电能源科学*, 2019, 37(1): 29-31. [ZHAO P, CHENG W Q, PANG L J, et al. Study on hydrological effect of permeable pavement system based on SWMM. *Water Resources and Power*, 2019, 37(1): 29-31.]
- [50] 肖存艳, 傅春, 詹健. 基于SWMM的中尺度雨水系统构建下的水质水量模拟. *水利水电技术*, 2018, 49(3): 17-25. [XIAO C Y, FU C, ZHAN J. SWMM-based simulation on water quality and water quantity for construction of meso-scale rainwater system. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(3): 17-25.]
- [51] 李家科, 李亚, 沈冰, 等. 基于SWMM模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟. *水力发电学报*, 2014, 33(4): 60-67. [LI J K, LI Y, SHEN B, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(4): 60-67.]
- [52] 杨帆, 徐建刚, 林蔚. 基于元胞自动机的低影响开发对城市内涝削减效果模拟. *自然资源学报*, 2017, 32(7): 1158-1169. [YANG F, XU J G, LIN W. Cellular automaton simulation of the effect of low impact development on urban water-logging reduction. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(7): 1158-1169.]
- [53] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 社区尺度绿色基础设施暴雨径流削减模拟研究. *生态学报*, 2016, 36(6): 1686-1697. [LIU W, CHEN W P, PENG C. Modeling the effects of green infrastructure on storm water runoff reduction at community scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(6): 1686-1697.]
- [54] 黄国如, 李碧琦. 深圳民治河流域低影响开发措施水文效应评估. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 1-6. [WANG G R, LI B Q. Hydrological effect evaluation of low impact development measures at Minzhi River Basin in Shenzhen. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018, 29(3): 1-6.]
- [55] 贺靖雄, 李翠梅, 程桂, 等. 海绵城市雨水花园水文水质过程模拟. *水电能源科学*, 2019, 37(4): 9-12. [HE J X, LI C M, CHENG G, et al. Simulation of hydrology and water quality in rainwater garden of sponge city. *Water Resources and Power*, 2019, 37(4): 9-12.]
- [56] 杨钢, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于SWMM模型的北京大红门排水区雨洪模拟及LID效果评价. *北京师范大学学报: 自然*

科学版, 2018, 54(5): 628-634. [YANG G, XU Z X, ZHAO G, et al. Simulating urban rainfall-runoff and assessing LID facilities by SWMM model in Dahongmen catchment. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2018, 54 (5): 628-634.]

- [57] AHIALAME L M, ENGEL B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(7): 4253-4273.

Water environmental response under varying implication of stormwater management measures: Based on cases in China

DENG Jin-ling¹, YIN Hai-wei², QIU Shi², ZHU Jie², CHEN Jia-yu¹,
FEI Fan², KONG Fan-hua¹

(1. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Stormwater management measures can effectively control the runoff volume and rainwater pollutants. This study presented a systematic analysis of the impacts of stormwater management measures on runoff volume and pollutants in order to understand water environmental effects of stormwater management based on a meta-analysis method. A pool of studies identified by a literature search were analyzed to extract the information on the types of stormwater management measures, application scale, rainfall conditions, reduction rate of runoff volume and pollutants and to review the variation of runoff and pollutants under different stormwater management measures. The results of statistical analysis show that: (1) Different types of stormwater management measures generated different water environment effects (e.g., green roof had the strongest runoff reduction capacity, while permeable pavement had the strongest runoff pollution reduction effect); (2) The impacts of stormwater management measures were scale-sensitive, namely, large areas had lower average rates of runoff reduction and small areas had lower average rates of pollutions reduction; (3) With the increase of rainfall, the capacity of stormwater management measures to reduce runoff and pollutant concentration showed a decreasing trend. Through the systematic analysis of existing cases, the research demonstrated differences in water environmental effects of controlling runoff volume and runoff pollutant, as well as the key factors behind such differences. The results can provide theoretical references for runoff regulation and runoff pollution treatment in stormwater management.

Keywords: stormwater management measures; runoff; water quality; meta-analysis