



基于“海绵体”原位试验的环境地质适宜性评价及应用 ——以河南省新乡市为例

王帅伟,孙伟超,刘松波,王秀艳,刘长礼,孙琳

中国地质科学院水文地质环境地质研究所/自然资源部地下水科学与工程重点实验室,河北石家庄 050061

摘要:海绵城市是针对城市建设中解决城市雨洪问题提出的生态理念,其本质是通过渗、蓄、净、排等手段解决城市水资源问题的综合治理。本研究从环境地质条件出发,考虑海绵城市建设中地质体的海绵属性,开展研究区原位双环渗水试验和工程钻孔,针对原始海绵地质条件的降雨入渗最大深度和地表土体渗水速度进行分析,提出海绵渗水、海绵蓄水两个指标。该指标可有效表示及概括海绵城市建设中环境地质适宜性,易得易懂,具有较强的普适性,易于推广。最后以中国中部城市新乡市为例,进行海绵城市建设环境地质适宜性评价。

关键词:海绵城市;海绵渗水;海绵蓄水;原位试验;环境地质;适宜性评价;河南省

SUITABILITY EVALUATION OF ENVIRONMENTAL GEOLOGY BASED ON SPONGY BODY IN-SITU TEST AND ITS APPLICATION: A Case Study of Xinxiang City, Henan Province

WANG Shuai-wei, SUN Wei-chao, LIU Song-bo, WANG Xiu-yan, LIU Chang-li, SUN Lin

*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences/Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering,
Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China*

Abstract: Sponge city is an ecological concept proposed to solve the problem of rainfall flood in urban construction, aiming to realize the comprehensive treatment of urban water resources by means of seepage, storage, purification and discharge. Starting with the environmental geological conditions and considering the sponge properties of geological bodies in sponge city construction, the study carries out the in-situ double-ring infiltration test and engineering drilling in the study area, analyzes the maximum rainfall infiltration depth and surface soil water seepage speed in the original sponge geological conditions, and proposes two indexes of water seepage and storage which can effectively represent and summarize the environmental geological suitability in sponge city construction, with strong universality, easy to spread. Finally, Xinxiang City in central China is taken as an example to evaluate the environmental geological suitability of sponge city construction

Key words: spongy city; sponge seepage capacity; sponge storage capacity; in-situ test; environmental geology; suitability evaluation; Henan Province

收稿日期:2021-12-29;修回日期:2022-03-01. 编辑:张哲.

基金项目:国家自然科学基金项目“低渗透透镜体中 NAPLs 残余的分形特征及形成机制研究”(42007171);河北省自然科学基金项目“水位循环变动及荷载作用下砂性土变形特性研究——黄河下游城市郑州为例”(D2021504034);中国地质调查局项目“中原城市群北部城镇规划区 1:5 万环境地质调查”(DD20160244).

作者简介:王帅伟(1989—),男,博士,助理研究员,主要从事工程地质灾害防治、水资源污染风险评价方面的研究,通信地址 河北省石家庄市新华区中华北大街 268 号,E-mail//626792005@qq.com

通信作者:孙琳(1985—),女,硕士,助理研究员,主要从事环境地质、水文地质方面研究,通信地址 河北省石家庄市新华区中华北大街 268 号,E-mail//278869640@qq.com

0 前言

目前我国正在并将持续经历一段城市化急剧发展时期。城市化建设一方面推动国家现代化,促进经济飞速发展,同时由于城市化建设发展的不成熟产生一系列“城市疾病”,主要表现为:城市内涝、水资源短缺、水资源污染和水生态退化^[1-4]。由于我国城市水问题较为复杂,且海绵城市建设处于起步阶段,海绵城市建设原则、开发模式、指标体系等诸多标准还未健全,整体上仍处于在摸索中前进^[5]。

20世纪90年代初,美国率先提出“低影响开发”(low impact development, LID)理念^[6-8];在场地建设阶段通过控制场地降雨径流量,达到控制城市雨水径流量和污染负荷的目的。该理念很快被澳大利亚、新西兰以及欧洲一些国家接受并发展延伸,并在LID基础上提出“水敏感城市规划”“可持续排水系统”“绿色基础设施”^[9-14]。其中瑞典和丹麦^[15-16]推行的“雨水最佳管理实践”研究,融合水文特征参数、景观设计、环境控制、管理制度等措施,综合管理雨水及防治洪水。该模式因其处理成本低、处理效果好而被广泛接受,其亦可以在国内中小城市进行前期实践,作为探索现阶段适应我国城市雨水管理的方向之一。

区别于“快排式”的传统雨水模式,我国众多专家学者对海绵城市本质进行了新的解释,指出海绵城市根本问题是水系统治理问题,其核心是城市水安全,海绵城市建设应多学科、多部门共同协作,深入研究,强化沟通,科学定位海绵城市,提出新的构建理念及模式^[17-18]。研究者认为,海绵城市应基于生态环境、低碳排放、景观规划、市政设计等技术手段,统筹内涝防治、水质污染、水资源利用和水生态修复等多元化耦合目标建设海绵城市^[19-21]。还有学者从实例出发,分析径流系数、径流总量、排水系统及雨水资源循环现状等主要问题,解决海绵城市构建模式、理念等重要问题^[22-24]。地方性法规中,有北京、南宁等市要求各地区新建、改建、扩建工程对海绵城市建设中的雨水利用有了指引性的设计模式和工程要求,制定了城市雨水资源化的诸多措施^[25-26]。

海绵城市建设本质是解决城市水问题,它不仅仅包括渗、滞、蓄、净、排等措施的合理和有效性,还需考虑“海绵体”承载体(岩土)的物性,以及储存雨水的危险性(诱发环境地质问题)等,这些核心内容与环境地

质、水文地质密切相关。目前国内外专家学者对海绵城市的研究多为建设方式、技术手段的“工程性措施”研究^[27],而忽略海绵能力(渗、蓄)的地质体属性,并未整体性考虑海绵城市建设区或规划区的环境地质适宜性评价,同时由于缺乏资金,大多研究仅停留在理论研究阶段,未付诸实地实践。因此本研究在大量调查我国中原城市群水文地质、工程地质基础上,从地质角度出发,主要考虑海绵城市建设地下环境承载力,开展海绵城市建设环境地质适宜性评价,可有效节约建设成本,减少建设工作量,实现海绵城市建设规划有的放矢。

1 海绵城市建设环境地质适宜性评价

环境地质适宜性评价是海绵城市建设的前提,海绵城市建设中地质体的海绵能力大小直接影响到海绵城市建设的城市规划、方案设计及现场施工的难易复杂程度^[28]。因此开展海绵城市建设适宜性评价,主要考虑地下环境承载力,从环境、水文地质角度出发,针对原始海绵地质条件的降雨入渗最大深度及地表土体渗水速度进行研究分析。基于大量实际钻孔及原位渗水试验,选择海绵渗水、海绵蓄水两个指标对海绵城市建设中环境地质适宜性进行评价,该指标能够有效地代表及概括海绵城市建设中环境地质适宜性,且易懂,具有较强的普适性,易于推广,可减少城市规划勘察、设计及施工难度及工作量。

1.1 海绵城市建设评价指标

海绵城市建设中针对城市“海绵体”对降雨量的海绵能力,包括渗透能力(雨水渗透系数)、蓄存雨水能力(浅层地质“海绵体”储水空间),采用提出海绵渗水、海绵蓄水两个指标,表达环境地质条件对于有效解决城市雨水问题的能力大小。

1)海绵蓄水能力:假定理想状态下(一个大气压,水力梯度为1,只考虑垂直入渗),在整个降雨入渗过程中,由于渗透雨水总量相等,地表水渗水速度等于包气带渗透速度,降雨量 Q 完全入渗需要时间为 t_0 ,则入渗最大深度 h_{\max} 为:

$$h_{\max} = \frac{Q}{A \times n}$$

其中, A —区域面积; Q —30 a内最大降雨量; V_s —雨水入渗速度; h_{\max} —降雨最大入渗深度; h_{cW} —地下水

位埋深; t_0 —降雨完全入渗时间; n —渗透深度内加权有效孔隙率; h_0 —区域面积降雨量高度(图 1).

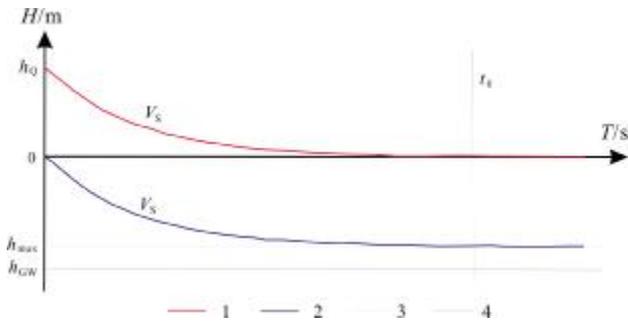


图 1 理想状态下降雨渗透曲线

Fig. 1 Rainfall infiltration curves under perfect condition

1—地面雨水渗透曲线 (surface rainwater infiltration curve); 2—包气带渗透曲线 (vadose zone permeability curve); 3—雨水渗透最大深度 (maximum penetration depth of rainwater); 4—地下水位线(groundwater level)

那么定义海绵蓄水能力: $P = \frac{h_{GW}}{h_{max}}$

当 $P > 1$ 时, $h_{GW} > h_0$, 表示地质环境(包气带厚度)完全能承受 30 a 内最大降雨量 Q , 则表示城市“海绵体”对降雨量有足够的蓄存能力、释水能力;

当 $P = 1$ 时, $h_{GW} = h_0$, 表示地质环境刚好能承受降雨量 Q , 此时为临界状态, 若要进行海绵城市建设需保持天然地质环境或稍加措施处理即可;

当 $P < 1$ 时, $h_{GW} < h_0$, 表示地质环境不能承受降雨量 Q , 则表示城市“海绵体”对降雨量有足够的蓄存能力.

2) 海绵渗水能力: 假理想状态下(一个大气压, 水力梯度为 1, 只考虑垂直入渗), 在整个降雨入渗过程中, 同等降雨量 Q 条件下不同土性地层完全入渗过程中渗水速度 V_i 为:

$$V_i = \frac{Q}{t_i}$$

式中, V_i —不同土性地层渗水速度; t_i —不同土性地层完全入渗时间(图 2). 设 V_s —小雨降水速度; V_m —中雨降水速度; V_h —大雨降水速度.

那么定义海绵渗水能力 V :

当 $V < V_s$ 时, 地表土层仅能接受小雨程度降水;

当 $V_s < V < V_m$ 时, 地表土层能接受中雨程度降水;

当 $V_m < V < V_h$ 时, 地表土层能接受大雨程度降水;

当 $V > V_h$ 时, 地表土层能接受大雨以上级别程度降水.

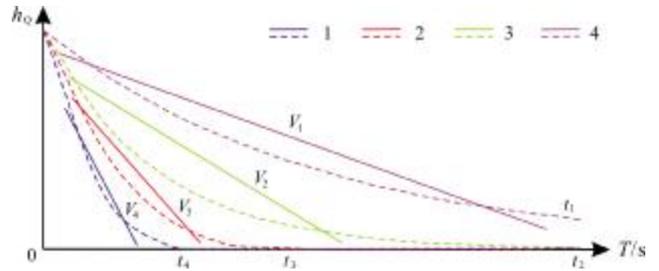


图 2 不同土性对应渗透曲线

Fig. 2 Rainfall infiltration curves for different soil formations

1—粗砂、砾石(coarse sand & gravel); 2—中砂、细砂(medium & fine sand); 3—粉土、黄土(silt & loess); 4—粉黏、黏土(silty clay & clay)

1.2 原位渗水试验对照降雨量分级

本研究针对中原地域河南平原区新乡市不同土性开展野外原位渗水试验 50 组, 地面调查、水位统测和收集资料共 120 个钻孔点及 163 个调查取样点(图 3), 通过大量野外渗水试验(图 4), 得到不同类型土质渗水参数与降雨级别的对应关系(表 1).

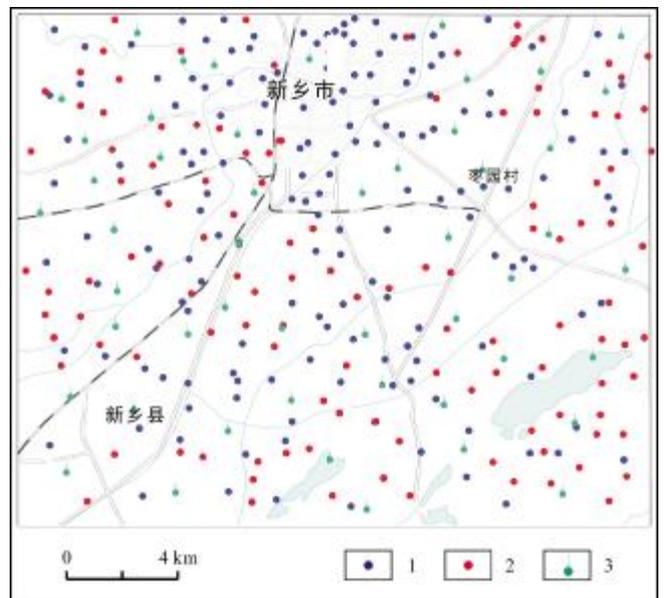


图 3 研究区调查点分布

Fig. 3 Distribution of survey points in the study area

1—调查点(survey point); 2—钻孔(borehole); 3—渗水实验点(seepage test point)

由表 1 降雨级别确定对应渗水速度临界值:

当 $V < 0.6 \times 10^{-3}$ 时, 地表土层仅能接受小雨程度降水;

当 $0.6 \times 10^{-3} \leq V < 1.2 \times 10^{-3}$ 时, 地表土层能接受中雨

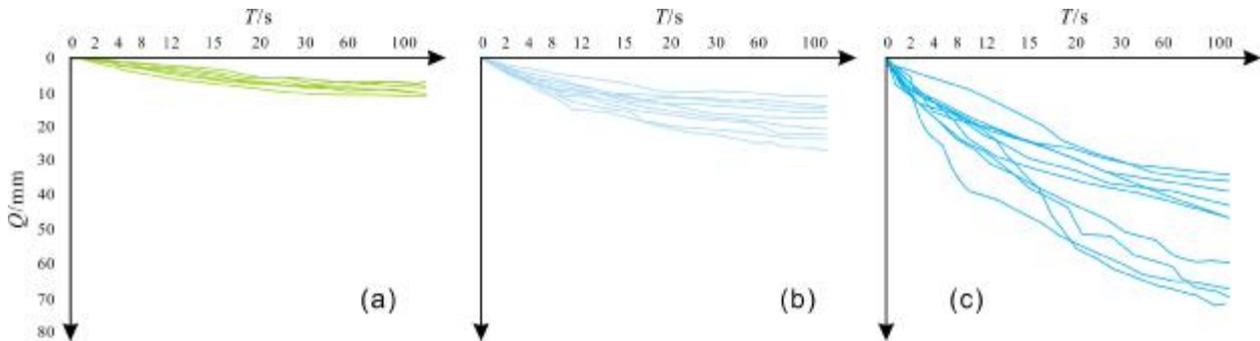


图4 不同降雨级别对应渗透曲线

Fig. 4 Infiltration curves corresponding to different rainfall levels

a—小雨级别(light rain); b—中雨级别(moderate rain); c—大雨及以上级别(heavy rain and above level)

表1 渗水试验结果与降雨等级对应表

Table 1 Infiltration test results and corresponding rainfall levels

土质类型	渗水速度/(mm/d)	渗透系数/(cm/s)	能吸收的雨强	降雨级别	降水量/(mm/d)
黏土	4.12	$<1.2 \times 10^{-6}$	小雨	小雨	0.1~9.9
粉黏	5.18	$1.2 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$	小雨	小雨	0.1~9.9
粉土	6.61	$60 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$	小雨	小雨	0.1~9.9
黄土	6.73	$0.3 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3}$	小雨	小雨	0.1~9.9
粉砂	18.36	$0.6 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-3}$	中雨	中雨	10~24.9
细砂	22.75~31.76	$1.2 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-3}$	大雨	大雨	25~49.9
中砂	57.86~81.32	$6.0 \times 10^{-3} \sim 24 \times 10^{-3}$	暴雨	暴雨	50~99.9
粗砂	87.46~125.23	$24 \times 10^{-3} \sim 60 \times 10^{-3}$	大暴雨	大暴雨	100~249.9
砾石	289.26~342.32	$60 \times 10^{-3} \sim 180 \times 10^{-3}$	特大暴雨	特大暴雨	大于250

注:降雨不产生径流.

程度降水;

当 $1.2 \times 10^{-3} \leq V < 6.0 \times 10^{-3}$ 时,地表土层能接受大雨程度降水;

当 $V \geq 6.0 \times 10^{-3}$ 时,地表土层能接受大雨以上级别程度降水.

2 案例分析

新乡市位于河南省北部,地处黄河、海河两大流域,地势北高南低,北部主要是太行山山地和丘陵岗地,南部为黄河冲积扇平原,平原占全市土地总面积的78%,年平均降水量573.4 mm,其中6—9月份降水量最多,占全年降水的72%,年蒸发量1748.4 mm.新乡市共有3个国家级开发区和2个省级开发区,整体处于城市化急剧建设发展时期.

本次新乡地面调查、水位统测和资料收集共获得120个钻孔点及163个调查取样点,以及研究区50组双环原位渗水试验、调查点及钻孔点原状土样.结合室内土体物理力学参数试验数据分析,依据实测数据及实验结果对新乡市海绵渗水能力 V 、海绵蓄水能力 P 进行计算,结果如表2.

依据表2研究区“海绵体”海绵能力计算结果,对海绵能力 V 进行分区,结果见图5.

由表2及图5可以看出:

1)研究区内表层“海绵体”海绵渗水能力 V 整体评价较差,区域内仅3%面积入渗速率 $V > 1.2 \times 10^{-3}$,达到大雨级别以上.雨季时雨水可直接渗透表层“海绵体”补给浅层地下水,不会形成地表径流及地面积水.此区域可直接用来海绵城市渗水工程建设.

表 2 研究区“海绵体”海绵能力计算结果

Table 2 Calculation results of sponge capacity of “sponge body” in the study area

点号	包气带厚度/m	渗水能力 $V/10^{-6}$	蓄水能力 P
XXSL01-01	11.88	37.3673	1.463054187
XXSL01-02	13.02	4.90682	1.603448276
XXSL01-03	12.91	8.49257	1.589901478
XXSL01-04	12.26	5.09554	1.509852217
XXSL01-05	12.28	4.24628	1.512315271
XXSL01-06	12.19	3.82166	1.501231527
XXSL02-01	11.38	5.9448	1.401477833
XXSL02-02	10.31	6.36943	1.269704433
XXSL02-03	8.41	1.42675	1.035714286
XXSL02-04	8.35	0.339703	1.028325123
XXSL02-05	9.11	1.01911	1.121921182
XXSL03-01	13.41	0.815287	1.651477833
.....
XXSL14-09	4.34	1.22293	0.534482759
XXSL14-10	4.27	0.509554	0.525862069

成地表径流或地面积水. 在海绵城市建设初期需进行透水铺装,或增设植草沟、植被缓冲带等工程设施,对海绵渗水能力改善后进行海绵城市建设.

3)70%面积渗水能力仅达到小雨级别, 渗水能力差, 在雨水条件时会形成大量地表径流并导致地面积水,其主要原因为该区域大部分地表有 1~5 m 厚粉黏土. 新乡市南部为开发区、新兴工业产业园区选址,大面积路面硬化、建筑设施等不透水面积占比过大导致地表渗透能力降低. 针对该区域地质“海绵体”渗水能力较差, 提出以下建议: ①在该区内地面建设雨水湿地、湿塘、生物滞留池等设施净化雨水径流;②表层厚度较薄的粉质黏土可直接去除,利用下伏渗透性能较好的粉细砂土地层铺设透水铺装系统,若表层粉质黏土厚度较大,可采用地表铺设透水铺装+渗透井施工,将雨水引入浅层地下水;③利用干渠排泄部分雨水,利用湖泊消纳部分雨水;④在人工条件干预和工程建设成本较高的区域,不宜直接进行或有选择性地海绵城市建设,可在部分地方建设下沉式绿地.

依据研究区“海绵体”海绵能力计算结果(表 2),对新乡市海绵城市建设海绵蓄水能力 P 进行分区(图 6).

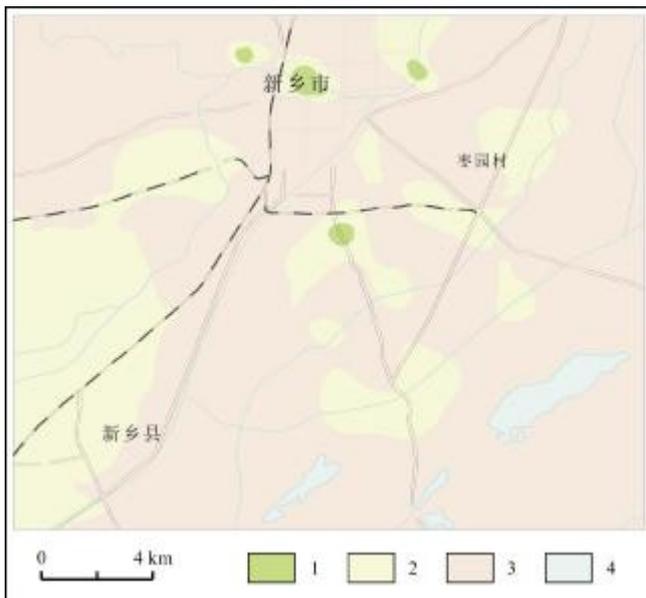


图 5 新乡市海绵渗水能力分区图

Fig. 5 Zoning map of sponge seepage capacity in Xinxiang City
1—良(good); 2—中等(medium); 3—差(bad); 4—河流(river)

2) 区域内仅 26.5%面积入渗速率 $V>0.6 \times 10^{-4}$,达到中雨级别以上,分布在区域西南和中部. 雨季时降雨量不能全部渗透地表包气带补给浅层含水层,会形

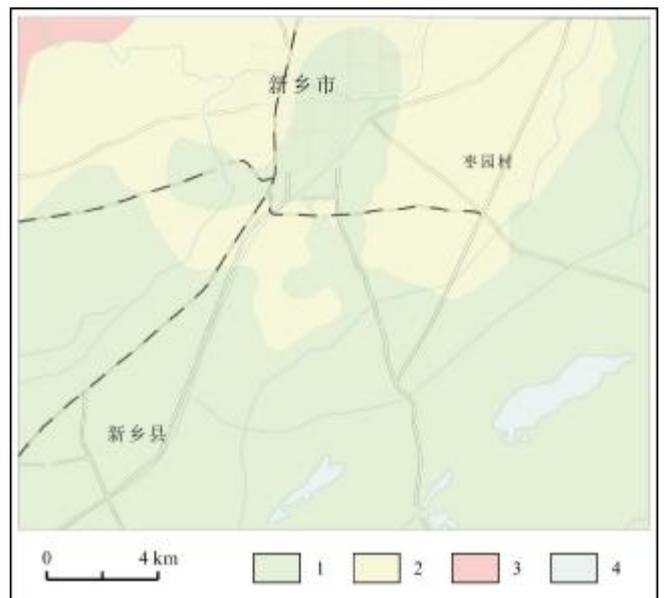


图 6 新乡市海绵蓄水能力分区图

Fig. 6 Zoning map of sponge storage capacity in Xinxiang City
1—良(good); 2—中等(medium); 3—差(bad); 4—河流(river)

由表 2 及图6 可以看出:

1)区域内 62%面积 $P>1$,表明该区域内表层“海绵

体”蓄水能力满足年降雨量,雨季时地表包气带海绵蓄水能力足够承受降雨量入渗,不会产生地面积水.此区域可直接用来海绵城市蓄水工程建设.

2) 雨季时区域内 35.5%面积地表包气带 $P=1$,即蓄水能力处于临界范围,部分低洼区可能会产生地面积水.在海绵城市建设初期需进行坡面引流,或增设蓄水池、人工湖等工程设施,对海绵蓄水能力改善后进行海绵城市蓄水工程建设.

3) 区域内 2.5%面积 $P<1$,表示此部分区域内表层“海绵体”蓄水能力差,在雨水条件时不足以承受降雨量而导致地面积水.主要原因为该区域内表层土壤渗透性差,地表水位浅(大多在 5 m 左右),包气带有效孔隙率小.且人工条件干预和工程建设成本较高,不宜直接进行海绵城市蓄水能力建设.针对该区域地质“海绵体”渗水能力较差,提出以下几点建议:①地面建设雨水湿地、湿塘、生物滞留池等设施,增强地表滞水,减小雨水径流;②按照规范铺设透水系统、植草沟等设施,在透水铺装系统中铺设输水管道引雨水到人工池塘或临近蓄水洼地,或采用人工渗井等有效手段将雨水引入地下水含水层;③利用孟姜女河等河流排泄部分雨水,利用水塘、水库和湖泊消纳部分雨水;④建设下沉式绿地,消化“海绵体”系统不足以储存的降雨量.

3 结论

1) 环境地质适宜性评价是海绵城市建设的前提.本研究从地质角度出发,考虑海绵城市地下环境承载力的地质属性,基于大量实际钻孔及原位渗水试验,针对原始海绵地质条件的降雨入渗最大深度和地表土体渗水速度,采用海绵渗水(V)、海绵蓄水(P)两个指标对海绵城市建设中环境地质适宜性进行评价,为中原城市群海绵城市建设规划设计提供思路及参考.

2) 通过大量原位双环渗水试验及室内渗透试验对不同降雨级别条件下土体渗透性分级,并依据海绵渗水能力和海绵蓄水能力两指标对新乡市海绵城市建设环境地质适宜性进行分区评价,结果表明:研究区内海绵蓄水能力明显优于海绵渗水能力,在渗水能力和蓄水能力不足以消化最大降雨量区域给出具体海绵城市地学建议,可减少海绵城市规划、设计及施工难度及工作量.

3) 在提出海绵城市建设环境适宜性指标理论时进

行理想状态假设,并且海绵净化能力也是海绵城市建设中的重要目标,此为目前研究不充分和粗糙点.此外海绵渗水能力与海绵蓄水能力应结合考虑,该内容应为下一步研究问题的方向和重点.

参考文献(References):

- [1]董英,张茂省,刘洁,等.西安地区含水系统释水压密效应及微结构变化[J].西北地质,2019,52(2):63-71.
Dong Y, Zhang M S, Liu J, et al. Water release compaction effect and microstructure change of aquifer system in Xi'an[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 63-71.
- [2]董英,张茂省,刘洁,等.西安市地下水与地面沉降地裂缝耦合关系及风险防控技术[J].西北地质,2019,52(2):95-102.
Dong Y, Zhang M S, Liu J, et al. Coupling relationship between groundwater and ground fissures of land subsidence in Xi'an City and risk prevention and control technology [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 95-102.
- [3]洪增林.城市地质调查标准化建设系统[J].西北地质,2019,52(2):53-62.
Hong Z L. Multi-factor urban geological survey standardization construction system[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 53-62.
- [4]张建业,王银堂,胡庆芳,等.海绵城市建设有关问题讨论[J].水科学进展,2016,27(6):793-799.
Zhang J Y, Wang Y T, Hu Q F, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 793-799.
- [5]王浩,梅超,刘家宏.海绵城市系统构建模式[J].水利学报,2017,48(9):1009-1014,1022.
Wang H, Mei C, Liu J H. Systematic construction pattern of the sponge city[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1009-1014, 1022.
- [6]United States Environmental Protection Agency. Low impact development (LID): A literature review[R]. EPA-841-B-00-005, Office of Water, Washington DC, 2000.
- [7]United States Environmental Protection Agency. Terminology of low impact development [R]. EPA-841-N-12-003B, Office of Water, Washington DC, 2012.
- [8]Melbourne Water. Water sensitive urban design[R]. <http://www.wsud.melbournewater.com.au>. accessed on May 19, 2015.
- [9]Hoyer J, Dickhaut D, Kronawitter L, et al. Water sensitive urban design: Principles and inspiration for sustainable stormwater management in the city of the future[M]. Berlin: JOVIS Publishing Co, 2011: 79-87.
- [10]D'Arcy B J, Ellis J B, Ferrier R C, et al. Diffuse pollution impacts: The environmental and economic impacts of diffuse pollution in the UK [M]. Lavenham: Terence Dalton Publishers, 2000: 142-158.

- [11] CIRIA. SUDS: Sustainable drainage systems: Promoting good practice — A CIRIA initiative[R]. 2005. <http://www.ciria.org/suds/background.htm>. accessed on May 22, 2015.
- [12] Geiger W, Dreiseitl H. Neue Wege für das Regenwasser: Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten [M]. München: Oldenbourg, 2001: 107–122.
- [13] Yamagata Y, Kimura Y, Sunaga H. Preventive maintenance of social infrastructure and non-destructive testing[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2012, 78(1): 44–48.
- [14] Ji L Y. Rainstorm management strategy and site planning practice for low impact development: An empirical analysis of North American countries[C]//Proceedings of the Conference on Urban Development and Planning. North China University of Technology, 2014: 1–6.
- [15] Martin P. Sustainable urban drainage systems: Best practice manual for England, Scotland, Wales and Northern Ireland [M]. London: Construction Industry Research & Information Association, 2001: 88–117.
- [16] Revit M. Report 5.1: Review of the use of storm water BMPs in Europe. EVKI-CT-2002-00111[R]. 2003.
- [17] 胡灿伟. “海绵城市”重构城市水生态[J]. 生态经济, 2015, 31(7): 10–13.
Hu C W. “Sponge city” reconstructing urban water ecology[J]. Ecological Economy, 2015, 31(7): 10–13. (in Chinese)
- [18] 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, 31(6): 21–25.
Hu N, Li X, Ge X Y. Change with water: The rational cognition of sponge city system from the perspective of urban green space system [J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(6): 21–25.
- [19] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1): 79–97.
Wu D J, Zhan S Z, Li Y H, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics[J]. China Soft Science, 2016(1): 79–97.
- [20] 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 K J, Li D H, Yuan H, et al. “Sponge city”: Theory and practice [J]. City Planning Review, 2015, 39(6): 26–36.
- [21] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 中国勘察设计, 2015(7): 30–41.
Qiu B X. The connotation, ways and prospects of spongy city (LID) [J]. Construction Science and Technology, 2015 (7): 30–41. (in Chinese)
- [22] 邹宇, 许乙青, 邱灿红. 南方多雨地区海绵城市建设研究——以湖南省宁乡县为例[J]. 经济地理, 2015, 35(9): 65–71, 78.
Zou Y, Xu Y Q, Qiu C H. The research on sponge city construction in southern hilly area: A case study of Ningxiang County in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2015, 35(9): 65–71, 78.
- [23] 王宁, 吴连丰. 厦门海绵城市建设方案编制实践与思考[J]. 给水排水, 2015, 41(6): 28–31, 32.
Wang N, Wu L F. Practice and reflection of the urban municipal construction plan edition of sponge city, Xiamen[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(6): 28–31, 32.
- [24] 王帅伟, 王秀艳, 孙琳, 等. 基于城市“海绵体”环境地质条件的海绵城市建设适宜性评价体系及其应用——以焦作市为例[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2): 79–87.
Wang S W, Wang X Y, Sun L, et al. A suitability evaluation system of sponge city construction based on environmental geological condition of urban sponge body and its application: A case study of Jiaozuo City[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(2): 79–87.
- [25] 宋云, 俞孔坚. 构建城市雨洪管理系统的景观规划途径——以威海市为例[J]. 城市问题, 2007(8): 64–70.
Song Y, Yu K J. The landscape planning approach to construct administration system of city storm water: A case study of Weihai City[J]. Urban Problems, 2007(8): 64–70.
- [26] 车武, 李俊奇. 从第十届国际雨水利用大会看城市雨水利用的现状与趋势[J]. 给水排水, 2002(3): 12–14.
Che W, Li J Q. Recent status and prospect of urban rainwater utilization[J]. Water & Wastewater Engineering, 2002(3): 12–14.
- [27] 王家彪, 赵建世, 沈子寅, 等. 关于海绵城市两种降雨控制模式的讨论[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1490–1498.
Wang J B, Zhao J S, Shen Z Y, et al. Discussion about the two rainfall control approaches in sponge city construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1490–1498.