

# 西安城区海绵城市建设设计降雨量与不透水地面分布研究

任勇翔<sup>1,2</sup>, 刘 强<sup>1,2</sup>, 王 希<sup>3</sup>, 赵耀龙<sup>4</sup>, 王建斌<sup>5</sup>, 熊家晴<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;

3. 西安市城乡建设干部学校, 陕西 西安 710054; 4. 华南师范大学 地理科学学院, 广州 510631;

5. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为给西安市海绵城市建设提供科学依据和参考, 确定了西安市海绵城市建设设计降雨量并对主城区下垫面进行分析。结果表明: 西安市年径流总量控制率为 50%、80% 和 85% 时, 对应的设计降雨量分别为 6.76 mm、17.43 mm 和 21.22 mm。设计降雨量为 21.22 mm 时, 海绵城市建设可实现对全年 87.14% 的降雨场次地表径流有效控制的目标。主城区中, 莲湖区、碑林区和新城区的不透水地面积为 90% 左右, 城市内涝的风险和促渗难度较大。结合西安市湿陷性黄土的地质条件, 建议建立连续渗透体系; 对既有街区, 海绵城市建设应优先从公园绿地海绵化入手。

**关键词:** 海绵城市; 年径流总量控制率( $\alpha$ ); 设计降雨量; 渗透性

中图分类号: TU984.11

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0100-05

## Study on dependable rainfall and impermeable ground distribution of sponge city construction in main urban area of Xi'an

REN Yongxiang<sup>1,2</sup>, LIU Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Xi<sup>3</sup>, ZHAO Yaolong<sup>4</sup>, WANG Jianbin<sup>5</sup>, XIONG Jiaqing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Environmental Engineering of Shaanxi Province, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Environment & Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Xi'an Urban and Rural Construction Cadre School, Xi'an 710054, China;

4. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

5. School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** To provide a scientific basis and reference for the construction of Xi'an sponge city, the dependable rainfalls were determined and the underlying surface in Xi'an was analyzed. The results showed that when the total annual runoff control rates were 50%, 80% and 85%, the corresponding dependable rainfall were 6.76 mm, 17.43 mm and 21.22 mm respectively. When the dependable rainfall was 21.22 mm, underlying surface runoff resulted from 87.14% of rainfall events during the whole year could be effectively controlled by the sponge city construction in Xi'an. Within the main areas of Xi'an, the risk of inland inundation and construction difficulty has increased gradually in the district of Lianhu, Beilin, and Xincheng due to their impermeable ground proportion which has reached around 90%. It was recommended that the continuous infiltration system be created on the basis of the geological condition of collapsible loess in Xi'an; and sponge city construction in Xi'an should start from the reconstruction of park green land to sponge for existing-blocks.

**Key words:** sponge city; total annual runoff control rate ( $\alpha$ ); dependable rainfall; permeability

海绵城市是一种新型的雨洪管理理念, 旨在营造健康的城市生态环境和有效减少城市内涝及切实实现雨水综合利用。不健康的城镇化发展道路使西安市主城区不透水面积逐渐增大, 内涝风险加大。西安地处西北地区, 水资源缺乏, 并且已成为制约城市经济社会发展的一个重要因素<sup>[1]</sup>。

因此, 海绵城市的建设对于西安尤为重要。

海绵城市建设需要明确年径流雨量控制率( $\alpha$ )及其对应的降雨量, 《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》只明确了西安市海绵城市建设的  $\alpha$  值, 但  $\alpha$  对应的设计降雨量并没有明确。同时海绵城市建设的关键之一在于促渗, 下

垫面的分布情况对于渗透效果影响很大,而西安主城区下垫面类型分布尚未清晰。西安市土壤大多为湿陷性黄土,如何快速、安全促进雨水下渗,是西安市海绵城市建设必须要解决的难题。

为给西安市建设海绵城市提供科学依据,根据西安市30 a日降雨资料,确定了西安市 $\alpha$ 值对应的设计降雨量。通过对西安市下垫面和西安市规划2020年各类用地比例的分析,得出西安市下垫面不同地表类型的比例,提出西安市海绵城市建设改造建议,并在以上分析基础上提出经济可行的连续渗透体系。

## 1 研究与计算方法

### 1.1 $\alpha$ 值对应设计降雨量的计算方法

选取西安市(台站代码57036)30 a日降雨(不包括降雪)记录,时段为1985—2014。扣除小于等于2 mm降雨事件的降雨量,将降雨量日值按雨量由小到大进行排序,统计小于某一降雨量的降雨总量(小于该降雨量的按真实雨量计算出降雨总量,大于该降雨量的按该降雨量计算出降雨总量,两者累计总和)在总降雨量中的比率,此比率( $\alpha$ )对应的降雨量(日值)即为设计降雨量<sup>[2]</sup>。

### 1.2 西安城区下垫面分析与海绵体削峰和错峰能力的评价

在地理空间数据云中下载西安市卫星图,利用遥感图像处理软件(ENVI)分析处理卫星图,通过地理信息系统软件(GIS)进行着色处理,分析西安城区下垫面分布情况,像元尺寸为30 m×30 m。

利用暴雨洪水管理模型(SWMM 5.1)模拟常用的两种海绵体透水铺装和生物滞留设施对降雨的削峰、错峰效果。

## 2 $\alpha$ 值对应西安市设计降雨量的确定及其对径流控制的功效

西安新建城区海绵城市 $\alpha$ 值要求为80%~85%<sup>[2]</sup>。当绿地空间、资金等条件受限时,可考虑适当降低年径流总量控制率要求,对于既有街区 $\alpha \geq 50\%$ <sup>[3]</sup>。西安市 $\alpha$ 值对应的设计降雨量见图1。

### 2.1 西安市 $\alpha$ 值对应设计降雨量的确定

西安市 $\alpha$ 值对应的设计降雨量计算结果见图1。

由图1可知, $\alpha$ 值为80%和85%对应的设计降雨量分别为17.43 mm和21.22 mm; $\alpha$ 值为50%对应的设计降雨量为6.76 mm。

对于降水强度,按照我国常用的分级标准<sup>[4]</sup>来

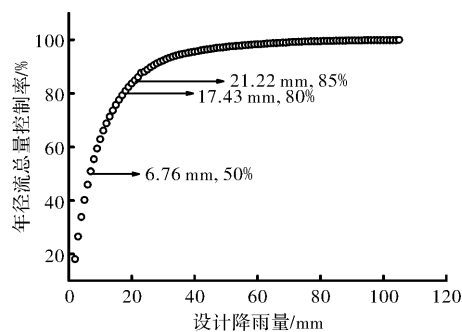


图1 西安市 $\alpha$ 与设计降雨量关系

g. 1 Relationship between  $\alpha$  and dependable rainfall in Xi'an

定义,分别为24 h降水<10 mm为小雨、10~25 mm为中雨、25~50 mm为大雨、50~100 mm为暴雨、100~200 mm为大暴雨、 $\geq 200$  mm为特大暴雨。故西安市 $\alpha$ 值为80%、85%时,对应的设计降雨量为中雨级别。对于既有街区( $\alpha$ 值为50%)的设计降雨量仅为小雨级别。

### 2.2 西安城区 $\alpha$ 值与径流控制目标的关系

根据近30年日降雨资料,可得西安市降雨频率分布,如图2所示。

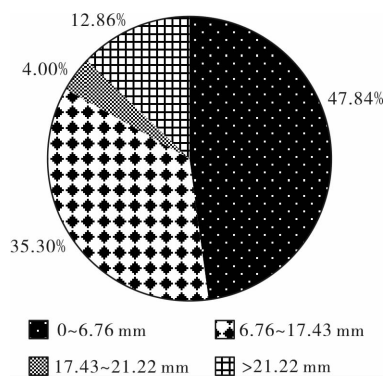


图2 西安市降雨频率分布

Fig. 2 Rainfall frequency distribution in Xi'an

由图2可知,西安市降雨量为0~6.76 mm、6.76~17.43 mm、17.43~21.22 mm和 $\geq 21.22$  mm的降雨频率分别为47.84%、35.30%、4.00%和12.86%。故当 $\alpha$ 值为85%、设计降雨量为21.22 mm时,海绵城市建设可实现对87.14%的降雨场次有效控制的目标。

### 2.3 常用海绵体对地表径流的削峰和错峰作用

利用SWMM分别模拟透水铺装(透水面层、透水找平层、透水基层和透水底基层分别为60 mm、20 mm、100 mm和150 mm)和生物滞留设施(下凹深度为200 mm)在重现期2 a,降雨历时120 min和重现期为10 a,降雨历时为120 min暴雨强度下,对于地表径流的削峰、错峰的效果。土壤渗透系数根据对西安市城六区土壤渗透系数

实测,取最频值  $1.7 \times 10^{-5}$  m/s.

模拟结果显示,透水铺装两种暴雨强度下对洪峰的削减率分别为60%和21%,延迟峰现时间为14.5 min和6.5 min.生物滞留设施在两种暴雨强度下对洪峰的削减率分别为90%和38%,延迟峰现时间为30 min和15.3 min.由此可知,海绵体对径流的削峰和错峰能力大小与暴雨强度大小成反比;生物滞留设施的削峰和错峰能力明显优于透水铺装.国内外相关研究也得出了类似结论<sup>[5-7]</sup>.

### 3 西安市主城区下垫面分析

城镇化进程的不断加快导致地表不透水面的增大和植被覆盖率下降<sup>[8]</sup>,对海绵城市的建设带来很大的挑战.分析不同区域下垫面地表类型的分布进而可知各区海绵城市建设的难易程度.

将地表分为不透水地面、裸土地、水体、植被四个类型,西安市城六区各类型2000年与2015年地表分布如图3和图4所示.

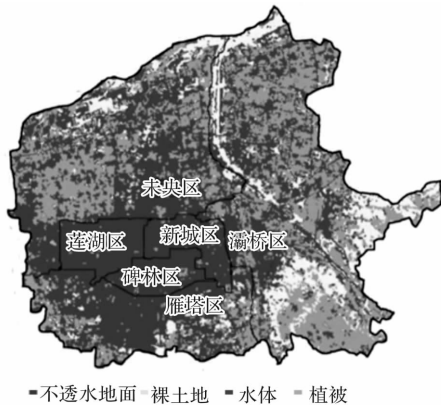


图3 2000年西安城六区地表分布

Fig. 3 The distribution of the earth surface type of six districts in Xi'an in 2000

西安市及其城六区各地表类型所占总面积的比例,详见表1与表2.

表1 不同年份西安城六区各地表类型所占比例

Tab. 1 Proportion of the earth surface types in 2010 and 2015 in the six districts of Xi'an

地表类型	2000年所占比例	2015年所占比例
不透水地面	53.38	64.67
裸土地	12.68	3.29
水体	2.7	1.73
植被	31.24	30.31

由表1可知,随着城镇化的不断推进,与2000年相比,2015年西安市城六区不透水面积比例增加

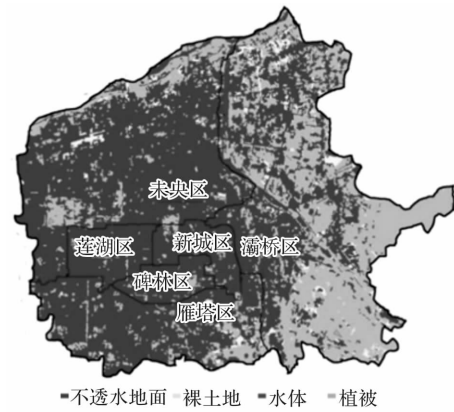


图4 2015年西安城六区地表分布

Fig. 4 The distribution of the earth surface type of six district in Xi'an in 2015

了11.29%,而裸土地、水体和植被分别减少了9.39%、0.97%和0.93%.说明地表径流的形成和峰现时间在逐渐缩短,发生城市内涝的风险在逐步增大,西安市城六区留给海绵城市建设的渗透区域越来越小,建设海绵城市的难度也在逐步增大.

表2 2015年西安城六区地表类型分布

Tab. 2 Distribution of earth surface type in the six districts of Xi'an in 2015

地表类型	新城	莲湖	碑林	雁塔	未央	灞桥
不透水地面	88.49	94.52	94.22	82.26	76.20	40.50
裸土地	0.51	0.19	0.03	2.24	2.62	4.81
水体	2.67	0.37	0.4	0.49	6.02	2.49
植被	8.33	4.92	5.35	15.01	15.16	52.20

由表2可知,西安市城六区不透水面积占比由大到小为:莲湖区(94.52%)>碑林区(94.22%)>新城区(88.49%)>雁塔区(82.26%)>未央区(76.20%)>灞桥区(40.50%).莲湖区、碑林区和新城区的不透水面积占比较大,海绵城市建设工程改造和促渗难度较大.

根据西安市城市总体规划(2004—2020年),西安市主城区2020年规划城市建设用地平衡表<sup>[9]</sup>见表3.

表3 西安市主城区2020年规划城市建设用地平衡表

Tab. 3 Urban construction land use balance of Xi'an main urban area planning in 2020

用地名称	用地面积/hm <sup>2</sup>	用地百分比/%
居住用地	15 402.98	30.20
公共设施用地	10 247.83	20.08
公园绿地	9 685.42	18.99
其他	15 663.77	30.73

由表3可知,西安市居住用地、公共设施用

地、公园用地分别占规划用地的 30.20%、20.08%和 18.99%。根据国务院《关于推进海绵城市建设的指导意见》要求,通过综合采取“渗、滞、蓄、净、用、排”等措施,将 70%的降雨就地消纳和利用,到 2020 年,城市建成区 20%以上的面积须达到目标要求<sup>[10]</sup>。通过对城六区土壤类型现场调研、实测和 SWMM 模拟,取土壤渗透系数最频值  $1.7 \times 10^{-5}$  m/s,可知公园绿地类用地可满足将 70%的降雨就地消纳和利用的目标要求。因此若能在 2020 年仅完成公园绿地海绵化改造,城市建成区就将有近 20%的区域可达到目标要求。根据西安市城乡规划管理技术规定<sup>[11]</sup>可知,2015 年公共设施用地绿地率为 35%,居住用地绿地率为 15%。因此,海绵城市建设应率先从容易推进的公园绿地海绵化入手,再辅以少量公共设施用地绿地和居住用地绿地的海绵化改造,将更利于达到国家对于建设海绵城市的要求。

#### 4 西安市连续渗透体系的构建

西安市大部分地区的土壤属湿陷性黄土,湿陷性呈现由西向东、由北向南依次增强的趋势<sup>[12]</sup>。在湿陷性黄土区开展海绵城市建设,应采取防渗措施。地基处理方法常采用强夯方法,然而防渗和过度压实的地基均不利于雨水的下渗,是西安市建设海绵城市急需解决的问题。

促渗海绵城市建设的首要途径,非饱和状态更利于实现快速的连续渗透。综合西安市地质情况,提出了“渗”、“滞”、“蓄”、“净”、“用”、“排”于一体的连续渗透体系,如图 5 所示。

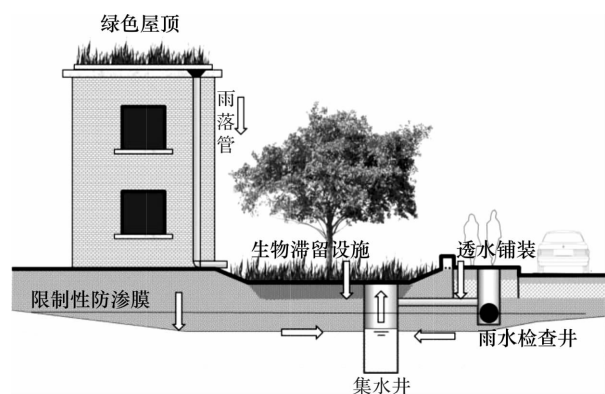


图 5 连续渗透体系

Fig. 5 Continuous infiltration system

如图 5 所示,连续渗透体系包括绿色屋顶、生物滞留设施、透水铺装、雨水检查井、集水井和限制性防渗膜等。其中,限制性防渗膜是指当土壤湿陷性等级较低,雨水能够安全自然下渗情况

下,允许雨水下渗;当土壤湿陷性等级较高或重要建筑物周围,应控制或禁止雨水的自然下渗。降雨通过绿色屋顶、透水铺装、绿地、生物滞留设施下渗,汇流至集水井。集水井中设有溢流口与雨水检查井相连接,雨量不大时,雨水通过海绵体下渗,其余水量汇流至集水井;雨量过大时,集水井中过多雨水将通过溢流口流向雨水检查井,进入城市排水系统。在晴天绿地道路需要浇洒时,可使用集水井里收集的经净化的雨水。透水铺装和绿地对雨水主要发挥“渗”和“蓄”的作用;生物滞留设施和绿色屋顶主要发挥“滞”和“净”的作用;集水井主要发挥“蓄”的作用;雨水管渠主要发挥“排”的作用。

连续渗透体系的关键是须形成动态渗透,即实现收集雨水的有效持续利用,包括道路、绿化浇洒、城市生态用水补水、回灌地下水等。在雨水利用量小于收集量时,应保证雨水排水系统的通畅。

#### 5 结论与建议

(1)西安市  $\alpha$  值为 50%、80%、85%时,对应的设计降雨量分别为 6.76 mm、17.43 mm、21.22 mm。

(2)设计降雨量为 21.22 mm 时,西安市海绵城市的建设对于全年 87.14%的降雨场次都可以达到降雨量有效控制的目标。

(3)对于中小降雨量,西安市海绵城市的建设可基本达到  $\alpha$  值目标要求,对于大雨及以上降雨强度,应主要依靠灰色市政基础设施的排水能力,排洪防涝。

(4)西安市不透水面积比例在逐渐增大,城六区中,碑林区、莲湖区和新城区可建设促渗区域较小,难度较大。海绵城市建设应率先对公园绿地进行改造。

(5)海绵城市建设的关键在于促渗,西安市海绵城市建设应优先从低洼区域改造,根据汇水分区,与生态斑块营造相结合,相对均匀地布置海绵体,从而快速改变整个城市的可渗透性,同时减少不均匀沉降、地质灾害等风险。

#### 参考文献 References

- [1] 李九一,李丽娟. 中国水资源对区域社会经济发展的支撑能力[J]. 地理学报, 2012, 67(3):410-419.  
LI Jiuyi, LI Lijuan. Water resources supporting capacity to regional socio-economic development of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3):410-419.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[S]. 北京: 2014;11,64.  
Ministry of Housing and Urban-Rural of P. R. China. Development technical guide for sponge city construction: low impact development [S]. Beijing: 2014: 11,64.
- [3] 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(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(8): 6-12.
- [4] ZHANG J, LIN Z. Climate of China[M]. New York: John Wiley Sons, 1992: 376.
- [5] 王哲, 谢杰, 谢强, 等. 透水铺装地面滞蓄净化城镇雨水径流研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013(S2): 138-143.  
WANG Zhe, XIE Jie, XIE Qiang, et al. Advances on the research of the detention and purification of urban stormwater runoff by permeable paving[J]. Environmental Science & Technology, 2013(S2):138-143.
- [6] DAVIS A P. Field performance of bioretention: hydrology impacts[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(2):90-95.
- [7] HATT B E, FLETCHER T D, DELETIC A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater bio filtration systems at the field scale[J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(3/4):310-321.
- [8] 刘焱序, 吴文恒, 温晓金, 等. 晋陕蒙能源区城镇化过程及其对生态环境的影响[J]. 地理研究, 2013, 32(11):2009-2020.  
LIU Yanxu, WU Wenheng, WEN Xiaojin, et al. Urban process and its eco-environmental impact in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia energy area[J]. Geographical Research, 2013, 32(11):2009-2020.
- [9] 西安市政府. 西安市城市总体规划(2004年—2020年)[R]. 西安:西安市政府, 2004.  
Xi'an Municipal Government. Overall planning of Xi'an(2004—2020)[R]. Xi'an: Xi'an Municipal Government, 2004.
- [10] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见[EB/OL]. (2015-10-16). [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/16/content\\_10228.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/16/content_10228.htm).  
General Office of the State Council. Guideliness on Promoting the Construction of Sponge City[EB/OL]. (2015-10-16). [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/16/content\\_10228.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/16/content_10228.htm).
- [11] 西安市规划局. 西安市城乡规划管理技术规定[S]. 西安: 西安市规划局, 2015: 30-35.  
Xi'an Planning Bureau. Planning and management technical regulations of Xi'an urban and rural[S]. Xi'an: Xi'an Planning Bureau, 2015: 30-35.
- [12] 王宝峰, 樊丽萍. 西安地区黄土的湿陷性及其处理方法[J]. 工程勘察, 2006(S1): 216-219.  
WANG Baofeng, FAN Liping. The character of collapsibility loess and its processing method in Xi'an[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(S1): 216-219.

(编辑 桂智刚)