

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0008

刘家宏,王佳,邵薇薇,等.南水北调工程受水区城市雨水利用潜力分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):70-78. LIU J H, WANG J, SHAO W W, et al. Assessment of potential rainwater use in urban areas of reception basins of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 70-78. (in Chinese)

南水北调工程受水区城市雨水利用潜力分析

刘家宏^{1,2}, 王佳^{1,2}, 邵薇薇¹, 苏鑫¹, 杜晓鹤¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038)

摘要:考虑地理气候和降水特点等,调研分析我国中、东部地区和西部地区共 26 个海绵城市建设试点/示范城市的雨水资源利用水平,分区测算城市雨水利用能够替代城市自来水的比例;基于城市建设统计年鉴中南水北调工程东、中、西线受水区 60 个城市 2018 年供水量数据,估算高、中、低利用水平下南水北调工程受水区城市雨水利用的潜力分别为 6.19 亿、4.71 亿和 3.27 亿 m³。考虑降水的不确定性,测算了平水年($P=50\%$)、枯水年($P=75\%$)、特枯年($P=95\%$)受水区城市的雨水资源利用量。以北京、天津、石家庄、济南、太原等城市为典型,计算得到南水北调工程受水区典型城市雨水利用的平均保证率约为 45.9%,远低于城市供水保证率的要求。

关键词:南水北调工程;雨水利用潜力;海绵城市;供水保证率;水文频率

中图分类号:TV125

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



在全球气候变化和快速城镇化背景下,极端水文事件^[1-2]和旱涝急转^[3]现象频现,城市洪涝和干旱问题并存,一方面因汛期暴雨造成城市内涝淹水灾害^[4],另一方面是城市面临水资源短缺的持续风险^[5]。如何科学、经济、高效利用雨水,缓解内涝成为城市水资源管理的热点^[6]。2021 年 5 月 14 日习近平总书记在推进南水北调后续工程高质量发展座谈会上强调要坚持节水优先,把节水作为受水区的根本出路^[7-8]。科学高效地利用城市雨水资源^[9]是践行新时代治水思路的重要内容,也是南水北调后续工程规模论证需要考虑的关键问题之一。

城市雨水利用方式及其相关的技术^[10]、政策、效益^[11]研究在国内外受到广泛关注^[12-13],特别是在缺水国家^[14-15]和缺水城市^[16-17],相关的科学研究和实践探索较多。总体来看,城市雨水利用的研究重点主要包括 4 个方面:面向不同水质要求研发经济可行的雨水处理技术^[18-19],例如 Costa 等^[20]等提出

利用丙烯酰毛毯过滤雨水的处理方法,其出水的浊度指标可以达到巴西的雨水利用标准;雨水利用设施的设计和优化技术^[21-22],例如 Kim 等^[23]提出了家庭雨水收集的容积优化方法;雨水利用潜力评估模型,例如黄显峰等^[24]、李晓贝等^[25]、徐志欢等^[26]、曹言等^[27]、Almeida 等^[28]、Kanno 等^[29]针对不同的城市或片区分别提出了雨水利用潜力的计算模型和方法;海绵城市雨水资源利用潜力分析^[30-36]。其中,现有城市雨水利用潜力的计算方法多是采用水文或水动力模型评价得到的雨水可能收集量,没有测算具体可以替代多少自来水量,因此评估结果尚不能直接作为城市供水规模论证的依据。为了贯彻落实节水优先的方针,须在充分考虑受水区城市雨水利用的前提下,科学论证南水北调后续工程的调水规模。本研究调研分析海绵城市建设试点雨水资源的利用水平,将其实际替代的城市自来水比例作为经济可行的指标,据此测算南水北调工程受水区城市

收稿日期:2021-12-31 修回日期:2022-01-06 网络出版时间:2022-01-07

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220107.0939.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51739011;51979285);国家重点实验室基金(SKL2022TS11)

作者简介:刘家宏(1977—),男,湖北钟祥人,正高级工程师,主要从事城市水文学研究,E-mail:liujh@iwahr.com

雨水利用潜力。

1 受水区海绵城市雨水利用现状

海绵城市为城市雨水管理和利用提供了新的指南和思路。2015—2016 年全国共确定第一批和第二批共 30 个国家海绵城市建设试点。2021 年国家又遴选了 20 个“系统化全域推进海绵城市建设示范城市”,推动海绵城市建设迈上新台阶。海绵城市对于城市雨水资源管理来说就是一种系统化的、综合化的理念,通过多种海绵设施的实施对城市水文过程进行有效调节,实现对“水资源、水环境、水生

态、水安全”的综合协调治理。

城市雨水的资源化利用是海绵城市考核指标中的一项量化的约束性指标,目的是将雨水资源收集并利用,以有效减少城市自来水资源供水,缓解水资源短缺的压力。海绵城市雨水资源利用方面的示范以及推广应用已经初见成效。南水北调受水城市中,北京、天津、济南、青岛、鹤壁、西咸新区 6 个国家海绵城市试点城市,已经通过了验收。通过 6 个城市海绵试点建设绩效评估报告等文献调研和监测数据分析,获得了南水北调工程受水区海绵城市雨水资源利用现状,见表 1。

表 1 南水北调工程受水区雨水资源利用现状

Tab. 1 Current situation of rainwater utilization in reception basins of SNWDP

试点城市	雨水资源利用率/%	试点区规模/km ²	年平均降雨量/mm	雨水利用量/(万 m ³ ·a ⁻¹)
北京	5	19.36	545	52.76
天津	6	27.60	523	86.61
济南	12	39.00	706	330.41
青岛	8	25.24	660	133.27
鹤壁	1	29.80	571	17.02
西咸新区	15	22.50	520	175.50
合计				795.57

表 1 显示南水北调工程受水区 6 个海绵试点城市或区域年均雨水利用总量为 795.57 万 m³,从总量上看,南水北调工程受水区城市雨水利用率还比较低,未来还有一定的开发利用潜力。除了国家级试点以外,很多省区市也开展了省级、市级海绵城市示范区建设,由于缺乏准确数据,本次统计暂未列入。

2 受水区雨水资源利用潜力

2.1 雨水资源利用潜力计算方法

广义的雨水资源利用潜力是指在经济技术可行的前提下通过降雨或降雨产生的径流收集、存储、净化以及回用的雨水资源量,既包括社会经济系统的利用量,也包括生态环境的利用量。本研究服务于南水北调后续工程论证,将其限定于社会经济系统中雨水利用替代自来水的量(因为南水北调工程的水源主要供城市利用)。基于此,本研究的雨水资源利用潜力是指:以雨水资源为核算对象,计算在可预见期内,南水北调工程受水区城市可通过海绵城市的建设实现的雨水资源对自来水的替代量。计算方法是统计分析已建海绵城市试点和系统化全域推进海绵城市建设示范城市的雨水资源利用现状和规划雨水利用目标,考虑经济技术可行性,分不同气候区

设定海绵城市雨水利用替代自来水的比例,包括平均值、上限阈值和下限阈值,进而根据城市建设统计年鉴中的城市自来水供水量计算雨水利用潜力。本方法基于海绵城市试点建设经验,同时考虑了不同区域的气候特点,满足雨水利用潜力计算中的经济技术可行性要求。

现有的海绵城市雨水利用指标主要有两类:一类是雨水资源替代自来水比例;另一类是雨水资源回用率。前者以城市自来水供水量为基数,后者以城市建成区面积上的年降水量为基数。两类指标通过式(1),将雨水资源回用率转化为雨水资源替代自来水比例,实现指标统一。

$$K_i = 0.1P_i \times S_i \times R_i / W_{s,i} \quad (1)$$

式中: K_i 为城市 i 的雨水资源替代自来水比例指标; $W_{s,i}$ 为城市 i 的年均自来水供水量,万 m³; P_i 为城市 i 的多年平均降雨量,mm; S_i 为城市 i 的建成区面积,km², R_i 为城市 i 的海绵城市雨水资源回用率指标。

由式(1)可知,只要取得各个城市多年平均降雨量、建成区面积和城市自来水的供水量,就可实现“雨水资源回用率”和“雨水资源替代自来水比例”两个指标的相互转换。表 2 列出了南水北调工程受水区 60 个城市(东线 26 个,中线 22 个,西线 15 个,东线与中线受水城市重合 3 个)2018 年的建成

区面积以及多年平均降水量,可作为各受水城市海绵试点实施后雨水资源利用率指标转换的计算依据。其中,年平均降雨量数据主要来源于中国

天气网关于城市的气象数据以及地方城市的气象类网站,建成区面积数据来源于 2018 年度《城市建设统计年鉴》。

表 2 南水北调工程各受水城市建成区面积及年平均降雨量
Tab. 2 The build-up area and precipitation of cites in reception basins of SNWDP

中线			东线			西线(规划)		
受水城市	S_i/km^2	P_i/mm	受水城市	S_i/km^2	P_i/mm	受水城市	S_i/km^2	P_i/mm
南阳	159.80	765	天津	1 077.83	523	宝鸡	94.97	627
平顶山	73.40	746	济南	485.54	706	西安	701.67	514
漯河	67.67	749	青岛	715.07	660	咸阳	72.90	517
周口	75.03	600	聊城	110.94	578	延安	41.00	500
濮阳	63.00	603	德州	160.06	548	榆林	78.38	506
许昌	107.00	706	滨州	142.40	550	铜川	48.85	583
郑州	543.92	623	烟台	336.13	652	渭南	68.20	514
焦作	113.30	569	威海	197.94	730	定西	25.22	471
新乡	124.76	656	淄博	284.08	641	临夏	24.00	537
鹤壁	64.12	571	潍坊	197.85	440	临汾	54.00	486
安阳	87.00	557	东营	152.85	556	朔州	49.70	423
邯郸	188.55	549	枣庄	155.38	804	太原	340.00	467
邢台	105.89	517	济宁	239.93	597	忻州	36.56	431
石家庄	309.12	523	菏泽	163.85	653	运城	66.00	525
保定	195.00	499	泰安	158.35	697	吕梁	33.32	503
廊坊	69.66	550	徐州	271.30	861			
沧州	83.66	510	扬州	171.83	1 020			
衡水	75.59	575	淮安	190.00	940			
定州	44.20	499	宿迁	94.26	910			
辛集	33.63	488	连云港	223.00	930			
北京	1 469.05	545	蚌埠	149.00	905			
天津	1 077.83	523	淮北	88.56	834			
			宿州	86.90	878			
			盐城	164.00	1 000			
			沧州	83.66	579			
			衡水	75.59	575			

2.2 雨水资源替代自来水比例

以我国第一、二批国家级海绵城市试点城市以及 2021 年确定的全国首批国家级海绵城市示范城市的系统化方案作为数据源,筛选出在南水北调工程受水区及内及周边降雨量相当的试点和示范城市 26 个,其中,中、东部地区 19 个(表 3),西部地区 7 个(表 4)。南水北调工程东、中、西线的受水区东西跨度大,气候条件差别较大:中、东部地区为季风气候区,降水量较大;西部为大陆性气候,降水偏少,因此,在“雨水资源替代自来水比例”指标分析时分为两大类。统计分析得到我国中、东部地区海绵城市建设目标中,雨水资源替代自来水比例均值为

6.6%,考虑经济技术可行性,上阈值为 8.5%,下阈值为 4.8%。西部地区通过雨水资源回收利用,规划实现雨水资源替代自来水比例均值为 4.7%,上阈值为 7.7%,下阈值为 1.6%。各分区的均值、上下限阈值见图 1。南水北调工程受水区城市的雨水资源利用率 K 根据其所处地理位置,选择相应的值。上述指标确定时主要考虑了城市雨水用途、适宜海绵城市建设的城区面积比例等。一般而言,城市雨水替代自来水主要为绿化浇灌和一部分市政杂用。海绵城市雨水资源利用替代自来水的比例上限不宜超过城市绿化浇灌和市政杂用的用水比例。下限主要是考虑到一部分老城区难以建设海绵城市,因此雨水收

集利用量较少,根据试点建设经验做了相应的折扣。

表 3 中部和东部地区海绵城市试点、示范城市名单

Tab. 3 The sponge pilot cities in central and eastern China

省区市	城市名称	类别	省区市	城市名称	类别
河南	鹤壁	试点城市	吉林	白城	示范城市
山东	济南		天津	天津	
浙江	嘉兴		浙江	宁波	
江苏	镇江		山东	青岛	
湖北	武汉				
安徽	池州		江苏	无锡	
河北	迁安		浙江	杭州	
北京	北京		山东	潍坊	
辽宁	大连		河南	信阳	
上海	上海		河北	唐山	

表 4 西部地区海绵城市试点、示范城市名单

Tab. 4 The sponge pilot cities in western China

省区市	城市名称	类别	省区市	城市名称	类别
四川	遂宁	试点城市	山西	长治	示范城市
青海	西宁		新疆	乌鲁木齐	
宁夏	固原		甘肃	天水	
			陕西	铜川	

表 5 南水北调工程各受水城市雨水资源利用潜力(中水平)

Tab. 5 Potential rainwater use of cities in reception basins of SNWDP(medium level)

受水城市	中线			受水城市	东线			受水城市	西线(规划)		
	雨水利用潜力/亿 m ³				雨水利用潜力/亿 m ³				雨水利用潜力/亿 m ³		
	高	中	低		高	中	低		高	中	低
南阳	0.10	0.08	0.06	天津	0.46	0.36	0.26	宝鸡	0.05	0.03	0.010
平顶山	0.05	0.04	0.03	济南	0.30	0.23	0.17	西安	0.28	0.17	0.058
漯河	0.04	0.03	0.02	青岛	0.40	0.31	0.23	咸阳	0.03	0.02	0.007
周口	0.04	0.03	0.02	聊城	0.05	0.04	0.03	延安	0.02	0.01	0.003
濮阳	0.04	0.03	0.02	德州	0.08	0.06	0.04	榆林	0.03	0.02	0.007
许昌	0.06	0.05	0.04	滨州	0.06	0.05	0.04	铜川	0.02	0.01	0.003
郑州	0.28	0.22	0.16	烟台	0.18	0.14	0.10	渭南	0.03	0.02	0.007
焦作	0.05	0.04	0.03	威海	0.13	0.10	0.07	定西	0.02	0.01	0.003
新乡	0.06	0.05	0.04	淄博	0.15	0.12	0.09	临夏	0.02	0.01	0.003
鹤壁	0.03	0.02	0.01	潍坊	0.08	0.06	0.04	临汾	0.02	0.01	0.003
安阳	0.04	0.03	0.02	东营	0.08	0.06	0.04	朔州	0.02	0.01	0.003
邯郸	0.09	0.07	0.05	枣庄	0.10	0.08	0.06	太原	0.11	0.07	0.024
邢台	0.05	0.04	0.03	济宁	0.12	0.09	0.07	忻州	0.02	0.02	0.003
石家庄	0.14	0.11	0.08	菏泽	0.09	0.07	0.05	运城	0.03	0.02	0.007
保定	0.08	0.06	0.04	泰安	0.09	0.07	0.05	吕梁	0.02	0.01	0.003
廊坊	0.04	0.03	0.02	徐州	0.19	0.15	0.11				
沧州	0.04	0.03	0.02	扬州	0.15	0.12	0.09				
衡水	0.04	0.03	0.02	淮安	0.15	0.12	0.09				
定州	0.01	0.01	0.01	宿迁	0.08	0.06	0.04				

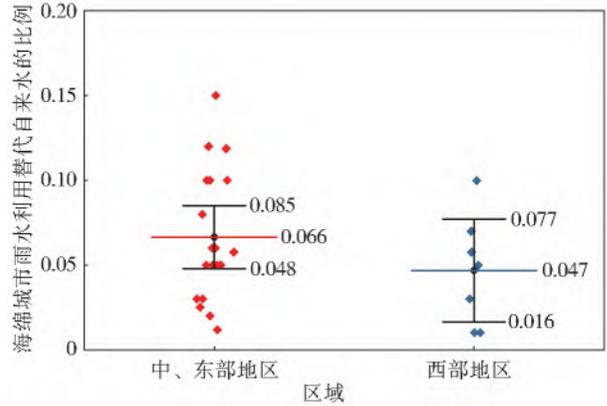


图 1 试点及示范海绵城市雨水资源利用替代自来水的比例统计分析

Fig. 1 The proportion of tap water replaced by rainwater in sponge cities

2.3 雨水资源利用潜力计算结果

基于雨水资源利用潜力计算方法和雨水资源替代自来水比例等指标,可进行南水北调东线、中线和西线工程海绵城市雨水资源利用潜力分析。计算得到各受水城市通过海绵城市建设。在高、中、低利用水平下各城市的雨水资源利用潜力见表 5。南水北调工程受水区各城市高、中、低水平下的雨水利用潜力及分布见图 2。

表 5 (续)
Tab.5 (Continued)

中线				东线				西线(规划)			
受水城市	雨水利用潜力/亿 m ³			受水城市	雨水利用潜力/亿 m ³			受水城市	雨水利用潜力/亿 m ³		
	高	中	低		高	中	低		高	中	低
辛集	0.01	0.01	0.01	连云港	0.18	0.14	0.10				
北京	0.68	0.53	0.39	蚌埠	0.12	0.09	0.07				
天津	0.48	0.37	0.27	淮北	0.06	0.05	0.04				
				宿州	0.06	0.05	0.04				
				盐城	0.14	0.11	0.08				
				沧州	0.04	0.03	0.02				
				衡水	0.04	0.03	0.02				
合计	2.45	1.91	1.39	合计	3.58	2.79	2.04	合计	0.72	0.44	0.146

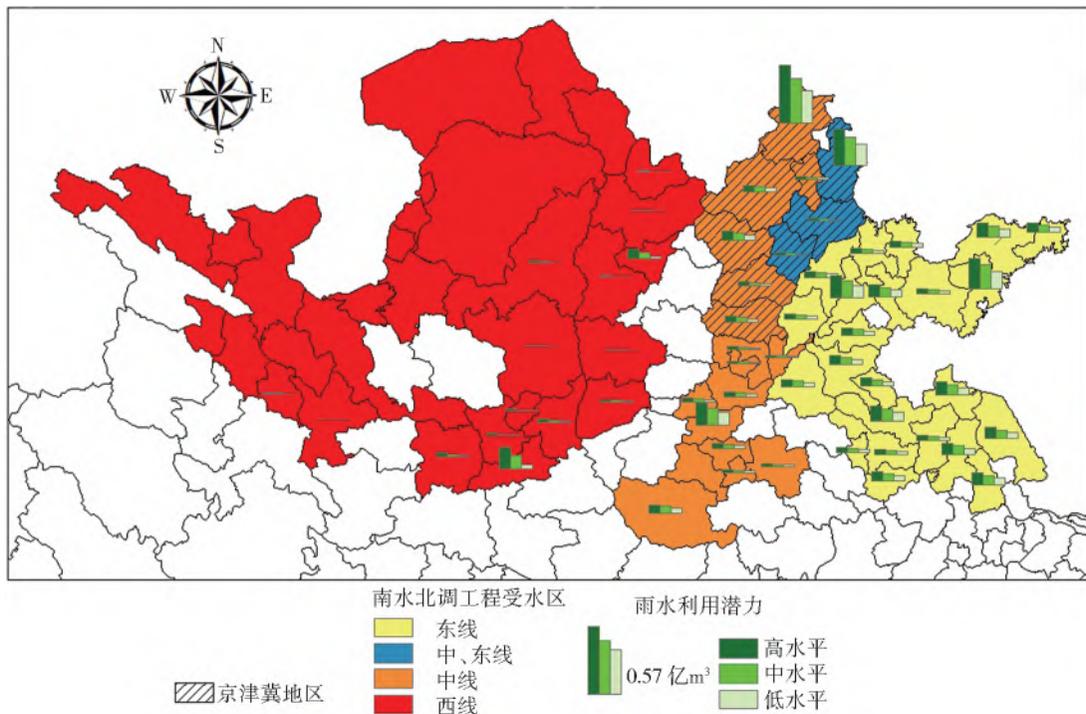


图 2 海绵城市建设下南水北调工程各受水城市雨水资源利用潜力及分布
Fig.2 Potential rainwater use of sponge cities in reception basins of SNWDP

京津冀地区是南水北调东线工程和中线工程受水区的重合区域,且是南水北调工程受水区中最重要的城市群区域,其城市雨水利用潜力受到格外关注,因此本研究做了专门的统计,得到京津冀地区受水城市通过海绵城市建设可利用的雨水资源潜力约为 0.94 亿~1.66 亿 m³/a,见表 6。南水北调工程东、中、西线 60 个城市的雨水资源利用总体潜力约为 3.27 亿~6.19 亿 m³/a。

统计得到通过海绵城市建设东线、中线、西线受水城市雨水资源利用潜力见表 7。按照 2015 年国务院 75 号文件的要求,到 2030 年全国 80% 的建成区建成海绵城市,并不能使建成区完全实现

海绵城市雨水资源利用,因此以上计算的城市雨水资源利用潜力还需要根据海绵城市的建设时序做相应的折扣。

表 6 京津冀地区受水区海绵城市建设雨水资源利用潜力
Tab.6 Summary of potential rainwater use of sponge cities in Beijing-Tianjin-Hebei region provinces

京津冀受水区	海绵城市建设雨水利用潜力/亿 m ³		
	高水平	中水平	低水平
河北省	0.50	0.39	0.28
北京市	0.68	0.53	0.39
天津市	0.48	0.37	0.27
合计	1.66	1.29	0.94

表 7 东线、中线、西线受水城市雨水资源利用潜力

Tab. 7 Summary of potential rainwater use of cities in reception basins of SNWDP

南水北调工程受水区	海绵城市建设雨水利用潜力/亿 m ³		
	高水平	中水平	低水平
东线	3.58	2.79	2.04
中线	2.45	1.91	1.39
西线	0.72	0.44	0.15
合计(扣除重复城市)	6.19	4.71	3.27

3 雨水资源利用保证率分析

城市雨水资源受气象降雨条件影响,具有很大的不确定性。以北京、天津、石家庄、济南、太原等城市为相应受水区代表,开展不同水文年条件下东、中、西线受水城市以及京津冀受水城市雨水资源的不确定性分析。对各城市多年的降雨数据(1970—2020)进行统计和排频分析,计算得到各城市在不同水文年条件下东线、中线、西线受水城市以及京津冀受水城市通过海绵城市建设可实现雨水资源利用潜力(中水平),见表 8。

城市供水保证率是指预期供水量在多年供水中能够得到充分满足的年数出现的概率。城市供水保证率一般要求较高,居民用水的供水保证率一般在

95%以上,公共设施与居民生活密切相关,其供水保证率也在 95%以上,工业用水的供水保证率在 90%以上。以北京、天津、石家庄、济南、太原等城市作为各受水区典型城市,以各城市 1970—2020 年的降雨序列作为数据源,计算得到各城市满足雨水利用均值要求的年份的分布图见图 3,其中,柱状图的长短表示超出均值部分的比例,柱状图顶格表示超过均值 100%,达到中间线表示超过均值 50%。由图 3 可见,各城市雨水资源利用的保证率分别为 45.1%、51.0%、41.2%、45.1%、47.1%,平均为 45.9%,远低于城市供水保证率的要求。

表 8 不同水文年南水北调工程受水区及京津冀雨水资源利用潜力(中水平)

Tab. 8 Potential rainwater use of cities in reception basins of SNWDP considering hydrologic uncertainty (medium level)

南水北调工程受水区	海绵城市建设雨水利用潜力/亿 m ³		
	平水年 (P=50%)	枯水年 (P=75%)	特枯年 (P=95%)
东线	2.76	2.30	1.68
中线	1.91	1.58	1.11
西线	0.40	0.35	0.27
京津冀	1.28	1.06	0.74
合计(扣除重复城市)	4.66	3.89	2.82

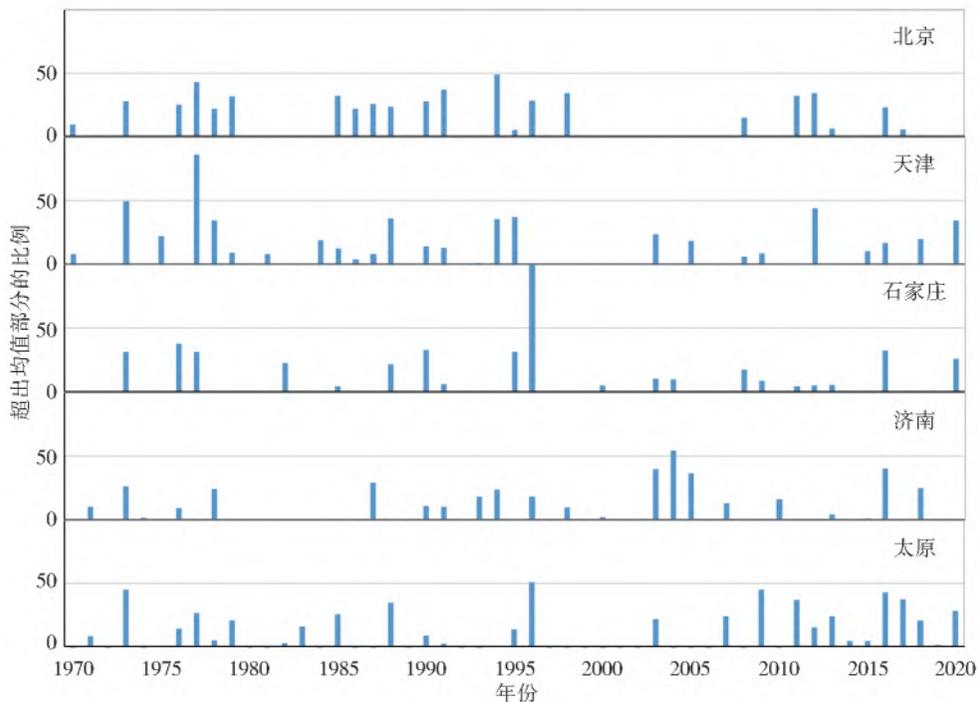


图 3 典型城市 1970—2020 年序列雨水资源利用保证率分析

Fig. 3 The diagrams of rainwater guarantee rate from 1970 to 2020 for sampled cities

4 结论

城市雨水利用是海绵城市建设的一个重要考核指标,在全球气候变化和快速城市化的共同作用下,

城市洪涝和缺水问题并存,开展海绵城市雨水利用研究十分必要。本文基于国家海绵试点城市和系统化全域推进海绵城市建设示范城市的科学调研和数据统计,考虑经济技术可行性,提出了南水北调工程

受水区不同气候区城市雨水资源替代自来水的比例等指标。提出的指标被用于南水北调工程受水区城市雨水资源利用潜力计算,结果表明:高、中、低利用水平下南水北调工程受水区城市雨水利用的潜力分别为6.19亿、4.71亿和3.27亿 m^3 ,典型城市多年平均的供水保证率为45.9%,低于城市供水保证率要求(95%)。综上所述,南水北调工程受水区城市经济技术上可利用的雨水资源数量有限,且不确定性高,保证率低,年际变化大,因此适用于作为城市的补充性水源,而难以作为稳定的水源供给。

参考文献(References):

- [1] 张金萍,张航,方宏远,等. 郑州城市暴雨特性研究[J]. 水文, 2021, 41(5): 78-83. (ZHANG J P, ZHANG H, FANG H Y, et al. Study on the characteristics of rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(5): 78-83. (in Chinese)) DOI: 10. 19797/j. cnki. 1000-0852. 20210246.
- [2] 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等. 郑州“7·20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 445-454. (SU A F, LYU X N, CUI L M, et al. Prediction and test of optimal integrated precipitation based on similar spatial distribution of precipitation[J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40(5): 445-454. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-9045. 2021. 05. 001.
- [3] 彭高辉,秦琳琳,马建琴,等. 1955—2015年郑州夏季旱涝急转特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 27-32. (PENG G H, QIN L L, MA J Q, et al. Analysis of drought-flood abrupt alternation in Zhengzhou during summer in 1955-2015[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 27-32. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0001.
- [4] 李鹏,徐宗学,赵刚,等. 基于SWMM与LISFLOOD-FP模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(6): 1083-1092. (LI P, XU Z X, ZHAO G, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging process based on SWMM and LISFLOOD-FP models: Case study in Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1083-1092. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2021. 0111.
- [5] 龙秋波,朱文彬,吕爱锋. 水资源承载风险监测预警理论与方法探析[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(6): 1147-1156. (LONG Q B, ZHU W B, LYU A F. Theory and methodology for water resources development carrying capacity risk monitoring and early warning system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1147-1156. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2021. 0117.
- [6] MESHARAM S G, ILDEROMI A R, SEPEHRI M, et al. Impact of roof rain water harvesting of runoff capture and household consumption[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021(4): 1-12. DOI: 10. 1007/s11356-021-14098-9.
- [7] 李国英. 推进南水北调后续工程高质量发展[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(8): 1-3. (LI G Y. Promote the high-quality development of the subsequent South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2021, 41(8): 1-3. (in Chinese)) DOI: 10. 16616/j. cnki. 11-4446/TV. 2021. 08. 01.
- [8] 郑晓云. 把践行节水优先作为推进南水北调后续工程高质量发展的重要保障[J]. 中国水利, 2021(11): 17-18. (ZHENG X Y. Give priority to water conservation as an important guarantee for promoting the high-quality development of the subsequent South-to-North Water Diversion Project[J]. China Water Resources, 2021(11): 17-18. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2021. 11. 024.
- [9] 郭北辰. 综合利用城市雨洪资源[J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2(6): 27-28. (GUO Y C. Comprehensive utilization of rainwater resources in urban area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2004, 2(6): 27-28. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2004. 06. 016.
- [10] 孙德威. 城市雨洪利用技术综述[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(1): 32-36. (SUN D W. Summary of urban rainwater utilization technology[J]. China Flood & Drought Management, 2010, 20(1): 32-36. (in Chinese)) DOI: 10. 16867/j. cnki. cfdm. 2010. 01. 010.
- [11] S. 多尔曼,朱庆云. 雨水收集系统收益成本分析[J]. 水利水电快报, 2017, 38(4): 21-25. (DORMAN S, ZHU Q Y. Benefit cost analysis of rainwater collection system[J]. Express Water Resources & Hydro-power Information, 2017, 38(4): 21-25. (in Chinese)) DOI: 10. 15974/j. cnki. slsdbk. 2017. 04. 008.
- [12] 陶望雄. 雨水利用理论与技术方案研究[D]. 西安:长安大学, 2016. (TAO W X. Research on theory and technical program of rainwater utilization[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. D01114922.
- [13] 梁文逵. 城市雨水收集利用研究现状与进展[J]. 工业用水与废水, 2014, 45(3): 6-9. (LIANG W K. Current status and research progress of urban rainwater collection and utilization[J]. Industrial Water & Wastewater, 2014, 45(3): 6-9. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-2455. 2014. 03. 002.
- [14] RYAN A M, SPASH C L, MEASHAM T G. Socio-economic and psychological predictors of domestic greywater and rainwater collection: Evidence from

- Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1/2): 164-171. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.10.002.
- [15] RYAN A, SPASH C L, MEASHAM T G. Motives behind domestic greywater and rainwater collection: Evidence from Australia[R/OL]. Vienna, WU Vienna University of Economics and Business, 2021. http://www.sre.wu.ac.at/sre-disc/sre-disc-2021_05.pdf.
- [16] PRASOOD S P, MUKESH M V, RANI V R, et al. Urbanization and its effects on water resources; Scenario of a tropical river basin in south India [J]. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, 2021(4): 100556. DOI:10.1016/j.rsase.2021.100556.
- [17] 俞书涵. 福州市居住区雨水资源化利用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017. (YU S H. Fuzhou City residential rainwater utilization research[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese))
- [18] LIU X, REN Z, NGO H H, et al. Membrane technology for rainwater treatment and reuse; A mini review [J]. *Water Cycle*, 2021, 2: 51-63. DOI: 10.1016/J.WATCYC.2021.08.001.
- [19] SCHANG C, SCHMITT J, LI G, et al. Rainwater for residential hot water supply; Managing microbial risks [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 782(1): 146889. DOI:10.1016/J.SCITOTENV.2021.146889.
- [20] COSTA P, AZEVEDO A, SILVA F, et al. Rainwater treatment using an acrylic blanket as a filtering media [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 303(23): 126964. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2021.126964.
- [21] 时晓蒙. 基于景观格局的城市居住区雨水利用研究: 以郑州市为例[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017. (SHI X M. Study on rainwater utilization in urban residential area based on landscape pattern; Taking Zhengzhou City as an example[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017. (in Chinese)) DOI:10.7666/d.D01304916.
- [22] 王阳. 基于海绵城市理论下的城市公园设计中的雨水利用研究: 以滁州双洪公园为例[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018. (WANG Y. The Study on rainwater utilization in urban park design based on sponge city theory: A case study of Chuzhou Shuanghong park [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2018. (in Chinese))
- [23] KIM J E, TEH E X, HUMPHREY D, et al. Optimal storage sizing for indoor arena rainwater harvesting: Hydraulic simulation and economic assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280(8): 111847. DOI:10.1016/J.JENVMAN.2020.111847.
- [24] 黄显峰, 邵东国, 魏小华. 基于水量平衡的城市雨水利用潜力分析模型[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2007, 40(2): 17-20. (HUANG X F, SHAO D G, WEI X H. A potentialities evaluation model of city rainwater utilization based on water balance [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(2): 17-20. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-8844.2007.02.004.
- [25] 李晓贝, 杨侃, 刘建林, 等. 城市雨水利用潜力计算与效益识别模型与应用[J]. 2017(11): 14-19. (LI X B, YANG K, LIU J L, et al. Models of urban rainwater utilization potential calculation and benefit identification and their application [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(11): 14-19. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2017.11.004.
- [26] 徐志欢, 纪静怡. 基于 GIS 的城市区域雨水资源可利用量估算[J]. *海河水利*, 2021(1): 11-18. (XU Z H, JI J Y. Estimation of available amount of urban regional rainwater resources based on GIS [J]. *Haihe Water Resources*, 2021(1): 11-18. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2021.01.004.
- [27] 曹言, 王杰, 黄英, 等. 基于 SCS 模型的昆明市主城区雨水资源潜力特征分析 [A]. *中国水利学会 2017 学术年会论文集*, 2017: 161-170. (CAO Y, WANG J, HUANG Y, et al. Potential characteristics of rainwater resources in the main urban area of Kunming based on SCS model [A]. 2017 CHES Annual Conference, 2017: 161-170. (in Chinese))
- [28] ALMEIDA A P, LIBERALESSO T, SILVA C M, et al. Dynamic modelling of rainwater harvesting with green roofs in university buildings [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312(1): 127655. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127655.
- [29] KANNO G G, LAGISO Z A, ABATE Z G, et al. Estimation of rainwater harvesting potential for emergency water demand in the era of COVID-19; The case of Dilla town, southern Ethiopia [J]. *Environmental Challenges*, 2021(3): 100077. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100077.
- [30] 马瑾瑾, 陈星, 许钦. 海绵城市建设中雨水资源利用潜力评价研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019(1): 27-32. (MA J J, CHEN X, XU Q. Evaluation of regional rainwater resources utilization potential in sponge city construction [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2019(1): 27-32. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.05.
- [31] 陈丽君, 刘海臣. 海绵城市建设中雨水利用潜力研究 [J]. *城市住宅*, 2021, 28(3): 128-129. (CHEN L J, LIU H C. Evaluation of regional rainwater utilization in sponge city construction [J]. *City & House*, 2021, 28(3): 128-129. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-6659.2021.03.030.
- [32] 宫思羽, 陶洪波, 高炎冰, 等. 哈尔滨市群力区绿园居住小区雨水资源潜力研究 [J]. *北方园艺*, 2019(8): 97-104. (GONG S Y, TAO H B, GAO Y B, et al.

- Study on the construction of water saving green space in residential district[J]. Northern Horticulture, 2019(8): 97-104. (in Chinese)) DOI:10.11937/bfyy.20160895.
- [33] 郑斐冉. 基于低影响开发的都市雨水资源利用[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2017. (ZHEN F R. Utilized study on urban rainwater based on the low impact development[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017. (in Chinese)) DOI:10.7666/d.D01304910.
- [34] 陆筱慧, 李琼. 基于低影响开发理念的城市硬化路面雨水利用潜力分析:以广州某高校地块为例[A]. 中国第二届风景园林与小气候国际研讨会论文集, 2020:205-210. (LU X H, LI Q. Analysis of rainwater utilization potential of urban hardened pavement based on the low impact development: A case study of a university plot in Guangzhou[A]. Proceedings of 2nd Landscape Architecture v s. Microclimate International Confer-
- ence China, 2020:205-210. (in Chinese))
- [35] 梁建军, 侯淑媛, 彭俊. 山地城市屋面雨水可利用量分析:以重庆市沙坪坝某片区为例[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 27-30. (LIANG J J, HOU S Y, PENG J. Analysis of available quantity of roof rainfall in mountainous urban: A case study in Chongqing[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(4): 27-30. (in Chinese)) DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2016.04.05.
- [36] 王琳, 王浩程, 卫宝立. 小城镇低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(2): 99-106. (WANG L, WANG H C, WEI B L. Simulation of control effect of rainfall and flood in low impact development of small towns[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 99-106. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0032.

Assessment of potential rainwater use in urban areas of reception basins of South-to-North Water Diversion Project

LIU Jiahong^{1,2}, WANG Jia^{1,2}, SHAO Weiwei¹, SU Xin¹, DU Xiaohu¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: The extreme hydrological events such as storms and droughts are sharply increasing, which leads to the coexistence of urban floods and drought. Scientific control of urban rain and flood process is the frontier and hot spot of urban hydrology. Rainwater utilization is one of the important means to alleviate urban waterlogging, and also a key issue to determine the water diversion scale of the subsequent South-to-North Water Diversion Project (SNWDP). It is very necessary to assess the potential of urban rainwater use in the reception basins of SNWDP.

The rainwater utilization levels of sponge pilot cities were investigated and analyzed, considering the geographical climate and precipitation characteristics in central-eastern and western China. The two different indicators "Proportion of Tap Water that replaced by rainwater water (PTW)", and "Proportion of Rain Water that used by human beings (PRW)" are used to quantify the rainwater water utilization levels in sponge cities. The conversion formula was put forward to unify the two indicators as PTW. Considering the economic and technical feasibility, the upper, lower threshold, and an average of PTW in the central-eastern and western regions were calculated. The uncertainty of urban rainwater utilization and the guaranteed rate of rainwater supply were quantified based on the hydrological frequency analysis method.

The potential rainwater use was calculated based on the datasets of year 2018. The result is 620 million m³, 470 million m³ and 326 million m³ for high, medium and low utilization levels, respectively. Based on the hydrological series from 1970 to 2020, the potential utilization of rainwater resources is 466 million m³, 389 million m³ and 282 million m³ for a normal year ($P=50\%$), dry year ($P=75\%$), and extreme dry year ($P=95\%$), respectively. Taking Beijing, Tianjin, Shijiazhuang, Jinan, Taiyuan as sample cities, the guaranteed rate of rainwater utilization was obtained, which were 45.1%, 51.0%, 41.2%, 45.1%, 47.1%, respectively, with an average rate of 45.9%. The average rate is far lower than the requirement of the urban water supply guarantee rate.

The potential urban rainwater use is quite small compared with the total demand capacity of subsequent projects of SNWDP. Due to the randomness of precipitation, the rainwater use has the characteristics of high uncertainty, low guarantee rate and great interannual variation. The rainwater is suitable as a supplementary water source for the city, instead of serving as a stable water supply.

Key words: South-to-North Water Diversion Project; potential rainwater use; sponge city; guarantee rate of water supply; hydrologic frequency