

沈阳市建成区自然水文循环过程的 多元协整分析

王曦¹, 初亚奇², 曹晓妍¹, 石铁矛¹

(1. 沈阳建筑大学建筑与规划学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳大学建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

摘要 目的 弥补自然水文循环过程分析中城市建成环境影响参数的缺失, 为城市内涝治理提供科学量化的参考依据。方法 以沈阳市建成区为研究对象, 将气候、降雨、地理、土壤、水文、绿地等多个元素纳入沈阳市自然水文循环过程的分析中, 通过代入降雨量、土壤类型、植被覆盖、地形地貌、净辐射、土壤热通量、温度、风速、饱和水汽压和实际水汽压等基础数据, 量化分析地表径流、地下水补给和蒸发蒸腾过程。结果 通过对地表-地下-大气的各个循环过程阶段进行多元协整分析可知, 沈阳市建成区的整体水汽循环量较大。结论 城市建设导致水文循环系统不畅, 呈现极端化倾向, 容易引发雨涝灾害的产生。

关键词 沈阳市; 建成区; 自然水文循环过程; 多元分析

中图分类号 TU985.1

文献标志码 A

引用格式:王曦, 初亚奇, 曹晓妍, 等. 沈阳市建成区自然水文循环过程的多元协整分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(6): 1089-1098. (WANG Xi, CHU Yaqi, CAO Xiaoyan, et al. Natural hydrological cycle process of shenyang built-up area multivariate co-integration analysis[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(6): 1089-1098.)

Natural Hydrological Cycle Process of Shenyang Built-up Area Multivariate Co-integration Analysis

WANG Xi¹, CHU Yaqi², CAO Xiaoyan¹, SHI Tiemao¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Construction Engineering School, Shenyang University, Shenyang, China, 110044)

Abstract: To make up for the lack of parameters in the process of urban construction and provide a scientific and quantitative reference for urban waterlogging control. The climate, rainfall, geography, geography, hydrology, green space and other elements were included in the analysis of natural hydrological cycle process in Shenyang. The surface runoff, groundwater recharge and evaporation transpiration process were quantitatively analyzed by including basic data parameters such as rainfall, soil type, vegetation cover, topography, net radiation, soil heat flux, temperature, wind speed, saturated water vapor pressure and actual water vapor pressure. The total amount of the

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52308070)

作者简介: 王曦(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事生态规划等方面研究。

water vapor circulation in Shenyang built-up area is relatively large. Urban construction leads to the extreme tendency of the unstable hydrological circulation system, which is easy to cause rain and waterlogging disasters.

Key words: Shenyang city; built-up area; natural hydrological cycle process; multivariate analysis

自然水文循环是指地球上水分在大气、地表和地下之间的循环过程^[1]。有研究表明,降雨量是地表径流的主要驱动因素,绿地可以增加城市地面的整体糙度,加剧空气的垂直向流动,增加周边地区的空气湿度^[2-3],对降雨-径流的空间格局、土地利用方式、土壤湿润程度都会产生影响^[4]。不同的土壤类型和土壤蓄水容量会影响地表的渗透能力和保水能力,地下水位及饱和水位的高低也会影响地下水的补给量和补给速率。蒸发蒸腾的影响因素主要包括净辐射、土壤热通量、温度、风速、饱和水汽压和实际水汽压等^[5-7]。

这些研究多从水汽循环角度出发,忽视了城市建成环境与自然水文循环的相互作用。城市绿地土壤的入渗速率是城市内涝防治的重要指标之一^[8-10],在规划设计过程中,通过人为干预,调整城市绿地植被结构的配置方式,可有效增加渗蓄量,从而改善雨水入渗消纳作用^[11-15]。基于此,笔者深入调查研究了沈阳市建成区在城市化作用下的现状,包括建成区地形地貌、降水量、土壤类型分布^[16]、净辐射、土壤热通量、温度、风速、饱和水汽压和实际水汽压等各方面基础数据,将城市绿地的植被覆盖相关参数代入土壤入渗消纳系统中,构建出沈阳市建成区的自然水文循环过程的多元化协整计算模型,找寻水汽循环特征,提出解决办法,为城市内涝治理提供科学量化的参考。

1 研究概况

1.1 气候概况

研究区为沈阳市三环范围内的建成区,属温带季风气候,年平均气温在 6.2 ~

9.7 ℃,在 7—8 月出现峰值,表现为两头低中间高的变化趋势。主要风向为西南风、东北风和北风,全年平均气压相对均匀,峰值在冬季,谷值在夏季,呈现标准的“V”字型分布。夏季的净辐射约为 158 W/m²,冬季约为 52 W/m²。夏季的土壤热通量约为 13 W/m²,冬季约为 8 W/m²。饱和水汽压随温度变化而变化,一般在 0.38 ~ 3.02 kPa,实际水汽压一般在 0.01 ~ 2 kPa。年平均蒸发量为 1 444.9 mm,平均相对湿度为 63%,平均风速为 3.1 m/s,最大风速可达 29.7 m/s,最大风速出现在西南风。

1.2 水文概况

沈阳市建成区内主要有浑河、新开河、南运河、卫工明渠等 18 条河流,形成了“一城一带一环”的格局。大气降水是沈阳地表水的主要来源,市域水资源总量为 32.6 亿 m³,其中地表水 11.4 亿 m³,地下水 21.2 亿 m³。多年平均降水总量为 77.17 亿 m³,其中地表水多年平均径流量为 13 亿 m³。由于地下水开采量大、补给量少,导致地下水位不断下降,部分地区甚至出现了地下水严重超采问题。

根据沈阳水文站实测数据,截至 2023 年底,年均水头高 40.95 m,流量 5 010 m³/s,河底最大冲刷变幅 7.0 m。抽水试验表明,单井涌水量为 1 720.8 ~ 6 306 m³/d,降深 1.72 ~ 12.05m,单位涌水量 104.3 ~ 3 665.02 m³/d。含水层综合渗透系数为 74.8 ~ 210 m³/s,影响半径为 80 ~ 350 m^[20-24]。沈阳市建成区地下水埋深呈东高西低趋势,与地势坡度一致。这个水资源特性的产生是由地貌、地层结构、岩土孔隙度和水理性质等因素决定的。

2 自然水文循环参数分析

2.1 降水量

近年来,沈阳年均降水量显示出较大的波动,极端降水(包括降雨和降雪)事件增多,年均降水量呈现稳步上升的趋势。2008—2023 年平均年降水量为716.2 mm,最大年降水量为 845.8 mm,平均水面蒸发量为 1 300 ~ 1 800 mm,陆地蒸发量为 450 ~ 500 mm。从统计资料可以看出,降水集中于4—10 月,占总量的 90% 以上,而 11 月至次年 3 月降水量不足 10%。沈阳市降水量最多的月份为 7 月,平均降水量为 156.22 mm(见图 1)。根据沈阳市年降水量统计数据计算得出线性方程为 $y = 0.028\ 16x + 561.273\ 01$ 。

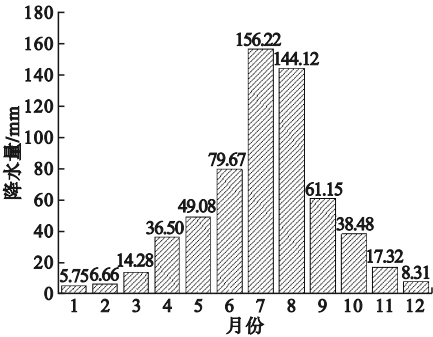


图 1 沈阳市 1965—2020 年月均降水量分布图

Fig. 1 Shenyang monthly rainfall distribution from 1965 to 2020

依据沈阳市建成区 18 个气象站的降水统计数据,利用 ArcGIS 平台的普通克里金插值法计算得出沈阳市 2008—2023 年的夏季平均降雨强度分布,网格大小设为 500 m。采用自然间断法划分降雨风险区,划分为一、二、三、四 4 个等级。将结果进行可视化表达,如图 2 所示。可以看出,颜色从浅到深,表明暴雨风险等级逐渐提高,沈阳市建成区降水总体呈现“南多北少”的空间分布。受强降雨影响多次发生城市内涝,近五年暴雨主要在夏秋交替时期,即 7 月 15 日—8 月 15 日(见表 1)。

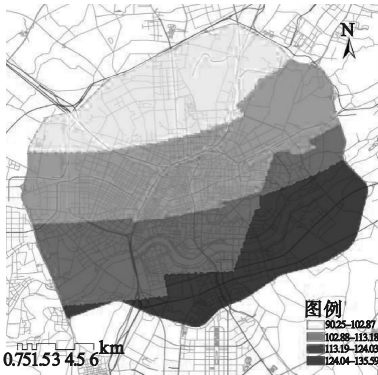


图 2 沈阳市建成区夏季月均降水插值图

Fig. 2 Interpolation map of summer monthly precipitation in main urban area of Shenyang

表 1 2008—2023 年沈阳市暴雨强度分类统计

Table 1 Statistics of Shenyang rainstorm intensity in 2008—2023

日期	重现期/a	降水量/mm	总降水量/mm
2008-08-12	50	120.3	189.5
2013-08-16	20	60.3	149.1
2016-07-21	10	55.6	87.5
2016-07-26	30	69.9	102.1
2017-07-14	>50	82.2	102.5
2017-08-17	>50	83.4	114.9
2018-07-6	100	142.7	258.6
2019-08-16	>50	26.7	118.2
2020-08-22	30	35.7	104.8
2021-08-16	30	139.2	204.2
2023-07-15	>50	128.7	219.4

沈阳市的单场降雨具有历时短、降雨集中、降雨强度不均匀等特点。不同重现期降雨表现出同样的雨型特征,降雨强度随着降雨历时先增大后减小。表 2 为沈阳市不同重现期降雨特征统计结果。可以看出,随着设计暴雨重现期从 1a 增大到 50a,降雨量从 33.82 mm 增大到 67.73 mm,峰值降雨强度从 2.33 mm/min 增至 4.67 mm/min。图 3 为不同重现期下的 2 h 内降雨过程分布示意图。由图 3 可知,沈阳市降雨雨型为单峰雨型,雨

峰位置靠前。在 48 min 达到最大,峰值雨量占据总雨量 40% ~ 50%。统计数据显示,沈阳市五年一遇的降雨强度是 43.8 mm/h, 50 年一遇的降雨强度是 71.6 mm/h,100 年一遇的降雨强度是 79.6 mm/h。

表 2 沈阳市降雨特征统计表

Table 2 Statistical table of rainfall characteristics in Shenyang city			
重现期/a	降雨量/mm	峰值降雨强度/(mm·min ⁻¹)	平均降雨强度/(mm·min ⁻¹)
1	33.84	2.35	0.29
3	43.25	2.98	0.37
5	47.78	3.28	0.41
10	53.76	3.71	0.48
50	67.72	4.65	0.57

$$i(t)=\begin{cases}\frac{1774(1+0.59\lg p)}{\left(\frac{0.4T-t}{0.4}+7.56\right)^{0.75}}\left[1-\frac{0.75\times(0.4T-t)}{0.4T-t+7.56}\right], & 0\leq t\leq 0.4T; \\ \frac{1774(1+0.59\lg p)}{\left(\frac{t-0.4T}{0.6}+7.56\right)^{0.75}}\left[1-\frac{0.75\times(t-0.4T)}{t-0.4T+4.536}\right], & 0.4T<t\leq T; \\ 0, & t>T.\end{cases}\quad (1)$$

式中: A_1 、 C 、 b 、 n 为经验参数; p 为设计降雨重现期,a; t 为降雨历时,min; T 为降雨总历时,min; r 为雨峰位置系数,即从降雨历时开

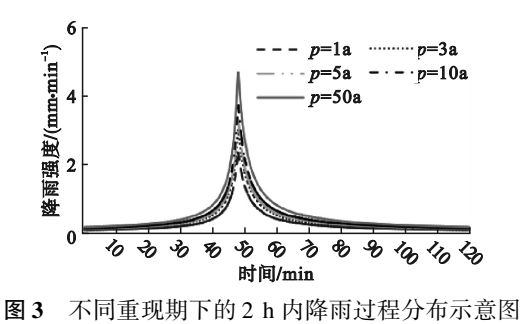


图 3 不同重现期下的 2 h 内降雨过程分布示意图
Fig.3 Schematic distribution of rainfall process within 2 h under different reproduction periods

沈阳市降雨特征明显,可归属芝加哥雨型,具有洪峰流量稳定、径流值稳定等特点。在峰值系数一定的情况下,降雨强度随降雨历时的增加呈线性增长。按芝加哥雨型进行降雨时程分配,根据峰值系数分为峰前和峰后两部分,则降雨强度过程可表示为

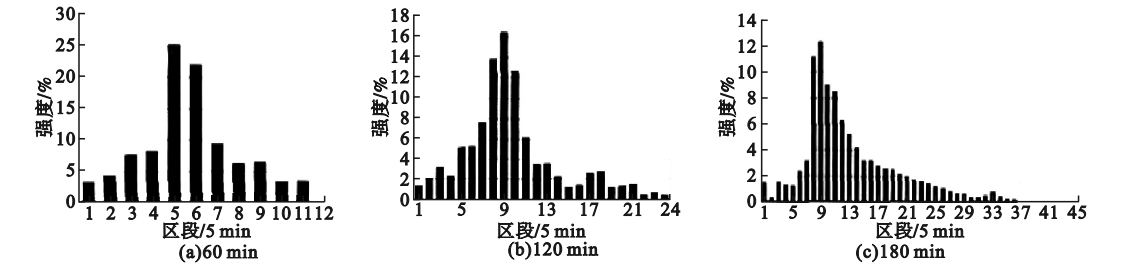


图 4 沈阳市常见雨型图

Fig.4 Common rain type map in Shenyang city

式(1)可有效反映近些年城市建成环境变化作用下水文循环过程中的降雨强度状况,对比各严寒气候区的特大型城市,沈阳市建成区属于雨峰更快、强度更大的雨型特征,年平均降雨量较高,这些特点与城市化进程较快有较强相关性,从降雨过程角度反映出

始至峰值出现的时段与降雨总历时的比值),取值在 0.35 ~ 0.45,根据沈阳市不同降雨历时下的雨型图,取 0.4^[20](见图 4)。

自然水文循环过程的极端化倾向。

2.2 地理与土壤

沈阳市建成区宏观地貌为冲洪积扇,沈阳第四系地层主要以砂土、圆砾为主,颗粒粒度在水平方向上从东部向西部逐渐变细、在竖向上呈上细下粗形态分布。浑河河道变迁

和多次冲洪积导致新地层覆盖并侵蚀沉积老地层。

图5为沈阳市建成区的DEM高程分析结果。地势由北东向南西、两侧向中部倾斜。最高处在大东区,海拔65 m;最低处在铁西区,海拔36 m。皇姑区、和平区和沈河区的地势略有起伏,高度在41~45 m。地下水埋深一般在6~9 m,随季节变化会有1~3 m的波动。

大型下凹的蓄水湖泊相对匮乏,沈阳市建成区中一二环内雨涝风险最大。原生土壤以水稻土为主,渗透性较差,天然的水文循环条件并不优越,加上在城市开发综合作用下,更容易受到极端气候影响,进而引发雨涝灾害。

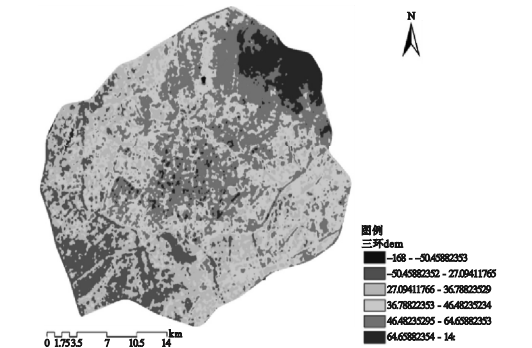


图5 沈阳市建成区DEM高程分析

Fig. 5 DEM elevation analysis of the main city of Shenyang

基于降水条件和下垫面组成的不同,根据入渗量将土壤分为四类(见表3)。利用Arc GIS工具提取研究区土壤分布数据,并采用SCS模型对水文土壤进行识别,按照表3的最小渗透率标准重分类编码,得到沈阳市建成区水文土壤分布图(见图6)。

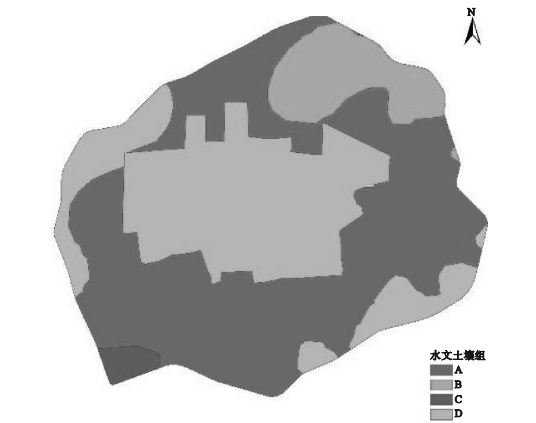


图6 沈阳市建成区水文土壤分布图

Fig. 6 Hydrological and soil distribution map in the built-up area of Shenyang city

2.3 城市绿地调查

2.3.1 绿地分布

通过野外调查实测与目视解译相结合的方式,得出沈阳市建成区城市绿地的空间分布概况,结果如图7所示。根据2020年沈阳市总体规划统计数据,建成区绿地面积共105.62 km²,区域绿地的面积为78.45 km²,公园绿地的面积为15.17 km²,防护绿地的面积为12.01 km²。

表3 沈阳市建成区水文土壤分类表

Table 3 Soil classification table of Shenyang city built-up area		
类别	土壤类型	最小渗透率/(mm·h ⁻¹)
A	厚层沙、黄土,团粒化沙粉土	7.26~11.43
B	薄层黄土、沙壤土	3.81~7.26
C	薄层沙壤土、黏壤土、有机质低或黏质高的土壤	1.27~3.81
D	塑性土壤、盐渍土壤、吸水后膨胀明显的水稻土壤	0~1.27

根据上述水文土壤及地理高程概况可得出,沈阳市原生地表高程相对平坦,坡度影响下径流汇流速度较慢,原生地形形成的天然

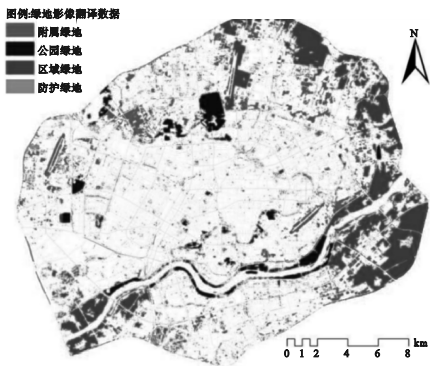


图7 沈阳市建成区绿地分布概况

Fig. 7 Greenland distribution in the main urban area of Shenyang

2.3.2 植物种类

利用遥感反演建立叶面积指数与植被指数回归方程,测算出主城区绿化覆盖率分布,结果如图8所示。依据《城市绿地分类标准(2018)》将城市绿地分为公园绿地G1、防护绿地G2、广场用地G3、附属绿地XG和区域绿地EG五大类,对建成区的210个各种类型绿地进行了信息调查分析,计有130多种树木,包括18种针叶树、63种阔叶乔木、50多种灌木。表4~表7为不同类型绿地上主要树种及生长特征统计情况。

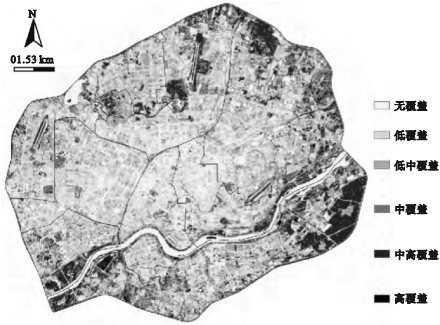


图8 沈阳市建成区叶面积指数分布

Fig.8 Leaf area index of the main urban area of Shenyang city

表4 公园绿地G1树木的生长特征

Table 4 Growth characteristics of G1 park green space

树种名称	株数	胸径/cm			高度/m			冠幅/m		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
樟子松	185	29.72	6.32	14.46	17.43	2.97	6.41	6.21	1.62	3.48
水曲柳	159	17.04	3.35	8.51	12.25	2.34	6.89	3.82	0.52	1.98
蒙古栎	114	55.82	6.33	12.54	16.38	2.23	8.43	9.93	1.30	3.28
黑皮油松	85	43.33	7.12	21.54	16.63	1.42	7.28	10.85	1.70	5.07
槭树	82	14.31	4.02	6.94	8.53	1.63	5.45	4.99	0.62	2.30
云杉	81	26.24	5.02	13.24	13.68	2.94	5.16	6.31	1.51	3.06
旱柳	77	95.44	7.32	28.26	23.51	3.33	11.49	13.26	1.34	5.93
榆树	62	54.33	4.21	17.23	19.87	2.11	8.41	16.29	1.25	4.80
白桦	60	30.29	4.18	13.44	26.63	3.37	11.87	6.73	1.47	3.38
落叶松	57	29.48	2.21	12.40	20.63	1.63	9.38	6.28	0.63	2.35

表5 区域绿地EG树木的生长特征

Table 5 Growth characteristics of EG regional green space

树种名称	株数	胸径/cm			高度/m			冠幅/m		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
山杨	222	59.22	5.33	16.83	19.55	4.03	9.93	13.69	2.35	5.54
旱柳	66	45.21	10.12	16.55	20.73	10.23	12.40	14.34	1.42	3.45
梓树	58	25.38	5.33	13.45	11.63	3.43	8.47	5.84	1.53	3.32
樟子松	49	14.44	5.41	7.94	5.39	1.48	3.53	3.35	0.86	1.97
白桦	39	10.35	2.25	6.38	6.45	3.17	4.76	5.51	0.42	2.59
东北杏	27	21.23	4.16	10.25	9.05	1.26	3.92	5.35	1.37	2.85
黑皮油松	19	11.36	3.39	5.94	6.45	2.37	4.86	3.79	1.24	2.34

表6 防护绿地G2树木的生长特征

Table 6 Growth characteristics of G2 protective green space

树种名称	株数	胸径/cm			高度/m			冠幅/m		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
旱柳	298	59.40	4.50	21.43	16.13	1.95	9.72	12.85	3.15	6.39
山杨	228	72.56	5.22	30.33	24.13	4.96	11.67	12.35	0.85	4.08
樟子松	153	36.78	7.22	12.83	9.98	2.80	5.31	5.35	1.75	3.45
榆树	128	13.92	4.43	6.07	5.43	2.70	4.73	6.17	1.77	3.54
糖槭	101	33.54	2.80	15.45	6.08	2.61	4.50	8.65	2.10	4.95
黑皮油松	105	55.01	8.22	20.71	19.08	4.06	7.78	12.02	2.43	5.66
杨树	99	51.32	6.27	15.92	23.53	2.78	7.27	11.97	1.12	2.73
云杉	79	19.07	4.30	10.65	7.52	1.52	4.08	4.59	1.20	2.54
蒙古栎	55	24.42	7.27	11.17	11.53	4.45	5.68	4.13	1.54	2.61
白桦	55	13.56	3.72	6.71	9.08	3.18	6.32	6.85	1.11	2.62

表 7 附属绿地 XG 树木的生长特征

Table 7 Growth characteristics of XG attached green space

树种名称	株数	胸径/cm			高度/m			冠幅/m		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
云杉	168	25.60	3.20	11.02	12.4	1.58	4.18	8.15	1.19	2.62
旱柳	122	72.52	6.30	19.75	16.82	3.06	9.42	12.33	1.23	4.61
白桦	99	18.05	3.21	7.43	11.13	1.65	5.93	5.39	0.82	2.46
落叶松	95	34.60	5.32	16.45	21.38	9.15	14.67	6.46	1.46	3.27
蒙古栎	92	35.02	4.32	14.70	16.84	3.98	7.55	9.58	1.06	3.63
榆树	75	46.67	4.22	13.63	17.23	1.39	6.39	8.58	1.55	3.77
黑皮油松	65	44.48	5.01	22.02	12.43	2.83	8.55	10.75	1.75	5.51
梓树	63	18.09	3.36	9.78	7.02	2.43	5.12	6.71	1.02	3.26
山杨	61	71.06	6.42	27.36	25.78	3.31	12.46	12.65	0.89	4.73
樟子松	60	43.22	5.13	13.16	11.23	2.86	5.69	8.43	1.33	3.53

2.3.3 入渗分析

使用双环刀法采取地表厚度 200 mm 土样测定不同植被结构绿地土壤的入渗率,计算样地土壤的饱和滞蓄量 Q 和 1 h 稳定下渗量 Q_{1h} ,以推导出单位面积土壤平均滞蓄量 Q_m ,结果如图 9、表 8 所示^[7]。

城市绿地土壤入渗速率受多种因素影响,如母质、结构、维护设施等。有研究显示,森林土壤稳定入渗速率高达 8.0 cm/h,而城市绿地土壤入渗平均速率约 2.46 cm/h。从表 9 可知,阔叶类乔木和针叶类乔木型绿均比灌木和草本能够有效地吸收和保持水分,表现出较高的水文特性^[15-16]。

乔木的树冠能够提供一定的阻尼效果,减缓雨水的冲击力,增加土壤的蓄水能力,灌木和草地植物的覆盖度和密度能够促进土壤的下渗,乔-灌-草(疏林)型绿地结合了乔木、灌木和草地植物的优点^[7,12]。

根据上述城市绿地的分类调查数据可得出,沈阳市建成区中一二环内,由于城市建设早期对于绿化重视度弱的历史问题,造成绿化覆盖率及绿地的植被结构类型不足,因此在水文循环过程中,对于径流下渗的蓄滞能力较差。新建设的三环区域植被分布类型相对丰富,叶面积指数及植被结构均大幅度提高。因此在建成区中要划分出新老城区差异,城市建设越早的区域,绿地在水文循环过程中起到的降雨蓄滞能力越差,雨涝灾害问题越严重。

3 自然水文循环过程计算

根据统计分析得到的沈阳市气候、降雨、地理、土壤、水文、绿地等基础数据,分别建立数学公式,从地表径流、地下水补给及蒸发蒸

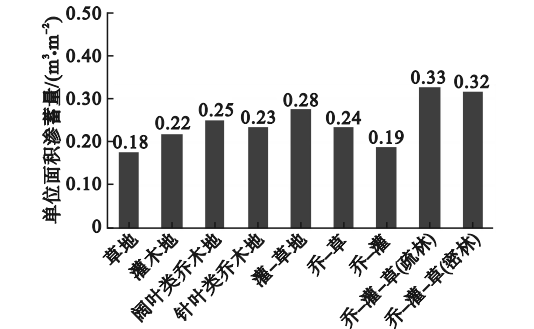


图 9 不同植被结构的单位渗蓄量对比示意图
Fig. 9 Schematic comparison of unit infiltration storage of different vegetation structures

表 8 不同植被结构类型绿地的蓄水量与下渗量统计表
Table 8 Statistical table of water storage and infiltration of green space with different vegetation structures

序号	植被类型	Q	Q_{1h}	Q_m
1	草	4 382.03	1 776.82	0.18
2	灌木	1 134.40	575.63	0.22
3	阔叶类乔木	2 404.22	1 629.84	0.25
4	针叶类乔木	717.12	391.91	0.23
5	灌-草	805.93	569.03	0.28
6	乔-草	17 867.03	9 617.62	0.24
7	乔-灌	2 524.93	1 172.23	0.19
8	乔-灌-草(疏林)	5 873.32	4 218.14	0.33
9	乔-灌-草(密林)	4 244.52	3 213.20	0.32

腾三个方面解析自然水文循环的量化过程^[9-15]。

3.1 地表径流

地表径流计算公式^[12]:

$$Q_s = P - (I_a + C(P - I_a)). \quad (2)$$

式中: Q_s 为地表径流量, mm; P 为降水量, mm; I_a 为初始抽蓄量, mm; C 为径流系数, 根据沈阳市土壤类型和绿地植被覆盖及地形地貌的特点, 径流系数较高, 取 0.4^[11]。

沈阳市建成区在 7、8 月份最容易产生内涝, 假设降水量为 100 mm, 根据现有水文数据推算出初始抽蓄量约为 20 mm^[13-14], 由式(2)可以计算出地表径流量 $Q_s = 48$ mm。与未经过城市开发的自然状态相比, 沈阳市建成区的地表径流量较大, 这也是沈阳市容易发生城市内涝的一个重要原因。城市化进程中, 大量的硬化地表削弱了土壤的渗透能力, 增加了地表径流。可通过调整城市绿地的植被覆盖来改善土壤的吸水能力, 有效减少地表径流^[11,16]。

3.2 地下水补给

地下水补给公式^[18]:

$$Q_g = (P - I_a) \times (1 - \exp(-KA(P - I_a))). \quad (3)$$

式中: Q_g 为地下水补给量, mm; P 为降水量, mm; I_a 为初始抽蓄量, mm; K 为地下水补给系数, 由于沈阳市地表覆盖的综合 CN 值等影响, 因此将地下水补给系数设定为 0.35^[6,14]; A 为流域面积, km²。

该水文方程描述了沈阳市建成区地下水补给的形成过程, 依此可以计算出沈阳市建成区在 7、8 月份的地下水补给量, 假设降水量为 100 mm, 初始抽蓄量为 20 mm, 流域面积设定为 100 km², 将参数代入式(3)计算出地下水补给量 Q_g 约为 80 mm^[14,18]。可以看出, 沈阳市建成区地下水补给资源较丰富, 相对高于北京等其他特大型城市, 不属于水资源紧缺型城市。但相比未经过城市开发的自然状态, 建成区的地下水补给通常会受到过

度抽取地下水、排水系统的建设等人为因素的影响, 地下水补给量会降低^[4,11]。

3.3 蒸发蒸腾

Penman-Monteith 蒸发蒸腾方程^[17]:

$$ET_0 = (0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900/(T + 273))u_2(e_s - e_a))/(\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)). \quad (4)$$

式中: Δ 为斯特凡-玻尔兹曼常数, 0.27 ~ 0.32; γ 为心理常数, 0.065 ~ 0.067; R_n 为净辐射, W/m²; G 为土壤热通量, W/m; T 为温度, °C; u_2 为风速, m/s; e_s 为饱和水汽压, e_a 为实际水汽压, hPa, 均根据当时当地气候条件和观测数据确定^[12]。

沈阳市建成区在 7—8 月份的净辐射平均约为 200 W/m², 土壤热通量约为 50 W/m², 平均温度约为 30 °C, 平均风速为 2 m/s, 平均饱和水汽压为 20 hPa, 实际水汽压为 10 hPa, 根据式(4)可以计算蒸发蒸腾量 ET_0 约为 45.6 mm^[14-15]。这说明沈阳市的蒸发蒸腾受净辐射、土壤热通量、温度、风速、饱和水汽压和实际水汽压等因素的影响较大。

4 结 论

(1) 城市化进程对沈阳市建成区水文循环过程有显著影响, 城市建设导致降水量不断加大, 峰值提高, 土壤渗透性显著降低的同时植被的滞蓄作用严重不足; 提出通过优化设计手段提高城市绿地入渗量和蓄水量, 改善城市建成环境的自然水文循环。

(2) 由于建成环境中硬质地表面积增加, 导致径流系数显著提高, 增加城市内涝的风险; 建筑增加和道路铺设等城市开发活动使得土壤的透水性下降, 改变了地下水补给状况, 显著影响了地下水的补给量; 建筑物和道路等硬质表面的热容量低、反射率高, 建成区的蒸发蒸腾量受这些人为因素的影响, 相对比未经开发的自然状态的蒸发蒸腾量高; 沈阳市整体水气循环量较大, 这些变化造成

地表-地下-大气对应的各个阶段均呈现出极端效应,受饱和水汽压及热通量等气候因素影响较大,导致沈阳市建成区的水文循环系统不畅,径流系数整体偏高,易引发雨涝灾害的产生。由于地理气候及水汽循环特征影响,与历史统计数据对比,沈阳城市建成区环境均显示出负效应。

(3)基于植被可减缓径流峰值、增加入渗量,增加地下水补给量,减少蒸发蒸腾等特点,应用绿地自然滞蓄消纳能力有效缓解下垫面循环功能障碍,通过科学配置植物群落,修补弥合城市自然水文循环过程,促进城市永续发展的实现。

参考文献

[1] GRACAA M, ALVES P, GONCALVES J, et al. Assessing how green space types affect ecosystem services delivery in Porto [J]. Portugal. landscape and urban planning, 2018, 170: 195 – 208.

[2] SOPHOCLEOUS M. Interactions between groundwater and surface water; the state of the science [J]. Hydrogeology journal, 2002, 10(1): 52 – 67.

[3] ESPADAFOR M, ORGAZ F, TESTI L, et al. Responses of transpiration and transpiration efficiency of almond trees to moderate water deficits [J]. Scientia horticulturae, 2017, 225: 6 – 14.

[4] 张成凤, 杨晓甜, 刘酌希, 等. 气候变化和土地利用变化对水文过程影响研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 46 – 50.

(ZHANG Chengfeng, YANG Xiaotian, LIU Zhuoxi, et al. Research on the influence of climate change and land use change on hydrological process [J]. Journal of north China university of water resources and electric power(natural science edition), 2019, 40(4): 46 – 50.)

[5] 花圣卓, 蔡昕, 余新晓. 平坦下垫面植被蒸散特征及对气象因素的响应研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 344 – 350.

(HUA Shengzhuo, CAI Xin, YU Xinxiao. Study on the evapotranspiration features of vegetation over flat underlying surface and response to meteorological factors [J]. Journal of soil and water conservation,

2016, 30(3): 344 – 350.)

[6] 张铁钢, 李占斌, 李鹏, 等. 土石山区不同植物土壤水分利用方式对降雨的响应特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1461 – 1467.

(ZHANG Tiegang, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Response characteristics of soil water use patterns by different plants to precipitation in rocky mountainous areas [J]. Journal of applied ecology, 2016, 27(5): 1461 – 1467.)

[7] 石铁矛, 于畅. 北方校园绿地滞蓄雨水能力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 697 – 704.

(SHI Tiemao, YU Chang. Analysis of rainwater detention ability of green space in northern campus [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36 (4): 697 – 704.)

[8] 孙媛, 董晓华, 郭梁锋, 等. 不同降雨条件下土壤水运动及再分布模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(增刊2): 74 – 80.

(SUN Yuan, DONG Xiaohua, GUO Liangfeng, et al. Simulation of soil water movement and redistribution under varying rainfall intensity conditions [J]. Journal of irrigation and drainage, 2018, 37(S2): 74 – 80.)

[9] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

(RUI Xiaofang. Principles of hydrology [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004.)

[10] 王蕊, 王中根, 夏军. 地表水和地下水耦合模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 37 – 41.

(WANG Rui, WANG Zhonggen, XIA Jun. Advances in the integrated surface water and groundwater model [J]. Progress in geography, 2008, 27(4): 37 – 41.)

[11] 贾仰文, 王浩, 仇亚琴, 等. 基于流域水循环模型的广义水资源评价[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 1051 – 1055.

(JIA Yangwen, WANG Hao, QIU Yaqin, et al. The generalized water resources evaluation based on the watershed water cycle model [J]. Journal of water resources, 2006, 37(6): 1051 – 1055.)

[12] 康绍忠, 刘小明, 熊运章. 土壤-植被-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1994.

(KANG Shaozhong, LIU Xiaoming, XIONG

- Yunzhang. Soil-vegetation-atmospheric continuum water transport theory and its application. [M]. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 1994.)
- [13] 王中根, 朱新军, 李尉, 等. 海河流域地表水与地下水耦合模拟[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1345 - 1353.
(WANG Zhonggen, ZHU Xinjun, LI Wei, et al. A coupled surface-water/groundwater model for Haihe river basin [J]. Progress in geography, 2011, 30(11): 1345 - 1353.)
- [14] 戚晓明, 杜培军, 周玉良, 等. 基于遥感和 GIS 的城市景观格局演变与水文效应关系研究[J]. 国土资源遥感, 2010(4): 103 - 107.
(QI Xiaoming, DU Peijun, ZHOU Yuliang, et al. Study on the relationship between the evolution of urban landscape pattern and hydrological effects based on remote sensing and GIS [J]. Land and resources, 2010(4): 103 - 107.)
- [15] JIAO S, ZHANG X L, XU Y. A review of Chinese land suitability assessment from the rainfall-waterlogging perspective: evidence from the Su Yu Yuan area. [J] Journal of cleaner production, 2017, 144: 100 - 106.
- [16] SHI T M, TANG Y, MA F S. Eco-environmental effects of industrial cities based on remote sensing images: a case study of Shenyang, China [J]. IOP Conference series: earth and environmental science, 2021, 719: 1 - 11.
- [17] 夏军, 左其亭, 王根绪, 等. 地球科学学科前沿丛书: 生态水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
(XIA Jun, ZUO Qiting, WANG Genxu, et al. Frontiers in earth science: eco-hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2020.)
- [18] 张杰, 史培军, 杨静, 等. 北京地区景观城市化进程对暴雨过程的影响: 以“7·21”暴雨为例[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 113 - 125.
(ZHANG Jie, SHI Peijun, YANG Jing, et al. The impact of the urbanization process on rainfall in Beijing: a case study of 7. 21 rainstorm [J]. Journal of geography, 2020, 75(1): 113 - 125.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
(Ministry Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for outdoor drainage: GB 50014—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.)
- [20] 高世斌, 曹静, 赵源媛. 沈阳市地下水的动态规律和地下水资源量的分析[J]. 东北水利水电, 2005(2): 29 - 30.
(GAO Shibin, CAO Jing, ZHAO Yuanyuan. Analysis of the dynamic law of groundwater and underground water resources in Shenyang city [J]. Northeast water conservancy and hydropower station, 2005(2): 29 - 30.)
- [21] 都基众, 赵杰, 邢树文. 沈阳市城区地下水位的变化与控制[J]. 地质与资源, 2004(9): 907 - 910.
(DU Jizhong, ZHAO Jie, XING Shuwen. Ground watertable changing and control in Shenyang city [J]. Geology and resources, 2004(9): 907 - 910.)
- [22] 尤祥瑜, 赵剑, 唐辉. 沈阳市水资源承载力研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(1): 48 - 51.
(YOU Xiangyu, ZHAO Jian, TANG Hui. Sustainable carrying capacity of water resources in Shenyang [J]. Journal of Shenyang agricultural university, 2004, 35(1): 48 - 51.)
- [23] 王玉成, 耿延博, 王婷, 等. 不同降雨条件下土壤水运动及再分布模拟研究[J]. 东北水利水电, 2008(6): 16 - 17.
(WANG Yucheng, GENG Yanbo, WANG Ting, et al. Simulation study of soil water movement and redistribution under different rainfall conditions [J]. Northeast water conservancy and hydropower station, 2008(6): 16 - 17.)
- [24] 沈阳市水利局. 沈阳市水资源评价[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2007.
(Shenyang Municipal Water Conservancy Bureau. Evaluation of water resources in Shenyang city [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2007.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)