

石铁矛, 王曦, 曹晓妍, 初亚奇. 用地开发强度对城市绿地渗蓄效能的影响机制测评 [J]. 风景园林, 2021, 28 (7) : 17-23.

用地开发强度对城市绿地渗蓄效能的影响机制测评

The Impact Mechanism Evaluation of Land Use Development Intensity on Urban Green Space Hydrological Storage Efficiency

石铁矛 王曦 曹晓妍 初亚奇

SHI Tiemao, WANG Xi, CAO Xiaoyan, CHU Yaqi

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU986

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2021)07-0017-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2021.07.0017.07

收稿日期: 2021-01-30

修回日期: 2021-05-19

石铁矛 / 男 / 博士 / 沈阳建筑大学空间规划与设计研究院院长, 建筑与规划学院教授、博士生导师 / 研究方向为生态规划与设计
SHI Tiemao, Ph.D., is the dean of Space Planning and Design Research Institute in Shenyang Jianzhu University, professor and doctoral supervisor in the School of Architecture and Urban Planning. His research focuses on ecological planning and design.

王曦 / 女 / 沈阳建筑大学建筑与规划学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林生态规划
WANG Xi is a Ph.D. candidate in the School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University. Her research focuses on ecological planning of landscape architecture.

曹晓妍 / 女 / 沈阳建筑大学建筑与规划学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林生态规划
CAO Xiaoyan is a Ph.D. candidate in the School of Landscape Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University. Her research focuses on ecological planning of landscape architecture.

初亚奇 / 女 / 博士 / 沈阳大学建筑工程学院讲师 / 研究方向为健康城市规划
CHU Yaqi, Ph.D., is a lecturer in the School of Architectural Engineering, Shenyang University. Her research focuses on healthy city planning.

摘要: 城市的高强度开发建设如何影响城市绿地的渗蓄效能值得研究, 可解决现有研究由于原型观测量不足造成的参数误差, 实现城市雨洪韧性管理的科学预测和精准调控。以沈阳市三环内主城区为研究范围, 将土壤容重作为因变量, 选取不同自变量例如绿地类型、容积率、建设密度、建筑高度、用地开发年限、地形高程、绿化覆盖率、下垫面硬化比例等用地开发强度的相关因子, 进行多元线性回归分析, 总结用地开发强度对城市绿地渗蓄效能的影响机制。结果表明, 在城市开发建设过程中, 相关工程做法等人工干预因素对城市绿地的渗蓄效能产生显著负向影响。拓展了交叉学科理论成果的创新性应用领域, 提出有效提高城市绿地渗蓄效能的关键方法, 为韧性城市的更新改造建设提供理论依据。

关键词: 用地开发强度; 城市绿地; 渗蓄效能; 影响机制; 综合测评

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 51878418, 52008267)

Abstract: How the high-intensity urban development and construction affect the hydrological storage efficiency of urban green space is worth studying. It can solve the parameter errors caused by insufficient prototype observations in existing studies, and realize the scientific prediction and precise regulation of urban stormwater resilience management. Taking the third ring road of Shenyang as the research scope, selecting soil bulk density as the dependent variable, and different independent variables such as green space type, floor area ratio, construction density, building height, land development years, terrain elevation, green coverage, and underlay hardening ratio, the related factors of land development intensity were analyzed by multiple linear regression analysis, and the influence mechanism of land use development intensity on the Hydrological Storage Efficiency of urban green space was studied and summarized. It reveals the significant negative impact of relevant engineering practices and other human disturbance factors on the hydrological storage efficiency of urban green space in the process of urban development and construction, and expands the innovative application fields of interdisciplinary theoretical results. The key method of applying design methods to effectively improve the efficiency of urban green space infiltration and storage is put forward to provide a theoretical basis for the renewal and reconstruction of resilient cities.

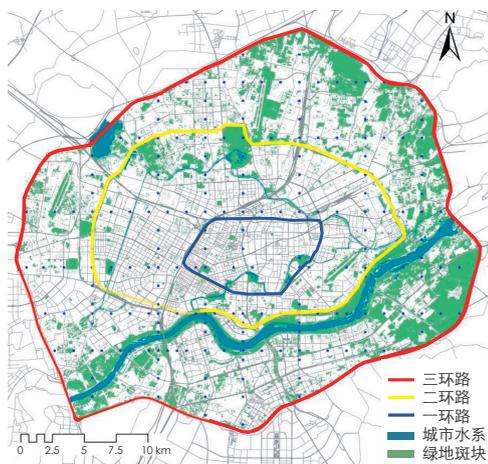
Keywords: intensity of land use development; urban green space; hydrological storage efficiency; impact mechanism; comprehensive evaluation

Fund Items: The National Natural Science Fund of China (No. 51878418, 52008267)

1 背景与目的

城市的高强度开发建设改变了下垫面状况, 产生了大量的城市生态问题。城市公园绿地系统是海绵城市建设目标实现的重要载体, 是建立健康、韧性的城市水系统的必要环节^[1-2]。笔

者将城市绿地能够渗蓄雨水、减缓城市雨水径流的能力称之为绿地的渗蓄效能。通过样地实测加模拟分析的手段, 测评城市用地开发强度对城市绿地渗蓄效能的影响机制, 以此推导出缓解雨涝冲击的关键方法, 为高度城市化背景



1 沈阳市三环城区蓝绿斑块样地选址分布图
The distribution map of the site selection of the blue-green patches in Shenyang

下实现城市韧性水安全的目标提供依据。

1.1 城市绿地渗蓄效能研究进展

降雨径流通常包括地表径流、壤中流和地下径流。土壤入渗率的主要影响因子有土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、水稳性团聚体含量、土壤有机碳和土壤饱和持水量。土壤水分具有明显的空间结构和很好的空间连续性^[3-4]。降雨可以通过改变土壤质地影响土壤含水量波动，植被可以通过改变土壤孔隙度来影响土壤水分，以至于影响整体的水分输入过程。雨水的入渗量与降雨量、降雨强度和土壤的理化性质、地面高程、坡度等有关^[5-6]。雨水经过地上层和地表层后到达土壤层，表土层厚度可达 25 cm，最易受人类活动影响，通常为原生土与搬运客土的混合，对绿地渗蓄效能影响最大；亚表层厚度约 30~100 cm；母质层深度在地表 1m 以下，受地表气候的影响很少，对城市绿地海绵效应的影响最小^[1-2]。不同季节中，土壤深度的变化以及土壤剖面中存储的土壤含水量和蒸腾速率存在差异，可用土壤容重反映^[4,7]。当降雨强度大、历时短、量级小，且前期绿地土壤干燥总孔隙度大，即土壤容重较小时，城市绿地能起到显著的削峰、减洪和拦沙的作用；当暴雨量级大、历时长，前期土壤已蓄满或压实情况严重，即土壤容重较大的情况下，城市绿地不但可能起不到削减径

流的作用，还可能会由于流失地表土壤等造成径流增加，进一步加大城市雨洪管理的难度^[4,8-9]。因此土壤容重作为城市绿地渗蓄效能的显著关联数据，对量化对比不同区域的渗蓄容量差异具有十分重要的价值^[4,7]。

现有的土壤水文渗蓄效能的相关研究主要着眼于自然森林生态系统，更多应用于水土保持等领域，很多成果是从土壤与植被等单一方面展开而得到的，综合水文循环系统的城市绿地整体水文渗蓄效能研究相对较少，基于量化评估的影响机制研究相对薄弱，原型观测量不足。在综合借鉴前期相关理论及数据的基础上，城市绿地的海绵韧性系统构建尚需要更加系统化、科学化的深入研究，为实现城市雨洪韧性管理的科学预测和精准调控，有进一步展开针对性研究的必要性。

1.2 城市开发强度对绿地渗蓄效能影响研究进展

城市化与土地利用和覆盖变化密切相关 (Land-Use and Land-Cover Change, LUCC)，不透水表面的增加会显著改变自然水文过程，使地表对雨水的滞蓄能力减弱，糙率系数降低，相同的降雨量级和强度，产流多、汇流快，使得地表径流过程中洪峰流量严重升高，雨水过程呈现出暴涨趋势^[5,10]。近年来海绵城市建设偏向于低影响开发 (Low Impact Development, LID)^①措施的研究与应用，通过使用 SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number)^②等模拟降雨地表径流过程从而有效控制城市洪涝灾害已成为目前雨洪管理的重要手段^[11]，但对于因城市开发强度而对水文循环产生影响的具体机制的研究则更多处于模拟层面和定性研究层面，模拟预测模型的针对性有待提升，其在定量评估绿地滞蓄效能发挥程度时存在偏差。

中国现状城市建设过程中，原表层土壤被移走，土壤中会经常混入砾石、煤渣、建筑垃圾或其他人工制造物，土壤结构层次混乱，导致土壤形成了一些大孔隙且非常容易形成优先流，从而影响土壤入渗速率^[9,10]。同时，城市绿地土壤易受过往车辆等的机械压实与人为踩踏，土壤变得紧实，存在严重的压实退化现象，土壤容重增加，孔隙度减小，

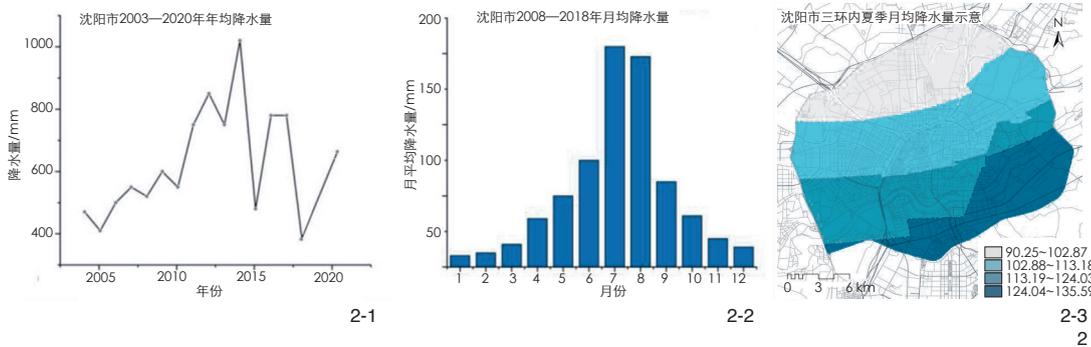
这在一定程度上减少了城市绿地土壤的入渗量和持水量，从而改变了城市下垫面的水文过程^[1]。不同城市化梯度的附属林和道路林土壤入渗速率没有显著差异，但是不同城乡梯度的景观林土壤入渗速率差异显著^[5,9]。降雨-径流的空间格局随土地利用类型、土壤类型、前期土壤湿润程度而发生变化，CN 值的高值区主要集中在城市用地和水体；低值区主要出现在林地、灌草地、果园等植被覆盖较好、地势起伏较大的地区^[11-13]。

2 数据和方法

2.1 研究区域和数据来源

研究区为沈阳市三环内的主城区，研究区域的总面积约为 452.80 km²，绿地总面积约为 101.50 km²，绿化率约为 22.4%。一环核心区城市开发强度最高，过渡至三环内才有较大斑块的绿地。沈阳市三环内现状水面面积率为 2.58%。通过 ArcGIS 平台将各类景观指数使用网格法进行分区统计，同时也考虑到不同城市用地开发强度的相关影响因子数据，为符合统计分析中德斌沃森系数的正态分布，保证样本的一致性、再现性、稳定性和可靠性，根据不同的水系分布和绿地斑块的特征，以及实测过程中该用地权属管理导致的采土难易情况，筛选出沈阳市三环内横纵均匀呈方格网排布的 210 块样地 (图 1)，根据 2017 版《城市绿地分类标准》，样地选取位置包含了沈阳市主要的公园绿地、防护绿地、广场用地、附属绿地及区域绿地等不同属性绿地，深入调研实测了均衡分布的格网状样地内不同的自变量因子。

沈阳市 2000—2017 年自然降雨量平均值为 673.85 mm (包括降雨和降雪)。根据现有的沈阳市 2003—2020 年年均降雨量统计数据 (图 2)，对沈阳市多年来各月平均降雨量的情况进行计算。沈阳市年内降雨量与年际变化相对较大，降雨季节分配不均。历年来，沈阳市 6—9 月降雨量约为全年总降雨量的 60%~90%，汛期降雨量较多，极易引发雨涝灾害。采用沈阳市共 18 个气象站在 2008—2018 年的夏季月均降雨统计局公布数据作为基础，利用 ArcGIS 平台对研究区域内的降雨



2 沈阳市及周边地区降水情况
Statistical map of precipitation in Shenyang and surrounding areas

强度进行插值估算，再将逐年数据进行叠加得到沈阳市主城区夏季平均降雨强度的空间分布情况，降雨呈现出“南多北少”的空间分布。

2.2 研究方法

城市用地开发强度，是指建设用地总量占行政区域面积的比例，包括容积率、建筑密度、建筑高度、绿地率等主要指标，其根本是对开发容量的控制。可持续的城市用地开发在此基础上还需要综合考虑不同区位的交通基础设施、环境条件、开发年限等多重因素的影响。考虑到在前期研究基础中对于土壤渗蓄效能的关键作用机制，将用地开发强度的环境条件影响因素，针对性地着眼于实验样地范围内的水体比例、地形高程范围、下垫面硬化比例、建筑地下结构形式等^[14-15]。

土壤容重是田间自然垒结状态下单位容积土体（包括土粒和孔隙）重量与同容积水重的比值^[16]。土壤饱和蓄水量所体现的渗蓄极值与土壤容重呈极显著负相关：相同单位体积的土层内，土壤越疏松多孔即总孔隙度越大，则土壤容重越小，该区域渗蓄效能越大，水文韧性越强^[17-18]；与此相反，土壤物理质地越紧实，总孔隙度越小，则土壤容重越大，渗蓄容量越小，水文韧性越受限。为分析宏观数据，本研究只关注土壤容重所体现出的雨洪韧性应对方面的土壤最大渗蓄极值，不考虑降雨过程中雨强、风速、降雨时长等不同外部因素对入渗的微观曲线影响机制。

运用多影响因子分析方法对上述 210 块样地进行全面的统计，取土时间为 2020 年 5 月 15—16 日，为避免不同时间段对土壤理化性质的影响，团队分 6 组按照规划路线同时取

样，并尽可能将采土时间的温度、湿度保持接近一致。详细实测调查容积率、开发年限、建筑高度、建筑密度、绿化覆盖率、水体比例、地形高程、硬化比例、地下结构等不同影响因子，后在实验过程中发现了新的显著影响因素，增加了场地上是否有建筑垃圾这一重点因素的调研记录。

具体数据获取方法有：1）利用统计学方法设置哑变量的方法：设定有建筑垃圾为 1，无建筑垃圾为 0；详细调查周边建筑物的建设年代，确定场地的开发年限，将 2000 年为界限，用地开发年限 < 20 年记为 0，而 > 20 年记为 20；调研资料结合实际观测经验，确定样地内建筑物结构形式，框架结构记为 0，非框架结构记为 1。对上述不同类别进行分类分析，对照两类变量下的土壤容重数据分布状况。

2）在实验规划中提前规定好样地遥感影像范围，翔实记录 30 m²、50 m²、100 m² 范围内的周边环境，配合现场记录的实时卫星经纬度，保证实验数据地理位置的可靠性。通过 GPS 手持高精度坡地测量仪，检测采取土样周边的高程，多次测量取平均数记录，降低随机误差的影响。将卫星图中的绿化覆盖率结合现场实测环境进行验证，避免卫星数据时效对样本环境数据产生误差影响。

3）在研究区实地采样计算土壤容重后确定土壤渗蓄能力。测定方法是在每块绿地样地采 3 个土盒，设定取样深度为 20 cm，采取环刀法进行取样，应用烘干称重法测定土壤含水率，称取土样的重量记作湿重 M ，在 105 °C 的烘箱内将土样烘 6~8 h 至恒重，然后测定烘干土样干重 M_s ，将相同地块的 3 组数据得出的土壤容重取平均值，尽量降低样本实测中的

各种偶然因素对数据精度的影响，按照如下公式计算土壤容重等相关数据。

$$\rho_b = \frac{Ms}{V}, \quad (1)$$

$$P_1 = \left(1 - \frac{\rho_b}{d}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中： ρ_b 为土壤容重 (g/cm³)， M_s 为土壤干重 (g)， V 为土壤体积 (cm³)， P_1 为土壤总孔隙度 (%)， d 为土壤比重 (g/cm³)^[18]。

$$W_0 = P_1 \cdot h. \quad (3)$$

式中： W_0 为土壤饱和蓄水量 (mm)； P_1 为土壤总孔隙度 (%)； h 为土壤蓄水层高度 (mm)^[18-19]。

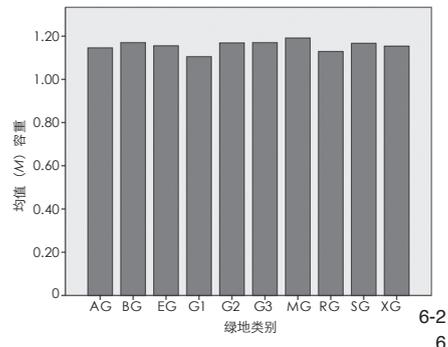
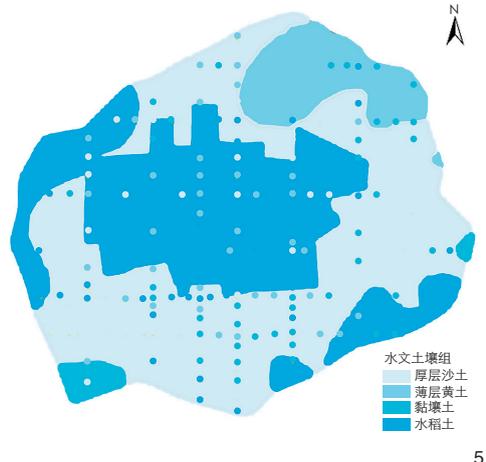
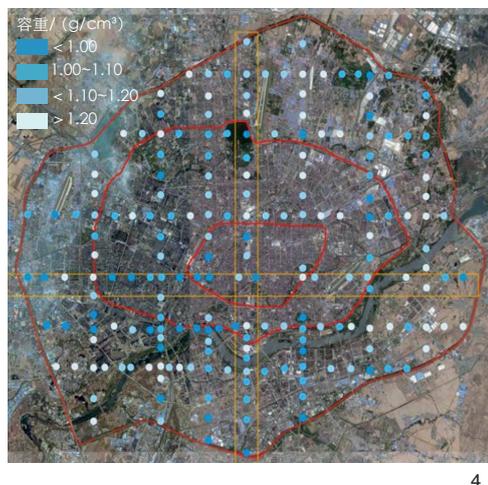
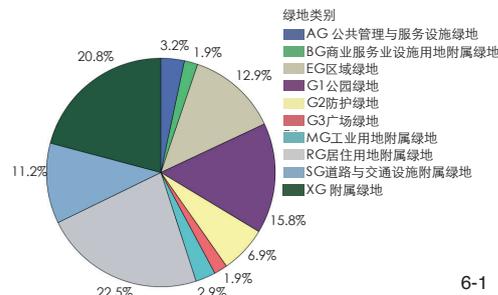
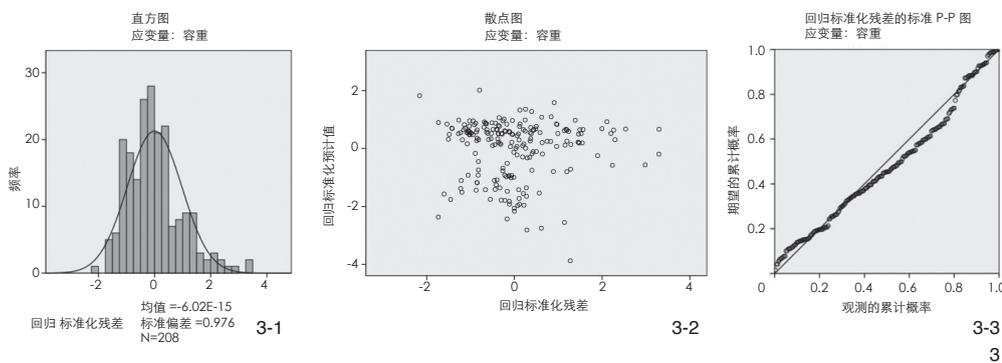
3 结果与分析

3.1 SPSS 样本可靠性验证

将 210 项实验数据代入 SPSS 软件中进行模型运算汇总后，以容重为因变量，用地开发强度的相关影响因子为自变量的 R^2 值达到了 0.365，体现了很强的相关性，德斌沃森系数偏低[®]，推测原因是在城市建设中的建筑垃圾就地回填、平整场地等素土夯实工程做法较为常见，在挖土盒过程中实际验证有大约 60% 的样地含有砖块、水泥块、苯板碎料、石膏、碎石等不同种类的建筑垃圾，人工建造的绿地土壤压实情况较高的同时，植被种类单一，生境状况差，推测上述各类因素可能影响了样本的共线性等验证分析，但整体还在合理范围（图 3），在 SPSS 样本可靠性验证中，样本有效率为 98.6%。

3.2 城市绿地滞蓄效能的宏观空间分布

将全部 210 个样地土盒容重的实验结果标注在研究区卫星图上，根据实测数据分布情况，将样本分为 4 个区间等级：<1.00 g/cm³、



3 SPSS 多元回归分析样本数据标准化残差分布
Schematic diagram of standardized residual distribution of sample data in SPSS multiple regression analysis

4 渗蓄实验样地土盒容重量级分布图
Distribution map of bulk density of soil box in infiltration experiment plot

5 土壤宏观数据与实测数据的叠合验证示意图
Schematic diagram of superimposition verification of soil macro data and measured data
6 不同绿地类型频率分布图 (6-1), 实测容重均值对比 (6-2)
Frequency distribution map (6-1) and comparison of the mean value of measured bulk density of different green space types (6-2)

1.00~1.10 g/cm³、1.10~1.20 g/cm³、>1.20 g/cm³，随着数字增大，渗蓄效能逐渐降低，在图中采用蓝色由深至浅的方式直观表达宏观对比效果。西部的于洪区渗蓄效能高于东部的大东区等，南部的浑南区明显高于北部的沈北区，土地开发建设的时间越久，渗蓄效能有明显降低的趋势 (图 4)。

根据 1 : 100 万中国土壤数据，利用 Arc GIS 矢量裁剪工具进行识别、重分类和重编码，基于 SCS 模型水文土壤分组标准，提取出沈阳市三环内土壤分布图。将此数据与实测的颗粒构成与土壤容重显示出的水文土壤属性进行叠合验证 (图 5)，根据统计数据显示宏观土壤分布类型有 4 种，主要包括厚层沙土、薄层黄土、黏壤土、水稻土，将其与实际微观地点检测的土壤类型对比，发现偏差较大，土壤分布重合率仅约 34.5%。分析原因，推测是中国近 30 年来由于快速城市化进程，在建设过程中引入了大量客土，由于城市建设

模式中需要夯实基础和进行土方工程改造等，导致现状城市环境中的土壤物理性质产生了较大改变，很难达到无人工干预的条件下原生土壤所能达到的模拟渗蓄效能。这一实地验证结果，对于以后的渗蓄容量估测有参考价值，能避免不符合实际条件的模拟造成的巨大设计误差。

选取 210 块样地中覆盖城市开发强度数据最全面，三环内最长的横纵轴线作为例证样本，整理调研的详细数据 (表 1)，反映城市开发强度的不同相关因子的变化情况。通过 SPSS 软件得出以土壤容重为因变量的多元线性回归分析模型，直观对比不同变量因子对于土壤渗蓄效能的影响机制。

3.3 城市绿地类型对滞蓄效能的影响分析

经过 SPSS 相关性度量计算，绿地类型与样地土壤容重的 ETA² 达到了 0.139，呈现出较为明显的相关性，同时通过对比组间数据 (显著性为 0.03, < 0.05)，证明绿地类型是绿

地渗蓄能力的显著影响因子。在 210 块样地中对不同类型绿地的占比进行统计 (图 6-1)，最多的是 RG、MG、G1、XG 等绿地类型，通过均值测算，参考土壤容重与最大渗蓄容量呈显著负相关，则不同绿地斑块类型中土壤渗蓄能力的排序为：G1 > RG > AG > XG > EG > SG > BG > G2 > G3 > MG (图 6-2)。现有研究成果表明，结构性好的土壤容重小：丰富的植被及各类真菌微生物等可有效提高有机质含量，适度耕作可以提高黏重土壤的疏松度和通气度，均可降低土壤容重^[18-19]。本次实验的测算结果表明，排名靠前的为乔灌草种类丰富、保持了原生地貌且人工干预较少的绿地类型，而排名靠后的绿地则植被、微生物物种相对单一，人工干预较多，在养护过程中对土壤的耕作翻动少，实验结果基本与现有综述基本相符，可互为佐证。210 块样地的容重均值为 1.14g/cm³，以大颗粒的沙土为主，黏性土等分布较少，土壤孔隙度和通

表 1 横纵轴样地实测信息记录表

Tab. 1 Measured information record table of the sample plot on the horizontal and vertical axis

样地 标号	容重/ (g/cm ³)	样地 类别	绿化覆 盖率/%	水体 比例/ %	硬化 比例/ %	建筑 密度/ %	建筑高 度/m	开发年限 (> 20 记 20, < 20 记 0)	地下结构 (框架记 0, 非框架记 1)	容积 率	建筑垃圾 (有 建筑垃圾记为 1, 无记为 0)
YC27	0.96	WG	30	0	20	20	20	0	1	1.0	0
YC28	0.94	MG	30	0	10	5	5	0	1	0.7	0
YC29	1.25	RG	47	0	50	30	30	20	1	1.9	1
YC30	1.22	SG	50	0	50	0	0	20	1	1.7	1
YC31	0.89	G1	90	0	0	0	0	0	0	0	0
YC32	0.88	AG	55	0	45	35	20	0	1	0.3	0
YC33	1.04	RG	30	0	70	55	30	20	1	2.1	0
YC34	1.06	SG	25	0	85	55	30	20	1	2.8	1
YC35	0.91	SG	35	0	70	35	10	0	1	1.6	0
YC37	0.91	SG	35	0	60	0	0	0	1	0.2	0
CX39	0.99	G1	60	0	40	5	0	20	1	0	0
CX40	1.04	XG	65	0	35	0	0	0	0	0.2	0
CX41	1.24	XG	35	0	60	0	0	20	0	0.3	1
CX42	1.26	XG	35	0	65	15	10	20	0	3.1	1
WD1	1.19	RG	65	0	30	0	0	20	1	1.6	1
WD2	1.17	EG	80	0	20	15	5	20	1	1.5	1
WD4	1.15	EG	90	0	10	8	8	0	0	1.2	1
WD14	1.21	EG	0	0	10	10	5	20	1	1.2	1
WD13	1.25	RG	15	0	85	0	0	20	0	1.0	1
WD12	1.1	RG	60	0	40	15	10	0	1	0.6	1
WD11	1.03	EG	0	15	0	0	0	0	0	0	1
CX2	1.10	MG	65	0	15	0	5	0	0	0.7	1
CX6	1.18	RG	85	0	10	10	50	0	0	1.1	1
CX10	1.18	G3	0	0	90	10	10	20	1	0.8	1
CX13	1.22	SG	50	0	50	0	50	20	1	1.7	1
CX17	0.89	G1	90	0	10	0	0	0	0	0	0
CX21	1.02	G1	95	0	0	0	0	0	0	0	0
CX29	1.21	G2	15	0	80	15	20	0	1	1.7	1
CX28	1.16	RG	20	0	80	20	50	20	1	0.8	1
CX27	1.24	G3	20	0	80	20	15	20	1	1.1	1
CX36	0.91	XG	65	0	30	0	0	0	0	0	0
CX38	1.15	XG	55	0	40	0	90	0	0	1.5	1
CX40	1.24	XG	65	0	30	0	90	0	0	2.6	1
CX41	0.97	G1	85	0	0	0	0	20	1	0.2	0
CX42	1.16	XG	35	0	65	15	10	0	0	2.1	1
WX18	1.37	G1	90	0	5	5	8	20	1	0.6	1
WX19	1.01	EG	100	10	0	0	0	0	0	0	1
WX20	1.25	XG	0	0	20	5	5	20	0	0	1
WX21	1.09	SG	45	0	5	0	0	20	1	0.8	1
ZZ11	1.14	G2	85	0	15	5	100	0	0	1.6	1
ZZ14	1.05	XG	100	0	0	0	0	0	0	0.4	1
ZZ15	1.01	XG	10	0	0	0	0	0	0	0	0
ZZ16	1.01	G1	0	5	0	0	0	0	0	0	0
ZZ17	0.97	E2	60	0	40	0	5	0	0	0	0

表 2 SPSS 多因素线性回归分析权重系数表

Tab. 2 The weight coefficient table of SPSS multivariate linear regression analysis

模型	非标准化系数		标准系数		t	显著性	共线性统计量	
	B	标准误差	试用版				容差	VIF
(常量)	1.060	0.044			24.162	0.000		
绿化覆盖率	-0.038	0.044	-0.070		-0.866	0.388	0.474	2.108
硬化比例	-0.053	0.051	-0.088		-1.041	0.299	0.425	2.355
建筑密度	-0.001	0.003	-0.032		-0.562	0.575	0.970	1.031
建筑高度	0.000	0.000	0.035		0.437	0.663	0.476	2.103
开发年限	0.004	0.001	0.213		2.676	0.008	0.484	2.066
地下结构	-0.031	0.024	-0.093		-1.265	0.207	0.568	1.762
水体比例	0.182	0.089	0.126		2.042	0.042	0.806	1.241
地形高程	-0.035	0.011	-0.208		-3.259	0.001	0.751	1.332
建筑垃圾	0.160	0.024	0.443		6.721	0.000	0.706	1.417
容积率	-0.002	0.014	-0.015		-0.170	0.866	0.368	2.714

气度相对较差, 因此沈阳市三环内主城区的绿地渗蓄容量的整体上限阈值并不乐观。

4 结论与讨论

4.1 城市绿地滞蓄效能的影响因子显著性对比

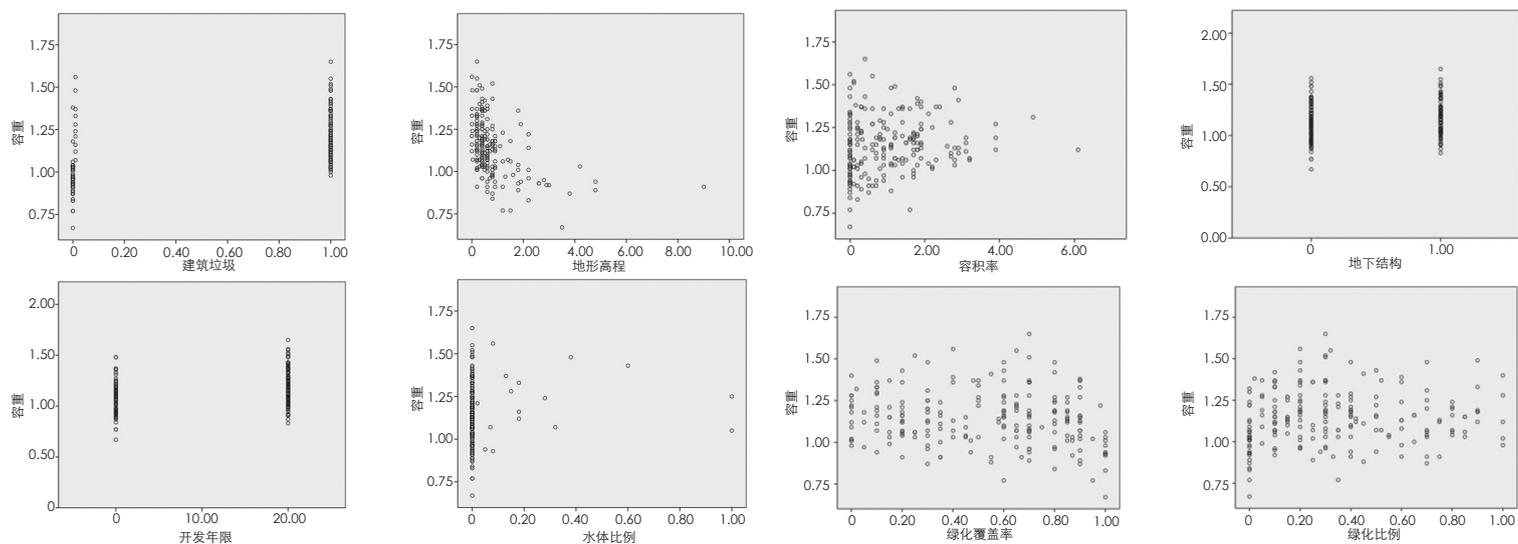
应用 SPSS 分析不同种类影响因子的权重比较 (表 2), 呈显著关联的影响因子是建筑垃圾、地形高程、开发年限和 水体比例, 显著性均 < 0.05, 不同显著性自变量因子影响下的土壤容重自变量散点分布如图 7。而建筑物地下结构形式、场地硬化比例、绿化覆盖率、建筑密度、容积率等影响因子, 对于容重的影响并不显著 (图 7)。

采用 ArcGIS 平台的普通克里金插值法对三环内主城区的降雨强度进行估算, 根据统计数据显示的近 10 年沈阳市区域逐年平均降雨强度, 再将本次实测的土壤容重数据进行叠加, 将年均降雨强度与土壤容重进行 SPSS 的相关性度量分析, 得出的 Eta[®] 数值为 0.453, 相关性较低。

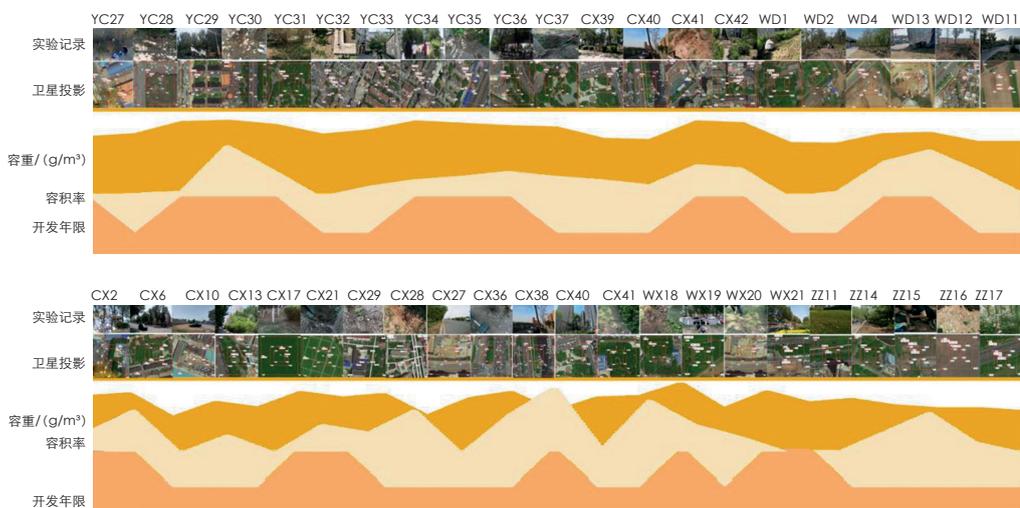
4.2 城市绿地滞蓄效能的影响机制分析

1) 将研究区横纵轴线的卫星投影与实验记录图以标号分别记录, 结合实验结果分析, 将与用地开发强度直接关联的开发年限和容积率这 2 个具有代表性的影响因子与土壤容重数据进行对比叠合分析, 对比 3 者的折线趋势变化情况 (图 8)。可得出结论: 开发年限与土壤容重的折线趋势体现了较显著的相关性, 用地开发越久的样地土盒, 土壤容重的均值显著提高, 渗蓄效能相对越差。而容积率仅在开发年限相近时, 才能与容重体现出一定相关性。容积率高的场地, 土壤渗蓄能力并不会显著提高, 从统计数据看仍然回归均值。在相同室外绿化率基础上, 不同建筑高度对于土壤的渗蓄能力并无明显影响。人工干预程度越强、持续时间越久的区域, 土壤渗蓄效能越差。

此分析结果创新性较强, 之前的土壤渗蓄机制研究基本集中于农林及环境生态等相关学科, 暂未有从城市用地开发强度作为出发点, 对绿地进行影响机制分析的研究, 本次成果可对城市建成环境内水文韧性绩效的



7



8

7 用地开发强度的相关影响因子对容重数据样本的散点分布图

Scattered distribution map of relevant influence factors of land use development intensity on soil bulk density data samples

8 横纵轴样地实测数据折线图对比

Line graph comparison of the sample plots on the horizontal and vertical axes

影响机制提供重要的实测数据依据。

2) 由图 7 可知, 有建筑垃圾的场地, 土壤容重均值提高明显, 土壤渗蓄能力严重下降。这一结果与现有综述对比基本相符, 可互为佐证^[3,4,7], 揭示出开发建设过程中的土方量工程等人工干预影响因素, 对城市绿地的渗蓄效能产生的影响不容忽视, 在测算渗蓄容量阈值时, 必须作为重要参数进行翔实调查。

3) 样地 100 m² 范围内地形高程差异越大、场地凹凸褶皱越多的样地, 土盒实测显示的土壤容重数值相对较低, 体现出的渗蓄效能相对越强。针对此问题的现有研究大多集中在水土保持等相关学科领域, 通过测算土壤动态墒值和土壤容重极值的手法, 对坡

度和坡向等高程因素对于降雨径流产生的水土流失风险进行评估, 结合 GIS 数据模拟等可以得出不同地区在不同降雨量下, 场地内土壤自然安息角度的阈值范围^[8,17]。在城市绿地渗蓄效能的相关研究中, 高程、坡度等对其影响机制的实测或模拟相对缺乏, 本研究针对此问题, 通过借鉴农林类交叉学科理论成果, 逆向推理以解决城市绿地规划问题, 拓展了新的应用领域。

4) 将场地中水体比例作为影响因素, 实测后发现采土样本距离水体越近、水体比例越大的样地, 虽然域内土壤的通气度和总孔隙度良好, 但是由于前期含水量较高, 土壤容重的平均数值显著提高, 降雨后土壤渗蓄容量相对较低。上述研究的成果与现有综述

对比基本相符, 但考虑到天然水系的区域有较好的汇流条件, 可配合合理的竖向设计, 科学引导场地内坡度坡向, 虽然不能提高土壤渗蓄容量, 但可有效利用凹形绿地来提高场地的蓄水容积, 可提高城市绿地综合滞蓄效能。

5) 绿化覆盖率作为 SCS 模型的重要量度, 在本次实测中, 分析发现其对土壤渗蓄能力的影响的显著性关联程度的权重数值较低, 属于基本可以忽略的影响因子。此分析结果与现有研究的差异较大, 推测可能是由于不同地块的建设开发年代差异, 导致土壤存在不同程度的人为踩踏压实, 并且不同绿地类型的造景手法不同, 因而对场地的平整度要求不同, 所以存在不同程度的机械素土

夯实。由于人为影响过大导致植物根系对于土壤的疏松作用降低，使得在自然森林研究中，与绿地渗蓄效能呈显著关联性的绿化覆盖率自变量因子在城市绿地范围内的影响很小，本研究对后续建立城市绿地整体滞蓄容量阈值的模拟估测具有重要的价值，可避免直接套用低人工干预环境下的参数，避免对于整体数据库造成的偏差。

6) 沈阳市三环内不同年均降雨量的分布状况，不是影响城市绿地渗蓄效能的关键作用因子，这一实测结果与现有研究中关于农作物耕种的不同水量对于土壤墒情的影响的偏差较大。推测原因可能是：一方面由于建设过程中的人工干预较多，改变了原生场地的土壤物理结构和熟化程度；另一方面是由于实测当日不是降雨量丰沛的时期，土壤的原生含水量受前期降雨量影响很小，很难体现出不同等级降雨量下的宏观渗蓄效能差异。在下一步研究中，要探索不同降雨时长、降雨强度、降雨量和温度湿度等环境影响下，对于土壤渗蓄效能的动态影响曲线，以求更加科学地指导城市绿地海绵韧性效能的量化模拟。

4.3 城市绿地水文韧性改造的关键方法

城市更新过程中，针对上述影响机制特性，为提高韧性水文安全性，可考虑以下方法。

1) 在相关工程开发建设的规定中，推行无尘施工的建筑垃圾集中收纳、不就地回填等强制性规定，能有效减少土壤形成优先流，提高土壤通气度和孔隙率，降低人工干预对渗蓄的影响。

2) 进行竖向设计时，尽量保持原生环境，不过分平整场地，减少对原生土壤物理性质的改变。可适度增加场地高程变化，不仅可以提高蓄水量，也对绿地渗水效能有显著提升。

3) 在城市绿地规划设计中，采取乔灌木等多种种植种类复合造景，不仅有利于提高林冠截留部分的降雨量，还能提高土壤的有机质含量，有效改善土壤的黏性，形成良性循环。

4) 在未来城市宏观规划中，注重集约化

土地建设思路，提高建筑平均层数，降低建筑密度，增加下垫面透水面积，提高三维绿量，有效提高城市绿地土壤的整体渗蓄容量。

5) 在城市更新改造过程中，可根据开发年限的长短来判断人为压实的严重程度，根据不同程度的等级采取物理疏松或生化干预或生态缓解等不同手段，对雨洪风险较高的区域进行针对性的韧性改造提升。

本研究以用地开发强度作为出发点，分析城市绿地渗蓄效能的影响机制，提出有效提高城市绿地渗蓄效能的关键方法。后续研究将结合微观土壤入渗率等来综合确定土壤渗蓄能力，并量化评测城市绿地的水文综合韧性效能，为韧性城市的更新改造建设提供依据，力求缓解高度城市化背景下雨涝风险的发生频率。

注释 (Notes):

- ① LID 是 20 世纪 90 年代末发展起的暴雨管理和面源污染处理技术。
- ② SCS-CN 应用于小流域水文模拟模型计算中，径流曲线数 (CN) 和初损率 (λ) 是 SCS-CN 模型的 2 个主要输入参数，其中 CN 值是一个无量纲参数，通常根据经验参数表确定，详见参考文献 [14]。
- ③ Durbin-Watson，译为德斌沃森系数，是目前检验自相关性最常用的方法，用来检验残差分布是否为正态分布。
- ④ 建筑密度、建筑高度、容积率散点图分布相似，因此由于篇幅限制，不展示于本文。
- ⑤ η^2 (Eta-squared) 是在方差分析中应用的一种效应值估量，介于 0~1，该值越大说明差异幅度越大，相关性越小。

参考文献 (References):

[1] 张彪, 谢高地, 薛康, 等. 北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估 [J]. 生态学报, 2011, 31 (13) : 3839-3845.

[2] 张洁. 基于雨洪安全的城市绿地量化研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.

[3] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展 [J]. 水利学报, 2013, 44 (7) : 779-790.

[4] 杨栩, 尤学一, 季民, 等. 城市绿地土壤入渗模型及参数确定 [J]. 城市环境与城市生态, 2011, 24 (6) : 18-21.

[5] CHI Y J. Soil Compaction as a Constraint to Tree Growth in Tropical and Sub-Tropical Urban Habitats[J]. Environmental Conservation, 1993, 20(1): 35-49.

[6] WINZIG G. The Concept of Storm Water Infiltration[C]// FERGUSON B K. Stormwater infiltration[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994.

[7] 卓文珊, 唐建锋, 管东生. 城市绿地土壤特性及人类活动的影响 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2007, 46 (2) : 32-35.

[8] 王友生. 北京山区典型小流域土地利用: 森林植被变化的水文生态响应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.

[9] 杨金玲, 汪景宽, 张甘霖. 城市土壤的压实退化及其环境效应 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (6) : 688-694.

[10] 程江, 杨凯, 徐启新, 等. 2008 高度城市化区域汇水域尺度 LUCC 的降雨径流调蓄效应 [J]. 生态学报, 2008, 28 (7) : 2972-2980.

[11] 岳健敏, 张金池, 庄家尧, 等. 南京毛竹林小流域 SCS-CN 方法初损率 λ 取值研究 [J]. 中国水土保持科学, 2015, 13 (5) : 9-15.

[12] GILL S E, HANDLEY J F, ENNOS A R, et al. Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure[J]. Built Environment, 2007, 33(1): 115-133.

[13] HOPKINS K G, LOPERFIDO J V, CRAIG L S, et al. Comparison of Sediment and Nutrient Export and Runoff Characteristics from Watersheds with Centralized Versus Distributed Stormwater Management[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 203(1): 286.

[14] 车伍, 赵杨, 李俊奇. 海绵城市建设热潮下的冷思考 [J]. 南方建筑, 2015 (4) : 104-107.

[15] 白海江. 城市建设用地开发强度与效益的动态响应关系: 以兰州市为例 [J]. 国土与自然资源研究, 2020 (3) : 41-45.

[16] 程江, 徐启新, 杨凯, 等. 下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素 [J]. 给水排水, 2007, 33 (5) : 45-49.

[17] 李志飞, 赵雨森, 辛颖, 等. 阿什河上游 3 种人工林土壤贮水量与入渗特征 [J]. 中国水土保持科学, 2010, 8 (1) : 77-80.

[18] 解文艳, 樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响 [J]. 太原理工大学学报, 2004, 35 (5) : 272-275.

[19] 张建国, 金斌斌. 土壤与农作 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

图表来源 (Sources of Figures and Tables):

图 1~8 由作者绘制; 其中图 1、2、4、5 底图来源于沈阳市土地利用总体规划 (2006—2020 年); 图 2 数据来源于统计局数据; 表 1~2 由作者绘制。

(编辑 / 王亚莺)