

深圳城市绿地土壤水库特征及影响因素

黄 晖^{1,2}, 毕舒贻^{1,2}, 字肖萌³, 廖耿强⁴, 温暖玲¹, 叶子驹¹, 茹正忠^{1,2}

(1.深圳市真和丽生态环境股份有限公司, 广东 深圳 518052;

2.深圳市真和丽生态环境科技研发中心, 广东 深圳 518052; 3.中国科学院 西双版纳热带植物园
公共技术服务中心 生物地球化学实验室, 昆明 650023; 4.龙岗区城市管理行政执法局, 广东 深圳 518116)

摘 要:研究深圳城市绿地土壤水库特征及其相关影响因素,为海绵城市建设和城市绿地水土保持提供参考。针对不同类型绿地(交通、公园、小区)在不同深度土层(0—30 cm, 30—60 cm)分析了土壤水库特征,并探究了土壤理化性质对土壤水库特征的影响。结果表明:深圳城市绿地土壤死库容及滞洪库容较低,但有效库容较大,约占总库容的 68%,这表明深圳城市绿地土壤有较大的水分存蓄空间;交通绿地的总库容及死库容显著高于小区绿地、公园绿地($p<0.05$),公园绿地死库容显著高于小区绿地($p<0.05$),说明不同类型绿地的不同利用方式可影响绿地土壤死库容;深圳城市绿地土壤压实较为严重,透气性能差,非毛管孔隙度较低;土壤容重、孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、砂粒含量显著影响土壤水库,改善土壤理化性质能显著提高土壤水库库容;深圳绿地土壤死库容较低,有效库容较大,未来可考虑降低土壤压实、提高砂粒含量、改良土壤理化性质来大幅度提高土壤水库库容。

关键词:城市绿地; 土壤水库特征; 土壤物理特性; 深圳

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0146-05

Investigation on Soil Water Reservoir Properties and Its Influencing Factors in Urban Green Spaces of Shenzhen City

HUANG Hui^{1,2}, BI Shuyi^{1,2}, ZI Xiaomeng³, LIAO Gengqiang⁴,
WEN Nuanling¹, YE Ziju¹, RU Zhengzhong^{1,2}

(1.Shenzhen Zhenheli Ecology & Environment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518052,

China; 2.Shenzhen Zhenheli Ecology & Environment Research Center, Shenzhen, Guangdong,

518052, China; 3.Laboratory for Biogeochemistry, Public Technology Service Center, Xishuangbanna

Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming, 650032, China; 4.Urban

Administrative and Law Enforcement Bureau of Longgang District, Shenzhen, Guangdong 518116, China)

Abstract: To investigate soil water reservoir properties and its influencing factors in urban green spaces of Shenzhen City, and to provide references for the construction of sponge cities and soil-water conservation of the city, soil water reservoir properties and its basic physicochemical properties of different green spaces (transportation, garden, resident) in different soil layers (0—30 cm, 30—60 cm) were determined based on the national standard. The fixed storage and detention capacity of urban green space in Shenzhen was quite low. However, effective storage showed the 68% of total reservoir capacity, which means a big potential in water storage. The transportation green space showed the significant difference from garden space and residential space in total reservoir capacity and fixed storage; significant difference of fixed storage between garden space and residential space also can be seen, which means that the using ways can affect the fixed storage. The soil water reservoir properties in urban green spaces of Shenzhen was very poor, therefore, these results can help decrease the soil compaction degree and increase sand contents to improve soil water reservoir properties.

Keywords: urban green spaces; soil infiltration; soil physical characteristics; Shenzhen

收稿日期:2019-01-15

修回日期:2019-03-03

资助项目:深圳市科技创新委员会项目“城市绿地系统低影响开发关键技术研发”(JSGG20170412145935322)

第一作者:黄晖(1992—),男,江西赣州人,硕士,工程师,研究方向为海绵城市技术研发与推广。E-mail:huanghui.hdsz@foxmail.com

通信作者:茹正忠(1957—),男,广东深圳人,学士,教授级高工,主要从事海绵城市概念与技术研究。E-mail:1352863103@qq.com

城市化是人类社会发生的最为显著的变化之一,也是人类发展的必然趋势^[1]。城市化往往伴随着相当部分的下垫面被开发为不透水下垫面,使得城市水文循环发生剧烈变化,导致城市内涝风险不断增加^[2]。城市内涝现象是我国最常见的自然灾害类型之一,随着极端暴雨天气频现,逢暴雨必涝已成为我国城市的真实写照^[3]。

以末端排放为核心的传统地下雨水管网系统并不足以有效应对日益增大的泄洪压力;另一方面,面对国内人均水资源的极度缺乏,排泄的雨水无疑是资源的严重流失^[4]。通过低影响开发(LID, Low impact development)等综合工程措施将发挥城市作为“海绵体”对雨水吸纳、蓄存与再利用功能,将城市排水从“快”排转到“渗、滞、蓄、净、用、排”,最大限度地实现雨水在城市区域的积存、渗透和净化,由此减少洪涝灾害,实现水资源平衡,是真正解决城市内涝问题的有效途径^[5]。

土壤作为“城市海绵体”至关重要的元素之一,可通过土壤水分入渗存蓄天然降水,发挥出明显的存蓄、调节水分的功能,也被称之为“土壤水库”^[6]。土壤蓄水能力相当于土壤水库的“库容”,一般用总库容、有效库容、死库容和滞洪库容来评价土壤水库特征^[7]。开展城市绿地土壤水库特征研究,是海绵城市建设的一个重要环节,也是低影响开发技术的重要构件,对增加城市雨水存蓄、减少暴雨雨洪径流有着重要意义。

土壤水库特征研究已有先例报道,但多集中于自然林地或农田^[8-11],城市绿地土壤水库仅有有限几例报道^[6,12]。深圳作为全国主要大型城市,绿地面积率高达45%,然而对于深圳绿地土壤水库特征基本情况及其影响因素研究还有待开展,这限制了发挥绿地土壤的雨洪利用和调蓄功能。鉴于此,本研究选取深圳市具有代表性的城市绿地,在不同土层深度开展绿地土壤水库特征调查,同时探究深圳绿地土壤水库特征与土壤物理性质之间的关系,以期为城市绿地土壤管理改良、海绵城市建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

深圳位于广东省中南沿海地区,东经113°46′—114°37′,北纬22°24′—22°52′,属亚热带海洋性气候,年平均气温22.4℃,年降雨量1 933.3 mm。本研究将深圳市8个绿地纳入研究范围,公园绿地:中山公园、大沙河公园、红树林生态公园、莲花山公园、深圳湾公园;生活绿地:野生动物救护基地、盐田污水处理厂绿化区;交通绿地:龙翔大道绿化区。经过实地调查,深圳市绿地常

见植物乔木有:香樟(*Cinnamomum camphora*)、火焰木(*Spathodea campanulata*)、垂叶榕(*Ficus benjamina*)、小叶榄仁(*Terminalia catappa*)、黄槐(*Cassia surattensis*)等;灌木有:龙船花(*Ixora chinensis*)、红背桂(*Excoecaria cochinchinensis*)、红花檵木(*Loropetalum chinense*)、三角梅(*Bougainvillea glabra*)等;草地有:狗牙根(*Cynodon dactylon*)、高羊茅(*Festuca elata*)、细叶结缕草(*Zoysia tenuifolia*)等。

1.2 试验方法与分析仪器

本研究根据采样地实际情况设计选择采样点,采集0—30 cm上层土壤及30—60 cm下层土壤,每个样点三次重复,其中公园绿地、小区绿地、交通绿地分别采样92个、40个、22个共154个鲜土样品及对应的原状环刀样品。分析测试主要仪器包括:上海产DHA-0140A烘箱(温度为±1℃);乐琪LQ-C5001天平(精度为0.01 g),取样环刀规格为100 cm³(天平,环刀皆由北京乐琪科学器材有限公司提供)。

2 测定项目与方法

2.1 土壤水库库容计算

计算土壤水库库容是根据土壤容重、质量含水量以及土层深度来计算:

$$W=0.1\times\rho\times\theta\times h$$

式中: W 为土壤各类型水库库容(mm); ρ 为土壤容重(g/cm³); θ 为土壤各水分常数(%); θ 为饱和含水量时对应的 W 为土壤总库容; θ 为调萎含水量时对应的 W 为死库容; θ 为饱和含水量与田间持水量之差时对应的 W 为滞洪库容; θ 为田间持水量与调萎含水量之差时对应的 W 为有效库容; h 为土层厚度(cm)。

2.2 土壤物理性质测定

用环刀采样器在每个测定点分层取环刀土样(环刀体积为100 cm³),用于测定土壤饱和含水量及田间持水量,土壤调萎含水量参照中华人民共和国林业行业标准(见《森林土壤分析方法》)^[13];此外,每层分别取适量土样,一部分用电子天平于现场快速测定土壤湿重,随即装入铝盒带回实验室,置于120℃烘箱烘干后测定土壤质量含水量;将另一部分土样自然风干、过筛,测定土壤机械组成。土壤总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度、容重、机械组成的测定参照国标^[14]。

2.3 数据统计分析

采用Excel 2003和SPSS 17.0软件进行数据处理与分析,采用单因素多变量方差分析(One Way Anova)和LSD最小二乘法进行方差分析和多重比较,用Pearson法对土壤基本理化性质和土壤水库特征进行相关分析。

3 结果与分析

3.1 深圳绿地土壤水库特征总体概况

3.1.1 土壤总库容 土壤总库容是指土壤完全饱和时所能蓄存的水量,直接反映土壤的最大蓄水能力^[15]。由表 1 可以看出,深圳绿地土壤水库总库容最大值为 170.56 mm,最小值为 84.52 mm,均值为 (117.18±17.30)mm,上下土层土壤水库总库容均值分别为(117.58±17.55)mm 和(112.23±17.15)mm。总体而言深圳绿地土壤水库总库容量变化不大,上下层之间总库容量也较为接近。与天然林地高达 393.4 mm 土壤水库相比^[16],深圳城市绿地土壤水库总库容量偏低,仅为天然林地的 29.78%,这直接影响绿地土壤蓄洪排涝能力,严重制约了绿地土壤消减城市瞬时洪涝生态功能的发挥。

3.1.2 土壤有效库容 有效库容是指土壤水资源存贮、调蓄的空间,反映的是土壤水库库容有效性。由表 1 可以看出,深圳市城市绿地土壤有效库容普遍较大,为(80.08 ±16.11)mm,占比约为总库容的 68%。有效库容较高,说明深圳城市绿地土壤可蓄存的水量空间较大,然而由于深圳城市绿地土壤普遍压实严重,水分入渗进入土壤水库通道受阻,表现为入渗率极差,导致土壤有效库容不能有效发挥雨水资源存贮、调蓄作用,这可能是加剧近年深圳城市内涝现象的原因之一。城市绿地土壤渗透性能丧失,阻断了雨水进入地下,使得地下水得不到补给,造成地下水位下降和地下漏斗形成^[17-18]。

3.1.3 土壤滞洪库容 滞洪库容是土壤中不能贮水的孔隙部分,水量只能短时间地蓄存于土壤中,最终经入渗补给地下水或蒸发消耗掉,在减少地表瞬时径流量、补给地下水起着重要作用^[19]。由表 2 可以看出,深圳绿地土壤滞洪库容最大为 50.23 mm,最低仅为 2.55 mm,平均值为 (16.83±9.28)mm,仅占总库容的 14.36%。土壤滞洪库容较低,不利于绿地土壤减少瞬时径流,增加了地表瞬时洪涝。这种滞洪能力的损失无疑会对区域的径流形成产生显著的影响,极大地增加区域洪涝灾害的危险^[19]。深圳城市不同类型绿地的土壤滞洪库容变异系数较高,为 55.14%,这与前人研究较为一致^[12]。

3.1.4 土壤死库容 死库容对应土壤凋萎含水量,死库容越大,土壤水库可发挥的水分蓄存、雨洪调蓄能力越低。由表 1 可以看出,深圳城市绿地土壤死库容最大为 37.64 mm,最小为 9.99 mm,均值为 (20.27 ±5.04)mm,约占总库容的 17.30%。由此可见,深圳城市绿地土壤死库容较小,拥有较大的吸纳、蓄存水

分的潜力空间,且土壤中可被植被利用的水分含量高,这对植物耐干旱、减少人为频繁灌溉有重要现实意义。黄荣珍等^[11]研究发现恢复森林的死库容大概占总库容的比例范围为 13%~27%,本研究死库容约占总库容的 17.30%,这可能是因为深圳城市绿地土壤有着较高的活性有机碳密度^[20],这有待进一步研究验证。

表 1 深圳城市绿地土壤水库库容统计

土壤 库容	土层/ cm	最大值/ mm	最小值/ mm	平均值/ mm	标准差/ mm	变异 系数/%
总库容	0—30	170.56	84.52	117.58	17.55	14.93
	30—60	168.40	84.77	112.23	17.15	15.28
	均值	170.56	84.52	117.18	17.30	14.76
有效库容	0—30	125.46	35.48	80.67	16.83	20.86
	30—60	123.82	44.37	76.37	15.43	20.20
	均值	125.46	35.48	80.08	16.11	20.12
滞洪库容	0—30	49.10	4.65	16.30	9.81	60.18
	30—60	50.23	2.55	16.71	8.74	52.30
	均值	50.23	2.55	16.83	9.28	55.14
死库容	0—30	34.57	9.99	20.61	5.37	26.06
	30—60	37.64	11.99	19.14	4.70	24.56
	均值	37.64	9.99	20.27	5.04	24.86

3.2 深圳不同类型绿地土壤水库特征

3.2.1 不同类型绿地土壤水库总库容 如图 1 所示,交通绿地土壤水库总库容最高,为 (130.30±19.69)mm,且与公园绿地(113.82±116.30)mm 和小区绿地(119.01 ±16.30)mm 差异显著($p<0.05$),虽然小区绿地要高于公园绿地,但是二者之间差异不显著。通常认为交通绿地受人为干扰较大,其土壤水分涵养功能不如小区及公园绿地^[21],这与本研究结果不符。这可能是因为小区绿地和公园绿地人为踩压最为严重,非毛管孔隙少,因而稳渗率更低,稳渗率低直接影响绿地对强降水下水分的下渗和对外部径流的吸收功能^[22]。

3.2.1 不同类型绿地土壤水库有效库容 各绿地类型土壤有效库容普遍较高,最高为交通绿地(83.12±20.31)mm,其次为小区绿地(82.53±16.21)mm,最低为公园绿地(78.41±15.10)mm,占总库容比达 69.02%以上。虽然公园、小区、交通绿地之间有效库容各有大小,但是三者之间并无统计学差异($p>0.05$)。马建刚等对昆明市建成区不同类型城市绿地研究亦发现昆明公园绿地、交通绿地、小区绿地的有效贮水量并不存在显著性差异^[22],未来需要更多研究进一步验证其内在机制机理。

3.2.1 不同类型绿地土壤水库滞洪库容 如图 1 所示,不同类型绿地的滞洪库容普遍偏低,最高的交通绿地为 (20.68±8.12)mm,仅占总库容的 20.34%。

交通绿地要显著高于公园绿地(15.34 ± 4.46) mm($p < 0.05$),然而小区绿地(18.51 ± 9.64) mm 与二者之间并不存在显著性差异。交通绿地滞洪库容最大,可能的原因是交通绿地中拥有较多数量的砾石,砾石带来较多非毛管大孔隙所致。亦有研究显示相比较与公园绿地,停车场区绿地表层有 thicker 枯枝落物和更强的对雨水径流的有效拦蓄能力,而土壤微生物的丰富度和多样性也有可能影响这一过程^[23]。

3.2.1 不同类型绿地土壤水库死库容 如图 1 所示,不同类型绿地的死库容也普遍较低,最高的为交通绿地(26.51 ± 8.12) mm,且显著高于小区绿地(20.05 ± 90.08) mm 及公园绿地(17.96 ± 9.64) mm ($p < 0.05$)。而公园绿地又显著高于小区绿地($p < 0.05$)。不同类型绿地之间死库容均有显著性差异,说明不同类型绿地的不同利用方式可影响绿地土壤的死库容,这其影响大小分别为交通>公园>小区,这与前人研究结果较为一致^[24-25]。

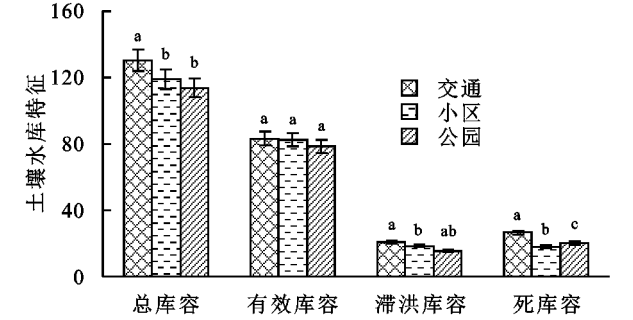


图 1 深圳市不同利用类型绿地土壤水库库容

3.3 深圳不同类型绿地土壤基本理化性质

深圳城市绿地土壤基本理化性质见表 2。从表 2 可以看出,深圳城市绿地土壤容重普遍偏大,小区绿

地最高,为 1.66 mg/m^3 ,公园绿地与交通绿地同为 1.60 mg/m^3 ,小区绿地与公园绿地、交通绿地间差异不显著;上下层之间最高为交通绿地上层,高达 1.74 mg/m^3 ,最低的公园绿地下层也有 1.58 mg/m^3 ,皆明显高于较理想化的 1.35 mg/m^3 绿化土壤平均容重¹⁶,这表明深圳绿地土壤出现了明显压实现象。含水率中,各个类型绿地之间相差不大,分布于 $14\% \sim 16\%$ 。上下层中,除交通绿地外,公园绿地和小区绿地上层含水率皆低于下层含水率,这是因为深层土壤只能接收少量的由上层下渗的部分雨水,土壤水分相对较少,这与尹光彩等^[26] 研究结果相似。由于深圳绿地土壤受压实作用比较大,较为紧实,透气性能较差,非毛管孔隙度普遍比较低,均值最高的交通绿地仅为 6.24% ,勉强达到《绿化种植土壤》要求的 $5\% \sim 25\%$ 的标准^[27]。而公园绿地的非毛管孔隙度仅有 3.34% ,显著低于小区绿地(5.80%)及交通绿地。就毛管孔隙度而言,最高为交通绿地 35.30% ,其次是公园绿地 33.51% ,小区绿地最低 32.13% ,然而三者之间并无显著性差异。因此也不难理解交通绿地孔隙度(41.53%)要显著高于公园绿地(36.84%)及小区绿地(37.91%),这部分差异主要是由非毛管孔隙度所带来。而交通绿地的砾石含量(42.71%)显著高于公园绿地(37.20%)和小区绿地(35.46%) ($p < 0.05$),研究表明,砾石含量对土壤非毛管孔隙度具有增大效应^[28],这可能是交通绿地有着更高的非毛管孔隙度原因。土壤机械组成是土壤中矿物颗粒的大小及其组成比例,与土壤中的水分、空气和温度等状况密切相关。深圳不同类型绿地土壤砂粒($2 \sim 0.02 \text{ mm}$)含量均高于 60% 。

表 2 深圳不同类型绿地土壤基本理化性质

绿地类型	土层/cm	容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	黏粒/%	砂粒/%	粉粒/%	砾石含量/%	含水率/%
公园绿地	0—30	1.64±0.03a	36.85±0.99a	33.71±0.97ab	3.13±0.67a	11.93±1.52a	63.42±1.35a	24.65±1.87a	36.85±1.41ab	16.39±1.66a
	30—60	1.58±0.03a	36.85±0.95a	33.32±0.93ab	3.54±0.65ab	10.03±1.46a	64.17±1.30a	25.81±1.80a	37.54±1.36ab	13.90±1.60a
	均值	1.60±0.16A	36.84±4.81A	33.51±4.31A	3.34±3.31A	10.94±8.74A	63.81±7.42A	25.25±10.54A	37.20±5.64B	15.10±9.12A
交通绿地	0—30	1.74±0.07a	39.63±2.03ab	33.82±1.98ab	5.80±1.37abc	15.24±3.10a	58.91±2.76a	25.85±3.82a	43.12±2.87a	13.44±3.39a
	30—60	1.65±0.11a	47.25±3.52b	39.75±3.44a	7.55±2.38abc	6.74±5.38a	64.70±4.79a	28.57±6.62a	41.51±4.98ab	16.90±5.86a
	均值	1.60±0.23A	41.53±6.11B	35.30±4.98A	6.24±3.02B	13.11±5.28A	60.36±5.39A	26.53±4.36A	42.71±4.96A	14.30±3.01A
小区绿地	0—30	1.60±0.05abc	39.58±1.66ab	32.72±1.62ab	6.87±1.12abc	11.04±2.53a	62.34±2.26a	26.62±3.12a	35.82±2.35ab	18.82±2.77a
	30—60	1.68±0.05abc	36.41±1.58a	31.59±1.54b	4.83±1.06abc	10.33±2.40a	63.27±2.14a	26.41±2.96a	35.14±2.23b	14.50±2.62a
	均值	1.66±0.14A	37.91±5.27AB	32.13±6.10A	5.80±3.56B	10.67±3.93A	62.82±4.67A	26.51±5.84A	35.46±10.09B	16.54±7.08A

注:同列数值后小写字母不同及同行数值后大写字母皆表示差异显著 $p < 0.05$ 。

3.4 深圳城市绿地土壤水库特征影响因子

土壤各基本理化性质也显著影响深圳绿地土壤水库特征。由表 3 可以看出,土壤总库容与孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度相关关系达到极显著水平

($p < 0.01$),而与土壤容重显著负相关,这是由于孔隙度高的土壤结构疏松多孔,可发挥出良好的水分蓄、运、保、调功能。多项研究也表明压实程度较高的土壤孔隙度较低^[29-30],这与本研究的结果相符。土壤死

库容与砂粒含量显著负相关($p<0.05$),与黏粒、粉粒含量正相关,而深圳城市绿地土壤含砂量普遍较高,含砂量均 $>60\%$ (表 2),这可能是深圳城市绿地土壤水库死库容较低的内因之一。土壤死库容与土壤容重呈显著正相关,这与前人研究结果较为一致;土壤容重越高,压实越严重,而压实增加了土壤凋萎含水量,从而增加土壤死库容^[6]。土壤有效库容与孔隙度、毛管孔隙度的正相关关系为极显著($p<0.01$),与土壤容重显著负相关,土壤滞洪库容与孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度显著正相关,与土壤容重呈显著负相关。

表 3 深圳城市绿地土壤水库与土壤理化指标相关性

土壤参数	总库容/ mm	死库容/ mm	有效库容/ mm	滞洪库容/ mm
孔隙度/%	1.000**	-0.237*	0.748**	0.516***
毛管孔隙度/%	0.756**	-0.126	0.939**	0.756**
非毛管孔隙度/%	0.427**	-0.175	0.197	0.427**
黏粒/%	-0.197	0.043	0.074	-0.197
砂粒/%	0.124	-0.260*	0.082	0.124
粉粒/%	0.072	0.156	-0.162	0.072
砾石含量/%	0.048	-0.027	0.038	0.048
土壤容重	-0.749**	0.412**	-0.490**	-0.749**

注:*,**分别表示在 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 水平下显著相关。

4 结论

(1) 深圳绿地土壤水库总库容偏低,仅为 110 mm 左右。土壤有效库容普遍较大,为 80.08 mm 左右,占比约为总库容的 68%,这说明深圳绿地土壤有着较高的剩余蓄水空间;土壤滞洪库容相对较小,占总库容的 14.36%,这将导致绿地土壤消减瞬时洪涝能力较弱,不利于土壤发挥蓄洪排涝功能。

(2) 交通绿地土壤水库总库容显著高于小区绿地及公园绿地,而其有效库容与小区绿地及公园绿地相比并无显著性差异。不同类型绿地的不同利用方式可影响绿地土壤的死库容,这其影响大小分别为交通 $>$ 公园 $>$ 小区。

(3) 土壤理化性质及相关性分析结果表明,深圳城市绿地土壤压实现象较严重,表现为容重普遍偏大,非毛管孔隙度比较低。不同类型绿地土壤砂粒(2~0.02 mm)含量均高于 60%,交通绿地砾石含量对非毛管孔隙度具有明显增大效应。土壤死库容与砂粒含量显著负相关($p<0.05$),与土壤容重呈显著正相关,土壤有效库容与孔隙度、毛管孔隙度的正相关关系为极显著($p<0.01$)。

参考文献:

[1] 陈明星.城市化领域的研究进展和科学问题[J].地理研究,2015,34(4):614-630.

[2] Roy poirier A, Champagne P, Filion Y. Review of bioretention system research and design:past, present, and future[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010,136(9):878-889.

[3] 尹占娥,许世远,殷杰,等.基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J].地理学报,2010,65(5):553-562.

[4] 唐田.海绵城市理念下的城市绿地系统研究[D].山东青岛:青岛理工大学,2016.

[5] 曹国平.海绵城市建设背景下的城市内涝防治探讨[J].四川建材,2016,42(3):275-276.

[6] 伍海兵,方海兰,彭红玲.典型新建绿地上海辰山植物园土壤水库特征及其影响因子[J].应用生态学报,2016,27(5):1437-1444.

[7] 朱显谟.重建土壤水库是黄土高原治本之道[J].中国科学院院刊,2006,21(4):320-324.

[8] 史学正,梁音,于东升.“土壤水库”的合理调用与防洪减灾[J].水土保持学报,1999,5(3):6-10.

[9] 汪永英,段文标.小兴安岭南坡 3 种林型林地水源涵养功能评价[J].中国水土保持科学,2011,9(5):31-36.

[10] 谢莉,陈三雄,彭庭国,等.浙江安吉主要植被类型土壤水库库容特性研究[J].亚热带水土保持,2012,24(3):14-18.

[11] 黄荣珍,朱丽琴,王赫,等.红壤退化地森林恢复后土壤有机碳对土壤水库库容的影响[J].生态学报,2017,37(1):238-248.

[12] 伍海兵,周建强,方海兰.上海中心城区绿地土壤水库特征[J].应用生态学报,2017,28(3):966-974.

[13] 张万儒.森林土壤分析方法[S].北京:中国标准出版社,1999.

[14] 中国标准出版社第二编辑部.环境监测方法标准汇编:土壤环境与固体废物[M].北京:中国标准出版社,2007.

[15] 孟春红,夏军.“土壤水库”储水量的研究[J].节水灌溉,2004(4):8-10.

[16] 谢莉,陈三雄,彭庭国,等.浙江安吉主要植被类型土壤水库库容特性研究[J].亚热带水土保持,2012,24(3):14-18.

[17] 杨金玲,张甘霖.城市功能区、植被类型和利用年限对土壤压实的影响[J].土壤,2007,39(2):263-269.

[18] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments:effects on infiltration[J]. Catena, 1994,23(1/2):99-110.

[19] 杨金玲,张甘霖.城市“土壤水库”库容的萎缩及其环境效应[J].土壤,2008,40(6):992-996.

[20] Dexter A R, Richard G, Arrouays D, et al. Complexed organic matter controls soil physical properties[J]. Geoderma, 2008,144(3/4):620-627.

- 征[D].长春:东北师范大学,2011.
- [6] 齐月,陈海燕,房世波,等.1961—2010 年西北地区极端气候事件变化特征[J].干旱气象,2015,33(6):963-969.
- [7] 刘琳,徐宗学.西南 5 省市极端气候指数时空分布规律研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(2):294-301.
- [8] 王琼,张明军,王圣杰,等.1962—2011 年长江流域极端气温事件分析[J].地理学报,2013,68(5):611-625.
- [9] 黄强,陈子荣.全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J].地球科学进展,2014,29(8):956-967.
- [10] 郑江禹,张强,史培军,等.珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J].地理科学,2017,37(2):283-291.
- [11] 吴灿,赵景波,王格慧.黄河流域极端气温指数的气候演变特征分析[J].中国农业气象,2015,36(5):525-535.
- [12] 王婷婷,冯起,李宗省,等.1960—2012 年祁连山东段古浪河流域极端气候事件研究[J].冰川冻土,2018,40(3):1-9.
- [13] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.云南省 1958—2013 年极端气温时空变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2016,25(3):523-536.
- [14] 王晓,李佳秀,石红彦,等.1960—2011 年云南省极端气温事件的时空分布[J].资源科学,2014,36(9):1816-1824.
- [15] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.云南省 1958—2013 年极端降水时空变化特征分析[J].灾害学,2015,30(4):178-186.
- [16] 杨丹丽,王杰,曹言.再分析资料 ERA Interim 在云南省的精度评估[J].人民珠江,2018,39(7):51-56.
- [17] 韩会庆,张娇艳,苏志华,等.2011—2050 年贵州省极端气候指数时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(2):341-346.
- [18] 曹永旺,延军平.1961—2013 年山西省极端气候事件时空演变特征[J].资源科学,2015,37(10):2086-2098.
- [19] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等.云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J].灾害学,2010,25(1):39-44.
- [20] 任菊章,黄中艳,郑建萌.基于相对湿度指数的云南干旱气候变化特征[J].中国农业气象,2014,35(5):567-574.
- [21] 杜俊,陈晶,熊执中.云南省山洪灾害防治非工程措施项目建设综述[J].人民长江,2016,47(9):12-16.
- [22] 杨茂灵,王龙,杨蕊,等.南盘江流域季节性干旱时空分布特征研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(2):251-256.
- [23] 谭顺萍,吴巩胜,李丽,等.1961—2010 年云南省极端降水时空变化特征[J].云南师范大学学报:自然科学版,2015,35(1):67-72.
- [24] 何娇楠,李运刚,李雪,等.1961—2012 年干旱时空变化特征[J].山地学报,2016,34(1):19-27.
- [25] 曹言,王杰,黄英,等.云南省气候干湿状况时空变化特征研究[J].水电能源科学,2017,35(8):6-9,22.
- [26] 杜亮亮,周雪英,赵有谱,等.河北邯郸地区极端降水指数气候特征及其与降水量、气温的关系[J].干旱气象,2017,35(6):968-974.
- [27] 张雷,王杰,黄英,等.1961—2010 年云南省基于 SPEI 的干旱特征分析[J].气象与环境学报,2015,31(4):141-146.

~~~~~  
(上接第 150 页)

- [21] Jim C Y. Soil characteristics and management in an urban park in Hong Kong [J]. Environmental Management, 1998,22(5):683-695.
- [22] 马建刚,王克勤.昆明市城市绿地蓄水滞洪效益研究[J].中国水土保持,2012(2):34-37.
- [23] 李晨.榆林市绿地生态系统土壤水文调控过程及土壤微生物群落特征[J].水土保持研究,2017,24(3):80-85.
- [24] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.城镇化人为扰动下垫面类型影响水源涵养功能的评价[J].农业工程学报,2017,33(22):100-110.
- [25] 娄义宝,史东梅,蒋平,等.紫色丘陵区城镇化不同地貌单元的水文特征及土壤重构[J].土壤学报,2018,55(3):650-663.
- [26] 尹光彩,周国逸,唐旭利,等.鼎湖山不同演替阶段的森林土壤水分动态[J].吉首大学学报:自然科学版,2003,24(3):62-68.
- [27] 梁晶,方海兰,张浪,等.基于城市绿地土壤安全的主要生态技术研究及应用[J].中国园林,2016,32(8):14-17.
- [28] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等.六盘山典型植被类型土壤中石砾对大孔隙形成的影响[J].山地学报,2007,25(5):541-547.
- [29] 祝景彬,贺慧丹,李红琴,等.牧压梯度下高寒草甸土壤容重及持水能力的变化特征[J].水土保持研究,2018,25(5):76-81.
- [30] 于法展,李保杰,尤海梅,等.徐州泉山自然保护区人工林下土壤容重与孔隙度时空变化研究[J].水土保持研究,2007,14(6):162-164.