

北方校园绿地滞蓄雨水能力分析

石铁矛,于 畅

(沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究绿地中土壤和植被最大滞蓄能力,绿地在降雨过程中对雨水的吸收滞留量.分析不同植被结构绿地对雨水滞蓄能力的差异及其原因.方法 以沈阳建筑大学校园绿地为研究区域,通过测量和遥感方法对校园内不同植被结构类型绿地的滞蓄能力进行量化.结果 校园内绿地土壤稳定入渗率平均为 0.12 cm/min ;校园内 20 cm 蓄水层土壤及植被可滞蓄雨水总量达到 $63\ 117.72\text{ m}^3$,在50年一遇的降雨强度的情况下,校园内绿地可滞蓄雨水量达到校园内总降雨量的 88.15% .结论 城市中绿地对雨水具有十分明显的调蓄作用,不同植被结构的绿地调蓄雨水的能力不同,且绿地中的滞蓄能力受植被叶面积指数和土壤性质共同影响,阔叶乔木-灌木-草复合植被结构类型的绿地滞蓄能力最强.

关键词 校园绿地;滞蓄能力;土壤;植被截留

中图分类号 TU985.12⁺9

文献标志码 A

Analysis on Rainwater Detention Ability of Green Space in Northern Campus

SHI Tiemao, YU Chang

(School of Architecture and Planning Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The maximum stagnant storage capacity of soil and vegetation in the green land that absorbs and retains rainwater during rainfall is studied, and rainwater detention ability of green land with different vegetation structure is analyzed too. The green space in Shenyang Jianzhu University campus taken as the research area, the stagnation capacity of green space with different vegetation structure types is quantified by experimental measurement and remote sensing methods. The stable infiltration rate of soil in the campus is 0.12 cm/min on average; the total rainwater amount of stagnant storage can reach $63\ 117.72\text{ m}^3$ for soil and vegetation in the 20 cm aquifer. In the case of 50-year rainfall intensity, the amount of stagnant rainwater of the green space in the campus can be reached 88.15% of the total rainfall on campus. So the green space in the city has a very obvious effect on regulating and storing rainwater. The green space with different vegetation structures has different capacity to store rainwater, and the stagnant capacity of the green space is affected by the

收稿日期:2020-04-15

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51878418)

作者简介:石铁矛(1957—),男,教授,博士,主要从事生态绿色规划方面研究.

vegetation leaf area index and soil properties. The structure type of green space with tree-shrub-herb composite vegetation has the strongest stagnation capacity.

Key words: campus green space;detention ability;soil;vegetation intercepting

城市过度扩张建设导致不透水下垫面极速的扩张,不透水下垫面的涌现阻断了土壤的自然渗透进程,自然环境中“降雨-蓄水-入渗-径流-蒸发”的水文循环逐步缺失.城市中有针对降雨后雨水的处理措施大都是以快速转移排放雨水为目的而修建的地下市政雨水管网和水池^[1],却忽视了雨水在自然环境中的循环过程,同时地表的渗透能力下降,植被截留功能大量缺失,也间接给排水系统增加了排水压力.城市中的绿地是城市生态系统重要组成部分,尤其在缓解城市洪涝灾害、调蓄雨水径流量、削减峰值流量等方面具有的潜力十分可观.比较传统的市政管网排水,合理利用城市中的绿地对雨洪进行充分滞蓄,是现有海绵城市建设方法中最经济、高效、便利的一种途径^[2].绿地对城市中雨水调蓄作用的研究方向主要集中在绿色基础设施对雨水调蓄作用的评价^[3-4]、城市及流域大尺度范围绿地调蓄能力的评估,以及通过模拟海绵城市建设后的绿地滞蓄功能^[5].在研究方法上主要分为两种:一是根据土壤渗透系数和径流系数来反推绿地滞蓄的能力,多适用于宏观量的计算^[6-7];二是从绿地本身入手,研究绿地中土壤和植被两大主要基本要素的滞蓄雨水的能力,多用于研究绿地内部因素对滞蓄能力的影响^[8-9].

沈阳市是北方典型的存在汛期和干旱期的城市,汛期降雨大且多为短时强降雨,导致排水管网不能及时将雨水排走,形成城市积水.笔者将沈阳建筑大学校园绿地作为研究区,在实地调研、采土取样、遥感影像定向提取方法的基础上,分析校园内绿地滞蓄雨水的能力及其与绿地中各要素之间的关系,为以缓解内涝灾害为目的的绿地植物景观设计

及小区域绿地系统规划提供依据.

1 沈阳建筑大学校园绿地斑块及采土样地分布

1.1 沈阳建筑大学概况

沈阳建筑大学位于沈阳市二环与三环之间,占地 1 000 000 m²,是城市化的代表地块,校园内绿地具有植被结构形式丰富、绿化率高、绿地和水系等斑块齐全、植被种类丰富、绿地土壤压实程度较低等特征,可作为城市周围建设用地中的绿地代表.校园原址为农业用地,自 2002 年建设至今,绿地土壤基本为原生土,植被绝大部分为沈阳市乡土树种,生长情况良好,部分绿地已经形成较好的纯林绿地.依据道路及建筑边界,以完整或植被结构与功能相同临近的绿地为单位进行划分,共分成 139 个绿地斑块(见图 1),绿地总面积 323 108.87 m²,绿地率 32.3%.



图 1 沈阳建筑大学校园绿地斑块分布
Fig. 1 Green space distribution in Shenyang Jianzhu University

根据校园内绿地植被层次和生长情况,将校园内绿地植被结构分为 9 种类型,各植被结构绿地斑块数量和面积如表 1 所示.

表1 校园内各植被类型绿地统计

Table 1 Green space statistics of various vegetation types on campus

植被结构类型	绿地斑块数量/个	总面积/m ²
草	16	37 016.37
灌木	14	9 592.55
阔叶乔木	11	19 402.53
针叶乔木	6	5 937.37
灌木-草	9	6 322.63
阔叶乔木-草	46	145 721.82
阔叶乔木-灌木	9	21 706.39
阔叶乔木-灌木-草(疏林)	22	43 938.07
阔叶乔木-灌木-草(密林)	6	33 471.14

1.2 采样点选取与数据获取方法

为了研究区域内的绿地更具有城市绿地代表性,依据人为活动因素和建筑因素,将校园内的绿地根据不同的使用位置、功能及特征分为建筑及道路周边附属绿地、水边观赏绿地、校园生产及防护绿地、生态绿地和其他绿地5类,并在其中每种绿地中分别选取表1中9种植被结构且平整无坡的绿地作为样地,共45个样地(见图2)。

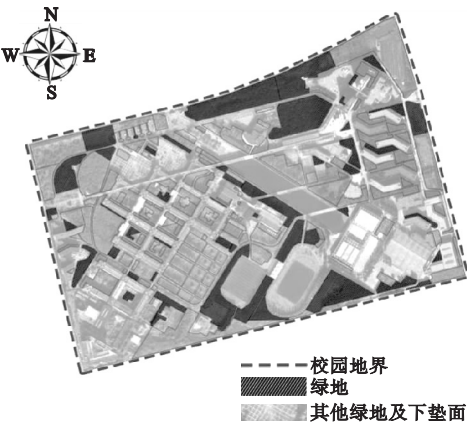


图2 采土样地分布图

Fig.2 The distribution of soil sample

每个样地选取3个点进行土样的收集,共计135个土样,测定结果采取平均值作为样地的实验测定值.根据孙媛等^[10]的研究,在降雨一小时内绿地土壤表面以下20cm的土层起到主要的滞蓄作用,根据土壤学中的

对土壤性质的测定方法^[11],采用规格为70 cm³环刀法对绿地中对降雨过程中最为敏感的20cm土层进行取样.将土样进行烘干、称重、浸泡、沥水操作,计算土壤容重、田间持水量和总孔隙度.土壤入渗数据采用野外双环入渗法测定.通过时间和入渗量计算入渗速率,将最终不再变化的入渗率作为土壤的稳定入渗率.

A. P. J. DE ROO^[12]和王佩将^[9]的研究表明,降雨和叶面积指数(LAI)是影响林冠截留的重要因素,可用叶面积指数对最大林冠截留进行估算.遥感技术能对不同尺度LAI实现长期连续监测^[13],并且对植物的破坏最小.沈阳市暴雨事件多发生在7、8月份,且在此期间绿地的植被覆盖度最佳,便于解译和反演计算,因此笔者选取沈阳市2017年8月下旬的清晰无云Landsat8遥感影像.通过对影像的提取和估算获取绿地中的归一化植被指数,在通过计算得到校园内植被的LAI^[14].

2 绿地滞蓄能力量化方法

绿地滞蓄能力的研究方法主要是根据降雨后的城市绿地水文循环过程以及土壤中水分存在形式的原理,对试验区绿地实测并计算校园内绿地所能滞蓄雨水的容量,在50年及以上一遇的暴雨中可为城市排水系统减缓排水压力的能力.从单场降雨过程来看,绿地对雨水的滞蓄效应主要体现在林冠截留和土壤入渗蓄水至饱和.植被林冠截留随着降雨量的增加会逐渐趋于饱和且不在增加,土壤也会在孔隙全部填充水分后达到最大持水能力,即饱和蓄水量^[15].因此校园内绿地的滞蓄能力包括20 cm土壤层蓄水量、土壤入渗量和植被截留量3部分.

W_{max} = W₀ + W_i + W_h. (1)

式中:W_{max}为绿地总截留量,mm;W₀为土壤饱和蓄水量,mm;W_i为土壤稳定入渗量,mm;W_h为植被冠层最大截流量,mm.

$$\rho_b = \frac{Ms}{V}.$$

(2)

$$P_1 = (1 - \frac{\rho_b}{d}) \times 100\%.$$

(3)

式中: ρ_b 为土壤容重, g/cm^3 ; Ms 为土壤干重, g ; V 为土壤体积, cm^3 ; P_1 为土壤总孔隙度, %; d 为土壤相对密度, 通常为 2.65.

$$W_0 = P_1 \cdot h.$$

(4)

式中: h 为土壤蓄水层高度, mm .

土壤稳定入渗率^[16]:

$$i = \frac{10^3 \cdot Q}{S \cdot t}.$$

(5)

$$W_i = i \cdot t \cdot 10.$$

(6)

式中: i 为入渗速率, cm/min ; Q 为入渗量, L ; S 为内环面积, cm^2 ; t 为时间, min .

植被截留量的计算采用 De Roo^[10] 等构建的植被冠层截留模型.

$$W_h = 0.935 + 0.498 \times LAI - 0.00575 \times LAI^2.$$

(7)

式中: LAI 为叶面积指数.

3 结果与分析

3.1 降雨情况分析

沈阳市属于温带季风气候, 多年平均降水量 600 mm, 雨型为单峰雨型. 年均降雨 91 d, 降雨主要集中在 7、8 月份, 约占全年降水量的 50%. 降水具有时段和雨量较为集中的特征. 根据《沈阳市海绵城市规划设计导则》, 城市暴雨内涝防治标准为 50 年一遇, 降雨强度为 71.6 mm/h. 因此当遭遇 50 年一遇的降雨, 在沈阳建筑大学校园范围内可产生 71 600 m^3/h 的降雨量.

3.2 土壤渗蓄能力分析

将校园内所有土样性质数据经过整理, 得到各植被结构类型绿地土壤性状均值如表 2 所示, 表 2 反映出各植被结构类型的土壤蓄水能力的总体特征.

表 2 各植被结构类型绿地土壤性状表

Table 2 Soil properties of green space with different vegetation structure

植被结构类型	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙 度/%	毛管孔隙 度/%	非毛管孔 隙度/%	田间持 水量/%	稳定入渗率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	20cm 土层饱和 蓄水深度/mm
草	1.08	59.19	26.50	32.68	24.86	0.08	118.38
灌木	1.06	59.13	23.71	35.42	21.74	0.10	118.26
阔叶乔木	1.01	61.95	24.26	37.69	24.20	0.14	123.91
针叶乔木	1.05	60.39	24.08	36.30	22.95	0.11	120.78
灌木-草	0.96	63.73	25.79	37.94	26.83	0.15	127.47
阔叶乔木-草	1.03	61.30	25.05	36.26	24.58	0.11	122.61
阔叶乔木-灌木	1.11	58.16	26.34	31.82	24.09	0.09	116.32
阔叶乔木-灌木-草(疏林)	0.88	66.84	19.93	46.91	22.66	0.16	133.68
阔叶乔木-灌木-草(密林)	0.97	63.40	19.77	43.64	20.30	0.16	126.81

土壤容重、孔隙度以及持水量是度量土壤蓄水能力的物理特性的指标, 土壤容重及孔隙度的差异主要是由于土壤颗粒的形状、大小和排列的不同所引起的, 从而影响了土壤中水分的存在时间和状态. 土壤容重是由土壤孔隙和土壤固体的数量来决定的, 可以反映出土壤的紧实度, 是否利于透水、通气和植被扎根等特性.

3.2.1 土壤容重、孔隙度

土壤容重决定着土壤的孔隙度及入渗,

是绿地土壤非常重要的指标. 土壤孔隙度按类别分为毛管孔隙度和非毛管孔隙度, 毛管孔隙度反映了土壤保持水分的能力. 非毛管孔隙度反映了土壤的通气性、透水性程度.

校园绿地作为城市中的附属绿地具有以下特点: 绿地一般在校园围墙内, 使用人群单一. 学生活动范围集中, 校园内路线规划合理, 极少发生大片绿地踩踏的情况. 校园中的绿地功能以景观、生态性为主, 多数绿地可以自主生长, 不需要定期的人工栽植.

从表2可知,沈阳建筑大学校园内各植被结构绿地的容重由大到小的顺序为,阔叶乔木-灌木-草、灌木-针叶乔木、阔叶乔木-草、阔叶乔木、阔叶乔木-灌木-草(密林)、灌木-草、阔叶乔木-灌木-草(疏林)。由式(3)可知,土壤孔隙度与容重成反比关系,因此各植被结构绿地土壤孔隙度排序正好相反。阔叶乔木-灌木结构的绿地平均容重最大,阔叶乔木-灌木-草(疏林)结构的绿地平均容重最小,差值为 0.23 g/cm^3 。总体来看,除阔叶乔木-灌木结构绿地外,植被结构越丰富的绿地土壤容重值越小,孔隙度越大,压实程度越低。主要原因是植被结构越丰富的绿地受人为干预的影响越小。此外,枯落物形成的腐殖质对植被的生长非常有利,植被根系发达,枝叶茂盛,形成良性循环。较茂密的阔叶乔木-灌木-草植被结构的绿地土壤毛管孔隙度最小,也就是其所在绿地的土壤本身蓄水能力相对最小。单一植被结构草地的土壤毛管孔隙度最大,因草本植物较小,根系也短小,故土壤容重较大,土壤的持水能力较强。阔叶乔木-灌木组合结构的绿地土壤的非毛管孔隙度最小,代表其土壤的渗水能力最差。乔木和灌木组合的绿地土壤中灌木多数生长多年,其根系结构十分发达,土壤中大部分已经被乔木的大根系和灌木细小错落的根系填满,由此造成土壤的容重大,渗透能力差。沈阳建筑大学校园绿地各植被结构绿地土壤容重介于 $0.88\sim 1.11\text{ g/cm}^3$,均值为 1.065 g/cm^3 。土壤容重经验均值为 1.3 g/cm^3 ^[10]。沈阳建筑大学校园内绿地土壤容重低于平均值,土壤状况较好。校园内绿地土壤容重均值较小、总体孔隙度较大,土壤压实程度低,透水能力强,具有较大的滞蓄潜力。

3.2.2 入渗率

土壤水分入渗过程受土壤质地、降雨强度、初始含水率等多因素的影响^[1],在自然降雨的条件下,土壤水分的入渗不是始终按照土壤的稳定入渗能力进行的。在降雨初期,土壤比较干

燥,含水量较小,此时在毛管力、分子力和重力的共同作用下,土壤的入渗能力较强,随着降雨量的增加,土壤中的毛管间隙吸满水,入渗能力逐渐减弱。土壤入渗虽与降雨强度有关,但当降雨强度较大,如达到暴雨或特大暴雨,土壤的入渗过程就可以用土壤本身的入渗曲线表达,最后土壤达到饱和蓄水量以后,土壤的入渗速率即达到稳定入渗速率,此时土壤所能入渗的雨量极小且只随时间而变化。

笔者研究土壤最大滞蓄能力,不考虑降雨过程中雨强对入渗的影响。因此,将土壤的入渗分为土壤蓄水入渗和土壤稳定入渗两部分。从表2土壤的入渗性能可知,阔叶乔木-灌木-草植被结构的绿地土壤稳定入渗率最高,其次是灌木-草植被结构的绿地。主要原因是阔叶乔木-灌木-草和灌木-草植被结构的绿地一般是校园内的生态绿地居多,也因有灌木的阻挡极少有人进入,落叶基本不进行清理,形成土壤腐殖质较多,且植被结构形式丰富,根系的结构层次也相对较为丰富,因此土壤疏松多孔,透气、透水性较好,入渗率也最高。通过土壤的稳定入渗率,求得校园中绿地中土壤在降雨过程中可稳定入渗雨水量为 $23\ 164.12\text{ m}^3/\text{h}$ 。

3.2.3 蓄水量

绿地的蓄水能力取决于土壤饱和蓄水量,土壤的蓄水量与土壤的毛管孔隙度、非毛管孔隙度以及土壤本身的性质都有关。土壤饱和蓄水量就是土壤中全部空隙都充满水时土壤所蓄的水量,包括毛管空隙和非毛管空隙(土壤总空隙),体现土壤的最大容水限度,此时的含水量为土壤饱和含水量,除土壤本身少量因重力作用的稳定入渗之外,不能在吸收更多的水,否则就会产生径流。

从表2可知,阔叶乔木-灌木-草结构的绿地饱和蓄水量最高,200 mm土层内,蓄水深度达133.68 mm,蓄水能力在各植被结构绿地土壤中最强,蓄水能力最差的是乔木-灌木结构的绿地土壤,只有116.32 mm,

蓄水量差为 17.36 mm. 根据式(4), 土壤的饱和蓄水量与土壤的总孔隙度有直接关系, 植被结构丰富的绿地在校园内一般为生态型绿地, 在校园内极少受到人为活动的干扰, 且无需维护即可表现出良好的绿地景观, 绿地内土壤状况良好, 疏松多孔, 同时为植被的生长提供有利条件, 因此表现出更好的蓄水能力. 结合表 1 中各植被类型绿地的面积以及表 2 中 200 mm 土层的蓄水量, 计算可得沈阳建筑大学校园中去除稻田及水系所有绿地 200 mm 土层的滞蓄总量 39 953.6 m³. 即在 50 年一遇的降雨强度下, 校园内的绿地土壤一小时可滞蓄降雨量的 55.8%.

3.2.4 土壤渗蓄量

绿地中单位面积土壤的蓄水量和稳定入渗量可反映出土壤的滞蓄能力. 通过比较各植被结构绿地单位面积土壤中的蓄水量及稳定入渗量之和(见图 3). 较疏松的乔木-灌木-草植被结构绿地的土壤渗蓄性能最好, 草地土壤渗蓄能力最差. 综合校园内各植被结构类型绿地的单位面积土壤渗蓄能力, 基本呈现植被群落结构越丰富的绿地, 土壤的渗蓄能力越强. 阔叶乔木-灌木是复合植被结构绿地中土壤渗蓄能力较差的, 原因可能是灌木和乔木组合的状况下根系过于密集, 使相同体积的土壤颗粒少、孔隙小, 同时阻碍雨水的入渗.

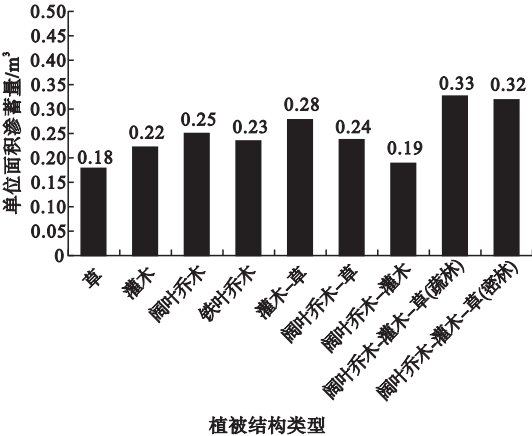


图 3 单位面积土壤渗蓄能力

3.3 植被滞水能力分析

植被冠层降雨截留量是降雨过程中被植被冠层所截留下来无法落到地面的降雨量, 植被冠层作为绿地生态系统中的第一个接触到大气降雨的界面, 可以通过对降雨的截留作用, 改变降雨的分配过程, 缓和地表径流^[17].

绿地植被的林冠截留是绿地起到对降雨滞蓄作用的第一步, 具有一定黏滞力的雨滴浸润枝叶表面, 形成水膜, 产生一定的表面张力, 林冠截留量的大小就由林冠所能产生的这种总的表面张力的多少所决定. 当降水量达到某一值之后, 降水量增加, 林冠截留量达到极限值不会再增加, 此时的截留量为林冠饱和截留量, 也称林冠贮水容量. 因此当降雨强度较大, 就会达到植被冠层饱和截留量, 从而导致植被冠层的最大截留能力主要取决于叶面积的多少, 而不受降雨量的影响.

通过遥感技术获取近年来的 Landsat 遥感影像数据得知, 2017 年夏季为近几年遥感影像中识别度最高的影像数据. 因此笔者采用 2017 年夏季的遥感影像, 利用 ENVI 提取计算出叶面积指数(分辨率 30 m×30 m), 再经 ArcGis 软件将校园内的栅格进行二次分割提取 5 m×5 m 的 LAI 栅格数据, 计算校园内的植被的截留能力. 每个栅格内的校园植被截留量为网格的面积乘以该网格对应的植被冠层的最大截留量(见图 4).



图 4 沈阳建筑大学校园植被截留量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of vegetation interception in the campus of SJZU

Fig. 3 Soil infiltration capacity per unit area

计算得到校园内植被冠层截留总量为 $1\,622.72\text{ m}^3$ 。按 50 年一遇的降雨强度来计算,校园内的林冠截留率为 2.26%。结合校园绿地植被结构与不同绿地的截留能力可以看出校园内植被截留量较大的绿地分为两种(见图 5)。一种是以乔木为主,林下有草本植

被的阔叶乔木-草地(见图 4(a)),另一种是阔叶乔木-灌木-草复合植被结构绿地(见图 5(b))。这两种植被结构的绿地一般为较大面积的生态绿地,人为干扰因素极小,植被的生长茂密,形成了较好的纯林景观,因此,叶面积指数较大,对应冠层截留量也较大。



(a) 阔叶乔木-草



(b) 阔叶乔木-灌木-草

图 5 阔叶乔木-草、阔叶乔木-灌木-草结构代表绿地

Fig. 5 The sample of arbor-grass, arbor-shrub-grass green space

4 结 论

(1) 沈阳建筑大学校园内绿地 200 mm 蓄水层土壤及植被可滞蓄雨水总量达到 $63\,117.72\text{ m}^3$, 在 50 年一遇的降雨强度条件下, 绿地滞蓄率为 88.15%, 即校园内绿地的滞蓄能力不足以抵御校园内 50 年一遇降雨强度下产生的雨水量。

(2) 校园内绿地土壤稳定入渗率平均为 0.12 cm/min, 土壤在降雨过程中可稳定入渗雨水量为 $23\,164.12\text{ m}^3/\text{h}$ 。

(3) 综合校园内各植被结构类型绿地的单位土壤入渗能力, 较疏松的乔木-灌木-草植被结构的绿地单位面积土壤的综合滞蓄性能最好, 为 0.33 m^3 。

(4) 校园内植被冠层截留总量为 $1\,622.72\text{ m}^3$, 截留率为 2.26%。通过校园绿地中植被截留量的分布可知, 两种及两种以上植被结构, 且有乔木的复合植被结构类型绿地的截留能力较强。

(5) 根据对校园内绿地滞蓄能力的研

究, 绿地滞蓄能力与土壤性质、植被结构类型、和植被生长状况有关, 绿地的滞蓄能力充分发挥的情况下可解决大部分的降雨量, 并且通过对绿地中土壤条件和植被结构的改善优化, 提高绿地的滞蓄能力。

参考文献

- [1] 牛帅, 黄津辉, 曹磊, 等. 基于水文循环的低影响开发效果评价[J]. 建筑节能, 2015, 43(2): 79-84.
(NIU Shuai, HUANG Jinhui, CAO Lei, et al. Evaluation on the effect of low impact development for stormwater management system on the hydrologic cycle[J]. Building energy efficiency, 2015, 43(2): 79-84.)
- [2] 张云路, 李雄, 邵明, 等. 基于城市绿地系统优化的绿地雨洪管理规划研究: 以通辽市为例[J]. 城市发展研究, 2018, 25(1): 97-102.
(ZHANG Yunlu, LI Xiong, SHAO Ming, et al. Study on green space stormwater management based on urban green space system optimization: a case study of Tongliao[J]. Urban development research, 2018, 25(1): 97-102.)
- [3] 孙挺, 倪广恒, 唐莉华, 等. 绿化屋顶雨水滞蓄能力试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 44-48.
(SUN Ting, NI Guangheng, TANG Lihua, et al. Experimental study on green roof stormwater retention[J]. Journal of hydroelectric engineering,

- 2012,31(3):44-48.)
- [4] 于冰沁,车生泉,严巍,等.上海海绵城市绿地建设指标及低影响开发技术示范[J].风景园林,2016(3):21-26.
(YU Bingqin, CHE Shengquan, YAN Wei, et al. Construction indexes and practices of suitable low impact development techniques at Shanghai urban green space[J]. Landscape architecture, 2016(3):21-26.)
- [5] 孟莹莹,陈茂福,张书函.植草沟滞蓄城市道路雨水的试验及模拟[J].水科学进展,2018,29(5):636-644.
(MENG Yingying, CHEN Maofu, ZHANG Shuhan. Experiment and simulation of the vegetative swale to control road stormwater[J]. Advances in water science, 2018, 29(5):636-644.)
- [6] 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.
(ZHANG Biao, XIE Gaodi, XUE Kang, et al. Evaluation of rainwater runoff storage by urban green spaces in Beijing[J]. Acta ecologica sinica, 2011, 31(13):3839-3845.)
- [7] 潘文东,潘学渊,刘琳琳.北方城市利用绿地滞蓄汛雨的分析与研究[J].水土保持研究,2007(2):127-128.
(PAN Wendong, PAN Xueyuan, LIU Linlin. Study and analysis on greenbelt's floodwater-storing in the north city[J]. Research of soil and water conservation, 2007(2):127-128.)
- [8] 于冰沁,车生泉,严巍等.上海城市现状绿地雨洪调蓄能力评估研究[J].中国园林,2017,33(3):62-66.
(YU Bingqin, CHE Shengquan, YAN Wei, et al. Assessment on the capacity of rain water management by multi-disciplinary methods[J]. Chinese landscape architecture, 2017, 33(3):62-66.)
- [9] 王佩将.城市森林对降雨径流的调蓄研究:以长春市为例[D].长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2017.
(WANG Peijiang. Study on rainwater runoff regulation of urban forest: a case study in changchun city[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.)
- [10] 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.)
- [11] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
(SHAO Mingan, WANG Quanjiu, HUANG Mingbin. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.)
- [12] DE ROO, A P J, WESSELING, C G, CrREMERS, N H D T, et al. LISEM: a new physical-based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment, theory and implementation[M]. London: Palgrave Macmillan, 1994.
- [13] 孙彩红,苏泳娴,韩留生,等.广东省2004—2016年植被冠层降雨截留模拟及时空变化特征[J].生态学报,2020,40(7):2252-2266.
(SUN Caihong, SU Yongxian, HAN Liusheng, et al. The simulation and spatial temporal variations of atmospheric rainfall interception by vegetation canopies based on MODIS LAI data at the basin scale in the Guangdong province from 2004 to 2016[J]. Acta ecologica sinica, 2020, 40(7):2252-2266.)
- [14] 云增鑫,郑光,马利霞,等.联合主被动遥感数据定量评价林下植被对叶面积指数估算的影响[J].遥感技术与应用,2019,34(3):583-594.
(YUN Zengxin, ZHENG Guang, MA Lixia, et al. Evaluate quantitatively effects of understory on leaf area index(LAI) estimation combining active and passive remote sensing data[J]. Remote sensing technology and application, 2019, 34(3):583-594.)
- [15] 杨展览,李希圣,黄伟雄.地理学大辞典[M].合肥:安徽人民出版社,1992.
(YANG Zhanzhan, LI Xisheng, HUANG Weixiong. A dictionary of geography[M]. Hefei: Anhui People's Publishing House, 1992.)
- [16] 关连珠.普通土壤学[M].北京:中国农业大学出版社,2007.
(GUAN Lianzhu. General soil science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.)
- [17] 马维玲,石培礼,宗宁,等.太行山区主要森林生态系统水源涵养能力[J].中国生态农业学报,2017,25(4):478-489.
(MA Weiling, SHI Peili, ZONG Ning, et al. Water conservation capacity of forest ecosystems in Taihang mountain[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2017, 25(4):478-489.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)