

# 沈阳市雨涝源头控制措施关键影响因素分析

马兴冠, 纪文娟, 王梦琪, 姜伟, 傅金祥

(沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 沈阳 110168)

**摘 要:**基于沈阳市 1975—2005 年降雨统计数据,通过芝加哥降雨过程线法建立沈阳市的设计暴雨雨型模型,研究了土壤稳定入渗速率  $K$ 、一系列重现期  $P$  条件下的低势绿地下凹深度  $\Delta h$ 、低势绿地面积率  $f$  与渗蓄率  $N$  的关系,分析了低势绿地设计的关键参数  $\Delta h$  和  $f$  的合理范围。结果表明:沈阳市降雨强度随着降雨历时先增大后减小,主体表现为单峰雨型,降雨历时在 48 min 时降雨强度达到最大。在一定的降雨强度条件下, $\Delta h$  和  $f$  越大, $K$  值越高,低势绿地的渗蓄效果越明显。为了保证实际降雨的完全下渗, $K$  选取较低值  $1.0 \times 10^{-6}$  m/s;居民区绿化面积在 15%~20% 范围内时,低势绿地下凹深度宜在 230~250 mm;工业区绿化面积在 20%~40% 范围内时,低势绿地下凹深度宜在 120~250 mm。如果通过土壤改良将  $K$  提高到  $5 \times 10^{-6}$  m/s,下凹深度 100~250 mm 即可使得沈阳市 98% 的降雨量有效渗蓄。

**关键词:**源头控制措施;低势绿地面积率;下凹深度;渗蓄率

**中图分类号:** TU991.11<sup>+</sup>4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2014)03-0201-07

## Analysis on Critical Parameters of Control Measure of Waterlogging Source in Shenyang City

MA Xing-guan, JI Wen-juan, WANG Meng-qi, JIANG Wei, FU Jin-xiang

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** Based on the rainfall statistical data from 1975 to 2005 in Shenyang City, design of storm rainfall patterns of the city was established by Keifer&Chu. The relationship between area proportion ( $f$ ) and storage-infiltration efficiency ( $N$ ) of low elevation greenbelt was investigated under the condition of constant infiltration rate ( $K$ ), a series of the design storm recurrence interval ( $P$ ) and depth ( $\Delta h$ ). The reasonable ranges of the critical parameters,  $\Delta h$  and  $f$ , were analyzed. The results showed that the rainfall intensity increases firstly and then decreases with rainfall durations, exhibiting a peak design storm rainfall, where the heaviest rainfall intensity appears at 48 min of rainfall durations. Under the special rainfall intensity, the value of  $K$  increases with  $\Delta h$  and  $f$ , reflecting more remarkable storage-infiltration performance. In order to ensure a complete infiltration for actual rainfall, the smaller value of  $K$  of  $1.0 \times 10^{-6}$  m/s was selected. In such case, the  $\Delta h$  should be 230~250 mm for residential area with the  $f$  of 15%~20%, while it should be 120~250 mm for industrial area with the  $f$  of 20%~40%. If the  $K$  increases to  $5 \times 10^{-6}$  m/s by soil improvement,  $\Delta h$  among the range of 100~250 mm can achieve an effective storage and infiltration for 98% of rainfall events in Shenyang City.

**Key words:** control measure of waterlogging source; area proportion; depth; storage-infiltration efficiency

城市化建设与经济发展使得城市面临严峻的雨涝问题。城市内涝的传统解决策略往往从给排水角度围绕以排为主的传统理念,遵循“末端控制”被动的解决城市内涝问题。这种处理模式不仅增加了市政

管网的压力,降雨初期大量污染物也对河道造成污染;同时,浪费了大量的雨水资源,使得地下水得不到补给。另一方面,单一提高标准、重新修订暴雨强度公式等方式只能解决一部分水涝问题,难以综合防

收稿日期:2013-07-15

修回日期:2013-10-16

资助项目:国家水体污染控制与治理重大科技专项基金资助项目(2012ZX07505-002-02;2012ZX07505-004-01;2012ZX07208-012-05;2009ZX07208-002-005);住房和城乡建设部科技发展基金资助项目(2011-k6-13)

作者简介:马兴冠(1972—),男,辽宁省大连市人,博士,教授,主要从事环境工程及环境科学研究。E-mail: hj\_mxg@sju.edu.cn

通信作者:纪文娟(1987—),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事雨水资源化利用及城市内涝控制研究。E-mail: winjuj@163.com

治。因此,将“以排为主”的理念转变为“蓄、滞、渗、排”,综合新型源头控制措施和传统雨水基础设施将成为国内解决内涝问题的发展趋势。

新型源头控制措施是利用多功能调蓄设施来控制城市的水涝<sup>[1]</sup>,主要包括低势绿地、雨水花园、植被浅沟、透水铺砖等<sup>[2-3]</sup>。这种新型源头控制措施已在国内外具有广泛的应用,例如德国开发利用的“洼地—渗透”系统增强了雨水下渗和雨水径流滞留,使流域径流过程发生推移,峰值时间滞后;同时也减少了径流外排量,防止水涝的发生<sup>[4-5]</sup>。美国加州弗雷斯等许多城市建立了屋顶蓄水、草地、雨水花园和透水地面相结合的地表回灌系统,有效地实现了就地滞洪蓄水<sup>[6]</sup>。在新型源头控制措施中,低势绿地是利用下凹空间滞留渗蓄雨水径流、削减洪峰、减轻地表径流污染的一种低影响开发措施(Low Impact Design, LID),具有建设费用低、安全、便捷等特点<sup>[7-9]</sup>,其渗蓄效率的影响因素包括下凹式绿地面积率 $f$ 、绿地下凹深度 $\Delta h$ 、绿地土壤稳定入渗速率 $K$ 、设计暴雨重现期 $P$ 等。在各影响因素中, $\Delta h$ 与 $f$ 是低势绿地结构设计的关键参数。从低势绿地下凹深度角度考虑,增大 $\Delta h$ 与 $f$ 可以增加雨水径流渗蓄效率,但是受植物耐淹时间、汇水区域径流量、土地规划等因素的限制,不能无限制增加绿地的高程和面积;由于计算的目的、前提以及研究区域的差别,这两个参数的设计取值也会改变。李俊奇等<sup>[10]</sup>对北京地区的研究表明,植物耐淹时间为1~3 d条件下,下凹深度控制在50~250 mm的范围内是安全可行的。根据天津市的实际情况,邢国平等<sup>[11]</sup>认为绿地下凹100 mm、绿地率为30%,对1年一遇和2年一遇的雨水有70%入渗,可削减暴雨洪峰。聂发辉等<sup>[12]</sup>研究表明,由于上海市人口密度、绿地景观等因素限制,绿地下凹深度为50 mm比较合适;然而程江等<sup>[13]</sup>以雨洪滞蓄和削峰为目的,采用极端设计降雨,推荐上海低势绿地下凹深度为100~300 mm,绿地面积率10%~30%为宜。有研究认为广州省下凹绿地深度宜采用80~120 mm,既能避免高差过大,又可以有效降低城区径流深度;并且提出低势绿地的绿化面积率一般需达到10%以上<sup>[14-15]</sup>。由此看来,低势绿地设计的关键参数下凹深度和绿地面积率受稳定入渗速率、设计降雨重现期、植物耐淹时间等很多因素影响。对于特定城市内涝问题的解决,最有效的方法是通过该地区降雨雨型的统计分析,选择适宜的调控措施,并对关键设计参数进行调整优化。

雨涝渗蓄效应的影响因素和低势绿地设计参数的探讨已经成为国内该领域研究的热点<sup>[10-15]</sup>。本文

在已有研究的基础上,利用水量平衡原理,结合沈阳市1975—2005年降雨统计数据与雨型分析,考察沈阳市雨涝源头控制措施低势绿地的雨水渗蓄效应及主要影响因素,分析低势绿地设计过程中主要控制参数的合理范围,以为低势绿地在沈阳市绿地规划与建设中发挥削减雨水径流、缓减排水系统建设运行压力等效应应用的设计运行提供理论依据与实践指导。

## 1 低势绿地雨水量平衡分析与计算

### 1.1 雨水量平衡分析

雨水径流汇入低势绿地后,首先通过低势绿地表层土壤下渗;雨水径流过大时流入绿地上的雨水口,进入穿孔渗透管中集蓄向底层土壤中下渗;最后,当径流超过低势绿地集蓄和渗透能力时,就近溢流排入雨水管道。计算时段内各水文要素之间存在的水量平衡关系式见公式(1)。

$$Q_0 + U_0 = S + Z + D + U_1 + Q_2 \quad (1)$$

式中: $Q_0$ ——计算时段进入低势绿地的雨水径流量( $\text{m}^3$ ); $U_0$ ——计算时段开始时低势绿地的蓄水量( $\text{m}^3$ ); $S$ ——计算时段内低势绿地的雨水下渗量( $\text{m}^3$ ); $Z$ ——计算时段内低势绿地的雨水蒸发量(不包括植物的蒸腾量)( $\text{m}^3$ ); $D$ ——计算时段内低势绿地的植物蒸腾水量( $\text{m}^3$ ); $U_1$ ——计算时段结束时低势绿地的最大蓄水量( $\text{m}^3$ ); $Q_2$ ——计算时段内低势绿地的雨水溢流外排量( $\text{m}^3$ )。

### 1.2 计算方法

在某场降雨内,低势绿地对雨水的渗蓄效应由雨水径流渗蓄率 $N$ 来表示,即降雨过程中绿地渗蓄雨量占汇入绿地总雨水径流量的百分比。一般计算时段按一场降雨来计算;降雨历时较短时,雨水蒸发量和植物蒸腾作用较小, $Z_1$ 可以忽略。由于绿地植物的淹没时间不宜过长,绿地调蓄的雨水在雨后短时间内入渗排空,所以假设降雨开始低势绿地内无蓄水,即 $U_0=0$ 。假设设计暴雨重现期内的雨水径流全部渗透利用,不产生外排,即 $Q_2=0$ 。

对于特定的土壤,其不同初始含水率对入渗速率有较大影响。在入渗初期,土壤入渗速率随着土壤含水率的增加而减小,累积入渗量和稳定入渗率增大;随着时间的延续,含水率对入渗的影响减小以致最终可以忽略。此外,有机质含量丰富的草地土壤入渗率对含水率的敏感性较弱。本文采用不同数值的土壤稳定入渗速率,可以近似理解为不同时段土壤入渗速率的平均。另一方面,沈阳不同类型土壤的含水率与入渗速率之间尚未有明确的函数关系。为了在定量

前提下简化计算,雨水下渗量按土壤的渗透系数和绿化面积确定,忽略植物截留、土壤含水率对雨水下渗的影响,而且设计值也更偏安全。因此,雨水下渗量按土壤稳定入渗速率和绿化面积确定是合理可行的。雨水径流渗蓄率计算公式如(2)所示,下渗量公式如(3)所示,径流蓄水量公式如(4)所示。

$$N=\frac{S+U_1}{(Q_ZF_1C_n+Q_ZF_2)/1000}\times100\% \quad (2)$$

式中: $Q_Z$ ——降雨量(mm); $F_1$ ——绿地服务区域的面积( $m^2$ ); $F_2$ ——低势绿地的面积( $m^2$ ); $C_n$ ——绿地服务区域的径流系数。

$$S=60K\cdot J\cdot F_2\cdot T \quad (3)$$

式中: $K$ ——土壤稳定入渗速率(m/s); $J$ ——水力坡度,一般取  $J=1$ ;  $T$ ——计算时段(min)。

$$U_1=F_2\cdot\Delta h \quad (4)$$

式中: $\Delta h$ ——下凹深度(m)。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨过程设计

根据应用数理统计方法,分析沈阳市 1960—2005 年近 45 a 的短历时降雨量数据和多个气象站逐分钟降雨记录,归纳实际降雨过程。通过模糊模式识别法与目估法相结合<sup>[16]</sup>进行降雨历时为 120 min 的雨型划分,可以得出:① 沈阳市雨型主体为单峰雨型,其雨量集中,易引起城市内涝;② 强度均匀的降雨占的比例较少,所以不宜采用均匀雨型作为沈阳市设计暴雨雨型,而考虑用非均匀设计雨型比较合理。非均匀设计雨型的方法有 Yen & Chow 法、Huff 法、芝加哥过程曲线法等<sup>[17-18]</sup>。大量研究表明<sup>[19-21]</sup>,利用芝加哥过程曲线法的设计雨型具有计算方便、洪峰不受降雨历时限制、在城市雨水径流模型中应用效果好等特点。因此,本文基于芝加哥过程曲线法建立沈阳市的设计暴雨分配雨型;为了避免雨峰过于尖瘦的缺点,不同重现期下的降雨过程分布采用 5 min 为单位时段的柱状过程来表示,雨峰的相对位置取 0.4<sup>[22]</sup>,如图 1 所示;在不同重现期的降雨特性统计结果见表 1。可以看出,在不同重现期,降雨强度均随着降雨历时先增大后减小,主体表现为单峰雨型,降雨历时在 48 min 降雨强度达到最大。重现期从 1 a 增加到 100 a,峰值降雨强度随之从 2.21 mm/min 增加到 5.57 mm/min。

### 2.2 渗蓄效应

根据表 1 的特性参数统计数据,对沈阳市低势绿地的渗蓄率  $N$  进行计算。土壤稳定入渗速率  $K$ 、低势绿地面积率  $f$ 、下凹深度  $\Delta h$ 、重现期  $P$  均是影响低

势绿地雨水径流渗蓄效应的因素。 $K$  受土壤含水量、导水率、植被、土质等众多因素影响差异较大,最小范围为  $10^{-8}\sim10^{-7}$  m/s<sup>[23]</sup>。由于沈阳市绿地土壤一般为棕壤土,根据现场模拟降雨实验及相关文献<sup>[24]</sup>, $K$  可以达到  $1\times10^{-6}\sim3\times10^{-6}$  m/s,经过土壤改良之后可达  $5\times10^{-6}$  m/s。因此,在本文中  $K$  取值  $1\times10^{-7},1\times10^{-6},3\times10^{-6},5\times10^{-6}$  m/s。根据已有研究<sup>[12]</sup>, $f$  一般需要达到 10% 以上,大多数城市一般为 15%~45%,本文中  $f$  取较宽的范围 10%~60%。根据各个城市  $\Delta h$  的统计,对沈阳市  $\Delta h$  取 50~300 mm。按照 2.2 给出的计算方法,分别计算  $f$  值为 10%,30%, $\Delta h$  值为 50 mm、200 mm 边界条件下  $P$  与  $N$  的关系,结果见图 2。计算  $\Delta h$  值为 100 mm, $P$  值为 5 a,10 a 边界条件下,不同土壤稳定入渗速率情况下的面积率为 10%~60%的低势绿地对雨水径流渗蓄效应的影响,结果见图 3;计算  $f$  值为 20%, $P$  值为 5 a,10 a 边界条件下,不同土壤稳定入渗速率情况下  $\Delta h$  为 50~300 mm 的低势绿地对雨水径流渗蓄效应的影响,结果见图 4。

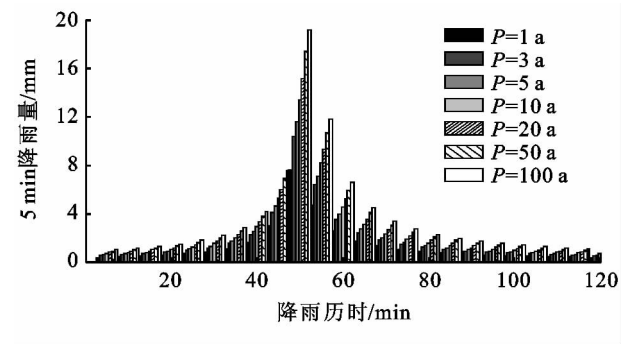


图 1 不同重现期下的 2 h 降雨过程分布

表 1 沈阳市降雨特性统计

重现期/ a	降雨量/ mm	峰值降雨强度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	平均降雨强度/ (mm·min <sup>-1</sup> )
1	34.2	2.21	0.28
3	46.5	3.01	0.39
5	52.1	3.37	0.43
10	60.0	3.88	0.50
20	68.0	4.40	0.56
50	78.2	5.06	0.65
100	86.0	5.57	0.72

图 2 为不同下凹深度  $\Delta h$  与绿地面积率  $f$  条件下,降雨重现期  $P$  与渗蓄率  $N$  的关系。可以看出,在不同的下凹深度  $\Delta h$  和绿地面积率  $f$ 、重现期  $P$  为 1~10 a 范围内,低势绿地对雨水径流的渗蓄率  $N$  随着重现期  $P$  的增大而快速下降;当  $P$  大于 10 a,渗蓄率  $N$  平缓降低。另外, $N$  随着土壤稳定入渗速率  $K$  的增大而增大。

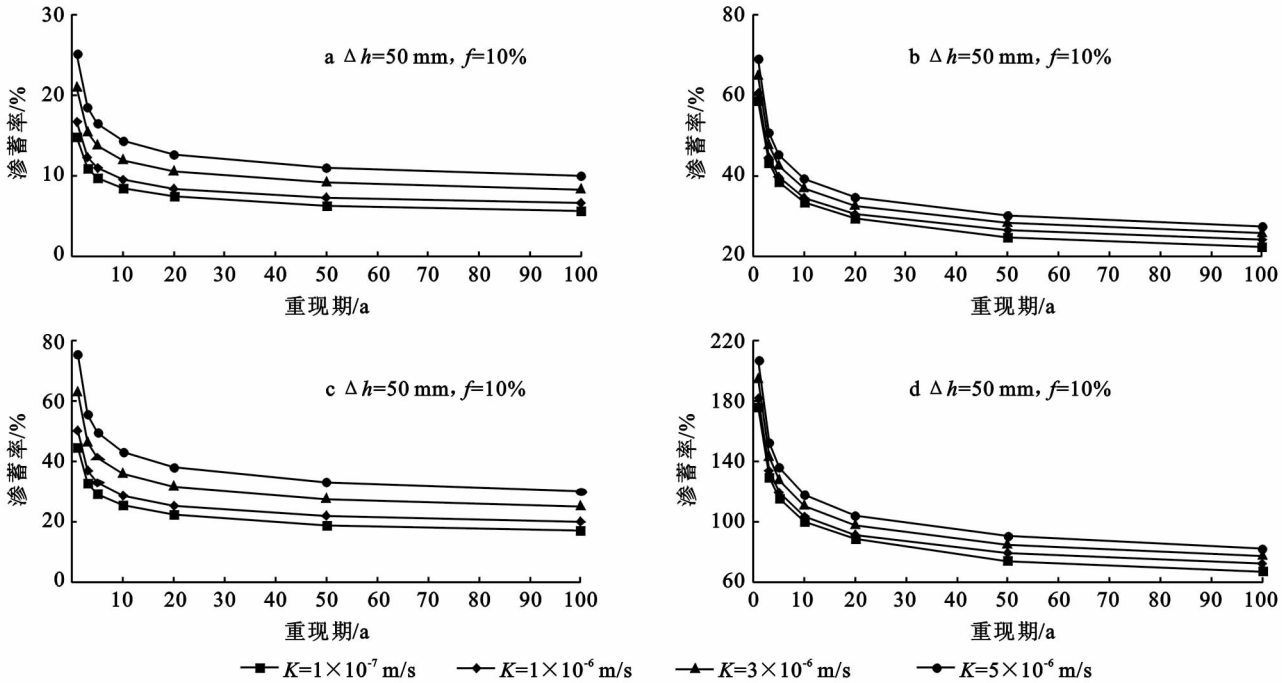


图 2 不同土壤稳定入渗速率  $K$  条件下重现期  $P$  与蓄渗效率  $N$  的关系

对图 2a—d 进行两两比较可以看出,在相同的绿地面积率  $f$  条件下,渗蓄率  $N$  随着下凹深度  $\Delta h$  的增加而增大。例如在 10% 的面积率条件下,随着  $\Delta h$  从 50 mm 增加到 200 mm,  $N$  从 5%~25% 范围增加到 22%~70% (图 2a 和 b)。在相同的  $\Delta h$  条件下,渗蓄率  $N$  随着绿地面积率  $f$  的增加而增大。例如对于 50 mm 的下凹深度,随着  $f$  从 10% 增加到 30%,  $N$  值从 5%~25% 范围增加到 18%~75% (图 2a 和 c)。当绿地面积率  $f$  和下凹深度  $\Delta h$  同时增加,可以使得渗蓄率  $N$  大幅升高;在 30% 和 200 mm 条件下,  $N$  值达到 70%~210% 范围,而且在此条件下低势绿地对 10 a 一遇的降雨均可 100% 的渗蓄,当土壤稳定入渗速率  $K$  为  $5 \times 10^{-6}$  m/s 时,可将 50 年一遇的降雨渗蓄 90% 以上 (图 2d)。

图 3 为不同下凹深度  $\Delta h$  条件下的土壤稳定入渗速率  $K$  与渗蓄率  $N$  的关系。可以看出,在一定的  $\Delta h$  和  $f$  条件下,渗蓄率  $N$  随着土壤稳定入渗速率  $K$  单

调增加。由图 3a 可以看出,当  $\Delta h$  大于 250 mm 时,在所有的土壤稳定入渗速率下的低势绿地渗蓄率均超过 100%,即在此边界条件下,低势绿地还可以渗蓄比其服务面积更大区域的雨水径流。由 3b 可以看出,对于 10 a 一遇的降雨,绿地渗蓄率较图 3a 明显偏低。这使得下凹深度  $\Delta h$  临界值从 250 mm 增加至 300 mm,即在  $\Delta h$  为 300 mm 条件下,所有土壤稳定入渗速率下的低势绿地渗蓄率均超过 100%。

图 4 为下凹深度  $\Delta h$  为 100 mm、不同低势绿地面积率  $f$  条件下的土壤稳定入渗速率  $K$  与渗蓄率  $N$  的关系。在其它参数相同的条件下,渗蓄率随着土壤稳定入渗速率的增大而单调增加。在相同的绿地面积率和土壤稳定入渗速率条件下,降雨重现期为 5 a 的渗蓄率高于 10 a 的渗蓄率。当  $f$  值为 20%,  $K$  值  $5 \times 10^{-5}$  m/s 时,低势绿地对 5 a 一遇的雨水基本全部渗蓄 (图 4a)。当  $f$  值为 30%,  $K$  值  $5 \times 10^{-5}$  m/s 时,低势绿地对 10 a 一遇的雨水基本全部渗蓄 (图 4b)。

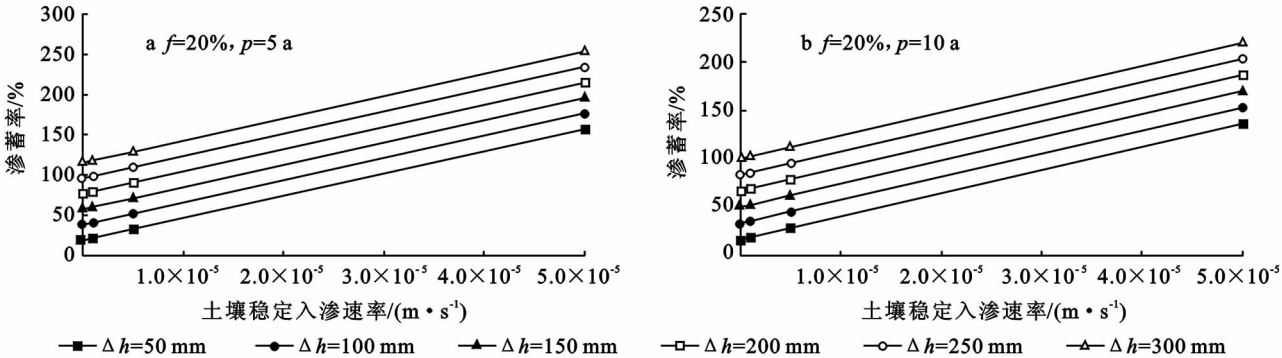


图 3 不同下凹深度  $\Delta h$  条件下土壤稳定入渗速率  $K$  与蓄渗效率  $N$  关系

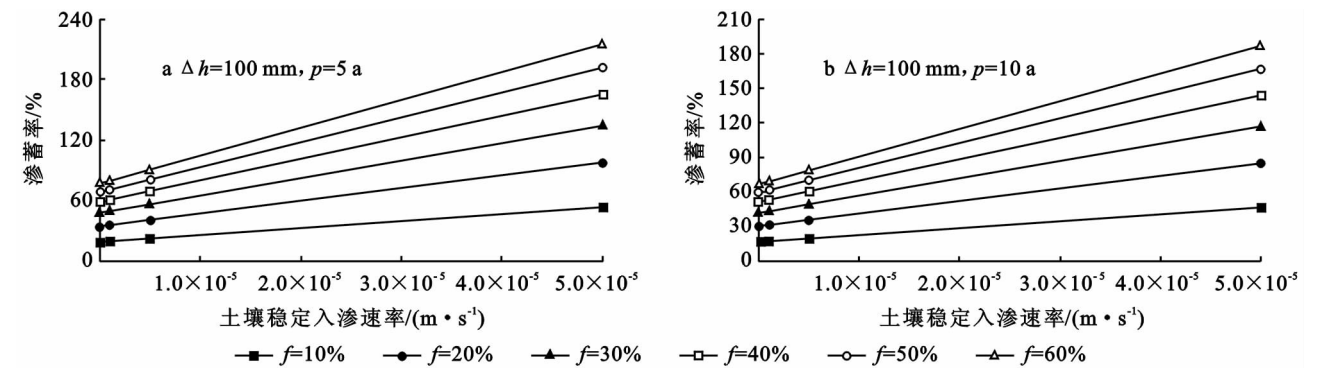


图 4 不同低势绿地面积率  $f$  条件下土壤稳定入渗速率  $K$  与蓄渗效率  $N$  关系

2.3 低势绿地的关键性设计

$\Delta h$  与  $f$  是低势绿地设计的两个关键参数。为了确定合理的  $\Delta h$  和  $f$ , 使地势绿地能够拦蓄更高重现期的暴雨量, 提出临界面积比例  $f_0$ 。  $f_0$  定义为在一定重现期下、 $N = 100\%$  时的临界低势绿地面积。当实际的  $f > f_0$  时, 雨水径流零排放; 反之, 雨水有

外排。结合沈阳地区土壤稳定入渗速率、雨水设计重现期等影响低势绿地渗蓄率的因素, 对  $\Delta h$  和  $f$  的取值进行讨论。图 5 所示为不同设计重现期、土壤稳定速率为  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  和  $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  条件下的  $\Delta h$  与  $f_0$  以及雨水下渗时间的关系。

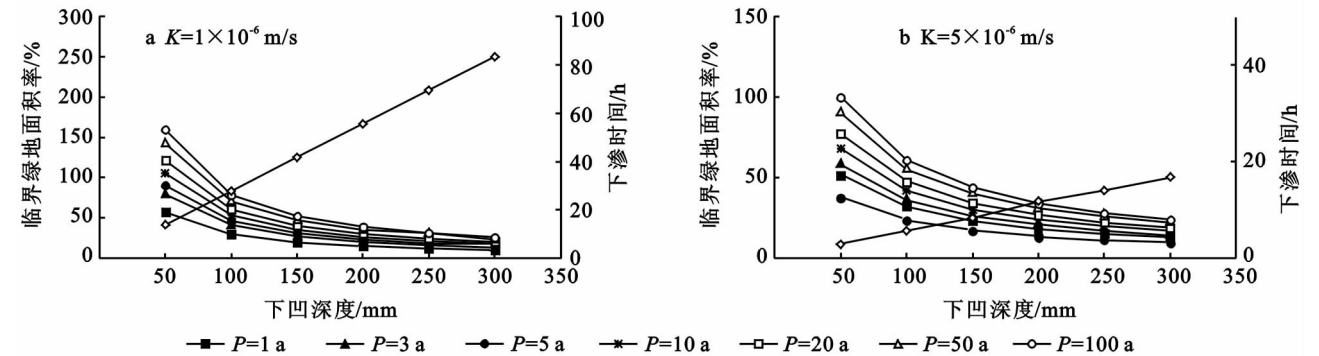


图 5 不同重现期下凹深度  $\Delta h$  与临界面积比  $f_0$ 、雨水下渗时间的关系

在一定的土壤稳定入渗速率条件下, 低势绿地临界面积比随着下凹深度的增加而减小, 随着降雨重现期的增大而增大; 雨水下渗时间随着下凹深度的增加而增加。从图 5a 可以看出,  $K$  值为  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,  $\Delta h$  值为 150 mm 时, 低势绿地面积率为 40% 以上即可全部渗蓄 20 a 一遇的降雨; 绿地面积率为 35% 可全部渗蓄 10 a 一遇的降雨。在此入渗速率下, 需要较长的下渗时间 45~85 h。从图 5b 可以看出,  $K$  值增大到  $5.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,  $\Delta h$  值为 250 mm 时, 设计重现期为 100 a 的降雨全部渗蓄所需的低势绿地面积率仅需 31%。在此入渗速率下, 下渗时间控制在 2.8~30 h。

2.4 讨论

低势绿地设计时, 稳定入渗速率应进行实测, 以评价其渗透能力。在设计计算时稳定入渗速率应选取下限, 保证完全下渗, 所以在本研究中稳定入渗速率取较低值  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。低势绿地应保证一定的最小构造深度以便实现其功能, 应不小于 50 mm<sup>[10,25]</sup>。经过计算, 当下凹深度值为 50 mm 时, 1 a

一遇降雨的全部渗蓄所需的临界绿化面积率高达 43%; 10 a 一遇降雨的全部渗蓄所需临界绿化面积率已经超过了 70%。然而, 根据《沈阳市绿化条例》规定, 居民绿地面积率一般为 20%~40%; 对一些要求有附加值的工业用地绿化率一般为 15%~20%。尽管城市绿地面积率一般大于低势绿地面积率, 结合本文理论计算和城市建设规定, 可以根据城市绿地面积率来估算低势绿地下凹深度。对于绿地面积率为 20%~40% 的居民用地, 低势绿地下凹深度高达 120 mm 可将 5 a 一遇的降雨量全部渗蓄, 低势绿地下凹深度高达 130 mm 以上时可将 10 a 一遇的降雨量全部渗蓄; 对于绿地面积率为 15%~20% 的工业用地, 低势绿地下凹深度高达 230 mm 以上可全部渗蓄 5 a 一遇的降雨量, 下凹深度高达 280 mm 以上时可将 10 a 一遇的降雨量全部渗蓄。另一方面, 当下凹深度超过 250 mm 时, 位于道路或建筑物周边的低势绿地会成为过往行人、车辆的安全隐患<sup>[26]</sup>。此外, 当下凹深度增加到 300 mm, 雨水全部下渗所需时间为 83.3 h(图 5), 超过了植物 1~3 d 的耐淹时间, 因此植物的耐淹

深度一般控制在 250 mm 以下<sup>[27-28]</sup>。由此看来,当下渗速率高于  $1.0 \times 10^{-6}$  m/s,居民区绿化面积在 20%~40% 范围内时,低势绿地下凹深度宜在 120~250 mm;工业区绿化面积在 15%~20% 范围内时,低势绿地下凹深度宜在 230~250 mm。

受城市特征和降雨特点等因素的影响,使得低势绿地的关键参数(下凹深度和绿地面积率)设计值存在差异,主要表现在以下几个方面:(1) 对于人口密度大、绿地景观要求高的城市,为了保证安全和不影响绿地植物的生长,要求低势绿地设计时尽量减少开挖量<sup>[29]</sup>。(2) 城市实际降雨特性、绿化面积、土壤下渗能力不同使得设计参数存在差异。(3) 研究目的与方法不同造成设计参数不同。本研究以雨洪滞蓄和削峰为目的,结合雨型过程线法对设计降雨量进行计算;然而以雨水资源化为目的城市,主要针对小降雨事件并考察长期运行效率<sup>[30]</sup>。(4) 校核所用的绿地植物淹没时间不同。例如,假设本研究校核的植物淹没时间采用 24 h,那么只有下凹深度在 50~80 mm 才满足低势绿地正常运行。

一般地,参数设计可根据项目的实际条件进行调整。沈阳市 45 a 降雨量统计数据表明,98% 以上的降雨事件的降雨量小于 50 mm,这相当于重现期介于 3~5 a 之间的降雨历时为 2 h 的降雨量。为了控制沈阳市 98% 的降雨量,将设计重现期从 1 a 提高到 5 a,则相同下凹深度的低势绿地的雨水渗蓄率将变得更小(图 2)。因此,通过改良土壤的方式将  $K$  提高到  $5 \times 10^{-6}$  m/s(图 5b),下凹深度值在 50~300 mm 的低势绿地的雨水下渗时间均小于 24 h。若下凹深度为 100 mm,低势绿地均可渗蓄沈阳市居民区重现期为 10 a 以下的降雨量;若下凹深度为 250 mm,则低势绿地均可渗蓄沈阳市几乎所有服务汇水面的重现期为 5 a 以下降雨量。因此,当  $K$  增大至  $5 \times 10^{-6}$  m/s 时,下凹深度 100~250 mm 即可使得沈阳市 98% 的降雨量有效渗蓄。对于重现期高达 50 a,100 a 降雨,当绿化面积增大至 30% 以上,下凹深度增大到 250 mm 以上,将土壤稳定入渗速率  $K$  通过改良土壤方式提高到  $5 \times 10^{-6}$  m/s 时,单独利用低势绿地即可将 50 a 一遇的降雨渗蓄 90% 以上,将 100 a 一遇的降雨渗蓄 80% 以上(图 2)。然而,下凹深度超过 250 mm 造成绿地淹水时间过长,同时使绿地日常维护所需水量增大。对沈阳这个水资源相对比较缺乏的城市,以增大低势绿地面积率来提高雨水渗蓄效率并不是完全合理的。因此,对于重现期高达 50 a,100 a 降雨乃至更高的降雨,需结合其他的源头控制措施(如透水路面、渗透沟渠、多功能调蓄池等)达到增加雨水

渗蓄能力。比如可以利用立交桥附近的部分绿地建成多功能雨洪调蓄设施;可以在快速路或主干道两侧的绿地内建造低势绿地、雨水花园、渗透管渠、雨水塘等设施;可以在硬化铺装较大的停车场铺设低势绿地与植被浅沟,当停车场有足够空间情况下还可设计小型雨水塘,用以调蓄迅速汇流的雨水,防止停车场积水;也可以在交通量较小的道路、人行道和停车场采用透水铺装。此外,还应考虑路面污染物的控制问题,可采用截污措施避免对绿地的不利影响。

### 3 结论

结合沈阳市 1975—2005 年降雨统计数据,通过芝加哥降雨过程线法建立沈阳市的设计暴雨雨型模型,研究了土壤稳定入渗速率  $K$ 、一系列重现期  $P$  条件下的低势绿地下凹深度  $\Delta h$ 、低势绿地面积率  $f$  与渗蓄率  $N$  的关系,分析了低势绿地设计的关键参数  $\Delta h$  和  $f$  的合理范围,得出以下的结论。

(1) 沈阳市降雨强度随着降雨历时先增大后减小,主体表现为单峰雨型,降雨历时在 48 min 时降雨强度达到最大。

(2) 在一定的降雨强度条件下,下凹深度  $\Delta h$  和绿地面积率  $f$  越大,土壤稳定入渗速率  $K$  值越高,低势绿地的渗蓄效果越明显。为了保证实际降雨的完全下渗, $K$  选取较低值  $1.0 \times 10^{-6}$  m/s;居民区绿化面积在 15%~20% 范围内时,低势绿地下凹深度宜在 230~250 mm;工业区绿化面积在 20%~40% 范围内时,低势绿地下凹深度宜在 120~250 mm。

(3) 通过土壤改良将  $K$  提高到  $5 \times 10^{-6}$  m/s,下凹深度 100~250 mm 即可使得沈阳市 98% 的降雨量有效渗蓄。沈阳市低势绿地的设计宜根据实际规划要求和地理条件进行相关参数调整,对于重现期高达 50 a,100 a 降雨可结合其他的源头控制措施来增加雨水渗蓄能力。

#### 参考文献:

- [1] 周健,王建龙,车伍. 低影响开发与绿色建筑[J]. 中国给水排水,2011,27(20):17-20.
- [2] Patric L. Brezonik, Teresa H. Stadelmann. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota[J]. Water Research,2002,36(7):1743-1757.
- [3] 晋存田,赵树旗,闫肖丽,等. 透水砖和下凹式绿地对城市雨洪的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(1):40-46.
- [4] Gantner K. Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden [D]. Berlin: Eigenverlag,

2002.

[5] 王紫雯,张略荣. 新型雨水排放系统:健全城市水文生态系统的领域[J]. 给水排水,2003,29(5):17-20.

[6] Brond Maestri, Byron N. Guide for mitigation of high-way stormwater runoff pollution[J]. The Science of the Total Environment,1987,59:467-476.

[7] 叶水根,刘红,孟光辉. 设计暴雨条件下凹式绿地的雨水蓄渗效果[J]. 中国农业大学学报:自然科学版,2001,6(6):53-58.

[8] 武云甫,任晓燕,章慧慧. 城市宜打埋规划建设下凹式绿地[J]. 给水排水,2001,27(10):67.

[9] Sieker F. On-site storewater management as an alternative to conventional sewer systems: a new concept spreading in Germany[J]. Water Science and Technology, 1998,38(10):65-71.

[10] 李俊奇,车武,池莲,等. 住区低势绿地设计的关键参数及影响因素分析[J]. 给水排水,2004,30(9):41-46.

[11] 邢国平,邵兆凤,周建芝,等. 天津市建设下凹绿地的雨水渗蓄效果分析[J]. 水土保持通报,2012,32(6):120-122.

[12] 聂发辉,李田,宁静. 概率分析法计算下凹式绿地对雨水径流的截留效率[J]. 中国给水排水,2008,24(12):53-56.

[13] 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.

[14] 蔡剑波,林宁,杜小松,等. 低势绿地对降低城市径流深度、径流系数的效果分析[J]. 城市道桥与防洪,2011(6):119-121.

[15] 侯国华,韩烈保,里吉跃. 草坪生物过滤与再生回用技术[J]. 北京林业大学学报,2006(增刊):95-99.

[16] 岑国平,沈晋. 城市设计暴雨雨型研究[J]. 水科学发展,1998,9(1):41-46.

[17] Keifer C J, Chu H H. Synthetic storm pattern for drainage design[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1957,83(4):1-25.

[18] Kibler D F. Urban Stormwater Hydrology[M]. American Geophysical Union's Water Resources Monograph, 1982:48-60.

[19] 刘金星. 城市暴雨径流模型及透水式管道设计方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

[20] 岑国平,詹道江. 城市雨水管道计算模型[J]. 中国给水排水,1993,19(1):37-40.

[21] 周文玉,孟昭鲁. 瞬时单位线法推求雨水管网入流流量过程线的研究[J]. 中国给水排水,1995,21(3):5-8.

[22] 曾晓岚,张智,丁文川,等. 城市雨水口地面暴雨径流模型研究[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(6):79-85.

[23] 郑兴,周孝德,计冰昕. 德国的雨水管理与其技术措施[J]. 中国给水排水,2005,21(2):104-106.

[24] 范昊明,李贵圆,周丽丽,等. 冻融作用对草甸土物理力学性质的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2011,42(1):114-117.

[25] 张丽,彭小金. 产流过程分析下凹绿地对城市雨水径流和汇流的影响[J]. 水科学与工程技术,2007(5):16-18.

[26] 张炜,车伍,李俊奇,等. 图解法用于雨水渗透下凹式绿地的设计[J]. 中国给水排水,2008,24(20):35-39.

[27] 丁纪闽,杨珏,黄利群,等. 北方城市下凹式绿地植物选择与配置模式[J]. 防汛与抗旱,2010(17):20-22.

[28] 陈祖军,黄士力,周建国. 关于区域水务规划若干问题的讨论[J]. 中国给水排水,2003,19(11):29-31.

[29] 尹海伟,徐建刚,孔繁花. 上海城市绿地宜人性对房价的影响[J]. 生态学报,2009,29(8):4492-4498.

[30] 张光义,聂发辉,宁静,等. 城市下凹式绿地长期运行渗蓄效率的概率分[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009,37(5):651-655.

(上接第 200 页)

[6] 李海防,卫伟,陈利项,等. 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展[J]. 水土保持研究,2013,20(1):287-292.

[7] 杨锋伟,陈丽华,朱清科,等. 晋西黄土区主要造林树种耗水特性分析[J]. 水土保持研究,2008,15(1):41-45.

[8] 侯兰功,肖洪浪,邹松兵,等. 黑河流域水循环特征研究[J]. 水土保持研究,2010,17(3):254-258.

[9] 黄枝英. 北京山区典型林分水分循环与水量平衡研究[D]. 北京:北京林业大学,2012.

[10] 张燕. 北京地区杨树人工林能量平衡和水量平衡[D]. 北京:北京林业大学,2012.

[11] 宋颖帕,谢小立. 土地利用方式对红壤坡地雨水利用和水量平衡的影响研究[J]. 水土保持通报,2009,29(3):97-102.

[12] 胡梦珺,刘文兆,赵姚阳. 黄土高原农、林、草地水量平衡异同比较分析[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(4):113-116.

[13] 阿拉木萨,蒋德明,骆永明. 半干旱区人工固沙灌丛发育过程土壤水分及水量平衡研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):107-110.

[14] Di Stefano C, Ferro V. Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid Mediterranean areas[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1997,68(3):189-199.

[15] Peacock C E, Hess T M. Estimating evapotranspiration from a reed bed using the Bowen ratio energy balance method[J]. Hydrological Processes,2004,18(2):247-260.

[16] 熊伟,王彦辉,徐德应. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J]. 林业科学,2003,39(2):38-40.