



下凹式绿地内气压变化及其对雨水蓄渗过程的影响

黄琪琪^{1,2,3}, 陈皓^{1,2,3}, 曲丹^{1,2,3}, 王渝超^{1,2,3}, 史鑫磊^{1,2,3}

1. 北京林业大学水体污染源控制技术北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学污染水体源控与生态修复技术北京高校工程研究中心, 北京 100083; 3. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083

摘要 通过研究不同降雨、土壤性质条件下下凹式绿地土内气压的变化及其对雨水蓄渗过程的影响, 从而对下凹式绿地的设计优化提供依据。研究发现, 下凹式绿地土内气压的产生时间随土层加深逐渐推迟, 表层土 (0~10 cm) 与中层土 (10~30 cm) 的气压峰值基本一致, 底层土 (30~40 cm) 气压峰值降低, 主要由于随着土层深度的增加土壤空气含量降低。下凹式绿地内的气压可分为潜伏期、攀升期、平滑期和缓慢下降期 4 个阶段。下凹式绿地土内气压受降雨强度影响显著。当降雨重现期由 1 a 增大到 3 a 时, 土内气压峰值由 697.8 Pa 增加至 1 101.5 Pa。气压产生后影响表层积水下渗, 当降雨重现期由 1 a 增加到 3 a 时, 所需渗水时长由 320 min 延长至 750 min, 降雨重现期为 5 a 时所需渗水时长延长至 960 min。土内气压随着土壤含水率的增加而增大, 当土壤含水率由 2.1% 增大到 19.3% 时, 气压峰值累计增长 97%, 稳渗期渗水速率由 0.68 mL·s⁻¹ 降低到 0.06 mL·s⁻¹, 60 min 内的径流入渗量减少 98.8%。植被覆盖层对下凹式绿地土内气压产生的作用较小。研究成果对提高下凹式绿地对于雨水径流的调蓄效能, 提高低影响设施对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用具有指导意义。

关键词 下凹式绿地; 土内气压; 雨水径流入渗; 入渗量

海绵城市建设是生态文明建设中的重点工作, 2022 年住建部发布了《关于进一步明确海绵城市建设工作有关要求的通知》^[1], 对提高低影响开发设施对雨水径流削减的效能提出了新的要求。下凹式绿地广泛应用于城市低影响开发建设中, 狭义的下凹式绿地指低于周边铺砌地面或道路在 200 mm 以内的绿地; 广义的下凹式绿地泛指具有一定的调蓄容积且可用于调蓄和净化径流雨水的绿地^[2], 可以通过渗透、滞留和吸附, 达到调节地表径流、减少径流污染物^[3] 和补充地下水的目的, 具有适应性强、消纳调蓄雨水径流效果好等特点^[4]。为了提高下凹式绿地对雨水的蓄渗效果, 研究人员通过优化下凹式绿地中填充基质^[5-6]、种植植物种类^[7-8]、绿地建设比例^[9-11] 等来提升下凹式绿地蓄渗雨水的的能力。然而, 在雨水渗透过程中下凹式绿地内部产生的气阻同样会阻碍雨水蓄渗。

水体向土壤渗透过程中会驱赶土壤孔隙中的空气, 使其受到挤压, 因此会产生土内气压^[12-15]。土内气压会对入渗水流产生阻碍效应, 减小土壤中水流的运动速率^[16]。在暴雨和漫灌等使土地表面快速产生积水的情况下, 土内气压更容易出现^[17-18], 并且由于城市绿地周围通常被不透水界面包裹, 所以相较于农田更易出现土内气压^[19], 通过在土壤表面种植植物可以有效降低土壤容重, 增大土壤的持水性以及饱和导水率^[20], 对土内气压可以产生一定削减作用。刘长殿等^[21] 认为在水体入渗过程中, 存在土内气压的土壤入渗能力较自然入渗减小约 15%。刘刚等^[22] 发现通气条件下的土壤稳渗速率是闭气条件土壤稳渗速率的 25 倍。

在降雨过程中, 周边硬质地面产生的雨水径流通过有组织汇流或漫流快速流入下凹式绿地表面, 在其表面产生积水, 下凹式绿地内部气体向外逸散的通路被阻断, 下渗径流会对土内禁锢气体产生压迫作用, 使得土内气压增大, 减小雨水渗水速率, 延长积水留存时间, 将会造成绿地表面生态和内部结构被破坏^[23]。因此, 揭示下凹式绿地土内气压的产生、变化规律, 阐明其对下凹式绿地蓄渗雨水的影响, 可以为下凹式绿地

收稿日期: 2023-12-05; 录用日期: 2024-03-07

第一作者: 黄琪琪 (1999—), 女, 硕士研究生, kikihuang0526@163.com; 通信作者: 曲丹 (1982—), 女, 博士, 教授, qudan@bjfu.edu.cn

前期设计提供科学依据，如土内气压产生情况严重，可以根据不同地理、气候环境对下凹式绿地进行设计，如在下凹式绿地内增设不同的导排气装置或采用侧向进水的方式减少土内气压，对于下凹式绿地的设计优化具有重要的指导意义。

本研究系统探究下凹式绿地不同深度禁锢土壤压力的产生及变化过程，揭示降雨强度、下凹式绿地内基质含水率、植被覆盖情况对禁锢土壤气体压力产生的影响，阐明禁锢压力变化对下凹式绿地蓄渗雨水的影响，可为下凹式绿地的优化设计提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 实验装置

试验装置如图 1 所示。由进水桶、蠕动泵、下凹式绿地和测压管 4 部分组成。下凹式绿地为有机玻璃制作 (长×高×宽=30×70×30 cm)，下凹式绿地装填基质由下至上分别为：厚度 2 cm 尖角砾石 (直径 0.9~1.2 cm)，厚度 5 cm 底泥，厚度 35 cm 棕壤土。下凹式绿地中间设置溢流口，溢流口高度为 10 cm，溢流口与底部储水槽相连。下凹式绿地侧壁从底部向上每隔 10 cm 布置 1 个测压孔，通过乳胶管与 U 型测压计相连接。

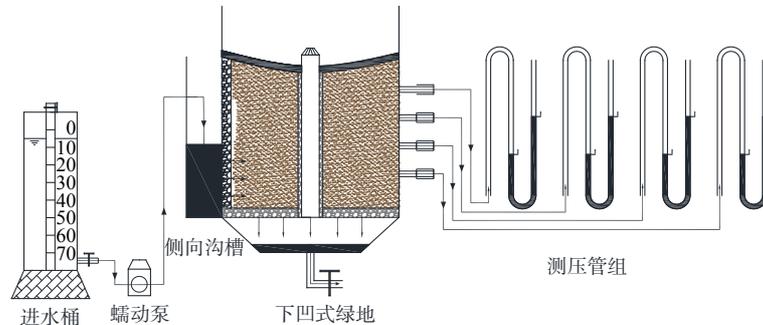


图 1 模拟下凹式绿地反应装置图

Fig. 1 Simulated concave green space reaction device

1.2 实验设计

研究降雨强度、土壤含水率和下凹式绿地表面植被覆盖对下凹式绿地内部气压产生和变化的影响。试验于北京林业大学校园内进行，根据式 (1) 计算不同参数下雨水径流量，流入下凹式绿地开展研究，具体参数和径流量如表 1 所示。试验过程中每隔 20 min 观测并记录与下凹式绿地连接的测压管读数，监测下凹式绿地内气压的产生和变化规律；通过观测降雨和径流下渗过程中下凹式绿地表面积水深度、入渗过程中土壤表面积水液面，监测下凹式绿地对雨水的蓄渗情况。土壤含水率为初始含水率，在确定土壤含水率的参数时，分别选择干燥、润湿、潮湿 3 种不同状态的均匀土壤进行称量及烘干处理，分别代表土壤低、中、高 3 个不同梯度的土壤基础含水率的情况。研究植被覆盖层对下凹式绿地土内气压及蓄渗效果的影响时，在相同土质条件下，选择下凹式绿地表面密集种植、培育 20 d 黑麦草与没有种植任何植物的 2 种实验条件作为对比参数。

表 1 试验所需变化条件及具体参数

Table 1 Change conditions and specific parameters required for the experiment

变化条件	具体变化参数	进水水量/(L·min ⁻¹)	进水时长/min
降雨强度	63.54 L·(s·hm ²) ⁻¹	0.13	
	88.12 L·(s·hm ²) ⁻¹	0.18	
	99.55 L·(s·hm ²) ⁻¹	0.20	
土壤含水率	2.10%		120
	8.10%	0.13	
	19.30%		
植被覆盖层	有	0.13	
	无		

$$Q_s = \Psi q F \tag{1}$$

式中： Q_s 为雨水设计流量，L·s⁻¹； q 为北京地区设计暴雨强度，L·(s·hm²)⁻¹，可采用北京暴雨强度公式进行

计算; 降雨历时 t 取 120 min, P 为设计暴雨重现期, a ; Ψ 为径流系数, 本研究取 0.85; F 为汇水面积, $F=0.37 \text{ m}^2$ 。

由于下凹式绿地在 $P<3 \text{ a}$ 时能起到最佳调蓄雨水径流、削减洪峰流量的作用, 并且根据北京市年平均降雨量, 小于 $P=1 \text{ a}$, $T=120 \text{ min}$ 的降雨量, 所以后续实验选择 $P=1 \text{ a}$ 为实验进水条件。

试验过程中每隔 20 min 观测并记录下凹式绿地表面积水深度。利用上述的设计进水流量, 可计算得到试验开始后不同时刻的进水总量, 减去同一时刻绿地表面积水体积, 即可得到该时刻下凹式绿地内累计的径流入渗量。根据不同时间间隔和径流入渗量可计算得到该时间段的渗水速率。下凹式绿地瞬时渗水速率和平均渗水速率计算如式 (2) 和式 (3) 所示。

$$v_p = \frac{v_2 - v_1}{t_s} \quad (2)$$

式中: v_p 为瞬时渗水速率, $\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$; $v_{1,2}$ 为相邻时刻累计渗水体积, mL ; t_s 为相邻时间差, s 。

$$v_{\text{平均}} = \frac{V_t}{t} \quad (3)$$

式中: $v_{\text{平均}}$ 为不同时间段内平均渗水速率, $\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$; V_t 为某时间段内渗水体积, mL ; t 为相应时间段时长, s 。

研究所列时间均是以降雨开始时刻为零时刻的试验时长。降雨时间 120 min 为开展试验的降雨历时, 也为总体试验时长的前 120 min, 试验开始 120 min 后降雨停止, 后续时间下凹式绿地表面及内部雨水径流继续蓄渗, 直至表面无积水。

2 结果与讨论

2.1 下凹式绿地气压的产生及变化过程

以降雨重现期 3 年, 降雨历时为 120 min 条件下的实验结果为例说明下凹式绿地表面积水、径流下渗和土内气压的产生情况, 具体如图 2 所示。从图中可以看出, 下凹式绿地表面的积水深度随着降雨时间推移逐渐增加, 降雨结束后逐渐减小, 渗水深度逐渐增大后不变, 试验开始后 120 min 时达到下凹式绿地的最大积水高度 11.2 cm (设计溢流高度为 10 cm, 实际运行过程中土壤沉积, 实际溢流高度为 11.2 cm), 此时下凹式绿地内的渗水深度为 20 cm。120 min 后降雨结束, 下凹式绿地表面积水继续向绿地内部渗透, 润湿锋顶点在 280 min 达到最大入渗深度 35 cm, 在 765 min 时下凹式绿地表面无积水, 入渗水体集中储存在绿地底部储水槽中。

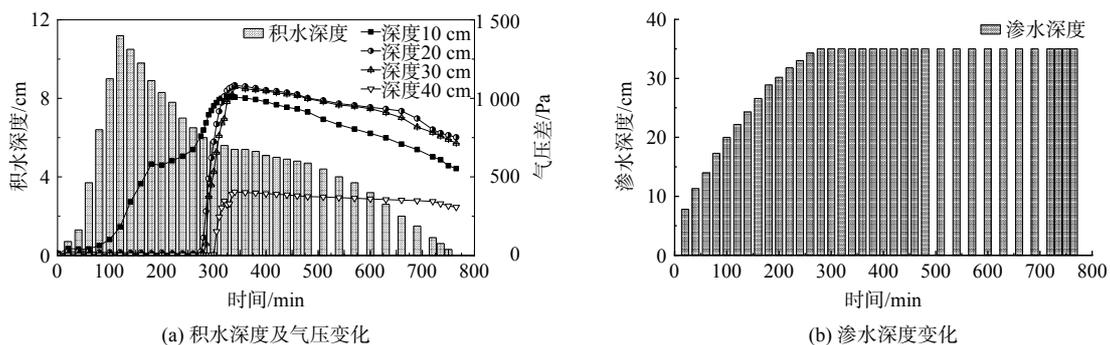


图 2 降雨-蓄渗过程中水体运动与土层内气压发生情况 ($P=3 \text{ a}$, $T=120 \text{ min}$)

Fig. 2 The movement of water bodies and the occurrence of air pressure in soil layers during the rainfall infiltration process ($P=3 \text{ a}$, $T=120 \text{ min}$)

不同深度土层出现气压时间和气压峰值存在差异。深度 10 cm 土层首先于 100 min 出现土内气压, 20 和 30 cm 土层在 280 min 开始出现气压, 40 cm 土层出现气压最晚, 为 305 min, 与不同深度土层处禁锢气体受到下渗水体挤压的时间先后相符合。土层深度 10、20 和 30 cm 出现的气压峰值基本相同, 在 1 012.3 Pa 左右, 40 cm 深度出现的气压峰值较低, 为 403.8 Pa。空气在土壤内分布不均匀是导致不同深度

土层产生气压峰值不同的原因。随着土层深度的增加，土壤孔隙中的气体含量呈指数倍数减小^[24]。土层深度 10 cm 的一部分禁锢土壤空气逸散到大气中，剩余气体产生的气压与深度 20、30 cm 接近，深度 40 cm 处土层禁锢气体量很少，所以产生气压较小。

下凹式绿地内的气压可分为潜伏期、攀升期、平滑期和缓慢下降期四个阶段，具体如图 3 所示，图 3(a) 表现入渗过程中土层深度 10 cm 处的气压变化规律，图 3(b) 为不同深度各阶段的时间分布。在测压管出现读数前可以视为下凹式绿地土内气压变化的潜伏期，这段时期下凹式绿地表面积水深度较浅，下渗的径流驱赶土壤孔隙中的空气，使其在相互连通的土内孔隙间逃逸，但仍未运动至测压管所监测的位置。随着表层积水深度逐渐增加和雨水持续入渗，不断挤压下凹式绿地内部气体^[25]，土内禁锢气体沿着土壤内由液相包裹形成的通道转移，土内气压在短时间内快速攀升，此时为气压的攀升期。下凹式绿地内气压达到峰值后，与表面的水头压力在短时间内处于平衡状态，气压暂时性维持稳定，此时为土内气压的平滑期。在度过短暂的平滑期后，随着土壤表面积水层高度下降，水头压力变小，绿地内气压变化进入缓慢下降期^[26]。在其他研究中，当表面积水深度始终不变的情况下，渗水过程中由于水头压力不变，土柱内的禁锢气体无法溢出，土柱内的气压在上升后将出现长期的类似稳定状态，而不会缓慢下降^[13]，当地表不产生积水时，土内气压到达某一阈值后土内禁锢气体会挣脱束缚，与外界联通，土内气压即会突然下降^[27]。与 10 cm 土层气压变化相比，20~40 cm 处土内气压潜伏期增加，攀升期缩短，说明较深处土层位置的气体在受到下渗水体挤压作用后，会在短时间内对下渗水体产生很大的阻碍作用。下凹式绿地土内气压具有伴随着雨水下渗持续产生作用的特点，在雨水下渗初期，雨水入渗深度较浅时并未有明显表现，随着雨水下渗深度的增加，土内气压对下渗雨水的阻碍作用逐渐增大，在某一时刻各个土层深度的土内气压所产生的阻碍作用会达到峰值，后续长期处于较高位置。

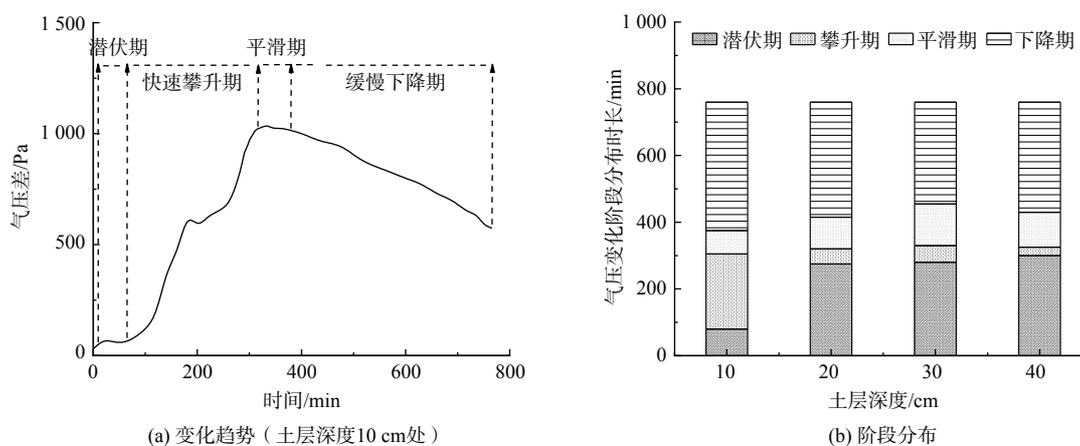


图 3 入渗过程中下凹式绿地内气压变化

Fig. 3 Changes in air pressure inside concave green spaces during infiltration

2.2 降雨强度对下凹式绿地内气压变化及雨水蓄渗的影响

地表产生积水时容易出现土内气压，且土内气压的大小与地表积水深度呈正相关^[27]。不同降雨强度下凹式绿地内气压变化及积水情况如表 2 所示。当降雨重现期为 1 a 时，下凹式绿地未发生溢流，积水峰值为 5.2 cm；降雨重现期为 3、5 a 时，均发生了溢流，因此积水峰值均为 11.2 cm。在降雨至 90~100 min 时，气压开始攀升，当重现期为 1、3、5 a 时，气压峰值分别为 697.8、1 012.3 和 1 101.5 Pa，由于绿地表面最大积水深度相同时会给土壤内部气体造成同样的压力，所以重现期为 3、5 a 时下凹式绿地最大土内气压接近。

表 2 不同降雨强度土内气压变化及积水情况

Table 2 Changes in soil pressure and water accumulation under different rainfall intensities

重现期 /a	降雨强度 /L·(s·hm ²) ⁻¹	积水峰值 /cm	气压攀升时 刻	气压峰值 /Pa
1	63.5	5.2	降雨90 min	697.8
3	88.1	11.2	降雨100 min	1 012.3
5	99.6	11.2	降雨100 min	1 101.5

土内气压的产生对下凹式绿地瞬时渗水速率的影响如图 4 所示。从图中可以看出, 渗水速率的变化过程分为 3 个阶段: 快速下降期、波动入渗期和稳定入渗期。快速下降期为降雨开始后 100 min 内, 这一阶段土壤的渗透系数因为表层土壤润湿而减小, 同时雨水下渗受到气体阻碍, 导致入渗速率迅速下降, 绿地表面产生积水。波动入渗期为 100~200 min, 这一阶段, 雨水不断下渗压迫土壤孔隙中的气体导致土内压力不断增加, 当其大于水头压力时会有气泡溢出, 渗水速率在瞬时有所回升, 存在波动但整体仍呈下降趋势^[25-26]。200 min 至渗水结束时段为稳定入渗期, 此时下凹式绿地的土壤达到饱和, 土壤致密性增大, 只有少量封闭性空隙含有空气^[28], 在此期间有少量土内空气与下渗水体发生位置置换, 气体外溢与雨水下渗趋于稳定^[29], 气压产生的阻碍作用有限, 渗水速率不再产生明显变化。

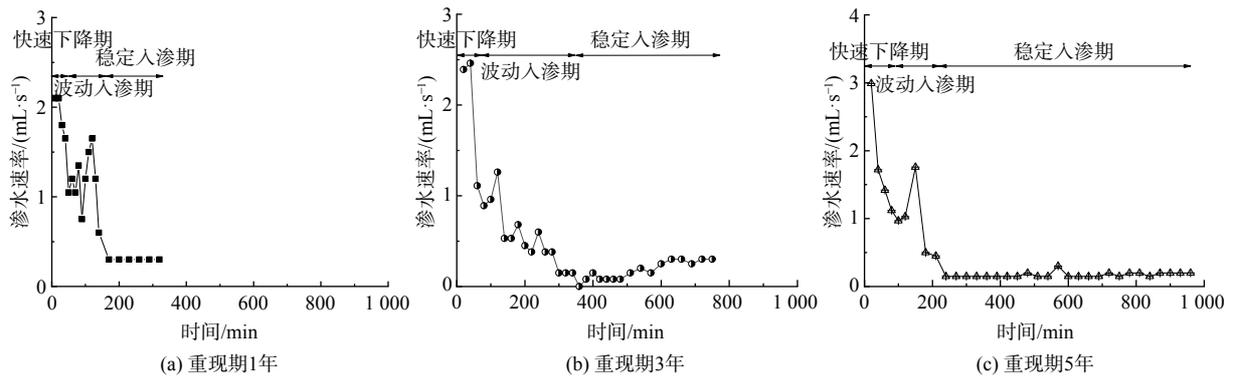


图 4 不同降雨强度下凹式绿地瞬时渗水速率 (降雨历时: 120 min)

Fig. 4 Instantaneous water infiltration rate of concave green spaces under different rainfall intensities (rainfall duration: 120 minutes)

进一步计算了不同降雨强度下凹式绿地的平均渗水速率, 如表 3 所示。3 种降雨强度下快速下降期的平均渗水速率均高于波动入渗期和稳定入渗期, 这是由于随着雨水的逐渐入渗, 表层水头压力逐渐降低、土内气压不断增加, 导致雨水入渗阻力逐渐增加, 渗水速率逐渐降低。不同阶段平均渗水速率随降雨强度增加的变化规律不同, 快速下降期的平均渗水速率随着降雨重现期的增加而增大, 而波动入渗期和稳定入渗期的平均渗水速率则随着降雨重现期的增加而减小。其原因是在快速下降期

间, 随着重现期由 1 a 增大到 5 a, 下凹式绿地表面积水带来水头压力增长为原来的 2.6 倍, 径流下渗的驱动力不断增加, 大于绿地内气压产生的阻力, 致使径流渗水速率增加。在波动入渗期和稳定入渗期, 绿地表面积水深度不断降低, 水体下渗的驱动力逐渐减小, 而在此阶段土内气压逐渐增大, 对雨水下渗带来更大的阻碍作用, 所以在此阶段渗水速率随着降雨强度的增大而减小。由于重现期为 3、5 a 时积水深度与气压大小接近, 所以在稳渗阶段两者渗水速率接近, 分别为 0.26 和 0.20 $\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.3 土壤含水率对下凹式绿地内气压变化及雨水蓄渗的影响

不同土壤含水率的下凹式绿地内气压变化及积水情况如表 4 所示。当土壤含水率分别为 2.1% 和 8.1% 时, 下凹式绿地土壤表面积水峰值分别为 5.2 和 5.0 cm; 当土壤含水率为 19.3% 时, 下凹式绿地发生了溢流, 溢流高度为 11.2 cm, 说明随着土壤含水率的升高, 下凹式绿地的渗透性能降低, 导致表面积水增加。下凹式绿地的气压攀升时刻随土壤含水率的增大逐渐提前, 分别为降雨开始后 100、60 和 20 min, 土内气压峰值由 697.8 Pa 增长到 1 372.0 Pa, 这是由于土壤种类以及粒径等理化性质相同时, 土壤紧实度随

表 3 不同降雨强度降雨-蓄渗过程中绿地平均渗水速率

Table 3 The average water infiltration rate of green spaces during the rainfall infiltration process with different rainfall intensities

重现期/a	平均渗水速率/ $(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$		
	快速下降期	波动入渗期	稳定入渗期
1	1.47	1.38	0.68
3	1.56	1.26	0.26
5	1.64	1.12	0.20

着含水率的增大而增大^[28]，导致土壤中连通性强的孔隙减少，土内禁锢气体越难逸散至大气中，雨水下渗时不断地挤压土内禁锢气体，更易形成土内气压^[30-31]。

不同土壤含水率下土内气压的产生对下凹式绿地瞬时渗水速率的影响如图5所示。当含水率为2.1%时，在土壤达到饱和的过程中渗水速率由 $2.1 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低到 $0.3 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ ；当含水率为8.1%时，渗水速率由 $1.87 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低到 $0.15 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ ；当含水率为19.3%时，渗水速率由 $0.97 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低到 $0.08 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 。渗水速率的快速下降期出现在降雨开始后100 min内，由于含水率较高土壤的基础渗透系数较小，因此当雨水径流汇入后渗水速率的下降幅度越大，快速下降阶段越短。在波动下降期，渗水速率存在波动但整体仍呈下降趋势^[25, 26]，随着土壤含水率的增大，绿地表面积水提供的水头压力增大，土内气压对下凹式绿地渗水速率的影响小于水头压力，所以含水率越高的土壤渗水速率出现的波动幅度越小。在150 min时渗水进入稳定渗透期，在此期间下凹式绿地的渗水速率受土壤孔隙中剩余空气的影响，含水率较高土壤的紧实度高，土壤孔隙中的剩余气体较多^[30]，导致其渗水速率较小^[32]，并且稳渗状态占整体蓄渗过程的比例增加。在雨水下渗时，随着土壤含水率增大，润湿锋与下部土壤交界处产生的水-气交换趋势减小，同时土壤渗透性降低，导致土壤迅速达到水相饱和，挤压气体流动通道，减慢气体移动速度，造成土内气体难以向上逸散，在润湿锋前端形成土内气压，阻碍水流下渗^[29, 33]。

表4 不同土壤含水率土内气压变化及积水情况

Table 4 Changes in soil air pressure and water accumulation under different soil moisture contents

土壤含水率	积水峰值/cm	气压攀升时刻	气压峰值/Pa
2.1%	5.2	降雨90 min	697.8
8.1%	5.0	降雨60 min	774.0
19.3%	11.2	降雨20 min	1372.0

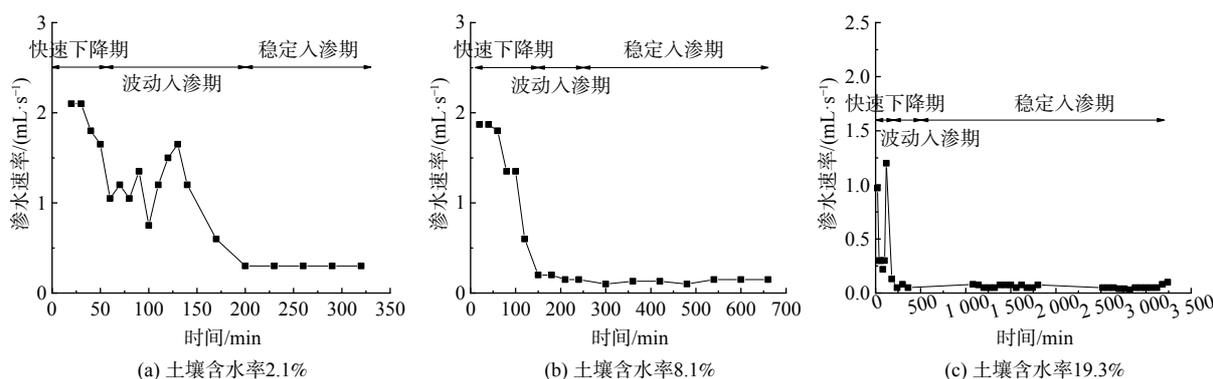


图5 不同土壤含水率下凹式绿地瞬时渗水速率

Fig. 5 Instantaneous water infiltration rate of concave green spaces under different soil moisture contents

进一步计算了不同土壤含水率的下凹式绿地的平均渗水速率，如表5所示。随着雨水的逐渐入渗，绿地表面水头压力减小、土内气压持续作用，3种土壤含水率的下凹式绿地平均渗水速率随着时间推移逐渐减小。不同阶段平均渗水速率随土壤含水率增加的变化规律不同，在波动入渗期和稳定入渗期，平均渗水速率随着土壤含水率的增大而减小，快速下降期渗水速率随土壤含水率的变化不规律，这是由于当土壤含水率为2.1%时，土壤饱和度和紧实度小，渗水过程中土内气压产生最晚，致使快速下降期的用时较长，所以在此阶段的平均渗水速率较小。在波动入渗期和稳定入渗期，由于含水率较高的土壤更易产生土内气压并且更难向外逸散^[30]，导致土壤含水率越高的下凹式绿地内部气压越大、作用时间越长，平均渗水速率随土壤含水率的增大而减小，当土壤含水率由2.1%增长到19.3%时，稳渗速率由 $0.68 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到 $0.06 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表5 不同土壤含水率降雨-蓄渗过程中绿地平均渗水速率

Table 5 The average infiltration rate of green space during rainfall infiltration process with different soil moisture contents

土壤含水率	渗水速率/ $(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$		
	快速下降期	波动入渗期	稳定入渗期
2.1%	1.47	1.38	0.68
8.1%	1.84	1.10	0.14
19.3%	0.97	0.46	0.06

2.4 植被覆盖对下凹式绿地内气压变化及雨水蓄渗的影响

土壤表面种植植被后会改变土地表层的物理性质, 从而影响下凹式绿地内表层土壤气压的发生情况^[34]。在土柱表层培育 20 d 黑麦草(根系影响约 4 cm 深)。如图 6 所示为不同覆盖层的下凹式绿地土内气压变化趋势。二者气压攀升都出现在降雨开始后的 20 min 内, 随着降雨的持续进行, 下凹式绿地表面积水产生的水头压力不断增大, 削弱了表层土壤的物理性质对土内气压的影响, 导致有无植被覆盖层的下凹式绿地气压产生规律一致, 但气压峰值存在一定差别。有植被覆盖的下凹式绿地气压出现时刻较晚并且峰值较低, 为 1 171.1 Pa, 无植被覆盖下凹式绿地气压峰值为 1 372.0 Pa, 这是由于种植草地的土壤表层的孔隙较大, 在绿地表面积水较浅时, 土壤孔隙为土内气体提供了更多的逃逸路线, 并且逃逸路线更为集中, 气体逃逸次数多, 所以其气压较小^[31]。

在整体降雨-蓄渗过程中, 渗水速率随着时间的推移逐渐减小。在快速下降期, 由于草地土壤表层的孔隙较大, 有植被覆盖的下凹式绿地的平均渗水速率远远大于无植被覆盖的下凹式绿地, 二者分别为 1.72 和 0.97 mL·s⁻¹, 在入渗过程中, 种植植被的下凹式绿地土壤表层的大孔隙分布不均匀, 使得不同位置入渗水流产生的水头压力不同, 禁锢气体产生不均匀的土内气压, 进而导致雨水下渗初期出现手指状不规则润湿锋, 并且入渗速率波动较大^[33,35]。随着下凹式绿地表面土层达到饱和, 土壤孔隙被下渗水体填满, 表层土壤的禁锢气体释放到大气中, 土内气压逐渐均匀, 植被覆盖层对渗水速率的影响逐渐削弱, 不同覆盖层的下凹式绿地表面积水深度与气压大小接近。

2.5 下凹式绿地内气压对雨水径流入渗量的影响

在降雨-蓄渗过程中, 下凹式绿地内部气压产生会降低其稳渗速率, 使得整个蓄渗过程的平均入渗速率降低、渗透系数降低、累计入渗量减少^[13,26]。不同条件对下凹式绿地内部气压和径流入渗量产生的影响不同, 如图 7 为下凹式绿地达到稳渗状态后 60 min 内的雨水径流入渗量。降雨重现期由 1 a 增长到 5 a 时, 下凹式绿地内部气压的峰值累计增长 58%, 径流入渗量随之逐步减少, 累计降幅为 49.8%; 土壤含水率由 2.1% 增长为 8.1% 后, 气压峰值增长 11.1%, 径流入渗量降低了 41.7%, 含水率再次增长为 19.3% 后径流入渗量又降低了 57.1%, 气压峰值增长 77.3%; 覆盖层改变时绿地内气压峰值增大 17.1%, 径流入渗量没有明显区别。由于雨水渗透过程中, 下渗水体逐渐替代土内禁锢气体的位置, 土内压力越大对于下渗水体的阻碍作用越大, 并且禁锢气体周围的土壤致密性越大, 使得土壤的渗透能力减弱^[33,36]。由此可见, 降雨强度和土壤含水率对于下凹式绿地土内气压的影响较为显著, 对下凹式绿地进入稳渗状态后蓄渗雨水径流的效果有更强的影响。

3 结论

1) 不同条件对下凹式绿地土内气压产生不同的影响, 降雨强度和土壤含水率对土内气压的影响作用较大, 植被覆盖层作用较小。降雨重现期由 1 a 增长到 5 a 时, 下凹式绿地内部气压的峰值累计增长 58%; 土

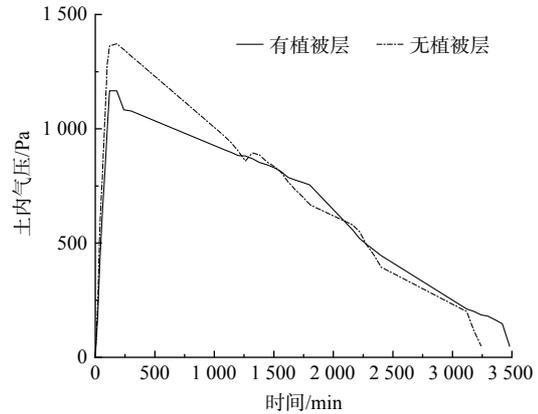


图 6 不同覆盖层的下凹式绿地土内气压变化趋势

Fig. 6 The trend of air pressure changes in sunken green spaces with different coverage layers

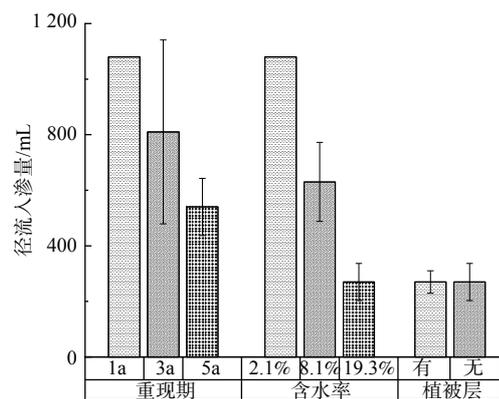


图 7 稳渗状态下单位时间 (60 min) 内径流入渗量

Fig. 7 Infiltration rate per unit time (60 minutes) of inner diameter under stable infiltration state

壤含水率由 2.1% 增大到 19.3% 后, 气压峰值累计增长 96.6%; 覆盖层改变时绿地内气压峰值增大 17.1%。

2) 随着下凹式绿地土层深度的增加, 土内气压产生的时间逐步推迟, 表层土壤最先受到下渗水体的挤压作用, 所以最早产生气压。土层深度 10、20 和 30 cm 出现的气压峰值基本相同 (700~1 400 Pa), 深度 40 cm (400~1 000 Pa) 处土内禁锢气体量很少, 所以产生气压较小。

3) 下凹式绿地土内气压会对雨水下渗产生阻碍作用, 使绿地中水体的下渗速率降低, 雨水径流累计入渗量减少, 其削减效果与下凹式绿地土内气压产生情况有关。当气压峰值累计增长 96.6% 时, 下凹式绿地稳渗时期的渗水速率由 $0.68 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低到 $0.06 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$, 60 min 内的径流入渗量减少 98.8%。

4) 下凹式绿地土内气压降低了其对雨水径流的蓄渗能力, 导致绿地表面存在积水的时长增加, 对后续降水的阻截减弱, 形成地表径流。气压峰值累计增长 17.2%, 表面积水留存时长增加 240 min。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. 进一步明确海绵城市建设工作有关要求[Z]. 2022-04-30.
- [2] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南(试行)——低影响开发雨水系统构建[Z]. 2014-11-03.
- [3] 张媛, 谢天, 王美娥. 小尺度水平上植被格局对城市绿地土壤污染物累积的影响[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(5): 1343-1353.
- [4] 胡作鹏, 刘志强, 彭森, 等. 低影响开发(LID)雨水径流控制效果模拟[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(7): 3956-3960.
- [5] 杨世蜀, 王海洋. 人工生物蓄水过滤系统对雨水的滞留与过滤功效[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(5): 2259-2264.
- [6] 孙丹焱, 郑涛, 徐竟成, 等. 城市绿地土壤渗透性改良对雨水径流污染的削减效果及去除规律[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(2): 372-380.
- [7] 余雪花, 陈焱, 任萍萍, 等. 生物滞留系统植物筛选与综合评价[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(7): 1634-1644.
- [8] 王彤. 下凹式绿地等 LID 技术及城市雨水利用工程的应用研究[D]. 天津大学, 2016.
- [9] 俞绍武, 丁年, 任心欣, 等. 城市下凹式绿地雨水蓄渗利用技术的探讨[J]. *给水排水*, 2010, 46(S1): 116-118.
- [10] 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(5): 45-49.
- [11] 焦胜, 贺颖鑫, 罗碧虹, 等. 基于雨水年径流控制的下凹式绿地面积比研究[J]. *给水排水*, 2016, 52(S1): 66-72.
- [12] 徐硕昌, 刘德仁, 王旭, 等. 重塑非饱和黄土浸水入渗规律的模型试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2023(1): 140-148.
- [13] CHEN P, WEI C F, MA T T, et al. Analytical model of soil-water characteristics considering the effect of air entrapment[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15(6): 04014102.
- [14] 李承成. 土中的气对非饱和黄土渗流特性影响的研究[D]. 兰州交通大学, 2018.
- [15] 刘欢, 甘永德, 贾仰文, 等. 考虑空气阻力影响的流域水文过程模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(8): 1463-1474.
- [16] LOIZEAU S, ROSSIER Y, GAUDET P J, et al. Water infiltration in an aquifer recharge basin affected by temperature and air entrapment[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2017, 65(3): 222-233.
- [17] 吴争光. 封闭气泡对近饱和和土体渗透性影响的试验研究[D]. 三峡大学, 2010.
- [18] 张振华, 谢恒星, 刘继龙, 等. 气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析[J]. *水土保持学报*, 2005(4): 36-39.
- [19] REN X W, HONG N, LI L F, et al. Effect of infiltration rate changes in urban soils on stormwater runoff process[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114158.
- [20] 张宇恒, 张莉, 张秀娟, 等. 退化程度对玛沁高寒草甸植物群落及土壤持水能力的影响[J]. *草业科学*, 2022, 39(2): 235-246.
- [21] 刘长殿, 康剑伟. 土体充气阻渗机理分析[J]. *低温建筑技术*, 2013, 35(5): 97-100.
- [22] 刘刚, 童富果, 习念念, 等. 通气和封气条件下降雨对粘性土入渗速率、含水率及孔隙压力的影响试验[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(12): 19-21.
- [23] 宫永伟, 张爱玲, 刘浩悦, 等. 下沉式绿地积水不利影响及促渗排空方法研究[J]. *给水排水*, 2018, 54(5): 36-38.
- [24] 路明杰, 郭向红, 雷涛, 等. 不同灌溉方式下苹果园土壤氧气分布特征研究[J]. *节水灌溉*, 2020(4): 6-10.
- [25] 余娅婷, 王大浩, 董洁, 等. 重塑非饱和黄土中水-气两相运移规律研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(3): 228-232.
- [26] SIEMENS A G, PETERS B S, TAKE A W. Comparison of confined and unconfined infiltration in transparent porous media[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 851-863.
- [27] 刘炜杰, 马建刚. 土内气阻对土壤入渗的影响研究进展[J]. *亚热带水土保持*, 2023, 35(1): 27-34.
- [28] 周健民, 沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 科学出版社, 2013.
- [29] 沈铁元, 彭涛, 殷志远, 等. 包气带气压计算及其影响入渗的模拟[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, 6(2): 8-12.
- [30] 李秀娟. 裂缝及古土壤影响下黄土包气带水-气运移规律研究[D]. 长安大学, 2018.
- [31] CHEN K P, WEI Y B, WU J C. The effect of infiltration flux on air counterflow in a 2-D confined sand chamber[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 619-626.
- [32] SAKAGUCHI A, NISHIMURA T, KATO M. The Effect of entrapped air on the quasi-saturated soil hydraulic conductivity and comparison with the unsaturated hydraulic conductivity[J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, 4(1): 139-144.
- [33] 梁爱民, 邵龙潭. 土壤中空气对土结构和入渗过程的影响[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 502-506.
- [34] 李永宁, 王忠禹, 王兵, 等. 黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 176-181+189.
- [35] 于珍珍, 王宏轩, 邹华芬, 等. 加气灌溉下红壤土呼吸速率变化及其与土壤水氧的关系[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(1): 110-118.
- [36] 李仁海, 周志超, 李杰彪, 等. 甘肃北山地区典型沟谷包气带土壤渗透特征研究[J]. *土壤通报*, 2020, 51(6): 1380-1385.

(责任编辑: 金曙光)

The variation of air resistance in concave green spaces and its influence on rainwater seepage process

HUANG Qiqi^{1,2,3}, CHEN Ai^{1,2,3}, QU Dan^{1,2,3,*}, WANG Yuchao^{1,2,3}, SHI Xinlei^{1,2,3}

1. Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, Beijing 100083, China; 2. Research Center for Source Control & Eco-remediation of Water Pollution, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

*Corresponding author, E-mail: qudan@bjfu.edu.cn

Abstract This article mainly studied the changes in soil pressure in concave green spaces under different rainfall conditions and soil properties and their impacts on the rainwater storage and infiltration process. The results showed that the air pressure in concave green spaces was generated later with deeper soil horizons. The maximum air pressure in the surface soil (0~10 cm) and middle soil (10~30 cm) was similar, while the maximum air pressure in the bottom soil (30~40 cm) decreased, mainly due to the decrease in soil air content as the depth of the soil layer increases. The air pressure inside the concave green space can be divided into four stages: latent period, ascending period, smooth period, and slow descending period. The pressure inside the concave green soil was significantly affected by rainfall intensity. When the rainfall recurrence period increased from 1 a to 3 a, the peak pressure in the soil increased from 697.8 Pa to 1 101.5 Pa. The generation of pressure affected the infiltration of the water accumulated at the surface. When the rainfall intensity increased from 1 a to 3 a and 5 a, the required infiltration time extended from 320 min to 750 min and 960 min, respectively. The pressure inside the soil increased with the increase of soil moisture content. When the soil moisture content increased from 2.1% to 19.3%, the maximum pressure increased by 97%. During the stable infiltration period, the infiltration rate decreased from 0.68 mL·s⁻¹ to 0.06 mL·s⁻¹, and the runoff infiltration amount within 60 minutes decreased by 98.8%. The vegetation cover had a relatively smaller effect on the air pressure inside the concave green space. The research results can provide guidelines for improving the regulation and storage efficiency of sunken green spaces for rainwater runoff and enhancing the absorption, storage, and slow-release effects of low-impact facilities on rainwater.

Keywords concave green space; air resistance; rainwater runoff infiltration; infiltration capacity