

西安城区绿地雨水下渗特征与影响分析

张建锋¹, 董旭辉¹, 刘茵², 张挺³, 马泽龙⁴

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑设计研究院, 陕西 西安 710055;
3. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 4. 深圳市新城市规划建筑设计股份有限公司, 广东 深圳 518172)

摘要: 强化雨水入渗是目前海绵城市建设的重要内容之一。本文通过现场实测和计算模拟探讨了西安城区雨水下渗特征, 构建以湿陷性黄土层为约束条件的城市绿地渗水地层模型, 采用 HYDRUS 软件模拟分析了西安城区下凹式绿地深度(入渗作用水头)与雨水下渗深度的关系, 并分析了雨水在土壤下渗过程中污染物浓度在土壤中的迁移消减变化规律。结果显示, 以地下 5.0 m 处存在湿陷性黄土为约束, 25.0 cm 入渗水头作用下对应的连续渗水时间为 16.6 d, 小于西安城区历史连续降雨极限天数(19 d), 因此在西安城区进行雨水下渗措施建设必须考虑地质条件的约束; 以降雨径流在 5.0 cm 水头下渗为初始条件, 雨水中典型污染物的变化表明, 氨氮在土壤以及植物根系作用下基本去除, 而 COD_{Cr}、总磷和总氮在 40~50 cm 深度土壤中污染物仍然有很高残存。研究结果为湿陷性黄土地区城市雨水下渗系统和径流面源污染治理提供了依据。

关键词: 下凹式绿地; 雨水; 入渗; 径流污染物

中图分类号: TU998.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0116-06

Analysis of characteristics and influence of rainwater infiltration in Xi'an's greenland

ZHANG Jianfeng¹, DONG Xuhui¹, LIU Yin², ZHANG Ting³, MA Zelong⁴

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Architectural Design and Research Institute, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Central and Southern China Municipal Engineering Design & research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China;

4. Shenzhen New Land Tool Planning & Architectural Design Co. Ltd., Shenzhen 518172, China)

Abstract: Currently, strengthening rainwater infiltration is one of the important contents of sponge city construction. This paper investigated the infiltration characteristics of Xi'an through field measurement and computer simulation, established the corresponding relationship between green subsurface pit depth and rainwater infiltration depth, constructed a water-infiltrating stratum model of urban green space with the collapsible loess layer as the constraint condition, and analyzed the water head of infiltration in depressed greenland with infiltration depth by using HYDRUS software. The results revealed that the collapsible loess at the depth of 5.0 m underground was the constraint while the time corresponding to the continuous action of the 25.0 cm infiltration head was 16.6 days, which is shorter than the climate history of continues rainfall time (19 days) in Xi'an. Therefore, the construction of rainwater infiltration in Xi'an must take into account the geological conditions of constraint. With the initial condition of the rainfall runoff head infiltration at 5.0 cm, changes in typical pollutants in rainwater showed that ammonia nitrogen in rainwater can be removed easily by soil adsorption and bio-degradation of plant root system. However, COD_{Cr}, TP and TN concentration remained high at the depth of 40~50 cm soil. The results provide evidence for construction of urban rainwater infiltration system and runoff non-point source pollution control in the collapsible loess area.

Key words: rainwater, depressed green land, infiltration, runoff pollutant

按照国家住建部颁布的《海绵城市建设技术指南》, 构建低影响开发雨水系统是海绵城市建设的重要内容, 其中高效稳定的雨水下渗系统是减少径流量、降低雨洪峰值和消减城市面源污染的有

效技术手段^[1]。

在西北干旱半干旱地区开展城镇雨水渗蓄的实践, 应考虑西北地区广泛存在湿陷性黄土的工程地质特征。西安市主城区湿陷性黄土分布广

泛^[2]，经过长期的自然降水过程和人工扰动，城区表层黄土的湿陷性已经消除，一般降雨条件下极少涉及到黄土地层的湿陷性问题^[3]。强化雨水下渗是目前海绵城市建设的重要内容之一，通过下凹式绿地、渗井、盲沟以及渗水沟渠等工程措施，可以增大雨水下渗量进而达到消减地表径流和径流面源污染的目的，但这一过程中对以往已经减缓或消失的湿陷性黄土层的扰动缺乏精确分析。另外，在开展强化雨水下渗实践时，表层土对雨水径流中典型污染物的截留消解性能也亟待探明。

本文通过现场实测和计算模拟讨论了西安城区雨水下渗特征，建立了西安城区绿地下凹深度与雨水下渗深度的对应关系，结合当地极端降水条件和湿陷性黄土层埋深特征，讨论了强化雨水下渗技术在西安城区的适用性，并分析了雨水在土壤下渗过程中污染物浓度在土壤中的迁移消减变化规律，研究结果可为湿陷性黄土地区城市雨水下渗系统和径流面源污染治理设施的建设提供依据。

1 材料与方法

1.1 渗水试验

渗水试验在西安南郊一处草坪绿地进行，绿地草茎剥除后整平，作为表层入渗场地；，绿地草茎剥除后下挖 30 cm 整平，作为深层入渗截面。入渗仪采用由马利奥特容器自动供水的单环渗透仪进行现场渗水试验，入渗试验开始后 1.0 min 测定的第一个数据作为初始入渗率，入渗试验结束前单位时间内连续 3 次保持不变的入渗速率作为稳定入渗率，每个试验点重复三次后取平均值。

1.2 城市土壤性能检测

地表土壤取样点包括居民区绿地、公园绿地、学校绿地、道路绿化带，植被类型选择草坪、树下草坪、树下灌木等，土壤历史包括小于 5 a 的新土以及大于 20 a 的老土^[4]。剥除表层 10 cm 作物层后利用圆形环刀采集表层以下 10~20 cm 的土壤样品进行粒径、组成、容重等特征参数检测，三

组对照试验求出均值

1.3 城市土壤污染物本底性能检测

在渗水试验前使用圆形环刀自表层 10~50 cm 埋深、间隔 10 cm 采集土壤，进行土壤中 NH₃-N、COD_{Cr}、TN、TP、含水率等 5 指标检测。在有关污染物浓度变化试验中，使用水质相对稳定的人工配制雨水，代替实际雨水径流进行污染物降解及机理的研究^[5]，人工配水污染物浓度按照研究区域内典型道路雨水算子处径流的实际监测数据确定。将预制好的钢圈切入地下 30cm 使雨水垂直下渗，为模拟下凹式绿地蓄积雨水入渗条件，地表留 20 cm 高度钢圈，检测不同作用水头土壤入渗污染物变化。注入雨水达到设定水位后开始计时，在注水结束后分别在不同时间点分别采集表层下每 10 cm 间隔处深度土壤，检测土样中 NH₃-N、COD_{Cr}、TN、TP、含水率等 5 项指标。

1.4 模拟分析

采用 HYDRUS 软件平台进行雨水下渗过程的模拟分析。软件中所需的土壤水力参数主要通过三种方法获得，即实测、参考文献数据和软件所提供的预测数据，模型土壤为单层，假设土壤颗粒为均匀分布。

2 研究结果与分析

2.1 西安城区工程地质特征

西安主城区内工程地质性质沿地表向下分别为杂填土、素填土、新黄土、古土壤、粉质黏土和中砂，其中新黄土层普遍具有湿陷性，其埋深在地表下 4.5~15 m，层厚在 4.0~9.0 m，呈透镜体分散分布^[6]。

2.2 西安城区绿地表层土壤的特征参数

剥除表面作物层后取埋深 1.0 m 以内土壤风干、碾碎、混合均匀后筛分。结果显示，土壤颗粒粒径范围为 0.002~2.0 mm， $d_{50}=0.04$ mm。依据土壤质地的分类，西安城区绿地基层土壤属于砂壤土^[6]，不同区域的表层土构成见表 1。

表 1 西安城区不同类型绿地土壤的颗粒特征

Tab. 1 The characteristics of soil particles in green space of Xi'an urban

| 绿地类型 | 粘粒 | 粉粒 | 砂粒 | 粉粒：粘粒 |
|------|-----------------|------------------|------------------|-------|
| | <0.002 mm/% | 0.002~0.020 mm/% | 0.020~2.000 mm/% | / % |
| 小区绿地 | 44.5(36.0~58.0) | 33.3(20.0~42.0) | 22.2(12.0~38.0) | 0.74 |
| 公园绿地 | 36.6(26.2~44.0) | 32.0(24.0~41.8) | 31.4(32.0~40.0) | 0.87 |
| 市政绿地 | 36.0(24.0~45.0) | 31.0(23.0~43.0) | 33.0(29.0~45.0) | 0.86 |
| 校园绿地 | 45.2(43.0~47.0) | 28.5(25.0~33.0) | 26.3(21.0~33.0) | 0.63 |

土壤颗粒组成及配比情况是影响水分入渗性能关键性因素^[7]。表1中,与小区绿地和校园绿地相比较,公园绿地和市政绿地基层土壤中粘粒含量较低。土壤中较高的粘粒含量一般表示其水分的入渗能力较差。多个采样点土壤容重检测结果表明,绿地基层土壤的容重为 $1.40 \sim 1.51 \text{ g/cm}^3$,其中公园、市政等开放绿地中土壤容重明显高于小区及景观等封闭绿地。土壤容重及孔隙度(34%~50%)结果显示,除市区主要公园开放绿地外,其他绿地内基层土壤属于轻度~中度压实级别。

2.3 雨水的入渗性能

4种不同类型土壤水分入渗过程曲线显示,不同类型绿地土壤入渗速率呈现初始下降快后趋于平缓的规律(图1)。入渗开始的40 min内,单位时间内入渗速率变化幅度较大,呈不稳定状态。40 min后变化曲线逐渐平缓,90 min后均趋于稳定。造成土壤入渗速率前后变化差异大的原因很多,入渗初始阶段没有降雨浸润的土壤表层相对干燥,一方面为土壤提供了较大的基质势度,此时基质吸力起到了主要作用;另一方面,存在可利用的缺少水分的土壤孔隙较多,故初始入渗率较大。随着入渗进程加快,表层土壤水分逐渐进入深层土壤,土壤中含水量增加,湿润带层加厚,土壤基质吸力梯度逐渐下降,通气孔隙逐渐被充满,入渗率随之降低。当土壤基质吸力梯度随入渗过程的进行趋于零时,土壤入渗率在重力作用下维持在一个相对比较稳定的水平^[9]。

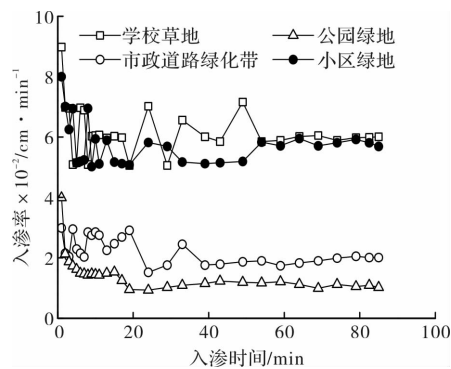


图1 不同类型土壤入渗速率随时间变化曲线

Fig. 1 Infiltration rate of various soil with time

根据 Kohnke 的土壤渗透性能分级标准,结合实测和相关文献资料数据整理,给出西安、南京和上海城区绿地基层土壤的渗透情况见图3。黄土丘陵沟壑区的农地和荒地的土壤入渗率分别为 $0.19 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $0.13 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$,与图3中“较快”渗透级别相当,以这一渗透级别(下限)为基准,西安城区较快渗透级别的区域比例为78.9%,

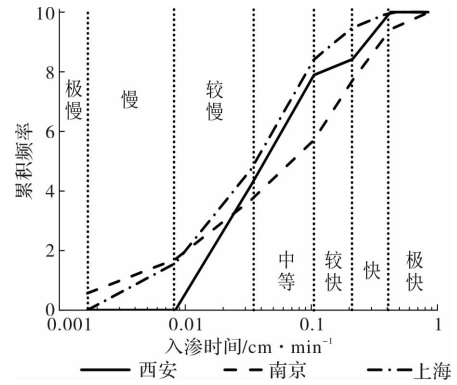


图2 不同城市土壤入渗率比较

Fig. 2 Soil infiltration rate in typical city urban

高于南京(57.1%)低于上海(84.2%)^[4,8]。另一方面,在西安城区绿地基层中没有出现“较慢”以下级别的区域,因此整体优良的地层下渗能力和较深的地下水位,是西安城区推广雨水下渗措施的优势。

2.4 雨水入渗过程的数值模拟

2.4.1 绿地土壤含水率的自然变化

自然条件下,一场降雨过后雨水在土壤中下渗的同时也会存在地表蒸发,因此土壤含水率是下渗与蒸发结果的叠合。图3为校园内一处绿地的土壤含水率变化连续监测(10月26日降雨结束至11月2日)结果,地表土壤含水率最大值为0.207,最小值为0.179;埋深45 cm、75 cm处的最大和最小含水率分别为0.184、0.169及0.174、0.157。表层的含水率的变化幅度大于深层,表层主要受人为因素和降雨的影响,且表层存在水分的蒸发,小规模降雨且地表没有积水存在情况下,深层的土壤含水率较为稳定。

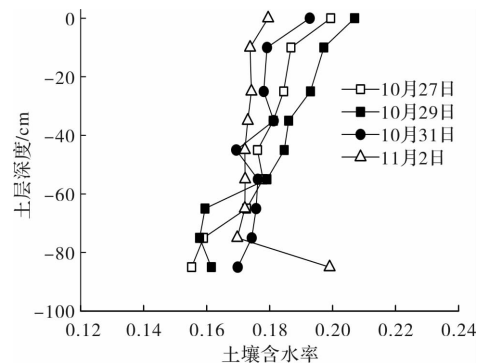


图3 不同深度土壤实测含水率

Fig. 3 The measured soil moisture at different depths

2.4.2 绿地土壤入渗速率模拟分析

根据图3的实测结果,对HYDRUS软件中的相关参数进行回溯分析^[11],确定与实测结果近似的模型参数取值,采用HYDRUS软件分析极端条件下雨水下渗深度的变化,建立渗水时间与入渗

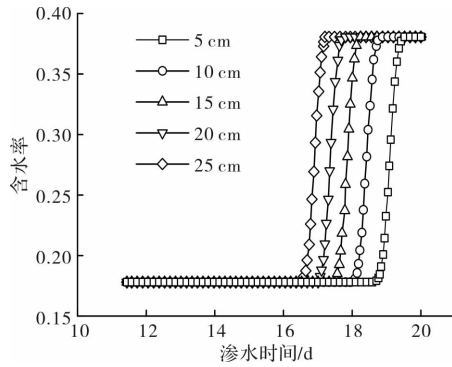


图 4 不同作用水头下埋深 5.0 米处土壤含水率变化

Fig. 4 The soil moisture at 5.0 m depth with infiltration time under different water head

深度的关系。

假设在极端降雨条件下, 下凹式绿地中一直蓄满水, 则相当于在固定水头条件下雨水下渗。根据西安城区表层土壤参数, 以表层以下 5.0 m 处存在湿陷性黄土为约束条件, 考察在不同作用水头下雨水下渗 5.0 m 所需渗水时间。模拟土壤 5.0 m 深度处观察点的含水量变化与渗水时间如图 5 所示。当湿润峰到达某一深度后, 这一深度的含水率在短时间内从初始含水率迅速达到饱和, 对于湿陷性黄土层, 在土压力存在的情况下, 含水量的增加将引起黄土的湿陷变形。在 25 cm 水头条件下, 雨水下渗到深度 5.0 m 处的时间为 16.6 d, 即此时雨水下渗到这一深度, 并迅速达到饱和, 随着水头减小, 这一时间也向后推移, 当水头为 5.0 cm 时, 时间延长至 18.8 d。根据西安城区的历史气象资料, 最大的持续降雨时间为 19 d, 因此在西安城区开展雨水下渗的实践, 在 25 cm 蓄水深度条件下, 地层以下 5.0 m 范围内不出现湿陷性黄土为必须满足的条件之一。

3 地表入渗后土壤中污染物迁移变化规律

3.1 土壤本底污染物及污染物迁移实测分析

城市道路边的下凹式绿地一般比路面低 5.0~20.0 cm。道路表面初期雨水进入下凹式绿地后即开始下渗, 其中携带的污染物在下渗过程中被土壤截留或消解。在持续降雨条件下, 污染物随雨水下渗深度及浓度变化, 是评判雨水下渗过程环境影响的基础。图 5 为一次人工模拟降雨后水中污染物浓度在土壤中的迁移变化的实测结果, 雨水积蓄(渗水作用水头)为 5.0 cm, 定水头渗水 2 h 后水位下降直至积蓄雨水完全入渗。

图 5 显示, 表层土壤中污染物浓度在雨水下渗

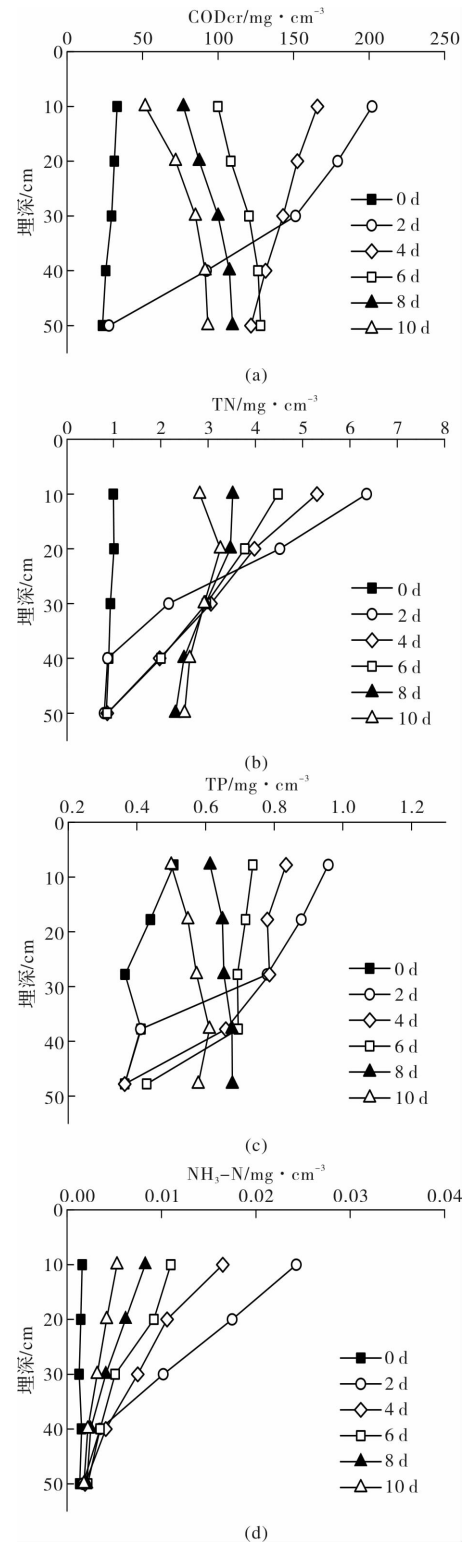


Fig. 5 典型污染指标(实测)在雨水下渗过程中的变化

Fig. 5 Distribution of pollutant measure concentration in soil with rainwater infiltration process

开始后迅速增大, 渗水结束后逐渐降低, 其中 COD_{Cr} 、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在渗水结束 10 d 后均回落至土壤本底值附近, 但 TN 在 10 d 后依然高过本底值约 2 倍, 表明下凹式绿地对于不同污染物的截留消解效率存在差异。在表层以下, 污染物随雨水下渗逐渐向下迁移, 随入渗时间延长表层以下某

一深度处土壤中污染物浓度从本底值开始不断增大至一稳定值,随后在入渗结束后时间逐渐向本底值回落.与 COD_{Cr} 、TP 和 TN 相比较, $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标历经 10 天在表层以下 50 cm 处最先恢复到土壤本底值,表明这一污染指标的环境消解效率最高,这与地表环境富含硝酸盐菌和亚硝酸盐菌的特征相一致,而同一点 TN 的浓度在第 10 天稳定在 2.7 mg/L,表明 $\text{NH}_3\text{-N}$ 没有完全实现脱氮,硝态氮和亚硝氮的分解可能需要更长的时间. COD_{Cr} 、TP 浓度的变化与含水率变化趋势一致,表明 COD_{Cr} 、TP 污染物随雨水下渗迁移过程主要受水分迁移控制.另一方面,从 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化情况来看,在表层以下并没有出现“浓度锋面横向扩张”的特征,表层以下各取样点的浓度一直处于持续降低的过程,表明 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的消解速率快于 COD_{Cr} 和 TP.

雨水下渗过程中污染指标变化规律的分析表明,与 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 相比较, COD_{Cr} 、TN 在土壤层中的消解速率及效率较低,应该是评价雨水下渗环境影响效果的主要控制指标,在径流污染浓度高的区域开展雨水下渗,必须对污染负荷较高的初期雨水进行必要的前期处理.

3.2 雨水入渗土壤污染物模拟

根据对雨水下渗过程中污染指标的实测数据,确定研究区域内污染物在地层中的消解效率和速率常数,在 HYDRUS 软件中将含水率变化与污染物消解过程耦合,可以开展相应的模拟计算分析.模拟结果与实测结果(图 5)较为接近,如图 6 所示.

下凹式绿地下蓄积水深为 5.0 cm,在模拟土壤污染物含量初始值和土壤本底值相同情况下,西安城区 2 年一遇 2 小时降雨的模拟结果如图 6 所示.降雨后第十天降雨径流挟带的 COD_{Cr} 、氨氮、总磷污染物在地表层基本完全消解,在 20 cm 以下深度的土壤 COD_{Cr} 和总氮富集高过本底值,污染物中除氨氮外其它三种污染均向更深土壤层迁移.总体上看,在降雨结束时污染迁移深度基本达到 10~15 cm 埋深,降雨后第 4 d 污染物都已达到 50 cm 深度处土壤.氨氮和实测结果基本一致,氨氮到达 40 cm 深度处后不再向下迁移.模拟西安地区连续降雨历史极限降雨(19 d)情况下污染物土壤中的变化,结果显示总磷向下迁移到距地表 5.8 m 的深土壤层中,总氮和 COD_{Cr} 在距地表 4.5 m 内完全消解,因此应加强地表土壤和植物根系对总磷的去除或者对雨水中磷在进入下凹式绿地前进

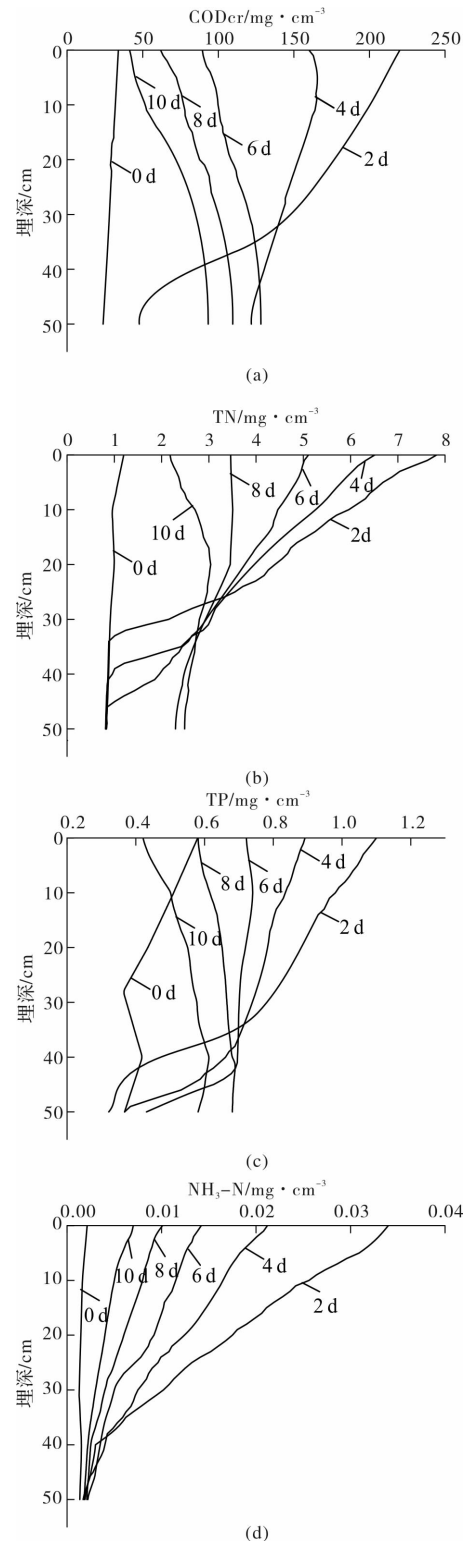


Fig. 6 典型污染指标(模拟)在雨水下渗过程中的变化

Fig. 6 Distribution of calculated pollutant concentration in soil with rainwater infiltration process by HYDRUS

行预处理.

4 结论

通过实测与模型分析,关于西安城区绿地雨水下渗过程获得以下结论:

(1)监测表明西安地区黄土的下渗性能良好.

模拟分析表明,在下凹式绿地中 25 cm 蓄水深度条件下雨水下渗到 5.0 m 深度需要 16.6 d,小于西安城区连续降雨的极限值 19 d,因此在极端天气条件下,下凹式绿地中的雨水可能会对湿陷性黄土层造成影响,在西安城区开展雨水下渗应结合地勘确定技术方案。

(2)雨水水质在下渗过程中的迁移变化表明,氨氮污染在土壤和植物的作用下在表层基本得到去除,而 COD_{Cr} 、TP 和 TN 在 40~50 cm 深度处污染物浓度均高过土壤本底值,在降雨入渗后第 10 天污染物不能完全去除,因此需要强化土壤表层去除污染物的效果,降低雨水下渗对深层土壤和地下水的污染风险。

参考文献 References

- [1] JIA Haifeng, WANG Zheng, ZHEN Xiaoyue, et al. China's sponge city construction: A discussion on technical approaches[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2017, 11(4): 18-28.
- [2] 陈开圣,彭小平.关中地区黄土的湿陷特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2005, 32(1): 37-40.
CHEN Kaisheng, PENG Xiaoping. Study on loess's collapsibility in the Guanzhong area [J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, 2005, 32(1): 37-40.
- [3] 宋扬,周维博,马聪,等.西安主城区地下水埋深空间变异性分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(8): 56-59.
SONG Yang, ZHOU Weibo, MA Cong, et al. Analysis of spatial variability of groundwater depth in Xi'an downtown area [J]. *Yellow River*, 2015, 37(8): 56-59.
- [4] 杨金玲,张甘霖,袁大刚.南京市城市土壤水分入渗特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 363-368.
YANG Jinling, ZHANG Ganlin, YUAN Dagang. Characteristics of water infiltration in urban soils of Nanjing city [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 363-368.
- [5] 杨清海,吕淑华,李秀艳,等.城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2008(2): 41-47.
YANG Qinghai, LÜ Shuhua, LI Xiuyan. Reduction function of runoff contaminants by the urban greenbelt [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2008(2): 41-47.
- [6] 陈晓健,西安城市规划建设中的工程地质环境问题探讨[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(3): 325-328.
- CHEN Xiaojian. The engineering geological problems in city construction and planning[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2003, 33(3): 325-328.
- [7] 魏俊岭,金友前,郜红建,等.合肥市绿地土壤水分入渗性能研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(25): 302-307.
WEI Jinling, JIN Youqian, GAO Hongjian, et al. Investigation on Soil Water Infiltration in Different Urban Green Lands in Hefei City [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(25): 302-307.
- [8] 聂发辉,李田,姚海峰.上海市城市绿地土壤特性及对雨洪削减效应的影响[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(2): 49-52.
NIE Fahui, LI Tian, YAO Haifeng. Characteristics of soil samples of five Shanghai urban green areas and their effects on reduction of storm water runoff [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(2): 49-52.
- [8] 程冬兵.三峡库区等高绿篱坡地农业系统紫色土水分特性研究[D].武汉:华中农业大学,2008.
CHEN Dongbing. Study on the Purple Soil water properties Under Control Hedgerow- intercropping System in the three gorges reservoir area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [9] 李贵玉.黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤入渗性能对比研究[D].西安:西北农林科技大学,2007.
LI Guiyu. Comparative study of soil infiltration under different land uses in loess hilly regions [D]. Xi'an: Northwest A & F University. 2007.
- [10] WINZIG G. The concept of storm water infiltration [C]. Burghardt W, Dornauf C, eds. //First International conference on soils of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas. Essen, Germany: University of Essen, Areas, 2000: 427-433.
- [11] 陆东旭,刘金涛,尚曼廷,等.土壤表面积水深度对入渗的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 140-142.
LU Dongxu, LIU Jintao, SHANG Manting, et al. Effects of soil surface ponding depth on infiltration [J]. *Agricultural research in the arid area*. 2009, 27(1): 140-142.

(编辑 桂智刚)