

固原市低影响开发措施下土壤水分时空变化

张镇玺¹, 徐国策¹, 黄绵松², 田珂², 李占斌¹, 徐明珠¹

(1. 西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室,

陕西 西安 710048; 2. 宁夏首创海绵城市建设发展有限公司, 宁夏 固原 756000)

摘要: [目的] 分析宁夏回族自治区固原市低影响开发措施下土壤水分时空变化规律, 为该市海绵城市低影响开发(LID)建设及水资源有效利用的相关标准和规范制定提供科学参考。[方法] 选取草地、过水草沟和下沉式绿地三种低影响开发措施, 研究不同深度土壤储水量的时空变化和稳定性特征, 分析不同低影响开发措施下土壤水分在干湿季、不同降雨、冻融条件下的变化情况。[结果] ①草地、过水草沟和下沉式绿地的土壤储水量全年分别为 101.96, 27.22 和 97.33 mm, 雨季和旱季分别为 107.37, 29.46, 101.03 和 67.6, 20.66, 69.34 mm; 各 LID 措施下土壤储水量变异系数在 26.01%~76.37% 之间, 均属于中等变异; ②暴雨条件草地、过水草沟和下沉式绿地的补给量分别为 63.68, 14.84 和 66.49 mm; 小雨条件草地、过水草沟和下沉式绿地土壤补给量分别为 3.94, 1.71 和 1.26 mm; ③冻融期内草地、过水草沟和下沉式绿地的冻融量分别为 111.16, 75.73 和 46.9 mm, 各措施下土壤低温和冻融主要集中于 0—10 cm 层; ④研究区在全年、雨季、旱季、暴雨补给和冻融潜力分别为 1 691.31, 1 766.46, 1 216.31, 1 121.8 和 699.67 m³。[结论] LID 措施下土壤水分补给潜力较大; 同时需要考虑不同 LID 措施的结构、填料、植被覆盖等方法的改进, 以提高 LID 措施的储存能力。

关键词: 海绵城市; 低影响开发; 土壤储水量; 降雨; 冻融; 固原市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0162-08

中图分类号: TU992, S152.7

文献参数: 张镇玺, 徐国策, 黄绵松, 等. 固原市低影响开发措施下土壤水分时空变化[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 162-169. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.023; Zhang Zhenxi, Xu Guoce, Huang Miansong, et al. Changes of soil moisture and its influencing factors under low impact development measures in Guyuan City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 162-169.

Changes of Soil Moisture and Its Influencing Factors Under Low Impact Development Measures in Guyuan City

Zhang Zhenxi¹, Xu Guoce¹, Huang Miansong², Tian Ke², Li Zhanbin¹, Xu Mingzhu¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Ningxia Capital Sponge City Construction & Development Co., Ltd., Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal variation of soil water under the low impact development measures in Guyuan City of Ningxia Hui Autonomous Region was analyzed, in order to provide scientific reference for the low impact development and construction of sponge city and the construction of the relevant standards and norms for the effective utilization of water resources. [Methods] Three low impact development measures, namely, grassland, aquatic grass ditch and sunken green land were selected, to study the spatial-temporal changes and stability characteristics of soil water storage at different depths. And the changes of soil moisture under different measures of low impact development measures in dry and wet seasons, different rainfall and freeze-thaw conditions were analyzed. [Results] ① The soil water storage capacity of grassland, aquatic grass ditch and sunken green land was 101.96, 27.22 and 97.33 mm respectively all through the year, was 107.37, 29.46 and 101.03 mm respectively in rainy seasons, and was 67.6, 20.66 and 69.34 mm

收稿日期: 2019-07-10

修回日期: 2019-11-21

资助项目: 宁夏首创委托科技项目“雨洪调控机制及水资源高效利用模式”(SCHM-2018-01); 国家自然科学基金项目(51779204); 陕西省创新人才推进计划项目科技(水资源环境演变与调控)创新团队项目(2018TD-037)

第一作者: 张镇玺(1996—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: 635996596@qq.com。

通讯作者: 徐国策(1985—), 男(汉族), 河南省洛阳市孟津县人, 副教授, 主要从事水土保持与水文水资源方面的研究。Email: xuguoce@xaut.edu.cn。

respectively in dry seasons. The variation coefficient of soil water storage under various low impact development measures was between 26.01% and 76.37%, all of which belonged to moderate variation. ② Under rainstorm conditions, the replenishment amount of grassland, aquatic grass ditch and sunken green land was 63.68, 14.84 and 66.49 mm, respectively. Under light rain conditions, the soil replenishment of grassland, aqueduct grass ditch and sunken green land was 3.94, 1.71 and 1.26 mm, respectively. ③ During the freeze-thaw period, the freezing-thawing capacity of grassland, aquatic grass ditch and sunken green land was 111.16, 75.73 and 46.9 mm, respectively. Low temperature and freeze-thaw were mainly concentrated in 0—10 cm soil layer. ④ The annual, rainy, dry, heavy rain and freeze-thaw replenishment of the study area were 1 691.31, 1 766.46, 1 216.31, 1 121.8 and 699.67 m³, respectively. [Conclusion] The potential of soil water recharge under the low-impact development measures is great. And the improvement of structure, filler and vegetation cover of different low impact development measures should be considered to improve the water storage of LID measures.

Keywords: sponge city; low impact development; soil moisture content; rainfall; freezing-thawing; Guguang City

城市雨洪管理问题是制约我国城市发展的核心问题之一,因城市地表不透水面积增加,雨水可下渗量减少,导致地表径流增加,城市排水负荷加重^[1]。海绵城市遵循 LID(低影响开发)原则:即针对城市化过程中所产生的内涝、污染加剧、径流蔓延、生态环境恶化等问题,使区域开发后的排水状态,效仿自然的排水方式,尽可能接近于区域开发前的排水状态和自然的水文循环。在此基础上,将雨水蓄存、吸收、渗透、净化,并在需要时再加以利用,能够提升城市生态系统功能,减缓城市洪涝灾害的发生^[2]。目前应用效果较好的 LID 措施包括透水铺装、生物滞留措施、下沉式绿地、绿色屋顶、过水草沟、雨水花园和雨水桶等措施,各种 LID 措施的建设对于城市海绵化高效益建设十分必要^[3]。土壤储水量受到降水入渗及再分布、土壤水分的蒸发、植物根系吸水利用等水循环过程的影响^[4]。Xu 等^[5]研究表明,土壤深度对土壤含水量的时空分布有着显著影响。刘继龙等^[6]研究表明随着土层深度的增加,土壤水分的时间稳定性逐渐增强。同时,土壤储水量也受到气候及环境温度的影响,冻融期内,土壤的冻融特性受到气候、植被、地形、积雪覆盖、含水率和盐分含量等因素的影响^[7]。当土壤温度降低,直至冻结温度之下时,土壤内部水分冻结,形成冻土^[8]。樊贵盛等^[9]研究表明,随着土壤含水率的增大,冻融土壤入渗能力降低。LID 措施能够从源头对径流进行调控^[10],不同 LID 措施对土壤水分的蓄存及分布均有影响。目前为了探究 LID 措施对土壤水分的影响,已经开展了很多相关研究。Allen 等^[11]研究表明,生物滞留措施及雨水花园等措施通过过滤和渗透作用将雨水蓄存到措施内部,极大地减少了径流量和洪峰。Busk^[12]研究发现,生物滞留措施可以减少地表径流量的 97%~99%。Ahiablame 等^[13]发现 LID 措施削减城市洪水效果明显。刘昌明

等^[14]研究表明下凹式绿地稳定入渗率在 0.5~2.3 mm/min 之间。汪艳宁等^[15]研究表明,过水草沟接纳径流量可达硬质路面的 2.16 倍。李怀恩等^[16]研究表明,LID 雨水入渗会影响设施净化雨水能力。不同的 LID 措施,对径流削减效果不同,在措施布设较为密集的街区,内涝面积削减率达 48.96%^[17]。值得注意的是,虽然前人对不同 LID 措施下地表径流的水文过程做了大量研究,然而目前对于 LID 措施下不同季节和降雨条件土壤水分的研究较少,且很少有关于冻融期内 LID 措施下土壤冻融量的研究。土壤水分在干湿季、以及不同降雨和冻融条件下的变化不同,LID 措施下的效果也会有较大区别,因而研究不同 LID 措施对土壤水分的影响有重要意义。

宁夏回族自治区固原市从 2016 年被列为国家第二批海绵城市的建设试点以来,共实施海绵城市建设项目 70 个,基本完工 60 个,改造海绵化道路 16 条 18 km,小区 90 个 3.23×10⁶ m²。水资源的存蓄和利用是固原海绵城市建设中控制雨水和缓解水资源短缺的重要技术手段,本文根据气象数据、遥感数据及土壤含水量资料,分析了不同 LID 措施条件下的土壤在干湿季、不同降雨、冻融条件下土壤水分变化情况,并对研究区的 LID 措施蓄存潜力进行了评估,为固原市海绵城市低影响开发建设及水资源有效利用前景提供相关依据和参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

固原市位于宁夏回族自治区,地处黄土高原上六盘山北麓清水河畔,地势南高北低,坐标 106°11′—106°18′E,35°85′—36°30′N,海拔 1 753 m,属典型的中温带大陆性气候,多年平均气温 5℃^[18],多年平均降水量 438.5 mm。年内降水主要集中在 6—9 月,约占全年降水的 79.37%。土壤以湿陷性黄土为主,

是西北高原典型土质类型;植被类型主要为华北落叶松、沙棘等。本文研究区域位于固原市原州区海绵措施区块西部的玫瑰苑小区,玫瑰苑小区是固原市海绵化改造小区之一,具有明显的海绵化小区特征,是典型的小区海绵示范工程;玫瑰苑小区内内部布设有过水草沟、下沉式绿地和雨水花园等 LID 措施,同时每栋建筑周围布设有 2~3 个雨水桶。

1.2 研究方法

测点布设及样品采集:对固原市玫瑰苑小区内不同 LID 措施下的土壤水分变化进行实时动态监测,采用东方生态公司智墒 ET60,土壤水分监测仪分别布设在过水草沟外部的草地,过水草沟内部及下沉式绿地内部。监测深度为 0—60 cm,分为 6 层,每 10 cm 为一层,6 个土层从上到下分别为 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 和 L_6 。根据前人研究^[19-21],将 0—10 cm 土层称为活跃层,10—30 cm 土层为次活跃层,40 cm 之下的土层为稳定层。本研究采用 2018 年 8 月 20 日至 2019 年 2 月 28 日期间的逐小时土壤水分监测数据,数据采集时间间隔为 1 h,对不同 LID 措施的土壤水分在不同季节、不同降雨条件、冻融条件下的土壤含水量进行研究。通过以下公式计算各层土壤的土壤储水量及降雨后的水分补给量:

(1) 各层土壤储水量(SW_i):

$$SW_i = \theta_i h_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

(2) 土壤总储水量(SW):

$$SW = \sum_{i=1}^6 \theta_i h_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (2)$$

式中: SW_i 为第 i 层土壤储水量(mm); θ_i 为第 i 层土

壤体积含水量(%); h_i 为各层土壤厚度(mm); SW 为 0—60 cm 土层土壤总储水量(mm)。

(3) 土壤水分补给量:

$$\Delta SW = SW_{\max} - SW_0 \quad (3)$$

式中: ΔSW 为研究时段内土壤储水量的变化量(mm); SW_{\max} 为降雨后 0—60 cm 土壤总储水量最大值(mm); SW_0 为降雨前期 0—60 cm 土壤总储水量(mm)。

(4) 土壤冻融量:

$$\Delta SW_i = SW_{\alpha} - SW_{\beta} \quad (4)$$

式中: ΔSW_i 为冻融期内第 i 层土壤储水量的变化量,即为冻融量(mm); SW_{α} 为第 i 层冻融前土壤储水量(mm); SW_{β} 为第 i 层冻融后土壤储水量(mm)。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征详

2000, 2010, 2018 年固原市海绵措施区块土地利用类型面积统计详见表 1。结果表明,固原市海绵措施区块总面积为 39.91 km²,其中,耕地、林地和建筑用地是主要的土地利用类型。

2000—2018 年,林地、公路和建筑用地面积持续增加,占比从 2000 年的 5.33%, 3.23% 和 29.24%, 增加至 2018 年的 17.86%, 9.61% 和 45.96%。耕地面积显著减少,占比从 2000 年的 56.88% 减少为 2018 年的 5.02%,草地面积先增加后减少,总体呈增加趋势,水域面积基本不变。原因在于固原市城市化进程明显,对建筑用地需求增加,其他土地利用类型逐步转化为建筑用地。

表 1 固原市土地利用结构

年份	草地		耕地		公路		建筑用地		林地		水域	
	面积/ km ²	比例/ %										
2000	0.74	1.86	22.69	56.88	1.29	3.23	11.66	29.24	2.13	5.33	0.77	1.94
2010	2.41	6.03	8.42	21.10	2.80	7.01	16.08	40.33	6.49	16.27	0.73	1.82
2018	2.30	5.77	2.00	5.02	3.83	9.61	18.33	45.96	7.12	17.86	0.73	1.82

图 1—2 分别为固原市海绵措施区块 2000—2010 年和 2010—2018 年的土地利用变化程度,深色为土地利用变化程度较大的区域,且颜色越深表示变化程度越大,浅色为土地利用变化程度较小的区域,越浅表示变化程度越小。

由图 1—2 可知,2000—2010 年,土地利用变化程度较大的区域主要出现于研究区东侧,并向西侧延伸,西北方向土地利用变化程度较小;2010—2018 年,研究区变化程度较大区域出现在研究区西部,而研究区东部变化程度较西部低,几乎没有土地利用变化程度较小的区域。

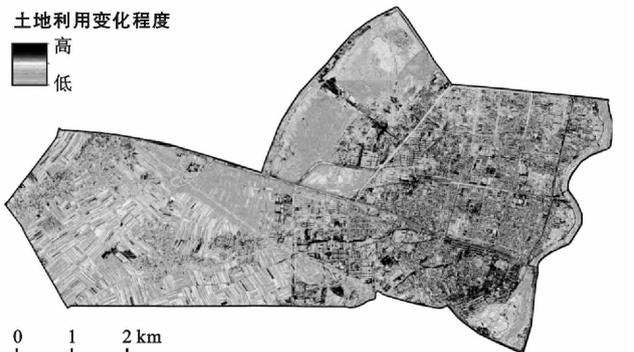


图 1 研究区 2000—2010 年土地利用变化程度

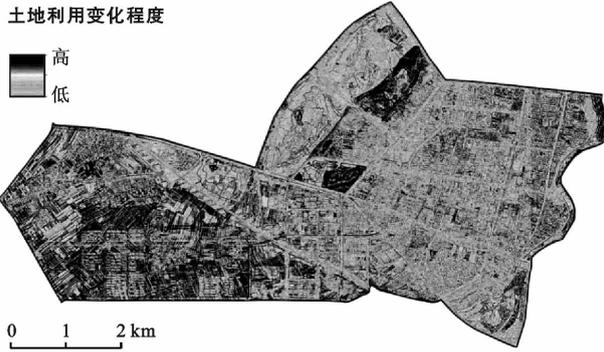


图 2 研究区 2010—2018 年土地利用变化程度

玫瑰苑小区不同土地利用类型面积详见表 2。统计玫瑰苑小区不同土地利用下的面积及所占比例。结果表明,玫瑰苑小区总面积为 63 725.58 m²。建筑用地是玫瑰苑小区的主要土地利用类型,面积 33 525.64 m²,占总面积的 52.61%。

玫瑰苑小区草地、过水草沟、下沉式绿地和雨水花园面积占总面积的比例分别为 6.22%,8.75%,14.54%和 1.08%。其中 LID 措施下过水草沟、下沉式绿地和雨水花园总面积 15 530.42 m²,占总面积的 24.37%。

表 2 玫瑰苑小区不同土地利用面积分布

项目	建筑用地	道路	草地	过水草沟	下沉式绿地	雨水花园
面积/m ²	33 525.64	10 708.39	3 961.12	5 574.93	9 268.00	687.49
面积比例/%	52.61	16.80	6.22	8.75	14.54	1.08

2.2 雨季和旱季土壤储水量变化特征

不同季节 LID 措施下土壤储水量的统计特征详见表 3,通过公式(1)—(2)将土壤含水量转换为各 LID 措施下各层土壤储水量和总储水量。结果表明,整个研究时段内,草地、过水草沟和下沉式绿地全年储水量分别可达 101.96,27.22 和 97.33 mm,全年储水量呈现:草地>下沉式绿地>过水草沟。不同 LID 措施下,绝大部分土层雨季的土壤储水量大于旱季的土壤储水量。此外,对全年土壤储水量进行差异显著性检验后得出,草地、过水草沟、下沉式绿地在不同季节间差异不显著($p>0.05$)。全年平均土壤储水量最低的土层为过水草沟 L₅,最高为草地 L₅。草地、过水草沟、下沉式绿地在雨季和旱季储水量分别为 107.37,29.46,101.03 mm 和 67.6,20.66,69.34 mm。雨季和旱季下沉式绿地 L₁—L₃ 土壤储水量最高,草地 L₄—L₆ 土壤储水量最高,过水草沟土壤储水量普遍低于草地和下沉式绿地,草地和下沉式绿地储水效果明显。不同 LID 系统的土壤储水效率从大到小依次

为:L₁—L₃ 土层土壤储水量呈现:下沉式绿地>草地>过水草沟,L₄—L₆ 土层土壤储水量呈现:草地>下沉式绿地>过水草沟,过水草沟储水效果较差,储水量较低,草地和下沉式绿地分别对表层和下层的雨水起到一定的存储作用。本身草地对土壤水分就有着较好的蓄存效果,下沉式绿地和过水草沟取代了一部分原本的草地,下沉式绿地储水效果和草地相当,而过水草沟对雨水的存蓄效果不太理想。

根据 Nielson 和 Bouma 对 C_v 分类^[22-23]可知,当研究变量为弱变异时 C_v≤10%;当研究变量为中等变异时 10%<C_v<100%;当研究变量为强变异时 C_v≥100%。不同季节下,三种不同措施中,过水草沟的变异系数(C_v)最高,而下沉式绿地最低,说明过水草沟土壤含水量在不同土层之间变化剧烈,而下沉式绿地的土壤含水量在不同土层之间波动不大。因此,6 个土层深度的土壤含水量具有一定的空间异变性,不同措施下的变异系数在 26.01%~76.37%之间,均属于中等变异。

表 3 不同季节 LID 措施下土壤储水量统计

季节	全年			雨季			旱季		
	草地	过水草沟	下沉式绿地	草地	过水草沟	下沉式绿地	草地	过水草沟	下沉式绿地
L ₁ /mm	10.10	8.78	9.22	10.61	10.13	9.71	6.73	5.72	5.76
L ₂ /mm	6.01	1.72	14.20	6.78	1.84	14.68	3.24	1.37	9.06
L ₃ /mm	12.44	5.95	16.05	12.53	6.31	16.6	8.93	5.07	9.60
L ₄ /mm	23.02	2.38	20.08	24.51	2.49	20.48	14.49	1.79	15.19
L ₅ /mm	26.11	0.77	16.68	27.34	0.8	17.57	17.95	0.93	12.98
L ₆ /mm	24.28	7.60	21.10	25.61	7.9	21.99	16.26	5.78	16.75
储水量/mm	101.96	27.22	97.33	107.37	29.46	101.03	67.6	20.66	69.34
均值/mm	16.99	4.54	16.22	17.9	4.91	16.84	11.27	3.44	11.56
C _v /%	50.03	73.86	26.46	49.84	76.37	26.01	51.83	67.09	35.85

2.3 不同降雨条件土壤水分变化

不同降雨条件(2018年08月21日暴雨和2018年09月14日小雨)后72h内各LID措施的土壤含水量变化如图3所示。根据图3所显示不同LID措施布设情况下的储水深度及含水量,各措施土壤含水量变化受降雨量变化影响明显。暴雨条件,各个LID措施的土壤含水量在降雨前期迅速增加,草地、过水草沟和下沉式绿地在暴雨降雨42,24和36h后,不

同深度土壤水分含量开始下降,各LID措施下的降雨入渗均可至 L_0 土层;小雨条件,各LID措施下 L_1 土层土壤含水量仅在降雨前期出现小波动,小雨在草地可入渗至 L_3 土层,而小雨对于过水草沟和下沉式绿地,仅入渗至 L_1 土层,其余各层土壤含水量均没有明显变化,小雨降雨30h后,各个措施下土壤含水量趋于平稳,小雨在草地的入渗深度较过水草沟和下沉式绿地深10—20cm。

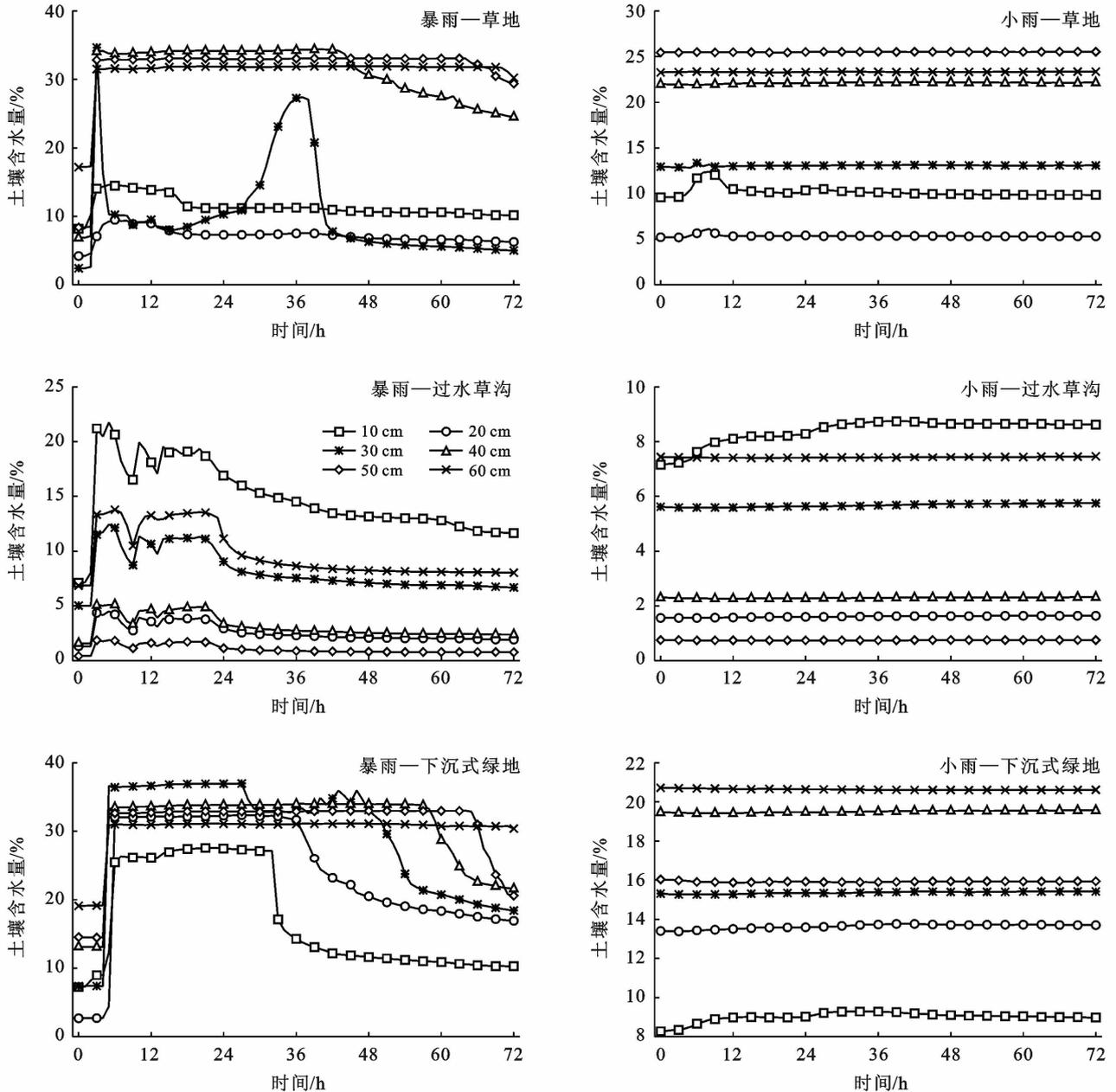


图3 不同降雨条件下各LID措施的土壤含水量变化

不同降雨条件下各LID措施储水量详见表4。暴雨和小雨后72h草地、过水草沟、下沉式绿地的储水量分别为104.51,31.37,115.54mm和99.48,26.16,94.08mm。通过公式(3)计算土壤水分补给量,研究

结果表明,暴雨条件,各措施储水效果明显,草地和过水草沟土壤补给量分别为63.68和14.84mm,下沉式绿地补给量最高,为66.49mm,充分发挥蓄存功能,下沉式绿地和草地对雨水的存蓄补给效果明显。

主要是因为 LID 措施代替了原有的部分草地,大大增加了雨水的入渗能力和存储能力,相比于传统小区绿地,下沉式绿地措施对雨水的存蓄效果更加明显;小雨条件各措施储水量增加值变化不明显,草地、过水草沟和下沉式绿地土壤补给量分别为 3.94, 1.71 和 1.26 mm,各个措施均有一定的蓄存量。

表 4 不同降雨条件下各 LID 措施储水量

降雨条件	土壤储水量/mm		
	草地	过水草沟	下沉式绿地
暴雨前	47.22	22.32	64.02
暴雨最大值	110.9	37.16	130.51
暴雨后 72 h	104.51	31.37	115.54
小雨前	98.46	24.84	93.18
小雨最大值	102.40	26.55	94.44
小雨后 72 h	99.48	26.16	94.08

LID 措施在暴雨条件下的蓄存效果显著,能够有效减少径流总量并存储积水,小雨条件下 LID 措施能有效减少小区发生内涝的概率。要解决内涝问题,仍需要多布设下沉式绿地,并多保留草地。

2.4 冻融条件土壤水分变化

不同措施下冻融期(2018 年 11 月至 2019 年 2 月)土壤平均温度如图 4 所示。由图 4 可知,在整个冻融期内,草地、过水草沟和下沉绿地的平均温度随着土壤深度增加呈现增加趋势,在 60 cm 土层中,草地、过水草沟和下沉绿地的温度达到最大值 5.23, 5.95, 5.82 °C。研究结果表明,不同措施下的温度变化大致相同,低温主要出现在各措施的 0—10 cm 层,在 10—60 cm 的土壤深度中,草地、过水草沟和下沉绿地三种措施的下垫面温度呈现:过水草沟>下沉式绿地>草地,冻融期内,过水草沟和下沉绿地的温度高于草地,两种 LID 措施有着良好的保温效果, LID 措施深层保温效果较浅层更加明显。

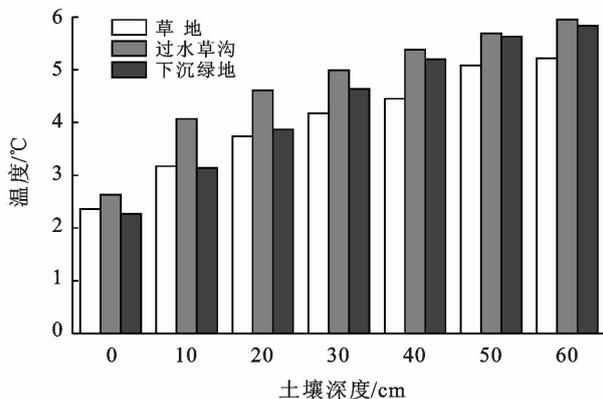


图 4 不同 LID 措施下土壤平均温度

不同 LID 措施土壤总冻融量如图 5 所示。由图 5 可知,在整个冻融期内,草地、过水草沟和下沉式绿地的总冻融量随着土壤深度增加呈现减少趋势,其中草地、过水草沟和下沉绿地的冻融量分别达到 111.16, 75.73 和 46.9 mm,所有措施在 0—10 cm 层总冻融量为 88.30 mm,占总冻融量的 37.34%。在整个冻融期内,草地、过水草沟和下沉式绿地等 3 种下垫面总冻融量在 L_1 土层中呈现:过水草沟>草地>下沉式绿地;在 L_2 — L_6 土层中呈现:草地>下沉式绿地>过水草沟;冻融主要集中于 L_1 土层层, L_2 — L_6 土层土壤对比 L_1 土层土壤,冻融量较少。因为 LID 措施的取代传统小区绿地,使得冬季小区绿地内冻融的水分减少, LID 措施内土壤水分增加。通过对土壤温度和冻融量分析表明, LID 措施土壤保温性能良好,并且能够达到很好的冻融控制效果,若冬季冻土较多,可适当多布设 LID 措施,对土壤温度的降低起到一定的缓释作用。

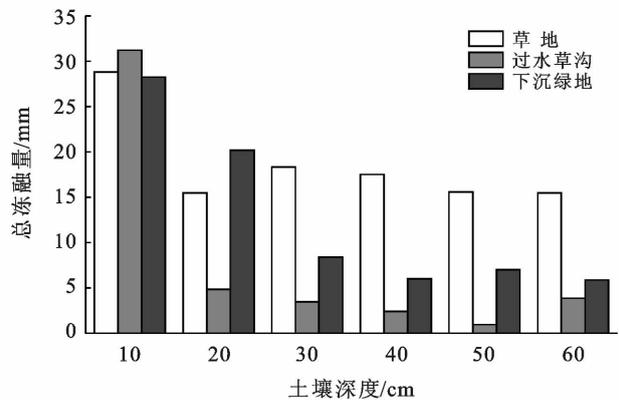


图 5 不同 LID 措施土壤总冻融量

2.5 LID 措施蓄存潜力评估

为了对建设海绵城市给玫瑰苑小区带来的绿化面积和土壤储水量进行评估,首先对玫瑰苑小区海绵城市建设所带来的 LID 措施面积进行评估,分析得到玫瑰苑小区两种 LID 措施面积大小, LID 措施面积评估详见表 5。过水草沟和下沉式绿地面积分别为 5 574.93 和 9 268.00 m²。玫瑰苑小区的绿地面积潜力可达 18 804.05 m²。

表 5 LID 措施面积评估

措施	当前 LID 措施面积/m ²	比例/%	玫瑰苑绿地面积评估/m ²
过水草沟	5 574.93	37.56	7 062.71
下沉式绿地	9 268.00	62.44	11 741.34

玫瑰苑小区 LID 措施调蓄潜力评估详见表 6。分析玫瑰苑小区蓄存水资源的含量,综合 LID 措施

的空间分布特征,在土地利用及储水量变化的基础上,评估玫瑰苑小区的调蓄潜力。结果表明,小区全年蓄存潜力为 $1\ 691.31\ \text{m}^3$,其中雨季蓄存潜力 $1\ 766.46\ \text{m}^3$,旱季蓄存潜力 $1\ 216.31\ \text{m}^3$;暴雨补给

潜力可达 $1\ 121.8\ \text{m}^3$,小雨补给潜力较低;冻融期内,各个措施冻融潜力为 $699.67\ \text{m}^3$ 。各种影响因素下,研究区玫瑰苑小区 LID 措施调蓄潜力可观,存储调蓄效果明显。

表 6 LID 措施调蓄潜力评估

m^3

潜力评估	全年蓄存潜力	雨季蓄存潜力	旱季蓄存潜力	暴雨补给潜力	冻融潜力
过水草沟	243.55	263.60	184.82	132.78	279.16
下沉式绿地	1 447.76	1 502.87	1 031.48	989.02	420.51

3 讨论

引起土壤水分变化因素有很多,不同 LID 措施下土壤水分还会受到填料、植被类型、LID 措施结构等因素的影响^[24]。土壤表层的植被的变化也会导致土壤物理性质的变化^[25]。混合 LID 措施对径流也有一定的削减作用^[26],从而改变土壤水分。本文中过水草沟相比于草地和下沉式绿地,雨季和旱季、不同降雨条件和冻融条件下土壤储水量和冻融量较低,与王艳宁^[27]等研究结果相差较大,经过实地考察,可能因为过水草沟土层受到土工布等材料影响,导致土壤结构过于紧致或松散,孔隙度过小或过大,土壤水保留至土壤表面或下渗至 60 cm 之下,引起过水草沟土壤储水量低于草地和下沉式绿地的现象。总之,本研究中虽显示下沉式绿地在各种影响因素下,储水量最高,但现实中同种措施的植被覆盖不同,且常常需要多种 LID 措施相结合,在实际的海绵城市建设过程中,需要考虑不同 LID 措施的结构、填料、植被覆盖等方法的改进,不断提高各种 LID 措施的储水量。

4 结论

(1) 固原市海绵区块主要土地利用类型为耕地、林地和建筑用地土地利用变化程度从东部向西部延伸;玫瑰苑小区 LID 措施面积占总面积的 24.37%。

(2) 下沉式绿地和草地对降雨有显著的存蓄作用,但过水草沟存蓄效果不明显,6 个土层深度的土壤含水量均属于中等变异;LID 措施对暴雨条件下的雨水蓄存效果显著,小雨条件下能有效减少小区发生内涝的概率。

(3) 冻融期内随着土层深度增加,各措施下垫面平均温度呈现增加趋势;而各措施冻融量呈现减小趋势,冻融主要集中于 0—10 cm 层,占总冻融量的 37.34%。

(4) 经评估结果显示,LID 措施的存蓄潜力巨大,对全年降雨有着良好的存蓄潜力,同时对暴雨后的存蓄潜力较多,布设 LID 措施能够有效缓解内涝,增加土壤储水量,减轻排水管网压力。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 张建云,王银堂,胡庆芳,等.海绵城市建设有关问题讨论[J].*水科学进展*,2016,27(6):793-799.
- [3] 段晓涵,郑志宏,赵飞.基于海绵城市理念的低影响开发设施应用研究[J].*科技创新与应用*,2019(1):25-27.
- [4] 段晨宇.黄土高原植被对土壤储水量和土壤干层的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [5] Guoce Xu, Tiegang Zhang, Zhanbin Li, et al. Temporal and spatial characteristics of soil water content in diverse soil layers on land terraces of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2017,158:20-29.
- [6] 刘继龙,任高奇,付强,等.秸秆还田下土壤水分时间稳定性与玉米穗质量的相关性[J].*农业机械学报*,2019,50(5):320-326.
- [7] 陈军锋,郑秀清,臧红飞,等.季节性冻融期灌水对土壤温度与冻融特性的影响[J].*农业机械学报*,2013,44(3):104-109.
- [8] 李慧,靳志锋,岳胜如.冻融期不同地表覆盖模式对土壤水分的影响[J].*节水灌溉*,2018,278(10):24-26,32.
- [9] 樊贵盛,贾宏骥,李海燕.影响冻融土壤水分入渗特性主要因素的试验研究[J].*农业工程学报*,1999,15(4):88-94.
- [10] 孙艳伟,魏晓妹, Pomeroy C A. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望[J].*水科学进展*,2011,22(2):287-293.
- [11] Allen P D, William F H, Robert G T, et al. Bioretention technology: Overview of current practice and future needs [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009,135(3):109-117.
- [12] De Busk K, Wynn T. Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2011,137(9):800-808.
- [13] Ahiablame L, Shakya R. Modeling flood reduction effects of low impact development at watershed scale [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016,

- 171(15):81-91.
- [14] 刘昌明,张永勇,王中根,等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. 自然资源学报,2016,31(5):719-731.
- [15] 汪艳宁,张杏娟,程方,等. 植被渗透浅沟对城市暴雨径流的调蓄效应研究[J]. 中国给水排水,2012,28(5):61-63.
- [16] 李怀恩,贾斌凯,成波,等. 海绵城市雨水径流集中入渗对土壤和地下水影响研究进展[J]. 水科学进展,2019,30(4):589-598.
- [17] 李娜,孟雨婷,王静,等. 低影响开发措施的内涝削减效果研究:以济南市海绵试点区为例[J]. 水利学报,2018,49(12):1489-1502.
- [18] 周瑶,马红彬,贾希洋,等. 不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵典型草原土壤质量评价[J]. 农业工程学报,2017,33(18):102-110.
- [19] Xinbin Tu, Kwong A K L, Fuchu Dai, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides [J]. *Engineering Geology*, 2009,105(1/2):134-150.
- [20] 韩仕峰,李玉山,张孝中,等. 黄土高原地区土壤水分区域动态特征[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(黄土高原区域治理技术体系与效益评价专集),1989(1):161-167.
- [21] 刘小路,鲁克新,李鹏,等. 不同降雨条件下坡面土壤水分入渗过程研究与模拟[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(11):114-118.
- [22] Neil J M, Philip J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation [J]. *Geoderma*, 1999, 89(1):67-94.
- [23] 成玉婷,徐国策,李鹏,等. 丹江流域径流养分的空间变异特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(4):93-99.
- [24] 石风善. 多年生混播草坪土壤物理性质的研究[J]. 草原与草坪,2004(2):31-33.
- [25] 丛晓峰,刘立成,王宇超,等. 不同干扰对城市绿化用地土壤物理性质的影响[J]. 中国农学通报,2015,31(28):166-172.
- [26] 李庆云,余新晓,信忠保,等. 黄土高原典型流域不同土地利用类型土壤物理性质分析[J]. 水土保持研究,2010,17(6):106-110,114.
- [27] 李旦,叶长青. 基于耦合 SWMM 模型和 NSGA-II 算法的多目标低影响开发措施优化设计方法及应用[J]. 水电能源科学,2019(6):58-61.

(上接第 161 页)

- [12] Gong Peng, Liu Han, Zhang Meinan, et al. Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 [J]. *Science Bulletin*, 2019,64(6):370-373.
- [13] 李骛,魏欣,李子轩. 土壤侵蚀动态监测中的高分辨率影像土地利用解译精度分析[J]. 中国水土保持科学,2018,16(3):8-17.
- [14] Hansen M C, Reed B. A comparison of the IGBP DIS-Cover and University of Maryland 1 km global land cover products [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000,21(6/7):1365-1373.
- [15] Fritz S, See L. Identifying and quantifying uncertainty and spatial disagreement in the comparison of global land cover for different applications [J]. *Global Change Biology*, 2008,14(5):1057-1075.
- [16] Yang Yongke, Xiao Pengfeng, Feng Xuezi, et al. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125: 156-173.
- [17] 张荣祖. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区土壤微形态与自然地理条件[J]. 科学通报,1973,18(3):134-138.
- [18] Amir S, Saqib Z, Khan A, et al. Land cover mapping and crop Phenology of Potohar region, Punjab, Pakistan [J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 56(1):187-196.
- [19] Longley P A. *Geographical Information System (2nd ed, Abridged) [M]*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [20] Cohen J. Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit [J]. *Psychological Bulletin*, 1968,70(4):213-220.
- [21] 牛亮,杨勤科. DEM 尺度变换中直方图相似度计算与应用[J]. 水土保持研究,2010,17(3):120-125.