

基于 HYDRUS-1D 的城市草地土壤水分模拟

——以扬州市人工草地为例

朱超凡, 黄金柏, 顾准, 罗迪文

(扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: [目的] 研究城市化背景下草地土壤水分运动规律, 为提升海绵城市建设水平提供科学依据和技术支撑。[方法] 以江苏省扬州大学扬子津校区农水与水文生态试验场的人工草地为研究区, 利用实测降雨和同期土壤含水量数据对不同降雨事件下的雨水入渗深度进行分析。通过 HYDRUS-1D 模型对研究区土壤含水量变化过程进行模拟。[结果] 在小雨(<10 mm)和中雨($10\sim 25$ mm)事件中, 研究区草地的雨水入渗深度分别小于 15 cm 和 30 cm; 在大雨($25\sim 50$ mm)到暴雨(>50 mm)事件中, 雨水入渗深度通常超过 30 cm, 或可达 60 cm 以上; 土壤含水量模拟值与实测值的均方根误差范围为 $0.012\sim 0.034$ cm^3/cm^3 。[结论] 不同等级降雨事件下的草地雨水入渗深度存在明显差异, 入渗深度总体上随着降雨量的增加而增加; HYDRUS-1D 模型能够准确模拟不同等级降雨事件下的城市人工草地区雨水入渗深度。

关键词: 人工草地; HYDRUS-1D; 土壤水分模拟; 降雨量; 入渗深度

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)03-0118-09

中图分类号: S152.7

文献参数: 朱超凡, 黄金柏, 顾准, 等. 基于 HYDRUS-1D 的城市草地土壤水分模拟[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 118-126. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.017; Zhu Chaofan, Huang Jinbai, Gu Zhun, et al. Soil moisture simulation in urban grassland using HYDRUS-1D [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 118-126.

Soil Moisture Simulation in Urban Grassland Using HYDRUS-1D

—Taking Artificial Grassland in Yangzhou City as an Example

Zhu Chaofan, Huang Jinbai, Gu Zhun, Luo Diwen

(School of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

Abstract: [Objective] The soil moisture movement in grassland under the background of urbanization was studied in order to provide a scientific basis and technical support for improving the construction level of sponge city. [Methods] The study area was an artificial grassland at the hydraulic and hydro-ecological testing ground, located on the Yangzijin campus of Yangzhou University, Jiangsu Province. Observed rainfall data and soil moisture data were used to analyze infiltration depths under various rainfall events. Soil moisture variation processes at the study area were simulated using the HYDRUS-1D model. [Results] During light rain (<10 mm) and moderate rain ($10\sim 25$ mm) events, rainfall infiltration depths at the grassland study area were not more than 15 cm and 30 cm, respectively. During heavy rain ($25\sim 50$ mm) and torrential rain (>50 mm) events, rainfall infiltration depths were always more than 30 cm, and sometimes exceeded 60 cm. Root mean square errors of simulated results against observations ranged from 0.012 cm^3/cm^3 to 0.034 cm^3/cm^3 . [Conclusion] Rainfall infiltration depths at the grassland area are clearly different under rainfall events with different magnitudes, and infiltration depth can generally increase with increasing rainfall amount. Additionally, the HYDRUS-1D model can accurately simulate rainfall infiltration depths under differing rainfall amounts for urban grassland areas.

收稿日期: 2020-12-26

修回日期: 2021-03-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“耦合融雪的分布式流域降雨—径流过程数值模型的研究”(41271046); 2019 年扬州大学科技创新培育基金项目(2019CXJ069); 2018 年扬州大学青蓝工程—中青年学术带头人项目

第一作者: 朱超凡(1996—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤水分模拟。Email: zhuchaofan960423@163.com。

通讯作者: 黄金柏(1974—), 男(汉族), 黑龙江省桦南县人, 副教授, 主要从事物理性分布式水文模型、流域水文、陆面过程等研究。Email: huangjinbai@aliyun.com。

Keywords: artificial grass; HYDRUS-1D; soil moisture simulation; rainfall; infiltration depth

城市快速发展和建设对自然水循环系统造成了无序的干扰和破坏,进而引发了一系列的城市水问题^[1]。土壤水分作为水文循环的重要因子,是制约植物生长发育的物质基础^[2],也是城市水资源管理、洪水预报等的重要参数,对其变化过程模拟有助于探究土壤水分运移规律^[3]。

降水可通过影响土壤水分的可获得性间接影响水文循环^[4],国内外学者针对降雨与土壤水分关系进行了大量研究,如 Pan 等^[5]提出了一种直接根据降雨数据估算浅层土壤水分的分析方法;周海等^[6]开展了河西走廊典型荒漠区土壤水分对降水脉动响应的研究,发现降雨量的大小直接影响土壤水分的补给量;刘战东等^[7]基于不同降雨条件下土壤水分的变化,对麦田降雨的有效利用情况进行了评估,等。因此,探讨降雨与土壤水分变化的关系有助于揭示不同降雨过程对土壤水分的影响机理。HYDRUS-1D 基于 Richards 方程综合考虑了土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 系统中的水热运动、溶质运移和根系吸水过程,且集成了参数优化功能,适用于恒定或非恒定边界条件的模拟^[8-9]。

国内外关于 HYDRUS-1D 模型模拟土壤水分的研究有很多,如 Ma 等^[10]将 HYDRUS-1D 模型中地表阻力计算公式进行了修正,提高了土壤水分的模拟精度;Satchithanatham 等^[11]利用 HYDRUS-1D 模型模拟灌溉后马铃薯根区土壤含水量变化来确定合理的灌溉量;Ries 等^[12]基于 HYDRUS-1D 模型的计算结果,对地中海地下水补给的变化进行了评估;童永平等^[13]采用 HYDRUS-1D 模型对黄土高原小麦地和苹果地深层土壤水分变化进行模拟并得到其主控因素为叶面积指数和根系深度等。

已有的基于 HYDRUS-1D 对土壤水分模拟的研究,多以“月”或“日”为尺度^[14-15],采用更小时间步长(如 1 h)对城市地区土壤水分模拟的研究相对较少。城市草地作为城市生态系统的重要组成部分,在缓解城市内涝灾害、改善城市生态环境等方面发挥着重要作用^[16-18]。

为揭示城市化背景下人工草地植被土壤水分的变化特性以及降雨量与入渗深度之间的关系,本研究选取位于扬州城区一隅的扬州大学农水与水文生态试验场的单一草种草地(狗牙根)为研究区,对不同等级降雨事件的雨水入渗深度进行分析,采用 HYDRUS-1D 对草地植被土壤水分逐时变化过程进行模拟,利用模拟结果检验基于观测数据分析得到的降雨事件降雨量与所选单一草种植被入渗深度的关

系,以期在城市化背景下草地土壤水分运动规律的研究以及基于发展草地植被提升海绵城市建设水平提供部分基础数据。

1 研究区概况与数据观测

1.1 研究区概况

扬州市地处江苏省中部,江淮平原南部,属亚热带湿润季风气候,四季分明,日照充足,空气湿度大,雨量充沛。年平均气温 16.1 °C,年平均太阳辐射量 128.3 W/m²,年平均相对湿度 75.6%,多年平均降雨量 910 mm,汛期(5—9 月)降雨量约占全年降雨量的 67%^[19]。扬州是国家生态园林城市,城区分布着多个绿地、公园,绿化覆盖率达 44.03%,在改善扬州城区水分循环和减轻内涝方面发挥着重要作用。

选取扬州大学扬子津校区农水与水文生态试验场的草地为研究区,研究区面积约为 340 m²,植被分布主要为单一草种(狗牙根),覆盖度近 100%。狗牙根为多年生暖季型草本植物,5—9 月为生长高峰期,具有抗旱抗杂草、适应性强等特点,其根系深度为 8~10 cm。目前,该草种作为绿化用草已广泛应用于南方各城市公园、小区、学校等。研究区 0—60 cm 土壤主要为粉壤土,地下水(潜水)位埋深约 2—5 m,周围分布着较多建筑物、不透水路面等。

1.2 数据观测

利用土壤水分计(型号: H21-002;制造商:美国 On-Set 公司)对深度为 5, 15, 30, 60 cm 的土壤水分进行观测(观测点: 32°21'14.95"N, 119°23'46.32"E),观测时间间隔为 1 h;采用自动气象站(型号: U30-NRC-10-S100-000;制造商:美国 OnSet 仪器设备公司;观测点高程: 14 m)对研究区温度(T)、风速(u)、降雨量(P)、相对湿度、太阳辐射量等数据进行间隔为 1 h 的观测。观测时段为 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 9 月 19 日,包含一个完整生长期。

对研究区不同深度土壤进行采样,采用激光粒度分析仪(型号: Mastersizer 3000 E)对土壤的颗粒组成进行测量,筛选得到各层土壤样本的颗粒级配(黏粒、砂粒、粉粒的百分含量)。

2 模型构建

2.1 基础方程式

利用 HYDRUS-1D 模型可对土壤水分的一维垂向运动过程进行模拟,采用以含水率 θ 为因变量的 Richards 方程(式 1)来构建水分运移模型。

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S \\ K(\theta) = K_s \theta_e^l \left[1 - (1 - \theta_e^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \\ \theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha |h|)^n \right]^{-m} \\ (m = 1 - \frac{1}{n} \quad 0 < m < 1, n > 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中： θ 表示土壤含水量 (cm^3/cm^3)； t 表示时间 (h)； z 为土层深度 (cm)，以地面为基准面，坐标向上为正； $D(\theta)$ 为土壤水分扩散率 (cm^2/h)； $K(\theta)$ 为非饱和导水率 (cm/h)； S 为土壤水分汇源项，表示作物根系吸水速率 (cm/h)； K_s 为饱和导水率 (cm/h)； $\theta_e, \theta_s, \theta_r$ 分别为土壤有效含水率、饱和含水率和残余含水率 (cm^3/cm^3)； α, l, m, n 均为拟合参数； h 为土壤基质势 (cm)。

2.2 根系吸水

HYDRUS-1D 模型考虑植物根系吸水过程，将根系吸水转化为水分胁迫函数。模型提供的水分胁迫函数有两种：Feddes (梯形函数) 和 S-shaped (S 形函数)。本研究采用 Feddes 水分胁迫函数来描述草地植被的根系吸水过程，具体表达式如下：

$$S(h) = \alpha(h) b(x) T_p \quad (2)$$

式中： $S(h)$ 是吸水强度函数 (h^{-1})； $\alpha(h)$ 是水分胁迫函数，无量纲； $b(x)$ 为标准化根系吸水分配密度函数 (cm^{-1})； T_p 为作物潜在蒸腾速率 (cm/h)。

2.3 定解条件

2.3.1 蒸散发计算

潜在蒸散发 (ET_0) 为 HYDRUS-1D 模型的重要输入参数之一，采用 Penman-Monteith 模型推求 ET_0 ，公式如下^[20]：

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} u (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u)} \quad (3)$$

式中： ET_0 为潜在蒸散发量 (mm/h)； Δ 为温度随饱和水汽压变化曲线的斜率 (kPa/C)； R_n 为草地植被表层净辐射量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]； G 为土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]； γ 为干湿温度计常数 (kPa/C)； T 为气温， C ； u 为风速 (m/s)； e_s 为饱和水汽压 (kPa)； e_a 为实际的水汽压 (kPa)，式中各因子的计算

公式具体参考周钦等^[21]。

HYDRUS-1D 模型对草地植被潜在蒸腾量 T_p 和土壤蒸发量 E_p 分开处理，公式如下：

$$T_p = \text{ET}_0 (1 - e^{-k \cdot \text{LAI}}) = \text{ET}_0 \cdot \text{SCF} \quad (4)$$

$$E_p = \text{ET}_0 e^{-k \cdot \text{LAI}} = \text{ET}_0 (1 - \text{SCF}) \quad (5)$$

式中： T_p 为草地植被潜在蒸腾量 (mm/h)； E_p 为土壤蒸发量 (mm/h)； k 为冠层消光系数，取默认值 0.463^[22]；LAI 为草地植被叶面积指数，本文取值 2.5 ~ 3.5^[23]；SCF 为植被覆盖系数，无量纲^[24]。

2.3.2 定解条件

初始条件为起始时刻土壤含水量实测值；上边界条件为 1 h 序列的降雨量和潜在蒸散发 (ET_0)，设置为大气边界 (atmospheric BC with surface layer)；下边界因未达潜水层 (地下水位埋深 2 ~ 5 m)，处于非饱和带，设置为自由排水 (free drainage) 边界。

$$\begin{cases} \theta(z, t) = \theta_0(z) & (t = 0) \\ -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \Big|_{z=0} = q_0(t) & (t > 0) \\ \theta(L, t) = \theta_L(t) & (t > 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中： θ_0 为土壤含水量的初始值； $q_0(t)$ 为土壤水通量 (cm/h)； L 是下边界的深度 (cm)； $\theta_L(t)$ 为下边界土壤含水量 (cm^3/cm^3)。

2.4 时间和空间离散化

根据土壤的颗粒组成 (见表 1) 和草地植被的根系层分布 (0—10 cm)，将自地面开始至地面以下 60 cm 的土壤划分为 4 层 (表 1)，以 1 cm 间隔将土壤剖面分割为 60 个单元，同时设置节点 61 个，监测点 4 个；模拟时段为 2018 年 4 月 4 日 00:00 至 2019 年 9 月 19 日 18:00，共计 12 811 h。

2.5 参数率定

利用 HYDRUS-1D 模型对土壤水分模拟，需基于研究区的实际对模型参数 $\theta_r, \theta_s, \alpha, n$ 和 K_s 等准确率定。根据土壤粒径组成的筛选结果 (表 1)，采用基于神经网络的 Rosetta 模块初步确定饱和含水量 θ_s 、残余含水量 θ_r 和饱和导水率 K_s 等参数，在此基础上，利用模型计算结果与实测土壤水分数据相比较，通过调整参数值减小模拟值与实测值之间误差，实现对各参数的校正，结果见表 1。

表 1 实测土壤物理性质数据和 Rosetta 获得的土壤水力参数

土层范围/ cm	砂粒/% (50~2 000 μm)	粉粒/% (2~50 μm)	黏粒/% (<2 μm)	θ_s / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_r / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α / cm	n	K_s / ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	l
0—10	27.10	65.71	7.19	0.35	0.045	0.004 7	1.23	2.08	0.5
10—20	21.78	69.76	8.48	0.37	0.051	0.004 6	1.23	2.33	0.5
20—40	17.72	74.05	8.24	0.36	0.056	0.004 8	1.33	1.85	0.5
40—60	19.33	71.23	9.45	0.37	0.053	0.004 5	1.42	1.43	0.5

注： θ_s 饱和含水量； θ_r 残余含水量； K_s 饱和导水率； α, n, l 为拟合参数。

3 结果与分析

3.1 降雨量与入渗深度分析

选取 8 次降雨事件和同期不同深度土壤含水量的观测结果,探讨不同降雨事件的降雨量与入渗深度

的关系。参照中国气象局对降雨等级的划分标准,对 8 次降雨事件的等级进行划分(表 2)。所选的次降雨事件,最大时间跨度为 23 h,为保证雨水的充分入渗,以 4 d 为单位时段进行分析,各时段降雨量、入渗深度见表 2,不同深度土壤含水量变化情况见图 1。

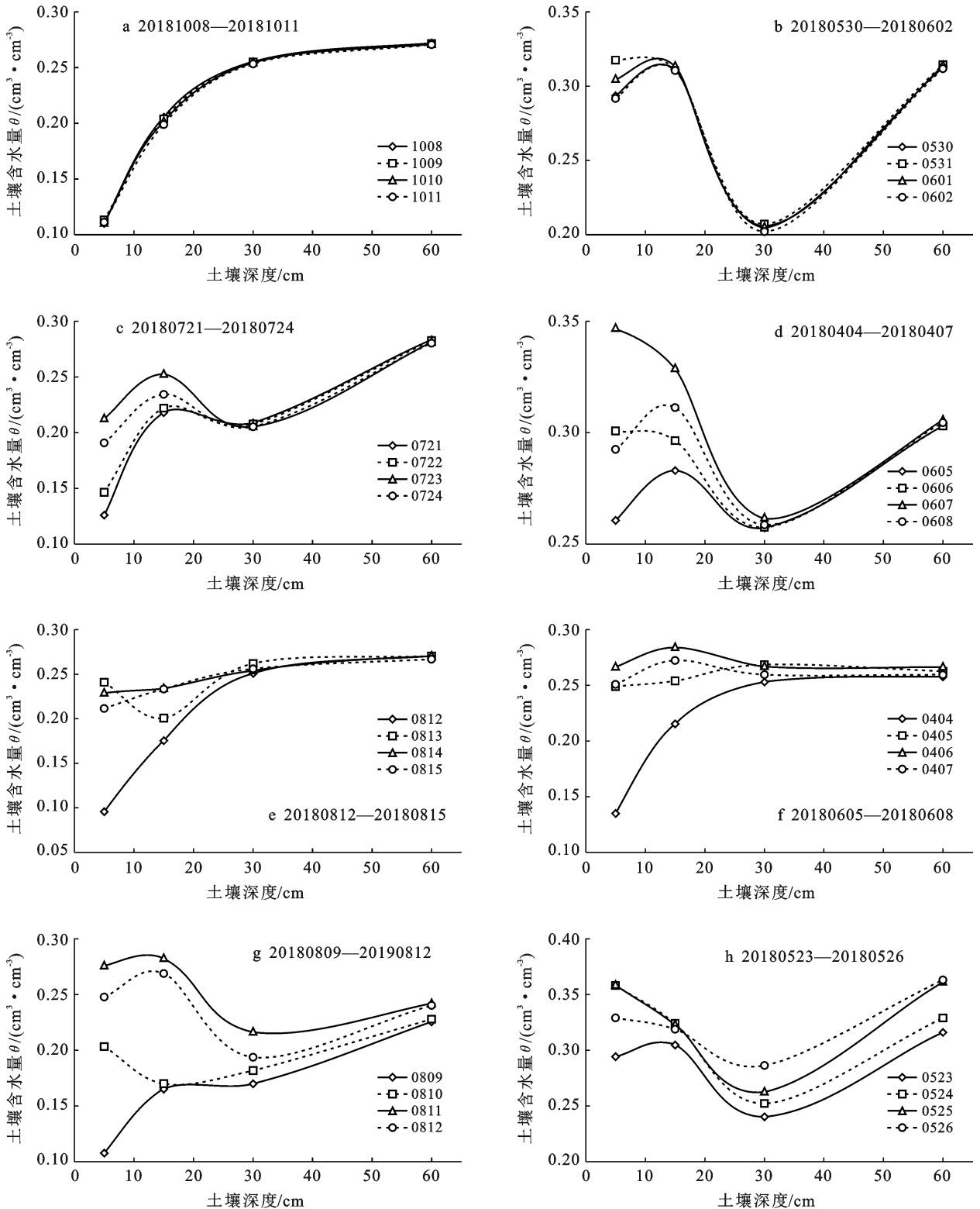


图 1 8 次降雨事件不同深度土壤含水量变化

表 2 研究选择的 8 次降雨事件等级划分

降雨事件	分析时段	降雨发生时段	降雨量/mm	入渗深度 d/cm
小雨(<10 mm)	20181008—20181011	1009(14:00—16:00)	4.8	$d < 5$
	20180530—20180602	0530(22:00)—0531(7:00)	8.9	$5 < d < 15$
中雨(10~25 mm)	20180721—20180724	0722(11:00)—0723(3:00)	17.8	$15 < d < 30$
	20180404—20180407	0405(12:00—23:00)	24.0	$30 < d < 60$
大雨(25~50 mm)	20180812—20180815	0813(00:00—17:00)	37.6	$d > 60$
	20190605—20190608	0606(1:00—14:00)	41.2	$d > 60$
暴雨(>50 mm)	20190809—20190812	0810(2:00)—0811(1:00)	55.0	$d > 60$
	20180523—20180526	0524(22:00)—0525(20:00)	107.0	$d > 60$

图 1a 所示为 2018 年 10 月 8 日至 10 月 11 日各观测深度土壤含水量变动情况。降雨集中在 10 月 9 日,降雨量为 4.8 mm(表 2),在分析时段的 4 d 内,不同深度土壤含水量保持稳定,即雨水入渗未达到 5 cm。主要原因是本次降雨事件的降雨量很小,且研究区草地的草种叶片密度较大,覆被率很高,几乎没有裸露地面,对雨水截留作用较强,从而未能形成有效入渗^[25]。2018 年 5 月 30 日至 5 月 31 日发生一次降雨事件,降雨量为 8.9 mm,5 cm 土壤含水量因雨水入渗有明显增加,15,30,60 cm 土壤含水量保持相对稳定(图 1b)。以上两次降雨事件的等级属小雨,后一次降雨事件的降雨量(8.9 mm)大于前一次(4.8 mm),其入渗深度也大于前一次。

2018 年 7 月 22 日至 7 月 23 日和 2018 年 4 月 5 日各发生了一次等级为中雨的降雨事件,降雨量分别为 17.8,24.0 mm。在各自的分析时段内,5,15 cm 土壤含水量均有较明显增加,30,60 cm 土壤含水量保持稳定,即雨水入渗深度均超过 15 cm 但未达 30 cm(图 1c,1d)。

2018 年 8 月 13 日和 2019 年 6 月 6 日各发生了一次等级为大雨的降雨事件,降雨量分别为 37.6,41.2 mm。在入渗作用下,5,15,30 cm 土壤含水量均有不同程度的增加,60 cm 土壤含水量在 2018 年 8 月 13 日降雨发生期间及发生前、后一段时间内保持相对稳定,表明雨水入渗未到达 60 cm(图 1e);在 2019 年 6 月 6 日降雨事件的入渗作用下,60 cm 土壤含水量有小幅增加(图 1f),即此次降雨事件的入渗达到了 60 cm。

2018 年 5 月 24 日至 25 日和 2019 年 8 月 10 日至 8 月 11 日各发生一次暴雨事件,降雨量分别为 107,55 mm,各观测深度土壤含水量均有明显增加,入渗深度超过 60 cm(图 1h,1g)。

3.2 模型验证

选取均方根误差(RMSE)和纳什效率系数

(NSE)作为评价指标;RMSE 表示模拟值与实测值之间的平均误差水平,其值越接近于 0,误差越小;NSE 表征模型效率,其值越接近 1,模型的可信度越高。相关计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (8)$$

式中: S_i 为土壤含水量的模拟值; O_i 为土壤含水量的实测值; \bar{O}_i 为实测值的平均值。

利用 HYDRUS-1D 对研究区 20180404—20190919(共计 12 811 h)不同深度土壤含水量进行模拟,结果见表 3 及图 2。

表 3 土壤含水量模拟误差评价指标统计结果

深度/cm	RMSE	NSE
5	0.034	0.77
15	0.022	0.78
30	0.015	0.83
60	0.012	0.84

参考同类研究对 HYDRUS-1D 模拟误差的评价结果,张洛丹等^[26]对黄土高原两种乔木林土壤水分模拟结果的 RMSE 在 0.018~0.029 cm^3/cm^3 之间;Kanzari 等^[27]对突尼斯半干旱地区土壤水分模拟结果的 RMSE 在 0.10~0.20 cm^3/cm^3 之间。本研究误差分析结果接近并部分优于上述结果,表明 HYDRUS-1D 对研究区草地土壤水分模拟具有较好的适用性,模拟结果可靠性强。

3.3 入渗深度的模型验证

为验证基于观测数据分析得到的不同等级降雨事件降雨量与入渗深度结果(图 1)的正确性,将表 2 所示 8 次降雨事件的降雨集中时段和同期不同深度土壤含水量的观测及模拟结果进行整理,结果见图 3。

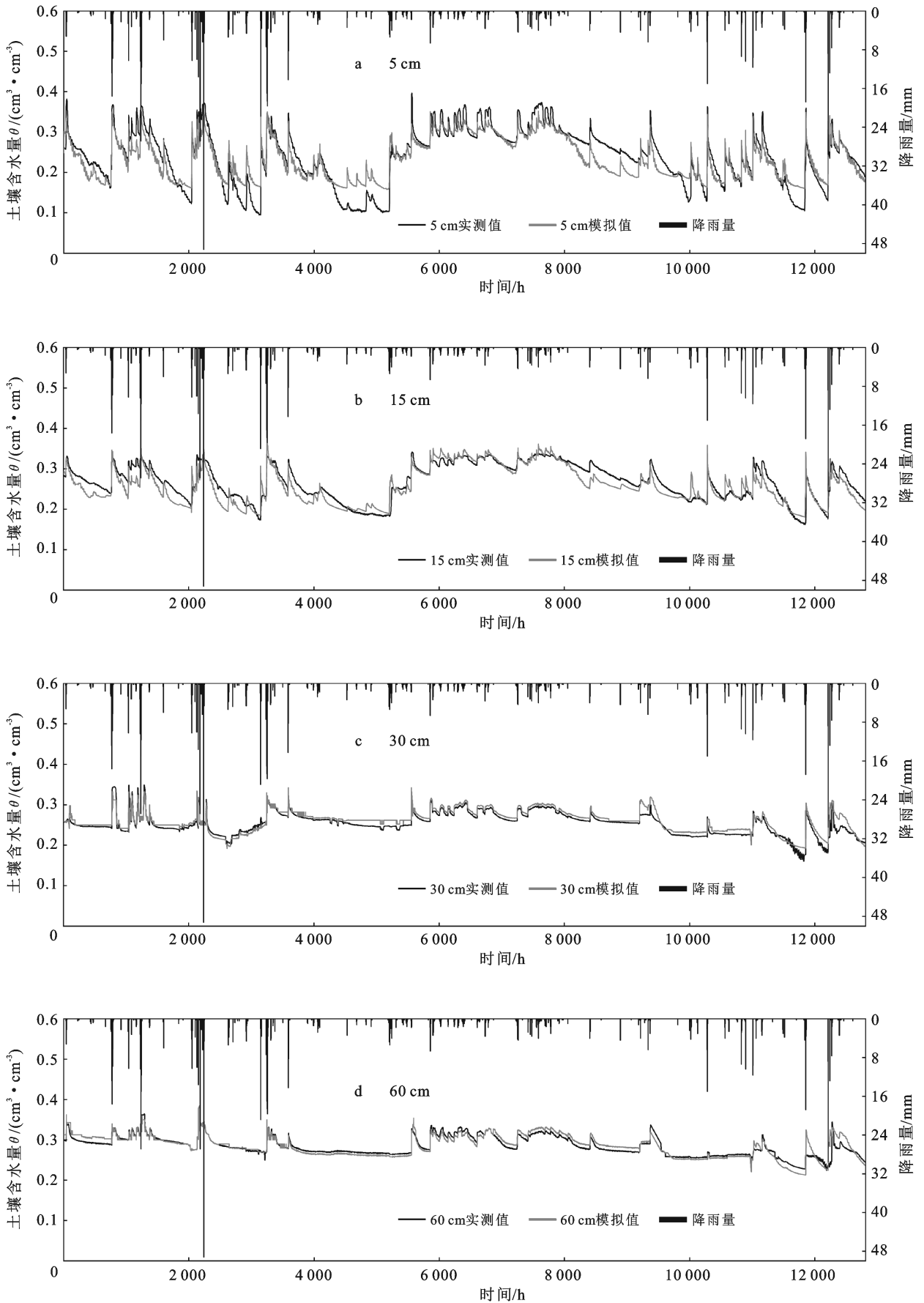


图2 研究区不同深度土壤含水量模拟结果

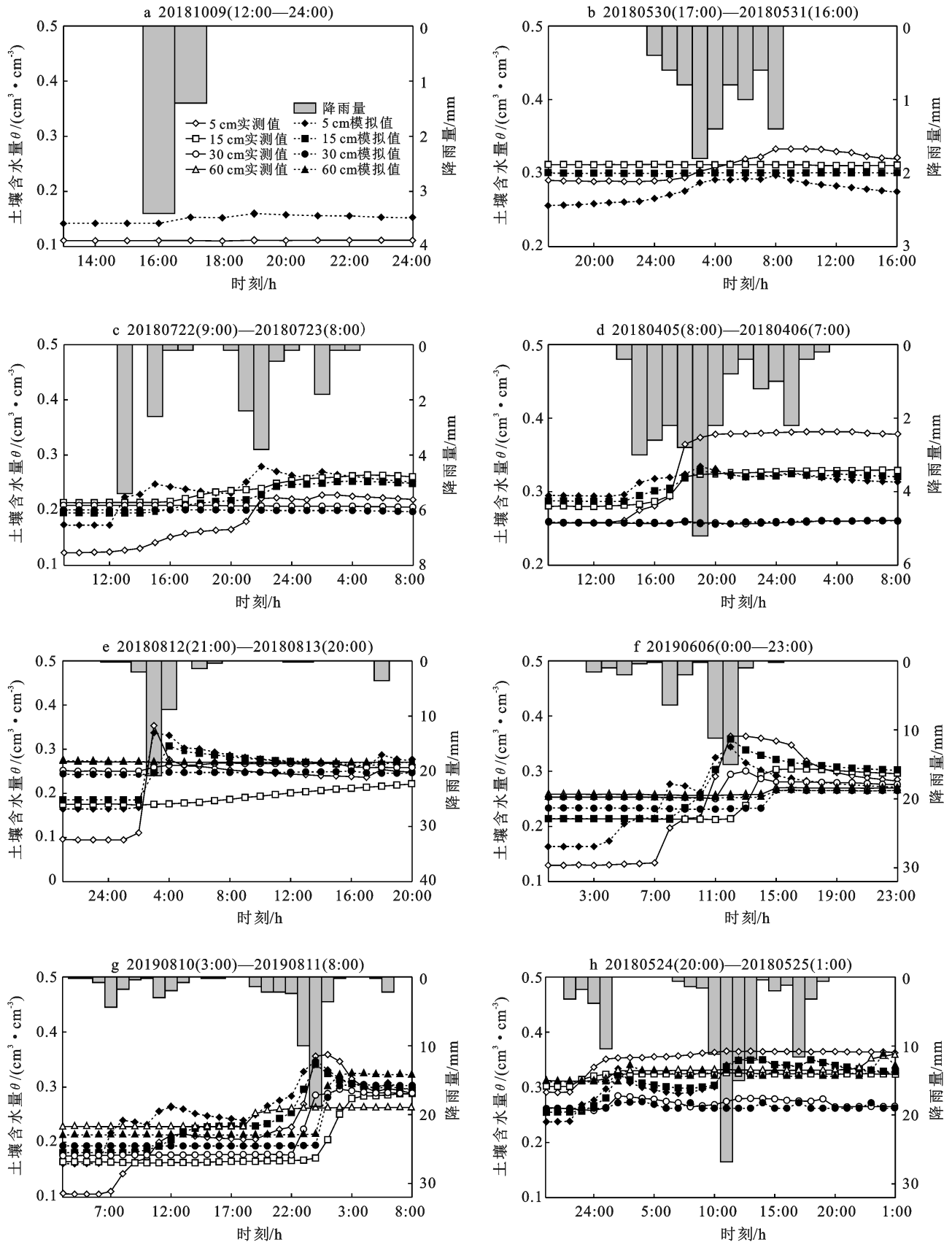


图 3 8 次降雨事件与各深度土壤含水量变化过程

由图 3a 可知, 5 cm 土壤含水量的观测结果在 2018 年 10 月 9 日小雨事件发生过程中及发生前、后

的一段时间内保持稳定, 而模拟值在降雨集中时段有轻微的增加, 模拟值不同于观测结果的主要原因是,

上边界只要有水量的输入,模型中的土壤含水量就会增加,从而导致了 5 cm 土壤含水量观测和模拟结果之间的微小差异,也证实了研究区草地具有较强的截留作用。图 3b 所示为 2018 年 5 月 30 日至 5 月 31 日小雨事件发生及前、后一段时间土壤含水量的变动情况,5 cm 土壤含水量的观测值和模拟值均有增加,且增加幅度相近,而 15 cm 的观测值和模拟值均保持相对稳定,由此验证了前述(5 月 30 日至 5 月 31 日小雨事件)降雨量与入渗深度分析结果的正确性。两次中雨事件(表 2)同期土壤含水量模拟结果显示,30 cm 土壤含水量未发生变动,而 15 cm 土壤含水量有了较明显增加(图 3c,3d),结果与前述中雨条件下的降雨量与入渗深度分析结果一致;大雨事件(表 2)发生过程的土壤含水量模拟结果显示,2018 年 8 月 13 日的入渗未达到 60 cm(图 3e,60 cm 土壤含水量未增加),而 2019 年 6 月 6 日的入渗深度达到了 60 cm(图 3f),模拟结果也与前述一致。对于表 2 所示的两次暴雨事件,模型计算过程中,暴雨发生期间 60 cm(第四层底部)土壤水分通量不为 0,发生了向下释水(图 3g,3h),说明入渗已超过 60 cm,从而验证了暴雨的入渗深度超过 60 cm 的正确性。通过上述分析可知,在缺少实测土壤含水量的情况下,可利用 HYDRUS-1D 对研究区不同降雨事件的入渗深度进行较准确的推求。

4 讨论与结论

4.1 讨论

为探讨研究区草地植被条件下不同降雨等级的降雨量与入渗深度的关系,对随机选取的多次降雨事件与同期土壤含水量变动情况进行分析。结果显示,不同等级降雨事件的降雨量不同,入渗深度存在差别,一般情况下,降雨量越大,入渗深度也越大。对于研究区单一草种(狗牙根)的草地,小雨的入渗深度一般小于 15 cm,中雨的入渗深度多小于 30 cm,而大雨的入渗深度多超过 30 cm,有的超过 60 cm,暴雨的入渗深度更大。研究结果与吴辰(2018 年)^[28]同类研究(植被类型与本研究不同)得到的结论基本一致。

HYDRUS-1D 对研究区草地植被土壤水分的模拟结果表明,不同深度土壤含水量的模拟结果均较好地再现了观测数据的变化过程,但模型对不同深度土壤含水量模拟结果的误差不同,5 cm 土壤含水量模拟值与实测值之间的时段性差别较大,计算期间内的各误差评价指标在各深度模拟结果的误差中也是最大的,如 RMSE 为 $0.034 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,NSE 为 0.77;随着深度的增加,模拟精度也有所增加,主要原因是 5 cm

土壤含水量受降雨入渗和蒸散发等因素的随机影响较大,而 HYDRUS-1D 功能为对土壤水分的垂向运动过程进行模拟(没有土壤水分横向扩散过程的计算),且在垂向计算过程中,模型将截留作为 ET₀ 的一部分,所以对降雨过程中植被截留的准确评价难于实现^[29];由于研究区草地根系深度在 10 cm 左右,随着深度的增加,蒸散发和雨水入渗对土壤含水量的影响逐渐减小,模拟结果的精度也随之增加。5 cm 土壤含水量的模拟误差虽然在各深度模拟结果中是最大的,但模拟精度依然较高,NSE 接近 0.80。

HYDRUS-1D 模型是模拟土壤水分运移的常用工具,但实际土壤水分入渗问题与地表植被类型、土壤物理性质等众多因素相关。本研究依托扬州大学扬子津校区农水与水文生态试验场单一草种的草地植被(狗牙根草坪),对城市化背景下草地植被降雨事件与入渗深度的关系进行了探讨,并对其合理性进行了模型验证,一定程度上揭示了不同等级降雨事件与入渗深度的关系;HYDRUS-1D 对不同深度土壤含水量的模拟结果可以较准确地描述狗牙根草坪土壤含水量随时间的变化过程。为了更准确地评估城市化条件下草地植被入渗特性以及实现土壤水分时空多尺度准确模拟,需对不同类型草地植被截留特性、土壤物理结构等参数进行精确调研、构建具有支撑多尺度时间和空间模拟功能的土壤水分数值模型,相关工作将在今后持续开展。

4.2 结论

本文以扬州市区域性单一草种的草地植被(狗牙根草坪)为研究区,分析降雨等级与入渗深度的关系并对土壤水分模拟结果进行评价,得到主要结论如下:

(1) 一定程度上揭示了不同等级降雨事件与入渗深度的关系,总体上,降雨事件的降雨量越大,入渗深度也越大;小雨的入渗深度一般小于 15 cm,中雨的入渗深度多小于 30 cm,大雨、暴雨的入渗深度多超过 60 cm。

(2) HYDRUS-1D 对研究区土壤水分模拟具有很好的适用性,随着深度的增加,模拟精度有所提高。

(3) 利用 HYDRUS-1D 可对研究区草地不同降雨事件的入渗深度进行精度较高的模拟,在缺少观测土壤水分数据条件下,可利用 HYDRUS-1D 模型推求不同等级降雨事件的入渗深度,结果具有较高精度。

[参 考 文 献]

- [1] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础—城市水文学研究进展[J].水利学报,2019,50(1):53-61.
- [2] 张永旺,王俊,屈亚潭,等.黄土高原植被恢复过程中土壤水分有效性评价[J].灌溉排水学报,2020,39(6):79-85,114.

- [3] 朱忠礼,林柳莺,徐同仁.海河流域不同下垫面土壤水分动态模拟研究[J].地球科学进展,2012,27(7):778-787.
- [4] Muldavin E, Moore D, Collins S, et al. Aboveground net primary production dynamics in a Northern Chihuahuan Desert ecosystem [J]. *Oecologia*, 2008,155:123-132.
- [5] Pan Feifei, Christa D, Peters-Lidard, et al. An analytical method for predicting surface soil moisture from rainfall observations [J]. *Water Resources Research*, 2003,39(11):1314-1333.
- [6] 周海,赵文智.河西走廊典型荒漠区土壤水分对降水脉动响应的稳定同位素分析[J].中国沙漠,2016,36(6):1637-1645.
- [7] 刘战东,秦安振,宁东峰,等.降雨级别对农田蒸发和土壤水再分布的影响模拟[J].灌溉排水学报,2016,35(8):1-8.
- [8] 俞双恩,李倩倩,陈凯文,等. DRAINMOD 和 HYDRUS-1D 模型对水稻控制灌排条件下农田水位的模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):46-52.
- [9] 徐丽萍,张朝晖.基于 Hydrus-1D 的滴灌土壤水分运移数值模拟[J].节水灌溉,2019(2):64-67.
- [10] Ma Huan, Yang Dawen, Lei Huimin, et al. Application and improvement of Hydrus-1D model for analyzing water cycle in an agricultural field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011,27(3):6-12.
- [11] Satchithanatham S, Krahn V, Ranjan R S, et al. Shallow groundwater uptake and irrigation water redistribution within the potato root zone [J]. *Agricultural Water Management*, 2014,132:101-110.
- [12] Ries F, Lange J, Schmidt S, et al. Recharge estimation and soil moisture dynamics in a Mediterranean, semi-arid karst region [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015,19(3):1439-1456.
- [13] 童永平,贺美娜,孙慧,等.黄土关键带深层土壤水分动态模拟与主控因素[J].第四纪研究,2017,37(6):1182-1192.
- [14] 盖佳敏,樊军,王胜.黄土高原粗质地土壤剖面水分运动与浅层地下水补给可能性模拟[J].中国生态农业学报,2018,26(2):253-262.
- [15] 李冰冰,王云强,李志. HYDRUS-1D 模型模拟渭北旱塬深剖面土壤水分的适用性[J].应用生态学报,2019,30(2):398-404.
- [16] 范海荣,常连生,王洪海,等.城市草坪土壤肥力综合评价[J].草业科学,2010,27(10):17-22.
- [17] 许翼,徐向舟,于通顺,等.强降雨条件下城市回填土草坪径流系数的影响因子分析[J].水土保持学报,2014,28(6):82-87.
- [18] 杨世梅,张涛,赵秋梅,等.贵阳市不同栽培草地生态系统呼吸特征及其影响因子[J].草业科学,2020,37(11):2211-2222.
- [19] 许凤群,王荃.扬州市地下水资源特征及可持续利用对策研究[J].扬州职业大学学报,2015,19(4):32-36.
- [20] 徐俊增,彭世彰,张行南,等.两种 Penman-Monteith 公式计算草坪草参考腾发量的适用性[J].农业工程学报,2009,25(12):32-37.
- [21] 周钦,黄金柏,周亚明,等.城市背景下草地蒸散发及土壤水分变异特性:以扬州区域性草地植被为例[J].节水灌溉,2019(3):22-26.
- [22] Chen M, Willgoose G R, Saco P M. Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using HYDRUS-1D [J]. *Hydrological Processes*, 2014,28(2):171-185.
- [23] 黄玫,季劲钧.中国区域植被叶面积指数时空分布:机理模型模拟与遥感反演比较[J].生态学报,2010,30(11):3057-3064.
- [24] Caiqiong Y, Jun F. Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2016,139:1-8.
- [25] 熊沛枫.黄土丘陵区草地群落冠层降雨截留特征及优势种对降雨的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [26] 张洛丹,张瑜,黄明斌,等.黄土高原沟壑区两种乔木林土壤水分平衡的模拟[J].水土保持研究,2015,22(2):26-31.
- [27] 王宇祥,刘廷玺,段利民,等.基于 Hydrus-1D 模型的科尔沁沙地沙丘—草甸相间区土壤水分动态模拟[J].中国沙漠,2020,40(2):195-205.
- [28] 吴辰,郝振纯,鲁承阳,等.五道沟地区土壤水分动态变化规律及模拟研究[J].水电能源科学,2018,36(9):138-142.
- [29] Sutanto S J, Wenninger J, Coenders-Gerrits A M J, et al. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: A comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2012,16(8):2605-2616.