doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.060

河套灌区典型夹砂层农田水分通量模拟与灌溉制度优化

孙　伟[1]　史海滨[1]　李仙岳[1]　苗庆丰[1]　冯壮壮[1]　苏海涛[2]

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;
2.内蒙古自治区水利科学研究院,呼和浩特 010040)

摘要:为揭示不同灌溉制度下河套灌区典型夹砂层农田水分运移机制,在砂层埋深大于 40 cm 农田设置高水(W1)、中水(W2)、低水(W3)3 个灌水水平,高氮(F1)、中氮(F2)、低氮(F3)3 个施氮水平,观测土壤含水率,基于田间试验结果,利用 HYDRUS-1D 模型对典型夹砂层农田土壤水分运移过程进行模拟,分析了不同砂层埋深及不同灌溉制度对根区土壤水分通量与玉米根系吸水量的影响规律。结果表明:根区土壤水分渗漏损失量随砂层埋深增加而减小,可提高根系对砂层以上根区水分的利用。随灌水量增加,根区土壤水分渗漏的减少效果更加明显。当砂层埋深为 20~40 cm 时,砂层上边界土壤水分向下迁移量占灌水量的 12.39%~98.19%;当砂层埋深大于 40 cm 时,土壤水分向下迁移量降为灌水量的 2.73%~7.00%,水分有效利用率显著提高。根系受到的最大水分亏缺发生在第 2 次灌水后至第 3 次灌水前,占总亏缺量的 56.04%~68.56%,拔节期至第 1 次灌水的水分亏缺最小。根系受到的总水分亏缺量随砂层埋深增加而逐渐降低,砂层埋深越深,水分亏缺量越低,与砂层埋深 20~40 cm 相比,根系受到的总水分亏缺量降低 10.76%~45.63%。不同生育阶段根系受到的最大水分胁迫均在砂层埋深 20~40 cm,随砂层埋深增加,水分亏缺量逐渐降低,最大降幅达 82.61%。综合考虑夹砂层土壤水分迁移、根系受到的水分亏缺,建议在夹砂层土壤农田春玉米灌溉时根据砂层分布因地制宜定灌溉制度,砂层埋深 20~40 cm,推荐春玉米在生育期灌溉定额为 189~216 mm,砂层埋深 40~60 cm,推荐灌溉定额为 243~270 mm,砂层埋深大于 60 cm,推荐灌溉定额为 216~270 mm。研究结果可为河套灌区典型夹砂层土壤农田水分高效利用与灌溉制度制定提供理论依据。

关键词:夹砂层农田;土壤水分运移;根系胁迫;HYDRUS-1D 模型;灌溉制度

中图分类号:S274;S513　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0639-14　　**OSID**:

Water Dynamic Simulation and Irrigation Scheme Optimization in Typical Sand-interlayered Soil in Hetao Irrigation District

SUN Wei[1]　SHI Haibin[1]　LI Xianyue[1]　MIAO Qingfeng[1]　FENG Zhuangzhuang[1]　SU Haitao[2]

(1. *College of Water Conservation and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *China*
2. *Inner Mongolia Water Conservancy Research Institute*, *Hohhot* 010040, *China*)

Abstract: In order to reveal the influence mechanism of soil water movement in typical sand-interlayered soil under different irrigation systems in Hetao Irrigation District (HID), HYDRUS-1D model was used to simulate the process of soil water movement in typical sand-interlayered soil, and the effects of different sand depth and irrigation regimes on soil water dynamics were studied based on the field experiments with three irrigation levels of high water (W1), medium water (W2) and low water (W3), high nitrogen (F1), medium nitrogen (F2) and low nitrogen (F3) were set in the farmland at sand depth more than 40 cm. The results showed that the deeper the depth of sand layer was, the more effective it was to reduce the loss of soil water leakage and improve the root water uptake above the sand layer. With the increase of depths of sand layer and irrigation amount, the effect of reducing soil water leakage was more obvious. When the depth of sand layer was 20~40 cm, the soil water leakage at the upper boundary of

收稿日期:2024-04-12　修回日期:2024-08-07

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(2023JBGS0003)、国家自然科学基金项目(U2443210)和内蒙古自治区水利科技项目(NSK202202)

作者简介:孙伟(1990—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail:494567578@qq.com

通信作者:史海滨(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail:shi_haibin@sohu.com

sand layer accounted for 12.39% ~98.19% of irrigation amount. When the depth of sand layer was greater than 40 cm, the soil water leakage was decreased to 2.73% ~7.00% of irrigation amount. The maximum water stress of roots occurred between the second irrigation and the third irrigation, accounting for 56.04% ~68.56% of the total stress, and the water stress from jointing to the first irrigation was the smallest. The total stress on root was decreased with the increase of sand depth. Compared with the stress on 20 ~40 cm, the total water stress of root was decreased by 10.76% ~45.63%. The maximum stress on roots at different growth stages was on the depth of 20 ~40 cm, and the stress was decreased gradually with the increase of sand layer depth, the maximum decrease was 82.61%. Considering the soil water movement and root stress in the sand layer, it was suggested that the irrigation scheme of spring maize on the typical sand-interlayered soil should be set due to the distribution of sand layer. The recommended irrigation regime for different depths of sand layer was as follows: 189 ~216 mm for the depth of 20 ~40 cm, 243 ~270 mm for the depth of 40 ~60 cm, and 216 ~270 mm for the depth greater than 60 cm. The research results can provide theoretical guidance for the formulation of irrigation system on typical sand-interlayered soil in HID.

Key words: sand-interlayered soil; soil water movement; root stress; HYDRUS - 1D model; irrigation scheme

0 引言

内蒙古河套灌区是我国重要的商品粮基地,同时也是内蒙古生态屏障的重要组成[1]。农业是用水大户,由于气候干旱及引黄水量的指令性减少[2],导致农业用水量急剧缩减,农业节水行动势在必行。由于河套灌区气候干旱,蒸降比大于 10,蒸发强烈,降雨较少,缺水成为制约灌区建设高产稳产农田和提高区域生态环境的潜在威胁[3-4]。保障河套灌区农业可持续发展对我国旱区农业生产甚至全国粮食安全具有重要意义。

自然界中的大部分土壤都是以层状交错形式存在,其构造复杂多样[5]。同时,在人类互动的影响下,如灌溉、耕作、土壤改良等,还会在农田中形成致密层、沉积层或犁底层等土层。河套灌区主要为黄河淤灌土,其沉积物分型明显,使得土地质地复杂多变,形成粘砂交错的土体构型[6],土层夹砂结构是河套灌区分布广泛的土体构型[7],其中又以 40 ~100 cm 夹砂层结构最为典型[8]。通过对夹砂层土壤水分运移规律及根系生长的研究发现,夹砂层土壤对土壤水分有一定阻渗作用[9-10],可有效增加砂层以上土壤有效水分含量,砂层埋深越深,土壤保水性越好[10]。而且由于砂层的存在,使得作物根系生长表现出“遇砂即停”的生长特点,根系无法穿透砂层向下深扎,吸收砂层以下土壤水分和养分[10]。典型夹砂层土壤结构具有一定的特殊性,砂层对土壤水分入渗具有一定的阻渗作用,但当上层含水量达到一定值时,土壤水分向下渗漏,形成渗透流,过多的水分通过重力作用损失掉[11]。在河套灌区农业节水大环境下,寻求典型夹砂层土壤条件下的适宜灌溉制度具有一定农业指导意义,农业节水具有强大潜力[12]。

农业节水通常以改进灌溉方式[13-14]、优化种植结构[15]、实行非充分灌溉[16]等措施进行,适用于均质土壤的灌溉制度很难适用于分层土壤农田,不同节水措施和方法在不同土壤类型上的适用性存在差异[17]。常规灌溉方式及灌溉定额在夹砂层土壤农田不具有代表性,夹砂层土壤作物需水规律及灌溉制度有别于均质土壤。盲目地采用以前研究的相关灌溉方式和灌溉制度,并不能最大化优化农业灌水结构,从而获得高产和更高的水肥利用效率。

由于河套灌区土壤异质性较大[18],砂层分布较复杂,在大田研究夹砂层土壤农田的作物需水规律和灌溉制度较困难,而 HYDRUS 作为一款模拟变量饱和度情况下多孔介质中水分和溶质运移软件,可以较为准确地模拟非饱和带土壤水分运动状况及作物根系吸水,HYDRUS - 1D 模型在模拟饱和非饱和带多孔介质中水热溶质运移领域应用广泛,尤其是在模拟分层土壤中水分的入渗特性方面表现较好。该模型不仅能够详细地反映不同土壤层之间水分的传输和分布,还可用来模拟层状土壤水分入渗特性[19-21]。冯壮壮等[22]通过应用 HYDRUS - 1D 模型模拟春玉米生育期田间蒸散发、土壤水分深层渗漏及地下水补给耕层水量与根系吸水量,与不含夹砂层处理对比分析夹砂层对田间水分利用的影响,结果表明,含夹砂层土壤可有效减少棵间蒸发和田间毛管向上补给水量。丁运韬等[23]通过 HYDRUS - 2D 模型模拟膜下滴灌玉米农田深层土壤水分动态和根系吸水,结果表明,滴灌对 100 cm 以下深层土壤含水量基本无影响,基质势越大,深层向上补给水量越大。王晓彤等[24]运用 HYDRUS - 1D 模型模拟了黄

河泥沙充填复垦土壤不同夹层厚度、位置和数量对重构土壤入渗和蒸发特性的影响，结果表明，黄河泥沙充填层中夹土壤层后能够有效改善重构土壤的水分运动特性并提高保水性。目前，关于夹砂层土壤剖面水分分布及运移规律多通过室内土柱试验和数值模拟结合实现，通过设置室内不同砂层分布与砂层质地土柱研究土壤水分入渗和蒸发等的影响[25-26]，所得结果与实际农田种植情况有较大差异。

基于河套灌区典型夹砂层土壤田间观测数据，本研究通过 HYDRUS－1D 软件模拟不同砂层埋深、不同灌溉制度下的不同土层界面水分通量以及根系受到的水分亏缺，研究典型夹砂层农田水分变化，分析不同砂层埋深下土壤水分通量变化，并优化不同砂层埋深的灌溉制度，以期为河套灌区典型夹砂层农田灌溉用水和提高水分利用效率提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2016 年和 2017 年在内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区水利科学研究所曙光试验站（40°49′01″ N，107°26′02″ E）进行。该研究区为典型的大陆性干旱气候区，气候干燥，蒸发强烈，降水稀少，冬季漫长寒冷，夏季短促炎热，昼夜温差较大。多年平均降水量 143.5 mm，降雨年内分配不均，7—9 月降雨量最高，约占全年降雨量的 70%；年蒸发量 2 435.6 mm，春季返盐较为严重，年均相对湿度为 51%，平均气温 7.5℃，其中 1 月均温 －13℃，7 月均温 23℃，最低气温 －33.9℃。年无霜期 150 d，年均日照时数 3 180 h，土壤最大冻深 1.32 m。试验区内土壤结构分层明显，供试土壤为含夹砂层土壤的粉壤土，土壤理化性质见表 1。2016 年和 2017 年春玉米生育期内降雨量与平均气温等气象数据见图 1。

表 1　典型夹砂层土壤物理性质

Tab. 1　Physical properties of typical sand-interlayered soil

砂层埋深/cm	土层深度/cm	容重/（g·cm^{-3}）	土壤粒径占比/%			土壤类型	凋萎系数	田间持水率/%
			黏粒（0～0.002 mm）	粉粒（0.002～0.05 mm）	砂粒（0.05～2 mm）			
	0～20	1.40	13.11	52.23	34.66	粉壤土	0.060	29.2
	20～40	1.38	9.85	52.12	38.03	粉壤土	0.062	31.1
>40	40～50	1.43	12.32	65.88	21.80	粉壤土	0.061	31.4
	50～90	1.54	2.10	8.56	89.34	砂土	0.035	22.0
	90～120	1.48	22.25	65.99	11.76	粉壤土	0.068	31.5

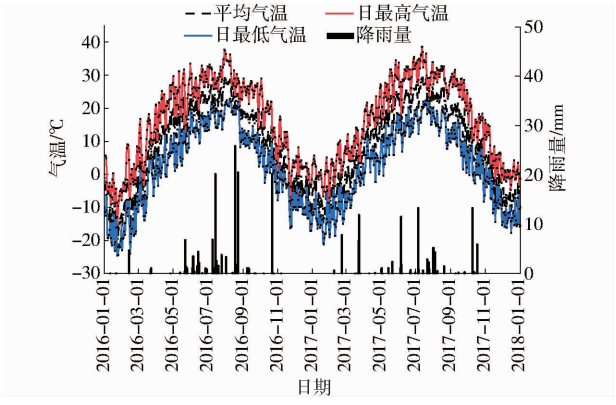

图 1　2016 年和 2017 年日降雨量及气温

Fig. 1　Daily rainfall and air temperature from 2016 to 2017

1.2　试验设计

采用裂区试验设计，根据实际取样调查结果，以实际土壤分层为准，选取砂层埋深大于 40 cm 土壤农田，灌溉方式采用当地常规畦灌，设置水、氮两个因素，根据当地引黄灌溉渠道供水情况及参考当地农民灌水经验，设置灌水次数。以调查的当地灌水施氮量为基准，以当地常规灌溉量作为高水处理，记为 W1，分别减少灌水定额 20%、40% 作为中水和低水处理，记为 W2 和 W3；当地常规施氮量设置为高氮处理，记为 F1，分别降低 20%、40% 作为中氮和低氮处理，记为 F2 和 F3。以常规灌水不施氮作为对照处理（CK），共 10 个处理，试验设置 3 次重复，共 30 个小区。各小区长 9 m，宽 5 m，小区面积为 45 m^2。各试验小区间以高 15 cm 田埂及深 1 m 聚氯乙烯塑料布隔离，以减少小区间水分养分的横向迁移影响。供试玉米品种为‘西蒙 3358’，宽窄行种植，宽行间距 60 cm，窄行间距 40 cm，株距 27 cm。播种时施 P_2O_5 150 kg/hm^{2}和 N 150 kg/hm^2，其中磷肥为磷酸二铵（含 P_2O_5 46%，含 N 18%），氮肥为尿素（含 N 46%）；其余氮素以尿素的形式分别于拔节期及抽雄期追施。全生育期在关键生育期灌水 3 次，灌水量通过水表记录，具体试验方案设计见表 2，施氮量为换算后的纯氮素量。其他田间管理，如除草、病虫害防治等与周边农田一致。

1.3　观测内容与方法

1.3.1　土壤含水率

土壤含水率每隔 15 d 测定 1 次。将所取土样 105℃干燥至恒定质量，测定质量含水率，利用已知

容重,计算得出体积含水率。

表 2 含夹砂层农田水氮试验设计

Tab. 2 Experimental design of water and nitrogen in typical sand-interlayered soil

处理	灌水定额/($m^3 \cdot hm^{-2}$)			灌溉定额/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	追肥量/($kg \cdot hm^{-2}$)		追肥总量/($kg \cdot hm^{-2}$)
	拔节期	抽雄期	灌浆期		拔节期	抽雄期	
W1F1	900	900	900	2 700	187.5	187.5	375
W1F2	900	900	900	2 700	150.0	150.0	300
W1F3	900	900	900	2 700	112.5	112.5	225
W2F1	720	720	720	2 160	187.5	187.5	375
W2F2	720	720	720	2 160	150.0	150.0	300
W2F3	720	720	720	2 160	112.5	112.5	225
W3F1	540	540	540	1 620	187.5	187.5	375
W3F2	540	540	540	1 620	150.0	150.0	300
W3F3	540	540	540	1 620	112.5	112.5	225
CK	900	900	900	2 700	0	0	0

1.3.2 气象数据

气象数据通过试验站自动气象站(HOBOH21-001 型,Onset,美国)获取,同步测定最高气温、最低气温、相对湿度、风速、太阳辐射、气压、降水量等,每 30 min 采集 1 次。地下水位由观测井观测。

1.4 数值模拟及模拟验证

1.4.1 基本原理

Hydrus-1D 模型[27]是一款可用于模拟多层变饱和土壤中的一维水分运动,用于预测深层渗漏量、补给量与蒸散量的土壤环境模拟软件。对于典型夹砂层土壤水分运移的复杂问题,模型模拟是一种了解其运动机理的解决方案。在 HYDRUS-1D 模型中,土壤水分的运动过程采用带有根系吸水源汇项的 Richards 方程来描述,表达式为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1\right)\right] - S(h) \tag{1}$$

式中 θ——土壤体积含水率,cm^3/cm^3

t——时间,d

K——非饱和导水率,cm/d

h——基质势,cm

z——垂直坐标,cm(假设地表为 0,向下增加)

S——根系吸水源汇项,cm/d,表示单位时间内作物从单位体积土壤中吸取水的体积

土壤水分特征曲线和变饱和导水率利用 HYDRUS-1D 中的 Van Genuchten 模型来进行拟合,表达式为

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_a + \dfrac{\theta_m - \theta_a}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & (h < h_s) \\ \theta_s & (h \geqslant h_s) \end{cases} \tag{2}$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s K_h h & (h \leqslant h_k) \\ K_h + \dfrac{(h - h_k)(h_s - h_k)}{h_s - h_k} & (h_k < h < h_s) \\ K_s & (h \geqslant h_s) \end{cases} \tag{3}$$

$$K(h,z) = K_s(z) K_r(h,z) \tag{4}$$

其中

$$K_r = \frac{K_k}{K_s}\left(\frac{S_e}{S_{ek}}\right)^{1/2}\left(\frac{F(\theta_r) - F(\theta)}{F(\theta_r) - F(\theta_k)}\right)^2 \tag{5}$$

$$F(\theta) = \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_\alpha}{\theta_m - \theta_\alpha}\right)^{1/m}\right]^m \tag{6}$$

$$m = 1 - 1/n \quad (n > 1) \tag{7}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{8}$$

$$S_{ek} = \frac{\theta_k - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{9}$$

式中 K_r——非饱和导水率,cm/s

K_s——饱和导水率,cm/s

θ_r——土壤残余体积含水率,cm^3/cm^3

θ_s——土壤饱和体积含水率,cm^3/cm^3

S_e——有效含水率,cm^3/cm^3

h_s——饱和水势,MPa

h_k——临界水势,MPa

K_h——临界含水率处非饱和导水率,cm/s

K_k——临界含水率处导水率,cm/s

S_{ek}——临界含水率对应的有效效和度

α、m、n 为土壤持水-导水特征参数,其中 α 为进气值的倒数,cm^{-1},n 为与孔径分布相关的经验参数。孔隙介质连通度 l 取 0.5[28]。

选择 Feddes 模型[29]来模拟根系吸水过程,根系深度根据实际根系深度设定,Feddes 模型参数选用 FENG 等[30]研究结果,进行根系吸水项计算。根系吸水由潜在吸收率和水分胁迫因子[29]表示。其对应单位时间内单位体积土壤因根系吸水而流失的水量[31],定义为

$$S(h) = \alpha(h)\beta(z)T_p \quad (0 \leqslant \alpha \leqslant 1) \tag{10}$$

式中 $\alpha(h)$——土壤水头的无因次响应函数,说明水分胁迫对根系水分吸收的影响[29]

$\beta(z)$——归一化水分吸收分布,cm^{-1}

T_p——潜在根系水分吸收速率[32]

1.4.2 时间和空间离散

选用 2016 年 4 月 29 日—9 月 20 日作为率定期,2017 年 4 月 29 日—9 月 20 日作为验证期。时间离散采用以日(d)为单位进行模拟计算,初始时间步长为 0.001 d,最小步长默认值为 1×10^{-5} d,最大时间步长为 1 d,模拟时间按 145 d 计算。试验站

各粒径含量和容重如表 1 所示。以美国农业部土壤分类标准及土壤容重为分层依据，将试验站土壤剖面分为 5 层：0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm。在土壤剖面设置 5 个观察点。

1.4.3　初始条件及边界条件

初始条件为模拟开始日期试验站 5 个观测点的土壤含水率，即率定期和验证期的初始条件分别为 2016 年 4 月 29 日、2017 年 4 月 29 日的实测土壤含水率。消光系数参照文献[33]取 0.462。上边界为大气边界条件。由于试验区地下水埋深小，作物生育期内变幅大，为考虑地下水的影响将下边界设置为变压力水头边界。HYDRUS－1D 模型边界条件示意图如图 2 所示。

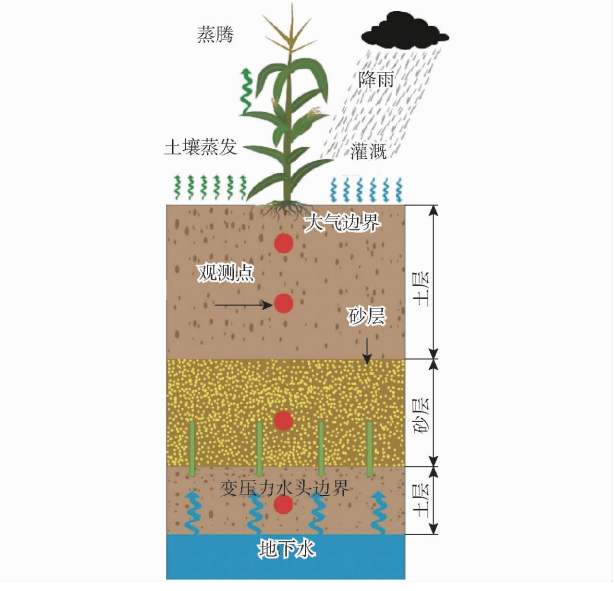

图 2　HYDRUS－1D 模型边界条件设置示意

Fig. 2　Schematic representation of boundary conditions of HYDRUS－1D model

1.4.4　模型参数

土壤水力特性参数影响土壤水分模拟精度，对各层土壤的 K_s、θ_s、α 和 n 进行反演优化，选取 2016 年高水中肥处理（砂层埋深 60 ~ 80 cm）作为典型夹砂层土壤各层土壤水力参数率定和模拟精度检验的典型处理，利用 2017 年作物生育期田间实测数据进行参数检验。将试验处理各层土壤的颗粒含量和容重输入 Rosetta 神经网络预测模块进行预测，作为残余含水率 θ_r 初始值。HYDRUS－1D 模型自带的参数反演模块采用 Levenberg－Marquardt 进行局部优化，不断尝试不同的参数初始值，使之能够适用于研究区土壤水分动态模拟[34]。优化参数如表 3 所示。

1.4.5　模型模拟评价指标

模型评价指标包括决定系数（R^2）、均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）和纳什效率系数（NSE）。RMSE 越接近 0，R^2 越接近 1，说明模型模拟精度越高[35]。

表 3　不同处理不同土层土壤水力特征参数

Tab. 3　Soil hydraulic characteristics in different soil layers

土层深度/cm	K_s/（cm·d^{-1}）	θ_s/（cm^3·cm^{-3}）	θ_r/（cm^3·cm^{-3}）	α/cm^{-1}	n	l
0 ~ 20	126.1	0.350	0.035	0.021	1.509	0.5
20 ~ 60	25.0	0.363	0.034	0.052	1.504	0.5
60 ~ 80	724.9	0.451	0.036	0.275	1.788	0.5
80 ~ 100	55.0	0.393	0.034	0.022	1.384	0.5

1.4.6　HYDRUS－1D 模型情景设置

根据实地取样结果，设置模拟情景为：砂层埋深 20 ~ 40 cm（S1）、40 ~ 60 cm（S2）、60 ~ 80 cm（S3）和 80 ~ 100 cm（S4）4 种较为常见的砂层埋深；根据黄河实际来水情况及当地农民常规灌溉水量，以 10% 为梯度依次减少灌水定额，设置 90 mm（I1）、81 mm（I2）、72 mm（I3）、63 mm（I4）和 54 mm（I5）5 个灌水梯度，模拟不同砂层埋深不同灌溉制度下各土层界面水分通量，探讨不同夹砂层分布与不同灌溉制度下砂层上下边界水分交换与深层渗漏规律。当上层土壤含水率减少时，根据能量守恒定律，在土壤水势差的作用下，深层土壤水分通过上升毛管作用，向上补给[36]。当发生降水和灌溉事件时，土壤含水率超过土壤最大持水率[37－38]，在重力作用下，向下运动，产生渗漏。

2　结果与分析

2.1　模型率定与验证

图 3 为高水中肥典型处理样地 0 ~ 100 cm 的土壤含水率实测值与模拟值对比（图 3 中 2016 年表层较低土壤含水率为玉米收获期含水率）。土壤含水率在率定与验证过程中模型计算值与实测值的 R^2 为 0.83 ~ 0.89，RMSE 为 0.005 47 ~ 0.045 46 cm^3/cm^3，NSE 约为 0.9，表明 HYDRUS－1D 模型对模拟含有夹砂层土壤水分运动有较好的适用性。

2.2　不同砂层埋深和灌溉定额下土层各界面水分通量

不同砂层埋深、灌溉定额下，土层各界面水分通量如图 4 所示。砂层上边界为土砂界面，砂层以上土层含水率大于砂层含水率，相同砂层埋深下，全生育期水分向下和向上迁移量均随灌水量增加而增加。水分向下和向上迁移量分别占灌溉定额的 0.20% ~ 98.19% 和 1.31% ~ 12.13%；砂层埋深 20 ~ 40 cm 时，水分向下和向上迁移量最大，分别为灌溉定额的 98.19% 和 12.13%。与灌溉定额 270 mm 相比，减少灌溉定额，水分向下迁移量分别

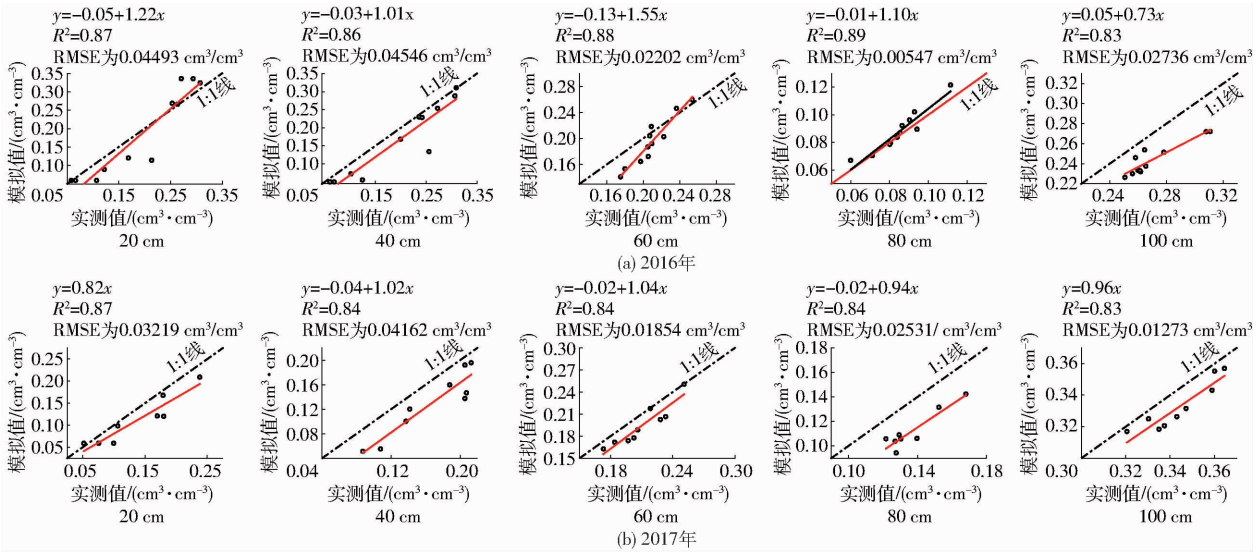

图 3 土壤含水率定(2016 年)和验证(2017 年)模拟值与观测值对比

Fig. 3 Comparisons of simulated values and observed values of soil content in 2016 and 2017

减少 10.95% ~97.35%,水分向上迁移量增加 1.49% ~62.89%。砂层下边界为砂土界面,水分运移以土壤水分向下迁移为主,毛管向上补给量为 0。水分迁移量随灌溉定额增加而增加,向下迁移量为灌溉定额的 2.26% ~14.80%;与灌溉定额 270 mm 相比,减少灌溉定额,水分向下迁移量减少 9.41% ~90.80%。1 m 土体界面水分向上迁移量随灌溉定额的增加而略微增加,水分向下运移随灌溉定额的增加而增加,分别为灌溉定额的 4.91% ~31.10% 和 0 ~7.20%;与灌溉定额 270 mm 相比,减少灌溉定额,水分向下迁移量分别减少 10.93% ~69.40%,水分向上迁移量分别增加 0 ~400.28%。相同灌溉定额,砂层上边界土层水分通量随砂层埋深增加而降低。砂层埋深 20 ~40 cm 时,以水分向下迁移为主,累计水分通量为 67.54 ~235.60 mm,占灌溉定额的 4.85% ~87.26%;当砂层埋深下降至 40 cm 以下时,以水分向上迁移为主,累计水分通量为 0.01 ~5.00 mm,降低至灌水量的 0 ~3.02%。砂层下边界水分运移以土壤水分向下迁移为主,毛管向上补给量为 0。水分迁移量随砂层埋深增加而减少,累计水分通量为 3.65 ~39.70 mm,为灌溉定额的 2.26% ~14.80%。最大水分通量发生在砂层埋深 20 ~40 cm 时,砂层埋深下降至 40 cm 以下后,累计水分通量降低至灌溉定额的 2.73% ~7.00%。1 m 土体界面水分运移以水分向下迁移为主,水分通量同样随砂层埋深增加逐渐减少。砂层埋深 20 ~40 cm 时,水分向下迁移量为灌溉定额的 11.91% ~30.76%;当砂层埋深下降至 40 cm 以下,降低至灌溉定额的 4.91% ~8.81%。适宜的砂层埋深和灌溉定额可有效减少土层各界面水分损失,有效增加玉米根区根系可利用水量。

2.3 不同砂层埋深和灌溉定额生育期根系吸水量

将根系受到的水分亏缺量定义为潜在根系吸水量与实际根系吸水量差值,不同砂层埋深、灌溉定额下的玉米根系吸水量如图 5 所示,第 1、2、3 次灌水分别在玉米播后 60、80、100 d。根系生长完全取决于砂层埋深[39],根系无法扎穿砂层,吸收砂层以下土壤水分,只能吸收利用砂层以上土壤水分,同时河套灌区蒸发强烈,且灌溉以黄河来水时间为依据,灌溉间隔较大,不能完全实现依据土壤干湿情况及玉米需水适时灌溉,各灌溉制度下春玉米在生长阶段不同生育期均出现水分亏缺现象。

不同灌溉定额下根系实际吸水量变化趋势相同,春玉米生长初期,玉米根系较小,作物生长所需水分较少,实际根系吸水量与潜在根系吸水量基本同步,基本无水分亏缺产生,拔节期后至第 1 次灌水前,春玉米生长进入快速生长期,玉米根系快速发育,生长茂盛,耗水量增加,土壤水分不能完全满足根系正常吸水,产生水分亏缺,此阶段水分亏缺较小,及时灌水可有效缓解根系水分亏缺,减小水分亏缺。第 1 次灌水后至第 2 次灌水前,春玉米进入快速生长旺期,其根系及地上部快速生长,土壤蒸发及耗水量增加,快速消耗土壤储水,土壤含水率逐渐降低,根系实际吸水量减少,并再次出现水分亏缺。第 2 次灌水后至第 3 次灌水前,春玉米由营养生长转为生殖生长,进入产量形成的最关键时期,根系及地上部生长趋于稳定,耗水量达到最大,土壤含水率不能满足春玉米生长需水,根系受到的水分亏缺达到最大。第 3 次灌水后至灌浆期结束,耗水量逐渐减

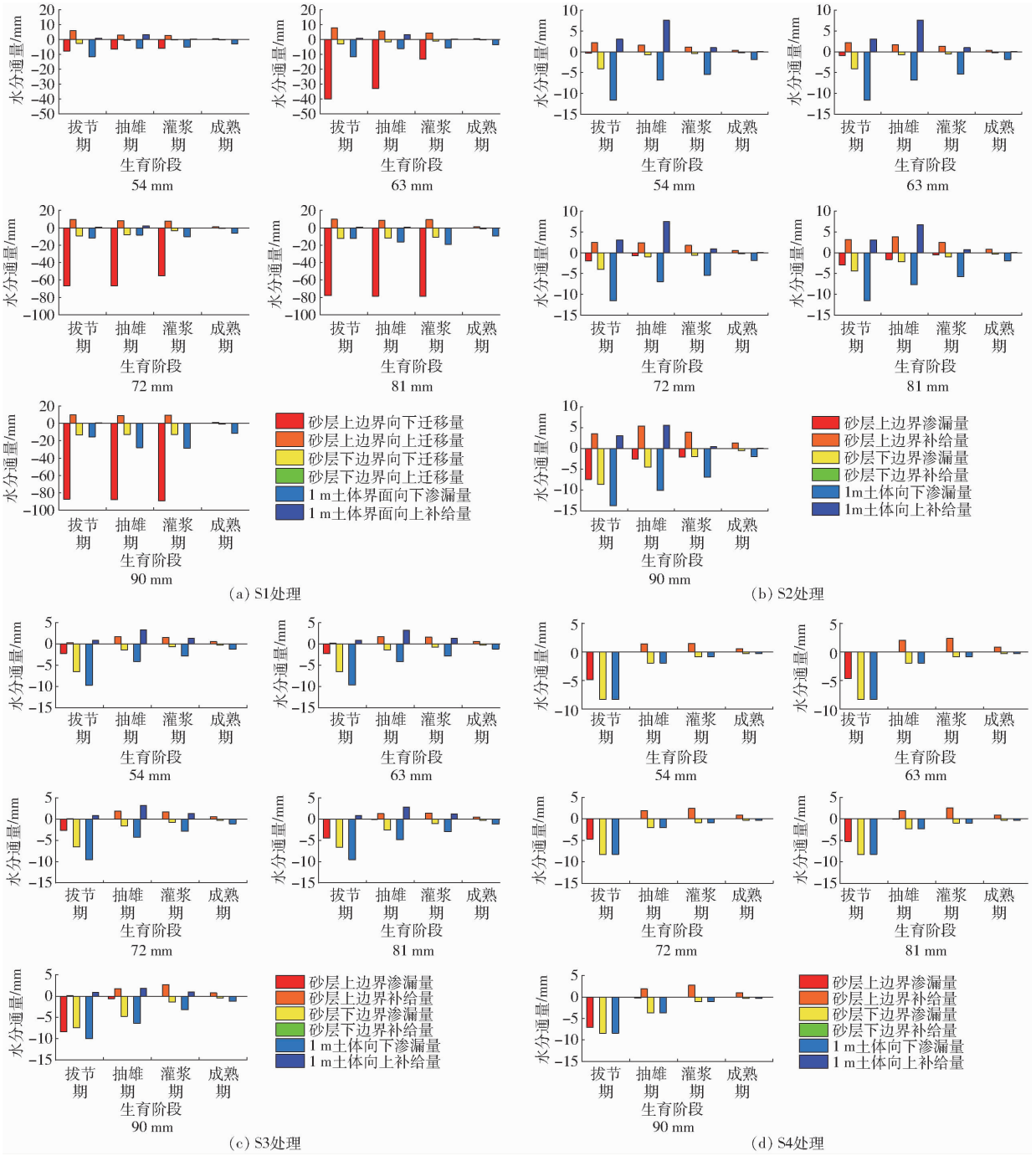

图 4　不同砂层埋深和灌溉制度下土层界面水分通量

Fig. 4　Simulation values of soil water flux at different soil interfaces under different irrigation systems at typical sand-interlayered soil

少，根系受到的水分亏缺降低。根系受到的水分亏缺量随砂层埋深和灌溉定额增加而逐渐减小，相同砂层埋深下，增加灌溉定额可有效缓解根系受到的水分亏缺。根系受到的最大水分亏缺发生在第 2 次灌水后至第 3 次灌水前，占总亏缺量的 56.04% ~ 68.56%，在第 1 次灌水至第 2 次灌水受到的水分亏缺次之，占总亏缺量的 6.25% ~20.63%，第 3 次灌水至灌浆结束受到的水分亏缺量占总亏缺量的 6.73% ~18.19%，拔节期至第 1 次灌水的水分亏缺量最小。

2.4　不同砂层埋深和灌溉定额根系累计吸水量

不同砂层埋深不同灌溉定额模拟情景下模拟根系受到的累计亏缺量如图 6 所示。相同灌溉定额下，根系受到的累计亏缺量随着砂层埋深增加而逐渐降低，砂层埋深越深，根系受到的水分亏缺量越低，与砂层埋深 20 ~40 cm 相比，根系受到的累计水分亏缺量降低 10.76% ~45.63%。相同砂层埋深，累计亏缺量随灌溉定额增加而逐渐降低，砂层埋深 20 ~40 cm，与 I5 相比，I1、I2、I3、I4 根系受到的水分亏缺量降低 4.04% ~5.80%；砂层埋深 40 ~60 cm，

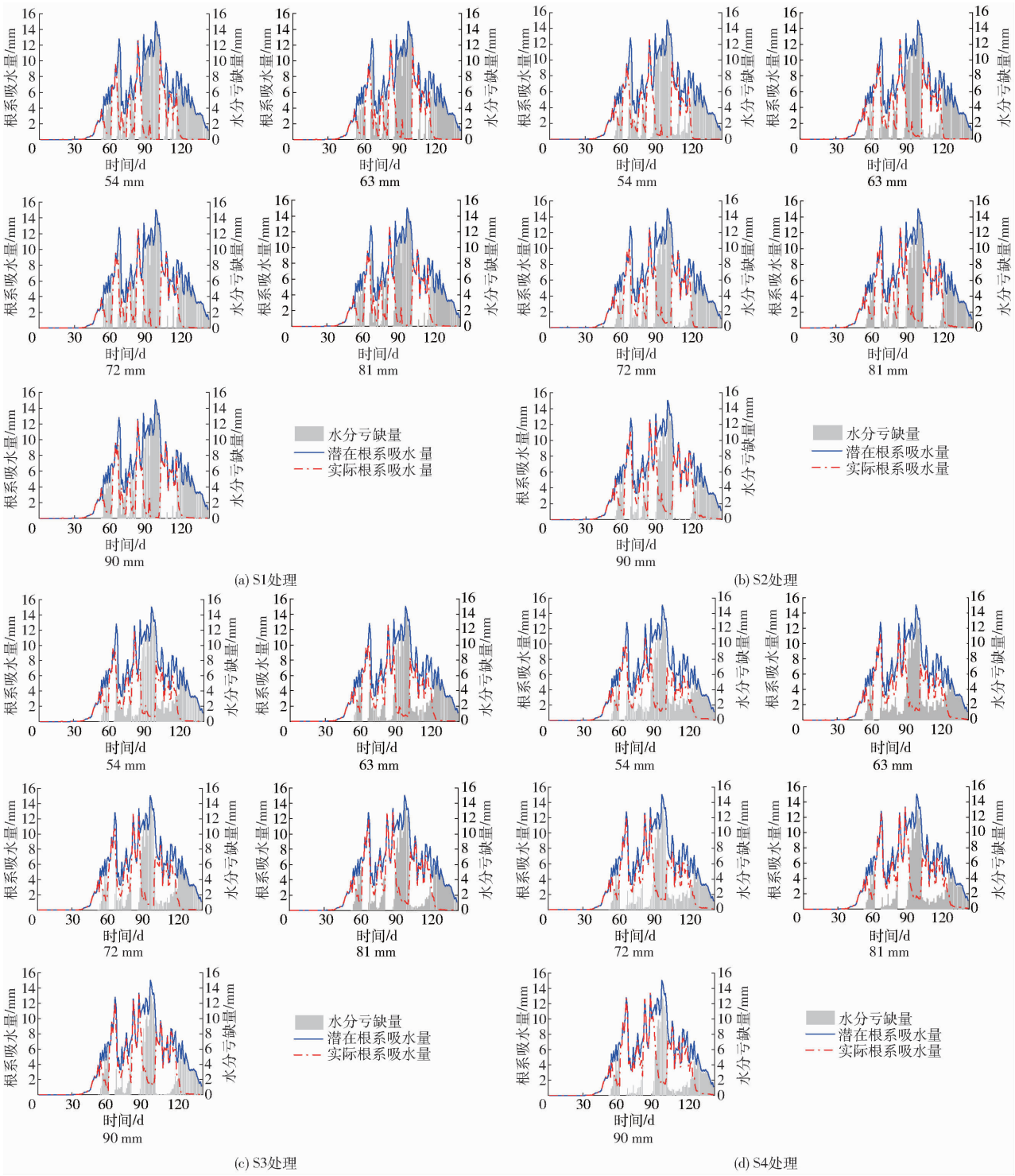

图 5 不同砂层埋深和灌溉制度下根系吸水量与分阶段水分亏缺量

Fig. 5 Root water uptake and water deficit in each stage at typical sand-interlayered soil

与灌溉定额 I5 相比，I1、I2、I3、I4 根系受到的水分亏缺量降低 7.00% ~20.73%；砂层埋深 60 ~80 cm，与 I5 相比，I1、I2、I3、I4 根系受到的水分亏缺量降低 7.40% ~24.69%；砂层埋深 80 ~100 cm，与 I5 相比，I1、I2、I3、I4 根系受到的水分亏缺量降低 8.00% ~28.94%。

不同生育阶段水分亏缺量如图 7 所示。不同阶段水分亏缺最大值均在砂层埋深 20 ~40 cm 时出现。拔节期至第 1 次灌水前，相同砂层埋深不同灌溉定额间水分亏缺量相同，且砂层埋深越深，水分亏缺量越低，随砂层埋深增加，水分亏缺量呈降低趋势，不同砂层埋深下水分亏缺量分别为 31.27、20.78、20.72、20.07 mm，与砂层埋深 S1 相比，砂层埋深 S2、S3、S4 水分亏缺量降低 33.54% ~35.82%。第 1 次灌水后至第 2 次灌水前，砂层埋深越深，水分亏缺量越小且显著降低。与 S1 相比，S2、

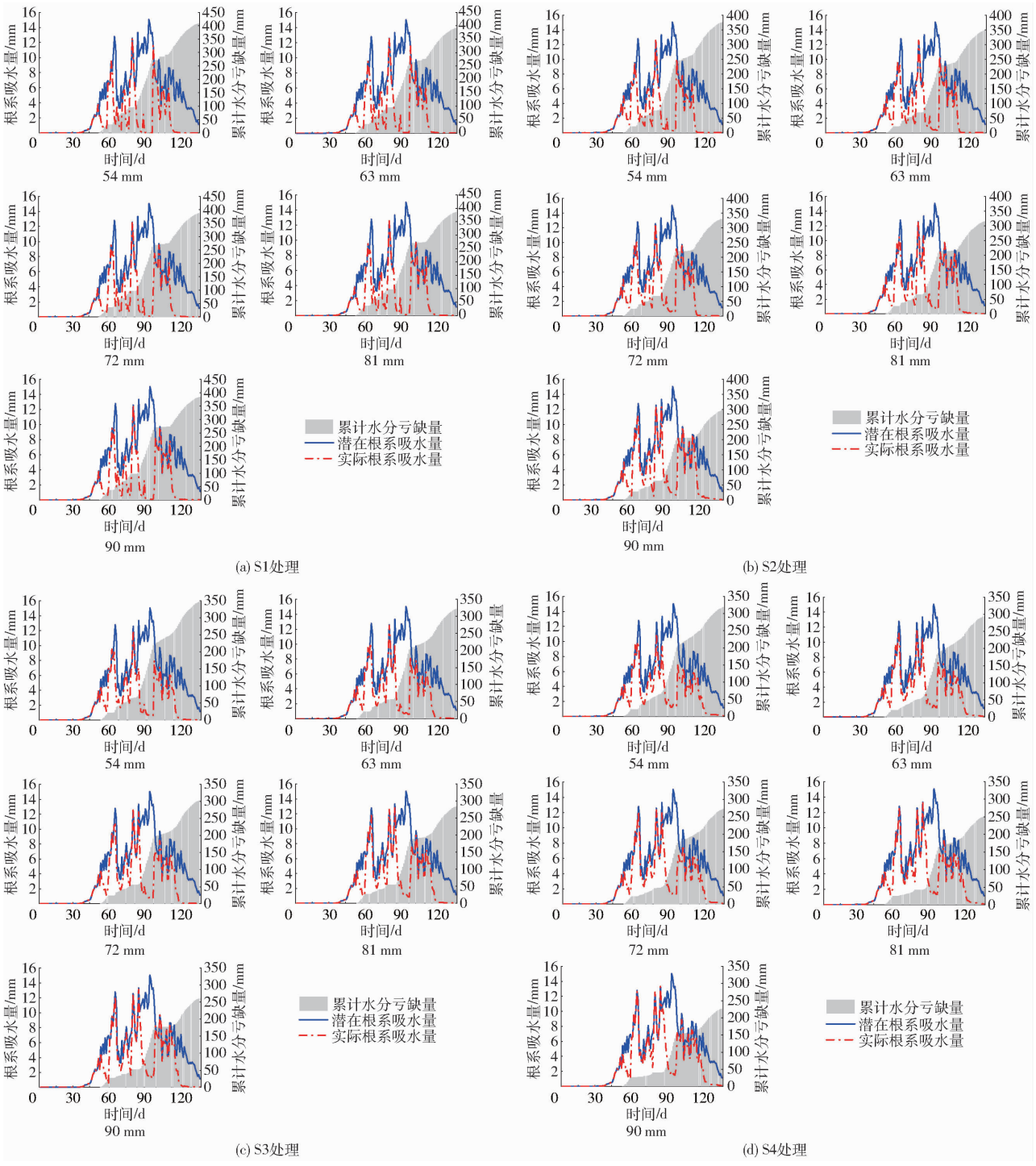

图 6　不同砂层埋深和灌溉制度下根系吸水量与累计水分亏缺量

Fig. 6　Root water uptake and cumulative deficit at typical sand-interlayered soil

S3、S4 水分亏缺量降低 15.54% ~82.61%，最大降幅达 82.61%。第 2 次灌水后至第 3 次灌水前，较小灌水量对缓解这个阶段根系受到的胁迫作用较小，随着灌水量增加，该阶段水分亏缺量逐渐降低；与 S1 相比，S2、S3、S4 水分亏缺量降低 4.17% ~39.08%。第 3 次灌水后至灌浆结束，随砂层埋深加深，水分亏缺量呈降低趋势，与 S1 相比，S2、S3、S4 水分亏缺量降低 7.54% ~54.95%。相同灌溉定额，水分亏缺量随砂层埋深增加呈先减小后增加趋势，灌水定额小且砂层埋深较深时，水分亏缺量反而有所增加；砂层埋深 S1 情景，与 I1 相比，I2、I3 水分亏缺量分别降低 13.95%、7.54%，I4 水分亏缺量增加 4.38%。砂层埋深 S2 情景，与 I1 相比，I2、I3 水分亏缺量分别降低 21.93%、2.50%，I4 水分亏缺量增加 15.76%。砂层埋深 S3 情景，与 I1 相比，I2、I3 水分亏缺量分别降低 42.78%、12.03%，I4 水分亏缺量增加 0.06%。砂层埋深 S4 情景，与 I1 相比，I2、I3、I4 水分亏缺量降低 23.95% ~54.95%。

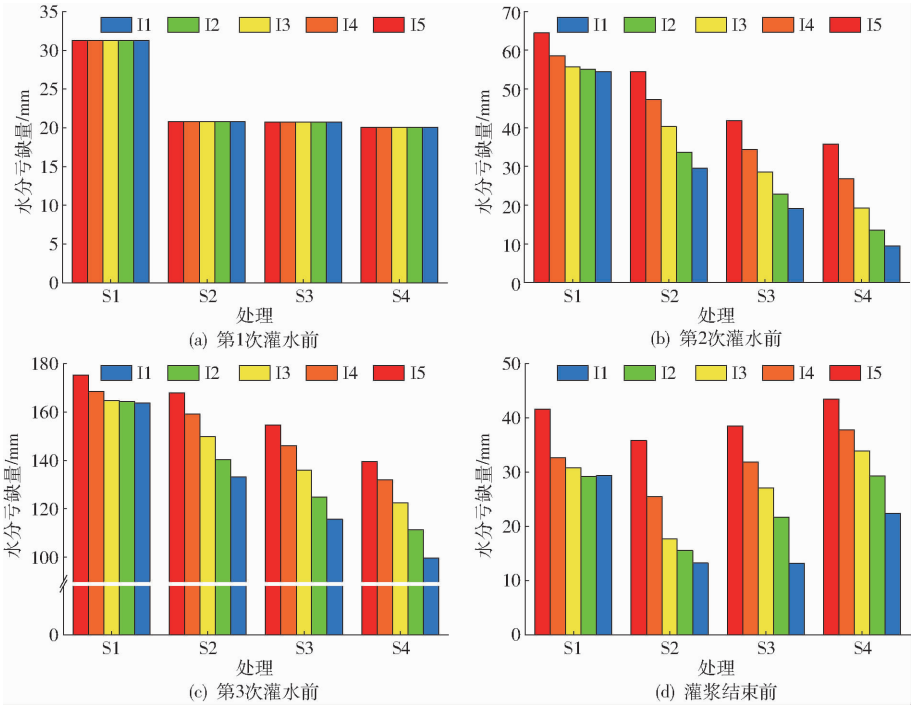

图 7 不同生育阶段不同砂层埋深根系水分亏缺量

Fig. 7 Amount of water deficit received by roots at typical sand-interlayered soil at different stages

2.5 典型夹砂层农田玉米灌溉制度优化

遵循根区土层界面水分渗漏量及根系受到的水分亏缺量最小原则,通过对不同砂层埋深和土层界面水分通量以及对全生育期水分亏缺量的分析,对河套灌区典型夹砂层土壤农田,不同砂层埋深情况进行灌溉制度优化,结果如表 4 所示。

表 4 不同砂层埋深灌溉制度优化

Tab. 4 Optimization of irrigation system at typical sand-interlayered soil farmland

砂层埋深/cm	灌水量/mm			灌溉定额/mm
	拔节期	抽雄期	灌浆期	
20 ~ 40	63 ~ 72	63 ~ 72	63 ~ 72	189 ~ 216
40 ~ 60	81 ~ 90	81 ~ 90	81 ~ 90	243 ~ 270
60 ~ 80	72 ~ 90	72 ~ 90	72 ~ 90	216 ~ 270
80 ~ 100	72 ~ 90	72 ~ 90	72 ~ 90	216 ~ 270

3 讨论

夹砂层对土壤水分运移的影响主要体现在土壤水分向下入渗的阻水减渗作用,以及向上潜水蒸发和土壤表层返盐的抑制作用[9-11]。砂层上边界水分通量以向下迁移为主,随砂层埋深增加,向下迁移量逐渐减少,砂层埋深大于 40 cm 时,水分向下迁移量出现断崖式下降并接近于 0。砂层埋深大于 40 cm 时,砂层上边界累计水分通量为灌溉水量的 0.2% ~4.47%。砂层下边界水分通量主要为向下迁移,随砂层埋深增加而增加,下边界累计水分迁移量为灌溉水量的 2.26% ~14.70%。这一结论与史文娟等[9]发现的在灌水后砂层以上土壤水分向下层水分迁移速率随砂层埋深减小而增加的结论相似。同时,由于砂层持水量较小,灌水后浅埋砂层迁移量大于砂层深埋。下边界水分通量为 0,夹砂层阻止了土壤水分通过毛管作用向上补给。这一结论与王文焰等[11]通过在黄土中设置砂层,发现砂层具有良好阻水性,可增加砂层上层土壤持水能力,且对水分入渗具有一定的减渗性,减少了下渗水量的结果相一致。

作物潜在蒸腾量即为潜在吸水量,最终可反映到作物潜在产量。当根系吸收水量达到潜在根系吸水量时,认为可达到潜在产量[40],而当作物根系受到水分盐分胁迫时,根系实际吸水量小于潜在吸水量[41],由于畦灌灌水定额较大,且灌水间隔较大,作物生长过程中,土壤水分不能时刻满足作物生长需要,根系极易受到水分胁迫[12]。玉米生育期内,相同砂层厚度下,随砂层深度增加,土壤水分向根系层以下迁移量逐渐减少,对根系吸水胁迫逐渐减小,相同砂层埋深下,增加灌水定额有利于减少根系水分亏缺。水分亏缺主要发生在第 2 次灌水后至第 3 次灌水前的抽雄-灌浆期,此时作物生长所消耗水分最多,受到根系吸水量限制,此时水分亏缺量最大,占总亏缺量的 56.04% ~68.56%。拔节期前,作物和根系相对较小,需水量较小,根系吸水完全可以满足作物生长需要,不存在水分亏缺。通过比较不同砂层埋深和不同灌溉定额下根系层土层水分通量模拟结果,相同砂层埋深下,过大灌水定额会使土壤水分

通过砂层向下迁移损失造成水分浪费[42]，其次由于砂层孔隙度较大，土壤含水率较小，夹砂层对土壤水分有一定的阻碍作用。

砂层孔隙度和导水率较大[43]，保水能力较差，根系的向水向肥性[44]导致根系生长至土砂界面时出现根系向土壤含水率较大的土层生长[39]，不同砂层埋深及灌溉定额在影响土壤水分分布的同时，也影响玉米根系分布，根系分布受到砂层埋深影响与限制[10]，由此，根系吸水也出现差异。模拟结果表明，潜在吸水量与实际吸水量间的差值（水分亏缺量）随砂层埋深增加而减小，随灌水定额增加而减小。综合考虑土壤水分向下迁移损失与水分亏缺较小，不同砂层埋深设置不同灌水定额可以保证作物更好的生长，减少水分向下迁移损失。

合理的灌溉制度可以促进作物生长并达到高产[45-46]，而夹砂层土壤水分运移与均质土壤间存在较大差异[47]，已有研究所得的适宜水氮组合[48-52]并不能简单运用到含夹砂层土壤农田，夹砂层对作物灌溉制度的影响不容忽视，本研究针对不同砂层埋深进行了相应的灌溉制度优化建议。

综上，不同砂层埋深土壤水分运移规律与水分亏缺量存在较大差异，由于在确定土壤分层情况时人为取样调查存在误差，导致模型输入的土壤分层情况与实际情况存在一定差异。本研究仍需进一步改进，寻找更为简便且更加准确的方法确定土壤实际分层情况，对土壤分层情况进行判别，进一步改进模型。本研究针对相同砂层厚度对不同灌溉制度进行了优化，在未来研究中，仍需针对河套灌区复杂的土壤条件，对不同厚度砂层的农田灌溉制度优化进行进一步研究。

4　结论

（1）砂层埋深大于 40 cm 时，砂层上边界水分向下迁移出现断崖式下降并接近于 0，当埋深为 20～40 cm，砂层上边界水分累计迁移量高达灌溉水量的 12.39%～98.19%。当砂层埋深大于 40 cm 时，水分累计迁移量降为灌溉水量的 0.2%～4.47%。当砂层埋深为 20～40 cm，砂层下边界水分累计迁移量占灌溉水量的 2.26%～14.70%。当砂层埋深大于 40 cm 时，水分累计迁移量为灌溉水量的 2.73%～7.00%，无毛管向上补给水分。1 m 土体界面主要以渗漏为主。

（2）玉米受到的最大水分亏缺量发生在第 2 次灌水后至第 3 次灌水前，占总亏缺量的 56.04%～68.56%，拔节期至第 1 次灌水前水分亏缺量最小。与砂层埋深 20～40 cm 相比，其他砂层埋深水分亏缺量降低 10.76%～45.63%。

（3）不同生育阶段均在砂层埋深 20～40 cm 时水分亏缺量达最大，第 1 次灌水前，砂层深埋较浅埋水分亏缺量最大降幅为 35.82%，第 2 次灌水前，最大降幅为 82.61%，第 3 次灌水前，最大降幅为 39.08%，灌浆结束前，最大降幅为 54.95%。

（4）综合考虑各土层界面水分通量及水分亏缺量，推荐在全生育期于拔节期、抽雄期、灌浆期共灌水 3 次，其中砂层埋深 20～40 cm、40～60 cm、60～80 cm 和 80～100 cm 灌水量分别为 63～72 mm、81～90 mm、72～90 mm 和 72～90 mm。此时，砂层上边界水分向下迁移量和水分亏缺量均较小。

参　考　文　献

[1] 杨世琦. 基于国家粮食安全下的农业面源污染综合防治体系思考[J]. 中国农业科学，2022，55(17)：3380－3394.
YANG Shiqi. Thought of pollution comprehensive prevention and control system of non-point sources based on national food security[J]. Scientia Agricultura Sinica，2022，55(17)：3380－3394.（in Chinese）

[2] 史海滨，杨树青，李瑞平，等. 内蒙古河套灌区节水灌溉与水肥高效利用研究展望[J]. 灌溉排水学报，2020，39(11)：1－12.
SHI Haibin，YANG Shuqing，LI Ruiping，et al. Water-saving irrigation and utilization efficiency of water and fertilizer in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia：prospect for future research[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2020，39(11)：1－12.（in Chinese）

[3] 常晓敏，王少丽，陈皓锐，等. 河套灌区土壤盐分时空变化特征及影响因素[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(10)：1000－1005.
CHANG Xiaomin，WANG Shaoli，CHEN Haorui，et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of soil salinity in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2018，36(10)：1000－1005.（in Chinese）

[4] ZHOU L，HE J，QI Z，et al. Effects of lateral spacing for drip irrigation and mulching on the distributions of soil water and nitrate，maize yield，and water use efficiency[J]. Agricultural Water Management，2018，199：190－200.

[5] 涂安国. 层状土壤水分入渗与溶质运移研究进展[J]. 江西农业大学学报，2017，39(4)：818－825.
TU Anguo. Advances in water infiltration and solute transport in layered soil[J]. Acta Agriculturae Universitatis，2017，39(4)：818－825.（in Chinese）

[6] 范严伟，赵文举，王昱，等. 夹砂层土壤 Green－Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 农业工程学报，2015，31(5)：93－99.
FAN Yanwei，ZHAO Wenju，WANG Yu，et al. Improvement and verification of the Green－Ampt model for sand-layered soil[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(5)：93－99.（in Chinese）

[7] 邹宇锋,蔡焕杰,张体彬,等. 河套灌区不同灌溉方式春玉米耗水特性与经济效益分析[J]. 农业机械学报,2020,51(9):237 - 248.
ZOU Yufeng, CAI Huanjie, ZHANG Tibin, et al. Water use characteristics and profit analysis of spring maize production with different irrigation methods in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):237 - 248. (in Chinese)

[8] 童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
TONG Wenjie. Study on salt tolerance of crop and cropping system optimization in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: China Agricultural University,2014. (in Chinese)

[9] 史文娟,沈冰,汪志荣,等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 农业工程学报,2005,21(9):23 - 26.
SHI Wenjuan, SHEN Bing, WANG Zhirong, et al. Water and salt transport in sand-layered soil under evaporation with the shallow under-ground water table[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(9):23 - 26. (in Chinese)

[10] 孙伟. 河套灌区典型夹砂层农田水肥高效利用与灌溉制度优化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
SUN Wei. Study on efficient utilization of water and nitrogen and optimization of irrigation scheduling with the typical sand-interlayered soil in Hetao Irrigation District[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023. (in Chinese)

[11] 王文焰,张建丰,汪志荣,等. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(1):104 - 110.
WANG Wenyan, ZHANG Jianfeng, WANG Zhirong, et al. Experiment and study on water-tighiness and infiltration reduction of sand layer in loess soils[J]. Transactions of the CSAE,1995,11(1):104 - 110. (in Chinese)

[12] 徐昭,史海滨,李仙岳,等. 不同程度盐渍化农田下玉米产量对水氮调控的响应[J]. 农业机械学报,2019,50(5):334 - 343.
XU Zhao, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Response of maize yield to irrigation and nitrogen rate in different salinization farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):334 - 343. (in Chinese)

[13] 王惠,凌刚,查晴,等. 肥料种类与浓度对灌水器堵塞特征的影响及防堵策略[J]. 农业工程学报,2023,39(5):53 - 60.
WANG Hui, LING Gang, ZHA Qing, et al. Effects of fertilizer type and concentration on the clogging characteristics of emitters and anti-clogging strategies[J]. Transactions of CSAE,2023,39(5):53 - 60. (in Chinese)

[14] 王振华,韩美琪,宋利兵,等. 加气对西北旱区膜下滴灌棉花生长与水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(14):108 - 116.
WANG Zhenhua, HAN Meiqi, SONG Libing, et al. Effects of aeration on the growth and water use efficiency of cotton under mulched drip irrigation in the dry areas of Northwest China[J]. Transactions of CSAE, 2022, 38(14): 108 - 116. (in Chinese)

[15] 王海永,沈红,丛振涛,等. 宁夏汉延渠灌区灌溉用水量变化影响因素分析[J]. 节水灌溉,2018(11):61 - 64,72.
WANG Haiyong, SHEN Hong, CONG Zhentao, et al. Analysis of influencing factors for irrigation water change in Ningxia Irrigated District[J]. Water Saving Irrigation,2018(11):61 - 64,72. (in Chinese)

[16] 宋歌,陈玉珊,张珊,等. 非充分灌溉条件下多目标整数规划配水模型构建[J]. 农业工程学报,2022,38(9):129 - 139.
SONG Ge, CHEN Yushan, ZHANG Shan, et al. Construction of water allocation model with multi-objective integer programming under inadequate irrigation[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(9):129 - 139. (in Chinese)

[17] ZHOU L, FENG H, ZHAO Y, et al. Drip irrigation lateral spacing and mulching affects the wetting pattern, shoot-root regulation, and yield of maize in a sand-layered soil[J]. Agricultural Water Management,2017, 184:114 - 123.

[18] 赖黎明,美丽,杨旸. 内蒙古河套灌区农业土壤特征与发展分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(2):213 - 218.
LAI Liming, MEI Li, YANG Yang, et al. Characteristics and development analysis of agricultural soil in Hetao Irrigation District[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2022,50(2):213 - 218. (in Chinese)

[19] 毛晓敏,尚松浩. 计算层状土稳定入渗率的饱和层最小通量法[J]. 水利学报,2010,41(7):810 - 817.
MAO Xiaomin, SHANG Songhao. Method of minimum flux in saturation layer for calculating stable water infiltration through layered soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(7):810 - 817 (in Chinese)

[20] 任利东,黄明斌,樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报,2013,29(19):105 - 111.
REN Lidong, HUANG Mingbin, FAN Jun. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(19):105 - 111. (in Chinese)

[21] 肖庆礼,黄明斌,邵明安,等. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布[J]. 农业工程学报,2014,30(2):124 - 131.
XIAO Qingli, HUANG Mingbin, SHAO Ming'an, et al. Infiltration and drainage of different textural soil moisture in middle reaches of Heihe River Basin[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(2):124 - 131. (in Chinese)

[22] 冯壮壮,史海滨,苗庆丰,等. 基于 HYDRUS - 1D 模型的河套灌区典型夹砂层耕地水分利用分析[J]. 农业工程学报,2021,37(18):90 - 99.
FENG Zhuangzhuang, SHI Haibin, MIAO Qingfeng, et al. Water use analysis of cultivated land with typical sand layers in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia using HYDRUS - 1D model[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(18):90 - 99. (in Chinese)

[23] 丁运韬,程煜,张体彬,等. 利用 HYDRUS - 2D 模拟膜下滴灌玉米农田深层土壤水分动态与根系吸水[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(3):23 - 32.
DING Yuntao, CHENG Yu, ZHANG Tibin, et al. Modeling of dynamics of deep soil water and root uptake of maize with mulched drip irrigations using HYDRUS - 2D[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021,39(3):23 - 32. (in

Chinese)
[24] 王晓彤,胡振琪,梁宇生. 基于 Hydrus－1D 的黄河泥沙充填复垦土壤夹层结构优化[J]. 农业工程学报,2022,38(2):76－86.
WANG Xiaotong, HU Zhenqi, LIANG Yusheng. Structural optimization of reclaimed subsidence land interlayers filling with the Yellow River sediments using a HYDRUS－1D model[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(2):76－86. (in Chinese)
[25] 张建丰,王文焰,贾中华. 具有砂质夹层的土壤连续函数入渗模型[J]. 水土保持学报,2007,21(4):94－97.
ZHANG Jianfeng, WANG Wenyan, JIA Zhonghua. A continuous infiltration model for soil interlayered with soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(4):94－97. (in Chinese)
[26] 曲晨晓,王炜. 土壤剖面中砂质夹层的储水作用及机理研究[J]. 华中农业大学学报,1997,16(5):43－50.
QU Chenxiao, WANG Wei. Mechanisms of water reserved by sand interlayer in soil profile[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,1997,16(5):43－50. (in Chinese)
[27] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, SEJNA M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. Vadose Zone Journal,2008,7(2):587－600.
[28] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892－898.
[29] FEDDES R A, KOWALIK P J, ZARADNY H. Simulation of field water use and crop yield[M]. New York: John Wiley and Sons,1978.
[30] FENG Zhuangzhuang, MIAO Qingfeng, SHI Haibin, et al. Simulation of water balance and irrigation strategy of typical sand-layered farmland in the Hetao Irrigation District, China[J]. Agricultural Water Management,2023,280:108236.
[31] ŠIMUNEK J Š M. The HYDRUS－1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[EB/OL]. (2009－12－13). http://www.pcprogress.com/en/Default.Aspx.
[32] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]//FAO Irrig Drain 56,1998:147－151.
[33] 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.
[34] 黎洪德,董小涛,李巧玲. 基于 HYDRUS－1D 模型的水库近坝区土壤水分动态模拟[J]. 长江科学院院报,2024,41(7):34－40.
LI Hongde, DONG Xiaotao, LI Qiaoling. Dynamic simulation of soil moisture in the near-dam area of reservoir based on HYDRUS－1D model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024,41(7):34－40. (in Chinese)
[35] 马欢,杨大文,雷慧闽,等. Hydrus－1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进[J]. 农业工程学报,2011,27(3):6－12.
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 CSAE,2011,27(3):6－12. (in Chinese)
[36] XU C, ZENG W Z, WU J W, et al. Effects of different irrigation strategies on soil water, salt, and nitrate nitrogen transport[J]. Ecological Chemistry and Engineering,2015,22(4):589－609.
[37] YANG T, ŠIMŮNEK J, MO M, et al. Assessing salinity leaching efficiency in three soils by the HYDRUS－1D and －2D simulations[J]. Soil and Tillage Research,2019,194:104342.
[38] YIN L, ZHOU Y, HUANG J, et al. Interaction between groundwater and trees in an arid site: potential impacts of climate variation and groundwater abstraction on trees[J]. Journal of Hydrology,2015,528:435－448.
[39] SUN Wei, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Effect of water conservation and nitrogen reduction on root growth and yield in spring maize in typical sand interlayered soil[J]. Agriculture,2024,14(3):338.
[40] 李红芳,王会肖,杨雅雪,等. 基于 WOFOST 与 CROPWAT 模型的松嫩平原春玉米灌溉制度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(3):424－435.
LI Hongfang, WANG Huixiao, YANG Yaxue, et al. Irrigation regime of spring maize in Songnen plain by WOFOST and CROPWAT model[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020,56(3):424－435. (in Chinese)
[41] 李会杰. 旱区河滩湿地水盐运移与根系吸水的模型模拟[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
LI Huijie. Modeling of soil water and salt dynamics and its effects on root water uptake in Heihe arid wetland, Gansu, China[D]. Yangling: Northwest A&F University,2016. (in Chinese)
[42] 冯浩,王杰,王乃江,等. 起垄覆膜条件下夏玉米农田耗水过程分析[J]. 农业机械学报,2018,49(9):205－213.
FENG Hao, WANG Jie, WANG Naijiang, et al. Analysis of water consumption in summer maize field under planting pattern of ridge-furrow with plastic film mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):205－213. (in Chinese)
[43] 吴继强,张建丰,高瑞. 不同大孔隙深度对土壤水分入渗特性的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(5):91－95.
WU Jiqiang, ZHANG Jianfeng, GAO Rui. The effect of infiltration characteristics under the different macrospores depth in the soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(5):91－95. (in Chinese)
[44] 王立志,何帅,李东伟. 膜下滴灌滴水流量对棉花根系分布的影响[J]. 干旱地区农业研究,2024,42(3):153－161.
WANG Lizhi, HE Shuai, LI Dongwei. Effects of drip flow rate of mulched drip irrigation on root distribution of cotton[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2024,42(3):153－161. (in Chinese)

[45] 张富仓,严富来,范兴科,等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(22):111 – 120.
ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(22):111 – 120. (in Chinese)

[46] 周罕觅,孙旗立,张硕,等. 基于多目标综合评价的滴灌苹果水肥协同调控研究[J]. 农业机械学报,2023,54(11):335 – 346.
ZHOU Hanmi, SUN Qili, ZHANG Shuo, et al. Cooperative regulation of water and fertilizer in drip irrigation apple based on multi-objective comprehensive evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(11):335 – 346. (in Chinese)

[47] FENG Z, MIAO Q, SHI H, et al. Simulation of water balance and irrigation strategy of typical sand-layered farmland in the Hetao Irrigation District, China[J]. Agricultural Water Management,2023,280:108236.

[48] 高翠民,丁晋利,张洁梅,等. 水氮运筹对玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2022,41(2):44 – 51.
GAO Cuimin, DING Jinli, ZHANG Jiemei, et al. The combined effects of irrigation and nitrogen fertilization on yield and water and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(2):44 – 51. (in Chinese)

[49] 闵迪,王增红,李援农,等. 不同灌水和施氮水平对河西春玉米水氮利用效率和经济效益的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(5):153 – 160.
MIN Di, WANG Zenghong, LI Yuannong, et al. Effects of different irrigation and nitrogen application levels on the yield and water and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2020,38(5):153 – 160. (in Chinese)

[50] 雒文鹤,师祖姣,王旭敏,等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J]. 作物学报,2020,46(6):924 – 936.
LUO Wenhe, SHI Zujiao, WANG Xumin, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica,2020,46(6):924 – 936. (in Chinese)

[51] LI J, JIAO X, JIANG H, et al. Optimization of irrigation scheduling for maize in an arid oasis based on simulation-optimization model[J]. Agronomy,2020,10(7):935.

[52] GUO D, OLESEN J E, MANEVSKI K, et al. Optimizing irrigation schedule in a large agricultural region under different hydrologic scenarios[J]. Agricultural Water Management,2021,245:106575.

(上接第 626 页)

[33] 云勇, 严小微, 唐清杰, 等. 海南台风暴雨对水稻的危害及灾后补救措施[J]. 杂交水稻, 2014, 29(1): 44 – 45.
YUN Yong, YAN Xiaowei, TANG Qingjie, et al. Damages to rice production caused by typhoon rainstorm and post-disaster remedial cultivation measures in Hainan[J]. Hybrid Rice, 2014, 29(1): 44 – 45. (in Chinese)

[34] 杨建莹,霍治国,吴立,等. 西南地区水稻洪涝等级评价指标构建及风险分析[J]. 农业工程学报,2015,31(16):135 – 144.
YANG Jianying, HUO Zhiguo, WU Li, et al. Evaluation level construction and analysis of risk on rice flood in Southwest China [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(16):135 – 144. (in Chinese)

[35] LIU Y, ZHOU W, GE Q. Spatiotemporal changes of rice phenology in China under climate change from 1981 to 2010[J]. Climatic Change, 2019, 157(2): 261 – 277.

[36] 何爱斌,郭夏宇,赵廷丞,等. 高温对湖南省一季稻及再生稻结实的影响及应对策略[J]. 杂交水稻,2024,39(2):89 – 96.
HE Aibin, GUO Xiayu, ZHAO Tingcheng, et al. Effects of high temperature on grain filling of single-season rice and ratoon rice in Hunan Province and its countermeasures[J]. Hybrid Rice, 2024,39(2):89 – 96. (in Chinese)

[37] 李可,蒋伟勤,车阳,等. 水稻冷害成灾机制与调控机理研究进展及展望[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):31 – 40.
LI Ke, JIANG Weiqin, CHE Yang, et al. Research progress and prospect on mechanism and regulation of cold damage in rice [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024,52(2):31 – 40. (in Chinese)

[38] AKINCI H, ÖZALP A Y, TURGUT B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 97: 71 – 82.

[39] 张寒博, 窦世卿, 温颖. 基于遥感降水产品的西南地区降水时空动态分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 265 – 278.
ZHANG Hanbo, DOU Shiqing, WEN Ying. Analysis of spatiotemporal dynamics of precipitation in Southwest China based on remote sensing precipitation products[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 265 – 278. (in Chinese)

[40] 胡祖恒, 李永华, 胡跃文, 等. CMIP5 和 RegCM4.0 模式对西南区域未来降水的预估[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(5): 19 – 25.
HU Zuheng, LI Yonghua, HU Yuewen, et al. Prediction of future precipitation in Southwest China by CMIP5 and RegCm4.0 models[J]. Journal of Mountain Meteorology, 2020, 44(5): 19 – 25. (in Chinese)