

阿克苏河下游区灌溉入渗补给系数计算及影响因素分析

王璐,李升*,王友年,王旭东
(新疆大学地质与矿业工程学院,乌鲁木齐830047)

摘要:【目的】准确获取阿克苏河下游区灌溉入渗补给系数,对该区灌溉入渗补给系数的影响因素进行分析,为绿洲带高强度人工灌溉模式下地表水地下水转化机理研究,提高研究区地下水数值模拟精度提供基础。【方法】选取阿克苏下游区不同灌溉制度、包气带厚度、土壤结构下代表性点进行野外取样及室内灌溉试验,并结合Hydrus-1d进行包气带水流数值模拟,通过改变灌溉制度、包气带厚度,应用Hydrus-1d模型计算该土壤结构下的灌溉入渗补给系数变化。在模型计算结果的基础上,首先分析灌溉制度、包气带厚度与灌溉入渗补给系数的关系;其后重点利用模型计算结合数理统计的方法分析土壤结构中影响灌溉入渗补给系数的主要因素。【结果】研究区内滴灌条件下灌溉入渗补给系数的范围为0.320~0.474;畦灌条件下灌溉入渗补给系数的范围为0.408~0.561,即不同灌溉制度下灌溉入渗补给系数不同;而伴随包气带厚度增大,灌溉入渗补给系数也随之减小;土壤结构对灌溉入渗补给的主要影响因素为土壤渗透系数、土壤体积质量、土壤初始含水率。【结论】根据室内试验结合数值模型计算出不同灌溉制度下的灌溉入渗补给系数变化范围,得出灌溉入渗补给系数的影响因素为灌溉制度、包气带厚度和反映土壤结构的土壤渗透系数、土壤体积质量及土壤初始含水率,为干旱区下游区灌溉入渗补给系数选取及后续研究提供理论依据。

关键词:Hydrus-1d;室内灌溉试验;干旱区下游区;灌溉入渗补给系数;灌溉入渗补给系数影响因素

中图分类号:S31;S565

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20190169

王璐,李升,王友年,等.阿克苏河下游区灌溉入渗补给系数计算及影响因素分析[J].灌溉排水学报,2019,38(11):65-73.

0 引言

由于我国新疆阿克苏地区干旱少雨,且农业作为当地重要的经济来源,灌溉水入渗成为当地地下水主要补给来源,其是灌区地表水和地下水转化量研究的重要水文地质参数之一,同时灌溉入渗补给系数的精确性是决定地下水数值模型可靠的重要因素,也影响着地下水数值模拟及地下水资源评价结果。

地下水数值模拟主要用于研究水文地质条件、地下水资源定量评价及模拟地下水流及溶质运移规律等方面,而基础资料及参数的相对精确决定模拟结果的准确性。目前,测算灌溉入渗补给系数的方法很多,主要有水量均衡法、相关分析法、试验法、双环入渗法、SWAP模型法、Hydrus-1d数值模拟法及同位素示踪法等。其中,水量均衡法即水量平衡法,该方法将包气带视作一个独立系统,灌溉入渗量为灌溉水量减去农作物蒸发蒸腾量及灌溉前后包气带中储存量的变化量^[1]。然而灌溉入渗补给分量很难量化,为测算灌溉入渗补给系数增加了难度。相关分析法一般用于野外试验,利用中子仪及负压计得到含水率及土壤负压的变化规律,通过零通量面法及分层差分求和法计算出灌溉水量及灌溉水入渗补给系数,采用相关分析法找出灌溉入渗补给系数与灌水量之间的关系^[2]。双环入渗仪法其实是通过内外两环控制灌溉量和入渗速率来求取入渗量,肖庆礼通过双环入渗仪和手持式TDR测得不同深度含水率变化值得到包气带水入渗过程^[3]。张志杰等^[4]采用野外试验与SWAP模型法相结合的方法,通过灌溉前后地下水位变化及土壤含水率变化得到灌溉入渗补给系数。野外试验虽然符合当地灌溉环境,但野外试验点单一,不具有代表性。

收稿日期:2019-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(U1603243)

作者简介:王璐(1993-),女。硕士研究生,主要从事水文地质、环境地质方面研究。E-mail:Esperanzall@163.com

通信作者:李升(1980-),男。副教授,博士,主要从事水文地质、环境地质方面研究。E-mail:lisheng2997@163.com

数值模拟已成为研究地下水运动特性的重要手段。而 Hydrus 模型可以在考虑源汇项的情况下模拟包气带入渗过程,且能根据实际情况选择不同边界条件^[5]。国内研究者将 Hydrus-1d 软件广泛应用于包气带的研究中,卞建民等^[6]以吉林省大安灌区为研究对象,在野外调查和资料收集的基础上,借助 Hydrus-1d 型,模拟分析了旱田灌溉条件下地下水入渗补给过程。范严伟等^[7]依据包气带水分运动理论,采用 Hydrus-1d 软件,对砂质夹层土壤入渗特性进行数值模拟,分析了各因素对砂质夹层土壤入渗规律的影响。肖庆礼等^[3]利用 Hydrus-1d 模型动态模拟土壤水分的入渗和再分布过程,得到不同土壤剖面下土壤水分入渗及再分布有明显差异。Mariem 等^[8]选取凯鲁万平原不同盐渍化程度的土壤剖面,通过改变自然条件,预测地下水位及水质受包气带影响的规律。阿克苏流域下游灌区由于长期的灌溉不合理,造成水资源的浪费,致使灌区水位普遍上升,造成土壤次生盐碱化,同时地表水与地下水缺乏统一规划,片面强调开发地表水,严重破坏了天然水循环系统,也严重影响研究区生态平衡,生态环境急剧恶化。梁籍等^[9]、沈玉凌等^[10]通过对新疆阿克苏地区的定点观测试验,以及阿克苏地区种稻改良盐渍土对塔里木河的影响的分析,得到当地改良盐渍土的根本途径应是完善排水系统,降低地下水位。孟江丽^[11]通过灌区监测资料,利用地下水数值模型 MODFLOW 和土壤水一维数值模型 Hydrus 对农田中的水盐运动进行模拟并分析灌溉引水、地下水位、土壤质地等特征因素对土壤盐分、作物长势的影响,得到较为合理的灌溉对当地盐渍化改良有积极作用。所以揭示当地实际情况下灌溉水入渗特征,判断不同条件下灌溉入渗补给系数,分析其影响因素,对当地有效灌溉和地下水可持续利用与保护都具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿克苏河流域下游灌区地处塔里木盆地的西北边缘,北枕汉腾格里山群,南望塔克拉玛干沙漠,属典型的温带大陆性干旱气候,多年平均降水量 74.5 mm,多年平均水面蒸发量 1 854 mm,多年平均气温 10.4 ℃。区内地下水埋深由北向南逐渐变浅,埋深为 1~5 m,直至南边缘接近地表。研究区位于下游地下水埋深较浅处,当地抽取地下水与河水混合后进行灌溉,灌溉水再次入渗,导致地下水很大程度上受到农田灌溉水入渗条件的影响,而当地气候条件干旱,蒸发强烈且降雨稀少,灌溉水的入渗成为地下水的主要补给来源。

1.2 室内灌溉试验设计

由于田间试验只能得到试验区内灌溉入渗补给系数,为了更加全面地获得阿克苏河流域下游灌区灌溉入渗补给系数,根据收集到的探井资料,按照地理位置、灌溉制度(灌溉定额、灌溉方式、种植农作物类型)、各取样点剖面上主要岩性及包气带厚度进行分类将下游划分为 5 种类型,详见表 1,选取这 5 种代表性取样点(图 1),使用取样器在取样点不同深度进行取样,将样品放入密封袋中,密封保存。针对不同取样点、不同土壤类型共取土样 12 组,并设计 5 组室内土柱模拟试验。试验使用材质为有机玻璃的圆柱形土柱仪,土柱仪半径为 19 cm,高为 70 cm,室内灌溉试验装置示意图见图 2。为符合天然状态下的包气带环境,将取回的原状土样晒干并按照天然状态下的干体积质量进行填充,填充前记录对应晒干土样的含水率及计算填充质量;填充时底部填充石英砂并让其处于饱水状态,模拟潜水含水层,按照实际包气带土壤情况进行微缩比例填充;填充好后进行饱水及重力释水,关闭底部释水口并静置一段时间使包气带的含水率能更接近灌溉前天然条件下的状态。上部利用红外灯模拟光照,并根据实际调查的蒸发量进行等比例计算,根据红外灯的开关时间来模拟蒸发量,其灌溉量根据取样点处的灌溉制度即典型农作物的灌溉方式及灌溉定额确定,并依照土柱等比例计算得到其灌溉量,进行室内灌溉试验。

表 1 取样点分布表及其特征

取样点	代表地	灌溉方式	灌溉定额/cm	典型农作物	灌溉周期/d	主要岩性	包气带厚度/cm
1	农一师八团、阿瓦提县多浪乡	滴灌	1.76	棉花	10	粉土、细砂	300
2	阿瓦提县丰收三场	畦灌	3.85	果树	10	粉砂、粉土	150
3	阿瓦提县丰收二场	畦灌	3.85	果树	10	黏土、黏土、粉砂	210
4	农一师十六团	畦灌	3.85	果树	10	粉砂,黏土夹粉砂	150
5	农一师二团	畦灌	3.85	果树	10	黏土	250

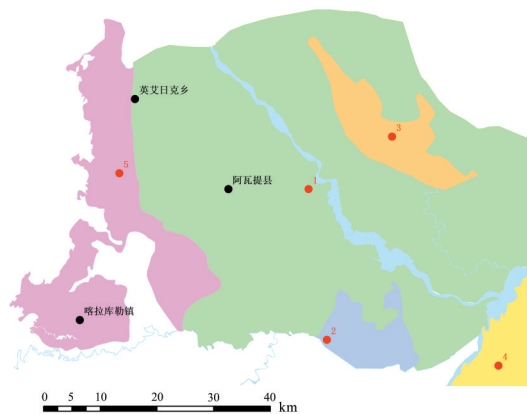


图1 取样点分布

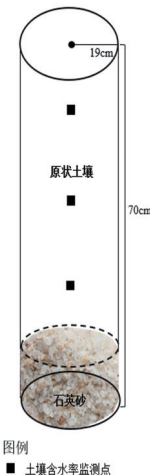


图2 室内灌溉试验装置示意图

1.3 模型构建

通过采用 Hydrus-1d 中的 Richards 方程进行求解水流模拟过程：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K(h) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K(h) \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \frac{\partial h}{\partial z}] \mp \frac{\partial K(h)}{\partial z}, \quad (1)$$

初始条件：

$$\theta(z, 0) = \theta_0(z), Z \leq z \leq 0,$$

式中： θ 为土壤体积含水率 (cm^3/cm^3)； h 为土壤负压水头 (cm)； $K(h)$ 为土壤非饱和含水率 (cm/h)； t 为时间 (h)； x, y, z 分别为空间坐标，原点为土层的上边界，向上为正； θ_0 为初始土壤含水率 (%)。

建立包气带水流数值模型，模拟在垂直方向上不同包气带土壤结构下灌溉水进入土柱后的运移过程，定量描述其灌溉量及底边界渗漏量，将包气带深度单位定为 (cm)，时间单位定为 (d)，根据室内土柱试验的实际时间，将模拟时间步长定为 10 d。包气带土壤在接受灌溉水垂向入渗补给后，以向地下水渗漏及水分蒸发的方式排泄。由于在连续入渗过程中，水流会在短时间内趋于稳定状态，因此初始条件的设置对最终结果影响不大^[8]，将模型上边界定为大气边界并选择使用消光系数法（按照经验值取 0.5）来划分土壤的潜在蒸发量，输入每天的降水量、灌溉量及蒸发量，下边界定义为自由排水边界。将试验获得的初始土壤含水率、样点土壤参数等条件输入 Hydrus-1d 进行模拟，土壤水分特征参数根据压力膜仪得到土壤水分特征曲线，并求得相关参数，参数见表 2。

表 2 不同土壤介质土壤水分特征曲线相关参数

介质类型	θ_r	θ_s	Alpha/cm	n	$Ks/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	L
粉土	0.067	0.45	0.020	1.41	75.2	0.5
黏土	0.095	0.41	0.019	1.31	6.2	0.5
粉砂	0.037	0.28	0.051	1.22	803	0.5
细砂	0.043	0.29	0.041	1.18	10.1	0.5
黏土夹粉砂	0.148	0.49	0.005	1.09	0.7	0.5

2 结果与分析

2.1 模拟结果及结果验证

近年来，国内外学者研究出一系列计算田间灌溉入渗补给系数的方法^[12-14,18]，本文将室内土柱模拟试验及 Hydrus-1d 数值模拟法二者得到的结果进行拟合，得到试验开始到结束不同深度土壤体积含水率的实测值和模型的模拟结果对比见图 3。

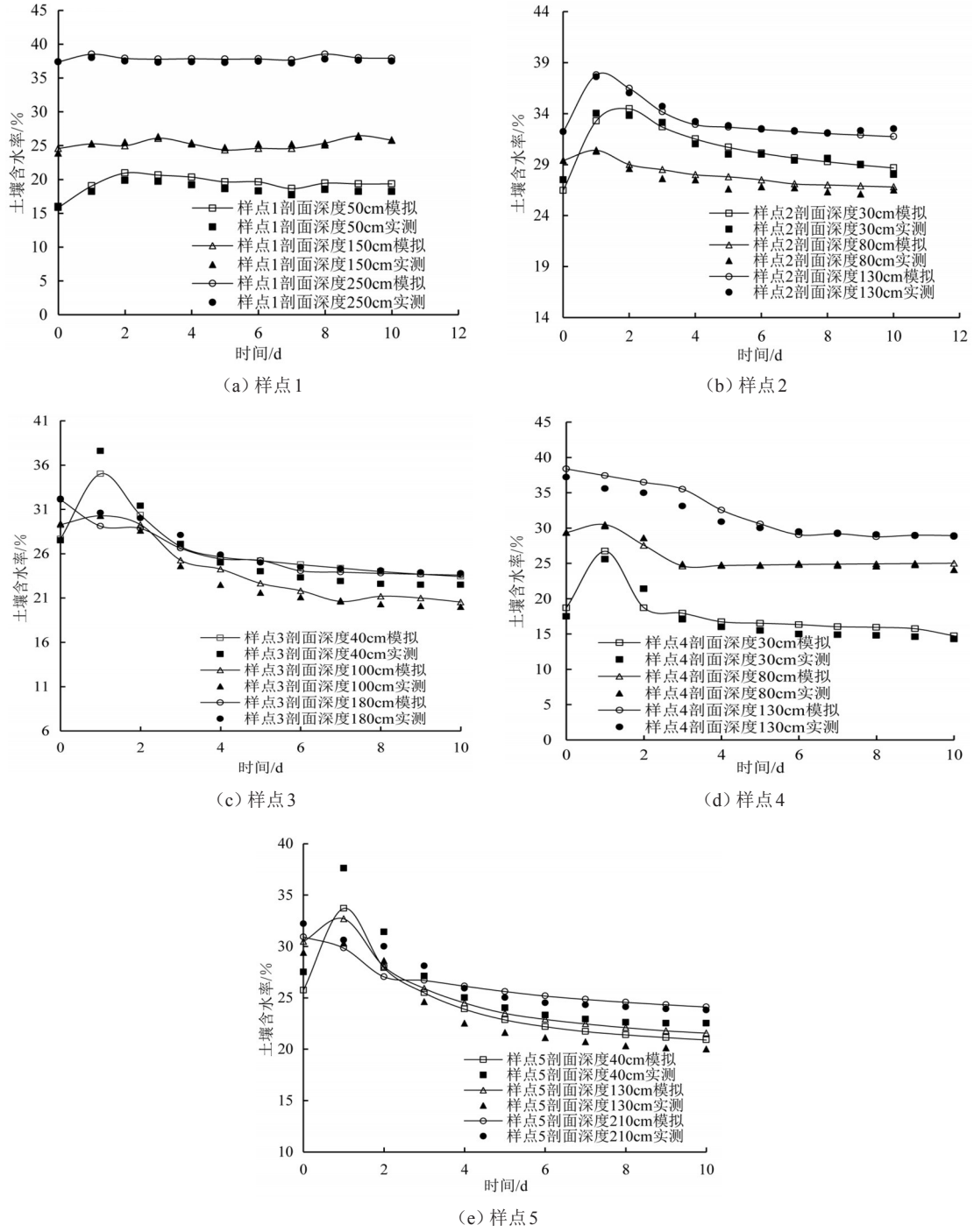


图3 不同深度土壤含水率的变化情况

2.2 误差分析

为了验证模型结果的准确性,本文通过均方根误差和拟合优度 R^2 来对本次模拟结果进行误差分析,具体根据式(2)、式(3) 计算:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{实测}} - X_{\text{模拟}})^2}{n}}, \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}} = 1 - \frac{\sum (X_{\text{实测}} - X_{\text{模拟}})^2}{\sum (X_{\text{实测}} - \bar{X})^2}, \quad (3)$$

式中: $RMSE$ 为均方根误差; $X_{\text{实测}}$ 为试验实测值; $X_{\text{模拟}}$ 为模型模拟值; n 为观测次数; R^2 为拟合优度; SS_{res} 为残差平方和; SS_{tot} 为总平方和; $\bar{X}$ 为实测平均值。

均方根误差的结果表征模型的拟合程度,能够很好地反映出模拟结果同实测结果之间的偏差, $RMSE$ 计算结果越小,则证明误差越小,表明所选择模型参数及模拟结果与实际情况相符,能够准确地对包气带中水分运移情况进行模拟。 $RMSE$ 计算结果见表3,由表3可得,5种不同样点数据,不同深度的 $RMSE$ 值范围为0.02~2.00,证明模拟效果较好。拟合优度是检验模拟值对实测值的拟合程度。 R^2 的值越接近1,说明模拟值与实测值之间的误差越小,由图4及表3可知,拟合优度的范围在0.89~0.99之间,由图2可观察到实测值略低于模拟值,推测是因为数值模拟的环境较为理想,而试验环境则存在外界不可控因素的影响。

表3 土壤含水率实测值和模拟值的 $RMSE$ 和拟合优度表

误差分析法	样点1 深度/cm			样点2 深度/cm			样点3 深度/cm			样点4 深度/cm			样点5 深度/cm		
	50	150	250	30	80	130	40	100	180	30	80	130	40	130	210
$RMSE$	0.14	0.20	0.02	0.57	0.64	0.36	1.29	0.83	0.77	1.28	0.45	1.21	2.00	1.69	1.15
拟合优度	0.99	0.94	0.99	0.93	0.95	0.98	0.99	0.98	0.97	0.89	0.96	0.97	0.99	0.96	0.91

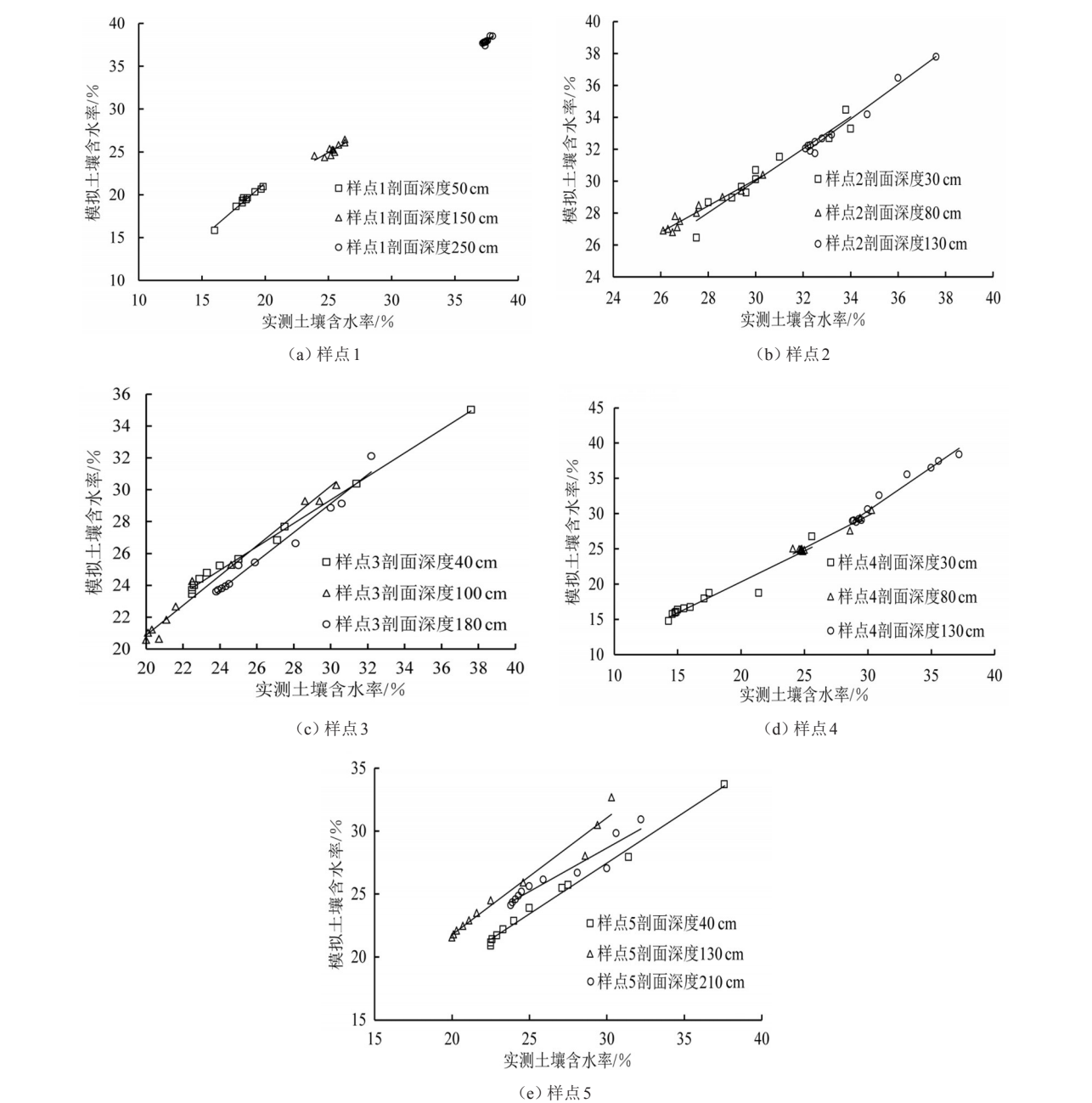


图4 模拟值与实测值的误差分析

2.3 灌溉入渗补给地下水的分析

灌溉入渗补给系数是灌溉水入渗补给地下水的量与灌溉水量之比,在干旱区绿洲带灌溉入渗补给地下

水量为地下水的主要补给来源,灌溉入渗补给系数决定了补给强度及大小。而灌溉入渗补给系数影响因素主要有灌溉制度、气候条件^[4]、地下水埋深即包气带厚度^[22]和土壤结构^[23]等,由于研究区处于干旱区,气候条件变化不大,此次主要分析灌溉制度、包气带厚度和土壤结构对其的影响。

1) 灌溉制度对灌溉入渗补给系数的影响

灌溉制度是根据作物需水特性和当地气候、土壤、农业技术及灌水等因素制定的灌水方案,主要内容包括灌水次数、灌水时间、灌溉定额等。由误差分析可知包气带水分运移模型拟合效果较好,因此通过对当地实际灌溉制度的分析,输入取样点适配的灌溉制度,样点剖面上滴灌的灌溉水量为1.76 cm/d;畦灌的灌溉水量为3.85 cm/d。模型运行后得到样点剖面上补给量及底边界在一个灌溉周期内的累积渗漏量,而样点剖面上这一部分渗漏量即为灌溉入渗量,根据式(4)计算灌溉入渗补给系数。

$$\theta = \frac{W_b}{W_u}, \tag{4}$$

式中： θ 为灌溉入渗补给系数； W_b 为底边界累积渗漏量； W_u 为灌溉水量。

模拟计算样点灌溉入渗补给系数见表4。由表4可知,灌溉制度不同影响其灌溉入渗补给系数,在滴灌条件下灌溉入渗补给系数的范围为0.320~0.474;在畦灌条件下灌溉入渗补给系数的范围为0.408~0.561。由于畦灌灌溉定额大于滴灌,造成同样土壤结构条件下畦灌灌溉入渗系数大于滴灌。

表4 不同样点灌溉入渗补给系数

样点	灌溉定额/cm	底板渗漏量/cm	灌溉入渗补给系数
1	1.76	0.79	0.349
	3.85	2.02	0.525
2	1.76	0.70	0.398
	3.85	1.73	0.550
3	1.76	0.75	0.362
	3.85	2.27	0.490
4	1.76	0.83	0.474
	3.85	2.16	0.561
5	1.76	0.74	0.320
	3.85	1.96	0.408

2)包气带厚度对灌溉入渗补给系数的影响

灌溉水在入渗过程中同时受到包气带厚度的影响,在入渗过程中,由于包气带土壤能存储与消耗一部分灌溉水,所以当包气带厚度较大时,灌溉水补给不到地下水导致其滞留在包气带中或被植物蒸腾消耗不能补给地下水。在不改变模型参数条件下,只改变其包气带厚度,在原样点剖面结构不变的基础上对其进行等比例增厚,分析不同土壤结构下灌溉入渗补给系数随包气带厚度变化情况,绘制灌溉入渗补给系数与包气带厚度关系(图5),从图5可以看到,随着包气带厚度增大,灌溉入渗补给系数也随之减小。

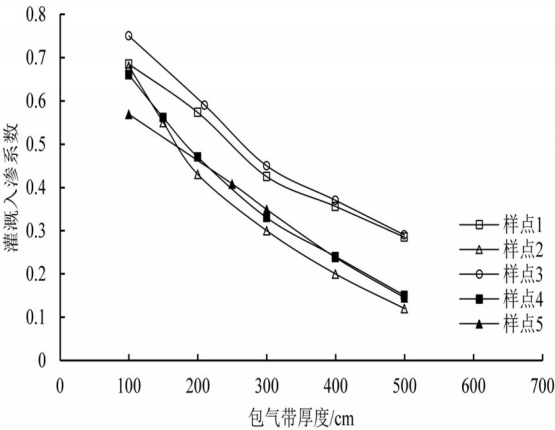


图5 灌溉入渗补给系数与包气带厚度关系图

3)土壤结构空间变异性对灌溉入渗补给系数的影响

土壤结构在空间上存在变异性,土壤结构的空间差异在数值上体现在土壤参数,故灌溉入渗补给系数在空间上存在差异,其不同土壤体积质量、初始含水率、饱和含水率、渗透系数^[21-23]均会对灌溉入渗补给量产生影响,从而导致各试验点灌溉入渗补给系数存在差异。本次将通过模型结合数理统计的方法来分析上述因素的影响。首先根据所建立的模型,在保证其包气带厚度、灌溉制度一致的基础上,通过改变不同样点的饱和含水率、土壤体积质量、渗透系数、含水率等参数,实现土壤结构空间变异性,模拟计算灌溉入渗补给系数的变化情况,模拟结果见表5;其后应用逐步回归法对土壤体积质量、初始含水率、饱和含水率、渗透系数与灌溉入渗补给系数之间的关系进行分析,并对其回归系数值进行检验。逐步回归分析及方程检验结果见表6。由表6可以看出,在分析过程中将相关性较小的饱和含水率剔除,灌溉入渗补给系数与土壤体积质量、初始含水率、渗透系数的回归拟合较好,且拟合优

度 R^2 的值达到了 0.875, 表明该逐步回归模型拟合度较好。由于显著性 <0.05 说明显著有意义, 显著性 <0.01 时为非常显著影响^[28]。灌溉入渗补给系数与土壤体积质量、初始含水率、渗透系数的偏回归系数检验亦达到显著水平, 而渗透系数相对其他参数更为显著。即土壤体积质量、初始含水率、渗透系数的空间变异均对灌溉入渗补给系数的变化产生影响, 而土壤渗透系数对灌溉入渗补给的影响更大, 土壤体积质量、初始含水率次之。渗透系数大, 土壤透水性愈强, 灌溉入渗补给量大; 体积质量小, 连通性好, 有利于灌溉水入渗时土壤孔隙内的气体排出, 从而有效减小了入渗过程中的气相阻力, 所以灌溉入渗补给量增加; 土壤初始含水率越大, 其土壤内部孔隙率越小, 土壤的连通性越差, 气相阻力增大, 则灌溉入渗补给量减小。即灌溉入渗补给系数随土壤初始含水率、体积质量的减小而增大, 随渗透系数增大而增大。

表 5 不同土壤参数模拟结果					
土壤类型	饱和含水率	体积质量	渗透系数	土壤含水率	灌溉入渗系数
1	0.43	0.99	15.16	0.066	0.492
2	0.41	1.41	10.11	0.068	0.475
3	0.38	1.26	6.36	0.069	0.483
4	0.39	1.38	2.63	0.052	0.461
5	0.32	1.38	1.36	0.075	0.45
6	0.45	1.42	207.55	0.146	0.56
7	0.44	1.34	93.56	0.039	0.545
8	0.51	1.53	4.85	0.158	0.435
9	0.41	1.39	50.23	0.033	0.53
10	0.45	1.41	19.57	0.014	0.501
11	0.49	1.51	0.73	0.144	0.408
12	0.39	1.39	21.08	0.074	0.515

表 6 灌溉入渗补给系数与各影响因子之间回归方程及回归系数检验					
灌溉入渗补给系数	逐步回归方程	决定系数 R^2	回归系数值	t 值	显著性
y	$y=0.507+0.003x_1-0.31x_2-0.55x_3$	0.875	0.507(常数)	48.938	0
			0.003	7.286	0
			-0.31	-1.604	0.001
			-0.55	-4.693	0.001

注 x_1 、 x_2 、 x_3 为渗透系数、土壤体积质量、初始含水率。

综上所述, 影响灌溉入渗补给系数的影响因素为灌溉制度、包气带厚度、反映土壤结构的渗透系数、土壤体积质量及土壤初始含水率。

3 讨论

灌溉入渗补给系数的计算方法很多^[12-18], 但近些年来国内研究者主要采用水量均衡法、试验法、Hydrus-1d 数值模拟法、同位素示踪等^[15-18], 任玉忠^[19]利用 Hydrus-1d 模型对土壤水渗漏量进行模拟, 同时根据农田水量平衡模型计算了土壤水渗漏量, 对不同方法计算的土壤水渗漏量进行比较, 为进行渗漏量的准确监测提供依据, 同时得到试验及模拟下的灌溉入渗补给系数。刘苗苗等^[20]基于不同方法得到的传统灌溉模式下新疆灌溉水田间入渗系数为 0.6 左右, 节水灌溉模式下的田间入渗系数为 0.3 左右。本文选用室内试验对数值模型进行验证, 利用数值模型累计渗漏量得到灌溉入渗补给系数。模拟得到的 2 种灌溉模式下的系数分别为 0.408~0.561 和 0.320~0.474。

灌溉制度、包气带厚度、反映土壤结构的渗透系数、土壤体积质量及土壤初始含水率是灌溉入渗补给系数的重要影响因素, 根据室内试验及模型模拟研究发现, 灌溉定额大则灌溉入渗补给系数大, 这与霍思远等^[25]的研究结果基本一致。同时, 杨庆^[26]通过建立 6 个不同条件下的包气带水分运移数值模型, 分析了不同包气带厚度下的蒸发入渗变化规律得到包气带厚度与灌溉入渗补给系数呈负相关, 李卓等^[21]、蔡焕杰等^[23]认为的一般体积质量较小的土壤其土壤孔隙大内部有较好的连通性, 即土壤初始入渗能力随体积质量增大递减, 入渗能力衰减速度随体积质量增大递增。白丹等^[27]利用竖管地下灌溉室内试验装置测定 7 h 内累积入渗量得到灌溉入渗量与土壤初始含水率、土壤体积质量负相关。由于研究灌溉入渗补给的影响因素有利于深入认识补给及正确评价入渗补给量, 对合理开发利用地下水资源具有重要意义。因此, 为了进一步探明灌

溉入渗补给和地下水量之间的互馈关系,今后有必要加强灌溉水在非饱和带与饱和带之间传输机制及其影响因素的定量研究。

4 结 论

1)通过建立取样点剖面数值模型对不同土壤结构下水流运规律进行了模拟,经与室内试验实测数据的对比分析表明,模型能够较好地模拟水流在包气带土壤内随时间变化的趋势,即能够通过模型输入灌溉水量得到累积渗漏量,并通过二者之间的关系求出不同土壤结构下的灌溉入渗补给系数。可以减小试验过程中不可避免的人为因素影响,且能根据当地地貌类型及土壤结构调整其参数,得到适用于不同环境的灌溉入渗补给系数。

2)根据研究区灌溉制度得到滴灌条件下灌溉入渗补给系数的范围为0.320~0.474;畦灌条件下灌溉入渗补给系数的范围为0.408~0.561。

3)不同灌溉制度即灌溉方式、灌溉定额、农作物均会对灌溉入渗补给系数产生影响,畦灌灌溉入渗补给系数大于滴灌的;灌溉水在入渗过程中受到包气带厚度的影响,在不改变模型参数条件下,只改变其包气带厚度,灌溉入渗补给系数随包气带厚度增大而减小。说明灌溉制度及包气带厚度是灌溉入渗补给系数的主要影响因素。

4)在保证包气带厚度、灌溉制度一致的基础上,改变不同样点的饱和含水率、土壤体积质量、渗透系数、含水率等参数,模拟计算灌溉入渗补给系数的变化情况,应用数理统计方法中的逐步回归法对土壤体积质量、渗透系数、初始含水率、饱和含水率与灌溉入渗补给系数进行相关性分析,并对其回归系数值进行了检验,且决定系数 R^2 的值达到了0.875。分析过程剔除了饱和含水率,说明通过土壤结构影响灌溉入渗补给系数的主要影响因子为渗透系数、土壤体积质量、初始含水率。

5)由于阿克苏流域下游灌区位于干旱区,其地下水的主要补给来源为灌溉水入渗,选取灌区内具有代表性的样点进行室内灌溉试验,将室内试验结果与数值模拟进行拟合,得到在不同灌溉制度、包气带厚度、土壤结构条件下其对应的不同灌溉入渗补给系数。本文经过对二者的结合为获取更为精确的灌溉入渗补给系数提供一种新思路,同时为后续评价该地区地下水资源可持续利用及保护提供依据。

参考文献:

- [1] 胡顺军,田长彦,宋郁东.干旱内陆河灌区灌溉入渗系数的测定与计算[J].灌溉排水学报,2010,29(2):124-125.
- [2] 王春峰,董新光,王水献,等.干旱区农田灌溉地下水与土壤水转化及入渗系数计算[J].地下水,2007(3):102-104.
- [3] 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.
- [4] 张志杰,杨树青,史海滨,等.内蒙古河套灌区灌溉入渗对地下水的补给规律及补给系数[J].农业工程学报,2011,27(3):61-66.
- [5] GENUCHTEN M, NAVEIRA-COTTA C, SKAGGS T H, et al. The Use of Numerical Flow and Transport Models in Environmental Analyses[M]. Application of Soil Physics in Environmental Analyses, 2014.
- [6] 卞建民,李育松,胡昱欣,等.基于Hydrus-1D模型的大安灌区旱田灌溉入渗补给研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):191-195.
- [7] 范严伟,黄宁,马孝义,等.应用HYDRUS-1D模拟砂质夹层土壤入渗特性[J].土壤,2016,48(1):193-200.
- [8] MARIEM Saadi, ADEL Zghibi, SABRI Kanzari. Modeling interactions between saturated and unsaturated zones by hydrus-1d in semi-arid regions (plain of kairouan, central tunisia)[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(3):1-18.
- [9] 梁籍,李颖,张学红,等.阿克苏地区地下水资源与水盐调控分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(2):192-196.
- [10] 沈玉凌.新疆阿克苏地区种稻改良盐渍土问题[J].干旱区研究,1998(3):56-59.
- [11] 孟江丽.水盐和排水系统的模拟研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2004.
- [12] HEATWOLE K K, MCCRAY J E. Modeling potential vadose-zone transport of nitrogen from onsite wastewater systems at the development scale[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 91(1/2):184-201.
- [13] 王燕,杨劲松,王相平,等.滨海农田土壤入渗特性规律研究[J].灌溉排水学报,2015,34(8):41-45.
- [14] 韩冬梅,周田田,马英,等.干旱区重度和轻度盐碱地包气带水分运移规律[J].农业工程学报,2018,34(18):152-159.
- [15] 聂卫波,董书鑫,马孝义.基于灌区尺度的畦田规格优化研究:以泾惠渠灌区为例[J].灌溉排水学报,2018,37(4):113-120.
- [16] 周田田,韩冬梅,宋献方,等.干旱区滴灌水盐调控改良重度盐碱地棉田的包气带水分运移分析[J].资源科学,2018,40(4):818-828.
- [17] 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.
- [18] 庞忠和,黄天明,杨硕,等.包气带在干旱半干旱地区地下水补给研究中的应用[J].工程地质学报,2018,26(1):51-61.
- [19] 任玉忠.干旱区枣园土壤水深层渗漏数值模拟研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2010.
- [20] 刘苗苗,杨丽,李斐,等.基于数值模拟的新疆灌溉水田间入渗系数研究[J].中国农村水利水电,2017(12):17-21.
- [21] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.

- [22] 武敏, 冯绍元. 不同地下水埋深土壤水分入渗规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(Z1):79-81.
- [23] 蔡焕杰, 徐家屯, 王健, 等. 基于 WinSRFR 模拟灌溉农田土壤入渗参数年变化规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2):92-98.
- [24] 李卓, 刘永红, 杨勤. 土壤水分入渗影响机制研究综述[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5):124-130.
- [25] 霍思远, 靳孟贵. 不同降水及灌溉条件下的地下水入渗补给规律[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5):6-13.
- [26] 杨庆. 银川平原包气带试验及数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [27] 白丹, 何靖, 郭霖, 等. 多因素影响下竖管地下灌溉入渗特性分析[J]. 农业工程学报, 2016(23):101-105.
- [28] 杨善朝. SPSS 统计软件应用基础[M]. 南宁: 广西师范大学出版社, 2001.

Calculation of Irrigation Infiltration Recharge Coefficient and Analysis of Influencing Factors in the Lower Reaches of Aksu River

WANG Lu, LI Sheng*, WANG Younian, WANG Xudong

(College of Geology and Mineral Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: **【Objective】**In order to obtain the irrigation infiltration recharge coefficient in the lower reaches of Aksu river and improve the numerical simulation accuracy of groundwater in the study area, the influencing factors of the irrigation infiltration recharge coefficient in this area were analyzed. **【Method】**In this paper, field sampling and indoor irrigation experiments were carried out by selecting representative points under different irrigation schemes, vadose zone thickness and soil structure in the lower Aksu area, and numerical simulation of vadose zone flow was carried out in combination with Hydrus-1d. Hydrus-1d model was used to calculate irrigation inflow under this soil structure by changing irrigation schemes and vadose zone thickness. Change of seepage recharge coefficient. On the basis of the calculation results of the model, the relationship between irrigation schedule, aeration zone thickness and irrigation infiltration recharge coefficient is analyzed firstly, and then the main factors affecting irrigation infiltration recharge coefficient in soil structure are analyzed with the method of model calculation and mathematical statistics. **【Result】**The results showed that the irrigation infiltration recharge coefficient ranged from 0.320 to 0.474 under drip irrigation and from 0.408 to 0.561 under border irrigation. The irrigation infiltration recharge coefficient varied under different irrigation schemes, while the irrigation infiltration recharge coefficient decreased with the increase of aeration zone thickness. The main factors affecting irrigation infiltration recharge are soil permeability coefficient, soil bulk density and initial soil water content. **【Conclusion】**According to indoor experiment combined with numerical model to calculate the irrigation infiltration coefficient under different irrigation system range, it is concluded that the influence factors of irrigation infiltration coefficient of irrigation system, the thickness of the vadose zone and reflects soil permeability coefficient of soil structure, soil quality and soil initial moisture content, volume for the downstream area irrigation infiltration coefficient selection in arid areas and provides the theory basis for further research.

Key words: Hydrus-1d; indoor irrigation test; irrigation area downstream of arid area; coefficient of recharge from irrigation; influencing factors of irrigation infiltration recharge coefficient

责任编辑: 赵宇龙