

长期滴灌棉田土壤盐分演变趋势预测研究

孙林¹, 罗毅²

(1. 中国科学院 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘 要:膜下滴灌节水增产高效的表现使其成为我国西北干旱区绿洲农田普遍使用的灌溉方式。然而,长期滴灌下土壤盐分的变化趋势亟待研究。于 2010 年在新疆玛纳斯河绿洲进行微咸水灌溉试验,校验 Hydrus 2D 模型,并模拟预测长期滴灌下土壤盐分积累的变化特征。结果显示:Hydrus 2D 模型可以有效模拟滴灌土壤盐分分布与积累特征;滴灌根区土壤盐分主要受灌溉输入土壤盐分与深层淋洗作用影响,随着滴灌年份的增加,根区盐分逐步增加,作物蒸腾受限,下渗淋洗量加大,最终根区的输入盐量与淋洗盐量相当,根区盐分处于相对平衡状态。以矿化度分别为 4.8, 3.2, 1.6, 0.8 g/L 的灌溉水质为例,在 420 mm 灌溉水量下,分别在 10, 15, 20, 35 a 后土壤盐达到平衡,根区盐分分别稳定在 4.2, 3.8, 3.2, 2.8 mg/cm³, 作物的蒸腾满足率分别为 72%, 80%, 85%, 91%, 为保证研究区内作物的正常生长,需要的灌溉量至少应分别为 495, 470, 425, 395 mm。

关键词:膜下滴灌; Hydrus 2D 模型; 土壤盐分; 数值模拟

中图分类号: S156.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)01-0186-07

Study on the Evolution Trends of Soil Salinity in Cotton Field under Long-term Drip Irrigation

SUN Lin¹, LUO Yi²

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Research Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Drip Irrigation under film is a prevailing irrigation method in arid area of northwest China due to its outstanding efficiency of water saving and production increases. However, issue on rise of salt accumulation in crop field under long-term drip irrigation should been dealt with as soon as possible. In this paper, the Hydrus 2D model was calibrated and validated by using the observed data of dynamics progress of soil salt obtained from field experiment which was conducted in Manasi river irrigation district, Xinjiang Uygur Autonomous Region. The result showed that Hydrus 2D model was a useful tool to simulate soil salt distribution and accumulation under drip irrigation. Then soil salt accumulation in different quota brackish water under long-term drip irrigation was simulated and analyzed. We found that soil salt increased with the irrigating years, but it finally reached a stable equilibrium for its increasing speed got slower which was chiefly due to salt leaching increase while transpiration was suppressed by increased soil salt. The equilibrium times were 10, 15, 20 and 35 years, respectively, while then contents of irrigated water salinity were 4.8, 3.2, 1.6 and 0.8 g/L and with irrigation water rate of 420 mm, contents of soil salt at root zone were 4.8, 3.2, 1.6, 0.8 mg/cm³, respectively, and corresponding guarantee rate of transpiration requirement were 72%, 80%, 85% and 91%, respectively. In order to maintain soil salt below the tolerance of crop, contents of irrigated water salinity were 4.8, 3.2, 1.6 and 0.8 g/L, rates of irrigation water should be more than 495, 470, 425 and 395 mm, respectively.

Key words: drip irrigation under film; Hydrus 2D model; soil salinity; mathematical simulation

收稿日期: 2012-01-15

修回日期: 2012-07-02

资助项目: 中国科学院“百人计划”项目(KZXC2-YW-BR-12); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB951002)

作者简介: 孙林(1973—), 男, 新疆塔城人, 主要研究方向为干旱区生态水文过程与模型。E-mail: Sunlin-Cas@hotmail.com

通信作者: 罗毅(1966—), 男, 河南罗山县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为旱区寒区水文过程模拟与观测。E-mail: luoyi.cas@hotmail.com

膜下滴灌既具备滴灌的防止深层渗漏、减少棵间蒸发、节水、节肥的特点,同时还具备地膜栽培技术的增温、保墒作用^[1],在我国西北干旱地区,特别是新疆,得到了广泛的应用^[2-3]。滴灌在根区可以形成淡化的脱盐区^[4-5],覆膜抑制了膜内的土壤蒸发作用,并使得膜内盐分发生侧向运移^[2,6],同时深层渗漏的减少,也降低了次生盐渍化发生的可能性,因此膜下滴灌还被用于防治土壤次生盐碱化^[2,5]。但是,膜下滴灌只是调节土壤盐分在作物根系层的分布状况,盐分并未排出土体,在灌溉用水含有一定盐分时,盐分会逐步在根底积累,有可能产生土壤积盐爆发^[2,5,7],因此,长期滴灌下土壤盐分积累特征是决定这一灌溉方式能否可持续的重要问题。近年来,通过室内土柱试验^[4-5,8]和田间调查及试验^[2-3,6,9-10],对膜下滴灌的水盐运移规律与特征有了一定的认识。由于滴灌土壤水盐运动为局部扩散模式,其土壤水盐分布表现出很强的时空分异与变异性,并受到土壤质地、潜水位、根系等的影响^[11],田间试验所得的结果并不能直接应用到具体的农田灌溉管理中^[12]。相对田间试验观测,数值模拟的人力、物力时间成本低,且可针对不同环境分析,因此,模型模拟分析成为研究滴灌下土壤水盐运移与灌溉管理措施制定和评估的一个重要途径^[11-13]。Hydrus 2D 是由美国国家盐土实验室(US Salinity laboratory)开发成功的一套用于模拟 2D 空间中变饱和和多孔介质中水分、能量、溶质运移的数值模型^[14],广泛应用于模拟滴灌条件下土壤水分和溶质运移分布规律以及灌溉管理措施评估研究中^[15-19]。本文根据微咸水膜下滴灌棉田试验,验证并分析 Hydrus 2D 模型在膜下滴灌的有效性^[20],在此基础上模拟分析长期滴灌下根区土壤盐分积累与分布特征。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在新疆石河子大学节水灌溉试验站内进行(44°18'N, 86°02'E),该站位于玛纳斯河流域洪积冲积扇中部,海拔 400 m 左右,潜水位较深,年变化约 7~11 m。气候属于中温带干旱区气候。根据石河子气象站近 30 a 资料统计,年平均气温(7.7±0.90)℃,无霜期(172.5±6.29) d,年降水量为(213±56.7) mm,年蒸发量(1 342±413) mm(小型蒸发皿)。原始土壤类型为荒漠灰钙土,经过多年耕作已改良熟化为耕作灰漠土。

1.2 试验设计与数据采集

于 2010 年 4—10 月进行膜下微咸水滴灌田间试

验,灌溉水质为 3.32 g/L,设置 3 个灌溉量处理,次灌水量分别为 36, 48, 60 mm,记为 Q_{36} , Q_{48} , Q_{60} ,历时分别为 6, 8, 10 h,滴头流量为 1.6 L/h,灌水间隔时间为 10 d,总灌溉量分别为 320, 420, 520 mm。小区面积为 54 m²,每小区 3 条膜,代表 3 个重复。种植方式为一膜两管四行模式(图 1),膜宽 140 cm,行距为 30 cm+60 cm,株距 10 cm。棉花品种为新陆早 7 号,于 2010 年 5 月 1 日采用“干播湿出”方式播种。

土壤盐分采用土钻取样,利用烘干配制 1:5 浸提液,采用电导法测定(DDP-210 便携式电导仪,中国科学院南京土壤研究所)。取样部位设在垂直滴灌带的膜间、宽行和窄行之间(图 1),设 5 个剖面点,取样深度为 5, 10, 20, 30, 45, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 cm。取样时间分两类:(1)年内变化取样,于播种前(4 月中旬)、蕾期(6 月中旬)、花铃期(7 月中旬)、铃期(8 月中旬)、吐絮期(9 月中旬)、秋收(10 月中旬)取样,除秋收取样深度至地下 200 cm,其余深度至地下 100 cm;(2)灌溉周期内变化取样。选取次灌水量为 60 mm 的处理,取样时间为灌前 6 h 和灌后 36 h;并在花铃期加密取样,即灌后 1, 36, 72, 120, 228 h 时取样,深度至地下 100 cm。10 d 测一次叶面积,每次 5 株,摘取叶子烘干称重后用叶比换算,根据株面积计算出叶面积指数;气象数据从石河子气象站(<http://www.shzqx.gov.cn/>)获取,该站距离本试验站约 1.5 km。

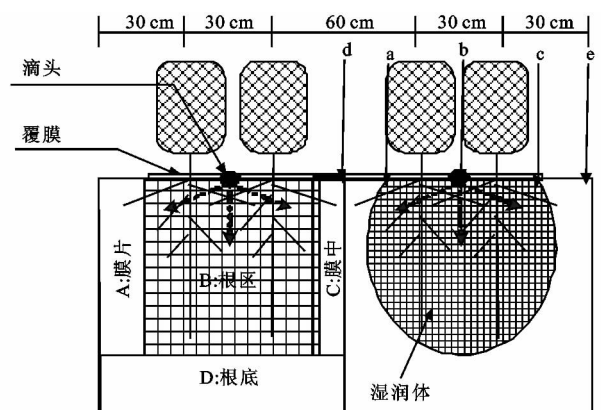


图 1 膜下滴灌设置、取样

注:a 为滴头内侧;b 为滴头下;c 为滴头外侧;d 为膜下中部;e 为膜间;A 为膜外;B 为根区;C 为膜中;D 为根底。

1.3 数值模拟模型

1.3.1 模拟单元设置 Hydrus 2D 模型的土壤水分动态模拟采用的是理查兹(Richards)方程,溶质运移模拟采用的是对流-弥散(CDE)方程,通过对模拟对象进行三角网剖分,利用迦辽金(Galerkin)线性有限单元法求解水盐运移模拟特征^[14]。一膜两管四行方式下土壤水分分布以膜下中部呈对称分布,因此以半膜剖

面作为基本模拟单元,构造 2D 三角网几何体(图 1),其宽度为 90 cm,深度到潜水位,为 600 cm。

模拟单元上边界中的无覆膜部位使用大气边界,用以模拟计算降水入渗与土壤蒸发过程;有覆膜部位使用无流量边界;本文假定单元两侧水分交换处于平衡,将土体两侧也设为无流量边界;底边界取至潜土层,选取的是 0 定水头边界;滴灌入渗采用时变水头边界实现,将水头设为 0,入渗宽度根据灌溉量、灌溉历时以及入渗速率计算得到。Hydrus 2D 模型运行所需要的环境驱动变量主要为降水、潜在蒸腾、潜在土壤蒸发和边界流量 4 项。其中降水直接来源于气象数据,边界流量由灌溉确定,潜在蒸腾和潜在土壤蒸发需要单独计算,本文采用由叶面积指数(LAI)计算得到的作物系数法分割潜在蒸散 $ET_p^{[20]}$ 。

1.3.2 参数获取与率定 模型选用的土壤水分特征函数的是 van Genuchten-Mualem 公式^[21],其参数首先用 Hydrus 2D 程序包提供 Rosetta 软件,由观测的饱和含水量、容重、土壤质地预测得到初始参数值,然后以加密观测灌溉周期内得到的土壤水分、盐分分布数据率定。

根系吸水模型选用的是 Feddes^[22] 提出的 van Genuchten 改进公式,根系吸水参数参考 Forkutsa^[13] 的成果,分别设为 $h_1 = -10\text{ cm}$, $h_2 = -25\text{ cm}$, $h_3(\text{high}) = -200\text{ cm}$, $h_3(\text{low}) = -6\ 000\text{ cm}$ 和 $h_4 = -14\ 000\text{ cm}$;盐分胁迫参数采用 Hydrus 2D 自带作物库参数,其盐分胁迫阈值为 7.7 dS/m ,每增加 1 dS/m ,其吸水能力降低 5.2% ,根系深度 60 cm ,其分布按危常州等^[23]的观测结果计算得到。

1.3.3 模型检验 模型检验选用的是以灌水量为 60 mm 处理生长季的土壤盐分,以及 3 个处理下秋末 200 cm 剖面的盐分数据;滴灌的土壤分布具有较高的空间分异特征,本文采用分区与剖面比较两种方法检验模拟效果,以 75 cm 为根底边界,划分为膜外、根区、膜中和根底 4 个区(图 1)。模拟效果评价方法一是通过曲线进行直观定性比对,二是利用统计指标选取均方根误差(RMSE)和相对平均误差(RMAE)。进行定量评估。

1.4 情景设置与分析

根据已有的新疆北疆地区棉花滴灌田间实验与

调查^[1,24],情景分析中灌溉水量为 $280\sim560\text{ mm}$,灌溉水质分别设为 $4.8,3.2,1.6,0.8\text{ g/L}$,以 2010 年气象数据与观测的叶面积指数为基本背景,连续模拟 50 a ,分别统计根区盐分、根底盐分,并计算实际蒸腾与潜在蒸腾之比,也即蒸腾满足率,以反映土壤水盐对作物生长的影响,确定适宜的灌溉量。

2 结果与分析

2.1 参数化结果

表 1 是根据灌后水盐动态反演率定的土壤水分特征参数,图 2 是模拟灌溉周期内分区土壤盐分与观测值比较,模拟结果表明,滴灌的水盐运移特征为:在滴头所在根区土壤盐分因输入先增加,再经淋洗迁移出现降低的过程,其它部位则为一个缓慢增加的过程。总体来看,第一灌溉周期的模拟效果较好,第二灌溉周期模拟值偏小,这主要是因为输入潜在蒸腾项是根据叶面积指数计算的作物系数法推算的,而第二灌溉周期已处于吐絮期,叶片活性降低,蒸腾减缓,相应的根区水分降低速度减慢造成的。统计结果表明(表 2),土壤盐分模拟 RMSE 为 0.6 mg/cm^3 ,除膜外分区外,RMAE 基本低于 10% 。

2.2 模型检验结果

图 3 是模拟的 Q60 处理年内分区土壤盐分与观测值的比较,从观测值变化趋势来看,随着灌溉时间的增加,各分区的盐分呈增加趋势,直观对比与统计分析评估显示(表 2),各分区 RMAE 低于 10% ,模拟效果好于灌溉周期,这主要是由于短期观测值的变异性超出其变化趋势,而较长期的土壤盐分变化趋势则大于观测值变异。

由于不再有灌溉与根系吸水的驱动作用,秋收后的剖面土壤盐分分布处于相对平稳状态,可以有效反映出一个生长季内的土壤盐分迁移积累特征。图 4 是模拟不同灌溉处理秋后剖面盐分模拟值与观测值比较,结果表明:模型较好地模拟出不同灌溉量下根区盐分的分布积累特征,模拟出的滴头内侧、滴头下、滴头外侧剖面的 RMSE 小于 0.75 mg/cm^3 ,除滴头内侧 RAME 较大外,滴头下、滴头外侧剖面小于 10% ,模拟效果较好。

表 1 观测与灌溉后水盐动态反演率定的土壤水分特征参数

土层深度/ cm	残余含水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α	n	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	扩散系数	弥散系数	l
0—45	0.062	0.432	0.021	1.41	42.8	0.5	4.8	2
45—100	0.082	0.381	0.019	1.31	14.2	0.5	4.8	0.5

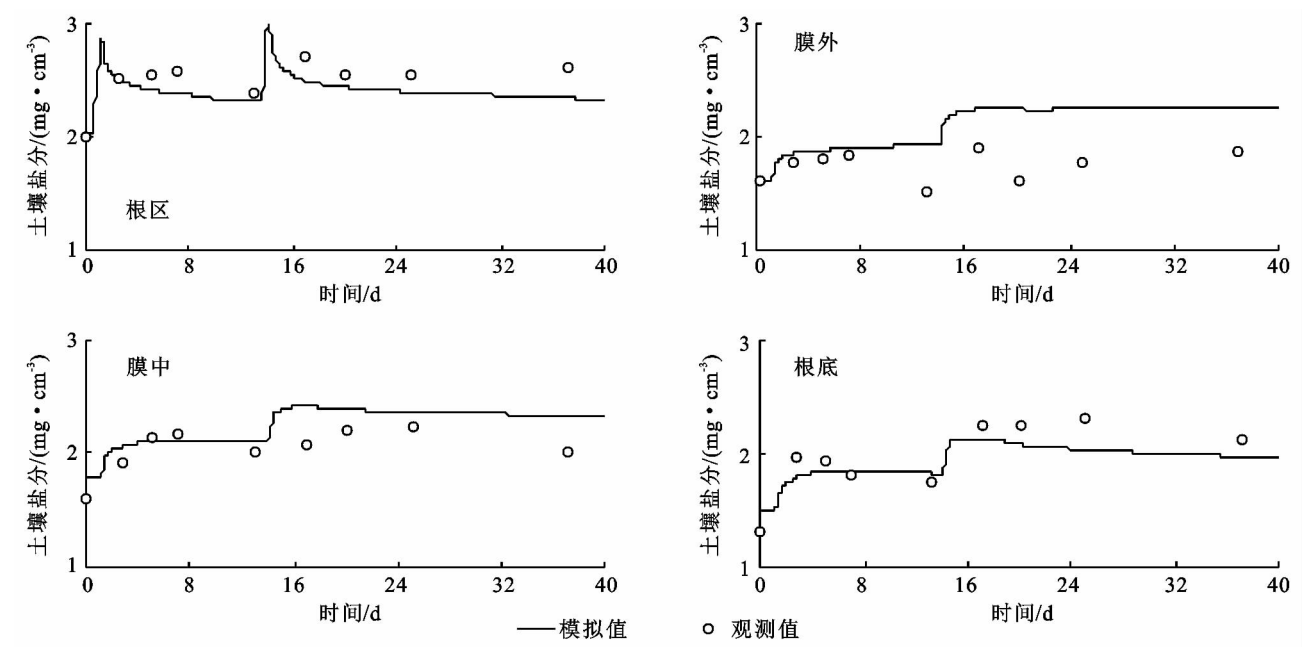


图 2 率定阶段灌溉周期内分区土壤盐分动态模拟与观测比较

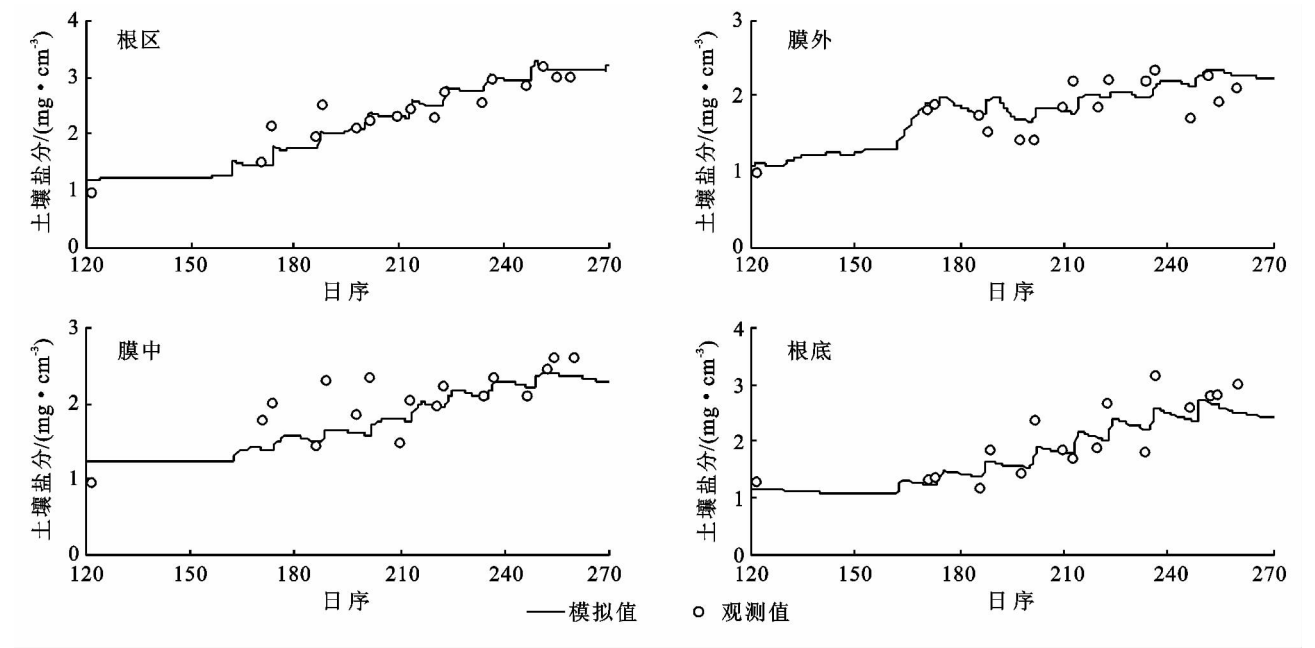


图 3 验证阶段分区的土壤盐分模拟与观测比较

表 2 土壤盐分模拟统计评估

项目	位置	RMSE/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	RMAE/%
灌溉周期 分区率定	膜 外	0.63	34.86
	根 区	0.51	10.60
	膜 中	0.18	7.82
	根 底	0.17	7.65
年分区检验	膜 外	0.34	2.71
	根 区	0.28	6.09
	膜 中	0.40	9.56
	根 底	0.76	4.76
秋收后剖面检验	滴头内侧	0.74	14.19
	滴头下	0.34	7.33
	滴头外侧	0.69	9.76

2.3 不同灌溉量与灌溉水质根区土壤盐分积累

图 5 为模拟计算的不同灌水量与灌溉水质下铃期根区(0—60 cm)和根底(60—120 cm)土壤盐分以及蒸腾满足率与根底下渗量,结果显示:根区盐分与灌溉水量表现为抛物线关系(图 5a),随着灌溉量的增加,输入土壤中的盐分增加,但当灌溉量超出蒸腾耗水量时,多余的水分向深层下渗,产生盐分的淋洗,使得根区盐分降低,灌溉水矿化度分别为 4.8,3.2,1.6,0.8 g/L 时,灌溉量分别为 370,365,300,180 mm 时根区盐分积累最大;灌溉量超出 300 mm 时出现根底下渗(图 5d),根底土壤盐分增加(图 5b);作物的蒸腾满足率随着灌溉量的增大而增加(图 5c),当灌

溉额为 300 mm 时,蒸腾满足率可达 85% 以上,在同一灌溉量下,随着灌溉水质的增加,蒸腾满足率有一定程度的降低,但 0.8~4.8 (g/L) 之间总体差别不大,这主要是因为根区积累的土壤盐分尚未对蒸腾造成明显胁迫,因此,微咸水灌溉对作物生长与产量的影响,在滴灌初期并不明显。

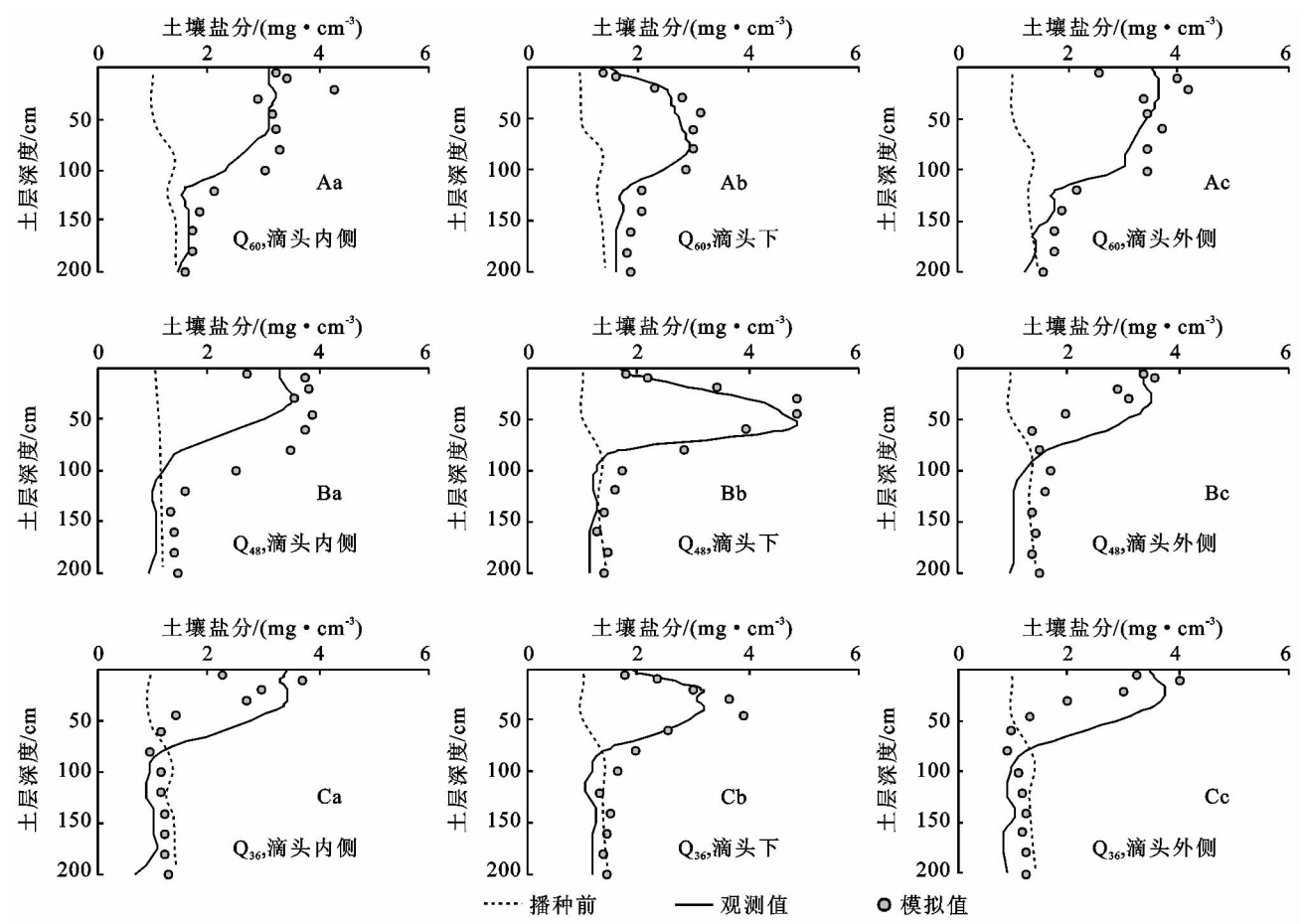


图 4 秋后不同灌溉量不同剖面盐分的模拟值与观测值比较

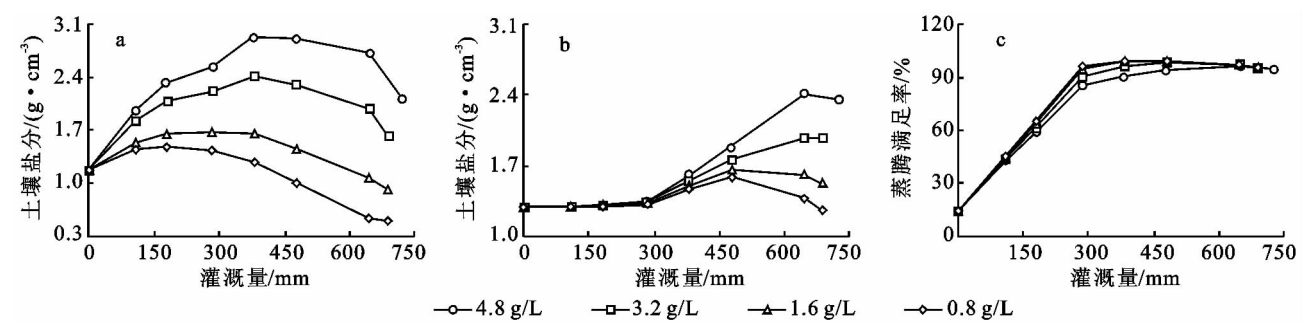


图 5 不同灌溉量根区盐分、根底盐分、蒸腾满足率的变化

2.4 长期滴灌根区盐分动态与分布特征

灌溉定额为 390~450 mm。图 6a 是灌溉量为 420 mm 时不同灌溉水质长期滴灌下根区(0—75 cm)土壤盐分动态,结果显示:对于灌溉水质分别为 4.8, 3.2, 1.6, 0.8 g/L, 分别在 10, 15, 20, 35 a 后根区盐分相继达到平衡稳定状态,分别为 4.2, 3.8, 3.2, 2.8 mg/cm³, 此时根区剖面盐分也处于相对稳定状态(图 6b), 其中根区部位的盐分则随着深度的增加而逐步增加, 根底 75 cm 以下分别稳定在 6.0, 5.6, 4.9, 4.3

mg/cm³, 作物的蒸腾满足率分别为 72%, 80%, 85%, 91%。长期滴灌后根区盐分趋于稳定的主要原因在于, 随着根区盐分的增加, 作物蒸腾受限, 下渗淋洗量加大, 最终根区输入盐量与淋洗盐量相当, 根区盐分处于相对平衡状态。

长期滴灌根区盐分平衡值由灌溉水质和灌溉量决定, 图 7 是不同灌溉量与灌溉水质长期灌溉平衡时根区盐分、根底盐分、蒸腾满足率与根底下渗水, 基本特征为随着灌溉量的增大, 土壤盐分降低; 随着灌溉水质

增大,土壤盐分增加。将根区盐分限制在一定水平是保证作物蒸腾吸水的前提,以85%灌溉满足率最低要

求,对于4.8,3.2,1.6,0.8 g/L灌溉水质,从图7c得出所需要的灌溉量至少分别为495,470,425,395 mm。

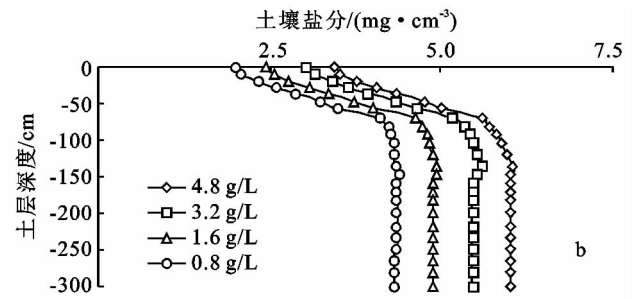
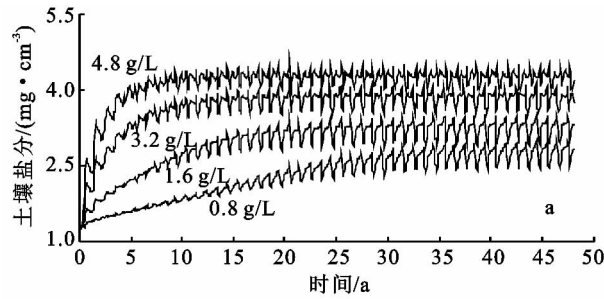


图6 长期滴灌下根区(0—75 cm)土壤盐分动态(a)与稳定时0—300 cm土壤剖面盐分分布(b)

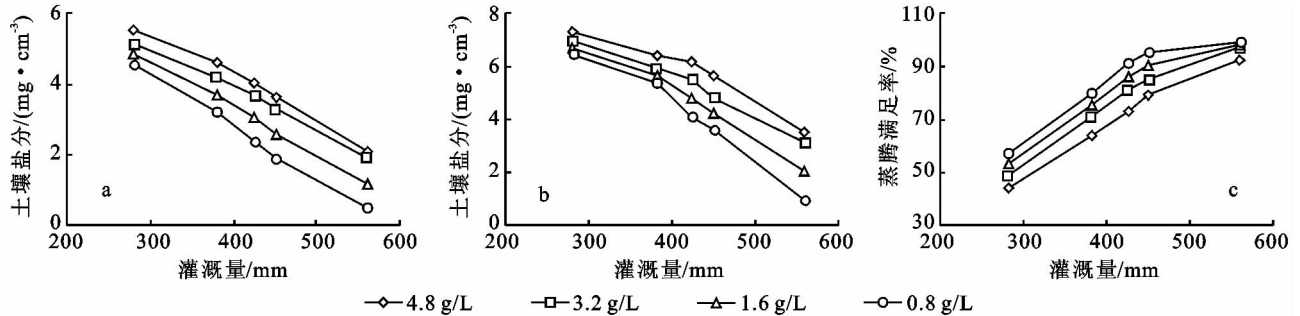


图7 不同灌溉量长期灌溉后土壤盐分稳定时根区盐分(a)、根底盐分(b)、蒸腾满足率(c)的变化

3 结论

本文利用微咸水灌溉的实地观测数据,率定并校验 Hydrus2D 模型在膜下滴灌棉田土壤盐分运移积累的模拟效果。结果显示:生长季内,土壤盐分模拟的 RMSE 低于 0.6 mg/cm^3 , RMAE 基本低于 10%, 秋后剖面分布中 RMSE 小于 0.75 mg/cm^3 , 滴头内侧与滴头下剖面模拟 RAME 小于 10%, Hydrus 2D 模型可用于干旱区绿洲灌区中膜下滴灌土壤盐分运移模拟。以 2010 年为基准气象条件,模拟计算玛纳斯流域绿洲不同灌溉水质与灌溉量滴灌土壤盐分积累过程,结果显示:

(1) 根区盐分与灌溉水量呈现出抛物线关系,灌溉量低时,根区土壤盐分随着灌溉量的增加而增加,对于矿化度分别为 4.8,3.2,1.6,0.8 g/L 灌溉水质,相应的灌溉量分别为 370,365,300,180 mm 时根区盐分积累速率最大,由于滴灌初期根区盐分较低,微咸水灌溉对作物耗水的影响,在滴灌初期表现不明显。

(2) 随着滴灌年限的增加,土壤盐分逐步增加,作物蒸腾受限,下渗淋洗量加大,对于矿化度分别为 4.8,3.2,1.6,0.8 g/L 的灌溉水质,在灌溉量为 420 mm,分别在 10,15,20,35 a 后土壤盐分相继达到平衡稳定状态,根区盐分分别为 4.2,3.8,3.2,2.8 mg/cm^3 ,作物的蒸腾满足率分别为 72%,80%,85%,91%,由于根区盐分是限制作物用水的直接因素,为

保证作物正常生长,合理的灌溉量至少应分别为 495,470,425,395 mm。

滴灌输入的土壤盐分会在根区积累,长期滴灌根区土壤盐分在灌溉输入与深层淋洗作用下逐步达到稳定平衡,其中深层淋洗量除直接决定于灌溉量外,还受因盐分积累对作物蒸腾限制的反馈调节,因此,需要根据土壤盐分对作物生长的影响,确定合理的灌溉淋洗用水,另外还需要一定的排水系统将深层下渗水排出灌区,以避免浅层潜水的上升。

参考文献:

- [1] 李明思,郑旭荣,贾宏伟,等.棉花膜下滴灌灌溉制度试验研究[J].中国农村水利水电,2001(11):13-15.
- [2] 刘新永,田长彦.棉花膜下滴灌盐分动态及平衡研究[J].水土保持学报,2005,19(6):82-85.
- [3] 张伟,吕新,李鲁华,等.新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J].农业工程学报,2008,24(8):15-19.
- [4] 李明思,康绍忠,孙海燕.点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J].农业工程学报,2006,22(4):32-35.
- [5] 吕殿青,王全九,王文焰,等.膜下滴灌水盐运移影响因素研究[J].土壤学报,2002,39(6):794-801.
- [6] 张琼,李光永,柴付军.棉花膜下滴灌条件下灌水频率对土壤水盐分布和棉花生长的影响[J].水利学报,2004(9):123-126.
- [7] 田长彦,周宏飞,刘国庆.21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J].干旱区地理,2000,23(2):177-181.

- [8] 王全九,王文焰,王志荣. 盐碱地膜下滴灌技术参数的确定[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 47-50.
- [9] 李玉义,逢焕成,陈阜,等. 膜下滴灌对风沙土盐分变化和棉花产量的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 96-100.
- [10] 陈秀龙,胡顺军,李修仓. 膜下滴灌条件下不同矿化度水对土壤水盐动态及棉花产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 7-12.
- [11] Khumoetsile M, Dani O. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review[J]. Plant and Soil, 2000, 222(1/2): 163-190.
- [12] Hanson B, Hopmans J W, Šimunek J. Leaching with subsurface drip irrigation on under saline, shallow irrigation under saline, shallow groundwater conditions[J]. Journal of Vadose Zone, 2008, 7(2): 810-818.
- [13] Forkutsa I, Sommer R, Shirokova Y I, et al. Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the aral sea basin of uzbekistan: I. Soil salinity dynamics[J]. Irrigation Science, 2009, 27(4): 319-330.
- [14] Šimunek J, Šejna M, van Genuchten M T. The Hydrus Software Package for Simulating Two- and Three-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-saturated Media, User Manual [M]. Prague, Czech Republic: PC Progress, 2007.
- [15] Skaggs T H, Trout T J, Šimunek J, et al. Comparison of hydrus-2d simulations of drip irrigation with experimental observations[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(4): 304-310.
- [16] Roberts T, Lazarovitch N, Warrick A W, et al. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using hydrus-2D[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(1): 233-240.
- [17] Mubarak I, Mailhol J C, Angulo-Jaramillo R, et al. Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(11): 1547-1559.
- [18] Šimunek J, van Genuchten M T, Šejna M. Development and applications of the hydrus and stanmod software packages and related codes[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 587-600.
- [19] 席本野,贾黎明,王烨,等. 地下滴灌条件下三倍体毛白杨根区土壤水分动态模拟[J]. 应用生态学报, 2001, 22(1): 21-28.
- [20] 孙林,罗毅,杨传杰,等. 干旱区滴灌棉田灌水量与灌溉周期关系[J]. 资源科学, 2012, 34(4): 668-676.
- [21] Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [22] Feddes R A, Rijtema P E. Water withdrawal by plant roots[J]. Journal of Hydrology, 1972, 17(1/2): 33-59.
- [23] 危常州,马富裕,雷咏雯,等. 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究[J]. 棉花学报, 2002, 14(4): 209-214.
- [24] 李旭东,王俊. 新疆棉花膜下滴灌条件下盐分变化及最优洗盐模式的确定[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 115-118.

(上接第185页)

- [8] 茆长宝,陈勇. 土地利用及其生态服务价值演变的驱动力与预测研究:以江苏省为例[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 269-275.
- [9] 李加林,许继琴,李伟芳,等. 长江三角洲地区城市用地增长的时空特征分析[J]. 地理学报, 2007, 62(4): 437-447.
- [10] 张淑英,陈云浩,李晓兵,等. 内蒙古生态资产测量及生态建设研究[J]. 资源科学, 2004, 26(3): 22-28.
- [11] 孙洪泉,邓磊,蒋卫国,等. 长江三角洲地区生态资产评估[J]. 资源科学, 2008, 30(9): 1367-1373.
- [12] 李京,陈云浩. 生态资产定量遥感测量技术体系研究—生态资产定量遥感评估模型[J]. 遥感信息, 2003(3): 8-11.
- [13] 谢余初,巩杰,赵彩霞,等. 干旱区绿洲土地利用变化的生态系统服务价值响应:以甘肃省金塔县为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 165-170.
- [14] 朱文泉,张锦水,潘耀忠,等. 中国陆地生态系统生态资产测量及其动态变化分析[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 586-594.
- [15] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the worlds ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.