

盐碱土入渗下修正 Green-Ampt 模型参数确定与验证

陈俊英^{1,2}, 何旭佳^{1,2}, 杨亚龙², 白旭乾², 李毅², 谢林林³

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学理学院, 杨凌 712100)

摘要: 为进一步探究盐碱土的入渗机理, 实现科学的盐碱土农业生产与灌溉, 基于传统 Green-Ampt 模型, 根据盐碱土的入渗特性引进扩散率, 并结合对土壤剖面含水率分布的划分假定对模型进行修正。利用 5 种盐碱土进行一维积水入渗试验, 采用入渗率、湿润锋数据验证该修正模型。结果显示: 修正模型模拟值与实测值的一致性良好, 进行相关分析得到 5 种盐碱土入渗率 R^2 平均值为 0.983, 平均绝对误差均小于 0.05 cm/min; 湿润锋 R^2 平均值为 0.868, 平均绝对误差均小于 3.50 cm。将修正模型参数饱和导水率、湿润锋面基质吸力值与盐碱土盐分离子含量进行相关分析, 结果显示基质吸力值随 K^+Na^+ 含量的减少而减小, 饱和导水率随 K^+Na^+ 含量的减少而增大。该修正模型经验证可应用于不同盐渍化程度的盐碱土入渗过程模拟, 从而为深入盐碱土水分入渗机制研究与加快盐碱土农业生产提供理论支持。

关键词: 入渗; 含水率; 盐碱土; 基质吸力; Green-Ampt 模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.015

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0125-09

陈俊英, 何旭佳, 杨亚龙, 等. 盐碱土入渗下修正 Green-Ampt 模型参数确定与验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 125-133. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.015 http://www.tcsae.org

Chen Junying, He Xujia, Yang Yalong, et al. Parameter determination and verification of improved Green-Ampt model under saline-alkali soil infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 125-133. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.015 http://www.tcsae.org

0 引言

盐碱土是碱土与盐土的总称, 在中国总面积超过 0.33 亿 hm^2 , 占灌溉面积的 15%^[1]。土壤中的盐分离子影响作物水分吸收, 对作物生长造成危害^[2]。盐碱土的改良利用与盐碱土的入渗规律研究息息相关, 掌握盐碱土的入渗特性, 建立盐碱土的入渗模型尤为重要。

Green-Ampt 模型是 1911 年 Green 与 Ampt 根据土壤毛管理论提出的土壤入渗模型^[3], 计算精度较高, 因而得到广泛应用。随着研究深入, Green-Ampt 模型不断被修正应用于初始含水率不均的土层入渗^[4]、层状土^[5-6]以及浑水入渗^[7]、降雨入渗^[8]等研究领域, 证明了该模型拥有广泛的适用性。赵伟霞等^[9]建立了适用于恒定水头井积水入渗的 Green-Ampt 模型, 联立入渗率与累计入渗量的表达式, 反求土壤导水率与湿润锋面基质吸力, 并发现恒定水头井入渗下土壤湿润体呈椭球体。Ma 等^[10]对大型分层土壤土柱进行扩大试验, 采用了 Bouwer 方法对 Green-Ampt 模型进行修正, 修正模型模拟效果良好。针对 Green-Ampt 模型的修正集中在土壤导水率与湿润锋面基质吸力两个参数的变换求解, 问题难度较高。迄今已有大量使用该入渗模型拟合盐碱土入渗过程的研究, 周蓓蓓等^[11]施加枯草芽孢杆菌改良盐碱土, 并

分别采用 Philip 和 Green-Ampt 模型拟合入渗数据, 结果显示 Green-Ampt 模型的拟合数据误差小于 Philip 模型。这与王全九等^[12]的研究成果相似, 都证明了在入渗时间较长的情况下, Green-Ampt 模型模拟精度更高。盐碱土由于盐分离子的存在, 其入渗性能降低, 入渗历时较普通土壤更长^[13], 采用 Green-Ampt 模型更适合描述盐碱土水分运移规律。不同于 Kostikov 等经验模型, Green-Ampt 模型具有坚实的理论基础, 可以不断被修正从而适用于盐碱土入渗。因此采用 Green-Ampt 模型模拟盐碱土入渗过程具有明显优势, 但目前还未有固定的适用于盐碱土入渗的修正 Green-Ampt 模型。

本文根据盐碱土的入渗特性采用入渗区含水量剖面分布假定, 通过扩散率计算得到基质吸力值从而对传统 Green-Ampt 模型进行修正, 建立适用于盐碱土的修正 Green-Ampt 入渗模型, 并采用试验数据验证该模型。修正模型综合考虑盐碱土入渗机理, 结合水分入渗过程, 进一步提高了入渗预测模型的精度, 高精度的水分入渗预测作为基础研究可为盐碱土的改良利用与农业生产提供理论依据与技术支持。

1 基本理论

1.1 Green-Ampt 模型基本表达式

Green-Ampt 模型针对出现薄层积水时干燥土壤的入渗问题, 假定入渗中存在明显的水平湿润锋面, 将湿润区与未湿润区分开, 入渗时的水分运移符合达西定律。模型基本表达式^[3]为

收稿日期: 2021-04-09 修订日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51409221, 51979234)

作者简介: 陈俊英, 博士, 教授, 研究方向为节水农业和水土资源高效利用。

Email: cjiyrose@126.com

$$i(t) = K_s \frac{Z_f + S_f + H}{Z_f} \quad (1)$$

式中 $i(t)$ 为入渗率, cm/min; K_s 为饱和导水率, cm/min; S_f 为湿润锋面基质吸力, cm; Z_f 为湿润锋运移深度, cm; H 为土壤表层积水深度, cm。

由水量平衡原理, 推得累积入渗量与湿润锋运移深度的表达式为

$$I = (\theta_s - \theta_i) \cdot Z_f \quad (2)$$

式中 I 为累积入渗量, cm; θ_s 为土壤饱和含水率, %; θ_i 为土壤初始含水率, %。

利用式 (1) 和式 (2) 推得时间与湿润锋关系式为

$$t = \frac{\theta_s - \theta_i}{K_s} \left[Z_f - (S_f + H) \ln \frac{Z_f + S_f + H}{S_f + H} \right] \quad (3)$$

式中 t 为时间, min。

1.2 修正 Green-Ampt 模型

1.2.1 基本假设与理论

对于 Green-Ampt 模型, 应用时要解决的最重要问题, 即确定模型两大参数饱和导水率 K_s 与基质吸力 S_f 。在传统模型的实际应用中, 由于空气的存在, 土壤的饱和区并不能完全被水填满, 因此饱和区的实际导水率 K_0 会小于理论上的饱和导水率 K_s , 地表实际含水率值 θ_0 会小于土壤饱和含水率 θ_s [14-16]。有研究表明 $(\theta_0 - \theta_i)$ 与 K_0 不准确造成的数据结果差异大于 S_f 不准确造成的差异, 因此确定 $(\theta_0 - \theta_i)$ 与 K_0 的数值是至关重要的 [17]。

本研究对修正 Green-Ampt 模型作以下假设:

1) 考虑到盐碱土由于盐分离子的存在, 入渗时长高于普通土壤, 甚至出现水分难以下渗的现象 [18], 假设试验计划湿润锋深度足够深, 入渗时间足够长, 认为上层土壤接近饱和, 入渗率趋于稳定。则有两个结论: ① K_0 数值等于土壤稳定入渗率 i_e , 为 1/2 的饱和导水率 [19]; ② 土壤上层饱和区的地表实际含水率 θ_0 等于入渗时间超过 24 h 的土壤表层实测含水率 θ_m 。

2) 由于盐碱土为非饱和土, 假定水分到达的区域为入渗区, 将入渗区分为湿润区与浸润区, 含水量分布如图 1 所示, 湿润区导水率 $K=i_e$ 且含水率 $\theta=\theta_m$, 浸润区含水率由 θ_m 到 θ_i 变化。对湿润区作以下假设: ① 当湿润锋运移深度为 L 时, 湿润区深度为 L/α (α 的取值范围为 1~10); ② 有研究证明土壤浸润区的含水率分布采用椭圆曲线描述具有较高精度 [20], 因此入渗时用 1/4 的椭圆曲线描述浸润层含水量变化, 温馨等 [21] 经研究获得湿润区深度为 $L/2$ 时入渗深度的隐性表达式, 本研究将湿润区深度设为 L/α , 得出不同入渗时刻 t (min) 下, 湿润锋运移深度 L (cm) 的隐性表达式

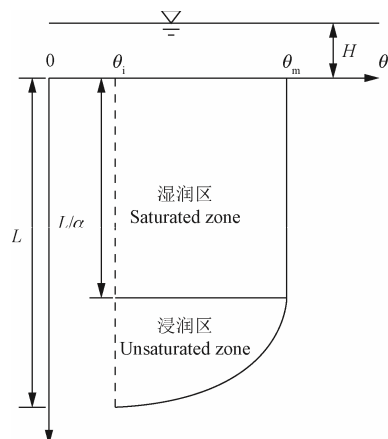
$$t = \frac{(4 + \pi)(\theta_m - \theta_i)}{4\alpha i_e} \left[L - \alpha(S_f + H) \ln \left(1 + \frac{L}{\alpha(S_f + H)} \right) \right] \quad (4)$$

式中 i_e 为土壤稳定入渗率, cm/min; θ_m 为土壤表层实测含水率, %; α 为表征湿润区深度时使用的参数, 无物理意义。

由此, 将 Green-Ampt 模型中的 K_s 数值替换为稳渗率

i_e , 修正 Green-Ampt 模型的表达式为

$$i(t) = i_e \frac{Z_f + S_f + H}{Z_f} \quad (5)$$



注: θ_i 为土壤初始含水率, %; θ_m 为土壤表层实测含水率, %; H 为土壤表层积水深度, cm; θ_v 表示含水率, %; L 为湿润锋运移深度, cm; L/α 表示湿润区深度, cm。下同。

Note: θ_i indicates the initial moisture content of the soil, %; θ_m indicates the measured moisture content of the soil surface, %; H indicates the depth of water accumulation on the soil surface, cm; θ_v indicates the moisture content, %; L indicates the depth of wetting front, cm; L/α indicates the depth of the saturated zone, cm. Same as below.

图 1 入渗区含水量分布图

Fig.1 Distribution of water content in the infiltration area

1.2.2 参数推导

根据 Philip 的研究 [22-23], 传统 Green-Ampt 模型实质上是土壤水分运动参数近似为 δ 函数, 即用一个含水率处急骤上升的 δ 函数来近似代替土壤扩散率 $D(\theta)$, 而扩散率 D 随含水率发生变化, 土壤含水率较大时, 扩散率急速增大, 因此模型计算的土壤湿润锋吸力 S_f 值与实际数值有较大差距。 S_f 值的修正方法本质是用一条 $D=D'$ 的线性化直线近似表达土壤水分运动参数 $D(\theta)$, 避免了扩散率 $D(\theta)$ 因含水率的增加而急速上升的现象, 从而增加了 S_f 计算值的准确度。

令 D' 表示湿润区某种平均的或有效的土壤扩散率, 已知 Z_f 与 t 有近似关系式 [24]

$$Z_f = \sqrt{2D't} \quad (6)$$

使用 ORIGIN 软件通过最小二乘法拟合试验数据 Z_f 与 t , 拟合形式为: $Z_f = \lambda \cdot t^{0.5}$ (λ 为拟合时使用的参数, 无物理意义)。则有 $D' = \lambda^2/2$, 通过拟合结果得到 D' 值。

而 D' 的表达式为

$$D' = K_s \frac{S_f + H}{\theta_s - \theta_i} \quad (7)$$

根据对 Green-Ampt 模型的两个假设, 将土壤饱和导水率 K_s 替换为稳渗率 i_e , 将土壤饱和含水率 θ_s 变为土壤表层实测含水率 θ_m , 式 (7) 可写为

$$D' = i_e \frac{S_f + H}{\theta_m - \theta_i} \quad (8)$$

将定值 i_e 、 H 、 θ_m 、 θ_i 代入式 (8), 得 S_f 值。

综上, Green-Ampt 模型修正后两大参数 K_s 与 S_f 都可得到准确数值。在入渗时间足够长的情况下, 将 K_s 转换为更易得的稳渗率 i_e , 并通过将土壤水分参数 $D(\theta)$ 近似

线性化，经 ORIGIN 软件拟合后得到更准确的 S_f 值，避免了含水率增大对 $D(\theta)$ 的影响。

为进一步探究修正模型精度，引用郭向红等^[25]建立的 Green-Ampt 模型模拟盐碱土的入渗过程，比较两种模型模拟效果，确定模拟效果造成差异的原因。郭向红模型与修正模型基本假定相同，因此可引用该模型模拟盐碱土的入渗过程，并探究郭向红模型模拟盐碱土入渗的精度。为了研究不同水头下的水分入渗情况，基于传统 Green-Ampt 模型的基本假定，即土壤初始含水率分布均匀且存在明显的湿润锋，郭向红等采用入渗率与湿润锋运移深度的倒数呈线性关系这一理论依据，求得概化湿润锋深度，通过拟合入渗率数据与概化湿润锋，求得参数 a 、 b 值，计算得饱和导水率 K_s 与基质吸力值 S_f 。

将 K_s 代入式 (3)，利用 MATLAB 采用二分法解不同时刻 t 对应的 Z_f ，将解出的 Z_f 代入式 (1)，即可求出不同时刻对应的入渗率。

2 材料与方法

2.1 试供土样

试验土壤均取自于内蒙古河套地区沙壕渠灌域，在灌域内随机选取 12 个采样点，采集 0~30 cm 深度表层土，经风干、研磨、过筛后得到土样。土壤含水率由烘干法测得，使用 pH 试纸测得土壤 pH 值，采用激光粒度仪 Mastersizer-APA2000 测得土壤颗粒组成，对盐碱土易溶盐离子的含量进行测定。经测定后获取到易溶盐总量与 8 种主要的易溶盐离子 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量。根据盐渍化分级标准的易溶盐总量确定盐碱土的盐渍化程度，12 个采样点的盐碱土样品分别为 2 个轻度盐碱土、2 个中度盐碱土、2 个重度盐碱土，其他 6 种均为盐土。因此样品中的轻度盐碱土、中度盐碱土与随机选取的 1 个重度盐碱土构成了本文所用的 5 种土壤类型，根据 5 种试验土样验证修正 Green-Ampt 模型的适用性，其基本理化参数见表 1。

2.2 试验方案

试验地点位于陕西西北农林科技大学旱研院灌溉大厅，试验为一维垂直积水入渗试验，装置图见图 2。装置由试验土柱、供水设备和支架组成，试验土柱采用有机玻璃材料制造，柱高 70 cm，内径为 12 cm，装土高为 60 cm，下置透气底板。供水设备为内径 10 cm 的马氏瓶。试验土柱与马氏瓶外壁均有刻度，以便观察读数。

将试验土样混合均匀，风干后过 2 mm 筛备用。灌溉用水为咸阳市杨陵区自来水。利用马氏瓶供水，供水水头始终控制为 3 cm。在试验过程中，按照先密后疏的时间间隔定时观察数据，记录土柱湿润锋运移深度和马氏瓶水位数据。经预试验确定计划湿润锋为 30 cm，即当湿润锋达到 30 cm 时停止供水，结束试验。

环境温度控制在 24 ℃ 左右，蒸发忽略不计，每种盐碱土入渗试验重复 3 次。

2.3 数据处理

将修正 Green-Ampt 模型与郭向红模型计算的入渗率

进行对比，分析两者模拟效果的差异。为评价模型模拟精度，将修正 Green-Ampt 模型模拟值与实测值进行相关分析，并使用决定系数 R^2 与平均绝对误差 MAE 作为评价指标。采用软件 SPSS19.0 进行分析。

表 1 试验土样理化参数
Table 1 Physical and chemical parameters of test soil samples

项目 Item	参数 Parameter	土样编号 Soil number				
		S1	S2	S3	S4	S5
颗粒组成 Particle composition/%	<0.002 mm	32.1	22.8	19.2	22	25.5
	0.002~0.02 mm	31.9	25.2	22.3	25.6	28.6
	>0.02~2 mm	36.0	51.9	58.6	52.4	46.0
土壤质地 Soil texture	-	壤质黏土 黏壤土 砂质黏壤土 黏壤土 壤质黏土				
容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	-	1.48	1.48	1.48	1.48	1.47
土壤水力参数 Soil hydraulic parameters	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	0.529	0.59	0.552	0.629	0.667
	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	0.049	0.024	0.025	0.03	0.042
	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	0.001 6	0.003 1	0.001 2	0.004	0.000 3
盐分离子含量 The content of salt ions	pH	8.10	8.05	8.87	7.93	9.15
	$\text{K}^++\text{Na}^+/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.49	0.93	1.69	0.90	5.33
	$\text{Mg}^{2+}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.30	0.19	0.06	0.78	0.65
	$\text{Ca}^{2+}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.64	0.32	0.08	0.83	0.22
	$\text{Cl}^-/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	1.01	1.23	1.14	3.48	3.09
	$\text{SO}_4^{2-}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	2.11	1.42	1.96	1.85	8.86
	$\text{HCO}_3^-/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.24	0.31	0.17	0.31	0.23
	$\text{CO}_3^{2-}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	0	0	0.04	0	0.06
	易溶盐总量 Total soluble salt/(g·kg ⁻¹)	4.66	4.26	5.05	7.99	18.32
	盐渍化程度 Degree of salinization	轻度盐渍土 轻度盐渍土 中度盐渍土 中度盐渍土 重度盐渍土				

注： θ_s 为土壤饱和含水率， $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ； K_s 为饱和导水率， $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。下同。
Note: θ_s indicates the saturated moisture content of the soil, $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$; K_s indicates saturated hydraulic conductivity, $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Same as below.

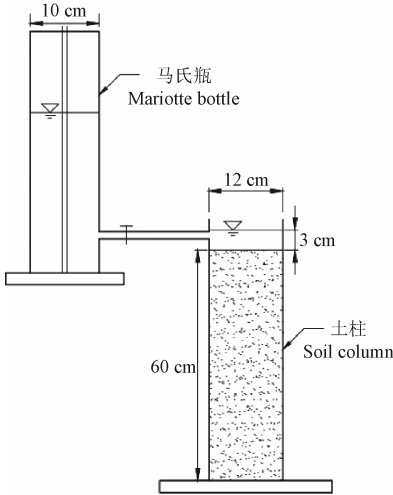


图 2 入渗试验装置图
Fig.2 Diagram of infiltration test device

3 结果与分析

3.1 参数确定

3.1.1 修正 Green-Ampt 模型

根据式 (8) 求得土壤水分运动参数 S_f 。
根据对 Green-Ampt 模型的假设，认为盐碱土试验计

划湿润锋深度足够深,入渗时间足够长, K_s 数值等于土壤稳定入渗率 i_e 。

5 种盐碱土采用修正 Green-Ampt 模型计算的 K_s 与 S_f 值见表 2。

表 2 修正 Green-Ampt 模型 K_s 与 S_f 值汇总
Table 2 Summary of K_s and S_f values of improved Green-Ampt model

土样编号 Soil number	λ	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity $K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	基质吸力 Matric suction S_f/cm	决定系数 Decision Coefficient R^2
S1	1.219 8	0.001 6	109.493 5	0.982
S2	1.418 0	0.003 1	91.499 6	0.991
S3	1.199 7	0.001 2	165.153 2	0.856
S4	1.448 6	0.004 0	85.795 1	0.994
S5	0.880 5	0.000 3	280.603 4	0.842

注: 参数 λ 为拟合过程中使用的一项参数, 无物理意义。

Note: λ is a parameter used in the process of fitting and has no physical meaning.

3.1.2 郭向红模型

根据试验方案确定入渗水头为定值, 即 $H=3\text{ cm}$ 。求得概化湿润锋深度后, 经拟合概化湿润锋深度的倒数与试验入渗率的关系计算 K_s 与 S_f 值。5 种盐碱土的 K_s 与 S_f 值见表 3。

表 3 郭向红模型 K_s 与 S_f 值汇总
Table 3 Summary of K_s and S_f values of Guo Green-Ampt model

土样编号 Soil number	a	b	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	S_f/cm	R^2
S1	0.002 1	0.168 2	0.002 1	77.095 2	0.940
S2	0.004 2	0.286 2	0.004 2	65.142 9	0.906
S3	0.002 1	0.349 8	0.002 1	163.571 4	0.916
S4	0.004 9	0.279 5	0.004 9	54.040 8	0.958
S5	0.000 9	0.148 1	0.000 9	161.555 6	0.870

注: 参数 a 、 b 为拟合过程中使用的参数, 无物理意义。下同。

Note: a , b are parameters used in the process of fitting and have no physical meanings. Same as below.

3.2 模型参数与含盐量分析

土壤入渗 Green-Ampt 模型的两大参数 K_s 与 S_f 值由土壤性质确定。在灌溉水样一致、装土容重相同的情况下, 土壤自身特性是影响模型参数的主要因素, 作为盐碱土, 盐分含量对土壤的模型参数有重要影响。将修正模型参数值与盐碱土含盐量进行分析。根据土壤中盐分离子电动电位从小到大的排序 ($\text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{H}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{K}^+ < \text{Na}^+$), K^+ 和 Na^+ 电动电位大, 分散性强而凝聚性弱, 即加强土壤颗粒的分散性并降低土壤团聚体的稳定性, 较短时间内使土壤的大孔隙崩塌, 小孔隙堵塞, 降低土壤对水和空气的渗透性, 降低导水率, 即这两种离子最大程度上会影响土壤入渗能力, 改变土壤入渗模型参数。因此取 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 与易溶盐总量作为衡量土壤含盐量的两大指标。

5 种盐碱土修正 Green-Ampt 模型参数值与含盐量指标见表 4。根据表 4 可以看出, K_s 、 S_f 与易溶盐总量无明显规律, 但是与 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 存在一定规律, 除 S1 外其他 4 种盐碱土的参数值 K_s 随 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量的增大而减小, S_f 随 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量的增大而增大。

由于模型参数受 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 的影响, 选择 S2、S3、S4、S5 的 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量分别与 K_s 、 S_f 值进行回归分析, 分别采

用幂函数模型与对数函数模型进行回归估计。决定系数和检验值结果见表 5。

表 4 修正模型参数值与含盐量指标汇总
Table 4 Summary of improved model parameter values and salt content index

土样编号 Soil number	S_f/cm	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	$\text{K}^+ + \text{Na}^+ / (\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	易溶盐总量 Total soluble salt/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
S1	109.494	0.001 6	0.49	4.66
S2	91.500	0.003 1	0.93	4.26
S3	165.153	0.001 2	1.69	5.05
S4	85.795	0.004 0	0.90	7.99
S5	280.603	0.000 3	5.33	18.32

表 5 饱和导水率、基质吸力与 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量回归分析结果
Table 5 Regression analysis results of saturated hydraulic conductivity, matric suction, and $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ content

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	回归模型 Regression model	R^2	F
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	K_s	$y=0.0029\cdot x^{-1.401}$	0.986**	140.832
	S_f	$y=109.03\ln(x)+100.7$	0.997**	681.723

注: **代表在 0.01 水平显著。

Note: ** represents significance at the level of 0.01.

从表 5 可以看出, 采用幂函数模型对 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 与 K_s 值进行回归分析, R^2 值大于 0.95; 采用对数函数模型对 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 与 S_f 值进行回归分析, R^2 值大于 0.99。因此两种模型拟合的显著性检验都具有统计意义。

3.3 模型验证与对比

3.3.1 入渗率验证与对比

将修正 Green-Ampt 模型计算的 K_s 与 S_f 值代入式(5), 郭向红模型通过式(3)采用二分法解出 Z_f 代入式(1), 可求出两种模型不同时刻对应的入渗率, 将模型计算结果与实测数据进行对比, 探究其模拟入渗效果的准确度。5 种盐碱土的入渗率比较结果点绘于图 3。

如图 3 所示, 修正 Green-Ampt 模型计算的入渗率在整体上更接近于实测值, 特别在曲线的后半段, 郭向红模型与实测值差距较大, 而修正 Green-Ampt 模型与实测值更为接近。由图 3 中 S3 曲线可见, 郭向红模型计算值与实测值差距明显, 显著高于实测值, 而修正 Green-Ampt 模型的数据曲线与实测值曲线基本一致。因此根据图 3 显示, 修正 Green-Ampt 模型的入渗率数据更接近于 5 种盐碱土的实测值。

将郭向红模型、修正 Green-Ampt 模型计算的入渗率与实测值进行相关分析, 以衡量两组数据的接近程度, 见表 6。

表 6 显示, 对于试验所用的 5 种盐碱土, 修正模型计算的入渗率 R^2 平均值为 0.983, 且 58 种盐碱土 R^2 值均高于 0.95, 呈现极强相关性。修正模型模拟值的 MAE 均小于 0.05 cm/min, MAE 最大值的平均值分别为 0.048 和 0.029 cm/min。综合 R^2 值与 MAE 两个指标, 修正 Green-Ampt 模型预测值误差较小, 模拟精度较高。郭向红模型入渗率 R^2 平均值为 0.932, MAE 平均值为 0.055 cm/min, 总体与实测值存在一定差距, 特别在曲线后半段其计算值高于实测值。总体看来, 修正 Green-Ampt 模型模拟的入渗率曲线更接近实测值, 更适用于盐碱土入渗分析。

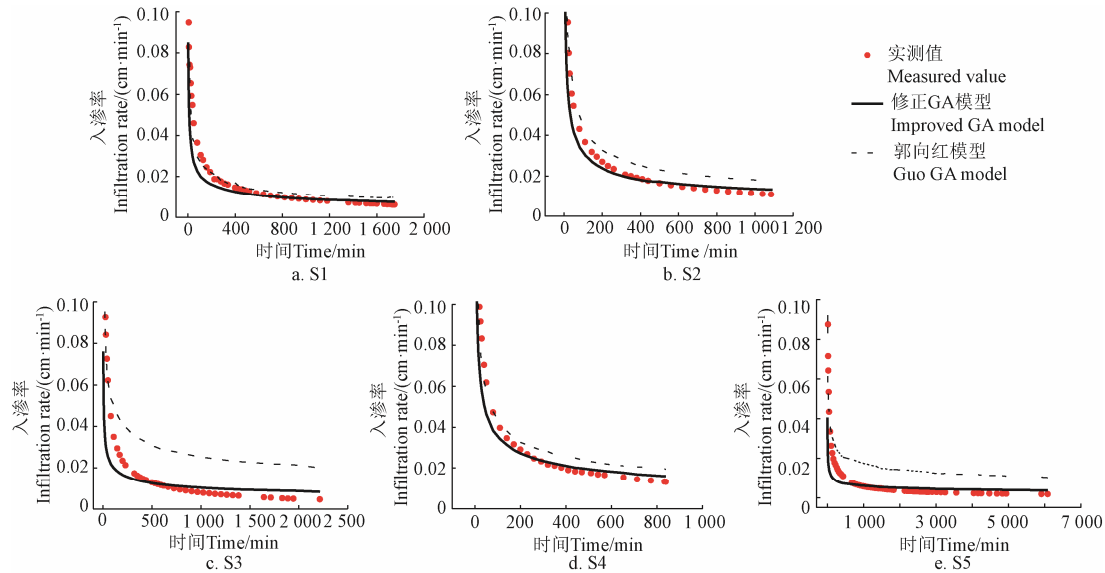


图 3 五种盐碱土入渗率实测值与模拟值对比
Fig.3 Comparison of measured and simulated values of infiltration rate of five saline-alkali soils

表 6 入渗率相关分析结果汇总

Table 6 Summary of related analysis results of infiltration rate				
土样编号 Soil number	修正 Green-Ampt 模型 Improved Green-Ampt model		郭向红模型 Guo Green-Ampt model	
	R^2	MAE/(cm·min ⁻¹)	R^2	MAE/(cm·min ⁻¹)
S1	0.994	0.015	0.968	0.024
S2	0.962	0.021	0.912	0.061
S3	0.989	0.048	0.902	0.089
S4	0.988	0.018	0.946	0.036
S5	0.982	0.031	0.931	0.066
平均值 Average	0.983	0.027	0.932	0.055

3. 3. 2 湿润锋运移深度验证

因为郭向红模型中的湿润锋为概化湿润锋，因此只利用湿润锋实测值验证修正模型的适用性，不进行两种模型模拟效果的对比。修正 Green-Ampt 模型的验证是通过 MATLAB 建立代码表达式 (4)， α 定义为从 1 到 10 步长为 0.1 的循环，精度为 0.001，将 1 种盐碱土的 $\Delta\theta$ 、 t 、 S_f 、

K 代入计算得 91 个数组 (横轴为 α ，纵轴为时间)，5 种盐碱土重复 5 次操作。将 91 个数组与对应盐碱土的湿润锋实测值进行相关分析，当 α 取值为 1 时与实测值最接近，随着 α 的增加，实测值与模拟值的差距越来越大，严重偏离实际情况 (当 α 取值为 1.1 时与实际情况已出现较大差异)。因此， α 取值为 1，湿润层深度为 L 。出现此情况是由于所取盐碱土的盐分与土壤质地共同影响。由表 1 可以得知 5 种盐碱土的质地偏黏，土壤颗粒中黏粒占据一定比例，黏土在岩土工程中被称为饱和土，水会占据土壤孔隙的绝大部分体积，土壤持水能力强。其次，5 种盐碱土中含有大量 K^+ 和 Na^+ ，两种离子电动电位大，对土壤颗粒的分散作用强，会减弱对下层土壤的导水能力。

将修正 Green-Ampt 模型所计算的不同时刻的湿润锋运移深度与实测值进行对比，分析模型精度。将 5 种盐碱土的湿润锋运移深度点绘于图 4。

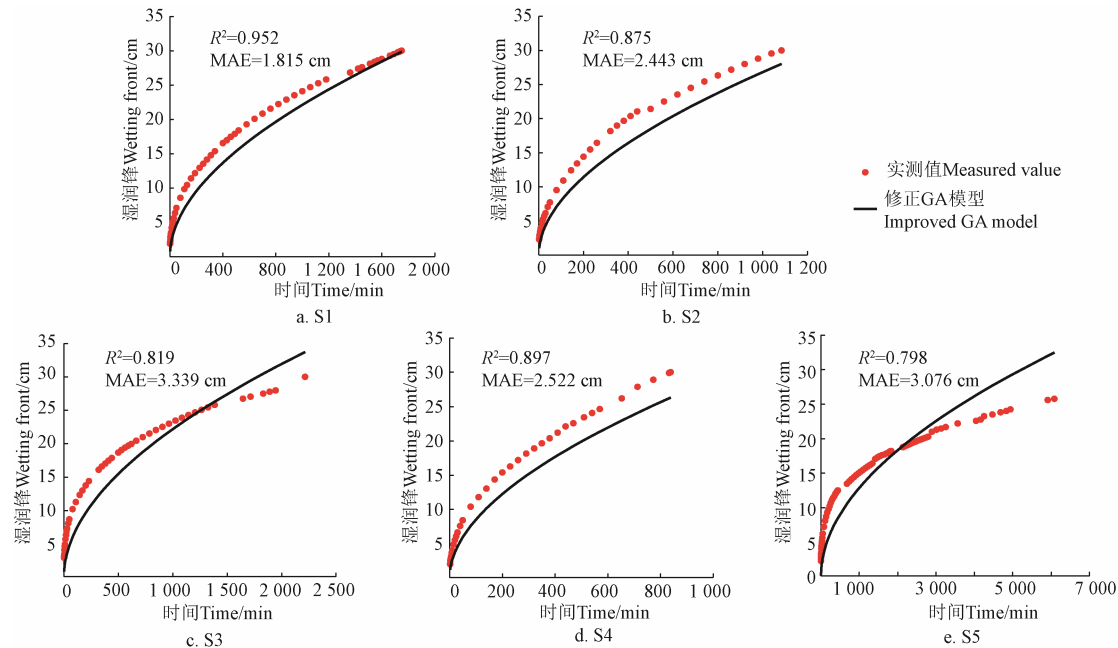


图 4 五种盐碱土湿润锋实测值与模拟值对比
Fig.4 Comparison of measured and simulated values of the depth of wetting front of five saline-alkali soils

如图 4 所示,修正 Green-Ampt 模型与实测值的差异整体上较小,图 4 中 S1 曲线显示模拟值与实测值趋势基本相同,S2、S4 模拟曲线与实测值比较接近。S3、S5 曲线有明显拐点,拐点前模拟值小于实测值,拐点后模拟值大于实测值。将此现象结合盐碱土的盐分离子含量进行分析, K^+ 和 Na^+ 分散性强凝聚性弱,降低土壤导水率^[26-27],S3、S5 的 K^+Na^+ 含量分别为 1.69、5.33 g/kg,而其他 3 种土均小于 1 g/kg,因此在拐点处盐分向下运动不断累积,土壤水溶液的 K^+ 和 Na^+ 到达一定浓度,使土壤颗粒分散,导水能力出现明显衰减,湿润锋向下运移的速率减缓。

此外,S5 的湿润锋运移距离只到达 25 cm,与预期湿润层 30 cm 出现矛盾。原因在于 S5 是唯一的重度盐碱土,土壤质地为壤质黏土。黏土持水能力强、易饱和,又由于盐分离子随着水分运动的下移不断累积,堆积形成障碍层,两者共同影响从而使水分无法下渗。

5 种盐碱土修正模型计算的 R^2 平均值为 0.868,S1 的 R^2 最高,为 0.952。修正模型计算的 MAE 平均值为 2.639 cm,且 5 种盐碱土 MAE 数据均小于 3.50 cm,修正模型中 S1 的 MAE 值最小,为 1.185 cm。分析结果证明修正模型的预测值与实测值较为接近,数据误差较小,其中 S1 实测值与模型计算值一致性较高。

4 讨 论

4.1 S1 含盐量与修正模型参数分析

模型参数与含盐量分析中,S1 不符合 K_s 随 K^+Na^+ 含量的增大而减小、 S_f 随 K^+Na^+ 含量的增大而增大的规律。5 种盐碱土中 S1 含盐量指标 K^+Na^+ 含量最少,而模型参数值 K_s 却并非最高,原因在于与其他盐碱土相比,S1 作为轻度盐碱土,其 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量较高,且 pH 值为 8.10,属碱性。在水分的入渗过程中,土壤胶体上的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子被 Na^+ 置换到土壤溶液中,从而形成一种微溶物和一种沉淀,分别为 $Ca(OH)_2$ 、 $Mg(OH)_2$,这些物质在土壤中大量累积堵塞土壤孔隙,使水分和空气无法透过,降低土壤的导水能力。另外,S1 为壤质黏土,与作为重度盐碱土的 S5 质地相同。而壤质黏土与其他土壤相比,由于土壤颗粒本身含有较多黏粒,在入渗过程中势必会降低土壤的入渗性能^[28-29],使土壤表现出特殊性。

S1 修正模型参数值 S_f 不符合规律的原因在于其黏重的质地。根据国际制土壤质地分类标准,S1 中的黏粒(土壤颗粒粒径小于 0.002 mm)含量在 5 种盐碱土中位居首位(表 1)。 S_f 存在一定表达式^[6],说明其值受土壤进气吸力 ψ_b 、形状系数 n 、土壤表层积水深度 H 与位置水头 Z 共同影响。对于本文 H 与 Z 都是定值, H 取 3 cm, Z 定值为 0,而 ψ_b 、 n 与土壤质地关联紧密。一般地说,粗质地砂性土壤或结构良好的土壤其进气值是比较小的,而细质地的黏性土壤其进气值相对较大^[30],S1 黏重的质地使其 ψ_b 数值变大。土壤孔径分布要取决于土壤质地,质地越黏,土壤形成细小的无效水孔径越多,较大的有效水孔径越少^[31],用 RETC 软件选用 VG 公式拟合 5

种盐碱土的土壤水分特征曲线得到参数 n 值,S1、S2、S3、S4、S5 的 n 值分别为 2.162、2.189、2.306、2.165、2.408,S1 的 n 值最小。S1 的 ψ_b 数值大且 n 值小,因此出现了 S1 的 S_f 值偏大,不符合规律的特殊现象。

4.2 模型入渗率模拟值对比分析

入渗率验证与对比中,修正 Green-Ampt 模型模拟精度高于郭向红模型。这是由于修正模型计算的模型两大参数 K_s 与 S_f 值比郭向红模型更精确,更接近其理论值。郭向红模型的参数计算误差主要发生在曲线拟合处,即拟合入渗率与概化湿润锋运移深度的关系这一部分,出现误差的原因在于试验数据会受到各种外界因素干扰,特别是在入渗初期,入渗水头会产生波动,土壤入渗情况会受到扰动直至入渗稳定,而在入渗末期由于这 5 种盐碱土中含有黏土颗粒,甚至会出现入渗率数据非常小、水分几乎无法向下渗透的情况,在曲线拟合时入渗初期与入渗末期的数据都会对曲线拟合的参数值大小产生影响。由于拟合曲线的纵截距等于 K_s 值,且试验所用盐碱土都为黏壤土, K_s 数量级很小,因此入渗数据的微小变化都会使 K_s 值发生较大改变, S_f 受 K_s 影响数据也会产生偏差。修正的 Green-Ampt 模型通过将土壤水分运动参数 $D(\theta)$ 线性化,计算出的 S_f 值更接近理论值, K_s 数据由试验实测确定,因此模型计算结果更贴近实测值。但是考虑到两种模型最初的最佳适用条件不同,郭向红模型使用于不同入渗水头下的入渗试验,而本研究的修正模型本就使用于盐碱土的入渗试验,因此该对比具有一定限制性。修正模型计算值与实测值不完全一致是因为:试验数据易受环境扰动且土壤初始含水率极低,因此在入渗初期水分以极快速度湿润土体,入渗率往往会大于模型计算值。

4.3 修正模型模拟误差原因确定

湿润锋运移深度验证中,忽略由于盐分离子影响而使湿润锋出现拐点的 S3 与 S5,其他 3 种土的模型预测值均小于计算值,即对应时刻的预测值小于试验的湿润锋实测值,原因在于两点:1) 湿润区的确定, α 定义为从 1 到 10 步长为 0.1 的循环,当 α 取值为 1 时模型湿润锋计算值小于实测值,而当 α 取值为 1.1(湿润区为 10/11 L)时模型计算值大于实测值,因此存在相对于湿润区占比很小的浸润区;2) 在试验开始阶段,表层土壤会以极快速度被润湿,湿润锋快速下移,影响后期湿润锋运移实测值,因此模型计算值通常小于实测值。

4.4 修正模型的限制性

研究盐碱土的入渗特性对于其改良利用有至关重要的意义,目前还未建立盐碱土的入渗模型。由于盐碱土盐分离子存在使其入渗时长大于普通土壤,采用对长时间入渗模拟具有较高精度 Green-Ampt 入渗模型模拟盐碱土入渗。本文在传统 Green-Ampt 入渗模型的基础上根据盐碱土的入渗特性引进扩散率 $D(\theta)$ 对模型进行修正,考虑了土壤中空气的存在并通过线性化表达 $D(\theta)$ 的方法,提高了模型参数的准确性,该研究对加深盐碱土农业灌溉研究与加快盐碱土农业生产起一定推动作用。模型参数受盐碱土自身特性影响,此处探究了含盐量与模

型参数的变化规律,发现参数值 K_s 随 K^+Na^+ 含量的增大而减小, S_f 随 K^+Na^+ 含量的增大而增大。樊贵盛等^[32]通过大田盐碱荒地入渗试验证明了入渗能力、稳定入渗率与 K^+Na^+ 呈负相关,本文得到的部分结论与之类似。该研究建立的修正 Green-Ampt 模型经检验可应用于土壤质地较为黏重的盐碱土入渗模型研究中,进行不同盐渍化程度的盐碱土入渗过程模拟,当盐碱土离子成分与试验土样不同时,该模型依然适用。但对于不同土壤质地的盐碱土,如砂土含量极高的盐碱土,该模型具有一定限制性。修正 Green-Ampt 入渗模型的建立还需进行更加深入的研究,作者将在后期的研究中将此作为重点,保证模型在不同质地土壤类型的广泛应用。

5 结 论

本文根据盐碱土的入渗特性对 Green-Ampt 模型进行修正,确定修正 Green-Ampt 模型参数并利用入渗数据验证后,得到以下结论:

1) 土壤自身特性是改变修正 Green-Ampt 模型参数的主要因素,盐碱土的盐分含量对土壤的模型参数有重要影响。总体上,修正 Green-Ampt 模型的 K_s 值随 K^+Na^+ 含量的增大而减小, S_f 值随 K^+Na^+ 含量的增大而增大。

2) 使用室内入渗试验的入渗率与湿润锋数据验证修正 Green-Ampt 模型。结果显示,5 种盐碱土入渗率 R^2 平均值为 0.983,且 MAE 平均值仅为 0.027 cm/min;5 种盐碱土湿润锋 R^2 平均值为 0.868,MAE 平均值为 2.639 cm。因此该模型具有较高精度,可用于盐碱土的入渗过程模拟。

修正 Green-Ampt 模型适用于质地较为黏重的盐碱土,存在一定的限制性,能否应用于其他土壤类型,需进一步验证,未来可继续改进该模型从而适用于其他类型盐碱土。

【参 考 文 献】

- [1] Zaman M, Shahid S A, Heng L. Guideline for salinity assessment. Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques[M]. Switzerland: Springer, 2018.
- [2] 俞仁培, 杨道平, 石万普, 等. 土壤碱化及其防治[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- [3] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics (Part I): The flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4: 1-24.
- [4] 张丁, 黄英, 何金龙. 湿润区含水率随土壤深度变化的 Green-Ampt 模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(12): 60-66.
Zhang Ding, Huang Ying, He Jinlong. Study on Green-Ampt model of soil moisture changes with depth in wet area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(12): 60-66. (in Chinese with English abstract)
- [5] Han N N, Wang Y R, Sun S H, et al. Research on moist soil infiltration law in coastal regions of Tianjin[J]. New Technology of Agricultural Engineering (ICAE), 2011: 590-593.
- [6] 陈琳, 费良军, 傅渝亮, 等. 地下水浅埋下层状土壤波涌畦灌间歇入渗模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 314-324.
Chen Lin, Fei Liangjun, Fu Yuliang, et al. Intermittent infiltration model of surge border irrigation in layered soil under groundwater[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(Transactions of the CSAM), 2018, 49(12): 314-324. (in Chinese with English abstract)
- [7] 汪志荣, 王文焰, 王全九, 等. 浑水波涌灌溉入渗机制及其 Green-Ampt 模型[J]. 水利学报, 1998, 29(10): 45-49.
Wang Zhirong, Wang Wenyan, Wang Quanjiu, et al. The Green-Ampt model and infiltration characteristics of surge flow irrigation for muddy water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(10): 45-49. (in Chinese with English abstract)
- [8] Mein R, Larson C. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384-394.
- [9] 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 恒定水头井入渗 Green-Ampt 模型的修正与验证[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 464-470.
Zhao Weixia, Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, et al. Improvement and verification of the Green-Ampt model for constant-head well permeameter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 464-470. (in Chinese with English abstract)
- [10] Ma Y, Feng S Y, Su D Y, et al. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71: 40-47.
- [11] 周蓓蓓, 侯亚玲, 王全九. 枯草芽孢杆菌改良盐碱土过程中水盐运移特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 104-110.
Zhou Beibei, Hou Yaling, Wang Quanjiu. Characteristics of water and salt migration in process of improving saline alkali soil with bacillus subtilis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(6): 104-110. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13-16.
Wang Quanjiu, Lai Jianbing, Li Yi. Comparison of Green-Ampt model with Philip infiltration model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(2): 13-16. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨艳, 王全九. 微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 13-19.

- Yang Yan, Wang Quanjiu. Analysis water and salt transport characteristic of infiltration with saline water on alkaline and saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 13-19. (in Chinese with English abstract)
- [14] Parlange J Y. Note on Green and Ampt equation[J]. Soil Science, 1975, 119(6): 466-467.
- [15] Neuman S P. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 564-566.
- [16] Brakensiek D L, Onstad C A. Parameter estimation of the Green and Ampt infiltration equation[J]. Water Resources Research, 1977, 13(6): 1009-1012.
- [17] Ahuja L R. Modeling infiltration into crusted soils by the Green-Ampt approach[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47: 412-418.
- [18] 王雪, 樊贵盛. 改善原始盐碱荒地入渗能力措施的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 46-49.
- Wang Xue, Fan Guisheng. Study on measures for improving infiltration capability of original saline-alkali wasteland soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 46-49. (in Chinese with English abstract)
- [19] Bouwer H. Unsaturated flow in ground water hydraulics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964, 90: 121-144.
- [20] 张杰, 韩同春, 豆红强. 基于降雨入渗分层假定的黄土边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(12): 4355-4361.
- Zhang Jie, Han Tongchun, Dou Hongqiang. Stability of loess slope considering infiltration zonation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(12): 4355-4361. (in Chinese with English abstract)
- [21] 温馨, 胡志平, 张勋, 等. 基于 Green-Ampt 模型的饱和-非饱和黄土入渗修正模型及其参数研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1991-2000.
- Wen Xin, Hu Zhiping, Zhang Xun, et al. Modified infiltration model of saturated-unsaturated loess based on Green-Ampt model and its parameters research[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1991-2000. (in Chinese with English abstract)
- [22] Philip J R. Steady infiltration from spheroidal cavities in isotropic and anisotropic soils[J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 1874-1880.
- [23] Philip J R. The infiltration joining problem[J]. Water Resources Research, 1987, 23(12): 2239-2249.
- [24] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [25] 郭向红, 孙西欢, 马娟娟, 等. 不同入渗水头条件下的 Green-Ampt 模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 64-68.
- Guo Xianghong, Sun Xihuan, Ma Juanjuan, et al. Green-Ampt model of different infiltration heads[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 64-68. (in Chinese with English abstract)
- [26] 任长江, 白丹, 周文, 等. 土壤初始含盐量对水分入渗特性的影响[J]. 干旱区研究, 2014, 31(2): 222-225.
- Ren Changjiang, Bai Dan, Zhou Wen, et al. Effect of initial soil salt content on infiltration of soil water[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(2): 222-225. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王雪, 樊贵盛. Na^+ 含量对土壤入渗能力影响的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(4): 391-394.
- Wang Xue, Fan Guisheng. Experimental Study on the influence of sodium ion content on infiltration capability of soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(4): 391-394. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘姗姗, 白美健, 许迪, 等. Green-Ampt 模型参数简化及与土壤物理参数的关系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 106-110.
- Liu Shanshan, Bai Meijian, Xu Di, et al. Parameters simplification of Green-Ampt infiltration models and relationships between infiltration and soil physical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 106-110. (in Chinese with English abstract)
- [29] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004(5): 537-540.
- Xie Wenyan, Fan Guisheng. Influence of Soil structure on infiltration characteristics in field soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004(5): 537-540. (in Chinese with English abstract)
- [30] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [31] 张航, 徐明岗, 张富仓, 等. 陕西农业土壤持水性能及其与土壤性质的关系[J]. 干旱地区农业研究, 1994(2): 32-37.
- Zhang Hang, Xu Minggang, Zhang Fucang, et al. Relationship between agricultural soil water holding capacity and soil properties in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1994(2): 32-37. (in Chinese with English abstract)
- [32] 樊贵盛, 李尧, 苏冬阳, 等. 大田原生盐碱荒地入渗特性的试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 63-70.
- Fan Guisheng, Li Yao, Su Dongyang, et al. Study on infiltration characteristics of original saline-alkali wasteland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 63-70. (in Chinese with English abstract)

Parameter determination and verification of improved Green-Ampt model under saline-alkali soil infiltration

Chen Junying^{1,2}, He Xujia^{1,2}, Yang Yalong², Bai Xuqian², Li Yi², Xie Linlin³

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. College of Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the traditional Green-Ampt infiltration model, the diffusion rate $D(\theta)$ was introduced to improve the model according to the saline soil infiltration characteristics. Considering the presence of air in the soil, the method of linearizing $D(\theta)$ expression was adopted to improve the accuracy of the model parameters. Five types of saline-alkali soils were used to conduct five one-dimensional water infiltration experiments. The data of infiltration rate and wetting front were used to verify the applicability of the improved model, and the result showed that the simulated values of the improved model were in good agreement with the measured values. The average value of the R^2 for the five saline-alkali soil infiltration rate was 0.983, and all the average absolute errors for the five saline-alkali soil infiltration rate were less than 0.05 cm/min. The average value of the R^2 for the five saline-alkali soil wetting front was 0.868, and all the average absolute errors for the five saline-alkali soil wetting front were less than 3.50 cm. The simulation data of the improved Green-Ampt model were not completely consistent with the measured value, which was due to the combined influence of various factors, the main reason was that the test data was easy to be changed by environmental disturbance. Notably, none of the model data is completely consistent with the experimental data. The experimental data was affected by the disturbance of environmental factors, and were often different from the theoretical results. The experimental data was different from the theoretical results due to the interference of environmental factors. Soil characteristics was the main factors affecting model parameters, and the model parameters of the improved model was affected by K^+Na^+ content of saline-alkali soil. The correlation between salt content and model parameters was also explored, the result showed that the suction head value decreased with the decrease of the content of K^+Na^+ , and the saturated hydraulic conductivity increased with the decrease of the content of K^+Na^+ . However, the S1 in the five saline-alkali soils did not conform to the above law, which was due to the influence of the texture of its heavy clay. The increase of clay particles in the soil reduces the infiltration performance, the water conductivity of the soil decreased and the pore structure of the soil became more complicated. Guo Green-Ampt model was used to simulate the infiltration process of saline-alkali soil. The results showed that Guo Green-Ampt model had a certain limitation in the simulation of saline-alkali soil infiltration, and the improved model had a better simulation effect than Guo Green-Ampt model, but the two models had different applicable conditions, so there were certain limitations in the comparison. The improved Green-Ampt model can simulate the infiltration process of saline-alkali soil with different levels of salinization, and it can be used in the study of the infiltration model of saline-alkali soil with relatively heavy clay texture. The improved model was still applicable when the ionic composition of saline-alkali soil was different from that of test soil. However, for the saline-alkali soil with different soil texture, especially the soil with very high sand content, the improved model was limited to some extent. This study can provide theoretical support for further study on the mechanism of water infiltration in saline-alkali soil and promotion of local agricultural production.

Keywords: infiltration; water content; saline-alkali soil; suction head; Green-Ampt model