

有限深土体中再分布的土壤水盐运移试验研究

李毅^{1,2}, 邵明安^{1,2}, 王文焰³, 王全九³, 张建丰³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 101001; 3 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘要: 再分布是田间水分循环的过程之一, 研究再分布的水盐运移特征对于盐碱地开发和改良工作有重要意义。该文根据实测资料, 研究了在有限深度下新疆盐碱土再分布过程中水分和盐分运移特征。根据 γ 透射法观测的水分剖面, 可获得再分布水分的动态变化过程。对盐分分布特征进行分析, 可建立含盐率和盐分浓度与深度之间的指数函数关系。采用水分特征曲线预测了再分布平衡时的含水率剖面, 并与新疆盐碱土再分布 10 d 的实测含水率剖面资料进行了对比, 结果表明, 该特征曲线可较好地预测再分布达到平衡时的水分运动特征。

关键词: 再分布; 水盐运移; 盐分浓度; 预测

中图分类号: S152.7; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)03-0040-04

0 引言

为了适应我国人口增长和国民经济日益发展的需要, 必须提高土地利用效率。我国盐渍土面积大, 分布广^[1,2]。仅在新疆平原区的 2153.3 万 hm^2 土地中, 盐土和碱化土分别占 733.3 万 hm^2 及 133.3 万 hm^2 , 两项约占全部未垦荒地的 43%, 强度盐碱化土则占全部盐碱化土的 60% 以上; 全疆耕地面积 411.4 万 hm^2 中, 因盐渍化影响作物生长的面积约 100 万 hm^2 ^[1-5]。开发和改良盐碱地长期以来一直是农业发展的重要任务, 也是摆在科研工作者面前的一个严峻的课题。

再分布是田间水分循环的过程之一, 是入渗的后续过程。当地表停止供水且表面采取覆盖措施抑制蒸发时, 入渗过程即告结束, 若水分和盐分运行到所研究土体的下边界并继续分布则为有限土体再分布。再分布开始后, 整个土体水分运动属于非饱和状态, 且由于无外界供水, 若不计蒸发损失, 入渗结束的土体总水量就是守恒的。再分布过程对灌溉和降雨具有重要意义。国内外学者对水分再分布过程进行了一些研究^[6-11], 取得了相当有意义的成果。Youngs (1958) 测定了水平一维条件下再分布的水分剖面, 并将其表达为无量纲形式^[6]。Gardner (1970) 采用 γ 射线法测定灌溉后再分布过程中土体含水率变化, 推导了非饱和流方程的近似解, 得出的初始湿润层水量变化为时间的函数^[7]。Poulovassilis (1983) 研究了初始含水率对入渗后水分再分布的影响^[8]。邵明安 (1985) 基于一些假定, 利用再分布过程推求了垂直一维和水平一维再分布条件下的导水率函数^[9]。Philip (1991) 假定水分剖面与时间平方根成正比, 推导了滞后作用存在时再分布过程的解析

解^[10]。Shao 和 Horton (2000) 利用广义相似论求解了水平方向水分再分布的精确解, 获得了水分再分布问题的显式解, 发展了传统的 Boltzmann 变换理论^[11]。但截止目前为止, 将再分布特征与盐碱土盐分迁移特征相联系, 并根据土壤水分特征的基本属性预测再分布的水分运动过程, 还少有研究。本文以新疆盐碱土为对象, 研究有限土体再分布过程中的水分和盐分运移特征。对实验测定的水分和盐分分布特征进行分析, 建立土壤含盐率和盐分浓度剖面的数学模型。在此基础上采用水分特征曲线预测再分布平衡时的含水率剖面, 并进行实验资料的对比检验。该研究对于新疆盐碱地改良有一定的指导作用。

1 材料与方法

1.1 供试土样的基本性质

供试土样选自新疆石河子兵团垦区盐碱地, 为灰漠土。土样取回后, 经碾压、粉碎、风干、过筛后测定其基本物理化学特性。对大于 0.1 mm 的土粒采用筛分法, 而小于 0.1 mm 的土粒采用精度较高的吸管法测定土壤的粒径分配, 结果表明, 土样中的粘粒、粉粒、砂粒含量分别为 11.3%、54.4% 和 34.3%, 参照我国质地分类系统将该土划分为粉质壤土。采用烘干法测定风干含水率, 并用环刀装土水饱和后烘干测定饱和含水率, 所测土壤风干和饱和含水率分别为 0.035 和 0.48 cm^3/cm^3 。土壤初始含盐率用重量法测定, 为 10.5 mg/g , 此外, 测定土壤盐分组成可知该盐土分类属于氯化物——硫酸盐土, 根据原新疆荒勘局提出的土壤盐化程度分级标准, 属强盐化土。此外, 根据当地容重范围, 实验土容重选为 1.45 g/cm^3 。

1.2 实验方案

如图 1 所示, 用马氏瓶做为恒水头供水装置对初始风干的新疆盐碱土进行垂直一维土柱积水入渗实验, 装土高度为 55 cm。土柱内截面面积为 12.5 $\text{cm} \times 10 \text{ cm}$, 总长度为 60 cm, 入渗时的积水高度为 2.5 cm。实验过程中记录湿润锋和累积入渗量随时间变化过程。当入渗历时为 3948 min (2.74 d)、即湿润锋达到 46.5 cm 时停

收稿日期: 2003-07-28 修订日期: 2004-03-19

基金项目: 国家杰出青年基金 (40025106); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金

作者简介: 李毅 (1974-), 女, 汉族, 博士后, 从事土壤水、盐、热耦合迁移和微观水土过程方面的研究。陕西杨凌西农路 26 号 中国科学院水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。Email: liyinm@163.net

止供水,并立即在土表覆盖塑料膜以防止蒸发,至此再分布过程开始,此时的土壤中蓄存水量为 2317 cm³。入渗结束的含水率和含盐率分布是再分布水盐运移的初始状态。

再分布过程中用 γ 透射法(由放射源、探头和定标器组成)观测含水率剖面,其中再分布初期观测间隔较密为 8 h,再分布 3 d 后每日观测一次。再分布总历时为 10 d。实验结束后立即在土柱不同深度处取土,烘干测定土壤含水率后,对烘干土样以 1:5 的土水比浸提,浸提液用于重量法测定土壤含盐率。土壤盐分浓度由含水率和含盐率的比值求得。

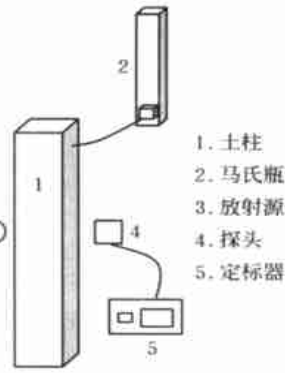


图 1 入渗-再分布试验装置
Fig 1 Infiltration-redistribution test equipment

对于入渗结束时湿润锋为 46.5 cm、总深度为 55 cm 的盐碱土,再分布 2 d 后湿润锋达到了土柱下边界。本实验中的土柱底部为多孔有机玻璃板,而土壤中的水分和盐分在达到土体下边界后仍然继续运动,但土壤—空气界面的介质不连续会影响其运移方式,这一情况可看做是土体下部为砂层阻水。实际中由于用砂粒布设层状土不易施行,若砂粒空隙分布不均,容易使上层细颗粒土进入砂层中的大孔隙,因此用空气界面作为有限土体的下边界,该空气层可看做非常粗的砂粒。这样布置实际上将层状土模拟得更好。

2 再分布的水盐运移特征

2.1 再分布的水分运动特征

对于初始风干土壤,在上部采用覆膜方式抑制蒸发,再分布历时 10 d 后,含水率剖面已趋于均匀。图 2 显示了实测再分布含水率剖面的时间变化。

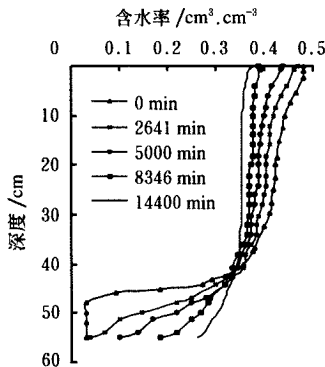


图 2 再分布的含水率剖面

Fig 2 Soil water content profiles for redistribution

由图 2 可知,再分布的初始湿润深度基本上为再分布过程中吸水区和脱水区的分界点。在整个深度上脱水—吸水过程交替出现,初始湿润层的剖面含水率逐渐降低,而初始干燥层的剖面含水率则逐渐增加,初始湿

润层基本上以脱湿过程为主,而初始干燥层基本以吸湿过程为主。与入渗结束时相比,随再分布时间的延长,初始湿润层内水量递减速率趋于减小,含水率剖面的差异也逐渐缩小,再分布 10 d 时,含水率剖面变化已比再分布初期平缓得多。根据实测资料分析可得初始湿润层的水量递减随时间变化关系为:

$$W = 0.0073t^{0.5722} \quad R^2 = 0.9994 \quad (1)$$

式中 W —— 初始湿润层减少的水量, cm; t —— 再分布历时, min。

入渗结束时的剖面水分梯度变化较大,可明显区分出饱和区、过渡区、传导区和湿润区,入渗结束后的土表 0 cm、46.5 cm 和 55 cm 处含水率分别为 0.48、0.0928 和 0.035 cm³/cm³,湿润体平均含水率为 0.404 cm³/cm³,湿润体平均饱和度 82.41%。而再分布结束时,从土面到土体最底端含水率剖面差异不大,土表 0 cm、46.5 cm 和 55 cm 处含水率分别为 0.3890、0.3217 和 0.2694 cm³/cm³,湿润体平均含水率为 0.3451 cm³/cm³,湿润体平均饱和度 70.43%。可见再分布过程将入渗结束后较陡的水分剖面拉直,使之变平缓,土壤剖面水分含量也趋于均一。

2.2 再分布的盐分运动

土壤盐分随水分运动而迁移,入渗结束后,在土壤水分继续迁移的过程中,盐分也随之迁移。有限土柱中水分不断向下运动必然引起溶于其中的盐分随之向下迁移,因此再分布过程将使盐分在土柱底端累积,水分下移越多,携带的盐分越多,所以这一过程中盐分的运动方式与入渗过程对盐分淋洗的作用和机理类似,区别在于入渗过程中水分运动的速度快,而再分布则相对慢。图 3 显示了入渗结束和再分布 10 d 的土壤含盐率及盐分浓度剖面。

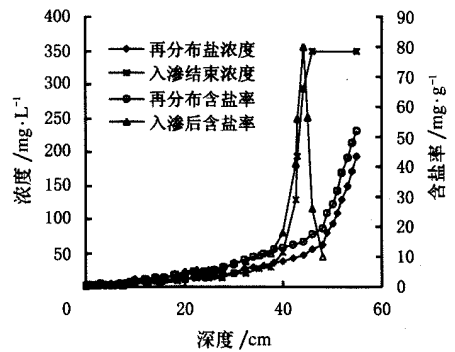


图 3 入渗-再分布含盐率剖面 and 浓度剖面

Fig 3 Profiles of soil salt content and concentration for infiltration-redistribution

由图 3 可知: 1) 从总体上比较可知,入渗含盐率剖面形状在湿润锋(46.5 cm 上部)位置上与浓度剖面极为相似;类似的,再分布的含盐率和浓度剖面在整个深度上形状也很相似;但其数值有明显差异,这是由含水率的变化引起的。2) 入渗和再分布的含盐率均在土表最低,并随深度增加而逐渐增加。其中就再分布而言,直到 38 cm 才达到入渗前的初始值,在 38 cm 以下土壤含盐

率迅速达到峰值, 然后快速降低到初始值, 表明再分布使盐分向更深层移动并积累在下边界。而入渗结束时的含盐率则约在入渗湿润锋附近有一峰值。由于再分布结束后, 38 cm 处为相对于初始值来说盐分变化的临界点, 在该深度以上土体处于脱盐状态, 因此将其定义为临界盐分变化位置 z_{cs} 。此外, 与入渗过程相比, 再分布含盐率剖面中, 小于入渗前含盐率的深度有所增加, 表明再分布使土壤更深层次的脱盐。3) 再分布的盐分浓度峰值也出现在含盐率峰值处, 在入渗湿润锋附近变化明显。盐分浓度的峰值出现在土体下边界, 也与含盐率特征类似, 表明再分布过程中盐分随水分迁移造成盐分在土体更深层累积。此外, 盐分锋面(即: 土壤剖面中含盐率达到最大值的深度位置)随湿润锋的推进也在逐渐向下移动。再分布过程延续了入渗之后水的运动, 因而也延续了对盐分淋洗的作用, 只是由于其湿润锋运行速度减慢, 因此对盐分淋洗的速度也比入渗过程慢。

再分布的含盐率剖面和浓度剖面在 z_{cs} 以上与入渗结束时的含盐率形状类似, 但数值上比入渗的稍低(由于坐标最大值远高于该值, 两者图形中的差别不大。)在 z_{cs} 以下部分, 再分布的盐分变化较大, 不仅含盐率远大于初始值, 而且含盐率和浓度峰值都出现在土体最底部, 表明再分布过程中盐分锋面在随水分运动而不断下移, 同时也说明, 田间夹砂土壤中浓度峰在土层界面处。

经分析, 再分布结束时的含盐率剖面和浓度剖面与位置之间都具有良好的指数关系, 表示为:

$$W_s = 0.5949e^{0.0799z} \quad R^2 = 0.9636 \quad (2)$$

$$C_r = 1.5578e^{0.0842z} \quad R^2 = 0.9677 \quad (3)$$

式中 W_s ——土壤含盐率, mg/g; C_r ——土壤盐分浓度, mg/L; z ——垂向深度, cm。分析式(2)、(3), 并比较图 3 和图 4 可知, 再分布结束后的 W_s 分布与 C_r 分布极相似, 其表达式形式和系数也接近, 因此直接将同一位置的 W_s 与 C_r 建立关系, 得出其最小二乘法的线性回归表达式为:

$$W_s = 0.2797C_r + 1.0504 \quad R^2 = 0.9951 \quad (4)$$

上式表明再分布 10 d 后, 由于土壤含水率分布在垂直深度上已趋于均一化, 因此由含盐率和含水率之比得到的浓度剖面受含水率的影响已较小。

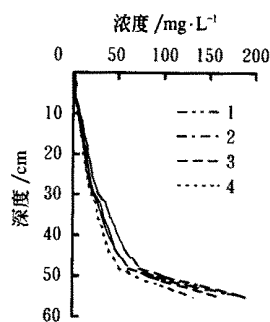


图 4 实测和概化的盐分浓度剖面

Fig 4 Measured and unified soil salt concentration profiles

为比较不同深度含水率概化后浓度剖面的差别, 将实测的盐分浓度剖面及计算得出的盐分浓度剖面做图

见图 4(图例中 1 为实测浓度, 2、3、4 分别代表以土体最底部含水率, 46.5 cm 处的含水率及 0 cm 含水率概化后的浓度剖面)。根据再分布结束时的含水率剖面计算的平均含水率为 $0.3451 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 46.5 cm 处含水率为 $0.3215 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 而表层和土柱底端含水率分别为 0.3891 和 $0.2694 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 和平均含水率相差较大。

由图 4 可见, 以不同的含水率值概化含水率剖面得到的浓度剖面与实测浓度剖面总体上差异不大, 尤其在土壤上层 20 cm 以内差别更小。若比较其差异, 则以表面 0 cm 处含水率概化后的浓度值在剖面上均比实测值低, 而以土体最底部含水率概化后的浓度值在剖面上比实测值高, 以 46.5 cm 处含水率概化后的浓度最接近实测值。由于剖面 0、46.5 及 55 cm 处已是再分布含水率剖面中有较显著差异的位置, 因此根据以上分析, 在已获某深度含水率后, 即可将其作为土壤剖面水分的概化值, 根据土壤含盐率剖面 and 该含水率概化值即可得到再分布的盐分浓度剖面。

3 再分布平衡的含水率剖面预测

3.1 理论关系的建立

土壤水分特征曲线可表示为^[13]:

$$h = a\theta^b \quad (5)$$

式中 θ ——含水率, cm^3/cm^3 ; h ——土壤水吸力, cm; a, b ——分别为经验常数。取土体底端为坐标原点, 再分布平衡时的土壤水势为定值, 设为 H , H 为基质势和重力势之和, 写为:

$$H = -h + z \quad (6)$$

z 向上为正, cm。由式(5)和式(6)得:

$$z = H + a\theta^b \quad (7)$$

上式的微分形式为:

$$dz = ab\theta^{b-1}d\theta \quad (8)$$

当土体上部采用覆盖方式, 下部采用密封方式抑制蒸发时, 再分布过程中的剖面水量始终为入渗结束时的水量 I , 可用含水率在剖面上的定积分形式得到:

$$I = \int_0^{z_e} \theta dz \quad (9)$$

式中 z_e ——土体总深度。将式(8)代入上式, 结合式

$$\left(\frac{z-H}{a}\right)^{1/b}$$

(7), 整理得: $I = \int_{\left(\frac{z-H}{a}\right)^{1/b}}^{z_e} ab\theta^{b-1}d\theta$, 积分可得剖面水量的表

达式为:

$$I = \frac{ab}{b+1} \left[\left(\frac{z_e-H}{a}\right)^{\frac{b+1}{b}} - \left(\frac{-H}{a}\right)^{\frac{b+1}{b}} \right] \quad (10)$$

上式经试算可得出 H 值。由式(7), 可将含水率表示为:

$$\theta = \left(\frac{z-H}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (11)$$

上式即为再分布达到平衡时的含水率剖面。

3.2 实例分析

为检验再分布平衡后剖面水分的理论关系, 以新疆土为供试土样进行为期 10 d 的等温再分布实验。根据

实测资料可获得不同的参数分别为: $a = 5.9771$, $b = -3.6556$, $l = 18.98$ cm, 将参数代入式(9), 经试算可得 $H = -265.2$ cm, 代入式(11)可得到再分布平衡时的含水率剖面。为比较再分布水分剖面随时间变化的特征, 将再分布平衡时的水分剖面(即预测结果)及再分布 10 d 的水分剖面(即实测结果)同绘于图 5。

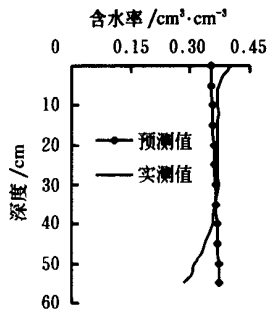


图5 再分布含水率剖面预测值与实测值的比较

Fig 5 Comparison of predict and measured soil water content profiles during redistribution

图5中, 再分布达到平衡时剖面上层含水率最低, 土体最底端含水率最高, 但两者相差不大, 仅差 0.0178 cm^3/cm^3 , 整个剖面平均含水率为 0.3495 cm^3/cm^3 。而再分布 10 d 与再分布平衡时的水分剖面在表层和底层有明显差异, 土体中部含水率较接近。此外, 该图还表明再分布达到平衡的历时很长。

4 结论

再分布是田间水分循环的过程之一。本文通过实测资料和理论分析, 研究了新疆盐碱土再分布过程中水分和盐分运移特征。根据实测水分和盐分分布特征可知, 再分布使土壤更深层次脱盐。根据实测资料建立了土壤含盐率和盐分浓度剖面的指数函数。由于再分布过程中含水率在剖面上近乎均一, 因此可由不同含水率对剖面上浓度概化, 其概化的浓度剖面差异不大。此外, 利用水分特征曲线预测了再分布平衡时的含水率剖面, 并利用

新疆盐碱土进行实测资料对比检验。结果表明, 利用该关系可对再分布平衡时含水率剖面进行较准确的预测。

[参考文献]

- [1] 王遵亲, 祝寿全, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 12.
- [2] 中国土壤学会. 中国土壤学在前进[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 9.
- [3] 罗家雄, 等. 新疆垦区盐碱地改良[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [4] 沈晋, 王文焰, 沈冰, 等. 动力水文实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991, 98-131.
- [5] 李毅, 王文焰, 王全九. 试论膜下滴灌技术在干旱-半干旱地区节水抑盐灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2001, 2: 42-46.
- [6] Youngs E G. Redistribution of moisture in porous materials after infiltration: 1[J]. Soil Sci, 1958, 86: 117-125.
- [7] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post-irrigation movement of soil water: 1. Redistribution[J]. Water Resour Res, 1970, 6: 851-861.
- [8] Poulouvasilis A. The influence of the initial water content on the redistribution of soil water after infiltration[J]. Soil Science, 1983, 5: 275-281.
- [9] 邵明安. 根据土壤水分再分布过程确定土壤的导水参数[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985, 2: 47-53.
- [10] Philip J R. Horizontal redistribution with capillary hysteresis[J]. Water Resour Res, 1991, 27(7): 1459-1469.
- [11] Mingan Shao, Horton Robert. Exact solution for horizontal water redistribution by general similarity[J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64: 561-564.
- [12] 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.

Experimental study on characteristics and forecasting of soil water and salt movement affected by redistribution

Li Yi^{1,2}, Shao Ming'an^{1,2}, Wang Wenyan³, Wang Quanjiu³, Zhang Jianfeng³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, China Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Water Resources Research, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract Redistribution is one of the water recycling processes in the field. The related study on water and salt movement characteristics is of much importance for the reclamation and development of salinized soil. According to the data obtained by using gamma ray attenuation method, the dynamic water and salt movement characteristics of salinized soil in Xinjiang province during redistribution process was described. Based on the experimental data of salt distribution, the exponential function of soil salt content and concentration with depth were established. Moreover, the soil water content profile was predicted using soil water characteristic curve and compared with that of measured data, the results show that it can predict water movement accurately.

Key words: redistribution; soil water and salt movement; soil salt concentration; prediction