

层状土壤毛管水最大上升高度分析

史文娟, 沈冰, 汪志荣, 王文焰

(西安理工大学水资源与环境陕西省重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 针对目前层状土体剖面夹层土质对毛管水分最大上升高度的影响存在较大分歧, 以沙土夹层为例, 从土壤水动力学的角度, 通过实验和理论分析, 分不同情况对层状土壤的毛管水最大上升高度进行了系统研究。结果表明: 层状土壤毛管水的最大上升高度取决于夹层土壤的质地、厚度、层位及其相互关系, 同时也与土壤剖面中其它土壤的质地密切相关。当其它条件一定时, 夹层土壤质地越粗、厚度越大或层位越高, 毛管水最大上升高度受影响可能性越大; 以沙土的有效粒径和不均匀系数为量化指标, 提出了沙质夹层影响毛管水最大上升高度的条件。此结果对于研究层状土壤地区水盐运动以及土壤盐碱化治理有重要意义。

关键词: 层状土壤; 夹层土质; 毛管水最大上升高度

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)01-0094-04

在地下水矿化度较高的地区, 表土的积盐速度与毛管上升水的上升高度和输水速度有关; 毛管上升水的上升速度对补给土面蒸发损失很重要, 而其上升高度又是决定毛管水能否输送到土壤表层的先决条件。在毛管水最大上升高度范围内, 输水速度快, 积盐速度快, 土壤的次生盐碱化较易发生。研究表明, 细质地土壤的最大毛管水上升高度大于粗质地土壤, 但其在毛管饱和带的上升速度却小于粗质地土壤^[1]。因此对于大田普遍存在的不同沙粘交错的层状土壤来说, 研究夹层土质对毛管水分运动特性的影响无论是对于次生盐碱化的防治还是对于农田灌溉都具有十分重要的意义^[2]。目前对于层状土壤毛管水上升速度的研究较多, 且不同夹层土质对毛管水上升速度的影响都已经有了定论^[3], 但有关层状土壤毛管水最大上升高度的问题, 还存在较大分歧。其中一种观点认为, 层状土壤的毛管水最大上升高度与均质土壤不同, 在有粘土夹层或沙土夹层的情况下, 则毛管水的最大上升高度会减小^[4,5]; 而另一种观点则认为, 层状土壤毛管水分的最大上升高度与均质土相同^[6,7]。本文在前人研究的基础上从土壤物理和土壤水动力学的角度, 分不同的情况来讨论沙质夹层对于毛管水最大上升高度的影响。并提出了沙土层影响毛管水最大上升高度的条件。以期 为农田水分调控及盐碱地的改良提供依据。

1 基本理论

在土壤的非饱和带中, 毛管水的运动极为普遍。风干土壤中毛管上升水的运动过程与积水入渗过程

相似, 只是在方向上相反, 且压力势为 0。设毛管水从水面 A 点运动到 B 点, A、B 间的长度为 L, 如果取 A 点水面为基准面, Z 轴取向上为正(如图 1), 则 A 点的水头为零, B 点的水头为 $-s + L$, AB 间的水势梯度

$$\nabla \Psi = \frac{\partial [0 - (-s + L)]}{\partial L} = \frac{\partial (s - L)}{\partial L} = \frac{\partial s}{\partial L} - 1 \quad (1)$$

根据 Darcy 定律, 则毛管上升水的水流量为

$$q = -K(s) \nabla \Psi = K(s) \left(-\frac{\partial s}{\partial L} + 1 \right) \quad (2)$$

式中: q 为水流量; $K(s)$ 为土壤非饱和导水率 (cm/h); L 为毛管水上升阶段的湿润锋高度 (cm); s 为湿润锋处的土壤水吸力 (cm)。

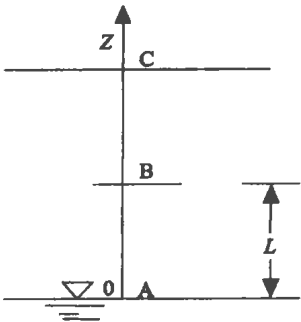


图 1 毛管水上升示意图

Fig 1. Sketch of the capillary water upward movement

由式(2)可知, 非饱和带土层中地下水补给速率决定于水势梯度 $\nabla \Psi$ 。初始时 L 小, $\nabla \Psi$ 大, 故地下水补给速率大, 当水柱不断升高 L 值加大, $\nabla \Psi$ 逐渐变小; 与此同时, $K(s)$ 则因土壤基质势的不断减小而减小, 因此, 地下水的补给速率 q 也就减小。

当毛管水上升到最大高度 H 时, $\nabla \Psi = 0, q = 0$, 同时由于田间土壤水分的运动主要以垂向为主, 即可认为不与外界发生能量交换, 因此毛管水分停止上升, 水分运动达到平衡状态。

此时, 根据式(1)无论是对于层状土壤或是均质土壤来说, 在毛管水上升高度内, 其土壤中任意一点的土壤水基质势都与其重力势平衡, 即有 $s = L$ 。因此, 分析层状土壤毛管水的最大上升高度是否会受到夹层土质的影响就归结为土壤剖面的吸力和重力势的分布是否会受到影响。

2 分析与讨论

根据以上基本原理, 下面即针对层状土壤的不同情况进行具体分析。

2.1 均质土壤平衡体系

为了说明问题, 首先对平衡体系中均质土壤的情况进行了分析。在不考虑水分横向交换的情况下, 均质土壤平衡系统如图 2 所示, 图中 H 为毛管水上升的最大高度, θ 为土壤含水量, Ψ_m 表示土壤中任意一点的基质势, Ψ_g 表示土壤水分的重力势(下同)。此时土壤中任意一点的重力势在数值上等于基质势(或吸力), 且含水量的剖面分布呈连续分布, 并不随时间而发生改变。

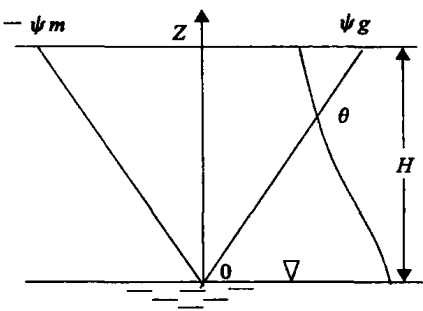


图 2 均质土壤平衡体系中水势和含水量分布示意图
Fig 2. Water potential and water content profile of the uniform soils in balance systems

2.2 层状土壤平衡体系

与均质土相比, 层状土壤平衡体系中基质势和含水量的分布则较为复杂。以下以夹沙层土壤为例进行具体分析。

根据土壤水动力学原理, 对于起始风干的层状土壤, 砂土与壤土的初始含水量接近, 可近似为同一含水量, 此时壤土的吸力明显高于砂土的吸力^[8]。因此, 当水分运动到土、砂界面时将不能立即进入砂层, 即水流在界面处发生滞留, 直至壤土的吸力随含水量的增加而减小, 并开始小于砂土的吸力时, 水流

才开始向上运动。同时在整个土体不与外界发生能量交换的条件下, 土沙界面处水分的最小吸力即为达到平衡时的吸力, 即

$$S_{min} = z \tag{3}$$

式中: S_{min} 为水分在土沙界面处的最小吸力(cm); z 为土沙界面距水位的距离也即沙土层的层位(cm), 且 $z < H$ (毛管水的最大上升高度)。

2.2.1 毛管上升水不能进入沙质夹层的情况 根据式(3), 若沙土的进水吸力 $S_{进}$ 仍小于 S_{min} , 即

$$S_{进} \leq S_{min} \tag{4}$$

则水分会滞留在土沙界面而不会进入沙土层, 此时, 沙土层的层位 z 即为毛管水在层状土壤中上升的最大高度, 即沙质夹层对毛管水上升最大高度有明显影响。

根据王全九等的研究结果^[9], 水分到达土沙界面时, 不同沙土的进水吸力即等于各粒级水分特征曲线(对数坐标系, 见图 3)上直线段与曲线段的交点。根据此结论, 对不同沙土的粒级组成以及水分特征曲线进行测定, 以沙土的有效粒径和均匀系数作为沙土的量化指标, 建立不同质地沙土的进水吸力与其有效粒径以及均匀系数的数学模型, 得

$$\begin{aligned} S_{进} &= 6.0993 (D_{10})^{-0.6838} & R^2 &= 0.9373 \\ S_{进} &= 8.4159 \mu^{0.793} & R^2 &= 0.9921 \end{aligned} \tag{5}$$

式中: $S_{进}$ 为沙土的进水吸力($\text{cm} \cdot \text{H}_2\text{O}$); D_{10} 为沙土的有效粒径(mm); μ 为沙土的均匀系数。从式(5)可以看出, 沙土的进水吸力与其有效粒径以及均匀系数均呈良好的幂函数关系, 且与不均匀系数的相关性更好。

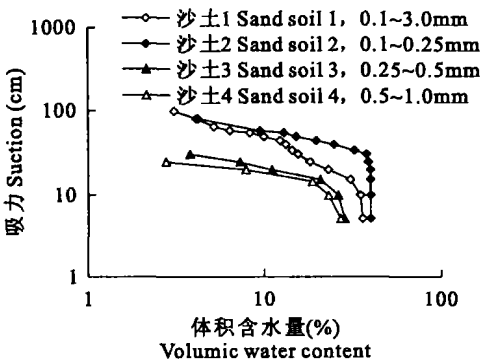


图 3 不同粒级沙土的水分特征曲线

Fig 3. Water characteristic curve of the sand soils with the different particle size

将式(5)代入式(4), 得沙土层影响毛管水最大上升高度的临界条件为

$$\begin{aligned} D_{10} &\geq 14.063 z^{-1.462} & z &< H \\ \mu &\leq 0.068 z^{1.261} & z &< H \end{aligned} \tag{6}$$

2.2.2 毛管上升水不能穿过沙质夹层的情况 在沙土层的进水吸力 $S_{进} > S_{min}$ 时,水分可进入沙土夹层,此时水分能否到达土沙上界面主要取决于沙层的厚度及粒径组成。若沙土层的厚度和级配使其水分不能到达土沙上界面时,毛管水会停留在土沙上界面或沙土层当中,而不会到达土沙上界面,即沙层隔断了上下土层之间的水力联系,毛管水的最大上升高度会受到明显影响。此时毛管水的最大上升高度将小于或等于砂层的厚度与层位之和。

2.2.3 毛管上升水可穿过沙质夹层的情况 如果沙土夹层不影响上下土层的水力联系,即水分可以穿过沙土层到达以上土壤层,此时毛管水的最大上升高度主要取决于沙土层的层位和质地。当沙土层的层位较低且粒径相对较小时,水分穿过沙土层以后,土壤中的水分仍然以毛管水运动为主,此时尽管夹层的存在会影响毛管水分在上层细质土壤中的上升速度,但最终沙土层以上土壤的含水量分布会达到与均质土壤相同的情况^[9],因而整个层状土壤剖面的基质势分布仍与均质土相同,即毛管水的最大上升高度不受影响,其值将等于均质土的毛管水最大上升高度。同时,由于层状土壤剖面中的土质差异,在吸力连续的情况下,其含水量的剖面分布会出现不连续现象(见图 4)。

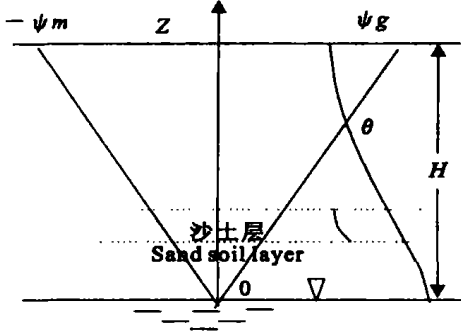


图 4 层状土平衡体系中水势和含水量分布示意图

Fig 4. Water potential and water content profile of the sand-layered soils in the balance systems

另一种可能出现的情况则是沙土层的层位继续抬高,并到达一定程度时,尽管水分仍然会到达沙土层以上的土壤,但由于沙土层的层位抬高后,因含水量的减小而使沙土层的导水率明显减小,水分在沙土层中的运动相当的缓慢,同时在水分到达沙土层以上土壤时,水分的分布以及运动主要以薄膜水为主,沙土层以及以上土壤的基质势变得相当的大,含水量则明显减小(图 5)。毛管水上升的速度极为缓慢,此时尽管从理论上讲,水分最终仍可能达到与均质土相同的毛管水最大上升高度,但事实上是不可

能的。此种毛管水分运动的状态可视为一种准平衡状态^[11],即此时沙质夹层的存在也会对毛管水最大上升高度产生一定影响。

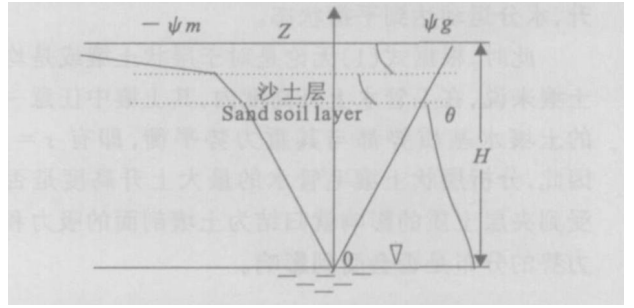


图 5 层状土准平衡体系中水势和含水量分布示意图

Fig 5. Water potential and water content profile in the quasi-balance systems

根据土壤水动力学理论^[12],当水分以薄膜水状态存在时,土壤基质对薄膜水的吸力范围为 $6.33 \times 10^5 \sim 31.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。以最小吸力 $6.33 \times 10^5 \text{ Pa}$ 进行换算,则水分以薄膜水为主时的位置至少在距水位 64 m 处。由于土壤的毛管水最大上升高度一般不会达到如此高度,即认为此种情况不可能出现,或者说此时沙土层的层位已明显大于下层土壤毛管水的最大上升高度。对于后者,显然夹层土壤不会影响其毛管水的最大上升高度。

由以上分析可以看出,毛管水的最大上升高度是否会受到影响要视沙质夹层的质地、层位、厚度以及三者之间的关系而定。

3 结 论

沙质夹层土壤毛管水最大上升高度以及各层土壤含水量的分布是否会受到影响主要取决于沙土层的质地、层位、厚度及其相互间的关系,同时还与同剖面中其它土壤的质地有关。其它土壤质地一定时,若沙土层的有效粒径或不均匀系数满足式(6)即

$$D_{10} \geq 14.063 z^{-1.462} \quad z < H \quad \text{或} \\ \mu \leq 0.068 z^{1.261} \quad z < H$$

则毛管水的最大上升高度以及各层土壤含水量的分布均会被抑制。

参 考 文 献:

- [1] 同延安,尉庆丰,王全九.土壤—植物—大气连续体系中水运移理论与方法[M].陕西:陕西科学技术出版社,1998.26—50,134—137.
- [2] 史文娟,沈冰,汪志荣.层状土壤水盐动态研究与分析[J].干旱地区农业研究,2005,23(5):250—254.
- [3] 史文娟,汪志荣,沈冰,等.夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J].水土保持学报,2004,18(6):167—170.

[4] Фелициант И Н. Озакономерностях капиллярного передвижения влаги в сдоистых грунтах[J]. Почвовеление, 1961, 10; 59—69.

[5] Wenjuan S, Bing S, Zhirong W, et al. Laboratory studies of e-vaporation from the stratified soil—sand Column[A]. Guanhua H, Luis S P. Land and Water Management Decision Tools and Practices[C]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. 888—892.

[6] 罗焕炎. 层状土中毛管水上升的实验研究[J]. 土壤学报, 1965, 13(3); 312—324.

[7] 王雄师. 疏勒河项目区土壤结构分类及对盐碱地改良的影响[J]. 甘肃水利水电技术, 1998, 3; 66—69.

[8] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. 20—63.

[9] 王全九, 邵明安, 汪志荣, 等. Green-Ampt 式在层状土入渗模拟计算中的应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4); 66—70.

[10] 史文娟. 蒸发条件下夹砂层土壤水盐运移实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. 6—8.

[11] 罗 戴. 土壤水[M]. 北京: 科学出版社, 1964. 259—265.

[12] 姚贤良, 程之生. 土壤物理学[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 40—95.

Maximum height of upward capillary water movement in layered soil

SHI Wen-juan, SHEN Bing, WANG Zhi-rong, WANG Wen-yan

(Key Lab of Water Resources and environment, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: According to the fact that the viewpoints on whether the interlayer soil influences the maximum height of the capillary water rise or not always keep difference, the maximum height of the capillary water rise in sand-layered soil was studied through the experiment and analysis which was based on the dynamics theory of the soil water movement. The results showed that the maximum height of the capillary water rise of layered soil was mainly determined by the sand soil texture, position, thickness and their mutual relationship, and they also were closer connected with other soil texture in the profile. When the soil profile was certain, the height was possible influenced by the worse sand particle size distribution, the thicker sand layer or the higher sand layer position as compared to the uniform soil. With D^{10} means effective particle diameter of the sand layer and “ μ ” means no uniform coefficient of it and “ z ” means the position of it, the paper concluded that the height would decrease when the sand layer meets with the conditions, i.e. . This will provide important information for further studies on transport of water and salt in layered soil regions.

Keywords: layered soil; the texture of interlayer soil; the maximum height of the capillary water rise