

# 新疆阿瓦提丰收灌区砂壤土非饱和土壤 水分运动参数的测定与计算

胡顺军<sup>1,2</sup>, 田长彦<sup>1,2</sup>, 宋郁东<sup>1</sup>

(1. 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘 要:** 采用负压计法和双环入渗法在田间分别测定了阿瓦提丰收灌区砂壤土土壤含水率及其对应的土壤水吸力和土壤饱和导水率, 采用 Sigmaplot 软件拟合了 Van Genuchten 水分特征曲线公式。根据 Mualem 提出的非饱和土壤导水率公式, 建立了该灌区砂壤土非饱和土壤导水率的计算公式, 并间接推导了非饱和土壤扩散率和比水容量两个参数的计算公式。

**关键词:** 丰收灌区; 水分特征曲线; 土壤导水率; 土壤水分扩散率; 比水容量

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0044-04

自20世纪50年代以来,应用能量观点研究非饱和土壤水分运动有了很大发展。应用数学物理方法研究、掌握和预报土壤水分运动过程时,无论是解析解法,还是数值解法,土壤水分特征曲线、饱和导水率、非饱和导水率、扩散率以及比水容量都是必不可少的资料<sup>[1~5]</sup>。因此,正确测定这些参数就成为定量研究的基础。目前,确定土壤水分运动参数有直接测定和间接计算两种方法<sup>[1~5]</sup>。直接测定参数亦采用两种方法:一是在室内或田间直接测定所需参数,二是在有定位点土壤含水率或负压值的观测资料时,将实测值代入基本方程,把欲求参数看作未知数,求解方程,获得参数。间接计算法是在已知土壤水分运动的其它参数后,通过它们相互之间固有的关系来间接获得所求参数。本文采用野外测定与计算相结合的方法,测定阿瓦提丰收灌区土壤水分特征曲线、饱和土壤导水率,并间接计算非饱和土壤导水率、扩散率和比水容量,为该灌区水盐运动规律与水盐调控研究提供科学依据。

## 1 试验区概况

阿瓦提县位于欧亚大陆腹地,地处天山南麓,塔克拉玛干大沙漠北缘,东、北以阿克苏河为界与阿克苏市接壤,西与柯坪县毗邻,西南与巴楚县交界,南与墨玉、洛浦县毗连。丰收灌区位于阿瓦提县西南部,东经80°12′~80°20′,北纬40°20′~40°38′,海拔高程1 041~1 054 m。丰收灌区西侧为艾西曼湖等

低洼地与荒漠区,南临阿克苏河、叶尔羌河和喀什噶尔河冲积平原交汇区,面积约7.6万hm<sup>2</sup>,地形平坦,地质结构复杂,土壤颗粒细,分布有大面积的草甸盐土、普通盐土和沼泽盐土,盐渍化严重,是典型的干旱内陆河灌区。无灌溉就无农业。属暖温带大陆性荒漠气候,夏季炎热,冬季寒冷,四季分明。年平均气温10.4℃~11℃,气温年际变化较小,但各月气温变化很大,气温年较差34.2℃,日较差为12℃~16℃。年降水量6.7~61.2 mm,年最大降水量为110 mm,年最小降水量仅10.3 mm,降水量多集中在夏季,占全年降水量的57%。全年平均风速2.1 m/s,最大风速20 m/s,3~5月多为扬沙浮尘天气,每年浮尘天气51.6 d。年蒸发量1 877.5~2 337.4 mm,一年中4~8月份蒸发量最大,占年蒸发量的71.5%。年日照时数2 570~2 778 h,年平均无霜期193 d,最大冻土深度62 cm。地下水埋深较浅,水质较差,矿化度多在1~5 g/L。灌溉季节地下水埋深变化在1.16~2.75 m之间,最大变幅1.59 m,平均地下水埋深2.28 m,土壤为砂壤土。

## 2 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线是指土壤水的基质势或土壤水吸力随土壤含水率变化的关系曲线,它表示土壤水的能量和数量间的关系,是研究土壤水分的保持和运动所用到的反映土壤水分基本特性的曲线。

收稿日期:2009-12-20

基金项目:新疆维吾尔自治区科技攻关重大专项(20073117~3);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-XB2-03-02);国家自然科学基金(编号40771043,40471020);中国科学院“西部之光”人才计划“联合学者”(LHZ200801)

作者简介:胡顺军(1968—),男,陕西勉县人,副研究员,主要从事干旱区生态水文、节水灌溉等方面的研究。E-mail: xjhushunjun@yahoo.com.cn。

## 2.1 测定方法

采用负压计法测定。2004 年在新疆阿瓦提丰收三场八连棉田内选择不同湿度的地块,埋设负压计,等陶土头的水势达到平衡后,读取负压计读数,同时用烘干法测定土壤含水率。另外,在塑料桶内装棉田土壤,控制干容重  $1.42 \text{ g/cm}^3$  (与大田相同),在桶中间埋设负压计,用小土钻在陶土头附近取土,同时用烘干法测定土壤含水率。将烘干法测定的土壤质量含水率乘以干容重得到土壤体积含水率。最后得到一系列由土壤水吸力  $S$ 、体积含水率  $\theta$  组成的  $(S, \theta)$  数据对。

## 2.2 测定结果与分析

田间测定的丰收三场八连棉田土壤含水率和土壤水吸力见表 1。Van Genuchten<sup>[6]</sup> 提出的土壤水分特征曲线公式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha S)^n]^m} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为土壤体积含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_r$  为残余含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  为饱和含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\alpha$  为经验常数,它的倒数常常被认为是进气压力 ( $\text{cm}^{-1}$ );  $S$  为土壤水吸力 ( $\text{cmH}_2\text{O}$ );  $m$  和  $n$  为经验常数,它可以改变土壤水分特征曲线的形状,又称为形状系数,  $m = 1 - 1/n$ <sup>[7,8]</sup>。

采用 Sigmaplot 软件对 (1) 式中的参数进行拟合得:  $\theta_r = 0$ ;  $\theta_s = 0.46$ ;  $\alpha = 0.0511$ ;  $n = 1.3015$ ;  $m = 0.2317$ ,  $F = 48.17 > F_{0.01} = 5.74$ ,  $F$  检验达极显著水平。将这些参数代入 (1) 式得丰收灌区土壤水分特征曲线表达式为:

$$\theta = \frac{0.46}{[1 + (0.0511S)^{1.3015}]^{0.2317}} \quad (2)$$

表 1 阿瓦提丰收灌区砂壤土土壤含水率和土壤水吸力

Table 1 The corresponding soil water suction to soil water content of sandy loam in Fengshou irrigation district in Awati county

| 土壤水吸力<br>Soil water<br>suction<br>( $\text{cmH}_2\text{O}$ ) | 体积含水率<br>Volumetric soil<br>water content<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | 土壤水吸力<br>Soil water<br>suction<br>( $\text{cmH}_2\text{O}$ ) | 体积含水率<br>Volumetric soil<br>water content<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 0                                                            | 0.46                                                                       | 100                                                          | 0.34                                                                       |
| 20                                                           | 0.35                                                                       | 115                                                          | 0.30                                                                       |
| 30                                                           | 0.35                                                                       | 225                                                          | 0.22                                                                       |
| 34                                                           | 0.36                                                                       | 250                                                          | 0.16                                                                       |
| 40                                                           | 0.33                                                                       | 252                                                          | 0.24                                                                       |
| 42                                                           | 0.33                                                                       | 330                                                          | 0.20                                                                       |
| 50                                                           | 0.32                                                                       | 352                                                          | 0.16                                                                       |
| 70                                                           | 0.33                                                                       | 365                                                          | 0.17                                                                       |

## 3 饱和导水率的测定

### 3.1 测定方法

采用双环入渗法:积水入渗试验采用西安理工大学研制的野外积水入渗装置观测,其原理和仪器构造见文献[9]。

采用 Philip 公式拟合累积入渗量与入渗时间的关系式为<sup>[2,4,10]</sup>:

$$I = At + S_1 t^{0.5} \quad (3)$$

对 (3) 求导得入渗速率与入渗时间的关系式为<sup>[2,4,10]</sup>:

$$i(t) = A + \frac{S_1}{2\sqrt{t}} \quad (4)$$

式中,  $I$  为累积入渗量 ( $\text{cm}$ );  $t$  为入渗时间 ( $\text{d}$ );  $i$  为入渗速率 ( $\text{cm/d}$ );  $S_1$  为吸渗率,是与土壤起始含水率有关的特征常数;  $A$  为稳定入渗速率 ( $\text{cm/d}$ )。

当  $t \rightarrow \infty$  时,  $i \rightarrow A$ 。即当入渗时间很长,土壤达到饱和时的入渗速率趋近于土壤的饱和导水率<sup>[1,9,10]</sup>。

或采用试验后期累积入渗量  $I(t)$  与入渗时间  $t$  的关系曲线的斜率近似代表土壤的饱和导水率。

### 3.2 测定结果与分析

2004 年 7 月 14 日在新疆阿瓦提丰收三场八连棉田内共进行了 2 次土壤入渗试验,测得的稳定入渗速率见表 2,平均值为  $80.83 \text{ cm/d}$ 。故取饱和导水率  $K_s = 80.83 \text{ cm/d}$ 。

表 2 阿瓦提丰收灌区砂壤土土壤稳定入渗速率

Table 2 Soil steady infiltration rate of sandy loam in Fengshou irrigation district in Awati county

| 试验次数<br>Test number | 稳定入渗速率 ( $\text{cm/d}$ )<br>Soil steady infiltration rate |
|---------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1                   | 80.56                                                     |
| 2                   | 80.80                                                     |
| 平均 Average          | 80.83                                                     |

## 4 非饱和导水率的测定

Mualem 于 1976 年推导出简化模型,试图通过室内土样试验得到的饱和导水率及水分特征曲线来估测土壤的非饱和导水率<sup>[11]</sup>。Van Genuchten 在 1980 年将其导出的水分特性曲线形式与 Mualem 模型相结合,提出的非饱和导水率的计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (5)$$

式中,  $K(\theta)$  为非饱和导水率( $\text{cm/d}$ )。

将  $\theta_r = 0, \theta_s = 0.46, \alpha = 0.0511, n = 1.3015, m = 0.2317, K_s = 80.83$  代入(5)式得:

$$K(\theta) = 119.1773\theta^{0.5} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta}{0.46} \right)^{4.3159} \right]^{0.2317} \right\}^2 \quad (6)$$

## 5 其它参数的计算

### 5.1 比水容量的计算

土壤比水容量是单位基质势的变化引起的土壤含水率变化量,用公式表示为<sup>[2]</sup>:

$$C(\theta) = -\frac{d\theta}{dS} = -\frac{1}{\frac{dS}{d\theta}} \quad (7)$$

由(1)式和(7)式得

$$C(\theta) = \alpha mn (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \times \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \quad (8)$$

式中,  $C(\theta)$  为比水容量( $\text{cm}^{-1}$ )。

将  $\theta_r = 0, \theta_s = 0.46, \alpha = 0.0511, n = 1.3015, m = 0.2317, K_s = 808.27$  代入(8)式得:

$$C(\theta) = 0.2023\theta^{4.3159} \left[ 1 - \left( \frac{\theta}{0.46} \right)^{4.3159} \right]^{0.2317} \quad (9)$$

### 5.2 扩散率的计算

定义非饱和土壤水的扩散率为非饱和导水率和比水容量的比值<sup>[2]</sup>,即

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \quad (10)$$

式中,  $D(\theta)$  为扩散率( $\text{cm}^2/\text{d}$ )。

将(5)式和(8)式代入(10)式得:

$$D(\theta) = \frac{K_s}{\alpha mn (\theta_s - \theta_r)} \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2-1/m} \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^{-m} + \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m - 2 \right\} \quad (11)$$

将  $\theta_r = 0, \theta_s = 0.46, \alpha = 0.0511, n = 1.3015, m = 0.2317, K_s = 808.27$  代入(11)式得:

$$D(\theta) = 589.0352\theta^{-3.8159} \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\theta}{0.46} \right)^{4.3159} \right]^{-0.2317} + \right.$$

$$\left. \left[ 1 - \left( \frac{\theta}{0.46} \right)^{4.3159} \right]^{0.2317} - 2 \right\} \quad (12)$$

## 6 结 论

1) Van Genuchten 提出的水分特征曲线公式能较好地描述阿瓦提丰收灌区砂壤土的土壤水分特性。

2) 阿瓦提丰收灌区砂壤土 Van Genuchten 水分特征曲线公式中,残余含水率为接近于  $0 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 饱和含水率为  $0.46 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 经验常数  $\alpha, n, m$  分别为  $0.0511, 1.3015, 0.2317$ ; 饱和导水率约为  $80.83 \text{ cm/d}$ , 通过土壤水分运动参数之间的定量关系, 获得的非饱和土壤导水率、非饱和土壤扩散率和比水容量的计算公式可供研究该灌区砂壤土水分运动时使用。

### 参 考 文 献:

- [1] 河南省人民胜利渠管理局, 国家重点科技项目黄淮海平原综合治理及人民胜利渠灌区区域水盐运动监测预报课题组. 灌区水盐监测预报理论与实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997: 30—47, 104—105.
- [2] 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: 124—126, 220—263.
- [3] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 264—294.
- [4] 王全九, 王文焰, 沈冰, 等. 田间非饱和土壤水分运动参数的测定[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 149—153.
- [5] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 48—77.
- [6] Van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1980, 44: 892—899.
- [7] Van Genuchten M Th, Nielsen D R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils[J]. Ann Geophys, 1985, 3: 615—628.
- [8] 黄强, 刘玉芸, 李生秀, 等. 塔克拉玛干沙漠土壤水分运动参数的计算[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 75—78.
- [9] 王文焰, 张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(4): 38—44.
- [10] 华孟, 王坚. 土壤物理学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 107—121, 280—286.
- [11] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resource Research, 1976, 12: 513—522.

## Field measurement and calculation of unsaturated soil water movement parameters of Fengshou irrigation district in Awati county of Xinjiang

HU Shun-jun<sup>1,2</sup>, TIAN Chang-yan<sup>1</sup>, SONG Yu-dong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** Soil water movement parameters are necessary for the solution of the basic soil water movement equation. A set of data about soil water suction corresponding to soil water content were observed by tensiometer method, and the soil saturated hydraulic conductivity was determined by double loop infiltration experiment in the field of Fengshou irrigation district in Awati county of Xinjiang, respectively. A water retention equation based on a closed form equation proposed by Van Genuchten was fitted with Sigmaplot software. The calculation formula for unsaturated hydraulic conductivity was established by employing the equation put forwarded by Mualem. Finally, the calculation formula for soil water diffusivity and specific water capacity were also derived indirectly.

**Keywords:** Fengshou irrigation district; soil water retention curve; soil hydraulic conductivity; soil water diffusivity; specific water capacity

(上接第43页)

- [8] 殷淑燕, 黄春长. 黄土高原苹果基地土壤干燥化原因及其对策[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 76—80.
- [9] 李凤民, 郭安红, 雒梅, 等. 土壤深层供水对冬小麦干物质生产的影响[J]. 应用生态学报, 1997, 8(6): 575—579.
- [10] 罗宏海, 张宏芝, 杜明伟, 等. 膜下滴灌下土壤深层水分对棉花根系生理及叶片光合特性的调节效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1337—1345.
- [11] Blum A, Johnson JW. Wheat cultivars respond differently to a drying top soil and a possible non-hydraulic root signal[J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44: 1149—1153.
- [12] Siddique KHM, Belford RK, Tennant D. Root:shoot ratios of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in a mediterranean environment[J]. Plant and Soil, 1990, 121: 89—98.

## Characteristics of soil moisture change of apple orchards of different planting years in Weibei dryland

ZOU Yang-jun<sup>1</sup>, CHEN Jin-xing<sup>1</sup>, MA Feng-wang<sup>1</sup>, ZHE Xiao-feng<sup>2</sup>, DANG Zhi-ming<sup>2</sup>, QU Jun-tao<sup>2</sup>

(1. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Pomology in Luochuan, Shaanxi 727400, China)

**Abstract:** Study was conducted on water content of different soil depth in apple orchards of different cultivation years and different yields in the Loess Plateau which belongs to arid and semiarid areas in China. The results showed that, in apple orchards of different cultivation years, the water content in 0 ~ 1 m soil layer changed significantly, and it decreased rapidly with the increase of soil depth; the water content in 1 ~ 2 m soil layer decreased with the increase of soil depth and cultivation years; the water content in 2 ~ 8 m soil layer changed little in different soil depth, but decreased significantly with the increase of cultivation years; and the water content in 10 ~ 15 m soil layer decreased gradually with the increase of cultivation years. In the orchards of different yields, the water content in 0 ~ 2 m soil layer decreased with the increase of yields, and it increased first and decreased then with the increase of soil depth; the water content in 2 ~ 8 m depth stabilized without violent fluctuation, and it was an aquifer in 8 ~ 10 m depth, while the water content in 10 ~ 15 m depth was 15% without much fluctuation.

**Keywords:** soil depth; cultivation age; apple orchards of different yield; water content