

# 考虑源汇项的1维稳态流下非饱和土基质吸力的解析解

程大伟<sup>1,2</sup>,王文科<sup>1,2</sup>,陈茜<sup>3</sup>,安鹏<sup>4</sup>,郑睿<sup>1</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院,陕西 西安 710000;

2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,陕西 西安 710000;

3. 陕西理工大学 土木工程与建筑学院,陕西 汉中 723001;4. 长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710000)

**摘要:**根据1维稳态渗流微分方程,结合 Gardner 模型,求解考虑源汇项的均质非饱和土基质吸力铅直分布通解,并据此求解不考虑源汇项和源汇项为非零常数两种情形下基质吸力铅直分布的特解。通过算例计算对比有源汇项蒸发、无源汇项蒸发、静水条件、有源汇项入渗和无源汇项入渗等5种情况下非饱和粉土层内基质吸力铅直分布规律。结果表明:源汇项为非零常数时,基质吸力铅直分布受土层表面比流量、源汇项,饱和渗透系数等因素控制;在静水条件下,基质吸力与距地下水位的距离呈线性关系;在非静水条件下,呈非线性关系。源汇项为非零常数且与流动方向同号时,比流量自地下水水位处至地表递增。当地表比流量相同时,在蒸发条件下,基质吸力比无源汇项的相应条件下的基质吸力要小;在入渗条件下,则相反。

**关键词:**1维稳态流;源汇项;基质吸力;铅直分布;解析解

中图分类号:TU435

文献标志码:A

## Analytical Solution to the Matric Suction of Unsaturated Soil by a Source Term's 1D Steady Flow

CHENG Dawei<sup>1,2</sup>, WANG Wenke<sup>1,2</sup>, CHEN Xi<sup>3</sup>, AN Peng<sup>4</sup>, ZHENG Rui<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Sci. and Eng., Chang'an Univ., Xi'an 710000, China;

2. Key Lab. of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an Univ., Xi'an 710000, China;

3. School of Civil Eng. and Architecture, Shaanxi Sci-Tech Univ., Hanzhong 723001, China;

4. School of Geology Eng. and Geomatics, Chang'an Univ., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** To ascertain the vertical distribution of the matric suction in unsaturated soil by a source term's 1D steady flow, a general solution was found with Gardner model. In addition, two particular solutions under the conditions of no source term and constant source term were also obtained, and the vertical distribution of the matric suction in unsaturated silt soil was analyzed under different surface flux boundary conditions and by different source terms. The results showed that the matric suction in unsaturated silt soil, when adopting constant source term, could be controlled with a specific discharge from the surface, a source term, a soil-saturated infiltration coefficient and others. Under hydrostatic conditions, the matric suction and the distance from water table had a linear relationship. However, the relationship was non-linear in non-hydrostatic conditions. The specific discharge, when applying the constant source terms in the same direction of water flow, increased from the groundwater level to surface. Under the condition of evaporation, the matric suction by a constant source term was less than that with no source term at the same surface flow rate, whereas the result was the reverse when in the infiltration conditions.

**Key words:** 1D steady flow; source-sink term; matric suction; vertical distribution; analytical solution

非饱和土是较为复杂的多相系混合物,除了包括固相、液相和气相3个相系之外,目前主流观点认

收稿日期:2016-01-10

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(41230314);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41202164);中央高校基本科研业务费基础研究计划资助项目(310829151076);中央高校基本科研业务费重点科研平台条件建设项目资助(310829163307)

作者简介:程大伟(1984—),男,讲师,博士。研究方向:非饱和土力学;地下水动力学。E-mail:250446719@qq.com

网络出版时间:2016-9-13 15:33:36 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160913.1533.008.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

为还应包括收缩膜相<sup>[1]</sup>。收缩膜是土中液-气交界面。收缩膜的存在使土粒还受到基质吸力的作用,在数值上,基质吸力可表示为孔隙气压和孔隙水压之差<sup>[2-3]</sup>。基质吸力是区别饱和土与非饱和土的重要变量。对非饱和土的渗流问题而言,基质吸力是非饱和土液相驱动势的重要组成部分,有效解决基质吸力问题是深入理解非饱和土渗流特性的关键环节之一<sup>[4-6]</sup>。对非饱和土力学问题而言,基质吸力对非饱和土的强度具有重要的贡献<sup>[7-10]</sup>,对非饱和土的有效应力和变形均具有重要的影响。

基质吸力大小,除受非饱和土自身影响<sup>[11-15]</sup>之外,还与非饱和土周围环境关联密切。如受降水与蒸发的影响,降水入渗基质吸力下降,干燥蒸发基质吸力上升;植被蒸腾作用对基质吸力也会产生影响,蒸腾作用可对孔隙水压力施加高达1~2 MPa的张力,使得土中水分减少、基质吸力增加。对于1维稳态流问题而言,诸如降水与蒸发这类在土层表层对非饱和土渗流产生的影响因素处理为流量边界条件是合理的;而对于诸如蒸腾作用植物根系吸水这类在土层内部对非饱和土渗流产生的影响因素则更适宜作为源汇项处理。鉴于此,根据微分形式渗流流动方程,结合渗透性函数中的 Gardner 模型,给出考虑源汇项1维稳态流非饱和土基质吸力铅直分布的通解。

### 1 1维稳态流条件下考虑源汇项基质吸力铅直分布的通解

对均质非饱和土而言,在稳态流条件下,当存在源汇项时,非饱和土单元的1维水流如图1所示。根据连续性条件要求土单元内水的流入量、流出量与源汇项三者之和为0,即

$$\left[ q(z) + \frac{dq(z)}{dz} dz \right] dx dy - q(z) dx dy - w dz dx dy = 0 \quad (1)$$

式中:  $q(z)$  为  $z$  方向上比流量,可以理解为通过地面单位面积的入渗或蒸发水流量;  $w$  为源汇项,表示单位体积土体内如蒸腾作用对比流量的影响强度,为简化处理仅考虑与  $z$  方向相关;  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的3维无穷小量。

净流量可写为:

$$\frac{dq(z)}{dz} dz dx dy = w dz dx dy \quad (2)$$

考虑  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  为非零的3维无穷小量,并结合 Darcy 定律<sup>[1]</sup>,式(2)可写为:

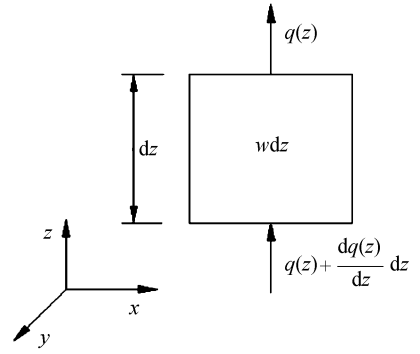


图1 非饱和土单元的1维水流

Fig.1 1D water flow through an unsaturated soil element

$$\frac{dq(z)}{dz} = \frac{d(-k_{wz} \frac{dh_w}{dz})}{dz} = w \quad (3)$$

式中,  $k_{wz}$  为随  $z$  方向(铅直方向)位置而变化的、与基质吸力函数有关的水的渗透系数,  $h_w$  为  $z$  方向的总水头。

式(3)两侧分别对  $dz$  积分有:

$$q(z) = -k_{wz} \frac{dh_w}{dz} = \int w dz \quad (4)$$

式(4)左侧为渗透系数与水力坡度的乘积,即比流量;右侧反映源汇项对比流量的影响。式(4)中水头  $h_w$  可用基质吸力( $u_a - u_w$ )和位置水头  $z$  表示:

$$h_w = -\frac{(u_a - u_w)}{\gamma_w} + z \quad (5)$$

式中,  $\gamma_w$  为水的重度。

将式(5)代入式(4)有:

$$q(z) = -k_{wz} \left[ -\frac{d(u_a - u_w)}{\gamma_w dz} + 1 \right] = \int w dz \quad (6)$$

渗透系数与基质吸力之间的关系可用 Gardner 模型<sup>[16]</sup>表示:

$$k_{wz} = k_s e^{[-\alpha(u_a - u_w)]} \quad (7)$$

式中,  $k_s$  为饱和渗透系数,  $\alpha$  为土水特征曲线的拟合系数。

将式(7)代入式(6)有:

$$-k_s e^{[-\alpha(u_a - u_w)]} \left[ -\frac{d(u_a - u_w)}{\gamma_w dz} + 1 \right] = \int w dz \quad (8)$$

令  $u = e^{[-\alpha(u_a - u_w)]}$ , 则:

$$du = de^{[-\alpha(u_a - u_w)]} = -\alpha u d(u_a - u_w) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),则:

$$-k_s u \left[ \frac{1}{\alpha u \gamma_w} \frac{du}{dz} + 1 \right] = \int w dz \quad (10)$$

对式(10)可进一步化简为:

$$\frac{du}{dz} = -\alpha\gamma_w u - \frac{\alpha\gamma_w}{k_s} \int w dz \quad (11)$$

因为源汇项  $w$  仅考虑与  $z$  方向相关,式(11)是形为式(12)的1阶非齐次线性微分方程。

$$\frac{du}{dz} = P(z)u + Q(z) \quad (12)$$

其中:

$$P(z) = -\alpha\gamma_w \quad (13)$$

$$Q(z) = -\frac{\alpha\gamma_w}{k_s} \int w dz \quad (14)$$

1阶非齐次线性微分方程(12)的通解为:

$$u = e^{\int P(z) dz} \left( \int Q(z) e^{-\int P(z) dz} dz + c_1 \right) \quad (15)$$

式中,  $c_1$  为积分常数。

将式(13)、(14)代入式(15),则式(11)的通解为:

$$u = e^{\int -\alpha\gamma_w dz} \left[ \int -\frac{\alpha\gamma_w}{k_s} \int w dz e^{\alpha\gamma_w dz} dz + c_1 \right] \quad (16)$$

如前所述,  $u = e^{[-\alpha(u_a - u_w)]}$ , 因此对于考虑源汇项1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布的通解为:

$$(u_a - u_w) = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[ e^{\int -\alpha\gamma_w dz} \left( \int -\frac{\alpha\gamma_w}{k_s} \int w dz e^{\alpha\gamma_w dz} dz + c_1 \right) \right] \quad (17)$$

## 2 不考虑源汇项时基质吸力的解

当不存在源汇项时,式(3)中  $w = 0$ ,此时式(3)可表示为:

$$k_{wz} \frac{d^2 h_w}{dz^2} + \frac{dk_{wz}}{dz} \frac{dh_w}{dz} = 0 \quad (18)$$

即土单元内水的流入量、流出量相等。式(18)为不考虑源汇项的1维稳态流非饱和土渗透连续方程。当源汇项  $w = 0$ 时,式(4)等号右侧  $\int w dz$  积分结果为常数,即比流量为:

$$q(z) = \int w dz = q \quad (19)$$

式中,  $q$  为常数。

将式(19)代入式(17),且积分路线为自地下水位处至地下水位以上任一点  $z$  处,即为  $0 \sim z$ ,则:

$$\begin{aligned} (u_a - u_w) &= \\ & -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ e^{\int_0^z -\alpha\gamma_w dz} \left( \int_0^z -\alpha\gamma_w \frac{q}{k_s} e^{\int_0^z \alpha\gamma_w dz} dz + c_1 \right) \right] = \\ & -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ e^{-\alpha\gamma_w z} \left( \int_0^z -\alpha\gamma_w \frac{q}{k_s} e^{\alpha\gamma_w z} dz + c_1 \right) \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ e^{-\alpha\gamma_w z} \left( -\frac{q}{k_s} (e^{\alpha\gamma_w z} - 1) + c_1 \right) \right] = \\ & -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ -\frac{q}{k_s} + \left( \frac{q}{k_s} + c_1 \right) e^{-\alpha\gamma_w z} \right] \quad (20) \end{aligned}$$

地下水位处  $z = 0$ ,相应的基质吸力  $(u_a - u_w) = 0$ ,故  $c_1 = 1$ 。则式(20)可写为:

$$(u_a - u_w) = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ -\frac{q}{k_s} + \left( \frac{q}{k_s} + 1 \right) e^{-\alpha\gamma_w z} \right] \quad (21)$$

式(21)为依据考虑源汇项的1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布的通解求取的无源汇项的1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布,该结果与文献[17]的表达完全一致,说明文献[17]获取的计算结果是本文考虑源汇项通解的一个特例。

## 3 源汇项为非零常数时基质吸力的解

式(17)为考虑源汇项的1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布的通解,对于不同的源汇项情形,解的具体表达存在差异。现考虑一种理想化的情况,无限大区域、有限厚度的均质各向同性非饱和土层内均匀分布源汇项的稳态流情况,该理想化情况可简化为源汇项非零常数  $w = constant = w_{con}$  的1维稳态流条件下非饱和土渗流问题。源汇项为非零常数,由式(4)可得比流量为:

$$q(z) = \int w dz = w_{con} z + c \quad (22)$$

式中,  $c$  为积分常数。

该式表明当源汇项为非零常数时,比流量  $q$  沿  $z$  方向线性变化。在非饱和土力学中以蒸发失水为正,因此本文中汇为失水,规定符号为正号;源为供水,符号为负号。将式(22)代入式(17),并考虑积分路线为  $0 \sim z$ ,则:

$$\begin{aligned} (u_a - u_w) &= \\ & -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ e^{\int_0^z -\alpha\gamma_w dz} \left( \int_0^z -\frac{\alpha\gamma_w}{k_s} (w_{con} z + c) e^{\int_0^z \alpha\gamma_w dz} dz + c_1 \right) \right] = \\ & -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ e^{-\alpha\gamma_w z} \left( \int_0^z -\frac{\alpha\gamma_w}{k_s} (w_{con} z + c) e^{\alpha\gamma_w z} dz + c_1 \right) \right] = \\ & -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ -\frac{w_{con} z - \frac{w_{con}}{\alpha\gamma_w} + c}{k_s} - \left( \frac{w_{con}}{\alpha\gamma_w k_s} - \frac{c}{k_s} - c_1 \right) e^{-\alpha\gamma_w z} \right] \quad (23) \end{aligned}$$

确定  $c$  和  $c_1$ ,假设地表处高度  $z = H$ ,相应的比流量为  $q$ ;地下水位处  $z = 0$ ,该处相应的基质吸力  $(u_a - u_w) = 0$ ,代入式(22)和(23):

$$\begin{cases} c = q - w_{\text{con}}H, \\ c_1 = 1 \end{cases} \quad (24)$$

故式(23)为:

$$(u_a - u_w) = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ -\frac{w_{\text{con}}z - \frac{w_{\text{con}}}{\alpha\gamma_w} + q - w_{\text{con}}H}{k_s} - \left( \frac{w_{\text{con}}}{\alpha\gamma_w k_s} - \frac{q - w_{\text{con}}H}{k_s} - 1 \right) e^{-\alpha\gamma_w z} \right] \quad (25)$$

式(25)为当源汇项为非零常数时,1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布的解。式(25)表明当源汇项为非零常数时,1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力受土层表面比流量 $q$ 、源汇项 $w_{\text{con}}$ 、饱和渗透系数 $k_s$ 、土水特征曲线的拟合系数 $\alpha$ 、水的重度 $\gamma_w$ 、土层厚度 $H$ 等因素控制。

表1 用于模拟计算的参数

Tab.1 Hydraulic parameters for analog computation

| 土类 | 工况 | 流动方向 | 源汇项情况 | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | $\alpha/(kPa^{-1})$ | $q/(m \cdot s^{-1})$  | $w_{\text{con}}/s^{-1}$ |
|----|----|------|-------|------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| 粉土 | 1  | 蒸发   | 有     | $1.0 \times 10^{-7}$   | 0.01                | $3.14 \times 10^{-8}$ | $3.0 \times 10^{-9}$    |
|    | 2  | 蒸发   | 无     |                        |                     |                       | 0                       |
|    | 3  | 静水状态 | 无     |                        |                     |                       | 0                       |
|    | 4  | 入渗   | 有     |                        |                     |                       | $-3.0 \times 10^{-9}$   |
|    | 5  | 入渗   | 无     |                        |                     |                       | 0                       |

图2是根据表1模拟计算的参数求得的不同流动方向和源汇项情况下粉土内基质吸力铅直分布。图2表明不同流动方向和源汇项情况下基质吸力随着距地下水位距离的增大而增大。在静水条件下,基质吸力与距地下水位距离呈线性关系;在非静水条件下,二者呈非线性关系。静水条件是蒸发与入渗的分界。对于流动方向为蒸发时,基质吸力比静水条件下相应位置处的基质吸力要大;对于流动方向为入渗时,基质吸力比静水条件下相应位置处的基质吸力要小。对于流动方向为蒸发,且源汇项(非零常数)与比流量同号时,基质吸力比无源汇项相应条件下的基质吸力要小。其原因为在蒸发条件下源汇项(非零常数)为正时,根据式(22)和式(24)可知蒸发率从地下水位处的 $q - w_{\text{con}}H$ 线性递增至地表处 $q$ ,尽管失水强度沿铅直方向向上递增但不大于无源汇项时的失水强度(无源汇项时土层各点处蒸发率等于地表蒸发率),因此比无源汇项条件下的基质吸力小。对于流动方向为入渗,且源汇项(非零常数)为负时,基质吸力比无源汇项相应条件下的基质吸力要大。其原因为在入渗条件下源汇项(零常数)为负时,根据式(22)和式(24)可知入渗率从地下水位处 $q - w_{\text{con}}H$ 线性递增至地表处 $q$ ,

### 4 算例

对比计算1维稳态流条件下非饱和土基质吸力沿铅直方向( $z$ 方向)的分布,考虑的情况分为有源汇项蒸发、无源汇项蒸发、静水条件、有源汇项入渗和无源汇项入渗,共5种情况,其中源汇项 $w$ 假定为非零常数 $w_{\text{con}}$ 。土层为厚度为10m的粉土层,地下水位处取 $z = 0$ m,该处基质吸力为0,重力加速度取 $g = 10$  m/s<sup>2</sup>。饱和渗透系数 $k_s$ 、土水特征曲线的拟合系数 $\alpha$ 和地表处的入渗率 $q$ 等参数引自文献[17]。为便于对比,地表处的蒸发率 $q$ 的数值与地表处的入渗率相等,方向相反。源汇项 $w_{\text{con}}$ 由作者选定,具体数据见表1。

补给强度沿铅直方向向上递增但不大于无源汇项时的补给强度减弱(无源汇项时土层各点处入渗率等于地表入渗率),因此比无源汇项条件下的基质吸力大。

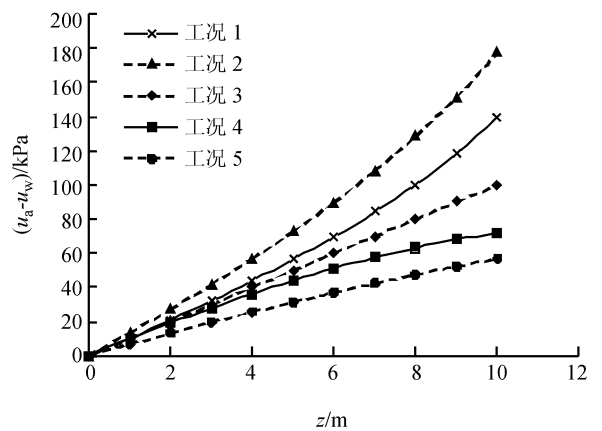


图2 不同流动方向和源汇项情况下粉土内基质吸力铅直分布

Fig.2 Matric suction vertical distribution in silt under different flow direction and source-sink term conditons

### 5 结论

根据微分形式渗流流动方程,结合渗透性函数中的 Gardner 模型,给出了考虑的源汇项1维稳态

流非饱和土基质吸力铅直分布通解,验证了不考虑源汇项时基质吸力铅直分布的解,给出了源汇项为非零常数时基质吸力铅直分布的解。最后通过算例计算了有源汇项蒸发、无源汇项蒸发、静水条件、有源汇项入渗和无源汇项入渗等5种情况下粉土内基质吸力铅直分布。主要结论如下:

1)获得了考虑源汇项的1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布的通解,该通解为一个对数函数。

2)不考虑源汇项的1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布的解仅是考虑源汇项的1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布的解一个特例。

3)当源汇项为非零常数时,1维稳态流条件下非饱和土的基质吸力沿铅直向分布的解表明基质吸力受土层表面比流量、源汇项、饱和渗透系数、土水特征曲线的拟合系数、水的重度、土层厚度等因素控制。

4)不同流动方向和源汇项情况下基质吸力与距地下水位的距离之间关系存在差异。在静水条件下,呈线性关系;在非静水条件下,呈非线性关系。源汇项(非零常数)与比流量同号时,当流动方向为蒸发,蒸发率从地下水位处至地表处线性递增,且土层各点处蒸发率均不大于无源汇项时的蒸发率,基质吸力比无源汇项的相应条件下的基质吸力要小;当流动方向为入渗,入渗率从地下水位处至地表处线性递增,且土层各点处入渗率均不大于无源汇项时的入渗率,基质吸力比无源汇项的相应条件下的基质吸力要大。

#### 参考文献:

[1] Fredlund D G, Rahardio H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐,译. 北京:中国建筑工业出版社,1997:97-129.

[2] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(2): 379-392.

[3] Oloo S Y, Fredlund D G. A method for determination of  $\phi^b$  for statically compacted soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(2): 272-280.

[4] Chen Xunhong, Song Jinxi, Wang Wenke. Spatial variability of specific yield and vertical hydraulic conductivity in a highly permeable alluvial aquifer[J]. Journal of Hydrol-

ogy, 2010, 388(3): 379-388.

- [5] Li Zhan, Luan Maotian, Liu Zhange, et al. Elasto-plastic FEM for embankment stability analysis under the condition of seepage based on the technique of shear strength reduction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 554-559. [李湛, 栾茂田, 刘占阁, 等. 渗流作用下边坡稳定性分析的强度折减弹塑性有限元法[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 554-559.]
- [6] Sun Dasong, Liu Peng, Xia Xiaohe, et al. Permeability coefficient of unsaturated soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 71-75. [孙大松, 刘鹏, 夏小和, 等. 非饱和土的渗透系数[J]. 水利学报, 2004(3): 71-75.]
- [7] Shen Chunni, Fang Xiangwei, Wang Hewen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1347-1351. [申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347-1351.]
- [8] Lin Hongzhou, Li Guangxin, Yu Yuzhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1931-1936. [林鸿州, 李广信, 于玉珍, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1931-1936.]
- [9] Yang Qing, Zhang Huizhen, Luan Maotian. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 420-425. [杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420-425.]
- [10] Meng Qianling, Yao Hailin, Qiu Lunfeng. The contribution of matric suction to shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 423-427. [孟黔灵, 姚海林, 邱伦峰. 吸力对非饱和土抗剪强度的贡献[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 423-427.]
- [11] Liu Xiaowen, Chang Lijun, Hu Xiaorong. Experimental research of matric suction with water content and dry den-

- sity of unsaturated laterite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3302 – 3306. [刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3302 – 3306.]
- [12] Wang Donglin, Luan Maotian, Yang Qing. Experimental study of soil water characteristic curve of remolded unsaturated clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 751 – 756. [汪东林, 栾茂田, 杨庆. 重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 751 – 756.]
- [13] Wang Tiehang, Wang Xiaofeng. Influence of density on matrix suction of sandy soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(6): 979 – 982. [王铁行, 王晓峰. 密度对砂土基质吸力的影响研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(6): 979 – 982.]
- [14] Wang Tiehang, Lu Jing, Yue Caikun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 1 – 5. [王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(1): 1 – 5.]
- [15] Yang Dejun, Bian Zhengfu, Zhang Kefeng, et al. Study on modeling soil moisture responses under steady-state evaporation conditions from a shallow water table[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(5): 13 – 18. [杨德军, 卞正富, 张科锋, 等. 潜水稳定蒸发条件下土体响应模拟[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, 45(5): 13 – 18.]
- [16] 谢定义, 姚仰平, 党发宁. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 172 – 178.
- [17] Ning Lu, William J L. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 195 – 200.

(编辑 李铁楠)