

土壤下渗能力之定量分析^{*}

邓孺孺 黄慧萍

(中山大学地学院遥感中心, 广州 510275)

摘 要 从分析下渗水受力状态出发, 根据土壤水动力学和流体力学, 推导了不同情况下下渗流速和下渗强度的计算公式; 论证了一般情况下下渗水有重力流和毛细管流两种流态, 下渗流流速与下渗强度取决于渗透系数、粒度和球度等土壤物性, 并受土壤原含水量及潜水面埋深的制约。

关键词 下渗流流速, 下渗强度, 渗透系数, 潜水面

分类号 P 641. 131

土壤下渗能力, 包括下渗流流速和下渗强度, 是制约水环境以及降雨时地面产流量的重要因素, 其研究有重要意义。长期以来, 对下渗强度和下渗量的计算多采用经验公式, 如最具代表性的霍顿公式。该类计算公式以降雨开始时的下渗强度恒定为前提, 存在两方面的局限性: ① 适应性差, 如在具有不同含水量 (湿度) 时, 土壤的初始下渗强度是不同的, 该类公式无法考虑这些变化, 故在进行大范围的土壤下渗量计算时精度有限^[1]; ② 公式建立在经验之上, 并未反映下渗的机理。为克服这些不足, 本文从分析下渗水的受力状态入手, 根据土壤水动力学和流体力学, 推导了新的土壤水下渗速度、下渗强度等定量计算公式, 并对包气带各分带的水下渗情况分别进行了分析。

1 过渡带露出地表时的下渗分析

1.1 过渡带的含水状态

过渡带为包气带中毛管带以上、根带以下的部分。土壤含水量小于田间含水量, 大于枯萎点, 水主要以薄膜水和悬着水的形式存在。

1.2 下渗水的受力状态分析

若水源在地面上保持有一定的深度, 渗入土壤的下渗水所受的力有以下几种:

(1) 重力。当下渗锋面的深度为 h 时, 锋面上水所受的重力为

$$W = d gh S_c \quad (1)$$

其中, d 为水密度 (g/cm^3); g 为重力加速度 (980 cm/s^2); S_c 为等面积水平截面上的孔隙面积 (cm^2), 对同种土壤其为常数; h 为土壤厚度 (cm)。

(2) 毛管力。存在于下渗锋面上的土颗粒、水与空气交界处, 方向向下, 力的大小为

* 广东省国土厅行业基金资助项目

收稿日期: 1996-11-06 邓孺孺, 男, 33 岁, 讲师

$$F_m = V L_m \cos \theta \quad (2)$$

式中, F_m 为毛管力 (10^4 N); V 为水张力系数, 常温下为 $7.28 \times 10^2 \text{ N/cm}$, θ 为水—土颗粒接触角, 常温下接近 0° ; L_m 为等面积内的下渗锋面上毛细孔隙壁的土颗粒与水接触线总长度 (cm), 对同一种土壤如考虑的面积相等且足够大, 不同截面上其值为常数。

(3) 粘滞阻力. 根据土壤水动力学, 粘滞阻力 $F_z = v f_k V_w$, v 为水流流速 (水锋面下移速度), V_w 为流动水体积, f_k 为阻力系数, 可由达西定律导出. 当水在饱和带中垂直下渗时, 毛管力为 0, 下渗力为重力, 这时下渗强度等于渗透系数 K , 渗流流速为 $v = K/e$, e 为土壤孔隙率, 因为均速流动, 所以重力等于粘滞阻力, 即 $V_w dg = K f_k V_w / e$, 可得 $f_k = dg / K$. 故粘滞阻力为

$$F_z = v e dg V_w / K \quad (3)$$

(4) 地表水层的静水压力. 方向向下, 与地表水深成正比, 可表示为 $P_s = h dg$. 实验证明此静水压力对入渗水的影响极为有限, 其作用可以忽略^[2].

(5) 空气余压力. 当土壤中的空气不能及时排出时, 会产生渗入水顶、底面的空气压力差即空气余压力而影响下渗. 但在天然条件下的下渗中, 空气余压力的影响很小, 可以忽略不计^[3].

土壤中毛细孔隙中的下渗水所受的下渗力为重力和毛管力. 但并非所有的土壤孔隙都能产生毛细管作用, 即存在非毛细管孔隙. 非毛细管孔隙中下渗水的下渗力仅为重力. 由于毛细管力通常远大于重力, 故下渗流必被分为两种, 一种是沿毛细管孔隙快速下渗的毛管流, 另一种是沿非毛细管孔隙均速缓慢下渗的重力流.

1.3 毛管下渗流分析

1.3.1 下渗水量 毛管下渗流通过后, 水充满土壤的所有毛细管孔隙, 充水情况与毛管带中的毛管水相同, 即含水量为土壤最大田间容量 U .

1.3.2 下渗速度 下渗速度可根据下渗水的受力状态导出. 根据上述分析, 下渗水所受的力为重力、粘滞阻力、静水压力和空气余压力. 水下渗加速度为 $a = (W + F_m - F_z + P_s - P_k) / M$, M 为水体积 (cm^3), P_s 和 P_k 分别为静水压力和空气余压力, 天然状态的下渗中这两项均可忽略不计, 故可简化为

$$a = (W + F_m - F_z) / M \quad (4)$$

因为只有毛细孔隙中水的毛管力和重力才是下渗的有效作用力, 毛细孔隙与所有孔隙之比为 U/e , 所以 $L_m = L U / e$, L 为等面积水平截面上孔隙周长的总和; 同理可得毛细管体积 $V_w = h S_c U / e$. 下渗水质量为 $M = h d S_c U / e$, h 为下渗锋面深度.

将 L_m , V_w , M 代入 (1)~(3) 式再代入 (4) 式后得

$$a = g + V L \cos \theta / d h S_c - v g e / K \quad (6)$$

其中, $L / S_c = 6(1 - e) K_c / d e$ ^[4], e 为土壤颗粒粒度, K_c 为颗粒球度, 代入 (6) 式得

$$a = g + 6V(1 - e) K_c \cos \theta / d h e d - v g e / K \quad (7)$$

实际上在下渗过程中, 当速度改变时, 粘滞力也跟着变化, 下渗力与粘滞力始终是趋于平衡状态的, 即 $a \approx 0$, 代入 (7) 式可得

$$v = K / e + 6K V(1 - e) K_c \cos \theta / h e^2 d g d \quad (8)$$

其中, $6K V(1 - e) K_c \cos \theta / h e d g d = h_c$ 为土壤毛管带平均厚度^[4], 代入 (8) 式即得

$$v = K / e + K h_c / e h \quad (9)$$

等式右边第一项为重力对流速的贡献, 为一常数, 令其为 v_g . 第二项为毛管力对下渗流流速的

贡献,令其为 v_p ,有 $h = Kh_c / ev_p$,降雨历时时间尺度内通常 $v_p \gg v_g$,即有

$$\int_0^t v_p dt = Kh_c / ev_p$$

微分后解其微分方程得 $v_p = (Kh_c / 2e(t - C))^{1/2}$,其中 C 为常数,其物理意义为下渗之初粘滞阻力与下渗力达到平衡所需的时间,通常该时间极短,可认为 $C \approx 0$,即

$$v_p = (Kh_c / 2et)^{1/2} \quad (10)$$

因为 $v = v_g + v_p$,根据微分方程解的结构定理可知, v_g 与 v_p 的解之和即为 v 的解,所以

$$v = K/e + (Kh_c / 2et)^{1/2} \quad (11)$$

结合降雨过程中可能出现的情况,可对 (11) 式作如下讨论:① 毛细管下渗流流速随时间 t 的增长而单调减慢. 下渗之初,即 $t = 0$ 时,流速 $v \rightarrow \infty$;② 随着时间的增长,下渗速度迅速减慢,但时间越长,速度减慢的幅度越来越小,如过渡带足够厚,下渗时间 $t \rightarrow \infty$ 时, $v \rightarrow K/e$,接近于渗流速度.③ 当过渡带厚度有限,下渗锋面到达毛管带顶面,即 $h \geq H - h_c$ 时 (H 为潜水面埋深),因该处毛细孔隙已被水充满,故毛管力消失, $v_p = 0$,此时 $v = K/e$,即毛管下渗流速变为渗流流速.④ 下渗过程中如水源断绝,即降雨停止且积水耗尽,下渗流顶面立即产生向上的毛管力,其大小与向下的毛管力相等,此时下渗的作用力仅为重力,故毛管流转化为重力流,流速亦为 $v = K/e$. 此后若降雨重新开始,向上的毛管力消失,原来的毛管下渗流在经历了停雨时段的缓慢重力下渗后又重新恢复毛管流下渗形式.

1.3.3 下渗强度 下渗强度即单位时间内的下渗水深,可表示为

$$f_1 = v(w_t - w_0) \quad (12)$$

式中 v 为毛管流锋面下移速度,即毛管流流速; w_0 为原土壤含水率; w_t 为下渗流通过后土壤含水率,对于毛管下渗流, $w_t = U$. 所以 $f_1 = v(U - w_0)$,将 (11) 式代入得

$$f_1 = (K/e + (Kh_c / 2et)^{1/2})(U - w_0) \quad (13)$$

即为过渡带毛管下渗流下渗强度的计算公式. 通常 w_0 是随深度而变化的,其值在 U 与枯萎点 S_k 之间,土壤水处于平衡状态时某深度的 w_0 可根据地表土壤含水率用下式进行计算^[4]

$$w_0 = V_c U (2h_c / (2h_c U^3 - 3h V_c^3))^{1/3} \quad (14)$$

该式中 V_c 为地表土壤含水率, h 为深度.

1.4 重力下渗流分析

(1) 下渗速度. 较之毛细管下渗水,非毛细孔隙中的下渗水所受的力少了毛细管力,其下渗力仅为重力,反向力为粘滞阻力. 下渗过程中这两个力始终处于平衡状态,即 $W = F_z$ 为均速下渗,服从达西定律. 其下渗流流速为

$$v = K/e \quad (15)$$

(2) 下渗强度. 重力下渗充满土壤中的非毛细孔隙,空间比率为 $e - U$,下渗强度为

$$f_2 = K(e - U)/e \quad (16)$$

过渡带总的下渗强度为 $f = f_1 + f_2$,即

$$f = (K/e + (Kh_c / 2et)^{1/2})(U - w_0) + K(e - U)/e \quad (17)$$

比较 (11) 和 (15) 式还可以看出,在下渗初始阶段,毛细管下渗流流速远大于重力下渗流,实际上是一种所谓的优先流^[5]. 当水源不足时,在毛管力作用下优先形成毛管流,直至水源供给大于毛管流下渗强度时,才形成重力流.

2 分子吸附带露出地表时的下渗分析

分子吸附带指在潜水面埋深大、蒸发强的地区,含水率低于枯萎点的上部土壤层。较之过渡带,分子吸附带的下渗水所受的力多了土壤颗粒分子的吸附力,因此,该带的下渗实际上分为三种形式,除了与过渡带相同的毛细管下渗和重力下渗外,还有一种在分子吸附力作用下形成的分子吸入下渗。分子吸附力大于毛管力,且随水份的减少而增大,所以分子吸入下渗进行得很快,但其受两方面的严格限制:①当被吸入的水量达到形成水膜的水量时,土颗粒对外界的分子吸附力即告消失,而代之以水表面张力,即毛管力,分子吸入下渗停止。②下渗过程中,空气和水膜所能输送的水份十分有限,水份的大量输送需靠毛管下渗才能达到。因此,由于这两方面的限制,实际上决定分子吸入下渗的速度和强度的仍为毛细管下渗,分子吸入下渗只是稍超前于毛细管下渗,宏观上二者可合而为一。该联合下渗的速度和强度与过渡带的毛管下渗流相似,只是本带原土壤含水率 w_0 较低,这已在公式(14)中得到反映,故下渗速度与强度的计算公式与过渡带相同。

3 毛管带露出地表时的下渗分析

毛管带露出地表的情况常见于三角洲平原地区。由于毛管带中所有毛细孔隙均已为水充满,下渗水所受力只有重力和粘滞阻力,故下渗水只有重力下渗,其下渗流速为 $v = K/l_e$,下渗强度为 $f = K(e - U)/l_e$;下渗锋面深度为 $h = Kt/l_e$ 。

当下渗锋面到达潜水面时,水充满所有孔隙,土壤含水量达饱和,此时若发生侧向渗流,下渗将以等于侧向渗流的速度缓慢、匀速地继续进行。否则下渗将停止。

综合上述,可得以下结论:

(1) 下渗流速、下渗强度与土壤原含水率及粒度等物理性质有关。

(2) 一般情况下的下渗有重力流和毛管流两种形式。

(3) 重力流为缓慢、匀速的下渗,其充填非毛细孔隙。

(4) 毛细管流为流速随时间而变化的快速下渗。初始阶段,其速度远大于重力流,为一种优先流;但其速度随时间的增长而迅速减慢,最后趋于与重力流一致。毛细管流充满毛细孔隙,流经部分土壤含水率为田间容水量。

(5) 下渗过程中如地面水源断绝,毛管流即转变为重力流;此后若水源重新供给,则毛管流又恢复原来的下渗方式。

(6) 如潜水面埋深小,毛管带直接出露地面时,下渗水只有重力下渗一种流态。

参 考 文 献

- 1 Vachaud G, Thony J L. Hysleresls during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water Resour Res*, 1991(7): 111~ 127
- 2 陈振铎. 土壤水之理论与应用. 台北: 台湾编译馆, 1990. 86~ 93
- 3 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988. 12~ 17
- 4 邓孺孺. 土壤水份垂向分布的平衡状态分析. 中山大学学报(自然科学版), 1997, 36(2): 100~ 104
- 5 刘亚平, 陈川. 土壤非饱和带中的优先流. 水科学进展, 1996, 7(1): 85~ 88

Quantitative Analysis on Infiltration in Soil

Deng Ruru^{} Huang Huiping*

Abstract The formulas of the speeds and intensity of infiltration on varied conditions are derived based on the theory of soil hydraulics and hydromechanics. Gravitational current and capillary current of infiltratin water on common condition are discussed. Infiltration speed and intensity are dominated by soil physic characteristics such as permeability, granularity and spherical degree, while restricted by soil water content and depth of water table.

Keywords infiltration current speed, infiltration intensity, coefficient of permeability, water table

^{*} Center for Remote Sensing, Zhongshan University, Guangzhou 510275