

無結構土壤透氣性的初步研究*

陳 清 碩

(安 徽 農 學 院)

土壤的透氣性是指土壤讓空氣穿透本身的能力。透氣性是土壤很重要的物理性質，因為它不僅決定了土壤與大氣間空氣交換的速度^[1]，而且和土壤的持水性有關^[2]，測定土壤的透氣性還可以瞭解土壤其他一系列的物理性質如排水的能力^[3]、地表逕流的速度^[2]、耐蝕性、空氣容量^[3]及其結構性的程度等等。土壤中微生物活動的方向與強度、種籽的發芽、根系的發育及其吸收能力、土壤中養分的狀態^[4]和影響農作物生活的其他重要土壤因素都有賴於土壤的透氣性。因為在土壤所有的物理性質中，以透氣性的變化最為敏感^[5]，因此，各種能夠提高土壤肥力和作物產量的耕作措施都和改變土壤的透氣性有關。

植物生長的土壤因素——水分和空氣(養料)在土壤中存在的狀況是決定土壤這個物理系統性質最本質的要素。土壤處在不同的物理狀態下，會表現出不同的透氣性，而其中以水分含量和透氣性之間所表現的關係最為重要。在有結構的土壤中，水分和空氣在孔隙中的分配是很理想的，因為結構學說在一個非常嚴密和完整的基礎上解釋了有結構的土壤中水-氣相分配機構的問題，因此，自從它出現的時候起，一直在農業科學中佔有鞏固的地位，無數的研究都認為，解決土壤水-氣矛盾最好的方法是創造土壤的水穩性團粒結構。應當指出，這種結論是正確的。但是自從草田輪栽制受到了批評以後，產生了這樣的看法，認為作物也可以在沒有結構的土壤中生長良好^[6]。我們說，土壤的水穩性團粒結構對土壤肥力的影響是肯定的，但是遵循着結構學說的論點對沒有結構土壤中水分和空氣狀況的估計也認為是農業科學中最普遍的規律，確實是還值得深入地探討，因為這種估計可能是一種極端的想像，它忽略了土壤膠體的活性。下面我們只是從土壤含水率的變化和透氣性之間的關係來研究在沒有結構的土壤中水分和空氣的分配的情形，當然這並不是說我們已經找到了作物能在沒有結構的土壤中生長良好的根據，但是可以指出，認為在沒有結構的土壤中水分和空氣是完全對立的觀點的根據是不足的。從耕作學的立場出發，我們還研究了沒有結構的土壤和透氣性有關的一些問題。

儀器裝置和試驗方法

測定土壤透氣性的專門儀器種類很多^[3, 19, 20, 22]，作者所用的儀器基本上是根據 Kirkham 和 Grover 的壓力計原理^[3, 19]製成的。透氣性的測定也是藉觀察水柱下降的速度來進行的，但是由於安裝了一個供水和容水的特殊裝置，就可以把土壤的持水性和透氣性結合起來測定。

* 本文初稿承王澤農教授和陳自在副教授的詳細校閱，陶仲文先生代為作圖，劉自瑜先生協助參加田間工作，高鴻林先生代為攝影，安徽省科學研究所土壤室朱仁同志幫助分析有機質，謹致深厚謝意。

它的構造主要包括三個部分(見圖 1), 第一部分是一個緩衝瓶, 緩衝瓶有三個接口, 一個接口連一個可以加壓的橡皮球, 另一個接口用一根帶活塞的玻璃管和外面相聯, 第三

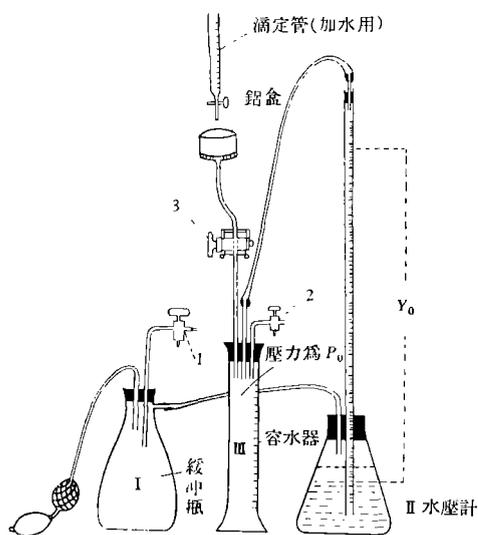


圖 1 儀器裝置

個接口用橡皮管和水壓計相接。水壓計由一根 50 毫升的滴定管和一個盛水的三角瓶構成, 滴定管的上端用橡皮管和第三部分容水器相聯, 容水器也有三個接口, 第一個接口也是用一根帶活塞的“Γ”形管和外面接通, 另一個接口也是連一根帶活塞的玻璃管, 活塞上有一個特殊的裝置(見圖 2), 使每次開啓的洞口大小能够完全保持一致。 玻璃管的頂端裝了一小節橡皮管, 用來啣接盛土樣的鉛盒。 鉛盒的上面有一根盛水的滴定管, 以使用來加水。

盛土樣的是一個體積為 $\pi r^2 \cdot h = \pi \cdot (2.3)^2 \cdot 3.0 = 49.8$ 立方厘米的鉛盒, 鉛盒的蓋子上有一根伸出的鉛管, 鉛管的內徑是 0.15 厘米, 截面積是 0.07 平方厘米, 將供試土樣用一個改裝的緊壓機和一個比鉛盒直徑略小的橡皮塞壓入

鉛盒中(見圖 3), 由緊壓機旋轉的轉數可以控制土樣的緊密度保持一致。

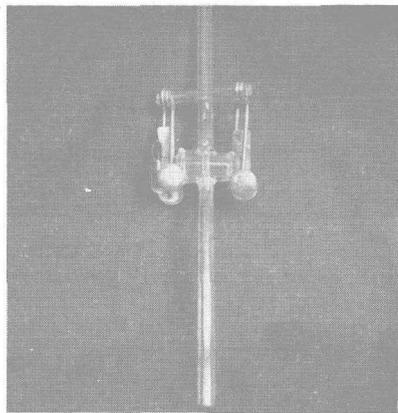


圖 2 活塞(3)上的特殊裝置

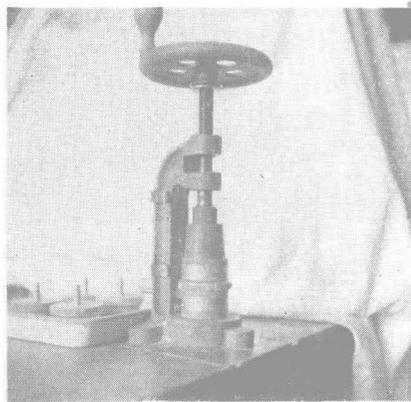


圖 3 緊 壓 機

儀器所有的接口處都用石蠟塗閉, 塗抹時石蠟的溫度必需達到 100°C 才能獲得滿意的結果。

開始測定的時候, 將活塞(1)、(3)關閉, 活塞(2)打開, 然後用橡皮球加壓, 這時水柱上升, 空氣由活塞(2)排出, 當水柱上升到滴定管刻度零的位置時, 迅速把活塞(2)關閉, 而把活塞(1)打開, 這時上升的水柱就會下降少許(下降的多少決定於容水器的體積), 並且立即趨於穩定(從活塞(1)打開到水柱穩定的時間一般要一分鐘, 因為滴定管的內壁上附着的水會緩緩地沿着管壁下降)。 然後將盛有供試土樣的鉛盒裝在活塞(3)的橡皮管上, 並把活塞(3)打開, 這時空氣就通過鉛盒往容水器和滴定管中滲入, 水柱也就隨即下降, 當水柱下降到刻度 10 的地方時, 開動跑錶, 當下降到刻度 50 的地方立即停錶, 這時跑錶所表

示的時間就是 40 毫升的空氣在一定壓力下(試驗中水柱高(y_0)是 66 厘米)通過鉛盒所需要的時間。

理論推導與試驗結果

(一)表示土壤透氣性的方法

我們都知道,氣流和水流、電流通過土壤的情形是很相似的^[3],因此,可以根據電流的理論導出我們所需要的公式。

例如,我們可以從下式

$$I = \sigma \frac{a}{L} (V_1 - V_2) \quad (1)$$

導出表示空氣通過土柱的數學表式:

$$Q = \frac{K}{\mu} \frac{a}{L} (P_a - P_e) \quad (2)$$

(1)式中的 I 為電流(安培), a 為導體的橫截面, L 為導體的長度, σ 為導體的電導率(歐姆)⁻¹, ($V_1 - V_2$)為導體兩端的電位差(伏特)。(2)式中的 Q 為每秒鐘空氣的流量, μ 為空氣的粘度, K 為空氣的通透度, a 和 L 均同(1)式, ($P_a - P_e$)為管狀導體(中空的)兩端的壓力差(大氣壓)。

現在假定儀器中水柱上升後穩定的高度為 y_0 , 而該時在容器和滴定管內部相應的氣壓為 P_0 , 當水柱下降時(y_0 減少), P_0 也會伴隨着相應的變化,因此我們有:

$$\frac{dP_0}{P_0} = -c \frac{dy_0}{y_0} \quad (3)$$

或者是:

$$\frac{P_e}{P_0} \frac{dP_0}{P_0} = -c \int_{y_0}^{y_e} \frac{dy_0}{y_0} \quad (4)$$

也就是:

$$P_e = \left(\frac{y_0}{y_e}\right)^c P_0 \quad (5)$$

將(5)式代入(2)式,我們有:

$$K = \frac{Q\mu}{\left[P_a - \left(\frac{y_0}{y_e}\right)^c P_0\right] (a/L)} \quad (6)$$

而 $Q = \frac{V}{t}$, V 為空氣的體積(立方厘米), t 為時間(秒), 將它代入(6)式, 得出:

$$K = \frac{V\mu}{a/L} \frac{1}{\left[P_a - \left(\frac{y_0}{y_e}\right)^c P_0\right] t} \quad (7)$$

在這裏, K 值的物理意義很明顯, 它實際上就是標準通透單位達西數(一個達西就是表示當壓力為一個大氣壓, 空氣的粘度為一厘米泊, 一秒鐘內通過單位面積、單位長度的多孔體時空氣的立方厘米數)。

鉛盒中沒有土壤時, 其 K 值的求法已如上述, 但當它盛有土壤時, K 值也必然地會起變化, 我們以 θa 來表示有土壤時鉛盒的透氣截面積, aL 表示氣流通過的實際長度, θ, α

都是代表一個分數，它們完全決定於該土壤的孔隙性質（大小分配），也就是說，它完全決定於該土壤讓空氣穿透本身的能力，因此，現在(7)式變為：

$$K_s = \frac{V\mu}{\left(\frac{\theta a}{\alpha L}\right) \left[P_a - \left(\frac{y_0}{y_e}\right)^{\circ} P_0 \right] t_s} \quad (8)$$

試比較(8)、(7)二式，得出：

$$\frac{K_s}{K} = \frac{t}{t_s} \frac{\alpha}{\theta} \quad (9)$$

或者是：

$$\frac{t}{t_s} = \frac{K_s}{K} \frac{\theta}{\alpha} \quad (10)$$

命 $P^A = \frac{K_s}{K} \frac{\theta}{\alpha}$ ，我們有：

$$P^A = \frac{t}{t_s} \quad (11)$$

這就是導出來的表示土壤透氣性的係數。在這裏，表示試驗結果的數學方法獲得了最理想的簡化形式。可以看出， P^A 值完全表示了土壤讓空氣穿透本身的能力，它的值可以直接地從儀器上讀出（ t ——空白試驗時水柱下降所需要的時間， t_s ——空氣通過土壤使水柱下降到同一高度所需要的時間）。很明顯， P^A 值不受儀器大小的影響，因為設計任何一種測定土壤透氣性的儀器都可以有它空白測定的數值，因此，用壓力計法所測得的結果，不管儀器的構造如何，都可以相互比較。

還可以看出， P^A 值有一個固定的範圍，當土壤的透氣性極低時，這時的 $t_s \rightarrow \infty$ ，則 $\frac{t}{t_s} \rightarrow 0$ ，當土壤的透氣性非常良好時， $t_s \rightarrow t$ ，這時的 $\frac{t}{t_s} \rightarrow 1$ ，因此， P^A 值介於 0—1 之間。

(二) 在無結構的土壤中容氣量、透氣性和含水量之間的關係

本節中，我們提出了否定結構學說“精確性”的初步意見。這裏，我們首先嘗試解決兩個問題：(1) 土壤中的容氣孔隙究竟是不是和水分呈等體積的交換的（這是結構學說的理論基礎）；(2) 土壤的透氣性究竟是不是會隨着含水量的增加而呈綫性地降低。

假定有一種乾燥的土壤，它的總體積是 V_T ，孔隙的總體積是 V_A ，則它的孔隙率為：

$$\frac{V_A}{V_T} = P \quad (12)$$

現在假定在該土壤上加水，由於水分的增加， V_A 勢必會發生變化，設空氣孔隙隨水分增加的變化率是 $\frac{\partial V_A}{\partial w}$ ，則由水量 dw 所引起的體積變化是 $\frac{\partial V_A}{\partial w} dw$ ，並假定 V_w 是加入水分的體積，則土壤中水分的體積隨水分的增加的變化率是 $\frac{\partial V_w}{\partial w}$ ，由水量 dw 所引起的體積變化是 $\frac{\partial V_w}{\partial w} dw$ （我們沒有充分的理由在理論上假定 $V_w = \frac{\partial V_w}{\partial w} dw$ ，因為土壤水的密度並不剛好等於 1）^[31]。

而土壤在吸水時有膨脹或收縮的特性，各種粘土礦物的膨脹度是不同的，有的只收

縮、不膨脹，有的膨脹度卻很大^[23]。因此，乾燥的土壤的體積 V_T 在吸水以後應當變為 $\frac{\partial V_T}{\partial w} dw$ ，而其時土壤的孔隙率應當變為¹⁾：

$$\frac{V_A - \frac{\partial V_A}{\partial w} dw + \frac{\partial V_w}{\partial w} dw}{V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw} = P' \quad (13)$$

研究一下(12)和(13)兩式，可能有兩種情況：(1)因為孔隙率的值是代表一個商，當分子分母同時變化時，如果兩者的變化度是一樣，其商可以不變，即 $P = P'$ ；(2) $P \neq P'$ 。

在第一種情況下，如果要 $P = P'$ ，必需有以下兩組條件中的任何一組條件成立，即：如果命：

$$\frac{V_A}{V_T} = \frac{V_A - \frac{\partial V_A}{\partial w} dw + \frac{\partial V_w}{\partial w} dw}{V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw} \quad (14)$$

則必需有：

$$\left. \begin{aligned} V_A &= V_A - \frac{\partial V_A}{\partial w} dw + \frac{\partial V_w}{\partial w} dw \\ V_T &= V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

或者是：

$$\left. \begin{aligned} V_A &\neq V_A - \frac{\partial V_A}{\partial w} dw + \frac{\partial V_w}{\partial w} dw \\ V_T &\neq V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

的條件，現在我們再來研究(15)式的情形：如果命 $\frac{\partial V_A}{\partial w} dw = \frac{\partial V_w}{\partial w} dw$ ，則(14)式變為：

$$\frac{V_A}{V_T} = \frac{V_A}{V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw} \quad (17)$$

可以看出，(17)式成立的必要條件是 $\pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw = 0$ ，但是這對大多數土壤來說，是決不可能的，因為除了砂土和富含有機質的土壤以外，找不到一種土壤在吸水以後不表現一些膨脹或者是收縮的性質。反過來，我們只能認為(15)式成立的唯一可能條件是：

$$\frac{\partial V_A}{\partial w} dw \neq \frac{\partial V_w}{\partial w} dw \quad (18)$$

1) 在 $\frac{\partial V_A}{\partial w} dw$ 以前冠以負號，是表示土壤的容氣孔隙會因為水分的增加而減少。如果在它的前面不是冠以負號，而是冠以正號，則將說明土壤的容氣孔隙因為水分的增加反而會增加，如果這種情況發生，就直接說明了土壤的容氣孔隙和水分是呈不等體積交換的原理。所以現在姑且認為在 $\frac{\partial V_A}{\partial w} dw$ 以前應當冠以負號，再遵循着數學的嚴格性來研究水分和空氣是不是呈等體積交換的問題。

在 $\frac{\partial V_T}{\partial w} dw$ 以前冠以正號，是說明某些土壤是正的，某些土壤是負的(如高嶺土和紅壤)。

這就說明，在無結構的土壤中，空氣孔隙的減少並不和水分的增加相適應。由此可見，(15)式實際上根本不能成立。

再就(16)式條件組的情況來看：顯然，這個條件組成立的唯一的必要條件也是 $\frac{\partial V_A}{\partial w} dw \approx \frac{\partial V_w}{\partial w} dw$ ，因為反之，我們就會得出 $V_A \approx V_A$ 的不合理的結論。

現再進一步研究(12)和(13)兩式可能發生的第二種情況，也就是 $P \approx P'$ 的情況。

根據 A. A. Роде 的方程式^[24]，我們有：

$$A + B = \Pi, \quad A = \Pi - B \quad (19)$$

式中 A 為土壤的空氣孔隙率， B 為土壤被水分佔住的孔隙率， Π 為總孔隙率。可以看出，Роде 方程式的成立是完全建立在一種認為土壤呈乾燥和濕潤狀態時孔隙率(Π)保持不變的假定基礎之上的。而我們現在所要研究的是不認為“ Π ”在乾燥和濕潤時是不變的，也就是在 $P \approx P'$ 的情況下將會有甚麼結果產生。

可以認為，土壤在乾燥狀態時，總孔隙率就等於空氣孔隙率(A)，當土壤濕潤時，空氣孔隙率變為：

$$A - \frac{\frac{\partial V_A}{\partial w} dw}{V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw} \quad (20)$$

被水分佔住的孔隙率為：

$$\frac{\frac{\partial V_w}{\partial w} dw}{V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw} \quad (21)$$

並設總孔隙率變為 $\Pi \pm \theta$ ，則我們有：

$$A - \frac{\frac{\partial V_A}{\partial w} dw}{V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw} + \frac{\frac{\partial V_w}{\partial w} dw}{V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw} = \Pi \pm \theta \quad (22)$$

而在前面已經指出過，當土壤在乾燥狀態時：

$$A = \Pi \quad (23)$$

將(22)式減(23)式，我們有：

$$\frac{\partial V_A}{\partial w} dw = \frac{\partial V_w}{\partial w} dw \mp \theta \left(V_T \pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw \right) \quad (24)$$

這就非常明顯了，因為(24)式清楚地表明，當 $P \approx P'$ 時， $\frac{\partial V_A}{\partial w} dw$ 是不等於 $\frac{\partial V_w}{\partial w} dw$ 的，而且這種不等主要的是因為土壤的膨脹或者是收縮所引起的，因此 Роде 的公式只有在 $\pm \theta = 0$ 時才能成立。

因此，在這裏導出了土壤物理學中的新觀念，這就是：水分和空氣在土壤中的不等體積交換原理。

所謂無結構的土壤，Baver^[16] 認為是一種無能力表現裂隙與次生單位的土壤；朱祖祥^[25] 認為土粒是呈單粒狀態，彼此之間沒有膠結關係而各自獨立的土壤；Вильямс^[13] 認

為土壤中單粒含量達到 23—35% 時或者是全部是毛管孔隙的土壤就叫做無結構的土壤。根據這些定義，在理論上就可以做出結論：假定 P_c 表示土壤的毛管孔隙， P_{n-c} 表示非毛管孔隙，並且因為：

$$P_{n-c} \rightarrow 0 \quad (25)$$

所以

$$P_c \gg P_{n-c} \quad (26)$$

而土壤在濕潤時孔隙度要發生變化，當然也就是毛管孔隙和非毛管孔隙發生變化，因為無結構的土壤中原有的非毛管孔隙很少，因此，可以假定它的變化是正的變化，也就是說，當土壤濕潤時，非毛管孔隙由 P_{n-c} 變為 $P_{n-c} + \frac{\partial P_{n-c}}{\partial w} dw$ ，而毛管孔隙是由 P_c 變為 $P_c \pm \frac{\partial P_c}{\partial w} dw$ ，因此，它們的變化率根據(25)和(26)二式必然有着下面的關係：

$$+ \frac{\frac{\partial P_{n-c}}{\partial w} dw}{P_{n-c}} > \pm \frac{\frac{\partial P_c}{\partial w} dw}{P_c} \quad (27)$$

這也就說明，如果自然界真的存在着如威廉斯所說的無結構的土壤的時候，那麼，當它在濕潤時，其孔隙度必然地會發生變化，而其變化從理論上來看主要的只是非毛管孔隙發生變化，而非毛管孔隙的多少是密切地和土壤的透氣性有關的。既然氣流通過土壤的情形和水流很相似，那麼，非毛管孔隙和透氣度之間根據 K. Subba Rao 的意見也可能有着平行的現象^[26]，因此，我們認為，當非毛管孔隙增加時，可以表現出較高的透氣性。反之，透氣度的增強，也可以說明非毛管孔隙的增多。由此，我們在理論上獲得了非常明晰的觀念，就是，對無結構的土壤來說，其透氣度的減低是不一定和水分的增加呈正相關的。

在這裏不得不迫使我們對威廉斯所倡導的無結構的土壤中水分和空氣是完全對立的定律發生懷疑，因為這個定律在理論上是不嚴密的。由於作者在實驗室中完成了下面的試驗，就更加使人確信這種懷疑是正確的。

試驗本來是為了找出說明在無結構的土壤中水分和通氣性之間是呈對立關係的某些經驗數據而進行的，但是所得到的全部結果剛好和原來所預期的相反，除了在砂壤土（北京附近的）（粉砂 8.36%，粘粒 12.52%，砂粒 79.12%）和生草層的土壤發現由於水分的增加使土壤的透氣性逐漸減低以外，在其他所有的土壤上，土壤的透氣性並不因為水分的增加而呈綫性地降低，在最初往往因為水分的增加反而有使土壤的透氣性增強的情形，試驗的結果列在圖 4 中。我們可以看到，在大多數土壤中， $P^{A'}$ 值（土壤在濕潤時的透氣性）都有比 P^A 值（土壤在加水以前的透氣性）較高的情形發生。曲綫的起伏變化很清楚地顯示出，在理想的無結構的土壤中（沒有非毛管孔隙的土壤，或毛管孔隙很少的土壤），由於水分的增加，在最初可以引起土壤發生急劇的次生結構的形成作用，在這個過程中，導致了土壤的孔隙度發生很大的變化，因此，認為土壤實際上可能具有一種這樣的“機能”，這就是：土壤膠體因為吸水收縮或膨脹會引起本身的體積和孔隙度發生變化，以及在乾濕變異的情況下有促進本身發生次生結構再形成作用的特性，因而在理想的無結構的土壤中，由於這樣的“機能”，常常可以使水分和空氣在其中的對立關係予以自發性地緩和。在無結構的土壤中，水分和空氣的不等體積的交換原理也正是建立在這種事實的基礎之上。因為結構學說不能解釋這種發生在實驗室中的客觀事實。同時，作者在大田中也用另外設計的

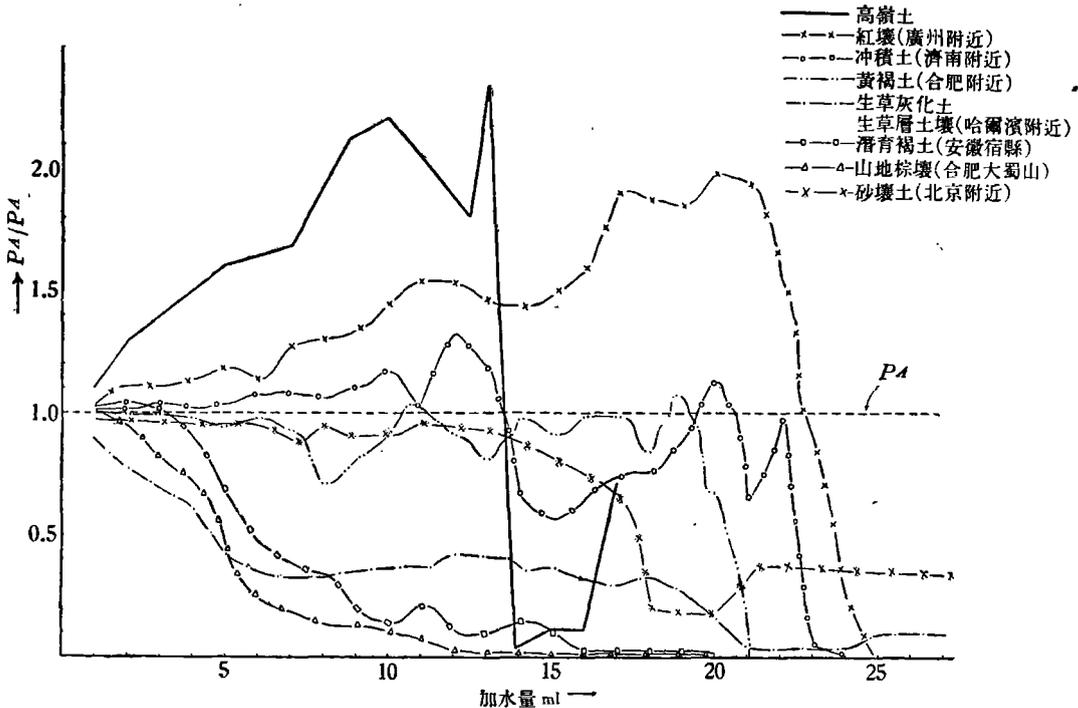


圖4 無結構土壤的透氣性和土壤含水量的關係

說明：供試的土壤都通過了100孔的篩子（北京附近的砂壤土除外），並用緊壓機壓到不能再緊的程度，因此，所有的土壤都處在一種高度的無結構狀態，然後測定它們的透氣性（在66 cm高的水柱壓力下測定40 ml的空氣通過它所需要的時間 t_s ），之後，每加1 ml的水再測定一次透氣性 (t'_s) 。而儀器的空白讀數是 t （1.6秒），因此，乾土的 $P^d = t/t_s$ ，濕水以後土壤的 $P^A = t/t'_s$ ，而 $P^A/P^d = t_s/t'_s$ 。如果 $P^A/P^d > 1$ ，則說明濕土的透氣性比乾土的還要強，這就是圖上平行於橫座標的虛綫（ P^A ）以上的曲綫部分。如果 $P^A/P^d < 1$ ，則說明濕土的透氣性比乾土的要低，這就是虛綫以下的曲綫部分。

由圖上所表示的結果可以看出，無結構的土壤其透氣性並不因為水分的增加而呈綫性地降低，而且有很多的土壤其透氣性因為水分的增加反而增強，其中以紅壤和高嶺土的情形表現得最為突出（見圖5、6、7），沖積土和黃褐土次之。生草灰化土生草層的土壤和砂壤土則和其他的土壤相反，它沒有 $P^A/P^d > 1$ 的情形（見圖7、8），這是因為生草層的土壤富含有機質，而有機質含量較高的土壤其膨脹度是很弱的^{[14][27]}。而砂壤土則是因為其中的粘粒含量過少，它在膨脹或收縮時不足以引起土壤產生次生結構的形成作用的原故，這也就是文中所提到的 $\pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw = 0$ 或者是 $\pm \theta = 0$ 的情況。當發生了這樣的情況時，在這種土壤中實

際上也就不存在着甚麼水分和空氣對立的問題，因為 $\pm \frac{\partial V_T}{\partial w} dw = 0$ 或者是 $\pm \theta = 0$ 在實質上也就是土壤具有良好滲水性的同義語。在圖中就可以看到，這二種土壤的曲綫後部分是平行於橫座標的。因為這時候即是不斷地往土壤中加水，所加入的水都全部地滲漏到儀器的容器中，因此，此時的透氣性也就不再變化。

一種干擾土壤很少的專用儀器測定過，發現在耕作層中因為到處都有裂縫和孔隙，因此，水分的增加並不使耕作層的透氣性降低，只是在犁底層透氣性有降低的現象。因此，田間試驗同樣的提出了一個為威廉斯所沒有解決的問題，這就是：只有在整個土壤剖面中創造了良好的水穩性團粒結構才可能徹底地解決他所強調的“水分和空氣完全對立”的問題，至於對耕作層的土壤來說，作者認為威廉斯所理想的無結構土壤在自然界中並不存在。如果假定它是實際存在的話，那麼它就有可能發生和實驗室中出現的相似結果，而這個正如同前面簡單的陳述所證明的一樣，這時候在無結構的土壤中水分和空氣的關係並不如威廉

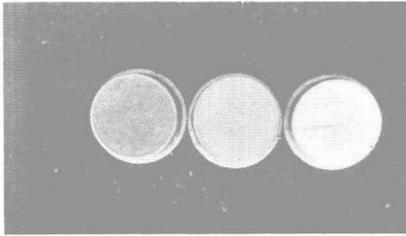


圖 5 加水以前的土壤狀態
左——生草灰化土生草層土壤
中——黃褐土
右——高嶺土

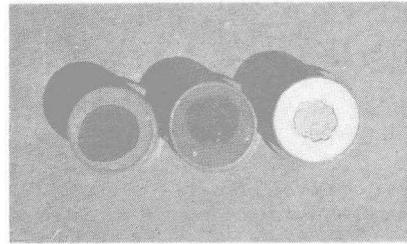


圖 6 加水後的土壤狀態
左——黃褐土，由於膨脹而產生非毛管孔隙
中——生草灰化土生草層土壤，加水以後形成水膜塞，使透氣性降低
右——高嶺土，由於收縮而產生非毛管孔隙

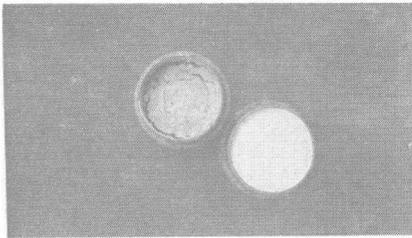


圖 7 高嶺土吸水以前和充分吸水以後的土壤狀態
右——加水前
左——吸水後產生巨大的非毛管孔隙（含水量 13.2%），使透氣性大大地增加

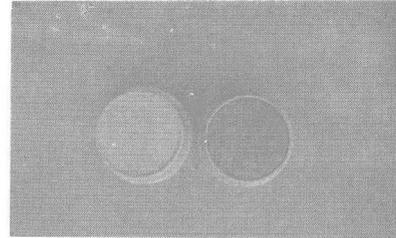


圖 8 砂壤土吸水前和吸水後的土壤狀態
左——吸水前
右——吸水後膨脹很少，而且不開裂，因而使土壤透氣性降低

斯所說的“根據兩個物體不能同時佔有同一空間這一簡單的物理學公理，在任何的多孔體中，水分和空氣發生着對抗的作用”（威廉斯土壤學，傅子禎譯第 44 頁）這樣簡單。應當指出，這個不精確的原理在農業中由來已久，在 King (1940) 的著作“農業物理”和 Keen (1931) 的“土壤的物理性質”專著中，都可以看到“土壤中水分和空氣是呈等體積交換的”說法，我們認為，全部理論上的嚴格分析和多次重複的精密試驗都表明了這個由來已久的並且長時期為人們的直覺所承認的“定律”已經是一種陳腐的論點了，這是因為，土壤並不是一個普通的多孔體，而是一個具有“物理活性”的“機體”。

在試驗中還發現，對無結構的粘土來說，幾乎所有不同的土壤都具有一個同樣的臨界水分含量的數值，所謂臨界水分含量，是指土壤的含水量達到這種程度就可能使本身的透氣性降低到零。在這個試驗中，這個數值是 33—45%（高嶺土、生草層土壤除外）。至於對砂土來說，因為它具有很好的透水性，因此“水分和空氣完全對立”的問題根本不存在。在一般所指的自然界的無結構的土壤中，臨界水分的數值可能比這還要高。在降雨以後的第二天很少有那一層的土壤水分含量達到了臨界含水量的數值，例如合肥近郊的黃褐土就是這樣（0—3 厘米 25.80%，3—20 厘米 23.80%，20—40 厘米 28.39%，以下每隔 20 厘米測定水分的結果分別為 25.87%，23.03%，24.16%，23.20%，21.62%，20.00%，22.64%，28.81%，33.33%）。如所週知，合肥近郊的黃褐土可以稱爲一種無結構的土壤（用 Yoder 法測定水穩性團聚體的結果為 30%，用人工降雨法測得的結果為 35%）^[25]，它的質地較粘重（土壤剖面中 0—8 厘米粘粒含量為 14.52%，8—29 厘米 12.80%，29—35 厘米

28.80%，35—52 厘米 47.20%，52—136 厘米 52.80%，136—151 厘米 47.80%，151—220 厘米 54.96%），有機質的含量很少（0—3 厘米 0.24%，3—20 厘米 0.19%，20—40 厘米 0.14%，40—60 厘米 0.07%）。在田間持水量的情況下（雨後 2 天）各層土壤的 P^A 的平均值為 6.36×10^{-2} 。由此可見，在這種無結構的土壤中，土壤的透氣性並不因為一下雨就會完全降低到零。完全可以認為，在自然界中，除了沼澤土以外，沒有那種土壤可能表現出充分的“水分和空氣（養料）完全對立”的現象，因為並沒有那種土壤因為富含了養料但因為通氣不良而使土壤貧瘠化的。至於對土壤結構的利益予以更廣義的理解，似乎是無結構的土壤必然地會受到嚴重的沖刷，但是沖刷現象應當決定於多雨和暴雨的氣候以及地形等其他條件，設想把東北的黑土搬到華南的紅壤地區，並破壞其地表植被，未必就不會產生同樣的被沖刷的現象。

應當說明的是，作者並不企圖否定良好的水穩性土壤結構在土壤肥力方面的作用，而只是指出了“水分和空氣在土壤中呈等體積交換”的原理並不精確，而特別是在濕潤的條件下，這個原理應當被所提出的“水分與空氣在土壤中不呈等體積交換”的新原理所代替。

（三）無結構的土壤的機械組成、孔隙度、土層的厚度、鬆動土層的深度和透氣性之間的關係

因為在自然界很難找到理想的無結構的土壤，以及為了避免自然土壤中的有機質和水分含量會使問題複雜化起見，因此，在試驗的處理中必需排除一切其他的可以影響土壤透氣性的因素，而這祇有用砂粒（細砂）和粘粒（高嶺土）的人工混合物才能達到目的。每個試驗處理藉助緊壓機可以使土壤的緊密度保持一致，因此就可以使試驗結果有着高度的精確性。

第一個試驗獲得的結果列在表 1 中。

表 1 無結構土壤的機械組成、孔隙度和透氣性的關係*

處理代號	土壤質地	粘 粒 (%)	砂粒:粘粒	容 重	真 比 重	孔 隙 度 (%)	毛管孔隙 (%)	非毛管孔隙 (%)	$P^A \times 10^{-2}$
1	砂 土	10	1.0:0.1	1.46	2.62	44.27	33.93	10.34	47.05
2	砂 壤 土	20	1.0:0.2	1.49	2.61	42.91	35.54	7.34	12.80
3	壤 土	30	1.0:0.4	1.57	2.60	39.61	37.11	2.17	2.08
4	粘 壤 土	40	1.0:0.6	1.53	2.59	40.92	39.55	1.37	1.08
5	粘 土	50	1.0:1.0	1.49	2.58	42.24	40.96	1.28	0.61

* 土壤質地按照日本農學會的規定命名^[28]。

毛管孔隙用 Воробьев 和 Аваев 的方法測定^[29]。

從表 1 中的資料可以看出以下幾個問題：

（1）一般認為土壤的質地愈細，孔隙度也就愈大的說法不是完全正確的，像砂土的孔隙度是 44.27%，而壤土的孔隙度只有 39.61%，壤土以後，孔隙度又增加，因此，混合物的粘粒含量在 30—40% 的範圍內，孔隙度最小。這和 Охотин^[30]所得到的結果完全符合，他是這樣來解釋的，就是在壤土中的孔隙被一些小於孔隙半徑的粘粒所填塞，因此，它的孔隙度要比砂土來得低。而當粘粒再增多的時候，因為接觸點增多，孔隙度也就逐漸提高。

(2) 土壤的透氣性和總孔度沒有綫性的關係，像粘壤土比壤土的孔隙度較高，而 P^A 值反而較小，粘土和粘壤土的情形也是如此，而砂壤土的孔隙度比砂土較低， P^A 值也就較小。

(3) P^A 值和土壤的非毛管孔隙呈正相關，而和土壤中粘粒的含量呈反相關。而且也論證了 Добряков^[14]所提出的原理，就是當土壤機械粒級從一組過渡到另一組的時候，土壤的透氣性降低得最顯著，像在表中可以看出從砂土過渡到壤土以後透氣性確是降低得最多的。但是可以補充一點的是，在壤土以後，透氣性的降低是不像從砂土過渡到壤土這樣的顯著的。這可以這樣來解釋：土壤中的小孔隙對氣流的通過實際上是無益而且是反而有害的。因為大多數的小孔勢必都很曲折，氣流通過的時候便因之而產生了大量的漩渦，這時候流體的運動已經不服從達西定律或者是著名的 Poiseuille 原理。而在壤土中，已經存在着大量的小孔隙，因此，當小孔隙再增加時，這種影響當然不及從砂土過渡到壤土這樣的顯著。

如果是一種單一機械組成的無結構土壤，則 P^A 值和孔隙度就有着相應的關係，容重愈小，孔隙度越大，透氣性也就越強，反之亦然，這從表 2 的資料中可以很清楚地看出來。不難理解，這種現象實際上也就意味着無結構的土壤的緊密度和透氣性有着相應的關係，土壤愈緊密，透氣性也就越低，為了論證這一原理，繼續進行了試驗。試驗結果見表 3。

從表 3 中的資料可以看出，透氣性和土層的厚度呈正相關。Renk^[16]曾經提出過空氣通過土壤的速度反比例於該層的厚度的原理。但是必需補充的是：這個原理只能應用於無結構的緊密土壤。

鬆動土層的厚度越大，透氣性也就越強，試驗的結果見表 4。很有趣的是，比較表 3 和表 4，0.5 厘米厚的緊密土層和 3.0 厘米厚的鬆土層的透氣性相等，而後者的厚度却比前者增多了 6 倍。因此，全部試驗結果就允許我們做出很有價值的實踐上的結論：在無結構的土壤中，土壤的緊密度是影響土壤透氣性決定性的因素，即令祇有一層很薄的緊實土層存在，就可以大大地限制整個土層空氣的流通。這也就啓示人們注意到，在農業上增加中

表 2 單一機械組成的無結構土壤孔隙度和透氣性的關係

處理代號	容 重	孔 隙 度 (%)	$P^A \times 10^{-2}$
1	0.83	67.19	8.46
2	0.91	64.03	3.61
3	0.97	61.66	1.76
4	1.02	59.68	1.09
5	1.08	57.31	0.70
6	1.12	55.73	0.63
7	1.14	54.94	0.57

表 3 無結構的土壤土層厚度和透氣性的關係

處理代號	土層厚度(厘米)	$P^A \times 10^{-2}$
1	0.5	33.33
2	1.0	20.51
3	1.5	16.84
4	2.0	12.80
5	2.5	11.51
6	3.0	10.25

表 4 無結構的土壤鬆動土層的厚度和透氣性的關係

處理代號	鬆動土層的深度* (厘米)	$P^A \times 10^{-2}$
1	0.5	10.45
2	1.0	12.03
3	1.5	13.91
4	2.0	16.84
5	2.5	21.64
6	3.0	33.33

* 未鬆動前係 3.0 厘米厚的緊土層， $P^A=8.88 \times 10^{-2}$ 。

耕的深度和破除土壤結皮的農業措施該具有多麼重要的意義。

總 結

1. 在無結構的土壤中,其透氣性並不因為水分的增加而呈綫性地降低,這可以用土壤中的“水分和空氣呈不等體積的交換”的原理來解釋。在土壤學中廣泛流行的結構學說對無結構土壤中水分和空氣狀況所做的估計不僅在理論上不嚴密,而且也沒有試驗的基礎。

2. 在無結構的土壤中,土壤的透氣性與土壤的總孔隙度沒有綫性的關係,決定土壤透氣性的因子是土壤的非毛管孔隙度。

3. 在無結構的土壤中,質地越粘重,透氣性也就愈低。

4. 在無結構的土壤中,整個土層的透氣度決定於其中任何一層土層的緊密度,而不管這層緊密土層的厚度如何。因此在農業中增加中耕的深度和破除土壤結皮的技術措施對調節土壤的透氣度有着決定性的意義。

本文所報導的只是一個初步研究的結果,這方面的工作還在繼續進行。

參 考 文 獻

- [1] Виленский, Д. Г., 1949. 土壤學(上)華孟等譯,高等教育出版社,1954,第232—233頁。
- [2] Wilde, S. A. & Steinbrenner, E. C., 1950. Determination of air permeability of soil by means of a sphygmomanometer. *Jour. Forest.* 48 (12): 480—481.
- [3] Evans, D. D. & Don Kirkham, 1949. Measurement of the air permeability of soils in situ. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 14: 65—73.
- [4] Shaw, B. T., 1952. Физические условия почвы и растение (Soil physical conditions and plant growth), перевод с английского яриловой, 1955. Изд. Ил. СССР, 288—333.
- [5] De Boot, M. F. A. J. Englehom, & Kirkham, K., 1953. Fall vs. Spring flowing and soil physical condition in a rotation experiment. *Agron. Jour.* 45 (6): 257—261.
- [6] Дима, В. Н., 1955. Совещание по агрономической физике. Почв. 9, Изд. АН СССР, 70—71.
- [7] Taylor, Sterling A., 1949. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 14: 55—61.
- [8] Webley, D. M., 1947. A technique for the study of oxygen availability to micro-organisms in soil and its possible use as an index of soil aeration. *J. Agr. Sci.* 37: 246—256.
- [9] King, F. H., 1904. *Physics of agriculture*. 3rd ed. Madison, Wis Published by the author, 126, 127, 204, 209.
- [10] Keen, Bernard A., 1931. *The physical properties of the soil*. Longmans, Green and Co., London, 136—136, 339, 172—3.
- [11] Wilbert, W. Weir, 1936. *Soil Science*. J. B. Lippincott Co., 271, 274, 275.
- [12] Mosier, J. G. & Gustafson, A. F., 1917. *Soil physics and management*. Philadelphia & London. J. B. Lippincott Co., 309—310.
- [13] Вильямс, В. Р., Антагонизм воды и пищи в бесструктурной почве и значение травопольных севооборотов. В. Р. Вильямс избранные сочинения, том 2, 1950, Изд. АН СССР, 30—73.
- [14] Добряков, Н. Ф., 1952. Динамика воздухопроницаемости почвы при увлажнении в полевых условиях как метод оценки ее структурного состояния. Почв. 12: 1,089—1,100.
- [15] Yamasaki, T., Terashima, M., 1954. Studies on the excess-moisture injury of upland crops in overmoist soil, from the viewpoint of soil chemistry and plant physiology. *Soil & Fertilizers*. Vol. XVIII, No. 3, 220.
- [16] Baver, L. D., 1956. *Soil physics*. John Wiley & Sons, Inc., N. Y., 3rd ed., 199—222.
- [17] Buckingham, E., 1904. Contributions to our knowledge of the aeration of soils. U. S. Bur. Soils Bull. 25.
- [18] Buchrer, T. F., 1932. The movement of gases through the soil as a criterion of soil structure. *Arizon Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 39.
- [19] Grover, Ben L., 1955. Simplified air permeameters for soil in place. *Soil Sci. Soc. Amer.*

- Pro.* **19** (4): 414—418.
- [20] Mosier, J. G. & Gustafson., 1912. Soil physics laboratory Manual. Ginn and Co., 49.
- [21] Воробьев С. А., Егоров В. Е. и Квеелева А. Н., 1956. Руководство к лабораторно-практическим занятиям по земледелию. Сельхозгиз. 120.
- [22] Stevenson, W. H. & Schanb, J. O., 1912. Soil physics laboratory guide. Orange Judd Co., N. Y., 39—41.
- [23] 蔣劍敏、熊毅, 1956. 土壤膠體膨脹的初步研究. 土壤學報 **4** (2): 129—139.
- [24] А. А. Роде, 1955. Водные свойства почв и грунтов. Изд. АН СССР, 68.
- [25] 朱祖祥等編, 1956. 土壤學. 高等教育出版社, 第195頁.
- [26] Subbs Rao K. & Ramacharla, P. T., 1955. Porosity changes and P^F -water relation in heated soils. *Soil Sci.* **79** (5): 393—404.
- [27] Davidson, S. E. & Page, J. B., 1956. Factors influencing swelling and shrinking in soils. *Soils & Fertilizers*, Vol. XX, No. 1. Feb. 1957. 22.
- [28] 牧隆泰著, 1956. 農業土木學詳論. 地球出版株式會社, 第65—66頁.
- [29] Воробьев С. А. и Аваев М. Г., 1955. Лаборатоно-практические занятия по почвоведению и земледелию. Сельхозгиз., 60.
- [30] Роде, А. А., 1952. Почвенная влага. Изд. АН СССР, 28—9, 136.
- [31] 陳清碩, 1956. 土壤中束縛水密度的研究. 安徽農學院學報. I, 第7—13頁, 1957.
- [32] Fukuda Hitoshi, 1955. Air and vapor movement in soil due to windgustiness. *Soil Sci.* **79** (4): 249—255.
- [33] Haines, W. B., 1923. The volume-changes associated with variation of water content in soil. *J. Agr. Sci.* 13: 296—310.
- [34] 威廉斯土壤學, 傅子禎譯, 1957. 高等教育出版社, 第293頁.
- [35] 陳清碩, 1957. 一種測定土壤水穩性團聚體的新方法 (未發表).
- [36] Шилова, Е. И., 1957. Еще раз о необходимости критического отношения к учению акад. В. Р. Вильямса о едином почвообразовательном процессе. Вестник ЛГУ, № 9, 34.

A PRIMARY STUDY OF PERMEABILITY OF STRUCTURELESS SOIL TO AIR

(ABSTRACT)

CHEN CHING-SHOW

(College of Agriculture, Anhwei)

The object of this work was an investigation of the relationship between soil moisture content and soil aeration in the structureless soils, and a theoretical consideration was proposed out: For a given moisture content, the water which enters the soil must not displace the volume of air equal to that of the water which penetrates the soil, and the decrement of permeability of soil to air will not be found to bear a linear relation to the increment of the water content, however, the permeability also probably increases as the soil is wetted. All of this has been proved by the experiment. Furthermore, the results of the experiment showed that until the moisture content of the soil increased up to the level 33—45% the antipode of the moisture content and soil aeration in structureless soils then would be true. It has been suggested that this could happen in the so-called ideal structureless soils (soil without non-capillary pore space) only. Under natural conditions, however, in author's opinion, the antipode of soil moisture content and soil aeration in structureless soils will not be so seriously as we generally had thought of.

From the viewpoint of Agronomy, further studies about the physical properties of structureless soils with relation to the permeability of soil to air was also made. The results, obtained in the experiment showed that the air permeability of soil would be a function of the soil noncapillary pore volume, but with no linear relation to the total pore space. If the texture of structureless soil is heavier, then the air permeability will be lower. It also showed that the permeability of air flow through soil columns was inversely proportional to the depth of the column and was proportional to the depth of the soil made loose. Experiment also showed that even a thin compressive soil layer is sufficient to restrict air movement through the system. All of this is in accordance with the materials of literatures so far have touched.

A coefficient P^A was proposed out to represent the permeability of soil to air. It has been suggested that this coefficient could be used as an index of soil aeration, the method used to derive this coefficient has been given in details in the paper.