

土壤空气研究概况*

程云生

(中国科学院土壤研究所)

土壤空气是土壤物理学研究领域内比较薄弱的的一个分支学科^[3]。但是,它在土壤形成过程中和土壤肥力的培育过程中却占有十分重要的地位。Вернадский^[7]曾以“无气体不成土壤”这句话来表达土壤空气与土壤之间的相互关系。1910年 Вильямс^[9]在关于土壤发生和土壤肥力学说的問題中就指出了土壤空气所具有的重要意义。土壤空气是高等植物和低等植物生命活动必不可少的因素,并用它作为判断土壤肥力基础——土壤结构性——的重要指标之一。

Baver^[53] 1951年研究了土壤空气与土壤物理性质的关系及其与植物生长的关系,并曾指出土壤通气性不良会产生三方面的作用:(1)植物根系生长发育受到最大的限制,(2)植物根系的正常呼吸作用受到限制并难以吸收水分和养料,(3)良好土壤所必需的生物过程受到抑制而不能正常进行。此外,土壤空气中具有植物生活直接和间接需要的营养物质,如氧、氮(对根瘤菌而言)、二氧化碳等。因此,可以认为在一定条件下土壤空气起着与土壤固、液二相相同的作用^[21]。同时,还应看到土壤固、液、气三相的相互联系和相互作用。

在通气条件不良或调节不当时,土壤空气的容量和组成会成为作物产量的限制因子^[47,55,87]。因此,在农业实践中常需通过耕作、排水和改善土壤结构等措施以调节土壤空气状况,使植物生长发育获得最适宜的居住环境。

土壤空气的研究工作大致可以分为以下四个方面:(1)土壤空气的容量和组成,(2)土壤空气交换的因素,(3)土壤空气的扩散作用,(4)土壤空气与土壤性质和植物生长的关系。

一、土壤空气的容量和组成

1. 土壤空气存在的状态:土壤空气按其物理状态可分为自由态、吸附态和溶解态三种^[77]。

自由态空气存在于土壤孔隙中,其容量主要

决定于土粒的排列状况及水分的含量。土粒排列的疏松或紧密决定着孔隙的容积。疏松排列的孔隙容积占47.64%,而紧密排列的仅有25.95%。这是一个理论计算值,而在土壤中则有很大的变异。通常是按土壤总孔隙度 $\left[P = \left(1 - \frac{\text{容重}}{\text{比重}} \right) \times 100\% \right]$ 和水分所占孔隙之差来确定空气的容量。这部分空气一般具有最大的易动性和有效性,而且随着孔径的减小而逐渐减弱。

吸附态空气主要是指土壤颗粒表面吸附的空气。早在1886—1887年 Костычев^[28]就指出吸附在土壤颗粒表面的气体是难于和土粒分开的。Russell 和 Appleyard^[77]、Глинка^[15]、Дояренко^[22]、Keen^[24]、Турлюн^[42]等人认为吸附在土粒表面的气体主要是二氧化碳,其次是氧气,氮几乎不存在,而其中最多的是水汽。土壤中腐殖质和二氧化物具有吸附气体的最大能力,而石英等则很小。土壤在最大吸湿水以下就有吸附气体的能力,在绝对干燥土壤中最大。晚近 Антипов-Каратаев^[2]指出,吸附在土粒表面的气体是直接参与土壤表面现象作用的。

溶解态空气是指溶于土壤溶液中(或水中)的气体。气体在水中的溶解度是随着气体分压的增加和温度的降低而增高。土壤溶液中的气体会改变溶液的性质,如CO₂增加则促使土壤中碳酸盐、磷酸盐等盐类溶解度的提高。O₂、H₂、N₂、H₂S等气体对土壤溶液的氧化还原过程有着巨大的影响。

对上述三种状态的空气的研究,以自由态空气为多,这可能是因为它在土壤和植物生命过程中起着比较重要的作用。其次,溶解态空气在沼泽土、水稻土以及地下水位较高的土壤中的变化常引起人们的注意^[6,31,35,49,52,57]。

* 本文写成后承蒙熊毅教授审阅,特此致谢。

2. 土壤空气容量: 这方面的工作多偏重于说明土壤的某一性质(如土壤的结构性)或直接对植物生长发育的影响。1927年 Коpecкy^[66]研究了土壤空气容量与作物生长的关系得出: 苏丹草正常生长所需的空气容量为6—10%, 小麦和燕麦为10—15%, 大麦、甜菜和马铃薯为15—20%。Yoder 1937年调查籽棉最高产量的土壤空气容量为30%。Baver 和 Farnsworth^[55]研究了土壤中非毛管孔隙与甜菜产量的关系以后指出, 它们之间有密切关系, 这不仅表现在土壤空气容量大时产量高, 而且甜菜的块茎发育也较壮大, 糖分含量也高。这些都说明各类植物皆需要足够的空气容量。

影响土壤空气容量的土壤因素主要是土壤的质地和结构性。砂质土壤、结构性良好的土壤和腐殖质土壤中皆含有比较多的空气, 而土壤团粒的大小是决定土壤空气容量的重要因子^[36, 54, 87]。

粘质土壤的空气容量较小, 不利于植物生长。Baver 曾在粘质土壤中加入有机肥料或掺砂客土以提高土壤的空气容量, 从而改善原来不良的水-气状况。由于土壤空气容量深受水分物理性质的影响, 而土壤中水-气的关系又了解得很不够, 所以近年来引起了人们注意土壤中水-气体系类型的研究。Bolantov^[59]根据土壤永久雕萎含水量到田间持水量范围内水分和空气的容积比的动态变化特点, 将土壤水-气体系划分成分散的(divergent)、收敛的(convergent)、收敛-分散的(convergent-divergent)、平行的(parallel)和半分散的(semi-divergent)五种类型。

3. 土壤空气组成: 土壤空气组成和大气组成相近, 但在数量上却有显著的不同。其中氮气的容积百分比最高, 在一般条件下它是不溶于水的, 所以它在土壤中的变化是极其微小的。其次是氧气, 它的变化很大, 一般皆低于大气中的含量, 但是土壤空气中的CO₂含量却比大气中高得多。这种规律已早在1852年为法国学者 Boussingault 和 Lewy 所发现。他们第一次研究并确定了土壤空气的组成(容积%)是: N₂ 78.80—80.24%, O₂ 10.35—20.03%, CO₂ 0.74—9.74%。同时认为土壤空气中CO₂的生成是由于O₂的消耗的结果。土壤空气中CO₂含量总是比其在大气中的多, 而O₂的含量却相反。这种事实以后为许多学者所证实^[4, 9, 11, 13, 15, 16, 20, 24, 28, 31, 33, 42, 60, 73, 77]。但是, 有关沼泽土类型土壤空气的研究资料还较少。据记

载^[52], Harrison 和 Aiyer 及 Yamane^[86]从事水稻土的研究表明, 其中CH₄和N₂的含量最高(CH₄高者可达50%以上), CO₂次之, 而H₂和O₂最低。此外, 土壤空气组成中还有一定数量的挥发性有机化合物类的气体。Холодный^[46]在研究土壤空气及其生物意义时指出这类气体是不溶于土壤溶液(或水)的。但它对于土壤中的生物活动却有明显的作用, 其成分是含有碳、氢、氧比较复杂的有机化合物(脂肪族)。它是木素腐殖化和腐殖质本身进一步起生物化学变化的产物, 但迄今还研究得很少。最近, 应用现代科学成就开始进一步区分土壤空气组成的研究表明, 各类土壤空气中氧的同位素组成(O¹⁶, O¹⁷, O¹⁸)的比例是不同的, 但重氧的含量是较少的(0.2%左右)^[45]。

综上所述, 虽然土壤空气的组成迄今尚无一个较为完整的内容, 但它的组成是与大气中的一样这一点已无疑问。土壤空气的组成并不是固定不变的, 而是随着外界条件及土壤本身性质的不同而变的。

许多学者^[4, 5, 13, 15, 24, 30, 31, 33, 42, 48, 61, 72, 77, 78]曾系统地研究过土壤空气(主要是CO₂和O₂)的季节性变化。所得结论可以归纳如下: (1) 土壤空气中CO₂的含量比大气中多, 而O₂则相反, 其变化也较大气中大。(2) 表层(A₁层或耕作层)土壤空气与大气中的组成极为相近, 随着深度的加深差异愈来愈大。(3) CO₂和O₂含量的变化成反相关, 二者之和稍低于大气中的含量。(4) CO₂含量的变化随着植物的生长发育而逐渐增高, 发育最盛期达到最高(禾本科植物是拔节期, 豆科植物是始花期), 以后随着植物的成熟而逐渐下降到最低值, O₂则相反。(5) CO₂含量的变化随着温度的升高而增加, 一般在夏季(7—8月)达到最高, 冬季最低, O₂则相反。但是, 也有人得到与此相反的结论, 其原因是由于土壤空气受到地表结冰层的影响, 扩散速度降到最小, 阻隔了土壤空气和大气的交换^[48]。因此, 各类土壤所处的具体条件不同, 也是影响土壤空气季节性变化的重要因素。(6) 土壤空气组成的变化与土壤中生物活性的强弱密切相关, 植物根系和微生物的活动有利于增加土壤空气中CO₂的含量。

土壤空气的组成, 除了季节性变化以外, 尚有其昼夜变化。在这里温度是主要的因子。Костычев^[28]指出, 夜间和清晨气体由大气向土壤中运动, 而白天则相反, 即土壤空气向大气中运动。

Keen^[24] 对于这种变化规律的解释是: 由于空气本身的比热很小(约 0.003), 当空气进入土壤以后就会很快地受到土温的影响。热空气向上运动由冷空气取代补充, 这种作用在夜间特别明显, 即夜间土壤下层较上层的温度高, 促使气体由大气进入土壤。白天由于太阳的辐射, 土壤上层温度高于下层, 土壤温度梯度的方向与夜间相反, 土壤空气就随着温度梯度的变化而向大气中运动。

对于土壤空气中 CO_2 比大气中含量高而 O_2 含量比大气中低的这一事实的解释, 前人的意见很不一致。Костычев^[28]、Wollny^[11] 等认为 CO_2 的形成是由于土壤中有物质矿化的结果, 涉及到土壤深层时, 则是由于下层土壤比上层土壤紧密, 使气体交换不易进行的缘故。Вернадский^[7]、Турлюн^[42] 则认为土壤中 CO_2 的形成主要是由地层中扩散而来。显然, 这种认识是很不全面的。Коссович^[26]、Бараков^[4]、Мацкевич^[33] 等认为土壤空气中 CO_2 的形成和 O_2 的消耗主要是植物根系活动的结果。Гельцер^[13]、Горбунов 和 Такарев^[16]、Макаров^[30] 等则认为主要是土壤微生物活动的结果。此外, 尚有许多学者^[9, 22, 28, 30, 67, 71] 用“土壤呼吸”的结果来说明这种变化规律, 这是把土壤中所有生物活动的作用综合在一起来说明问题的。实际上, 这样对于起作用的因素还是难以区分, 而且在什么条件下起作用的问题等也未能加以分析阐明, 只能得到一个笼统的概念。

Boussigault^[15]、Wollny^[11] 等得出的土壤空气中 CO_2 和 O_2 的含量之和与大气中二者之和相差很小的这一结论, 由于它的局限性而对以后的许多工作带来了难以弥补的损失。因为, 许多学者曾经根据这个结论, 在研究土壤空气状况时, 把注意力只集中在 CO_2 的变化规律上, 然后据此以推求 O_2 的变化规律。实际上, 在许多情况下, 土壤空气中 CO_2 和 O_2 的总和往往与大气中二者之和相差很大。因此, Дояренко^[20] 指出了上述观点的局限性, 并认为在一般情况下土壤中形成 CO_2 时需要消耗氧, 但还有许多过程生成 CO_2 而不消耗 O_2 ; 也有消耗 O_2 而不形成 CO_2 的过程。

这些都说明, 为了正确认识土壤空气组成的变化规律, 就必须对每一个组成成分直接进行研究, 才能得出符合实际情况的结果。

二、土壤空气交换的因素

研究土壤空气与大气交换的现象及其所制约

的各个因素和它们相互之间的关系是探讨土壤空气领域内的一个中心问题。1871—1873 年 Pette-nkofer 和 Fleck 先后发现了土壤空气和大气处在经常不断地交换过程, 并指出土壤表层比底层要强烈得多, 而土壤空气组成的变化是由于土壤水分运动的结果。1880 年 Wollny^[11] 的工作表明, 土壤空气和大气的交换取决于土壤微域地形及其色泽的条件。显然, 这种观点是极不完全的。以后 Костычев^[28] 根据自己的观测并综合了前人已有的研究结果得出了如下的结论: 土壤空气与大气经常相互交换, 而影响气体交换的原因是不同的。第一是气体的扩散, 但与其他因素比较起来却是次要的, 因为气体扩散的进行比较慢; 第二是大气压力的变化; 第三是土壤温度的变化, 土壤空气遇热后膨胀而从土壤中释放出来, 土温下降时气体由大气进入土壤; 第四是风的作用。最后, 他十分强调土壤干湿交替对土壤空气的更新具有很重要的作用。随后 Глинка^[15] 等皆证实了上述论点。

Дояренко^[20] 指出, 关于土壤空气容量和组成变化的自然因素有温度变化、扩散作用、水分下渗、土壤空气的流动和土壤中某些气体(如 CO_2 等)的形成。10 年以后他着重指出, 经常起作用的因素是土壤呼吸, 即由于土壤中微生物和植物根系活动促使土壤空气向外释放的结果^[53]。Russell 和 Appleyard^[77] 指出, 土壤空气中 CO_2 的变化与气压和风速的变化没有明显的关系, 而土壤空气组成的变化主要是受土壤中进行的生物化学过程的影响。近年来他强调土壤空气交换的主要因素是气体扩散^[78]。

Вильямс 及 Макаров 等则着重强调生物的作用。Макаров 认为影响土壤空气与大气交换的因素主要有四: (1) 土壤释放 CO_2 , (2) CO_2 向大气中扩散, (3) 土壤的物理和化学性质(包括透气性、空气容量、土壤结构、有机质含量等), (4) 气象因素。

Baver^[54] 认为气象因素、土壤温度变化、大气压力变化、风力作用、降雨作用和气体的扩散作用都是影响土壤空气更新的因素。Поясов^[36] 在详细论述了土壤空气与大气交换的因素以后指出, 土壤温度变化、大气压力变化、土壤含水量的变化(降水、灌溉和蒸发)、风力作用以及地下水位的变化等起着相当重要的作用。

综上所述, 可以把影响土壤空气和大气不断

相互交换的因素归纳如下:

(1) 气象条件: 包括大气和土壤温度的变化、空气压力变化、降雨和风力的作用等。

(2) 土壤物理及化学性质: 包括土壤的通气性、空气容量、土壤质地、结构和水分状况、有机质的含量以及养分分布状况等。

(3) 土壤生物及生物化学作用: 包括土壤微生物区系和动物区系及其活动能力以及植物根系呼吸作用等。

(4) 人类生产活动: 包括耕作、施肥、灌溉、排水等制度以及其他农业技术措施等。

最后还应指出, 上述四类因素彼此间的关系是十分密切而不可分割的。事实上, 对于土壤空气与大气的交换过程的影响是上述因素综合作用的结果。但是, 每一因素皆有其特点, 有时甚至是起主导作用的, 而土壤空气交换的方式却只能通过气体扩散作用来实现。

三、土壤空气的扩散作用

土壤空气运动的理论是建立在气体分子运动学说的基础上的。根据气体分子运动学说, 所有气体分子是向所有方向永恒运动。组成气体的各个成分的运动强度是由该种气体成分在气体组成中的浓度(或称分压)所决定, 这就是气体的扩散作用。土壤空气中 CO_2 的含量比大气中多, 而 O_2 相反。因此, 就必然以扩散的方式使土壤空气与大气进行着不断的交换。

据记载^[54], 1904 年 Buckingham 第一个运用气体动力学研究了土壤空气的扩散作用。他以气体扩散常数表示二个对流气体彼此向相反的方向扩散。此常数规定为二个对流气体的压力梯度为 1 毫米水银柱, 每秒通过截面 1 平方厘米、厚度 1 厘米土层的平均毫升数。他认为土壤的扩散常数 (D) 与自由孔隙度 (S) 的平方成比例:

$$D = KS^2 \quad (1)$$

式中 K 为比例常数, 称为扩散系数。如果 $S = 1$ 时, 则 $D = K$ 。按 Buckingham 的计算, 此值等于 2.16×10^{-4} 。该值与 Loschmidt 求出的 2.20×10^{-4} 和 Obermayer 求出的 2.13×10^{-4} 十分接近。因此, Buckingham 认为控制扩散作用的土壤因素只受自由孔隙度变化的影响, 而土壤的其他性质, 如质地、结构、含水量等实际上皆不影响土壤空气的扩散作用。

显然, Buckingham 的论点具有相当的局限

性。为了进一步研究这个问题, 苏联农业物理研究所 Вершинин 和 Кириленко^[8] 的工作表明, 土壤空气的扩散常数应该是单位时间(秒)通过单位截面(1 厘米²)单位厚度(1 厘米)的气体体积(厘米³), 亦即扩散速度(厘米³/秒·厘米²·厘米)。他们认为气体的扩散与土壤中有有效孔隙的关系十分密切(有效孔隙度 = 总孔隙度 - 土壤水分所占的孔隙度); 扩散不仅取决于总的有效孔隙度, 而且也取决于孔隙的连续性(通路)和封闭孔隙的数量。在指出 Buckingham 公式不正确的同时, 说明气体扩散常数是重要的常数, 对每种土壤皆应具体测定, 只靠计算是难以反映实际情况的。

Penman^[74,75] 进一步说明了土壤空气扩散的特点, 并认为扩散速率 $\frac{dq}{dt}$ (q 为气体的扩散量, t 为时间)在一个比较坚固的多孔体中是:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{D}{\beta} A \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (2)$$

式中 D 为扩散常数, A 为多孔体的横截面积, P_1 和 P_2 为在距离 l 两端的气体分压, 即分压梯度 $\left(\frac{P_1 - P_2}{l}\right)$, β 为比例常数。

式(2)说明气体扩散率与通透的截面 (A), 通过距离 (l) 和分压梯度成比例。但是, 在土壤中由于孔隙只占土壤的一部分, 又不都是直通的, 而是弯曲的, 所以对土壤来说应该是:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{D_0}{\beta} AS \frac{P_1 - P_2}{l_e} \quad (3)$$

式中 D_0 为气体在大气中的扩散系数, S 为孔隙度, l_e 为气体通过的实际距离(有效距离)。将式(2)和(3)合并则:

$$D = D_0 S \frac{l}{l_e} \text{ 或 } \frac{D}{D_0} = S \frac{l}{l_e} \quad (4)$$

$\frac{D}{D_0}$ 称为相对扩散系数。由于土壤颗粒排列不同, 其孔隙状况亦不同, $\frac{l}{l_e}$ 的比值也不一样。所以, 根据相对扩散系数 $\left(\frac{D}{D_0}\right)$ 的数值可以作为鉴定土壤空气扩散的指标。

根据土粒疏松和紧密两种极端的排列, 从理论上求得的 $\frac{D}{D_0}$ 分别为 0.6365 和 0.8265。Penman 采用了各种多孔体的孔隙在较高范围内 (60—70%) 测定的结果是 $\frac{D}{D_0} = 0.66S$ 。

Taylor^[81] 通过试验对 Penman 的公式进行

了修改,提出了一个比较简单的公式:

$$D = \frac{1}{\lambda^2} D_0 \quad (5)$$

式中 λ 是一个参数, Taylor 称谓等量扩散距 (equivalent diffusion distance), 它表示气体通过单位截面自由扩散的路程, 以长度为单位。 λ 随着土壤含水量的增加而增加, 随着有效孔隙度的增加而成比例下降。 $\frac{1}{\lambda^2}$ 相当于 Penman 的 $\frac{D}{D_0}$, Taylor 测得壤土的 $\frac{1}{\lambda^2} = \frac{D}{D_0} = 0.6685$, 这与 Penman 的

结果相接近。 Blake 和 Page^[58] 利用 CO_2 直接测定了 Paulding 粘土和 Brookston 粘土的 $\frac{D}{D_0}$ 值分

别为 0.6185 和 0.7985。 后者是当土壤孔隙度降低到 10%, 且因孔隙的封闭性而扩散作用即行停止时测定的结果。 因此, 土壤孔隙的弯曲程度并不决定于土粒的大小, 而是决定于它们的排列状况。 实际上, 土壤中并不是所有的孔隙都能使空气自由通过, 尤其是那些切断和封闭的孔隙, 即使在干燥状态下也不能有效地参于扩散作用。

但是, 在一般情况下, 土壤具有粗大的颗粒总是比较细小的颗粒具有更高的相对扩散系数 ($\frac{D}{D_0}$)。 根据 Поясов^[37] 研究良好结构普通黑钙土和分散粘质普通黑钙土, 当土壤孔隙度皆为 40% 时, $\frac{D}{D_0}$ 分别为 0.265 和 0.180。

由此可知, 土壤空气的扩散作用不仅与孔隙的数量和几何形状有关, 而且也与孔隙的粗细有关。 鉴于这种情况 Поясов 将相对扩散系数与孔隙的关系以下式表示:

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1}{n} (S - S_m) \quad (6)$$

式中 n 为弯曲孔隙系数, 它通常是大于 1, 如在疏松排列时为 $\frac{\pi}{2} = 1.57$, 而在紧密排列时为 $\frac{\pi}{3 \sin 60^\circ} = 1.21$, S 为总孔隙度, S_m 为不参加于扩散作用的孔隙 (封闭的或无效的孔隙), 该值受到含水量的影响很大, 若排除水分的影响其值是很小的。

综上所述, 所有研究土壤空气扩散作用的大都局限在土壤颗粒的粗细及其排列状况、土壤孔隙的大小及其数量以及它们在土壤中的变化等范围。 至于联系到土壤的物理、化学及生物特性全面地进行研究还是一个有待深入探讨的问题。

四、土壤空气与土壤性质及植物生长的关系

土壤空气对土壤性质影响的研究报道比较少, 而在植物生理方面则比较多。 这一问题的主要研究方面偏重于土壤空气中 CO_2 和 O_2 的作用。 所涉及的问题较广, 大致有土壤空气对成土过程的影响、对土壤氧化还原过程的影响、在土壤结构形成中的作用、对养分转化以及对植物种子发芽和植株生长发育的影响等方面。

1. 对成土过程的影响: 土壤空气对土壤的化学及生物过程的影响较大, 因此, 土壤空气在成土过程中起着重要的作用。 空气溶于水, 由于氧的作用可以氧化某些矿物, 例如硫铁矿在氧的作用下可以变成溶解态的硫酸铁。 Шмук^[50] 指出这一过程不仅可以增加易溶性的铁盐, 而且还可以氧化低铁化合物以减少对植物的危害。

CO_2 溶于水以后, 虽然只有极少量变成 H_2CO_3 , 但其作用甚大。 它可以促使许多碳酸盐 (如 Ca 、 Mg 等) 的溶解, 使原来的盐类变成易溶性的, 从而丰富了土壤溶液中的 Ca^{++} 、 Mg^{++} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Fe^{+++} 等。 这些离子可被下渗的土壤水分带走, 也可能淀积在较深的土层中, 或随地下水的流向而流到别处。

2. 对氧化还原过程及养分转化的影响: 土壤空气在调节土壤的氧化还原条件上具有重要的作用。 当土壤水分过多时, 土壤空气的含量明显下降, 气体扩散作用大大减弱, 土壤可以在不长的时期由原来以氧化过程为主而转向以还原过程为主的状况^[12, 17, 41]。

Геллер^[12] 的工作表明, 土壤的氧化还原电位在不同轮作区, 在春季都很相近, 而随着植物的生长则有明显的下降, 但是, 在裸地几乎没有变化, 而且还积累了植物易利用的硝态氮。

Сердобольский^[41] 在研究生草灰化土的氧化还原过程以后指出, 氧化还原电位降低到 200 毫伏以下, 土壤中就出现低价铁和低价锰, 并且硝态氮急剧下降接近于零。 这时, 开始影响植物的氮素营养, 并因大量低价铁、锰的化合物的存在而使植物中毒。 当土壤的氧化还原电位高到 700 毫伏以上时, 土壤中几乎只是好气的条件。 这时, 常出现某些植物营养物质的不足。

Рабинович^[38] 认为土壤中水分适量时, 不仅有利于好气微生物的活动, 而且也有利于嫌气微

生物的活动, 它们的活动互为补偿。当土壤中氧化还原电位高时有利于好气细菌的活动, 其结果对自己造成了一个不利的还原条件, 但随之而来的是嫌气细菌的活动, 其结果将使土壤的氧化还原电位下降。

一般认为, 土壤处于空气充足、扩散作用较强的条件下, 有机化合物分解的最终产物为二氧化碳、水、硝酸、硫酸、磷酸等盐类以及钙、镁、钾、铁等化合物。这些都是可以供给植物生长发育的营养物质。但是, 在通气不良、扩散作用很弱的土壤中, 有机物质分解的最终产物有各种还原性化合物和有害于植物的气体, 如甲烷、硫化氢、氨、醛类以及低价铁和锰。这些产物在不同程度上皆有害于植物和土壤生物的正常活动。但是, 应该看到大部分土壤皆有这两个过程的交替作用。

土壤中氮素化合物的分解和转化与外界条件的关系十分密切, 而土壤空气状况只是一个方面。土壤中氨化作用可以在土壤通气的任何条件下进行, 但硝化作用并非如此, 而是需要足够空气(氧)的供应^[17, 19, 47, 63]。土壤中氧气供应不足时, NO_3^- 在反硝化作用下还原成 N_2 而丢失。因此, 为了防止 N_2 的损失就应设法调节土壤以保证有良好的通气条件。但是, 这种观点也曾遭到许多学者的怀疑和反对。如 Broadbent^[62] 认为, 土壤在通气良好的条件下反硝化作用进行得相当强烈。Работнова^[39] 也指出, 有机物质的存在, 反硝化作用可以在不同程度的好气条件下进行。但是, 在这种条件下, 反硝化作用严格地以好气硝化菌和固氮菌的活动为补偿。Федоров^[44] 指出, 良好的土壤通气性不但可以改善固氮菌的活动条件, 而且可以提高固定大气中氮素的能力。因此, 植物可吸收利用的氨态和硝态氮素的含量在一定程度上取决于土壤中空气的扩散作用。

植物可吸收利用的磷素与土壤的通气性有着密切的关系。Яроков、Кауричев 等人^[51] 关于土壤氧化还原条件对磷素形态进行了广泛的研究。他们的工作说明土壤处于水分暂时饱和条件下, 磷素的溶解度大大提高, 这与低铁化合物的形成有关; 而土壤干湿交替到干燥状态(通气性条件变化), 其低铁转化为高铁的同时, 降低了磷素的溶解度。Лебедев^[29] 的工作表明土壤干旱时可以提高有效磷的含量。Карпинский 和 Замятин^[23] 也得到了同样的结果, 即土壤处于疏松状态和适量水分条件下可溶性磷有所提高。以后 Гречин^[19]

的工作证明了土壤处于通气良好的条件下, 可溶性磷素的含量可以大量积累, 而通气不良时则相反。看来, 土壤中有效磷的转化与土壤通气条件的关系尚须考虑到土壤的水、热条件进行深入的研究。

3. 对土壤结构形成的影响: 土壤空气状况对土壤肥力重要因素之一的团粒结构形成问题的研究, 在农业生产上是很有意义的。

Костычев^[27] 首先指出, 为了恢复和提高土壤肥力, 种植多年生牧草是很有成效的农业措施, 因为种植多年生牧草在土壤团粒结构形成上起着巨大的作用。Вильямс 发展了 Костычев 的思想, 在研究土壤形成过程和土壤肥力发展及土壤腐殖质问题相互关系的基础上制定了著名的草田轮作制。同时指出了土壤团粒结构的水稳性对农业增产的重要意义。1919 年 Вильямс^[10] 认为土壤水稳性团粒结构的形成主要是借助于好气条件下生成胡敏酸的作用, 而后期于 1936 年^[9] 又认为是嫌气条件下生成乌里敏酸的作用, 但是同样强调了多年生牧草的作用。1954 年 Мальцев^[32] 根据新的耕作法证明了不但多年生牧草、而且一年生牧草也有恢复土壤水稳性团粒结构的作用。目前已经公认多年生牧草和一年生牧草同样可以创造土壤团粒结构, 不过前者较后者的作用要大一些。又据 Киселев^[25] 的工作表明, 在好气或嫌气条件下均可形成水稳性团粒结构, 但嫌气条件比好气条件形成的要多些。

Антипов-Каратаев^[1] 指出, 在氧化过程中能改善土壤的团粒结构。在这种条件下, 土壤中形成氧化铁的水化物可以胶结土壤颗粒, 而在还原过程中, 铁转化为可溶性的化合物, 致使丢失其胶结土壤颗粒的能力。Гельцер^[14]、Мишустин^[34] 等工作表明, 土壤好气过程中一些细菌和真菌具有构成活性腐殖质的能力, 以供给土壤水稳性团粒结构的形成。Тюлин^[43] 也指出水稳性团粒结构的形成要有胡敏酸钙和胡敏酸铁的参与, 而在好气条件下是它们形成的。Самцевич^[40] 的工作则直接反对关于土壤水稳性团粒结构在嫌气条件下形成的可能性。总之, 直到目前, 关于土壤通气性对团粒结构形成的作用还存在着争论。这就要求从各方面结合生物化学过程进行深入的研究。

4. 对植物生长发育的影响: 土壤通气性与植物生长发育的关系是在研究植物呼吸作用过程中

逐渐明确起来的。许多工作证明植物根系(包括块茎植物)和地上部器官的形成皆要求有足够的氧气供应,如缺氧则生长受到抑制或停止。但是,各类植物对土壤通气性的要求是不相同的,如水生植物对氧气的需要就比较弱。

据记载^[79], Cannon 系统地研究了不同氧分压对植物根系发育的影响以后指出,当氧分压低于0.5%,植物根系的生长在较长时间内是很缓慢的,而当氧分压增至2%时生长正常;甚至当CO₂的分压不超过30—50%时,根系仍能正常生长。若氧分压增加到10%,温度18℃时根系发育正常;但当温度超过30℃以上时,则生长速度显著下降。这说明温度的升高,植物的需氧量也增高。Boynton等人根据植物根系的活动强弱与氧分压的关系指出,根系生长的最低氧分压为3%,而在1%时根系明显不增长,根尖发育的氧分压为5—10%,新根出生的氧分压应超过12%,植物对灰分元素的吸收和积累需要氧分压高于15%。Girton观测到植物根系生长在通气水培下比不通气水培下要快得多。氧分压1.5%时,根系在17天以内没有任何增长,而在4.6—6.1%时根系生长速度仅及正常生长的一半。当含有CO₂ 37%的混合气体通入8天后,根系根本不生长。

Leonard 和 Pinckard^[70]同时采用CO₂和O₂的不同浓度对棉花根系生长的影响进行了研究。每天测定根的增长量表明,10%的CO₂和10—21%范围的O₂对根的发育没有影响。O₂含量低于5%和90—100%时一样对根系生长有明显的抑制作用。另一组试验中,O₂含量维持21%,而CO₂变化在0—100%范围。两周以后,说明CO₂的浓度低于15%时对根系生长没有影响;30%的CO₂其生长速度下降了约一半;而CO₂高达60%以上时根系生长完全停止。Vlamiš^[83]等人用各种气体成分(O₂、N₂、CO₂、CH₄等)对大麦、蕃茄和水稻的生长进行的试验表明,通气良好时,即充分供给氧气时,对植物地上部分和地下部分皆有良好的作用,而CO₂和CH₄则有不良影响。

植物种子发芽的需氧条件已为人们所注意。Vlamiš^[82]指出,在O₂低于0.2%时大麦种子发芽即行停止,1%时其发芽率仅有30%,2.5%时为45%,5.2%时为60%,9.5%以上和21%的相同。Bendall^[56]的工作说明CO₂超过20%时,则影响到种子的正常发芽。Гречин 等人^[18]也得到了类似的结果。他们认为种子正常发芽的O₂浓

度需在10%以上,低于5%发芽受到很大的抑制,低于0.5%时则很快死亡。CO₂高达30%以上时,即使有少量O₂的供应也不利于种子发芽,甚至完全不发芽。

根据上述研究的结果可以认为,O₂和CO₂的浓度只在一定范围内对植物生长是相互起作用的。但从田间实际情况出发,CO₂浓度过高的土壤是极其有限的,因此CO₂和O₂比较起来其意义是十分有限的。同时,仅仅考虑到O₂的浓度还不够,而它在土壤中的扩散往往比起它的绝对浓度更加重要,这已为许多学者所公认^[57,68,69,76,84]。

Erickson^[69]指出,O₂的扩散与植物的生长有着直接的关系,并认为O₂的扩散作用与光、热、肥对植物生长的作用同等重要。Doyle^[64]等人得出O₂的扩散与蕃茄产量的关系为一直线相关。Wiersum^[85]从土壤中O₂的扩散联系到植物根系生长发育的研究也表明,土壤中O₂的扩散率是决定植物根系发育和分布的重要因素之一。后来许多工作更明确地说明了这一问题,并提出植物根系发育所需最低O₂扩散率为23—25×10⁻⁸克/厘米²·秒^[57,71,80]。

结 束 语

土壤空气的研究多偏重于空气的状况,而且资料主要集中在CO₂和O₂的动态变化上,其他组分的资料还很少。因此,对于全面认识土壤空气的变化规律还缺乏足够的资料。关于土壤空气交换的机制研究进展不大,这方面主要的缺点是把土壤当作一个单纯的多孔体系进行研究,而很少考虑到土壤本身的有关属性。关于土壤空气与土壤性质的相互关系的研究也还没有全面展开,而结合农业生产上存在的问题进行土壤空气专门性的研究工作极少。为了更好地在农业生产上发挥这一分支学科的作用,看来今后应该紧密结合土壤性质和植物需要以及土壤改良和农业增产措施开展土壤空气的综合研究是一个相当重要的任务。

参 考 文 献

- [1] Антипов-Каратаев, И. Н.: Учение о почве, как полидисперсной системе и его развитие в СССР за 25 лет (1917—1942). Почвоведение, 6: 3—26, 1943.
- [2] Антипов-Каратаев, И. Н.: Методы исследования сорбции газов и паров почвами.

- Современные методы исследования физико-химических свойств почвы, вып. 3, стр. 50—87, АН СССР, 1948.
- [3] Антипов-Каратаев, И. Н.: Химия и физико-химия почв в СССР. Почвоведение, № 11, 29—42, 1957.
- [4] Бараков, П. Ф.: Содержание CO_2 в почвах в различные периоды роста растений. Жур. опытно-агроном., т. XI, кн. 3, 1910.
- [5] Буссенго, Ж. Б.: О составе воздуха, заключенного в почве. Избранные произведения по физиологии растений и агрохимии, 2-изд., стр. 394—408, СГЗ, М., 1957.
- [6] Вернер, А. Р., Гордеева, Е. А.: Содержание кислорода и сероводорода в грунтовых вадах (верховодках) барабы. Почвоведение, № 11, 1012—1018, 1952.
- [7] Вернадский, В. И.: К вопросу о химическом составе почв. Почвоведение, № 2—3, 1—21, 1913.
- [8] Вершинин, П. В. и Кириленко, Н. В.: О диффузии CO_2 через почву. Почвоведение, № 5, 325—328, 1948.
- [9] Вильямс, В. Р.: Почвоведение (1936), стр. 35—77, 269—300, 1946.
- [10] Вильямс, В. Р.: Общее земледелие (1919). Собрание сочинений, т. III, стр. 67—69, 316, М., 1949.
- [11] Вольни, Э. (Wollny, E.): Физические свойства почвы. Одесса., 1896.
- [12] Геллер, И. А.: Об окислительно-восстановительных свойствах почвы. Окислительно-восстановительный режим почв и прорастание семян. Тр. по экономике, агротехнике, механизации, селекции и защите растений сахарной свеклы и др. культур. т. XXXII, стр. 39—43, Киев-Харьков, 1950.
- [13] Гельцер, Ф. Ю.: Динамика углекислоты почвенного воздуха в условиях орошаемого земледелия. Тр. Ак-Кавакской опытно-оросит.-ст. вып. 10, 1930.
- [14] Гельцер, Ф. Ю.: Значение микроорганизмов в образовании перегноя и прочности структуры почвы. СХГ., М., 1940.
- [15] Глинка, К. Д.: Почвоведение (1908). стр. 262—263, 273—276, 1931.
- [16] Горбунов, Н. И. и Токарев, В. М.: Динамика CO_2 почвенного воздуха в условиях орошения. Проблемы Сов. почвоведения, № 14, 171—188, 1946.
- [17] Гречин, И. П.: Воздушный режим и плодородие дерново-подзолистых почв. Докл. ТСХА, 84: 5—17, 1963.
- [18] Гречин, И. П., Курлыкова, М. В.: Прорастание семян в зависимости от различных концентраций кислорода и углекислоты в газообразной фазе дерново-подзолистой почвы. Докл. ТСХА, 84: 59—66, 1963.
- [19] Гречин, И. П.: Роль свободного кислорода в почвенных процессах. Физика, Химия, Биология и Минералогия почв СССР. Докл. к VIII Междун. конгр. почвов., стр. 188—194, М., 1964.
- [20] Дояренко, А. Г.: К изучению аэрации почвы. Изв. Моск. с.-х. ин-та, год XXI, кн. 1, 1915.
- [21] Дояренко, А. Г.: Почвенный воздух, как составная часть почвы. Научно-агрон. жур. 3, 1926.
- [22] Дояренко, А. Г.: “Дыхание почвы”, как фактор поглощения почвой газов. Научно-агрон. жур. 12, 1926.
- [23] Карпинский, Н. П. и Замятина, В. Б.: Фосфатный уровень почвы. Почвоведение, № 11, 27—39, 1958.
- [24] Кин, Б. А. (Кенн, В. А.): Физические свойства почвы. гл. X, стр. 236—250, ГТИ, 1933.
- [25] Киселев, А. Н.: Структура почвы и условия ее образования. Почвоведение, 10: 11—22, 1955.
- [26] Коссович, П. С.: Количественное определение CO_2 , выделяемой корнями во время их развития. Жур. опыта. агроном., 5: 482—500, 1904.
- [27] Костычев, П. А.: Из степной полосы Воронежской и Харьковской губерний. Сельское хозяйство и лесоводство, часть СХХХVII, Июль, 1881.
- [28] Костычев, П. А.: Почвоведение (1886—1887), стр. 146—156, 1940.
- [29] Лебедянцева, А. Н.: Высыхание почвы, как природный фактор образования ее плодородия. Тр. Шатиловской с.-х. опытн. ст., сер. I, Химическая лаборатория, вып. 5 (1927), Орел, 1928.
- [30] Макаров, Б. Н.: Динамика газообмена между почвой и атмосферой в течение вегетационного периода под различными культурами севооборота. Почвоведение, № 3, 271—277, 1952.
- [31] Макаров, Б. Н., Мацкевич, В. Б., Бондарев, А. Г. и Николаева, И. Н.: Воздушный режим некоторых типов почв СССР. Физика, Химия, Биология и Минералогия почв СССР, Докл. к VIII Междун. конгр. почвов., стр. 120—124, м., 1964.
- [32] Мальцев, Т. С.: О методах обработки почвы и посева, способствующих получению высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. СХГ, 1954.
- [33] Мацкевич, В. Б.: Наблюдения над режимом углекислоты в почвенном воздухе мощных черноземов. Тр. Почвен. ин-та им. Докучаева,

- т. XXXI, стр. 214—238, 1950.
- [34] Мишустин, Б. Н.: Микробиологические процессы и структура почвы. Природа, 11: 27—38, 1951.
- [35] Новиков, М. А.: Состав почвенного воздуха торфяно-болотных почв. Почвоведение, № 2, 58—68, 1962.
- [36] Поясов, Н. П.: Основы агрофизики. ч. в. Аэрация почвы, стр. 889—892, 1959.
- [37] Поясов, Н. П.: Диффузия углекислого газа в почве. Сб. Тр. по агрономической физике, 8: 190—209, 1960.
- [38] Рабинович, В. А.: О зависимости окислительного потенциала почвы от жизнедеятельности почвенной микрофлоры. Докл. АН СССР, т. 103, 2: 305—308, 1955.
- [39] Работнова, И. Л.: Роль физико-химических условий (рН и rH_2) в жизнедеятельности микроорганизмов. стр. 210—212, Изд. АН СССР, 1957.
- [40] Самцевич, С. А.: Об анаэробных и аэробных условиях образования структур почвы. Почвоведение, № 5, 54—59, 1955.
- [41] Сердобольский, И. П.: Химия почвы. стр. 132—136, АН СССР, 1953.
- [42] Турлюн, И. А.: К теории газообмена в почвах. Почвоведение, № 7, 22—30, 1957.
- [43] Тюлин, А. Ф. и Коровкина, А. В.: Различное качество почвенных водопрочных агрегатов в зависимости от группового состава вторичных частиц менее 0,01 мм. Почвоведение, № 3, 142—150, 1950.
- [44] Федоров, М. В.: Биохимическая фиксация азота атмосферы. стр. 510—512, СХГ, 1952.
- [45] Хитров, Л. М. и Задорожный, И. К.: Фракционирование изотопов кислорода в почве. Почвоведение, № 1, 5—14, 1960.
- [46] Холодный, Н. Г.: Почвенная атмосфера как источник органических питательных веществ для растений. Почвоведение, № 1, 16—29, 1951.
- [47] Черненко, А. Д.: Воздушный режим почвы и урожай сахарной свеклы. Химизация социалистического земледелия, 7—8, 1936.
- [48] Чань Юнь-шэн: Динамика содержания кислорода и углекислоты в почвенном воздухе Дерново-подзолистой почвы. Докл. ТСХА, 42: 145—152, 1959.
- [49] Шилова, Е. И. и Крейер, К. Г.: Углекислота почвенного раствора и ее роль в почвообразовании. Почвоведение, № 7, 65—72, 1957.
- [50] Шмук, А. А.: Динамика режима питательных веществ в почве. Тр. Т. I: 47—53, 1950.
- [51] Ярков, С. П., Кулаков, Е. В., Кауричев, И. С.: Образование закисного железа и особенности фосфатного режим в дерново-подзолистых почвах. Почвоведение, № 8, 466—475, 1950.
- [52] Alberda, T. H.: Growth and root development of lowland rice and its relation to oxygen supply. Plant and Soil, 5: 1, 1—26, 1953.
- [53] Baver, L. D.: The effect of physical properties of soil on the efficient use of fertilizers. Agron. Jour., 43:356—363, 1951.
- [54] Baver, L. D.: Soil Physics. 3rd ed., pp. 199—204, 209—218, John Wiley and Sons, Inc., N. Y., 1956.
- [55] Baver, L. D. and Fernsworth, R. B.: Soil structure effects in the growth of sugar beets. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 5: 45—48, 1940.
- [56] Bendall, D. S., Ranson, S. L. and Walker, D. A.: Some effects of carbon dioxide-bicarbonate mixtures on the oxidation and reduction of cytochrome c by *Ricinus* mitochondria. Nature, 181: No. 4602: 133—134, 1958.
- [57] Bertrand, A. R. and Kohnke, H.: Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and the growth of corn roots. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 21: 135—140, 1957.
- [58] Blake, G. R. and Page, J. B.: Direct measurement of gaseous diffusion in soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 13: 37—42, 1948.
- [59] Bolanov, P.: Types of water-air regimes of soils. 8th Intern. Congr. Soil Sci., Abstracts of papers, I: Soil Physics, pp. 55—56, 1964.
- [60] Boynton, D. and Compton, O. C.: Normal seasonal changes of oxygen and carbon dioxide percentages in gas from the largest pores of three orchard subsoils. Soil Sci., 57: 107—117, 1944.
- [61] Boynton, D. and Reuther, W.: A way of sampling soil gases in dense subsoil and some of its advantages and limitations. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 3:37—42, 1938.
- [62] Broadbent, F. E.: Denitrification in some California soils. Soil Sci., 72: 129—137, 1951.
- [63] Broadbent, F. E., Stojanovic, B. F.: The effect of partial pressure of oxygen on some soil nitrogen transformations. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 16: 359—363, 1952.
- [64] Doyle, J. J. and Maclean, A. A.: The effect of soil aggregate size on availability of oxygen and on growth of tomatoes. Canad. J. Soil Sci., 38:143—146, 1958.
- [65] Erickson, A. E. and Van Doren, D. M.: The relation of plant growth and yield to soil oxygen availability. Transactions of 7th Intern. Congr. Soil Sci., III: pp. 428—434,

- 1961.
- [66] Kopecky, J.: Investigations of the relations of water to soil. Proc. 1st Intern. Congr. Soil Sci., 1: 495—503, 1927.
- [67] Kristensen, K. J., Enoch, H.: Soil air composition and oxygen diffusion rate in soil columns at different heights above a water table. 8th Intern. Congr. Soil Sci., Abstracts of papers, I: Soil Physics, pp. 57—58, 1964.
- [68] Lawton, K.: The influence of soil aeration on the growth and absorption of nutrients by corn plants. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 10:263—268, 1945.
- [69] Lemon, E. R. and Erickson, A. E.: The measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum microelectrode. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 16: 160—163, 1952.
- [70] Leonard, O. A., Pinckard, J. A.: Effect of various oxygen and carbon dioxide concentrations on cotton root development. Plant Physiol., 21: 18—36, 1946.
- [71] Letey, J., Stolzy, L. H., Blank, G. B.: Effect of duration and timing of low soil oxygen content on shoot and root growth. Agron. J., 54: 34—37, 1962.
- [72] Lipps, R. C. and Fox, R. L.: Root activity of sub-irrigated alfalfa as related to soil moisture, temperature, and oxygen supply. Soil Sci., 97: 4—12, 1964.
- [73] Lundegårdh, H.: Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. Soil Sci., 23:417—453, 1927.
- [74] Penman, H. L.: Gas and Vapour movements in the soil. I. The diffusion of vapours through porous solids. J. Agric. Sci., 30: 437—462, 1940.
- [75] Penman, H. L.: Gas and vapour movements in the soil. II. The diffusion of carbon dioxide through porous solids. J. Agric. Sci., 30: 570—581, 1940.
- [76] Raney, W. A.: Field measurement of oxygen diffusion through soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 14: 61—65, 1949.
- [77] Russell, E. J. and Appleyard, A.: The atmosphere of the soil, its composition and the causes of variation. J. Agric. Sci., 7: 1—45, 1915.
- [78] Russell, E. W.: Soil conditions and plant growth. 9th ed., pp. 361—371, 1961.
- [79] Shaw, B. T.: Soil physical conditions and plant growth, 1952. (Физические условия почвы и растение. стр. 300—309, И-Л., М., 1955.).
- [80] Stolzy, L. H., Letey, J., Szuszkiewicz, T. E. Etal.: Root growth and diffusion rates as functions of oxygen concentration. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 25:463—467, 1961.
- [81] Taylor, S. A.: Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 14:55—61, 1949.
- [82] Vlamis, J. and Davis, A. R.: Germination, growth and respiration of rice and barley seedlings at low oxygen pressures. Plant Physiol., 18: 685—692, 1943.
- [83] Vlamis, J. and Davis, A. R.: Effect of oxygen tension on certain physiological responses of rice, barley, and tomato. Plant Physiol., 19: 33—51, 1944.
- [84] Wiersma, D. and Mortland, M. M.: Response of sugar beets to peroxide fertilization and its relation to oxygen diffusion. Soil Sci., 75: 355—360, 1953.
- [85] Wiersum, L. K.: Some experiences in soil aeration measurements and relationships to depth of rooting. Netherlands J. Agric. Sci., 8: 245—252, 1960.
- [86] Yamane, I.: Metabolism in muck paddy soil. II. Determination of gases evolved from paddy field—estimation of decomposable organic matter—. Soil and plant food, 4: 25—31, 1958.
- [87] Yoder, E. R.: The significance of soil structure in relation to the tilth problem. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 2: 21—33, 1937.