

土壤进气值和发泡点测定方法的研究*

解迎革^{1a, 2}, 王国栋^{1b}, 薛绪掌²,
刘云鹏^{1b}, 李霞^{1b}

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100;

2 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

[摘要] 应用土壤电导率与基模吸力的关系, 判断和测定了土壤的进气值, 采用改进后的砂型漏斗装置测定了土壤的发泡点。对脱水过程中3个不同剖面层次土壤进气值和发泡点的测定结果表明, 耕作表层(A_p)土壤的进气值和发泡点分别为1.343和5.880 kPa; 淋溶淀积过渡层(AB)土壤的进气值和发泡点分别为2.597和4.116 kPa; 埋藏表层(A_b)土壤的进气值和发泡点分别为0.451和6.076 kPa。由此可见, 土壤的进气值与发泡点的数值明显不同, 进气值与发泡点是2个不同的概念。

[关键词] 土壤; 进气值; 发泡点; 电导率; 基模吸力

[中图分类号] S154.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)09-0108-05

Richards等^[1]在研究多孔陶瓷板的脱水过程时, 最早提出了发泡点和进气值的概念并给出了其定义, 即当对水分饱和的多孔陶瓷板的一边增加气压到一定值时, 陶瓷板开始排水, 但空气不能透过陶瓷板, 此时陶瓷板的基模吸力(与陶瓷板两面的气压差对应)定义为进气值; 当继续加压时, 陶瓷板所含的水分持续排出, 到一定程度时, 陶瓷板的导气率由0变为非0, 空气可以透过陶瓷板, 此时陶瓷板的水分状况(用含水量或基模吸力衡量)为陶瓷板的发泡点。Brooks等^[2]注意到, 当多孔介质的液体饱和度高于某一定值, 空气不能透过, 只有其液体饱和度低于某一定值时, 其导气率才突变为非0值。White^[3]还研究了多种刚性多孔介质(砂岩)的脱水过程, 该试验测定数据表明, 进气值和发泡点的值明显不同, 甚至几种砂岩的发泡点超过进气值的2倍, 且发泡点时的液体含量可低至总孔隙度的55.3%^[3-5]。

土壤也属于多孔介质, 其进气值和发泡点均与土壤的水气平衡关系有关, 是研究土壤水分运动和土壤与大气气体交换的重要参数。Pierre等^[6]观测到田间水分入渗后, 土壤水分再分布过程中的土壤空气压力低于大气压, 这在某种程度上暗示当基模吸力小于发泡点时, 排水过程中有空气进入了多孔

介质孔隙的机理。Luckner等^[7]在采纳进气值概念的同时, 定义了“残余空气含量”(Residual Air Content), 即土壤导气率从0到非0时的土壤空气含量。

由于土壤这种多孔介质与砂岩、陶瓷板等刚性介质间存在着区别, 故在测定土壤进气值和发泡点时所采用的方法会有所不同。本研究采用土壤电导率与基模吸力的关系判断和测定土壤的进气值, 采用改进后的砂型漏斗装置测定土壤的发泡点, 准确地测定了土壤脱水过程中的进气值和发泡点, 以期为土壤水分运动、土壤水气平衡以及土壤-植物-大气连续体等方面的相关研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤采自北京昌平小汤山镇国家精准农业基地, 整个试验站的土壤均系山前冲积而成, 按照美国的土壤分类系统, 其土族名称为细壤质复合矿物型深厚石灰性半湿润软土(Pachic Calcicustoll, Fine Loamy, Mixed, Mesic)。本研究对采自3个土壤剖面层A_p(耕作表层)、AB(淋溶淀积过渡层)、A_b(埋藏表层)的土壤分别测定了各自的进气值和发泡点, 并测定其持水曲线。各个剖面层次的土壤样品自然

* [收稿日期] 2005-04-18

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50209001; 50479064); 北京市科技新星计划项目(H020821340130)

[作者简介] 解迎革(1976-), 男, 山西平陆人, 助教, 在读硕士, 主要从事土壤水分的精确控制及其应用研究。

[通讯作者] 薛绪掌(1967-), 男, 陕西韩城人, 副研究员, 博士, 主要从事节水农业和精准农业的研究。E-mail: xuexz@nrcita.org.cn

风干且过 1 mm 筛, 表 1 为 3 种土壤的基本性质。

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Properties of three kinds of soils

土壤剖面层次 Soil profile	深度/m Depth	物理性粘粒 (< 0.01 mm) 含量/% Amount of physical clay (< 0.01 mm)	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$) Organic M	结构描述 Description of structure
Ap	0~ 22	26.2	3.35	细团粒结构 Fine granular structure
AB	22~ 40	21.3	1.14	细团粒结构 Fine granular structure
Ab	40~ 60	39.6	1.37	小块结构 Block structure

1.2 进气值的测定方法

在 Richards 等^[1]及 White^[4]的研究中, 持水曲线斜率剧烈变化的地方被用于判断进气值, 因其所研究的介质是刚性介质, 不存在容重随含水量变化的情况。而对于土壤这种多孔介质, 土壤会通过体积的减少而排水, 这就难以用持水曲线斜率的剧烈变化来估计进气值。故本研究中采用土壤电导率与基模吸力的关系判断进气值。土壤电导率与土壤含水量存在如下关系^[8]:

$$EC_a = EC_s + T \theta EC_w \quad (1)$$

式中, EC_a 为由固液 2 项共同决定的土体电导率 (S/m); EC_s 为土壤固体部分的表观电导率 (主要由于吸附于粘土矿物上的代换离子以及土壤中的金属矿物引起) (S/m); T (< 1) 为与弯曲因子 (Tortuosity Factor) 有关的传导系数, 弯曲因子是离子沿溶液浓度梯度扩散因经过土壤水而所需路径增加值的倒数^[9]; θ 为土壤体积含水量 (%); EC_w 为土壤溶液的电导率 (S/m)。对某一给定的土壤而言, EC_w 和 EC_s 为常数, 因此 EC_a 的变化主要由土壤体积含水量 θ 和传导系数 T 决定。

当基模吸力小于进气值时, 土壤孔隙空间全部被水分占据, 因土壤体积变化而发生的土壤脱水对离子扩散的路径长短影响很小, 即弯曲因子随基模吸力变化的幅度很小。当基模吸力大于进气值时, 由于气相进入土壤孔隙, 离子扩散所经过的路径长短随土壤含水量迅速降低而明显增加, 弯曲系数因此迅速降低, 而土壤含水量和弯曲系数的共同减少导致土壤电导率迅速减少。这种变化表现在土壤电导率-基模吸力曲线上, 便是在曲线斜率剧烈变化的进气值附近出现了拐点, 可以利用这一斜率变化来判断进气值的位置。本试验土壤进气值的测量装置如图 1 所示。

土壤进气值具体测定步骤如下: (1) 装入土壤样品前, 在悬挂水柱法测定持水曲线的装置中, 先注入质量分数 1% 的 $CaCl_2$ 溶液, 液面要超出砂型漏斗

底部, 并且使砂型漏斗 (发泡点为 3.92 kPa 左右) 及相连的导水管内无气泡; (2) 用质量分数 1% 的 $CaCl_2$ 溶液浸泡土壤样品, 使其达到吸水饱和状态; (3) 将待测土壤样品放入砂型漏斗中, 电极插入土样中部, 且把与电极下端相平行的导水管中水面位置设为土壤基模吸力 0 点; (4) 通过调整导水管中悬挂水柱高度来调整土壤基模吸力, 并待电导率仪的读数稳定后记录从基模吸力 0 点开始的不同基模吸力及其相对应的电导率; (5) 依据测定的电导率和相应的基模吸力数据绘制曲线, 通过曲线斜率的变化判断进气值。

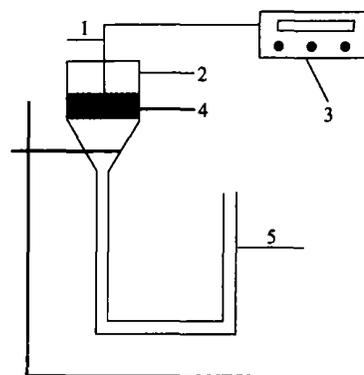


图 1 土壤进气值测量装置示意图

1. 电极; 2. 砂型漏斗; 3. 电导率仪; 4. 土壤样品; 5. 导水管

Fig. 1 Schematic diagram for measurement of soil air entry value

1. Electrode; 2. Sand mold funnel; 3. Conductivity apparatus; 4. Soil sample; 5. Water tube

1.3 发泡点的测定方法

在对发泡点测定方法的研究过程中, Bouwer^[10], Fallow 等^[11]都提供了测定发泡点的装置。Bouwer 将发泡点和进气值作为同一个概念进行测定; 而 Fallow 等对圭尔夫入渗仪进行了改装, 在田间测定土壤的进气值, 所给出的进气值的定义与本试验对发泡点的定义一致。这些装置可用于测定小于大气压的发泡点值, 但对于发泡点值较高的情况

(> 49 kPa), 方法仍需进一步改进。

除以上方法可以测定土壤的发泡点外, 还可以把本研究中土壤进气值测定装置中的电导率仪去掉, 以方便快速的测出土壤发泡点, 而且还可测量发泡点值较高的土壤。其具体操作方法如下: (1) 将整个装置注入蒸馏水, 使砂型漏斗及相连的软管内无气泡, 将待测土壤样品装入砂型漏斗中, 装入土壤的样品量以达到砂型漏斗中部为宜; (2) 待测土壤样品充分吸水饱和后, 将其下底面和右侧导水管相水平的位置作为 0 点; 并使导水管内水面和土样底面平行; (3) 向下缓慢移动右侧导水管约 1~2 cm, 直到导水管中水面不再上升, 然后再次下移导水管。此过程为保证装置不晃动, 可采用向外抽水的办法, 并同时仔细观察砂型漏斗中土样下方和水面接触处有无气泡自上方冒出; (4) 直到发现砂型漏斗中第 1 次出现气泡时停止移动导水管, 此时导水管中水面到土样下底面的水柱高度即为所测土壤的发泡点。

1.4 持水曲线的测定方法

为测定土壤脱水过程中的质量含水量随基模吸力的变化情况, 采用自制的负水头控制仪与多孔膜材料的组合控制供水吸力, 从而精确、持续地控制土

壤质量含水量。测量时, 首先使土壤在较低吸力控制下被水分充分平衡(土壤样品是否平衡可通过观察装置中水面高度有无变化来判断), 然后用土盒取土, 称盒重和湿土重, 记录此时的基模吸力值。最后把土壤在 105 °C 下烘干至恒重, 再称盒重和干土重, 计算土壤质量含水量; 其他基模吸力下的质量含水量可采用相同方法得到。

2 结果与分析

2.1 土壤的发泡点

对所选择的 3 种土壤的发泡点分别进行了测定, 得到 AB, Ab 和 Ap 剖面层土壤的发泡点分别为 4 116, 6 076 和 5 880 kPa。比较这 3 种土壤发泡点和土壤物理性粘粒含量, 可知其存在一定的相关性。

2.2 土壤的进气值

图 2 是 AB, Ab, Ap 3 个土壤剖面层的土壤电导率与基模吸力的关系曲线。由图 2 可知, 当基模吸力为 2 597 kPa 时, AB 剖面层土壤的电导率出现了剧烈变化, 之后开始减小, 出现拐点, 可以判断该剖面土壤的进气值为 2 597 kPa; 同理可知, Ab, Ap 剖面层土壤的进气值分别为 0 451 和 1 343 kPa。

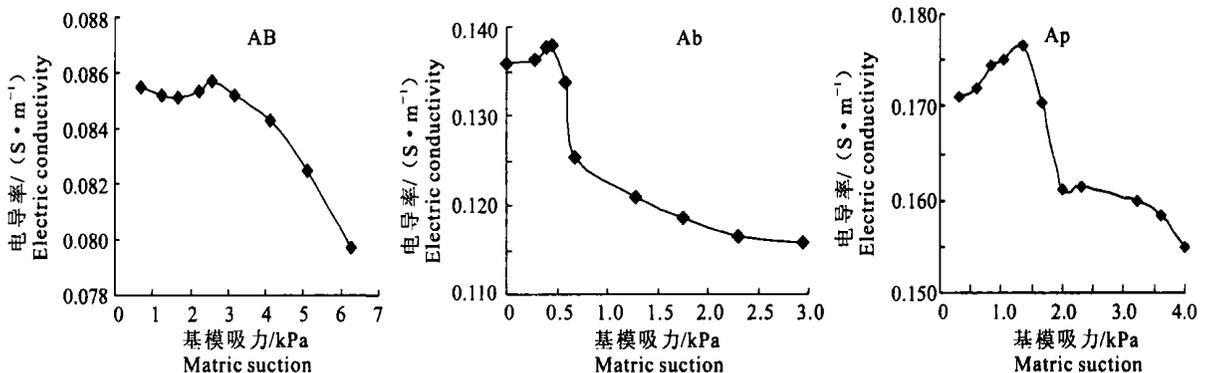


图 2 AB, Ab, Ap 3 种剖面土壤脱水过程中基模吸力与电导率的关系

Fig. 2 Relationship between matric suction and bulk soil electric conductivity of AB, Ab, Ap horizon during desorption

由图 2 可知, 在土壤的基模吸力达到进气值之前, 除 AB 剖面层土壤电导率随基模吸力的增加不明显外, Ab, Ap 剖面层土壤的电导率随基模吸力的增加而增加, 且当基模吸力达到进气值时, 土壤电导率达到最大值, 而后随着基模吸力的增加, 电导率开始减小。这是因为在基模吸力小于进气值前, 随着基模吸力的增加, 土壤会通过体积的减少而排水^[9], 使土壤内部局部土壤溶液浓度增大, 电导率亦随着基模吸力的逐渐增加而增大; 当基模吸力达到进气值时, 土壤溶液的浓度达到了最大值, 相应的电导率值

也达到最大; 当基模吸力值大于进气值后, 开始有气相进入土壤, 溶液中离子扩散所经过的路径随土壤含水量迅速降低而明显增加, 土壤电导率开始减小。

由以上数据可以看出, 所研究的 AB, Ab, Ap 3 种剖面层土壤的进气值和发泡点值明显不同。可见, 土壤的进气值和发泡点是两个不同的概念, 在土壤学的相关研究中二者不应该被混用。

2.3 土壤的持水曲线

对 AB, Ab, Ap 3 个剖面层土壤持水曲线的测定结果如图 3 所示。

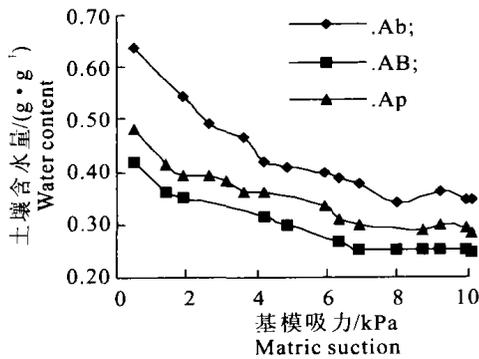


图3 AB, Ab, Ap 3种剖面土壤的持水曲线

Fig 3 Retention functions of AB, Ab, Ap assumed soils

由图3可知, 3种剖面土壤的含水量随基模吸力的增加而减小, 且变化趋势一致。但是在相同的基模吸力下, 不同土壤的含水量不同。在相同的基模吸力下, AB剖面层土壤含水量最低, Ab剖面层土壤含水量最高。由表1可知, AB剖面层土壤的物理性粘粒含量和有机质含量较其他两种土壤低, 在相同的吸力水平下, 其土壤含水量也最低; Ab和Ap两种剖面层土壤相比, 由于Ab剖面层土壤的物理性粘粒含量为39.6%, 较Ap剖面层高, 其含水量也比Ap剖面层土壤高。可见, 土壤物理性粘粒含量与土壤的持水能力关系密切。

值得注意的是, 在Richards等^[1]及White等^[4]的研究中, 持水曲线斜率剧烈变化的地方被用于判断进气值, 是因为他们所研究的介质是刚性介质, 不存在容重随含水量变化的情况。而对于土壤这种多孔介质而言, 在脱水过程中其容重随土壤含水量的变化而变化, 持水曲线上并不存在因进气值变化导致斜率骤变而出现的拐点, 故认为不能单纯用土壤持水曲线来判断土壤的进气值。

3 讨论

除水稻等少数作物外, 大部分作物正常生长需要土壤具备适宜的水分和氧气条件, 土壤导气率在发泡点附近由0变为非0这一事实对指导作物生产

有重要意义。因此, 土壤发泡点是衡量土壤水气平衡的1个重要常数, 可能与常用的田间持水量这个概念有关, 甚至有可能代替田间持水量这一被有些学者认为不可靠的常数。

本研究对3种剖面层土壤进气值和发泡点的测定结果表明, 土壤进气值和土壤发泡点值并不相同。人们难以理解和接受土壤发泡点时土壤水分不饱和现象的主要原因, 是因为目前尚没有令人信服地解释“当多孔介质的导气率为0时, 空气如何进入液体排出而空出的多孔介质孔隙”的现象^[2]。现有的理论^[5]一般认为, 只有土壤饱和时, 土壤导气率才能为0, 也许这类数据是经过修正的, 但土壤导气率在非饱和含水量时变为非0, 这一事实确实需要理论上的合理解释。土壤孔隙系统的模型有“交联模型”(interconnected model)和“离散模型”(discrete model)两种^[4]。“离散模型”认为, 土壤孔隙系统由不同孔径大小的毛管束构成, 水分先从大孔径毛管排出, 再从小孔径毛管排出; “离散模型”意味着进气值和发泡吸力是同一个概念。“交联模型”认为, 土壤孔隙系统的大孔隙与小孔隙相连通, 这与土壤孔隙系统的真实状况一致。按照Richards等^[1]的解释, 水分先从孔肚排出(对应于进气值), 再从孔脖排出(对应于发泡点), 问题是空气是否进入了水分排出所腾出的孔隙空间。笔者认为, 空气是以微气泡的形式进入水分排空的孔隙空间, 然后在进一步的排水过程中, 小气泡通过调整气压来扩大所占据的孔隙体积。Pierre等^[6]在测定田间入渗后水分再分布过程的土壤空气压力变化时, 发现在水分入渗后的再分布过程中, 土壤空气压力减少, 这间接说明了笔者推断的合理性。

通常研究的入渗和毛管上升过程均是吸水过程。对毛管上升过程的研究^[5], 似乎进气吸力和发泡吸力将毛管上升过程分为特征不同的几个阶段。且本研究中, 发泡点和进气值的测定均是针对脱水过程进行的。对于吸水过程, 进气值和发泡点变化关系如何, 将是作者下一步研究的主要内容。

[参考文献]

- [1] Richards L A, Ogata G M. Materials for retainer plates and their use for retentivity measurements[J]. Soil Sci Soc Am, 1956, 20: 303- 306
- [2] Brooks R H, Corey A T. Properties of porous media affecting fluid flow[J]. Irrigation and Drainage, 1966, 92: 61- 88
- [3] White N F. The desaturation of porous materials[D]. Fort Collins Colorado: Colorado State University, 1968
- [4] White N F, Duke H R, Sunada D K, et al. Physics of desaturation in porous materials[J]. Irrigation and Drainage, 1970, 96: 165- 191.
- [5] White N F, Sunada D K, Duke H R, et al. Boundary effects in desaturation of porous media[J]. Soil Sci, 1972, 113: 7- 12

- [6] Pierre R, Dalila M, Jean-claude G, et al Air pressure fluctuations in a prairie soil[J]. Soil Sci Soc Am, 1998, 62: 553- 563
- [7] Luckner L, Van Genuchten M T, Nielsen D R. Comment on the treatment of residual water content in a consistent set of parametric models for 2-phase flow of immiscible fluids in the subsurface-Reply[J]. Water Resources Research, 1991, 27: 663- 664
- [8] Rhoades J D, Manteghi N A, Shouse P J, et al Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations[J]. Soil Sci Soc Am, 1989, 53: 433- 439
- [9] Rhoades J D. Measuring, mapping and monitoring field salinity and water table depths with soil resistance measurements[J]. FAO Soils Bull, 1976, 31: 159- 186
- [10] Bouwer H. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis [J]. Water Resources Research, 1966, 2(4): 729- 738
- [11] Fallow D J, Elrick D E. Field measurement of air-entry and water-entry soil water pressure heads[J]. Soil Sci Soc Am, 1996, 60: 1036- 1039

Measurement of air entry value and bubbling point of soils

XIE Ying-ge^{1a, 2}, WANG Guo-dong^{1b}, XUE Xu-zhang², LIU Yun-peng^{1b}, LI Xia^{1b}

(1 a College of Resources and Environment; b College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 National Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract: Relationship between soil electric conductivity and soil matric suction was used to estimate soil air entry value. Sand mold funnel apparatus provided in this paper was identified as the method for the measurement of soil bubbling point. Air entry value and bubbling point of three profile layers during desorption were measured: Air entry value of Ap horizon was 1.343 kPa, the bubbling point 5.880 kPa. Air entry value and bubbling point of AB horizon were 2.597 kPa and 4.116 kPa respectively. Air entry value and bubbling point of Ab horizon were 0.451 kPa and 6.076 kPa respectively. The measured results show that the air entry value and bubbling point are two concepts with different values.

Key words: soil; air entry value; bubbling point; electric conductivity; matric suction

《畜牧兽医学报》(月刊)2006 年征订启事

《畜牧兽医学报》是由中国科协主管、中国畜牧兽医学会主办,由《畜牧兽医学报》编委会、中国农业科学院畜牧研究所编辑出版的畜牧兽医学术性期刊。创刊于 1956 年 7 月,读者对象为大、中专院校师生和各级畜牧兽医生产、科研工作者等。主要刊登较高水平的学术论文和专业研究报告及对生产实践具有指导性和启发性的文章。

《畜牧兽医学报》是行业内创刊早、学术水平高、影响大的全国中文核心期刊,现被国内外多家数据库及文摘期刊收录。

- 中国科技论文统计源期刊
- 中国科学引文数据库 CSD
- 中文科技期刊数据库
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国学术期刊(光盘版)
- 中国期刊网
- 中国农业科技文献数据库
- CAB 数据库
- CAB 各文摘分册
- 中文核心期刊要目总览
- 中国生物学文摘
- 中国学术期刊文摘
- 中国畜牧兽医文摘
- 中国万方数据(China Info)系统科技期刊群

本刊 2006 年为月刊,大 16 开。邮发代号: 82-453。国外代号: BM 446。定价 20 元,全年 240 元。全国各地邮局均可订阅。漏订的用户请直接将款汇至本刊编辑部补订。

地 址: 北京市海淀区圆明园西路 2 号中国农业科学院畜牧所《畜牧兽医学报》编辑部

邮政编码: 100094 电 话: 010-62815987 E-mail: xm syxb@263.net