

# 一种田间测算土壤导气率的瞬态模型\*

李陆生 张振华<sup>†</sup> 潘英华 赵丽丽 朱敏 任尚岗

(鲁东大学地理与规划学院, 山东烟台 264025)

## TRANSIENT-FLOW MODEL FOR IN-SITU MEASURING OF SOIL AIR PERMEABILITY

Li Lusheng Zhang Zhenhua<sup>†</sup> Pan Yinghua Zhao Lili Zhu Min Ren Shanggang  
(College of Geography and Planning of Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

关键词 三维瞬态模型; 三维稳态模型; 土壤导气率; 田间测算  
中图分类号 S151.9+2 文献标识码 A

空气和水共同存在于土壤孔隙中<sup>[1]</sup>, 两者之间渗透性关系紧密<sup>[2]</sup>, 通过测定土壤导气率可获得给定土壤饱和导水率和非饱和导水率的相关信息<sup>[3]</sup>。同时相对饱和导水率等水力参数测定, 土壤导气率的测定对土体结构破坏小, 并且能够充分反映土壤孔隙和土壤结构特征<sup>[4-5]</sup>。

通常采用稳态法或瞬态法测定土壤导气率。稳态法是在研究土体的一端施加稳定气压<sup>[6-8]</sup>, 测定通过土体的气体通量, 根据土壤空气渗透量得到导气率。Smith 等<sup>[9]</sup>在室内分析土样间压力变化, 得到土壤导气性相关数值, 该方法测定结果受土壤含水率、土壤非均质性影响较大。Massmann 等<sup>[10]</sup>将空气看作不可压缩气体情况下在室内测定土壤导气率, 其试验方法仅适用于气压变化范围较小时导气率测定。瞬态法是指通过记录被测土样密封端压力随时间的变化关系, 根据相关模型计算得出土壤导气率。Kirkham<sup>[11]</sup>首次提出瞬态土壤导气率测算模型, 并在假设空气不可压缩的情况下分析了原状土土壤导气率。Smith 等<sup>[12]</sup>提出环境温度对于瞬态模型测算结果有影响。Li 等<sup>[13]</sup>提出沥青导气率瞬态测算模型, 该模型测算导气率时无需给样品提供稳定气压, 并默认空气是可压缩的。根据测定过程中气体运动边界条件不同, 导气率测定模型又

分为一维和三维两种形式。一维测定方式通常为扰动土导气率测定, 将待测土样处理后填装进土柱管测定; 三维测定方式通常为原状土导气率测定, 将测定仪器插入待测土样中进行测定。一维和三维测定方式通常又与稳态、瞬态法相结合, 称一维或三维稳态法、一维或三维瞬态法。

不同导气率测算模型在测定效率、经济性等方面各有优缺点。稳态模型测定技术成熟, 但试验设备复杂昂贵; 瞬态模型测定时无需给样品提供稳定的气压, 对土壤扰动小, 仪器成本低。但目前应用较广的一维瞬态导气率测算模型不能满足原状土导气率的测定要求。本文根据长度等效原理, 在定义了三维边界条件下难以直接测定的土柱外气体运动范围的情况下, 推导出了三维瞬态土壤导气率测算模型, 并对其测定精度进行了检验, 以期田间便捷测定土壤气体运动参数提供参考。

## 1 理论推导

Soltan 等<sup>[14]</sup>基于达西定律基础上提出低压低速状态下均质土壤的一维稳态导气率计算关系式:

$$k_a = \frac{\mu Z}{A} \frac{Q}{\Delta P} \quad (1)$$

\* 国家高技术发展计划(2011AA100504)、国家自然科学基金项目(41271236)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2011HZ004)和烟台市科技发展计划(2011065)资助

<sup>†</sup> 通讯作者, E-mail: Zhangzh71@163.com

作者简介: 李陆生(1986—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要从事区域水土资源高效利用研究。E-mail: 236876571@qq.com

收稿日期: 2011-12-13; 收到修改稿日期: 2012-03-20

式中,  $A$  为土柱管横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\mu$  为干空气动态黏滞系数,  $\text{Pa s}$ ;  $Z$  为土柱管中土样高度,  $\text{m}$ ;  $Q$  为土壤气体传导速率,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta P$  为土柱管内密闭空间气体的压强值,  $\text{Pa}$ ;  $k_a$  为土壤导气率,  $\text{m}^2$ 。

Li 等<sup>[13]</sup> 结合达西定律气体运动方程和理想的气体流动定律推导出一维瞬态土壤导气率表达式如下:

$$k_a = \frac{VZ\mu s}{AP_{atm}} \quad (2)$$

式中,  $k_a$  为土壤导气率,  $\text{m}^2$ ;  $P_{atm}$  为土样表面大气压值,  $\text{Pa}$ ;  $A$  为土柱管管口横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $Z$  为土柱管中土壤样品高度,  $\text{m}$ ;  $\mu$  为干空气动态黏滞系数,  $\text{Pa s}$ ;  $V$  为土柱管中除样品外体积与储气筒体积之和,  $\text{m}^3$ ;  $s$  为式  $\ln\left(\frac{c \frac{P(t) - P_{atm}}{P(t) + P_{atm}}}{c \frac{P(t) - P_{atm}}{P(t) + P_{atm}}}\right)$  与时间  $t$  的斜率,  $\text{s}^{-1}$ 。

$s$  关系式中参数  $c$  定义如下:

$$c = \frac{P(0) + P_{atm}}{P(0) - P_{atm}} \quad (3)$$

式中,  $P(0)$  为土柱管内密闭空间气体初始压力差,  $\text{Pa}$ ;  $P_{atm}$  为土样表面大气压值,  $\text{Pa}$ 。

Jalbert 等<sup>[15]</sup> 在 Liang、Iversen 等提出理论的基础上推导出三维稳态土壤导气率关系式:

$$k_a = \frac{\mu Q}{DG \Delta P} \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为干空气的动态黏滞系数,  $\text{Pa s}$ ;  $D$  为土柱管直径,  $\text{m}$ ;  $G$  为土壤的形状系数;  $Q$  为土壤气体传导速率,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta P$  为土柱管内密闭空间气体的压强值,  $\text{Pa}$ ;  $k_a$  为土壤导气率,  $\text{m}^2$ 。

考虑到一维和三维的差别, 三维边界条件下气体通过的范围可以分解成两部分, 从土壤表面到土柱管末端之间的部分可考虑为一维状态, 设其长度为  $Z$ , 土柱管以外的气体经过的土体为另一部分, 其范围很难精确判断, 出流过程为典型的三维问题。为了使问题简化, 将这一部分土体抽象为横截面积为  $A$  而长度为  $Z^\#$  的一维土柱, 其对通过气流的影响与作用与土柱管以外气体经过部分的土体等效。在上述假设条件下, 则可利用一维公式(1)计算土壤的导气率:

$$k_a = \frac{\mu Z^* Q}{A \Delta P} \quad (5)$$

式(5)中,

$$Z^* = Z + Z^\# \quad (6)$$

将  $Z^*$  称作土壤等效长度。

假设土壤为均质、各向同性的多孔介质, 则三维条件下导气率测定值应与一维条件下测定值相等, 即:

$$k_a = \frac{\mu Q_s}{DG \Delta P} = \frac{Z^* \mu Q_s}{A \Delta P} \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$Z^* = \frac{A}{DG} \quad (8)$$

式(8)即为三维边界条件下被测土壤的等效长度表达式, 将式(8)代入式(2)可得到瞬态三维边界条件下土壤导气率的计算模型:

$$k_a = - \frac{V\mu S}{DG P_{atm}} \quad (9)$$

基于 Liang<sup>[16]</sup> 理论上得到形状系数  $G$  估计值为:

$$G = \left(\frac{\pi}{4} + \frac{D}{H}\right) \left(1 + \frac{D}{H}\right)^{-1} \ln\left(1 + \frac{D}{H}\right) \quad (10)$$

式中,  $D$  为土柱管直径,  $\text{m}$ ;  $H$  为土柱管插入土壤深度,  $\text{m}$ 。

## 2 材料与方法

### 2.1 供试土壤

试验在西北农林科技大学农业灌溉站小麦田和烟台市农业科学研究院苹果园中进行。灌溉站供试土壤为壤土, 实验时土壤表层体积含水率为 0.275 ~ 0.292  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , 平均干容重为 1.592  $\text{g cm}^{-3}$ 。以水平方向 20  $\text{cm}$  为间隔在小麦地田垄确定 45 个试验测定样点。烟台市农业科学研究院苹果园面积 2 770  $\text{m}^2$ , 实验时土壤表层体积含水率为 0.312 ~ 0.341  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , 平均干容重为 1.647  $\text{g cm}^{-3}$ 。以东西方向每隔 3  $\text{m}$  为间隔, 每行取 25 个样点; 南北方向每隔 1.5  $\text{m}$  取样, 每行取 35 个样点, 共确定 60 个试验测定样点。两组试验土样经自然风干后过 2  $\text{mm}$  孔径的土筛, 利用沉降法对土壤进行颗粒分析, 结果如表 1 所示。按照国际制土壤质地分类标准, 灌溉站小麦地供试土壤为粉砂质壤土, 农科院苹果园供试土壤为粉砂质黏壤土。

### 2.2 试验装置

试验装置分为三维瞬态法和三维稳态法两套装置。三维瞬态法装置包括: 打气筒、储气筒(体积 0.189  $\text{m}^3$ )、两端开口土柱管(管口直径 0.021  $\text{m}$ )、橡皮塞、U 形管压力计、气门嘴、导气软管、导气管、秒表等装置。试验时在土柱管外侧垂直方向贴上标签, 方便读取土柱管插入土样深度。土柱管上用插有两个导气管的橡皮塞密封, 两导气管连上导气软管并分别连接储气筒和 U 形管压力计。U 形管压力计用于确定土柱管内密闭空间气体压力大小。往 U 形管压力计中注入一定量的纯净水, 使液面两端无高度差, 并在测量零点处, 保持 U 形管支架与地面垂直。试验时确保各个仪器密封性良好。

表 1 试验土样的机械组成

采样地	各级颗粒含量百分数(%)			
	<0.002 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 0.20 mm	0.20 ~ 2.0 mm
小麦地	11.32	58.61	27.98	1.42
苹果园	16.51	49.56	32.76	1.17

三维稳态法装置分为供气装置和测定装置。供气装置为空气压缩机,通过压缩机将空气储存在储气瓶中,以供应试验所需空气。压缩机上减压阀,用于将输出气压控制在试验所需范围之内。此外,还有控制输出气体流速的流量计,使输出气体保持在一定速率,方便数据记录。测定装置包括两端开口土柱管,用插有两导气管的橡皮塞密封其上端,两导气管连上导气软管并分别连接至气体流量计和 U 形管压力计,形成土壤气体运动测定仪。

### 2.3 试验方法

试验由两部分构成:一用三维瞬态法测定出试验样点土壤导气率;二用三维稳态法重复测定同一个试验样点土壤导气率。

试验步骤如下:将土柱管插入试验样点地下一定深度(受土柱管长度影响,土柱管插入地下深度为 5 ~ 15 cm),为保证原状土不受扰动,在插入过程中尽量使土柱管顶端保持水平,且管中的土壤表层也未受扰动。用导气软管连接三维瞬态模型所需仪器设备,将气门嘴与打气筒连接,打气筒打气,压迫空气通过气门嘴后进入储气筒,气门嘴用于防止空气回流,储气筒内空气再通过导气软管进入土柱管中,此时管中气体只能通过土样向外溢出。U 形管压力计产生高度差。当 U 形管压力计水柱高度差略高于预定值后(试验中 U 形管压力计高度差初始值均为 20 cm)停止打气,U 形管水柱高度差开始减小,到预定值时用秒表计时。直到 U 形管压力计水柱无高度差时停止计时,记录土柱管中土样密封端压力变化所需时间。三维瞬态法测定一组土样导气率试验结束,确保土柱管中土样未被扰动基础上,移开储气筒上与土柱管相连接的导气软管,将

其连接至气体流量计。连接好稳态法供气装置与测定装置,确保减压阀和气体流量计等部件正常工作。将事先充满气的储气瓶阀门打开,调节减压阀将输出气体气压控制在适当范围,调节气体流量计,使输出的气体在一定速率下通过测定仪(试验采用  $50 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 、 $100 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 、 $150 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  三种不同流速),当气体传导速率稳定时,通过 U 形管两侧水柱高度差读出土柱管内土样密封端压强值,记录气体流量计读数和 U 形管两侧水柱高度差。

## 3 结果与分析

### 3.1 两种方法测定的导气率统计特征值

为了检验式(9)导气率测算模型的精度,按照试验方法在小麦地和苹果园进行 105 组导气率对比试验。获得的土壤导气率指标描述性统计分析见表 2。

### 3.2 三维瞬态法与三维稳态法两种土壤导气率测定方法的比较与分析

相对于稳态法,瞬态法无须测定通过土样的气体数量,测定时间短,只需少量体积的气体通过土样,对土壤结构破坏性小。相对于一维瞬态导气率测算模型,三维瞬态导气率测算模型更具有实用性,可用于测算原状土导气率。根据三维瞬态法和三维稳态法测定的导气率统计特征值,两者试验结果尽管存在一定差异但较接近。图 1 表明对于小麦地和苹果园两种不同质地土壤,三维瞬态法和三维稳态法导气率测定数值之间仍具有极显著相关性,分别可用线性函数关系式表示,小麦地的为  $y = 1.038x (r = 0.97 > R_{0.01}, \alpha = 0.01)$ ,苹果园的为  $y = 0.961x (r = 0.83 > R_{0.01}, \alpha = 0.01)$  表示。

表 2 两种方法测定的导气率统计特征值

试验方法	观测数目 (个)	土壤导气率					
		平均值( $\text{m}^2$ )	最大值( $\text{m}^2$ )	最小值( $\text{m}^2$ )	标准差( $\text{m}^2$ )	变异系数	
小麦地	三维稳态法	45	2.85E-11	5.55E-11	9.24E-12	1.13E-11	0.40
	三维瞬态法	45	2.99E-11	5.44E-11	1.24E-11	1.08E-11	0.36
苹果园	三维稳态法	60	1.47E-11	3.68E-11	5.31E-12	6.11E-12	0.41
	三维瞬态法	60	1.43E-11	3.97E-11	4.38E-12	6.39E-12	0.45

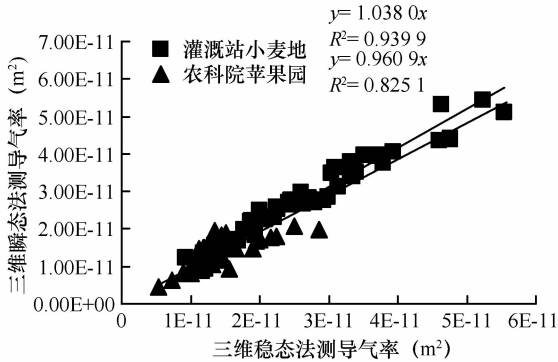


图1 稳态法与瞬态法测定的土壤导气率结果相关分析

### 3.3 三维瞬态法与三维稳态法测定的土壤导气率结果误差分析

图2为两种测定方法测定的土壤导气率相对误差。对于种植小麦研究区的土壤导气率,以三维稳态法测定值为标准,两种方法测定结果相对误差的变化幅度在0.5%~34.4%之间,85%以上相对误差变化幅度小于15%,仅有少数变化幅度大于20%;对于苹果园土壤导气率,以三维稳态法测定值为标准,两种方法测定结果相对误差的变化幅度在0.9%~44.8%之间,75%以上相对误差变化幅度小于20%,仅有少数变化幅度大于20%。针对三维瞬态法和三维稳态法测定结果存在差异,初步推断造成两种方法测定同一土样导气率值差异性的原因是:(1)三维瞬态法测定完一组土样导气率,换三维稳态法装置测定时对土样有细微扰动;(2)三维瞬态法测定土壤导气率,试验气体会对土壤产生微小压力,使土壤孔隙发生变化,影响接下来三维稳态法测定结果;(3)U形管压力计所测压力滞后于土柱管中实际压力;(4)观测精度。

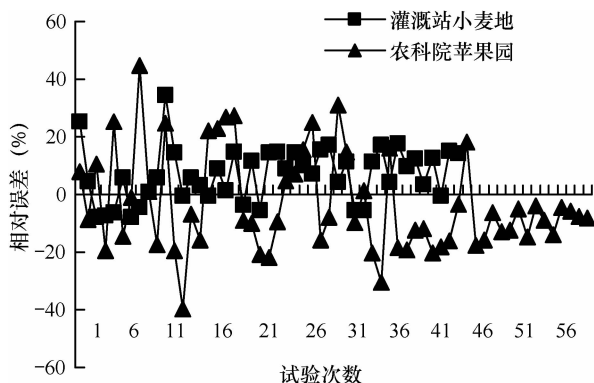


图2 两种方法测定土壤导气率相对误差

## 4 结论

1) 利用测定技术成熟的三维稳态模型验证三维瞬态模型,小麦地和苹果园土壤试验结果表明两者测算出的导气率数值之间具有极显著相关性,且两种导气率测定方法所测土样导气率数值均不服从正态分布,皆为中等变异,分别可用线性函数关系式表示,小麦地的为  $y = 1.038x$  ( $R = 0.97 > R_{0.01}, \alpha = 0.01$ )、苹果园的为  $y = 0.961x$  ( $R = 0.83 > R_{0.01}, \alpha = 0.01$ )表示。表明更加经济方便的三维瞬态模型具有实际应用的可行性,对于三维稳态模型,三维瞬态模型对土样结构破坏性更小。

2) 以三维稳态模型为标准,三维瞬态模型与三维稳态模型所测的土壤导气率数值相对误差整体变化幅度小。三维瞬态模型与三维稳态模型所测土壤导气率数值接近,用三维瞬态模型代替三维稳态模型测算土壤导气率可减少成本,且因无需电源,对于野外等条件下其土壤导气率测定优势明显。

3) 本文只对杨凌壤土和烟台棕壤土进行了研究,对于本文提出的三维瞬态模型是否具有通用性还有待进一步的实验研究。

## 参考文献

- [1] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学. 北京:高等教育出版社, 2006:186—199
- [2] Corey A T. Measurement of water and air permeability in unsaturated soil. *Soil Sci Soc Am J*, 1957, 21(1):7—10
- [3] Blackwell P S, Ringrose-Voase A J, Jayawardane N S. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. *J Soil Sci*, 1990, 41(2):215—228
- [4] Schjonning P, Thomsen I K, Moberg J P. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma*, 1999, 89(3/4):177—198
- [5] Moldrup P, Olesen T, Komatsu T. Tortuosity, diffusivity and permeability in the soil liquid and gaseous phases. *Soil Sci Soc Am J*, 2001, 65(3):613—623
- [6] Han C, Falta R W, Javandel I. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapor extraction well. *Water Resources*, 1992, 28(4):1105—1120
- [7] Springer D S, Loaiciga H A, Cullen S J. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions. *Ground Water*, 1998, 36(4):558—565
- [8] Poulsen T G, Moldrup P. Air permeability of compost as related to bulk density and volumetric air content. *Waste Management Research*, 2007, 25(4):343—351

- [ 9 ] Smith J A, Katchmark W, Choi J W, et al. Unsaturated-zone air flow at Picatinny Arsenal, New Jersey: Implications for natural remediation of the trichloroethylene-contaminated aquifer//Morganwalp D W, Buxton H T. eds. Geological Survey Toxic Substances Hydrology Program—Proceedings of the Technical Meeting, Charleston, South Carolina, US, 1999:625—633
- [ 10 ] Massmann J, Johnson L. Exercises illustrating flow in porous media. *Ground Water*, 2001, 39(4):499—503
- [ 11 ] Kirkham D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1946, 11: 93—99
- [ 12 ] Smith J E, Robin M J L, Elrick D E. A source of systematic error in transient-flow air permeameter measurements. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1997, 61(6):1 563—1 568
- [ 13 ] Li H L, Jiao J J, Luk M. A falling-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1/4):69—77
- [ 14 ] Soltani M A, Le Ravalec-Dupin M F. An experimental method for one dimensional permeability characterization of heterogeneous porous media at the core scale. *Transp Porous Med*, 2009, 77(1):1—16
- [ 15 ] Jalbert M, Dane J H. A handheld device for intrusive and nonintrusive field measurements of air permeability. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2(4):611—617
- [ 16 ] Liang P, Bowers Jr C G, Bowen H D. Finite element model to determine the shape factor for soil air permeability measurements. *Trans ASAE*, 1995, 38(4):997—1 003