土壤导气率瞬态模型关键参数 *s* 简化求解

李陆生， 张振华*， 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）

摘 要： Li Hailong 瞬态导气率模型无需测量通过样品的气体通量，相对传统稳态测量法具有测量时间短、对样品结构破坏小等突出优点，但模型的关键参数 *s* 即样品密封端压力动态变化与时间 *t* 之间关系计算过程复杂，致使其应用不便。因此，本文在 Li Hailong 导气率测算模型基础上对参数 *s* 计算过程进行了简化，并用稳态法对简化后的模型进行验证。室内对 40 组土样导气率测量结果表明：简化解 s_0 即 *Lnp*（*t*）与时间 *t* 之间存在 Kirkham 提出的瞬态模型线性关系；以原模型参数 *s* 为标准，简化解 s_0 与参数 *s* 相对误差变化幅度小于 0.5%，整体相对误差小。

关键词： 瞬态模型；稳态模型；简化解；土壤导气率

中图分类号： S151.9+2

空气和水共同存在于土壤孔隙中[1]，两者之间渗透性关系紧密[2]，通过土壤导气率的测量可获得给定土壤饱和导水率和非饱和导水率的相关信息[2-3]。Iversen 等[4]研究了 3 种不同质地土样的导气率与饱和导水率的关系。Tuli 等[5]研究原状土和扰动土两种情况下的土壤导气率及导水率随土壤含水率的变化特征。王卫华等[6]研究长武地区土壤导气率及其与导水率的关系，认为含水率接近田间持水率时土壤导气率和饱和导水率之间存在对数线性关系，验证了通过测量导气率获得饱和导水率的可行性。通过导气率预测饱和导水率的方法在需要多点测定饱和导水率的大田土壤研究中尤其重要[7]，因为田间饱和导水率的变异性通常较大（几个数量级）[8]，且测量耗时，效率低下，而土壤导气率相对容易测量，并且能够充分反映土壤孔隙和土壤结构特征[9-10]。土壤导气率作为重要的土壤物理性质，是影响土壤肥力的因素之一，对作物种子发芽、出苗、后期成长与成熟以及作物对养分吸收等影响较大[1]。

通常采用稳态法测量土壤导气率，在研究土体的一端持续施加稳定气压[11-12]，测量通过土体的气体通量，根据土壤空气渗透量得到导气率。该方法测量技术成熟，试验时需压缩机等相关设备提供稳定气压，并用流量计等仪器测量通过样品的气体通量，所需试验设备较为昂贵，携带不方便。因此，相关研究者提出瞬态土壤导气率测算模型。瞬态测量方法是指通过记录被测土样密封端压力的动态变化，得到土样密封端压力随时间的变化关系，根据相关模型得到土壤导气率。Kirkham[13]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[14]提出环境温度对于瞬态模型测算结果有影响。Li 等[15]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。相对于稳态法，瞬态法测量导气率时提供气体压力小，对土壤扰动性小，仪器成本低，但计算稍复杂。

目前瞬态导气率测算模型中，Li Hailong 瞬态模型较成熟，经相关试验验证，该模型对沙壤土等透气性良好物质的导气率测算效果差，并且数据分析复杂。因此，本文对 Li Hailong 导气率测算模型中关键参数 *s* 计算过程进行简化，并对简化后模型测算结果用测量技术成熟的稳态导气率测算模型进行验证。

1 理论推导

Li Hailong 利用样品密封端压力与时间的动态变化关系推导出沥青导气率计算公式（式（1）），该公式中压力变化与时间之间关系理论的分析是基于扩展的达西定律气体运动方程和理想的气体流动定律。

$$Ln\left(c\frac{p(t)-Patm}{p(t)+Patm}\right)=-\frac{APatmk}{VZ\mu}\cdot t \qquad (1)$$

式中，*k* 是导气率（m^2）；*Patm* 是样品表面的大气压值（kPa）；*A* 是土柱管管口横截面积（m^2）；*Z* 是土柱管中样品高度（m）；μ 是干空气动态黏滞系数（Pa·s）；*V* 是土柱管中除样品外体积与储气筒体积之和（m^3）；*P*(*t*) 指 *t* 时间对应 U 形管压力计的高度差（m）。

式（1）中 *c* 常数用如下公式计算：

$$c=\frac{P(0)+Patm}{P(0)-Patm} \qquad (2)$$

①基金项目：国家自然科学基金项目（41271236）、国家高技术研究发展计划项目（863 计划项目）（2011AA100504）、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目（BS2011HZ004）和烟台市科技发展计划项目（2011065）资助。

* 通讯作者（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

其中，$P(0)$ 为 U 形管初始压力差（kPa）。

$Ln(c\frac{p(t)-Patm}{p(t)+Patm})$ 数值大小取决于瞬态时间 t，用参数 s 表示 $Ln(c\frac{p(t)-Patm}{p(t)+Patm})$ 与时间 t 之间的线性关系[15]。

将参数 s 代入式（1）中得到 Li Hailong 一维瞬态导气率计算公式[15]：

$$k=-\frac{VZ\mu s}{APatm} \tag{3}$$

式中，k 是导气率（m^2）；$Patm$ 是样品表面大气压值（pa）；A 是土柱管管口横截面积（m^2）；Z 是土柱管中样品高度（m）；μ 是干空气动态黏滞系数（Pa·s）；V 是土柱管中除样品外体积与储气筒体积之和（m^3）；s 是与时间 t 之间的线性关系（s^{-1}）。

干空气动态黏滞系数 μ 一般受温度影响较大[16]，估计值约为：$\mu=(1\ 717+4.8T)\times10^{-8}$，T 为空气温度。

试验时土柱管中样品高度 Z、土柱管中除样品外体积与储气筒体积之和 V 均相同，式（3）中土柱管管口横截面积 A、大气压值 $Patm$ 以及干空气的粘滞系数 μ 均固定，每次试验记录变化的只有时间 t。因此瞬态法测量土壤导气率核心是记录被测土柱管中土样密封端压力动态变化与时间 t 之间关系，即参数 s 的测算。

Li Hailong 导气率测算模型中参数 s 计算过程较麻烦，影响模型应用，对参数 s 进行简化可以方便模型应用。

s 是 $Ln(c\frac{p(t)-Patm}{p(t)+Patm})$ 与时间 t 线性关系，即为：$Ln(\frac{P(0)+Patm}{P(0)-Patm}\cdot\frac{p(t)-Patm}{p(t)+Patm})\sim t$ 的关系。

在试验过程中 $Patm$ 是定值，一般取 101.3 kPa，$P(0)$ 为土柱管中封闭气体的初始压力，其范围通常介于 20～50 cm H_2O 即 1.96～4.90 kPa。

由于试验时提供的气压通常从 1.96 ～ 4.90 kPa 一直下降为 0 kPa，相对于大气压 101.3 kPa 较小，因此可以认为整个试验过程中土柱管中压力变化幅度较小：

$$P(0)+patm\approx p(t)+patm \tag{4}$$

进而得出斜率 s 为 $Ln(\frac{p(t)-Patm}{P(0)-Patm}\cdot)\sim t$ 的关系，简化为 $\ln(\frac{p(t)-Patm}{\Delta p(0)})\sim t$ 的关系，即 $\ln(p(t)-Patm)-\ln\Delta p(0)\sim t$ 的关系。

考虑到在试验过程中 $Patm$ 和 $P(0)$ 是定值，$\ln\triangle p(0)$、$\ln Patm$ 为定值，上述关系进一步简化得到斜率 s 简化解为 $Lnp(t)\sim t$ 的关系。

根据上述关系每次试验时只需记录瞬态时间 t 对应的 U 形管压力计高度差就可得到斜率 s 简化解 s_0，相对于原模型参数 s，简化解 s_0 计算过程更为简便。

2　材料与方法

2.1　供试土壤

试验地点位于鲁东大学水土资源调控实验室，试验用 40 组土样取自烟台市农科院苹果园，土样经自然风干，过 2 mm 孔径的土筛后采用烘干法测量含水率，其质量含水率均在 70 g/kg 以下。利用沉降法对土样进行颗粒分析。按照中国土壤质地分类标准进行分析，土样为沙质壤土。表 1 为试验土样的机械组成。

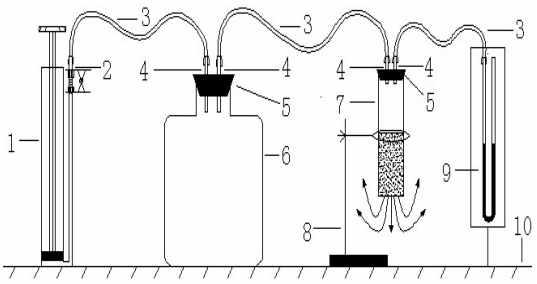
表 1　试验土样的机械组成（g/kg）

Table 1　Mechanical compose of tested soil

细砾（＞1 mm）	砂粒（1～0.05 mm）	粉砂粒（0.05～0.01 mm）	黏粒（＜0.01mm）
200.4	333.0	356.4	110.2

2.2　试验系统

经试验验证，Li Hailong 试验装置对沙壤土等透气性良好物质的导气率测量效果差，需在其装置基础上添加储气筒，用于减缓 U 形管压力计中水柱下降速度，方便数据读取。试验装置包括：打气筒、储气筒、两端开口土柱管（管口直径 4.2 cm）、橡皮塞、U 形管压力计、气门嘴、导气软管、导气管、秒表等。试验时在土柱管外侧垂直方向贴上标签，方便读取管中土样高度。将待测土样装入土柱管，敦实土壤后，记下土体高度，利用铁架台固定住土柱管。土柱管上端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土样密封端压力大小。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。试验装置如图 1 所示。

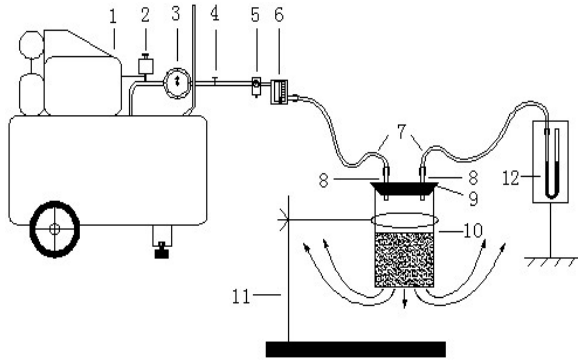


（1 打气筒；2 气门嘴; 3 导气软管；4 导气管；
5 橡皮塞；6 储气筒；7 土柱管；8 铁架台；
9 U 形管压力计；10 地表）

图 1 瞬态模型试验装置

Fig. 1 Schematic diagram oftransient-flow air permeability design

稳态模型试验装置分为供气装置和测量装置。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。测量装置包括两端开口土柱管，用插有两个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量仪。试验装置如图 2 所示。



（1 空气压缩机；2 压缩机充电开关；3 储气瓶压力指示表；
4 储气瓶阀门；5 减压阀；6 气体流量计；7 导气软管；
8 导气管；9 橡皮塞；10 土柱管；11 铁架台；12 U形管压力计）

图 2 稳态模型试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of steady-state air permeability design

2.3 试验方法

试验分为两部分：用瞬态法测量出某一土壤样品导气率后，在确保该土样未受扰动基础上再用稳态法测量其导气率。

试验步骤如下：用导气软管连接好瞬态法所需仪器设备，确保各个仪器密封性良好。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，气门嘴用于阻止空气回流，储气筒内空气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 形管压力计中水柱产生高度差。当 U 形管压力计水柱高度差略高于预定值后停止打气。U 形管中水柱的高度差开始减小，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动态变化所需时间。瞬态法测量一组土样导气率试验结束。确保土柱管中土样未被扰动的基础上，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量装置，确保减压阀和气体流量计等各部件正常工作。检查导气管各接口是否漏气。将事先充满气的储气瓶阀门打开，调节减压阀使输出气压控制在适当范围，调节气体流量计使输出气体在稳定速率下通过测量仪。当气体流量计读数稳定时，通过 U 形管两侧水注高度差计算出土柱管内土样密封端压力值，记录气体流量计读数和 U 形管两侧水柱高度差。一组土样导气率两种方法测定试验结束，其余土壤样品按照试验步骤依次测量。

3 试验结果与数据分析

3.1 $Lnp(t)$ 与时间 t 的关系

Kirkham[13]提出在瞬态导气率测算模型中被测土样密封端压力动态变化与时间 t 之间存在线性关系，如图 3 所示。试验结果表明简化解 s_0 即 $Lnp(t)$ 与时间 t 之间也存在类似的线性关系。由于数据过多，在此不一一列举，图 4 展示部分土样所测试验数据：U 形管压力计水柱初始高度差相等，均从 20 cm 高度差开始下降，20，18…0 cm 即 $\triangle P$ 是从 1.96，1.76…0.20 一直下降到 0 kPa。对应 40 次试验有 40 组试验数据，每组数据 $Lnp(t)$ 变化与时间 t 都成线性关系。

3.2 参数 s 与其简化解误差分析

图 5 为原模型参数 s 和简化解 s_0 相对误差分析图。根据对两者的误差分析可知，以原模型参数 s 为标准，简化解 s_0 与原模型参数 s 相对误差变化幅度在 0.13% ~ 0.54% 之间，75% 以上变化幅度小于 0.4%，仅有个别大于 0.5%，整体相对误差变化幅度小。相对于原模型参数 s，简化解 s_0 计算方便，减少了瞬态法测算导气率的复杂程度，提高了瞬态导气率模型测算效率。

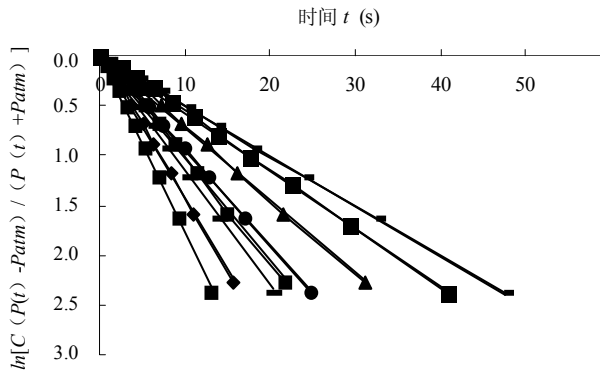


图 3　部分土样 $Ln(c\frac{p(t)-Patm}{p(t)+Patm})$ 的变化与时间 *t* 之间的关系

Fig. 3　*Ln[c(P-Patm)/(P+Patm)]* versus time test data of some soil samples

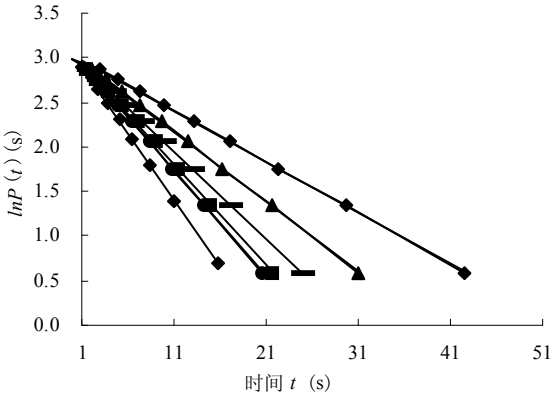


图 4　部分土样 *Lnp*(*t*) 的变化与时间 *t* 之间的关系

Fig. 4　*Lnp*(*t*)　versus time test data of some soil samples

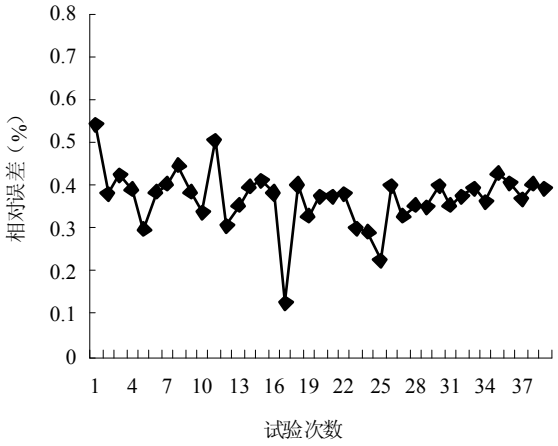


图 5　原模型参数 *s* 与其简化解 s_0 相对误差

Fig. 5　Relative error of parameter *s* measurement calculated by parameter *s* and simplified solution s_0

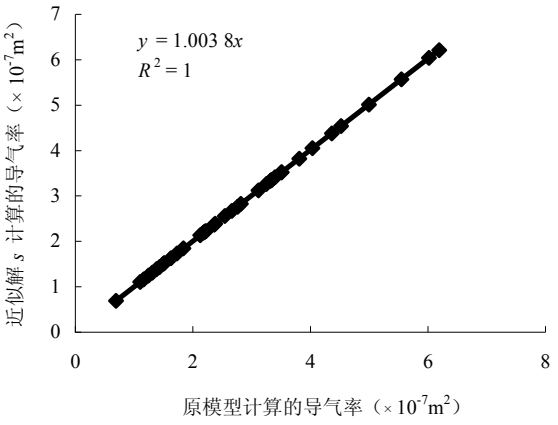


图 6　简化解 s_0 与原模型参数 *s* 计算的土壤导气率数值相关分析

Fig. 6　Correlation analysis of air permeability simplified and solution s_0

3.3　简化解 s_0 与原模型参数 *s* 对于导气率计算结果影响

图 5 展示了简化解 s_0 与原模型参数 *s* 的相对误差图，两者数值接近。将简化解 s_0 和原模型参数 *s* 分别代入（3）式计算得到对应的导气率数值，并对其进行对比。从图 6 可以看出两者计算的导气率数值之间存在良好的线性关系（$r=1$，$\alpha=0.001$），表明用简化解 s_0 代替原模型参数 *s* 对于导气率计算结果影响较小，两者计算出的导气率数值接近，用简化解 s_0 代替原模型参数 *s* 计算导气率具有可行性。

3.4　稳态导气率与 s_0 求解的瞬态导气率对比分析

按照试验步骤共测算 40 组土样的导气率，得到相应 40 个简化解 s_0，分别将其代入式（3）得到对应的导气率数值。将简化解 s_0 计算的瞬态导气率结果和稳态法测量结果进行对比，如图 7 所示：两者数值之间正相关关系密切，相关系数 *r* 为 0.934 9，在 $\alpha=0.001$ 的水平上达到显著性，验证了用简化解 s_0 代替原模型参数 *s* 计算土壤导气率的可行性。

4　结论

（1）试验验证了Kirkham 提出的在瞬态模型中被测土样密封端压力动态变化与时间 *t* 之间存在线性关系，对于简化解 s_0 即 *Lnp*(t) 与时间 *t* 之间也存在类似的线性关系。

（2）以原模型参数 *s* 为标准，简化解 s_0 与原模型参数 *s* 相对误差变化幅度小，大部分变化幅度小于 0.4%。简化解 s_0 数值接近原模型参数 *s*，用简化解 s_0 代替原模型参数 *s* 计算导气率可以提高瞬态模型导气率的测算效率。

（3）简化解 s_0 和原模型参数 *s* 计算的样品导气

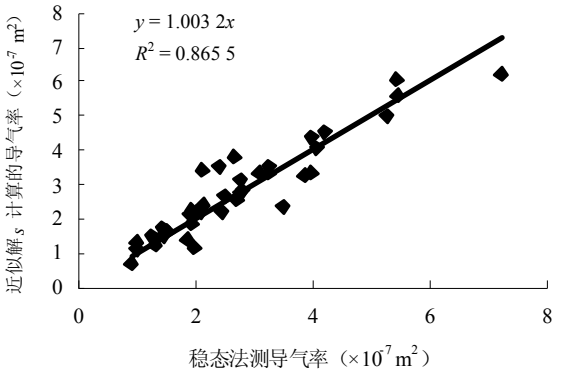


图 7 简化解 s_0 求解的瞬态法与稳态法测量的土壤导气率结果相关分析

Fig. 7 Correlation analysis of steady-state method and transient-flow method calculated by simplified solution s_0 in air permeability measurement

率数值之间具有显著的线性关系，表明相对于原模型参数 s，简化解 s_0 对于导气率计算结果影响较小。

（4）根据简化解 s_0 计算的瞬态土壤导气率结果和稳态导气率结果之间正相关关系密切，表明简化后的参数 s 对导气率计算结果影响较小，验证了用简化解 s_0 代替原模型参数 s 计算土壤导气率的可行性。

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 AT. Measurement of water and air permeability in unsaturated soil. SSSAJ, 1957, 21: 7−10

[3] Blackwell PS, Ringrose−Voase AJ, Jayawardane NS, Olsson KA, Mckenzie DC, Mason WK. 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: 215−228

[4] Iversen BV, Moldrup P, Schjønning P, Loll P. Air and water Permeability in differently-textured soil at two measurement scales. Soil Sci., 200l, 166: 643−659

[5] Tuli A, Hopmans JW, Dennis E. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. Soil Sci., 2005, 69: 1 362−1 371

[6] 王卫华, 王全九, 李淑芹. 长武地区土壤导气率及其与导水率的关系. 农业工程学报, 2009, 25(22): 120−127

[7] 王卫华. 土壤导气率变化特征实验研究（博士学位论文）. 西安: 西安理工大学, 2008: 26−36

[8] Schjonning P, Thomsen IK, Moberg JP. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. Geoderma, 1999, 89: 177−198

[9] Moldrup P, Olesen T, Komatsu T. Diffusivity and permeability in the soil liquid and gaseous phases. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65: 613−623

[10] Han C, Falta RW, Javandel I. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapor extraction well. Water Resources, 1992, 28(4): 1 105−1 120

[11] Springer DS, Loaiciga HA, Cullen SJ. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions. Ground Water, 1998, 36(4): 558−565

[12] Poulsen TG, Moldrup P. Air permeability of compost as related to bulk density and volumetric air content. Waste Management Research, 2007, 25: 343−351

[13] Kirkham D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1946, 11: 93−99

[14] Smith JE, Robin MJL, Elrick DE. A source of systematic error in transient-flow air r permeability measurements. Soil Sci. Am. Proc., 1997, 61: 1 563−1 568

[15] Li HL, Jiao JJ, Luk M. A falling-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory. Journal of Hydrology, 2004: 69−77

[16] Mason EA, Monchick L. Survey of the equation of state and transport properties of moist gases. Reinhold Publishing Corp, 1965: 257−272

A Simplified Solution to Key Parameter *s* on Transient-flow Modelin Measuring Air Permeability

LI Lu-sheng,　ZHANG Zhen-hua,　PAN Ying-hua,　ZHAO Li-li,　ZHU Min,　REN Shang-gang

（*College of Geography and Planning of Ludong University*, *Yantai, Shandong*　264025, *China*）

Abstract:　Li Hailong transient-flow model in measuring air permeability doesn't need to measure the gas flux through the samples. The measurement time is short and exerts little damage to the sample structure compared to the traditional steady-state measurement, but the key parameter *s* of the transient-flow model which describes the pressure−time relationship in the air chamber needs lots of calculations, causing inconvenience in their application. Therefore, this paper tried to simplify the calculation process of parameter *s* based on Li Hailong transient-flow model and then tested it by steady-state method. Through the 40 soil sample's measurement indoors, the outcome indicated that the relationship between and the time *t* was similar to the transient-flow modle linear relation raised by Kirkham. Furthermore, if taking parameters *s* as a standard, the relative error range of Parameters *s* and simplified solution s_0 was under 0.5%, and the relative error as a whole was very low.

Key words:　The constant pressure method, The transient-flow method, Simplified solution, Soil air permeability.