

两种土壤导气率测算模型的对比分析^①

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: 土壤导气率是重要、易测量的土壤参数, 其价值在于可以预测田间饱和导水率, 反映土壤孔隙和土壤结构特征。国内外学者提出不同土壤导气率测算模型。本文通过对比瞬态法和稳态法两种土壤导气率测算模型, 分析两模型在测量效率、经济性等方面优缺点, 以及测量结果的相对误差变化幅度。瞬态法相对稳态法, 无须测量通过土样的气体数量, 测量时间短, 且只需少量体积的气体通过土样, 对土样结构破坏小; 而稳态法测量技术较成熟, 计算方便。室内对 60 组土样测算结果表明, 瞬态法与稳态法测量结果之间具有极显著的相关性, 可用线性函数关系式 $y = 0.9791x$ 表示; 以稳态法为标准, 两种方法测量结果相对误差变化幅度在 0.5% ~ 45% 之间, 80% 以上测量结果相对误差变化幅度 < 15%, 仅有少数变化幅度 > 20%; 同时, 试验结果也验证了稳态试验中气体传导速率 Q 与测量仪内封闭气体压强值 ΔP 存在显著的线性关系, 及 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。

关键词: 瞬态法; 稳态法; 土壤导气率

中图分类号: S151.9²

土壤导气率是反映气体透过土体的能力^[1]。作物种子发芽、出苗、后期成长与成熟以及作物对养分吸收, 都与土壤导气率相关^[2]。土壤导气率良好时, 土壤中好氧微生物活动和繁殖能力增强, 土壤有机质分解迅速, 矿质化明显加快, 有利于作物对养分吸收利用^[2]。反之, 土壤导气率弱时, 土壤中各种有利微生物活动受到抑制, 不利于作物对养分吸收, 影响作物生长, 最终导致作物减产^[2]。因此, 土壤导气率好坏对农业生产极其重要, 是影响土壤肥力的重要因素之一。土壤导气率亦可为土壤孔隙几何特征与土壤结构研究提供参考^[3]。在田间持水量情况下的土壤导气率和饱和导水率之间存在线性关系, 土壤导气率测量值可用于预测田间饱和导水率^[4-5]。

国内外学者提出不同的土壤导气率测算模型与方法。根据模型供气方式不同分为两类: 稳态法和瞬态法。传统土壤导气率测量方法多为稳态法: 在研究土体的一端持续施加稳定气压, 然后测量通过土体的空气数量, 根据土壤空气对流方程得出土壤导气率^[6-8]。Smith^[9]在室内分析土样间压力变化, 得到土壤导气性相关数值, 该方法测量结果受土壤含水率、土壤非均质性影响较大。Massmann 等^[10]用气泵将地表以下 1.2 ~

1.8 m 不饱和区空气抽出或者压入, 利用压力传感器监测不饱和带压力变化, 根据相关模型预测土壤中气流运移参数。Massmann 等^[11]将空气看作不可压缩气体情况下在室内测算土壤导气率, 其试验方法仅适用于气压变化范围较小时土壤导气率测量。Moldrup 等^[12]测算原状火山灰导气率。稳态法测量技术成熟, 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土壤的空气数量, 试验设备复杂且昂贵。瞬态测量方法是指通过记录被测土样密封端压力动态变化, 得到土样密封端压力随时间的变化关系, 根据相关模型计算得出土壤导气率。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未扰动土壤导气率。Smith 等^[14]提出环境温度对于瞬态模型测算结果有影响。Li Hailong^[15]在室内降压法测量沥青导气率, 文中提出沥青导气率测算模型与方法, 属于典型瞬态模型, 该方法无需测量通过沥青的空气数量, 并默认空气是可压缩的, 经试验验证, 其实验模型仅能测算出沥青等透气性差物质的导气率。瞬态模型优势是无需测量通过土样的空气数量, 试验所需气体压力小, 对土样扰动小, 但计算稍复杂。

关于土壤导气率, 国外学者已经进行大量研究,

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (50609022、40801100) 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

目前国内相关研究比较少,仅有王卫华、王全九撰写的相关文献可供参考。王卫华等^[1]研究原状土与扰动土导气率、导水率与含水率的关系,依据试验结果,土壤导气率总体表现为随着土壤含水率增加而呈现显著减少,并讨论了原状土与扰动土之间导气率、导水率存在明显差异原因是由于扰动土土壤结构被破坏,从而改变了土壤孔隙状况;王卫华等^[16]在土壤导气率变化特征试验研究中,对土壤导气率的影响因素进行分析,并对典型土壤导气率和导水率关系进行探讨;王卫华等^[17]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量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。

土壤导气率测算模型研究者较多,尚未有人对瞬态和稳态模型测算结果进行对比,对于模型测算精度研究亦少,仅 Mira Stone Olsojn 等^[18] 分析对比了室内完整土样法、泵测法以及自然气压条件下数字气流模型法 3 种不饱和地带稳态土壤导气率测算模型,3 种稳态模型测算结果接近。本文以测量技术成熟的稳态土壤导气率测算模型为标准,对瞬态和稳态两种导气率测算模型测算结果进行对比分析。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

试验地点设在鲁东大学水土资源调控实验室,土壤样品采集于烟台市农业科学研究院苹果园,果园面积 2 770 m²,所栽果树为 3 龄红富士,东西株距 6 m,南北株距为 3 m。地势平坦,园内采用挖沟埋肥方式,施肥位置为靠近果树根部互为 90° 的四个方向^[19]。以东西方向每隔 3m 为间隔,每行取 25 个样点;南北方向每隔 1.5 m 取样,每行取 35 个样点。确定采样点后,用干净铁铲将采样点地表植物残体落叶等除去,用铁铲垂直将土壤切开,在垂直面取土^[20],整个苹果园内共提取 60 组土样并分别编号。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 7% 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。

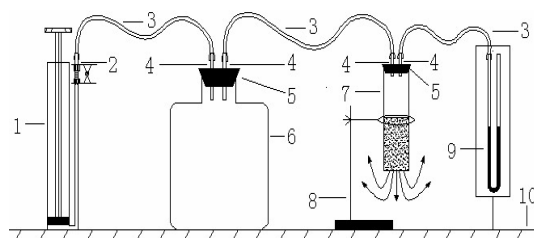
表 1 试验土样的机械组成 (g/kg)

Table 1 Mechanical composition of the tested soil

砂粒 (1~0.05 mm)	粉砂粒 (0.05~0.01mm)	黏粒 (<0.001mm)
342.0	364.6	110.2

1.2 试验装置

试验装置分为瞬态法和稳态法两套装置。瞬态法试验装置包括:打气筒、储气筒、两端开口土柱管、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,方便读取管中土壤样品高度。将待测土样装入土柱管,为防止试验时土样散落,将土柱管底部暂时密封后夯实土壤,记下土体高度。用铁架台固定土柱管,拆下土柱管底部密封物。土柱管上端用插有两个导气管的橡皮塞密封,两导气管插上导气软管并分别连接储气筒和 U 形管压力计。储气筒用于减缓 U 形管压力计水柱的下降速度,方便读数;U 形管压力计用于确定土柱管内土样密封端压力值大小。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)

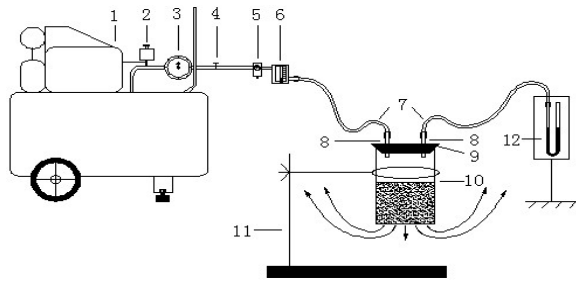
图 1 瞬态法试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the transient-flow air permeability design (not to scale)

稳态法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。压缩机上连有减压阀,用于调节空气压缩机输出气压大小,将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,方便试验记录。测量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量仪。试验装置如图 2 所示。

1.3 试验方法

试验分两部分:用瞬态法测量出某一土壤样品导气率后,在确保土样未受扰动基础上再用稳态法重复测量同一土样导气率。



(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 稳态法试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of the steady-state air permeability design(not to scale)

试验方法如下: 用导气软管连接瞬态法所需仪器设备, 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时停止打气, U 形管水柱高度开始下降, 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。重复该步骤 3 次, 得到同一组土样 3 个瞬态法时间测量数据。瞬态法测一组土壤样品导气率试验结束, 确保土柱管中土样未被扰动基础上, 将储气筒上与土柱管相连接的导气软管拔下, 并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。检查导气软管各接口是否漏气。将事先充满气的储气瓶阀门打开, 调节减压阀把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量仪, 当土壤气体传导速率稳定时, 通过 U 形管两侧水柱高度差读出测量仪内封闭气体压强值, 记录气体流量计读数和 U 形管两侧水柱高度差。一组土样两种方法测量对比试验结束, 其余土壤样品按照试验步骤依次测量。

2 数学模型

2.1 一维瞬态土壤导气率测算模型

假设土壤是恒温的, 如果不考虑重力因素, 通常认为通过土样的气体运动过程是一维的, 因此瞬态法导气率公式可以用 Li Hailong 沥青降压公式^[15]描述。

对于土样中一维气体运动可以用拓展的达西定律

气体运动方程表示:

$$q(z, t) = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P_{smpl}}{\partial z} \quad (1)$$

式中, $q(z, t)$ 指单位时间 t 内通过高度为 z 的土样的气体流量, 单位为 L/T ; k 是土壤导气率, 单位 L^2 ; μ 是干空气粘滞系数, 单位 $M/L \cdot T$; P_{smpl} 是土样表面的大气压力, 单位 $M/L \cdot T^2$; z 是土样高度, 单位 m 。

对于理想的气体运动规律, 有如下公式:

$$p = \frac{w P_{smpl}}{RT} \quad (2)$$

式中, $p(z, t)$ 指空气密度, 单位 M/L^3 ; w 是空气分子量, 单位 M/mol ; T 是环境温度, 单位 $kelvin$; R 指气体常数, 单位 $M/L^2 \cdot T^2 \cdot mol \cdot Kelvin$ 。

Li Hailong 在式 (1)、式 (2) 基础上推导出: 当被测土样密封端压力变化所需的时间从 0 到 t 时, 有下列公式:

$$\ln\left(c \frac{p(t) - P_{atm}}{p(t) + P_{atm}}\right) = -\frac{A P_{atm} k}{V Z \mu} \cdot t \quad (3)$$

式中, k 是土壤导气率, 单位 m^2 ; P_{atm} 是土样表面的大气压值, 单位 Pa ; A 是土柱管管口横截面积, 单位 m^2 ; Z 是土柱管中土壤样品高度, 单位 m ; μ 是干空气粘滞系数, 单位 $Pa \cdot s$; V 是土柱管中除样品外体积与储气筒体积之和, 单位 m^3 ; $p(t)$ 指对应 t 时间的 U 形管压力计高度差, 单位 m 。

式 $\ln\left(c \frac{p(t) - P_{atm}}{p(t) + P_{atm}}\right)$ 中 c 常数用下列公式计算:

$$c = \frac{p(0) + P_{atm}}{p(0) - P_{atm}} \quad (4)$$

式中, $p(0)$ 为 U 形管初始压力差, 单位 Pa ; P_{atm} 为大气压, 单位 Pa 。

$\ln\left(c \frac{p(t) - P_{atm}}{p(t) + P_{atm}}\right)$ 数值大小取决于时间 t , 因此用斜

率 s 表示 $\ln\left(c \frac{p(t) - P_{atm}}{p(t) + P_{atm}}\right)$ 与时间 t 的关系^[15]。

将斜率 s 代入式 (3) 中得到一维瞬态土壤导气率计算公式:

$$k = -\frac{V Z \mu s}{A P_{atm}} \quad (5)$$

式中, k 是土壤导气率, 单位 m^2 ; P_{atm} 是土样表面大气压值, 单位 Pa ; A 是土柱管管口横截面积, 单位 m^2 ; Z 是土柱管中土壤样品高度, 单位 m ; μ 是干空气粘滞系数, 单位 $Pa \cdot s$; V 是土柱管中除样品体积与储气筒体积之和, 单位 m^3 ; s 是 $\ln\left(c \frac{p(t) - P_{atm}}{p(t) + P_{atm}}\right)$ 与时间 t 斜率, 单位 $1/s$ 。

干空气的粘滞系数 μ 一般受温度影响较大, 估计值约为:

$$\mu = (1.717 + 4.8T) \times 10^{-8} \quad (6)$$

式中, T 为空气温度。

Mason 等^[21]研究得出当空气温度在 -10°C 和 40°C 之间, 大气压强 $>77\text{ kPa}$ 时, 在实际应用 μ 参数的过程, 空气湿度对 μ 的影响 $<1\%$ 。

每次试验土柱管中土样高度 Z 、土柱管中除样品外体积与储气筒体积之和 V 均相同, 式 (5) 中土柱管管口横截面积 A 、大气压值 P_{atm} 以及干空气的粘滞系数 μ 均是一定的, 每次试验记录变化的数值只有时间 t 。因此瞬态法测量土壤导气率的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 之间的关系数据。

2.2 一维稳态土壤导气率测算模型

假设空气是不可压缩的, 如果不考虑重力因素, 低压低速情况下均质土壤的一维稳态土壤空气入渗模型可以用类似于描述土壤水分运动过程的达西定律^[22]表示:

$$Q = \frac{kA}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

式中, Q 是气体传导速率, 单位 m^3/s ; A 是土柱管的横截面积, 单位 m^2 ; μ 是干空气的粘滞系数, 单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; p 是测量仪内封闭气体压强值, 单位 Pa ; x 表示样品高度, 单位 m ; k 是土壤导气率, 单位 m^2 。

在 (6) 式基础上变换得到一维稳态土壤导气率计算公式:

$$k = \frac{l \cdot \mu}{A} \cdot \frac{Q}{\Delta P} \quad (8)$$

式中, k 是土壤导气率, 单位 m^2 ; μ 是干空气粘滞系数; Q 是气体传导速率, 单位 m^3/s ; ΔP 为 U 形管高度差对应的压强值, 单位 Pa ; A 是土柱管横截面积, 单位 m^2 ; l 是样品高度, 单位 m 。

3 试验结果与数据分析

为对比瞬态和稳态两种土壤导气率模型测算结果, 共进行 60 组土壤导气率对比试验。

3.1 稳态法 Q 与 ΔP 之间的关系

稳态法测量土壤导气率试验过程中需记录气体流量计读数和 U 形管两侧水柱液面高度差, 两者根据稳态法数学模型为 Q 与 ΔP 之间关系。通常多次读取

不同 Q 值及其对应 ΔP 数值, 取计算出的导气率平均值, 使计算结果更为准确。一维稳态导气率测算模型虽然默认空气是不可压缩的, 但是由于试验时提供的气压相对较低、流速较慢, 因此该假设对试验结果影响不显著。试验结果验证了对于同一组土壤样品, 多次读取不同 Q 及其对应 ΔP 值之间存在线性关系, 图 3 给出 6 组土壤样品气体流速 Q 与测量仪内封闭气体压强值 ΔP 之间的线性关系, 其余土壤样品 Q 与 ΔP 之间变化规律与这 6 组土样类似。

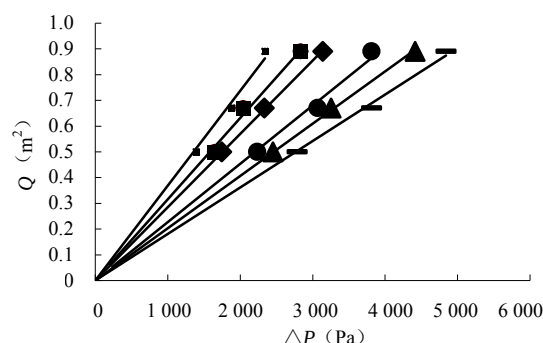


图 3 稳态法气体流速 Q 与测量仪内封闭气体压强值 ΔP 成线性关系

Fig. 3 The air flow rate Q as a function of the pressure difference ΔP across some soil samples

3.2 瞬态法 U 形管压力计高度差变化 ΔP 与时间 t 关系

瞬态法测量导气率重点是时间 t 的获取, 时间 t 变化对计算结果影响较大, 每组样品做 3 次重复性试验, 取时间 t 平均值, 减少人为误差。图 4 展示了同一组土样 3 次重复性试验中 $\ln(c \frac{p(t) - P_{\text{atm}}}{p(t) + P_{\text{atm}}})$ 变化与时间 t 关系。图 5 展示了部分样品所测试验数据的 $\ln(c \frac{p(t) - P_{\text{atm}}}{p(t) + P_{\text{atm}}})$ 变化与时间 t 之间关系。从数据结果看, U 形管压力计水柱初始高度相等, 均从 20 cm 高度差开始下降, 20, 18...0 cm 即 ΔP 均是从 1 960.6, 1 764.54...196.06 一直下降到 0 Pa。对应 60 次试验有 60 组实验数据, 每组数据 $\ln(c \frac{p(t) - P_{\text{atm}}}{p(t) + P_{\text{atm}}})$ 变化与时间 t 都成线性关系。

3.3 两种方法测量结果对比分析

3.3.1 两种方法测量的导气率统计特征值 共

进行 60 组土样对比试验,瞬态法和稳态法测量的土壤导气率指标描述性统计分析见表 2。由表 2 得知,两种方法测量的导气率数值均不服从正态分布,皆为中等变异,且稳态法测量导气率 k 的变异大于瞬态法测量导气率 k 的变异。其中瞬态法测量数值介

6.88806E-12 与 6.2361E-11 之间,变异系数 0.42,最大值是最小值的 9.05 倍;稳态法测量数值介于 9.11E-12 与 7.22E-11 m^2 之间,最大值是最小值的 7.93 倍,变异程度更大,变异系数为 0.43。

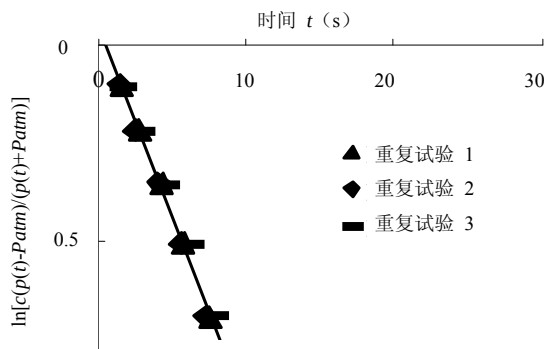


图 4 同一样品 3 次重复性试验

$\ln[c(p(t)-Patm)/(p(t)+Patm)]$ 变化与时间 t 关系

Fig. 4 $\ln[c(p(t)-Patm)/(p(t)+Patm)]$ versus time test data for three repeated tests of a soil sample

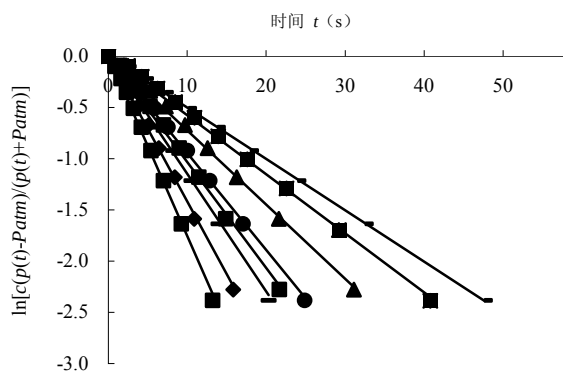


图 5 部分土样的变化

$\ln[c(p(t)-Patm)/(p(t)+Patm)]$ 与时间 t 之间的关系

Fig. 5 $\ln[c(p(t)-Patm)/(p(t)+Patm)]$ versus time test data of some soil samples

表 2 两种方法测定的导气率统计特征值

Table 2 Statistical characteristic values of air permeability under two methods of determination

试验方法	观测数	平均数	最大值(m^2)	最小值(m^2)	标准差	变异系数
稳态法	60	3.06E-11	7.22E-11	9.11E-12	1.32E-11	0.43
瞬态法	60	3.11E-11	6.24E-11	6.89E-12	1.32E-11	0.42

3.3.2 比较分析两种测量方法 瞬态法测量土壤导气率简单、方便,无须携带大型测量仪器及购买昂贵土壤导气率测量设备,用秒表,打气筒等简易设备即可测算出土壤导气率,通过导气软管连接各个仪器设备,方便移动,并且瞬态法无须测量通过土样气体数量,测量时间短,相对稳态法,只需少量体积气体通过土样,对土样结构破坏性小;稳态法测量技术成熟,但仪器较昂贵。两种方法均适合室内导气率测量试验。图 6 表明,瞬态法测量的土壤导气率和稳态法测量的导气率数值之间具有极显著相关性 ($R = 0.93 > R_{0.01}$, $\alpha = 0.01$),可用线性函数关系式 $y = 0.979 1x$ 表示。

3.3.3 两种方法测量的导气率结果误差分析 图 7 为两种方法测量土样的导气率相对误差图。以稳态法作为标准,两种方法测量结果相对误差的变化幅度在 0.5% ~ 45% 之间,80% 以上测量结果相对误差变化幅度 $< 15\%$,仅有少数变化幅度 $> 20\%$ 。针对瞬态法和稳

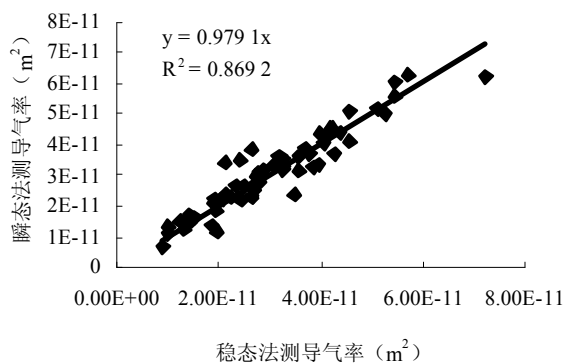


图 6 稳态法与瞬态法测量的土壤导气率结果相关分析

Fig. 6 Correlation between steady-state method and Transient-flow method in air permeability measurement

态法测定结果存在差异,初步推断造成两种方法测量同一组土样导气率数值差异性由如下原因造成:①瞬态法测量完一组土样,换稳态装置测量同一组土样时对土柱管中土样有稍微扰动;②人为因素影响,如瞬

态法测定导气率, 瞬态时间 t 读数误差对试验结果有影响; ③用瞬态法测量土壤导气率, 会对土壤产生微小压力, 使土壤空隙发生变化, 影响接下来稳态法测量结果准确性。

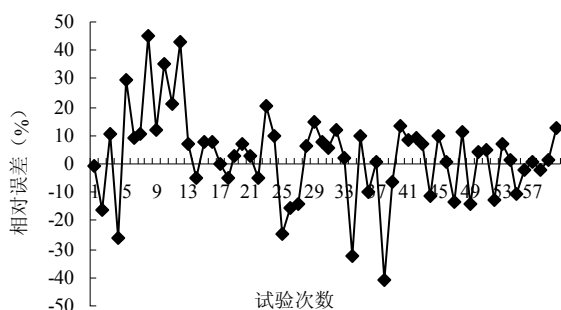


图7 两种方法测量土壤导气率相对误差

Fig. 7 Relative error of air permeability under two methods

3.4 结论

(1) 通过对稳态法试验结果分析, 验证了对于同一组土壤样品, 多次读取不同 Q 及其对应 ΔP 值之间均存在线性关系。

(2) 试验结果同时验证了瞬态法导气率测算试验中 U 形管压力计高度差变化 ΔP 与时间 t 呈线性关系, 每组数据 $\ln(c \frac{p(t) - P_{atm}}{p(t) + P_{atm}})$ 变化与时间 t 均呈线性关系。

(3) 两种测算模型测量的土壤导气率数值均不服从正态分布, 皆为中等变异, 且稳态法测量导气率 k 值的变异稍大。

(4) 瞬态法测量的土壤导气率和稳态法测量导气率结果之间具有极显著相关关系, 可用线性函数关系式 $y = 0.9791x$ 表示, 表明两种测量方法试验结果接近。

参考文献:

- [1] 王卫华, 王全九, 樊军. 原状土与扰动土导气率、导水率与含水率的关系. 农业工程学报, 2008, 24(8): 25-28
- [2] 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
- [3] 同延安, 王全九. 土壤-植物-大气连续体系中水运移理论与方法. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002: 22-40
- [4] Aljibury FK, Evans DD. Water Permeability of saturated soil as related to air Permeability at different moisture tensions. Soil Sci. Soe. Am.Proc., 1965, 29: 366-369
- [5] Iversen BV, Moldrup P, Schjønning P and Loll P. Air and water permeability in differently-textured soil at two measurement scales. Soil Sci., 2001, 166: 643-659
- [6] Shan C, Falta R, Javandel I. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapor extraction well. Water Resour. Res., 1992, 28(4): 1105-1120
- [7] Springer DS, Loaiciga HA, Cullen SJ, Everet LG. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions. Ground Water, 1998, 36(4): 558-565
- [8] Tjalfje GP, Moldrup P. Air permeability of compost as related to bulk density and volumetric air content. Waste Management Research, 2007, 25: 343-351
- [9] Smith JA, Katchmark W, Choi JW, Tillman JrFD. Unsaturated-zone air flow at Picatinny Arsenal, New Jersey: Implications for natural remediation of the trichloroethylene-contaminated aquifer. Water-Resources, 1999: 625-634
- [10] Massman JW, Madden M. Estimating air conductivity and porosity from vadose-zone Pumping tests. Journal of Environmental Engineering, 1994, 120(2): 313-328
- [11] Massmann J, Johnson L. Exercises illustrating flow in Porous media. Ground Water, 2001, 39(4): 499-503
- [12] Moldrup P, Yoshikawa S, Olesen T, Komatsu T, Rolston DE. Gas diffusivity in undisturbed volcanic ash soils: Test of soil-water-characteristic -based prediction models. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(1): 41-51
- [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] James ES, Michel JL. Robin, David EE. A Source of Systematic Error in Transient-Flow Air Permeamter Measurements. Soil Sci. Am. Proc., 1997, 61: 1563-1568
- [15] Li H L, Jiao J J, Luk M. A falling-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory. Journal of Hydrology, 2004: 69-77
- [16] 王卫华. 土壤导气率变化特征实验研究. 西安: 西安理工大学出版社, 2008: 26-36
- [17] 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
- [18] Olson MS, Tillman FD. Jr., Choi J-W, Smith JA. Comparison of three techniques to measure unsaturated-zone air permeability at Picatinny Arsenal. NJ Journal of Contaminant Hydrology, 2001, 53: 1-19
- [19] 谢恒星, 张振华, 刘继龙. 苹果园土壤含水量测定取样点数目及插值方法研究. 莱阳农学院学报, 2005, 22(4): 298-302

- [20] 奚延孔, 张艳新. 土壤样品的采集与处理技术. 广西农学报, 2007, 22(3): 36-37
- [21] Mason EA, Monchick L. Survey of the equation of state and transport properties of moist gases. Reinhold Publishing Corp, 1965: 257-272
- [22] Soltani AM, Le Ravalec-Dupin, Fourar M. An Experimental Method for One Dimensional Permeability Characterization of Heterogeneous Porous Media at the Core Scale. Transp. Porous Med., 2009, 77: 1-16

Comparative Analysis on Two Air Permeability Models

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: Air permeability is an easy but important soil parameter, which can be used as an indicator of K_s at field scale and of soil porosity and soil structural property. So far lots of air permeability models with different properties have been established. This paper compared the constant pressure method and the transient-flow method in measuring air permeability in the measure efficiency and economy, the range of relative error of measured result. Comparing to the constant pressure method, the transient-flow method is unnecessary to measure the air quantity through the soil sample, and it cost less time and need only a small volume air going through the sample soil, thus cause less damage to soil sample structure. The constant pressure method embraces the advantage in technique maturity and calculation convenience. The indoor measurement results of 60 soil samples showed the extremely significant correlation between the two methods ($y = 0.9791x$), taking the constant pressure method as a standard, the range of relative error of the measured results between the two methods was between 0.5% - 45%, the relative error was less than 15% for more than 80% of measured results. Meanwhile, the test results confirmed the significant linear relation between gaseous conductance rate Q and the gas pressure value ΔP within measuring apparatus by constant pressure method as well as the linear relation between time T and the dynamic change of seal section pressure in the measured soil sample by constant pressure model proposed by Kirkham.

Key words: Constant pressure method, Transient-flow method, Soil air permeability