

# 长武地区土壤导气率及其与导水率的关系

王卫华<sup>1,2</sup>, 王全九<sup>1,3\*</sup>, 李淑芹<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 四川省绵阳市北川羌族自治县水务农机局, 绵阳 622750;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 为了寻求快速、直接、耗资低并且可用于评估野外饱和导水率的量级和其空间变异性的方法, 利用 PL-300 土壤导气率测量仪对长武小麦试验田不同含水率、体积质量、土层、取样方向、根系密度下的导气率, 以及室内原状土壤样本 (248 cm<sup>3</sup>) 在田间持水率情况下的导气率及饱和导水率进行了研究。发现在不同的影响因素下导气率具有一定的变化规律; 含水率接近田间持水率时的土壤导气率和饱和导水率之间存在对数线性关系。土壤导气率与饱和导水率的这种预测关系在早期的试验研究中也有所反映。将本试验结果与 Loll、Iverson 等人的研究成果进行对比论证, 验证了通过测量土壤导气率预测田间饱和导水率的方法是可行的。

**关键词:** 土壤, 土壤水分, 预测, 模型, 导气率, 导水率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.11.022

中图分类号: S152.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-11-0120-08

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[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 120-127.

Wang Weihua, Wang Quanjiu, Li Shuqin. Character of soil air permeability and its relationship with water conductivity in Changwu, loess region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 120-127. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

土壤数学模型模拟预测的可靠性取决于该模型中参数的准确性。预测土壤水力参数的很多模型中都需要准确的参数输入。由于土壤水力参数的准确测量费时费力, 因此简单快速的测量方法一直是研究的热点之一。

饱和导水率 ( $K_s$ ) 在田间土壤的变异性通常很大 (几个数量级)<sup>[1-3]</sup>。田间  $K_s$  的测量耗时<sup>[4]</sup>, 且测量效率低下, 往往需要更多的重复<sup>[5]</sup>。所以, 可靠、快速、低廉的测量方法是亟需的。于是研究者从较容易的土壤特征入手, 诸如土壤质地、多孔性等<sup>[6-7]</sup>, 提出了土壤导气率的概念<sup>[8-9]</sup>。

土壤的导气率 ( $K_a$ ) 相对比较容易测量<sup>[10-11]</sup>, 并且可以充分反映土壤孔隙和土壤结构的特征<sup>[12-13]</sup>。导气率及其随土壤含水率的变化关系是气体运移建模时所必需的。最近研究建议在水和溶质运移中更好的利用土壤导气率 ( $K_a$ ) 来评估空间变异性<sup>[14]</sup>, 因为土壤导气率的测量更加迅速, 并且不破坏土壤结构。据我们所知, 田间土壤导气率的空间相关性仅被 Poulsen 等人<sup>[15]</sup>和 Iverson<sup>[16]</sup>等人研究过。

理想状况下, 导水率和导气率在相同流度的阶段应具有相同的数值, 完全干燥土样的导气率相当于饱和导

水率数值。但在实际情况下, 导气率的测量值往往低于完全干燥条件下的数值, 归因于土壤的收缩, 导致土壤结构损坏, 使得  $K_a$  与  $K_s$  没有可比性。 $K_a$  的测量值受控于大孔隙中的水流, 当含水率接近田间持水率时, 气体的流动主要存在于大孔隙之中。基于这个原因, 把田间持水率情况下的土壤导气率用于预测多孔系统的饱和导水率是一个不错的方案<sup>[17]</sup>。

仅有为数不多的研究关于发现并预测  $K_a$  与  $K_s$  的关系<sup>[8,11-12,16]</sup>, Loll 等人 1999 年建议在 -10 kPa 的压力下测量原状土样本获得  $K_a$ , 用于推断  $K_s$  的空间可变性。2003 年 Iverson 等人通过室内测量  $K_a$ , 刻画  $K_s$  的空间变异性, 并应用于表面出流模型。目前仍需要更多的试验研究来验证这种方法的可行性。

本研究旨在揭示长武地区不同影响因素下土壤导气率的变化规律以及  $K_a$  与  $K_s$  的关系; 并与前人研究成果进行比较, 讨论此种通过对数方程进行预测的方法的可行性与适用性。为了进一步明确土壤导气率的影响因素以及土壤导气率与饱和导水率的关系, 首先应获得土样导气率和导水率数值。

## 1 试验方法

本试验在陕西长武小麦地进行, 用环刀分别提取耕作层 5、15、40 cm 处原状土。以 5 cm 为间隔, 每层提取 60 个土样。其中 20 个用于分析土壤导气率影响因素, 40 个用于分析导气率与导水率间的关系。为了分析土壤导气率的影响因素以及土壤导气率与导水率关系, 测量不同含水率、体积质量、土层、取样方向、根系密度下的导气率及田间持水率条件下原状土的导气率, 同时在饱和条件下对原状土的导水率进行测定, 并比较分析各土层之间导气率与导水率的关系。

收稿日期: 2007-10-18 修订日期: 2009-07-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2005CB1211103); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-YW-N-003); 国家自然科学基金 (40601041)

作者简介: 王卫华 (1982-), 女, 陕西西安人, 主要从事土壤物理方面的研究。西安 西安理工大学水利水电学院, 710048。

Email: wangweihua1220@gmail.com

\*通信作者: 王全九 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会会员 (E041200065S), 主要从事农业水土工程方面研究工作。西安 西安理工大学水利水电学院, 710048。Email: wquanjiu@163.com

### 1.1 试验区介绍

试验站布设在中国科学院长武农业生态试验站, 该站位于黄土高原中南部, 陕甘交界处的陕西省长武县洪家镇王东村, 北纬 35°12'~35°16', 东经 104°40'~107°42', 海拔 940~1 220 m, 面积 8.3 km<sup>2</sup>[18]。

长武是黄土高原水土流失区, 属西北内陆暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候区, 四季冷暖干湿分明, 年平均日照 2 226.5 h, 日照百分率 51%, 年平均气温 9.1℃, 1 月平均气温 -5.1℃, 极端最低温度 -24.9℃, 7 月平均气温 22.1℃, 极端最高温 36.9℃。塬面全年 ≥0℃ 活动积温 3 688℃, ≥10℃ 活动积温 3 029℃, 多年平均无霜期 171 d。热量供作物一年一熟有余, 复种指数 116%。多年平均降水量 583.1 mm, 春季少雨, 夏季多伏旱、冰雹、风灾等自然灾害对农业生产危害较大。2003 年为特大降雨年, 降雨量超过 800 mm。

土壤属黏黑垆土地带, 母质是深厚的中壤质马兰黄土。长武中壤质黑垆土是国内优良的旱作土壤, 深厚土层和良好的物理性质给植物根系提供了有利的生长条件。全剖面土质均匀疏松, 空隙率占 50% 左右, 通透性好。

### 1.2 试验仪器简介

本试验采用 PL-300 型土壤导气率测定仪 (德国 Umwelt-Geräte-Technik GmbH 公司) 测定土壤导气率。该系统由主机和样本容器两部分组成。试验系统由图 1 所示: 主机包括气泵、测量喉管、压力传感器及数据采集器。环刀高为 6.1 cm, 内径为 7.2 cm, 容积为 248 cm<sup>3</sup>。在试验过程中首先利用环刀提取土壤样品, 然后与环刀适配器连接。在测量过程中, 空气自动由环刀流入仪器, 并测量环刀内部与外部空气间的压力差, 同时直接输出土壤导气率数值[19]。

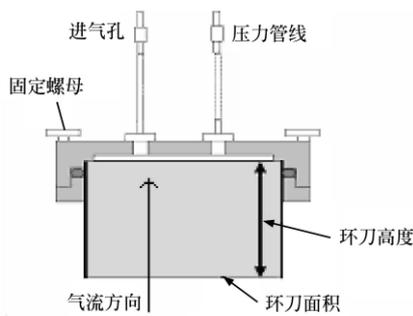


图 1 导气率测定系统示意图

Fig.1 Schematic description of air permeability measure system

### 1.3 试验过程

#### 1.3.1 样本处理及试验方法

用于分析土壤导气率影响因素的 20 个土样先饱和, 静置使之达到平衡后, 利用 PL-300 土壤导气率测定仪测定导气率, 称质量, 以便后期计算体积质量。之后将土样放入 35℃ 烘箱内 6~8 h, 使其含水率降低到一定程度, 静置至平衡, 再次测量导气率, 称质量。逐步减低含水率, 测定不同含水率下土壤导气率, 直至土样完全干燥。

用于分析导气率与导水率间关系的 40 个土样, 利用威尔科克斯法制备成含水率为田间持水率的土样 (具体

操作方法见下文), 利用 PL-300 土壤导气率测定仪测量含水率为田间持水率土样的导气率  $K_a$ ; 同时称质量, 以便后期计算田间持水率。接着再次饱和土样, 利用常水头法测量其饱和导水率  $K_s$ 。最后, 把土壤样本放入烘箱 105℃, 经过 12 h 取出称质量。饱和土样时用 0.01 mol/L 氯化钙溶液浸泡, 以稳定孔隙结构, 并抑制在潮湿环境下细菌滋生。

利用威尔科克斯法制备含水率为田间持水率的土样, 其具体操作步骤如下:

- 1) 用环刀在野外采集原状土, 带回室内在水中饱和和一昼夜 (水面较环刀上缘低 1~2 cm, 勿使环刀上面浸水)。
- 2) 同时在相同的土层采土, 风干, 过 1 mm 筛子, 装入环刀中, 装土时轻拍击实, 并稍微装满些。
- 3) 将装有饱和水分的环刀底盖打开, 连同滤纸一起放在装有风干土的环刀上, 为使接触紧密, 可用砖头压实。
- 4) 经过 8 h 的吸水过程, 上面原状土的含水率既是田间持水率。

#### 1.3.2 土样颗粒组成测定

供试土样经风干、过 1 mm 筛, 利用马尔文激光分析仪测定土壤机械组成, 如表 1 所示, 经测定土壤体积质量为 1.33 g/cm<sup>3</sup>, 通过查国际制土壤质地三角形可知, 黑垆土属于粉壤土。

表 1 各土层土壤颗粒组成

Table 1 Particle composition of tested soil in each layer			
土层深度/ cm	黏粒 <0.002 mm	粉粒 0.002~<0.05 mm	沙粒 0.05~1 mm
5	15.310	71.367	13.323
15	14.663	72.434	12.903
40	15.935	75.288	8.777

#### 1.3.3 土壤水分特征曲线测定

利用离心机法测定上、中、下 3 层原状土土壤样本的含水率及其对应的负压间关系, 结果如图 2 所示。

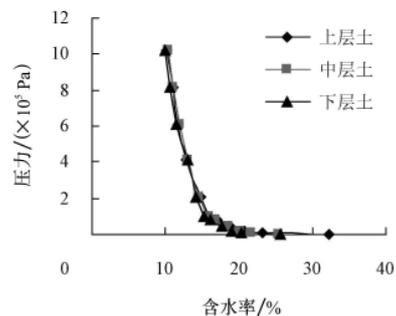


图 2 各土层土壤水分特征曲线

Fig.2 Soil moisture characteristic curves in each layer

由图 2 可知, 3 层土的水分曲线基本一致, 只是上层土的饱和含水率略微大一些。这是因为上层土壤比较疏松, 小孔隙较其他两层土含量较多。因此, 3 层土的水分曲线可以以 1 条表示, 应用 van Genuchten 公式描述土壤水分特征曲线, 具体表示为

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1)$$

式中： $\alpha$ ——与进气吸力有关的参数； $n$  和  $m$ ——形状系数； $\theta$ ——含水率； $\theta_s$ ——饱和土壤含水率； $\theta_r$ ——滞留土壤含水率； $h$ ——土壤吸力，cm 或 Pa。

应用 RETC 软件（美国盐改中心提供的专门用于确定土壤水分特征曲线的软件）拟合土样 van Genuchten 经验公式的参数值分别为

原状土： $\alpha = 0.0050$ ； $n = 1.673$ ； $m = 0.4023$

1.3.4 土壤体积质量及孔隙度测定

土壤体积质量利用烘干法测定<sup>[20]</sup>。

土壤总孔隙度一般都不直接测定，而由土粒密度和体积质量间接计算求得

$$\text{孔隙度} = 1 - \text{体积质量} / \text{土粒密度} \quad (2)$$

1.3.5 土壤饱和和导水率测定

利用常水头法测定了各土层土样饱和导水率<sup>[20]</sup>。

2 结果与分析

2.1 导气率影响因素分析

2.1.1 含水率、体积质量对导气率的影响

为了分析土壤导气率随土壤含水率、体积质量的变化规律，选择 5 cm 土层 3 组土样 UD1、UD2、UD3（UD 意为 Undisturbed，原状土）的测定结果进行分析。3 组原状土的基本物理特性列在表 2 中。测定的土壤导气率与含水率关系如图 3 所示。

由图 3 可知，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过程。这是因为土壤中空气和水分共同存在于土壤孔隙中，土壤水分的增加必然导致空气含量的减少，从而影响土壤的通气状况。由于土壤通气性好坏主要决定于土壤的通气孔隙大小和数量。土壤空气的交换主要通过土壤中相互连接并且充气的孔隙来实现的，土壤大孔隙的数量和比例是决定土壤通气能力的内在因素。图示原状土样本的导气率均随含水率的增大而减小；且同一含水率情况下，土壤导气率随体积质量的增大而减小。体积质量增大导致土壤孔隙率减小，进而影响土壤的通气状况<sup>[19]</sup>。

表 2 5 cm 原状土基本物理性质

Table 2 Basic physical properties of undisturbed soils in 5 cm depth

取土地点	样本编号	体积质量/ (g · cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/ (cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup> )	饱和含水量/ (g · cm <sup>-3</sup> )	饱和导水率/ (cm · min <sup>-1</sup> )
	UD1	1.205	0.545	0.451	0.470
长武	UD2	1.254	0.527	0.441	0.386
	UD3	1.428	0.461	0.394	0.206

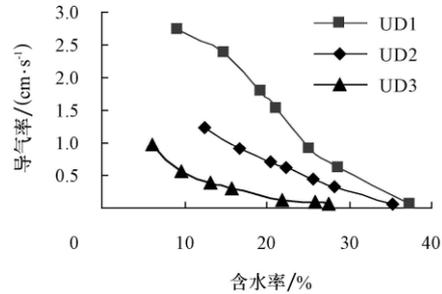


图 3 原状土导气率与含水率的关系

Fig.3 Relationship between air permeability and soil moisture for undisturbed soil samples

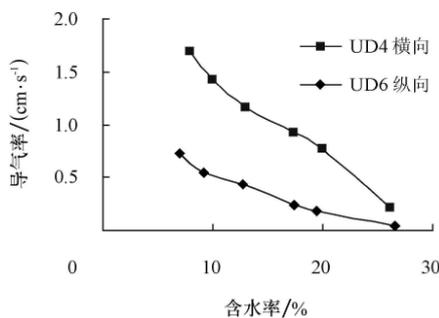
2.1.2 不同取土方向对导气率的影响

为分析不同取土方向对土壤导气率的影响，选择长武小麦试验田 15 cm 土层纵横两方向上体积质量相当的土样 UD5、UD6、UD7、UD8 的测定结果进行分析。4 组原状土的基本物理特性列在表 3 中。测定的土壤导气率与取土方向的关系如图 4 所示。

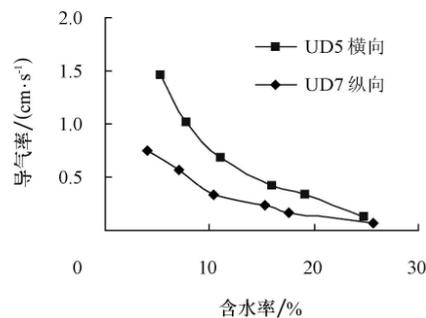
表 3 15 cm 原状土基本物理性质

Table 3 Basic physical properties of undisturbed soils in 15 cm depth

取土地点	样本编号	体积质量/ (g · cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/ (cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup> )	饱和含水量/ (g · cm <sup>-3</sup> )	饱和导水率/ (cm · min <sup>-1</sup> )	取土方向
	UD4	1.451	0.311	0.387	0.056	横向
长武	UD5	1.481	0.325	0.363	0.049	横向
小麦地	UD6	1.450	0.310	0.377	0.098	纵向
	UD7	1.481	0.325	0.369	0.072	纵向



a. 容重 1.45 g/cm<sup>3</sup>



b. 容重 1.48 g/cm<sup>3</sup>

图 4 不同取土方向上原状土导气率与含水率的关系

Fig.4 Relationship between air permeability and soil moisture of undisturbed soil with different directions

从图 4 中可以看出：体积质量相当的情况下，横向取土的土样导气率数值总体高于纵向取土的土样。一般认为黄土高原土壤存在纵向节理，理论上纵向应大于横

向的测量结果。但是，本试验的测量结果恰恰与人们的普遍认识相矛盾。导水率在体积质量相当的情况下，纵向数值大于横向，符合纵向节理的理论。

分析可能是因为土壤中本身存在纵向节理，横向也存在相连的孔隙。纵向取土样时，环刀壁恰好切断横向相连的孔隙；而横向取土样时，环刀壁切断的是土壤中的纵向节理，这时横向相连孔隙的方向与环刀取样的方向一致。也就是说，横向相连的孔隙的连通程度大于纵向节理的连通程度，从而造成横向取土的土样导气率大于纵向取土的土样。应注意，此结论只适用于该取样地点。目前，还没有找到能够合理解释这种情况的理论基础，有待进一步研究。

2.1.3 土样中根系密度对导气率的影响

为分析土样中根系密度对导气率的影响，选择长武小麦试验田 15、40 cm 土层纵向上体积质量相当的土样 UD8、UD9、UD10、UD11 的测定结果进行分析。根系含量是指将测量室中土样所含的根系挑出，用清水洗净，烘干并称质量。本文根系不区分几年生根，包括杂草根系，只要是土样中所含的根系一律计质量。4 组原状土的基本物理特性及各土样的根系密度在表 4 中。测定的土壤导气率与根系密度的关系如图 5 所示。

表 4 15 cm 和 40 cm 原状土基本物理性质

Table 4 Basic physical properties of undisturbed soils in 15 cm and 40 cm

取土地点	样本编号	体积质量/(g · cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/(cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup> )	饱和含水量/(g · cm <sup>-3</sup> )	饱和导水率/(cm · min <sup>-1</sup> )	取土层/cm	根系密度/(g · m <sup>-3</sup> )
长武 小麦地	UD8	1.450	0.310	0.386	0.097	15	0.1744
	UD9	1.447	0.309	0.401	0.099	15	0.0477
	UD10	1.516	0.340	0.358	0.057	40	0.0191
	UD11	1.518	0.341	0.369	0.059	40	0.0261

注：表中根系含量表示土样中所含有的根系烘干质量。

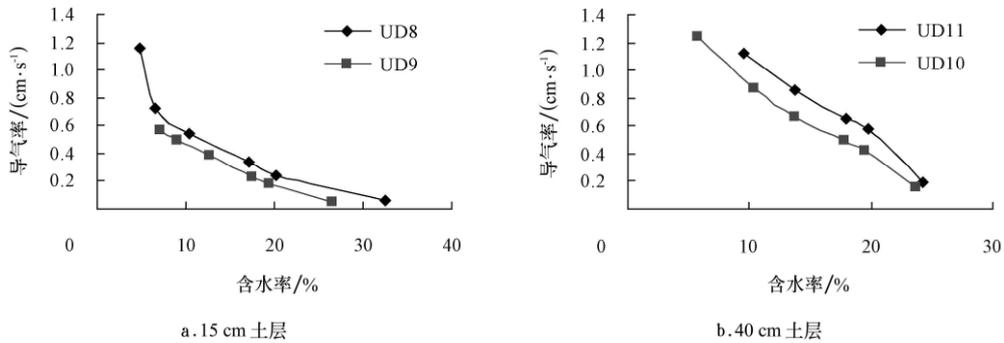


图 5 不同根系密度原状土导气率与含水率的关系

Fig.5 Relationship between air permeability and soil moisture of undisturbed soil with different root contents

从图 5 中可以看出：体积质量相当的情况下，根系含量高的土样导气率数值总体高于根系含量低的土样。同时本试验操作是实现各土样由湿到干的过程，随着水分的减少，根系萎缩，沿根系生长方向孔隙逐渐增大，故随着含水率的减小，导气率随含水率变化的曲线逐渐变陡。根系密度高的导气率大，说明植物根系对于改善土壤密实程度有一定作用。

2.2 导气率与导水率间关系

空气和水渗透性关系紧密<sup>[21]</sup>，通过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有价值的信息。导气率的测量值可用于预测饱和导水率<sup>[11,22]</sup>，这个方法非常实用，特别是在需要多点测量的大田土壤研究中，因为导气率的测量操作比导水率的测量更加容易，更加迅速且不扰动土壤。

2.2.1 各土层深度土壤样本田间持水率与导气率的分布规律

根据前述威尔克斯法制备土壤含水率为田间持水率的土样，测定土壤样本田间持水率，并利用土壤采样环测量室测量含水率为田间持水率情况下的土壤导气率。绘制出各土层深度土壤样本田间持水率与导气率的分布

图，如图 6 所示：5 cm 土壤比较疏松，小孔隙较其他两层分布较多，体积质量小，田间持水率较大。15 cm 土层体积质量较 5 cm 的大，田间持水率明显减小，导气率数值变化不明显。40 cm 位于土地机械耕作层深度，土壤存在裂隙，以致该土层部分样本导气率偏大。

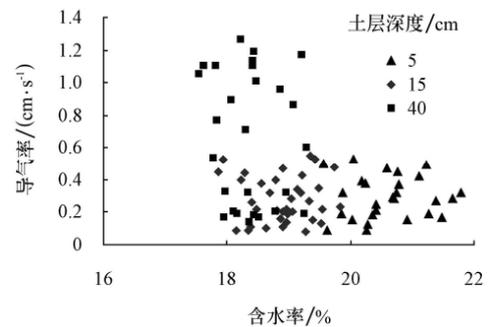


图 6 各土层深度土壤样本田间持水率与导气率的分布  
Fig.6 Distribution of field capacity and air permeability of soil samples in different soil layers

2.2.2  $K_a$  与  $K_s$  之间的对数关系

Loll 等人研究发现  $K_a$  与  $K_s$  之间有一定关系，即：

$$\log(K_s) = \gamma \log(K_a) + \beta \quad (3)$$

式中  $\gamma, \beta$ ——系数。

Loll 等人利用 100 cm<sup>3</sup> 的土样在吸力为-10 kPa 时测得  $K_a$ ，然后饱和土样测得饱和导水率  $K_s$ ，建立两者之间的对数关系，其精确度达±0.7<sup>[8]</sup>。Iversen 等人分别测定了 3 种不同土壤质地的土样的  $K_a$  与  $K_s$ ，土壤质地从沙土到黏壤土逐步变化，样品规格也有所变化，采用 6 280 cm<sup>3</sup> 和 100 cm<sup>3</sup> 两种土壤样品规格，从而使研究成果更具对比效果<sup>[16]</sup>，研究所得  $K_a$  与  $K_s$  的对数关系及其精确度见表 5。Iversen 等人<sup>[17]</sup>仍然使用 6 280 cm<sup>3</sup> 和 100 cm<sup>3</sup> 2 种土壤样品规格，设定土样吸力为-10 kPa 实际含水率与对应  $K_a$ ，结果同样显示在表 5 中。

前人的试验研究中  $K_a$  的测量数据仅仅通过改变土壤样品规格和土壤水吸力两个变量来获得，但土壤样品规格和土吸力不是预测的  $K_a$  与  $K_s$  之间对数关系的关键影响因素。本试验采用样本规格为 248 cm<sup>3</sup>，导气率数值在含水率为田间持水率时进行测量，同时测量饱和导水率，建立  $K_a$  与  $K_s$  之间对数关系，与前人试验结果进行对比分析，讨论此种函数关系是否存在。

表 5 不同研究中土壤导气率与导水率的对数关系

Table 5 Logarithmic relationships between air permeability and water conductivity in different studies

log $K_s$ -log $K_a$ 关系		精确度	取样数量	样品规格/ cm <sup>3</sup>	土壤水吸力/ kPa	参考文献
$\gamma$	$\beta$					
1.27	14.11	±0.7	1 614	100	-10	[8]
0.94	10.90	±1.4	59	6 280	-5	[16]
1.29	14.55	±1.2	171	100	-5	[16]
1.38	15.11	±1.3	63	100	-10	[17]
1.22	13.93	±0.7	62	6 280	田间持水率	[17]

注：前人试验研究各项指标参考Iversen等人（2003）发表在Vadose Zone Journal 的文章。

根据试验所获得的数据，拟合各土层  $K_a$  与  $K_s$  对数关系曲线，如图 7 左侧所示；确定拟和方程系数  $\gamma, \beta$  值见表 6 所示，拟合曲线时筛去因试验中操作不当引起的造成测量数据不合理的个别点， $R^2$  均达到 0.85 以上；取 3 个土层拟合参数的平均值作为长武地区  $K_a$  与  $K_s$  间对数关系的系数，为与前人研究结果形成对比，特将结果显示在表 7 中。

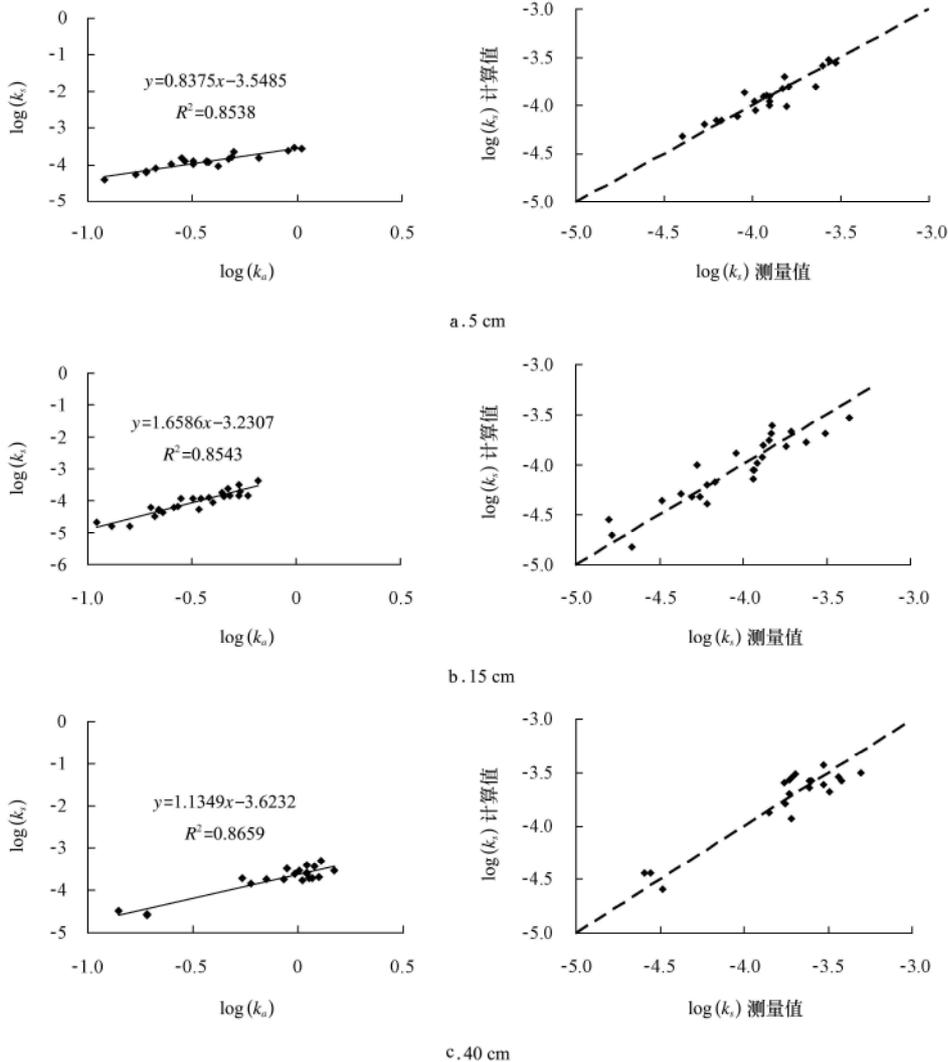


图 7 长武地区导气率与导水率的对数关系拟合曲线和导气率实测值与计算值对数关系

Fig.7 Log-log relationship between water conductivity and air permeability measured in changwu and air permeability estimated from air permeability using the equations on the left table

表 6 本试验研究中各土层导气率与导水率的对数关系

Table 6 Logarithmic relationships between air permeability and water conductivity in each layer in this study

土层深度/cm	logK <sub>s</sub> -logK <sub>a</sub> 关系			样品未损毁数/取样数量	log(K <sub>s</sub> )计算值与 log(K <sub>s</sub> )测量值之间的相对误差	log(K <sub>s</sub> )计算值与 log(K <sub>s</sub> )测量值之间的标准偏差
	γ	β	R <sup>2</sup>			
5	0.8375	-3.5485	0.8538	28/39	0.00046	0.02261
15	1.6585	-3.2307	0.8543	36/40	0.00118	0.03488
40	1.1349	-3.6232	0.8659	27/33	0.00120	0.03647

表 7 本试验中导气率与导水率的对数关系

Table 7 Logarithmic relationships [log(K<sub>s</sub>) = γ log(K<sub>a</sub>) + β] in this studies

logK <sub>s</sub> -logK <sub>a</sub> 关系		精确度	样品未损毁数/取样数量	样品规格/cm <sup>3</sup>	土壤水吸力/kPa
γ	β				
1.21	-3.46	±0.4	91/120	248	田间持水率

为了检测拟合方程  $\log(K_s) = 1.21\log(K_a) - 3.46$  是否能够应用于实际情况，进一步绘制图 7 右侧 3 个图，分别为对应土层  $\log(K_s)$  测量值与应用拟和方程计算  $\log(K_s)$  计算值之间的差距。如果  $K_s$  计算值与真实值数值一致，图上的散点应该落在 1:1 的直线上，试验结果显示散点落在 1:1 直线附近，两者相对误差及标准偏差指标（见表 6）都很小。

将本试验中  $K_a$  与  $K_s$  的对数关系（表 7）与前人研究成果（表 5）对比分析  $K_a$  与  $K_s$  之间的对数关系，仅有 Iversen 等人的研究成果与其他几项偏差较大，但是本试验研究结果系数  $\gamma$  与其接近；系数  $\beta$  与各研究成果对比差

异大，主要是因为土壤质地不一样，饱和导水率数值存在差异，Loll、Iversen 等人研究土样其土质为沙土、壤沙土；本试验用土为粉壤土。再者，可能由于进行试验的季节不一样（Loll、Iversen 等人研究在春秋进行，本试验在冬末初春进行），导致拟合曲线方程截距差异较大。

为验证长武地区  $K_a$  与  $K_s$  的对数关系预测式的准确性，特在长武试验田里再取一批土壤样本 70 组，测量其田间持水率下的导气率和饱和导水率。除在试验过程中有 3 组样本损毁以外，其余 67 组的试验数据用于效验预测式的准确性。将导气率数值  $k_a$  作为已知值，代入预测式  $\log(K_s) = 1.21\log(K_a) - 3.46$  中，计算  $\log(K_s)$  的预测值。图 8a 为  $\log(K_s) - \log(K_a)$  的实测值散点图，将趋势线设置为预测式  $\log(K_s) = 1.21\log(K_a) - 3.46$  散点与其匹配程度达 90% 以上。将  $\log(K_s)$  的预测值与  $\log(K_s)$  的实测值绘制于图 8b，图示散点落在 1:1 直线附近，预测值与实测值两组数据的标准偏差指标都很小（标准偏差为 0.3），说明拟合方程可以应用于长武地区土壤导气率的预测；达到了试验预期效果。

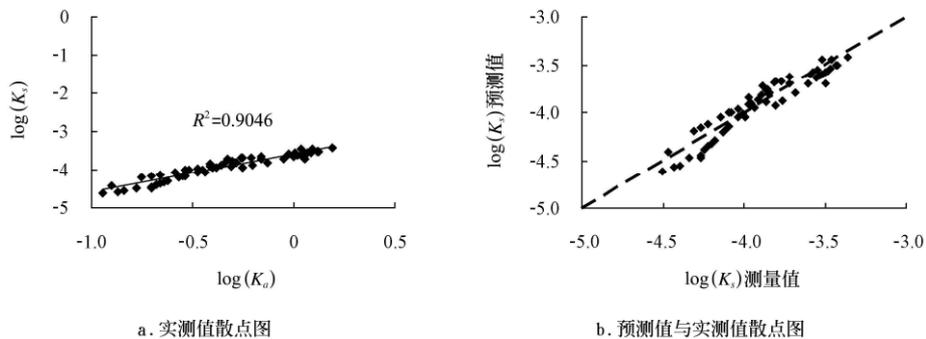


图 8 长武地区导气率与导水率的对数关系效验图

Fig.8 Log-log relationship between water conductivity and air permeability measured in changwu county

2.2.4 参考点选择田间持水率的原因

传统上，参考点采用土壤干旱时候的数值，即在土壤空气饱和即含水率为零的时候。选择参考点在田间持水率而不在空气饱和时具有明显的优势：首先，在不破坏原状土样品的情况下，当吸力为-100 cm 水柱(-9.8 kPa, 含水率相当于田间持水率)时测量导气率，此方法容易操作，不耗时，无需干燥土样；其次，导气率数值在含水率为田间持水率时进行测量（比如下雨或灌溉后几天的测量值），此数值可以直接应用于式（3）中。研究前人成果<sup>[8]</sup>发现导气率在含水率为田间持水率时的数值与土壤饱和导水率有联系，可能用于通过导气率预测导

水率的模型中，将在后续试验研究中得以证明。

本试验采用参考点在田间持水率对土壤样本进行测量，进一步证明了此方法可行；在实际情况下，可先对取样进行测量，确立拟合曲线方程后，在下雨或灌溉后（含水率接近田间持水率时）进行实地取点测量，通过计算即可得出该地区饱和导水率的数值。

3 结 论

- 1) 含水率接近田间持水率时的土壤导气率  $K_a$  和饱和导水率  $K_s$  之间存在对数线性关系。
- 2) 与前人研究成果进行了比较，验证了通过测定导

气率而获得饱和导水率值的可行性。

3)  $K_a$  与  $K_s$  的对数关系预测式应根据不同土壤质地分别拟合适用于当地土壤的方程, 不能以偏概全, 尤其土壤质地对拟合方程系数  $\beta$  影响较大。本文试验结果拟合的  $K_a$  与  $K_s$  的对数关系预测式相对误差很小, 可以应用于长武土壤导气与导水率的预测, 但应注意进行测量的季节及温差的影响。研究结论对快速而准确地测定田间土壤饱和导水率具有重要学术价值和实用意义。

#### [参 考 文 献]

- [1] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. *Soil Sci*, 1974, 117: 311—314.
- [2] Mualem Y. A new model for predicting the hydrologic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resour Res*, 1976, 12: 513—522.
- [3] van Genuchten. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *SSSAJ*, 1980, 44: 892—898.
- [4] Reynolds W D, Elrick D E, Youngs E G, et al. Saturated and field-saturated water flow parameters. Field methods (vadose and saturated zone techniques). 2002, p. 817—843. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis. Part4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.*
- [5] Minasny B, McBratney A B. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties[J]. *Geoderma*, 2002, 107(12): 55—70.
- [6] Gime'nez D, Allmaras R R, Huggins D R, et al. Prediction of the saturated hydraulic conductivity porosity dependence using fractals[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1997, 61: 1285—1292.
- [7] Poulsen T G, Moldrup P, Yamaguchi T, et al. Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics[J]. *Soil Sci*, 1999, 164: 877—887.
- [8] Loll P, Moldrup P, Schjonning P, et al. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling[J]. *Water Resour Res*, 1999, 35: 2387—2400.
- [9] Timlin D J, Ahuja L R, Williams R D, et al. Use of Brooks-Corey parameters to improve estimates of saturated conductivity from effective porosity[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63: 1086—1092.
- [10] Ball B C. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities[J]. *J Soil Sci*, 1981, 32: 483—498.
- [11] Blackwell P S, Ringrose-Voase A J, Jayawardane N S, et al. 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]. *J Soil Sci*, 1990, 41: 215—228.
- [12] Schjonning P, Thomsen I K, Moberg J P, et al. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils[J]. *Geoderma*, 1999, 89: 177—198.
- [13] Moldrup P, Olesen T, Komatsu T, et al. Diffusivity and permeability in the soil liquid and gaseous phases[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2001, 65: 613—623.
- [14] Moldrup P, Yoshikawa S, Olesen T, et al. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: Predictive model test and soil structure fingerprint[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67: 32—40.
- [15] Poulsen T G, christophersen M, Moldrup P, et al. Modeling lateral gas transport in soil adjacent to old landfill[J]. *Envior Eng*, 2001, 127: 145—153.
- [16] Iversen B V, Moldrup P, Schjonning P, et al. Air and water permeability in differently-textured soils at two measurement scales[J]. *Soil Sci*, 2001, 166: 643—659.
- [17] Iversen B V, Moldrup P, Schjonning P, et al. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability[J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2: 618—626.
- [18] 李双江. 黄土塬区农业生态系统水、热、碳通量研究[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2007.  
Li Shuangjiang. The study of water, heat, carbon flux in Agro-ecosystem Loess Plateau[D]. Yangling: Ministry of Education, Chinese Academy of Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research Center, 2007.
- [19] 王卫华, 王全九, 樊军. 原状土与扰动土土壤导气率、导水率与含水率间关系分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 25—29.  
Wang Weihua, Wang Quanjiu, Fan Jun. Relationship between air permeability, water conductivity and water content for undisturbed and disturbed soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(8): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [20] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [21] Corey A T. Measurement of water and air permeability in unsaturated soil[J]. *SSSAJ*, 1957, 21: 7—10.
- [22] Aljibury F K, Evans D D. Water permeability of saturated soils as related to air permeability at different moisture tensions[J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1965, 29: 366—369.

## Character of soil air permeability and its relationship with water conductivity in Changwu, loess region of China

Wang Weihua<sup>1,2</sup>, Wang Quanjiu<sup>1,3\*</sup>, Li Shuqin<sup>1</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Water and Agriculture Machinery Bureau of Beichuan Qiang Autonomous County, Mianyang 622750, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China)

**Abstract:** To seek the methods that are fast, direct, inexpensive as well as being used to assess the magnitude and spatial variability of  $K_s$  at field scale, we measured air permeability ( $K_a$ ), bulk density, soil layers, directions, and plant root content under different water content, respectively by using soil air permeability measurement instrument (PL-300) in Changwu county, Shanxi province, and further  $K_s$  of undisturbed soil samples ( $248\text{ cm}^3$ ) were measured in lab. Results showed that soil air permeability under different influence factors have a certain change law, and a log-log linear relationship between  $K_a$  measured at the actual soil-water content (close to field capacity) and  $K_s$  were found. The  $K_s$ - $K_a$  relationship was in agreement with an earlier predictive relationship. Compared to Loll and Iverson's results, this method was confirmed to be feasible and practical.

**Key words:** soils, soil moisture, forecasting, models, soil air permeability, water conductivity