

基于土壤物理基本参数的土壤导气率推求模型*

王卫华¹ 李建波¹ 苏李君² 王全九^{3,4}

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500;

2. 西安理工大学理学院, 西安 710048; 3. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;

4. 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, 陕西杨凌 712100)

摘要: 土壤气体传输过程复杂, 影响因素众多, 各因素之间相互影响与制约, 且存在严重的空间变异性, 其空间分布特征与变异程度同众多影响因素间关系复杂, 野外条件下难以准确计算大范围区域内土壤导气率平均值。通过已经获得的土壤样本实测资料, 建立土壤物理基本参数与土壤气体传输参数之间的函数模型, 结果表明: 偏砂质土壤的导气率与饱和度的拟合度较好, 决定系数 R^2 达 0.95 以上, 而偏黏性的土壤结构性强, R^2 在 0.69 以上; 遗传算法程序拟合系数 a_i 、 b_i , R^2 均达 0.90 以上; 利用此函数模型, 拟合导气率与实测导气率之间的相对误差绝对值小于 0.1, 效果较好, 验证了预测模型的适用性。提出的推求方法简化了土壤气体传输动力学参数在实际应用中繁琐的测算过程, 为野外环境下简单、快速获取土壤气体传输动力学参数提供了参考。

关键词: 土壤导气率 土壤物理基本参数 预测模型

中图分类号: S152.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0125-06

Soil Air Permeability Model Based on Soil Physical Basic Parameters

Wang Weihua¹ Li Jianbo¹ Su Lijun² Wang Quanjiu^{3,4}

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. School of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

3. Institute of Water Resources and Hydrologic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

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

Abstract: The transport process of soil gas is pretty complex. It is influenced by many factors, which are influenced and restricted by each other. It has heavy spatial variation, and the spatial distribution and variation extent present very complex relationship with many factors. So it is very difficult to estimate the average conductivity of soil gas accurately in a large area when this happens in wild. This paper establishes a functional model about soil physical basic parameters and soil air permeability on the basis of data from measured soil samples. The results show that R^2 , the fitting degree of air permeability and water saturation, is up to 0.95 in sandy soil and more than 0.69 in clayed soil, because the clayed soil has higher soil structuralism. The fitting degrees of genetic algorithm system of the above two kinds of soil are more than 0.90. The absolutely relative error between the fitting air permeability and the measured air permeability is less than 0.1 by using this functional model. Furthermore, this functional model proves applicability and has good effect. The proposed method simplifies complicated calculation process of practical application and provides reference to gain soil gas transportation dynamics parameters quickly and easily.

Key words: Soil air permeability Soil physical basic properties Prediction model

收稿日期: 2014-10-16 修回日期: 2014-12-15

* 国家自然科学基金资助项目(51179150、51409136)、昆明理工大学自然科学研究基金资助项目(KKSY201423023)和陕西省水利科技计划资助项目(2011slkj-04)

作者简介: 王卫华, 副教授, 主要从事土壤物理研究, E-mail: wangweihua1220@163.com

通讯作者: 王全九, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: wquanjiu@163.com

引言

近年来,研究者对土壤与生态环境间的相互作用、土壤气体传输状况与调节农田生产力的问题日益关注,关于利用数值模型模拟气体传输动力学过程及土壤气体传输对作物生长、生态环境方面影响的研究工作已开展多年^[1]。如何发展简单可行的土壤气体传输参数确定方法成为关注热点。研究者针对此问题进行了大量的试验工作,相继提出不同的土壤气体传输动力学参数的确定方法^[2-9]。土壤气体传输过程复杂,影响因素众多,且各因素之间相互影响与制约,因此很多方法都难以准确测算野外条件下的土壤导气率,尤其是在大范围区域内研究土壤气体传输动力学特征更加困难。另外,土壤气体传输参数存在严重的空间变异性,其空间分布特征与变异程度与众多影响因素间关系复杂^[10],如何准确获取指定范围内的土壤导气率平均值,仍缺乏系统研究。

土壤气体传输参数野外实地测量耗时费力,在实验经费有限的条件下,不可能到每一处研究区域做实地采样分析,并将土壤样本带回实验室分析其基本物理参数,为此考虑利用物理参数推求土壤气体传输参数。前期针对土壤导气率的影响因素、空间分布及变异、土壤孔隙分布与几何构成等方面已有大量相关研究^[10],发现影响土壤导气率分布、变异的土壤物理基本参数有几个主成因子。本文通过已经获得的土壤样本实测资料,建立土壤物理基本参数与土壤气体传输参数之间的函数模型,来简化在实际应用中繁琐的测算过程,并通过实测资料验证预测模型的适用性,为简单、快速获取土壤气体传输动力学参数提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试样本

本文试验数据分别来自陕西省神木县、米脂县、安塞县、洛川县、长武县、杨陵区、关中灌区、商南县、安康市、新疆维吾尔自治区库尔勒市以及甘肃省张掖地区,各个试验区的概况参考文献[11]。

采样时各地区均采用网格采样法布设测点。杨凌地区根据其农田类型分别在不同地域测量土壤导气率3次,以3 m×3 m网格分别布设测点9×9共81个、12×12共144个、12×12共144个,3次采样共有测点369个,其中“盲点”5处,剩余有效样本364个。长武地区进行土壤导气率工作2次,以3 m×3 m网格分别布设测点8×8共64个、12×12共144个,2次采样中有测点208个,包含“盲点”2处,

获得有效样本206个。关中灌区(泾渭渠灌区)由于面积较大,采用大距离网格采样,网格间距2.5 km,共获得样本数212个^[10]。张掖地区亦采用3 m×3 m网格布设测点,布设图参照文献[12]。其他地区采样点布设同张掖地区。

1.2 测量方法

利用PL-300型土壤导气率测定仪测量土壤导气率,具体方法参考文献[12-13];完成导气率测量之后,在临近测量室的位置地表10 cm内,用标准环刀取样,室内通过干燥法测量含水率及容重;并将土壤样本带回实验室,用密封袋封存,风干、研磨,过2 mm土壤筛,利用马尔文激光分析仪测定土壤颗粒机械组成;过100目土壤筛,利用重铬酸钾外加热法分析土壤有机质含量^[14]。

1.3 构建数学模型

影响土壤气体传输能力的因素众多,且各因素之间相互制约。土壤导气能力的主要影响因子有土壤颗粒组成、含水率、容重、有机质含量,其中颗粒分析数据反映土壤类型,容重反映土壤密实度、孔隙率等,有机质含量反映土壤颗粒间的团聚结构。流域尺度对土壤导气率影响因素的交互相关分析表明,容重、饱和度是影响土壤导气率的关键因子^[10]。因此,本文利用上述主要影响因子来建立模型。

令 $y = af(x)$,当 $x = 0$ 时, $f(x) = 1, y = a$,即:土壤含水率为零时,土壤孔隙被气体充满,除了闭合孔隙外,其余孔隙均为土壤气体传输做出贡献,故此时导气率达到最大值^[5,14];当 $x = 1$ 时, $f(x) = 0, y = 0$,即:土壤含水率达到饱和含水率时,土壤孔隙被水充满,导气率为零^[5,15]。

因此,令 $f(x) = (1 - x)^b$,构建的数学模型为

$$y = a(1 - x)^b \tag{1}$$

式中 x ——饱和度,% y ——导气率,cm/s
 a ——最大导气率,cm/s
 b ——拟合曲线的斜率

将式(1)取对数,可得

$$\ln y = b \ln(1 - x) + \ln a \tag{2}$$

利用土壤样本的实测导气率、饱和度数据拟合线性曲线,曲线斜率为 b ,截距为 $\ln a$;再通过各土壤样本的颗粒分析、容重、有机质含量数据建立参数 $a、b$ 的函数,即

$$\begin{cases} a = a_1c + a_2i + a_3s + a_4m + a_5\gamma_d \\ b = b_1c + b_2i + b_3s + b_4m + b_5\gamma_d \end{cases} \tag{3}$$

式中 c ——黏粒质量分数,%
 i ——粉粒质量分数,%
 s ——砂粒质量分数,% γ_d ——容重,g/cm³
 m ——有机质质量比,g/kg

a 具有实际的物理意义,代表最大导气率,试验中由于测量设备的局限性,即指 PL-300 型土壤导气率测定仪其测量室在干土环境下,测量室边壁与土壤不能紧密结合,土壤容易脱落,不易采集到含水率为零时的导气率,但通过式(3)可拟合得到。

利用 Matlab 软件中的遗传算法程序拟合系数 a_i 、 b_i ,其中 $i=1\sim5$,经过多次迭代计算,取最优拟合系数值。遗传算法的解可能是极值点处的解,所以一般需要多次运算来核实结果是否是最优解,每次计算结果可能不一样,通过多次迭代运算来确定其最优解。根据以上分析,建立土壤导气率与土壤物理基本参数之间的一般式,即

$$K_a = (a_1c + a_2i + a_3s + a_4m + a_5\gamma_d) \cdot \left(1 - \frac{\theta}{\theta_s}\right)^{b_1c + b_2i + b_3s + b_4m + b_5\gamma_d} \quad (4)$$

表 1 供试土样基本物理性质

Tab.1 Basic physical properties of measured soil samples

采样地区	样本数	土壤质地	黏粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	砂粒质量分数/%	有机质质量比/(g·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)	备注
神木县	76	砂土	0.17	3.68	96.15	5.626	1.575	训练集
库尔勒市	72	粉壤土	3.26	59.96	36.78	5.536	1.642	
关中灌区	212	黏壤土	22.41	23.39	54.20	22.085	1.253	
长武县	206	粉黏壤土	18.70	73.13	8.17	10.507	1.312	
洛川县	170	黏壤土	21.39	32.05	46.56	12.562	1.345	
杨陵区	364	粉黏壤土	22.24	67.52	10.24	17.727	1.623	验证集
张掖市	90	砂黏壤土	19.91	19.68	60.41	12.875	1.604	
米脂县	90	砂壤土	10.34	16.56	73.10	9.974	1.385	
安塞县	90	砂壤土	12.80	21.13	66.07	10.479	1.361	
商南县	90	砂壤土	13.81	28.50	57.69	9.725	1.396	
安康市	80	壤黏土	27.71	39.23	33.06	14.544	1.318	

2.2 导气系数的确定

将实测资料进行转化,按照式(2)拟合导气率与饱和度之间的关系,图 1 为导气率与饱和度对数关系的实测散点图。

从图 1 可以看出,偏砂质土壤的导气率与饱和度之间有更高的拟合度,整体水平 R^2 达 0.95 以上,而偏黏性的土壤结构性强,实测结果散布拟合趋势线的左右两侧, R^2 在 0.69 以上。其中关中灌区的采样点拟合度高达 0.97,比较特殊,归因于关中灌区的 212 个土样来自同一地区,生物群落一致,作物均为麦田,土壤颗粒组成较为统一,常年相同的耕作方式导致土壤结构差异不显著,加之灌区灌溉用水均衡造成土壤含水率均匀,从而导致关中灌区导气率与饱和度的拟合度较高。将拟合导气率与饱和度对数关系式系数 $\ln a$ 、 b 的值列于表 2。

用 Matlab 软件中的遗传算法程序拟合式(3)中的系数 a_i 、 b_i ,其中 $i=1\sim5$,经遗传算法多次迭代计算,取最优拟合系数值。遗传算法迭代计算给出拟

式中 K_a ——实际含水率下的导气率,cm/s
 θ ——实际含水率,%
 θ_s ——饱和含水率,%

2 结果与分析

2.1 供试土样基本物理性质

用马尔文激光分析仪测定土壤颗粒机械组成,采用国际制分级标准。土壤颗粒机械组成及各参数数据均取采样点样本均值,供试土样的基本物理性质见表 1。以神木县、库尔勒市、陕西关中灌区、长武县、洛川县、杨陵区试验地典型土壤质地的实测数据为训练集,拟合土壤导气率与土壤物理基本参数之间的关系。以张掖市、米脂县、安塞县、商南县、安康市的实测数据为验证集。

合系数的相对误差,每次运算都会有不同的拟合结果及对应的误差,选择多次运算结果中误差较小的一组拟合系数作为采用值,如表 3 所示。

将表 3 中系数 a_i 、 b_i 的最优拟合值代入式(3),结合土壤颗粒组成、有机质含量、容重反算系数 a 、 b 的值,比较拟合值与实测值的差异,见表 4。

a 代表最大导气率,从表 4 中可以看出,有 4 项根据实测数据推算 a 的实测值比根据土壤物理基本性质推算的拟合值要小,这归因于在试验操作过程中,往往测不到含水率为零时的最大导气率,实测值与拟合值相差也不是很大,因此接受拟合结果。

2.3 验证构建函数的准确性

2.3.1 利用拟合参数自检土壤导气率

首先,将上述采样地区各测点随机样本的实测数据代入式(4),进行自检;若实测数据符合理论计算,则进一步利用其他地区的实测数据进行检验。

在拟合参数的 6 组土壤质地的样本中,随机抽取每种质地的一组土样实测数据,结合表 1 中的土

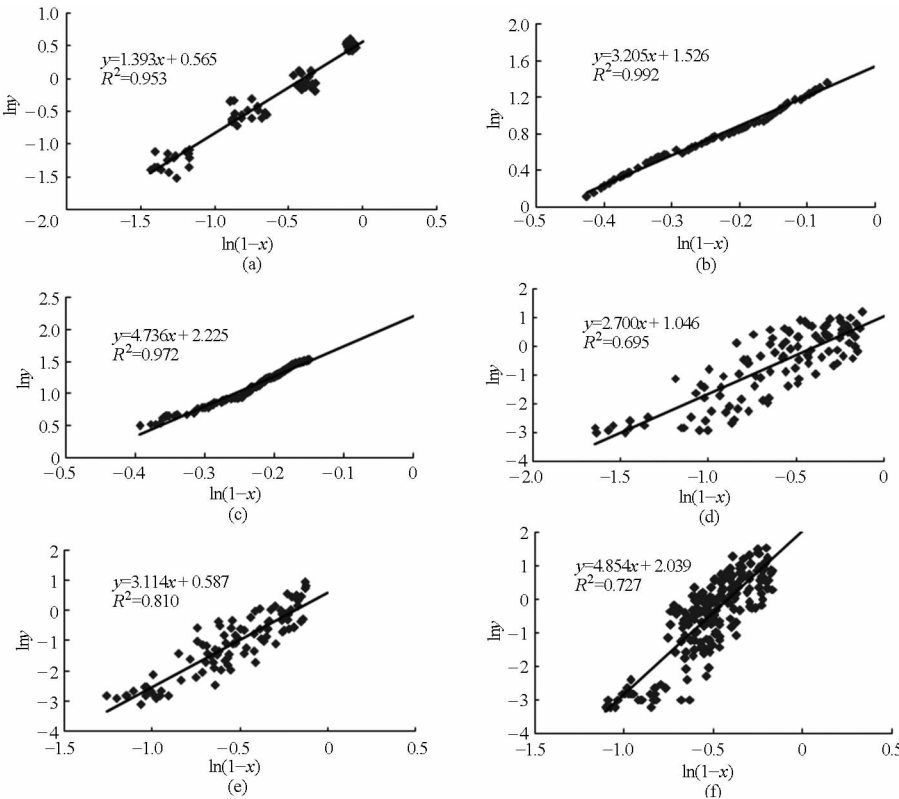


图 1 导气率与饱和度对数关系的实测散点图

Fig.1 Scatter plots of measured air permeability and saturation in logarithmic relationship

(a) 神木县,砂土 (b) 库尔勒市,粉壤土 (c) 关中灌区,黏壤土 (d) 长武县,粉黏壤土 (e) 洛川县,黏壤土 (f) 杨凌区,粉黏壤土

表 2 拟合系数

Tab.2 Fitting coefficients							
采样地区	<i>b</i>	ln <i>a</i>	<i>a</i>	采样地区	<i>b</i>	ln <i>a</i>	<i>a</i>
神木县	1.393 9	0.565 9	1.761 0	长武县	2.707 1	1.053 2	2.866 8
库尔勒市	3.205 9	1.526 4	4.601 6	洛川县	3.114 3	0.587 4	1.799 3
关中灌区	4.736 9	2.225 9	9.261 8	杨凌区	4.854 9	2.039 9	7.689 8

表 3 拟合系数 *a_i*、*b_i* 及误差

拟合系数	<i>i</i>					误差	<i>R</i> ²
	1	2	3	4	5		
<i>a_i</i>	-40.087	2.330 1	-3.011 2	0.878 8	-0.098 3	-0.027 1	0.996 9
<i>b_i</i>	-5.084 4	2.029 8	-0.052 0	0.239 3	0.169 7	-0.094 9	0.910 7

表 4 函数 *a*、*b* 拟合值与实测值的比较

采样地区	土壤质地	<i>a</i>			<i>b</i>		
		拟合值	实测值	误差	拟合值	实测值	误差
神木县	砂土	1.894	1.761	-0.133	1.659	1.394	-0.265
库尔勒市	粉壤土	4.769	4.602	-0.167	2.813	3.206	0.393
关中灌区	黏壤土	9.215	9.262	0.047	4.805	4.737	-0.068
长武县	粉黏壤土	3.065	2.867	-0.198	3.264	2.707	-0.557
洛川县	黏壤土	7.770	7.690	-0.080	4.751	4.855	0.103
杨凌区	粉黏壤土	1.686	1.799	0.113	2.757	3.114	0.358

壤质地、有机质含量、容重等土壤物理参数,检验利用参数拟合出的导气率与实测土壤导气率的差异。

从表 5 可以看出,在实时含水率情况下,拟合导气率与实测导气率相差不大。砂土导气率的拟合值比实

测值大,相对误差为负值;偏黏性的土壤,导气率拟合值小于实测值,且随着黏粒含量的增多,相对误差渐渐增大。这是因为砂土是无结构的,土壤孔隙在埋入土壤测量室的时候受到扰动,使得实际测量值小于真实值;另外,黏土与砂土相比,土壤有机质含量高,土壤团聚体数量多,土壤结构性好,导气率较细砂颗粒含量多的神木县样本要大一些。

表 5 利用拟合参数自检土壤导气率数值
Tab. 5 Self-inspection from fitting coefficients to air permeability

采样地区	实时 含水率/ (g·g ⁻¹)	饱和 含水率/ (g·g ⁻¹)	拟合 导气率/ (cm·s ⁻¹)	实测 导气率/ (cm·s ⁻¹)	实测与拟 合导气率 相对误差
神木县	10.170	23.310	0.732	0.720	-0.016
库尔勒市	7.740	39.680	2.072	2.060	-0.006
关中灌区	18.566	35.620	0.268	0.280	0.044
长武县	9.030	40.583	1.349	1.360	0.008
洛川县	13.050	38.386	0.530	0.540	0.018
杨凌区	12.040	31.978	0.823	0.895	0.080

2.3.2 验证构建函数的普遍适用性

取未参与参数拟合过程的 5 组(张掖市、安塞县、米脂县、商南县、安康市)土壤样本实测数据来验证构建函数的普遍适用性,基本资料如表 1 所示。根据土壤颗粒组成、有机质含量、容重等实测数据首

先拟合出 $\ln a$ 、 b 的值,将 $\ln a$ 值转化为 a 值,代表该土壤样本的最大导气率,数据如表 6 所示。将拟合出来的 a 值与实际试验操作过程中尽可能测到含水率低时的导气率相比较,可以发现拟合出的张掖市、商南县的 a 值略大于实际测量中的最大导气率,其他 3 处样本却大很多。商南县采样地区位于河滩边上,砂粒含量高,结构性差,在试验中埋入测量室时可能扰动了土壤,引起了土壤颗粒的重新排列;张掖地区砂粒含量相对较高,孔隙度大,野外环境风同样加速了空气流动,故而导致这两处土壤样本导气率拟合值大于实测值。 b 值代表拟合线条的斜率,没有实际的物理意义,在此不再赘述。

引入实时含水率与饱和含水率,代入式(4)拟合实时含水率条件下的导气率,与实测导气率相比较,并且计算出拟合导气率与实测导气率之间的相对误差,如表 6 所示。砂性土壤的拟合值小于实测值,而偏黏性的土壤则相反,拟合值大于实测值,与训练数组的自检结果一致。从表 6 可以看出,砂性土壤的相对误差绝对值较小,越是偏黏性的土壤,相对误差绝对值越大。最大导气率反映的是基于此种土壤的基本物理参数,在含水率为零时的导气率。亦可以根据土壤实时含水率、饱和含水率推求实际含水率下的土壤导气率。

表 6 根据土壤物理基本参数推求的土壤导气率

Tab. 6 Calculated soil air permeability according to soil physical parameters

采样地区	a	b	实时含水率/ (g·g ⁻¹)	饱和含水率/ (g·g ⁻¹)	拟合导气率/ (cm·s ⁻¹)	实测导气率/ (cm·s ⁻¹)	最大导气率/ (cm·s ⁻¹)	实测与拟合导 气率相对误差
张掖市	1.816	0.671	5.805	31.978	1.588	1.536	1.749	-0.034
米脂县	2.672	0.558	15.278	30.380	1.810	1.792	2.780	-0.010
安塞县	2.446	0.651	13.762	30.619	1.659	1.613	2.530	-0.028
商南县	1.778	0.809	8.275	32.743	1.405	1.362	1.710	-0.032
安康市	1.461	1.037	18.281	36.529	0.711	0.737	1.480	0.035

3 结论

(1)土壤中液相与气相共同存在于土壤孔隙中,本文以土壤含水率和导气率此消彼长的互补关系为思想,构建数学模型。结合训练数组土壤物理基本参数,基于 Matlab 遗传算法拟合得到各变量最优系数。发现偏砂质土壤的导气率与饱和度的拟合度较好, R^2 达 0.95 以上,而偏黏性的土壤结构性强, R^2 在 0.69 以上。遗传算法程序拟合系数 a_i 、 b_i , R^2 均达 0.90 以上,迭代运算中得到拟合系数的相对误差较小。函数 a 、 b 拟合值与实测值误差较小,说明推导公式的适用性较好。

(2)利用拟合参数自检训练数组土壤导气率过程中,代入土壤质地、有机质、容重等参数的实测数

据,发现拟合导气率与实测土壤导气率的相对误差较小,随着黏粒含量的增多,相对误差渐渐增大,在误差允许范围内公式的实用性较强。

(3)在未参与拟合的数组进行验证中发现拟合导气率与实测导气率的相对误差均小于 0.04。并且砂性土壤的相对误差绝对值较小,越偏黏性的土壤相对误差越大,这与结论(2)中自检结果一致,说明了该模型函数在上述试验区有较高的可靠性。

(4)本试验基于西北地区黄土高原干旱条件下、土壤质地偏砂质的环境下进行,文中所述方法的预测模型在陕西省、新疆库尔勒地区、甘肃省张掖地区均适用,但该函数关系式是否也适用于南方多雨水、土壤偏黏性的区域有待进一步研究验证。

参 考 文 献

1 王卫华,王全九,武向博,等. 黑河中游绿洲麦田土壤水气热参数田间尺度空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 94 – 102.
Wang Weihua, Wang Quanju, Wu Xiangbo, et al. Characteristics of spatial distribution of soil water conductivity, air permeability, and heat conductivity in typical oasis croplands of Linze County at middle reaches of Heihe River[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 94 – 102. (in Chinese)

2 Loll P, Moldrup P, Schjonning P, et al. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: application in stochastic water soil hydraulic conductivity modeling[J]. Water Resources Research, 1999, 35(8): 2387 – 2400.

3 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(4): 618 – 626.

4 Moldrup P, Olesen T, Komatsu T, et al. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3): 613 – 623.

5 Tuli A, Hopmans J W, Rolston D E, et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(5): 1361 – 1371.

6 Smith J E, Robin M J L, Elrick D E. A source of systematic error in transient-flow air permeameter measurements [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(6): 1563 – 1568.

7 李陆生,张振华,潘英华,等. 土壤导气率瞬态模型关键参数 s 简化求解 [J]. 土壤, 2012, 44(6): 1048 – 1053.
Li Lusheng, Zhang Zhenhua, Pan Yinghua, et al. A simplified solution to key parameter s on transient-flow model in measuring air permeability[J]. Soils, 2012, 44(6): 1048 – 1053. (in Chinese)

8 李陆生,张振华,赵丽丽,等. 瞬态三维边界条件下土壤导气率经验公式 [J]. 鲁东大学学报:自然科学版, 2011(4): 352 – 356.
Li Lusheng, Zhang Zhenhua, Zhao Lili, et al. Empirical formula for measuring air permeability in three-dimensional transient boundary conditions [J]. Ludong University Journal: Natural Science Edition, 2011(4): 352 – 356. (in Chinese)

9 李陆生,张振华,潘英华,等. 一种田间测算土壤导气率的瞬态模型[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1252 – 1256.
Li Lusheng, Zhang Zhenhua, Pan Yinghua, et al. Transient-flow model for in-situ measuring of soil air permeability [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1252 – 1256. (in Chinese)

10 王卫华,王全九,张志鹏. 流域尺度土壤导气率空间分布特征与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 118 – 124.
Wang Weihua, Wang Quanju, Zhang Zhipeng. Basin scale spatial distribution of soil air permeability and analysis of its impact factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 118 – 124. (in Chinese)

11 王卫华. 土壤导气率变化特征及水气热动力学参数空间变异性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2013.

12 王卫华,王全九. 黑河中游绿洲麦田土壤导气率空间变异尺度性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 179 – 183.
Wang Weihua, Wang Quanju. Scale-dependency of spatial variability of soil air permeability on typical oasis croplands at middle reaches of Heihe River[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 179 – 183. (in Chinese)

13 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 Quanju, 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)

14 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社, 1996.

15 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 Quanju, Fan Jun. Relationship between air permeability, water conductivity and water content for undisturbed and disturbed soils[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 25 – 29. (in Chinese)