

原状土与扰动土导气率、导水率与含水率的关系

王卫华¹, 王全九^{1,2*}, 樊军²

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;

2. 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: 为分析土壤导气特性与土壤导水特性间的关系, 该文通过研究陕西杨凌小麦试验田土样导水率和导气率随含水率的变化特征, 比较原状土与扰动土导气和导水特征, 分析相对导水率和相对导气率与饱和度的关系, 结果发现导水率随含水率的增加而减小, 且无论导水率还是导气率原状土都比扰动土大, 证实土壤结构及孔隙特征对水和气的传输有巨大的影响, 扰动土和原状土变化趋势虽然基本相同, 但曲线不重合, 说明扰动土和原状土的孔隙连接性和弯曲程度不尽相同。

关键词: 导气率; 导水率; 饱和度

中图分类号: S152.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0025-05

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[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 CSAE, 2008, 24(8): 25-29.(in Chinese with English abstract)

0 引言

土壤空气来源于大气, 存在于土壤各种孔隙中, 而土壤孔隙被水和空气共同占据。无论土壤处于脱湿还是吸湿过程, 水总是优先占据较小孔隙部分, 空气则优先占据较大孔隙。同时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^[1]。土壤大孔隙是土壤通气主要通道, 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。由于测试手段相对困难, 对土壤空气的研究还未广泛开展^[2], 但其应用的范围及潜力都很广。

土壤导气率直接影响土壤气体交换能力, 进而影响土壤水分和养分有效性。同时土壤导气能力可用于分析土壤孔隙几何分布、结构以及土壤稳定性等, 因此土壤导气特征受到很大关注^[3]。同时, 由于土壤中多相流特征受孔隙特征所控制, 如弯曲、连通性和收缩特性, 但通常缺乏试验研究来说明土壤结构和多孔系统特征对土壤导气率和土壤导水率的影响^[4,5]。前人应用土壤渗透性来描绘宏观的几何空间^[6,7], 假定土壤孔隙几何空间的连续性是由孔隙大小决定的。由于土壤固有的复杂性和非均匀性^[8], 他们的试验数据仅能提供一些关于孔隙几何特征和对流及传输过程之间相互作用关系的信息^[9]。同样, 土壤孔隙的几何形状和大小分布是确定饱和流的大小和水力传导性以及空气传导性函数关系的主要影响因

素^[10-12]。为了进一步分析土壤导气特性与土壤导水特性间的关系, 探究土壤结构对导气率的影响, 进而为发展利用统一模型描述土壤导水率和导气率奠定基础。本研究试图通过对原状土和扰动土土样的导气率与导水率的测量, 研究原状土和扰动土两种情况^[13]下的土壤导气率及导水率随土壤含水率的变化特征, 为进一步揭示土壤导气和导水的内在机制提供参考。

1 试验方法

土壤导气率是指气体透过土体的能力, 它是反映土壤特性对土壤空气更新速率的综合影响指标。土壤通气性好坏主要决定于土壤的总孔隙度, 孔隙连接性和通气孔隙度的大小^[1]。土壤导气率是指单位时间单位面积上土壤透过的气体数量。土壤导气率通常是在研究土体一端施加一定的气压^[14-16], 然后稳定测定通过土体的空气数量, 依据土壤空气对流通量方程 $J_c = -K_a dp/dz$ 获得^[14-16]。其中 J_c ——空气通量, cm/s; P ——气体压力, Pa; K_a ——土壤导气率, cm/s; Z ——坐标, cm。本文同样采用该方法测定土壤导气率, 并以此分析土壤结构和含水率对土壤导气特性的影响, 并比较分析扰动土和原状土的导气率差异。

1.1 试验系统

本试验采用 PL-300 型土壤导气率测定仪(德国 Umwelt-Geräte-Technik GmbH 公司)测定土壤的导气率。试验系统如图 1 所示。该系统由主机和样本容器两部分组成。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 cm³。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。

收稿日期: 2007-07-15 修订日期: 2008-02-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2005CB121103); 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

*通讯作者: 王全九(1964—) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程方面研究。西安 西安理工大学水利水电学院, 710048。

Email: wquanjiu@163.com

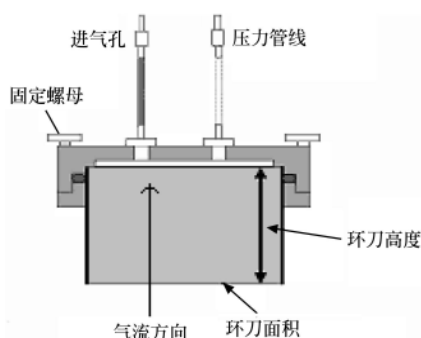


图1 导气率测定系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of air permeability measure system

1.2 试验过程

1.2.1 样品处理

试验样品是利用环刀提取陕西杨凌小麦的耕作层15~25 cm处原状土获得。为了比较土壤导水率和导气率间的关系及扰动土与原状土导气率差异，在水平方向以5 cm为间隔，提取60个土样。相邻样品一部分用于测定土壤导气率和导水率，一部分用于制备扰动土样，测定扰动土导气率。具体制备扰动土方法是将原状土干燥，碾碎，过1 mm筛，按照与原状土相当的容重装入环刀。在导气率测定过程中，首先将所有样品用0.01 mol/L氯化钙溶液浸泡24 h，以稳定毛孔结构，并抑制在潮湿环境下细菌滋生，然后再进行相关内容的测定。

1.2.2 土样颗粒组成

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，利用比重瓶法测定土壤相对密度为2.5，经分析供试土样属于重壤土。

1.2.3 土壤水分特征曲线测定

利用离心机测定了代表性的原状土和扰动土样本的含水率及其对应的负压间关系，结果如图2所示。

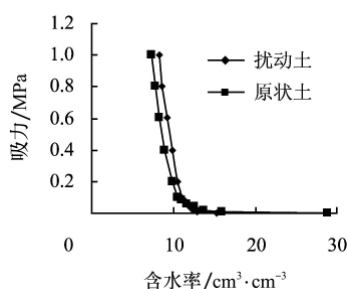


图2 原状土和扰动土土壤水分特征曲线

Fig.2 Soil water characteristic curves for the undisturbed and disturbed soil samples

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 α ——是与进气吸力有关的参数； n 、 m ——形状系数； θ ——土壤样本即时含水率， cm^3/cm^3 ； θ_s ——饱和

土壤含水率， cm^3/cm^3 ； θ_r ——滞留土壤含水率， cm^3/cm^3 ； h ——土壤吸力，MPa。

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）拟合原状土和扰动土土样 van Genuchten 经验公式的参数值 a 、 m 、 n （见表1）。

表1 van Genuchten 经验公式的拟合参数值

Table 1 Parameters in van Genuchten experience formula for undisturbed and disturbed soil samples

参 数	a	n	m
原状土	0.0111	1.4737	0.3214
扰动土	0.0158	1.4145	0.2934

1.2.4 土壤饱和含水率测定

首先用环刀在野外取原状土，每层重复2~3个。将盛有原状土的环刀称重（准确至0.1 g），盖上垫有粗滤纸的底盖（有孔），将环刀放入水中，保持水面与环刀上口齐平，但勿使水浸淹环刀的顶端，以免造成封闭孔隙，影响结果。水分通过底盖小孔和滤纸沿土壤孔隙上升，浸泡8 h。然后用干布将环刀外部擦干，放到已知质量的器皿中，然后连同器皿一起称重，准确至0.1 g。称毕，将环刀仍放回原处，使之继续吸水饱和约4 h，再次称重，如此操作，直到恒重为止。将土放入 $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干，测定其含水率，即得土壤饱和含水率。本试验需2~3次重复，取算术平均值。

1.2.5 土壤容重及孔隙度测定

土壤容重利用烘干法测定。土壤中的孔隙全部都充满水时的含水率，它代表土壤最大的容水能力。有人建议用土壤总孔隙度来代替土壤饱和含水率，但因封闭孔隙的存在，往往会使计算值偏高。本文应用环刀法进行测量。其操作步骤如下：土壤总孔隙度由土壤密度和容重间接计算求得：

$$\text{孔隙度} = 1 - \text{容重/密度} \quad (2)$$

1.2.6 土壤饱和导水率测定

利用常水头法测定了土样饱和导水率。

1.2.7 土壤导气率测定

导气率利用 PL-300 型土壤导气率测量仪进行测定，为了分析土壤导气率与土壤含水率间的关系。首先将待测土样饱和，静置使之达到平衡后，然后测定导气率。之后将土样放入 35°C 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。依次逐步减低含水率，并测定不同含水率下土壤导气率，直至土样完全干燥。

2 结果与分析

所有土样按照上述方法进行处理，现以其中6组土样为例进行说明，其他土样变化规律与这6组土样类似。

2.1 导气率和导水率随含水率的变化特征

为了分析土壤导气率随土壤含水率变化过程，选择4组土样的测定结果进行分析。4组原状土 UD1、UD2、UD3、UD4 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。

表 2 原状土基本物理性质
Table 2 Basic physical properties of undisturbed soils

样本 编号	容重 /g·cm ⁻³	孔隙度 /cm ³ ·cm ⁻³	饱和含水率 /cm ³ ·cm ⁻³	饱和导水率 /×10 ⁻⁴ cm·s ⁻¹
UD1	1.540	0.384	0.382	1.61
UD2	1.625	0.350	0.352	1.42
UD3	1.630	0.348	0.347	1.35
UD4	1.573	0.371	0.371	1.58

注：容重的最大测量误差为 0.0016。

根据实测土样饱和导水率数据及利用 RETC 拟合的 Van Genuchten 经验公式的参数 m 值，将其代入非饱和导水率 van Genuchten 经验公式^[1]中：

$$K_{(\theta)} = K_s \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right] \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 m ——形状系数； θ ——含水率，cm³/cm³； θ_s ——饱和土壤含水率，cm³/cm³； θ_r ——滞留土壤含水率，

cm³/cm³； K_s ——饱和导水率，cm/s； $K_{(\theta)}$ ——非饱和导水率，cm/s。

通过式 (3) 计算不同含水率情况下的非饱和导水率。绘制原状土导水率与含水率间的关系图，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的过程，导水率总体表现为随着土壤含水率增加而呈现显著增大的过程。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。

由表 2 可以看出导气率随容重的增大而减小。容重增大导致土壤孔隙率减小，进而影响土壤的通气状况。说明同一含水率情况下，容重是影响土壤导气率的主要因素^[16]。

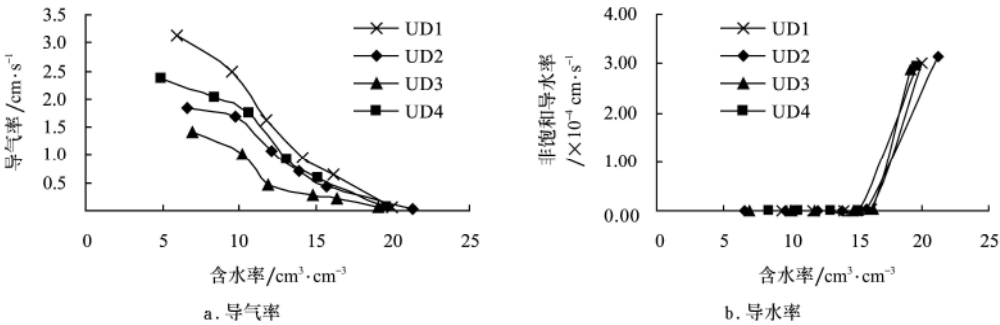


图 3 原状土导气率、导水率与含水率的关系
Fig.3 Relationship between air permeability values, water conductivity and water content for the undisturbed soil samples.

2.2 扰动土与原状土导气率与含水率的关系

为了比较分析原状土与扰动土导气率变化特征，选取 2 组土样进行分析，2 组土样的基本物理特性列在表 3 中。测定的土样导气率显示在图 4 上。由图 4 可知，扰动土的导气率比原状土的导气率随含水率的变化慢。这说明扰动土破坏了土壤孔隙结构，导致导气孔隙减少。也说明扰动土和原状土土样的导气率的不同很大程度上

取决于土壤结构和大孔隙的分布情况。

表 3 土壤样本的基本物理性质
Table 3 Basic physical properties of disturbed and undisturbed soils

土壤 样本	容重 /g·cm ⁻³	孔隙度 /cm ³ ·cm ⁻³	饱和含水率 /cm ³ ·cm ⁻¹	饱和导水率 /×10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹
原状土	1.614±0.028	0.354±0.011	0.354±0.004	14.30±2.30
扰动土	1.618±0.011	0.352±0.005	0.352±0.007	2.6±0.210

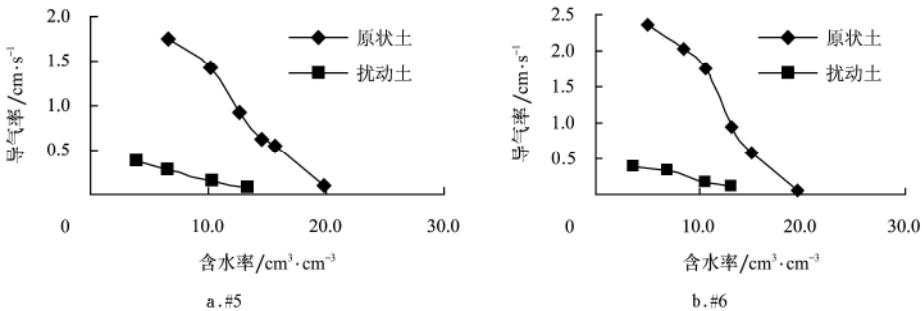


图 4 原状土与扰动土导气率与含水率间的关系
Fig.4 Relationship between air permeability values and water content for undisturbed and disturbed soil samples.

2.3 扰动土与原状土导水率的比较

根据实测土样饱和导水率数据及利用 RETC 拟合的

Van Genuchten 经验公式的参数 m 值，将其代入非饱和导水率 van Genuchten 经验公式^[1] (式 3) 中，计算不同含

水率情况下的非饱和导水率。绘制原状土与扰动土导水率与含水率间的关系图,如图 5 所示。

原状土比扰动土样本的饱和导水率普遍大一个数量级(见表 2),这个明显的差别说明原状土中的大孔隙对

水力传导起了重要作用。从图 5 可知,在含水率 $<20\%$ 时,原状土与扰动土样本的非饱和导水率随含水率的变化具有相同的趋势。但在高含水率时,两者的非饱和导水率变化差距变的非常明显^[17]。

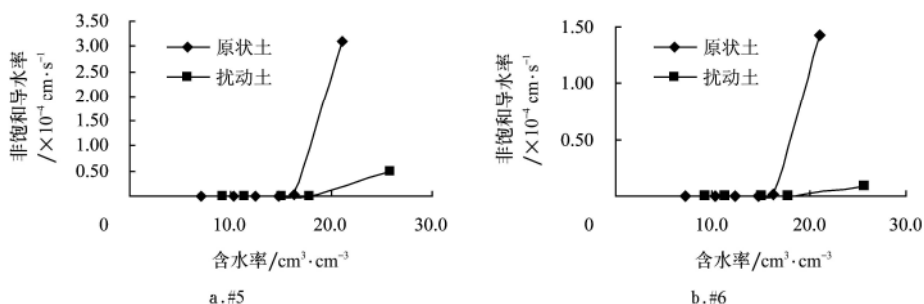


图 5 原状土与扰动土导水率与含水率间的关系

Fig.5 Relationship between water conductivity and water content for undisturbed and disturbed soil samples.

2.4 原状土与扰动土相对导气率、相对导水率与饱和度的关系

由上面分析可知,从绝对数值来看,原状土非饱和导水率和导气率都明显大于扰动土,主要由于大孔隙存在造成的。为了便于分析不同土样导水率或导气率与含水率或含气量间关系,通常采用相对概念进行分析,利于研究成果相互对比与推广应用。为此,利用饱和度反映土壤含水状况,并分析其与相对导气率、相对导水率间关系。

饱和度^[1]表示为:

$$s = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (4)$$

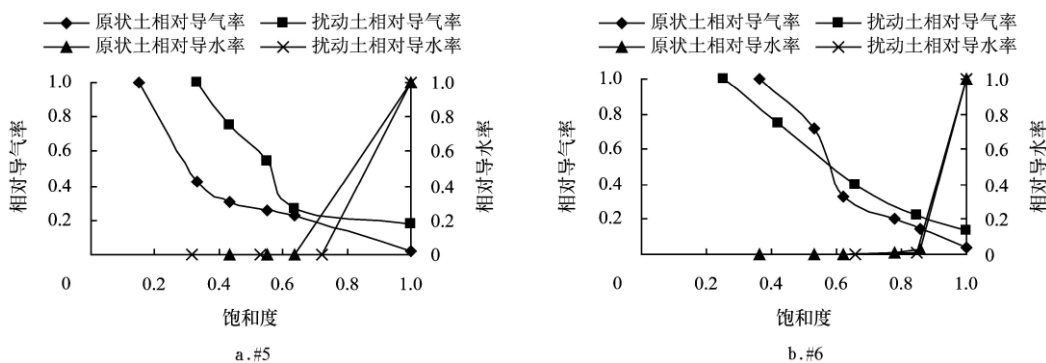


图 6 原状土与扰动土相对导气率、导水率与饱和度的关系

Fig.6 Relationship between relative permeability, water conductivity and water saturation for undisturbed and disturbed soil samples

3 结 论

1) 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的过程,导水率总体表现为随着土壤含水率增加而呈现显著增大的过程。

2) 扰动土的导气率比原状土的导气率随含水率的变化慢。在含水率变化范围内,原状土导气率的增幅较扰动土大。

3) 在高含水率时,原状土与扰动土的非饱和导水率变化差距拉大的情况非常明显。

式中 θ_s ——饱和体积含水率。

相对导水(气)率是任一含水(气)量下导水(气)率与饱和导水(气)率的比值。测定样品的相对导水率和相对导气率与饱和度的关系曲线显示在图 6 上。由图可知,扰动土和原状土相对导水率和相对导气率与饱和度的关系曲线变化趋势基本相同,但不重合。这就说明如果建立导气(水)率与饱和度间关系时,可以利用统一类型函数进行描述,但模型参数不仅相同^[18,19]。这种差异不仅体现在最大导水率或导气率上,而且体现在曲线形状系数上。因此,在分析扰动土和原状土导水和导气特征时,必须考虑两者差异,以便所建立模型可以综合反映扰动土和原状土导水和导气特征。

4) 扰动土和原状土相对导水率和相对导气率与饱和度的关系曲线变化趋势基本相同,但不重合。

综上所述,原状土与扰动土之间导气率、导水率存在明显差异,主要由于土壤结构破坏,改变了土壤孔隙状况,特别影响了大孔隙存在,如利用数学模型进行描述时,应充分考虑扰动土和原状土在孔隙分布上的差异。

[参 考 文 献]

- [1] 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.

- [2] Jury W A, Horton R. Soil Physics [M]. John Wiley and Sons, Inc, 2004.
- [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[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [4] Hillel D. Environmental soil physics[M]. Academic Press, 1998.
- [5] Van Bavel c H M. Gaseous diffusion and porosity in porous media[J]. Soil Sci, 1952, 73: 91—104.
- [6] Ball B C. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities[J]. Soil Sci, 1981, 32: 483—498.
- [7] 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]. Soil Sci, 1990, 41: 215—228.
- [8] Wildenschild D, Hopmans J W, Rivers M L, et al. Quantitative analysis of flow processes in a sand using synchrotron x-ray microtomography[J]. Vadose Zone, 2005, 4: 112—126.
- [9] Vogel H J. A numerical experiment on pore size, pore connectivity, water retention, permeability, and solute transport using network models. Eur[J]. Soil Sci, 2000, 51: 99—105.
- [10] Penman H L. Gas and vapor movements in the soil:I.The diffusion of vapors through porous solids [J]. Agric Sci, 1940, 30: 437—462.
- [11] Flegg P B. The effect of aggregation on diffusion of gases and vapors through soils[J]. Sci Food Agric, 1953, 4: 104—108.
- [12] Tuli A, Hopmans J W. Effect of degree of fluid saturation on transport coefficients in disturbed soils. Eur[J]. Soil Sci, 2004, 55: 147—164.
- [13] Atac Tuli, Hopmans J W, Dennis E, et al. Comparison of Air and Water Permeability between Disturbed and Undisturbed Soils [J]. Soil Sci, 2005, 69: 1362—1371.
- [14] han C, Falta R W, Javandel I. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapor extraction well[J]. Water Resour Res, 1992, 28(4): 1105—1120.
- [15] Springer D S, Loaiciga H A, Cullen S J et al. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions[J]. Ground Water, 1998, 36(4): 558—565.
- [16] Tjalfé G Poulsen, Per Moldrup. Air permeability of compost as related to bulk density and volumetric air content[J]. Waste Management Research, 2007, 25: 343—351.
- [17] 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.
- [18] Shoichiro Hamamoto, Takeshi Tokida, Tsuyoshi Miyazaki, and et al. Dense Gas Flow in Volcanic Ash Soil: Effect of Pore Structure on Density-Driven Flow[J] Soil Sci Soc Am J, 2008, 72: 480—486.
- [19] Unsal E, Dane J H. Equivalent Soil Pore Geometry to Determine Effective Water Permeability. Vadose Zone[J]. 2006, 5: 1278—1280.

Relationship between air permeability, water conductivity and water content for undisturbed and disturbed soils

Wang Weihua¹, Wang Quanjiu^{1,2*}, Fan Jun²

(1. The institute of Water Resources and Hydraulic Power Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. 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: In order to analyze the relationship between soil air permeability characteristics and soil water conductivity characteristics, the variational characteristics of soil air permeability and water conductivity with the change of soil water content were studied, the air permeability characteristics and water conductivity characteristics for both undisturbed and disturbed soils were compared and the relationship between relative air permeability, water conductivity and water saturation were analyzed of wheat lands soil samples in Yangling of Shannxi province. The results show that soil water conductivity decrease with water content increasing and Water conductivity and air permeability for undisturbed soils is higher than that for disturbed soils, which confirms that soil structure and pores characteristics have enormous impact on the transport of water and air. In addition, although the variational tendency of these characteristics between undisturbed and disturbed soils is almost same, but curves of their variational tendency are not completely alignment. It can be concluded that the pore connectivity and bending degree are different between undisturbed and disturbed soils.

Key words: soil air permeability; soil water conductivity; water saturation