

流域尺度土壤导气率空间分布特征与影响因素分析^{*}

王卫华¹ 王全九² 张志鹏¹
(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 采用地理信息系统和地统计学相结合的方法,以泾惠渠灌区麦田土壤导气率空间分布特征为基础进行相关研究。结果表明:地统计学方法较好地模拟了土壤导气率空间变异特征,反映出该地区土壤气体动力学参数具有较强的空间变异特征;容重、饱和含水率、饱和度与土壤导气率的空间自相关($C/(C_0 + C)$)均在 0.9 以上,说明由自相关部分引起的空间异质性占总空间异质性的程度较大;推荐土壤导气率的采样间距参考值大约为 7.5 km;土壤导气率与容重的 Pearson 相关系数绝对值为 0.595,两者显著相关;土壤导气率与饱和度的 Pearson 相关系数绝对值达 0.959,两者高度相关;交互相关关系说明容重、饱和度是影响土壤导气率的主成因素,在 95% 的置信水平上,容重、饱和度对土壤导气率的影响范围均为 -20 ~ 20 km。

关键词: 土壤导气率 空间变异 流域尺度 影响因素 交互相关分析

中图分类号: S152.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0118-07

引言

近年来人们对土壤与环境间相互作用以及精确调节农田土壤气体传导状况问题的关注度不断增加,数值模型研究土壤气体传输过程及其有效性与其对作物生长和生态环境的影响程度逐步成为现实^[1]。如何发展简单可行的土壤气体传输动力学参数确定方法成为各国学者关注的热点问题。对此研究者在大量试验基础上,相继提出确定土壤气体传输动力学参数的不同方法^[2-8],即直接测定方法和间接推求方法。两种方法各具优势,在生产实际中广泛应用。由于土壤气体传输过程比较复杂,不仅与土壤质地、结构、含水率、容重、土壤有机质含量等土壤基本物理化学特征有关^[4-5],而且受到气候条件、土地利用方式、生长植物群落的种类、田间耕作与管理方式等的强烈影响^[9],有些方法难以准确估计田间土壤导气率,在很大程度上存在局限性,尤其难以在大范围区域研究土壤气体传输动力学特征参数。

此外,土壤气体传输存在严重空间变异性,其空间变异特征与众多影响因素间存在何种关系,如何准确获取一定范围内土壤导气率的平均值,此方面仍缺乏系统研究。综合国内外研究结果发现:各研

究者在其研究区域内作出相关研究,得出相关结论,这些研究区域各自的土壤物理化学性质不相一致^[10-11],从而导致研究结果存在一定分歧。在同一个研究区域内,不同含水率、容重的条件下,土壤导气率的变异和空间格局也是不完全相同的。各个影响因素造成土壤导气率变异,这些因素与变异之间是紧密联系的。因此需要进一步研究土壤气体传输综合特征与各影响因素间的关系,阐明土壤导气率空间变异特征,发展确定土壤导气率简单易行的估算方法,才能实现利用动力学模型分析不同尺度下土壤气体传输动力过程,为农业、水利和生态环境行业的生产实际提供有效的方法。

基于此,本文以陕西省泾惠渠灌区麦田土壤为研究对象,展开关于土壤导气率流域尺度的空间分布特征研究,并利用 Pearson 相关系数及交互相关关系分析各个影响因素(土壤物理基本参数)与土壤导气率空间分布间的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泾惠渠灌区位于陕西省关中平原,地理坐标介于东经 108°34′34″ ~ 109°21′35″,北纬 34°25′20″ ~ 34°41′40″,灌区北邻黄土台塬,西、南、东三面有泾

收稿日期: 2014-02-27 修回日期: 2014-03-24
^{*} 国家自然科学基金资助项目(51179150)、陕西省教育厅专项科研计划资助项目(12JK0482)和昆明理工大学自然科学基金资助项目(KKSY201423023)
作者简介: 王卫华,讲师,博士,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

河、渭河、石川河环绕,清峪河由灌区北部自西向东穿越,为一较完整的水文地质单元;地面和地下径流排泄条件好,灌区东西长约 70 km,南北宽约 20 km,总面积 1 180 km²;地势总趋势是自西北向东南倾斜,海拔高度 350 ~ 450 m,地面坡降一般为 1.66% ~ 3.33%。多年平均降水量为 512 mm,蒸发量 1 212 mm,年平均气温 13.6℃^[12]。

1.2 取样与测量方法

本研究选取灌区麦田为测点,以 2.5 km 的采样间距布设,除去“盲点”外,共 212 个测点,图 1 为布置点示意图。采样点用手持 GPS 定位,记录采样点的经纬度,定位的样点经格式转换成 ArcGIS 能识别的 .shp 格式^[13]。对研究区进行地图数字化,经投影转换后生成研究区样点分布图,录入采样点基本物理参数的信息后,即可用于研究区土壤物理参数及土壤导气率的变异分析。笔者曾利用 PL-300 型土壤导气率测定仪展开研究,详见文献[1,5]。

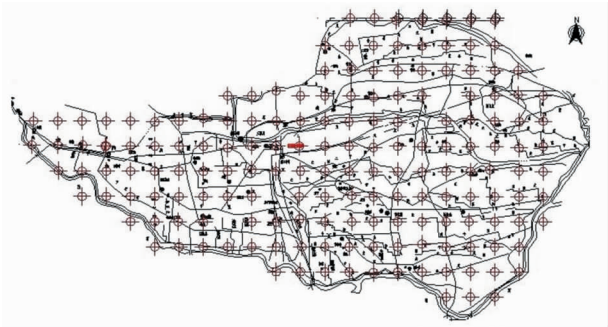


图 1 取样布点示意图(2.5 km × 2.5 km)
Fig. 1 Sketch map of sampling sites (2.5 km × 2.5 km)

土壤物理基本参数的测定方法如下:含水率(采集地表 0 ~ 10 cm 土层土样)、容重通过干燥法测量;土壤颗粒组成利用马尔文激光分析仪测定。每个测点土样用密封袋带回,风干后研磨,过 100 目土壤筛,用于制备供试有机质含量(重铬酸钾外加热法)的土样^[14]。

1.3 数据分析与处理

1.3.1 空间变异分析

利用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,以空

间变异理论为基础,利用 ArcGIS 软件里的地统计模块(Geostatistical Analyst),采用空间克里格插值法(Ordinary Kriging),构建土壤物理基本参数与土壤导气率的空间变异分布图^[15-16]。克里格插值法详见文献[1]。

1.3.2 交互相关系数的确定

变量 A 和 B,在一定滞后间距下,两个变量的交互相关系数可表示为^[17]

$$r_c(h) = \frac{\text{cov}[A_i(x_i), B_i(x_i + h)]}{\sqrt{\text{var}[A_i(x_i)]} \sqrt{\text{var}[B_i(x_i + h)]}} \quad (1)$$

式中 cov——协方差 var——方差
A_i(x_i)——A 变量在位置 x_i 处的值
h——滞后间距

当 h = 0 时,交互相关系数等于经典统计学计算得到的线性相关系数。通常用 t 检验验证交互相关系数的显著性, t 值计算公式^[17]

$$t = \gamma_c \sqrt{\frac{n - 2}{1 - \gamma_c^2}} \quad (2)$$

式中 n——计算交互相关系数所用数据的对数
当式(2)计算得到的 t 值大于查表得到的值时,则认为该交互相关系数显著。

2 结果与分析

2.1 土壤物理基本参数及导气率描述性统计分析

土壤物理基本参数及导气率的描述性统计分析见表 1。用变异系数判断其变异程度:C_v ≤ 0.1 属于弱变异性;0.1 < C_v < 1 为中等变异性;C_v ≥ 1 属于强变异性^[17-18]。由此看出研究区域容重为弱变异,有机质、饱和含水率、饱和度与土壤导气率属于中等变异。

采用地统计学分析的前提要求就是所有变量服从正态分布,即变量的大小分布符合自然状态。而土壤导气率服从对数正态分布,因此将其进行取自然对数的处理。通过表 1 中偏度、峰度以及 K-S 法进行正态检验(p = 0.05),亦能看出土壤物理基本参数以及经过对数处理过的土壤导气率属于近似正态分布。

表 1 土壤物理基本参数及导气率的描述性统计分析
Tab. 1 Descriptive statistics of basic soil physical parameters and soil air permeability

参数	样本数	平均值	标准差	变异系数 C _v	偏度	峰度	K-S 检验
黏粒质量分数	212	22.410	0.029	0.131	-0.211	1.881	1.335
粉粒质量分数	212	23.380	0.034	0.145	0.061	-0.724	1.141
砂粒质量分数	212	54.210	0.050	0.092	0.629	1.949	1.057
容重	212	1.252	0.124	0.099	0.691	2.037	0.835
有机质质量比	212	22.084	6.068	0.275	0.259	0.241	0.527
饱和含水率	212	35.620	0.051	0.143	-0.197	-0.238	0.948
饱和度	212	18.580	0.064	0.345	0.886	1.760	1.446
导气率	212	3.622	1.090	0.301	-0.460	-0.858	0.675

注:导气率与饱和度为实时含水率条件下的实测数值,偏度由 2 × (6/n')^{0.5} 得出,其中 n' 为样本数^[18],K-S 检验取高斯分布数值^[19]。

2.2 土壤物理基本参数与导气率的空间变异及其分布格局

将与各测点土样对应的地理坐标经纬度,以及土壤物理基本参数、土壤导气率等相关数据录入 ArcGIS 软件,在地统计模块的运行环境下,拟合得到各参数的变异函数值,详见表 2。采用变异函数理论模型拟合的方法,推荐其拟合最优值,即可得到结果:土壤颗粒组成(黏粒、粉粒、砂粒)和土壤有机质的最佳拟合模型为指数型;容重、饱和含水率与饱和度的最佳拟合模型为球形模型;土壤导气率的最佳拟合模型为指数型。表 2 可见,各个变异函数的残差平方和均很小,接近于零,且决定系数 R^2 均大于 0.8,说明上述理论关系模型能够描述试验数组的变异函数,并且能够较好地反映出理论变异函数与试验数组的变异函数间的关系。

表 2 显示各个土壤物理基本参数与土壤导气率的分维数(D)均大于 1.9,说明各土壤物理基本参数与土壤导气率的空间异质性较强;容重、饱和含水率、饱和度与土壤导气率空间自相关($C/(C_0 + C)$)均在 0.9 以上,说明由自相关部分引起的空间异质性

占总空间异质性的程度较大。也有学者用空间自相关的大小作为判定系统内变量空间相关性程度的依据,指出当 $C/(C + C_0)$ 为 0 ~ 0.25、0.25 ~ 0.75 和 0.75 ~ 1 时,分别表明变量具有较弱、中等和较强的空间依赖性^[19]。本文研究结果表明:土壤有机质的空间自相关为 0.5,其空间依赖程度属于中等水平;容重、饱和含水率、饱和度与土壤导气率,具有较强程度的空间依赖性。

以最大相关距离作为确定采样间距的参考^[1, 16]。由表 2 可见,土壤颗粒组成(黏粒、粉粒、砂粒)最优拟合模型为指数型,且三者变程 A_0 的数值很接近,空间变异分析具备一致性,因此推荐颗粒组成的采样间距为变程的 3 倍,大约为 6 ~ 8 km。容重、饱和含水率的最优拟合模型为球形模型,推荐变程作为采样间距的参考值,大约为 3 km。土壤导气率的最优拟合模型为指数型模型,推荐 3 倍变程作为采样间距的参考值,大约为 7.5 km。同时各参数最大相关距离都没有超出滞后距离(30.23 km)的范围,符合逻辑。而试验设计的 2.5 km 采样间距符合空间变异分析的采样要求,试验设计是合理的。

表 2 土壤物理基本参数与导气率的变异函数理论模型及其参数

Tab.2 Parameters of theoretical variogram models for basic soil physical parameters and soil air permeability								
参数	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	空间自相关 $C/(C_0 + C)$	变程 A_0/km	决定系数 R^2	残差	分维数 D
黏粒质量分数	指数	6.46	15.330	0.579	2.30	0.922	0.761	1.925
粉粒质量分数	指数	1.60	12.120	0.868	2.19	0.871	2.18×10^{-2}	1.916
砂粒质量分数	指数	8.41	26.100	0.678	2.84	0.896	8.24×10^{-2}	1.953
容重	球形	3.20×10^{-4}	0.016	0.980	3.18	0.824	2.19×10^{-7}	1.937
有机质质量比	指数	2.95	5.909	0.501	8.51	0.973	3.72×10^{-3}	1.928
饱和含水率	球形	1.79	25.55	0.93	2.38	0.873	1.95×10^{-2}	1.971
饱和度	球形	1.20	41.550	0.971	3.00	0.854	8.22×10^{-2}	1.915
导气率	指数	0.106	1.213	0.913	2.68	0.812	9.27×10^{-4}	1.939

2.3 Kriging 插值结果

以空间变异理论为基础,利用 ArcGIS 软件里的地统计模块,建立半方差函数模型(图 2),应用普通克里格法进行最优内插^[20],构建土壤物理基本参数与土壤导气率的空间变异分布图(图 3)。

总体上,各土壤物理基本参数的空间差异较大,在空间布局上呈现出不规律的斑块状分布。从图 3 中可以看出:颗粒组成黏粒、粉粒及砂粒含量分布图具有相反趋势,砂粒含量相对较低的地方,黏粒、粉粒含量相对较高。容重的大小决定了土壤孔隙率的大小,容重越大孔隙率越小。因此容重与饱和度在空间分布上具有相反的趋势。土壤导气率与容重空间布局具有一定程度的一致性,与饱和度的空间布局具有相反趋势。容重越小,砂粒含量越高的地方,

孔隙率越高,孔隙结构越发达,导气率数值也就越高。饱和度反映土壤孔隙含水的状况,饱和度小说明贡献于气体传输的有效孔隙多,土壤导气率数值越高。这归因于土壤孔隙中气相与液相并存,土壤结构及其孔隙的几何结构特征决定了土壤气体传输的特性。

2.4 土壤导气率与影响因素的相关性分析

利用 SPSS 软件对土壤导气率与主要影响因素之间作相关性分析,主要影响因素包括土壤颗粒组成、有机质质量比、容重、饱和度,将计算出的 Pearson 相关系数列于表 3。

由表 3 的分析结果来看,土壤导气率与有机质的 Pearson 相关系数绝对值介于 0 ~ 0.5 之间,说明两者之间微弱相关;土壤导气率与容重的 Pearson 相

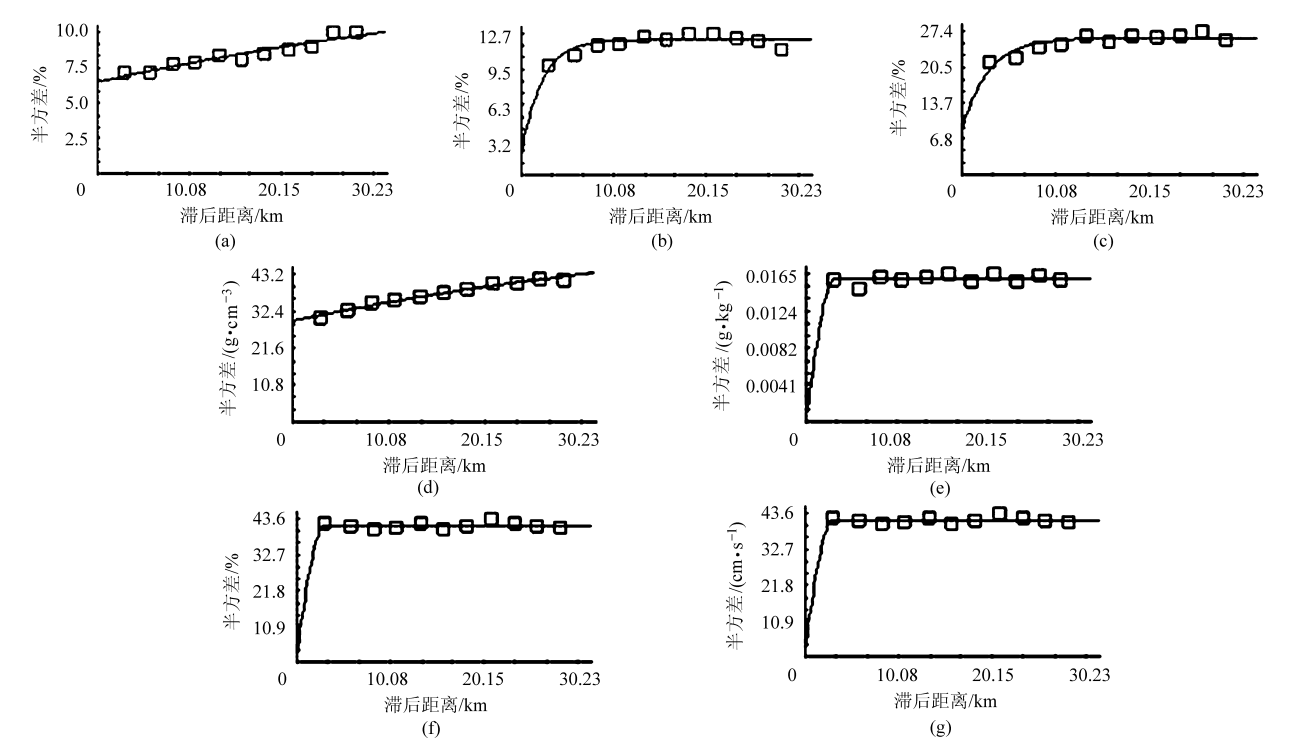


图 2 土壤物理基本参数的半方差图

Fig. 2 Semi-variogram of soil basic physical parameters

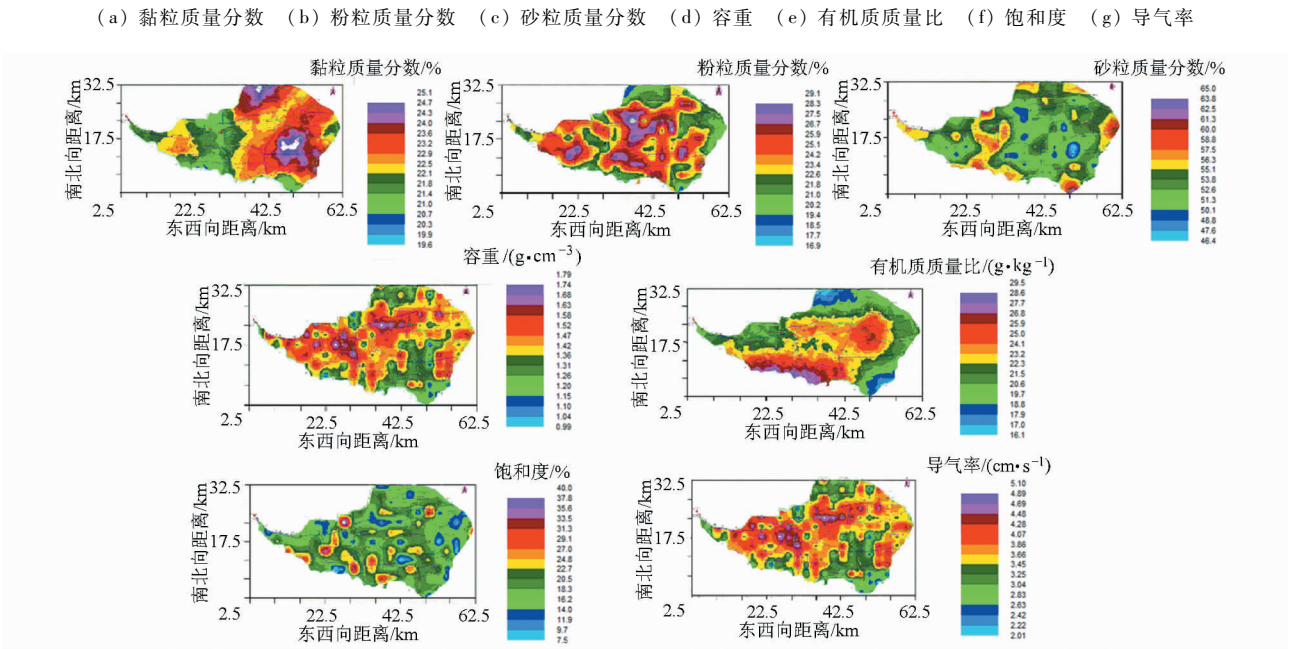


图 3 泾惠渠灌区麦田土壤物理基本参数的空间插值分布图

Fig. 3 Spatial interpolation distribution map of soil basic physical parameters in Jinghui Irrigation District

表 3 土壤导气率与土壤物理基本参数间的相关性分析		
Tab.3 Correlation analysis between air permeability and soil physical parameters		
	Pearson 相关系数	二尾检验
黏粒质量分数	-0.033	0.637
粉粒质量分数	-0.085	0.217
砂粒质量分数	0.077	0.266
有机质质量比	-0.136 *	0.048
容重	-0.595 **	1.127 × 10 ⁻²¹
饱和度	-0.959 **	1.329 × 10 ⁻¹⁶

注：* 表示在 0.05 的水平上显著，** 表示在 0.01 的水平上显著。

关系数绝对值介于 0.5 ~ 0.8 之间,两者显著相关;土壤导气率与饱和度的 Pearson 相关系数绝对值介于 0.8 ~ 0.1 之间,两者高度相关。由于在地统计分析时,对于选取的尺度较小的研究区域来说,DEM 地图的精度也是导致土壤导气率与某些影响因素之间相关性较差的原因之一,也不能完全说土壤颗粒组成与导气率之间微弱相关。

以上利用 Pearson 相关系数分析各个影响因素与土壤导气率之间的相关性的结果也有一定道理。

首先,土壤孔隙中气相与液相并存,饱和度高了,含水率相对就高,导气率自然就随之降低;其次,容重决定了土壤孔隙率的大小,贡献于土壤通气能力的孔隙受制于容重的大小;再次,在质地相同的情况下,土壤有机质含量高,土壤颗粒团聚体结构好,孔隙发达,导气率大;最后是决定土壤质地划分的土壤颗粒组成。基于以上分析,在利用土壤物理基本参数推求土壤导气率的研究中优先考虑饱和度,其次依次考虑容重、有机质、土壤颗粒组成。

2.5 土壤导气率与影响因素的交互相关性分析

在经典统计学中,Pearson 相关系数没有考虑空间位置,它仅代表两个变量在同一采样点上的相关性,交互相关图就可以反映出两个相关的变量在多大的滞后距离上存在相关性^[16]。

根据泾惠渠灌区土壤样本的实测数据,分析土壤导气率与各个土壤物理基本参数的交互相关关系,推求这些影响因素对土壤导气率的影响范围,各个影响因素与土壤导气率的交互相关图见图 4。由图 4 可见,各因素对土壤导气率的影响格局均不同;对于同一因素来说,在不同方向上,交互相关系数也不同。对于容重和饱和度这两个重要的影响因素来说,无论是正相关还是负相关,随着滞后间距的增大,交互相关系数的绝对值减小,说明随着容重、饱和度与土壤导气率之间变量的间距增大,其相关程度随之降低。在 95% 的置信水平上,容重、饱和度对土壤导气率的影响范围均为 -20 ~ 20 km。图 4 也能说明容重与饱和度是影响土壤导气率的主要影响因素。

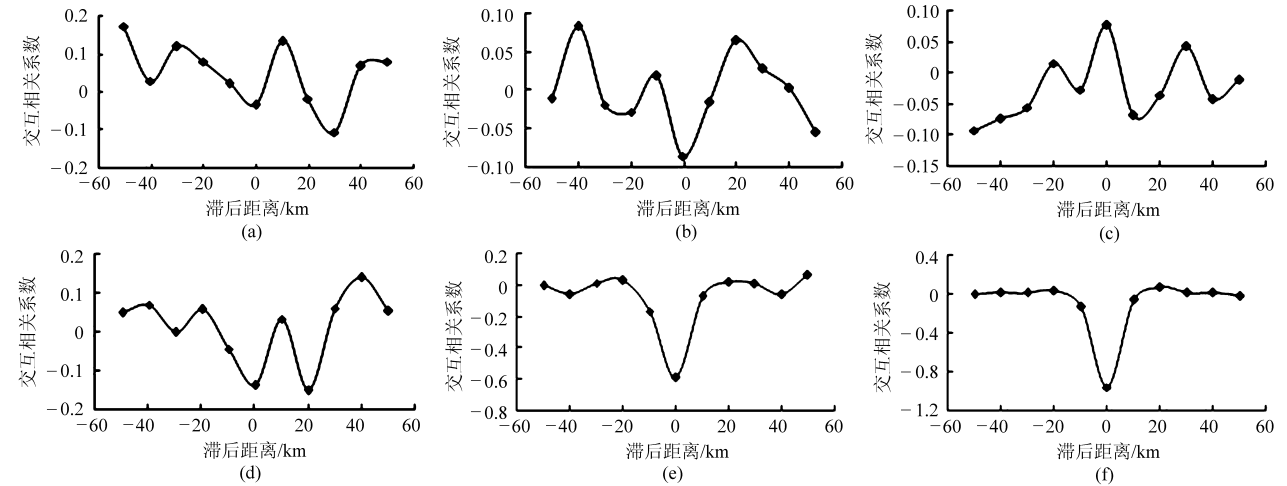


图 4 土壤导气率与土壤物理基本参数的交互相关图

Fig.4 Interactive correlation diagram between air permeability and soil physical parameters

(a) 导气率与黏粒质量分数交互相关图 (b) 导气率与粉粒质量分数交互相关图 (c) 导气率与砂粒质量分数交互相关图
(d) 导气率与有机质质量比交互相关图 (e) 导气率与容重交互相关图 (f) 导气率与饱和度交互相关图

3 结论

(1) 阐明了该灌区麦田土壤导气率与土壤物理基本参数的空间变异特征,土壤导气率分维数大于 1.9,反映出该研究区域土壤气体动力学参数具有较强的空间变异特征。

(2) 容重、饱和含水率、饱和度与土壤导气率的空间自相关($C/(C_0 + C)$)均在 0.9 以上,说明由自相关部分引起的空间异质性占总空间异质性的程度

较大。推荐土壤导气率的采样间距的参考值大约为 7.5 km,颗粒组成采样间距为 6 ~ 8 km,容重、饱和含水率采样间距的参考值大约为 3 km。

(3) 土壤导气率与容重的 Pearson 相关系数绝对值为 0.595,两者显著相关,其与饱和度的 Pearson 相关系数绝对值为 0.959,两者高度相关;交互相关关系说明容重、饱和度是影响土壤导气率的主成因素,在 95% 的置信水平上,容重、饱和度对土壤导气率的影响范围均为 -20 ~ 20 km。

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-air-heat parameters in typical oasis croplands at middle reaches of Heihe River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 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 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 Quanju, 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)

5 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 China Society of Agricultural Engineering, 2009, 25 (11): 120 – 127. (in Chinese)

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,2011,27(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, 27(4): 352 – 356. (in Chinese)

9 邱扬,傅伯杰,王军,等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志,2007,26(1):100 – 107.
Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et, al. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1): 100 – 107. (in Chinese)

10 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.

11 Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment[J]. Journal of Hydrology, 1998, 205(1): 20 – 37.

12 王卫华,王全九. 基于 GPS 与 GE 的土壤水力参数空间变异采样间距确定[J]. 农业机械学报,2014,45(3):97 – 100.
Wang Weihua, Wang Quanju. Sample spacing of spatial variability of soil hydraulic parameters in basin scale based on GPS and Google Earth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 97 – 100. (in Chinese)

13 Miller M P, Singer M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(4): 1133 – 1141.

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,1996:41 – 48.

15 李哈滨,王政权. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报,1998,9(6):651 – 657.
Li Habin, Wang Zhengquan. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 651 – 657. (in Chinese)

16 Zu Y, Ma K, Zhang X. A fractal method for analyzing spatial heterogeneity of vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(3): 333 – 337.

17 Nielsen D R, Wendroth O. Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation [M]. Reiskirchen: Catena Verlag, GmbH. , 2003: 31 – 90.

18 Massey J R F J. The Kolmogorov – Smirnov test for goodness of fit[J]. Journal of the American statistical Association, 1951, 46(3): 68 – 78.

19 Cambardella C, Moorman T, Novak J, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Science Society of American Journal, 1994, 58(5): 1501 – 1511.

20 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)

Abstract: In order to define the spatial distribution of soil air permeability and do correlation analysis of its impact factors in basin scale, researches in Jinghui irrigation district at the middle of Shaanxi province were made. Based on the spatial analysis function of geographic information systems, the results show that the optimal fitting model for air permeability is an exponential model, and the statistical method is suitable to simulate the spatial structure and variation characteristics of soil air permeability. The bulk density, saturated moisture content, saturated degree and soil air permeability's spatial autocorrelation $C/(C + C_0)$ are all greater than 0.9. It shows the spatial heterogeneity induced by the autocorrelation has a strong degree in the spatial heterogeneity of the study scale. Recommend sampling distances of air permeability is 7.5 km. Significant correlation is found between bulk density and soil air permeability, and the absolute value of Pearson correlation coefficient is 0.595. High correlation is found between soil air permeability and saturated degree, and the absolute value of Pearson correlation coefficient is 0.959. The bulk density and the saturated degree are proved to be the main impact factors by interactive correlation analysis between air permeability and soil physical parameters. The influence ranges of bulk density and soil saturation degree on air permeability are both from -20 km to 20 km at 95% confidence level.

Key words: Soil air permeability Spatial variability Basin scale Impact factors Interactive correlation analysis

~~~~~

(上接第 117 页)

**Simulation of Salt Leaching in Coastal Saline Soil Denoting Sand Columns Based on COMSOL**

Sun Xueyan<sup>1,2</sup>    Li Pinfang<sup>1</sup>    Li Baoguo<sup>1</sup>    Xue Yuanxia<sup>2</sup>    Shao Lei<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Arable Land Conservation (North China), Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100193, China*  
2. *Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China*)

**Abstract:** Based on COMSOL (3.5), two-dimensional transient cross-sectional models were used to investigate water and solute transport in the soil column coupled with variable sand column forms, with “a” denoting no sand column, “b” with one vertical middle sand column, “c” with one long slanged sand column, “d” with two long slanged X-shaped sand columns. The results showed that sand column obviously increased the transport efficiency of water and salt, which may attribute to the higher hydraulic conductivity and higher diffusion coefficients in sand columns than clay-loam coastal saline. The efficiency of sand column depends on its position and its angle accordingly. The slanted columns were overall superior to the vertical ones in transport efficiency. Generally, “d” is the best type, “c” is the second best and “b” is the third, according to the efficiency of salt leaching and the efficiency of the utilization of water resources.

**Key words:** Coastal saline    Solute transport    COMSOL 2-D    Sand column    Mathematical simulation