

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.018

土壤热特性参数空间变异性与拟合方法研究^{*}

王卫华¹ 李建波¹ 王 铄² 王全九^{3,4} 周广林³

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500;
2. 商洛市水务局, 商洛 726000; 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: 采用 3S 技术相结合的方法, 在陕西省泾惠渠灌区研究了土壤热特性参数区域尺度的空间变异性, 结果表明: 土壤热容量、热扩散率及土壤导热率在该区域尺度下属于中等变异, 土壤热扩散率和导热率的空间异质性较强, 而土壤热容量的空间异质性相对土壤热扩散率和导热率表现较弱, 三者均具有较强的空间依赖性。土壤热容量、热扩散率及土壤导热率的最优拟合模型分别为指数、球型、高斯模型, 推荐三者的采样间距分别为 2.67、3.68、2.76 km, 推荐该区域范围内土壤热特性参数空间变异采样间距的最优值为 3 km。在描述土壤热特性参数空间变异特征的基础上, 建立利用土壤物理基本参数拟合土壤热特性参数的简单公式, 并验证了此方法的适用性, 决定系数 R^2 达 0.80 以上, 利用此方法能够实现土壤热特性参数的空间变异特征在复杂程度上的定量化。

关键词: 土壤热特性参数 空间变异 流域尺度 预测模型

中图分类号: S1562.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0120-06

Spatial Variability of Soil Thermal Parameters and Its Fitting Method

Wang Weihua¹ Li Jianbo¹ Wang Shuo² Wang Quanjiu^{3,4} Zhou Guanglin³

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. Shangluo Water Resources Bureau, Shangluo 726000, 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, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: There are some research difficulties and highlights in analyzing spatial variation in recent years, such as how to choose advanced methods, how to make efficient and reasonable experimental designs, how to normalize field sampling program process, and how to select representative sampling points. In view of the above mentioned issues, a research on spatial variable of soil thermal parameters on basin scale in Jinghui Canal Irrigation District, Shaanxi Province was conducted by combining RS, GPS and GIS technology. The results showed that soil thermal capacity, thermal diffusion and thermal conductivity displayed moderate variation in the selected regional scale. Thermal diffusion and thermal conductivity displayed a stronger spatial heterogeneity than soil thermal capacity, which showed a relative weaker one. Furthermore, a strong spatial dependence was found among the above three parameters. The optimum fitting models for soil thermal capacity, thermal diffusion and thermal conductivity were exponential model, spherical model and Gaussian model, respectively. And the sample spacings of above three models were recommended to be 2.67, 3.68 and 2.76 km, respectively. Meanwhile, the best

收稿日期: 2014-10-28 修回日期: 2014-12-17
^{*} 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)和陕西水利科技计划资助项目(2011slkj-04)
作者简介: 王卫华, 副教授, 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

sampling spacing of soil thermal parameters in this region was recommended to be 3 km. A simple fitting formula for soil thermal parameters determined by basic parameters of soil physics was established based on describing the spatial variability of soil thermal parameters. It was proved to be a good applicability with $R^2 > 0.80$ after verifying. It indicated that quantization analysis on complex spatial variability of soil thermal parameters could be well achieved based on the introduced method.

Key words: Soil thermal parameters Spatial variability Basin scale Prediction model

引言

土壤热传递与土壤水分和气体传输机理大不相同,土壤热借助土壤空隙中的气体或者水分进行传递,也能直接通过固体颗粒进行传递,因此,热传递相对于水气传输显得更为复杂^[1]。土壤热传递受到世界各国学者的广泛关注,对测定导热率的简单方法进行了广泛研究,目前具有代表性的方法是热脉冲法^[2]。该方法利用探头发出的热量,根据测定温度变化来计算导热率。由于该技术可以与测定土壤水分的 TDR 仪器进行结合,同时测定土壤含水率和热参数,故便于实现多点快速测定。任图生等将热脉冲技术和 TDR 技术相结合,实现了同一位置下相同体积土壤含水率、温度、容积热容量、热扩散率和导热率的连续定位测定^[3-4]。为了提高测量精度和扩展热脉冲技术功能,逐步发展了不同形式的探头。陆森等对利用多探针热脉冲技术测定土壤导热率方法进行了分析,表明 Thermo-TDR 法能准确测定土壤导热率^[5-6]。从目前实际应用来看,热脉冲技术是直接测定土壤导热率的最好方法。但是,如果需要确定一定区域的土壤导热率,显然仍存在费时费力的问题,尤其是研究区域内采样点的合理布设问题不容小觑。

土壤热特性参数可以直接测定,也可利用公式计算,由于热参数的影响因素众多,学者们从不同角度尝试对其进行推导,得到多种结果,一般分为理论公式、经验方法两种类型。推求导热率的理论公式以 Lu、Johansen、Côté 等所提出的公式为代表^[6-8],在以上研究的基础上,本文提出利用土壤物理基本参数拟合热特性参数的流程。

本文将 RS (Remote sensing)、GPS (Global position system) 及 GIS (Geographic information system) 技术相结合,对区域范围内土壤热特性的研究提供行之有效的手段,并且将数值计算与图形处理有机结合,构建土壤热特性参数流域范围空间分布图。利用土壤物理基本参数建立其与土壤热理论公式参数间的关系,从而通过间接法获得土壤导热率,实现简洁、直观地针对区域尺度下土壤热传输特征的定性 & 定量化研究。

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中部,系从陕西泾阳县泾河仲山口引水的灌溉工程所经流域。地跨东经 108°34'34" ~ 109°21'35",北纬 34°25'20" ~ 34°41'40",灌区西临泾河、南至渭河、东接石川河,北依黄土台塬,清峪河自西向东穿过灌区北部,构成了一个完整的水文地质单元。灌区地势平坦,土壤肥沃,气候温和,径流排泄条件好,总面积 1 180 km²;海拔高度 350 ~ 450 m,地面坡降 3.33% ~ 1.66%。多年平均降水量 512 mm,平均蒸发量 1 212 mm,年平均气温 13.6℃^[9]。农作物种类丰富,以小麦、玉米、蔬菜、棉花为主。

1.2 测量方法与数据分析

本文数据获取与数据分析过程中,将 RS、GPS 与 GIS 三者技术相结合,采样区选取于泾惠渠灌区的小麦田,下载该区域 2013 年 4 月 11 日的 Landsat8OLI_TIRS 遥感影像,利用遥感影像进行采样点布设及研究区概况了解;利用均匀网格法布设采样点,网格间距为 2.5 km。在试验设计中,充分考虑研究区域的实际情况,利用 RS 遥感影像预先确定采样点,消除采样点盲区,共布设 212 个采样点。利用 ArcGIS 对遥感影像进行数字化,获取交通枢纽、行政中心等信息得到研究区概况如图 1 所示。利用手持 GPS 进行定位,依靠 GPS 寻找预先确定的采样点,记录采样点地理坐标,并将其导入 ArcGIS 软件经投影变换转化为 .shp 格式文件,导出取样测点布设图(图 2)。同时录入采样点土壤热特性参数信息后,即可用于研究区的相关变异分析^[10-11]。

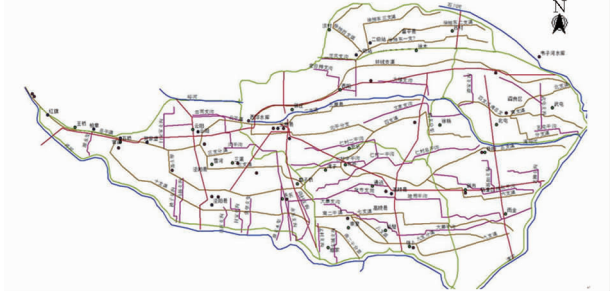


图 1 研究区概况图

Fig.1 General situation map of study area

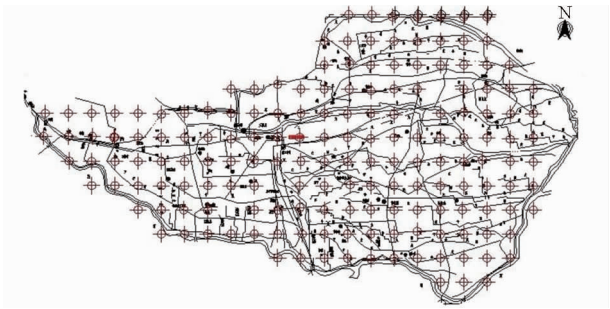


图 2 采样点布设示意图(2.5 km × 2.5 km)
Fig. 2 Sketch map of sampling sites(2.5 km × 2.5 km)

数据通过实地调研和测量获取,根据 RS 影像预先布置的采样点利用热脉冲法测量热参数,其具体测定方法参照文献[12]。其中土壤热扩散率和热容量可直接测得,根据二者推求土壤导热率^[12]。利用标准环刀采集地表 0 ~ 10 cm 土样,带回实验室通过干燥法测量容重及土壤含水率^[1]。

根据所测与所求数据,以空间变异理论为基础,将数据导入 ArcGIS 软件利用地统计模块(Geostatistical Analyst)中的空间克里格插值(Ordinary Kriging)法,绘制土壤热参数空间变异特征的分布图^[13-14]。室内数据分析利用 SPSS 19.0 软件进行所测参数的描述性统计分析并进行 K-S

检验,利用 Matlab 遗传算法进行参数拟合,将野外测量与室内解译相结合,实现针对区域尺度下土壤热特性参数的采集、处理、分析、输出及评价等功能。

2 结果与分析

2.1 土壤热特性参数统计特征值

变异程度由变异系数 C_v 判断: $C_v \leq 0.1$ 属于弱变异性; $0.1 < C_v < 1$ 为中等变异性; $C_v \geq 1$ 属于强变异性^[10-12]。土壤水力参数描述性统计分析见表 1。

采用地统计学分析的前提要求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。通过表 1 中偏度、峰度以及 K-S 法进行正态检验($p = 0.05$),也能看出土壤热容量、热扩散率及土壤导热率属于近似正态分布,在该区域尺度下属于中等变异。

2.2 土壤热特性参数空间分布特征

将采样点实测数据录入地理信息系统 ArcGIS 软件,数据包括采样点对应的地理坐标经纬度、土壤热容量、热扩散率及土壤导热率等。在地统计模块运行环境下,拟合得到土壤热参数变异函数值,见表 2。

表 1 土壤热特性参数描述性统计分析

Tab. 1 Descriptive statistics of soil thermal parameters

参数	样本数	平均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	K-S 检验
热容量/(J·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	212	2.418	0.644	0.266	0.059	-0.874	1.074
热扩散率/(m ² ·s ⁻¹)	212	0.407	0.220	0.541	1.094	1.794	0.988
导热率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	212	0.903	0.279	0.309	0.468	0.055	1.109

注: 偏度由 $2 \times (6/n)^{0.5}$ 得出,其中 n 为样本数^[15],K-S 检验高斯分布数值由 $(1.36/n)^{0.5}$ 得出^[14]。

表 2 土壤热特性参数变异函数理论模型及其参数

Tab. 2 Parameters of theoretical variogram models for soil thermal parameters

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/km	决定系数	残差平方和	分维数
热容量/(J·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	指数	4.8×10^{-2}	0.42	0.886	0.89	0.824	4.74×10^{-3}	1.761
热扩散率/(m ² ·s ⁻¹)	球型	1.9×10^{-3}	4.9×10^{-2}	0.961	3.68	0.902	4.63×10^{-5}	1.837
导热率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	高斯	1.94×10^{-2}	0.144	0.865	2.76	0.931	5.32×10^{-4}	1.881

建立变异函数理论模型,拟合推荐其最优值,结果表明:土壤热容量最佳拟合模型为指数模型;热扩散率的最佳拟合模型为球型模型;而土壤导热率的最佳拟合模型为高斯模型。由表 2 可见,土壤热特性参数的 3 个变异函数的残差平方和(RSS)均很小,接近 0,且决定系数 R^2 均大于 0.80,说明上述理论关系模型可用于描述试验数组的变异函数,并能较好地反映理论模型与试验数组变异函数之间的关系。

表 2 显示土壤热扩散率和导热率的分维数(D)均大于 1.8,说明该地区土壤热扩散率和导热率的

空间异质性较强;而土壤热容量的分维数(D)介于 1.7 ~ 1.8 之间,其空间异质性相对土壤热扩散率和导热率表现较弱。土壤热容量、热扩散率及土壤导热率的空间自相关($C/(C_0 + C)$)均在 0.85 以上,说明由自相关部分引起的空间异质性占总体空间变异性的比重较大^[12]。也有的研究者认为可以利用空间自相关的大小来判定系统内变量空间相关性程度,指出变量的 $C/(C_0 + C)$ 比值大于 0.75、0.25 ~ 0.75 之间、小于 0.25 时,分别表示其具有较强、中等、较弱的空间依赖性^[13]。本文研究结果表明:土壤热容量、热扩散率及土壤导热率在较大程度上对

空间存在依赖。

以最大相关距离作为确定采样间距的参照^[12]。由表 2 可见,指数模型为土壤热容量的最优拟合模型,推荐 3 倍变程作为采样间距^[12],约为 2.67 km;球型模型为土壤热扩散率的最优拟合模型,变程作为采样间距的推荐参考值,为 3.68 km;高斯模型为土壤导热率的最优拟合模型,推荐采样间距的参考值大约为 2.76 km。各土壤热特性参数的最大相关距离均在滞后距离(30.24 km)的范围之内,

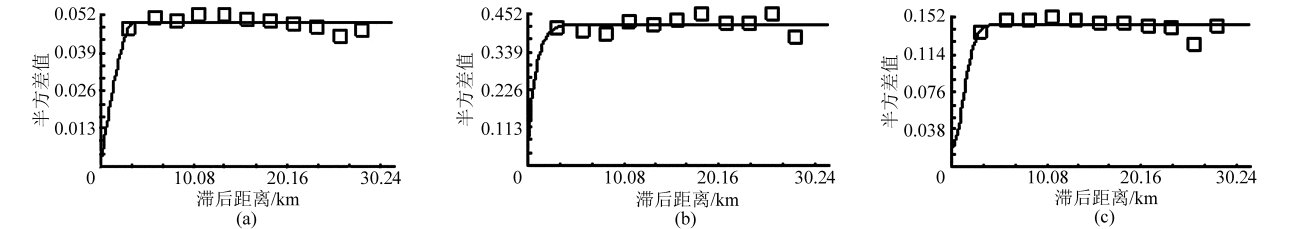


图 3 土壤热特性参数的半方差图
Fig.3 Frequency of soil thermal parameters
(a) 热扩散率 (b) 热容量 (c) 导热率

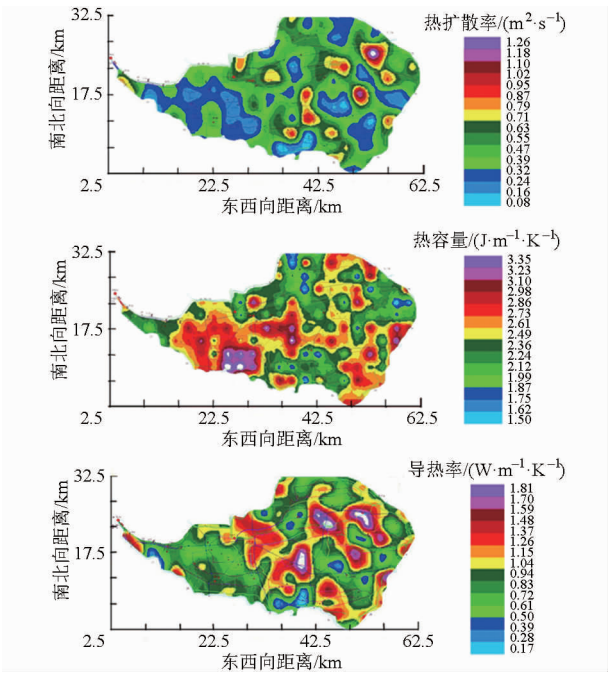


图 4 泾惠渠灌区麦田土壤热特性参数的空间插值分布图
Fig.4 Spatial interpolation distribution map of soil thermal parameters in Jinghui Canal Irrigation District

由图 4 可见,土壤热特性参数在空间上的分布差异较大,在空间布局上呈不规则的斑块状分布状态。土壤热容量与热扩散率呈现出 2 种不同的分布格局,但在各自斑块内部的空间连续性均较好。土壤热容量与热扩散率的乘积为导热率,从图 4 中也可看出:土壤热容量与热扩散率数值较高的测点位置对应的土壤导热率数值也相对较高,在地区分布上具有一定的一致性。

因此,试验最初设计采样间距 2.5 km 符合空间变异分析的采样要求;针对该区域范围内土壤热特性参数空间变异采样间距的最优值(取三者平均)为 3 km。

2.3 Kriging 插值结果

在 ArcGIS 软件统计模块运行环境下,以空间变异理论为建模指导思想,构建半方差函数模型(图 3),普通克里格法内插取最优值,绘制土壤热特性参数的空间变异分布图(图 4)。

2.4 利用土壤物理基本参数拟合热特性参数

2.4.1 理论公式

Johansen 在 1975 年提出了热导率的计算公式^[7]。以干土导热率 λ_{dry} 和饱和土的导热率 λ_{sat} 为基础,建立非饱和土壤导热率 λ 与 K_e (Kersten 数)之间的关系为

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) K_e + \lambda_{dry} \tag{1}$$

式中 λ ——导热率实测值, $W/(m \cdot K)$

K_e 与土壤实时含水率或者是饱和度 S_r 的关系式为

$$K_e = \begin{cases} 0.7 \lg S_r + 1.0 & (0.05 < S_r \leq 0.1) \\ \lg S_r + 1.0 & (S_r > 0.1) \end{cases} \tag{2}$$

其中 $S_r = \theta/\theta_s$

式中 θ_s ——饱和含水率, %

λ_{sat} 的计算式为

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n \tag{3}$$

其中

$$\lambda_s = \lambda_q \lambda_0^{1-q}$$

式中 n ——土壤孔隙度, %

在 20℃ 条件下, $\lambda_w = 0.594 W/(m \cdot K)$; λ_s 由整个固体石英含量的导热率 $\lambda_q = 7.7 W/(m \cdot K)$ 和其他矿物质的导热率(λ_0)得到。即

$$\lambda_0 = \begin{cases} 2.0 W/(m \cdot K) & (q > 0.2) \\ 3.0 W/(m \cdot K) & (q \leq 0.2) \end{cases} \tag{4}$$

λ_{dry} 的计算式为

$$\lambda_{dry} = \frac{0.135 \rho_b + 64.7}{2700 - 0.947 \rho_b} \tag{5}$$

式中 ρ_b ——土壤容重, g/cm^3

Côté 等于 2005 年的研究针对 Johansen 公式进行了改进^[8]

$$K_e = \frac{kS_r}{1 + (k - 1)S_r}$$

(6)

式中 k ——与土壤质地有关的独立参数

Côté 等指出粗砂粒、中小砂粒、黏土、有机质含量的 k 值分别为 4.60、3.55、1.90、0.60。 λ_{dry} 的计算式为

$$\lambda_{dry} = \chi 10^{-\eta n}$$

(7)

式中 χ 、 η ——受颗粒性状影响的参数

Lu 等在以上研究进展的基础上提出了新的改进公式^[6]

$$K_e = \exp(\alpha(1 - S_r^{\alpha-1.33}))$$

(8)

式中 α 为由土壤质地决定的参数,1.33 为形状参数。砂土、黏土、壤土 α 取值分别为 0.96、0.57、0.27。对于矿物质的土壤给出了新的 $\lambda_{dry} = -an + b$, a 、 b 是经验系数。

由于 Côté 公式中的系数 k 和 Lu 等公式中的系数 α 都是与质地有关的经验常数,故而,基于前人研究的基础之上,给出利用土壤物理基本参数推求土壤导热率的流程图,见图 5。

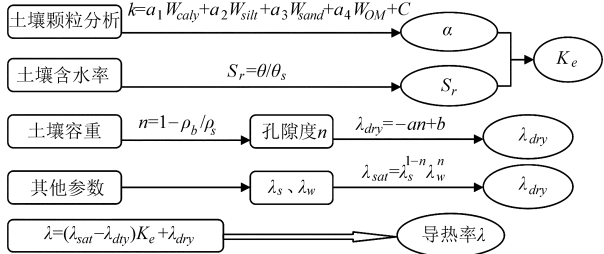


图 5 土壤物理基本参数推求土壤导热率流程图

Fig. 5 Flow chart of thermal conductivity calculation according to soil physical parameters

2.4.2 参数拟合与验证

将土壤导热率及土壤基本物理参数带入流程图中各个对应的步骤,土壤物理基本参数见文献[9],根据式(1)得到

$$K_e^{(1)} = \frac{\lambda - \lambda_{dry}}{\lambda_{sat} - \lambda_{dry}}$$

(9)

用 100 个点的土壤物理基本参数建立系数 k 、颗粒组成和有机质含量之间的线性关系式

$$k = a_1 W_{clay} + a_2 W_{silt} + a_3 W_{sand} + a_4 W_{OM} + C$$

(10)

式中 W_{clay} ——黏粒含量, %

W_{silt} ——粉粒含量, %

W_{sand} ——砂粒含量, %

W_{OM} ——有机质含量, g/kg

a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ——黏粒、粉粒、砂粒、有机质含量利用遗传算法程序拟合的系数

C ——常数

将计算得到的 k 值和土壤饱和度代入式(6)中计算出 K_e ;最后,计算 $K_e^{(1)}$ 和 K_e 之间的决定系数 R^2 ,以决定系数最大为原则。

用 Matlab 软件中的遗传算法程序拟合系数,得 $a_1 = 15.54$, $a_2 = 11.16$, $a_3 = 17.43$, $a_4 = 0.027$, $C = -12.59$, R^2 为 0.83。

根据以上系数计算出其余 112 个点对应的 k 值,再利用式(6)和式(1)计算导热率,与实测值进行比较,结果如图 6 所示。导热率计算值与实测值的均方根误差 RMSE 为 0.128 W/(m·K), R^2 为 0.811。

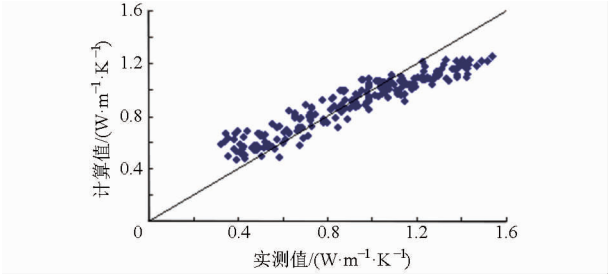


图 6 实测值与 Côté 公式计算值对比

Fig. 6 Comparison of Côté calculation with measured values

通过 112 个点实测资料的验证,计算值与实测值基本分布在 1:1 线附近,说明计算值和实测值基本吻合。

3 结论

(1) 土壤热容量、热扩散率及土壤导热率在该区域尺度下属于中等变异,土壤热扩散率和导热率的空间异质性较强,而土壤热容量的空间异质性相对土壤热扩散率和导热率表现较弱。土壤热容量、热扩散率及土壤导热率的空间自相关 ($C/(C_0 + C)$) 均在 0.85 以上,说明由自相关部分引起的空间异质性占总体空间变异性的比重较大,三者均具有较强的空间依赖性。

(2) 土壤热容量、热扩散率及土壤导热率的最优拟合模型分别为指数型、球型、高斯模型,推荐三者的采样间距分别为 2.67、3.68、2.76 km,推荐该区域范围内土壤热特性参数空间变异采样间距的最优值为 3 km。通过对该地区土壤热特性空间变异性的研究可以及时了解该地区土壤热特性参数分布状况。

(3) 在满足区域尺度研究要求的前提下,减少了野外采样数目,提高了工作效率。此方法可用于描述土壤热特性参数的空间变异性,也可用于分析其他土壤物理基本参数的变异。建立利用土壤物理基本参数拟合土壤热特性参数的简单公式,并验证了此方法的适用性, R^2 达 0.80 以上。利用此方法实现了在复杂程度上的土壤热特性参数空间变异特征的定量化研究。

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 Nicolsky D J, Romanovsky V E, Panteleev G G. Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(1): 120 – 129.

3 任图生,邵明安,巨兆强,等. 利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 I. 原理[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 225 – 229.

Ren Tusheng, Shao Ming'an, Ju Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry I. theory[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 225 – 229. (in Chinese)

4 陆森,任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 13 – 18.

Lu Sen, Ren Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 13 – 18. (in Chinese)

5 陆森,任图生,杨泱,等. 多针热脉冲技术测定土壤热导率误差分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 20 – 25.

Lu Sen, Ren Tusheng, Yang Yang, et al. Error analysis of multi-needle heat pulse probe for soil thermal conductivity measurement [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(6): 20 – 25. (in Chinese)

6 Lu S, Ren T, Gong Y, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(1): 8 – 14.

7 Johansen O. Thermal conductivity of soils[R]. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH, 1977.

8 Côté J, Konrad J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 443 – 458.

9 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 Quanjiu, 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)

10 Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability [M]. Wageningen; Pudoc Scientific Publishers, 1995: 209 – 234.

11 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)

12 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 Quanjiu, 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)

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

14 Massey Jr F J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit[J]. Journal of the American Statistical Association, 1951, 46(253): 68 – 78.

15 Szymanski D M, Hise R T. E-satisfaction: an initial examination[J]. Journal of Retailing, 2000, 76(3): 309 – 322.

~~~~~

(上接第 131 页)

22 韩召迎,孟亚利,徐娇,等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析——以江苏省为案例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):1034 – 1041.

Han Zhaoying, Meng Yali, Xu Jiao, et al. Temporal and spatial different in carbon footprint of regional farmland ecosystem—taking Jiangsu province as a case[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012,31(5):1034 – 1041. (in Chinese)

23 段华平,张悦,赵建波,等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报,2011,25(5):203 – 208.

Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint anylysis of farmland ecosystem in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(5):203 – 208. (in Chinese)

24 杨永辉,吴普特,武继承,等. 冬小麦光合特征及叶绿素含量对保水剂与 N 肥的响应[J]. 应用生态学报,2011,22(1):79 – 85.

Yang Yonghui, Wu Pute, Wu Jicheng, et al. Responses of winter wheat photosynthetic characteristics and chlorophyll content to water-retaining agent and N fertilizer[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 79 – 85. (in Chinese)

25 杨永辉,吴普特,武继承,等. 保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(12):19 – 26.

Yang Yonghui, Wu Pute, Wu Jicheng, et al. Impacts of water-retaining agent on soil moisture and water use in different growth stages of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 19 – 26. (in Chinese)