

Spatial and Temporal Characteristics of Soil Salinity in Ögan-Kuqa Oasis

Tursun·Hasan^{1,2}, Yusup·Mamat^{3*}, Mahpiret·Ulam³, Mamat·Sawut^{4,5}

¹Xinjiang Agricultural Resources and Regional Planning Office, Urumqi Xinjiang

²Urumqi Branch Remote Sensing Application Center Ministry of Agriculture, Urumqi Xinjiang

³College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi Xinjiang

⁴College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

⁵Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi Xinjiang

Email: tursun323@163.com, *yusup@xjnu.edu.cn

Received: Mar. 25th, 2015; accepted: Apr. 10th, 2015; published: Apr. 17th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Spatial variation of soil properties is one of the important properties of oasis soils. Quantitative research on spatial variation of soils on different scales could help people learn the soil-plant relationships and the effects of soil moisture and nutrients on plant growth, and spatial patterns of plant community. In this paper, we used GIS technology combined with traditional statistics and geostatistics to analyze Spatial and temporal characteristics of soil salinity in Ögan-Kuqa Oasis. Results showed that, the theoretical model of the surface soil salt fitting the spherical model; soil salinization in the study area is mainly concentrated in the east and southeast of this area with quite high salinity, formed a regional center of salt deposition; in western and northwestern area, low salt content were observed. The oasis climate is very suitable for cotton plantation, and thus this area is one of the main cotton production bases of Xinjiang. Results from this research should provide a scientific basis for rational use of the soils, understanding the structure and function of soil, reasonable irrigation water resources utilization, soil salinity control, optimize the layout of cotton fields, and provide a scientific basis for the sustainable development of cotton industry, thus to protect the stability of oasis ecological environment.

Keywords

Ögan-Kuqa Oasis, Soil Salinity, Spatial Variation, Geostatistics

渭 - 库绿洲土壤盐分时空分异特征研究

吐尔逊·艾山^{1,2}, 玉苏甫·买买提^{3*}, 买合皮热提·吾拉木³, 买买提·沙吾提^{4,5}

*通讯作者。

¹新疆维吾尔自治区农业资源区划办公室, 新疆 乌鲁木齐

²农业部遥感应用中心乌鲁木齐分中心, 新疆 乌鲁木齐

³新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐

⁴新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐

⁵绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

Email: tursun323@163.com, yusup@xjnu.edu.cn

收稿日期: 2015年3月25日; 录用日期: 2015年4月10日; 发布日期: 2015年4月17日

摘要

绿洲土壤特性的空间变异性是土壤的重要属性之一。不同尺度上的土壤空间变异性的定量化研究可以使人们了解植物与土壤的关系, 养分和水分对植物的影响以及植物的空间格局等具有重要的参考价值。本文运用GIS技术, 采用传统统计学和地统计学相结合的方法, 分析渭-库绿洲土壤含盐量的时空变异情况, 及其揭示其绿洲土壤盐分的时空变异规律。结果表明, 各时期表层土壤盐分拟合的理论模型都符合球状模型; 研究区盐渍化土壤主要集中于研究区的东部和东南部, 该区域土壤含盐量相当高, 形成了区域积盐中心; 研究区西部和西北部含盐量较低; 土壤含盐量大体上有从研究区的西北、西边区域向研究区东南和东部区域的方向增加的趋势。渭-库绿洲气候与土壤条件非常适宜种植棉花, 是新疆的主要棉花生产区域之一。这对研究区土地的合理利用、了解土壤的结构和功能、合理的水资源灌溉利用、土壤盐碱化防治、棉田的优化布局和棉花产业的可持续发展提供科学依据, 从而对保护渭-库绿洲生态环境的稳定性做出贡献。

关键词

渭-库绿洲, 土壤盐分, 空间变异性, 地统计学

1. 引言

我国一直以小流域为单元治理水土流失、改善生态环境、发展经济作为一项基本战略。土壤作为以疏松状态存在于陆地表面并具有肥力的动态自然体, 是小流域综合治理中的一个不可忽视的研究内容。新疆是我国的重要棉花、粮食和优质瓜果生产基地。由于长期以来的水资源及土地资源的不合理开发利用等人为因素以及其它自然因素影响下, 在新疆出现了大面积盐渍化地。土壤盐渍化是影响区域生态环境稳定性以及制约农业生产发展的重要因素。渭-库绿洲的原生盐渍化情况比较普遍。另外, 最近随着该区域经济的快速发展以及人口的增长, 渭-库绿洲的水土资源矛盾日益突出, 加上不科学的灌溉等因素下, 在该区域出现了大面积的次性盐渍化。这引起了区域土壤特性的不断恶化, 使土壤空间变异特征脱离了自然状态下的平衡, 对绿洲生态系统和农业生产的稳定性构成了威胁。

从20世纪70年代开始, 国外许多学者进行了土壤特性空间变异性规律的研究, 将地统计学理论用于土壤科学[1]。1978年J.B.Campbell首先采用地统计学方法研究了两个土壤制图单元中沙粒含量和PH值的空间变异。Gerd Dercon, Jozef Deckers等(2003)对农田土壤特性变异情况进行了研究[2]。最近几年, 国外的研究已更多地转向土壤化学特性和生物特性上。Burgess与Webster等[3][4]进行了较为成功的探索, 以及推动了土壤特性空间变异性的研究。

20世纪80年代中期以来, 我国一些学者针对土壤的某些特性, 采用半方差图和克里格插值法进行研究。到20世纪90年代, 随着发达国家精细农业的开展, 土壤特性及作物产量的空间变异性的研究方

法和手段得到了进一步的发展,主要表现为地统计学和地理信系统的有效结合[5]-[7]。1985年雷志栋,杨诗秀等人土壤特性空间变异性进行了初步的研究[8]。周慧珍(1996)、李毅(2000)、姚荣江(2006)等人前后,对土壤特性空间变异性进行了研究[9][10]-[12]。2000年杨玉玲,文启凯,田长彦[13]等人在“中国土壤学会土壤肥力与生态专业委员会学术研讨会”上系统地描述了对土壤空间变异性研究的现状及展望。韩茜(2008)对新疆奇台县绿洲土壤特性空间变异进行了研究,并完成了博士论文[14]。陈彦,吕新,利用地统计学,以地理信息系统软件 ArcGIS 为平台,采用 Geostatistical Analyst 地统计分析模块中的 Kriging 插值方法研究了新疆农七师 125 团土壤养分的空间变异性[15]。

土壤特性的空间变异性研究,对研究区的土地配置、合理利用、了解土壤结构和功能、合理的水资源灌溉利用、土壤盐碱化防治、改良和有效利用提供科学依据。因此,很有必要在时间和空间序列上对土壤特性的时空变异性进行研究,以便更准确地了解土壤特性时空变异和区域农业、生态环境之间的关系。本文运用 GIS 技术,采用传统统计学和地统计学相结合的方法,试图通过土壤这个切入点,准确的分析渭-库绿洲的土壤特性的空间变异性。

2. 研究区概况

渭-库绿洲地处天山南麓、塔里木盆地北缘的渭干河-库车河冲洪积平原,东径 $82^{\circ}15' \sim 83^{\circ}15'$,北纬 $41^{\circ}05' \sim 41^{\circ}40'$ 之间,是一个典型冲洪积扇平原[16][17]。土地利用类型主要包括农田、林地、荒地、草滩、盐碱地等,地形由北向南倾斜,地形坡降 $1\% \sim 4\%$ [18]。行政范围包括阿克苏地区沙雅县、新和县及库车县,共有 51.5 万人口。渭-库绿洲平均海拔 920~1100 m。三县现有引水干渠 795 km,支、斗渠 6726 km,渭干河的年径流量多年平均 $2.21 \times 10^9 \text{ m}^3$,变差系数 0.119,灌溉总面积为 1800 Km^2 左右[17]。渭-库绿洲平原区年均温度 11.4°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温 4515.6°C ,气温年较差 34.4°C ,日照 2888.7 h,全年无霜期 209 d,灌区属大陆性暖温带极端干旱气候,气候的最大特征是干旱少雨,光热资源充裕,多年年均降水量为 51.6 mm,水面蒸发量为 1750~1960 mm [18],干旱的气候环境致使灌区潜水蒸发浓缩作用强烈。

3. 数据来源与分析方法

3.1. 野外土壤样本的采集

对区域土壤质量研究就必须进行土壤质量现状调查。本研究主要通过多次野外采样(2006年7月、2007年7月、2008年4月、2008年9月、2010年4月、2010年10月和2011年4月)和室内实验分析获取了地物实地景观信息及土壤调查数据。为保证样品代表性,我们分别以2001年 ETM+和2007年 ALOS 影像为工作底图,结合土壤图、地形图和土地利用图等资料,确定研究区有代表性的盐碱土壤小区,制成野外采样路线图,使采样点尽可能遍及渭-库绿洲范围内主要的土地利用类型,而且尽可能使样点分布规则。在野外采样时,每个样点用 GPS 精确定位,获取点位经纬度,并实地记录样点土壤表面状况、植被、地貌类型等景观描述。考察中,考虑到采样点周围土壤性质相对成因一致,环境因子类似,异质性较小,每一采样点周围辐射约 10 m 选取 3 个点,分三层取样(0~10 cm, 10~30 cm, 30~50 cm),每个样层取 500 g。同时,用铝盒取土样 30~50 克左右,并现场称重。

3.2. 土壤样本指标的实验室测定

采集的土样在实验室自然风干后,进行磨细以及过 1 mm 孔径筛,之后装入容器。指标的测定参考“土壤农业化学常规分析方法(中国土壤学会,1983)”进行。主要测定含盐量、电导率、TDS。这些为土壤盐分特性的研究提供了可靠的数据支持。

3.3. 地统计方法

研究土壤特性空间变异规律的方法很多,有传统的统计方法,谱函数、人工神经网络模型、地统计学、分形理论和随机过程建模描述相应的成分等。其中,地统计学一经引入土壤特性的空间变异研究,便显示了强大功能,推动着土壤特性空间变异理论和实践指导作用不断向前发展,成为这一领域最重要的研究方法。由于土壤特性是一种区域化变量,同时具有地质结构的特性和统计学的随机特性,基于区变量理论的地统计学理论已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一[19]-[21]。

地统计是以区域化变量为基础,以变异函数为主要工具,研究既具有随机性又具有结构性,或空间相关性和依赖性的自然现象的一门科学。其经典理论包括半方差函数及其模型和克里格插值方法[22]。凡是与空间数据的结构性和随机性,或空间相关性和依赖性,或空间格局与变异有关的研究,并对这些数据进行最优无偏内插估计,或模拟这些数据的离散性、波动性时,皆可应用地统计学的理论与方法。因此,本文利用地统计学方法对研究区土壤特性进行了分析。

1) 半方差函数

本文首先通过半方差函数分析法对研究区盐渍化土壤特征进行了分析。半方差函数是用来描述区域化变量结构性和随机性并存这一空间特征而提出的。半方差函数公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (1)$$

式中: $\gamma(h)$ 是间距为 h 的半方差函数,该值随 h 的增加而增加; h 为两样本点空间分隔距离或步长; $N(h)$ 为相距为 h 的样点对数目,通过对样本变异函数的拟合,得到描述随机变量的理论变异函数 $\gamma(h)$ 。

2) Kriging 插值法

地统计分析的核心就是通过对采样数据的分析、对采样区地理特征的认识选择合适的空间内插方法创建表面。插值方法按其实现的数学原理可以分为两类:一是确定性插值方法,另一类是地统计插值,也就是克里格插值。土壤盐分、地下水埋深及矿化度在区域内的分布呈现随距离的规律性变化,在此基础上又受随机性因素的影响,是典型的区域化变量,满足协方差函数和变异函数[23]-[25]。因此,本研究利用 Excel、SPSS 处理后的土壤数据,在 Arcgis 10.0 软件的地统计学模块(Geo-statistic Analyst)下,采用指示克里格插值法(Ordinary kriging)进行空间插值。Kriging 插值模型检验特异值的存在将严重影响 Kriging 插值结果,使插值结果偏离实际值,因而在插值前要将特异值剔除。该部分工作利用地理信息系统软件 ArcGIS 地统计分析模块中的数据检查工(ESDA)来完成。

限于篇幅,本文仅对研究区 2008 年 4 月、2010 年 10 月和 2011 年 4 月表层土壤含盐量的空间变异性进行分析,目的在于进一步说明研究区表层土壤盐分含量的时空分布规律。本研究借助于 ArcGIS10.0 中的地统计分析模块分析半方差模型、并采用指示克里格插值法进行空间插值。

4. 结果分析

4.1. 正态性检验

指示克里格法要求数据服从正态分布,如果数据不服从正态分布,需要进行一定的数据转换,从而使其服从正态分布。同时,变异函数的计算一般也要求数据符合正态分布,否则可能存在比例效应[22]。在地统计分析中 Kriging 插值结果受样本中特异值的影响,这引起插值结果偏离实际值。因此在 Kriging 插值模型插值前必须要通过检验将特异值剔除。本文通过正态 QQplot 图来对模型数据的正态性进行了分析。土壤含盐量正态性分布检验结果表明,3 次采样时期的表层土壤含盐量数据均经过幂转换以后,在

QQPlot 图中数据的分布则近似呈一条直线。由此可知, 研究区表层土壤含盐量数据经过幂转换以后服从正态分布, 下一步可以对其进行半方差函数分析。

4.2. 不同采样时期表层土壤含盐量的半方差分析

对数据进行相应的转换后, 在 ArcGIS 的地统计分析模块下, 分别用不同类型的模型进行拟和, 并按照选取最优模型的标准(标准平均值最接近于 0, 均方根预测误差最小, 平均标准误差最接近于均方根预测误差, 标准均方根预测误差最接近于 1 [26]), 选取了最优的插值模型, 结果见表 1。

在半方差函数理论模型中, 块金值(Nugget)通常表示由实验误差和小于取样尺度上施肥、作物、管理水平等随机因素共同引起的变异, 块金值反映土壤含盐量的测量过程中出现的误差以及在最小间距内的土壤含盐量变异性, 基台值 Sill ($C_0 + C$)表示系统内总的变异, 它是半方差函数随间距递增到一定程度后出现的平稳值。空间相关性是 Nugget 与 Sill 的比值, 它们的比值 $<25\%$, 说明变量具有较大的空间相关性, 比值在 $25\% \sim 75\%$ 之间, 说明变量具有中等的空间相关性, 大于 75% , 变量空间相关性很弱[27] [28]。偏基台值, 亦为结构方差, 是基台值与块金系数的差值, 由土壤母质、地形、气候等非人为的结构性因素引起的变异。变程(range) a 是使半方差达到基台值时的样本间距, 即, 最大相关距离。某土壤养分观测值之间的距离大于该值时, 说明它们之间是相互独立的; 若小于该值时, 则说明它们之间存在一定的空间相关性。变程的变化也反映出引起土壤含盐量变异主要过程的变化。

通过对表层土壤含盐量进行半方差函数分析(见表 1), 结果如下:

1) 各时期表层土壤含盐量的块金值 C_0 均为正值, 说明存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异所引起的各种正基底效应。而各时期含盐量块金值和基台值都比较小, 这说明在最小间距内的变异分析过程中引起的误差较小。

2) 从不同采样时期土壤含盐量的变程来看, 2008 年 4 月土壤含盐量的变程为 1.506 Km, 说明在这个范围内, 表层土壤含盐量观测值之间存在着一定的相关关系, 如大于该值时, 则说明它们之间是相互独立的。2010 年 10 月和 2011 年 4 月土壤含盐量的变程均为 0.311 Km。

3) 不同采样时间(表 1)土壤含盐量的块金值和基台值之比均在 $25\% \sim 75\%$, 说明研究区表层土壤盐分具有中等的空间相关性, 盐分的空间变异是由结构性因素与随机性因子共同作用引起的[29]。各时期表层土壤盐分拟合的理论模型都符合球状模型。

4.3. Kriging 插值分析

本研究利用 ArcGIS10.0 的地统计分析模块, 根据所得到的半方差函数模型, 采用指示克里格法, 对研究区 3 次采样时期的表层土壤含盐量数据进行了空间插值并制图(图 1~图 3)。通过分析空间布局插值图, 可反映插值变量含量的分布状况。

图 1 是整个渭-库绿洲表层土壤含盐量的空间插值分布图。由图 1 可见:

1) 研究区盐渍化土壤主要集中于研究区的东部和东南部。从地域分布来说主要是库车县的东部, 即牙哈镇的东南、东部区域, 东河塘镇和汗合塔木镇的周边区域; 沙雅县的南部, 即托依堡乡周边区域。

Table 1. The spatial variation parameters of soil salinity in study area

表 1. 土壤盐分的空间变异参数

年份	分布类型	理论模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	块金值/基台值[$C_0/(C_0 + C)$](%)	变程(Km)
2008-04	幂变换(Cox-Box)	球状模型	0.169	0.337	50.15	1.506
2010-10	幂变换(Cox-Box)	球状模型	0.171	0.311	54.98	0.311
2011-04	幂变换(Cox-Box)	球状模型	0.183	0.298	61.41	0.311

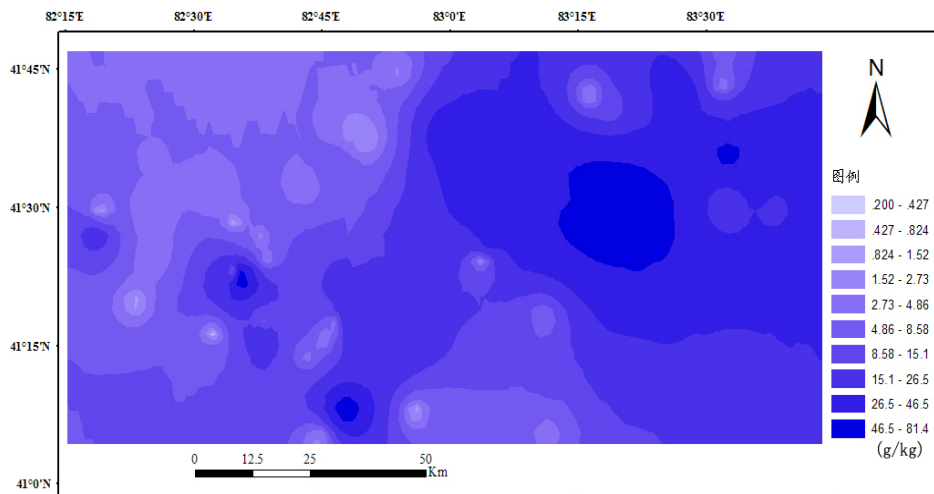


Figure 1. The spatio-temporal fractional map for soil salinity in study area (Apr. 2008)
 图 1. 研究区土壤盐分时空分级图(2008 年 4 月)

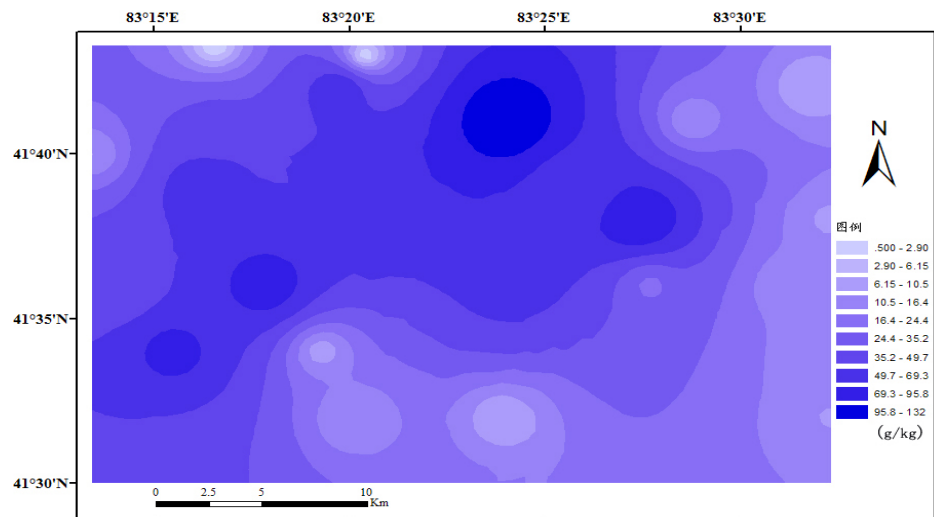


Figure 2. The spatio-temporal fractional map for soil salinity in east region of study area (Oct. 2010)
 图 2. 研究区东边区域土壤盐分时空分级图(2010 年 10 月)

该区域土壤含盐量相当高，形成了区域积盐中心。这主要与灌区微地形起伏，并在农业生产过程中引水及灌溉提高地下水位，因而深层土壤盐类积聚于表层有关。研究区西部和西北部含盐量较低。

2) 在空间尺度上，研究区表层土壤含盐量，经度 83°0'~83°40'，纬度 41°20'~41°40'范围的大于经度 82°15'~83°0'，纬度 41°5'~41°45'范围的，既，土壤含盐量大体上有从研究区的西北、西边区域向研究区东南和东部区域的方向增加的趋势。

图 2 和图 3 是研究区典型区域(东边区域)表层土壤含盐量的空间插值分布图。由图 2, 图 3 可见: 2010 年 10 月研究区东边区域盐渍化土壤分布情况具有从东北向西南方向的中断区域的土壤含盐量大于西北、东、东南及南部区域的含盐量特征。2011 年 4 月研究区东边区域盐渍化土壤分布情况具有中部上端区域的含盐量相对 2010 年 10 月含盐量有变小趋势，即，2010 年 10 月，经度 83°22'~83°27'，纬度 41°37'~41°48'范围的土壤含盐量明显大于 2011 年 4 月土壤含盐量，其它区域的变化不明显。研究区春灌是引起这种变化的主要原因。

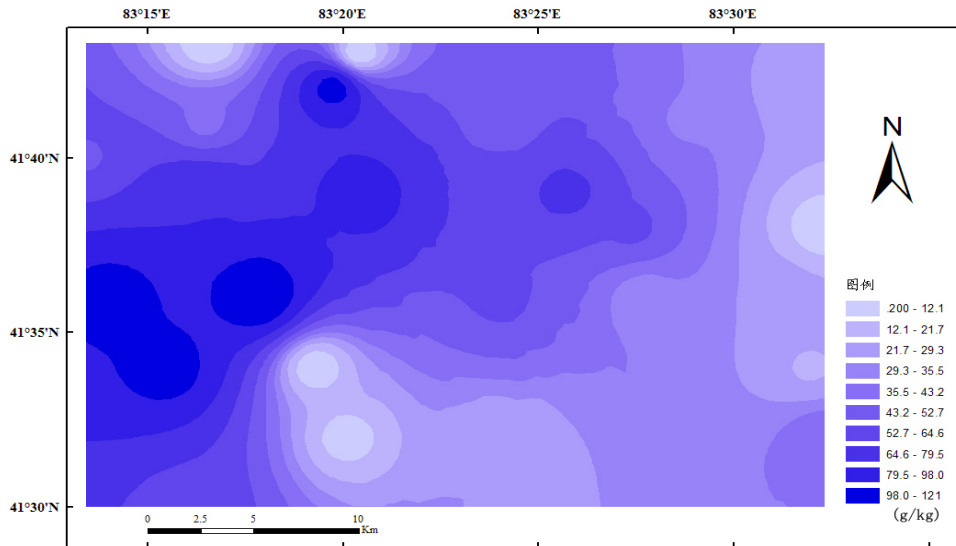


Figure 3. The spatio-temporal fractional map for soil salinity in east region of study area (Apr. 2011)
图 3. 研究区东边区域土壤盐分时空分级图(2011 年 4 月)

5. 小结

研究区 2008 年 4 月、2010 年 10 月和 2011 年 4 月表层土壤含盐量数据的空间变异性分析结果得出以下结论:

1) 3 次采样时期表层土壤含盐量数据的正态性分布检验结果表明, 研究区表层土壤含盐量数据经过幂转换以后服从正态分布; 表层土壤含盐量在一定的范围内观测值之间存在着空间相关性, 各时期土壤含盐量空间相关性均在 25%~75%之间, 具有中等的空间相关性; 各时期表层土壤盐分拟合的理论模型都符合球状模型。

2) 研究区盐渍化土壤主要集中于研究区的东部和东南部, 研究区西部和西北部含盐量较低。土壤含盐量大体上有从研究区的西北、西边区域向东南和东部区域的方向增加的趋势。

这一研究结果, 对研究区土地的合理利用、了解土壤的结构和功能、合理的水资源灌溉利用、土壤盐碱化防治、棉田的优化布局和棉花产业的可持续发展提供一定的科学依据, 对保护渭-库绿洲生态环境的稳定性做出贡献。

基金项目

国家自然科学基金项目(编号: 41261056, 31260048, 41461023); 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室开放课题(编号: XJDX0201-2013-03)经费资助。。

参考文献 (References)

- [1] Burgess, T.M. and Webster, R. (1980) Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: 1. The semi-variogram and punctual Kriging. *Journal of Soil Science*, **31**, 315-341.
- [2] Dercon, G., Deckers, J., Govers, G., et al. (2003) Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador. *Soil and Tillage Research*, **72**, 31-41.
- [3] White, J.G., Welch, R.M. and Norvell, W.A. (1997) Soil zinc map of the USA using geo-statistics and geographic information systems. *Soil Science Society of America Journal*, **61**, 185-194.
- [4] Webster, R. (1983) Spatial variation in soil and the role of Kriging. *Agricultural Water Management*, **6**, 111-121.
- [5] 胡克林, 李保国, 林启美等 (1999) 农田土壤养分的空间变异性特征. *农业工程学报*, **9**, 33-38.

- [6] 李菊梅, 李生秀 (1998) 几种营养元素在土壤中的空间变异. *干旱地区农业研究*, **16**, 58-64.
- [7] 孙波, 赵其国, 闫国年 (2002) 低丘红壤肥力的时空变异. *土壤学报*, **3**, 190-198.
- [8] 雷志栋, 杨诗秀 (1985) 土壤特性空间变异性初步研究. *水利学报*, **9**, 10-20.
- [9] 李毅, 刘建军 (2000) 土壤空间变异性研究方法. *石河子大学学报(自然科学版)*, **4**, 331-338.
- [10] 周慧珍, 龚子同 (1996) 土壤空间变异性研究. *土壤学报*, **33**, 232-240.
- [11] 李晓燕, 张树文, 王宗明, 张惠琳 (2004) 吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局. *地理学报*, **6**, 989-997.
- [12] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明 (2006) 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特性研究. *农业工程学报*, **6**, 61-66.
- [13] 杨玉玲, 文启凯, 田长彦, 等 (2000) 土壤空间变异性现状及展望. *中国土壤学会土壤肥力与生态专业委员会学术研讨会论文*, **2**, 51-55.
- [14] 韩茜, 熊黑钢 (2008) 新疆奇台县绿洲土壤特性空间变异及盐渍化逆向演替研究. 博士论文, 新疆大学, 乌鲁木齐, 6-17.
- [15] 陈彦, 吕新 (2005) 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以新疆农七师125团为例. *中国农学通报*, **7**, 389-405.
- [16] 江红南, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 徐佑成 (2008) 新疆渭干河灌区土地盐渍化时空变化影响因子分析. *干旱区地理*, **6**, 885-891.
- [17] 王春得, 赵忠贤 (2006) 新疆渭干河灌区水文地质条件变化及排水措施探讨. *地下水*, **6**, 87-89.
- [18] 陈小兵, 杨劲松, 杨朝晖, 胡顺军, 刘广明 (2008) 渭干河灌区灌排管理与水盐平衡研究. *农业工程学报*, **4**, 59-65.
- [19] Jin, J.Y. and Jiang, C. (2002) Spatial variability of soil nutrients and site-specific nutrient management in the P.R. China. *Computers and Electronics in Agriculture*, **36**, 165-172.
- [20] Qiu, Y., Fu, B.J., Wang, J. and Chen, L.D. (2001) Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, **49**, 723-750.
- [21] Qiu, Y., Fu, B.J. and Wang, J. (2001) Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, **24**, 243-263.
- [22] 徐建华 (2002) 现代地理学中的数学方法. 高等教育出版社, 北京.
- [23] Pucci, A.A. and Murashige, J.A.E. (1987) Application of universal Kriging to an aquifer study in New Jersey. *Ground Water*, **25**, 672-678.
- [24] Theodossiou, N. and Latinopoulos, P. (2006) Evaluation and optimization of groundwater observation networks using the Kriging methodology. *Environmental Modelling and Software*, **21**, 991-1000.
- [25] Triantafilis, J., Odeh, I.O.A., Warr, B. and Ahmed, M.F. (2004) Mapping of salinity risk in the lower Namoi valley using non-linear Kriging methods. *Agricultural Water Management*, **69**, 203-231.
- [26] 汤国安, 杨西 (2006) ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 科学出版社, 北京, 363-422.
- [27] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 倪福全, 张杰 (2009) 四川盆地西缘浅层地下水铁、锰含量的空间变异特征. *生态学报*, **2**, 797-803.
- [28] Zhang, S.R., Sun, B., Zhao, Q.G., Xiao, P.F. and Shu, J.Y. (2004) Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in rehabilitating ecosystem. *Pedosphere*, **14**, 501-508.
- [29] 王雪梅 (2010) 干旱区典型绿洲土壤盐渍化及其生态效应研究. 博士论文, 新疆大学, 乌鲁木齐.