

流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性

王玉刚^{1,3,*}, 肖笃宁^{1,2}, 李彦¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:针对目前绿洲内部土壤盐渍化问题,以三工河流域绿洲为研究区,运用遥感、GIS 和地统计学相结合的方法研究了 0 ~ 20cm 土层盐分含量的空间异质特征,结果表明:流域尺度上土壤含盐量的理论变异函数拟合符合指数模型, F 检验达到极显著水平,在 1.5 ~ 15km 的中尺度上具有强的空间变异性性和自相关性, Kriging 插值及其与同期的景观类型图叠加运算表明,整个绿洲区南部老绿洲土壤盐化面积及作用小于北部新绿洲,耕地景观类型的盐化作用及其面积强于其他景观类型,新绿洲盐化面积高于老绿洲,新绿洲耕地中有 38.81% 土地面积受盐害作用,而老绿洲仅为 8.54%。

关键词:地统计学;空间异质性;GIS;绿洲

文章编号:1000-0933(2007)12-5262-09 中图分类号:S151.1; S156.4 文献标识码:A

Spatial heterogeneity of soil salinity in oasis at catchment scale

WANG Yu-Gang^{1,3,*}, XIAO Du-Ning^{1,2}, LI Yan¹

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5262 ~ 5270.

Abstract: Aiming at the problem of soil salinization existed inside oasis, a case study was carried out on the oasis at the Sangong River catchment. Spatial variability of soil salinity in the topsoil (0 — 20cm) and its relationship with landscape structure were studied with the combination of methods in geo-statistics, GIS and RS. The result revealed that: on catchment scale, the spatial variation in soil salinity was best fitted by exponential model, with F -test showed high level of confidence. At the spatial case of 1.5 — 15km, variation in soil salinity showed strong spatial correlation and self-correlation. Mapping of soil salinity by Kriging and comparing it with landscape maps showed that area of soil salinization in old oasis is smaller than that in new oasis, and degree of soil salinization in old oasis is also lower than that in new one. Among all landscapes, cropland was mostly affected by salinity, with 38.8% of the cropland in new oasis moderately affected by soil salinity, and 8.54% in old oasis.

Key Words: geo-statistics; spatial variability; GIS; oasis; soil salinity

基金项目:中国科学院西部之光项目; 亚洲太平洋区环境创新战略项目(APEIS)环境综合监测子课题

收稿日期:2006-10-20; **修订日期:**2007-01-19

作者简介:王玉刚(1976 ~),男,新疆石河子人,博士生,主要从事绿洲景观生态学和人文水资源研究. E-mail: xj_wyg@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xj_wyg@163.com

Foundation item: The project was financially supported by the "Western Light" project of CAS; Integrated Environmental Monitoring Subproject, the Asia-Pacific Environmental Strategy Project

Received date:2006-10-20; **Accepted date:**2007-01-19

Biography: WANG Yu-Gang, Ph. D. candidate, mainly engaged in oasis landscape ecology and water resources. E-mail: xj_wyg@163.com

地统计方法是在传统统计学基础上发展起来的空間分析方法,自地统计学建立以来,在地质学、水文学和生态学等学科领域^[1~4]方面得到了较为广泛的运用,此方法不仅能够有效揭示属性变量在空間上的分布变异特征,而且能够有效解释空間格局对生态过程与功能的影响。自 20 世纪 70 年代,该方法被引入土壤科学,土壤要素的空間变异定量化研究一直是一个热点问题^[5~7]。土壤要素的异质性研究,多数研究者是立足于土壤水分、土壤结构等物理机制方面,而对土壤化学特征的空間异质性研究较少^[8,9],尤其在流域尺度上土壤含盐量的空間异质性研究相对较少,大多数的研究立足于田间中小尺度上。土壤盐渍化是西北内陆平原区主要生态环境问题之一,其发展已成为威胁绿洲稳定与安全的重要因素^[10,11]。研究土壤盐分的空間异质性是了解和防止土壤盐渍化发生发展的前提,是盐渍土资源利用的基础。土壤空間异质性是土壤重要属性之一,引发土壤异质性主要有两个方面原因,一方面由土壤的属性差异引起的异质性,另一方面由于人为等外界要素引起的异质性。在不同尺度上研究土壤特性的空間异质性,不仅有利于了解土壤的演化过程,而且对于了解各种生态过程对土壤的影响具有重要的意义^[12,13]。

本研究以地统计学原理为基础,定量研究流域尺度绿洲表层 0~20cm 土壤含盐量的空間异质性特征,目的在于理解大尺度下土壤盐分空間分异特征,以期更好的了解绿洲生态安全状态,为流域绿洲生态安全的管理提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

三工河流域位于天山北麓中段东部,准噶尔盆地南缘。地处东经 87°47'~88°17',北纬 43°09'~45°29',行政上属新疆昌吉州阜康市。流域南部为天山—阴山巨型纬向构造带,北部为准葛尔盆地,著名的古尔班通古特沙漠位于盆地中央。该区新构造运动十分强烈,以山前大断裂为界,南部山区剧烈上升,北部平原盆地相对沉降。北部山前倾斜平原沉降区自第四纪以来沉降幅度进一步加大,沉积了 400m 以上的松散沉积物,因而可将流域划分为南部山区、中部绿洲区及北部沙漠区三大地貌单元,其中,中部绿洲区为本文的研究区。研究区总面积 969.11km²,主要由山前倾斜平原和地下水溢出带以及细土平原区组成,其中山前倾斜平原区和地下水溢出带是以阜康市为主的洪积扇与扇缘老绿洲,该区域农业耕作历史悠久,土地利用有百年的历史,而细土平原区主要是以冲洪积平原六运湖农场和阜北农场为主的新绿洲,土地开发时间较短,行政建制始于 1960 年。气候上属于内陆干旱区,多年平均降雨量 220mm,多年平均气温 6.9℃,多年平均蒸发潜力 1817mm。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源及其处理

土壤含盐量数据

在研究区内布设采样点,采样点的位置、数量根据当地土质、土地利用类型、植被类型等因素确定,共采集土壤样点 308 个,土壤层主要为 0~20cm 土层,各采样点的坐标采用 GPS 现场定位确定,采样时间为 2005 年 10 月中旬,处于秋收季节,多数耕地处于非冬灌期,土壤相对比较稳定。采集的样品带回实验室内,自然风干,磨碎、过 2mm 筛后备用。所有的土样均制备 1:5 土水浸提液,并测定其电导率 EC₁₅,测定方法参考《土壤农业化学分析方法》一书,采用常规分析法(土水比 1:5)确定土壤各离子组成,计算出相应的土壤盐含量。

土地利用类型数据

2005 年景观类型数据来影像数据(2004 年 6 月 12 日,分辨率 10m 的 spot 影像),在 ERDAS IMAGINE8.6 支持下进行几何纠正和多波段融合,结合区域 2005 年 1:50000 规划图以及条田档案资料,并经现场 GPS 定位调查,目视解译遥感影像,网格分辨率为 15m×15m,由此获取当前景观类型数据。景观分类系统在参考全国土地利用现状调查技术规程中具有明确的地类定义,根据区域特有的自然、社会经济特点确定区域景观类型,主要景观类型为耕地、人工林地、灌木林地、草地、建设用地、盐碱地、裸地、坑塘河滩景观类型。应用 ArcView GIS3.2 进行数据处理的统计,并在其 Spatial Analysis 模块支持下进行相关的空間分析和统计。

1.2.2 地统计学方法

区域土壤含盐量空间分析采用了地统计学方法^[14],地统计方法是在传统统计学基础上发展起来的空间分析方法,此方法不仅能够有效揭示属性变量在空间上的分布变异特征,而且能够有效解释空间格局对生态过程与功能的影响。

对于空间格局的分析,在地统计学中,变异函数是基本的方法,为区域变量 $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 增量平方的数学期望,即区域化变量的方差。其通式为^[14]:

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

式中, $\gamma(h)$ 为变异函数; h 为步长,即为减少各样点组合对的空间距离个数而对其进行分类的样点空间间隔距离; $N(h)$ 为间隔距离为 h 时的样点对数; $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别是变量 Z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的取值。当定量描述研究区的变异特征时,需要通过模型的最优拟合,来建立变异函数的理论模型。在本研究中,步长的划分以 1.5km 为间距,即 1.5, 3, 4.5, 6, ..., 15km, 共 10 组距, 15km 小于样点最大距离的 (40.89km) 的一半,并且样本间距在变异函数的变程 (2.49km) 之内,符合地统计分析要求。通过模型的比较说明,三工河流域绿洲土壤含盐量的实际变异函数值与指数模型 (Exponential model, 公式 2) 的拟合效果最好。指数模型的变程等于相关距离 $3a$, 模型的一般公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-h/a}) & h < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_0 为块金值 (nugget), C 为拱高。

通过决定系数和残差平方和的比较来选择最优理论模型。决定系数 R^2 , 即回归平方和占总平方和的百分比, R^2 越大, 该回归模型配合的理论曲线精度越高。其计算公式为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [\hat{r}(h_i) - \overline{r(h)}]^2}{\sum_{i=1}^n [r(h_i) - \overline{r(h)}]^2} \quad (3)$$

式中, $\overline{r(h)}$ 为实际变异函数平均值。

而对于决定系数 R^2 多大, 回归模型才有价值, 则需要进行 R^2 的 F 检验。 F 检验决定系数的统计量为:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \times \frac{N - k}{k - 1} \quad (4)$$

式中, k 为回归模型中自变量的个数, R^2 为决定系数。

实际变异函数值 $r(h_i)$ 和理论模型计算出的变异函数值 $\hat{r}(h_i)$ 之差称为残差, 残差平方和 (Residual Sums of Squares, RSS), 即

$$RSS = \sum_{i=1}^n [\gamma(h_i) - \hat{\gamma}(h_i)]^2 \quad (5)$$

RSS 是对回归模型进行显著性检验的重要参数, 其取值愈小, 说明实际观测值与回归线靠近, 拟合曲线与实际配合愈好。

在 ArcGIS 的 Geostatistical Analyst 地统计模块支持下, 采用普通 Kriging 插值法 (Ordinary Kriging) 进行土壤含盐量的空间插值。Kriging 法被认为是空间预测的最优方法之一, 它的本质是对未抽样点进行线形无偏最优估计, 其算法如下:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (6)$$

式中, $z(x_0)$ 是 x_0 点的估计值, $z(x_i)$ 是实测点 x_i 的已知值, n 是估值搜索半径内的样点数量。 n 值基于移动窗口大小, 由使用者来定义。 λ_i 是权重系数。判断 Kriging 内插所得预测结果的优劣程度或半变异函数是否合

理的主要诊断指标是:①均值误差(ME)接近0;②均方根误差(RSME)越小越好;③平均标准差(average standard error)接近均方根;④标准化均方根(standardized root-mean-square prediction error)接近1。插值图的精度使用交叉验证法进行检验,其中两个主要指标均值误差(ME)和均方根误差(RSME)算法如下:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_0)] \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_0)]^2} \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 土壤含盐量的描述性统计分析

对研究区308个样点0~20cm土壤层含盐量进行经典统计分析,统计特征值列于表1。由表1可以看出,研究区土壤含盐量的特征值表现出较大的差异性,从含盐量的变幅来看,最大值是最小值的624倍,变化的幅度为6.23g/100g,从含盐量的均值来看,研究区总体上属于重盐土类型(含盐量大于0.4g/100g),表明土壤高度盐渍化是制约绿洲农业生产的重要因素。变异系数反映的是样本的离散程度,为样本的标准差对平均数的百分数。若该比值<10%,说明具有弱的变异性;若该比值在10%~100%之间,则说明具有中等强度的空间变异性;若该比值>100%,则说明具有强的空间变异性^[15]。故研究区土壤含盐量具有强的空间变异性,造成土壤含盐量的空间变异较大的原因在于研究区不同的地质结构、地形、土地利用方式、灌溉管理制度以及灌溉方式等多因素。数据的正态分布检验是采用变异函数分析的前提条件,仅当数据符合正态分布时,该方法才有效,否则可能出现比例效应^[4,14]。本研究采用单样本的Kolmogorov-Smirnov检验,其结果表明样本符合正态分布。描述性统计与正态分布检验的结果,完全满足变异函数的要求,可直接用于变异函数分析。

表1 土壤含盐量的描述性统计及正态分布检验

Table 1 Results of soil salt content for descriptive statistics and K-S test

样本数 Sample	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	最小值 Minimum	最大值 Maximum	偏斜 Skewness	峭度 Kurtosis	K-S 值 K-S value
308	0.9344	1.23	1.53	0.01	6.24	1.84	3.37	4.228

2.2 土壤含盐量的描述性统计分析

变异函数理论模型的优化选择主要考虑决定系数(R^2)要大,残差(RSS)、变程(Range)和块金值(C_0)要小。理论模型的最优拟合检验是模型应用的基础,模型拟合的优劣在于决定系数 R^2 , R^2 越大,该回归模型配合的理论曲线的精度越高。 R^2 的大小直接决定理论曲线模型的实际意义,当理论模型的 F 检验的 F 值大于显著水平 α (0.05或0.01)与自由度的 f 的临界值时,理论模型才具有实际意义,反之该回归模型作为理论模型无实际意义^[14]。根据公式(1)计算出土壤含盐量的试验变异函数值,经理论模型的最优拟合,研究区土壤含

盐量的最佳拟合模型比较符合指数模型(图1),理论变异函数与试验变异函数拟合较好,由公式(3)和公式(5)计算出它的决定系数较大,为0.758,残差平方和较小,为0.0011, F 检验(由公式(4)计算获得)达到极显著水平(表2),说明理论模型能够很好的反映土壤含盐量的结构特征,并且具有实际的应用意义。

地统计学理论认为,描述景观空间异质性的变量 Z 可分解成两部分,即自相关部分(SH_A)和随机部分(SH_R), SH_A 和 SH_R 可通过变异函数分析而量化。由空间自相关部分引起的空间异质性 SH_A 属于由变异函数 $\gamma(h)$ 定义的空间相关变程 a 的范围之内,在尺度上对应于中尺度。由随机部分引起的空间异质性 SH_R 出

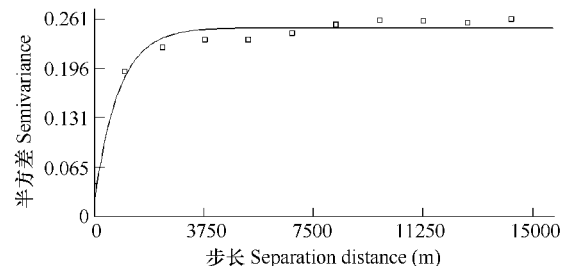


图1 研究区土壤含盐量的变异函数曲线图

Fig. 1 The semivariograms and its theory models of soil salt content in studied area

现在小尺度上,可以认为是小于分辨率尺度上的变异总和,它可由块金值(Nugget) C_0 表示。如块金值较大,则表明较小尺度上的某种生态过程是不容忽视的。结构系数 C 表示由结构性因素所引起的变异分量,基台值(Sill) $C_0 + C$ 表示系统内的总变异。块金值与基台值的比值($C_0 / C_0 + C$)可以表明空间相关程度,若该比值 $< 25\%$,说明具有强烈的空间相关性;若该比值在 $25\% \sim 75\%$ 之间,则说明具有中等强度的空间相关性;若该比值 $> 75\%$,则说明空间相关性较弱^[16]。在研究区域上,土壤含盐量在空间上的随机变异为 9.3% ,说明在 1.5km 以下的小尺度上的随机变异 SH_R 特别小,而在 $1.5 \sim 15\text{km}$ 的中尺度上,由空间自相关引起的结构性变异 SH_A 达 90.7% ,可以认为在整个尺度上土壤含盐量的空间变异性主要由中尺度上的自相关部分 SH_A 引起,并且在空间上具有强的空间相关性。这种现象与研究区的实际情况完全符合,土壤盐化主要由地形、土壤母质和人类对土地的利用程度所决定,随机性因素如灌溉、施肥、土地利用、种植结构调整等人为活动使得土壤含盐量的空间相关性增强。变程在研究尺度上相对较小,均包含在研究区范围(东西: 36.98km ,南北: 30.92km)之内,在研究尺度上具有有效性。

表 2 土壤含盐量变异函数理论模型参数和模型 F 检验

Table 2 Correlation parameters and F-test of theoretical variogram models of soil salt content

理论模型 Theoretical model	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	块金值/基台值 ($C_0 / C_0 + C$)	变程 Rang (km)	分维数 (D)	决定系数 (R^2)	残差平方和 RSS	F 检验 F-test
指数模型 Exponential	0.0233	0.27052	0.093	2.49	1.92	0.758	0.0011	103.71 * *

* * 表示 $\alpha = 0.01$ 水平 F 检验的显著水平,significance at $\alpha = 0.01$ (F-test)

2.3 Kriging 插值结果和精度交叉验证

地统计学可根据半方差分析所确定的理论模型和已有的观测数据,对未采样点进行空间插值,其结果平滑了采样点的数据,使得大值降低、小值增高,以图形的形式展示性状的空间异质性,并且能够有助于辨别空间分布格局^[17]。根据公式(6)对土壤含盐量进行 kriging 空间插值,由此得到土壤含盐量的区域分布状况图(图 2)。根据公式(7)和公式(8)计算了均值误差和均方根误差(表 3),均值误差较小,小于均值的 0.1% ,接近于 0,表明预测样点的精度高达 99% 以上,同时均方根误差与平均标准差接近,标准化的均方根达 0.95 。结果表明,本研究中插值图的交互验证参数均达到了插值图精度要求(表 3),因而认为插值取得了较好的精度。

表 3 插值精度交互验证参数

Table 3 Interpolation results of soil total salt was tested by cross-validation analysis

均值误差 ME	均方根误差 RMSE	平均标准差 ASE	标准化均方根 SRMSE
-0.0005	1.081	1.149	0.9468

2.4 区域土壤盐化与作物生长安全的关系

通过对 kriging 插值图进行重新等级划分,划分为 4 个等级:非盐化(< 0.2 ,作物生长安全);轻盐化($0.2 \sim 1.0$,作物生长较安全区);中盐化($1.0 \sim 2.0$,作物生长危害区);重盐化($2.0 <$ 作物生长重度盐害区)。然后将研究区景观类型图(图 3)与新分类的土壤含盐量区域分布图(图 4)进行空间叠加,由此获得土壤含盐量在区域景观中的分布状况(表 4)。由表 3 可以看出,整个流域绿洲上有 73.76% 的土地受到盐化作用,其中 4.02% 的土地受到重度盐化作用,而非盐化的土地面积仅为 26.23% 。同时可以看出,流域的南部老绿洲土壤盐化作用面积较少,非盐化土地主要集中分布在老绿洲,相对于南部老绿洲区,北部新绿洲区盐化面积较大,盐化作用较重。由于南部地区地下水水位处于下降趋势,年均地下水水位下降 0.44m ,而北部区域地下水位

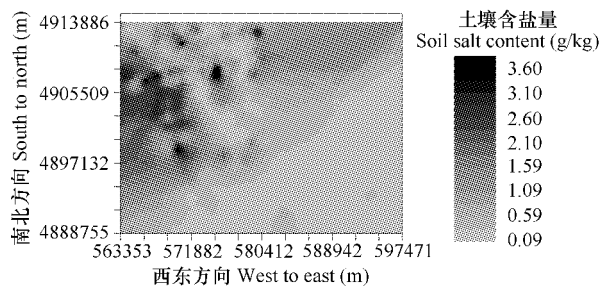


图 2 研究区土壤含盐量的空间分布图

Fig. 2 Predicted map of distribution of soil salt content in the studied area

处于上升趋势,年均地下水水位抬升 0.09m,并且老绿洲地下水水质好于新绿洲,老绿洲地下水矿化度年均升高 7.6mg/l,而新绿洲地下水矿化度年均升高 22.5mg/l。从新老绿洲单元看,老绿洲有 44.67%的土地面积未受到盐化作用,盐化的土地面积仅为 55.33%,并且其中有 39.21%的土地面积为轻盐化区域,而新绿洲区整个区域面积都受到盐化作用,其中中盐化和重盐化的土地面积为新绿洲总面积的 36.81%。从景观单元的盐化上看,耕地受到盐化的作用强于其他土地利用类型,整个流域绿洲上,耕地有 70.2%的土地受到盐化作用,并且新绿洲耕地的盐化作用强于老绿洲,新绿洲耕地中有 38.81%土地面积受到中度盐化以上的作用即作物生长受到盐害作用区,而老绿洲中仅有 8.54%的土地受到相同盐化作用。由于老绿洲耕地灌溉主要来自于地表水,年均地表水占耕地灌溉总用量的 82.19%,地下水的利用相对较少,仅为 17.81%,而新绿洲区耕地灌溉主要利用的是地下水,地下水用量占灌溉总量的 58.76%,由于耕地灌溉水资源利用的差异性,从而造成耕地土壤盐化作用的在流域空间上的不平衡性。

2.5 区域土壤盐分分布影响因素分析

为了了解区域土壤盐分分布的影响性因素,由于受研究区土壤盐分影响因素样本量的限制,根据所能收集到的流域相关数据样本,进行相关性分析。研究区现有 25 口地下水井的数据,主要包括 9 口地下水监测井和 16 口抽水井的同期分析数据,其中 4 口地下水监测井和 7 口抽水井分布在老绿洲区,其余的则分布在新绿洲区。初步选取土壤盐分进行地形、潜层地下水水位、潜层地下水矿化度、地下水总硬度、土壤有机质、潜层地下水 pH 值等 7 个因素进行相关性分析(Pearson 相关性检验),其结果如表 5 所示。由表 5 可以看出,区域土壤盐分分布与地形和土壤有机质之间具有极显著的负相关性($\alpha=0.01$),表明地形因素在区域土壤盐分的分布中起到重要作用,随着地形高程的降低,土壤有机质含量减少,土壤盐化作用加强。同时由表 5 可以看出,土壤盐分的空间分布与地下水水位之间具有一定的相关性,说明区域人为活动作用,影响地下水水位、水质的同时,也间接的影响到土壤盐分的空间分布。经相关性检验,土壤盐分与地下水矿化度负的相关性,并且与地下水总硬度呈现显著的负相关性($\alpha=0.05$),理论上土壤盐分与地下水矿化度和地下水总硬度应为正的相关性,由于流域尺度的绿洲存在着两个有显著差异的水文地质单元,即洪积扇与扇缘老绿洲,与冲洪积平原的新绿洲,二者存在着不同的地下水化学状况与运动规律,在人类活动影响下显现的地下水质变化与土壤盐分的相关性呈现出复杂的表现。由此表明,区域土壤盐分的空间变异性,主要是内部因素引起,外部因素在土壤盐分的空间分布上也起到一定的作用。

3 讨论与结论

地统计学是研究土壤空间变异的一个有效工具,通过利用半方差函数分析土壤属性变量的变化范围、特

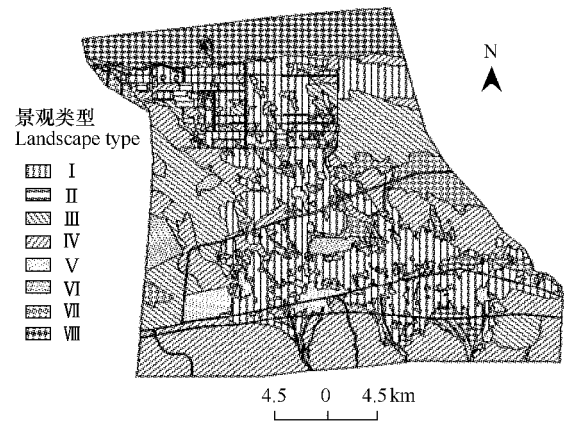


图 3 研究区绿洲景观分布图

Fig. 3 Distribution of landscape type in studied area

I 耕地 Cropland; II 人工林地 Artificial forest; III 灌木林地 Shrubbery land; IV 草地 Grassland; V 建设用地 Construction land; VI 坑塘、水库 Reservoir & Flood land; VII 盐碱地 Saline alkali land; VIII 裸地 Bald land

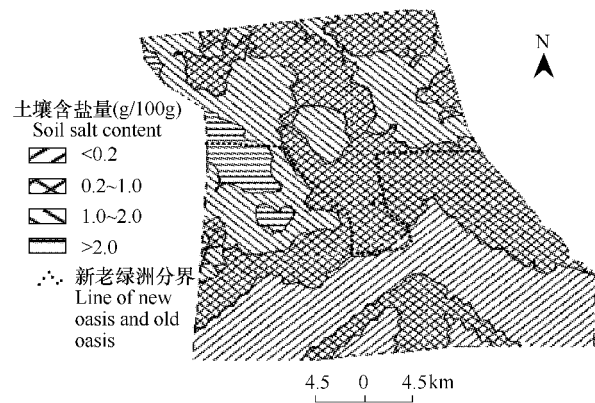


图 4 研究区土壤含盐量等级分布图

Fig. 4 Distribution of soil salt content in studied area

定的空间格局所对应的尺度和空间变异的特征,在半方差图拟合模型的基础上,采用 Kriging 空间内插,直观反映土壤属性的因子在空间上的分布特征。在此基础上,可以进一步分析空间格局与生态过程之间的关系^[18]。GIS 和地统计学的结合,在大尺度上能有效的解释土壤属性特征空间变异规律及其影响因子^[19]。三工河流域土壤表层 0~20cm 土壤盐分存在着明显的空间变异规律,经典统计分析和正态分布检验表明,流域尺度上土壤含盐量符合正态分布,土壤含盐量的最大值与最小值相差较大,变异系数在 1 以上,属于强变异强度,造成这种情况的原因在于流域范围内,局部地区不平,土壤的人为作用熟化程度不同,同时不同的灌溉管理方式等,这与流域自然状况是相符合的。

表 4 研究区不同土壤含盐量与绿洲景观类型中的关系(km²)

Table 4 The area of distribution of soil salt content at various levels landscape types in the studied area

景观类型 Landscape type	位置 Position	<0.2 非盐化 Non-salinization	0.2~1.0 轻盐化 Low salinization	1.0~2.0 中盐化 Moderate salinization	2.0 < 重盐化 Great salinization
耕地 Cropland	整个绿洲 Entire oasis	87.45	142.16	62.27	1.55
	老绿洲 Old oasis	87.45	63.8	12.76	1.37
	新绿洲 New oasis	0	78.36	49.51	0.18
人工林地 Artificial forest	整个绿洲 Entire oasis	0.46	2.6	11.9	0.04
	老绿洲 Old oasis	0.46	0	0	0
	新绿洲 New oasis	0	2.6	11.9	0.04
灌木林地 Shrubbery land	整个绿洲 Entire oasis	12.32	59.08	32.13	23.22
	老绿洲 Old oasis	12.32	16.63	23.51	20.71
	新绿洲 New oasis	0	42.45	8.62	2.51
草地 Grass land	整个绿洲 Entire oasis	102.88	128.6	42.06	11.78
	老绿洲 Old oasis	102.88	88.52	17.5	6.04
	新绿洲 New oasis	0	40.08	24.56	5.74
建设用地 Construction land	整个绿洲 Entire oasis	34.69	19.12	5.02	0.11
	老绿洲 Old oasis	34.69	7.4	1.14	0.07
	新绿洲 New oasis	0	11.72	3.88	0.04
坑塘、河滩 Reservoir/Flood land	整个绿洲 Entire oasis	5.18	12.89	5.81	2.24
	老绿洲 Old oasis	5.18	5.92	5.34	2.24
	新绿洲 New oasis	0	6.97	0.47	0
盐碱地 Saline alkali land	整个绿洲 Entire oasis	3.08	45.11	11.81	0
	老绿洲 Old oasis	3.08	39.56	1.02	0
	新绿洲 New oasis	0	5.55	10.79	0
裸地 Bald land	整个绿洲 Entire oasis	8.2	66.38	28.97	0
	老绿洲 Old oasis	8.2	1.36	0	0
	新绿洲 New oasis	0	65.02	28.97	0

表 5 研究区土壤盐分分布与相关因素相关关系

Table 5 Results of the Pearson-test for soil salt content between different factors

地形高程 Altitude of landform	潜层地下水位 Shallow groundwater table	潜层地下水矿化度 Shallow groundwater mineralization degree	潜层地下水总硬度 Hard water degree of shallow groundwater	地下水 pH 值 pH	土壤有机质 SOM
-0.804 **	-0.284	-0.097	-0.438 *	0.267	-0.649 **

* : $\alpha = 0.05$ 水平相关性显著 Correlation is significant at the 0.05 level; * * : $\alpha = 0.01$ 水平相关性极显著 Correlation is significant at the 0.01 level

空间结构性分析表明,土壤含盐量在研究变程内具有空间结构特征,均较好的符合指数模型,具有强的空间自相关性,说明土壤含盐量的空间变异在 1.5km 以下小尺度上的随机变异较小,而在 1.5 ~ 15km 的中尺度上由空间自相关引起的结构性变异高达 90.7%,可以认为在整个尺度上的空间变异主要由地形、土壤母质和人类对土地的利用程度所引起。

Kriging 插值图的交叉检验的结果表明,插值图具有较好插值精度,在空间上能够很好的反映研究尺度上土壤含盐量的空间状况。在研究区不同单元上,土壤含盐量的空间分布表现不同差异性,整个研究区土壤含盐量南部老绿洲区受盐化作用的面积及强度小于北部新绿洲,非盐化作用的区域主要分布在老绿洲区,并且新绿洲耕地景观的盐化作用高于老绿洲,同时,耕地景观类型的盐化作用要强于其他景观类型,盐化面积较大。

References:

- [1] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advance Soil Science*, 1985,3:1 — 70.
- [2] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, *et al.* Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, 1992,62(2):277 — 314.
- [3] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996,77:364 — 374.
- [4] Li H B, Wang Zh Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6):651 — 657.
- [5] Hillel D. Research in soil physics: a review. *Soil Science*, 1991,151: 30 — 34.
- [6] Jordán M M, Navarro-Pedreño J, García-Sánchez E, *et al.* Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions: geological and environmental implications. *Environmental Geology*, 2003, 45(4): 448 — 456
- [7] Wang Z Q, Wang Q C. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6):945 — 950
- [8] Ma F Y, Li X R, Zhang J G, *et al.* Spatial heterogeneity of soil physical properties in Shapoto artificial sand-fixing vegetation area. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(2): 207 — 215.
- [9] Yao R J, Yang J S, Liu G M, *et al.* Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22 (6):61 — 67.
- [10] Guo Z R, Liu H T. Secondary salinification of soil and dynamic control of groundwater in irrigation area of inland basin, northwestern China. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(1):45 — 48.
- [11] Liu H, Zhong H P, Gu Y. Water resources development and oasis evolution in inland river basin of arid zone of northwest china. *Advance in Water Science*, 2001, 9(3):378 — 384.
- [12] Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46: 103 — 133.
- [13] Garrigues S, Allard D, Baret F, Weiss M. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models. *Remote Sensing of Environment*, 2006,103: 81 — 96.
- [14] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Chinese Science Press, 1999.
- [15] Zhang S J, He Y, Fang H. Spatial Variability of soil properties in the field based on GPS and GIS. *Transactions of the CSAE*, 2003,19(2):39 — 45.
- [16] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, *et al.* Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Science*, 1997, 162:291 — 297.
- [17] Zhang C S, McGrath D. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods. *Geoderma*, 2004, 119: 261 — 275.

- [18] Bai Y F, Xu Z X, Li D X. On the small scale spatial heterogeneity of soil moisture, carbon and nitrogen in *stipa* communities of the inner Mongolia Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8):1215—1223.
- [19] Guo X D, Fu B J, Ma K M, *et al.* Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS- A case study in Zongha city of Hebai Province. *Journal of Applied Ecology*, 2000,11(4):557—563.

参考文献:

- [4] 李哈斌,王政权,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*,1998,9(6):651~657.
- [7] 王政权,王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. *生态学报*,2000,20(6):945~950
- [8] 马风云,李新荣,张景光,等. 沙坡头固沙植被若干土壤物理因子的空间异质性研究. *中国沙漠*,2005,25(2):207~215.
- [9] 姚荣江,杨劲松,刘广明,等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间异质特征研究. *农业工程学报*,2006,22(6):61~67
- [10] 郭占荣,刘花台. 西北内陆灌区土壤次生盐渍化与地下水动态调控. *农业环境保护*,2002. 21(1):45~48.
- [11] 刘恒,钟华平,顾颖. 西北干旱内陆河区水资源利用与绿洲演变规律研究. *水科学进展*,2001,12(3):378~384.
- [14] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用. 北京:科学出版社,1999.
- [15] 张淑娟,何勇,方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究. *农业工程学报*,2003,19(2):39~45.
- [18] 白永飞,许志信,李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. *生态学报*,2002,22(8):1215~1223.
- [19] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. *应用生态学报*,2000,11(4):557~563.