

伊犁河谷盐渍化区土壤盐分离子的空间变异特征

海米提·依米提¹, 米日姑·买买提^{1,2}, 古丽娜尔·托合提^{1,2}, 黄志方^{1,2}, 曹静静^{1,2}

(1. 教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 利用地统计学, 结合地理信息系统(GIS), 在面积约为 400 km² 的伊犁河谷典型研究区总共布设了土壤取样点 60 个, 测定土壤表层(0~20 cm)总盐分及其组成(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻)的空间变异性规律。结果表明: 总盐分, Ca²⁺, HCO₃⁻ 为正态分布, 其余盐分离子符合对数正态分布; 变异函数分析得出总盐分符合球状模型, Mg²⁺、K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、Ca²⁺ 符合高斯模型, 而 HCO₃⁻ 则是纯块金效应; 盐分离子的变程在 3.5~22.1 km 之间; 除了土壤总盐分(强烈自相关)其余盐分离子均表现为中等强度的空间自相关, 但程度有所差异。用 Kriging 插值法对未测点的盐分离子进行最优估计, 绘制含量分布图, 从而可以更直观地反映研究区土壤盐分离子的空间变异特征。

关键词: 盐渍化土壤; 盐分离子; 地统计学; 空间变异性

中图分类号: S153.6*1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0064-06

全世界约有 1/3 的盐渍化土壤, 严重制约着农业生产, 是影响生态环境的重要因素之一。我国约有 250 多万 hm² 的各种盐渍土壤, 而且还有逐年上升的趋势^[1]。盐渍化是干旱区土壤的一个普遍特征, 在新疆尤为严重, 土壤中化学物质的含量与空间分布是了解多孔介质中水盐运移规律并进而因地制宜提出盐渍土改良措施的关键。

地统计学已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其规律的有效方法之一。不少学者把它应用于土壤科学的研究领域^[2~8], 但是关于盐渍化土壤盐分离子的空间变异性研究却很少。盐渍土中含有大量的水溶性盐类, 不仅影响作物的生长, 而且同一浓度的不同盐分危害作物的程度也不一样。本文以新疆具有代表性的伊犁河流域盐渍化区为研究对象, 运用地统计学的方法研究表层土壤(0~20 cm)中总盐分及主要组成盐分离子 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻ 的空间分布特征, 使用有限的采样数据获得土壤溶质的准确变异。这对了解该地区土壤盐分及其组成在二维空间的分布及迁移转化特征, 确定有害盐分的分布状况, 制定合理的盐渍化土壤改良与培肥措施都具有指导意义。

1 研究区概况

本研究区位于新疆西天山支脉一包孙山北麓、伊犁河以南辽阔的河谷盆地。其地势南高北低, 南部为山区、丘陵, 中部为倾斜平原, 北部为伊犁河

冲积平原。北部隔着伊犁河与伊犁哈萨克自治州伊宁市及伊宁县, 霍城县相望, 南部以山为界和昭苏县、特克斯毗连, 东邻巩留县, 西部与哈萨克斯坦接壤。

研究区气候属温带亚干旱气候区, 年均气温 7.9℃, 年均降水小于 200 mm, 冬季寒冷, 夏季炎热, 降水少, 蒸发量大, 蒸发与降水之比约为 6~15:1。温度的日较差、年较差和年际变化大。最高处海拔为 739 m, 最低处为 558 m。因地形地貌的不同, 水热再分配及土壤垂直差异明显, 土壤以草甸土和灰钙土为主。主要植被有蒿草、狐茅、鸡脚草、老鹳草、羊茅、白草、苔草等。粮食作物主要有小麦、玉米、水稻、大麦、高粱、糜子、豆类。年径流量 9.566 × 10⁶ m³(不含地下水)^[9]。研究区水、土、光、热等自然资源丰富, 但其植被稀少且分布不均, 因此生态环境较为脆弱。

根据含水介质性质、空间分布以及埋藏特征, 区域第四系含水系统可化为山前冲积扇单一潜水含水层系统和细土平原多层潜水—承压水含水层系统。其中前冲积扇单一潜水含水层系统为径流区补给区, 细土平原多层潜水—承压水含水层系统为径流排泄区, 伊犁河流域下游, 成为研究区最终汇水区。

2 土样的采集及测定

采样地点位于新疆伊犁河流域下游——察布查

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAC15B02); 国家自然科学基金面上项目(40971020)

作者简介: 海米提·依米提(1960—), 男, 维吾尔族, 新疆喀什人, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区水资源开发利用及其环境效应研究。E-mail: hyimit@yahoo.com.cn.

尔县大河灌区, N43°45' ~ N43°55', E80°55' ~ E81°11' 之间。此研究在面积约为 400 km² 的范围内总共设了 60 个土样采样点。采样点分取 4 个土样层(0 ~ 20, 20 ~ 40, 40 ~ 60, 60 ~ 80 cm), 每个层取 200 g 土壤样本, 取土样时由样点断面向下均匀取土, 然后混合。对所采集的土样进行风干, 过 1 mm 的筛, 然后以 5:1 的水土比进行抽滤浸提, 按照《土壤理化分析》^[10] 对土样样品总盐及所组成的离子进行测定。

总盐含量: 以土壤中八大离子的重量和计算, 同时测定其电导率。K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 用焰原子吸收分光光度计进行测定; SO₄²⁻ 采用 EDTA 滴定法进行测定, Cl⁻ 采用硝酸银滴定法进行测定; HCO₃⁻ 采用双指示剂法进行测定。最终获取的数据是以地下水样品中以上各离子的质量浓度和进行计算的。每个离子重复做 3 次, 取其平均值。

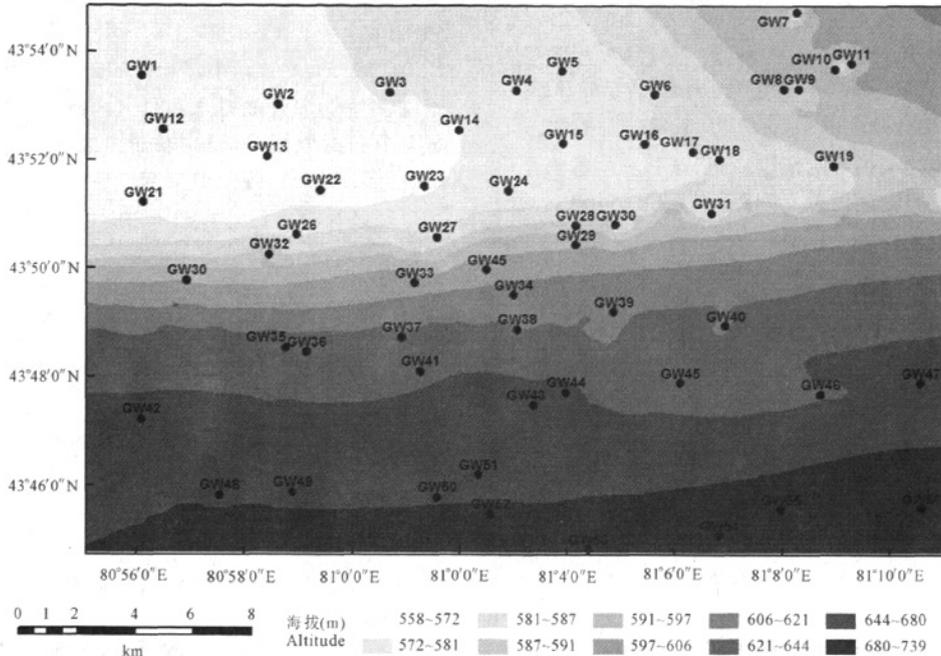


图 1 研究区样点分布

Fig.1 Distribution of sample points in study area

首先用 GPS(Global Position System)测定样点的经度值和纬度值, 然后将其换算成点的坐标后, 再算出其相对坐标和点距离, 即经度和纬度的分布特点, 结合球形和三角形的原理可直接得出地球表面任一待测点的相对坐标:

$$\begin{cases} x_i = \pi R / (\alpha_i - \alpha_0) (1 - \beta_i \times 90^\circ) \\ y_i = \pi R / 80 (\beta_i - \beta_0) \end{cases} \quad (1)$$

因此地球表面任一点 Z(x) 的坐标可写成如下形式:

$$(x_i, y_i) = [\pi R / 80 (\alpha_i - \alpha_0) (1 - \beta_i \times 90^\circ), \pi R / 180 (\beta_i - \beta_0)] \quad (2)$$

式中: α_0 为研究区参照坐标原点的经度值; β_0 为研究区参照坐标原点的纬度值; α_i 为研究区第 i 个样点的经度值; β_i 为研究区第 i 个样点的纬度值; x_i, y_i

分别为第 i 个样点(相对于研究区参照坐标原点)的横坐标和纵坐标; R 为地球半径(R ≈ 6 370 km)。

3 研究方法

采用统计软件 DPS8.0 和 Surfer8.0, ArcGis9.2 地统计学模块进行汇总分析和变异函数分析。分析不同空间盐分离子的变化趋势。

有关变异函数及其理论在徐建华和 Tyler S W 等的著作中有所阐述^[11,12], 用到的几个变异函数模型有:

球状模型:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C_1[1.5h/a - 0.5(h/a)^3] & 0 < h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C_1 & h > a \\ \gamma(0) = 0 & h = 0 \end{cases} \quad (3)$$

指数模型:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C_1[1 - e(-h/a)] & h > 0 \\ \gamma(0) = 0 & h = 0 \end{cases} \quad (4)$$

线性模型:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C_1 h/a & h > 0 \\ \gamma(0) = C_0 + C & h = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, h 表示分隔二点的矢量; $\gamma(h)$ 表示变异函数; C_0 表示块金效应; C_1 表示基台值减去 C_0 的值; a 表示观测点之间的影响范围, 对于球状和线性模型则表示观测点之间的独立间距, 指数模型的独立间距为 $3a$ 。

4 结果与分析

表 1 盐分及其组成离子的统计特征值 ($N = 60$) (g/kg)

Table 1 Statistical results of salinity and its composing ions in the study area

| 盐分 Salinity | 分布类型 Type of distribution | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 均值 Average | 中位数 Mean. | 标准差 STD. | 偏度 Skew | 峰度 Kurt | 变异系数 CV (%) |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|---------------|--------------|-------------|------------|------------|----------------|
| TDS | N | 0.181 | 39.088 | 6.7263 | 2.601 | 9.3561 | 1.960 | 3.183 | 139.10 |
| K ⁺ | lgN | 0.007 | 3.848 | 0.435 | 0.169 | 0.636 | 3.198 | 13.685 | 146.23 |
| Na ⁺ | lgN | 0.045 | 25.388 | 2.890 | 1.773 | 3.930 | 3.388 | 17.409 | 135.98 |
| Ca ²⁺ | N | 0.009 | 6.148 | 1.509 | 1.342 | 1.307 | 1.339 | 2.190 | 86.61 |
| Mg ²⁺ | lgN | 0.022 | 0.663 | 0.353 | 0.349 | 0.198 | -0.078 | -1.389 | 56.09 |
| Cl ⁻ | lgN | 0.079 | 47.047 | 5.293 | 1.031 | 9.231 | 2.800 | 8.577 | 174.40 |
| SO ₄ ²⁻ | lgN | 0.963 | 5.256 | 1.538 | 1.084 | 1.859 | 3.935 | 2.193 | 120.87 |
| HCO ₃ ⁻ | N | 0.001 | 0.015 | 0.006 | 0.006 | 0.003 | 0.873 | 2.606 | 50.00 |
| CO ₃ ²⁻ | lgN | — | 0.038 | 0.007 | — | 0.0072 | 1.443 | 1.538 | 102.85 |

4.2 土壤盐分及其组成离子的空间结构特征分析

由于经典统计学方法只能反映土壤盐分及组成离子变化的总体, 不能反映样本的独立性, 解决这一问题的方法是进一步研究其空间变异的结构性, 即应用地统计学的方法研究土壤盐分及其组成离子空间变异结构。

表 2 是根据土壤盐分及其组成离子变异函数理论模型得出的相应参数。 C_0 是间距 $h = 0$ 时的变异, 称为块金值或块金方差 (Nugget variance), 它反映了在最小间距内的土壤盐分及其组成离子变异性和测量分析过程中引起的误差, 较大的块金值表明较小尺度上的水文化学过程不容忽视。此处的块金值都较小, 说明在最小间距内的变异分析过程中引起

4.1 土壤盐分及其组成离子的描述性统计分析

表 1 是对样本的盐分数据进行统计分析后得出的结果。通过正态性检验结果与从表 1 中的各盐分统计特征值中可以看出, 被测的 9 个项目中总盐分、Ca²⁺、HCO₃⁻ 的含量服从正态分布, Mg²⁺、K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻ 的含量服从对数正态分布 (对原始数据进行对数转换后服从正态分布)。TDS、K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻ 的变异系数大于 100%, 属于强变异性; 其余的离子及总盐分的变异系数在 50.00% ~ 86.61% 之间, 属于中等变异性, 其中 HCO₃⁻ 的变异系数最小, 为 50.00%。由于受到地形地貌、季节以及灌溉排水和研究区地下水化学的形成与分布的原因等的影响, 研究区 K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 都表现出很强的时空变异性。从盐分离子的含量可以看出 K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 是盐分的主要组成部分。

的误差较小; $C_0 + C$ 值称基台值 (Sill), 是变异函数随间距增到一定程度后出现的平稳值, 通常表示系统内总的变异, 一般接近于观测值的方差 S^2 [13]。块金值与基台值之比表示随机性因素引起的空间变异性占系统变异的比值, 若该比值高, 则说明随机性因素引起的空间变异性程度起主要作用。反之, 则说明结构性因素引起的空间变异性程度起主要作用。由此可见, 块金值与基台值比例可以表明系统变量的空间相关性的程度。如果比值小于 25%, 说明系统具有强烈的空间相关性, 如果比值在 25% ~ 75% 之间, 说明系统为中等空间相关; 如果比值大于 75%, 说明系统具有较弱的空间相关性 [14]。

土壤盐分离子的空间分布是结构性因素 (气候、土壤母质、地形、土壤类型等) 与随机性因素 (耕作、

管理措施、种植制度等)共同作用的结果。从表 2 可以看出,在研究区内,土壤总盐的块金值和基台值之比 25.0%。其空间相关性属于强烈相关;说明影响总盐含量分布的结构因素很强,它们的变化主要由结构因素控制,导致样点之间的空间自相关作用强;而其余离子除了 Na^+ 都表现为中等空间相关性。而 Na^+ 的比值最高为 87.6%,说明 Na^+ 受随机性因素影响程度大,从而削弱了结构性因素造成的强空间自相关作用。 α 是变程(Range),是变异函数达到基台值时的样本间距,代表了该参数的相关距离(又称空间自相关范围),当观测点之间的距离大于该值时它们之间是相互独立的,小于该值时,说明观测点

之间存在一定的相关关系。变程的变化可反映出土壤盐分离子变异主要过程的变化,意味着盐分离子均匀性的强弱^[14]。可以看出盐分离子的变程在 3.5~22.1 km 之间,相差不太大,其中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的变程均在 3.5 km 左右,反映了这些变量空间自相关范围具有很大的相似性。根据地统计学的原理进行汇总分析和变异函数分析可知,总盐分符合球状模型, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 符合高斯模型,而 HCO_3^- 则是纯块金效应,这说明在误差范围内,研究区内 HCO_3^- 的分布在空间上是独立的。

表 2 盐分及其组成离子的变异函数理论模型及相关参数

Table 2 Semivariogram models and its parameters of soil salinity and its composing ions

| 盐分 Salinity | 块金方差 C_0 | 基台值 $C_0 + C$ | 块金方差/基台值 $C_0 / C_0 + C$ | 变程(km) Range | 模型 Model |
|--------------------|---------------|------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------|
| TDS | 0.436 | 1.700 | 25.0 | 12.914 | 球状模型 Spherical model |
| K^+ | 1.653 | 2.109 | 78.4 | 3.530 | 高斯模型 Gauss model |
| Na^+ | 2.321 | 2.650 | 87.6 | 6.532 | 高斯模型 Gauss model |
| Ca^{2+} | 0.460 | 1.035 | 44.5 | 3.664 | 高斯模型 Gauss model |
| Mg^{2+} | 0.011 | 0.036 | 30.4 | 3.675 | 高斯模型 Gauss model |
| Cl^- | 0.729 | 2.340 | 31.2 | 22.097 | 高斯模型 Gauss model |
| SO_4^{2-} | 0.408 | 0.571 | 71.6 | 5.490 | 高斯模型 Gauss model |
| CO_3^{2-} | 0.289 | 0.356 | 81.7 | 5.68 | 高斯模型 Gauss model |
| HCO_3^- | 0.273 | 0.273 | — | — | 纯块金效应 Pure nugget effect |

4.3 土壤盐分及其组成离子的空间分布特征

在盐渍化土壤中,盐分根据其对作物的影响可分为有害盐和无害盐。就 8 种离子组成的 12 种盐类,其中有害盐包括: Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 MgSO_4 、 Na_2SO_4 以及所有的氯化物。其余的由于是微溶或难溶性盐故为无害盐^[15]。为进一步准确而直观研究盐渍化区土壤盐分空间分布特征,确定盐分离子的结合方式,利用半变异函数模型进行普通的 Kriging 插值得到盐分及其组成含量分布图(图 2:a~h)。

由图 2 可以看出,大部分盐分离子空间结构性都较好。而 HCO_3^- 由于存在块金效应所以空间结构性较差,说明这次采样的距离对于 HCO_3^- 来说过大。除 HCO_3^- 外,其它离子的空间分布结构与总盐的空间分布情况基本上一致,即含量分布有明显的方向性和连续性。土壤总盐与盐分离子含量较高的区域主要集中在研究区中间部分和西南方向上,可以明显看出中部与西南部含量高,北部含量低的空间分布特征。其主要原因可能是研究区内的地形是南高北低,地下水埋深较浅,地下水的流向也是由南到北,盐分离子含量高的区域海拔相对周边区域

的海拔来说较低,而且盐分离子又有易从高到低水迁移的性质。但是 HCO_3^- 空间分布受地形、河流等结构性因素影响较小,这与其系统空间相关性较弱相一致。 HCO_3^- 的含量在整个区域的含量变化都不大,大约在 0.001~0.015 g/kg 之间,其转化为 CO_3^{2-} 的量会更少,而 CO_3^{2-} 的多少是判断土壤碱度的标志,由此可以说明该区的碱度不高,而 pH 值平均在 8.2 左右,也说明了这一点。

5 结 论

1) 研究区表层土壤盐分离子的含量统计特征值显示,总盐分、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 服从正态分布,其余盐分离子服从对数正态分布。不同项目的变异强度不同,反映出研究区盐分离子所受影响因素的复杂性。

2) 除 HCO_3^- 外,总盐分及其它盐分离子均能用不同的模型拟合, HCO_3^- 表现为纯块金效应说明采样间距对其来说过大。总盐分表现为强烈的空间相关性。其余盐分离子均为中等强度的空间相关性,是结构因素和随机因素共同作用的结果,相关距离在 3.5~22.1 km 之间。

3) 总盐分及其组成进行估值并绘制的含量分布图可以看出除 HCO_3^- 外,其它离子的空间分布结构与总盐分的空间分布结构具有较高的一致性,即

含量分布有明显的方向性和连续性。研究区内土壤盐渍化是氯化钠—硫酸盐型。

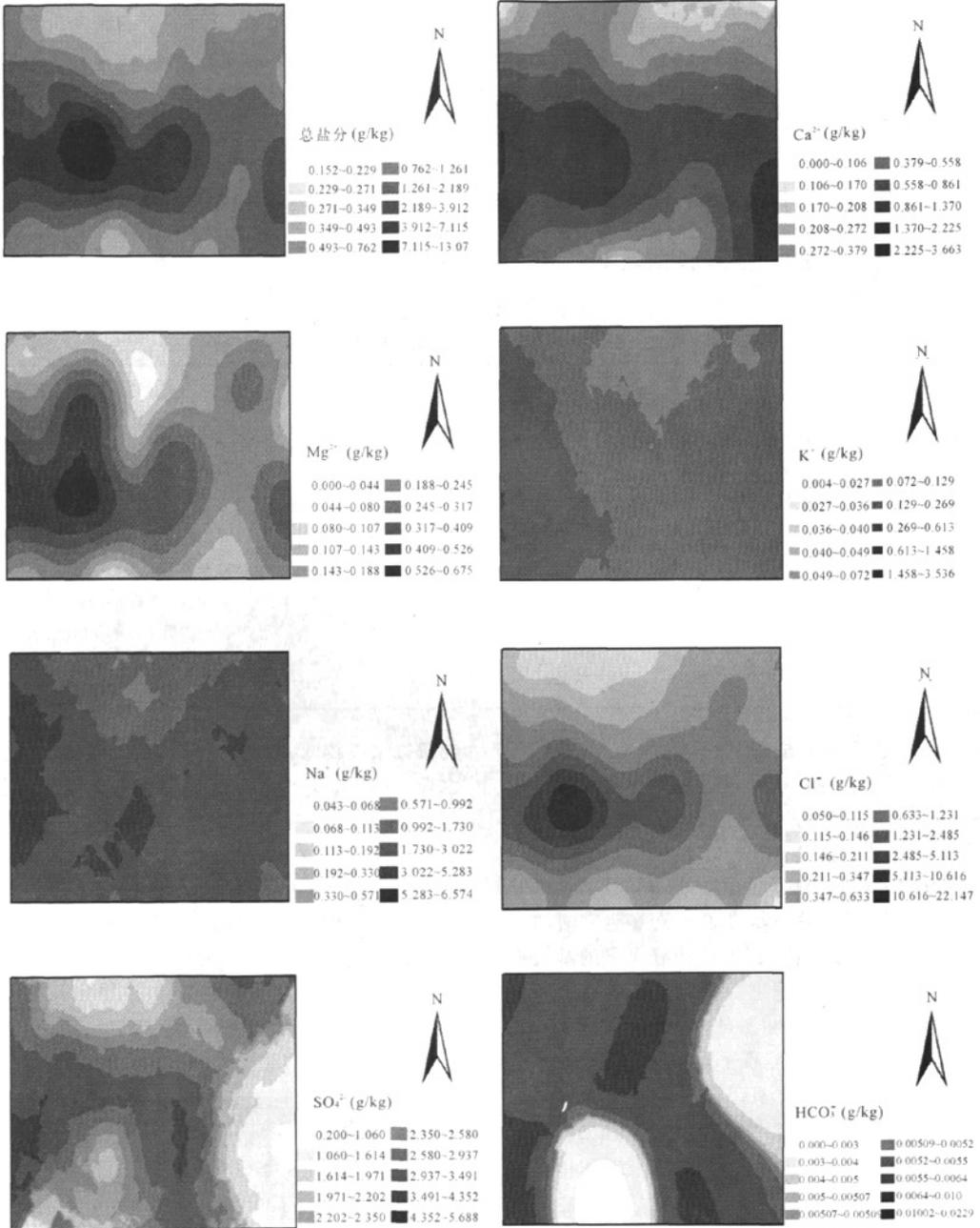


图 2 盐渍土壤盐分及其组成含量分布

Fig.2 Distribution map of content of soil salinity and its composing ions

土壤盐分是土壤的非常重要的特性之一,存在明显的空间异质性,同时也是土壤学领域的重点研

究对象。土壤盐渍化是土地荒漠化的类型之一,当土壤中积累的盐分达到一定的临界值时,会抑制作

物根系吸收水分和养分的能力,或腐蚀植物根系,从而导致作物的正常生长和发育受到危害。土壤盐渍化不仅严重损害了土壤的生产潜力,给农业带来严重的损失,而且盐分的积聚也改变了植物生长的环境,促进植物类型向盐生、荒漠类型转变,最终导致生态环境恶化。因此,了解土壤盐分空间分异特征是改善和恢复生态环境研究的重要内容之一^[16]。

参考文献:

- [1] 石玉林. 西北地区土地荒漠化与水土资源利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 335.
- [2] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual Kriging [J]. Soil Science, 1980, 31: 333—341.
- [3] 张乃明, 李保国, 胡克林. 污水灌区耕层土壤中铅、镉的空间变异特征[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 151—154.
- [4] 朱益玲, 刘洪斌, 江希流. 天津市紫色土中 N、P 养分元素区域空间变异性研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 138—143.
- [5] Imperato M, Adamo P, Naimo D, et al. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) [J]. Environmental Pollution, 2003, 124: 247—256.
- [6] Sylla M, Stein A, Breemen N, et al. Spatial variability of soil salinity at different scales in the mangrove rice agro-eco system in West Africa [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1995, 54: 1—15.
- [7] 王学军, 邓宝山, 张泽藩. 北京东郊污灌区表层土壤微量元素的小尺度空间结构特征[J]. 环境科学学报, 1997, 17(4): 412—416.
- [8] Chang Y H, Scrimshaw M D, Emmerson R H C, et al. Geostatistical analysis of sampling uncertainty at the Tollesbury Managed Retreat site in Blackwater Estuary, Essex, UK: Kriging and cokriging approach to minimize sampling density [J]. The Science of the Total Environment, 1998, 221: 43—57.
- [9] 颜亮, 高敏华, 刘光宇. 基于 RS/GIS 的新疆察布查尔县绿洲动态变化研究[J]. 研究与开发, 2007, (11): 25—29.
- [10] 中科院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海, 科学技术出版社, 1997: 188—200.
- [11] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 108—115.
- [12] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. Soil Sci Soc Am J, 1989, 53: 987—996.
- [13] 苏里坦, 宋郁东, 张振羽. 新疆三工河流域地下水矿化度的时空变异及分形特征[J]. 地质科技情报, 2005, 24(1): 85—90.
- [14] 侯景儒, 黄竟先. 实用地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [15] 于天仁, 王振权. 土壤分析化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 301—303.
- [16] 吕连宏, 刘淑春, 王薇, 等. 空间信息统计学在环境科学领域的应用进展[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(2): 194—198.

Spatial variability of soil salinity ions in the saline area of the Yili River Basin

Hamid Yimit¹, Mihrigul Mamat^{1,2}, Gulnar Tohti^{1,2}, HUANG Zhi-fang^{1,2}, CAO Jing-jing^{1,2}

(1. Key Lab of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. College of Resources & Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: Geostatistics combined with GIS was applied to collect 60 samples and analysis was made of the spatial variability of soil salt (total salt, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} and HCO_3^-) in top soil (0 ~ 20 cm) from about 400 km² of typical saline soil of study area in the Yili River Basin. The results indicated that the total salt, Ca^{2+} and HCO_3^- showed a normal distribution, and the others a lognormal distribution. The chemical analysis of semi-variograms indicated that the total salt was best described by spherical model, Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} and Ca^{2+} were best described by Gauss model, and HCO_3^- showed pure nugget effect. The ranges of soil salinity were from 3.5 ~ 22.1 km. The spatial variability of all soil salinity ions were mainly produced by structural factors and random factors. The results also showed that except HCO_3^- , the spatial correlation of other tested parameters, were moderately dependent, but their spatial heterogeneity degree was different. The Kriging method was applied to estimate the unobserved points and then the precise contour maps were obtained. By this way, the spatial variability of soil salinity ions could be reflected directly.

Keywords: saline soil; saltion; geostatistics; spatial variability