

新疆盐渍化区土壤盐分离子的空间变异特征

蔺 娟<sup>1</sup>,艾尼瓦尔·买买提<sup>1,2</sup>,地里拜尔·苏力坦<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 化学化工学院,乌鲁木齐 830046;2. 新疆大学 资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046)

**摘 要:**土壤中盐分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。利用地统计学,结合地理信息系统(GIS),在面积约为 2 000 km<sup>2</sup> 的新疆典型盐渍化区渭干河流域布设了土壤取样点 43 个,测定土壤表层(0 - 30 cm)盐分及其组成(Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>,K<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Cl<sup>-</sup>,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)的空间变异性规律。结果表明:Ca<sup>2+</sup>,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为正态分布,其余盐分离子符合对数正态分布;半方差分析得出总盐分符合球状模型,Mg<sup>2+</sup>,K<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup>,Cl<sup>-</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 符合指数模型,Ca<sup>2+</sup> 符合高斯模型,而 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 则是纯块金效应;盐分离子的变程在 14.3 ~ 64.1 km 之间;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:**S156.4      **文献标识码:**A      **文章编号:**1005-3409(2007)06-0184-04

Spatial Variability of Soil Saltions in Xinjiang Salinization Region

LIN Juan<sup>1</sup>,ANWAR Mohammed<sup>1,2</sup>,DILBAR Sultan<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;  
2. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** The quantity and distribution of soil salinities is a major component in the study of chemical transportation in the vadose zone and groundwater system. Geostatistics combined with GIS was applied to collect 43 samples and analyzed the spatial variability of soil salts (total salts, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) in top soil (0 - 30 cm) from about 2 000 km<sup>2</sup> of typical saline soil of Weigan drainage area in Xinjiang. The results indicated that Ca<sup>2+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> showed a normal distribution, the others with a lognormal distribution. The chemical analysis of semivariograms indicated that total salts was best described by spherical model, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> were best described by exponential model, Ca<sup>2+</sup> as fitted well using the Gauss model, and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> showed the pure nugget effect. The ranges of soil salinities were from 14.3 to 64.1 km. The spatial variability of all soil salinity ions were mainly produced by structural factors and random factors. The results also showed that except of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 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.  
**Key words:** saline soil; saltions; geostatistics; spatial variability

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 多万公顷的各种盐渍土壤,而且还有逐年上升的趋势<sup>[1]</sup>。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<sup>[2-8]</sup>,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渭干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 - 30 cm)中总盐分及主要组成盐分离子 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>,

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 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 实验方法

1.1 研究区概况

本研究区位于新疆典型的绿洲盐渍化区渭干河流域,地处天山中段南部,塔里木盆地的北缘,东经 82°18' - 83°14', 北纬 41°06' - 41°18', 属于干旱半干旱类型,为暖温带干旱气候。其海拔平均为 963 m,年降水量 73.6 mm,年均蒸发量 2 339.2 mm,年均气温 10.8 ~ 11.3℃。研究面积约为 2 000 km<sup>2</sup>,土壤 pH 值平均为 8.3,属于偏碱性土壤,有机质平均含量较低(< 8.9 g/kg),土壤主要为盐化草甸土、盐化潮土、

收稿日期:2006-12-20  
基金项目:国家自然科学基金项目(20267002)  
作者简介:蔺娟(1980-),女,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事土壤环境化学研究。

典型盐土。

1.2 采集土壤与室内分析

2005 年 9 月中旬,在研究区域内选取有代表性的土壤样点 43 个,每个样品取自 50 m ×50 m 正方形 4 个顶点和中心点 5 处的表土(0-30 cm)混合而成,总量大约 1 kg。采样点之间的间距最小为 100 m。同时记录采样点的坐标数据,用 GPS 进行定位,生成研究区的样点分布图(图 1)。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,按文献[9]进行土壤盐分及组成的测定:(1)总盐分含量:以土壤中八大离子的重量和计算,同时测定其电导率;(2)Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>:原子吸收分光光度法;(3)K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>:火焰光度计法;(4)Cl<sup>-</sup>:莫尔法;(5)HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>:双指示剂法;(6)SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:EDTA 容量法。

1.3 半方差函数理论与模型

半方差函数是分析变量空间结构的主要工具,半方差函数是方向和两点之间距离的函数,它可以反映变量的空间自相关性。用它可以描述土壤理化性质的空间变异结构,其定义为随机变量 Z(x) 增量方差的一半:

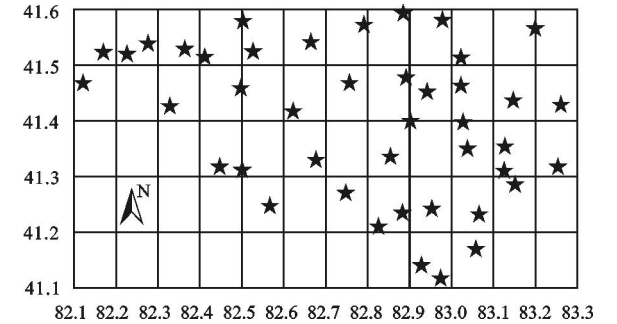


图 1 研究区的样点分布

$$r(h) = (\frac{1}{2}) \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] \tag{1}$$

其变异函数的计算式为

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \tag{2}$$

式中:h——土壤样本空间间隔距离,称为步长(lag);N(h)——间距为h的样点配对数目;Z(x<sub>i</sub>),Z(x<sub>i</sub>+h)——变量Z(x<sub>i</sub>)在空间位置x<sub>i</sub>和x<sub>i</sub>+h的实测值。在一定范围内,r(h)随h的增加而增大,反映不同间距观测值之间的变化。而当测点间距不小于最大相关距离时,该值趋于稳定。

半方差图由一系列离散点构成,根据其形状采用线性、球形、高斯或指数等模型拟合,得到半方差函数理论模型。半方差函数计算和半方差图拟合以及普通 Kriging 插值图应用 ArcGIS 8.3 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 分析项目的统计特征值

从表 1 对样本的盐分数据进行常规分析统计分析结果中看出,被测的 8 个项目 中总盐分、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的含量服从正态分布,Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 含量服从对数正态分布。Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 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 21.9%~94.4%之间,属于中等变异性,其中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的变异系数最小为

21.9%。Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 表现出的强变异性可能与研究区的面积较大、土壤类型以及盐渍化程度有关。从盐分离子的含量可以看出 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 是盐分的主要组成部分。

表 1 盐分及其组成离子的统计特征值(N=43) g/kg

项目	分布类型	最大值	最小值	均值	中值	标准差	变异系数/%
总盐分	对数正态	277.63	10.53	76.25	43.02	71.98	94.4
Ca <sup>2+</sup>	正态	5.47	0.51	3.02	2.85	1.11	36.8
Mg <sup>2+</sup>	对数正态	12.90	0.31	2.74	4.62	2.81	103
K <sup>+</sup>	对数正态	0.990	0.057	0.32	0.24	0.24	76.8
Na <sup>+</sup>	对数正态	79.25	2.45	20.72	4.35	24.31	117
Cl <sup>-</sup>	对数正态	118.08	2.57	26.12	5.98	27.42	105
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	对数正态	92.44	3.57	25.10	24.8	21.43	85.4
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	正态	0.37	0.14	0.24	0.22	0.051	21.9
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-	-	-	-	-	-	-

2.2 土壤盐分及其组成离子的空间结构特征

若是考虑不同方向,不同尺度条件下区域化变量表现出不同的空间结构时就称为各向异性。在本研究中,为了比较不同盐分离子在不同方向上的变异程度,分别计算了盐分离子在四个方向(0°,45°,90°,135°)的半变异函数,讨论它们的各向异性特征。在选取土壤盐分离子的半方差模型时,首先按照(2)式计算出 r(h) 的散点图,然后选择合适的步长,使得拟合半变异模型的规模与理论半变异模型的规模相当,再用不同类型的模型进行拟合,计算得到模型参数值。图 2 是总盐分及其组成离子的半变异函数曲线图。然后选取平均值最接近 0,均方根和平均误差最小,标准均方根最接近 1 的模型,最后用交叉验证法(cross validation)修正模型参数,模型拟合参数见表 2。

经过计算盐分离子在 4 个方向上拟合所得模型参数都一样,即不存在方向效应。这就说明盐分离子是各项同性的<sup>[10]</sup>。由表 2 中的拟合度以及图 2 的半方差函数可以看出,各项目都能很好的用模型来拟合。总盐分符合球状模型,Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 符合指数模型,Ca<sup>2+</sup> 符合高斯模型。而 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 则是纯块金效应,这说明在误差范围内,研究区内 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 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

项目	理论模型	块金值	基台值	块金值/ 基台值/ %	变程/ km	拟合度 R <sup>2</sup>
总盐分	球状模型	0.5006	0.8289	60.4	48.5	0.746
Ca <sup>2+</sup>	高斯模型	1.0016	1.4508	69.0	48.1	0.884
Mg <sup>2+</sup>	指数模型	0.4052	1.0569	38.3	25.8	0.648
K <sup>+</sup>	指数模型	0.2198	0.4609	47.7	14.3	0.772
Na <sup>+</sup>	指数模型	0.7993	1.3736	58.1	64.1	0.579
Cl <sup>-</sup>	指数模型	0.6177	1.2216	50.5	48.0	0.523
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	指数模型	0.3512	0.7262	48.4	17.8	0.899
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	纯块金 效应	0.0027	0.0027			

块金值通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异,较大的块金值表明较小尺度上的某种过程不容忽视。总的来看,土壤盐分离子的块金值都较小,表明在最间距内的变异分析过程引起的误差较小;变程(Range)是半方差达到基台值时的样本间距,代表了该参数的相关距

离。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。可以看出盐分离子的变程在 14.3 ~ 64.1 km 之间,相差比较大,不过其中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Cl}^{-}$ 、总盐分的变程均在 48 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;基台值通常表示系统内总的变异,块金值与基台值之比表示空间异质性占系统总变异的比,以及系统变量的空间相关性程度。如果比值  $< 25\%$ ,说明系统具有强烈的空间相关性;如果比例在  $25\% \sim 75\%$  之间,表明系统有中等强度的空间相关性;如果比例  $> 75\%$  说明系统空间相关性很弱<sup>[12]</sup>。由

表 2 看出,盐分及其组成离子均表现出中等强度的空间相关性。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。其中  $\text{Mg}^{2+}$  的块金值与基台值之比最低为  $38.3\%$ ,说明影响  $\text{Mg}^{2+}$  含量分布的结构性因素很强,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  $\text{Ca}^{2+}$  的比值最高为  $69.0\%$ ,说明  $\text{Ca}^{2+}$  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。

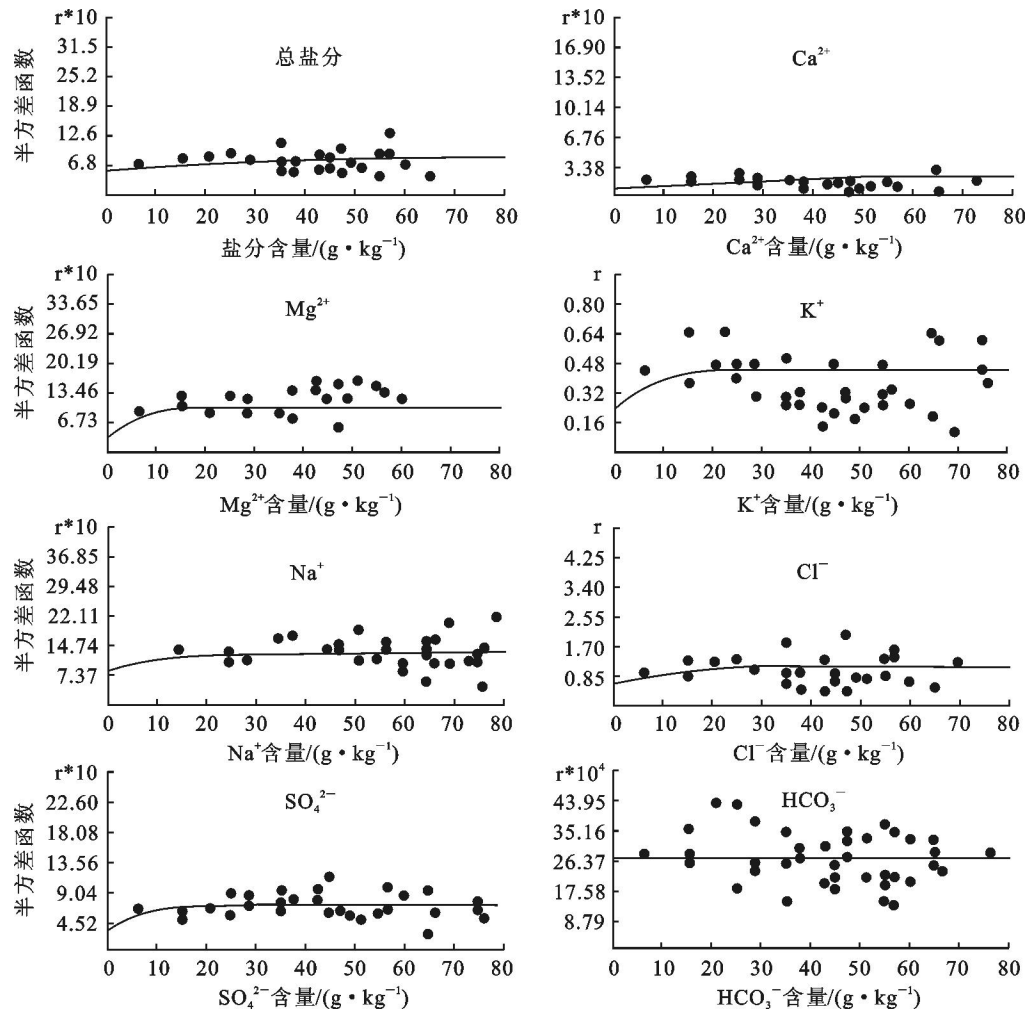


图 2 盐分及其组成离子的半方差函数

2.3 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:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  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<sup>[12]</sup>。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,利用拟合的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 3:a - h)。

由图 3 可以看出,大部分盐分离子的空间结构性都较好。而  $\text{HCO}_3^{-}$  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  $\text{HCO}_3^{-}$  来说过大。除  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}$  外,其它离子的空间分布结构与总盐的空间分布情况有高度的一致性,即含量分布有明显的方向性和连续性。在西北 - 东南方向上,盐分离子的含量逐渐升高,可以明显看出西北

含量低,东南含量高的分布特征。其主要原因可能是研究区内的地形是北高南低,渭干河及其支流的流向也是由北到南,而且盐离子又有易随水迁移的性质。

但是  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}$  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。 $\text{K}^{+}$  是在河流经过的地方含量较低,而离河流较远的地方含量则较高,形成了区域内  $\text{K}^{+}$  含量中间低两边高的趋势。 $\text{HCO}_3^{-}$  的含量在整个区域的含量变化都不大,大约在  $0.16 \sim 0.27 \text{ g/kg}$  之间,其转化为  $\text{CO}_3^{2-}$  的量会更少,而  $\text{CO}_3^{2-}$  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 8.3 左右,也说明了这一点。

从  $\text{Na}^{+}$  和  $\text{Cl}^{-}$  含量 Kriging 插值图中(如图 3e,图 3f)可看出其分布与总盐分(图 3a)极为相似,表明该盐渍化土壤中钠离子和氯离子是主要的结合方式,相比之下钠离子与硫

酸根的结合相对较弱,同时也表现出研究区特有的土壤特征,这与研究区盐渍化主要是氯化物—硫酸盐型相一致。

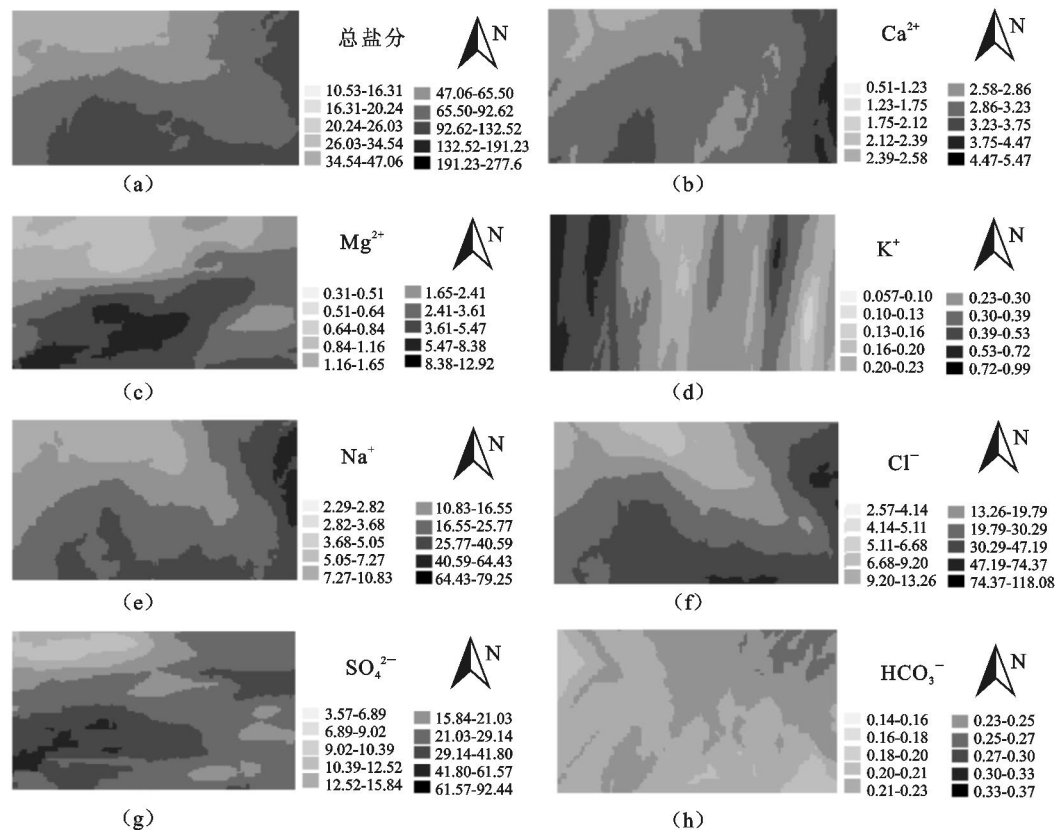


图 3 盐渍土壤盐分及其组成含量分布

3 结 论

(1)研究区表层土壤盐分离子的含量统计特征值显示,只有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  服从正态分布,其余离子及总盐分服从对数正态分布.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  $\text{HCO}_3^-$  外,总盐分及其它盐分离子均能用不同的模型拟合, $\text{HCO}_3^-$  表现为纯块金效应说明采样间距对其来说过大.总盐分及其组成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 14.3 ~ 64.1 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  $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  外,其它离子的空间分布结构与总盐分的空间分布结构有高度的一致性,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。

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. . 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. 江津市紫色土中 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 (Ita-

ly) [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-ecosystem in West Africa [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1995, 54: 1 - 15.  
[7] 王学军, 邓宝山, 张泽蒲. 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, U K: Kriging and cokriging approach to minimize sampling density[J]. The Science of the Total Environment, 1998, 221: 43 - 57.  
[9] 鲍力旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 178 - 200.  
[10] Ardahanlioglu, Ozas O T, Evren S, et al. Spatial variability of exchangeable sodium, electrical conductivity, soil pH and boron content in salt and sodium - affected areas of the Iğdir plain (Turkey) [J]. Journal of Arid Environments, 2003, 54: 495 - 503.  
[11] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 326.  
[12] 于天仁, 王振权. 土壤分析化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 301 - 303.