

# 新疆克里雅绿洲土壤盐分、pH 和盐基离子空间异质性分析<sup>①</sup>

阿斯古丽·木萨<sup>1,2</sup>, 阿不都拉·阿不力孜<sup>1,2</sup>, 瓦哈甫·哈力克<sup>1,2\*</sup>,  
依力亚斯江·努尔麦麦提<sup>2,3</sup>, 卢龙辉<sup>2,3</sup>, 普拉提·莫合塔尔<sup>1,2</sup>

(1 新疆大学旅游学院, 乌鲁木齐 830049; 2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046;

3 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:**以克里雅绿洲盐渍化土壤为研究对象,以野外调查与实地数据为基础,采用空间自相关分析与径向基函数插值法,定量分析了克里雅绿洲土壤的含盐量、pH 及盐基离子的空间异质特征。结果表明:绿洲盐渍土表聚性强、呈碱性,土壤含盐量从南至北呈现逐渐增大趋势。土壤含盐量、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 均属于强空间变异, $\text{HCO}_3^-$ 属于中等强度的空间变异,而 pH 属极弱变异。土壤盐分含量、pH 和盐基离子的 Moran's I 指数均通过了显著性检验,研究区土壤含盐量、pH 与盐基离子在空间上呈现低聚集性。Pearson 相关性分析结果显示,土壤盐分含量与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量具有强正相关性( $P<0.01$ ),与  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量中等程度正相关( $P<0.05$ );土壤 pH 与土壤含盐量及盐基离子含量极弱相关。该研究结果可为绿洲水资源合理开发与农业可持续发展提供科学依据,同时可作为盐渍土改良和沙漠化防治等环保工作的决策支撑。

**关键词:**土壤盐分;盐基离子;空间异质性;克里雅绿洲

中图分类号:K90 文献标识码:A

土壤盐渍化是表层土壤易溶盐含量过高而造成绝大多数植物难以生长,土地资源贫瘠退化的现象<sup>[1]</sup>。根据成因类型,盐渍化可分为原生盐渍化和次生盐渍化两种类型。当前,盐渍化与次生盐渍化已成为全球性问题之一,尤其在干旱半干旱地区极为显著。土壤盐渍化不仅制约着干旱区农业生产及可持续发展,还对区域生态安全构成潜在风险<sup>[2]</sup>。联合国粮农组织的资料表明,全世界盐渍化土地的总面积约达  $9.5\times 10^8\text{ hm}^2$ ,占地球陆地面积的 7.26%,其中,我国盐渍土面积为  $1.0\times 10^8\text{ hm}^2$ ,约占世界盐渍土面积的 1/10<sup>[3]</sup>。西部 6 省区中,盐渍土占全国盐渍土面积的 69.03%,其中新疆盐渍土积最大<sup>[4]</sup>,达到  $1\,336.1\times 10^4\text{ hm}^2$ ,包括次生盐渍化耕地  $126.4\times 10^4\text{ hm}^2$ <sup>[5]</sup>,因此,新疆克里雅绿洲土壤质量的研究具有重要的科学意义<sup>[6]</sup>。

土壤次生盐渍化对当前社会经济和生态环境结构均造成不同程度的影响。尤其在西北绿洲农业区,由于特殊的地理条件和不合理的水土资源利用方式,使土壤盐渍化加剧,农作物产量骤降,不仅影响农业生态系统

稳定性,还对国家粮食安全构成严重威胁<sup>[1-2,6-7]</sup>。通常土壤盐渍化程度取决于其区域土壤成分、气候、水文地质等条件及人为因素等因子的影响程度<sup>[8]</sup>。近 30 a 来土壤养分含量的变化,可能主要归因于耕作制度、长期施肥等引起土壤肥力和酸碱度的变化<sup>[9]</sup>。土壤 pH 是评价土壤盐碱化程度的一个重要指标,对土壤的氧化还原、沉淀溶解、吸附、解吸和配合反应起到支配作用<sup>[10]</sup>。定量分析区域土壤中盐分含量、pH 与盐基离子含量的空间异质性及其相互关系可为土壤盐渍化防治与土地资源管理提供决策依据<sup>[11]</sup>。

目前已有诸多研究分析和探讨区域土壤盐分含量、地下水埋深、电导率、pH 间的关系,所用研究方法主要有遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和地统计学相结合的方法、线性回归法、多重回归法和灰色关联分析法<sup>[12-18]</sup>等。管孝艳等<sup>[12]</sup>运用统计学、地统计学和 GIS 相结合的方法,分析了河套灌区土壤电导率的空间变异特征及地下水埋深对土壤盐分分布的影响,并得出该区域土壤盐分的空间分异特征。麦麦

基金项目:国家自然科学基金重点基金联合项目(41561089,41461111,U1138303)资助。

\* 通讯作者(hwahap@xju.edu.cn)

作者简介:阿斯古丽·木萨(1990—),女,新疆且末人,硕士研究生,主要从事自然地理学和旅游可持续发展相关研究。E-mail: asigulmusa@126.com

提吐尔逊·艾则孜等<sup>[18]</sup>运用灰色关联分析法,对伊犁河流域土壤盐分含量与地下水埋深、矿化度、电导率、pH 和主要离子进行了关联分析。邓宝山等<sup>[14]</sup>运用统计学和地统计学方法对克里雅绿洲土壤盐分和地下水埋深的时空分异特征进行了探讨。Abliz 等<sup>[15]</sup>采用地统计学方法和地理加权回归方法,定量分析了克里雅绿洲土壤含盐量、地下水埋深、电导率与土地利用/覆被的空间相关关系。胡佳楠等<sup>[16]</sup>对于田绿洲盐渍土电导率、含盐量、pH 和含水量的空间异质性进行了定量分析。赛迪古丽·哈西木<sup>[19]</sup>等借助统计软件,运用统计特征值等方法对于田绿洲土壤盐分分异特征进行了分析研究。古丽格娜·哈力木拉提等<sup>[20]</sup>运用相关统计软件对克里雅河流域不同时期土壤含量盐及 pH 进行了相关性分析。上述研究运用多种研究方法,从不同角度分析了土壤盐分的异质性及其与众多因子的相关关系,然而有关土壤盐分、pH 及盐基离子空间聚集特征的研究尚有欠缺。

本文以新疆克里雅绿洲为研究区,结合 2014 年对研究区土壤样品的实测分析,采用径向基函数插值法、Moran's I 空间自相关分析法和 Pearson 相关分析法,定量分析探讨研究区土壤盐分含量、pH 及盐基离子含量空间变异与聚集特征及各因子间相关性。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

克里雅绿洲位于中国西北部塔克拉玛干沙漠南缘,昆仑山北麓,是典型的干旱区绿洲(图 1)。它隶属新疆维吾尔自治区和田地区,是我国最贫困的地区之一。该区自然条件恶劣,人均耕地面积少,农业生产水平低,农业可利用水资源贫乏。研究区地理位置  $36^{\circ}47' \sim 37^{\circ}11' \text{N}$ ,  $81^{\circ}08' \sim 81^{\circ}42' \text{E}$ ,总面积为  $2.1 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,南高北低,最高海拔 1 495 m,最低海拔 1 325 m,具有暖温带大陆性干旱气候,热量与光照丰富,多年平均气温  $12.4^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $4\,340^{\circ}\text{C}$ ,年总辐射量达  $6.12 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$ ,年日照时数长达 2 730 h,多年平均降水量 44.7 mm,而多年平均蒸发量 2 498 mm,其蒸降比为 54:1,无霜期为 200 d。研究区天然植被分布有芦苇(*Phragmites communis*)、怪柳(*Tamarix* spp.)、胡杨(*Populus euphratica*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)等。克里雅河源于昆仑山上冰雪融水和降水,流经克里雅绿洲消失在塔克拉玛干沙漠腹地,总长约为 700 km。县城灌区面积为  $448 \text{ km}^2$ ,其农业引水量为  $6.38 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中地下水引水量为  $5.04 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[21]</sup>。平坦的地形,使地下水流速减缓,埋深

变浅。因潜水大面积溢出,使得该区域形成了沼泽、湿地和片状盐渍化土壤。在农灌区范围内,地下水埋深的年内变化幅度为  $0.25 \sim 1.4 \text{ m}$ 。因高温干燥的气候,地下水蒸发量大,导致潜水含盐量增高,矿化度约为  $3 \sim 10 \text{ g/L}$ ,随之水质变差。绿洲土壤主要为草甸土和棕漠土,种植业、林果业和畜牧养殖业等多种土地利用/覆被类型集中分布在人口密集、土壤条件较好、地势平坦的冲洪积绿洲平原。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 土壤样本采集及处理** 根据克里雅绿洲景观空间分布特征、土壤盐渍化程度空间差异性、土地覆盖与土地利用类型等特征,于 2014 年 7 月中旬在绿洲内部与绿洲-荒漠交错带内选择 95 个典型点位进行土壤样本采集(图 1),其中耕地采样点 45 个,交错带采样点 50 个,采样点间隔为  $1.5 \sim 5 \text{ km}$  不等,并在各点位取  $0 \sim 20 \text{ cm}$  深度的表层土样,装袋带回实验室。采用土壤学分析方法对土样进行土壤性质( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、pH 及含盐量)的测定。依据土壤盐渍化程度分级标准,参照新疆水利厅制定的《新疆县级盐碱地改良利用规划工作大纲》,将自然风干的土样碾碎过筛( $2 \text{ mm}$ ),取  $50 \text{ g}$  土样与  $250 \text{ ml}$  蒸馏水混合,经浸泡和振动使土壤盐充分溶解再进行土壤盐分及组分和 pH 等的测定<sup>[22]</sup>。其中,含盐量利用 Orion 115A+仪器测定;pH(水土比 2.5:1)采用 LP115pH-meter 酸度计法测定; $\text{HCO}_3^-$ 采用双指示剂中和法测定; $\text{Cl}^-$ 采用  $\text{AgNO}_3$  滴定法测定; $\text{SO}_4^{2-}$ 采用 EDTA 间接滴定法测定; $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Mg}^{2+}$ 采用 EDTA 络合滴定法测定; $\text{Na}^+$ 和  $\text{K}^+$ 采用差减法求得。

**1.2.2 空间自相关性分析法** 空间自相关分析是检测确定某一环境变量在空间上是否相关及其相关程度大小的一种统计方法,通常用空间自相关系数来刻画地理变量空间上的依赖关系<sup>[23]</sup>,即空间自相关系数常用来衡量物理或生态学变量的空间分布特征及其对领域的影响程度。空间自相关分析在地理统计学科中应用的较多并已有多种指数,其中最主要的两种指数是 Moran's I 和 Geary's c。Moran's I 分为全域型和区域型两种,本文将选用全域性 Moran's I 指数来度量研究区土壤含盐量、pH 和盐基离子的空间分布特征并进行全局性空间自相关检验。

**1.2.3 径向基函数插值法** 径向基函数法(radial basis function, RBF)是一种确定性插值方法,是以平滑度为基础,由已知采样点来创建表面,并把比样点高或低的未知点的值预测出来的方法。它是人工神经

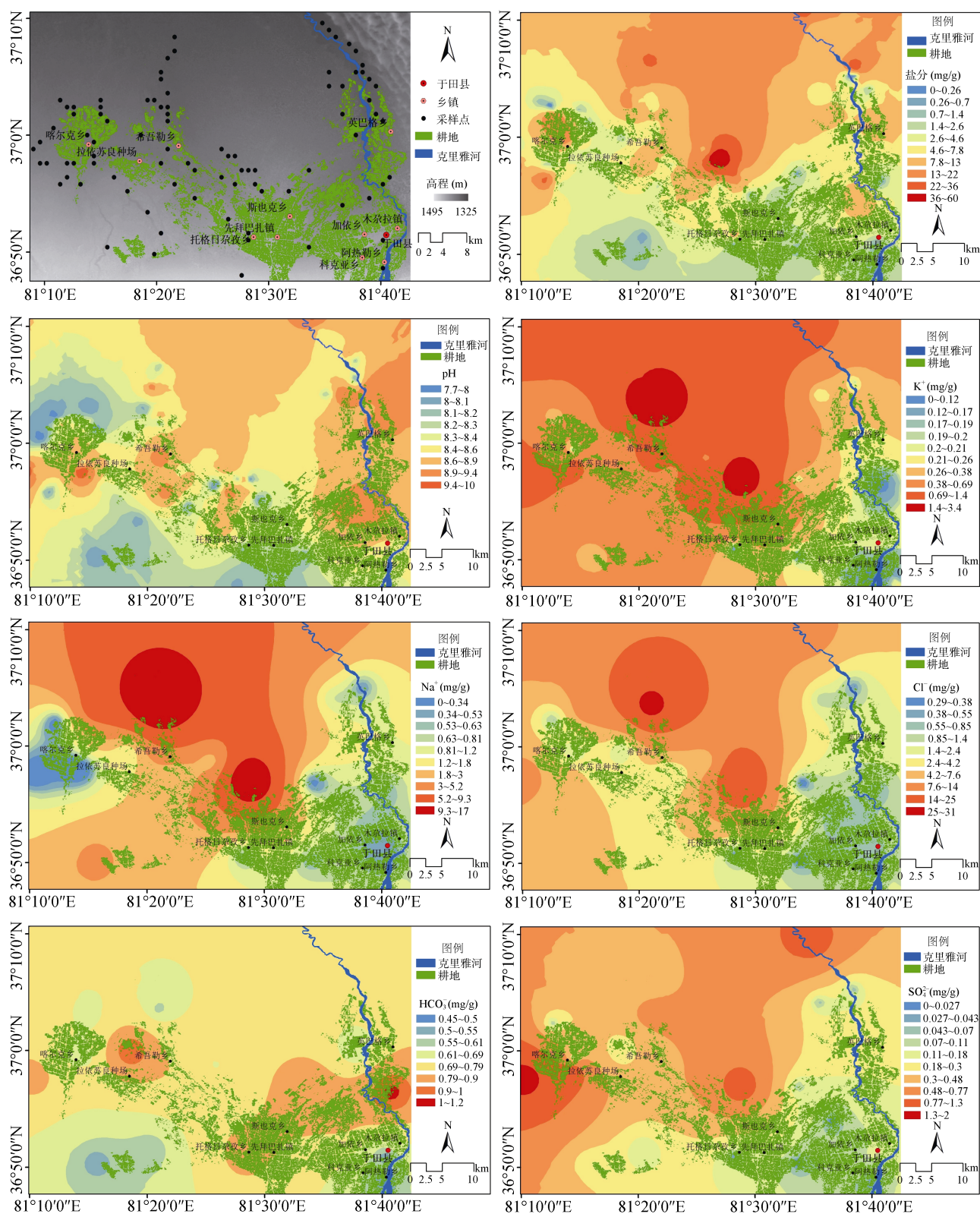


图 1 克里雅绿洲土壤采样点分布与土壤盐分、pH 和盐基离子的空间分布

Fig.1 Distribution of soil sampling sites, soil salt, pH, and base cations in Keriya Oasis

网络方法中的一种,其方法是待测点与样本点之间的欧氏距离作为自变量的函数,以径向函数为基函数,通过线性叠加构造出近似模型。常用的 5 种基函数为

反转多重二次曲面、多重二次曲面、张力样条、完全规则样条和薄板样条<sup>[25]</sup>。

其逼近函数数学表达式为：

$$y_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi(\|x - x_i\|), (i=1, \dots, n)$$

式中： $\phi(t), t \geq 0$  是一个不确定的实值函数，即上述 5 种径向基函数之一， $\|\cdot\|$  表示欧氏距离， $\alpha_i$  是待定系数，点  $x_i$  是径向基函数逼近的节点。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤盐分、pH 与盐基离子的描述性统计分析

土壤样品的理化分析结果(表 1)表明，研究区土壤含盐量平均值为 9.24 g/kg，最大值为 59.90 g/kg，最小值是 0。通常土壤总盐量是土壤溶液中各盐基离子之和，用以表示土壤盐渍化水平的高低<sup>[22]</sup>。根据我国盐渍化土壤分类标准<sup>[26]</sup>，研究区土壤盐分属于重度盐渍化土壤。

表 1 土壤盐分、pH 与盐基离子的描述性统计分析  
Table 1 Descriptive statistics of soil salt, pH and base cations

因子	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	方差	偏度	峰度
盐分(g/kg)	0.00	59.90	9.24	11.09	1.20	123.04	2.12	5.92
pH	7.67	11.60	8.56	0.65	0.08	0.42	1.84	5.13
K <sup>+</sup> (mg/g)	0.00	3.35	0.63	0.87	1.38	0.75	2.34	5.14
Na <sup>+</sup> (mg/g)	0.00	16.91	3.21	4.90	1.53	24.02	2.10	3.29
Ca <sup>2+</sup> (mg/g)	0.11	12.08	2.78	2.90	1.04	8.38	1.65	3.24
Mg <sup>2+</sup> (mg/g)	0.04	4.37	1.02	1.28	1.26	1.64	1.45	1.16
Cl <sup>-</sup> (mg/g)	0.29	30.69	5.90	8.96	1.52	80.31	2.03	3.34
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/g)	0.45	1.19	0.76	0.20	0.27	0.04	0.72	0.35
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/g)	0.00	2.02	0.39	0.57	1.47	0.33	1.73	2.07

### 2.2 土壤盐分、pH 与盐基离子的空间分布格局

利用土壤盐分、pH 与盐基离子含量的数据，采用径向基函数插值法对其进行插值并探讨各因子的空间分布特征。

#### 2.2.1 土壤盐分、pH 与盐基离子的径向基函数分析

本研究每次随机抽取 90 个样点数据来建立各个离子的空间分布预测模型，剩余 5 个样点来验证模型预测结果与实测值的误差，这样重复 10 次，即  $k=10$ 。每次建模和验证的数据均随机抽取，可保证验证过程的客观性。整个验证过程由 ArcGIS10.0 完成。在最终插值方法选择时，选取预测值和实测值之间预测误差均值(ME)最接近于 0 且均方根预测误差(RMSE)最小的插值方法。本研究主要以土壤盐分、pH 与盐基离子为对象比较交叉验证结果(表 2)。由表 2 可见，径向基函数交叉验证法的 ME 和 RMSE 均大体上符合插值方法选择标准，其中 K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 其 RMSE 略微偏高。最优理论变异函数模型及最适空间插值方法保证了空间模拟过程的准确性，因而最终的研究区

研究区土壤盐基离子各阴离子在表层土壤中的平均含量从大到小依次为 Cl<sup>-</sup> > HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，各阳离子平均含量从大到小依次为 Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup>。其中，盐基离子组成阴离子以 Cl<sup>-</sup> 为主，阳离子以 Na<sup>+</sup> 为主，因此，研究区盐分类型主要为氯化盐。从变异系数大小来看，土壤盐基离子空间变异性较显著。Na<sup>+</sup> 与 Cl<sup>-</sup> 的变化幅度远大于其他因子，pH 的变化幅度最小。变异系数(CV)反映随机变量的离散程度，一般认为 CV < 0.1 为弱变异性；0.1 < CV < 1 为中等变异性；CV > 1 为强变异性<sup>[24]</sup>。土壤盐基离子中阳离子变异系数范围为 1.04 ~ 1.53；阴离子含量变异系数范围为 0.27 ~ 1.52。土壤盐基离子中 Na<sup>+</sup> 变异系数最大为 1.53，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 变异系数最小为 0.27，Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 均具有强变异性，而 pH 变异系数极小，变异性非常弱。

土壤盐分、pH 与盐基离子空间变异特征分析结果与区域实际将更吻合。

表 2 土壤盐分、pH 与盐基离子的径向基交叉验证结果  
Table 2 Results of radial basis cross-validation of soil salt, pH and base cations

因素	规则样条函数	预测误差均值 ME	均方根预测误差 RMSE
盐分(g/kg)	222.01	-0.023	0.436
pH	451.2	0.008	0.356
K <sup>+</sup> (mg/g)	451.3	0.009	0.824
Na <sup>+</sup> (mg/g)	133.6	0.012	0.348
Ca <sup>2+</sup> (mg/g)	451.3	0.065	0.284
Cl <sup>-</sup> (mg/g)	189.4	0.036	7.607
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/g)	450.3	0.001	0.215
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/g)	451.3	-0.016	0.607

2.2.2 土壤盐分、pH 与盐基离子的空间分布 研究区土壤盐分含量从南至北方向呈逐步增大趋势(图 1)。土壤含盐量在不同的土地利用方式下均呈现明显的



表层富集现象。即使在同一种土地利用方式下,不同深度的土壤含盐量随土层深度的变化而变化,其中荒漠灌溉和盐碱草地对盐分的富集能力明显高于耕地和林业用地。研究区土壤盐分含量的空间分布除主要受地形(南高北低)因子的影响外,耕地与河流区位在一定程度上影响表层盐分聚集。农业耕地及周围区域,因农业灌溉和农业开荒等农耕措施导致周围地下水埋深及其含盐量增加,但其表层土壤盐分含量极低,且存在极轻度盐渍化现象。在英巴格乡、希吾勒乡和拉依苏良种场耕地区域存在轻度到中度土壤盐渍化现象,而在喀尔克乡耕作的部分地带出现重度盐渍化现象。研究区重度盐渍化和盐土分布中心主要集中在耕地北部的交错带以及沙漠地带,即喀尔克乡西南部交错带,希吾勒乡以东的交错带及荒漠区。除此之外,由于克里雅河流上游区域具有土壤盐分输送至下游的搬运作用,而盐分却聚集在下游表层土壤。克里雅河上游到下游,其河流周围土壤含盐量依次逐步增大。在南高北低的地形和农业灌溉排水及河流运送作用下,土壤盐分随地表水、土壤水和地下水通往绿洲南部的绿洲-荒漠交错带和荒漠带流动,并在强烈蒸散发作用下易出现表层土壤积盐现象,使得表层土壤盐分含量逐年增加,土壤盐渍化程度加大。

随着土层深度的增加,不同土地利用方式下的土壤 pH 差异越显著,且在耕地和林地利用方式下 pH 有增加趋势,而在荒漠灌丛和盐碱草地下 pH 略有下降。研究区表层土壤 pH 呈碱性(图 1),其中弱碱性(7.7 ~ 8.3)土壤主要分布在绿洲内部的耕地区域,即于田县、木尕拉镇等 6 个乡镇等,在该区域,因土壤特性,其土地利用类型主要是农业、畜牧养殖业。在英巴格乡、希吾勒乡等 5 个乡镇耕作地带土壤酸碱度呈中度碱性(8.4 ~ 8.9)。喀尔克乡灌溉渠南部东西两侧土壤呈较强碱性(9.0 ~ 10.0),其北部交错带区域土壤呈弱碱性且随着北部荒漠方向其碱性逐步增强,盐碱化、土地退化愈加严重,研究区农田南部区域土壤呈弱碱性。

$K^+$  和  $Na^+$  含量空间分布趋势基本一致(图 1)。在于田县、木尕拉镇等 6 个乡镇耕地区域  $K^+$  与  $Na^+$  含量均较低,在斯也克乡和希吾勒乡以北的交错带及荒漠区二者含量较高且均匀分布。从克里雅河的流向来看,从上游到下游两者含量依次增大。从二者空间分布看出,其最大的差异出现在喀尔克乡西部、西南部和拉依苏良种场以西区域,即  $K^+$  含量较大,而  $Na^+$  含量较小。

$Cl^-$  含量从东南往西北方逐步增大(图 1),  $Cl^-$  含量最大值集中区域分布在斯也克乡以北和希吾勒乡以

北的区域;从克里雅河上游到下游,  $Cl^-$  含量逐步增大,但研究区大部分灌溉区土壤  $Cl^-$  含量较低。 $HCO_3^-$  含量空间分布较杂乱,其最小值聚集区在东南和西南郊区域,高含量集中区分布在希吾勒乡及英巴格乡南区域。 $SO_4^{2-}$  含量从东南往西北方向逐步增大,其中,  $SO_4^{2-}$  含量最大值集中区分布在斯也克乡以北和喀尔克乡以西区域;从克里雅河上游到下游其含量逐步增大,研究区内大部分灌溉区土壤  $SO_4^{2-}$  含量均较低。

### 2.3 土壤盐分、pH 与盐基离子的空间聚集特征

空间自相关分析是不同变量在同一个分布区内的观测数据之间潜在的相互依赖性。土壤含盐量、pH 与盐基离子 Moran's I 空间自相关性分析及显著性检验结果(表 3)表明,土壤含盐量、pH 与盐基离子的 Moran's I 指数值分别为 0.124、0.118、0.190、0.196、0.087、0.135、0.192、0.339 和 0.115,且均通过了显著性检验,说明研究区土壤含盐量、pH 与各盐基离子在空间上呈现较低的空间聚集性。

表 3 土壤盐分含量、pH 与盐基离子的莫兰指数与显著性检验结果

Table 3 Moran's Indexes and significance test results of soil salt content, pH and base cations

因子	Moran's I	P 值
含盐量	0.124	0.010
pH	0.118	0.010
$Ca^{2+}$	0.190	0.001
$Cl^-$	0.196	0.001
$HCO_3^-$	0.087	0.063
$K^+$	0.135	0.001
$Mg^{2+}$	0.192	0.003
$Na^+$	0.339	0.043
$SO_4^{2-}$	0.115	0.001

注:  $P < 0.01$ , 表示通过 0.01 置信区间显著性检验。

土壤盐分含量、pH 与各盐基离子在不同距离尺度下的 Moran's I 空间自相关性界线各不相同(图 2)。其中,含盐量空间自相关性随着距离的增加而急剧减弱,其分界在距离 12.43 ~ 14.05 km,其增加趋势趋于平缓并呈现一定的规律。pH 的空间自相关性在距离该变量的 38.35 ~ 39.25 km,其自相关性的趋势随着距离的增加而逐步减弱。 $K^+$  的自相关性分界出现在距离 13.62 ~ 14.43 km,其自相关性的趋势随着距离的增加而急剧减弱。 $Ca^{2+}$  的自相关性分界在距离 31.35 ~ 32.12 km,其自相关性的趋势随着距离的增加而急剧减弱。 $Na^+$  自相关性界限出现在距离 21.58 ~ 22.01 km,其自相关性的趋势随着距离的增加趋于平缓。 $Mg^{2+}$  空间自相关性分界出现在距离 39.56 ~

40.43 km。Cl<sup>-</sup>的自相关性分界在距离 29.63 ~ 30.01 km,其自相关性的趋势随着距离的增加而减弱。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的空间自相关性界限出现于距离 13.87 ~ 14.23 km,

其自相关性的趋势随着距离的增加而急剧减弱。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的空间自相关性分界在距离 9.86 ~ 10.42 km,其自相关性的趋势随着距离的增加而急剧减弱。

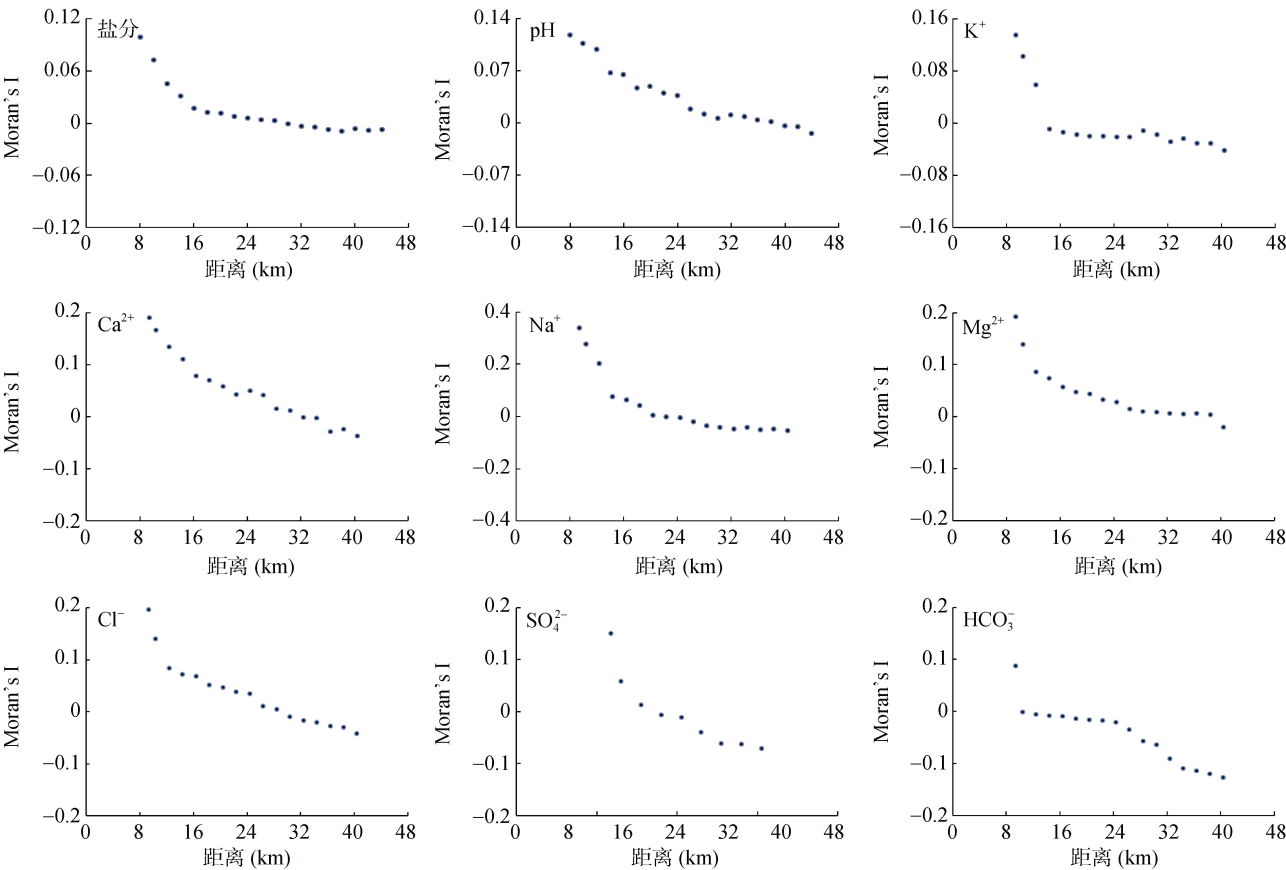


图 2 Moran's I 系数随距离的变化  
Fig. 2 Variation of Moran's I coefficient with distance

土壤盐分含量、pH 与盐基离子的 Pearson 相关性分析结果(表 4)表明,土壤盐分含量与 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量具有强正相关性( $P<0.01$ ),与 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>中等程度正相关( $P<0.05$ )。土壤 pH 与其他因

子呈极弱相关。土壤盐基离子含量中,Na<sup>+</sup>与 K<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>间存在极强正相关性( $P<0.01$ ),K<sup>+</sup>与 Cl<sup>-</sup>间存在极强正相关性( $P<0.01$ ),与 Mg<sup>2+</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量具有中等正相关性( $P<0.01$ ),与 Ca<sup>2+</sup>含量中等程度正相

表 4 土壤盐分含量、pH 与盐基离子的 Pearson 相关性分析  
Table 4 Pearson correlation analysis of soil salt, pH and base cations

	盐分	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
盐分	1								
pH	0.200	1							
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.090	0.100	1						
Cl <sup>-</sup>	0.658**	-0.176	-0.174	1					
Ca <sup>2+</sup>	0.460*	-0.070	-0.028	0.412*	1				
Mg <sup>2+</sup>	0.422*	-0.030	0.013	0.428*	0.831**	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.550**	0.044	0.065	0.530**	0.624**	0.887**	1		
K <sup>+</sup>	0.580**	-0.093	-0.108	0.960**	0.499*	0.523**	0.598**	1	
Na <sup>+</sup>	0.598**	-0.221	-0.205	0.953**	0.347	0.216	0.273	0.889**	1

注: \*\*表示在  $P<0.01$  水平显著相关; \*表示  $P<0.05$  水平显著相关。

关( $P<0.05$ )； $\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Mg}^{2+}$ 具有极强正相关性( $P<0.01$ )，与 $\text{Ca}^{2+}$ 强正相关( $P<0.01$ )，与 $\text{Cl}^-$ 存在中等程度正相关性( $P<0.01$ )； $\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 存在极强正相关性( $P<0.01$ )，与 $\text{Cl}^-$ 存在中等强度正相关性( $P<0.05$ )； $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{Cl}^-$ 存在中等强度正相关性( $P<0.05$ )。

### 3 结论

1) 克里雅绿洲表层土壤中各盐基阴离子平均含量从大到小依次为  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ ，各盐基阳离子平均含量从大到小依次为  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。盐基阴离子组成以 $\text{Cl}^-$ 为主，盐基阳离子组成以 $\text{Na}^+$ 为主，因此，研究区盐分类型主要为氯化盐。

2) 研究区土壤盐分含量从南至北呈逐步增大趋势。土壤含盐量空间分布除受地形因子影响外，耕地面积和河流分布等在一定程度上影响土地利用类型，土壤盐分呈现不等程度的聚集现象。受地形、土地类型影响，重度盐渍化土壤和盐土集中分布在耕地北部交错带和荒漠区。

3) 研究区土壤含盐量、pH与盐基离子的Moran's I指数值分别为0.124、0.118、0.190、0.196、0.087、0.135、0.192、0.339和0.115，且均通过了显著性检验，说明研究区土壤含盐量、pH与各盐基离子在空间上呈现较低的空间聚集性。

4) Pearson相关分析表明，土壤盐分含量与 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量具有强正相关性( $P<0.01$ )，说明盐渍化土壤主要为氯化盐和硫酸盐积聚。

### 参考文献：

- [1] 牛博, 倪萍, 塔西甫拉提·特依拜. 遥感技术在干旱区盐渍化动态变化分析中的应用——以新疆于田县为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(4): 78–82
- [2] Amezketa E. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67(4): 594–606
- [3] Nurmamet I, Ghulam A, Tiyyip T, et al. Monitoring Soil Salinization in Keriya River Basin, Northwestern China Using Passive Reflective and Active Microwave Remote Sensing Data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(7): 8803–8829
- [4] 郝金标, 张福锁, 毛达如, 等. 新疆盐渍土分布与盐生植物资源[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 299–303
- [5] 木合塔尔·吐尔洪, 木尼热·阿布都克力木, 西崎·泰, 等. 新疆南部地区盐渍化土壤的分布及性质特征[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(4): 22–26
- [6] 胡佳楠, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦提, 等. 于田绿洲土壤含盐量的空间异质性研究[J]. 土壤, 2017, 49(1): 162–170
- [7] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理(汉文版), 2000, 23(2): 177–181
- [8] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 45–51
- [9] 张智, 任意, 鲁剑魏, 等. 长江中游农田土壤微量养分空间分布特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1489–1496
- [10] 王合云, 李红丽, 董智, 等. 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 706–712
- [11] 张妙仙, 杨劲松. 地下水埋深对土壤及地下水盐分影响的信息统计分析[J]. 土壤, 2001, 33(5): 239–242
- [12] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1202–1210
- [13] 吐尔逊·艾山. 渭—库绿洲盐渍化土壤与地下水特征时空变化研究[D]. 新疆大学, 2012: 10–18
- [14] 邓宝山, 瓦哈甫·哈力克, 党建华, 等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤盐分时空分异及耦合分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3): 599–607
- [15] Abliz A, Tiyyip T, Ghulam A, et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 1–15
- [16] 胡佳楠, 塔西甫拉提·特依拜, 宋玉, 等. 于田绿洲盐渍土主要参数的空间异质性分析[J]. 土壤通报, 2015(6): 1328–1333
- [17] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 等. 基于灰色关联度法河口地区土壤盐分影响因子分析[J]. 土壤通报, 2010(4): 793–796
- [18] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 孙慧兰, 等. 伊犁河流域土壤盐分与地下水关系的关联分析[J]. 土壤通报, 2013(3): 561–566
- [19] 赛迪古丽·哈西木, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 等. 克里雅绿洲土壤盐分分异特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010(4): 161–166
- [20] 古丽格娜·哈力木拉提, 海米提·依米提, 阿布都沙拉木·加拉力丁, 等. 于田绿洲盐渍化土壤盐分动态变化特征分析[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(3): 541–546
- [21] 董新光, 邓铭江, 等. 新疆地下水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005: 8–9
- [22] Koenig W D. Spatial autocorrelation of ecological phenomena[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(1): 22–26
- [23] Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically Weighted Regression-Modelling Spatial Non-Stationarity[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1998, 47(3): 431–443
- [24] 魏义坤, 杨威, 刘静. 关于径向基函数插值方法及其应用[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2008, 20(1): 7–9
- [25] 李鹏飞. 径向基函数插值方法及其在倒向随机微分方程数值求解中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2012: 2–5
- [26] 丁建丽, 张飞, 江红南, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤含盐量和电导率空间变异性研究——以渭干河-库车河三角洲绿洲为例[J]. 干旱区地理(汉文版), 2008, 31(4): 624–632

## Spatial Heterogeneity of Soil Salinity, pH and Base Cations in Keriya Oasis of Xinjiang

Asigul MUSA<sup>1,2</sup>, Abdulla ABLIZ<sup>1,2</sup>, Wahap HALIK<sup>1,2\*</sup>, Ilyas NURMEMET<sup>2,3</sup>,  
LU Longhui<sup>2,3</sup>, Polat MUHTAR<sup>1,2</sup>

(1 College of Tourism, Xinjiang University, Urumqi 830049, China; 2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3 College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** In this paper, the spatial distribution characteristics of soil salinity, pH value and soluble salt ions in the Keriya Oasis were analyzed using spatial autocorrelation and radial basis function interpolation method. The results showed that saline soil had a strong surface aggregation and alkalinity, and soil salt content increased gradually from south to north. The variation coefficients of soil salinity,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  and  $SO_4^{2-}$  showed high variance,  $HCO_3^-$  showed medium variance, and pH showed low variance. The Moran's I for soil salinity, pH and base cations were lower than 0.4, indicating these variables were low spatially clustered and autocorrelated. Strong positive correlations were observed between soil salinity and  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  ( $P < 0.01$ ), indicating that saline soils are mainly composed of chlorate and sulphate. There was moderate positive correlation between soil salinity and  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  contents ( $P < 0.05$ ). Soil pH had very weak correlations with soil salinity and soluble ions. The above results provide scientific basis for the rational exploitation of water resources and the sustainable development of oasis agriculture, and are helpful to the decision support for the improvement of saline soils and the prevention and control of desertification.

**Key words:** Soil salinity; Base cations; Spatial heterogeneity; Keriya Oasis