

伊犁河谷地下水及土壤盐分分布特征

祖皮艳木·买买提^{1,2}, 海米提·依米提^{1,2}, 麦麦提吐尔逊·艾则孜^{1,2}

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

摘要: 利用化学分析和地统计学法, 分析了研究区地下水以及土壤盐分含量、离子组成特征及其分布规律。结果显示: 地下水矿化度平均值为 2.37 g/L, pH 值平均值为 7.63, 地下水中各阴离子含量由高到低依次为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$, 阳离子含量由高到低依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 地下水属于 $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ 型水; 各层土壤 pH 值表现出随土壤盐分增加逐渐增加的趋势, 土壤盐分垂直分布呈现较明显的表聚性; 在空间尺度上, 各层土壤与地下水盐分含量呈现了从研究区边缘向研究区中心增加的趋势。

关键词: 地下水; 土壤; 盐分; 空间分布; 伊犁河谷

中图分类号: S273.4; S153.6⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0058-06

土壤是植物生长的基质, 土壤盐分又是影响植物生长的重要因素。在自然条件下, 土壤的形成是一个漫长的过程, 在此过程中, 由于人为活动影响的加强, 对土壤的形成、演变和生产力的作用越来越深刻。

水资源是当今世界关注的焦点, 水质的优劣是评价水资源的重点之一^[1]。水土化学成分快速变化已经成为影响人类生存和社会发展的重要问题而倍受关注^[2]。盐渍化是干旱区土壤的一个普遍特征, 在新疆尤为严重。新疆土壤母岩和母质含盐丰富, 在自然条件下, 土壤的淋溶过程和脱盐过程十分微弱。土壤中的可溶性盐, 借助毛管水上升积聚于表层, 导致土壤普遍积盐, 形成大面积的盐土^[3]。本文以新疆伊犁河谷察布查尔县为研究对象, 对地下水及土壤的盐渍化程度、盐分组成进行分析, 将为察布查尔锡伯自治县资源开发利用提供重要的理论及参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆察布查尔县, 地理坐标: 东经 $80^{\circ}55' \sim 81^{\circ}11'$ 、北纬 $43^{\circ}45' \sim 43^{\circ}55'$ 。该区总面积 424.6 km^2 , 南高北低, 由东南向西北倾斜, 海拔 $560 \sim 740 \text{ m}$ 之间, 气候属于大陆性北温带温和干旱气候, 多年平均降水量为 277 mm , 多年平均蒸发量为

1594 mm , 多年平均气温为 7.9°C , 温度的日、年变化大^[4]。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。县内有 12 条河和 3 条干渠, 年径流量为 9.566 亿 m^3 (不含地下水)^[5]。本区内乔木主要有新疆杨等; 灌木主要有柽柳、铃铛刺等; 草本植物主要有芦苇、伊犁绢蒿; 农作物种类主要有水稻、棉花、小麦和玉米等^[6]。

1.2 数据获取

2009 年 10 月份在新疆察布查尔县根据当地土质、不同土地类型和采样点的均匀分布规则, 选择草地、林地、稻田和旱田等 4 种土壤剖面分 $0 \sim 5$ 、 $5 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 四个层次采集 260 个土样及各采样点相应的 52 个水样。同时进行了采样点的地理坐标、植被种类、地下水埋深等数据的收集。采集的土样密封带回实验室自然风干、磨碎、过 1 mm 筛后备用。所有的土样均制 $1:5$ 土水比土壤浸提液并立即测量其电导率 EC $1:5$ 、pH 值、矿化度和盐分离子组成。

HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 用双指示剂滴定法; Cl^- 用 AgNO_3 滴定法; SO_4^{2-} 用 EDTA 间接滴定法; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 用原子吸收光度法测定; 然后采用离子加和法计算出相应的土壤盐分含量^[7]。

水样密封后带回实验室测量其 pH 值、矿化度和盐分离子组成。水样的离子组成测定法同土壤盐分离子组成测定法。

收稿日期: 2010-05-31

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAC15B02); 国家自然科学基金项目(40971020, 40661002)

作者简介: 祖皮艳木·买买提(1983—), 女, 维吾尔族, 新疆阿克苏人, 在读博士研究生, 研究方向为干旱区水资源开发利用及其环境效应。E-mail: zulpiya1219@sina.com。

通讯作者: 海米提·依米提, E-mail: hyimit@sina.com。

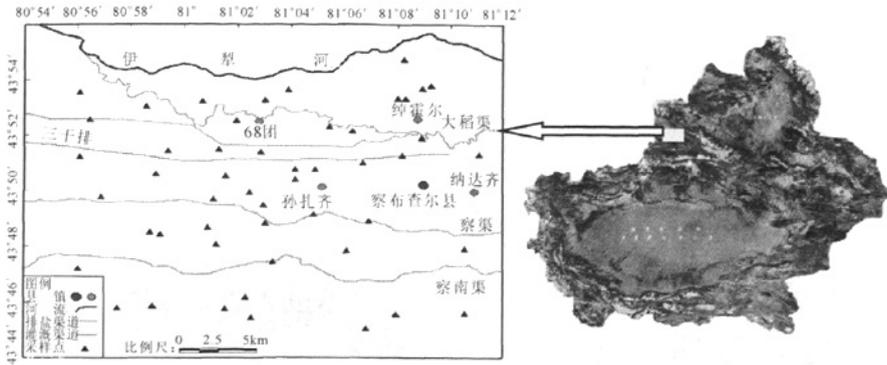


图 1 研究区示意图

Fig.1 The map of study area

1.3 分析方法

数据应用 SPSS16.0、Sigmaplot10.0、Arcgis9.2 及 Surfer7.0 等统计软件处理,并利用化学分析和地统计学的半方差函数和 Kriging 插值法,对研究区土壤矿化度进行空间变异分析。利用地统计学法可以准确、直观地了解研究区地下水和各层土壤盐分的空间分布格局,并能分析土壤盐碱化的成因及变化趋势,在伊犁河源区绿洲盐渍化土地的区分、改良、管理和合理利用中有广阔的应用前景。

半方差函数(又称半变异函数)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空间分析方法,不仅能够有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,而且可以将空间格局与生态过程联系起来,有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响^[8]。半方差函数的计算公式为:

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

式中: $r(h)$ 为半方差函数; h 为分隔两样点的距离,称为步长。 $N(h)$ 为相距为 h 的样点对数目; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值。

以 h 为横坐标, $r(h)$ 为纵坐标,即可得到半方差函数图 2。在图 2 中,3 个重要参数,即块金值(Nugget)、变程(Range)、基台值(Sill)。块金值(Nugget)是间距为 0 时的半方差,是由实验误差和小于取样尺度上随机因素共同引起的变异,较大的块金方差表明较小尺度上的某种过程不容忽视。如果无论 h 多么小,两个随机变量都不相关,这种情况称为纯块金效应。Range 为变程(半方差达到基台值的样本间距)。Sill 为基台值(半方差函数随间距递增至一定程度出现的平稳值)。基台值近似于采样方差 S^2 ,所以间距小于变程的样点是空间相关的,而间隔

大于变程的样点则无空间相关性。计算出 $\gamma(h) \sim h$ 的散点图之后,分别用不同类型的模型来进行拟合,得到模型的参数值。一般来说,最佳拟合模型应该是标准平均值(Mean Standardized)最接近零、均方根预测(Root-Mean-Square)误差最小、平均标准误差(Average Standard Error)最接近于均方根预测(Root-Mean-Square)误差、标准均方根预测(Root-Mean-Square Standardized)误差最接近于 1。最后用交叉验证法(Cross-validation)来修正模型的参数。模型的选择利用 Arc GIS 中的交叉验证,选用最优参数,确定最佳模型。选择克里格最优内插法,利用区域化变量的原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估计,最终生成土壤盐分含量空间分布图。

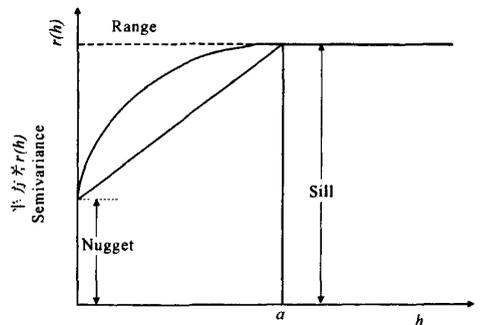


图 2 半方差函数理论模型

Fig.2 Theoretical model of semivariogram

克里格法(Kriging)是一种统计学插值方法,它是利用原始数据和半变异函数的结构性,根据已知点的属性,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估计的一种方法。克里格最优内插法依赖于数学模型和统计模型。设在一区域内采样点 X_0

处某一变量的估测值为 $z^*(x_0)$, 周围在相关范围内有 n 个已测定值 $z(x_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。通过 n 个测定值 $z(x_i)$ 的线性组合来求估测值 $z^*(x_0)$, 则公式为:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(x_i) \quad (2)$$

式中, λ_i 是与 $z(x_i)$ 位置有关的加权系数。Kriging 内插法是根据无偏估计和方差最小两项要求来确定上式中的系数 λ_i 的, 故称为最优内插法。若使估计值 $z^*(x_0)$ 最优, 必须满足以下条件, 即:

$$E\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\} = 0 \quad (3)$$

$$E\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\}^2 = \text{Min} \quad (4)$$

式(3)、(4)中 $Z(x_0)$ 为位置 x_0 处的真值。

2 结果与分析

2.1 地下水化学特征

为了充分保障采样的典型性和代表性, 在采样时选取全区的不同土地类型。通过对所采集到的地下水样进行分析, 获得了地下水的基本情况, 如表 1 所示。

表 1 研究区地下水化学特征

Table 1 Chemical characters of groundwater in study area

类型 Type	地下水埋深 Depth (m)	pH	全盐量 Total salt (g/L)	离子浓度 Ion concentration (g/L)									
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	阴离子 总量 Total anions	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	阳离子 总量 Total cations
草地 Grassland	1.22	7.63	8.46	0.08	1.3	4.45	1.78	7.61	0.06	0.16	0.43	0.2	0.85
林地 Forest	3.53	7.73	1.71	0.12	0.25	0.43	0.33	1.13	0.03	0.14	0.34	0.07	0.58
稻田 Paddy	1.36	7.57	3.52	0	0.75	1.12	0.92	2.80	0.01	0.25	0.32	0.14	0.72
旱田 Dryland	2.62	7.58	2.98	0	0.55	1.01	0.88	2.44	0.02	0.08	0.35	0.09	0.54

从地下水样品的分析结果可知, 研究区地下水的 pH 值在 7.57 ~ 7.73 之间, pH 值平均值为 7.63, 呈弱碱性。地下水中 Cl⁻ 摩尔数占阴离子总数的 50.63% ~ 71.3%, Ca²⁺ 的摩尔数占阳离子摩尔总数的 45% ~ 60%。地下水矿化度平均值为 2.37 g/L, 地下水中 CaCl₂ 含量占地下水全盐量的 53.71%, 地下水盐分组成离子中 Ca²⁺ 和 Cl⁻ 占绝对优势。地下水中各阴离子含量由高到低的顺序依次为 Cl⁻ > SO₄²⁻ > HCO₃⁻ > CO₃²⁻; 地下水中各阳离子含量由高到低的顺序依次为: Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺。

2.2 地下水埋深及地下水矿化度

当地微地形起伏不大, 在 1.60 m 范围内波动。通过野外测量得知当地地下水埋深大致在 0.60 ~ 2.50 m 之间。地下水样品所处的典型剖面主要分布水稻、棉花、杂草、芦苇、新疆杨等植被类型。通过地下水埋深与植被类型的比较可见, 地下水埋深与植被类型之间存在明显的对应关系, 通常按照杂草 → 杨树 + 杂草 → 棉花 → 芦苇 → 水稻的顺序地下水埋深逐渐减少。

地下水矿化度值为 1.71 ~ 8.46 g/L 之间, 矿化度变化范围比较大。各种植被类型所对应的地下水矿化度没有明显呈现出与这些植被类型的耐盐性能变化顺序一致的变化规律, 这表明地表盐分含量不仅与地下水矿化度有关, 而且与地下水埋深密切相关。

关, 即地表土壤盐分含量受地下水埋深与地下水矿化度的双层影响。在研究区内, 地下水矿化度的最小值对应的植被类型为水稻, 可见水稻的泡田、淋洗水分使得地下水的淡水得到了补充, 从而使地下水进一步淡化。这表明种稻洗盐效果明显; 在合理利用淡水资源的前提下, 在盐渍化的区域应当优先选择种植水稻, 加速盐渍土改良进程。地下水矿化度最大值为 8.46 g/L, 其对应的植被类型为草本植物, 且草本植物生长较为稀疏。这表明, 地下水矿化度与土壤母质有关。

2.3 土壤盐分与离子组成

根据研究区的实地情况, 选择草地、林地、稻田、旱田 4 种典型土壤剖面分 0 ~ 5、5 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 四个层次进行全盐量及其组成分析(图 3); 这 4 种土壤剖面所对应的植被类型分别为杂草、新疆杨树 + 杂草、水稻、棉花。各层次土壤的 pH 值表现出随土壤盐分增加逐渐增加的趋势, 但是在各层次内土壤的 pH 值都在 8.2 以下, 呈现出较弱的碱性特征。

由分析结果可知: 不同土壤剖面的含盐量垂直变化比较大, 土壤含盐量从土壤表层往下层逐渐降低。从表层到 20 cm 处, 随着深度增加盐分递减速度很快, 20 cm 以下土壤盐分随着深度增加, 盐分递减速度明显变缓。土壤盐分的垂直分布呈现出明显的盐分表聚特征。这表明, 在自然条件下土壤盐分

的发展趋势是积盐,种稻淋盐效果显著。在各层次内土壤盐分中 Ca^{2+} 、 Cl^- 含量所占的比重基本保持

稳定,并且各土壤剖面中的含量所占全含盐量比重的相对大小与土壤全含盐量的相对大小规律一致。

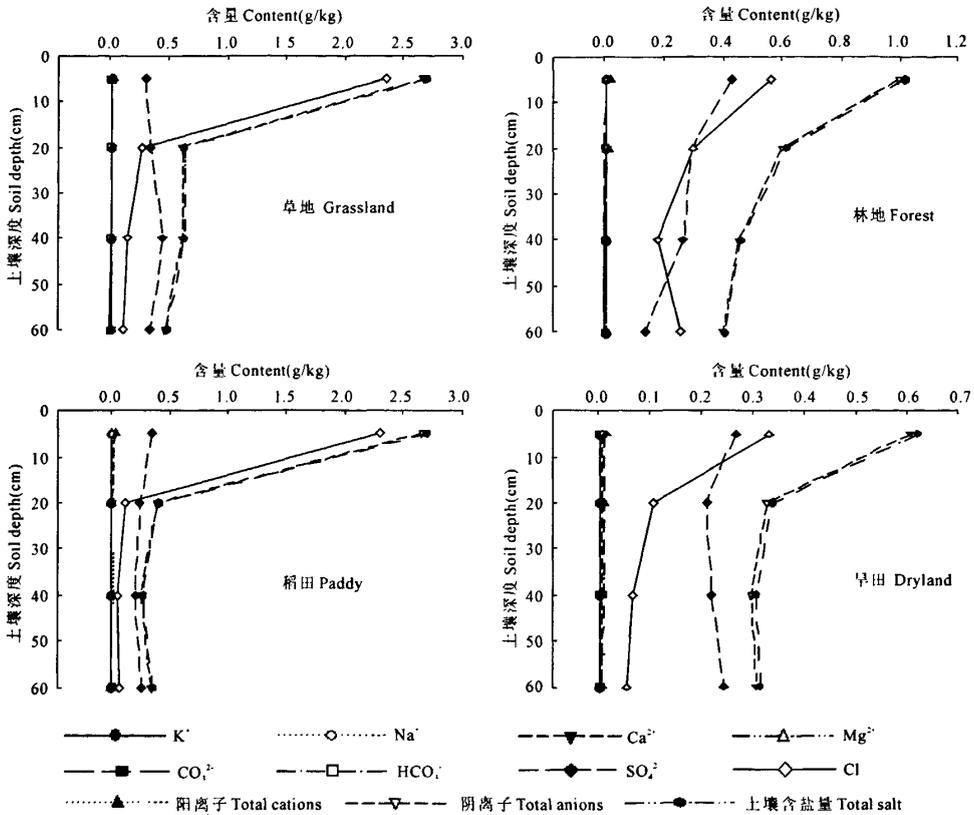


图 3 土壤盐分垂直分布

Fig.3 The vertical distribution of soil salinity

2.4 地下水及土壤盐分特征

2.4.1 盐分空间分异特征 为了解研究区土壤盐分在不同层次的变化情况,把地下水和土壤盐分数据,利用 Arc GIS 中的交叉验证,选用最优参数,确定最佳模型,结果见表 2。其中,块金值 C_0 是间距 h 为 0 时的半方差,称为块金系数 (Nugget coefficient),或块金效应 (Nugget effect),它反映了在最小间距内的土壤含盐量变异性性和测量分析过程中引起的误差,较大的块金方差值说明较小尺度上的某种过程不容忽视。基台值 (Sill) 通常表示系统内总的变异。空间相关性为块金值与基台值之比,比值小于 25%,说明变量具有强烈的空间相关性,比值在 25% ~ 75%,变量具有中等的空间相关性,大于 75%,变量空间相关性很弱^[9]。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,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。

由表 2 可见,各层次土壤盐分的块金值都比较小,这说明在最小间距内的变异分析过程中引起的误差较小。地下水盐分的变程范围内观测值之间存在着一定的相关关系。各层次土壤盐分的变程在 0.078 ~ 0.089 km 范围内,在这个范围内,土壤盐分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。地下水、表层和 5 ~ 20 cm 土壤盐分空间相关性均在 25% ~ 75% 之间,具有中等的空间相关性。20 ~ 40 cm 层的土壤盐分空间相关性均小于 25%,具有强烈的空间相关性。地下水和各层次土壤盐分拟合的理论模型都符合球状模型。

2.4.2 盐分 Kriging 插值结果 根据所得到的半方差函数模型,运用 Kriging 最优内插法,通过已知点来推测未知点的含盐量以估计其周围采样点特征。插值结果见图 4,等值线密集的地方空间变异比较大。

表 2 地下水和土壤盐分的空间变异参数

Fig.2 The spatial variation parameters of groundwater and soil salinity in study area

地下水及土层 Groundwater and soil	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value	基台值 Sill value	空间相关性(%) Spatial correlation	变程(km) Variable range
地下水 Groundwater	球状模型 Spherical model	0.598	1.655	36.00	0.084
0~5 cm	球状模型 Spherical model	1.558	3.172	49.15	0.088
5~20 cm	球状模型 Spherical model	0.756	1.644	45.98	0.078
20~40 cm	球状模型 Spherical model </tr				

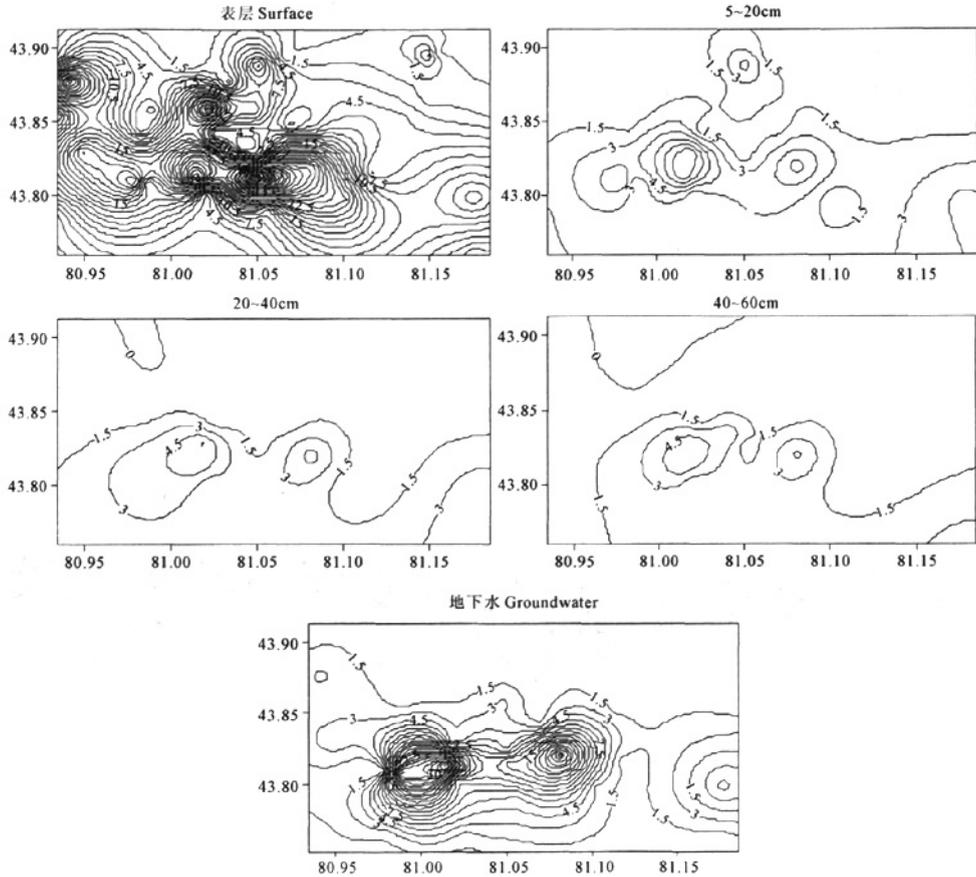


图 4 研究区地下水及土壤各层次矿化度块状 Kriging 估值等值线图

Fig.4 Histogram of the ground water and soil in vertical profile salinity Kriging estimation over a block at study area

从图 4 可以看出,表层含盐量在坐标值 $43.77^{\circ} \sim 43.88^{\circ}$ 、 $80.93^{\circ} \sim 81.07^{\circ}$ 范围内空间变异性大于 $43.88^{\circ} \sim 43.91^{\circ}$ 、 $80.93^{\circ} \sim 81.15^{\circ}$ 、 $43.75^{\circ} \sim 43.91^{\circ}$ 、 $81.07^{\circ} \sim 81.18^{\circ}$; $5 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 层的含盐量空间变异性主要在 $43.80^{\circ} \sim 43.85^{\circ}$ 、 $80.97^{\circ} \sim 81.10^{\circ}$ 范围内,变化不大。地下水含盐量在 $43.78^{\circ} \sim 43.84^{\circ}$ 、 $80.97^{\circ} \sim 81.10^{\circ}$ 范围内空间变化比较大。西南部变化大。总的来看,含盐量空间变化在研究区南部大于北部,西部的变化大于东部;从表

层往下层含盐量空间变化逐渐减少。地下水含盐量空间变化集中在研究区的西南部。其原因是土壤盐分的空间分布与微地形、气候、地下水性质等自然因素和农田灌溉等人为因素有关。研究区北部土地利用以稻田种植为主,种稻淋盐效果显著。南部是草地和旱田等,在农业生产过程中引水及灌溉提高了地下水位,因而深层土壤以及地下水中的可溶性盐类借助毛细管作用上升并积聚于表层。随着土壤剖面深度的增加,微地形、气候等因素对土壤盐分空间

分布的影响逐渐减弱,土壤盐分主要受地下水的影
响。

3 结 论

通过采样分析及数值拟合,可获得有关研究区
地下水及土壤盐分的主要研究成果:

1) 地下水矿化度微域差异比较显著,地下水矿
化度值在 1.71 ~ 8.46 g/L 之间,地下水 pH 值平均
值为 7.63,呈弱碱性。地下水埋深较浅,在 0.60 ~
2.50 m。地下水表现为典型的 $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ 型水,其
中 CaCl_2 含量占地下水全盐量的 53.71%。地下水
中各阴离子含量由高到低的顺序为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} >$
 $\text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$; 地下水中各阳离子含量由高到低的
顺序依次为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。

2) 在土壤含盐量中, CaCl_2 所占全盐量的比重
表现出随土壤全盐量增加而增大的规律性。在自然
条件下,不同区域土壤盐分呈表聚趋势。种稻洗盐
对于改善土壤盐渍化的效果显著。在淡水资源许可
的前提下,在本区域应当优先选择种植水稻,促进盐
渍土改造进程。

3) 利用半方差函数和 Kriging 插值法,通过等值
线图对研究区的盐渍化土壤特征进行空间分析,反
映出局部地的具体变化。研究区各土层含盐量的空
间分布表现为条带状和斑块状,南部的含盐量空间

变化大于北部,西部的变化大于东部。地下水、表层
和 5 ~ 20 cm 土壤盐分空间相关性均在 25% ~ 75%
之间,具有中等的空间相关性。20 ~ 40 cm 层的土壤
盐分空间相关性均小于 25%,具有强烈的空间相关
性。地下水和各层次土壤盐分拟合的理论模型都符
合球状模型。

参 考 文 献:

- [1] 叶 浩,王贵玲,叶思源,等.宁夏南部月亮山西麓地下水化学
特征研究[J].地球学报,2001,22(4):330—335.
- [2] 龚家栋,程国栋,张小由,等.黑河下游额济纳地区的环境演变
[J].地球科学进展,2002,17(4):491—497.
- [3] 吴三保,彭 斌.新疆土壤[M].北京:科学出版社,1996:304.
- [4] 察布查尔锡伯自治政府.察布查尔锡伯自治概况[M].乌鲁木
齐:新疆人民出版社,1986.
- [5] 王姣研,路京选.伊犁河流域水资源开发利用的水文及生态效
应分析[J].自然资源学报,2009,24(4):1297—1307.
- [6] 张军民.伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J].
干旱气象,2006,24(2):1—4.
- [7] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版
社,1999:86—91.
- [8] 李凤全,吴樟荣.半干旱地区土地盐碱化预警研究以吉林省西
部土地盐碱化预警为例[J].水土保持通报,2002,22(1):57—
59.
- [9] 苏里坦,宋郁东,张展羽.新疆渭干河流域地下水含盐量的时空
变异特征[J].地理学报,2003,58(6):854—860.

The distribution of salinity of soil and groundwater in Ili River valley

Zulpiya Mamat^{1,2}, Haimiti Yimiti^{1,2}, Mamattursun Aziz^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Xinjiang University, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract: Salinity of soil and groundwater, main ions components and their distribution in the study area were analyzed. The results showed that: The average value of groundwater salinity was 2.37 g/L, and the average pH value was 7.63. The abundance of anions in groundwater was in the following order: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$, while the abundance of cations in groundwater was in the following order: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, and the chemical type of groundwater belonged to $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ type of water. The pH value of each soil layer increased gradually with the increase of soil salinity, and the soil salinity was accumulated at the soil surface. In the spatial scale, the salinity of each soil layer and groundwater was increased from the marginal parts to central parts of the study area.

Keywords: groundwater; soil; salinity; spatial distribution; Ili River valley