

塔里木河源流区绿洲土壤含盐量空间变异 和格局分析——以岳普湖绿洲为例

赵锐锋^{1,2}, 陈亚宁^{1,2,*}, 洪传勋³, 李卫红^{1,2}, 白云岗³

(1. 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049)

摘要: 基于区域变量理论, 在 GPS 和 GIS 技术支持下, 通过地统计学的半变异函数和 Kriging 空间插值, 以岳普湖绿洲为例, 定量分析塔里木河源流区绿洲不同层次土壤盐分的空间异质性。结果表明: 0~30cm、30~60cm 和 60~100cm 土壤盐分半方差函数的理论分布模型属于指数模型, 100~200cm 属于球状模型。不同土层之间的空间自相关范围具有明显的差异, 由表层至深层, 土壤盐分的自相关范围逐渐增大。土壤盐分的空间格局分析表明, 在水平方向上, 研究区各层土壤盐分的高值区主要集中在分布在人类活动强烈、靠近河渠水源和地势较为低洼区域; 在垂直方向上, 土壤表层盐分含量最高, 向深层逐渐减少。

关键词: 地统计学; GIS; 土壤盐分; 空间变异; Kriging 插值; 塔里木河

文章编号: 1000-0585(2008)01-0135-10

1 引言

土壤作为历史自然体, 受气候、生物、母质、地形、成土时间等诸多因素的影响, 具有复杂性和高度的时空变异性, 不论在大尺度上还是在小尺度上, 土壤的空间变异性均存在^[1,2]。由于土壤特性是一种区域化变量, 同时具有地质结构的特性和统计学的随机特性, 基于区域变量理论的地统计学已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一^[3~5]。地统计学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^[6]。对土壤特性, 尤其是土壤盐分空间变异的充分了解是管理好土壤和防治土壤盐渍化的基础。近些年来 GIS、GPS 技术的发展, 也为研究相对较大尺度上土壤盐分的空间变异性提供了准确、便捷的工具^[7]。

近年来, 国内外学者对不同尺度土壤盐分空间变异的研究逐渐增多。Douaik 等^[8]对匈牙利东部田间土壤盐分的空间变异性进行了分析。Cemek 等^[9]对土耳其北部的冲积平原农田土壤盐分空间变异的研究得出, 土壤盐分的空间变异性主要由地下水位、排水、灌溉系统以及微地形等外因控制。白由路等^[10]研究了黄淮海平原土壤盐分及其组成的空间变异特征, 将影响盐分分布的因素划分为稳定因素和随机因素。杨玉建等^[11]在分析典型潮土区土壤耕层盐分含量空间变异的基础上, 总结了引起盐分含量变化的原因。徐英

收稿日期: 2007-01-23; 修订日期: 2007-07-10

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-03)和国家自然科学基金(90502004, 30500081)共同资助

作者简介: 赵锐锋(1976-), 男, 甘肃漳县人, 博士研究生。主要从事景观生态学研究。E-mail: zhaoruifeng@126.com

* 通讯作者: 陈亚宁, 博士, 博导。从事干旱区环境与生态学研究。E-mail: chenyn@ms. xjb. ac. cn

等^[12]在河套平原的研究表明采样尺度的划分和选取与土壤水分、盐分的空间变异密切相关。姚荣江、杨劲松、王红等^[13~16]分别对黄河三角洲地区土壤盐分的空间变异特征、合理采样数目及 CoKriging 法估值进行了研究,揭示土壤盐分空间变异的控制因素。以上研究大部分以内陆平原地区为主,而对于干旱区绿洲土壤盐分的空间变异研究较少^[17,18],特别是对我国第一大内陆河塔里木河源流区绿洲土壤盐分空间变异的研究更为缺乏,而塔里木河源流区地下水资源丰富,水位埋深浅、降雨稀少以及蒸发强烈等自然因素和人为因素造成该区域土壤盐碱化问题十分突出,土地资源质量改良势在必行^[19]。本研究以岳普湖绿洲为例,通过野外调查、采样及 GIS 和地统计分析相结合的方法,探讨在人为作用下干旱内陆河源流区绿洲土壤盐分的空间变异特征,为该地区盐渍化土壤的分区、改良和利用提供一定的理论基础,同时为塔里木河流域综合治理提供一定的参考。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

研究区选择在新疆西南部的岳普湖绿洲(图 1),地处塔里木河源流区,盖孜河下游,地理坐标为 $76^{\circ}23'E \sim 77^{\circ}25'E$, $38^{\circ}48'N \sim 39^{\circ}20'N$ 。研究区土地面积为 1756.27km^2 。整个研究区地势平坦,地面自西南向东北方向倾斜,坡降 $1\text{‰} \sim 1.2\text{‰}$,海拔 $1170 \sim 1250\text{m}$,年降水量约 51.7mm ,多年平均蒸发量为 2651mm ,年均温度 11.7°C ,无霜期 214d , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年有效积温约为 4354°C ^[20]。土壤质地较轻,以壤土、沙壤土为主,土壤类型主要有潮土、灌淤土、草甸土、盐土和风沙土。自然植被主要有柽柳 (*Tamaricaceae*) 科植

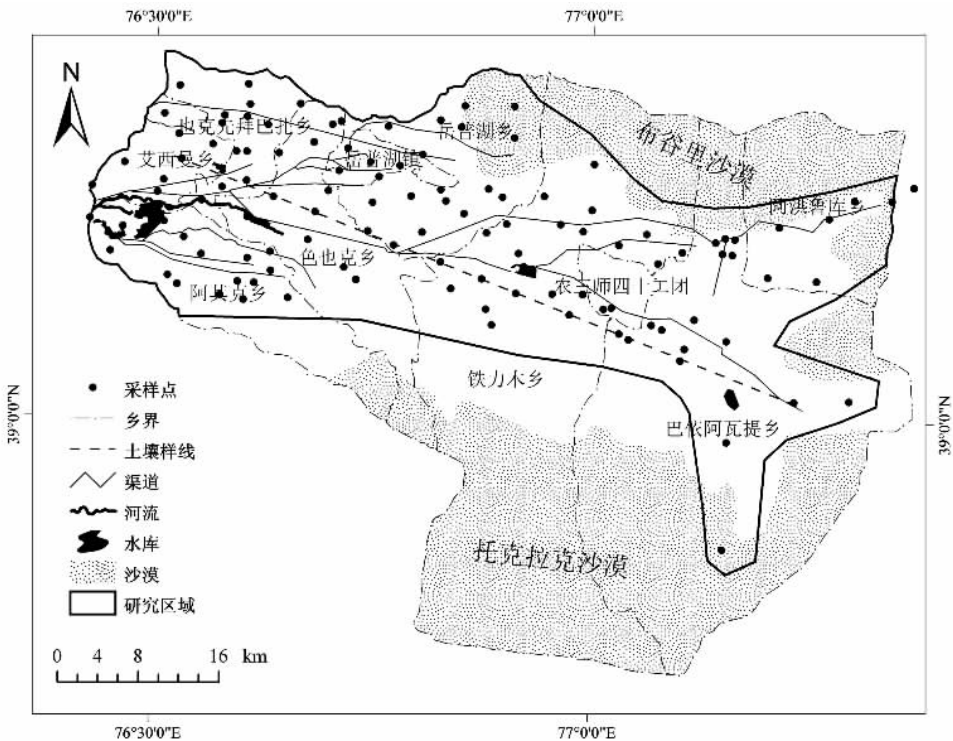


图 1 研究区及土壤样点分布示意图

Fig. 1 Location and distribution map of soil samples in the study area

物、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*)、西伯利亚白刺 (*Nitraria sibirica*)、花花柴 (*Karelinia caspica*)、芦苇 (*Phragmites communis*)、甘草 (*Glycyrrhiza uralensis*)、苦豆子 (*Sophora alopecuroides*)、泡泡刺 (*Nitraria sphaerocarpa*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 等。种植作物主要有小麦、玉米、大豆及棉花等。由于地处内陆干旱区,蒸发强烈,灌溉不当、排水不畅,加之土体母质含盐量较多,造成灌区土壤严重次生盐渍化^[19]。

2.2 样点布设及测定方法

2.2.1 样点布设 本研究采用 GPS 定位技术,以岳普湖县 1:100000 地形图和 2000 年土地利用现状图为基础底图,对岳普湖绿洲土壤进行定点取样,取样时兼顾代表性和均匀性,原则上每 3km 取一个点,同时为了探明土壤盐分的垂直变化规律,选择一条典型样线,从研究区西部艾西曼乡纵穿岳普湖绿洲至东部巴依阿瓦提乡托克拉沙漠边缘,样线和样点分布见图 1。每个样点挖 2m×2m 的土壤剖面,挖至地下水出露,澄清 15~20 分钟后测地下水埋深并取水样。土壤取样层次为 0~30cm、30~60cm、60~100cm 和 100~200cm,共取样点 118 个。采样时间为 2005 年 7 月~2005 年 8 月。

2.2.2 样品处理与分析 对所采集的土壤样品进行风干,过 1mm 筛,然后以 5:1 的水土比进行抽滤浸提,按常规方法进行土壤盐分及其组成的测定^[21]。

2.2.3 数据处理方法

1) 将 GPS 测得的带有坐标记录的采样点数据利用地理信息系统软件 Arcgis9.0 转为具有空间坐标的空间点,并进行投影转换,生成用于地统计学分析的样点分布图;

2) 样本的描述性分析采用 SPSS11.5 软件进行,用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验数据是否呈正态分布;

3) 半方差函数和 Kriging 插值应用地统计学处理软件 GS⁺ for windows 5.3b 进行计算。步骤为:(1) 在 GS⁺ 软件中对不符合正态分布的数据源进行对数转换;(2) 半方差函数的计算、模拟、分析和检验;

4) 利用 Arcgis 地理信息系统软件的 Geostatistical Analyst 模块,根据拟合的模型及其参数进行 Kriging 插值,生成 2 维空间分布图。

2.3 地统计学分析

采用半方差函数进行地统计学分析,其理论模型及参数的确定见参考文献^[22,23]。为了更直观地反映土壤盐分的空间分布状况,根据所得到的半方差函数模型,利用 Kriging 最优内插法^[24],绘制土壤盐分分布特征图。

3 结果与讨论

3.1 土壤盐分的统计特征分析

按经典统计方法,不同层次土壤盐分的统计特征值列于表 1。全部采样点为 118,剔除其中的异常点后,0~30cm、30~60cm、60~100cm 和 100~200cm 土壤盐分的样本数分别为 118、117、117 和 115。由表 1 可以看出,研究区不同层次土壤含盐量普遍较高,根据新疆土壤盐碱化的分级标准^[25],0~30cm 和 30~60cm 土壤盐分的均值分别为 17.44g/kg 和 11.67g/kg,属于重度盐化;60~100cm 和 100~200cm 的均值分别为 9.10g/kg 和 8.14g/kg,属于中度盐化。从偏度和峰度两项指标可看出,研究区各层土壤含盐量正偏差数值较大,均呈右偏,除表层土壤呈“平顶峰”外,其他三层土壤均为“尖

顶峰”。变异系数 (C_v) 反映的是相对变异, 即随机变量的离散程度。根据相关研究, $C_v \leq 0.1$ 为弱变异性; $0.1 < C_v < 1$ 为中等变异性; $C_v \geq 1$ 为强变异性^[26]。研究区各层土壤盐分的变异系数虽然属于中等变异性, 但变异性均比较高, 接近于强变异性, 分别为 0.959、0.941、0.877 和 0.860, 从表层向深层变异系数逐渐降低, 这可能与人为灌排、耕作方式不当有关, 使得表层土壤盐分的变异系数较大。土壤特性数据的正态分布性检验是使用地统计学 Kriging 方法进行土壤特性空间分析的前提, 由于半方差函数的计算一般要求数据符合正态或近似正态分布, 否则可能存在比例效应^[27]。根据 K-S 检验各层土壤盐分的原始数据均不属于标准正态分布 (表 1), 经对数转换后, 消除了可能存在的比例效应, 经检验, 4 组数据均服从正态分布。

表 1 研究区不同层次土壤盐分统计特征值

Tab. 1 Statistical feature values of soil salinity for each soil depth in the study area

土壤盐分(g/kg)	样本数	平均值	标准差	最大值	最小值	峰度	偏度	变异系数	相伴概率 P*
0~30cm	118	17.44	16.72	63.83	0.34	-0.024	0.969	0.959	0.008
30~60cm	117	11.67	10.99	50.61	0.29	0.890	1.169	0.941	0.010
60~100cm	117	9.10	7.98	43.56	0.35	2.574	1.350	0.877	0.026
100~200cm	115	8.14	7.81	46.73	0.32	4.861	1.859	0.860	0.006

注: * $\alpha=0.05$ 的双侧检验。

3.2 土壤盐分的空间变异特征分析

3.2.1 土壤盐分空间变异的半方差分析 本研究利用 SPSS11.5 软件进行分析, 用 K-S 检验对数据的正态分布进行了检验, 并在 GS⁺ 地统计学软件中对不符合正态分布的数据源进行对数转换, 使其符合正态分布。不同层次土壤的含盐量表现出了空间等方向性, 其半方差模拟模型及其拟合参数见表 2, 地统计学分析的半变异函数图及其模型拟合结果见图 2。从中可以看出土壤盐分的空间变程由土壤表层到深层逐渐变大, 分别为 56.40km、91.10km、114.10km 和 160.00km, 这是由于表土层受结构性因素 (或者称稳定因素) 影响相对较小, 而受人为因素 (或称随机因素) 影响较大, 随着土壤深度的增加, 后者影响逐渐减小, 前者影响加强, 土壤含盐量的稳定范围加大。表面三层土壤盐分的半变异函数符合指数模型, 其决定系数分别为 0.855、0.676 和 0.864, 100~200cm 符合球状模型, 决定系数为 0.924。

表 2 不同层次土壤盐分变异函数理论模型及其拟合参数

Tab. 2 Best-fitted semivariogram models of soil salinity for each soil depth and corresponding parameters

土壤盐分	理论模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金值/基台值 ($C_0/(C_0+C)$)(%)	变程 (km)	决定系数 R^2	残差 RSS	F 检验
0~30cm	指数模型	1.585	3.170	0.500	56.40	0.885	0.222	19.87**
30~60cm	指数模型	1.401	2.803	0.500	91.10	0.676	0.338	4.63*
60~100cm	指数模型	1.099	2.796	0.393	114.10	0.864	0.133	16.20**
100~200cm	球状模型	0.870	2.516	0.346	160.00	0.924	0.117	32.11**

注: * 为 F 检验, $\alpha=0.05$ 的显著水平; ** $\alpha=0.01$ 的显著水平。

在半方差函数模型中, 块金值 C_0 是由实验误差和小于取样尺度上土地利用、灌溉、施肥、管理水平等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^[28]。C 为结构方差, 由土壤母质、地形、地貌、气候等非人为的结构性因素引

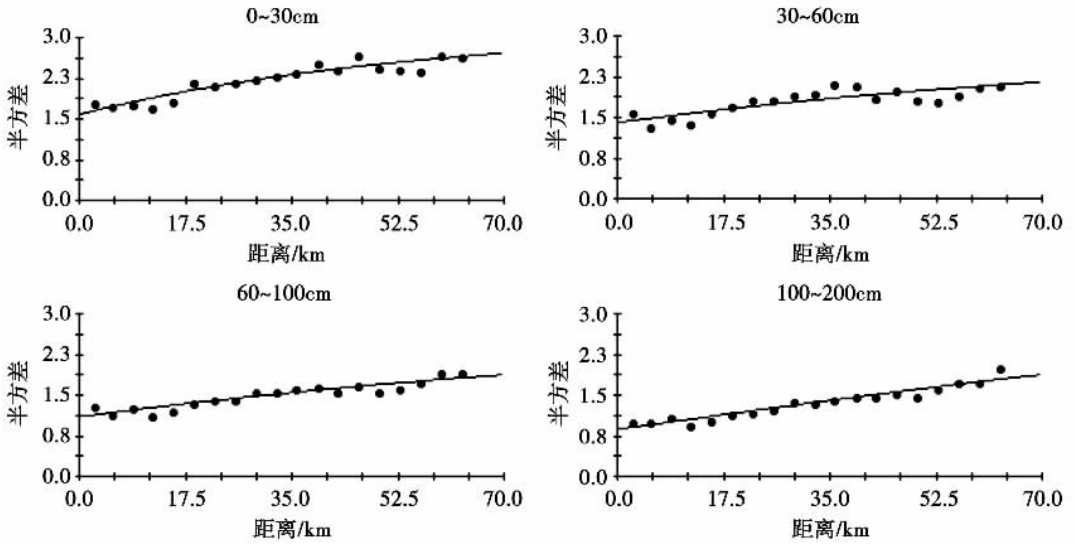


图 2 研究区不同土层土壤含盐量的半方差图

Fig. 2 The semivariograms of soil salinity for each soil depth in the study area

起的变异。 $(C_0 + C)$ 为基台值 (半方差函数随间距递增至一定程度后出现的平稳值), 表示系统内总的变异。从表 2 可见: 各层的基台值均为正值, 尤其是 0~30cm 土层, 说明存在着由采样误差或最小距离内的变异或随机和固有变异引起的各种正基底效应。块金方差/基台值之比 $(C_0)/(C_0 + C)$ 表示空间变异性程度 (由随机性因素引起的空间变异性占系统总变异的比), 该比值高, 说明由随机分布引起的空间变异性程度较大, 相反则由结构性因素引起的空间变异性程度较大, 如果该比值接近 1, 则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。按照区域化变量空间相关性程度的分级标准^[29], 当 $(C_0)/(C_0 + C) < 25\%$, 变量具有强烈的空间相关性; 在 $25\% \sim 75\%$ 之间, 变量具有中等的空间相关性; 当该比值 $> 75\%$ 时, 空间相关性很弱。各层土壤含盐量的块基值比在 $34.6\% \sim 61.2\%$ 之间, 具有中等空间相关性, 但从表层到深层, 块基值比逐渐降低, 表明空间相关性逐渐增加, 受结构性因子影响逐渐加大。研究区土壤盐分的空间变异性除了受结构性因子的影响外, 人为的灌溉、施肥和管理水平等生产管理措施也起到了很大的作用。表层 (0~30cm) 土壤是受人为因素影响较大的层次, 致使该层土壤盐分在小的范围内表现出较大的差异; 深层 (100~200cm) 土壤的块金系数最小, 结构方差较大, 说明土壤受结构性因素影响较大, 在较大的范围内表现出变异性。

3.2.2 土壤盐分的分维分析 从不同层次土壤盐分的分维图 (图 3) 可以看出, 随机性因素强、结构性差、分布复杂时分维数高 (如 0~30cm 土壤层含盐量); 相反, 当随机性因素差、结构性好、分布简单时分维数低 (如 100~200cm 土壤层含盐量)。4 层土壤盐分的分维数均在 1.891~1.937 之间, 除 30~60cm 土壤外, 其余三层的线性相关比较好 ($R^2 > 0.65$)。100~200cm 土壤盐分的分维数最低, 说明由随机性因素引起的空间异质性程度低, 结构性分布简单, 由空间自相关引起的空间异质性程度最高。分维数与块金值、基台值等参数也有一定的联系。在各层土壤盐分中, 0~30cm 土壤的块金值最大, 基台值最高, 分维数相对较大; 100~200cm 土壤的块金值最小, 基台值最小, 分维数最小, 表明如果随机部分引起的空间异质性占较大的比重, 那么它的分维数值较高。因此, 分维数

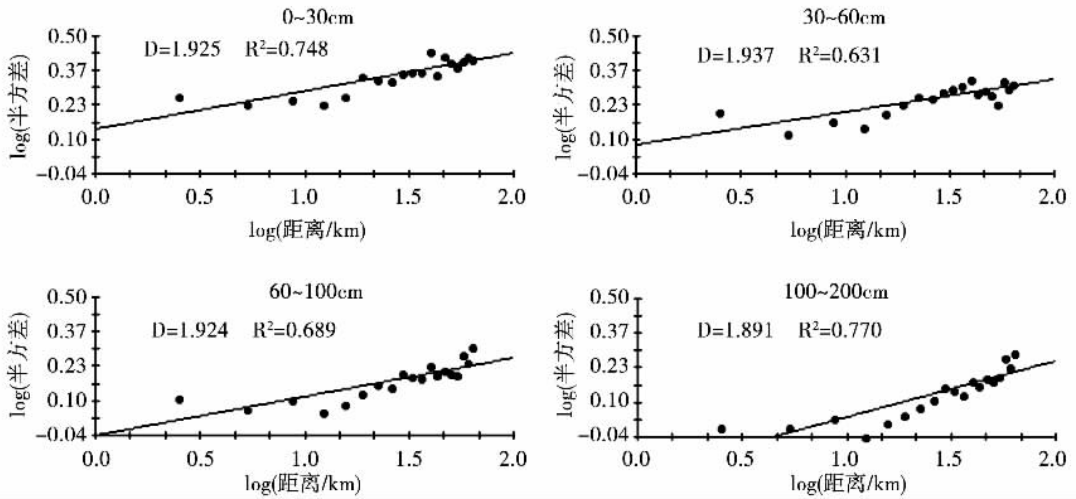


图 3 研究区不同土层土壤含盐量的分维分析图

Fig. 3 The fractal analysis of soil salinity for each soil depth in the study area

与空间自相关指标一样，能够较好地描述变量空间分布的规律性与随机性的强弱。

3.3 土壤盐分的空间分布特征分析

3.3.1 土壤盐分的水平分布 通过对岳普湖绿洲 118 个样点的取样分析，在 GPS 和 GIS 支持下，经过地统计学分析和 Kriging 插值，得到研究区各层次土壤含盐量级别的面积与比例（表 3，图 4）。可见，研究区土壤盐渍化现象相当严重。2005 年，研究区 0~30cm 土层中仅有 66.47km² 面积的土壤属轻度盐渍化，只占总面积的 3.78%，主要分布在岳普湖县东北部的布谷里沙漠区域。中度盐渍化面积为 117.04km²，占 6.66%，中度盐渍化土壤主要分布在东北角的阿洪鲁库木乡。重度盐化的土壤为 738.00km²，占 42.02%，其主要分布在研究区的西部和东南部。属于盐土的面积 of 834.76km²，占总面积的 47.53%，主要在分布在岳普湖镇、岳普湖乡、色也克乡、阿其克乡和铁热木乡，即农牧业开发活动最为强烈、靠近河渠水源和地势较为低洼的区域，其余三层土壤盐分高值区的分布趋势与表层类似。研究区土壤盐渍化程度由深及浅逐渐增大，特别是表层土壤含盐量 >20g/kg 的面积占总面积的 47.53%，这说明盐分由深层土壤向表层聚集。

表 3 研究区不同层次土壤含盐量的面积与比例

Tab. 3 The area and proportion of soil salinity for each soil depth in the study area

土壤深度		含盐量 (g/kg)				
		0~3	3~6	6~10	10~20	>20
0~30cm	面积 (km ²)	0	66.47	117.04	738.00	834.76
	比例 (%)	0	3.78	6.66	42.02	47.53
30~60cm	面积 (km ²)	0.08	129.76	451.89	868.04	306.51
	比例 (%)	0.004	7.39	25.73	49.43	17.45
60~100cm	面积 (km ²)	67.47	222.83	733.78	732.20	0
	比例 (%)	3.84	12.69	41.78	41.69	0
100~200cm	面积 (km ²)	210.35	682.99	589.25	273.69	0
	比例 (%)	11.98	38.89	33.55	15.58	0.0

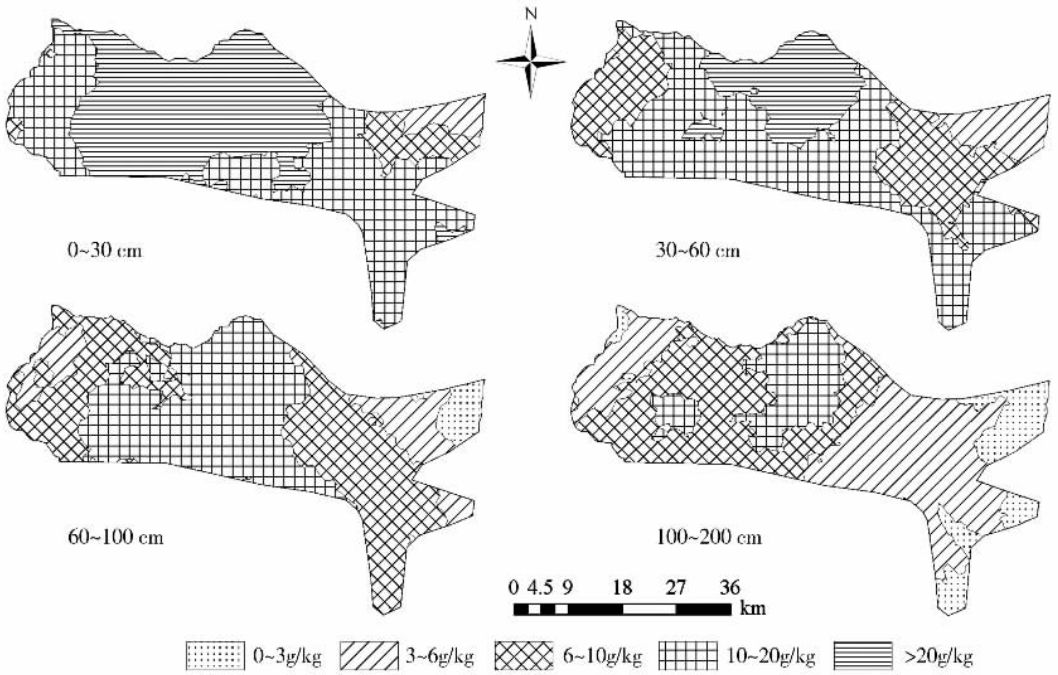


图 4 研究区不同土层土壤盐分的分布特征图

Fig. 4 The status of soil salinity for each soil depth in the study area

3.3.2 土壤盐分的垂直分布 研究区土壤盐分垂直分布的总趋势是表层土壤含盐量高于深层土壤（图 5）。从不同土层土壤盐分含量的面积分布来看，越到表层，土壤含盐量大于 10g/kg 的面积越大，且盐分含量也越高；越到深层土壤含盐量逐渐减小，60~100cm 和 100~200cm 土层中大于 20g/kg 的土壤面积减小为零，非盐化土和轻度盐化土面积逐渐加大。

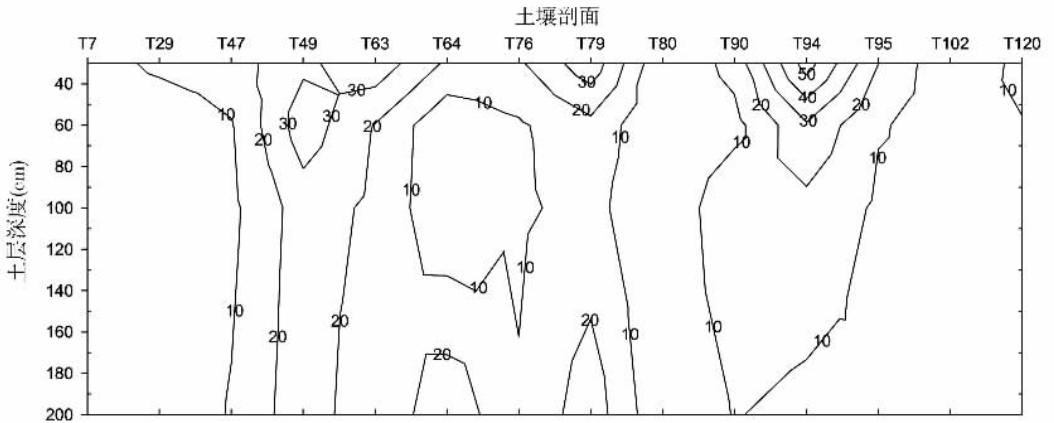


图 5 研究区土壤样线盐分含量 (g/kg) 分布图

Fig. 5 The distribution of soil salinity for each soil depth in the sampling line in the study area

3.4 土壤盐化原因分析

土壤盐渍化的形成主要受地质、地貌、气候及土壤质地等结构性因素，以及人为引水灌溉不当等人为因素所致^[30]。主要表现在以下几个方面：一是，研究区地处内陆干旱区，

降雨稀少,多年平均年降雨量只有 51.7mm,而蒸发量高达 2651mm,为降雨量的 51 倍多,这种气候特点为盐分聚集地表、土壤返盐提供了条件,加之研究区位于盖孜河最下游,上游多余洪水、冬闲水和各种废弃水均流入区内散失,是造成土壤盐化的主要原因,也是当地深层土壤含盐量大范围空间变异的主要控制因素;再是,不合理的灌溉制度。岳普湖县地处河流最下游,春秋两季旱情严重,因此在当地形成了“有水就有粮”的错误思想,进行超量和无节制的大水漫灌,致使大量水分入渗提高了地下水位,从而招致大面积土壤次生盐渍化;三是,渠道渗漏严重,根据岳普湖县水利局提供的资料,全县现有渠道总长度 1654.2km,其中乡级干渠 271.4km,支渠 291.1km,斗渠 549.4km,农渠 541.3km,渠道防渗差,长期渠道引水,提升了渠道两侧的地下水位,引起水道两侧的次生盐渍化;四是,平原蓄水不当。岳普湖县现有平原水库 5 座,这些平原水库的水位一般都接近于地面,由于水库水体的静水压,导致水库周围地下水位的升高,使土壤发生次生盐渍化。此外,在灌区耕作粗放、施肥不合理、土地不平整等,都易造成土壤次生盐渍化的加重。这些不仅加剧了表层土壤的盐渍化,还使表土盐渍化强度呈斑块状的局部空间变异特征。

4 结论

以岳普湖绿洲为例对塔里木河源流区绿洲土壤含盐量空间变异和格局进行了地统计学分析,结果显示,研究区土壤含盐量普遍较高,各层土壤均存在不同程度的盐化现象,盐分的变异系数较高,接近于强变异性,且表土盐渍化强度呈斑块状的局部空间变异特征。土壤盐分的空间变程由表层到深层逐渐变大。各层的高值区主要集中分布在人类活动强烈、靠近河渠水源和地势较为低洼区域。在垂直方向上,土壤表层盐分含量最高,向下层逐渐减少。

研究区绿洲土壤盐分的空间变异和格局受制于结构性因素和非结构性因素的双重影响。由于表土层含盐量受结构性因素影响相对较小,受人为因素、小尺度地形、浅层地下水位和上游来水含盐量等非结构性因素的影响强烈,而出现斑块状分布特征。

塔里木河源流区地下水资源丰富,水位埋深浅、降雨稀少,蒸发强烈的气候特点以及特殊的地形与土壤母质等是表层土壤盐分聚集的控制因素,而人为引水灌溉不当、耕作粗放是造成土壤次生盐渍化加重的主要原因。因此,在控制绿洲土壤盐渍化过程中应建立健全排灌系统,加强渠道防渗,节约地表水,适当开发地下水,推广地膜栽培技术,减小水分的蒸发和盐分的表层聚集。

总之,利用地统计学方法可以准确、直观地了解研究区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,在塔里木河源流区绿洲盐渍化土地的分区、改良、管理和合理利用中有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution critical review. *Catena*, 1998, 32: 155~472.
- [2] 李明亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用. *土壤通报*, 2005, 36(2): 265~268.
- [3] 李明辉, 彭少麟, 申卫军, 等. 丘塘景观土壤养分的空间变异. *生态学报*, 2004, 24(9): 1839~1845.
- [4] 李晓燕, 张树文, 王宗明, 等. 吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局. *地理学报*, 2004, 59(6): 989~997.
- [5] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全氮含量的空间变异特征. *地理研究*, 2004, 23(1): 63~70.
- [6] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, *et al.* Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial de-

- pendence. *Ecological Monographs*, 1992, 62(2): 277~314.
- [7] 宋新山, 邓伟, 何岩, 等. 土壤盐分空间分异研究方法及其展望. *土壤通报*, 2001, 32(6): 250~254.
- [8] Douaik A, Van Meirvenne M, Tôth T, *et al.* Space-time mapping of soil salinity using probabilistic bayesian maximum entropy. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2004, 18: 219~227.
- [9] Cemek B, Güler M, Kiliç K, *et al.* Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey. *Environ. Monit. Assess.*, 2007, 124: 223~234.
- [10] 白由路, 李保国, 胡克林. 黄淮海平原土壤盐分及其组成的空间变异特征研究. *土壤肥料*, 1999, (3): 22~26.
- [11] 杨玉建, 杨劲松. 典型潮土土壤耕层盐分含量的趋势效应研究. *灌溉排水学报*, 2004, 23(6): 10~13.
- [12] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 1~5.
- [13] 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变异特征研究. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 61~66.
- [14] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 89~94.
- [15] 杨劲松, 姚荣江, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区土壤盐分的空间变异性及其 CoKriging 估值. *干旱区研究*, 2006, 23(3): 439~445.
- [16] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异. *地理研究*, 2006, 25(4): 649~658.
- [17] 莫治新, 尹林克, 文启凯. 塔里木河中下游表层土壤盐分空间变异性研究. *干旱区研究*, 2004, 21(3): 250~253.
- [18] 赵成义, 王玉潮, 李子良, 等. 田块尺度下土壤水分和盐分的空间变异性. *干旱区研究*, 2003, 20(4): 252~256.
- [19] 李平, 赵鸿斌, 田原, 等. 塔里木河流域土地盐渍化改良与竖井排灌工程. *地质灾害与环境保护*, 2002, 13(2): 48~50.
- [20] 吉力力·阿不都万里. 岳普湖县水资源开发利用状况及发展方向. *干旱区研究*, 1996, 13(4): 57~62.
- [21] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 196~211.
- [22] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 向海沼泽湿地土壤氮素的空间分布格局. *地理研究*, 2004, 23(5): 614~622.
- [23] 李小明, 宋冬梅, 肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异. *地理学报*, 2005, 60(2): 319~327.
- [24] 史舟, 金辉明, 李艳, 等. 地统计软件包的开发及在土壤空间变异中的应用. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 170~173.
- [25] 新疆农业厅, 新疆土壤普查办公室. 新疆土壤. 北京: 科学出版社, 1996. 51~52.
- [26] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性变异性初步研究. *水利学报*, 1985, 9: 10~20.
- [27] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. 162~192.
- [28] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advanced Agronomy*, 1985, 38: 44~96.
- [29] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 1501~1511.
- [30] 魏云杰, 许模. 新疆土壤盐渍化成因及其防治对策研究. *地球与环境*, 2005, 33(B10): 593~597.

Study on spatial variability and pattern of soil salinity of the oasis in the headstreams of the Tarim River Basin: A case study on Yuepuhu oasis

ZHAO Rui-feng^{1,2}, CHEN Ya-ning^{1,2}, HONG Chuan-xun³, LI Wei-hong^{1,2}, BAI Yun-gang³

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

3. Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydroelectric Science, Urumqi 830049, China)

Abstract: Soil properties are one of the regional variables with the properties of geological

structure and the stochastics of statistics. Geostatistics, based on the regional variable theory, has been proved to be one of the most effective methods to analyze the spatial distribution and its variation law of soil properties. It is the foundation to well manage the soil and prevent the soil salinization for fully understanding the spatial distribution of soil salinity. In the present study, based on regionalized variable theory, the spatial variability of soil salinity in different soil layers were studied by means of GPS, GIS, semivariograms of geostatistics and Kriging method in Yuepuhu oasis to quantificationally analyze the spatial variation and patterns of soil salinity in the headstream area of the Tarim River, with the purpose of providing the academic basis for the area partitioning, meliorating and utilizing salinized soil in arid oasis. In the study, 118 samples were chosen from four soil layers at depths of 0-30cm, 30-60cm, 60-100cm and 100-200cm. The results indicated that the salt contents in different soil layers were high with 17.44g/kg, 11.67g/kg, 9.10g/kg and 8.14g/kg in 0-30cm, 30-60cm, 60-100cm and 100-200cm, respectively. The semivariogram of soil salinity of the four depths was best described by the Exponential model, of which the 100-200cm layer was best fitted by the Spherical model. The ranges of spatial autocorrelation differ from each other among the different soil layers. From the surface to the deeper layer, the autocorrelation ranges of the soil salinity increased gradually with 56.40 km, 91.10 km, 114.10 km and 160.00 km, respectively. The analysis of spatial pattern of soil salinity indicated that high values of soil salinity were mainly distributed at the places that were under the intensive anthropogenic activities, near to the watershed or located at low-lying areas. In vertical direction, the salinity of surface soil was the highest and it decreased gradually with the increase of soil depth. In the study area, the spatial variations and patterns of soil salinity in oasis were restricted to both the structural factors and the non-structural factors. For the impact of structural factors on surface soil was relatively less, and that of non-structural factors, i. e. anthropogenic activities, was greater. Some structural factors, such as topography, soil matrix, superficial groundwater table and soil water content from headstreams, strengthened with the increase of soil depths, and the spatial variations of soil salinity increased.

Key words: geostatistics; GIS; soil salinity; spatial variability; kriging method; the Tarim River