

塔里木河下游土壤盐分空间变异规律研究

沈丽娜, 吴巍, 周孝德, 焦露慧, 李景远, 杨启功

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培养基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对目前干旱区广泛存在的土壤盐渍化问题,以塔里木河下游流域为研究区,基于经典统计学和地统计学相结合的方法,研究不同层次土壤盐分的空间变异特征。同时利用研究区典型断面的2000-2011年期间地下水埋深和矿化度数据,探讨土壤盐分的影响因素及其变化规律。结果表明:研究区土壤盐分普遍较高表聚作用明显且存在着空间上的相关性,在垂直方向上呈现自上而下逐渐递减的趋势,在水平方向上表现出整体条带状,局部斑块状格局的变异特征。地下水埋深和矿化度是影响土壤盐分分布的主要因素,土壤全盐量与两者存在良好的指数函数关系,根据地下水埋深和矿化度的年际变化间接反馈出研究区土壤盐分的变化趋势,从而为研究区的土壤盐渍化防治及区域水盐运动调控提供理论基础和科学依据。

关键词: 地统计学; 土壤盐分; 空间变异; 地下水埋深; 矿化度; 塔里木河下游流域

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0231-06

Study on spatial variation law of soil salinity in lower reaches of Tarim river

SHEN Lina, WU Wei, ZHOU Xiaode, JIAO Luhui, LI Jingyuan, YANG Qigong

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: For the widespread problem of soil salinization in arid zone, the paper took the lower reaches of Tarim river basin as research area and studied the spatial variation of soil salinity at different levels by use of the method of combining classical statistics and geo statistics. At the same time, it discussed the influence factors of soil salinity and its variation law by use of the data of groundwater depth and salinity at typical section from 2000 to 2011. The results showed the accumulation was manifest on the surface, the accumulation effect of soil salinity is obvious and there is a significant correlation in space. The effect decreases gradually from top to bottom in vertical direction and maintains integral strip in the horizontal direction and the variation characteristics of local patch pattern. The groundwater depth and salinity is the major factor which impacts distribution of soil salinity. There is a good exponential function between soil whole salt with groundwater depth and salinity. The inter-annual variability of groundwater depth and salinity, indirectly reflected the trend of soil salinity, which can provide theoretical basis and scientific basis for soil salinity control and regulation of regional water and salt movement in the study area.

Key words: geo statistics; soil salinity; spatial variation; groundwater depth; salinity; lower reaches of Tarim river basin

土壤盐渍化是土地退化和土地荒漠化的主要形式之一,目前盐渍土广泛分布于中国的干旱区,约占全国总面积的1/3^[1]。就土壤特征而言,对土壤盐分空间变异特征的研究是防治盐渍化的前提。受气候、地形、母质、生物、水资源、成土时间、人为因素等诸多因素的影响,土壤盐分的分布具有复杂性和时

空变异性^[2]。其中,地下水文条件与土壤盐渍化有着非常密切的关系,地下水埋深及其矿化度是决定土壤盐分变化的重要因素^[3-5],因此综合分析二者对土壤盐分的影响是十分重要的。

研究表明,地统计学理论是分析土壤特征空间分布及其变异规律定量化最为有效的方法之一。近

年来随着 3S 技术的发展,国内外学者对不同尺度下土壤盐分的空间变异进行研究,取得了较好的效果。Cemek 等^[6]以土耳其北部冲积平原为例分析了农田土壤盐分的空间变异特征,得出当地土壤盐分的分布是地下水位、排灌溉系统以及地形地貌等因素综合影响的结果;姚荣江等^[7]运用 Kriging 插值法对黄河三角洲地区不同深度土壤中盐分含量的空间变异特征进行了研究,从而揭示了该区域土壤盐分空间分布的主要影响因素,为该区盐渍化土壤的分区、改良、管理和合理利用提供了理论基础和参考依据;祖皮艳木·买买提等^[8]应用地统计学方法结合 GIS 技术对于田绿洲典型区域 0~100 cm 土壤全盐量的空间分布规律进行了研究,提出了有效的关于绿洲盐渍化土壤治理和生态恢复的治理措施,具有一定指导意义。

近年来,关于塔里木河下游流域的研究主要集中在输水工程后地下水特征分析、生态恢复、植被响应等方面^[9-12],对沿岸土壤含盐量的空间变异和分布格局的研究较不多见。本研究结合近十年来输水工程期间地下水埋深和地下水矿化度的实时监测变化,以 GIS 空间分析技术和地统计学相结合为基础,对塔里木河下游流域土壤盐分的空间分布特征及其影响因素进行了探讨,为实现研究区土地盐渍化的科学治理、精准改良以及合理利用提供理论基础和科学依据。

1 研究区概况

研究区塔里木河下游段系指从大西海子水库至若羌的台特玛湖,东连库鲁克塔格沙漠,西依塔克拉玛干沙漠,全长 428 km,主要位于罗布泊微弱拗陷区。该区域水文地质结构简单,地势较为平坦,海拔平均高度为 825 m,主要地貌类型有风积、冲积、冲洪积以及河湖积地貌;流域土壤类型较为简单,以风沙土和水成型土壤为主,土壤分布由于受水文地质和地形条件的影响,垂直河道具有显著的带状规律性^[13]。该区属暖温带极干旱气候区,年降水量 20~40 mm,蒸发量 2 965 mm,光照强烈,太阳总辐射 5 692~6 360 kJ/m²,≥10℃的年积温为 4040~4300℃,平均日较差 13~17℃左右,日照时数 2 780~2 980 h^[14]。

近几十年来,由于人类不合理的水土资源开发,塔里木河下游流域自然生态过程发生了显著变化。1972 年大西海子水库的建成拦截了塔里木河中上游的来水,导致其下游 321 km 河道长期断流^[15],加

之研究区降水稀少,无地表径流补给,地下水位随之大幅度下降,英苏以下水位大都下降到 8~12 m。土壤普遍积盐,形成大面积盐土,同时不配套的灌溉、不合理的水资源利用进一步加速了该区域土壤严重的次生盐渍化现象,自然植被日趋退化,风蚀沙化加剧,裸露的地表部分形成流动沙丘,造成了极其恶劣的土地沙漠化环境。

2 材料与方法

2.1 资料来源

在野外实地考察和前人研究成果的基础上,本研究主要选取塔里木河下游具有代表性的英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻和考干等观测断面,如图 1 所示。主要采用的数据为土壤全盐量、地下水埋深及地下水矿化度数据。其中土壤盐分数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”和相关文献,2003-2011 年地下水埋深数据及 2000-2011 年地下水矿化度数据由塔里木河流域管理局提供。

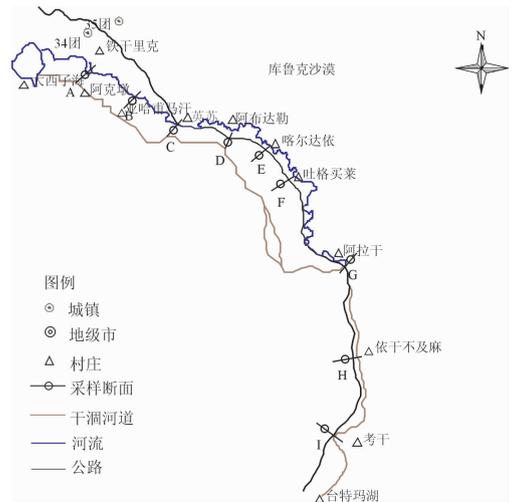


图 1 塔里木河下游各监测断面分布图

2.2 分析方法

本研究首先处理土壤原始数据,对不同土层的土壤盐分进行描述性分析,用 K-S 检验数据是否服从正态分布;然后对处理过的数据进行半方差分析,选取最优参数,确定最佳的预测模型;再利用地统计学方法进行 Kriging 插值,进而生成塔里木河下游区域土壤盐分的空间分布特征图,最后对土壤全盐量和地下水埋深及其矿化度的变化关系进行分析,探讨土壤盐分的影响因素及其变化规律,验证研究区盐渍化空间分布格局的合理性。

半方差函数是描述土壤特征空间结构变异结构的一个函数,计算公式如下:

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

式中: $r(h)$ 为半方差函数; h 为分隔两样点的矢量,称为步长; $N(h)$ 为间距为 h 的实验数据对的数目; $Z(x)$ 为区域化变量 $Z(x)$ 在位置 x 处的实测值; $Z(x+h)$ 则是在距离 $x+h$ 处的实测值。

克里格法 (Kriging) 是利用原始数据和变异函数的结构性特点,对未采样点的区域化变量取值进行无偏最优估计的一种方法。它通过对每个样品赋予一定的权重,然后进行滑动加权平均,以此来估计未知样品的平均值,其实质是一个进行局部估计的加权平均值,可准确地描述所研究变量在空间上的分布、大小、形状、地理位置等,是地统计中最为常用的插值方法。

3 结果与分析

3.1 土壤盐分的统计特征分析

按照经典统计方法对不同层次的土壤全盐量进行分析,统计特征值如表 1 所示。可以看出,研究区

表 1 不同层次土壤全盐量的统计特征

采样深度/cm	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度系数	峰度系数	分布类型
0~15	2.032	125.820	28.833	33.561	1.164	1.825	4.349	0.323
15~30	0.413	67.999	23.418	25.455	1.087	0.890	0.133	0.511
30~50	0.375	32.630	12.731	11.458	0.900	0.451	-0.648	0.836
50~80	0.511	22.593	7.718	6.807	0.882	0.652	-0.490	0.665

正态分布数据检验是使用地统计学克里格法进行土壤盐分空间插值分析的重要前提^[18]。根据 K—S 检验,本研究不同层次土壤盐分的原始数据不符合标准正态分布,经对数转换后,消除了可能存在的比例效应,使塔里木河下游不同土壤层次中盐分含量的数据符合正态分布,以此来地进行地统计分析。

3.2 土壤盐分空间变异的半方差分析

不同层次的土壤全盐量的半方差函数理论模型及其拟合参数如表 2,可以看出,各个土层的基台值都为正值,说明由采样误差、随机和固有变异或者最小间距内的变异所引起的正基底效应不容忽视。 $C_0/Sill$ 的比值表示由随机因素引起的空间变异性占土壤全盐量空间总变异的强弱程度^[19]。根据分级标准,当 $C_0/Sill < 25\%$ 时,说明土壤中盐分含量的空间相关性强,当 $25\% \leq C_0/Sill \leq 75\%$ 时,空间相关性为中等,当 $C_0/Sill > 75\%$ 时表示空间相关性很弱^[20]。本研究各个土层的 $C_0/Sill$ 值分别为 35%、41%、25%

0~15 cm、15~30 cm 层次土壤盐分的均值明显高于其他两层,依据新疆维吾尔自治区土壤盐碱化分级标准^[16],在 0~15 cm、15~30 cm 层土壤盐分的均值分别为 28.833、23.418 g/kg,属于盐土;30~50 cm 层为 12.731 g/kg,属于重度盐渍化;50~80 cm 层为 7.718 g/kg,属于中度盐渍化。同时从偏度和峰度系数两项可以看出,各层土壤全盐量正偏差均呈右偏,数值较大,0~15 cm 和 15~30 cm 层呈“尖顶峰”,其他两层为“平顶峰”。变异系数 C_V 是指随机变量的离散程度,反映的是相对变异, $C_V > 1.0$ 为强变异性, $0.1 \leq C_V \leq 1.0$ 为中等变异性, $C_V < 0.1$ 为弱变异性^[17]。研究区 0~15 cm、15~30 cm 层土壤全盐量的变异系数分别为 1.164、1.087,属于强变异性,30~50 cm、50~80 cm 层分别为 0.900、0.882,为中等偏强变异,由表至深呈现逐渐降低的趋势。造成这种现象的原因在于水文气象、地形地貌、土地利用方式不同、耕作方式以及灌排制度等因素的差异。

和 18%,0~15 cm、15~30 cm 属于中等空间相关性,30~50 cm 层属于中等与强空间空间相关性的临界状态,50~80 cm 层属于强空间相关性,说明土壤剖面盐分含量的空间分布是由结构性因素(如母质、地形、气候、土壤类型等)以及随机性因素(如作物施肥、灌排措施、种植制度、耕作模式等人为活动)共同作用的结果。表层(0~30 cm)土壤受随机性因素影响较大,深层(30~80 cm)土壤则受结构性因素影响较大,空间相关性随之增强。

进一步分析可以看出,土壤剖面全盐量均可用指数模型进行拟合,其决定系数在 0.69~0.82 之间,均为显著水平。同时土壤盐分的空间变程表现出自上而下逐渐增大的特点。造成这种现象的原因在于下游流域受地形、气象等外界条件和人为活动的影响都比较大,从而导致全盐量的空间相关距离上层比较小。随着采样深度的增加,受到上述因素的影响变小,其空间相关距离随之相对变大。

表2 不同层次土壤盐分半方差函数模型及其相关参数

采样深度/ cm	理论模型	块金值 C_0	基台值 Sill	块金/基台 $C_0/Sill$	变程/ km	决定系数 R^2	残差 RSS
0~15	指数	1.368	3.909	0.35	83.36	0.75	0.612
15~30	指数	1.099	2.681	0.41	121.00	0.69	0.598
30~50	指数	0.198	0.790	0.25	145.58	0.82	0.531
50~80	指数	0.046	0.257	0.18	183.20	0.78	0.647

3.3 土壤盐分的空间分布特征分析

根据已经得到的塔里木河下游流域剖面的全盐量的半方差函数理论模型,绘制了该区域不同层次盐分含量的空间分布特征图2,该图可以较为详尽地反映流域土壤盐渍化的空间格局。从垂直方向上,本研究结合土壤盐渍化的分级指标对不同土层的盐渍化程度进行了分类,从表3可以看出,0~15 cm 重度盐渍化和盐土的栅格单元数分别为6093和18445,共占总数的92.95%;15~30 cm所占比例仍非常大,重度盐渍化和盐土分别占总数的30.40%和60.02%;30~50 cm盐渍化有所缓解,轻度盐渍化和中度盐渍化的栅格单元数增加到了9483,比例上升到35.92%;50~80 cm基本无盐土,非盐渍化占总数的14.59%,呈显著的上升趋势。由此可以得出,研究区表层土壤的盐渍化程度远远高于其他各层,具有强烈的表聚性,各层土壤的盐分含量随着土壤深度的增加呈现逐渐变小的趋势,盐渍化面积随之逐渐减小,非盐渍化面积则增大。主要原因在于研究区气候干旱,持续强烈的水面地面蒸发促使土

壤剖面以及地下水中的可溶性盐在毛细管的作用下上升,促进盐分向土壤表聚,造成土壤普遍积盐,形成荒漠或重盐碱地。

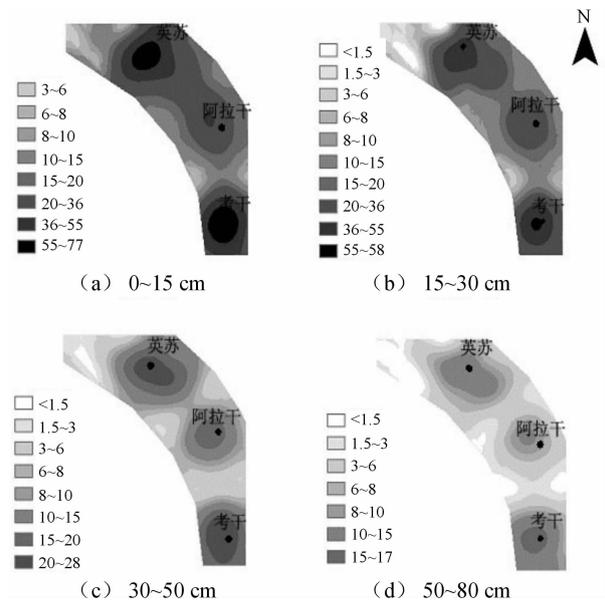


图2 研究区不同层次土壤盐分的空间分布图

表3 研究区土壤盐渍化程度分类

土层埋深/ cm	非盐渍化土		轻度盐渍化土		中度盐渍化土		重度盐渍化土		盐渍土	
	栅格数	百分比/%	栅格数	百分比/%	栅格数	百分比/%	栅格数	百分比/%	栅格数	百分比/%
0~15	8	0.03	458	1.73	1395	5.28	6093	23.08	18445	69.87
15~30	113	0.43	792	3.00	1623	6.15	8026	30.40	15845	60.02
30~50	1852	7.01	2918	11.05	6565	24.87	12787	48.44	2277	8.63
50~80	3852	14.59	6329	23.97	13581	51.45	2637	9.99		

在水平方向上,研究区土壤盐分的空间分布表现出明显的整体条带状和局部斑块状的空间分布格局。条带状主要表现在靠近河道的盐渍化较重,远离河道的盐渍化减轻,造成这种现象的原因可能是离输水河道的距离不同导致地下水埋深不同造成的。地下水埋深越浅,土壤积盐越严重,反之在较深的区域土壤含盐量降低。此外在河道较远的区域,土壤质地以粗砂为主,毛细作用较为微弱,土壤水分借助毛细管作用上升的水量相对减少,盐分并没有

随之累积到地表,因此该区域土壤盐分的变异性和表聚性要弱于靠近河道的区域。斑块状则表现为英苏附近、阿拉干附近和下段的考干附近盐渍化比其他区域较为严重,可能与微地形、河水漫溢、地下水性质及耕作、灌溉等人为活动有关。位于英苏的C断面地势相对较高,附近人口密度较大,排灌溉比较集中,同时连续的生态输水后,英苏获得的水量最多,水的累积效应使该断面地下水位上升到比较稳定的水平,地下水位过高,加上强烈的蒸发作用,盐

分不断浓缩造成土壤中盐分不断升高的趋势。在阿拉干设立的 G 断面位于下游的中段,地形比较复杂,输水过程中受漫溢的影响较大,人为干预较具有代表性。位于考干的 I 断面处于下游的末端,湖水干涸浓缩使地表形成盐壳,且与城市湖泊最为接近,即有着更加频繁的人类活动,使得该区土壤盐分较高,虽经输水,但影响不大。

4 讨论

4.1 土壤盐分的影响因素分析

大面积的土壤盐渍化与地形、地貌、气候、地下水埋深、水流流向、地下水矿化度及人类活动密切相关。一般来说,在垂直河道方向,随离河心垂直距离的增加地下水埋深也在加深,并且距河心越近,地下水埋深加深愈显著,反之,加深越平缓。同时地下水矿化度的含量表现出随着地下水埋深的加深而逐渐降低的趋势。付秋萍等^[21]在研究塔里木盆地土壤盐分变化特征时发现,地下水埋深、地下水矿化度都是土壤含盐量的决定性因子,并建立了不同土层间三者的函数关系。

本研究分别对土壤全盐量与地下水埋深、地下水矿化度的关系进行相关分析,并绘制了土壤含盐量与地下水埋深及其矿化度的关系图,详见图3。

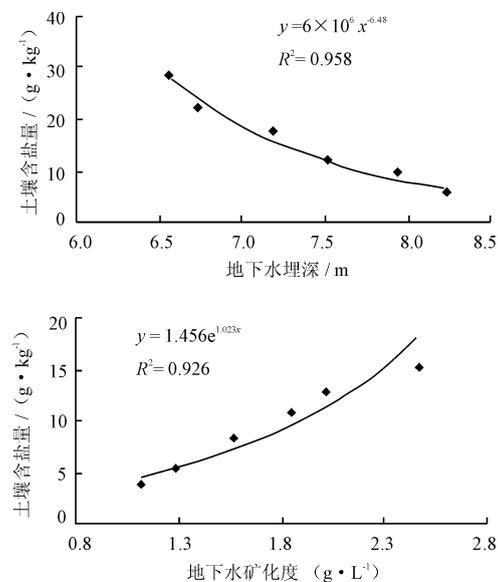


图3 土壤含盐量与地下水埋深及其矿化度的关系

由图3可知,土壤全盐量与两者存在明显的函数关系,地下水埋深越大,土壤全盐量反而越小;地下水矿化度越大,土壤全盐量也随之增大。利用指数函数对其进行拟合,相关系数均在0.9以上,结果表明,土壤全盐量与地下水埋深和地下水矿化度的

相关关系极为显著,指数函数可以很好地进行描述,因此可以通过考虑地下水埋深和地下水矿化度的年际变化,反馈出研究区盐渍土的时间变化序列。

导致这种现象的原因可能是早期利用地表水进行灌溉时,受来水和去水不同的影响水中盐分在土壤中积累,尤其在地下水中矿化度含量较高的地区,地下水对土壤的补给盐分也较多,土壤积盐量随之增大,反之越少,且不合理灌溉造成地下水位大幅度下降,地下水埋深加深。研究区进行生态输水后,地下水位明显抬升,抬升幅度越大,地下水埋深越浅,土壤越容易积盐,运动着的水体沿途溶解了土壤中的可溶性盐分^[22],土壤中盐分高的地方地下水矿化度也随之升高,从而致使地下水矿化度分布和土壤全盐量分布特征呈现一致性规律。

4.2 生态输水综合效应分析

从2000年5月至2011年11月的11年间,自治区已经先后12次向塔里木河下游实施了生态输水工程,从大西海子水库累计下泄水量 $34.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,9次将水输到台特玛湖,有效改善了下游生态环境。以塔里木河下游前12次生态输水工程为契机,选取典型断面,监测输水过程中地下水埋深和地下水质的动态变化情况,分析其变化规律,从而间接反馈出研究区土壤盐分的变化趋势。

在实施观测的塔里木河下游1899 km²整个区域内,地下水埋深0~4 m由输水前的5 km²增加到28 km²,提高1.2% (占总面积百分比计算);地下水埋深4~6 m由输水前的129 km²增加到328 km²,提高10.5%;地下水埋深6~8 m由输水前的183 km²增加到411 km²,提高12%;地下水埋深大于10 m由输水前的787 km²增加到1243 km²,提高24%。如图4所示,英苏断面C7井、喀尔达依断面E6井、阿拉干断面G7井、依干不及麻H6井地下水埋深的变化幅度分别为9.24%、7.63%、13.44%、8.69%、5.64%,地下水位抬升明显,并且抬升后的地下水位能够得以保持在相对稳定的水平。

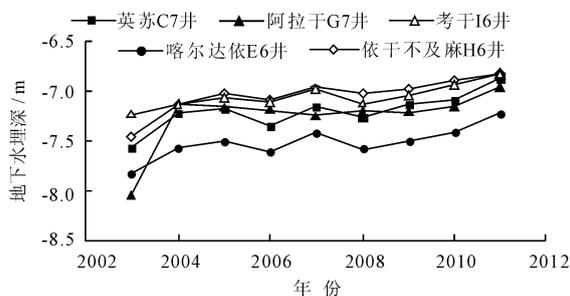


图4 典型监测断面地下水埋深逐年变化图

随着输水工程的实施,地下水矿化度相应发生了显著的降低。在河道横向和纵向范围内不仅呈现出明显的分带状特征,而且在河道两侧出现降低的变化趋势。河道附近地下水由输水初期的4~6 g/L下降到1~3 g/L,呈下降趋势,水化学类型也发生了相应的变化。如图5所示的英苏断面C6井、喀尔达依断面E3井、阿拉干断面G3井矿化度分别下降了78.9%、83.1%、68.6%,下降非常明显。

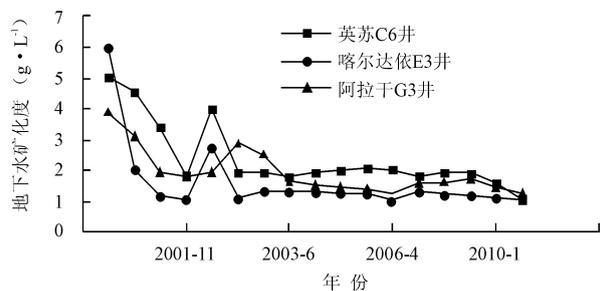


图5 典型监测断面地下水矿化度逐年变化图

分析表明,在间歇性输水情况下,随着河道充水和停水的重复进行,地下水埋深上下波动,其上升与下降构成了一个连续的周期性过程,但整体上来说呈现上升的总趋势。地下水矿化度在研究区生态输水工程初期变异最强,降低最为明显,对下游地下水的盐化状态影响最大,之后逐渐趋于缓和,下游的生态环境也有所稳定。根据土壤含盐量与地下水埋深、地下水矿化度的相关性关系,可以推断,通过连续的生态输水,研究区生态环境质量稳步提升,盐渍土的变化会向好的趋势发展,但由于各种因素的综合影响,整体分布格局不会有太大变化,和上述研究结果具有相似性。

5 结论

(1) 研究区0~30 cm和30~80 cm层次土壤盐分的均值差异较大,土壤盐分在0~15、15~30 cm层属于盐土;30~50 cm属于重度盐渍化;50~80 cm层属为中度盐渍化。各个土层盐分含量(或经对数转化)均符合正态分布。30~50 cm、50~80 cm层土壤盐分的变异系数分别为1.087、1.164,属于强变异性,0~15 cm、15~30 cm层分别为0.900、0.882,为中等偏强变异。

(2) 土壤中不同层次盐分的空间分布在一定范围内均存在着空间上的相关性,均能较好地符合指数模型分布。空间插值结果表明,研究区表层土壤盐分具有强烈的表聚性,在垂直方向上呈现自上而下逐渐递减的趋势,重盐渍化土地和盐土占相当大

的比例;在水平方向上表现为靠近河道的盐渍化较重,远离河道的盐渍化减轻,且英苏断面、阿拉干断面和考干断面比其他区域更为严重。这和气候、母质、地形、土壤类型等结构性因素以及耕作模式、灌溉不当、管理水平等随机性因素有着至关重要的关系。因此在土壤盐渍化治理过程中,应该采取建立科学的灌排系统、合理规划耕地布局、适当施用土壤改良剂、种植耐盐植物、推广地膜栽培技术等多种有效措施。

(3) 对土壤全盐量与地下水埋深和地下水矿化度的关系进行相关分析,结果表明:土壤全盐量与两者存在良好的指数函数关系,相关系数均在0.9以上,地下水埋深越大,土壤全盐量反而越小;地下水矿化度越大,土壤全盐量也随之增大。根据地下水埋深和矿化度的年际变化,反馈出研究区土壤盐分的时间变化序列。因此,在今后进行该区域土壤的次生盐渍化防治、水盐运移规律等研究时,不仅要考虑土壤盐分的空间分布,还要重视其时间变异性,有着直接的现实意义和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhou S W, Zhang G Y, Zhang X N. Exchange reaction between selenite and hydroxyl ion of variable charge soil surfaces: II. Kinetics of hydroxyl release[J]. *Pedosphere*, 2003, 13(4):317-322.
- [2] 李亮亮,依艳丽,凌国鑫,等.地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. *土壤通报*, 2005, 36(2):265-268.
- [3] 王全九,王文焰,汪志荣,等.排水地段土壤盐分变化特征分析[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2):271-276.
- [4] Shi Haibin, Takeo A, Kinzo N, et al. Simulation of leaching requirement for Hetao Irrigation District considering salt redistribution after irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2002, 18(5):67-72.
- [5] 陈亚新,史海滨,田存旺.地下水与土壤盐渍化关系的动态模拟[J]. *水利学报*, 1997, 33(5):78-83+35.
- [6] 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[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2007, 124(1-3):223-234.
- [7] 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[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6):61-66.

- [9] 王志伟,张元标. 危险化学品污染物在空气、水和土壤中的扩散与迁移研究进展[J]. 包装工程,2006,27(4):5-9.
- [10] 胡少平. 土壤重金属迁移转化的分子形态研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
- [11] 李昌朕. 重金属离子铅在土壤中的纵向迁移规律研究[D]. 淄博:山东理工大学,2014.
- [12] 傅晓文. 盐渍化石油污染土壤中重金属的污染特征、分布和来源解析[D]. 济南:山东大学,2014.
- [13] Mason R P, Laporte J M, Andres S. Factors controlling the bioaccumulation of mercury, methylmercury, arsenic, selenium, and cadmium by fresh water invertebrates and fish [J]. *Environmental Contamination and Toxicology*, 2000,38(3):283-297.
- [14] Perceval O, Pinel-Alloul B, Méthot G, et al. Cadmium accumulation and metallothionein synthesis in fresh water bivalves (*Pyganodon grandis*): relative influence of the metal exposure gradient versus limnologic a variability [J]. *Environmental Pollution*, 2002,118(1):5-17.
- [15] 王 瑶. 土壤重金属环境风险评估和污染防治对策研究[D]. 西安:西北大学,2014.
- [16] 蒋煜峰. 污灌土壤中重金属形态及化学治理研究[D]. 壮族:西北师范大学,2006.
- [17] 余开彪,胡 斌,张 挺. 垃圾渗滤液在土体中扩散规律的模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(11):1944-1948.
- [18] 关共凑,徐 颂,黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. 生态环境,2006,15(2):315-318.
- [19] 朱映川,刘 雯,周遗品,等. 水体重金属污染现状及其治理方法研究进展[J]. 广东农业科学,2008(8):143-146.
- [20] 陈 威,杨亦霖,张爱国,等. 非饱和土壤中重金属污染物迁移机理分析[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2010,34(5):98-103.

(上接第 236 页)

- [8] 祖皮艳木·买买提,海米提·依米提,吕云海. 于田绿洲典型区土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 土壤通报,2013,44(6):1314-1320.
- [9] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J]. 生态学报,2007,27(2):538-545.
- [10] 郑 丹,陈亚宁,薛 燕. 新疆塔里木河下游断流河道输水对地下水变化的影响分析[J]. 干旱区地理,2004,27(2):216-220.
- [11] 芦艳玲,叶朝霞. 塔里木河下游地下水位对生态输水的响应[J]. 干旱区研究,2012,29(4):574-578.
- [12] 安红燕,叶 茂,徐海量,等. 塔里木河下游胡杨径向生长量对生态输水的响应[J]. 中国沙漠,2011,31(4):957-962.
- [13] 杨玉海,陈亚宁,李卫红. 新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J]. 生态学报,2008,28(2):602-611.
- [14] 周洪华,陈亚宁,李卫红. 塔里木河下游绿洲-荒漠过渡带植物多样性特征及优势种群分布格局[J]. 中国沙漠,2009,29(4):688-696.
- [15] 叶朝霞,陈亚宁,李卫红. 塔里木河下游生态输水对地下水位影响的综合评价[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(8):12-16.
- [16] 姚荣江,杨劲松,姜 龙,等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. 土壤学报,2008,45(1):56-65.
- [17] 李新国,赖 宁,陈蜀江,等. 开都河流域下游绿洲表层土壤盐分空间变异特征分析——以焉耆县为例[J]. 地理与地理信息科学,2014,30(1):105-109.
- [18] 杨红梅,徐海量,樊自立,等. 塔里木河下游表层土壤盐分空间变异和格局分析[J]. 中国沙漠,2010,30(3):564-570.
- [19] 胡克林,陈海玲,张源沛,等. 浅层地下水埋深、矿化度及硝酸盐污染的空间分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(S1):21-25.
- [20] 赵 军,刘焕军,隋跃宇,等. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J]. 水土保持学报,2006,20(1):41-44.
- [21] 付秋萍,张江辉,王全九,等. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J]. 自然科学进展,2007,17(8):1091-1097.
- [22] 陈永金,陈亚宁,刘加珍,等. 塔里木河下游地下水化学特征对生态输水的特征响应[J]. 地理学报,2005,15(1):15-21.