塔里木河下游绿洲灌区土壤盐渍化特征及季节性变化规律

丁邦新[1,2]，白云岗[2]，柴仲平[1]，刘洪波[2]，蒋 磊[3]，杨佐怀[3]

（1.新疆农业大学 草业与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2.新疆水利水电科学研究院，新疆 乌鲁木齐 830049；3.中国地质调查局 乌鲁木齐自然资源综合调查中心，新疆 乌鲁木齐 830057）

摘 要：[目的] 研究典型绿洲灌区土壤盐渍化特征和季节性变化规律，为农业生产调控提供理论依据。[方法] 运用 GPS 定位技术在塔里木河下游三十一团灌区不同季节进行调查与采样，并结合室内样品测定结果，对该区土壤盐分含量和各盐分离子含量进行经典统计分析和地统计学分析。[结果] 研究区土壤的 pH 值范围在 8.09～8.24 之间，不同季节之间的差异不大，土壤呈碱性。土壤盐分含量受季节影响明显，在不同深度均表现为：秋季＞冬季＞春季＞夏季。不同季节下各深度的土壤中主要离子均相同，土壤盐分组成中阴离子主要为 SO_4^{2-} 和 Cl^-，阳离子主要为 K^+ 和 Na^+，土壤盐分类型春季和秋季以硫酸盐型为主，冬季以氯化物—硫酸盐型为主。秋季与冬季的土壤盐分含量随着土层深度的增加逐渐减小，总体呈表聚型，春季与夏季的土壤盐分含量随着土层深度的增加呈先减小后增大的趋势，总体呈底聚型。春季根域层（0—60 cm）土壤的盐分在东南部的含量较高，西北部的含量较低，而深层（60—100 cm）土壤盐分在东南部的含量较底，西北部的含量较高，夏季土壤盐分整体较底，且水平分布较为一致。秋季、冬季土壤盐分的高值区都出现在研究区的西南方向，靠近塔里木河，原始保留地和荒地较多的区域。[结论] 三十一团灌区土壤盐分的周年变化总体表现为秋季、冬季积盐，春季、夏季脱盐，土壤盐分的水平分布主要受土地利用类型、地形因素以及与水源位置距离的影响。

关键词：盐分季节性变化；土壤盐分；地统计学；塔里木河

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)02-0077-08 **中图分类号**：S156.4+1

文献参数：丁邦新，白云岗，柴仲平，等.塔里木河下游绿洲灌区土壤盐渍化特征及季节性变化规律[J].水土保持通报，2020，40(2)：77-84. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.011；Ding Bangxin，Bai Yungang，Chai Zhongping，et al. Soil salinization characteristics and its seasonal variation in oasis irrigation district of lower reaches of Tarim River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(2)：77-84.

Soil Salinization Characteristics and Its Seasonal Variation in Oasis Irrigation District of Lower Reaches of Tarim River

Ding Bangxin[1,2], Bai Yungang[2], Chai Zhongping[1], Liu Hongbo[2], Jiang Lei[3], Yang Zuohuai[3]

(1. *College of Pratacultural and Environmental Science, Xinjiang Agriculture University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 2. *Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang* 830049, *China*; 3. *Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Urumqi, Xinjiang* 830057, *China*)

Abstract: [Objective] The characteristics of soil salinization and seasonal variation in the typical oasis irrigation areas were studied, in order to provide theoretical basis for agricultural production regulation. [Methods] Using GPS positioning technology to conduct the field survey in different seasons. Indoor sample measurement, classical statistical analysis and geostatistics were used to analyze soil salinity and salt segregation content in the 31 regiment irrigation area of the lower reaches of the Tarim River. [Results] The pH value of the soil in the study area was ranged from 8.09 to 8.24, there was little difference between the different seasons, and

收稿日期：2019-08-01 **修回日期**：2019-12-08

资助项目：国家“十三五”重点研发计划项目“农田节水减排控盐技术及应用”(2017YFC0403305)，“西北典型农区高效节水灌溉技术与集成应用”(2016YFC0400208)

第一作者：丁邦新(1995—)，男(汉族)，新疆维吾尔族自治区乌鲁木齐市人，硕士研究生，研究方向为农业资源高效利用。Email：dovebx@163.com。

通讯作者：白云岗(1974—)，男(汉族)，新疆维吾尔族自治区奇台县人，博士，教授级高级工程师，主要从事农业节水方面的研究。Email：xjbaiyg@sina.com。

the soil was alkaline. The content of soil salinity was significantly affected by the season, and it showed in different depth as follows: autumn>winter>spring> summer. The main ions in the soil at different depths were the same in different seasons. The anions in the soil salinity were mainly SO_4^{2-} and Cl^-, and the cations were mainly K^+ and Na^+. Soil salinity types were mainly sulfate in spring and autumn, and chloride-sulfate in winter. The soil salt content in autumn and winter decreased gradually with the increase of soil depth and presented an overall surface aggregation pattern. The soil salt content in spring and summer decreased first and then increased with the increase of soil depth and presented an overall bottom aggregation pattern. In spring, the salt content in root domain layer (0—60 cm) was higher in the southeast and lower in the northwest, while the salt content of deep soil layer (60—100 cm) was lower in the southeast and higher in the northwest. The overall content of soil salinity in summer was low and the horizontal distribution was consistent. High value areas of soil salinity in autumn and winter were found in the southwest of the study area, close to the Tarim river, where there were many original reserves and wasteland. [Conclusion] The annual variation of soil salinity in the 31 regiment irrigated area is generally characterized by salt accumulation in autumn and winter, desalinization in spring and summer, and the horizontal distribution of soil salinity is mainly affected by land use type, topographical factors, and distance from the water source.

Keywords: seasonal variation of salinity; soil salinity; geo-statistics; Tarim River

土壤盐渍化是土壤荒漠化和土地退化的重要类型之一,同时也是影响干旱区绿洲生态环境稳定的重要因素[1],干旱区绿洲的稳定性外受过渡带影响,内受土壤盐渍化影响[2],盐渍化问题已经成为了干旱区农业发展的主要障碍,始终是干旱区农业可持续发展和改善环境质量的战略问题[3]。位于新疆维族自治区塔里木河下游的新疆二师三十一团灌区是典型的人工绿洲区域,地处恰拉水库下游、塔克拉玛干沙漠和库木塔格沙漠之间的狭长地带,干旱少雨,生态环境十分脆弱[4-5]。由于独特的地理位置、长期不合理的灌排和盲目的扩大耕地,灌区内地下水位逐渐增高,土壤盐渍化程度的不断增加,造成土壤板结、肥力下降,盐分胁迫通过离子毒害、渗透胁迫,引起作物生理生化代谢失调、营养失衡[6],阻碍了作物的正常生长,部分耕地地表有"盐碱斑",作物长势参差不齐,因土壤盐渍化而逐渐弃耕,土壤盐渍化问题已严重影响到了当地的经济发展。

盐渍化土壤的形成主要受气候、地理条件、土壤质地、耕作管理及人类活动等因素的综合影响[7],但其核心都可以归结到水分的运动,盐分一般伴随水分的运动而迁移[8]。王艳等[9]研究发现,自然状态下滨海盐渍土盐分含量具有明显的季节性积盐脱盐规律,大致表现为春季强烈积盐,雨季脱盐,秋季缓慢积盐和冬季盐分稳定。赵秀芳等[10]在苏北典型滩涂区的研究结果表明,土壤表层盐分随季节波动剧烈,盐分在夏季呈下降趋势,秋冬季呈上升趋势。在灌溉淋溶作用下表层土壤发生脱盐,盐分进入地下水并通过排水系统流至排水区域,同时在蒸发和蒸腾作用下地下水中的盐分又随水分的上移积累在上层土壤中,并引起土壤积盐[11]。在周年尺度下土壤水分和盐分运动十分活跃,土壤经历着反复的脱盐和积盐过程。土壤盐分在生育期和非生育期的累积与淋洗,共同决定了土壤盐分的全年变化和多年动态,影响着区域盐碱化的趋势[12],掌握土壤的盐渍化特征和季节性变化规律对于干旱地区绿洲土壤盐渍化的评价与治理、农业生产调控具有重要意义。然而,目前已有的盐分季节性变化规律研究大多是针对沿海地区来开展的,对于蒸发强烈,降雨稀少的西北干旱地区,此类研究还较为缺乏。因此,本研究以 2018 年 3,6,10 和 12 月在三十一团进行的 4 次采样为例,运用经典统计学和地统计学方法,在 GIS 技术的支持下,分析三十一团灌区土壤盐渍化特征和季节性变化规律,以期为干旱区典型绿洲区域土壤盐渍化灾害的防治、农业生产调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区新疆第二师三十一团位于塔克拉玛干沙漠东北边缘塔里木河与孔雀河下游的冲积平原上,地处新疆巴州尉犁县境内,地理坐标为 85°24′—88°30′E,39°30′—42°20′N。西与尉犁县塔里木乡接壤,东与三十三团相邻,北以孔雀河南岸的沙包起伏区为界,与库木塔格沙漠接壤,南以塔里木河为界,与塔克拉玛干沙漠接壤。海拔高度为 864～870 m,地形自西北向东南倾斜,地势起伏和缓,属大陆性暖温带、极端干旱沙漠性气候,光热资源丰富,降雨稀少且四季分

布不均,昼夜温差大,多风沙和浮尘天气,降雨量年际变化大,多年平均降雨量 53.3～62.7 mm,多年平均蒸发量 2 273～2 788 mm,日照时数 3 036.2 h,≥10 ℃的年积温 4 121 ℃,无霜期 191 d,生态环境极为脆弱,是我国最干旱的地区之一。三十一团现有灌溉面积 7 551 hm^2,大部分耕地处于恰拉水库下游,作物以棉花为主,采用膜下滴灌的灌溉方式,生育期灌溉量在 2 700～3 450 m^3/hm^2,于 5 月开始每 7 d 灌溉 1 次,冬灌量约为 3 600 m^3/hm^2,使用大水漫灌,于每年 11 月进行;研究区春季地下水位在 1～2.2 m 之间,其它季节保持在 1.8～3 m 之间,地下水矿化度变化范围为 2～7 g/L,灌溉用水来自塔里木河与恰拉水库,矿化度全年变化范围在 0.47～1.53 g/L 之间,全团灌溉排水矿化度在 10.58～18.36 g/L 之间;土壤类型主要有灌溉草甸土、风沙土、盐土、沼泽土等。三十一团由于地处塔克拉玛干沙漠与库木塔格沙漠之间,塔里木河和孔雀河两河下游河床历史上曾多次改道,使古河道在垦区婉蜒分布,致使垦区广泛分布着大小沙丘和洼地,地形起伏不平,灌区内地形复杂,耕地与荒地相间分布,土壤盐渍化、次生盐渍化现象严重。

1.2　样品采集与测定

通过收集和整理研究区域相关资料,于 2018 年 3 月 28 日(棉花播种前)、6 月 25 日(生育期内)、10 月 23(棉花采摘结束后)、12 月 25 日(冬灌后)在三十一团范围内分别内布设土壤取样点 45 处、30 处、40 处、41 处,取样点间距约为 3 km,耕地与荒地均进行采样(图 1)。使用 GPS 定点取样,土壤取样点总体按水库出口沿水渠流向布设,同时考虑土壤类型以及在作物种植集中区域加密布点原则。3 月采用人工挖掘剖面的方式采集土样,6,10 和 12 月使用土钻采集土样,考虑到耕地土壤的水盐变异性较强,6 和 10 月采样时在每一采样点周围辐射约 10 m 处选取 2 个点,呈三角形形状采样,分层混合后作为一个样品。每个位置土壤采样层次分为 0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm,共取得 775 个样品。将采集的土样分别装入袋中并做好标记,挑出杂物后,风干,研磨,过筛备用。

土样的测定方法为:总盐采用残渣烘干质量法;SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定;Cl^- 采用 $AgNO_3$ 滴定法测定;CO_3^{2-},HCO_3^- 采用双指示剂中和法测定;Ca^{2+},Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法测定;$K^+ + Na^+$ 采用阴阳离子平衡法。6 月的土壤样品只进行了电导率和 pH 值的测定,总盐根据实测得到的电导率与总盐转换关系:$y = 0.005\ 1x - 0.524\ 1$($R^2 = 0.953\ 4$)转换而来。

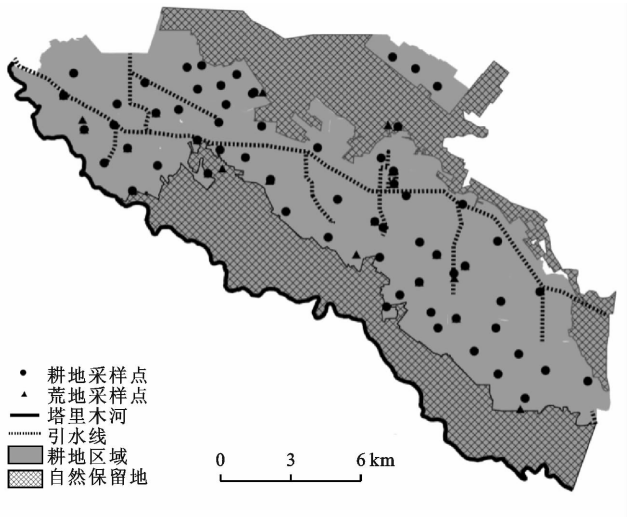


图 1　研究区及样点示意图

1.3　数据处理

试验数据使用 SPSS 19.0 进行描述性统计分析,盐分动态变化特征使用 SigmaPlot 10.0 制图软件来进行绘制。盐分水平分布图在 SPSS 19.0 内对数据先进行 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验,判断数据符合正态分布后,采用地统计软件 GS^+ 9.0 进行半方差函数拟合,经过选择不同步长进行拟合,比较不同模型下的决定系数与残差平方和,选出最佳理论模型,并根据拟合的模型及其参数,在 ArcGIS 地理信息系统软件的 Geostatistical Analyst 模块进行 Kriging 插值,生成 2 维空间分布图。

2　结果与分析

2.1　盐分特征描述分析

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,剔除其中的异常点后,3,6,10 和 12 月的样本数量分别为 225,150,180,185 个。由表 1 可知,研究区土壤的 pH 值的范围在 8.09～8.24 之间,不同季节之间的差异不大,研究区土壤呈碱性。土壤盐分含量受季节影响明显,盐分均值在不同深度均表现为:9 月＞12 月＞3 月＞6 月,主要与土壤中盐分的来源和影响因素的多样性有关。变异系数 C_v 反映的是相对变异,即随机变量的离散程度,雷志栋等[13]研究表明,$C_v < 0.1$ 呈弱变异性,$0.1 \leqslant C_v < 1$ 呈中等变异性,$C_v \geqslant 1$ 呈强变异性;研究区耕作层(0—20 cm)土壤盐分大多处于强变异性,耕作层以下(20—100 cm)土壤盐分大多处于中等变异性,这是由于耕作层土壤受人类活动的影响更大。

表1 研究区不同层次土壤盐分组分统计值

土层深度/cm	采样时间	pH值	总盐分含量/(g·kg^{-1})			标准差	变异系数
			最小值	最大值	平均值		
0—20	3月	8.225	1.37	12.36	2.49	1.78	0.71
	6月	8.121	0.42	13.96	1.89	2.52	1.33
	9月	8.161	1.64	40.25	7.25	8.13	1.12
	12月	8.122	1.43	27.03	4.58	4.58	1.00
20—40	3月	8.236	1.22	6.03	2.42	1.11	0.46
	6月	8.113	0.4	10.15	1.45	1.78	1.23
	9月	8.130	1.64	24.06	4.63	4.05	0.87
	12月	8.108	1.20	11.93	3.69	2.26	0.61
40—60	3月	8.242	1.05	9.45	2.38	1.45	0.61
	6月	8.123	0.38	3.63	1.13	0.77	0.68
	9月	8.138	1.84	18.7	4.03	3.38	0.84
	12月	8.092	1.25	11.49	3.18	1.94	0.61
60—80	3月	8.207	1.05	5.92	2.22	1.02	0.46
	6月	8.112	0.44	2.87	1.08	0.6	0.56
	9月	8.118	1.27	12.02	3.61	2.07	0.57
	12月	8.096	1.2	8.12	3.04	1.48	0.49
80—100	3月	8.192	1.24	12.35	2.6	2.04	0.78
	6月	8.115	0.4	3.29	1.16	0.57	0.49
	9月	8.110	1.12	8.01	3.51	1.49	0.42
	12月	8.100	1.17	6.56	2.97	1.24	0.42

依据3次采样各深度土壤盐分离子的均值绘制了土壤盐离子含量分布图(图2),由于研究区60 cm土层以下绝大部分为沙土,且60—80 cm,80—100 cm土层各离子含量差异很小,因此取其均值来代表60—100 cm土壤的离子含量。研究区不同季节下各深度的土壤中主要离子均相同,土壤盐分组成中阴离子主要为SO_4^{2-}和Cl^-,阳离子主要为K^+和Na^+,Mg^{2+},Ca^{2+}和HCO_3^-的含量相对较少;SO_4^{2-},Cl^-,K^+,Na^+含量在不同深度土壤中均表现为:秋季>冬季>春季,这与总盐含量变化相一致,HCO_3^-含量在不同深度土壤中均表现为:冬季>秋季>春季,Mg^{2+}和Ca^{2+}含量在不同深度土壤中无明显季节性变化规律,各土层盐分离子除Mg^{2+}和Ca^{2+}外,受季节变化的影响程度相同。盐土中所含盐类的区别主要依据阴离子,根据土壤盐渍化类型分类标准[14],[Cl^-]/[SO_4^{2-}]浓度之比≥4为氯化物型、1~4为硫酸盐—氯化物型、0.5~1为氯化物—硫酸盐型、≤0.5为硫酸盐型盐土。春季土壤0—100 cm土层盐分类型均为硫酸盐型,秋季土壤中0—20 cm土层盐分为氯化物—硫酸盐物型,20—100 cm土层盐分均为硫酸盐型,冬季土壤0—100 cm土层盐分类型均为氯化物—硫酸盐型。研究区土壤盐分类型春季和秋季以硫酸盐型为主,冬季以氯化物—硫酸盐型为主。

2.2 不同季节土壤盐分的垂直变化情况

以土壤盐分含量的均值来表示不同季节下不同深度的土壤盐分含量,研究区不同季节下土壤盐分的垂直变化及1 m土层内的积盐状况如图3所示。由图3可以看出,1 m土层内的积盐程度受季节变化的影响十分明显,盐分含量累积程度为:秋季>冬季>春季>夏季,且不同深度均表现为:秋季>冬季>春季>夏季,总体表现为秋季、冬季积盐,春季、夏季脱盐,研究区处于极端干旱性沙漠气候,秋季蒸发强烈,土壤中的盐分随潜水的蒸发向上移动,导致1 m土层内的盐分含量较高,而夏季处于作物生长旺盛期,在灌溉淋洗的作用下,1 m土层内的盐分含量较低。

不同季节下各深度土壤盐分含量有所差异,9月土壤中盐分含量随着土层深度的增加而出现减小的趋势,且在20—40 cm变化明显,盐分有明显的表聚现象,总体呈表聚型。12月土壤盐分含量的变化与9月相同,这是由于研究区干旱少雨,秋季蒸发强烈,盐分形成表聚后,在雨水补充较少的情况下,向下移动缓慢,依然呈表聚型,同时冬季土壤的冻结层也会对土壤盐分产生一定影响。3月和6月土壤盐分含量随着土层深度的增加而出现先减小后增大的趋势,总体呈底聚型。3月土壤中盐分含量在20—80 cm缓慢减少,80—100 cm开始增大,这主要与冬春灌和春季冰雪融化水分较为充足有关,盐分随着水分的淋洗向土层深处运动。6月土壤盐分含量在0—60 cm土层逐渐减少,而在60—100 cm土层中缓慢增加,这是由于6月正处于作物生长旺盛期,灌溉量较大,当地棉田全部采用滴灌的方式进行灌溉,滴灌的最大湿润锋在60 cm左右,因此6月土壤盐分含量表现为在0—60 cm土层中盐分受淋洗作用而下降,60—100 cm土层中又缓慢增加。

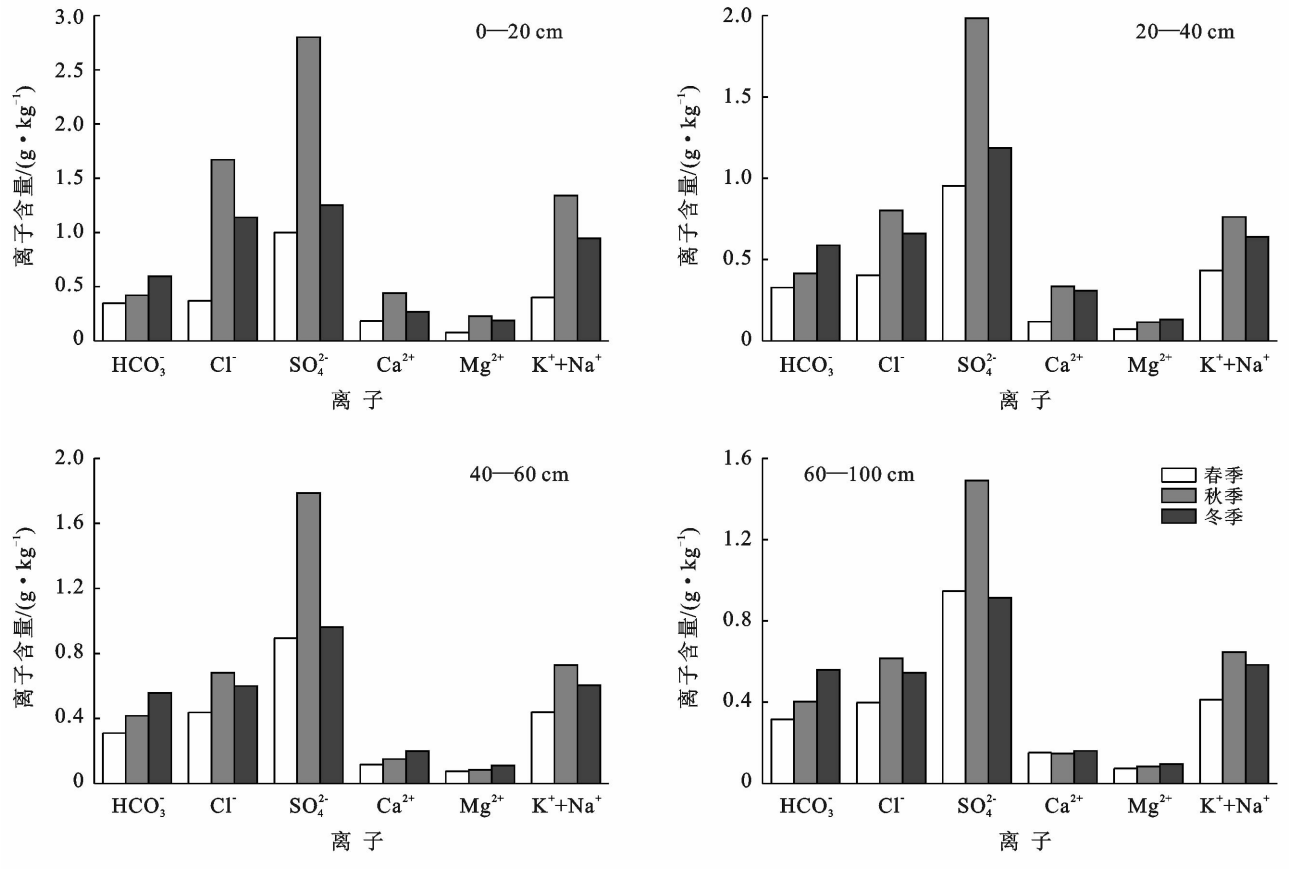


图 2　研究区土壤盐离子含量及其季节性分布特征

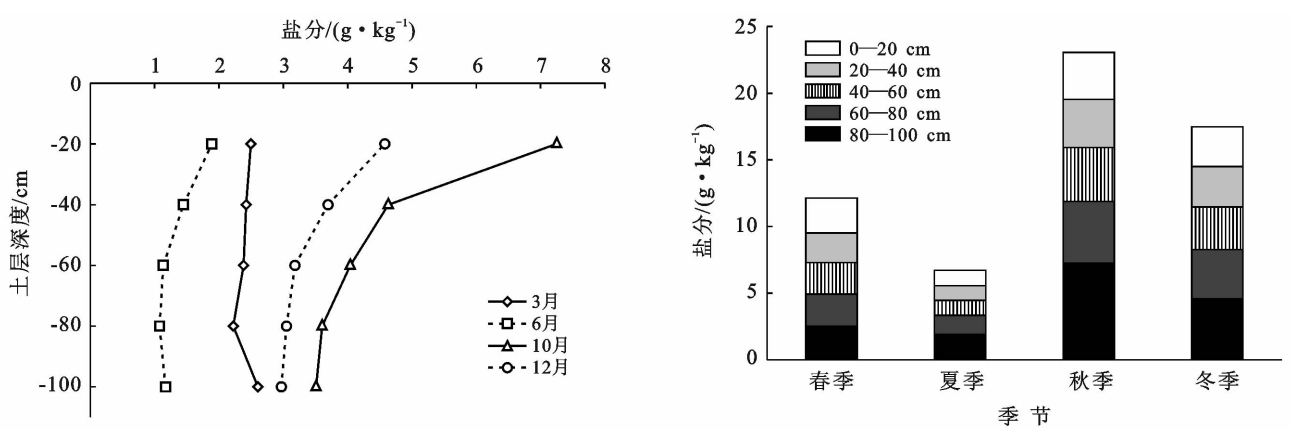


图 3　不同季节下土壤盐分的垂直变化及积盐状况

2.3　土壤盐分的水平分布

2.3.1　土壤盐分含量的空间结构特性　研究区主要种植作物为棉花,最大根系长度在 60 cm 左右,滴灌的最大湿润锋也在 60 cm 左右,因此土壤盐分的空间变异分析选取根域层(0—60 cm)和深层(60—100 cm)进行分析,在 GS+9.0 软件中经过选择不同步长进行拟合,比较不同模型下的决定系数与残差平方和,选出了决定系数(R^2)最大且残差平方和(RSS)最小的最佳理论模型,不同层次土壤的盐分含量的半方差模拟模型及拟合参数详见表 2。

在半方差函数模型中,块金值 C_0 是由最小取样距离内土地利用、灌溉、施肥、管理水平等随机因素共同引起的变异[15]。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起的变异。C_0+C 为基台值,是半方差函数随间距递增到一定程度后出现的平稳值,表示系统内总的变异[16]。由表 2 可知,土壤盐分含量的块金值、基台值均为正值,范围均在 0.095 4～0.751 3 之间,说明存在着由采样误差或最小取样距离内土壤特性变异或固有变异引起的各种正基底效应。但总盐分含量的 C_0 均较小,说明研

究区由随机变异、采样误差及距离误差所引起的变量变异程度不大。块金方差与基台值的比 $C_0/(C_0+C)$ 表示空间变异性的程度，是指由随机性因素引起的空间变异占系统总变异的比例，该值越高，说明由随机分布引起的空间变异性程度较大[17]。当块金方差与基台值的比值小于 25%时，表现为强空间相关性；若在 25%～75%时则表现为中等程度空间相关性；比值大于 75%时则表现为弱空间相关性[18]。夏季的深层土壤盐分含量和冬季的根域层土壤盐分含量符合线性模型，$C_0/(C_0+C)$的值为 1，由随机性因素引起空间变异程度较高，表现为弱空间自相关性，其它各时期土层的 $C_0/(C_0+C)$在 24.8%～49.2%之间，表现为中等和强的空间自相关性，这说明土壤盐分含量的空间分布除了受生物、气候、母质、地形、土壤类型等结构性因素的影响，最小取样距离内土地利用、灌溉、施肥、管理水平等随机因素对盐分的空间分布也有很大程度的影响。

表 2 不同层次土壤的盐分含量的半方差模拟模型及相关参数

季 节	土层深度/cm	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	$C_0/(C_0+C)$/%	决定系数	残差平方和
春季	0—60	高斯模型	0.143 7	0.426 4	34.0	0.591	0.042
	60—100	指数模型	0.116 8	0.417 6	28.0	0.393	0.018 6
夏季	0—60	指数模型	0.050 0	0.464 0	10.8	0.224	0.511
	60—100	线性模型	0.095 4	0.095 4	100.0	0.414	0.016
秋季	0—60	指数模型	0.231 0	0.930 0	24.8	0.606	0.373
	60—100	高斯模型	0.069 8	0.238 6	29.2	0.526	0.024
冬季	0—60	线性模型	0.751 3	0.751 3	100.0	0.703	0.202
	60—100	指数模型	0.165 2	0.331 4	49.8	0.473	0.015

2.3.2 土壤盐分的水平分布状况 为准确直观地描述各土层土壤含盐量在空间上的分布特征，根据半方差函数的拟合模型及其参数绘制了盐分含量的空间分布图(见封 2 附图 1)。由附图 1 可知，研究区春季根域层(0—60 cm)的土壤盐分在东南部的含量较高，西北部的含量较低。深层(60—100 cm)土壤盐分含量的分布特征与根域层土壤盐分含量刚好相反，西北部的含量较高，而东南部的含量较低，东北部土壤盐分含量在根域层和深层的差异不大，东北部靠近荒漠，远离河道，人为干扰也相对较少。夏季土壤盐分含量水平分布较为一致，根域层及深层土壤盐分在西北部较高，东南部较低，这可能与生育期内的灌溉周期和灌水量的差异有关。秋季土壤盐分含量总体较高，从水平分布来看，根域层盐分含量较高的区域主要分布在研究区的中部以及西南方向，原始保留地和荒地较多的区域，这与实际采样调查的结果正好相符，西北部的盐分含量相对较低，深层土壤盐分的水平分布基本一致，在秋季强烈的蒸发下，深层土壤中的盐分随潜水的蒸发被带到地表并聚集。冬季土壤盐分的水平分布在根域层和深层均表现为西南部高，东北部底，且规律明显，这与秋季土壤盐分含量的分布有很大的相似性。

3 讨 论

3.1 季节性盐渍化特征的变化

本研究对三十一团灌区不同季节的土壤盐渍化特征和盐分含量变化进行了研究，结果表明研究区土壤盐分含量受季节影响明显，在不同深度均表现为：9 月＞12 月＞3 月＞6 月，这与窦超银[19]等人的研究结论“盐分运动受水分运动影响明显，周年盐分动态可以分为春季强烈蒸发—积盐阶段、灌溉淋洗—稳定阶段、雨季淋溶—脱盐阶段、秋季蒸发—积盐阶段和冬季相对稳定阶段 5 个阶段”有所不同，春季土壤的盐分含量并不高，这是因为研究区地处沙漠边缘，属极端干旱气候，降雨稀少，为了保证作物正常生长，当地每年都会进行冬春灌，并且冬季的冻结期较长，春季采样是在 2018 年 3 月 20 日左右进行的，此时冰雪基本融化，对土壤的淋洗作用较强，导致盐分向土层深处运动，但在采样过程中发现，部分农田的边缘地带，依旧春季返盐严重，地表有盐霜。各季节土壤盐分变异程度均较强，0—20 cm 土层中土壤盐分大多处于强变异性变异性，20—100 cm 土层中土壤盐分大多处于中等变异性，这与赛佳美[20]、王雪梅[21]等对干旱地区土壤盐渍化特征的研究结果一致，耕作层(0—20 cm)更容易受到外界因素的干扰。研究区土壤盐分组成中阴离子主要为 SO_4^{2-} 和 Cl^-，阳离子主要为 $K^+ + Na^+$，土壤盐分类型春季、秋季以硫酸盐型为主，秋季以氯化物硫酸盐型为主，冬季以硫酸盐—氯化物型为主，这与当地团志、史料所记载的三十一团盐分组成以硫酸盐—氯化物为主相符合，并且通过分析地表灌溉用水和灌溉排水以及春季地下水的各项指标发现，地下水、灌溉用水和灌溉排水中阴离子也均以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主，阳离子均以 K^+ 和 Na^+ 为主，这与土壤盐分的主要离子相符。

3.2　土壤盐分的分布变化

不同季节下土壤盐分含量的垂直变化有所差异,9 月与 12 月的土壤盐分含量变化呈表聚型,3 月与 6 月的土壤盐分含量变化呈底聚型。秋季蒸发强烈且地表覆盖度较小,盐分随水分运用表聚明显,在 0—40 cm 土层内的土壤盐分含量变化较大,这与赵锐锋[17]、杨红梅[22]等在塔里木河流域开展的盐分空间变异研究结果相符。研究区 12 月的土壤盐分含量同样呈表聚型,主要与秋季的强烈蒸发积盐和冬季土壤冻融有关。12 月采样是在冬灌后进行,但其盐分变化趋势与 9 月一致,表层土壤盐分含量并没有因为冬灌而降低,这是由于当地水资源较为缺乏,管控严格,灌溉用水一般统一供给,冬灌灌水较晚,而一般在 11 月上旬就会形成冰层,采样时大部分农田地表有 10—20 cm 厚的冰层,这时的水分依然聚集在地表和浅层土壤当中,没有达到充分淋洗作用,并且胡宏昌等[23]研究发现,在强烈的冻结作用中,水分会向土壤表层冻结面迁移,导致盐分会从地下水和深层土壤向表层运移,此时土体上部盐分含量较高。富广强等[24]对冻融土壤的水盐运移进行了研究,结果也表明冻融情况下土壤剖面盐分在冻结期和初蒸期表聚作用明显,土壤盐分呈现出冻结期积盐、融化期脱盐、蒸发期再积盐的规律。3 月土壤中盐分含量随着土层深度的增加出现先减小后增大的趋势,在 0—80 cm 土层内盐分含量呈减小的趋势,且在 60—80 cm 变化幅度相对于 0—60 cm 处较大,这可能与土壤质地有关,春季冰雪融化以及冬灌的冻结层解冻而产生较多水分对土体淋洗作用较强,而采样过程中发现研究区土壤在 60—70 cm 左右时出现夹沙层,夹沙层以下全部为沙土,团志中也有所记载,灌区内成土母质以风积母质为主,土壤盐分含量在沙层的变化相对于根域层(0—60 cm)较大,盐分含量在 80—100 cm 土层内又有所增加,这主要与水分的淋洗深度和淋洗效率有关。6 月土壤盐分含量的变化与 3 月基本相同,受沙层和膜下滴灌最大湿润锋的影响,在 60—80 cm 土壤盐分含量变化较大,而在 80—100 cm 土层内又有所增加。

研究区土壤盐分的水平分布主要受土地利用类型、地形因素、以及距离水源的位置影响,这与贡璐[25]、张飞[26]、刘迁迁[27]等人的研究结果相一致。春季受恰拉水库的影响,根域层(0—60 cm)的土壤盐分在西北部的含量较高,东南部的含量较低,而深层(60—100 cm)土壤盐分含量的分布特征与根域层土壤盐分含量刚好相反,秋季、冬季土壤盐分的高值区都出现在研究区的西南方向,这里靠近塔里木河,原始保留地和荒地较多的区域,地表起伏不平,这与实际调查的结果也相符合。从研究区土壤盐分的空间结构来看,块金方差与基台值的比 $C_0/(C_0+C)$ 大部分在 24.8%～49.2%之间,表现为中等和强的空间自相关性,这与刘广明[28]、宋玉[29]等在新疆其它绿洲灌区研究所发现的盐分变异程度有很大的相似性,但夏季的深层土壤盐分含量和冬季的根域层土壤盐分含量 $C_0/(C_0+C)$ 的值为 1,由随机性因素引起空间变异程度较高,表现为弱空间自相关性,这主要是因为本研究的盐分含量水平分布是以根际层(0—60 cm)和深层(60—100 cm)为研究对象,研究区的主要种植作物为棉花,三十一团是农二师最大的棉花基地之一,而棉花的根系长度最大在 60 cm 左右,并且由于独特的地理条件,灌区内土壤在 60—70 cm 出现沙层,沙层及以下的土壤盐分含量和各盐分离子基本相同,因此选取了根际层和深层来进行分析,反映出研究区作物根系层的盐分状况以及沙土层的盐分状况。用每个采样点不同深度的盐分均值来代表根际层和深层土壤盐分,因此有一定随机性因素的影响,这也是本研究的一个不足之处,为了更好地掌握研究区土壤盐渍化状况,需要在研究区不同季节土壤水盐运移规律和盐分累积状况等方面进行更深入地研究。

4　结 论

(1) 研究区土壤的 pH 值的范围在 8.09～8.24 之间,不同季节之间的差异不大,土壤呈碱性。土壤盐分含量受季节影响明显,在不同深度均表现为:秋季>冬季>春季>夏季。

(2) 研究区不同季节下各深度土壤中主要离子均相同,土壤盐分组成中阴离子主要为 SO_4^{2-} 和 Cl^-,阳离子主要为 $K^+ + Na^+$。SO_4^{2-},Cl^-,$K^+ + Na^+$ 含量在不同深度土壤中均表现为:秋季>冬季>春季,HCO_3^- 含量在不同深度土壤中均表现为:冬季>秋季>春季,Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量在不同深度土壤中无明显季节性变化规律,土壤盐分类型春季和秋季以硫酸盐型为主,冬季以氯化物—硫酸盐型为主。

(3) 研究区土壤盐分的水平分布主要受土地利用类型、地形因素、以及距离水源的位置影响,春季根域层(0—60 cm)土壤的盐分在西北部的含量较高,东南部的含量较低,而深层(60—100 cm)土壤盐分在西北部的含量较底,东南部的含量较高。夏季土壤盐分整体较底,且水平分布较为一致。秋季、冬季土壤盐分的高值区都出现在研究区的西南方向。

(4) 灌区内土壤盐分的周年变化总体表现为秋季、冬季积盐,春季、夏季脱盐,秋季与冬季的土壤盐

分含量随着土层深度的增加逐渐减小，总体呈表聚型，春季与夏季的土壤盐分含量随着土层深度的增加呈先减小后增大的趋势，总体呈底聚型。

[参 考 文 献]

[1] 云安萍.西北绿洲典型盐渍土区土壤盐分的空间分布特征及淋盐需水量分析[D].北京：中国农业大学，2015.

[2] 李新国，樊自立，李会志，等.开都河下游灌区土壤盐渍化动态变化研究[J].水土保持研究，2011，18(3)：64-67，72.

[3] 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，2000，23(2)：177-181.

[4] 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[J].干旱区研究，2004，21(3)：250-253.

[5] 沈丽娜，吴巍，周孝德，等.塔里木河下游土壤盐分空间变异规律研究[J].水资源与水工程学报，2016，27(2)：231-236，240.

[6] 辛承松，董合忠，唐薇，等.棉花盐害与耐盐性的生理和分子机理研究进展[J].棉花学报，2005，31(5)：309-313.

[7] 胡宗英，孙泽威.土壤盐渍化及其危害的研究进展[J].安徽农业科学，2013，41(33)：12888-12890.

[8] 李晶，何志斌，杜军，等.冬灌对冻融期干旱区荒漠绿洲农田土壤水热状况的影响[J].农业工程学报，2018，34(11)：105-112.

[9] 王艳，廉晓娟，张余良，等.天津滨海盐渍土水盐运动规律研究[J].天津农业科学，2012，18(2)：95-97，101.

[10] 赵秀芳，杨劲松，姚荣江.苏北典型滩涂区土壤盐分动态与水平衡要素之间的关系[J].农业工程学报，2010，26(3)：52-57.

[11] 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，2001，53(2)：271-276.

[12] Chen Weiping, Hou Zhenan, Wu Laosheng, et al. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2010,97(12):2001-2008.

[13] 雷志栋，杨诗秀，许志荣，等.土壤特性空间变异性初步研究[J].水利学报，1985，30(9)：10-21.

[14] 南京大学地理系.土壤地理学土壤学基础与土壤地理学[M].北京：人民教育出版社，1983.

[15] 胡顺军，康绍忠，宋郁东，等.渭干河灌区土壤水盐空间变异性研究[J].水土保持学报，2004，18(2)：10-12，20.

[16] 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.

[17] 赵锐锋，陈亚宁，洪传勋，等.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[J].地理研究，2008，27(1)：135-144.

[18] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central lowa soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,58(5):1501-1511.

[19] 窦超银，康跃虎，万书勤.地下水浅埋区重度盐碱地覆膜咸水滴灌水盐动态试验研究[J].土壤学报，2011，48(3)：524-532.

[20] 赛佳美.荒漠绿洲土壤盐渍化特征与灌溉水质关系研究[D].陕西 西安：长安大学，2018.

[21] 王雪梅，康璇，赵枫.不同土地利用方式下渭—库绿洲土壤盐渍化特征分析[J].水土保持研究，2016，23(1)：160-164.

[22] 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.

[23] 胡宏昌，田富强，张治，等.干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态[J].水利学报，2015，46(9)：1037-1046.

[24] 富广强，李志华，王建永，等.季节性冻融对盐荒地水盐运移的影响及调控[J].干旱区地理，2013，36(4)：645-654.

[25] 贡璐，韩丽，任曼丽，等.塔里木河上游典型绿洲土壤水盐空间分异特征[J].水土保持学报，2012，26(4)：251-255，278.

[26] 张飞，李怡博，王东芳，等.精河绿洲盐渍土表层土壤盐分因子的空间变异及分布格局[J].生态与农村环境学报，2018，34(1)：64-73.

[27] 刘迁迁，苏里坦，刘广明，等.伊犁察南灌区土壤盐分时空变异特征与运移机理研究[J].农业机械学报，2017，48(12)：221-228.

[28] 刘广明，吕真真，杨劲松，等.典型绿洲区土壤盐分的空间变异特征[J].农业工程学报，2012，28(16)：100-107.

[29] 宋玉，塔西甫拉提·特依拜，吴雪梅，等.于田绿洲不同季节表层土壤盐渍化程度的空间变异特征[J].干旱地区农业研究，2014，32(6)：171-175，214.