文章编号:1000-7601(2015)06-0216-06 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2015.06.36

干旱区微咸水滴灌条件下典型土壤盐碱化影响因素研究

邵建荣[1,2],张凤华[1,2],董 艳[1],李乐佳[1],赵 宇[1],
张敬远[1],胡治强[1],徐 秀[1]

(1.石河子大学农学院,新疆 石河子 832003;2.新疆兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆 石河子 832003)

摘 要: 以代表性的沙壤和黏壤棉田土壤为研究对象,分别利用高、低矿化度水进行 5 年灌溉,即黏壤 – 低矿化度,黏壤 – 高矿化度,沙壤 – 低矿化度,沙壤 – 高矿化度共四个处理,测定 0 ~ 100 cm 分层土样总盐、pH、Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SAR、ESP 等指标,以研究玛纳斯河流域冲积扇扇缘和干三角洲区不同浓度微咸水长期滴灌条件下土壤盐分、土壤碱度、主要阳离子的变化,探讨对土壤盐化和碱化产生主要影响的离子,为干旱区微咸水灌溉生态安全管理提供理论参考。结果表明:冲积扇扇缘带黏壤土和干三角洲沙壤土盐化和碱化相伴发生,且主要受灌溉水矿化度影响;对土壤盐化和碱化均产生主要影响的离子为 Na^+,对土壤盐分产生主要影响的离子为 Na^+ 与 Ca^{2+}。这表明玛纳斯河流域土壤盐碱化的治理应从降低灌溉水 Na^+ 入手,将控制灌溉水总盐分和降低 Na^+ 占比结合起来,达到既降盐又防治土壤持续碱化的目的。

关键词: 微咸水;滴灌;土壤盐碱化;土壤离子;干旱区

中图分类号: S156.4+1 **文献标志码:** A

Influence factors research of typical soil salinization and alkalization under brackish water drip irrigation in arid areas

SHAO Jian-rong[1,2], ZHANG Feng-hua[1,2], DONG Yan[1], LI Le-jia[1], ZHAO Yu[1],
ZHANG Jing-yuan[1], HU Zhi-qiang[1], XU Xiu[1]

(*Agricultural College of Shihezi University, Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi, Xinjiang, China* 832003)

Abstract: In order to study the change of soil salinity, soil alkalinity and main cations under long time drip irrigation with different concentration of brackish water in alluvial fan of the edge and the dry delta area in Manas River Basin, taking the representative sandy loam and clay loam soil in cotton field as the research object, using the high and low saline water for 5 years irrigation, has set up four treatments as clay loam-low salinity, clay loam-high salinity, sandy loam-low salinity and sandy loam-high salinity, measured the soil total salt, pH, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, SAR, ESP, etc. in 0 ~ 100 cm soil layers, discussed the ions that have produced the main impact to soil salinization and alkalization, to provide the theoretical reference of ecological security for brackish water irrigation in arid area. The results indicated that: The soil salinization and alkalization in clay loam of alluvial fan of the edge and sandy loam of the dry delta area was together occurred, also was mainly affected by irrigation water salinity. The ion of main influence for soil salinization and soil alkalization was Na^+ and for soil salinization was Na^+ and Ca^{2+}. It indicated that amelioration of the soil salinization in Manas River Basin should be started with reducing irrigation water Na^+, and combined control of total salt content in irrigation water with reducng the proportion of Na^+ to achieve the purpose of reducing salt and preventing and controlling soil alkalization.

Keywords: brackish water; drip irrigation; soil salinization and alkalization; soil ion; arid area

---

收稿日期: 2015-02-21
基金项目: 教育部科学技术研究项目(213039A);国家自然科学基金项目(31360320);国家科技支撑项目(2014BAC14B03)
作者简介: 邵建荣(1989—),男,甘肃天水人,硕士,主要研究方向为农业生态与环境。E-mail:sjr2013@126.com。
通信作者: 张凤华(1970—),女,山东邹县人,教授,博士,博导,主要从事干旱区绿洲农业生态方面的研究。E-mail:zfh2000@126.com。

据全国第二次土壤普查数据,我国盐渍化土壤为3 600 万 hm^2,耕地中盐渍化面积达到 920.9 万 hm^2,占耕地面积的 6.62%,主要分布在我国的东北、华北、西北内陆地区以及长江流域以北的沿海地带[1]。根据盐碱土形成的气候、土壤、水文地质、水资源、土地利用、农业生产和地理分布等自然社会条件,我国盐碱土划分为:西北内陆干旱地区、黄河中上游半干旱地区、黄淮海平原半湿润 - 半干旱地区、东北半湿润 - 半干旱地区、滨海半湿润地区[2]。新疆兵团团场基本上都是在盐碱地上发展起来的,绝大部分盐碱土是典型的内陆干旱区盐碱土。新疆 0.1 亿 hm^2 垦荒地中盐碱化土壤占 75%以上,1/3 耕地遭受不同程度的盐渍化危害,兵团的农业发展史就是同盐碱地的斗争史。

微咸水作为一种非常规水资源,在干旱区灌溉农业中扮演着重要角色,一般认为微咸水矿化度为 1 ~ 5 $g \cdot L^{-1}$[3-4]。王丹等[5]对微咸水滴灌条件下盐分离子的分布研究表明,Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-} 易随水分迁移,而 Cl^-、Na^+、HCO_3^- 则主要分布在湿润体内,而且土壤剖面盐分总量不会增加,但土壤结构会发生改变从而产生盐碱危害。新疆以灌溉农业为主,由于地理、气候等因素的影响,下游灌溉水矿化度较高,农业灌溉满足了作物生长的需要,在作物的生长需水期降低了土壤表层盐分。但是灌溉间歇期强烈蒸发和植物蒸腾都将加剧盐分重新上移,如此反复,增加了土壤胶体离子的交换吸附频率,土壤离子组分的变化比较大,一定程度上改变了土壤性质[6]。采用微咸水滴灌可以使盐分在淋洗作用下在湿润锋边缘积累,滴头下方的土壤含盐量比较小,有利于作物正常生长[7],但长期的咸水滴灌很可能导致盐分的表聚[8],这些盐分可能会随着灌溉水或降水向下移动到作物根区,从而抑制作物对水分和养分的吸收,影响作物的生长和产量[9]。Esechie H A、肖振华、Shani U 等研究表明咸水灌溉会对作物出苗、生长、产量、品质等产生影响[10-12]。

绿洲盐渍化土地主要分布在洪积冲积扇扇缘、冲积平原、干三角洲,而地下水位较高且流动不畅的冲积扇扇缘盐渍化现象更突出[13]。颜安等[14]对玛纳斯河流域耕层土壤盐分的 Kriging 插值分析亦表明,灌区中北部地区盐分含量较高。微咸水灌溉是解决水资源短缺的一个重要途径,但缺乏对一些相关基础性问题研究,如覆膜条件下作物需水量、作物耐盐度[15],特别对于膜下滴灌土壤长期积盐特征以及土壤碱化发展等缺乏研究。本研究以新疆玛纳斯河流域主要棉花产区 147 团(冲积扇扇缘)、150 团(干三角洲)为试验地,进行了 0 ~ 100 cm 的剖面采样,对比分析了不同水质长期滴灌条件下土壤盐分剖面分布和土壤碱化的发展状况,运用相关性分析方法,明确了对土壤盐化和碱化产生重要影响的离子,以期为流域生态安全管理及灌溉模式的完善提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

玛纳斯河流域位于新疆天山北麓、准噶尔盆地南缘古老山前冲积平原,东经 84°43′ ~ 86°35′,北纬 43°21′ ~ 45°20′,平均海拔 300 ~ 500 m,为典型的山盆结构。属温带大陆性气候,冬季长而严寒,夏季短而炎热,年平均气温 7.5℃ ~ 8.2℃,无霜期 147 ~ 191 d,年降雨量 180 ~ 270 mm,年蒸发量 1 000 ~ 1 500 mm,是全国第四大灌溉农业区[16-17]。

试验点(图 1)147 团、150 团分别处于新疆玛纳斯河流域冲积扇扇缘(亦称泉水溢出带)、干三角洲(亦称尾闾湖泊带)。虽然同处干旱区,降水稀少,但受到地下水位及复杂气候条件等因素的影响,两种地貌间土壤盐碱情况有明显差异,尤其是 150 团北缘与沙漠相邻,以风沙土、夹黏土为主,受到沙漠增温效应的影响比较明显,而 147 团处于泉水溢出带,地势平坦,土壤质地以黏壤土、黏土夹层为主[18],地下水位较高且流动不畅,其土壤盐分受地下水矿化度影响较明显[19]。

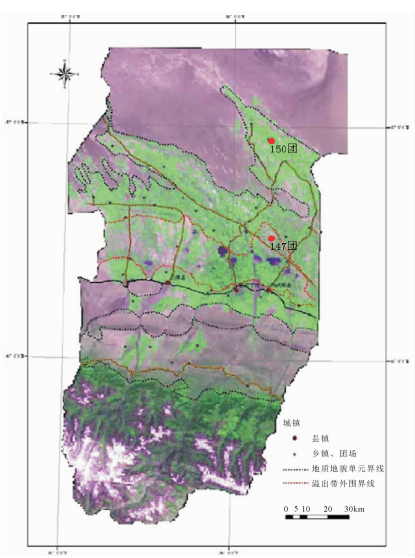

图 1　试验区地理位置

Fig.1　The geographical position of experiment area

1.2　样品采集及试验方法

试验样地选取 5 a 以上滴灌棉田,共 4 个不同处理(如表 1),从土壤质地与灌溉水矿化度两个方

面表示不同处理,例如"NR – H"中"NR"代表黏壤土,"H"代表高矿化度灌溉水。在棉花未灌出苗水前进行膜间采样,采用梅花布点法在每块样地取 3 ~ 5 个点进行分层混合,表层按照 0 ~ 10 cm,10 ~ 20 cm 分层,20 ~ 100 cm 每隔 20 cm 土层取一个土样。在采集土样的同时用塑料桶采集相应田块灌溉水。土壤样品含水率当天测定,其它样品用密封袋保存,带回实验室处理。土样经自然风干,磨碎、过 1 mm 筛备用。

表 1 样地基本情况

Table 1 The basic information of sample areas

处理 Treatments	灌溉水 Irrigation water		地理因素 Geographical factors			气候因素 Climate factors			
	矿化度 Salinity /(g·L^{-1})	pH	经纬度 Longitude and latitude/(°)	海拔 Elevation /m	地下水埋深 Groundwater depth/m	最高温度 The highest temperature/℃	≥10℃积温 Accumulated temperature/℃	年降雨量 Annual rainfall/mm	蒸发量 Evaporation /mm
黏壤 – 低 Clay loam – low (NR – L)	1.80	8.11	44.5908 N 86.1517 E	372	0.5 ~ 2.5	24 ~ 26	3478.0	197.2	1600 ~ 1800
黏壤 – 高 Clay loam – high (NR – H)	4.67	7.86	44.6012 N 86.1514 E	371					
沙壤 – 低 Silty loam – low (SR – L)	2.08	8.07	44.9837 N 86.1101 E	341	1.95 ~ 4.2	25 ~ 28	3693.8	107.9	2200 ~ 2500
沙壤 – 高 Silty loam – high (SR – H)	4.86	7.88	44.9799 N 86.1080 E	341					

注:表中地下水埋深及气候数据根据张凤华《绿洲农业生态系统演替及可持续发展方向》和赖先齐《绿洲盐渍化弃耕地生态重建研究》整理)。

Note: Groundwater table and climate data in the table were according to Zhang Fenghua 's *The Succession and Sustainable Development of Oasis Agroecosystem* and Lai Xianqi's *Ecological Rebuilt of Salinization Wasteland Land in Oasis*.

1.3 指标测定与数据分析

按土水比 1∶5 制备土壤浸提液,电导率采用 DDSJ – 308A 型电导率仪测定,pH 采用 BPH – 252 pH 计测定,K^+ 和 Na^+ 采用火焰光度法测定,Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 滴定法测定。灌溉水直接测定电导率和 pH 值,方法同上[20]。

Na^+ 吸附比 SAR 计算公式:

$$SAR(mmol\cdot L^{-1}) = [Na^+]/([Ca^{2+} + Mg^{2+}]^{1/2})$$

碱化度 ESP 计算公式:

$$ESP = [Na^+]/CEC \times 100\%$$

采用 SPSS 10.0 及 Excel 2007 进行数据统计分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉水质条件下土壤盐分分析

由土壤盐分分布图(图 2)可以看出,低矿化度灌溉水(矿化度 1.80 ~ 2.08 g·L^{-1})长期灌溉能够控制盐分淋溶到 90 cm 以下,使盐分呈底聚型分布,有利于降低作物根区盐分胁迫,不同土质差异不大。高矿化度灌溉水(矿化度 4.67 ~ 4.86 g·L^{-1})土壤盐分在不同地貌间差异较大,土壤盐分明显高于低矿化度水质灌溉,说明矿化度 4.67 ~ 4.86 g·L^{-1}的咸水灌溉已经造成了连作棉田明显积盐,表现在,0 ~ 100 cm 土体总盐的升高以及沙壤土表层积盐(SR – H)、粘壤土耕层(30 cm 左右)积盐(NR – H),高矿化度咸水灌溉土壤有向重度盐化演变的趋势。

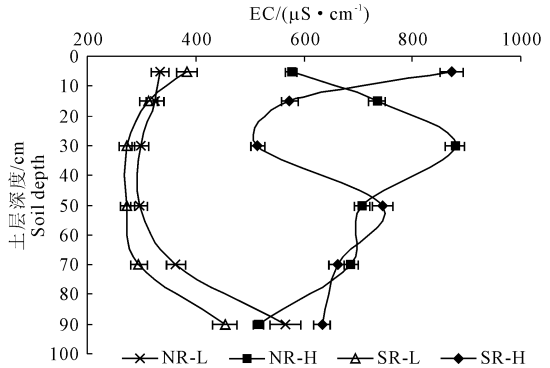

图 2 土壤盐分分布

Fig.2 Distribution of the soil salinity

孙林等[21]对扇缘带芨芨草"植物 – 土壤水盐系统"(潜水矿化度 3.5 g·L^{-1})的模拟结果也显示了扇缘带植物根区吸水对根区积盐的特点,根区高浓度盐分以及随灌溉水(降水)向下移动到作物根区的表层高浓度盐分会抑制作物对水分和养分的吸收,影响作物的生长和产量,从采样期间棉花出苗率和长

势来看,可能是高矿化度水质灌溉对棉花生长产生胁迫,这种灌溉管理模式亟需改进。

不同土壤类型盐分含量及分布不显著,而不同矿化度灌溉水条件下土壤盐分含量差异非常显著。由此可见,经过半个多世纪的开垦后,玛纳斯河流域农田土壤盐碱化主要影响因素由地理、气候因素控制为主[15]转向灌溉水矿化度控制为主,另外咸水灌溉下土壤类型也是影响土壤积盐特征的因素之一。

滴灌条件下少量、高频灌溉可以减少盐分累积,提高作物产量[22-23],一定浓度的盐分有利于土壤颗粒的絮凝团聚,增加土壤结构稳定性[24,15]。微咸水高频灌溉促进了作物的生长,而水中带来的盐分又会对作物生长产生抑制作用[25],因此,在作物需水量与盐分耐受度之间形成了一个平衡。耐盐作物种类、不同质地土壤盐分累积过程等都影响到最适灌溉水质的选取[26]。基于以上考虑,将灌区水资源统一整合规划,按照作物生长不同时期耐盐度大小,进行适当比例的高、低矿化度水轮灌或稀释灌溉,能够实现水资源的高效利用,缓解干旱区淡水资源紧张的压力。

2.2　不同灌溉水质条件下土壤碱化分析

土壤碱化度(ESP)和钠离子吸附比(SAR)变化表明(图 3),高矿化度水灌溉条件下土壤 ESP 和 SAR 均不同程度高于低矿化度水灌溉,高矿化度水灌溉下土壤碱度在沙壤和黏壤土之间的差异更加明显,而低矿化度灌溉两种土壤类型之间差异不大。pH 指标也能够反映不同土壤碱化程度的大小,但由于土壤环境缓冲性的影响,弱化了不同处理之间的差异。

土壤碱化指标依然与灌溉水矿化度大小有关,灌溉水矿化度从小到大为:NR – L < SR – L < NR – H < SR – H,ESP 和 SAR 从小到大为:SR – L < NR – L < NR – H < SR – H(60 cm 以上),NR – L < SR – L < NR – H < SR – H(60 cm 以下),可见,60 cm 以下土壤碱化程度与灌溉水矿化度大小一致,60 cm 以上土壤表现出低矿化度水灌溉下黏壤土碱化程度大于沙壤土。干三角洲地区沙壤土 40 ~ 60 cm 土层 ESP 大于 20%,为碱土层,不适宜作物生长。

与土壤盐分变化相似,土壤碱度变化依然与灌溉水矿化度有关。长期高矿化度水质灌溉可能促进土壤碱化,沙壤土碱化现象比黏壤土更加明显,这可能与水分运动的频率有关[10]。

2.3　不同灌溉水质条件下主要阳离子变化

土壤中离子含量受土壤本身性质及灌溉水离子浓度的影响,当土壤盐分较低时,灌溉水质起主要作用,相反,土壤盐分较高时,土壤本身的离子分布起主要作用。试验从土壤钠质化的角度出发,选择 4 种主要的阳离子进行研究,结果表明(图 4),钾离子作为植物养分离子在土壤中的分布近似呈线性递减,不同土质、不同水质间差异均不显著,主要集中在表层或者耕层,对土壤盐碱化的贡献不明显。镁离子作为一种土壤颗粒“粘合剂”,在土体中分布较均匀,可能由于水中镁离子浓度较低,不同矿化度微咸水灌溉对土壤中镁离子的分布及含量的影响不明显。钙离子的存在亦有助于土壤颗粒的絮凝,高矿化度水带入的钙离子主要在 0 ~ 30 cm 被截留,可能是钠离子的交换吸附导致钙离子成为游离状态随毛管水蒸发在上层聚集[27]。钠离子在不同土质和不同灌溉水质条件下差异比较显著,尤其与灌溉水质关系密切,长期高矿化度水灌溉的 NR – H 和 SR – H 钠离子和钙离子明显高于低矿化度水灌溉的 NR – L 和 SR – L,前者高出 2 ~ 4 倍,说明长期高矿化度水灌溉改变了土壤性质,通过频繁的交换吸附使得土壤交换性复合体趋于钠饱和状态,这也是土壤 ESP、SAR 升高的原因。

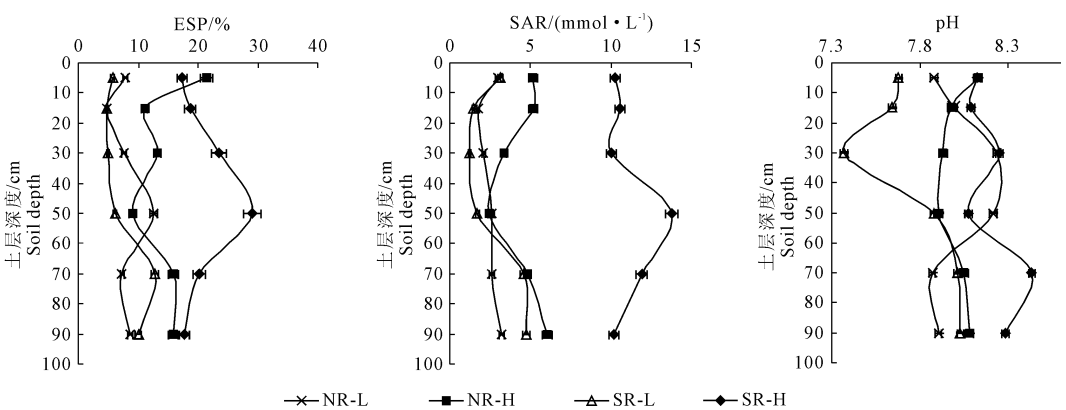

图 3　土壤碱化指标的变化

Fig.3　The change of soil alkaline indicators

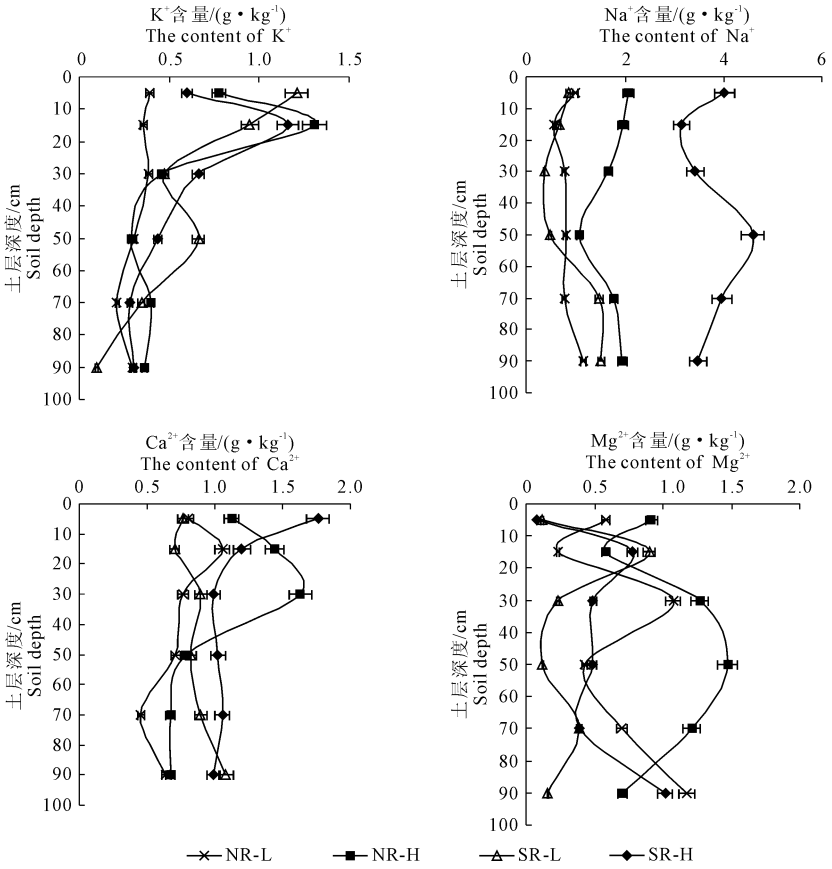

图 4 K^+、Mg^{2+}、Na^+、Ca^{2+} 4 种主要阳离子分布

Fig.4 The distribution of four main cations(K^+、Mg^{2+}、Na^+、Ca^{2+})

2.4 相关性分析

为了探讨各个测定指标间的联系,我们将盐度指标(EC)、碱度指标(ESP、SAR)与离子指标、pH 进行相关性分析,如表 2 所示。

相关性分析结果表明,Na^+ 与盐度指标和碱度指标相关性均非常显著,说明 Na^+ 的变化对土壤盐和碱的发展均有显著影响。并且 Na^+ 与 Ca^{2+} 相关性也比较显著,说明在滴灌条件下土壤 Na^+ 的增加可能增大了土壤胶体 Ca^{2+} 交换的频率,使 Ca^{2+} 变成游离状态重新分布。在 4 种主要阳离子中,Na^+ 和 Ca^{2+} 与 EC 相关性极显著,说明 Na^+ 和 Ca^{2+} 是土壤盐分构成的主要离子。

盐度指标(EC)和碱度指标(ESP、SAR、pH)有很大的联系。首先,EC 和 SAR、ESP 呈极显著相关,说明该流域土壤盐化和碱化基本上相伴发生,高矿化度水质灌溉或者土壤本身含盐量高都可能导致土壤碱化发展。土壤碱度指标 ESP、SAR 与 pH 呈显著或极显著相关,说明 pH 在一定程度上可以说明土壤碱度的变化,但在探讨土壤盐化和碱化的内在联系时,pH 指标没有说服力,具有局限性。

表 2 盐度、碱度与离子指标相关性分析

Table 2 The correlation analysis of salinity, alkalinity and ion indicators

各指标 Indicators	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SAR	ESP	EC	pH
K^+	1							
Na^+	-0.002	1						
Ca^{2+}	-0.034	0.379*	1					
Mg^{2+}	-0.157	-0.078	-0.154	1				
SAR	0.002	0.981**	0.230	-0.142	1			
ESP	-0.124	0.829**	0.214	0.135	0.817**	1		
EC	0.009	0.715**	0.604**	0.253	0.615**	0.514**	1	
pH	-0.214	0.347	-0.069	0.165	0.361*	0.554**	0.005	1

注:* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: * represent correlated significant at 0.05 level (double side), ** represent correlated significant at 0.01 level (double side).

由此可见,土壤中 Na^+ 的含量及分布很大程度上决定了土壤盐碱的状况,土壤中游离态钠离子和吸附态钠离子处于动态平衡状态,土壤中钠离子的增加会导致二价离子被置换进入土壤溶液[5],破坏土壤原有的团聚体结构,使粘粒趋于膨胀和分散并堵塞孔隙,使土壤水力传导度降低,通气性变差,并使有机胶体和无机胶体随淋溶下移,使表土质地变轻,而碱化层相对粘重,并形成粗大的不良结构[28],最终导致被迫弃耕。因此,玛纳斯河流域土壤盐碱的治理应从 Na^+ 入手,将控制土壤盐分和降低 Na^+ 占比结合起来,达到既降盐又防治土壤持续碱化的目的。

3　结论与讨论

玛纳斯河流域扇缘带与干三角洲不同质地土壤之间的盐分含量及分布差异的主要影响因素是灌溉水矿化度。高矿化度水长期灌溉导致黏壤、沙壤土 0 ~ 100 cm 土层尤其是耕层土壤明显积盐,影响作物生长;低矿化度水灌溉降低了 0 ~ 70 cm 土壤盐分,使盐分呈底聚型分布,而且不同土质盐分差异不大,矿化度 1.80 ~ 2.08 $g \cdot L^{-1}$ 的渠水滴灌既满足了作物生长的需要,又能够防止次生盐碱化的发生。所以,应整合流域或灌区现有水资源进行适当比例的高、低矿化度水轮灌或稀释灌溉,从而实现水资源的高效利用,缓解干旱区淡水资源紧张的压力。

土壤碱度变化依然与灌溉水矿化度有关。长期高矿化度水质灌溉明显促进了土壤碱化,咸水灌溉下沙壤土碱化现象比黏壤土更加明显。

冲积扇扇缘带黏壤土和干三角洲沙壤土盐化和碱化相伴发生,且主要受灌溉水矿化度影响。低矿化度灌溉条件下黏壤土和沙壤土差异不大,高矿化度灌溉条件下不同质地土壤耕层盐分与碱度有差异。对土壤盐化和碱化均起主要影响的离子为 Na^+,对土壤盐分起主要影响的离子为 Na^+ 与 Ca^{2+},因此,玛纳斯河流域土壤盐碱化的治理应从降低灌溉水 Na^+ 入手,将控制灌溉水总盐分和降低 Na^+ 含量结合起来,达到既降盐又防治土壤持续碱化的目的。

参 考 文 献:

[1] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.

[2] 杨小康,王　雪.盐碱地改良技术研究综述[J].江西农业学报,2012,24(3):114-116.

[3] 马太玲,袁保惠,梅金铎.内蒙河套灌区建立回归水灌溉系统可行性分析[J].灌溉排水,2001,20(2):69-72.

[4] Rhoades J D, Andiah A K, Mashali A M. The use of the saline water for production[R]. FAO: Irrigation and Drainage, 1997:48.

[5] 王　丹,康跃虎,万书勤.微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J].农业工程学报,2007,23(2):83-87.

[6] Tedeschi A, Dell'Aquila R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics [J]. Agricultural Wate Management,2005,77:308-322.

[7] Yaron B, Shalhevet J, Shimshi D. Pattern of salt distribution under trickle irrigation[M]. New York: Berlin Heidelberg, 1973:389-394.

[8] Ayers R S, Westcot D W. Water quality for agriculture[R]. FAO, Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 29,1985:141.

[9] Hanson B R. Drip irrigation of row crops: An overview. In Pro - ceedings[J]. Fifth International Microirrigation Congress, Or - lando, FL, 1995,42(6):651-655.

[10] Esechie H A, Saidi A A, Khanjari S A. Effect of sodium chloride salinity on seeding emergence in chickpea[J]. Agronomy & Crop Science,2001,188:155-160.

[11] 肖振华,万洪富.灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响研究[J].土壤学报,1998,35(3):359-366.

[12] Shani U, Dudiey L M. Field study of crop response to water and salt stress[J]. Soil Sci Soc Am, 2001,65:1522-1528.

[13] 赖先齐.绿洲盐渍化弃耕地生态重建的研究[M].北京:中国农业出版社,2007:9-20.

[14] 颜　安,蒋平安,盛建东,等.玛纳斯河流域表层土壤盐分空间变异特征研究[J].土壤学报,2014,51(2):223-227.

[15] 王全九,徐益敏,王金栋,等.咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J].灌溉排水,2002,21(4):73-77.

[16] 刘春卿,杨劲松,陈小兵,等.新疆玛纳斯河流域灌溉水质与土壤盐渍状况分析[J].土壤,2008,40(2):288-292.

[17] 邵景力,崔亚莉,李慈君.玛纳斯河流山前平原地下水资源分析及合理开发利用研究[J].干旱区地理,2003,26(1):6-10.

[18] 张凤华.绿洲农业生态系统演替及可持续发展方向[M].北京:中国出版集团现代教育出版社,2010:14-18.

[19] 李玉义,张凤华,潘旭东,等.新疆玛纳斯河流域不同地貌类型土壤盐分累积变化[J].农业工程学报,2007,23(2):60-64.

[20] 鲍士旦.土壤农业化学分析方法(第 3 版)[M].北京:中国农业科技出版社,2000:179-196.

[21] 孙　林,罗　毅,杨传杰,等.不同灌溉量膜下微咸水滴灌土壤盐分分布与积累特征[J].土壤学报,2012,49(3):428-436.

[22] Radin J W, Reaves L, Mauney J R, et al. Yield enhancement in cotton by frequent irrigations during fruiting[J]. Agron J, 1992, 84 (4):551-557.

[23] Smith R B, Oster J D, Phene C J. Subsurface drip produced highest net return in Westland area study[J]. California Agriculture, 1991, 45(2):8-10.

[24] 王全九,王文焰,汪志荣,等.盐碱地膜下滴灌技术参数的确定[J].农业工程学报,2001,(2):47-50.

[25] Pasternak D, Msaach Y D. Irrigation with brackish water under desert conditions irrigation management of tomatoes on desert sand dunes[J]. Agriculture Water Management,1995,28(2):121-132.

[26] 陈书飞,何新林,汪宗飞,等.微咸水滴灌研究进展[J].节水灌溉,2010,(2):6-9.

[27] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993:84-125.

[28] 王春裕,陈宣庆.中国东北西部退化土地治理[M].北京:地质出版社,1995:77-78.