

天山西部伊犁河流域土壤盐分特征

麦麦提吐尔逊·艾则孜^{1,2}, 海米提·依米提^{1*}, 艾尼瓦尔·买买提^{1,3}, 王庆峰²

1. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046

2. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046

3. 新疆大学化学与化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830046

摘要: 采用相关分析法与主成分分析法研究了伊犁河流域土壤盐分特征. 结果表明: 研究区域耕层(3~20 cm)土壤53.68%样地为非盐渍化土壤, 18.38%为轻度盐渍化, 13.97%为中度盐渍化, 8.82%为重度盐渍化, 5.15%为盐土; 土壤盐渍化类型以硫酸盐渍土为主, 占68.41%. 盐分组成中, 阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主, 阳离子以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主; 土壤盐分与 Cl^- 和 SO_4^{2-} 分别呈极显著、显著正相关关系, 揭示了土壤盐分大小与 $w(\text{Cl}^-)$ 和 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 有关; 表层(0~3 cm)土壤盐分平均值占0~60 cm土层盐分平均值的60.19%, 即土壤盐分垂直分布呈现强烈表聚性. 主成分分析结果表明, 盐分, $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Mg}^{2+})$ 与 $w(\text{Ca}^{2+})$ 可作为研究区域土壤盐渍化状况的特征因子. 不同土地利用类型条件下, 耕层土壤盐分平均值从高到低依次为草地、旱田、稻田、林地. 不同灌溉条件下, 井灌农田耕层土壤盐分平均值为1.12 g/kg, 渠灌农田耕层土壤盐分平均值为0.73 g/kg, 渠灌农田耕层土壤盐分平均值比井灌农田小0.39 g/kg. 不同时期耕层土壤盐分平均值从高到低依次为非灌溉期、夏灌期、秋灌期.

关键词: 伊犁河流域; 土壤; 盐分

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2010)06-0774-08

Characteristics of Soil Salinity in Ili River Valley, Western Tianshan Mountains

MAMATTURSUN Eziz^{1,2}, HAMID Yimit¹, ANWAR Mohammad^{1,3}, WANG Qing-feng²

1. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2. College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: The characteristics of soil salinity in the Ili River Valley, Western Tianshan Mountains, China, were studied based on correlation analysis and principal component analysis methods. Results of the study indicated that: 53.68% of soil samples from the root zone soil layer (3-20 cm) were non-salinized, while 18.38% were slightly salinized, 13.97% were moderately salinized, 8.82% were strongly salinized and 5.15% were saline soils. The types of soil salinization were mainly sulphate saline soils, occupying 68.41%. Anions were mainly SO_4^{2-} and Cl^- while cations were mainly Na^+ and Ca^{2+} . Soil salinity showed significantly positive correlation with the concentration of Cl^- and SO_4^{2-} , indicating that the degree of soil salinity depends on the concentration of Cl^- and SO_4^{2-} of soil to a certain extent. The salinity of the surface soil layer (0-3 cm) occupied 60.19% of the salinity of the 0-60 cm soil layer, indicating that the soil salinity was distributed mainly at the top soil layer. Results of principal component analysis indicated that the salinity, Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} and Ca^{2+} concentrations could be the characteristic factors for expressing soil salinization in the study area. The abundance of salinity of the root zone soil layer for different land use types was in the following order: grassland > glebe field > paddy field > forest land. Under different irrigation conditions, the salinity of the root zone soil layer of farmlands irrigated with groundwater and surface water was 1.12 g/kg and 0.73 g/kg respectively. However, the salinity of the root zone soil layer of farmlands irrigated with surface water was 0.39 g/kg lower than farmlands irrigated with groundwater. The abundance of salinity of the root zone soil layer for different periods was in the following order: non-irrigated period > summer irrigation period > autumn irrigation period.

Key words: Ili River Valley; soil; salinity

收稿日期: 2009-12-04 修订日期: 2010-03-29

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)

作者简介: 麦麦提吐尔逊·艾则孜(1981-), 男(维吾尔族), 新疆喀什人, oasiseco@yahoo.com.cn.

* 责任作者, 海米提·依米提(1960-), 男(维吾尔族), 新疆喀什人, 教授, 博士, 博导, 主要从事干旱区水资源与生态环境研究, hyimit@yahoo.com.cn

土壤盐渍化是干旱、半干旱区最突出的生态环境问题之一, 直接影响区域粮食生产安全和土地资

源的可持续利用^[1-2]. 在干旱环境强烈蒸发作用下, 农业生产过程中引水及灌溉会提高地下水位, 使其超过临界深度, 随着潜水不断蒸发, 盐分大量聚集地表, 形成土壤盐渍化^[3], 对植物产生盐胁迫^[4]. 因此, 分析盐渍化区域盐分特征, 对治理土壤盐渍化和农业可持续发展至关重要.

新疆是中国最干旱、盐碱化土壤分布面积最广、土壤积盐最严重的地区, 被称为“世界盐碱土的博物馆”^[5]. 近年来, 新疆农田土壤盐渍化在一定程度上得到了治理, 但由于部分地区新开荒地以及大水漫灌等原因, 又形成新的次生盐渍化土地^[6]. 目前, 新疆有关土壤盐渍化方面的研究主要集中在南疆的塔里木盆地^[7-10], 有关北疆土壤盐渍化方面的研究很少, 尤其是天山西部伊犁河流域. 近年来, 随着伊犁河流域不合理的水土开发活动, 土壤盐分逐年增高, 已明显阻碍了该区域高产、优质农业的发展, 造成伊犁河流域生态环境质量呈“局部改善、总体退化”的趋势^[11]. 因此, 对伊犁河流域土壤盐分特征进行详细的研究就显得尤为重要.

结合2008年以来对伊犁河流域土壤盐分以及地下水、地表水检测资料的分析, 探讨了流域土壤盐分分布情况与离子组成之间的关系, 并定量分析不同土地利用类型, 不同灌溉方式与不同灌溉时期土壤盐分分布特征, 以期对伊犁河流域水土资源可持续开发利用提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

伊犁河流域处于新疆北天山的科古秦山、博洛霍罗山与中天山的哈尔克他乌山、那拉提山等之间. 综合考虑伊犁河流域地形地貌、水文地质条件、土地利用状况与人类活动等因素, 选择的典型采样区域(43°44'N ~ 43°56'N, 80°54'E ~ 81°12'E)位于乌孙山北部, 伊犁河南岸的低级阶地、低河漫滩地区. 该区域行政上属于新疆伊犁地区察布查尔县, 是伊犁河流域人类活动对自然生态系统的干扰最剧烈的区域之一.

该区域总面积424.6 km², 南高北低, 由东南向西北倾斜, 海拔560 ~ 740 m, 气候属于温带大陆性干旱气候, 多年平均气温8.9 °C, ≥10 °C 积温3 100 °C, 温度的日、年变化大, 多年平均降水量277 mm, 多年平均蒸发量1 594 mm. 该区域乔木主要有新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis*)、尖果沙枣(*Elaeagnus oxycarpa*)和沙棘(*Hippophae*

rhamnoides)等; 灌木主要有怪柳(*Tamarix* spp)和铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等; 草本植物主要有伊犁绢蒿(*Seriphidium transilense*)、芦苇(*Phragmites australis*)和反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)等. 农作物种类主要有水稻、棉花、小麦和玉米等.

1.2 样品采集

在研究区域内共布设了55眼地下水监测井(见图1), 用GPS对每个样点定位. 在2008年9月与2009年3和6月, 通过3次相同标准的野外调研, 在研究区域内共采集了136个土壤剖面的0 ~ 3 cm(表层), 3 ~ 20 cm(耕层), 20 ~ 40 cm与40 ~ 60 cm土层共计540个土壤样品和136个相应的地下水样品, 采集的样品都由多点取样混合而成.

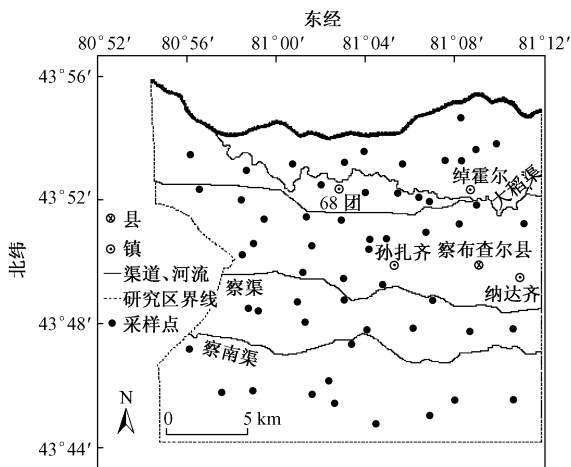


图1 伊犁河流域采样点位置

Fig. 1 The location map of Ili River Valley and the sampling area

1.3 样品的处理与分析

采集的水样和土样带回实验室, 把土样风干, 磨碎, 过1 mm筛后备用, 然后以5:1的水土比进行抽滤浸提, 并测定其主要离子(Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+})的质量分数. 其中 $w(\text{Cl}^-)$ 用 AgNO_3 滴定法测定; $w(\text{HCO}_3^-)$ 和 $w(\text{CO}_3^{2-})$ 用双指示剂滴定法测定; $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Ca}^{2+})$ 和 $w(\text{Mg}^{2+})$ 用EDTA容量法测定; $w(\text{Na}^+)$ 和 $w(\text{K}^+)$ 为差减法计算值^[12]; 采用离子加和法计算出相应的土壤盐分; 水样8个离子测定方法与土样相同, 矿化度为8个离子之和; 电导率用150 Conductivity Meter测定. 数据利用STATISTICA 6.0统计软件进行经典统计分析, 相关分析与主成分分析.

2 结果与分析

2.1 土壤盐渍化类型和程度分析

土壤盐渍化类型直接影响排盐的难易程度和土壤盐分的动态变化特征. 因此, 选取 136 个采样点的耕层土壤盐分数据, 分析研究区域 d 土壤盐渍化类型, 土壤盐渍化类型的确定参照 $\text{Cl}^- / 2\text{SO}_4^{2-}$ 的分子量比值^[13]. 结果表明, 研究区域内 68.41% 的土壤样品为硫酸盐渍土, 16.91% 为亚硫酸盐渍土, 11.74% 为亚氯盐渍土, 2.94% 为氯盐渍土. 可见, 研究区域土壤盐渍化类型主要为硫酸盐渍土, 即土壤中盐类主要为硫化物.

将 136 个土样按照土壤盐渍化程度分级标准^[14]分为 5 个等级, 即非盐渍化、轻度盐渍化、中度

盐渍化、重度盐渍化和盐土. 结果表明, 53.68% 土样为非盐渍化土壤, 18.38% 为轻度盐渍化, 13.97% 为中度盐渍化, 8.82% 为重度盐渍化, 5.15% 为盐土, 说明研究区域土壤次生盐渍化比较严重. 研究^[13]表明, 农药无论采用何种使用方式, 大部分都将进入土壤, 使土壤成为农药的蓄积库和耗散地. 由此可见, 研究区域不合理的农业生产过程中, 一些未被作物吸收利用的肥料成分残留于土壤中, 成为研究区域土壤盐分的主要来源.

2.2 土壤盐分与各离子关系

为了解盐分在土壤中的存在形态和土壤盐分积累的构成特点, 分析了土壤盐分、电导率与主要离子之间的内在关系, 结果见表 1.

表 1 耕层土壤盐分及组成离子相关关系矩阵 ($n = 136$)

Table 1 The correlation matrix of salinity and ion components of root zone soil layer ($n = 136$)

项目	盐分	$w(\text{总阴离子})$	$w(\text{总阳离子})$	$w(\text{Cl}^-)$	$w(\text{CO}_3^{2-})$	$w(\text{HCO}_3^-)$	$w(\text{SO}_4^{2-})$	$w(\text{K}^+)$	$w(\text{Na}^+)$	$w(\text{Ca}^{2+})$	$w(\text{Mg}^{2+})$
电导率	0.977 ^a	0.903 ^a	0.629 ^a	0.837 ^a	0.192	0.124	0.707 ^a	0.586 ^a	0.379 ^b	0.747 ^a	0.864 ^a
盐分	1.000	0.900 ^a	0.566 ^b	0.845 ^b	0.177	0.084	0.580 ^b	0.536 ^a	0.314 ^b	0.732 ^a	0.828 ^a
$w(\text{总阴离子})$	—	1.000	0.686 ^a	0.952 ^a	0.188	0.088	0.608 ^a	0.518 ^a	0.482 ^a	0.678 ^a	0.842 ^a
$w(\text{总阳离子})$	—	—	1.000	0.627 ^a	0.163	0.246	0.486 ^a	0.327 ^b	0.922 ^a	0.595 ^a	0.773 ^a
$w(\text{Cl}^-)$	—	—	—	1.000	0.131	0.076	0.336 ^b	0.416 ^a	0.486 ^a	0.521 ^a	0.724 ^a
$w(\text{CO}_3^{2-})$	—	—	—	—	1.000	0.211	0.249	0.222	0.059	0.266	0.302
$w(\text{HCO}_3^-)$	—	—	—	—	—	1.000	0.077	0.031	0.236	0.131	0.202
$w(\text{SO}_4^{2-})$	—	—	—	—	—	—	1.000	0.519 ^a	0.223	0.738 ^a	0.716 ^a
$w(\text{K}^+)$	—	—	—	—	—	—	—	1.000	0.030	0.661 ^a	0.582 ^a
$w(\text{Na}^+)$	—	—	—	—	—	—	—	—	1.000	0.243	0.535 ^a
$w(\text{Ca}^{2+})$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.000	0.778 ^a
$w(\text{Mg}^{2+})$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.000

注: a 表示相关系数在 0.01 水平上显著; b 表示相关系数在 0.05 水平上显著.

表 1 可见, 耕层土壤盐分与 $w(\text{总阴离子})$ 极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.900, 说明盐分与 $w(\text{总阴离子})$ 关系密切. 盐分与 $w(\text{总阳离子})$ 的相关系数为 0.599, 既显著正相关 ($P < 0.05$). 盐分与 $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{CO}_3^{2-})$, $w(\text{HCO}_3^-)$ 和 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 的相关系数分别为 0.845, 0.177, 0.084 与 0.580, 即盐分与 $w(\text{Cl}^-)$ 和 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 分别为极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) 正相关, 揭示了土壤盐分与 $w(\text{Cl}^-)$ 和 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 有关. Cl^- 和 SO_4^{2-} 除了土壤原始沉积量不同外, 大多为化肥的副成分或转化物^[15], 表明研究区域土壤盐渍化与化肥使用不当密切相关. 盐分与 $w(\text{K}^+)$, $w(\text{Na}^+)$, $w(\text{Ca}^{2+})$ 和 $w(\text{Mg}^{2+})$ 的相关系数分别为 0.536, 0.314, 0.732 与 0.828, 相关性较大. 电导率与盐分的相关系数为 0.977, 为极显著相关 ($P < 0.01$), 电导率与主要离子间的相关关系和盐分及主要离子间的相关关系基本相同.

2.3 土壤剖面不同深度的盐分特点

对 136 个土壤剖面的 0~3, 3~20, 20~40 与 40~60 cm 土层的盐分进行比较, 可以清楚地显示研究区域土壤盐分的垂直分布状况 (见表 2). 从表 2 可以看出, 0~3 cm 土层的盐分, $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{K}^+)$, $w(\text{Na}^+)$, $w(\text{Ca}^{2+})$ 和 $w(\text{Mg}^{2+})$ 均高于 3~20, 20~40 和 40~60 cm 土层. 其中, 0~3 cm 土层盐分平均值分别高出 3~20, 20~40 和 40~60 cm 土层 3.68, 3.96 和 4.171 g/kg, 0~3 cm 土层盐分约占 0~60 cm 土层盐分的 60.19%, 土壤盐分剖面分布呈现表聚性.

变异系数 (CV) 能反映随机变量的离散程度, 分析变异系数可以看出土壤盐分的空间分布特征. 一般认为: $CV \leq 10\%$ 为弱变异性; $10\% < CV < 100\%$ 为中等变异性; $CV \geq 100\%$ 为强变异性^[16]. 由表 2 可见, 0~3, 3~20, 20~40 与 40~60 cm 土层盐分

表2 研究区域土壤盐分及离子组成描述统计结果 ($n = 136$)Table 2 Descriptive statistics of soil salinity and ion components in the study area ($n = 136$)

土层深度/cm	项目	盐分	$w(\text{Cl}^-)$	$w(\text{CO}_3^{2-})$	$w(\text{HCO}_3^-)$	$w(\text{SO}_4^{2-})$	$w(\text{K}^+)$	$w(\text{Na}^+)$	$w(\text{Ca}^{2+})$	$w(\text{Mg}^{2+})$	g/kg
0~3	最小值	0.10	0.04	0	0	0.02	0.01	0.01	0.01	0	
	最大值	28.10	23.89	0.02	0.02	3.91	1.28	3.47	4.45	0.67	
	平均值	5.05	2.68	0.02	0.01	0.97	0.17	0.44	0.66	0.13	
	标准差	6.97	5.19	0.01	0.01	0.94	0.28	0.74	0.88	0.15	
	变异系数/%	138	193	50	100	96	164	168	133	115	
3~20	最小值	0.10	0.02	0	0	0.03	0	0.01	0	0	
	最大值	8.70	4.59	0.02	0.01	2.08	0.24	2.22	1.39	0.34	
	平均值	1.37	0.40	0.01	0.01	0.47	0.03	0.23	0.18	0.05	
	标准差	1.99	0.97	0.01	0.01	0.55	0.06	0.43	0.30	0.07	
	变异系数/%	145	243	100	100	117	200	187	167	140	
20~40	最小值	0.10	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0	
	最大值	6.20	3.65	0.01	0.01	1.19	0.20	1.65	1.14	0.24	
	平均值	1.09	0.36	0.01	0.01	0.37	0.02	0.13	0.17	0.04	
	标准差	1.61	0.86	0.01	0.01	0.34	0.13	0.31	0.29	0.06	
	变异系数/%	148	239	100	100	94	650	238	171	150	
40~60	最小值	0.10	0	0	0	0.02	0	0	0	0	
	最大值	4.60	1.97	0.01	0.01	1.18	0.13	2.80	0.85	0.18	
	平均值	0.88	0.20	0.01	0.01	0.31	0.01	0.22	0.12	0.03	
	标准差	1.26	0.42	0.01	0.01	0.28	0.02	0.56	0.20	0.04	
	变异系数/%	143	210	100	100	90	200	255	167	133	

的变异系数分别为 138%、145%、148% 和 143%，呈现强烈的空间变异性，主要离子质量分数也基本呈现强烈的空间变异性。

土壤离子按其质量分数大小在土壤剖面中基本上呈自上而下的垂直分异特点。各阴离子在表层土壤中的质量分数为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$ 。根据盐分上下运动的规律，以氯化物最为活跃，硫酸盐次之，碳酸盐较稳定。因此，在易溶性盐类上行过程中，氯化物表聚性最为强烈，硫酸盐次之。对于土壤脱盐过程，由于硫酸盐类较氯化物的淋溶速率慢，各类可溶性盐按其溶解度大小在土壤剖面中自上而下具有地球化学垂直分异特点。因此，在研究区域降水稀少，蒸发强烈的气候背景下，很少有淋洗脱盐过程，盐分以聚积为主，表层中氯化物、硫酸物占优势。3~20、20~40 和 40~60 cm 土层阴离子质量分数大小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$ ，进一步说明了硫酸盐渍土是伊犁河流域土壤盐渍化类型的主要成分。

研究^[17-18]表明，植物吸收过量的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 造成离子毒害，影响植物正常生长，此外， Cl^- 对 NO_3^- 和 HPO_4^- 的吸收有一定的抑制作用。研究区域各层土壤阳离子以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主，其次为 Mg^{2+} 和 K^+ 。与阴离子相比，阳离子的累积虽然不会对环境产生直接的危害，但某些离子的大量累积却会影响其他离子在土壤中的迁移和转化，或导致某

些养分的有效性降低。如 K^+ 对 Mg^{2+} 和 Mn^{2+} ， Na^+ 对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收都有一定的抑制作用； Ca^{2+} 对磷有固定作用， Ca^{2+} 的累积降低土壤磷的有效性； Na^+ 会增加土壤交换性钠水解作用，增加土壤碱性，腐蚀作物根系，并会降低 Fe、Mn、Ca 和 P 等营养元素的溶解度，不能满足作物营养吸收。高浓度 Na^+ 会使土壤胶体高度分散，恶化土壤物理性状，抑制作物正常的生理生化代谢过程，使作物体内蛋白质的合成、叶绿素的代谢，以及光合作用和呼吸作用等均受到损害^[19]。因此，加强对阴离子积累控制的同时也应加强对阳离子积累的控制。

2.4 离子间主成分分析

由于研究区域的土壤盐分空间变异大，难以定量描述土壤盐分及离子的分布特征。因此，选择盐分， Cl^- ， CO_3^{2-} ， HCO_3^- ， SO_4^{2-} ， K^+ ， Na^+ ， Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 9 个变量进行主成分分析。各主成分中各项指标系数、特征值及贡献率见表 3，按照累计贡献率达到 85% 确定主成分个数。并计算主成分与各项指标的相关系数。

分析结果表明，第一、二、三、四主成分的方差贡献率分别为 49.861%、15.153%、10.970% 和 8.941%，其累计贡献率达到了 84.925%，说明它们基本包含了以上 9 个指标的大部分信息。其中，第一主成分是最重要的，包含的信息最多，其对土壤盐渍化影响最大。从主成分载荷来看，第一主成分除对

表 3 4 个主成分的因子负荷矩阵(特征向量)、特征值及贡献率

Table 3 Eigenvectors, eigenvalues and variances proportions of the four principal components

主成分	盐分	$w(\text{Cl}^-)$	$w(\text{CO}_3^{2-})$	$w(\text{HCO}_3^-)$	$w(\text{SO}_4^{2-})$	$w(\text{K}^+)$	$w(\text{Na}^+)$	$w(\text{Ca}^{2+})$	$w(\text{Mg}^{2+})$	特征值	贡献率/%
Z ₁	0.894	0.781	-0.320	-0.162	0.764	0.649	0.467	0.873	0.951	4.488	49.861
Z ₂	0.039	0.229	0.566	-0.690	-0.194	-0.323	0.583	-0.151	0.092	1.364	15.153
Z ₃	0.054	0.313	-0.423	0.470	-0.259	-0.353	0.490	-0.235	0.063	0.987	10.970
Z ₄	0.294	0.368	0.547	0.405	-0.216	0.117	-0.224	-0.053	-0.079	0.805	8.941

CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 有逆向负荷外,与其他指标均为正向负荷,进一步说明第一主成分能较全面地反映各项指标,在实际意义上代表了土壤的盐化状况,与 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的逆向负荷则代表了土壤的碱化状况.

各指标系数的大小反映该指标对各主成分的贡献程度,从主成分载荷来看,与第一主成分密切相关的是盐分, $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Ca}^{2+})$ 与 $w(\text{Mg}^{2+})$,它们与第一主成分的相关系数绝对值都超过了 0.76. 在第二主成分中, Na^+ 的载荷较高,呈正相关,说明该主成分是在第一主成分的基础上进一步反映了土壤盐渍化在一定程度上受到 Na^+ 的影响. 在第三、四主成分中, HCO_3^- 的载荷较高,在第

四主成分中, CO_3^{2-} 的载荷较高,反映了土壤的碱度. 根据各指标与第一主成分间的相关性显著程度,可将盐分, $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Ca}^{2+})$ 与 $w(\text{Mg}^{2+})$ 作为研究区盐渍化状况的特征因子.

2.5 不同土地利用类型土壤盐分及离子组成变化

不同土地利用方式下因抽取地下水、灌水入渗、蒸发等引起地下水位在时间和空间上变化的同时,由于地下水中溶质被移走或带入,地下水发生淡化或浓缩,浅层地下水矿化度必然会发生时空变化,并引起区域土壤盐分浓度与运移规律不同^[20]. 因此,分草地、林地、稻田和旱地 4 个土地利用类型,分析了耕层土壤盐分与离子组成(见表 4).

表 4 不同种土地利用、覆被方式盐分及离子组成变化

Table 4 Change of soil salinity and ion components for different land use land cover types

土地利用类型	样品数/个	项目	盐分	$w(\text{Cl}^-)$	$w(\text{CO}_3^{2-})$	$w(\text{HCO}_3^-)$	$w(\text{SO}_4^{2-})$	$w(\text{K}^+)$	$w(\text{Na}^+)$	$w(\text{Ca}^{2+})$	$w(\text{Mg}^{2+})$	g/kg
草地	26	最小值	0.10	0.02	0	0	0.08	0	0.01	0.01	0	
		最大值	8.70	4.59	0.02	0.01	1.98	0.24	2.22	1.39	0.34	
		平均值	2.50	1.18	0.01	0.01	0.64	0.05	0.54	0.30	0.09	
		标准差	3.08	1.63	0.01	0.01	0.65	0.08	0.72	0.43	0.10	
		变异系数/%	123	138	100	100	102	160	133	143	111	
林地	27	最小值	0.20	0.01	0	0	0.12	0	0.02	0	0	
		最大值	1.10	0.21	0.01	0.01	0.59	0.01	0.39	0.01	0	
		平均值	0.60	0.08	0.01	0.01	0.24	0.01	0.12	0.01	0.03	
		标准差	0.44	0.09	0.01	0.01	0.19	0	0.16	0.01	0.01	
		变异系数/%	73	113	100	100	79	100	133	100	33	
旱地	44	最小值	0.10	0.01	0	0	0.07	0.01	0.01	0.01	0	
		最大值	4.00	0.47	0.01	0.01	2.08	0.05	0.68	0.84	0.17	
		平均值	1.10	0.21	0.01	0.01	0.71	0.02	0.23	0.22	0.06	
		标准差	1.46	0.21	0.01	0.01	0.72	0.02	0.29	0.32	0.06	
		变异系数/%	133	100	100	100	101	100	132	139	100	
稻田	26	最小值	0.10	0.01	0	0	0.05	0	0.01	0.01	0	
		最大值	3.30	0.96	0.01	0.01	1.45	0.18	0.41	0.76	0.17	
		平均值	0.90	0.13	0.01	0.01	0.43	0.04	0.08	0.18	0.04	
		标准差	1.12	0.26	0.01	0.01	0.53	0.06	0.11	0.27	0.06	
		变异系数/%	124	200	100	100	123	150	138	150	150	

从表 4 可以看出,草地的耕层土壤盐分平均值最高为 2.50 g/kg,普遍高于林地、旱田与稻田. 这表明研究区草地退化比较严重. 林地盐分平均值最低,其盐分平均值为 0.60 g/kg. 原因在于林地地表覆盖

高,使地表温度下降,阻止水分大量蒸发,盐分不能大量上升到达地表^[21]. 旱田与稻田土壤盐分平均值分别为 1.10 和 0.90 g/kg,最高值分别为 4.00 和 3.30 g/kg,说明部分农田出现次生盐渍化. 这与该区

农田长期处于高集约化、高复种指数、高肥料施用量的生产状态,并缺乏科学管理措施有关。

对 $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Na}^+)$ 与 $w(\text{Ca}^{2+})$ 而言,耕层土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 从高到低依次为草地、旱田、稻田、林地; $w(\text{SO}_4^{2-})$ 从高到低依次为旱田、草地、稻田、林地; $w(\text{Na}^+)$ 从高到低依次为草地、旱田、林地、稻田; $w(\text{Ca}^{2+})$ 从高到低依次为:旱田、草地、林地、稻田。研究区域不同土地利用类型条件下,耕层土壤盐分及各主要离子的质量分数空间变异性显著,反映了各土地利用类型土壤盐分来源和影响因素的多样性。

表5 研究区域地表水和地下水矿化度及离子组成变化

Table 5 Change of salinity of ground water and surface water and its ion components in study area g/kg

水源	样品数/个	项目	矿化度	$w(\text{Cl}^-)$	$w(\text{CO}_3^{2-})$	$w(\text{HCO}_3^-)$	$w(\text{SO}_4^{2-})$	$w(\text{K}^+)$	$w(\text{Na}^+)$	$w(\text{Ca}^{2+})$	$w(\text{Mg}^{2+})$
地表水	41	最小值	0.20	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.06	0.02
		最大值	2.70	2.68	0.09	0.08	2.39	0.09	1.64	0.52	0.08
		平均值	1.16	0.29	0.01	0.01	0.42	0.02	0.17	0.16	0.06
地下水	25	最小值	0.20	0.14	0	0	0.76	0	0.05	0.21	0.16
		最大值	21.2	16.2	0.11	0.06	16.37	0.66	5.74	4.74	0.53
		平均值	2.56	1.39	0.01	0.02	1.68	0.01	1.15	1.15	0.38

表6 研究区域不同灌溉方式土壤盐分及离子组成变化

Table 6 Change of soil salinity and its ion component under different irrigation types g/kg

灌溉方式	样品数/个	项目	盐分	$w(\text{Cl}^-)$	$w(\text{CO}_3^{2-})$	$w(\text{HCO}_3^-)$	$w(\text{SO}_4^{2-})$	$w(\text{K}^+)$	$w(\text{Na}^+)$	$w(\text{Ca}^{2+})$	$w(\text{Mg}^{2+})$
渠灌	25	最小值	0.10	0	0	0	0.03	0	0.01	0.01	0
		最大值	4.00	0.40	0.01	0.01	2.08	0.05	0.47	0.84	0.17
		平均值	0.73	0.06	0	0	0.36	0.02	0.12	0.14	0.03
井灌	41	最小值	0.10	0.01	0	0	0.08	0	0.01	0.01	0
		最大值	2.70	0.75	0.01	0	1.45	0.08	0.28	0.70	0.14
		平均值	1.12	0.32	0	0	0.37	0.02	0.17	0.19	0.03

由表5可知,研究区域地表水矿化度平均值比地下水小1.40 g/kg,地表水中各主要离子质量分数平均值也比地下水小。其中,地表水中 $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Na}^+)$ 和 $w(\text{Ca}^{2+})$ 平均值比地下水小1.10,1.26,0.98和0.32 g/kg。由表6可以看出,井灌和渠灌条件下,土壤盐分存在一定差异,井灌农田土壤盐分平均值为1.12 g/kg,渠灌农田土壤盐分平均值为0.73 g/kg;渠灌农田土壤各主要离子平均质量分数也小于井灌农田,其中,渠灌农田 $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Na}^+)$ 和 $w(\text{Ca}^{2+})$ 等平均值比井灌农田的分别小0.26,0.01,0.05和0.05 g/kg。

由于研究区域地下水矿化度较高,在井灌条件下,会将一定量的盐分带入土壤,使土壤的盐分增高。虽然加大灌水定额,可使土壤上层的易溶盐受到淋溶,但在研究区域水资源缺乏的情况下是不现实

2.6 不同灌溉方式对土壤盐分及离子组成变化的影响

灌溉水的矿化度或某些成分质量分数过高,将会恶化土壤物理和生物学性状,降低土壤的渗透性,影响植物吸收水分和营养物质,对植株体造成损害或有毒害物质在果实中残留,导致产品品质下降^[22],甚至导致土壤次生盐渍化,作物减产和生态环境恶化^[23]。分井灌农田和渠灌农田,对研究区域41个地表水样品,25个地下水样品(见表5)和相应的66个耕层土壤样品(见表6)的化学成分进行分析。

的,而且大灌水定额会提高地下水位,加剧土壤盐渍化。干旱区微咸水或矿化度大的地表水进行灌溉容易引起土壤积盐,对土壤与作物造成危害,影响作物生产和土地的持续高效利用^[24]。因此,在农业生产过程中,应实施地表水、地下水联合利用等措施来防治土壤次生盐渍化^[25]。

2.7 不同灌溉期土壤盐分及离子组成变化特点

灌溉期和非灌溉期土壤盐分积累与运移存在一定的差异^[26]。选择66个农田耕层土壤样品,分析了夏灌期(6月)与秋灌期(9月)土壤盐分特征及离子组成,并以非灌溉期(3月)作为对比(见表7)。

由表7可见,研究区域耕层土壤盐分平均值的最大值出现在非灌溉期,为1.61 g/kg,比夏灌期与秋灌期分别高0.24和0.44 g/kg。这与上层土壤在非灌溉区处于积盐状态,形成春季返盐并不能及时

脱盐有关^[27]. 夏灌期盐分比秋灌期高是因为6月研究区域地下水位、地表温度和蒸发量比秋灌期高, 较容易发生盐分积累. 不同灌溉期耕层土壤 $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Na}^+)$ 和 $w(\text{Ca}^{2+})$ 从高到低依次为非

灌溉期、夏灌期、秋灌期. 从变异系数来看, 夏灌期、秋灌期、非灌溉期盐分空间变异大, 变异系数分别为145%, 129% 和 136%, 反映了不同灌溉期土壤盐分积累和影响因素的多样性.

表7 研究区域不同灌溉期盐分及离子组成变化

Table 7 Change of soil salinity and its ion component under different irrigation period

时期	样品数/个	统计数值	盐分	$w(\text{Cl}^-)$	$w(\text{CO}_3^{2-})$	$w(\text{HCO}_3^-)$	$w(\text{SO}_4^{2-})$	$w(\text{K}^+)$	$w(\text{Na}^+)$	$w(\text{Ca}^{2+})$	$w(\text{Mg}^{2+})$
夏灌期	24	最小值	0.10	0.06	0	0	0.26	0.01	0.08	0	0
		最大值	8.70	5.19	0.07	0.02	5.69	1.32	6.58	3.39	0.63
		平均值	1.37	0.29	0.01	0.01	0.33	0.09	0.23	0.26	0.11
		标准差	1.99	0.83	0.01	0.01	0.89	0.23	0.47	0.51	0.17
		变异系数/%	145	286	100	100	269	256	204	196	155
秋灌期	18	最小值	0.06	0.09	0	0.01	0.09	0.03	0.02	0.03	0.03
		最大值	6.17	14.02	0.18	0.15	0.98	0.51	1.14	2.60	1.89
		平均值	1.17	0.20	0.01	0.01	0.31	0.07	0.14	0.23	0.15
		标准差	1.51	0.29	0.03	0.02	0.26	0.14	0.27	0.64	0.41
		变异系数/%	129	145	300	200	84	200	193	278	273
非灌溉期	24	最小值	0.10	0.05	0	0	0.15	0.01	0.04	0.03	0.01
		最大值	10.30	6.27	0	0.05	3.98	0.50	4.04	5.50	0.97
		平均值	1.61	0.31	0.01	0.01	0.39	0.11	0.28	0.36	0.13
		标准差	2.19	0.82	0.01	0.01	0.24	0.13	0.71	0.80	0.22
		变异系数/%	136	265	100	100	62	118	254	222	169

3 结论

a. 按照土壤盐化类型分级标准, 研究区域耕层土壤 68.41% 样品为硫酸盐渍土, 16.91% 为亚硫酸盐渍土, 11.74% 为亚氯盐渍土, 2.94% 为氯盐渍土. 土壤盐渍化类型主要为硫酸盐渍土. 按照土壤盐化程度分级标准, 53.68% 样地为非盐渍化土壤, 18.38% 为轻度盐渍化, 13.97% 为中度盐渍化, 8.82% 为重度盐渍化, 5.15% 为盐土.

b. 土壤盐分与阴离子质量分数呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 即土壤盐分大小与各阴离子质量分数有关. 其中盐分与 $w(\text{Cl}^-)$ 和 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 分别呈极显著 ($P < 0.01$)、显著 ($P < 0.05$) 正相关关系, 揭示了土壤盐分大小主要与 $w(\text{Cl}^-)$ 和 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 有关. 阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主, 阳离子以 Na^+ 和 Ca^{2+} 离子为主. 耕层 (0~3 cm) 土壤盐分平均值分别比 3~20, 20~40 和 40~60 cm 土层高 3.68, 3.96 和 4.171 g/kg, 呈现强烈表聚性. 从变异系数来看, 各土层土壤盐分及各离子质量分数的空间变异性大. 主成分分析结果来看, 盐分, $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Mg}^{2+})$ 和 $w(\text{Ca}^{2+})$ 可作为伊犁河流域土壤盐渍化状况的特征因子.

c. 不同土地利用类型条件下, 耕层土壤盐分从高到低依次为草地、旱田、稻田、林地, 主要离子组成分布特征与土壤盐分基本相同. 井灌农田土壤盐分

平均值为 1.12 g/kg, 渠灌农田土壤盐分平均值为 0.73 g/kg, 即渠灌农田耕层土壤盐分比井灌农田小 0.39 g/kg. 渠灌农田 $w(\text{Cl}^-)$, $w(\text{SO}_4^{2-})$, $w(\text{Na}^+)$ 和 $w(\text{Ca}^{2+})$ 比井灌农田的分别小 0.26, 0.01, 0.05 和 0.05 g/kg. 不同灌溉期耕层土壤盐分从高到低依次为非灌溉期、夏灌期、秋灌期.

参考文献 (References):

- [1] MASOUD A A, KOIKE K. Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: a case study in the Siwa Region, NW Egypt [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 66: 151-167.
- [2] 张微, 娄金勇, 程维新, 等. 内蒙古河套灌区水利工程对土壤盐渍化的影响 [J]. 环境科学研究, 2003, 16(3): 12-14.
- [3] JORENUSH M H, SEPASKHAH A R. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions [J]. Agricultural Water Management, 2003, 61: 125-141.
- [4] GRIES D, ZENG F, FOETZKI, et al. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table [J]. Plant Cell & Environment, 2003, 26: 725-736.
- [5] 田长彦, 周宏飞. 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.
- [6] 高吉喜. 西部生态环境问题及对策建议 [J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 49-53.
- [7] 张飞, 塔希甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 渭干河一库车河三角洲洲土壤盐渍化现状特征及其与光谱的关系 [J]. 环境科

- 学研究,2009,22(2):227-235.
- [8] 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.
- [9] 刘延锋,靳孟贵,金英春,等.新疆焉耆盆地土壤盐渍化特征分析[J].水土保持通报,2004,24(1):49-52.
- [10] 江红南,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等.新疆渭干河灌区土地盐渍化时空变化影响因子分析[J].干旱区地理,2008,31(6):885-891.
- [11] 王宏伟,张小雷,乔木,等.基于GIS的伊犁流域生态环境质量评价与动态分析[J].干旱区地理,2008,31(2):215-221.
- [12] 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.
- [13] 逯忠斌,侯志广,王秀梅.新农药HW-02在土壤中的吸附[J].环境科学研究,2009,22(7):851-855.
- [14] 王遵亲,祝寿泉,尤文瑞,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
- [15] 姚春霞,陈振楼,许世远.上海市郊保护地土壤盐分研究[J].环境科学,2007,28(6):1372-1376.
- [16] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002:30-35.
- [17] GRATTAN S R, GRIEVE C M. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops[J]. *Scientia Horticulturae*, 1999, 78: 127-157.
- [18] 郭文忠,刘声锋,李丁仁,等.设施蔬菜土壤次生盐渍化发生机理的研究现状与展望[J].土壤,2004,36(1):25-29.
- [19] 余海英,李廷轩,周健民.典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J].土壤学报,2006,43(4):571-576.
- [20] 马兴旺,朱靖蓉,李保国.绿洲土地利用对地下水矿化度时空变化影响的定量评估[J].自然资源学报,2009,24(3):466-475.
- [21] 何贵平,陈益泰,黄一青,等.杭州湾海涂造林后土壤盐分和水分动态变化[J].林业科学研究,2006,19(2):257-260.
- [22] AGNIESZKA P. Inland halophilous vegetation as indicator of soil salinity[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2003, 4: 525-536.
- [23] PRATHAPAR S A, QURESHI S. Modelling the effects of deficit irrigation on soil salinity, depth to water table and transpiration in semi-arid zones with monsoonal rains [J]. *Water Resources Development*, 1998, 15: 141-159.
- [24] AYARS J E, CHRISTEN E W, SOPPE R W, *et al.* The resource potential of in situ shallow ground water use in irrigated agriculture: a review [J]. *Irrigation Science*, 2006, 24 (3) : 147-160.
- [25] LAXMI N S, KUMAR D N, SUDHINDRA N P, *et al.* Optimal crop planning and conjunctive use of water resources in a coastal river basin [J]. *Water Resources Management*, 2002, 16: 145-169.
- [26] JORENUSH M H, SEPASKHAH A R. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 61: 125-141.
- [27] WANG Y R, KANG S Z, LI F S. Saline water irrigation scheduling through a crop-water-salinity production function and a soil-water-salinity dynamic model [J]. *Pedosphere*, 2007, 17 (3) : 303-317.

(责任编辑:孔欣)