

渭干河绿洲不同土地利用类型土壤盐分的变化特征分析^①

王丹丹^{1,2,3}, 于志同⁴, 程猛⁵, 赵成义², 丁建丽¹, 张小雷²

(1 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 北京师范大学, 全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875;

5 新疆新和县农技中心, 新疆 新和 842100)

摘要: 土壤盐分的动态分析与监测, 是实现盐渍化土地科学管理与利用的必要前提。运用 GIS 技术, 结合地统计学方法, 分析了渭干河绿洲土壤盐渍化的分布格局, 探讨了不同土地利用类型下土壤盐分的变化规律。结果表明: 土壤盐分离子含量随土层深度增加而减少, CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 变化不明显, 整个剖面表现为: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$, 具有中-强变异性, 除了 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 Ca^{2+} 外, 其他盐分离子变异系数随深度增加而减小。不同土地利用类型的土壤含盐量具有显著差异垂向分布, 耕地、荒地和草地、林地分别呈现为平均型、表聚型和底聚型盐分剖面, 且各类型表层土壤(0~40 cm)含盐量依次为荒地($38.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 草地($16.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 耕地($5.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地($4.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。渭干河绿洲土壤属于重盐土类型, 自然因素(蒸降比和地下水波动等)是土壤盐渍化的形成条件, 而人为干扰(土地利用方式、灌排、施肥等)则促进了土壤盐渍化的发展。

关键词: 土壤盐分; 空间变异; 盐渍化; 渭干河绿洲

中图分类号: S159.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-6060(2018)02-0349-09(0349~0357)

DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.02.016

土壤盐渍化是由强烈蒸腾作用下盐分离子随水分在土壤中运移导致表层土壤易溶性盐含量过高, 而造成绝大多数植物难以生长和土壤贫瘠的土地资源退化^[1-2]。目前, 土壤盐渍化仍是世界性资源和生态问题, 其范围遍及除南极洲以外的五大洲。一般而言, 土壤盐渍化出现在气候干旱, 土壤蒸发强烈, 地下水位高且可溶性盐类含量多的地区^[3]。据调查, 我国盐渍化土壤面积高达 $1.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[4], 仅新疆盐渍土就约为 $1.1 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[6]。新疆绿洲的稳定性外受过渡带影响, 内受土壤盐渍化的威胁^[5], 加之自然因素及人类活动的综合作用, 绿洲土壤盐分呈现出高度的空间变异性^[6-7], 且土壤盐渍化的问题日益加剧, 已成为影响绿洲稳定性和农业可持续发展的主要限制因素^[8-9]。

近年来, 国内外学者对干旱区绿洲土壤盐分开展了大量的研究, 包括土壤盐分及其盐分离子

的统计学特征^[10-11]、时空变化特征^[12-15]、盐分与地下水的关系^[16-19]以及影响因素^[20-21]。韩桂红等利用土壤全盐量、盐分离子组成和电导率等指标发现干旱区渭干河绿洲土壤盐渍化为重度至轻度盐化, 且 0~50 cm 剖面上土壤全盐量主要受控于 Cl^- 、 HCO_3^- 和 Na^+ 离子^[10]。HARTI 等发现塔德拉平原灌区土壤盐渍化强度降低, 但空间尺度上的面积却逐渐增加^[22]; MRALET Serge 等基于灌区尺度上的水盐平衡对撒哈拉以南绿洲含盐量进行了估算, 认为绿洲盐碱化形成的规模与绿洲水文变化(灌溉、排水、地下水径流)和灌溉面积扩大有关^[23]; 王玉刚等运用经典统计学、地质统计学、遥感技术(RS)和地理信息系统(GIS)指出三工河流域尺度上土壤表层(0~20 cm)盐分含量有着强空间自相关, 新绿洲的盐渍化比例高于老绿洲, 地形地貌是土壤盐分空间变异的关键因素之一^[24]; 绿洲土地盐渍化时空变化过程

① 收稿日期: 2017-11-25; 修订日期: 2018-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1403281, 41671030, 41601107)

作者简介: 王丹丹(1988-), 女, 山东曹县人, 博士研究生, 主要从事土壤生态。E-mail: wangdandan210@126.com

通讯作者: 赵成义(1966-), 男, 新疆玛纳斯人, 研究员, 博士, 主要从事生态水文学、土壤学和植物生态学。E-mail: zcy@ms.xjb.ac.cn

中,地下水埋深、地下水矿化度和气候因素在较小尺度上起主要作用,地形地貌、灌排系统、地表水资源在较大尺度上起主要作用^[15,25-26]。

前期研究证实,近 20 a 渭干河绿洲中度、重度土壤盐渍化土地面积均减少,非、轻度盐渍化土地的面积增加,土壤盐分由绿洲内部向外部转移,中上部向下部转移^[13],但现有大面积的盐渍土仍严重威胁着绿洲的农业发展。盐渍化土的改良利用对实现该区土地资源的可持续利用具有重要意义,而对土壤盐渍化剖面类型、特征及不同土地利用盐分变化特征的研究是实现盐渍化土地科学管理及合理利用的必要前提。因此,本文以典型干旱区渭干河绿洲为研究区,运用 GIS 技术,结合地统计学方法,分析了绿洲土壤盐渍化分布格局,阐明了不同土地利用类型盐分的变化特征。旨在为渭干河绿洲的土壤盐分的分区治理,土壤生态环境的保护和恢复提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

渭干河绿洲位于塔里木盆地的中北部,属渭干河—库车河流域,天山山脉南麓,塔克拉玛干沙漠北缘,在行政上隶属于阿克苏地区管辖,包括库车、沙雅和新和等三个县。渭干河流域地处欧亚大陆深处,远离海洋,属大陆性暖温带极端干旱气候,日照充足,热量丰富,气候干燥、降水稀少。年均降水量

在 46.4 ~ 64.5 mm,年均蒸发量为 1 992 ~ 2 863.4 mm,年均气温为 10.5 ~ 14.4 °C,极端最高气温为 40.1 ~ 41.5 °C,极端最低气温为 -26.8 ~ -28.7 °C,无霜期 209.8 ~ 226.4 d,日照为 2 886.7 ~ 3 031.2 h^[26-27]。适宜种植喜温作物,尤其是陆地棉和中早熟长绒棉。绿洲内盐渍化土壤的植被为多汁肉质盐生灌丛和泌盐植物,主要有盐穗木(*Halostachys caspica*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、胡杨(*Populus euphratica*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)和怪柳(*Tamarix ramosissima*)^[28]。此外,研究区内主要的土壤类型(图 1)有:潮土、盐土、草甸土、漠境盐土、灌淤土、水稻土、风沙土、林灌草甸土等。

1.2 样品采集

以渭干河绿洲土壤类型图和遥感影像(2010年)为参考,于 2012 年 10 月,采用 GPS 定位技术,选取了耕地、草地、林地和荒地四种土地利用类型进行采样,耕地 11 个样点,草地、林地和荒地各 8 个样点,共 35 个样点,主要分布于潮土(6 个样点)、盐土(5 个样点)、草甸土、漠境盐土、灌淤土、水稻土、风沙土和林灌草甸土(各 4 个样点)(图 2)。每个土壤剖面取样深度为 1 m,每 20 cm 一层,共取五层,共计 175 个样品。采样点遍及绿洲范围内的主要利用类型和土壤类型,而且尽可能使样点分布均匀,利于进行统计分析。

1.3 分析测试

样品经风干、碾碎、过 2 mm 筛,取出 20 g 风干

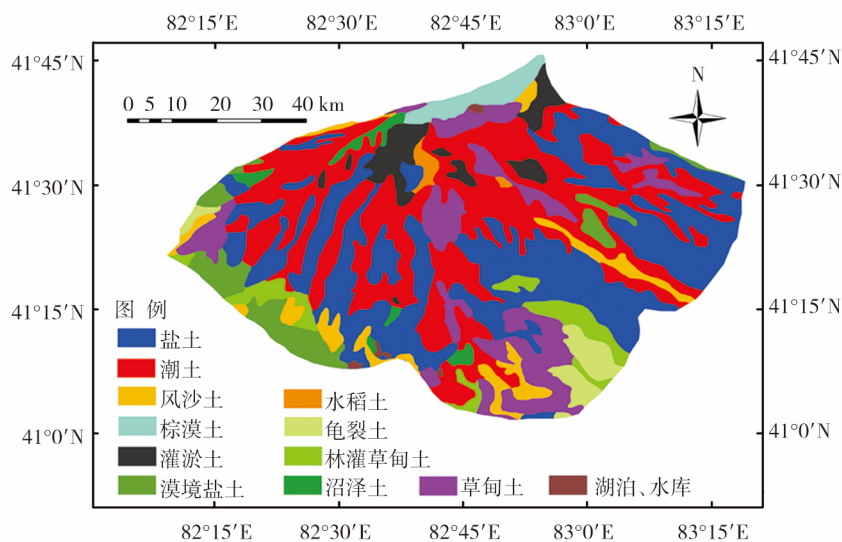


图 1 渭干河绿洲土壤类型分布图

Fig. 1 Soil type map of Weigan River Oasis

引注: 1985 年新疆土壤分布图

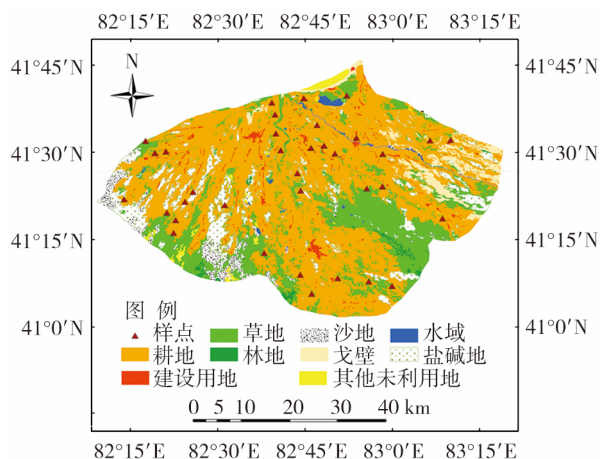


图2 采样点分布图

Fig. 2 Distribution map of sampling points

土与 100 ml 蒸馏水(5:1 水土比)进行浸提,测定浸提液 25 °C 时的电导率、pH、含盐量;总盐采用干渣法;电导率采用电导仪测定;pH 采用酸度计法测定;离子组成的具体测定方法^[29]为:CO₃²⁻和 HCO₃⁻采用

双指示剂中和法测定;Cl⁻采用 AgNO₃ 滴定法测定;SO₄²⁻采用 EDTA 间接滴定法测定;Ca²⁺和 Mg²⁺采用 EDTA 络合滴定法测定;Na⁺和 K⁺采用火焰光度计分析法。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分离子的垂向分布特征

由剖面土壤盐离子含量描述性统计表明(表 1):CO₃²⁻和 HCO₃⁻含量在土壤垂直方向上整体波动不大;Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻和 Cl⁻含量在土壤表层(0~40 cm)大幅度减少,其他土层波动性小;土层 40 cm 以下,Na⁺+K⁺含量呈明显减少趋势。如图 3 所示,渭干河绿洲土壤中盐离子含量随土层深度的增加逐渐减少,CO₃²⁻和 HCO₃⁻变化不明显,Na⁺+K⁺在 40~60 cm 土层下降趋势明显,而其他盐离子含量在 20~40 cm 土层下降趋势明显,剩余土层含量下降缓慢。土壤盐分的表聚现象强烈,呈 T 型

表 1 典型剖面土壤盐离子含量统计特征参数 / g · kg⁻¹Tab. 1 Statistical parameter of the mean value of salt ion content / g · kg⁻¹

深度 / cm	统计值	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
0 ~ 20	Min	0.000	0.121	0.004	0.081	0.060	0.008	0.020
	Max	0.007	0.364	8.609	12.345	3.250	0.945	5.960
	Mean	0.002	0.240	1.041	2.928	0.724	0.248	0.901
	SD	0.003	0.637	1.827	3.977	0.975	0.304	1.391
	CV / %	148.62	26.60	175.57	135.82	134.77	122.39	154.38
20 ~ 40	Min	0.000	0.125	0.009	0.032	0.050	0.009	0.020
	Max	0.007	0.369	4.038	10.711	2.725	0.625	5.960
	Mean	0.002	0.238	0.634	2.200	0.596	0.143	0.901
	SD	0.003	0.061	0.850	3.276	0.943	0.168	1.391
	CV / %	123.39	25.55	159.32	148.90	158.18	117.38	154.38
40 ~ 60	Min	0.000	0.116	0.018	0.040	0.040	0.006	0.021
	Max	0.007	0.326	5.192	10.536	2.790	0.641	3.748
	Mean	0.002	0.210	0.610	2.147	0.563	0.142	0.614
	SD	0.003	0.053	1.069	2.981	0.876	0.172	0.882
	CV / %	92.69	25.46	175.26	138.83	155.49	121.39	143.65
60 ~ 80	Min	0.000	0.102	0.013	0.048	0.040	0.006	0.027
	Max	0.007	0.329	4.438	9.837	2.825	0.580	3.212
	Mean	0.002	0.204	0.567	1.951	0.502	0.127	0.587
	SD	0.003	0.057	0.920	2.719	0.810	0.150	0.785
	CV / %	98.47	27.82	162.12	139.38	161.24	118.10	133.66
80 ~ 100	Min	0.000	0.095	0.027	0.033	0.040	0.006	0.029
	Max	0.009	0.345	4.216	9.829	2.725	0.488	3.149
	Mean	0.002	0.202	0.510	1.477	0.381	0.100	0.510
	SD	0.003	0.061	0.874	2.338	0.667	0.118	0.762
	CV / %	94.16	30.14	171.40	158.28	175.17	117.53	149.40
	F	0.160	0.012*	0.308	0.426	0.576	0.064	0.447

注:表中数据为 2012 年 10 月采样分析所得 n=35;F 值表示盐离子单因素方差分析统计值;* 代表 0.05 水平下的差异显著性。Min 代表最小值,Max 代表最大值,Mean 代表均值,SD 代表标准差,CV 代表变异系数

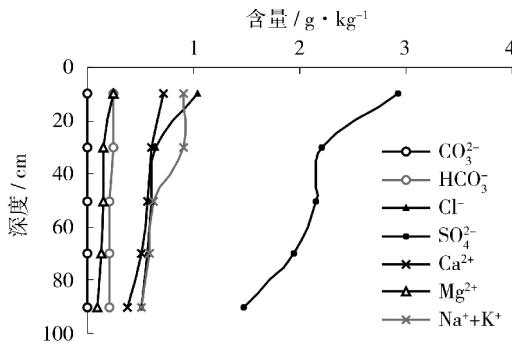


图3 土壤盐分离子分布特征

Fig.3 Distribution pattern of basic ion in soil profile

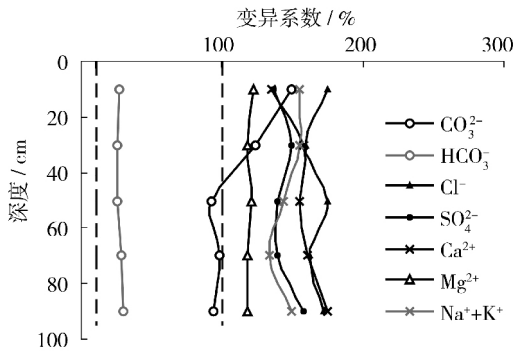


图4 土壤盐分离子变异系数

Fig.4 Coefficient of variation of basic ion in soil profile

分布,强烈的地表蒸发,许多可溶性盐类随土壤毛细管上升至地表,造成土壤表层盐渍化。在整个剖面表现为: $Na^+ + K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$, $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^- > CO_3^{2-}$; 阳离子 $Na^+ + K^+$ 含量在土壤中的分布态势基本与阴离子 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的态势基本一致。前人研究发现 Cl^- 在阴离子总量中占据绝对优势, SO_4^{2-} 次之^[10,30-31]。原因可能是由采样点位差异所造成的,后者采样由绿洲内部到外围,主要研究以自

然因素为主导的绿洲外围盐渍化特征,而本文偏向于人为因素为主导的绿洲内部土壤变化特征。

变异系数(CV)反映的是相对变异,即随机变量的离散程度。变异系数等级的划分标准^[32]如下:弱变异性, $CV < 10\%$; 中等变异性, $CV = 10\% \sim 100\%$; 强变异性, $CV > 100\%$ 。总体来看,整个剖面土壤盐分离子含量的变异系数均介于 $10\% \sim 200\%$,表明研究区土壤含盐量具有中一强变异性(图4)。 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $Na^+ + K^+$ 在 $0 \sim 100$ cm 土层均呈现很强的空间变异性; HCO_3^- 表现为中等变异性, CO_3^{2-} 在 $0 \sim 40$ cm,其它土层表现为中等变异性。通过单因素方差分析对不同土壤剖面层各盐分离子均值的比较, HCO_3^- 在五个土层的平均含量差异显著 ($P < 0.05$),其他离子在五个土层的平均含量差异不显著。

2.2 盐离子间相关性分析

土壤盐分离子的相关性分析,不仅可以揭示盐分在土体中的存在形态及其运移规律,还能在一定程度上反映出盐分的运移趋势^[33]。由于绿洲土壤盐分出现明显的表聚现象,表层土壤中各盐分离子存在着强烈的相互作用,变化显著。其中,pH与 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 之间有显著的正相关(表2),这是因为研究区的土壤pH均值为8.24,呈弱碱性,而碳酸盐和重碳酸盐是弱碱性盐,其含量的增加会使土壤逐渐向碱化方向发展^[34]。 $0 \sim 20$ cm 土壤中,电导率和盐分含量均与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 以及 $Na^+ + K^+$ 正相关极显著; Cl^- 、 SO_4^{2-} 均与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $Na^+ + K^+$ 正相关极显著,且 Cl^- 、 SO_4^{2-} 之间极显著正相关。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 、 $Na^+ + K^+$ 正相关极显著。

表2 盐分离子相关分析矩阵

Tab.2 Matrix of the correlation coefficients of salt ion

	pH	电导率	含盐量	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	全盐
pH	1.000										
电导率	-0.096	1.000									
含盐量	-0.106	0.999**	1.000								
CO ₃ ²⁻	0.767**	-0.124	-0.127	1.000							
HCO ₃ ⁻	0.339*	-0.055	-0.084	0.160	1.000						
Cl ⁻	-0.060	0.998**	0.996**	-0.096	-0.023	1.000					
SO ₄ ²⁻	-0.153	0.990**	0.995**	-0.161	-0.151	0.981**	1.000				
Ca ²⁺	-0.357	0.664**	0.699**	-0.204	-0.573**	0.635**	0.758**	1.000			
Mg ²⁺	-0.134	0.993**	0.996**	-0.144	-0.121	0.987**	0.997**	0.726**	1.000		
Na ⁺ + K ⁺	-0.061	0.998**	0.994**	-0.107	-0.009	0.999**	0.980**	0.621**	0.985**	1.000	
全盐	-0.104	0.999**	1.000**	-0.128	-0.082	0.996**	0.995**	0.696**	0.996**	0.995**	1.000

注: * 差异显著 ($p < 0.05$); ** 差异极显著 ($p < 0.01$)

此外, HCO_3^- 与 Ca^{2+} 之间负相关极显著, 这是因为土壤溶液中 Ca^{2+} 含量的增加, 容易形成碳酸盐的沉淀, 降低其浓度。

2.3 不同土地利用类型对土壤盐分的影响

不同土地利用类型土壤盐分的变化在垂直方向上有着各自的特点, 如图 5 所示。典型盐分土壤剖面分为 3 类: 表聚型盐分剖面、底聚型盐分剖面和平均型盐分剖面^[35]。

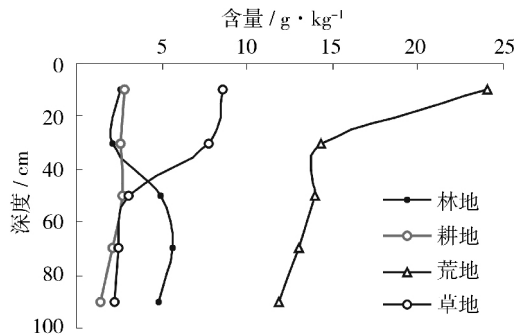


图 5 不同土地利用方式下土壤盐分分布特征

Fig. 5 Distribution pattern of salt in soil profile (0 ~ 100 cm) in different land use types

耕地的盐分含量垂直方向上的变化幅度不大, 大体属于平均型。林地土壤中的盐分在垂直分布上未出现表聚和底聚现象, 盐分含量的变化大体上呈 S 曲线, 呈底聚型。荒地和草地的盐分聚集于表层, 随着土壤深度的递增盐分含量大幅度减少, 在 60 cm 土层以下趋于稳定, 均呈现表聚类型。这与我国其他地区有所差异, 如黄河三角洲地区荒地呈表聚型, 而耕地呈底聚型^[36]; 新疆奇台县绿洲内荒地土壤含盐量高, 且表层聚集现象明显; 耕地 3 a 的土壤呈现为均匀型; 耕种 5 a、10 a 的土壤, 多呈现为底聚型盐分剖面^[37]。均匀型和震荡型剖面是由自然因素影响的表聚型剖面(荒地)向受人类干扰强大的(5 ~ 10 a 耕地)底聚型转化的两个过渡阶段。不同土地利用方式下土壤盐分累积差异, 一方面是地形和水文地质特征差异所引起^[38], 另一方面人为因素的干扰(如耕种、施肥、灌溉、地下水利用等)在土壤盐分聚集上也起到一定的作用^[37]。其中, 地形地貌是影响盐分累积的主要因素之一, 对土壤水盐的运移、淋滤、累积起决定作用^[39]。不同地貌类型的土壤盐分垂直分布、盐分累积强度和积聚特征都表现出显著差异^[40]。

在不同土地利用方式下, 土壤总盐量在 0 ~ 40

cm 土层呈现以下规律: 荒地(38.42 g · kg⁻¹) > 草地(16.30 g · kg⁻¹) > 耕地(5.37 g · kg⁻¹) > 林地(4.62 g · kg⁻¹), 且荒地和草地的表层含盐量远远高于其他土地利用类型。这与前人研究结果基本一致, 荒漠灌丛和盐碱草地对盐分的富集能力明显强于耕地和林地^[41]。由于大量荒地被开垦为新耕地, 造成耕地盐分含量均值大于林地(人工经济林)。研究区总体上属于重盐土类型(含盐量大于 4 g · kg⁻¹), 蒸降比^[42]和地下水位的变化对盐分累积的影响很大^[43]。一方面, 灌溉和降水的入渗, 耕地盐分由地表淋洗向下运移后聚集; 另一方面, 绿洲地下水埋深普遍偏浅, 在强烈的蒸发作用下, 地下水中的盐分不断地向土壤表层迁移^[44], 土壤盐分在中部积累。另外, 与土地利用方式和人类灌排活动也有关, 灌排技术落后、灌排失调、排水设施不完善、耕作措施不配套等都会影响土壤盐分的分布^[13, 45]。

由于不同土地利用类型土壤含盐量在垂直方向上的分布呈显著的差异性, 直接影响到土地の利用、改良及其分类。因此, 为明确不同土地利用土壤盐分的特征与类型, 对不同深度的土壤盐分离子进行了分析。结果表明: 耕地土壤中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 在土层 40 ~ 60 cm 达到最高值, Na^+ + K^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 随着深度的增加而减小, 变化幅度不大。随着土壤深度的增加, 林地土壤中 Na^+ + K^+ 、 Cl^- 含量呈逐渐增加的趋势, 而 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 含量呈 S 曲线变化(图 6)。对于荒地, 土壤 0 ~ 40 cm 中的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ + K^+ 、 Ca^{2+} 含量递减速度很快, 40 cm 以下含量递减速度明显变缓最后趋于稳定。而草地土壤中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 主要聚集表层, 40 ~ 60 cm 含量随着深度增加盐分含量迅速递减, 60 cm 以下含量递减速度变缓趋于稳定, Cl^- 、 HCO_3^- 、 Na^+ + K^+ 、 Mg^{2+} 随着土壤深度的增加含量减少, 是因草地的灌溉量很小, 不存在排盐的措施, 加上受蒸发作用的影响。表明, 该研究区的土壤盐分变化与阴离子 SO_4^{2-} 和阳离子 Ca^{2+} 的变化规律基本一致。

3 结论

(1) 渭干河绿洲土壤 SO_4^{2-} 在各土层中阴离子中含量最大, Cl^- 含量次之, 整个剖面盐分离子含量具有中 - 强度的变异性, 说明干旱区土壤盐分离子含量的垂直分布不均匀, 表层土壤主要受自然因素(微地形)和人为因素干扰的影响, 空间异质性较

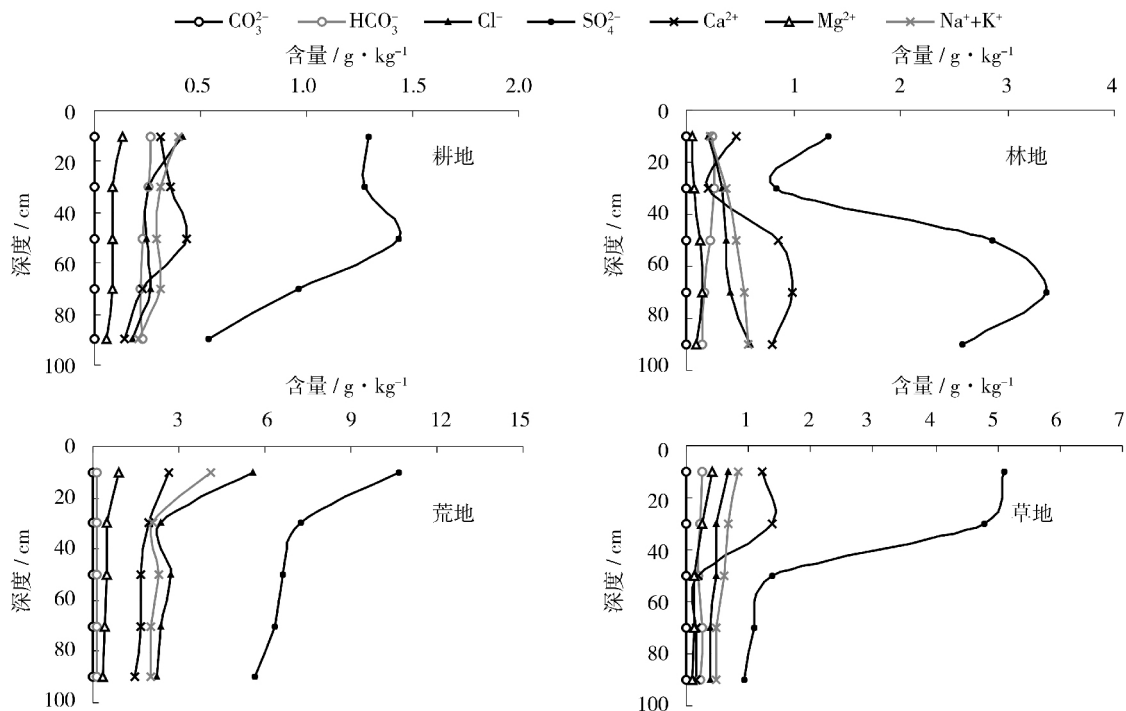


图6 不同土地利用方式下土壤盐分离子分布特征

Fig. 6 Distribution pattern of basic cation in soil profile in different land use types

强;该研究区的土壤盐分变化与阴离子 SO_4^{2-} 和阳离子 Ca^{2+} 的变化规律基本一致。

(2) 渭干河绿洲荒地和草地盐分含量在垂直方向上呈表聚型,林地呈底聚型,耕地的盐分含量的变化幅度不大,大体属于平均型。随着土壤深度的增加,耕地的土壤含盐量呈现出先减少—后增加—在减少的趋势,形成上、下部低、中部高的局面。不同土地利用方式下土壤盐分聚积差异,是由自然因素(地形地貌)和人为活动(耕种、施肥、灌溉、地下水利用等)共同作用所造成的。

(3) 渭干河绿洲土壤盐渍化是自然和人为因素综合作用的产物,自然因素是形成条件,人为因素则促进了盐渍化的发展。与1992年相比,2012年渭干河绿洲表层盐渍化土的土地面积减少了1579.66 km^2 ^[46],在于期间大量荒地被人开垦为耕地;但同时存在着大量耕地被弃荒,开荒后破坏了原有的地表植被,难以恢复,成为盐渍化的隐患,导致新绿洲及绿洲外围局部地区盐渍化呈恶化趋势^[47]。由于人类活动的干扰,导致绿洲土地利用不断发生变化,并对生态环境造成了严重影响。因此,为了改善恶化的生态环境、改良土壤盐渍化和确保绿洲农业经济的可持续发展,在土地开发利用过程中,应严格控制垦荒规模,完善农田水利建设,加强节水灌溉农

业;合理开发利用地下水资源,缓解地表水资源供应不足的问题,降低地下水位,重点解决灌排不协调的问题,从而防治次生盐渍化的发生。

参考文献(References)

- [1] 牛博,倪萍,塔西甫拉提·特依拜. 遥感技术在干旱区盐渍化动态变化分析中的应用——以新疆于田为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(4): 78-82. [NIU Bo, NI Ping, TIYIP Tashpolat. Application of remote sense technology to dynamic analysis of soil salinization in arid area: Example as the Yutian County [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004, 15(4): 78-82.]
- [2] 冉启洋,贡璐,韩丽,等. 塔里木河上游绿洲土壤表层盐分特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1098-1103. [RAN Qiyang, GONG Lu, HAN Li, et al. Analysis on characteristics of soil salinity in a typical oasis in upper reaches of the Tarim River [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1098-1103.]
- [3] 塔西甫拉提·特依拜,张飞,丁建丽,等. 干旱区典型绿洲盐渍化土壤空间信息研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 82-89. [TIYIP Tashpolat, ZHANG Fei, DING Jianli, et al. Spatial information on salinization of typical oasis in arid areas [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(4): 82-89.]
- [4] 李永智,单凤翔. 土壤盐渍化危害及治理途径浅析[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(8): 85-88. [LI Yongzhi, SHAN Fengxiang. Analysis of the harm of soil salinization and the way of governance [J]. Western Exploration Project, 2008, 20(8): 85-88.]
- [5] 田长彦,周宏飞,刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业可持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177-181.

- [TIAN Changyan ,ZHOU Hongfei ,LIU Guoqing. The proposal on control of soil salinizing and agricultural sustaining development in 21's century in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography* 2000 23(2) : 177 - 181.]
- [6] 赵新风,王炜,张涛,等. 塔里木河下游地区滴灌沙枣防护林地土壤盐分分布特征[J]. *中国沙漠* 2012 32(3) : 763 - 770. [ZHAO Xinfeng ,WANG Wei ,ZHANG Tao ,et al. Effect of drip irrigation on forest soil salinity distribution in lower reaches of Tarim River ,China[J]. *Journal of Desert Research* 2012 32(3) : 763 - 770.]
- [7] 郭丽俊,李毅,李敏,等. 盐渍化农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性[J]. *土壤学报* 2011 48(2) : 277 - 285. [GUO Lijun ,LI Yi ,LI Min ,et al. Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in saline-alkaline field [J]. *Acta Pedologica Sinica* 2011 48(2) : 277 - 285.]
- [8] DARWISH T ,ATALLAH T ,MOUJABBER M E ,et al. Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon [J]. *Agricultural Water Management* , 2005 78: 152 - 164.
- [9] QURESHI A S ,MCCORNICK P G ,QADIR M ,et al. Managing salinity and waterlogging in the Indus Basin of Pakistan [J]. *Agricultural Water Management* 2008 95: 1 - 10.
- [10] 韩桂红,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等. 基于典范对应分析的干旱区春季盐渍化特征研究[J]. *土壤学报* 2012 , 49(4) : 681 - 687. [HAN Guihong ,TIYIP Tashpolat ,SAWT Mamat ,et al. Characterization of soil salinization in arid based on canonical correspondence analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica* , 2012 49(4) : 681 - 687.]
- [11] 王勇辉,马蓓,海米提·依米提. 艾比湖主要补给河流下游河岸带土壤盐分特征[J]. *干旱区研究* 2013 30(2) : 196 - 202. [WANG Yonghui ,MA Bei ,YIMIT Hamid. Soil salinity in the riparian zone in lower reaches of the main feeding rivers of the Ebinur Lake [J]. *Arid Zone Research* 2013 30(2) : 196 - 202.]
- [12] MARLET S ,BOUKSILA F ,BAHRI A. Water and salt balance at irrigation scheme scale: A comprehensive approach for salinity assessment in a Saharan Oasis [J]. *Agricultural Water Management* , 2009 96(9) : 1311 - 1322.
- [13] 王丹丹,程猛,杨瑞红,等. 近 20 年渭干河绿洲土壤盐分变化特征[J]. *干旱区研究* 2015 32(6) : 1076 - 1081. [WANG Dandan ,CHENG Meng ,YANG Ruihong ,et al. Changing characteristics of soil salt in Weigan River Oasis for the last 20 years [J]. *Arid Zone Research* 2015 32(6) : 1076 - 1081.]
- [14] 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. [GONG Lu ,HAN Li ,REN Manli ,et al. Spatial variability of soil water-salt in a typical oasis on the upper reaches of the Tarim River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 2012 26(4) : 251 - 255.]
- [15] 乔木,周生斌,卢磊,等. 新疆渭干河流域土壤盐渍化时空变化及成因分析[J]. *地理科学进展* 2012 31(7) : 904 - 910. [QIAO Mu ,ZHOU Shengbin ,LU Lei ,et al. Causes and spatial-temporal changes of soil salinization in Weigan River Basin ,Xinjiang [J]. *Progress in Geography* 2012 31(7) : 904 - 910.]
- [16] CAUSAP'J ,QUILEZ. D ,ARAGUES R. Groundwater quality in CR-V irrigation district (Bardenas I ,Spain) : Alternative scenarios to reduce off-site salt and nitrate contamination [J]. *Agricultural Water Management* 2006 84(3) : 281 - 289.
- [17] ZHANG T T. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity [J]. *Ecological Indicators* 2011 11(6) : 1552 - 1562.
- [18] 管孝艳,王少丽,高占义,等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. *生态学报* 2012 32(4) : 1202 - 1210. [GUAN Xiaoyan ,WANG Shaoli ,GAO Zhanyi ,et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2012 32(4) : 1202 - 1210.]
- [19] 邓宝山,瓦哈甫·哈力克,党建华,等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤盐分时空分异及耦合分析[J]. *干旱区地理* 2015 38(3) : 599 - 607. [DENG Baoshan ,HALIK Wahap ,DANG Jianhua ,et al. Coupled analysis of spatio-temporal variability of groundwater depth and soil salinity in Keriya Oasis [J]. *Arid Land Geography* 2015 38(3) : 599 - 607.]
- [20] 贡璐,刘曾媛,塔西甫拉提·特依拜. 极端干旱区绿洲土壤盐分特征及其影响因素[J]. *干旱区研究* 2015 32(4) : 657 - 662. [GONG Lu ,LIU Zengyan ,TIYIP Tashpolat. Soil salinity characteristic and its determinant factors at different soil types in oasis of extreme arid region [J]. *Arid Zone Research* 2015 32(4) : 657 - 662.]
- [21] 贡璐,冉启洋,张雪妮,等. 塔里木河上游绿洲土壤表层盐分特征及其影响因子分析[J]. *环境科学研究* 2013 26(6) : 631 - 636. [GONG Lu ,RAN Qiyang ,ZHANG Xueni ,et al. Characteristics of surface soil salinity and impact factor analysis for the oasis in the upper reach of the Tarim River [J]. *Research of Environmental Sciences* 2013 26(6) : 631 - 636.]
- [22] HARIT A E ,LHISSOU R ,CHOKMANI K ,et al. Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation* 2016 50: 64 - 73.
- [23] MARLET S ,BOUKSILA F ,BAHRI A. Water and salt balance at irrigation scheme scale: A comprehensive approach for salinity assessment in a Saharan Oasis [J]. *Agricultural Water Management* , 2009 96(9) : 1311 - 1322.
- [24] WANG Y G ,LI Y ,XIAO D. Catchment scale spatial variability of soil salt content in agricultural oasis ,northwest China [J]. *Environmental Geology* 2008 56(2) : 439 - 446.
- [25] 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. [JIANG Hongnan ,TIYIP Tashpolat ,DING Jianli ,et al. Tempo-spatial change driving forces of land salinization in Weigan irrigated area ,Xinjiang [J]. *Arid Land Geography* 2008 , 31(6) : 885 - 891.]
- [26] 钱云,郝毓灵. 新疆绿洲 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000: 358 - 359. [QIAN Yun ,HAO Yuling. Xinjiang Oasis [M]. Urumqi: Volksverlag Xinjiang 2000: 358 - 359.]
- [27] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽. 渭干河一库车河三角洲绿洲盐渍化土壤特征研究[J]. *干旱地区农业研究* 2007 25(2) : 146 - 150. [ZHANG Fei ,TIYIP Tashpolat ,Ding Jianli. Analysis on characteristics of soil salinization in the Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers [J]. *Agricultural Research in the Arid*

- Areas 2007 25(2):146-150.]
- [28] 高婷婷,丁建丽,哈学萍等.基于流域尺度的土壤盐分空间变异特征——以渭干河—库车河流域三角洲绿洲为例[J].生态学报 2010 30(10):2695-2705. [GAO Tingting, DING Jianli, HA Xueping et al. The spatial variability of salt content based on river basin scale: A case study of the delta oasis in Weigan-Kuqa Watershed [J]. Acta Ecologica Sinica 2010 30(10):2695-2705.]
- [29] 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. [LU Rukun. Analytical methods for soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.]
- [30] 王雪梅,柴仲平,塔西南拉提·特依拜.渭干河—库车河三角洲绿洲表层土壤盐分空间异质性分析[J].干旱区资源与环境 2012 26(5):88-93. [WANG Xuemei, CHAI Zhongping, TIYIP Tashpolat. Spatial heterogeneity of topsoil salinity in the delta oasis of Weigan and Kuqa Rivers [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment 2012 26(5):88-93.]
- [31] 简娟,艾尼瓦尔·买买提,地里拜尔·苏力坦.新疆盐渍化区土壤盐分空间变异特征[J].水土保持研究 2007 14(6):189-197. [LIN Juan, MOHAMMED Anuar, SULTAN Dilbar. Spatial variability of soil salinity in Xinjiang salinization region [J]. Research of Soil and Water Conservation 2007 14(6):189-197.]
- [32] 王玉刚,肖笃宁,李彦.流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性[J].生态学报 2007 27(12):5262-5270. [WANG Yugang, XIAO Duning, LI Yan. Spatial heterogeneity of soil salinity in oasis at catchment scale [J]. Acta Ecologica Sinica 2007 27(12):5262-5270.]
- [33] 张飞,丁建丽,塔西南拉提·特依拜.干旱区典型绿洲土壤盐渍化特征分析——以渭干河—库车河三角洲为例[J].草业学报 2007 16(4):34-40. [ZHANG Fei, DING Jianli, TIYIP Tashpolat. Analysis on characteristics of soil salinization in the arid regions: A case study in Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers [J]. Acta Prataculturae Sinica 2007 16(4):34-40.]
- [34] 周在明,张光辉,王金哲等.环渤海低平原微咸水区土壤盐渍化与盐分剖面特征[J].地理科学 2011 31(8):929-934. [ZHOU Zaiming, ZHANG Guanghui, WANG Jinzhe et al. Salinity characteristics and profile types of saline soils in low plain around Bohai Sea [J]. Scientia Geographica Sinica 2011 31(8):929-934.]
- [35] 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. [YAO Rongjiang, YANG Jingsong, JIANG Long et al. Profile characteristics and spatial distribution of soil salinity based on hierarchical cluster analysis [J]. Acta Pedologica Sinica 2008 45(1):56-65.]
- [36] 姚荣江,杨劲松.黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析[J].干旱区资源与环境 2007 21(11):106-112. [YAO Rongjiang, YANG Jingsong. Analysis on salinity characteristics and profile types of saline soil in the Yellow River Delta [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment 2007 21(11):106-112.]
- [37] 李宝富,熊黑钢,张建兵等.不同耕种时间下土壤剖面盐分动态变化规律及其影响因素研究[J].土壤学报 2010 47(3):429-438. [LI Baofu, XIONG Heigang, ZHANG Jianbing et al. Dynamic of soil salt in soil profiles different in cultivation age and its affecting factors [J]. Acta Pedologica Sinica 2010 47(3):429-438.]
- [38] 王玉刚,李彦,肖笃宁.土地利用对天山北麓土壤盐渍化的影响[J].水土保持学报 2009 23(5):179-183. [WANG Yugang, LI Yan, XIAO Duning. Effects of land use type on soil salinization at northern slope of Tiansan Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2009 23(5):179-183.]
- [39] 马喆.吉林西部低平原盐渍化水盐运移影响因素研究[D].长春:吉林大学 2007. [MA Zhe. Research on the influence factors of the transfer of water and salt of low plain in western Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University 2007.]
- [40] 王海江.玛纳斯河流域土壤盐渍化过程和格局特征及盐渍土改良模式探讨[D].北京:中国农业大学 2014. [WANG Haijiang. Processes patterns and reclamation of soil salinization at Manas River Basin, Xinjiang, China [D]. Beijing: Beijing Agriculture University 2014.]
- [41] 王雪梅,康璇,赵枫等.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. [WANG Xuemei, KANG Xuan, ZHAO Feng et al. Analysis on characteristic of soil salinization in the Weigan-Kuqa River Delta Oasis under different land use patterns [J]. Research of Soil and Water Conservation 2016 23(1):160-164.]
- [42] 刘国华.于田绿洲土壤盐分特征及其成盐驱动因子分析[D].乌鲁木齐:新疆大学 2009. [LIU Guohua. Study on soil salinity characteristics and its salt-driven actuation factors in Yutian Oasis [D]. Urumqi: Xinjiang University 2009.]
- [43] 王雪梅,柴仲平,塔西南拉提·特依拜等.干旱区土壤盐渍化及其影响因子分析——以渭干河—库车河三角洲绿洲为例[J].土壤 2009 41(3):477-482. [WANG Xuemei, CHAI Zhongping, TIYIP Tashpolat et al. Analysis of soil salinization and influential factors in arid region: A case study in the delta oasis of Weigan and Kuqa Rivers [J]. Soils 2009 41(3):477-482.]
- [44] 赵振勇.渭干河三角洲绿洲景观格局演变及其生态响应[D].乌鲁木齐:中国科学院新疆生态与地理研究所 2006. [ZHAO Zhenyong. Landscape pattern changes and its ecological response in delta oasis of Weigan River [D]. Urumqi: Xinjiang Institute of Ecology and Geography, China Academy of Science 2006.]
- [45] 杨思存,车宗贤,王成宝等.甘肃沿黄灌区土壤盐渍化特征及其成因[J].干旱区研究 2014 31(1):57-64. [YANG Sicun, CHE Zongxian, WANG Chengbao et al. Soil salinization and its cause in the irrigated areas along the Yellow River in Gansu Province [J]. Arid Zone Research 2014 31(1):57-64.]
- [46] 王丹丹.新疆渭干河绿洲土壤盐分时空变化特征[D].乌鲁木齐:新疆农业大学 2013. [WANG Dandan. Spatial and temporal variation characteristics of soil salinity in Weigan Oasis of Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agriculture University. 2013.]
- [47] 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. [YANG Hongmei, XU Hailiang, FAN Zili et al. Spatial variability and pattern of surface soil salinity in the lower reaches of Tarim River [J]. Journal of Desert Research 2010 30(3):564-570.]

Characteristics of soil salinity under different land use types in Weigan River Oasis

WANG Dan-dan^{1 2 3}, YU Zhi-tong⁴, CHENG-Meng⁵, ZHAO Cheng-yi²,
DING Jian-li¹, ZHANG Xiao-lei²

(1 College of Resource and Environment Sciences Xinjiang University Urumqi 830046 Xinjiang China;

2 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology Xinjiang Institute of Ecology and Geography Chinese Academy of Sciences ,
Urumqi 830011 Xinjiang China; 3 University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China;

4 College of Global Change and Earth System Science Beijing Normal University Beijing 100875 China;

5 Agriculture Technology Extension Station of Xinhe County Xinhe 842100 Xinjiang China)

Abstract: Soil salinization is one of the important factors impacting the stability of oasis and sustainable agriculture. The dynamic monitoring and analysis of soil salinity are the prerequisite to manage and utilize the salinized land scientifically. This study aims to investigate the spatial variation and driving mechanism of soil salinization under the action of climate change and human activities in the Weigan River Oasis Xinjiang, China. In October 2012, based on the soil type map and the land use type map of the Weigan River Oasis, we collected 35 soil profiles covering four land use types (i. e. cultivated land, forest, grassland, and saline-alkali land) using GPS positioning technology. Based on the GIS technology and Geostatistics methods, this study analyzed the distribution of soil salinization and the soil salinity variation under different land use types. The results indicated that the soil salt ion content in general is decreased as the soil gets deeper with CO_3^{2-} and HCO_3^- being exceptional and the values of soil salt ions were listed in a descending order as follows: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$ for all the soil profiles. Generally, the variation coefficient of soil salt ion content was sitting in the range between 25% and 200%, indicating that the soil salinity in the region had a moderate to strong variability. The vertical distributions of soil salinity presented a significant difference for different land use types. For the cultivated land type, its soil salinity was a constant at different depth of the soil. For the grassland and saline-alkali land (wasteland), their soil salinity was accumulated in topsoil while for the forest, the soil salinity was accumulated at the bottom. In addition, the salinities in the surface soil (0–40 cm) for the four typical land use types were listed in an descending order as follows: wasteland ($38.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > grassland ($16.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > cultivated land ($5.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > forest ($4.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Overall, the soil in the Weigan River Oasis is heavily salinized, which was caused by the combination of nature and human factors. On the one hand, the natural factors including the ratio of evaporation to rainfall and groundwater fluctuation are the forming conditions of soil salinization. On the other hand, human disturbances, such as land use, irrigation, and fertilization, aggravate the soil salinization. In order to improve the deteriorating ecological environment and soil salinization to ensure a sustainable oasis agriculture, we should strictly control the scale of reclamation, improve the construction of water conservancy, and strengthen water-saving irrigation agriculture in the process of land exploitation and utilization in the Weigan River Oasis. Furthermore, rational exploitation of the groundwater resources in alleviating the shortage of surface water resources is also needed to solve the problem of uncoordinated irrigation and drainage to avoid secondary salinization.

Key words: soil salinity; spatial variability; salinization; Weigan River Oasis