

DOI:10.11937/bfyy.201615041

# 扬黄灌区土壤颗粒组成与盐分离子的分布特征及其对应关系

曲文杰<sup>1,2</sup>, 杨新国<sup>1,2</sup>, 陈林<sup>1,2</sup>, 宋乃平<sup>1,2</sup>

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**以扬黄灌区不同地类的土壤颗粒组成与盐分离子分布特征为分析对象,采用 RDA 方法研究了不同等级颗粒和不同盐分离子间的对应关系。结果表明:细砂粒、粉粒和粘粒系土壤颗粒的主要成分,研究区土壤质地以沙壤土为主。具有潜在沙化趋势的地块集中在沙化玉米地和 5 年玉米地表层土壤。枸杞地盐离子含量显著高于玉米地,潜在盐渍化风险较高;随种植年限的延长,各种盐离子的含量有所降低。基于冗余分析(RDA)分析,0~10 cm 和 20~40 cm 土层,粘粒和粉粒均对土壤盐离子响应有显著性解释( $P=0.002$ ),其解释量分别占有所有土壤粒径参数解释量的 63.64%、33.77% 和 69.12%、27.94%。60~80 cm 土层,细沙粒( $0.02\text{ mm}<D\leq 0.05\text{ mm}$ )对盐离子响应有显著性解释( $P=0.004$ ),其解释量占有所有土壤粒径参数解释量的 81.08%,但是这一土层的总解释量仅为 37%。研究区土地管理利用方式与利用年限的不同导致了土壤颗粒组成与盐分离子的基本分布特征的显著改变,部分地类依然存在潜在的次生退化风险。土壤颗粒组成与盐分离子组成间存在显著的对应关系,土壤粘粒和粉粒含量显著改变了表层和耕作层盐分离子的分布,而在深层土壤中细沙粒的作用可能更为突出。

**关键词:**扬黄灌区;颗粒组成;盐分离子;RDA 分析

**中图分类号:**S 606<sup>+</sup>.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)15-0166-06

受干旱气候和灰钙土土质的影响,土壤次生退化是宁夏扬黄灌区土壤健康面临的主要问题,开垦强度过大和灌排管理措施不当都可能引发土壤的次生盐渍化和沙化<sup>[1-2]</sup>。二者间也存在一定的联系,如土壤钠质化

破坏土壤团粒结构,加剧风蚀沙化等<sup>[3]</sup>;耕作熟化与灌排作用增加土壤粘粒含量<sup>[4]</sup>的同时,也可能使土壤灌溉脱盐能力降低,总碱度居高不下<sup>[5]</sup>。因此,深入研究灌区土壤次生沙化与盐渍化的发生条件及其相互关系,对于灌区土壤环境质量调控与土壤健康的维系具有重要的研究和实践意义。

杨新国等<sup>[6]</sup>通过控制取样和典型取样相结合的方法,分析了灌区耕层土壤质地与盐渍化特征指标间的关系,并发现了土壤阳离子交换量对障碍性土壤的指

**第一作者简介:**曲文杰(1982-),女,山东龙口人,硕士,研究实习员,研究方向为草地生态与恢复重建。E-mail: wenjiequ2015@163.com.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(41101301)。

**收稿日期:**2016-04-18

*Artemisia ordosica* community, the soil available phosphorus content of *Kalidium foliatum* community was relatively higher. The quantities of 3 kinds of soil microorganisms in all 4 kinds of plant communities were different from each other in the same soil layer of different communities and in the different soil layers of the same community, but the quantities of soil microorganisms in 4 kinds of plant communities were bacteria>actinomycetes>fungi. There were differences of the correlations between soil nutrient and soil microorganisms in every index among 4 kinds of plant communities. The relations of various indexes of *S. alopecuroides* community were the most close, that of *A. splendens* community took the second place, that of *A. ordosica* and *K. foliatum* community were more complicated. Thus, according to the characteristics of soil nutrient and soil microorganisms of different plant communities, and provided a certain reference basis for desert grassland restoration and management.

**Keywords:** plant communities; soil nutrition; microorganism; desert steppe

示作用。鉴于土壤质地和盐碱离子构成的多组分特征,该研究采用了 RDA(冗余分析)的方法,尝试分析不同等级颗粒和不同盐碱离子间是否存在特殊的对应关系,以期深入认识退化荒漠草原绿洲开发过程中土壤沙化与盐渍化的关系机制,为灌区土壤环境质量调控提供理论依据。

自然条件下,灌区土壤颗粒组成是一个长期的灌淤发育过程(慢变量)<sup>[7]</sup>,而土壤盐分离子更多受降水、灌溉等因素的影响而发生短期而快速的变化(快变量)<sup>[8]</sup>,因此二者间对应关系分析的前提条件必须加以限定。考虑到二者在变化尺度上的差异,现选取了不同的土地利用类型,或者说人为干扰程度不同的样地,构成研究样地体系。在人为干扰造成的土壤质地梯度下,研究某一个时期的土壤盐分离子在土壤垂直剖面上的静态分布差异,并在此基础上开展有关的 RDA 分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

宁夏红寺堡扬黄灌区始建于 1998 年,已开发灌溉耕地面积 2.67 万  $\text{hm}^2$ ,其中玉米种植面积 1.0 万  $\text{hm}^2$ 。灌区地处宁夏中部干旱带荒漠草原区,主要区域为罗山、烟筒山和牛首山之间的盆地和苦水河与甜水河所形成的冲积平原,海拔 1 240~1 450 m。土壤类型主要为淡灰钙土和风沙土,土壤基础肥力十分低下。该区多年平均降水量 250 mm,其中 7—9 月降水量占全年降水量的 50%~62%。多年平均水面蒸发量 2 325 mm。取样地位于红寺堡镇光彩新村,主要种植玉米、枸杞等作物。玉米地 1 年灌 4 次水,第 1 水(春灌)3 月中旬,第 2 水 4 月中旬,第 3 水 6 月 20 日前后,第 4 水 8 月 15 日左右。玉米一次灌水 1 500  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。1 年施肥 2 次,年用量二胺 750  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素 150  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,无有机粪肥投入。一般情况下,连续种 2~3 年玉米后,倒茬种 1~2 年的糜子、向日葵等。

### 1.2 试验材料

在农户调查访谈基础上,结合光彩新村土地利用历史与现有利用类型构成,采用空间取样和典型取样相结合的方式,选取不同种植年限的玉米地和枸杞地、明显沙化玉米地和盐渍化枸杞地等次生退化土地以及未利用的荒草地等 9 种地类构成取样样地体系,分别编号为 D1,沙化玉米;D2,未利用荒地;D3,盐化枸杞;D4,3 年枸杞;D5,6 年枸杞;D6,10 年枸杞;D7,2 年玉米;D8,5 年玉米;D9,8 年玉米,每个地类设置 3 次重复。每次重复地块内按“S”形 5 点采样法取 0~80 cm 的土壤,并按 0~10 cm(表层)、20~40 cm(耕作层)、60~80 cm(耕下层)分层混合。

### 1.3 试验方法

采集的土样室内自然风干,研磨过 1 mm 筛,按水土比 5:1 配制土壤浸提液,测定各种盐离子含量。

### 1.4 项目测定

碳酸根离子和重碳酸根离子采用双指示剂-中和滴定法测定;氯离子采用硝酸银滴定法测定;硫酸根采用 EDTA 间接络合滴定法测定;钙离子和镁离子采用 EDTA 滴定法;钾离子和钠离子采用火焰光度计法测定。土壤粒径分析采用吸管法,按美国制标准分级。具体粒径(D)分级标准与颗粒分类命名如下:粗沙粒 0.25  $\text{mm} < D \leq 0.50 \text{ mm}$  为沙粒 A,0.10  $\text{mm} < D \leq 0.25 \text{ mm}$  为沙粒 B;细沙粒:0.05  $\text{mm} < D \leq 0.10 \text{ mm}$  为沙粒 C,0.02  $\text{mm} < D \leq 0.05 \text{ mm}$  为沙粒 D;粉粒 0.002  $\text{mm} < D \leq 0.02 \text{ mm}$ ;粘粒  $D < 0.002 \text{ mm}$ 。

### 1.5 数据分析

采用 CANOCO 4.5 作为统计分析软件,以土壤颗粒组成为环境变量(6 个组分),盐碱离子组成为物种变量(7 个组分),分析二者间的对应关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤颗粒组成和盐碱离子组成的分布特征

整体而言,研究区的土壤质地以沙壤土为主,细砂粒、粉粒和粘粒系颗粒组成的主要成分。未利用荒地 0~80 cm 土层粉粒含量最高,其次是细砂粒,深层土壤粘粒含量高于细砂粒。沙化玉米地细砂粒和中沙粒含量大幅上升,而粉粒和粘粒含量明显下降。随利用年限的延长,枸杞地细砂粒含量有逐步增加的趋势,特别是在表层 0~10 cm。玉米地表层细砂粒含量以波动变化为主,5 年前后细砂粒含量最高。细砂粒含量枸杞地明显高于玉米地,而粘粒和粉粒含量则相反,这可能与枸杞地一般位于地势相对低洼,积沙层相对较厚的地貌单元有关。粗砂粒含量较高的地块集中在沙化玉米地和 5 年的玉米地表层土壤,应该主要是频繁耕作导致的风蚀沙化作用的结果(表 1)。

由表 2 可知,沙化玉米地盐碱离子含量最低,未利用地盐碱离子含量最高,枸杞地显著高于玉米地。未利用地盐碱离子的表聚性最为突出,枸杞地灌溉脱盐的效果比较明显。随种植年限的延长,各种盐碱离子的含量表现出一定的下降趋势,其中枸杞地的下降更为明显。由于未利用地处于灌溉农田的外缘,整体上灌溉活动对土壤的脱盐效果比较明显。脱盐的类型以移动性较强的氯离子、钠离子和硫酸根离子为主。农田中硫酸根离子含量最高,其次是重碳酸根离子,氯离子和钠离子含量居中,土壤环境质量以不同程度的盐化为主,碱化特征不明显。沙化玉米地通体由较为粗糙的质地构成,或较好的通透性,应该是其灌溉条件下整体盐碱离子含量明显偏低的主要因素。

表 1

土壤颗粒组成的分布特征

%

土层/cm	地类	沙粒 A		沙粒 B		沙粒 C		沙粒 D		粉粒		粘粒	
		0.25 mm<D≤0.50 mm		0.10 mm<D≤0.25 mm		0.05 mm<D≤0.10 mm		0.02 mm<D≤0.05 mm		0.002 mm<D≤0.02 mm		D<0.002 mm	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
0~10	D1	0.07	0.04	0.23	0.11	15.46	6.04	77.80	4.86	2.48	1.00	4.00	0.53
	D2	0.13	0.09	0.28	0.06	3.33	1.07	36.19	8.51	54.85	8.64	5.26	1.01
	D3	0.17	0.02	0.42	0.03	4.44	0.96	36.22	3.62	36.14	4.45	22.61	2.49
	D4	0.06	0.04	0.87	0.13	13.37	2.07	44.05	2.55	24.31	2.65	17.33	1.21
	D5	0.04	0.01	1.05	0.25	14.62	2.33	46.38	3.66	19.32	5.54	18.58	8.42
	D6	0.06	0.01	0.96	0.51	24.38	5.64	59.38	7.51	8.39	1.24	6.82	0.71
	D7	0.18	0.14	0.81	0.50	6.54	2.29	39.83	3.26	32.47	5.17	20.17	1.15
	D8	0.04	0.04	4.28	1.19	31.00	3.94	52.58	3.50	6.43	0.62	5.66	0.43
	D9	0.12	0.06	1.98	0.82	12.79	5.25	37.25	3.13	31.10	5.60	16.76	3.96
20~40	D1	0.00	0.00	0.14	0.05	8.47	0.26	82.94	3.44	3.28	2.43	5.17	1.22
	D2	0.09	0.05	0.13	0.15	1.94	2.50	21.29	16.46	70.94	18.80	5.68	1.04
	D3	0.00	0.00	0.22	0.08	4.56	2.22	36.35	1.26	41.10	2.52	17.77	2.00
	D4	0.06	0.05	0.84	0.20	12.29	0.75	51.52	7.39	20.34	4.16	14.96	3.32
	D5	0.02	0.02	0.97	0.29	15.23	5.35	46.77	5.14	22.35	6.11	14.66	4.78
	D6	0.00	0.00	0.42	0.04	27.68	5.86	63.29	5.15	4.36	1.01	4.25	0.90
	D7	0.17	0.07	0.46	0.10	6.33	1.57	39.89	4.95	31.66	2.34	21.48	3.86
	D8	0.03	0.05	1.78	0.90	15.94	9.48	41.97	20.32	26.44	21.96	13.84	8.12
	D9	0.07	0.04	0.70	0.31	4.40	1.81	30.17	4.79	40.44	5.21	24.22	2.84
60~80	D1	0.00	0.00	0.02	0.02	6.50	2.39	86.13	3.21	2.40	0.57	4.95	0.66
	D2	0.07	0.04	0.10	0.05	1.49	1.06	16.50	11.96	56.79	23.03	25.09	18.86
	D3	0.00	0.00	0.17	0.03	2.00	0.56	35.05	4.33	34.43	4.17	28.34	5.42
	D4	0.07	0.04	0.70	0.21	15.03	5.98	57.23	8.82	17.62	5.74	9.35	5.36
	D5	0.05	0.06	1.10	0.66	15.02	7.76	46.65	4.18	22.49	7.23	14.70	5.58
	D6	0.01	0.02	0.32	0.06	10.49	0.40	66.51	3.64	13.80	2.92	8.87	1.61
	D7	0.00	0.00	0.29	0.06	7.88	1.11	39.84	14.42	29.36	9.19	22.63	19.46
	D8	0.05	0.02	0.69	0.13	4.78	1.26	20.64	1.73	51.00	2.98	22.84	1.10
	D9	0.09	0.03	0.26	0.11	3.17	1.82	37.48	5.11	36.23	7.56	22.79	1.40

注:M为平均值,SD为标准差。下表同。

表 2

土壤盐分离子组成的分布特征

g·kg<sup>-1</sup>

土层/cm	地类	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		K <sup>+</sup>		Na <sup>+</sup>	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
0~10	D1	0.22	0.05	0.01	0.00	0.05	0.03	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
	D2	0.40	0.08	4.86	2.77	7.88	2.76	0.43	0.26	0.06	0.02	0.05	0.02	6.42	3.17
	D3	0.38	0.11	0.24	0.24	1.14	0.83	0.23	0.10	0.11	0.03	0.03	0.01	0.35	0.35
	D4	0.28	0.04	0.11	0.01	1.96	1.12	0.43	0.28	0.13	0.08	0.03	0.01	0.36	0.10
	D5	0.24	0.03	0.10	0.07	1.12	1.13	0.30	0.28	0.10	0.09	0.03	0.02	0.15	0.09
	D6	0.24	0.01	0.01	0.00	0.05	0.09	0.06	0.05	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
	D7	0.38	0.06	0.13	0.09	0.62	0.88	0.13	0.14	0.05	0.04	0.02	0.00	0.26	0.22
	D8	0.23	0.01	0.21	0.20	0.35	0.36	0.10	0.05	0.05	0.04	0.02	0.01	0.18	0.16
	D9	0.34	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.05	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01
20~40	D1	0.21	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00
	D2	0.76	0.19	3.22	0.46	2.90	1.97	0.10	0.01	0.03	0.02	0.03	0.00	3.61	1.13
	D3	0.29	0.01	0.52	0.28	1.76	0.67	0.24	0.13	0.12	0.04	0.02	0.00	0.79	0.29
	D4	0.24	0.01	0.16	0.13	2.63	1.54	0.33	0.16	0.21	0.21	0.03	0.01	0.68	0.23
	D5	0.21	0.04	0.21	0.03	1.59	0.44	0.22	0.15	0.17	0.10	0.01	0.01	0.42	0.07
	D6	0.23	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
	D7	0.35	0.02	0.23	0.10	0.50	0.36	0.08	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.36	0.26
	D8	0.28	0.04	0.13	0.12	0.31	0.36	0.08	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.18	0.19
	D9	0.33	0.03	0.02	0.00	0.02	0.02	0.05	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01
60~80	D1	0.24	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00
	D2	0.85	0.15	1.97	0.81	2.55	1.03	0.06	0.01	0.04	0.04	0.02	0.01	2.62	0.91
	D3	0.31	0.05	0.85	0.43	2.16	0.33	0.20	0.02	0.13	0.02	0.03	0.00	1.23	0.38
	D4	0.20	0.02	0.57	0.17	2.14	0.47	0.33	0.17	0.11	0.05	0.03	0.01	0.87	0.16
	D5	0.33	0.15	0.40	0.21	1.43	0.14	0.11	0.02	0.12	0.04	0.02	0.01	0.69	0.18
	D6	0.23	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00
	D7	0.50	0.17	0.16	0.08	0.26	0.23	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.35	0.18
	D8	0.37	0.08	0.18	0.10	0.40	0.19	0.07	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.33	0.23
	D9	0.36	0.03	0.03	0.00	0.29	0.03	0.05	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.15	0.03

## 2.2 RDA 排序的结果

分别对 0~10 cm、20~40 cm 和 60~80 cm 土层中的 6 个粒径土壤沙粒含量和土壤盐碱离子数据进行 RDA 分析,表 3 表明,0~10 cm 和 20~40 cm 土层第一典范轴和所有典范轴的蒙特卡罗检验均达到极显著水平( $P=0.002$ ;  $P=0.002$ ),所以 RDA 排序结果是可靠的。说明,0~10 cm 和 20~40 cm 土层不同粒径沙粒含量可以很好的反映土壤盐碱离子的变化。0~10 cm 和 20~40 cm 土壤环境和盐碱离子 RDA 分析中,排序轴 1、

2 分别解释了盐碱离子变量数据的 76.9%、0.2% 和 65.7%、2.5%。60~80 cm 土层中第一典范轴蒙特卡罗检验没有达到显著水平( $P=0.056$ ),说明 RDA 排序中,第一排序轴代表的土壤不同粒径的沙粒含量不能很好的反映土壤盐碱离子的变化情况,但是所有典范轴的蒙特卡罗检验达到显著水平( $P=0.044$ ),说明其它排序轴代表的环境因子变量可以很好解释土壤盐碱离子的变化,排序轴 1 不能很好的起到解释作用,第二排序轴解释了盐碱离子数据变量的 34%。

表 3 RDA 排序结果

参数	0~10 cm		20~40 cm		60~80 cm	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
特征值	0.769	0.002	0.657	0.025	0.340	0.340
变量累积百分比						
物种数据/%	76.9	77.1	65.7	68.2	34.0	37.0
物种-环境关系	99.7	100	96.3	99.9	90.8	98.8
物种-环境相关性	0.889	0.298	0.908	0.354	0.617	0.610
所有特征值之和	1		1		1	
所有典范特征值之和	0.772		0.682		0.374	
变量解释/%	77.10		68.20		37.40	
蒙特卡罗检验						
第一典范轴 P 值	0.002		0.002		0.056	
所有典范轴 P 值	0.002		0.002		0.044	

由表 4 可知,0~10 cm 土层,第一排序轴基本上反映了  $0.002\text{ mm}<D\leq 0.02\text{ mm}$ ,土壤粒径的沙粒含量变化趋势,其与排序轴的相关系数为 0.793 7。沿第一排序轴从左到右, $0.002\text{ mm}<D\leq 0.02\text{ mm}$  粒径的沙粒含量逐渐增加。第二排序轴基本反映了  $D\leq 0.002$ 、 $0.05\text{ mm}<D\leq 0.10$ 、 $0.10\text{ mm}<D\leq 0.25\text{ mm}$  粒径沙粒含量的变化趋势,三者与排序轴的相关系数分别为 -0.858 0、0.643 1 和 0.628 1,沿第二排序轴从上到下顺序, $D\leq 0.002\text{ mm}$  粒径沙粒含量逐渐增加, $0.05\text{ mm}<D\leq 0.10\text{ mm}$  和  $0.10\text{ mm}<D\leq 0.25\text{ mm}$  粒径沙粒含量逐渐减小。20~40 cm 土层,第一排序轴基本上反映了  $0.002\text{ mm}<D\leq 0.02\text{ mm}$  和  $0.02\text{ mm}<D\leq 0.05\text{ mm}$  粒径沙粒含量变化趋势,它们与排序轴的相关系数分别为 0.843 5 和 -0.623 5,沿第一排序轴从左到右, $0.002\text{ mm}<D\leq 0.02\text{ mm}$  粒径的沙

粒含量逐渐增加, $0.02\text{ mm}<D\leq 0.05\text{ mm}$  粒径沙粒含量逐渐减小。第二排序轴基本反映了  $0.25\text{ mm}<D\leq 0.50\text{ mm}$  粒径沙粒含量的变化趋势,其与排序轴的相关系数为 0.559 6,沿从上到下顺序,其含量逐渐减小。60~80 cm 土层,第一排序轴不能很好的解释土壤盐碱离子的变化趋势,因此,仅仅研究第二排序轴所代表的环境因子的变化趋势,第二排序轴基本反映了  $0.25\text{ mm}<D\leq 0.50\text{ mm}$  粒径沙粒含量的变化趋势,其与排序轴的相关系数为 0.667 4,沿从上到下顺序,其沙粒含量逐渐减小。整体来看,0~10 cm 和 20~40 cm 土壤盐碱离子的变化主要受  $0.002\text{ mm}<D\leq 0.02\text{ mm}$  粒径沙粒含量的影响,60~80 cm 土壤盐碱离子的变化主要受到  $0.25\text{ mm}<D\leq 0.50\text{ mm}$  粒径沙粒含量的影响。

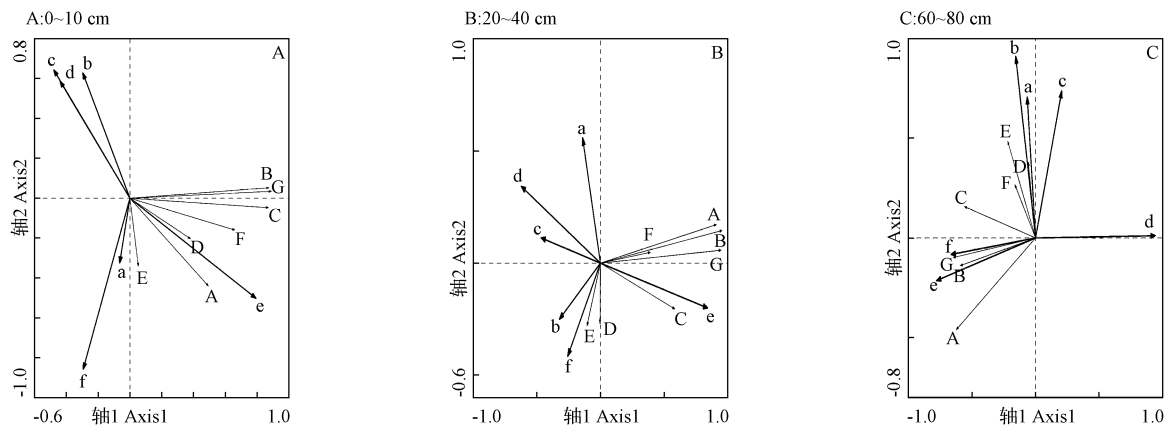
表 4 环境因子与 RDA 排序轴相关性分析

粒径/mm	0~10 cm		20~40 cm		60~80 cm	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
$0.25\text{ mm}<D\leq 0.50$	-0.064 2	-0.324 2	-0.140 6	0.559 6	0.706 4	0.667 4
$0.10\text{ mm}<D\leq 0.25$	-0.296 9	0.628 1	-0.323 3	-0.250 4	0.910 2	0.019 4
$0.05\text{ mm}<D\leq 0.10$	-0.479 4	0.643 1	-0.467 8	0.112 6	0.737 2	-0.235 6
$0.02\text{ mm}<D\leq 0.05$	-0.439 7	0.586 7	-0.623 5	0.342 6	0.011 4	-0.205 1
$0.002\text{ mm}<D\leq 0.02$	0.793 7	-0.502 2	0.843 5	-0.200 3	-0.232 1	0.558 6
$D\leq 0.002$	-0.293 4	-0.858 0	-0.257 8	-0.415 6	-0.082 2	-0.395 6

从图 1 可知,0~10 cm 和 20~40 cm 所有土壤盐碱离子均与  $0.002\text{ mm}<D\leq 0.02\text{ mm}$  粒径沙粒含量呈正相关关系,在 0~10 cm 土层中, $0.002\text{ mm}<D\leq 0.02\text{ mm}$  粒径沙粒含量主要影响了  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量的变化(图 1-A)。20~40 cm 土层中, $0.002\text{ mm}<D\leq$

$0.02\text{ mm}$  粒径沙粒含量主要影响  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量的变化(图 1-B)。60~80 cm 土层中, $0.25\text{ mm}<D\leq 0.50\text{ mm}$  粒径沙粒含量与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  呈正相关,与  $\text{HCO}_3^{-}$ 、 $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{Na}^{+}$  呈负相关关系。且  $0.25\text{ mm}<D\leq 0.50\text{ mm}$  粒径沙粒含量主要影响  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^{-}$  离子含





注:a,b,c,d,e,f 分别代表不同的土壤粒径,a.  $0.25\text{ mm} < D \leq 0.50\text{ mm}$ ; b.  $0.10\text{ mm} < D \leq 0.25\text{ mm}$ ; c.  $0.05\text{ mm} < D \leq 0.10\text{ mm}$ ; d.  $0.02\text{ mm} < D \leq 0.05\text{ mm}$ ; e.  $0.002\text{ mm} < D \leq 0.02\text{ mm}$ ; f.  $D \leq 0.002\text{ mm}$ 。A,B,C,D,E,F,G 分别代表不同的盐碱离子,A.  $\text{HCO}_3^-$ ; B.  $\text{Cl}^-$ ; C.  $\text{SO}_4^{2-}$ ; D.  $\text{Ca}^{2+}$ ; E.  $\text{Mg}^{2+}$ ; F.  $\text{K}^+$ ; G.  $\text{Na}^+$ 。

图 1 RDA 分析结果

量的变化(图 1-C)。

2.3 基于 RDA 分析前项选择分析

前项选择分析过程中,不同粒径的沙粒含量作为环境解释变量,被逐一引入模型分析,并通过蒙特卡罗检验(Monte Carlo permutation test)评价它们对土壤盐碱离子含量变化解释的显著性( $P < 0.05$ )。表 5 表明,0~10 cm 和 20~40 cm 土层,影响土壤盐碱离子含量及其变化的 6 个粒径参数中, $D \leq 0.002\text{ mm}$  和  $0.002\text{ mm} < D \leq 0.02\text{ mm}$  粒径沙粒含量均对土壤盐碱离子响应有显

著性解释( $P=0.002$ ),其解释量占有所有土壤粒径参数解释量分别为 63.64%、33.77%和 69.12%、27.94%。60~80 cm 土层,  $0.02\text{ mm} < D \leq 0.05\text{ mm}$  粒径沙粒含量对土壤盐碱离子响应有显著性解释( $P=0.004$ ),其解释量占有所有土壤粒径参数解释量的 81.08%,但是这一土层的总解释量仅为 37%。这可能是因为这一土层的土壤盐碱离子含量及其变化受到其它生态因子的影响更强烈,需要更近一步的研究。

表 5 颗粒组成指标作为解释变量的前项选择和蒙特卡罗检验分析

土层/cm	参数/mm	条件影响	多元相关比率/%	F 值	P 值
0~10	$0.25 < D \leq 0.50$	0.02	2.60	2.49	0.120
	$0.10 < D \leq 0.25$	0.00	0.00	0.13	0.854
	$0.05 < D \leq 0.10$	0.00	0.00	—	—
	$0.02 < D \leq 0.05$	0.00	0.00	—	—
	$0.002 < D \leq 0.02$	0.49	63.64	23.56	0.002
	$D \leq 0.002$	0.26	33.77	24.54	0.002
20~40	总计	0.77			
	$0.25 < D \leq 0.50$	0.02	2.94	1.50	0.224
	$0.10 < D \leq 0.25$	0.00	0.00	0.16	0.748
	$0.05 < D \leq 0.10$	0.00	0.00	0.04	0.920
	$0.02 < D \leq 0.05$	0.00	—	—	—
	$0.002 < D \leq 0.02$	0.47	69.12	22.04	0.002
60~80	$D \leq 0.002$	0.19	27.94	13.36	0.002
	总计	0.68			
	$0.25 < D \leq 0.50$	0.03	8.10	1.07	0.350
	$0.10 < D \leq 0.25$	0.00	0.00	0.16	0.798
	$0.05 < D \leq 0.10$	0.03	8.10	1.18	0.302
	$0.02 < D \leq 0.05$	0.30	81.08	10.82	0.004
总计	$0.002 < D \leq 0.02$	0.01	2.70	0.18	0.716
	$D \leq 0.002$	0.00	0.00	0.09	0.878
	总计	0.37			

注:条件影响用来计算多元相关比率 MCR(%),MCR 表示环境因子单独解释量占总解释量的百分比,“—”表示软件在分析过程中没有给出的值。

3 结论

研究区土地管理利用方式与利用年限的不同都导致了土壤颗粒组成与盐分离子的基本分布特征的显著改变,部分地类依然存在潜在的次生退化风险。

细砂粒、粉粒和粘粒系研究区土壤颗粒组成的主要

成分。荒地粉粒含量最高,其次是细砂粒。沙化玉米地细砂粒和中砂粒含量则大幅上升。随利用年限的延长,枸杞地细砂粒含量有逐步增加的趋势。玉米地表层细砂粒含量以波动变化为主,5 年前后细砂粒含量最高。细砂粒含量枸杞地明显高于玉米地,而粘粒和粉粒含量

则相反。粗砂粒含量较高的地块集中在沙化玉米地和5年的玉米地表层土壤。沙化玉米地盐碱离子含量最低,未利用地盐碱离子含量最高,枸杞地显著高于玉米地。未利用地盐碱离子的表聚性最为突出,枸杞地灌溉脱盐的效果比较明显。随种植年限的延长,各种盐碱离子的含量表现出一定的下降趋势。土壤环境质量以不同程度的盐化为主,碱化特征不明显。

土壤颗粒组成与盐分离子组成间存在显著的对应关系,土壤粘粒和粉粒含量显著改变了表层和耕作层盐分离子的分布,而在深层土壤中细沙粒的作用更为突出。

基于RAD分析,0~10 cm和20~40 cm土层,影响土壤盐碱离子含量及其变化的6个粒径参数中, $D \leq 0.002$  mm和 $0.002$  mm $<D \leq 0.02$  mm粒径沙粒含量均对土壤盐碱离子响应有显著性解释( $P=0.002$ ),其解释量占有土壤粒径参数解释量分别为63.64%、33.77%和69.12%、27.94%。60~80 cm土层, $0.02$  mm $<D \leq 0.05$  mm粒径沙粒含量对土壤盐碱离子响应有显著性

解释( $P=0.004$ ),其解释量占有土壤粒径参数解释量的81.08%,但是这一土层的总解释量仅为37%。

### 参考文献

- [1] 虞江萍,文云朝,汪一鸣,等.宁夏扬黄灌溉对土壤环境的影响[J].地理科学进展,2000,19(3):279-284.
- [2] 王鸣远,关三和,王义.毛乌素沙地过渡地带土壤水分特征及其植物利用[J].干旱区资源与环境,2002,16(2):37-44.
- [3] 李小刚,崔志军,王玲英,等.盐化和有机质对土壤结构稳定性及阿特伯格极限的影响[J].土壤学报,2002,39(4):550-559.
- [4] 靳敏生.宁夏红寺堡灌区土壤沙化治理的措施与实践[J].农业科学研究,2005,26(2):51-52.
- [5] 杨新国,宋乃平,刘秉儒,等.荒漠草原绿洲化过程中灌溉玉米地土壤夏季盐渍化特征[J].水土保持学报,2011,25(4):94-99.
- [6] 杨新国,宋乃平.宁夏红寺堡扬黄灌区土壤沙化和盐渍化及其相互关系[J].应用生态学报,2011,22(9):2265-2271.
- [7] 金国柱,马玉兰.宁夏淡灰钙土的开发和利用[J].干旱区研究,2000,17(3):59-63.
- [8] 路鹏,苏以荣,牛铮,等.土壤质量评价指标及其时空分异[J].中国生态农业学报,2007,15(4):190-194.

## Distribution Characteristics and Corresponding Relation Between Soil Particle Composition and Salt Ion Composition in Ningxia Pumping Irrigation Area

QU Wenjie<sup>1,2</sup>, YANG Xinguo<sup>1,2</sup>, CHEN Lin<sup>1,2</sup>, SONG Naiping<sup>1,2</sup>

(1. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 2. Key Laboratory for Recovery and Restoration of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

**Abstract:** Based on the distribution of soil particle composition and salt ions among different land use types in Yellow River irrigation area, the RDA method analysis was used to analysis their relationships. The results showed that, soil texture in the study area was sandy loam, including fine sand, silt, and clay particles as the main. Reclamation had significantly changed vertical distribution patterns of soil texture, as the effect by cultivation methods and cropping duration. There was a risk of desertification for corn lands under transitional utilization. Overall, sandy corn salt ions content, unused salt ions content, medlar was significantly higher than that of corn. Unused land of the accumulation of salt ions were most prominent, effect of the lycium barbarum water desalination was more obvious. With the increase of planting age, contents of alkali ions showed a downward trend, and mobility the ability of chloride, sodium and sulfate ions. With varying degrees of salinization of soil environmental quality and characteristics of alkalization was not obvious. Based on soil particle composition and RAD analysis of saline-alkali Ionic composition, 0—10 cm, and 20—40 cm soil, affecting soil salinity changed of ion concentration and particle size of 6 parameters,  $D \leq 0.002$  mm and  $0.002$  mm $<D \leq 0.02$  mm size sand content of soil salinity ions responded significantly to explain ( $P=0.002$ ), they explained all the soil grain size parameters are interpreted respectively as 63.64%, 33.77% and 69.12%, 27.94%. 60—80 cm soil,  $0.02$  mm $<D \leq 0.05$  mm grain diameter sand content on soil saline ion response had significantly explained ( $P=0.004$ ), its explained volume accounted for all soil grain diameter parameter explained volume of 81.08%, but this explained volume only for 37%. Different land management and utilization years led to significant changes in the basic distribution of soil particle composition and salt ions, secondary degradation of partial classes were still potential risks. There was a significant relationship between the salt ions and soil particle composition, soil clay and silt content significantly changed the distribution of salt ions in surface and plow soil, and fine sand may be more prominent role at the bottom of soil.

**Keywords:** pumping irrigation area; soil particle composition; salt ion composition; RDA analysis