

# 民勤绿洲盐生草周围土壤盐渍化类型及其盐分离子的相关性研究

张鸣<sup>1,2</sup>, 李昂<sup>1</sup>, 刘芳<sup>1,2</sup>, 吕亚娟<sup>1,2</sup>, 孙看军<sup>1,2</sup>

(1. 兰州城市学院 化学与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 城市环境污染控制高校省级重点实验室, 兰州 730070)

**摘要:**以民勤绿洲广泛分布的盐生植物盐生草为研究对象,对其周围不同距离范围内土壤盐渍化类型及盐离子的相关性进行研究。结果表明:在距盐生草水平方向 0—60 cm 范围内,从阴离子组成来看,0—40 cm 土层土壤盐渍化类型为氯化物—硫酸盐型,40—60 cm 土层土壤为硫酸盐—氯化物型;从阳离子组成来看,0—40 cm 土层土壤盐渍化类型为钙钠盐型,40—60 cm 土层土壤为钠盐型。同时盐生草周围土壤(0—60 cm)盐分离子的 Pearson 相关分析结果和偏相关分析结果存在明显差异,其中偏相关分析相对能够更准确地反映多元变量其中两个变量之间的相关性,建议在研究类似盐离子之间的相关性时采用偏相关分析。试验区盐生草周围土壤盐分离子的偏相关分析表明:距盐生草 20,40 cm 处,与土壤全盐含量相关性最高的阴阳离子分别为  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ;距盐生草 60 cm 处,与土壤全盐含量相关性最高的阴阳离子分别为  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ 。可见,在盐生草周围土壤(0—60 cm)中,土壤盐分主要是氯化钠、氯化钙、硫酸钠和硫酸钙。

**关键词:**盐生草;民勤绿洲;盐渍化类型;盐离子;相关性

中图分类号:S156.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0056-05

## Study on Salt Ion Correlation and Salinization Types of Soil Around *Halogeton glomeratus* in Minqin Oasis

ZHANG Ming<sup>1,2</sup>, LI Ang<sup>1</sup>, LIU Fang<sup>1,2</sup>, LÜ Yajuan<sup>1,2</sup>, SUN Kanjun<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemistry and Environmental Science, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China;

2. Provincial Key Laboratory of Gansu Higher Education for City Environmental Pollution Control, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:**Correlation of salt ions and salinization types of soil around different distance ranges from *Halogeton Glomeratus* were studied by using *Halogeton Glomeratus* of halophyte widely distributing in Minqin Oasis as the research example. The results showed that 0—60 cm distance from the *Halogeton glomeratus* in the horizontal direction, anion component of 0—40 cm soil layer belonged to chloride-sulfate type and belonged to chloride-sulfate type in 40—60 cm soil layer, cation component in 0—40 cm soil layer belonged to calcium-sodium type, and belonged to sodium type in 40—60 cm soil layer. Pearson correlation analysis and partial correlation analysis had clear difference among salt ions of *Halogeton Glomeratus* surrounding 0—60 cm range soil. Partial correlation analysis could more exactly reflect the correlation between two variables in multivariate, therefore, it was suggested that partial correlation analysis should be used when studying a correlation between similar salt ions. The partial correlation analysis of salt ions in soil around *Halogeton glomeratus* showed that in the horizontal direction away from the *Halogeton glomeratus* 20 cm and 40 cm,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Na}^+$  had the highest correlation with soil total salinity. In the horizontal direction away from the *Halogeton glomeratus* 60 cm,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  had the highest correlation with soil total salinity. Thus, in the horizontal direction away from the *Halogeton glomeratus* 0—60 cm range, soil salinity mainly resulted from sodium chloride, calcium chloride, sodium sulfate and calcium sulfate.

**Keywords:** *Halogeton glomeratus*; Minqin Oasis; salinization types; salt ions; correlation

收稿日期:2014-04-02

修回日期:2014-05-09

资助项目:兰州城市学院校长科研创新基金项目(LZCU-XZ2014-13);国家自然科学基金资助项目(30960060);兰州城市学院教学研究项目(2012-JY-40)

第一作者:张鸣(1979—),女,甘肃临洮人,硕士,讲师,主要从事环境科学研究。E-mail:zhangmingl@163.com

土壤盐渍化是干旱区农业发展的重要障碍<sup>[1]</sup>。而盐渍化土壤在一定程度上却又是一种重要的土地资源,科学合理的开发利用,具有重要的经济价值和社会意义<sup>[2]</sup>。盐渍土的发生受区域性因素的影响和制约,其盐分组成及离子比例呈现地域性特点,积盐和脱盐过程存在差异,对植物和农作物生长发育的影响也不尽相同<sup>[3]</sup>,从而确定区域内土壤盐渍化类型,对制定有针对性的改良措施尤为重要。大量研究表明,在盐渍土壤上种植耐盐碱植物,能有效改良盐渍土<sup>[4]</sup>,而且这种方法被普遍认为是最有效的盐渍土改良措施<sup>[5-6]</sup>。盐生草(*Halogeton glomeratus*)作为一种盐生植物,是广泛分布于我国西北内陆荒漠或半荒漠地区的一年生草本植物,为苋科(*Amaranthaceae*)盐生草属(*Halogeton*),由于其具有明显的聚盐特性,在盐碱地治理和防治盐渍化方面具有重要作用。目前,关于盐生草的研究报道相对较多,研究内容涉及盐生草的形态结构<sup>[7]</sup>、种子萌发<sup>[8]</sup>和盐碱地改良<sup>[9]</sup>等诸多方面,但是关于其对土壤盐分离子之间相关性影响的研究报道鲜见。由于化学元素的离子半径、化合价、存在形态等的相似性,它们在植物、土壤、沉淀物等生命和非生命体中的存在往往具有一定的相关性<sup>[10]</sup>。同时由于不同地区的气候特点,成土母质的差异致使土壤盐渍化成因不同,土壤总体盐分状况和盐分离子之间的相关性不同<sup>[11]</sup>。目前关于土壤盐分离子之间的相关性研究主要集中在 Pearson 相关分析<sup>[12-13]</sup>,偏相关分析鲜见<sup>[14]</sup>。为此,本文在前期研究的基础上<sup>[15]</sup>,以广泛分布于民勤绿洲的盐生草为研究对象,利用 Pearson 相关和偏相关两种分析方法对其周围区域内盐分离子之间的相关关系进行研究,探讨两种分析方法的异同,同时对盐生草周围不同距离范围内的土壤盐渍化类型进行确定,旨在为盐生植物的研究及其对盐渍化土壤的改良利用提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区概况

民勤绿洲位于河西走廊石羊河流域下游,地处腾格里沙漠西缘,南部为红崖山和阿古拉山,东北与巴丹吉林沙漠接壤,三面被沙漠和戈壁包围,地理位置为 38°05′—39°26′N,101°59′—104°12′E,海拔 1 180~1 500 m,总面积 1.6 万 km<sup>2</sup>,其中绿洲面积约占 9%。属于典型的温带大陆性荒漠气候,气候干旱,平均降水量 113 mm,年均蒸发量 2 625 mm,年均气温 8.3℃,年均扬沙日数 59 d,年均沙尘暴日数 27 d,气候环境十分恶劣。

### 1.2 采样区布设与样品采集

供试土壤于 2012 年 10 月中旬采集于甘肃省民勤治沙综合试验站的沙生植物园内,供试植物选取该区具有代表性的沙生植物盐生草。取样点地理坐标为 38°59′47″N,102°57′38″E,海拔 1 368.80 m。采样时在盐生草分布相对均匀的样地上随机划分 3 个 10 m×10 m 的样方,每个样方中随机选取长势和大小相对一致的 3 株盐生草为研究对象,以植株为圆心,以 20,40,60 cm 为半径,分别利用多点取样法采集距离植株 20,40,60 cm 处的土样,采样剖面深度划分为 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 四个层次。土样自然风干后剔出植物根系及石砾等杂物,磨碎,过 1 mm 筛,放于干燥的密封袋中备用。

### 1.3 土壤盐分测定方法

取上述风干处理样,按水土比 5:1 制备待测液,参照《土壤农化分析》<sup>[16]</sup>进行土壤 Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>,Cl<sup>-</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>测定,其中 Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>采用火焰光度计法测定;Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>采用 EDTA 络合滴定法测定;Cl<sup>-</sup>采用 AgNO<sub>3</sub> 滴定法测定,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>采用 EDTA 间接滴定法测定,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>采用双指示剂滴定法测定,其中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>未检出。土壤全盐含量为各盐分离子量之和。

### 1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 DPS 3.01 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐生草生境土壤盐渍化类型

从阴离子组成来看(表 1),在距盐生草水平方向 0—60 cm 范围内,根据我国盐渍化土壤类型划分标准<sup>[17]</sup>,0—40 cm 土层土壤为氯化物—硫酸盐型,40—60 cm 土层土壤为硫酸盐—氯化物型。同时,距盐生草越远,Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 越小,土层越深,Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 越大,说明盐生草对 Cl<sup>-</sup> 的富集程度要高于 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。而且各土层土壤内 Cl<sup>-</sup> 的含量明显高于 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量。由于盐分上下运动过程中氯化物的活动强度高于硫酸盐,即在易溶性盐类上行过程中,氯化物表聚性强于硫酸盐,在土壤脱盐过程中,氯化物的淋溶速度快于硫酸盐,所以可以推断出,研究区内盐分离子的运动趋势以向下运移为主。这可能是因为研究区的水分来源主要为地下水,地表水几乎为零,而采样区的表层土壤为沙质土,缺乏有机质,难以形成团粒结构,土壤孔隙较大,缺乏毛管孔以保存水分,内部排水快,蓄水少,而蒸发失水强烈,水汽由大孔隙扩散至表层损失,进而使得表层盐分容易缺失所致。

表 1 盐生草周围土壤盐渍化类型(按阴离子组成划分)

土层/cm	距盐生草 20 cm		距盐生草 40 cm		距盐生草 60 cm	
	Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	盐渍化类型	Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	盐渍化类型	Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	盐渍化类型
0—10	1.30	氯化物—硫酸盐型	1.18	氯化物—硫酸盐型	0.98	氯化物—硫酸盐型
10—20	1.60	氯化物—硫酸盐型	1.70	氯化物—硫酸盐型	1.24	氯化物—硫酸盐型
20—40	1.76	氯化物—硫酸盐型	1.78	氯化物—硫酸盐型	1.70	氯化物—硫酸盐型
40—60	2.14	硫酸盐—氯化物型	2.08	硫酸盐—氯化物型	2.32	硫酸盐—氯化物型

从阳离子组成来看(表 2),在距盐生草水平方向 0—60 cm 范围内,根据朱祖祥<sup>[18]</sup>提出的划分标准,

0—40 cm 土层土壤盐渍化类型为钙钠盐型,40—60 cm 土层土壤属钠盐型。

表 2 盐生草周围土壤盐渍化类型(按阳离子组成划分)

土层/cm	距盐生草 20 cm			距盐生草 40 cm			距盐生草 60 cm		
	(Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> )/ (Mg <sup>2+</sup> +Ca <sup>2+</sup> )	Mg <sup>2+</sup> / Ca <sup>2+</sup>	盐渍化 类型	(Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> )/ (Mg <sup>2+</sup> +Ca <sup>2+</sup> )	Mg <sup>2+</sup> / Ca <sup>2+</sup>	盐渍化 类型	(Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> )/ (Mg <sup>2+</sup> +Ca <sup>2+</sup> )	Mg <sup>2+</sup> / Ca <sup>2+</sup>	盐渍化 类型
0—10	1.89	0.74	钙钠盐型	1.92	0.48	钙钠盐型	1.79	0.74	钙钠盐型
10—20	1.17	0.70	钙钠盐型	1.38	0.35	钙钠盐型	1.77	0.50	钙钠盐型
20—40	1.77	0.66	钙钠盐型	1.35	0.49	钙钠盐型	1.36	0.54	钙钠盐型
40—60	2.33	0.58	钠盐型	2.14	0.47	钠盐型	2.22	0.54	钠盐型

## 2.2 土壤全盐含量与各离子含量的相关和偏相关矩阵

由表 3 可以看出,在距盐生草 20 cm 处,Pearson 相关系数表明,土壤全盐含量与 Cl<sup>-</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>,K<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup> 呈极显著正相关,与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 呈负相关,但是相关性未达到显著水平,其中与其相关性最高的阴阳离子分别为 Cl<sup>-</sup>,Na<sup>+</sup>,其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,土壤盐分主要是氯化钠,其次为氯化钙、硫酸钠和硫酸钙;而偏相关分析结果表明,土壤全盐含量与所有离子之间均呈极显著正相关,其中与其相关性最高的阴阳离子分别为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Na<sup>+</sup>,其次是 Cl<sup>-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,土壤盐分主要是硫酸钠,其次为硫酸钙、氯化钠和氯化钙。在距盐生草 40 cm 处,Pearson 相关系数表明,土壤全盐含量同样与 Cl<sup>-</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>,K<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup> 呈

极显著正相关,而与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 呈负相关,但是相关性未达到显著水平,其中与其相关性最高的阴阳离子分别为 Cl<sup>-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Na<sup>+</sup>,土壤盐分主要是氯化钙,其次为氯化钠、硫酸钙和硫酸钠;而偏相关分析结果与 20 cm 处相同。在距盐生草 60 cm 处,Pearson 相关系数表明,土壤全盐含量与 Cl<sup>-</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>,K<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup> 呈极显著正相关,与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 呈极显著负相关,其中与其相关性最高的阴阳离子分别为 Cl<sup>-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Na<sup>+</sup>,土壤盐分主要是氯化钙,其次为氯化钠、硫酸钙和硫酸钠;而偏相关系数表明,土壤全盐含量与所有离子之间均呈极显著正相关,其中与其相关性最高的阴阳离子分别为 Cl<sup>-</sup>,Na<sup>+</sup>,其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,土壤盐分主要是氯化钠,其次为氯化钙、硫酸钠和硫酸钙。

表 3 土壤全盐含量与各离子含量之间的 Pearson 相关和偏相关系数矩阵

离子类型	距盐生草 20 cm		距盐生草 40 cm		距盐生草 60 cm	
	相关系数	偏相关系数	相关系数	偏相关系数	相关系数	偏相关系数
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.3089	0.6599**	-0.2462	0.6567**	-0.5536**	0.6775**
Cl <sup>-</sup>	0.9624**	0.9627**	0.9656**	0.9552**	0.9598**	0.9866**
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.9374**	0.9907**	0.9426**	0.9842**	0.8791**	0.9715**
Ca <sup>2+</sup>	0.9689**	0.9973**	0.9621**	0.9958**	0.9718**	0.9893**
Mg <sup>2+</sup>	0.9388**	0.9666**	0.9549**	0.9720**	0.9316**	0.9637**
K <sup>+</sup>	0.8289**	0.9786**	0.8257**	0.9767**	0.8553**	0.9667**
Na <sup>+</sup>	0.9690**	0.9994**	0.9575**	0.9997**	0.9399**	0.9987**

注:\* 为  $p < 0.05$  时的显著性水平; \*\* 为  $p < 0.01$  时的显著水平,下同。

## 2.3 距盐生草 20 cm 处各盐分离子之间的相关与偏相关系数矩阵

在距盐生草 20 cm 处(表 4),Pearson 相关分析表明,Cl<sup>-</sup> 除与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 呈极显著负相关外,与其他离子均呈极显著正相关,其中与其相关性最高的阳离子为

Ca<sup>2+</sup>, 相关系数为 0.916 6,其次为 Na<sup>+</sup>, 相关系数为 0.916 1,而偏相关分析中,Cl<sup>-</sup> 除与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 呈极显著负相关外,只与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,K<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup> 呈极显著正相关,与其相关性最高的阳离子为 Na<sup>+</sup>, 相关系数为 0.895 0,其次为 K<sup>+</sup>, 相关系数为 0.482 1。Pearson 相关分析中,



## 2.5 距盐生草 60 cm 处各盐分离子之间的相关与偏相关系数矩阵

在距盐生草 60 cm 处(表 6), Pearson 相关分析表明,  $\text{Cl}^-$  除与  $\text{HCO}_3^-$  呈极显著负相关外, 与其他离子均呈极显著正相关, 其中与其相关性最高的阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ , 相关系数为 0.949 3, 其次为  $\text{Mg}^{2+}$ , 相关系数为 0.873 6, 而偏相关分析中,  $\text{Cl}^-$  除与  $\text{K}^+$  呈极显

著负相关外, 只与  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  呈极显著正相关。Pearson 相关分析中,  $\text{SO}_4^{2-}$  同样除与  $\text{HCO}_3^-$  呈极显著负相关外, 与其他离子均呈极显著正相关, 其中与其相关性最高的阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ , 相关系数为 0.942 6, 其次为  $\text{Mg}^{2+}$ , 相关系数为 0.818 3, 而偏相关分析中,  $\text{SO}_4^{2-}$  除与  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  呈极显著负相关外, 只与  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  呈极显著正相关。

表 6 距盐生草 60 cm 处各盐分离子之间的 Pearson 相关和偏相关系数矩阵

	离子类型	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$
Pearson 相关系数	$\text{HCO}_3^-$	1.0000						
	$\text{Cl}^-$	-0.6632**	1.0000					
	$\text{SO}_4^{2-}$	-0.7532**	0.9265**	1.0000				
	$\text{Ca}^{2+}$	-0.5881**	0.9493**	0.9426**	1.0000			
	$\text{Mg}^{2+}$	-0.3307*	0.8736**	0.8183**	0.9387**	1.0000		
	$\text{K}^+$	-0.1451	0.7210**	0.6663**	0.8351**	0.8921**	1.0000	
	$\text{Na}^+$	-0.4549**	0.8584**	0.6865**	0.8394**	0.8203**	0.7988**	1.0000
	偏相关系数	$\text{HCO}_3^-$	1.0000					
$\text{Cl}^-$		0.5134**	1.0000					
$\text{SO}_4^{2-}$		-0.7997**	0.7094**	1.0000				
$\text{Ca}^{2+}$		-0.0087	-0.0951	0.4865**	1.0000			
$\text{Mg}^{2+}$		0.5864**	-0.0251	0.2153	0.4901**	1.0000		
$\text{K}^+$		0.7601**	-0.6399**	0.5907**	0.1749	-0.2226	1.0000	
$\text{Na}^+$		-0.7808**	0.8015**	-0.8974**	0.3026	0.2381	0.7267**	1.0000

由表 3—6 可以看出, 距盐生草 20, 40, 60 cm 处各土层盐分离子的 Pearson 相关分析和偏相关分析结果之间存在明显差异。这与郭全恩等<sup>[14]</sup>在半干旱盐渍化地区果园土壤盐分离子的研究结果相一致。就本研究而言, 从整体上看, Pearson 相关系数和偏相关系数虽然在数值上差异不大, 但是从二者分析结果所得到的土壤主要盐分却大相径庭, Pearson 相关分析得出距离盐生草 20, 40, 60 cm 处的主要盐分分别为氯化钠、氯化钙和氯化钙, 而偏相关分析结果却为硫酸钠、硫酸钠和氯化钠, 而它们四者对作物的危害性不同, 从大到小依次为氯化钠、氯化钙、硫酸钠和硫酸钙。这两种方法的分析结果之所以出现差异, 主要是因为 Pearson 相关分析中, 分析两个盐分离子之间相关性时, 还混淆着其他盐分离子对它们的交互效应, 而偏相关分析却能够消除这种干扰, 相比 Pearson 相关分析能够更加准确地反映这两种离子之间的相关性<sup>[19-20]</sup>。可见, 通过偏相关分析所得到的土壤主要盐分相比 Pearson 相关分析结果更能代表研究区的真实情况。由于在现实盐渍化土壤治理和改良过程中, 只有明确了土壤的盐渍化类型和所含的主要盐分种类, 才能对该地的盐渍化治理和改良提出合理的建议和措施, 所以, 在研究类似盐分离子之间的相关性时, 建议采用偏相关分析。

## 3 结论

(1) 盐生草周围(0—60 cm)土壤盐分离子的运动趋势以向下运移为主, 土壤盐分主要是氯化钠、氯化钙、硫酸钠和硫酸钙。从阴离子组成来看, 0—40 cm 土层土壤盐渍化类型为氯化物—硫酸盐型, 40—60 cm 土层土壤为硫酸盐—氯化物型, 从阳离子组成来看, 0—40 cm 土层土壤盐渍化类型为钙钠盐型, 40—60 cm 土层土壤为钠盐型。

(2) 盐生草周围(0—60 cm)土壤盐分离子的偏相关分析表明, 全盐含量与各盐分离子之间均呈极显著正相关, 其中在距盐生草 20, 40 cm 处, 与土壤全盐含量相关性最高的阴阳离子分别为  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ , 其次为  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ; 在距盐生草 60 cm 处, 与土壤全盐含量相关性最高的阴阳离子分别为  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , 其次是  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 。

(3) 盐生草周围土壤(0—60 cm)盐分离子之间的 Pearson 相关分析结果和偏相关分析结果存在明显差异, 其中偏相关分析相对能够更准确地反映多元变量其中两个变量之间的相关性, 建议在研究类似盐分离子之间的相关性时采用偏相关分析。

- 探讨[J]. 江西师范大学学报:自然科学版, 2007, 31(2):210-214.
- [11] 李荣昉, 张颖. 鄱阳湖水质时空变化及其影响因素分析[J]. 水资源保护, 2012, 27(6):9-13.
- [12] 周礼恺, 张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. 土壤通报, 1980, 5(1):37-38.
- [13] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社, 2006.
- [14] Huang L, Gao X, Liu M, et al. Correlation among soil microorganisms, soil enzyme activities, and removal rates of pollutants in three constructed wetlands purifying micro-polluted river water[J]. Ecological Engineering, 2012, 46:98-106.
- [15] 谭周进, 肖启明, 杨海君, 等. 旅游对张家界国家森林公园土壤酶及微生物作用强度的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1):133-138.
- [16] 王芸, 韩宾, 史忠强, 等. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4):120-123.
- [17] 杨海君, 肖启明, 谭周进, 等. 放牧对张家界索溪峪景区土壤酶活性及微生物作用强度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):913-917.
- [18] 唐玉姝, 慈恩, 颜廷梅, 等. 太湖地区长期定位试验稻麦两季土壤酶活性与土壤肥力关系[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):1000-1006.
- [19] 滕应, 黄昌勇. 重金属污染土壤的微生物生态效应及其修复研究进展[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1):85-89.
- [20] 杨海君, 肖启明, 谭周进, 等. 放牧对张家界索溪峪景区土壤酶活性及微生物作用强度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):913-917.
- [21] 陈苏, 孙丽娜, 晁雷, 等. 基于土壤酶活性变化的铅污染土壤修复基准[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7):1659-1662.
- [22] 王俊华, 尹睿, 张华勇, 等. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(1):191-196.
- [23] 王晶, 包维楷, 何丙辉, 等. 旅游活动对九寨沟地表径流氮磷流失的影响研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2):284-288.
- [24] 赵美风, 席建超, 葛全胜. 六盘山生态旅游区水质变化对人类旅游活动干扰的动态响应[J]. 资源科学, 2011, 33(9):1815-1821.
- [25] Kerr Y H, Waldeufel P, Wigneron J P, et al. The smos mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5):666-687.
- [26] Hoek J P. Towards a climate neutral water cycle[J]. Journal of Water and Climate Change, 2012, 3(3):163-170.
- [27] Rozos E, Makropoulos C. Source to tap urban water cycle modelling [J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 41:139-150.

(上接第60页)

#### 参考文献:

- [1] 姜凌, 李佩成, 胡安焱, 等. 干旱区绿洲土壤盐渍化分析评价[J]. 干旱区地理, 2009, 32(2):234-239.
- [2] 王水献, 董新光, 杜卫东. 新疆阿瓦提灌区土壤盐渍化现状及特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5):170-175.
- [3] 刘庆生, 刘高焕, 励惠国. 辽河三角洲土壤盐渍化现状及特征分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):190-195.
- [4] Keiffer C H, Ungar I A. Germination and establishment of halophytes on brine-affected soils[J]. Journal of Applied Ecology, 2002, 39(3):402-415.
- [5] 陈双生. 4种作物对河西走廊盐渍化土壤的改良效果[J]. 甘肃农业科技, 2008(7):21-23.
- [6] 张建锋. 盐碱地的生态修复研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4):74-78.
- [7] 章英才, 张晋宁. 白茎盐生草叶片结构与盐生环境关系的研究[J]. 宁夏农学院学报, 2002, 23(1):30-32.
- [8] 于晓, 严成, 魏岩. 盐生草(*Halogeton glomeratus*)二型种子的休眠与萌发[J]. 生态学报, 2009, 29(3):1616-1621.
- [9] 王文, 张德罡. 白茎盐生草对盐碱土壤的改良效果[J]. 草业科学, 2011, 28(6):902-904.
- [10] 刘景双, 朱颜明, 黄锡畴, 等. 长白山岳桦林化学元素生物地球化学分析[J]. 地理科学, 1998, 18(5):457-462.
- [11] 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.
- [12] 李彬, 王志春, 梁正伟, 等. 苏打碱化土壤盐分离子与相关性分析[J]. 土壤通报, 2007, 38(4):653-656.
- [13] 王勇辉, 王艳丽, 海米提·依米提, 等. 博尔塔拉河下游河岸带土壤盐分特征分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5):139-142.
- [14] 郭全恩, 王益权, 郭天文, 等. 半干旱盐渍化地区果园土壤盐分离子相关性研究[J]. 土壤, 2009, 41(4):664-669.
- [15] 张鸣, 张力, 石晓妮, 等. 民勤绿洲盐生草生境土壤盐分特征及离子组成[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6):231-235.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [17] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社, 1993.
- [18] 朱祖祥. 土壤学(下册)[M]. 北京:农业出版社, 1984.
- [19] 廖小妹, 张炼辉, 李丽容, 等. 珍珠豆型花生品种性状相关与偏相关分析[J]. 中国油料作物学报, 1989(1):29-31.
- [20] 严丽坤. 相关系数与偏相关系数在相关分析中的应用[J]. 云南财贸学院学报, 2003, 19(3):78-80.