

DOI: 10.5846/stxb201312263033

唐让云, 曹靖, 董放, 董利苹, 孔晓乐. 淋洗与植物作用耦合对盐渍化土壤的改良效应. 生态学报, 2015, 35(17): - .

Tang R Y, Cao J, Dong F, Dong L P, Kong X L. Amelioration of salt-affected soils via combination of leaching and plant cultivation. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - .

淋洗与植物作用耦合对盐渍化土壤的改良效应

唐让云, 曹靖*, 董放, 董利苹, 孔晓乐

兰州大学生命科学学院草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000

摘要:以甘肃秦王川引大灌区盐渍化土壤为背景,以当地 5 种耐盐植物为材料,采用根袋法盆栽试验动态研究了淋洗结合植物种植对盐渍化土壤改良的效应。结果表明:与种前相比,单纯的淋洗作用对土壤 pH 值影响不大,而淋洗结合植物种植明显降低了土壤 pH 值,且根际土壤 pH 值小于非根际土壤的,5 种耐盐植物中霸王根际土壤 pH 值降低幅度最大,达 0.6 个单位。 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 在 5 种植物根际土壤中均有不同程度的富集,富集程度因物种的不同而不同,随培养时间的延长而呈波动状态。5 种供试植物和对照组土壤中的 6 种主要的可溶性盐分离子随淋洗次数和培养时间的延长呈下降趋势。在培养 120 d 后,单纯淋洗的土壤中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的含量相比种前平均分别降低了 33.3%、26.1%、35.6%、32.5%、35.5% 和 36.3%,植物吸收带走的上述各离子的含量平均分别占种前的 46.2%、8.1%、30.2%、7.2% 和 21.6%,其中霸王吸收带走的盐分离子最多,而淋洗结合种植植物的土壤中上述各离子的含量与种前相比平均分别降低了 67.25%、63.73%、83.8%、67.5%、81.55% 和 78.46%,由此可见,淋洗结合植物种植的脱盐效果优于单纯淋洗,且土壤中主要的盐分离子 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的含量降低幅度最大,通过计算得出,在 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 减少的总量中还有 37.73% 的 Na^+ 、38.22% 的 Cl^- 和 35.14% 的 SO_4^{2-} 的减少量是由植物根系的物理化学作用机制引起的。

关键词:淋洗与植物作用;盐渍化土壤;耐盐植物;根际土壤

Amelioration of salt-affected soils via combination of leaching and plant cultivation

TANG Rangyun, CAO Jing*, DONG Fang, DONG Liping, KONG Xiaole

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Salinization of soil is a major limiting factor for sustainable development of irrigated agriculture in arid and semi-arid regions. At present, the majority of comparative studies suggest that a plant-assisted approach is more effective in ameliorating soil salinization. Cultivation of salt-tolerant plants improves physical properties of salt-affected soil due to penetration and extrusion of extensive and thick root systems of plants, which promote leaching of salts from top to deeper soil layers. Furthermore, due to physiological activities of plant roots, there is a marked difference in physical and chemical properties of soils between the rhizosphere soil and bulk soil. Based on a background of calcareous salt-affected soil in the irrigated region of Qingwangchuan, Gansu, a pot experiment with rhizobag was carried out for five salt-tolerant plant species to investigate the coupling effect of leaching and plant cultivation on salt-affected soil and to compare the changes of the dynamics of salt ions in the rhizosphere and bulk soils at different plant growth stages. Results indicated that soil pH was not influenced by leaching alone compared to initial soil pH before plants were grown, but leaching and plant cultivation combined significantly decreased soil pH, resulting in lower pH in rhizosphere soil than in bulk soil. Reduction in soil pH in

基金项目:国家自然科学基金项目(31071866);甘肃省自然科学基金项目(096RJA066)

收稿日期:2013-12-26; 网络出版日期:2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caojing@lzu.edu.cn

the rhizosphere of *Zygophyllum xanthoxylum* was the highest among the five salt-tolerant plant species, by up to 0.6 units, whereas in the rhizosphere of *Medicago sativa* cv. *Xinjiangdaye*, pH was reduced to a smallest extent, by only 0.25 units. The enrichment with K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^- varied greatly in the rhizosphere soil of the five salt-tolerant plants. The enrichment levels were dependent on plant species and fluctuated as incubation days increased. Combining leaching with plant cultivation was more efficient in salt reduction than using leaching alone. Thus concentrations of six major salt ions in both control soil (soil without plants) and soils cultivated with five plant species significantly decreased with the extension of incubation days and leaching times. After 120 days of cultivation, total concentrations of six major salt ions in the control soil were reduced by 51.5%, whereas those in the treated soils were reduced by 77.7% compared to those in the soils before plants were grown. Among them, K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , and SO_4^{2-} concentrations in soils exposed to leaching alone were reduced on average by 33.3%, 26.1%, 35.6%, 32.5%, 35.5%, and 36.3% compared to those in soils before plants were grown. The concentrations of these cations and anions that were absorbed by plants accounted for 46.2%, 8.1%, 30.2%, 7.2%, and 21.6% respectively. Among the cultivated plants, *Zygophyllum xanthoxylum* removed more salt ions than other plants, whereas the cation and anion concentrations in soils with leaching and plant cultivation combined were reduced on average by 67.25%, 63.73%, 83.8%, 67.5%, 81.55%, and 78.46% compared to those in soils before plants were grown. Therefore, leaching and plant cultivation combined were more efficient than leaching alone in significantly reducing the main salt ions in salinized soil such as Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} . The analyses showed that of total reduction of Cl^- , SO_4^{2-} and Na^+ about 37.73% of Na^+ , 38.22% of Cl^- , and 35.14% of SO_4^{2-} were derived from the physical and chemical mechanisms caused by plant roots.

Key Words: leaching and plant cultivation; salt-affected soil; salt-tolerant plant; rhizosphere soil

干旱半干旱灌溉区土壤盐渍化是制约农业可持续发展最严重的环境问题之一^[1-2]。全世界约有 9.5 hm² 的盐渍化土壤,近年来其面积有扩大趋势,盐渍化程度不断加剧^[3]。因此,采取合理的措施控制或治理土地盐渍化的发生是亟待解决的关键问题。工程措施即单纯洗盐在改良盐渍化土壤方面非常有效,但在水资源短缺的干旱半干旱地区很难推广^[4];化学措施见效快,但存在一定的局限性^[5];生物措施与前两种措施相比既有低廉和环保的效果,又能产生一定的经济效益^[4,6]。

Khaksari 等通过室内模拟土柱淋溶实验研究表明,0—100 cm 土层经过淋洗,土壤盐分总量可降低 80%—85%^[7],刘亚男等对滩涂土壤盐分变化的研究表明,淋洗后较淋洗前各盐分离子的下降率分别为: K^+ 73.5%, Ca^{2+} 90%, Na^+ 80.3%, Mg^{2+} 86.6%, Cl^- 81.8%, SO_4^{2-} 98.2%, 盐分总量下降了 81.6%, 在淋洗过程中孔隙水是以氯化钠型为主^[8],而种植了耐盐植物后由于植物的根系作用、覆盖效应以及植物收获,不仅治理了盐碱地,而且改善了生态环境,还发展了养殖业^[9];另外,植物根系物理化学作用还能改善土壤的聚合性和持水性,进而增加土壤中的离子通道,促进了盐分向下淋溶^[10]。目前,关于单纯淋洗^[4,7]、种植耐盐植物^[6,9]、淋洗和化学改良剂的联合措施在改良盐渍化土壤方面的研究报道较多^[11],但主要侧重于改良后土壤盐分离子减少的总量^[7,9],而对不同盐分离子的动态变化和各个盐分离子减少的程度,尤其是淋洗结合植物种植后各种作用机制对改良盐渍化土壤的贡献却鲜见报道,为此,本试验以甘肃引大灌区盐渍化土壤为背景,以当地 5 种耐盐植物为材料,模拟了大田条件生产过程,用根袋法盆栽试验对根际与非根际土壤进行动态取样,以期进一步探讨不同耐盐植物在其生长过程中根际土壤盐分的动态变化,以及淋洗结合植物种植对盐分离子的去除效果,旨在为中国西北内陆地区土壤次生盐渍化的防治和改良提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

供试土壤采集于引大灌区永登县次生盐渍化农田土壤,其基本理化性质(表 1)采用常规分析测定^[12]。

供试牧草选自引大灌区盐渍化土壤上生长良好的 5 种耐盐植物:新疆大叶 (*Medicago Sativa. L. cv. Xinjiangdaye*)、中兰一号 (*Medicago Sativa. L. cv. Zhonglan No. 1*)、朝鲜碱茅 (*Puccinellia chinampoensis*)、霸王 (*Zygophyllum xanthoxylum*)、向日葵 (*Helianthus annuus L.*)。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical character of tested soil

土壤类型 Agrotype	碳酸钙 CaCO ₃ /%	pH	电导率 EC Electrical conductivity/ (dS/m)	田间持水量 Field capacity/%	有机质 Organic matter/ /(g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	速效磷 Available P/ (mg/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)
灰钙土 sierozem	16.27	8.31	6.87	21.43	10.75	0.03	64.66	2.05

1.2 植物培养及样品采集

试验在大棚内进行,采用盆栽根袋法^[10]。供试土壤在室内风干后过 2 mm 筛待用。植株移栽前添加肥料(尿素和磷酸二氢钾),添加量如下:200 mgN/kg 干土,100 mgP₂O₅/kg 干土,并充分混合均匀。根袋用 320 目孔径的尼龙网纱缝制而成,直径 7 cm,高 13 cm,每个根袋内装入 0.8 kg 备好的土壤,相同的供试土壤也装入高 19 cm,内径 23 cm 的盆中,同时在盆中央埋入备好的根袋 1 个,使装好的盆重为 5.5 kg(即总重达 6.3 kg)。用称重法控制土壤含水量,使土壤含水量达到 140 g/kg 备用。在每个根袋内播入露白的植物种子 20 粒,出苗后留苗 12 株。每个品种 18 个重复,另外留 18 盆作为对照(即没有种植植物处理的土壤)。生长期每 14 d 浇一次水,每次每盆浇 1 L 蒸馏水,其它不做任何处理^[13]。分别在培养 60 d,90 d 和 120 d 时进行采样,每种植物选择 6 盆,根袋内距离根系 2—4 mm 处的土壤作为根际土,靠近盆边缘的土壤作为非根际土^[14],同时选取 6 盆对照土壤。

1.3 样品的分析测定

将采集的土样在室内风干并过 0.5 mm 筛,取风干土按水土比 5:1 制备待测液,用于可溶性盐分总量及盐分的测定;EC 的测定用电导法;Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的测定采用原子吸收分光光度法;Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 的测定采用土壤盐分常规滴定法。以上各项指标测定的具体方法见参考文献^[12]。

1.4 数据处理

用 Excel 作图,用 spss17.0 进行统计分析,采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值的动态变化

由对照可以看出,单纯的淋洗作用对土壤 pH 值影响不大,淋洗结合植物种植后土壤 pH 值随着培养时间和淋洗次数的延长降低幅度较大(图 1)。在培养 120 d 时降低最明显,且差异显著($P < 0.05$)。随培养时间的延长,在不同的耐盐植物中,霸王、向日葵根际土壤 pH 值始终小于同一培养时期的非根际土壤 pH 值;而新疆大叶和朝鲜碱茅在培养 60 d 后根际土壤 pH 值也小于非根际土壤,中兰一号在各个培养时期根际和非根际 pH 值差异不显著;在培养 120 d 时,霸王根际土壤 pH 值下降幅度最大,比种前降低了 0.6 个单位,而新疆大叶的根际土壤 pH 值则下降幅度最小,比种前仅降低了 0.25 个单位,以上均说明相比种前淋洗结合植物种植降低了盐渍化土壤的 pH 值。

2.2 淋洗与植物作用耦合对土壤盐离子含量的影响

由表 2 可以看出,对照和种植植物的土壤中可溶性盐分总量随着淋洗次数和培养时间的延长而降低,在培养 120 d 时降到最低,且远远小于种前;在培养 120 d 时,对照土壤盐分总量相比种前平均下降了 51.5%,5 种耐盐植物种植后土壤中可溶性盐分总量与种前相比平均下降了 77.7%,与对照相比平均下降了 54%,其中根际土壤盐分与对照相比下降了 27.56%—52.9%,非根际土壤盐分下降了 39.85%—51.16%。在培养 120 d

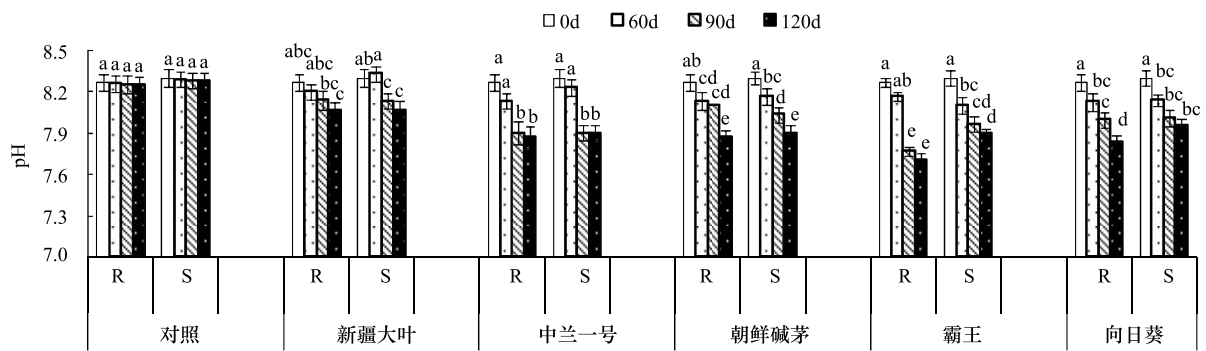


图1 不同植物根际和非根际土壤不同培养天数 pH 的变化

Fig.1 Dynamics of pH in the rhizosphere soil and bulk soil of different plants

R: Rhizosphere soil; S: Bulk soil; 0D: 0天; 60D: 60天; 90D: 90天; 120D: 120天; 小写字母表示同一植物在不同培养时期的显著性分析

时,5种耐盐植物根际土壤盐分总量均大于非根际土壤,其中霸王根际土壤盐分总量最高,说明霸王根际富集盐分离子的能力最强。

由表2还可以看出,淋洗结合植物种植的土壤中可溶性盐分总量随培养时间的延长而降低的同时,7个盐分离子的含量在根际和非根际变化趋势却表现不同。5种耐盐植物在各个培养期间, HCO_3^- 含量在根际和非根际均大于种前和对照,而其他盐分离子的含量则与之相反。在不同培养时期,对于 Cl^- ,新疆大叶根际含量始终小于非根际,而其他4种植物则呈波动状态。对于 SO_4^{2-} ,在培养60d时,仅中兰一号表现为根际含量大于非根际;在培养90d时,仅新疆大叶根际含量小于非根际;在培养120d时,5种植物均表现根际含量大于非根际。对于 K^+ ,在培养60d时,仅朝鲜碱茅根际含量小于非根际,而在培养90d和120d时却大于非根际含量,其他4种植物在各个培养时期均表现为根际含量小于非根际,这说明 K^+ 除了在朝鲜碱茅根际土壤中富集外,在其他4种植物根际土壤中均出现了亏缺。对于 Ca^{2+} ,除了向日葵外,其他4种植物在各个培养时期均表现为根际含量大于非根际。对于 Na^+ ,朝鲜碱茅和霸王在各个培养时期根际含量始终大于非根际,而其他3种植物在培养60d时根际含量小于非根际,在培养90d和120d时根际含量大于非根际。对于 Mg^{2+} ,在培养60d时,5种植物根际含量均大于非根际;在培养90d时,除新疆大叶和向日葵外,其他3种植物均表现为根际含量大于非根际;在培养120d时,仅向日葵根际含量小于非根际。

表2 淋洗与植物作用耦合对土壤盐分离子含量的影响(g/kg)

Table 2 Influence of leaching and plant cultivation on salt ion contents in soil (g/kg)

项目 Item	区域 Zones	天 Days	钾 K^+	钙 Ca^{2+}	钠 Na^+	镁 Mg^{2+}	氯 Cl^-	硫酸根 SO_4^{2-}	碳酸氢根 HCO_3^-	盐分总量 Total salt
对照 CG		0	0.08	0.702	1.77	0.396	3.11	2.91	0.049	9.02
	R	60	0.059	0.58	1.21	0.27	2.15	2.01	0.047	6.33
		90	0.048	0.491	1.06	0.234	1.83	1.64	0.048	5.35
		120	0.041	0.415	0.84	0.191	1.48	1.34	0.049	4.36
S	60	0.058	0.577	1.2	0.272	2.14	2.02	0.047	6.31	
	90	0.047	0.496	1.06	0.233	1.83	1.6	0.047	5.31	
	120	0.039	0.408	0.84	0.191	1.48	1.38	0.048	4.39	
	新疆大叶 XD	R	60	0.032	0.398	0.68	0.217	1.08	1.05	0.058
90			0.024	0.368	0.626	0.183	0.917	1.03	0.059	3.21
120			0.029	0.284	0.255	0.131	0.496	0.743	0.061	2.00
S		60	0.059	0.369	0.774	0.199	1.35	1.13	0.053	3.93
	90	0.05	0.34	0.597	0.189	0.902	0.59	0.056	2.72	
	120	0.031	0.114	0.25	0.067	0.355	0.446	0.082	1.35	

续表

项目 Item	区域 Zones	天 Days	钾 K ⁺	钙 Ca ²⁺	钠 Na ⁺	镁 Mg ²⁺	氯 Cl ⁻	硫酸根 SO ₄ ²⁻	碳酸氢根 HCO ₃ ⁻	盐分总量 Total salt
中兰一号 ZY	R	60	0.038	0.426	0.542	0.26	0.892	1.1	0.059	3.32
		90	0.03	0.369	0.512	0.17	0.784	0.93	0.051	2.85
		120	0.021	0.34	0.49	0.157	0.858	0.735	0.065	2.67
	S	60	0.056	0.368	0.642	0.209	1.01	1.08	0.055	3.42
		90	0.035	0.284	0.294	0.144	0.451	1.01	0.053	2.27
		120	0.029	0.227	0.129	0.109	0.237	0.488	0.061	1.28
朝鲜碱茅 AG	R	60	0.035	0.398	0.69	0.287	1.17	1.2	0.053	3.83
		90	0.029	0.369	0.647	0.169	1.02	0.659	0.056	2.95
		120	0.024	0.34	0.512	0.157	0.984	0.454	0.06	2.53
	S	60	0.044	0.369	0.653	0.22	0.969	1.928	0.053	4.24
		90	0.027	0.255	0.456	0.131	0.725	1.665	0.059	3.32
		120	0.019	0.17	0.324	0.111	0.584	0.798	0.063	2.07
霸王 CB	R	60	0.032	0.426	1.14	0.303	1.77	1.03	0.053	4.75
		90	0.036	0.425	0.734	0.197	1.15	0.973	0.055	3.57
		120	0.033	0.397	0.66	0.185	1.01	0.953	0.057	3.3
	S	60	0.044	0.284	0.67	0.169	0.88	1.22	0.051	3.32
		90	0.041	0.283	0.552	0.149	0.814	0.905	0.054	2.8
		120	0.035	0.198	0.282	0.121	0.444	0.565	0.058	1.7
向日葵 SF	R	60	0.053	0.369	0.822	0.255	1.32	0.879	0.057	3.76
		90	0.029	0.283	0.377	0.131	0.586	0.837	0.06	2.3
		120	0.018	0.226	0.256	0.105	0.348	0.65	0.064	1.67
	S	60	0.054	0.397	0.988	0.253	1.58	0.913	0.055	4.24
		90	0.051	0.369	0.236	0.246	0.512	0.6	0.056	2.07
		120	0.023	0.25	0.213	0.144	0.422	0.437	0.061	1.55

CG: control group; XD: Xinjiangdaye; ZY: Zhonglan No.1; AG: Alkaligrass; CB: common beancaper; SF: sunflower

2.3 各种作用机制下土壤盐分减少的比例

由表 3 可以看出,在培养 120 d 时,对照土壤单纯淋洗带走的 K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 的数量平均分别占植物收获后土壤中对各离子减少总量 81.8%、59.65%、62.1%、70.57%、61.63%、64.39%;植物吸收带走的 K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 的数量平均分别占植物收获后土壤中各对应盐分离离子减少总量 19.4%、1.2%、0.17%、0.74%、0.15%和 0.47%,所以淋洗与植物作用耦合带走的 K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 的数量平均分别占植物收获后土壤中对各盐分离离子减少总量的 101.2%、60.85%、62.27%、71.31%、61.78%和 64.86%,由此推算出,土壤中 39.15% 的 Ca²⁺、37.73%的 Na⁺、28.69%的 Mg²⁺、38.22%的 Cl⁻和 35.14%的 SO₄²⁻ 的减少量是由植物根系的物理化学的作用机制引起的。上述 6 种离子中,除了 K⁺ 的减少量大于植物收获后土壤中盐分离离子减少的总量,在土壤中出现了亏缺外,其他 5 种离子的数量均小于土壤中盐分离离子减少的总量,不同耐盐植物盐分离离子减少的总量是不同的。

在培养 120 d 后,对照土壤单纯淋洗带走的盐分离离子总量均为 256.6 g/kg(表 3)。淋洗作用下土壤中各盐分离离子数量减少的顺序是: Cl⁻ > SO₄²⁻ > Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > HCO₃⁻, 分别占淋出盐分总量的 35.07%、33.54%、19.83%、6.26%、4.4%、0.88%和 0.006%。

植物地上部吸收带走的盐分离离子总量因物种不同而不同,其范围在 0.97—3.52 g/kg 之间,所有植物对 K⁺ 和 SO₄²⁻ 的吸收量要高于其他盐分离离子,其中霸王对各盐分离离子的吸收量高于其他植物,朝鲜碱茅对 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Cl⁻ 的吸收较少,中兰一号对 Na⁺、Mg²⁺ 和 Cl⁻ 的吸收也比较少。

淋洗与植物作用耦合后,根系物理化学作用下盐分离离子淋洗的增加量在 133.3—160.3 g/kg 之间,其中

Cl⁻ 剩余的最多, 占盐分淋洗增加的总量的 32.97%—39.80%, 其次是 SO₄²⁻, 占盐分淋洗增加的总量的 29.06%—38.56%, 第三是 Na⁺, 占盐分淋洗增加总量的 19.29%—22.76%; 土壤中 K⁺ 离子的剩余量除了中兰一号为正值外, 其他 4 种植物均为负值, 这可能是由植物对 K⁺ 离子的大量吸收而引起的, 表明根系对离子的选择性吸收和吸收速率是不同的^[15]。

表 3 各种作用机制下土壤盐分减少的比例 (g/kg)

Table 3 Proportion of different salt ions removed from the soil under different mechanisms (g/kg)

项目 Item	离子 Ions	新疆大叶 XD	中兰一号 ZY	朝鲜碱茅 AG	霸王 CB	向日葵 SF
对照土壤中淋洗带走的各离子总量 Total amounts of each salt ion were removed by leaching from control soil	钾	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
	钙	16.07	16.07	16.07	16.07	16.07
	钠	50.89	50.89	50.89	50.89	50.89
	镁	11.28	11.28	11.28	11.28	11.28
	氯	89.98	89.98	89.98	89.98	89.98
	硫酸根	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
	碳酸氢根 ⁻	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	离子总量	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6
植物地上部吸收带走的各离子总量 Total amounts of each salt ion were taken away by shoot absorbing	钾	0.44	0.39	0.41	0.50	0.93
	钙	0.25	0.14	0.023	0.95	0.26
	钠	0.02	0.10	0.023	0.38	0.19
	镁	0.06	0.06	0.05	0.28	0.14
	氯	0.20	0.11	0.12	0.35	0.34
	硫酸根	0.49	0.38	0.34	1.06	0.88
	离子总量	1.46	1.18	0.966	3.52	2.74
根系物理化学作用下各离子淋洗增加的总量 Leaching total increase amount of each salt ion under root physical and chemical effects	钾	-0.11	0.23	-0.18	-0.20	-0.01
	钙	14.13	9.01	11.79	9.09	8.71
	钠	31.47	36.14	26.85	27.31	32.80
	镁	6.23	4.04	3.98	5.95	2.73
	氯	60.52	63.21	45.9	50.97	58.38
	硫酸根	47.94	46.15	50.89	40.17	48.75
	离子总量	160.3	158.8	139.2	133.3	151.4
植物收获后土壤中各离子减少的总量 Total amount of salt ions were reduced after harvesting plants	钾	2.68	2.87	2.48	2.55	3.17
	钙	30.45	25.22	27.88	26.11	25.04
	钠	82.38	87.13	77.76	78.58	83.88
	镁	17.57	15.38	15.31	17.51	14.15
	氯	150.7	153.3	136	141.3	148.7
	硫酸根	134.5	132.6	137.3	127.3	135.7
	碳酸氢根	-1.68	-0.73	0.94	-0.29	-0.66
	离子总量	416.6	415.8	397.7	393.1	410.0

①对照组土壤中减少的离子质量(g/kg) = (培养前根际土中 X 的起始浓度 × 根袋中土壤质量 × 离子的摩尔质量 + 培养前非根际土中 X 的起始浓度 × 非根际土的质量 × 离子的摩尔质量) / 100 - (对照组根际土中 X 的浓度 × 根袋中土壤质量 × 离子的摩尔质量 + 对照组非根际土中 X 的浓度 × 非根际土的质量 × 离子的摩尔质量) / 100;

②植物地上部吸收带走的离子质量(g/kg) = 每 100g 地上部干物质含 X 的质量 × 平均每盆地上部干物质;

③根系物理化学作用下对 X 淋洗质量的增加量(g/kg) = 植物收获后土壤中减少的 X 总质量 - 对照组土壤中减少的离子质量 - 植物吸收带走的离子质量;

④植物收获后土壤中 X 减少的总量(g/kg) = (培养前根际土中 X 的起始浓度 × 根袋中土壤质量 × 离子的摩尔质量 + 培养前非根际土中 X 的起始浓度 × 非根际土的质量 × 离子的摩尔质量) / 100 - (植物根际土中 X 的浓度 × 根袋中土壤质量 × 离子的摩尔质量 + 植物非根际土中 X 的浓度 × 非根际土的质量 × 离子的摩尔质量) / 100;

X: 7 种离子中的任意一种

植物种植后,土壤中盐分离子减少的总量为 393.1—416.6 g/kg, K^+ 减少量最少,仅占土壤中盐分离子减少总量的 0.624%—0.773%, Cl^- 减少量最多,占 34.2%—36.87%,其次是 SO_4^{2-} ,占 31.89%—34.52%,第三是 Na^+ ,占 19.55%—20.95%。不同植物间,种植向日葵的土壤中 K^+ 减少的最多,新疆大叶的土壤中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 减少最多,中兰一号土壤中 Na^+ 和 Cl^- 减少最多,种植朝鲜碱茅的土壤中 SO_4^{2-} 减少最多。植物种植后,除 K^+ 外,土壤中 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 减少的总量均大于对照土壤淋洗带走的和植物吸收带走之和,其中 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 减少的幅度较大, Na^+ 相比 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 平均分别降低了 44.06%、52.83%, Cl^- 相比 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 平均分别降低了 63.02%、68.82%, SO_4^{2-} 相比 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 平均分别降低了 66.4%、23.9%,由此可以看出,淋洗与植物作用耦合使土壤中主要盐分离子含量明显降低。

3 讨论

一些研究表明,盐渍化土壤种植植物可降低土壤 pH 值^[14,16],而王丽娜等对设施土壤的研究表明,保护地土壤 pH 值随淋洗次数的增加而增加^[17],李从娟等结果显示种植沙生耐盐植物可降低盐渍化土壤 pH 值,且根际土壤 pH 值小于非根际^[13]。本研究结果表明单纯淋洗下土壤 pH 值基本不变,而淋洗与植物作用耦合后可有效地降低土壤 pH 值,且在培养 120 d 时根际土壤 pH 值降低幅度较大。不同耐盐植物的根际和非根际土壤 pH 值降低幅度不同,霸王根际土壤 pH 值降低幅度最大,新疆大叶根际土壤 pH 值降低幅度最小,且差异显著($P < 0.05$)。植物根际土壤 pH 值下降可能的原因是:1. 植物对阴阳离子吸收不平衡引起的 pH 值变化^[18];2. 植物根系、根际微生物呼吸和根系分泌有机酸以及有机质分解释放 CO_2 引起土壤 pH 值下降^[18];3. 植物对氮素形态的适应以及对不同形态氮素的生理响应使根际 pH 值发生变化^[19],而本研究 pH 值降低的原因可能是由前两点所引起的。

一般来讲,灌水是快速降低土壤盐分的有效措施,阎顺国等田间试验表明,从播种至第三年生长季末,灌溉淋溶产生的脱盐量占草地总脱盐量的 89%^[20],灌水量的多少和次数直接关系到土壤盐分降低的多少,对滨海盐渍土的研究表明,淋洗量大的脱盐效果优于淋洗量小的^[10];设施盐渍化土壤经过 2 次灌水洗盐后,表层(0—20 cm)土壤电导率降低幅度达 53%—64%^[21];赵可夫等研究表明在轻质和重质盐渍土上种植耐盐植物一年后,耕层土壤含盐量下降幅度为 10%—20%^[22];在含盐量为 0.3% 的盐渍土上种植鲁梅克斯,一年后植物收获可带走 150—200 kg/hm² 盐分^[23];阎顺国等对裸地和碱茅草地灌水后脱、积盐速度的比较研究显示:在 0—40 cm 土层,碱茅草地的脱盐速度高于裸地,二者在灌水条件下的脱盐速度差异不显著,但碱茅草地的积盐速度仅为裸地的 1/7(抽穗期)—1/3(成熟收割期)^[20]。以上研究结果表明,淋洗与植物作用耦合加速了土壤的脱盐速率,增加了脱盐量,降低了土壤的盐渍化程度,在本实验中,土壤盐分总量随着淋洗次数和培养时间的延长而降低,5 种耐盐植物组相比种前和单纯淋洗的对照土壤盐分分别降低了 72.3%—82.2% 和 42.9%—61.7%,这说明淋洗结合植物种植有利于土壤脱盐。

与已有的研究结果相类似^[18],本研究表明种植耐盐植物可以有效地促进土壤脱盐,其原因可能有以下 2 个方面:1. 植物的覆盖作用,减少了土壤水分蒸发,有效抑制了土壤盐分的表聚发生^[24],有利于土壤脱盐;2. 植物对离子的选择性吸收^[25],植物体收获后也能够带走一部分盐分,使土壤含盐量降低,本实验表明霸王根际盐分聚集程度和地上部分吸收带走的盐分均较其他 4 个供试植物更为明显,表明霸王是较好的改良盐渍化土壤的材料。阎顺国等田间试验表明单纯灌溉淋溶产生的脱盐量占草地总脱盐量的 89%^[20],单纯淋洗作用只有淋溶带走土壤盐分,而种植植物后,由于植物的作用会带走更多的盐分^[24-25],本研究结果与 Ahmad 等研究一致^[26]。淋洗与植物作用耦合对盐渍化土壤的改良效果好于单独使用淋洗措施,但淋洗结合种植不同耐盐植物对盐渍化土壤的改良效果有所不同。

本实验中,淋洗结合植物种植后,土壤中盐分离子减少最多的是 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ ,经过计算,对照土壤淋洗带走的主要盐分离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 分别占植物收获后土壤中对离子减少总量的 61.63%、64.39% 和 62.1%,植物吸收带走的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 占植物收获后土壤中对离子减少总量的 0.15%、0.47% 和 0.17%,那么

剩余的 38.22% 的 Cl^- 、35.14% 的 SO_4^{2-} 和 37.73% 的 Na^+ 可能是由植物根系物理化学的作用机制引起的, 这种作用机制可能有: 1. 通过植物根系的穿插挤压作用, 使土壤的持水性、容重、通气性等物理性质得到改善, 有利于盐分离子淋洗到耕层以下的土体^[27]; 2. 植物的根际分泌物及脱落物可使根际土壤水稳性团聚体的数量增加, 进而增加了土壤中的离子通道^[28]; 3. 本实验供试土壤为钙质的盐渍化土壤, 种植植物后由于根系的呼吸作用^[10, 29-30]和根际酸化作用(分泌质子或有机酸释)降低了土壤 pH 值尤其是根际土壤 pH 值(见图 1), 使土壤中可溶性钙离子含量增加, 促使 Ca^{2+} 置换土壤中过量的 Na^+ , 降低了土壤对钠的吸附, 而置换的 Na^+ 则通过降雨、灌溉被淋洗至根区以下^[10, 31]。从本实验计算得出, 淋洗结合植物种植后, 其中 30% 以上土壤盐分离子的降低是由根系物理化学作用机制引起的, 但这个比例的大小还有待在大田条件下做进一步的验证。

4 结论

(1) 单纯淋洗对土壤 pH 值没有影响, 而淋洗与植物作用耦合能够明显降低土壤 pH 值。根际土壤 pH 值与生长同期非根际的相比因物种不同而有所差异, 随培养时间的延长根际土壤 pH 值小于非根际, 其中霸王根际土壤 pH 值降低最明显, 相比种前下降了 0.6 个单位。

(2) 淋洗与植物作用耦合对盐渍化土壤改良的效果优于单纯淋洗作用。在培养 120 d 后, 单纯淋洗的土壤中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的含量相比种前平均分别降低了 33.3%、26.1%、35.6%、32.5%、35.5% 和 36.3%, 淋洗结合植物种植的土壤中上述各离子的含量相比种前平均分别降低了 67.25%、63.73%、83.8%、67.5%、81.55% 和 78.46%, 表明淋洗与植物作用耦合对盐渍化土壤的改良效果最好。

(3) 适当的淋洗与植物作用耦合能够明显降低土壤含盐量, 淋洗结合植物种植后土壤中盐分离子减少最多的是 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ , 通过计算 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 减少的总量中有 38.22% 的 Cl^- 、37.73% 的 Na^+ 和 35.14% 的 SO_4^{2-} 可能是由植物根系物理化学的作用机制引起的。

(4) 实验表明根际土壤盐分聚集程度大于非根际土壤盐分, 为植物根际的“盐岛效应”提供了理论依据, 其中霸王根际聚集盐分程度最大, 改良盐渍化土壤效果最好。

参考文献 (References):

- [1] Frechilla S, Lasa B, Ibarretxe L, Lamsfus C, Aparicio-Tejo P. Pea responses to saline stress is affected by the source of nitrogen nutrition (ammonium or nitrate). *Plant Growth Regulation*, 2001, 35(2): 171-179.
- [2] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(3): 324-349.
- [3] Qadir M, Tubeileh A, Akhtar J, Larbi A, Minhas P S, Khan M A. Productivity enhancement of salt-affected environments through crop diversification. *Land Degradation and Development*, 2008, 19(4): 429-453.
- [4] Qadir M, Schubert S, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for sodic soils: a review. *Land Degradation and Development*, 2001, 12(4): 357-386.
- [5] Qadir M, Noble A D, Schubert S, Thomas R J, Arslan A. Sodicty induced land degradation and its sustainable management: problems and prospects. *Land Degradation and Development*, 2006, 17(6): 661-676.
- [6] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837-845.
- [7] Khaksari V, Cheraghi M A, Moosavi A A, Haghighi A A, Zandparsa S. Evaluation of SWAT and LEACHC models in chahafzal yazd province. *Journal of agricultural and resource economics*, 2005, 14: 65-80.
- [8] 刘亚男, 李取生, 杜焯锋, 崔志红, 李莎. 滩涂土壤淋洗过程中盐分变化及其对重金属的影响. *环境科学*, 2011, 32(7): 2087-2091.
- [9] Singh G. Salinity-related desertification and management strategies: Indian experience. *Land Degradation and Development*, 2009, 20(4): 367-385.
- [10] Qadir M, Steffens D, Yan F, Schubert S. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation. *Land Degradation and Development*, 2003, 14(3): 301-307.
- [11] 廉晓娟, 王正祥, 张余良, 王艳, 李明悦, 贺宏达. 富钙水淋洗与改良剂结合对滨海盐土的改良效果. *天津农业科学*, 2011, 17(2): 31-33.
- [12] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [13] 李从娟, 马健, 李彦. 五种沙生植物根际土壤的盐分状况. 生态学报, 2009, 29(9): 4649-4655.
- [14] 王瑛, 孟亚利, 陈兵林, 周治国, 束红梅, 卞海云. 麦棉套作棉花根际非根际土壤微生物和土壤养分. 生态学报, 2006, 26(10): 3485-3490.
- [15] 李加宏, 俞仁培. 土壤-作物根际系统中离子的迁移. 土壤学报, 1998, 35(2): 186-194.
- [16] 王丽娜, 张玉龙, 范庆锋, 王涛. 淋洗状态下保护地土壤 pH 与盐分含量及其组成关系的研究. 节水灌溉, 2009, (6): 8-11, 15-15.
- [17] 范庆锋, 张玉龙, 陈重. 保护地蔬菜栽培对土壤盐分积累及 pH 值的影响. 水土保持学报, 2009, 23(1): 103-106.
- [18] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际系统盐分分布特征. 生态学杂志, 2009, 28(5): 827-832.
- [19] 李春俭. 高级植物营养学. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [20] 阎顺国, 朱兴运, 郭树林, 付华. 碱茅草对土壤盐分动态及盐量平衡的影响. 水土保持学报, 1990, 4(1): 44-48, 55-55.
- [21] 沈根祥, 杨建军, 黄沈发, 姚政, 唐浩. 塑料大棚盐渍化土壤灌水洗盐对水环境污染负荷的研究. 农业工程学报, 2005, 21(1): 124-127.
- [22] 赵可夫, 李法曾, 樊守金, 冯立田. 中国的盐生植物. 植物学通报, 1999, 16(3): 201-207.
- [23] 董宝娣, 刘小京, 董文琦, 李登顺, 山崎·素直, 但野·利秋. 近滨海区鲁梅克斯 K-1 杂交酸模的引种及耐盐性研究. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 120-126.
- [24] Ghaly F M. Role of natural vegetation in improving salt affected soil in northern Egypt. Soil and Tillage Research, 2002, 64(3/4): 173-178.
- [25] 张彦东, 白尚斌. 氮素形态对树木养分吸收和生长的影响. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2044-2048.
- [26] Ahmad S, Ghafoor A, Qadir M, Aziz M A. Amelioration of a calcareous saline-sodic soil by gypsum application and different crop rotations. International Journal of Agriculture and Biology, 2006, 8(2): 142-146.
- [27] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 李永平, 刘世新. 宁南旱区草粮轮作系统中紫花苜蓿适宜利用年限研究. 草业学报, 2008, 17(3): 31-39.
- [28] Morel J L, Habib L, Plantureux S, Guckert A. Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability. Plant and Soil, 1991, 136(1): 111-119.
- [29] Qadir M, Steffens D, Yan F, Schubert S. Proton release by N_2 -fixing plant roots: a possible contribution to phytoremediation of calcareous sodic soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2003, 166(1): 14-22.
- [30] Maricle B R, Lee R W. Root respiration and oxygen flux in salt marsh grasses from different elevational zones. Marine Biology, 2007, 151(2): 413-423.
- [31] Robbins C W. Sodic calcareous soil reclamation as affected by different amendments and crops. Agronomy Journal, 1986, 78(5): 916-920.