

土壤-作物根际系统中离子的迁移^{*}

李加宏 俞仁培

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 本文通过田间对比和温室根际试验, 研究不同条件下土壤-作物根际系统中离子的迁移规律。结果表明, 田间条件下, 休闲地(裸露土壤)的盐分主要集中于表层, 而耕作土壤的盐分集中于作物根层。在矿化土灌溉过程中, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在小麦根际富集, K^+ 则亏缺。随着小麦生长, 根际与非根际土壤溶液中离子浓度的差异越来越大。离子在作物根际的富集和亏缺与作物对离子的吸收量和速度有关。在淋洗过程中, 土壤溶液中离子含量随淋洗水量的增加而降低。根际土壤溶液中离子浓度的降低率明显小于非根际。但二者的 Cl^- 淋出量都大于 SO_4^{2-} 。

关键词 土壤-作物根际系统, 离子, 迁移

水是土壤盐类离子迁移的载体。作物生长过程中, 随着根系不断吸水, 离子随水迁移。由于根对离子吸收的选择性和速度不同, 造成离子在作物根际的富集或亏缺。离子被根吸收的速度小于离子随水迁移到根表的速度时, 则发生富集, 反之则亏缺^[1-6]。国内外对离子在作物根内、外累积与分布进行过研究, 但仅限于实验室内。利用同位素示踪, 则很难区分水溶性、沉淀相或作物活组织中的离子。而利用根袋取样法, 因离子在灌溉过程中易移动, 得出的结果仅是离子在根际内外的分布^[1-3,6], 因此本文采用田间对比和温室根际试验, 对不同条件下土壤-作物根际系统中离子的迁移进行了研究。

1 材料与方法

1.1 供试土样

来自河南封丘县, 发育于黄河冲积物的壤质潮土, < 0.01mm 物理性粘粒含量为 33.6%, 土壤基本化学性质见表 1。

1.2 田间对比试验

在中国科学院封丘农业生态实验站完成。将内径 49cm, 高 108cm, 底部密封的特制水泥柱 12 根埋入土中。内衬密封塑料袋, 以防灌溉水渗漏和水泥柱中盐分溶解而进入土壤。底层装入细砂石 13cm 厚, 其上垫玻璃丝布一层, 然后按容重 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 分层装土 85cm。土柱中央置入内径 4cm, 底端 13cm 打孔的塑料管, 以备供水。试验设 3 个处理: 小麦、甜菜和对照。灌溉水为配制的 2g/L NaCl 水溶液。为防降水淋

^{*} 本文得到中国科学院南京土壤研究所所长基金资助与赵其国院士指导, 特此致谢。

收稿日期: 1996-01-17; 收到修改稿日期: 1997-05-23

表1 供试土壤基本化学性质

Table 1 The basic chemical properties of soil used in the experiment

pH	EC (s/m)	全盐 Total salt (g/kg)	CEC (cmol/kg)	ES (cmol/kg)	CaCO ₃ (g/kg)	MgCO ₃ (g/kg)	O.M. (g/kg)
8.44	0.015	0.74	10.15	0.17	106.2	10.1	9.2
离子组成 Composition of ions (cmol/kg)							
HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
0.59	0.03	0.06	0.02	0.01	0.21	0.38	0.25

入土柱,建有简易防雨棚。

1.3 温室根际试验

装置如图 1。内径 20cm、高 20cm 的瓷盆,从盆底孔穴插入三通供水玻璃管并密封,底层装入 3cm 用 0.05mol / L Hcl 和蒸馏水洗净晾干的石英砂,再盖上 300 目的纱网。先装入 3cm 土壤,再装 400g 土入袋内,6100g 土于袋外,装盆前先施尿素 1.95g, KH₂PO₄ 0.62g, 并与土混匀。用马寥特瓶从底层供处理液,并自动控制水位于 3cm,即与石英砂层齐平。处理液由 0.5g / L NaCl 和 1.42g / L Na₂SO₄ 组成, Cl⁻ / SO₄²⁺ 摩尔浓度比为 1:1。各离子的精确浓度以最后测定结果为准。每个处理三次重复。

用处理液浸润土壤到完全浸润后,停止供液,用手动真空吸液泵快速吸取网袋内(根际)、外(非根际)土壤溶液约 7.5ml,装入玻璃瓶并密封移至实验室。当天测定完Ca²⁺、Mg²⁺。Cl⁻、SO₄²⁻、K⁺、Na⁺经稀释后在一周之内测定。当盆内土壤含水量适宜播种时,每盆网袋内播入已露白的催芽小麦 30 粒。此后分别抽样二次。第三次抽样后,用蒸馏水分三次连续淋洗土壤,蒸馏水总用量与进入土壤的处理液量相同。每次淋洗结束时,采集根际和非根际的土壤溶液及淋出液,分析项目同前。

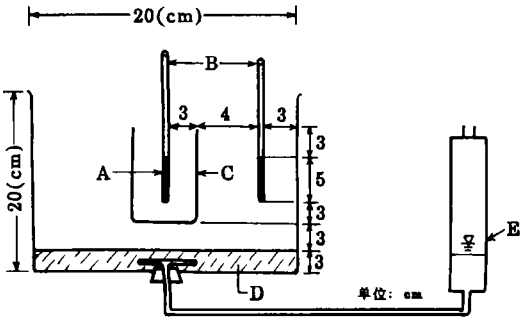
1.4 土壤及其溶液分析方法

有机质:重铬酸钾-外加热法。CEC:醋酸铵法。CaCO₃和 MgCO₃:NH₄Cl 煮沸-EDTA容量法。交换性钠:盖德洛依茨碳酸钙-CO₂法。CO₃²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 用滴定法^[7]。Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 用离子色谱法。

2 结果与讨论

2.1 田间条件下土壤-作物根际系统中离子的迁移。

试验结果(图 2)表明,不论是种植小麦还是甜菜,表层 0—10cm 土壤的 Cl⁻和 Na⁺ 含量占土壤总量的比率小于休闲地土壤,10cm 以下土层则相反。休闲土壤的盐分主要累积在表层,约占土壤总盐量的 50% 左右,而种植作物则使盐分主要累积于根层。这与



A 吸头 B 吸管 C 网袋 D 石英砂 E 马寥特瓶

图 1 温室根际试验示意图

Fig.1 Apparatus for the rhizosphere experiment in a greenhouse

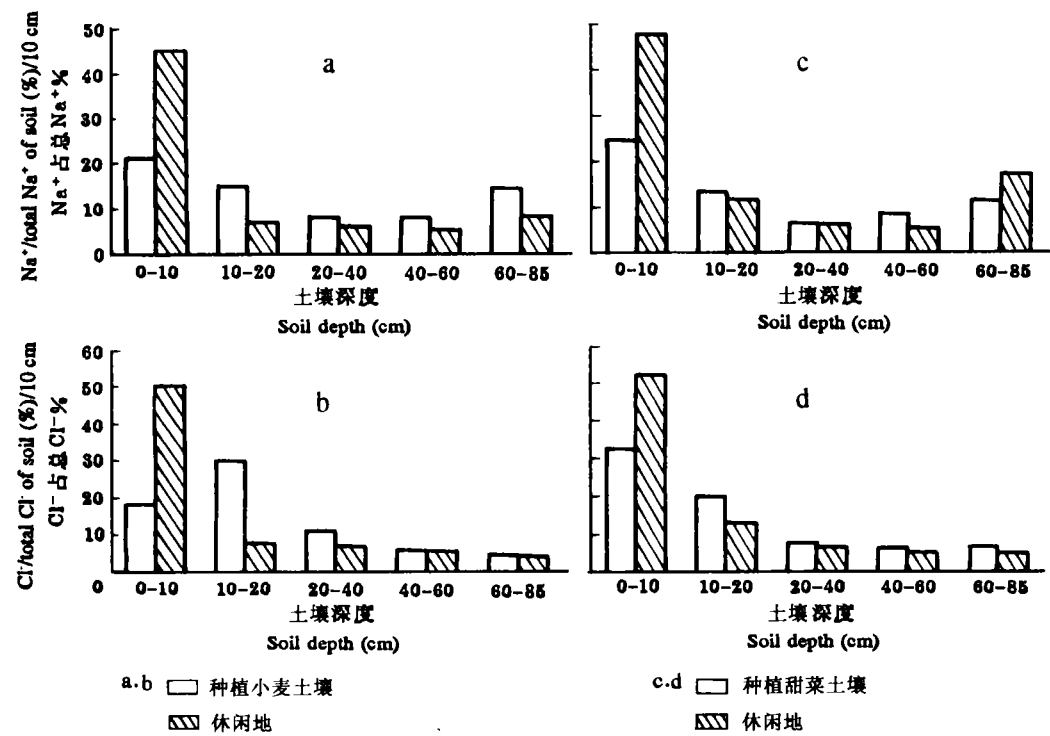


图2 离子在种植与休闲地土壤剖面中的分布

Fig.2 Ion distribution in soil profiles of cropping and fallow lands

Micah(1963)^[8],尤文瑞(1993)^[9]的结论相同。种植作物能够增加地表覆盖,改善土壤结构,减少地表蒸发^[10],减弱盐分向土表积累。但是,由于耕种地的总耗水量大于休闲地(表2),在盐渍区,尤其在地下水矿化度较高的地区,将加速盐分在下层土体中的积聚,增加土壤潜在盐渍化的威胁。

表2 田间对比试验不同处理耗水量

Table 2 Water consumption of different treatments in field contrast experiment

处理 Treatment	灌溉水量(L) Added irrigation water	结束时土壤储存水量(L) Stored water in soil at the end of irrigation	耗水量(L) Water consumption
小麦	99	19.13	79.87
休闲地	99	44.14	54.86
甜菜	184	28.16	155.84
休闲地	102	48.60	53.40

2.2 灌溉过程中小麦根际与非根际中离子的动态变化

表3表明,播种前网袋内外土壤溶液的各种离子含量几乎相同,随着小麦的生长则发生明显变化。

(1)Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺随着小麦的生长在根际大量富集(图3),并随着灌溉用水量的增加而增加,上述离子在根际土壤中不断增加,而非根际则变化很小。

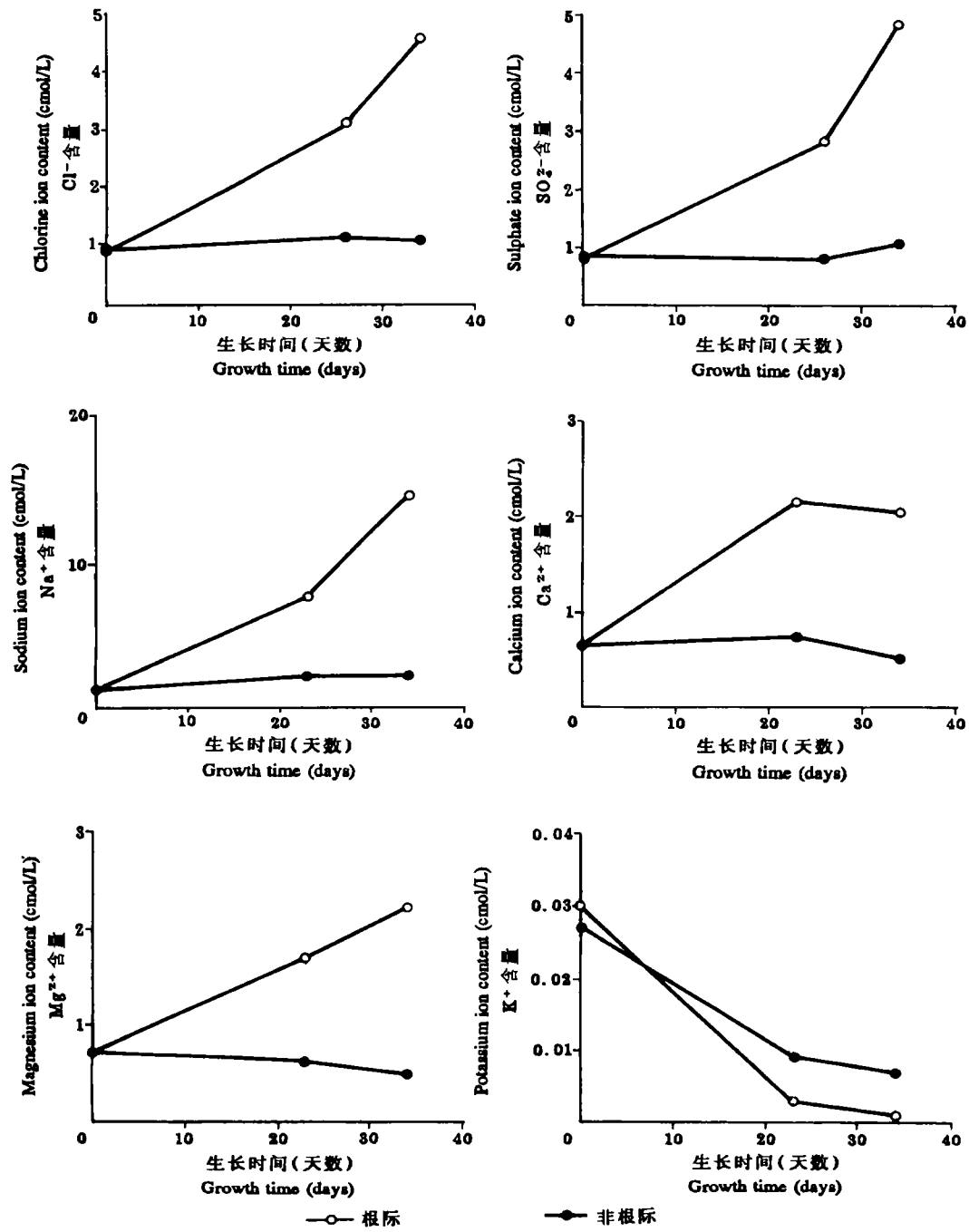


图3 矿化水灌溉下小麦根际与非根际土壤溶液离子变化

Fig.3 Ion changes of soil solution in rhizosphere and non rhizosphere of wheat irrigated with mineralized water

表3 小麦播种前网袋内外土壤溶液离子含量

Table 3 Ion contents of soil solution in and out the mesh sack before wheat sowing

离子 Ion	网袋内(cmol/L) In mesh sack	网袋外(cmol/L) Out mesh sack	T检验 T test t
Cl ⁻	0.83±0.03	0.90±0.06	1.807
SO ₄ ²⁻	0.78±0.03	0.85±0.08	1.419
K ⁺	0.030±0.003	0.028±0.002	0.961
Na ⁺	0.96±0.02	1.00±0.06	1.095
Ca ²⁺	0.64±0.02	0.63±0.02	0.612
Mg ²⁺	0.72±0.03	0.71±0.05	0.297

注：1. 所列数值为平均值
2. 当自由度为 4 时：| t |_{0.05}=2.776；| t |_{0.01}=4.604

(2) K⁺在根际与非根际土壤中的含量随小麦的生长而明显降低,且根际土壤中 K⁺浓度的降幅大于非根际,出现 K⁺的亏缺(图 3)。

(3) 离子浓度随着小麦的不断生长,在根际与非根际之间差异越来越大(表 4)。二者

表4 小麦根际与非根际土壤溶液离子浓度比的动态变化

Table 4 Dynamics of ion ratio in soil solution of wheat rhizosphere and nonrhizosphere

生长时间(天) Growth time (days)	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
播种前	0.88	0.92	0.96	1.01	1.01	1.11
播种后 26天	2.72	3.62	3.67	2.96	2.76	0.33
播种后 34天	4.10	4.55	6.61	3.90	4.44	0.14

之间差异主要取决于作物对该离子的吸收速度和体内累积量的多少。作物根际与非根际土壤溶液中离子浓度的比率称谓离子在作物根际的富集强度。当富集强度小于 1 时,则发生亏缺。从表 4 可以看出,小麦根际离子富集强度为 K⁺ < Cl⁻ < Na⁺。我们过去的试验结果(表 5)表明,在小麦苗期和整个生育期,它对离子吸收量和平均吸收速度为 K⁺ > Cl⁻ > Na⁺,与小麦根际离子富集强度顺序正相反。这说明,作物对离子的吸收量越小,吸收速度越慢,则离子在作物根际的相对累积量越大。反之,则可能出现亏缺。

表5 小麦在非盐渍条件下离子的吸收量和吸收速度

Table 5 Ion uptake amount and rate of wheat under non-saline condition

离子 Ion	吸收量(毫克/株) Uptake amount (mg/plant)		吸收速度(毫克/株·天) Uptake rate (mg/plant·day)	
	苗期(43天) Seedling stage (43 days)	全生育期(213天) Whole growth period (213 days)	苗期(43天) Seedling stage (43 days)	全生育期(213天) Whole growth period (213 days)
K ⁺	8.04	35.12	0.187	0.165
Cl ⁻	1.80	17.81	0.042	0.084
Na ⁺	0.76	2.02	0.018	0.009

2.3 淋洗过程中小麦根际与非根际中离子的动态变化

2.3.1 根际与非根际离子迁移模式 试验结果表明(图 4),随着淋洗水量的增加,根际与非根际中离子的迁移规律都符合休闲条件下土壤盐分迁移的一般规律^[11]。开始时,表层盐分的淋溶形成盐峰,随着盐峰下移,土壤发生脱盐。

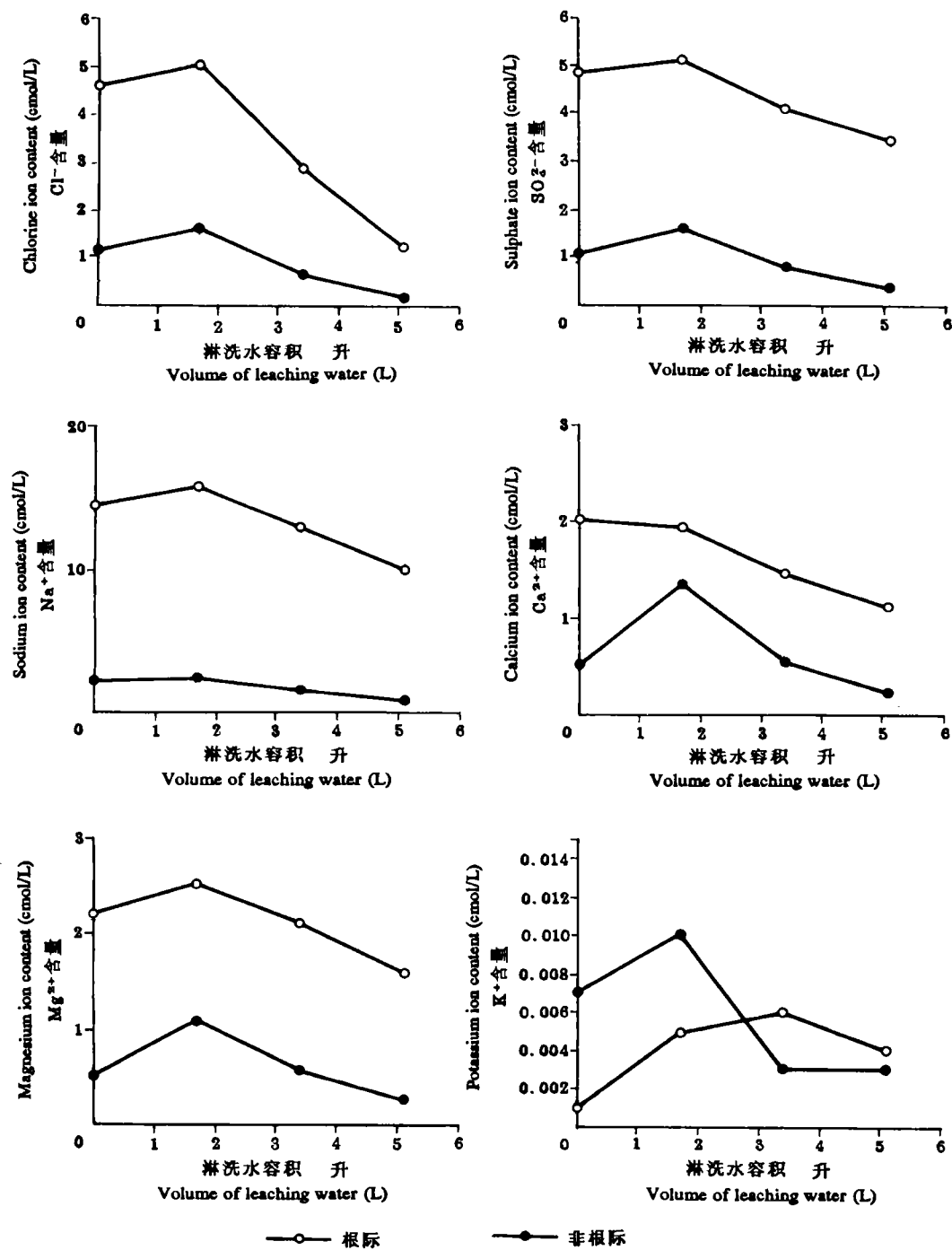


图 4 淋洗过程中小麦根际与非根际土壤溶液离子变化

Fig.4 Ion changes of soil solution in rhizosphere and non rhizosphere of wheat during leaching process

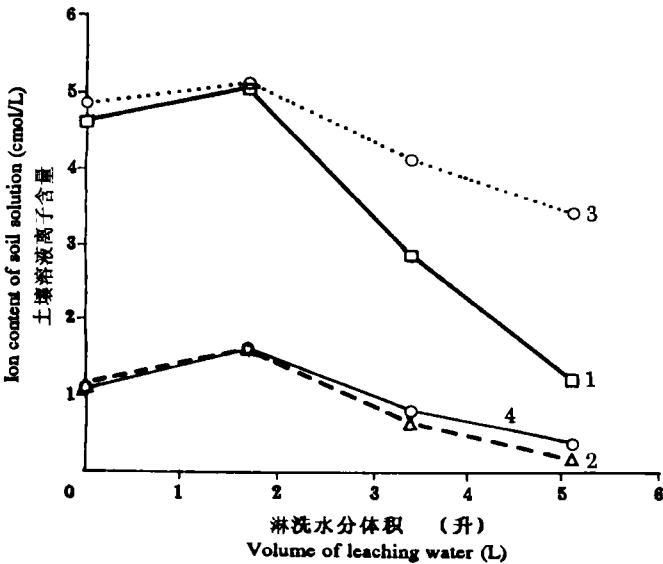
2.3.2 根际与非根际离子迁移速度的差异 在淋洗过程中,离子在根际的迁移模式与非根际虽然相同,但由于根系的吸水对根际水分和离子的迁移可能造成滞留,根际离子的迁移速度比非根际慢。表 6 表明,淋洗后,根际离子浓度的降低率明显小于非根际。

表6 淋洗下土壤溶液浓度的降低率

Table 6 The descending rates of ion concentrations in soil solution after leaching

离子 Ion	淋洗前土壤溶液 Soil solution before leaching (cmol/L)		淋洗后土壤溶液 Soil solution after leaching (cmol/L)		离子浓度降低率 Descending rate of ion concentration (%)	
	根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际
	Rhizo sphere	Nonrhizosphere	Rhizo sphere	Nonrhizosphere	Rhizo sphere	Nonrhizosphere
Cl ⁻	4.61	1.13	1.23	0.16	73.32	85.84
SO ₄ ²⁻	4.82	1.06	3.48	0.38	27.80	64.15
Na ⁺	14.55	2.20	9.96	0.86	31.55	60.91
Ca ²⁺	2.03	0.52	1.13	0.22	44.33	57.69
Mg ²⁺	2.22	0.52	1.59	0.27	28.38	46.00

2.3.3 不同离子迁移速度的差异 灌溉水的 Cl⁻、SO₄²⁻ 浓度 (mol)是按 1:1 配制的。而实测浓度 Cl⁻ 为 0.91cmol / L, SO₄²⁻ 为 0.98cmol / L, Cl⁻ / SO₄²⁻ 之比为 0.93, 总含盐量为 1.98g / L。由于 SO₄²⁻ 与 Ca²⁺ 的亲合力大于 Cl⁻,SO₄²⁻ 在土壤中迁移受到 CaCO₃ 中的 Ca²⁺ 和土壤吸收复合体中 Ca²⁺ 的牵制,移动速度比 Cl⁻ 慢。图 5 表明,在淋洗过程中,不论是根际还是非根际,土壤溶液中 SO₄²⁻ 的浓度都大于 Cl⁻。随着淋洗水量的增加,二者的差异越来越大。说明在淋洗过程中 Cl⁻ 的迁移速度比 SO₄²⁻ 快。土壤中 Cl⁻ 与 SO₄²⁻ 淋出量的测定结果 (表 7) 表明,Cl⁻ 的淋出量大于 SO₄²⁻。这与 Cl⁻ 的迁移速度比 SO₄²⁻ 快相一致。



1 根际 Cl⁻ 2 非根际 Cl⁻ 3 根际 SO₄²⁻ 4 非根际 SO₄²⁻

图 5 淋洗过程中小麦根际与非根际土壤溶液中 Cl⁻、SO₄²⁻ 的变化

Fig.5 Cl⁻ and SO₄²⁻ changes of soil solution in rhizosphere and non rhizosphere of wheat during leaching process

表7 土壤中Cl⁻与SO₄²⁻的淋出量
Table 7 Cl⁻ and SO₄²⁻ leached out from soil

淋洗次数 Times of leaching	淋洗水量(L) Leaching water volume	Cl 淋出量(cmol/盆) Cl leached out (cmol/pot)	SO ₄ ²⁻ 淋出量(cmol/盆) SO ₄ ²⁻ leached out (cmol/pot)
1	1.7	0.72	0.59
2	1.7	1.56	1.03
3	1.7	2.46	2.07
总量	5.1	4.74	3.69

3 结 论

1. 在田间条件下, 休闲地土壤的盐分主要集中于表层, 而种植作物的土壤盐分主要累积于根层。
2. 在矿化水灌溉过程中, Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 在小麦根际富集, 而 K⁺ 则亏缺。随着小麦的生长, 根际与非根际土壤溶液中离子浓度的差异越来越大。离子在作物根际的富集和亏缺与作物对离子的吸收量和吸收速度有关。
3. 在淋洗过程中, 根际和非根际土壤溶液中离子含量随淋洗水量的增加而降低。根际土壤溶液中离子浓度的降低率明显小于非根际。不论是在根际还是非根际, Cl⁻ 的淋出量都大于 SO₄²⁻。

参 考 文 献

1. 陈德明, 俞仁培. 作物相对耐盐性的研究. I. 大麦和小麦不同生育期的耐盐性. 土壤学报, 1995, 32 (4): 414—422

2. 陈德明, 俞仁培. 作物相对耐盐性的研究 II. 不同栽培作物的耐盐性差异. 土壤学报, 1996, 33 (2): 121—128

3. 沈其荣, 王建林等. 两种不同耐盐大麦根际中离子的分布特征. 土壤学报, 1993, 30 (4): 365—373

4. Riley D, Barber S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean (Glycine L. Merr) root-soil interface, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1969, 33:905—908

5. Riley D, Barber S A. Salt accumulation at the soybean(Glycine L. Merr) root-soil interface. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1970, 154—155

6. Schleiff V. Dynamics of salt content in the soil far from and near the roots of plants irrigated with highly saline water at various application frequencies, In: Inter Symp. Salt Affected Soils Proceedings, Karnal, India, 1980. 81—90

7. 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海科学出版社, 1978.

8. Micah W M, LFO. Effect of cropping and fallowing on soil salinity. Soil Science, 1963, 96:422—427

9. You Wen-rui, Meng Fan-hua. Salt-water dynamics: III. Effect of planting, Pedosphere, 1993, 3(1):7—12

10. 陆炳章, 许慰睦, 周春霖. 牧草对改良滨海盐土的效果及其利用效益. 土壤通报, 1993, 24: 53—55

11. 俞仁培, 尤文瑞主编. 土壤水盐动态和盐碱化防治. 北京: 科学出版社, 1987, 15—24

ION TRANSPORT IN SOIL-CROP RHIZOSPHERE SYSTEM UNDER DIFFERENT CONDITIONS

Li Jia-hong Yu Ren-pei

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

Summary

A contrast experiment in field and a rhizosphere experiment in greenhouse were conducted to study ion transport in soil-crop rhizosphere system under different conditions. Salts of irrigation water were accumulated in the surface layer of soil under fallow conditions, but in the root zone of soil under cropping conditions. Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , were accumulated in the rhizosphere of wheat in the process of irrigation with mineralized water, but K^+ was depleted in the rhizosphere. The differences of ion concentrations of soil solution between rhizosphere and nonrhizosphere became larger with the growth of wheat. The accumulation and depleted of ions in rhizosphere related to the uptake amount and rate of ions by crop. Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations of soil solution in rhizosphere and nonrhizosphere decreased with the increase of leaching water volume. The descending rates of ion concentrations in soil solution of rhizosphere were obviously lower than those of nonrhizosphere. More Cl^- than SO_4^{2-} was leached out both in rhizosphere and in nonrhizosphere.

Key words Soil-crop rhizosphere system, Ion, Transport.