

松嫩平原草原 5 种耐盐牧草体内

K^+ , Na^+ 的分布与积累的研究

殷立娟 石德成 薛萍

(东北师范大学草地所, 长春 130024)

摘 要

本文对松嫩平原盐碱化草地生长的 5 种耐盐牧草羊草 (*Aneurolepidium chinense*)、星星草 (*Puccinellia tenuiflora*)、虎尾草 (*Chloris virgata*)、獐茅 (*Aeluropus littoralis* var. *sinensis*) 和碱蓬 (*Suaeda glauca*) 体内 K^+ 、 Na^+ 的积累与分布动态进行研究。结果表明, 植物体内含量 Na^+ μmol /克干重, 碱蓬最高为 5419—5668, 其次是獐茅为 225—326 和星星草为 177—216, 虎尾草和羊草变化较大, 分别为 20—699 和 11—217。体内 Na^+ 含量受土壤中 Na^+ 水平的影响。 Na^+/K^+ 以碱蓬最大为 10.47—25.74。

随着土壤盐含量 (x_1)、pH (x_2) 的增加, 羊草和虎尾草体内 Na^+ μmol /克干重 (Y) 积累动态符合公式: $Y = Y_m / (1 + e^{(a + b_1 x_1 + b_2 x_2)})$, 碱蓬、星星草獐茅符合公式 $Y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2$ 。植物体内 Na^+ 的积累率依次为: 虎尾草 > 羊草 > 星星草、獐茅和碱蓬。 K^+ 主要分布在代谢旺盛的幼嫩组织中。茎叶是 Na^+ 的主要积累部位。虎尾草各部位 Na^+ 的积累率均呈显著增大, 同时 K^+ 均降低, 碱蓬各部位 K^+ 积累率均随 Na^+ 积累而增大。

关键词 盐生植物; Na^+ 积累; 数学模式; 盐度; 耐盐植物

东北松嫩平原草原区常见的 5 种耐盐牧草是羊草、星星草、虎尾草、獐茅和碱蓬。在盐碱化草地上, 它们都具有生长优势。羊草、星星草、獐茅属于多年生禾草, 虎尾草属于一年生禾草, 碱蓬属于一年生盐生藜科植物。它们对盐碱胁迫的耐力为碱蓬 > 虎尾草 > 星星草 > 羊草^[1]。耐盐牧草是如何适应盐碱生境的? 许多学者认为主要取决于植物的自身生理代谢及吸盐泌盐特点^[2]。植物细胞能保持几种矿质离子的相对稳定, 以区隔化的形式保持代谢活性的稳定^[5]。叶绿体中离子能自动平衡, 而氨基酸总积累保持稳定, 所吸收的 NaCl、硝酸盐隔绝在液泡中^[4]。NaCl 影响着大豆体内 Na^+ 和一些微量元素的分布^[6]。 K 、 Na 在土壤中以离子形式被植物吸收, 通过 ATP 泵进入体内转移到需要量最大的部位中, 参与生理代谢活动, 平衡阴离子, 控制膜透性和电解势, 或在细胞液中积累。植物吸收积累离子的程度依赖于离子本身的性质, 也依赖于植物种的特性。本文就松嫩平原碱化草地 5 种优势牧草体内 K^+ 、 Na^+ 积累及其分布动态进行初步探讨, 以了解种间的差异及盐生群落形成机制。

一、研究方法

本项工作在吉林省长岭县草原区腰井子种马场境内进行。分别在羊草、星星草、虎尾草、獐茅和碱蓬营养生长旺期, 依据植物生长状况与土壤盐碱化程度, 分别按不同胁迫程

度设 5 个梯度(土壤 pH 值和含盐量由低至高), 羊草和虎尾草为 6 个梯度。每个梯度取 5 个样区, 每区取 100—300 株, 按植物幼叶、成年叶、老叶、茎根等部分, 分别测定其含水量(%), 干物重(g), K^+ 及 Na^+ 含量(μmol /克干重)。同时取根系集中分布层土壤(地表以下 10—30cm), 分别测定土壤水分, pH 值、盐度、 K^+ 及 Na^+ 含量。计算 5 个样区的平均数作为每个梯度的值。根据植株各器官含量计算整株含量。所得数据按土壤梯度变化进行回归分析。

用 1481-60 型电导仪测定土壤含盐量, ZD-2 型 pH 计测定土壤 pH 值, 用 6400 火焰光度计测定 K^+ , Na^+ 含量。

二、结果与分析

(一) 牧草体内的 K^+ , Na^+ 分布

测定羊草、星星草、虎尾草、獐毛和碱蓬所分别生长的生境中, 含盐量及 pH 最低土壤上生长的植株整体及幼叶、成年叶、老叶、茎和根等各部位的 K^+ , Na^+ 含量, 结果见表 1。整体水平上, 体内 Na^+ 含量碱蓬 > 獐毛 > 星星草 > 虎尾草 > 羊草。碱蓬高达 $5491.0\mu\text{mol}$ /克干重, 羊草仅为 11.31。体内 K^+ 的含量却为虎尾草 > 獐毛、羊草、星星草 > 碱蓬。虎尾草 K^+ 含量高达 $702.26\mu\text{mol}$ /克干重, 碱蓬却为 207.52。 Na^+/K^+ 以虎尾草最低 0.0286,

表1 牧草体内 K^+ , Na^+ 含量¹⁾
Table 1 The concentrations of K^+ or Na^+ in forage plants

部位 Parts	植物名 Species μmol /克干重 (g·dr·wt)	羊 草	虎尾草	星星草	獐 毛	碱 蓬
		<i>A. chinense</i>	<i>C. virgata</i>	<i>P. tenuiflora</i>	<i>A. litoralis</i> var. <i>sinensis</i>	<i>S. glauca</i>
整 株 Plants	K^+	278.49	702.29	297.07	319.17	207.52
	Na^+	11.310	20.202	177.70	225.85	5491.0
	Na^+/K^+	0.0406	0.0286	0.5980	0.7076	25.244
幼 叶 Young leaves	K^+	447.14	672.78	495.46	514.93	446.00
	Na^+	4.7800	14.970	57.650	227.92	5248.9
	Na^+/K^+	0.0107	0.0220	0.1160	0.4430	11.770
成年叶 Mature leaves	K^+	438.33	654.88	359.68	304.61	281.00
	Na^+	4.1100	20.604	104.88	271.96	5476.0
	Na^+/K^+	0.0094	0.0315	0.2916	0.8930	19.490
老 叶 Old leaves	K^+	420.70	449.17	223.00	259.74	121.00
	Na^+	12.570	16.420	115.58	336.09	8840.0
	Na^+/K^+	0.0299	0.0366	0.5180	1.2960	73.058
茎 Stems	K^+	279.79	1075.3	306.24	581.79	393.00
	Na^+	33.220	19.068	140.53	177.57	4514.0
	Na^+/K^+	0.1190	0.0177	0.4590	0.3054	11.490
根 Roots	K^+	235.60	262.66	155.32	114.39	344.00
	Na^+	10.540	41.066	142.08	147.46	2427.0
	Na^+/K^+	0.0450	0.1560	0.9150	1.2890	7.0600

1) 含量为 5 个样区平均数 The contents are average values of 5 samples.

碱蓬最高 25.244。羊草、星星草和獐毛体内 K^+ 含量相似约在 $298.24 \pm 20.00 \mu\text{mol}/\text{克干重}$ 。

表 1 中还揭示了 K^+ 主要分布于代谢旺盛的幼嫩部分的幼叶以及输导组织茎叶，而在代谢迟缓的老叶中最少。在老叶中 Na^+ 含量均为最高， Na^+/K^+ 比其他部位均大。如碱蓬老叶 Na^+ 高达 $8840 \mu\text{mol}/\text{克干重}$ ， Na^+/K^+ 为 73.058，是幼叶的 6.2 倍。獐毛老叶 Na^+/K^+ 为 1.296，是幼叶的 2.926 倍。星星草、虎尾草和羊草的老叶中 Na^+/K^+ 分别为幼叶的 4.46, 1.7 和 2.8 倍。 Na^+ 在体内各部分的积累状况因植物而异，羊草中主要分布在茎、老叶和根中，茎中 Na^+ 含量为成叶 8 倍之多；星星草主要分布在茎和根中，约是成年叶的 1.36 倍；獐毛主要分布在叶中，约是茎或根的 1.71 倍；虎尾草主要分布在根中，约是叶或茎的 2 倍；碱蓬中的 Na^+ 主要积累在叶子里，尤其是成叶和老叶，是其他部位的 6 倍以上。

(二) 不同盐碱化程度土壤中牧草体内 K^+ 、 Na^+ 的积累动态

松嫩平原盐碱化草地土壤中含盐量 (%) 与 pH 值之间的相关系数为 0.498 ($P < 0.05$ $n = 20$)，并非显示极显著的关系，这是由于土壤所含盐分不同。如单因素分析盐或 pH 对牧草体内 K^+ 、 Na^+ 积累影响，均不能如实反映牧草在实际生境下的积累动态。为此，本文就 5 种牧草在松嫩平原长岭腰井子种马场境内分布范围所进行调查的结果，以土壤盐量 (%) 为自变量 x_1 ，土壤 pH 值为自变量 x_2 ，牧草体内 Na^+ $\mu\text{mol}/\text{克干重}$ 为因变量 Y，综合

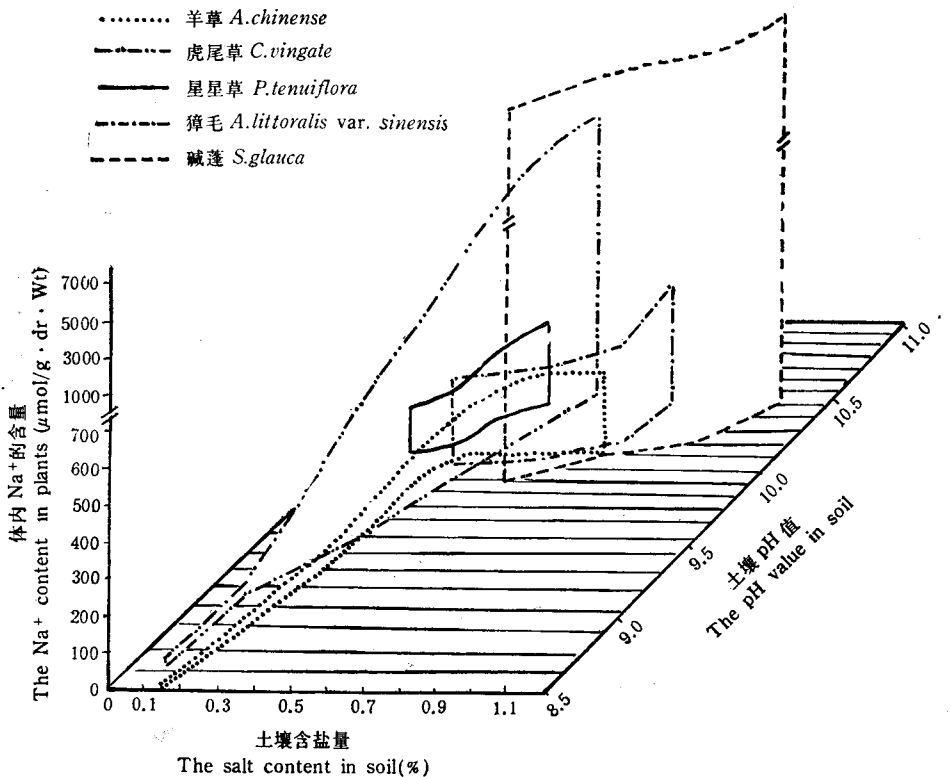


图 1 不同盐碱化土壤中植物体内 Na^+ 的积累动态
Fig. 1 The Na^+ accumulation patterns in plants grown on soils with different salinity

分析 3 者之间的关系, 结果见图 1。图 1 显示了羊草和虎尾草的适应性幅度广, 分别适应于含盐量 0.14—0.713%, pH8.50—9.97 和含盐量 0.098—0.53%, pH8.67—10.51 的土壤中生长期。体内 Na^+ 含量随土壤盐度和 pH 增强而逐渐增加, 其变化较大, 羊草 11—217 Na^+ $\mu\text{mol}/\text{克干重}$, 虎尾草 20—699。 Na^+ 的积累动态符合数学公式: $y = y_m / [1 + e^{(a+b_1x_1+b_2x_2)}]$ (y_m 为最大积累量(表 2))。如以土壤含盐量每增加 0.1%, 牧草体内 Na^+ $\mu\text{mol}/\text{克干重}$ 增加的百分数描述积累率(%), 则羊草 Na^+ 积累率是 3.27%, 虎尾草是 7.86%。星星草、獐毛和碱蓬的适应性较窄, 分别适应在含盐量 0.224—0.419% (pH9.93—10.46)、0.350—0.753% (pH10.10—10.48) 和 0.517—1.166% (pH10.10—10.48) 土壤中生长期, 在强碱高盐生境下具有很强的竞争力。它们体内 Na^+ 的积累量基本维持在一个比较稳定的水平, 星星草含 Na^+ 量 177—216 $\mu\text{mol}/\text{克干重}$, 獐毛 225—326, 碱蓬 5419—5668。体内 Na^+ 的积累率星星草是 0.46%, 獐毛 0.1%, 碱蓬 0.49%。这 3 种牧草 Na^+ 的积累动态均符合数学公式: $y = a + b_1x_1 + b_2x_2$ (表 2)。

表 2 牧草体内 Na^+ $\mu\text{mol}/\text{克干重}(y)$ 与土壤盐量%(x_1)、pH 值(x_2)之间的关系
Table 2 The relationship among the Na^+ mol/g. dr.w.(y) in forage plants, the salinity(x_1) and the pH(x_2) of the soil

植物名 Species	模拟公式 Simulated formulas	r	s	b_1x_1	b_2x_2
羊草 <i>A. chinense</i>	$y = \frac{216}{1 + e^{7.811 - 14.13x_1 - 0.375x_2}}$	0.9989**	4.36	0.957	0.071
虎尾草 <i>C. virgata</i>	$y = \frac{800}{1 + e^{19.63 - 6.739x_1 - 1.739x_2}}$	0.9316**	1.26	0.463	0.473
星星草 <i>P. tenuiflora</i>	$y = -1132.97 + 298.75x_1 + 117.51x_2$	0.9872**	8.56	0.565	0.439
獐毛 <i>A. litoralis</i> var. <i>sinensis</i>	$y = -2548.55 - 67.823x_1 + 279.1x_2$	0.9936**	8.69	0.304	7.376
碱蓬 <i>S. glauca</i>	$y = -83.43 + 716.05x_1 + 471.17x_2$	0.9887**	84.18	0.666	0.338

星星草体内 Na^+ 含量与土壤含盐量、pH 之间的相关系数均为极显著, $p < 0.01$ (表 2)。比较它们的标准回归系数(b_1x_1 和 b_2x_2), 发现獐毛体内 Na^+ 的含量受 pH 的影响较土壤含盐量更大, 而羊草、碱蓬和星星草体内 Na^+ 含量受土壤含盐量影响更大。盐和 pH 对虎尾草体内 Na^+ 的积累的影响程度是基本相同的。pH 的影响也许与植物的膜特性有关, pH 能提高膜透性和促进 Na^+/K^+ 交换, 也可能是土壤中碱性阴离子有利于 Na^+ 的进入植物体内 K^+ 积累动态因植物而异。虎尾草体内 K^+ 含量随土壤盐碱化强度增加、 Na^+ 的吸收而逐渐降低, K^+ 与土壤含盐量之间的相关系数 $r = -0.704$, 体内 K^+ 与 Na^+ 含量之间相关系数 $r = -0.937$ ($p < 0.01$)。碱蓬则相反, 体内 K^+ 含量随土壤盐碱化增强、 Na^+ 的吸收而不断增加, K^+ 与土壤含盐量之间相关性 $r = 0.916$ ($p < 0.05$), 体内 K^+ 与 Na^+ 的 $r = 0.982$ ($p < 0.01$)。羊草类似虎尾草是吸收 Na^+ 抑制 K^+ , $r = -0.875$, 獐毛类似碱蓬体内 Na^+ 与 K^+ 间的 $r = 0.674$, 星星草 K^+ 与 Na^+ 之间的关系不显著, K^+ 含量变化不大。

(三) 土壤含盐量对牧草体内各部位 K⁺、Na⁺ 分布的影响

由于 Na、K 在植物体内是以离子状态存在体液中，而植物不同部位所含水分不同，故按每毫升细胞液(细胞中 Na⁺ 和 K⁺ 的水分溶剂)Na⁺、K⁺ 的微摩尔衡量组织内 K⁺、Na⁺ 浓度(μmol/ml, 由 μmol/克鲜重 × 含水量计算而得)。以土壤每增加 0.1% 盐量所引起的细胞液 K⁺、Na⁺ μmol/ml 的变化百分数表示积累率(%), 分析各部位 K⁺、Na⁺ 的变化, 结果见图 2。当植物处于高盐生境下, 各部位将以不同的速度输入或排出 Na⁺、K⁺, 至使离子的积累因不同植物不同部位而异。虎尾草各部位均以惊人速度积累 Na⁺, 成叶和茎的积累率达到 3117% 和 2891%, 同时 K⁺ 含量下降, 积累率均出现负值, 也许是过高的 Na⁺, 使 K⁺ μmol/ml 变小。碱蓬、星星草和獐毛各部位 K⁺、Na⁺ 积累率均不超过 50%。碱蓬 K⁺ 积累率均比 Na⁺ 大, 说明体内高钠不影响 K⁺ 的进入。羊草茎、叶的 Na⁺ 积累率达 81.2%—219%, 幼叶、茎根中 K⁺ 的积累随 Na⁺ 进入而明显增加。碱蓬的成叶和茎, 獐毛的老叶、茎和根, 星星草的茎等 Na⁺ 积累率均比其他部位高。综上可见, 茎叶是 Na⁺ 的主要聚集部位, 茎是主要输导组织和储存器官, 而含水量较多的叶液泡又是积盐的主要仓库。碱蓬、獐毛和星星草体内 Na⁺ 含量一直维持在一个较高的水平(图 1), 叶子 Na⁺ 积累率表现不突出。

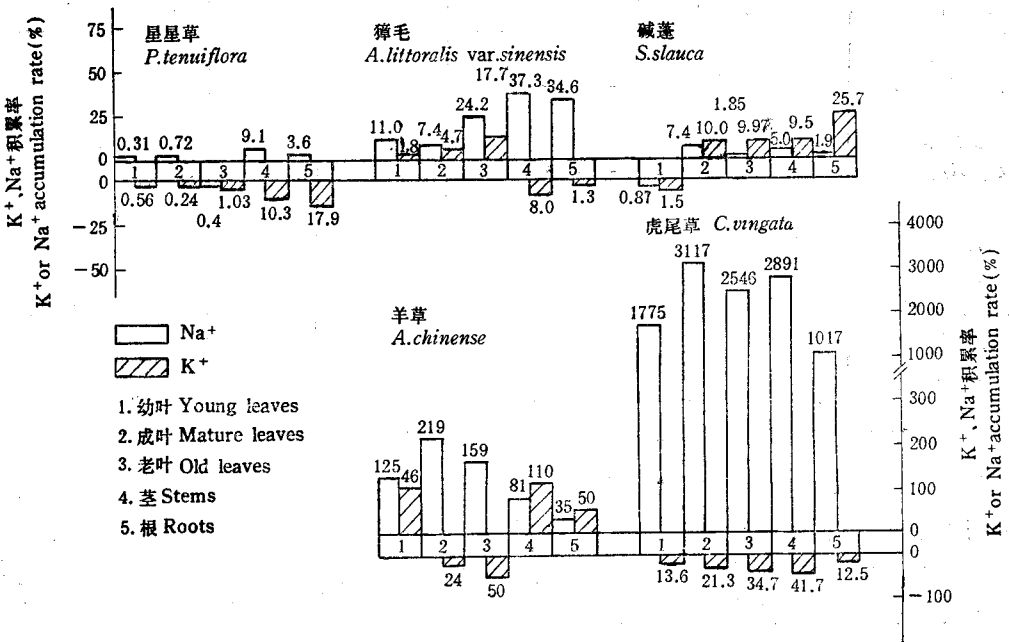


图 2 土壤含盐量增加 0.1%, 牧草各部位 K⁺、Na⁺(μmol/ml) 的积累率
 Fig.2 The accumulation rate(%) of K⁺ or Na⁺ in different plant tissues as a function of soil salt contents

三、讨论

植物对盐碱适应能力的不同, 决定了他们在盐生群落中的竞争力, 故群落的组成随着土壤含盐量和 pH 值变化而改变。从图 1 中可以发现 5 种牧草分布的状况相似于群落组

成的变化趋势。土壤含盐量 0.22%, pH9.925 羊草和虎尾草分布的生境中开始出现星星草, 含盐量 0.35%、pH10.1 开始出现獐毛, 含盐量 0.517% 出现碱蓬。当土壤含盐量大于 0.753% 的生境下基本为纯碱蓬群落。

植物对土壤中离子的吸收、转运及体内分布的特性决定了它们对盐碱的适应性。如在土壤 Na^+ 含量为 $155.986\mu\text{mol}/\text{克干重}$ 生长的碱蓬体内积累的 Na^+ 是 K^+ 的 26.46 倍。随着外界 Na^+ 的增加, 碱蓬虽不断吸收 Na^+ , 同时也吸收 K^+ , Na^+/K^+ 不低于 10.47, 体内 Na^+ 与 K^+ 含量之间呈显著正相关 ($r=0.982^{**}$)。獐毛和星星草体内 Na^+ 与 K^+ 的相关性虽不显著, 且具有正相关, 相关系数分别为 0.674 和 0.456。而虎尾草和羊草分别为负相关, 相关系数分别为 -0.937^{**} 和 -0.875 。碱蓬, 随着细胞液 Na^+ 从 $680.04\mu\text{mol}/\text{ml}$ 增加到 $874.04\mu\text{mol}/\text{ml}$, 同时 K^+ 从 $28.54\mu\text{mol}/\text{ml}$ 上升到 $83.49\mu\text{mol}/\text{ml}$ 。另一个是在 Na^+ 离子以较低浓度存在时对 K^+ 的进入效力更大。如虎尾草体内 Na^+ 为 $3.57\mu\text{mol}/\text{ml}$ 时, K^+ 浓度 $125.29\mu\text{mol}/\text{ml}$, 当进入的 Na^+ 达 $131.97\mu\text{mol}/\text{ml}$ 时, K^+ 浓度降低为 $53.42\mu\text{mol}/\text{ml}$, Na^+ 的摄入抑制了 K^+ 的吸收。从各部位细胞中 Na^+ 、 K^+ 积累率变化 (图 2) 不难发现, 碱蓬是 K^+ 、 Na^+ 同时进入, 除了幼叶外其他部位 K^+ 积累率比 Na^+ 还大。虎尾草随着大量吸收 Na^+ , K^+ 浓度下降, 积累率呈负值, Na^+ 抑制 K^+ 进入。Drew M. C. 等人 (1987)^[3] 发现玉米体内 Na^+ 抑制 K^+ 在茎中的运输。不同的离子运载系统也是植物对环境的生理适应结果。

如以进入体内的 $Na^+\mu\text{mol}/\text{克干重}$ 与土壤中 $Na^+\mu\text{mol}/\text{克干重}$ 之比为 Na^+ 的选择吸收系数, 则羊草为 1.79, 虎尾草 19.01, 星星草 4.10, 獐毛 1.82 和碱蓬 1.82。虎尾草对 Na^+ 的选择吸收明显比其他 4 种牧草高, 但虎尾草在高盐碱胁迫下, 体内脯氨酸含量基本保持在未受胁迫的低盐碱条件下的水平^[1], 说明虎尾草主要以吸收 Na^+ 维持组织的低渗透势。羊草、星星草和碱蓬在 $500\text{ppmNa}_2\text{CO}_3$ 培养液中受胁迫生长, 体内脯氨酸含量明显提高^[1], 它们除了吸收 Na^+ 以外, 还通过自身代谢产生大量脯氨酸等有机溶质进行渗透调节。

植物体内各部位 K^+ 、 Na^+ 分布及 Na^+/K^+ 交换特点也因植物而异。如碱蓬肉质化叶子和虎尾草繁茂的叶片、含水量达 80% 以上, 均利于溶解 Na^+ 。碱蓬和虎尾草均为 C_4 光合型植物, 高效光合能力可提供更多的代谢能, 促进膜上 K^+/Na^+ 泵的运转。羊草和星星草具发达茎, 不仅利于输送 Na^+ , 同时又是 Na^+ 库。獐毛的茎与根系发达, 含水量分别比叶子高 13% 和 16%, 很利于 Na^+ 吸收和积累, 一方面维持根系低渗透势, 另一方面防止叶子中 Na^+ 过高积累。獐毛体内 Na^+ 的积累特点很相似于星星草, 是否具有泌盐功能, 以及 5 种牧草体内 Na^+ 的分布机制, 如细胞中区隔化和离子通道特点等问题还有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] 殷立娟、祝玲, 1988: 东北盐生草甸五种习见牧草苗期抗盐碱性的比较。四川草原, (2)43—48。
- [2] 段维生, 1982: 作物耐盐机理研究的趋向。农业科技译丛, (4)1—5。
- [3] Drew M.C., Guenther J. and Lauchli A., 1988: The combined effects of salinity and root anoxia on growth and net Na^+ and K^+ accumulation in *Zea mays* grown in solution culture. *Annals of Botany* 61: 41—53.
- [4] Gabriele, S.M. and Werner, M.K., 1988: Ion homeostasis in chloroplasts under salinity and mineral deficiency. *Plant Physiol.*, 87: 822—827.
- [5] Maela L.B., Hess R.D., Ray A.B. and Paul M.H., 1988: Intracellular compartmentation of ions in salt adapted tobacco cells. *Plant physiol.* 86: 607—614.
- [6] Raafat K.R. and Kikuo K., 1988: Effect of NaCl salinity on growth and distribution of sodium and some macronutrient elements in Soybean plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 34(3)375—384.

THE DISTRIBUTION AND ACCUMULATION OF K^+ AND Na^+ IN FIVE SALT-TOLERANT FORAGE PLANTS IN A SONG-NEN PLAIN STEPPE

Yin Li-juan, Shi De-cheng, Xue Ping

(Grassland Research Institute, Northeast Normal University, Changchun 130024)

Abstract

The patterns of accumulation and distribution of K^+ and Na^+ in the tissues of *Aneurolepidium chinense* (Kitag), *Puccinellia tenuiflora* (Scribn. et Merr.), *Chloris virgata* (SW.), *Aelirepus litoralis* var. *sinensis* and *Suaeda glauca* (Bunge) in a saline grassland of Song-Nen Plain were discussed. The results showed that *S. glauca* had the highest Na^+ concentration (5,491.0 $\mu\text{mol Na/g dw}$), followed by *A. litoralis* and *P. tenuiflora* which had 225.85 and 177.7 $\mu\text{mol Na/g dw}$, respectively. The lowest levels were found in *A. chinense* and *C. virgata* which contained 20.2 and 11.31 $\mu\text{mol Na/g dw}$, respectively. The Na^+ content of these species was correlated with the levels of Na^+ in the soil. The Na/K ratio was highest in *S. glauca* (25.74) and lowest in *C. virgata* (0.028).

The sodium accumulation ($y = \mu\text{mol Na/g dw}$) in *A. chinense* and *C. virgata* could be best described by an equation $y = Y_m / [1 + e^{(a+b_1x_1+b_2x_2)}]$, where x_1 is the soil salt content and x_2 is the soil PH. In *S. glauca*, *P. tenuiflora* and *A. litoralis*, the Na^+ accumulation was described by the equation $y = a + b_1x_1 + b_2x_2$. The Na^+ accumulation rate, which was defined as the % increase in the Na^+ concentration in the tissues of grass for every 0.1% increase in the soil salt content, followed the order of *C. virgata* > *A. chinense* > *P. tenuiflora*, *A. litoralis* var. *sinensis* and *S. glauca*. The younger tissues, having a more active metabolism, were found to be the major sinks of accumulated Na^+ with increasing soil salinity. The Na^+ accumulation rate in *C. virgata* was markedly increased in different plant tissues, while K^+ content decreased with the increase in the Na^+ accumulation rate. However, in *S. glauca* the rate of K^+ accumulation increased with the increased in the rate of Na^+ accumulation.

Key words: Halophyte; Na Accumulation; Mathematical Model; Salinity; Salt-tolerant plants