

长期施用含氯化肥对稻田土壤氯 积累及养分平衡的影响

邹长明¹, 高菊生²

(1. 安徽技术师范学院农学系, 安徽 凤阳 233100; 2. 中国农业科学院红壤实验站, 湖南 祁阳 426182)

摘要:随着含氯化肥(氯化钾和氯化铵)在中国的广泛施用,其对稻田生态系统的长期影响成为人们关心的问题。为此,1975 年在湖南祁阳红壤站建立了含氯化肥长期定位试验,3 个处理(CK、低氯和高氯)的施 Cl 量分别为 0、352、1032 kg/(hm²·a),其历年土壤样品和 1997 年水稻植株样品被用于研究长期连续施用氯化钾和氯化铵后 Cl⁻ 在土壤-水稻系统中的累积及其对土壤养分平衡和水稻养分吸收的影响。结果表明:Cl⁻ 极易随水淋失,在土壤中的总残留率极低(占总施氯量的 0.16%~0.21%),但长期的积累还是使施氯处理土壤 Cl⁻ 含量显著增加,连续施用高氯化肥 24a 后(1998),表土(0~20 cm)中的 Cl⁻ 含量比试验前(1975)增长了 52.2%,0~100 cm 土壤剖面中和稻草中的 Cl⁻ 含量也显著增加;长期施用高氯化肥使表土中有效 K、Cu、B、Mn 及全 Ca 含量显著降低,而剖面(60~80 cm)中的有效 B 显著增加,对土壤有机质、全 N、全 P、有效 Mo、Zn 及总 Mg 没有明显影响;长期施用高氯化肥还显著抑制早稻对 P、Ca、Mn、Cu 的吸收和晚稻对 Ca、Mn、Cu、Si 的吸收,促进水稻对 Cl 和 Zn 的奢侈吸收,妨碍早稻植株中的 P、Cu 和晚稻植株中的 Cu、Zn、Si 向籽粒运输,使这些元素在稻谷中的分配率显著降低。长期施用低氯化肥后 0~80 cm 土壤剖面中 Cl⁻ 含量也显著增加且对土壤微量元素平衡和水稻微量元素养分吸收有一定的影响。可见,长期施用含氯化肥尤其是高氯化肥后,由于 Cl⁻ 在淋失过程中加剧了某些伴随离子的淋失,导致土壤中某些养分的供应能力降低;因为 Cl⁻ 在土壤-水稻系统中累积而干扰水稻对养分的平衡吸收并妨碍某些养分在水稻植株体内的运输和再分配。

关键词:长期试验;含氯化肥;氯积累;土壤养分;水稻

Effects of long-term application of chlorine-containing chemical fertilizers on chloride accumulation and nutrient balance in paddy fields

ZOU Chang-Ming¹, GAO Ju-Sheng² (1. Department of Agronomy, Anhui Technical Teachers College, Fengyang 233100, China; 2. Red Soil Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hu'nan 426182, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (11): 2557~2563.

Abstract: The effect of applying chlorine-containing chemical fertilizers on paddy field ecosystems is becoming a matter of concern in China with the extensive application of fertilizers such as KCl and NH₄Cl. Thus, a long-term field experiment was established in 1975 at Qiyang Red Soil Experimental Station, Hunan Province to investigate this problem. The application rates of Cl⁻ in 3 treatments (CK, Low Cl and High Cl) were 0, 352, 1032 kg/ha·yr, respectively. Soil Samples in 1975 to 1997 and rice plant samples in 1998 were collected and analysed to investigate the effects of long-term successive applications of KCl and NH₄Cl on the accumulation of Cl⁻ in the soil-rice system, soil nutrient balance, and nutrient absorption of rice plants. Results obtained were listed as follows. Accumulation percentage of Cl⁻ in the soil was very low because Cl⁻ could be leached easily. The total accumulated percentage of Cl⁻ was 0.16 to 0.21% of the total input of Cl⁻ before 1998, but the content of Cl⁻ in the soil increased significantly. In the High Cl treatment, the content of Cl⁻ in the surface soil (0 to 20 cm) in 1998 was 52.2% more than that in 1975. Cl⁻ in the soil profile (0 to 100 cm) and in the rice straw increased significantly after high rate

基金项目:中国农业科学院院长基金资助项目(A9703-16)

收稿日期:2004-02-26;**修订日期:**2004-09-25

作者简介:邹长明(1963~),男,湖南祁东人,硕士,副教授,主要从事土壤生态和植物营养研究。E-mail: cmzou@163.com

致谢:刘更另先生布置试验,秦道珠、李絮花、陈铭、申华平、潘顺秋、王伯仁等先生参加试验工作,在此一并致谢。

Foundation item: President Foundation of Chinese Academy of Agricultural Sciences (No. A9703-16)

Received date: 2004-02-26; **Accepted date:** 2004-09-25

Biography: ZOU Chang-Ming, Master, Associate professor, mainly engaged in soil ecology and plant nutrition. E-mail: cmzou@163.com

applications of chlorine-containing chemical fertilizers for 24 years. The long-term application of high rate of chlorine-containing chemical fertilizers decreased significantly available K, Cu, B, Mn and total Ca in the surface soil. However, the application of chlorine-containing chemical fertilizers significantly increased available B in the 60 to 80 cm soil profile. There was no effect of chlorine-containing fertilizer on organic matter, total N, P, Mg and available Mo, Zn in the surface soil in the period 1975 to 1998. The application of chlorine-containing chemical fertilizers decreased significantly P, Ca, Mn, Cu content of early season rice and Ca, Mn, Cu, Si content of late rice plants. The fertilizer application also increased Cl and Zn luxury accumulation of rice. However, the application of chlorine-containing chemical fertilizers inhibited the transport of P and Cu within early season rice plants and Cu, Zn, Si within late rice. As a result, the percentage of the elements in the grain of rice decreased significantly. Accumulation of Cl^- in the soil profile (0 to 80 cm) was also significant in the Low Cl treatment. The application of chlorine-containing chemical fertilizers affected some micronutrient balance in the soil and uptake of some nutrients by rice. Therefore, long-term application of chlorine-containing chemical fertilizers, especially at a high rate, could decrease the nutrient supply of some soils because Cl^- can make other nutrients leach from the soil, making them unavailable for uptake by the rice crop.

Key words: long-term trial; chlorine-containing chemical fertilizers; chloride accumulation; soil nutrients; rice

文章编号:1000-0933(2004)11-2557-07 中图分类号:S143 文献标识码:A

长期以来,人们对含氯化肥(氯化铵、氯化钾)的施用抱有疑惧,因为它施用过多时对一些作物(如烟草、甜菜、果树等)的品质产生明显的危害。但另一方面,随着我国联合制碱工业的迅速发展,其副产品氯化铵的生产量不断增加,越来越多的缺钾土壤也需要大量施用氯化钾。因此,20 世纪70 年代后期,含氯化肥能否在农业上广泛而持续地施用就成为我国化工部门和农业部门研究的热点和难点问题^[1]。刘更另、毛知耘等率先对含氯肥料的施用开展了广泛而深入的研究,带动了全国有关研究工作的开展,使我国在含氯肥料的研究和施用技术方面走在世界前列^[1]。多年来的研究^[1~9]表明:湿润地区多年连续施用含氯肥料, Cl^- 不会在稻田生态系统中大量累积,常规施肥所带入的 Cl^- 在非盐渍化土壤上对多数作物不会产生害害。但 Cl^- 与其它养分(尤其是微量元素养分)相互影响的研究很少^[2,3]。另外,由于已经报道的长期定位试验^[4~9]所研究的时间都不太长(3~13a),无法确定更长时间的效果,而在湖南祁阳的长期定位试验直到1993 年(试验进行到第19 年)才发现 Cl^- 对水稻产生了明显的影响。本研究对已经在湖南祁阳持续了 24a 的“定位连施含氯化肥对稻田生态系统的影响”长期定位试验的当年和历年样品进行了分析,旨在探明含氯化肥在稻田中长期连续施用后, Cl^- 在土壤中的累积及其对土壤-水稻系统养分平衡的影响,研究结果将为评价含氯化肥施用对农业生态环境的长期影响提供依据。

1 材料与方法

(1)本研究收集并分析了湖南祁阳红壤站化肥试验 3 个处理(对照、低氯和高氯,分别采用无氯化肥、低氯化肥和高氯化肥: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 +$ 过磷酸钙;尿素 + $\text{KCl} +$ 过磷酸钙; $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{KCl} + \text{KH}_2\text{PO}_4$)的历年(1975~1998 年)土壤样品和 1997 年的植株样品。试验土壤为第四纪红土母质上发育的水稻土,耕层土壤(0~20cm)基础肥力状况为:有机质 22.3 g/kg;全氮(N)1.29 g/kg;全磷(P)0.28 g/kg;碱解氮(N)183.9 mg/kg;速效磷(P)18.2 mg/kg;速效钾(K)124.2 mg/kg;缓效钾(K)218.2 mg/kg;含 Cl^- 为 31.8 mg/kg。各处理氮磷钾肥料用量相同,均于每季水稻插秧前一次施入,每年种两季水稻,品种为当地常用品种(随当地品种更新而更换,以保证产量不因品种退化而降低),每季施肥量:N 为 150 kg/hm², P_2O_5 为 75 kg/hm², K_2O 为 225 kg/hm²。小区面积 25 m²,由此带入 3 个供试处理(CK,低氯和高氯)的 Cl^- 量分别为 0,176kg/hm² 和 516 kg/hm²,小区之间用水泥埂相隔,重复 4 次。在水稻生长季定期进行田间观察和生长调查,收获时每区单独计产,每年晚稻收获后采集土壤样品风干(每季作物收植株地上部样品烘干)后保存供分析。

(2)土壤分析方法^[12] 有机质采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法;全氮、全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消化,分别用凯氏法和比色法测定;速效磷采用 NaHCO_3 浸提-比色法;速效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法;缓效钾采用 HNO_3 浸提-火焰光度法; Cl^- 采用水浸提, AgNO_3 滴定法;Ca、Mg 采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消化,原子吸收法;交换性 Mn 采用 NH_4OAc 浸提,原子吸收法;有效 Cu、Zn 采用 HCl 浸提,原子吸收法;有效 Mo 采用草酸-草酸铵浸提,催化极谱法;有效 B 采用沸水浸提,胭脂红比色法。

(3)植株分析方法^[12] N、P、K、Si 采用 $\text{H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消化,分别用开氏法、比色法、火焰光度法和重量法测定;Cl 采用水浸提, AgNO_3 滴定法;植株 Ca、Mg、S、Fe、Mn、Cu、Zn、B、Mo 采用干灰化-电感耦合(氩)等离子发射光谱法。

2 结果与分析

2.1 Cl^- 在土壤中的累积

以往的研究^[1,3~7,9]表明,不同气候带耕地土壤 Cl^- 的积累残留不同。前苏联在干旱条件下认为 NH_4Cl 的肥效比 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

差,且Cl⁻在土壤中有较高的积累;日本在湿润地区连续13a施用NH₄Cl,不仅肥效稳定,52个试验中有46个土壤无Cl⁻残留,另6种土壤Cl⁻残留量也仅占当季施Cl⁻量的4%~5%;美国和印度的很多含氯肥料试验也证实NH₄Cl的肥效等于或好于(NH₄)₂SO₄,Cl⁻在土壤中的残留可以忽略不计;江苏、四川、广西等地的含氯肥料长期试验也都证明Cl⁻不会在土壤中大量累积。本试验从更长的时间尺度上观察,也发现类似现象:从Cl⁻在稻田土壤中的残留率来看,高氯处理24a累计,随肥料施入土壤的Cl⁻量为24.8 t/hm²,扣除被水稻植株带走的Cl⁻量,表土净增Cl⁻量的理论值应为22.8 t/hm²,而表土层实际增加Cl⁻量仅为37.35 kg/hm²(按0~20 cm表土重量2250 t/hm²计算,表2中的计算依据与此相同),Cl⁻在表土中的多年总残留率仅为0.16%,在20~100 cm各层次剖面中均低于此值;按同样方法计算,Cl⁻在低氯处理表土中的多年总残留率为0.21%。说明Cl⁻极易随水下渗淋失,在稻田土壤中的积累率很低。但长期的积累还是使施氯处理Cl⁻含量出现了显著的增加(表1)。以高氯处理为例:从1975年到1998年,连施高含氯肥料24a,表土中Cl⁻含量由1975年的31.8 mg/kg增加到1998年的48.4 mg/kg(增加52.2%)且与其它处理有显著差异,从表土往下一直到80~100 cm的土壤剖面中都有类似现象,虽然这种Cl⁻浓度水平尚不至于对水稻产生毒害^[13,14],但其长期的负面影响不可忽视,它可对土壤-水稻系统中的养分平衡产生显著影响;长期施用低氯化肥,除深层次(80~100 cm)外,各层次土壤中Cl⁻含量也有显著增加(表1);但长期不施含氯肥料时(如CK处理),由于水稻植株带走的Cl⁻和淋失的Cl⁻得不到充分的补充(仅通过大气沉降补充少量氯^[2]),使表土中Cl⁻含量比试验前(1975年)有所减少(表1),但土壤尚未达到缺氯的程度^[13]。

表1 各处理Cl⁻含量随时间和深度的变化

Table 1 Content of Cl⁻ in the soils varying with time and depth (mg/kg)

处理 Treatments	年度 Years (0~20 cm)				深度 Depth (1998)				
	1975	1984	1991	1998	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
CK	31.8	30.1 b	27.2 c	24.8 c	24.8 c	28.1 c	30.0 c	30.8 c	31.9 b
低氯 Low Cl	31.8	36.0 a	39.4 b	39.7 b	39.7 b	35.8 b	35.1 b	36.9 b	34.3 b
高氯 High Cl	31.8	37.7 a	43.6 a	48.4 a	48.4 a	44.3 a	43.2 a	45.6 a	43.1 a

* 数据后的不同字母(a, b, c)表示处理间差异达 $p<0.05$ 显著水平 (Duncan's 新复极差测验),下表同 Letters (a, b or c) following the numbers indicate significant differences between fertilization treatments at $p<0.05$ level (Duncan's SSR-test), the same below

2.2 定位连施含氯化肥对土壤有机质和氮磷钾养分平衡的影响

到1998年,定位连施含氯化肥24a,各处理表层(0~20cm)土壤有机质、全氮和全磷含量比试验前(1975年基础土)都有一定的增加(表2),土壤有机质增加了9.4%~11.7%;全氮(N)增加了10.1%~12.4%;全磷(P)增加了44.8%~48.8%。出现有机质、氮素和磷素的逐渐积累是因为本试验各处理施用的化肥氮和磷都比较充足,氮磷养分在系统中有一定的盈余(每年施N 300 kg/hm²,降雨和灌溉带入N 12~15 kg/hm²,植株带走N 230~260 kg/hm²;每年施P 65.5 kg/hm²,植株带走P 35~40 kg/hm²。收入大于植株带走),根茬等有机物的还田也能促使土壤有机质缓慢增加。由于上述养分在处理间并无显著差异(表2),因此可以认为它们在表观含量上不受Cl⁻影响。

表2 1975~1998年0~20cm土壤C、N、P、K养分平衡状况

Table 2 The nutrient (C, N, P and K) balance in the 0~20 cm soils from 1975 to 1998

元素 Elements	处理 Treatments	(Ⅰ)基础土(1975年) Essential soil in 1975		(Ⅱ)1998年土壤残留 Retained in soil in 1998		养分平衡 Nutrient balance	
		(g/kg)	(t/hm ²)	(g/kg)	(t/hm ²)	Ⅲ = Ⅱ - Ⅰ (t/hm ²)	Ⅲ / Ⅰ (%)
C	CK	22.3	50.2	24.4 a	54.9	4.72	9.4
有机质	低氯 Low Cl	22.3	50.2	24.7 a	55.6	5.40	10.8
Organic matter	高氯 High Cl	22.3	50.2	24.9 a	56.0	5.85	11.7
N	CK	1.29	2.90	1.44 a	3.24	0.338	11.6
全N	低氯 Low Cl	1.29	2.90	1.42 a	3.20	0.293	10.1
Total N	高氯 High Cl	1.29	2.90	1.45 a	3.26	0.360	12.4
P	CK	0.281	0.632	0.414 a	0.932	0.299	47.3
全P	低氯 Low Cl	0.281	0.632	0.407 a	0.916	0.284	44.8
Total P	高氯 High Cl	0.281	0.632	0.418 a	0.941	0.308	48.8
K	CK	0.342	0.770	0.423 a	0.952	0.182	23.7
速效K + 缓效K	低氯 Low Cl	0.342	0.770	0.394 a	0.887	0.117	15.2
Avail. K + inexch. K	高氯 High Cl	0.342	0.770	0.334 b	0.752	-0.018	-2.34

与氮磷不同的是, 尽管每年施入系统的钾(K)量(373.5 kg/hm²)也大于植株带出系统的钾(K)量(260~296 kg/hm²), 高氯处理土壤钾含量仍然显著低于其它处理(表2)且其不同年份土壤速效钾的含量呈下降趋势。如图1所示, 高氯处理土壤速效钾在1986年以前逐年下降, 至1984年时开始显著低于其它处理, 从1975年的124.2 mg/kg下降到1986年的97.6 mg/kg(下降22%), 1988年以后则基本维持在99 mg/kg左右。而其它处理土壤速效钾含量多年来无明显变化。

在钾肥施用量和基础土钾含量都相同的条件下, 处理间土壤速效钾产生差异的原因不外3个: 植株带走量差异; 转化为缓效钾的数量不同; 淋失量不同。从1986~1998年的植株样品分析结果看, CK、低氯和高氯处理的植株平均年带走钾素(K)无显著差异(分别为274.2、271.3和274.0 kg/hm²), 可以排除高氯处理植株将更多钾素带出系统外的可能性; 从土壤测定结果看, 高氯处理缓效钾含量也最低(图2), 因而也可以排除其土壤速效钾更多地转化为非交换性钾(缓效钾)的可能性。可见, 主要原因是由于Cl⁻极易淋失, 作为主要伴随离子的K⁺因移动性较强, 也造成了较多的淋失, 而且随着施入Cl⁻量的增加, K⁺淋失量也增加。这就是高氯处理土壤钾平衡出现亏损(表2), 而其它处理土壤钾有15%~24%盈余的主要原因。

2.3 定位连施含氯化肥对土壤微量元素养分平衡的影响

从1984到1998年, 不同处理土壤中大多数微量元素都发生了较大的变化(表3)。

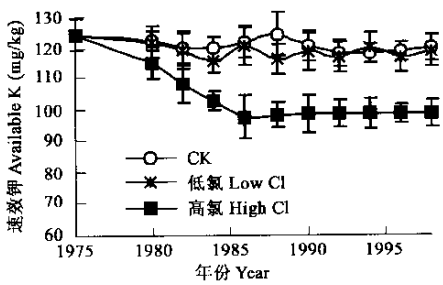


图1 各处理0~20 cm土壤速效钾随时间的变化
Fig. 1 Available K varied with time in the 0~20 cm soils

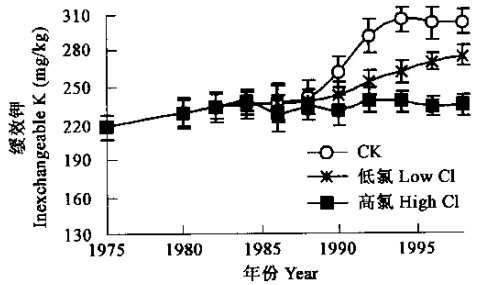


图2 各处理0~20 cm土壤缓效钾随时间的变化
Fig. 2 Inexchangeable K varied with time in the 0~20 cm soils

表3 各处理0~20 cm土壤微量元素养分多年变化

养分 Nutrient	1984			1998		
	CK	低氯 Low Cl	高氯 High Cl	CK	低氯 Low Cl	高氯 High Cl
有效铜 Available Cu	2.58 a	2.68 a	2.65 a	4.51 a	4.28 ab	4.09 b
有效锌 Available Zn	2.85 a	2.87 a	3.14 a	5.09 a	5.10 a	5.21 a
有效硼 Available B	2.56 a	2.53 a	2.47 a	2.35 a	2.23 a	1.73 b
有效钼 Available Mo	1.22 a	1.07 a	1.14 a	1.18 a	1.01 a	1.00 a
交换性锰 Exchangeable Mn	19.7 a	19.0 ab	17.0 b	10.80 a	8.02 b	7.21 b
总钙 Total Ca	899 a	849 b	782 c	820 a	746 b	714 b
总镁 Total Mg	427 a	429 a	421 a	428 a	423 a	424 a

表4 各处理1998年土壤剖面中某些微量元素含量

处理 Treatments	有效硼 Available B		交换性锰 Exchangeable Mn		有效钼 Available Mo	
	0~20cm		0~20cm		0~20cm	
	60~80cm	60~80cm	60~80cm	60~80cm	60~80cm	60~80cm
CK	2.35 a	0.37 b	10.80 a	0.49 a	1.18 a	0.92 a
低氯 Low Cl	2.23 a	0.56 a	8.02 b	0.53 a	1.01 a	0.95 a
高氯 High Cl	1.73 b	0.62 a	7.21 b	0.58 a	1.00 a	0.97 a

表3显示, 施用高含氯化肥24a后(1998年), 土壤有效Cu、B、Mn及全Ca含量比对照显著减少, 而对有效Mo、Zn及总Mg没有明显的影响; 低氯处理仅有效Mn和全Ca含量与对照有显著差异。说明施氯越多, 对微量元素的影响越大。可能与长期施氯使土壤酸化^[1,4], H⁺代换出土壤胶体上的Mn²⁺和Ca²⁺, 增加了它们的淋失而使高氯和低氯处理交换性Mn和全Ca含量显著减少; 同时, 某些元素(如Cu)在酸性条件下通过离子交换作用进入土壤溶液并与Cl⁻络合, 在Cl⁻遭淋溶的同时, 它们作为伴随离子(盐基金属离子或络离子)淋失; 至于有效B, 本身就阴离子形态(如BO₃³⁻)存在于土壤中, 大量Cl⁻与其竞争土壤胶体上的吸附位, 故施氯越多(如高氯处理), 淋失越严重。总之, Cl⁻对微量元素的影响机理比较复杂, 有待进一步深入研究。从剖面分异

看,高氯处理表土层有效B 含量显著低于对照区,而心土层则显著高于对照区,交换性Mn 也存在类似现象(表4)。这表明它们在施氯处理尤其是高氯处理区更多地从表土层淋溶到了心土层。这些结果说明,长期施用含氯肥料加速了Ca、Mn、Cu、B 等中微量元素 的淋失。上述各元素在施氯处理土壤中虽未达到缺乏程度^[13],但土壤Cl、K 及部分中微量元素平衡的失调却显著影响了施氯处理区水稻对养分的平衡吸收(表5)。

2.4 定位连施含氯化肥下水稻对养分的平衡吸收

1997 年,对包括Si 在内的水稻必需营养元素(C、H、O 除外)的吸收情况进行了分析,发现长期施用高含氯化肥显著抑制早稻对P、Ca、Mn、Cu 的吸收和晚稻对Ca、Mn、Cu、Si 的吸收,促进植株对Cl 和Zn 的奢侈吸收,妨碍早稻植株中的P、Cu 和晚稻植株中的Cu、Zn、Si 向籽粒运输;施用低氯化肥对上述元素也产生了不同程度的影响(表5)。

就处理间来看,高氯处理对早稻P、Ca、Mn 养分吸收的抑制作用比低氯处理明显,低氯处理与对照没有显著差异,而高氯处理的总吸收量显著降低。

早稻和晚稻比较,由于品种和外部环境(如气候和土壤条件)不同,养分吸收的特点有很大差异。施氯对水稻吸收P 的影响在早稻中表现得较为显著,可能与早稻需P 较多且早稻吸P 临界期(生长前期)温度低有关^[15];而对植株吸收Ca、Mn、Si 的影响则在晚稻中表现更明显,未见类似报道,其机理有待进一步研究;就养分吸收量来看,早稻对P、Cu、Zn 的总吸收量大于晚稻,而对Ca 和Si 的总吸收量则小于晚稻。

根据植物营养学原理,Cl⁻ 因为与H₂PO₄⁻ 在质膜上竞争同一结合位点而相互拮抗^[14],施用磷肥可以降低Cl 毒害^[10],而Cl 是否抑制植株吸收P 要依系统的养分平衡情况而定,当土壤有效磷含量低时Cl⁻ 可抑制P 的吸收而土壤有效磷含量高时则不影响^[3,4,11,16];本试验土壤有效磷(1975~1998 年一直维持在17~21 mg/kg)是较高的,全磷含量也有所增加,按常理应该不会减少水稻对磷的吸收,但表5 显示,低氯和高氯处理的早稻稻谷磷浓度仍然显著降低。可见长期施氯后由于土壤环境和养分平衡的改变,即使土壤含有较高的有效磷,植株对磷的吸收仍然受到了显著的影响。另外,高浓度的Cl⁻ 还可能破坏膜系统^[3]、影响植株体内某些酶的活性^[3]并降低土壤中多种酶的活性^[9]而抑制植株对养分的吸收。

表5 长期施用含氯化肥对水稻养分吸收的影响(1997 年)

Table 5 Effect of long-term application of chlorine-containing chemical fertilizers on nutrients absorption of rice in 1997									
元素 Elements	处理 Treatments	早稻 Early season rice				晚稻 Late rice			
		浓度 ⁽¹⁾ Concentration		总吸收量 ⁽²⁾ Total uptake	谷中分配率 Percentage in grain (%)	浓度 ⁽¹⁾ Concentration		总吸收量 ⁽²⁾ Total uptake	谷中分配率 Percentage in grain (%)
		稻谷 In grain	稻草 In straw			稻谷 In grain	稻草 In straw		
P	CK	2.77 a	1.11 a	19.3 a	76.0	2.01 a	0.93 a	12.0 a	62.4
	低氯 Low Cl	2.44 b	1.15 a	17.8 ab	71.2	1.96 a	0.98 a	11.5 a	64.9
	高氯 High Cl	2.33 b	1.16 a	17.3 b	70.6	2.03 a	0.89 a	12.5 a	63.8
Ca	CK	0.363 a	4.59 a	21.1 a	9.1	0.520 a	5.84 a	30.2 a	6.4
	低氯 Low Cl	0.350 a	4.19 b	20.5 ab	8.9	0.452 b	5.71 a	25.2 c	6.8
	高氯 High Cl	0.332 a	4.01 b	19.4 b	9.0	0.411 b	5.15 b	27.9 b	5.8
Mn	CK	156 a	1020 a	5.09 a	16.2	158 a	1180 a	6.29 a	9.3
	低氯 Low Cl	145 a	980 ab	5.13 a	14.7	127 b	950 b	4.39 b	11.0
	高氯 High Cl	128 b	922 b	4.73 b	14.2	126 b	775 c	4.45 b	11.2
Cu	CK	16.0 a	3.32 b	98.7×10 ⁻³ a	85.9	16.3 a	2.28 c	71.6×10 ⁻³ a	84.6
	低氯 Low Cl	13.7 b	4.04 a	89.4×10 ⁻³ b	79.8	12.8 b	2.57 b	59.2×10 ⁻³ b	82.2
	高氯 High Cl	12.6 b	3.86 a	82.9×10 ⁻³ b	79.5	12.4 b	2.94 a	64.0×10 ⁻³ b	76.6
Zn	CK	36.2 a	45.8 b	0.383 b	50.0	35.3 a	36.4 c	0.307 b	42.6
	低氯 Low Cl	33.4 a	60.5 a	0.444 a	39.2	31.8 b	40.7 b	0.288 b	41.9
	高氯 High Cl	34.8 a	59.5 a	0.444 a	41.1	30.8 b	45.2 a	0.352 a	34.5
Si	CK	15.6 a	50.6 a	294 a	28.1	16.6 a	68.1 a	391 a	15.7
	低氯 Low Cl	15.0 a	50.3 a	303 a	25.8	9.9 b	62.6 b	294 b	12.7
	高氯 High Cl	14.7 a	50.1 a	298 a	25.9	9.1 b	55.7 c	319 b	11.2
Cl	CK	0.98 a	5.74 b	29.2 b	17.8	1.08 a	6.22 c	34.1 b	11.8
	低氯 Low Cl	1.04 a	6.80 a	35.8 a	15.1	1.14 a	7.40 b	34.7 b	12.5
	高氯 High Cl	1.02 a	7.40 a	37.9 a	14.1	1.12 a	8.44 a	47.4 a	9.3

(1) 浓度单位,P、Ca、Si、Cl 为g/kg,Mn、Cu、Zn 为mg/kg Concentration unit of P, Ca, Si and Cl is g/kg, That of Mn, Cu and Zn is mg/kg;
(2)总吸收量=谷吸收量+草吸收量,单位为kg/hm²Total uptake equal to uptake of grain plus uptake of straw, Uptake unit is kg/hm²

从表 5 还可看出, Cl^- 不仅抑制了水稻对 P、Ca、Mn、Cu、Si 等元素的吸收, 而且也抑制某些元素在植株体内的移动和再分配, 表现在施氯处理晚稻稻谷中的 Cu、Zn 浓度低于对照, 而稻草中的 Cu、Zn 浓度反而显著高于对照, 且随着施氯量的增加, 这种现象表现得更明显, 早稻稻谷中的 Cu 也有类似现象。这导致施氯处理早稻稻谷中的 Cu 元素分配率比对照低 6%, Zn 元素分配率比对照低 9%~11%, 这种现象在晚稻高氯处理中表现得更强烈。其原因可能是过量的 Cl^- 与 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 形成了稳定的络离子 CuCl^+ 、 ZnCl^+ , 妨碍其被籽粒利用^[1]; 除 Cu 和 Zn 外, P 在早稻中的运输和 Si 在晚稻中的运输可能也受到 Cl^- 的影响, 因为施氯处理 (尤其是高氯处理) 除这些元素的吸收量显著减少外, 稻谷中的分配率也比对照低, 其机理有待进一步研究。

植株奢侈吸收的 Cl^- 主要集中在稻草中储存 (Zn 也如此)。表 5 显示, 施氯导致稻草中的含氯量显著增加, 施高氯则增加更多, 而稻谷中的含氯量各处理间并无显著差异。

3 讨论

在南方红壤地区淹水种稻条件下, 长期施用含氯化肥后 Cl^- 在土壤中的残留率虽然很低, 但却可使土壤和稻草中的 Cl^- 含量显著增加。尽管 Cl^- 本身在土壤中的积累尚未达到对水稻产生毒害的水平, 但却可引起土壤生态退化和养分平衡失调而使某些元素 (如 K、Ca、Cu、B、Mn) 的供应能力降低; 更重要的是: 植株体内过量的 Cl^- 可能导致植株体内养分平衡失调及酶活性降低, 从而减少了水稻对 P、Ca、Mn、Cu、Si 等元素的吸收并妨碍某些元素 (如 P、Cu、Zn 和 Si) 向籽粒运输或影响其被籽粒利用, 而 Ca 和 Si 可增强水稻植株细胞和器官的机械强度^[13], 缺乏易倒伏 (本试验的田间调查结果证实高氯处理水稻尤其是晚稻倒伏率较高); 缺 Cu 可导致花粉不育^[12], 缺 P 和 Ca 也可使结实率降低^[13]。可见含氯化肥虽然短期无害, 但对土壤-水稻系统养分平衡和土壤生态的长期影响不容忽视, 生产上不宜长期连续施用同一种化肥而应及时调整肥料类型。在研究方面, 应加强 Cl^- 对微量元素影响机理的研究。

References:

[1] Mao Z Y, Li J K, He G A, *et al.* Chloride-containing chemical fertilizer in China. Beijing: Chinese agricultural Press, 2001. 2~162.

[2] Chen M. Study on inorganic anion nutrient in plant. *Chinese Journal of Soil Science*, 1993, **24**(2): 95~96.

[3] Li T X, Wang C Q, Ma G R, *et al.* Research progress of chloride-containing fertilizers. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2002, **15**(2): 86~91.

[4] Ning Y W, Zhang Y C, Wu J G, *et al.* Chloride in soil-plant system and some question in chloride-fertilizer application. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, **32**(5): 222~224.

[5] Su Z, Dong X Y, Han X R, *et al.* Effects of long-term application of chlorine-containing fertilizers on soil physical and chemical properties. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1997, **28**(2): 116~119.

[6] Huang Y Y, Jiang Z P, Huang Z Z. Effects of long-term application of Ammonia chloride in acidic paddy soil. *Journal of Guangxi Agricultural Sciences*, 1997, (2): 78~80.

[7] Wu J G, Lou D R, Ning Y W, *et al.* A evaluate of application of chloride-containing on farm field. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, **32**(3): 321~325.

[8] Zhang S Q. Effects of ammonia chloride on yield, quality of crop and soil physical or chemical properties. *Gansu Agr. Sci. and Techn.*, 1998, (8): 36~40.

[9] Cheng G H. Effect of long-term application of chloride-containing chemical fertilizers on enzyme activity in the soil. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1994, **25**(4): 360~365.

[10] Chauhan R P S. The use of phosphorus fertilizers to reduce the chloride toxicity of wheat. *Fertilizer Research*, 1985, **6**(2): 171~176.

[11] Jin A S, Guo P C and Zhang X Y. The effect of Chlorine on nutrient ion uptake by and enzyme activity in crops. *Chinese Journal of Soil Science*, 1993, **24**(1): 35~36.

[12] Li Y K. *Measurement and methods of soil and agricultural chemistry*. Beijing: Chinese Scientific Press, 1983. 67~287.

[13] Liu Z ed. *Agricultural chemistry of micronutrient*. Beijing: Agriculture Press, 1991. 108~267.

[14] Lu J L ed. *Plant nutrition science*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994. 28~153.

[15] Zou C M, Qin D Z, Xu M G, *et al.* Nitrogen, phosphorous and potassium uptake characteristics of rice and its relationship with grain yield. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, **25**(4): 6~10.

[16] Zou B J. Elements in halogen family in soils and plants II. Cl. *Advances on Soil Science*, 1984, **12**(6): 1~6.

参考文献:

[1] 毛知松, 李青, 李安, 等. 中国含氯化肥. 北京: 中国农业出版社, 2001. 2~162.

[2] 陈铭. 植物无机阴离子营养研究. 土壤通报, 1993, **24**(2): 95~96.

[3] 李廷轩,王昌全,马国瑞,等. 含氯化肥的研究进展. 西南农业学报,2002,**15**(2):86~91.

[4] 宁运旺,张永春,吴金桂,等. 土壤-植物系统中的氯及施用含氯肥料的几个问题. 土壤通报,2001,**32**(5):222~224.

[5] 苏壮,董翔云,韩晓日,等. 含氯化肥长期施用对土壤理化性质的影响. 沈阳农业大学学报,1997,**28**(2):116~119.

[6] 黄玉溢,江泽普,黄卓忠. 酸性水稻土长期施用氯化铵的效应研究. 广西农业科学,1997,(2):78~80.

[7] 吴金桂,娄德仁,宁运旺,等. 含氯化肥农田应用效果的评价. 土壤学报,1995,**32**(3):321~325.

[8] 张树清. 氯化铵对作物产量品质及土壤理化性质的影响. 甘肃农业科技,1998,(8):36~40.

[9] 程国华. 长期施用含氯化肥对土壤酶活性的影响. 沈阳农业大学学报,1994,**25**(4):360~365.

[11] 金安世,郭鹏程,张秀英. 氯对作物养分离子吸收与酶活性的影响. 土壤通报,1993,**24**(1):35~36.

[12] 李西开主编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京:科学出版社,1983. 67~287.

[13] 刘铮主编. 微量元素的农业化学. 北京:农业出版社,1991. 108~267.

[14] 陆景陵主编. 植物营养学(上册). 北京:北京农业大学出版社,1994. 28~153.

[15] 邹长明,秦道珠,徐明岗,等. 水稻的氮磷钾养分吸收特性及其与产量的关系. 南京农业大学学报,2002,**25**(4):6~10.

[16] 邹邦基. 土壤与植物中的卤族元素(Ⅱ)氯. 土壤学进展,1984,**12**(6):1~6.

