

CNIC-01301

CSNAS-0125

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

降低农作物中 ^{137}Cs 污染水平的农业措施研究

A STUDY ON THE AGRICULTURAL MEASURES TO
REDUCE THE CONTAMINATION OF ^{137}Cs TO PLANT
(*In Chinese*)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01301 CSNAS-0125: 降低农作物中¹³⁷Cs 污染水平的农业措施研究/朱永懿等著. -北京: 原子能出版社, 1998. 12
ISBN 7-5022-1917-X

I. 中… II. 朱… III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-

2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 32271 号

降低农作物中¹³⁷Cs 污染水平的农业措施研究

朱永懿等著

©原子能出版社, 1998

原子能出版社出版发行

责任编辑: 郭向阳

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2 · 字数 21 千字

1998 年 12 月北京第一版 · 1998 年 12 月北京第一次印刷

定价: 5.00 元



朱永懿：中国农业科学院原子能利用研究所研究员，1961年毕业于中山大学生物系。

ZHU Yongyi: Research fellow of the Institute for Application of Atomic Energy, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Graduated from Biology Department, Zhongshan University in 1961.

CNIC-01301

CSNAS-0125

降低农作物中 ^{137}Cs 污染水平的 农业措施研究*

朱永懿 杨俊诚 陈景坚 刘学莲

(中国农业科学院原子能所, 北京, 100094)

徐寅良 孙志明

(浙江农业大学核农所, 杭州, 310029)

摘 要

对施用钾盐、钠盐、铵盐、磷酸盐、石灰、草木灰、褐煤及翻耕、生物净化、铲除表土等措施降低 ^{137}Cs 从土壤-植物的转移率, 减少农作物中 ^{137}Cs 污染的有效性研究表明, 铲除表土、翻耕等农业措施的应用, 可使春小麦的 ^{137}Cs 污染水平下降30%左右。施用硫酸钾能够使农作物的 ^{137}Cs 污染水平降低50%~90%, 而且3年内的后效非常显著。钾盐的作用表现为大大降低土壤中代换态 ^{137}Cs 的含量, 并且抑制 ^{137}Cs 从茎叶向籽粒的运转。钾盐的施用量按照土壤阳离子代换量的1/30计算为宜。由于 ^{137}Cs 在土壤中主要是以非代换态形态存在, 因此采用生物净化措施效果不理想。草木灰、褐煤、石灰都有降低 ^{137}Cs 从土壤-植物的转移率的作用, 但效果不够稳定。施用铵盐、钠盐、磷酸盐会促进作物对 ^{137}Cs 的吸收。

* 该项目受核工业科学基金资助 (1996~1998年)。

A Study on the Agricultural Measures to Reduce the Contamination of ^{137}Cs to Plant*

ZHU Yongyi YANG Juncheng CHEN Jingjian LUI Xuelian
(Institute for Application of Atomic Energy, CAAS, Beijing, 100094)

XU Yinliang SUN Zhiming
(Institute of Nuclear Agriculture, Agriculture
University of Zhejiang, Hangzhou, 310029)

ABSTRACT

The measures to reduce the contamination of ^{137}Cs to plant and ^{137}Cs transfer from soil to plant are evaluated by pot and field plot experiment. The measures include the application of salt such as potassium, sodium, ammonium, phosphate and lime, plant ash, trown coal, rooting, biological puritication and uprooting. The results show that the contamination decreases about 30% by rooting and uprooting, 50% to 90% by using potassium sulphate and the effect is significant after 3 years. The mechanism might be that the available ^{137}Cs in soil decreases sharply by potassium and the transfer of ^{137}Cs from leaf to seed is restrained. It is suitable to apply potassium as 1/30 of the available cation in soil. Because ^{137}Cs exist in soil mainly as unavailable form, the effect of biological puritication if unreasonable. The transfer ratio of ^{137}Cs from soil to plant cut down a little by the application of plant ash, brown coal but the effect is not stable. Ammonium, sodium and phosphate can promote the absorption of plant to ^{137}Cs .

* The Subject Supported by Nuclear Science Foundation of China (1996~1998).

前 言

^{137}Cs 是核电站事故中释放的高额、高毒性核素。在切尔诺贝利核电站事故中释放的 ^{137}Cs 有0.09 EBq。仅在白俄罗斯、俄罗斯和乌克兰就有几十万公顷农田被污染,造成巨大的经济损失。由于 ^{137}Cs 的半衰期长(30 a),具有生物迁移性,易被农作物和牧草吸收并进入食物链,因此, ^{137}Cs 污染问题是很值得重视的。

在核事故后,除了严重放射性沉降阶段需要采取紧急对策以外,后面的关键问题是处理土壤-农作物的污染,尽快恢复生产。沉降在土壤表面的 ^{137}Cs 等核素会被农作物吸收积累并进入食物链,因此科学家对降低农作物中 ^{137}Cs 的污染水平进行了不少研究^[1~4]。由于农业生产受环境的制约,土壤理化性状、气候、作物的生物学特性等等对 ^{137}Cs 从土壤-农作物的转移都会有很大影响,早在50年代初,科学工作者就开始对事故情况下的农业防护措施进行研究。我国的研究始于60年代初^[3,4]。本研究是从我国的国情出发,以浙江秦山地区土壤及北京地区土壤为研究对象,从多方面研究降低农作物中 ^{137}Cs 污染水平的有效技术措施,为万一出现核事故情况下恢复农业生产、保护居民健康、减少经济损失作技术储备和决策依据。

1 材料和方法

试验主要是用土培盆栽方法进行。供试土壤为北京地区褐土和浙江省秦山地区黄松田土,其基本理化性状列于表1。供试验的作物主要为水稻和小麦。试验用盆栽方法, ^{137}Cs 是以溶液随灌水施入进行(试验不同处理的设计列于相应的表中)。

模拟小区试验是在浙江农业大学进行,目的是对施用钾肥能够减少水稻对 ^{137}Cs 吸收的盆栽试验结果进行验证。供试土壤同前述。在体积为0.95 m×0.7 m×0.35 m的专用小池内,装入150 kg土。装土前先施入底肥(按每公顷施375 kg N, 187.5 kg P_2O_5 , 187.5 kg K_2O)。试验设6个处理,即 K_2O 施入量按土壤阳离子代换量1/50、1/40、1/30、1/20(详见表1)计算的四个处理、不施钾的对照1、不设施 ^{137}Cs 的对照2。土壤装入池后加水浸泡7 d,于1997年5月4日插秧。 ^{137}Cs 是在水稻返青后(5月17日)随灌水施入,施用量按100 Bq/kg土计算。在7月20日成熟期收获。分别取植株和土壤样品,植株分为茎叶和籽粒两部分,在 γ 谱仪上测量样品的 ^{137}Cs 活度。

表1 土壤理化性质

Table 1 Characteristics of the soil

土壤	有机质	pH	全氮	碱解氮	全磷	速效磷	速效钾	阳离子代换量	粘粒
Soil	Org. matter %		Total N/%	Alkaline hydrolysis N mg·kg ⁻¹	Total P %	Available P mg·kg ⁻¹	Available K mg·kg ⁻¹	CEC meq/100 g	Clay (<0.001 mm) /%
褐土 Drab soil	1.86	8.2	0.081		0.054	9.2	146.1	10.84	
黄松田土 Huang-song soil	1.61	6.9	0.069	121.9	0.121	3.93	45.7	14.0	5.86

2 试验结果

2.1 用施肥措施降低农作物中 ^{137}Cs 污染的研究

2.1.1 用施肥措施降低农作物中 ^{137}Cs 污染的效果

在北京褐土上进行试验是用容积为 4 L 的瓷盆, 装土 4 kg, 施入氮磷钾底肥。采用的施肥措施见表 2 (措施的肥料施用量是按照土壤阳离子代换量的 1/10 计算)。种植春小麦, 每盆 8 株, 在成熟期取样。从图 1 可见, 土壤中的 ^{137}Cs 经根系吸收后转移到植株的地上部, 并主要积累在颖壳和茎叶中, 籽粒中 ^{137}Cs 的活度比茎叶低得多, 小麦茎叶中 ^{137}Cs 比活度为籽粒的 4 倍。

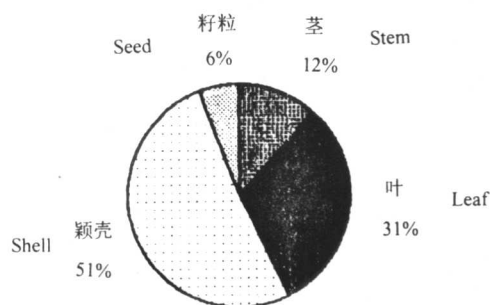


图 1 ^{137}Cs 在春小麦地上部的分配

Fig. 1 Distribution of ^{137}Cs in the upground part of spring wheat

研究表明, 施用不同的肥料或化合物对于 ^{137}Cs 从土壤-植物的转移的影响有很大的差异。从表 2 可见, 施用钾盐及草木灰可以降低小麦植株中 ^{137}Cs 活度, 使茎叶中 ^{137}Cs 活度比对照降低 43.18%~49.71%, 籽粒中效果更好, 可以降低 64.50%~72%。转移因数由 0.0053 下降到 0.0015~0.0019, 差异均达到十分显著水平。试验施用的 3 种钾盐中以碳酸钾的效果最好, 硫酸钾次之, 氯化钾再其次, 草木灰的效果与氯化钾的效果相似。磷酸盐和氯化钠则表现为促进小麦吸收 ^{137}Cs , 其中施用过磷酸钙使植株茎叶中 ^{137}Cs 的比活度提高 37.21%, 籽粒提高 91.50%, 转移因数也相应提高 1.92 倍, 差异十分显著。施用磷酸铵则使小麦茎叶和籽粒相应提高 29.06%和 49%。氯化钠使小麦茎叶和籽粒中 ^{137}Cs 比活度相应提高 5%左右, 与对照组的差异不显著。同时可以看到, 施用钾盐和草木灰后, 不但降低了 ^{137}Cs 在茎叶和籽粒中的含量, 还会使茎叶与籽粒中 ^{137}Cs 比活度的比值增大, 其中差异最大的是施硫酸钾的处理组, 茎叶中 ^{137}Cs 比活度比籽粒高 8.4 倍, 而对照组两者相差仅为 4 倍。说明施钾可以抑制 ^{137}Cs 从茎叶向籽粒运转。

表 2 施肥对降低春小麦植株中¹³⁷Cs积累的效果 (北京土)Table 2 Effect of fertilizer application on the accumulation of ¹³⁷Cs in spring wheat

处理 Treatment	茎叶 Stem			籽粒 Seed			转移因数
	Bq/g	比 CK±%	Bq/pot	Bq/g	比 CK±%	Bq/pot	
CK	29.5		338.2	7.4		45.8	0.0053
K ₂ SO ₄	21.5**	-27.00	254.3	2.6**	-65.50	13.5	0.0019**
K ₂ CO ₃	14.8**	-49.71	158.4	2.1**	-72.00	10.2	0.0015**
KCl	16.8**	-43.18	210.9	2.6**	-64.50	11.2	0.0019**
NH ₄ H ₂ PO ₄	38.1**	+29.06	557.7	11.0**	+49.00	97.7	0.0079**
NaCl	31.0	+5.08	320.9	7.73	+4.46	43.7	0.0056
草木灰	16.2**	-45.06	185.2	2.6**	-65.50	12.1	0.0019**
Ca (H ₂ PO ₄) ₂	40.5**	+37.21	570.2	14.2**	+91.50	76.4	0.0102**
LSD 0.05	1.9			1.3			0.0009
LSD 0.01	2.6			1.8			0.0013

注: ** 表示差异达到十分显著水平。

用秦山地区土壤进行试验是用容积为 0.6 L 的塑料盆, 预先将 500 g 土壤和底肥 (0.25 g 硫酸铵, 0.1 g 磷酸二氢钾) 拌匀, 在 5 月底以插秧方式栽种水稻, 每盆 9 株。试验第一年是在水稻返青后浇灌¹³⁷Cs 溶液, 每盆 41.8×10^4 Bq。第二和第三年后效试验是在第一年取样后的盆钵中进行, 连续 3 年的试验结果列于表 3。结果表明, 试验采用的施肥措施对降低水稻植株中¹³⁷Cs 积累均有一定的效果, 植株中的¹³⁷Cs 比活度降低了 2%~99%。在施用的几种肥料中, 钾盐的去污效果非常好。3 种钾盐在试验当年均使植株中¹³⁷Cs 减少 72.5% 以上, 而且第二和第三年的后效也非常好, 植株中¹³⁷Cs 积累减少 81%~99%, 与对照的差异均达到十分显著水平。在施用的硫酸钾、碳酸钾和氯化钾 3 种钾盐中, 又以硫酸钾的效果最好, 使¹³⁷Cs 减少 85.83%~99.54%。在本试验采用的两组施用量中, 低施用量组比高施用量组的效果更好。

褐煤是含腐植酸的天然肥料, 试验施用褐煤对降低植株中¹³⁷Cs 活度有一定作用。在试验第一年, 水稻植株中¹³⁷Cs 比活度降低 46.67%, 第二年降低 21.12%, 与对照组差异均达到显著水平。但是由于不同产地的褐煤成分有差异, 其效果不易重复。

已有研究表明, 石灰可以提高土壤的 pH 值, 增加土壤的阳离子交换能力, 减少植物对⁹⁰Sr 和¹³⁷Cs 的吸收, 在酸性土壤上施用的效果非常好^[7]。在本试验中采用的秦山地区土壤为中性土, 虽然对降低植株中¹³⁷Cs 的积累也有明显效果 (使水稻植株¹³⁷Cs 比活度降低 18%~29%), 但不够理想。在我国南方水稻田中有施用石灰的习惯, 这有利于降低水稻对¹³⁷Cs 的吸收。表 3 的试验采用的几种肥料在降低水稻植株中¹³⁷Cs 污染的效果的评价是: 硫酸钾>碳酸钾>氯化钾>褐煤>石灰。

表 3 施肥措施对降低¹³⁷Cs在水稻植株中积累的效应及其后效 (泰山土)Table 3 Effect of the measures to apply fertilizer on reducing the accumulation of ¹³⁷Cs in rice and the effect in later stage

处理	第一年		第二年		第三年		效果总评
Treatment	First year		Second year		Third year		Effect
	Bq/g	比 CK±%	Bq/g	比 CK±%	Bq/g	比 CK±%	evaluation
CK	12.0		99.6		508		10
CaO	8.8*	-26.67	81.4**	-18.29	359**	-29.27	8
褐煤 1	9.6*	-2.00	74.5**	-25.17	502	-1.25	9
褐煤 2	6.4**	-46.67	78.6**	-21.12	495	-2.56	7
K ₂ SO ₄ 1	1.1**	-90.83	3.0**	-97.03	4**	-99.21	1
K ₂ SO ₄ 2	1.7**	-85.83	8.2**	-91.79	2**	-99.54	2
K ₂ CO ₃ 1	1.8**	-85.00	18.2**	-81.68	6**	-98.81	5
K ₂ CO ₃ 2	1.6**	-86.67	11.2**	-88.80	3**	-99.49	3
KCl 1	2.8**	-76.67	15.1**	-84.82	31**	-93.98	6
KCl 2	3.3**	-72.50	9.6**	-90.40	4**	-99.30	4
LS00.05	2.4		12.0		46.4		
LS00.01	3.4		16.2		62.7		

注: 1. 褐煤 1、2 的施用量分别为 3375 kg/hm² 和 6750 kg/hm²;

2. 钾盐施用量 1、2 分别按土壤阳离子代换量的 1/20 和 1/10 计算。

表 4 施肥措施对降低作物中¹³⁷Cs积累的效果 (泰山土)Table 4 Effect of the measures to apply fertilizer on reducing the accumulation of ¹³⁷Cs in rice

处理		第一年		第二年		效果总评
Treatment		First year		Second year		Effect
肥料	施入量	Bq/g	比 CK± %	Bq/g	比 CK± %	evaluation
Fertilizer	Applied amount					
CK	0	322		921		9
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1/50	243**	-24.61	802	-12.94	6
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1/40	279	-13.35	695**	-24.50	7
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1/30	266**	-17.42	909	-1.26	8
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1/20	375*	+16.46	975	+5.85	10
K ₂ SO ₄	1/50	199**	-38.10	392**	-57.43	4
K ₂ SO ₄	1/40	144**	-55.28	256**	-72.24	2
K ₂ SO ₄	1/30	25**	-22.36	100**	-89.10	5
K ₂ SO ₄	1/20	214**	-33.55	57**	-93.77	3
K ₂ SO ₄	1/10	200**	-38.03	9**	-99.06	1
LSD0.05		41.9		140		
LSD0.01		56.6		190		

注: 肥料施入量是按土壤阳离子代换量计算。

表 4 是对不同施用量的过磷酸钙和硫酸钾的效果以及它们的后效进行比较, 从中可以

看到,在秦山地区土壤中施用重过磷酸钙的效果与其施入量有关,当施入量相当于土壤阳离子代换量的 1/50~1/30 时,植株中¹³⁷Cs 比活度比对照组低,去污率在 1.26%~24.51% 之间。而当施入量达到相当于土壤阳离子代换量 1/20 时,植株中¹³⁷Cs 的比活度比对照组高,而且第一年试验的差异达到显著水平。说明施用较大的磷肥时,会促进植株对¹³⁷Cs 吸收,这一结果与北京褐土的试验结果相似。

施用不同量的硫酸钾均可以有效地降低水稻植株中¹³⁷Cs 的含量,而且与前述(表 3)试验相似的是第一年的效果不如第二年好,试验第一年植株的去污率在 22.36%~58.28%,第二年达到 57.43%~99.06%,两年试验结果表明,各个处理组与对照组的差异均达到十分显著水平。从施入量的选择来看,在试验第一年,钾盐的施入量与效果之间的相关性并不明显,以土壤阳离子代换量的 1/40 组表现最好,去污率达到 58.28%。第二年则表现为随钾盐施入量的增加,植株中¹³⁷Cs 的比活度降低,两者呈显著的负相关($r = 0.7639, y = 577 - 1236x$)。施入量高的两组其去污率均在 93% 以上,效果非常好,说明在秦山地区土壤上施用钾盐对降低农作物中¹³⁷Cs 污染水平有很好的作用。

为初步验证盆栽试验结果,我们进行了模拟小区试验。从表 5 可以看到与春小麦试验的结果一样,在水稻植株的地上部¹³⁷Cs 主要是积累在茎叶中,其¹³⁷Cs 的比活度比稻谷高 5.7~10.5 倍。同时,施用硫酸钾能够有效地降低水稻植株中¹³⁷Cs 的活度,茎叶中¹³⁷Cs 的活度比对照降低 8.56%~41.635%,稻谷中相应降低 8.31%~59.10%,从而验证了施用钾盐的效果。试验结果还表明,随钾盐施入量的增加,植株中¹³⁷Cs 的积累减少,两者呈显著负相关($r = -0.7992$)。当钾盐施入量为土壤盐基代换总量的 1/40 以上时,稻谷中¹³⁷Cs 的积累比对照组减少 40% 以上。效果最好的是施钾量为土壤盐基代换总量的 1/30 的处理,使稻谷中¹³⁷Cs 的积累减少 59.10%,茎叶中减少 38.13%。

从以上试验获得的结果来看,无论在北京褐土还是在秦山地区土壤中,施肥措施对减少植物根部从土壤中吸收¹³⁷Cs 都表现有一定的规律,即施用过磷酸钙和硫酸铵有促进作物吸收¹³⁷Cs 的作用;施用石灰和褐煤,有减少植株吸收¹³⁷Cs 的作用,但效果不如施钾盐好。施用氯化钾、碳酸钾、硫酸钾和草木灰对减少农作物对¹³⁷Cs 的吸收都获得非常好的效果,其中又以硫酸钾的效果最好,使植物吸收的¹³⁷Cs 比对照减少 50% 以上。从效果和农业生产成本两方面考虑,钾盐施用量可以按照土壤阳离子代换量的 1/30 计算比较适宜。

表 5 不同施钾量对水稻吸收¹³⁷Cs 的影响模拟小区 试验

Table 5 Effect of different application of potassium fertilizer on the absorption of ¹³⁷Cs by rice in plot experiment

处理 Treatment	施入量	籽粒 Seed			茎叶 Stem		
		Bq/g	比 CK±%	效果排名	Bq/g	比 CK±%	效果排名
CK	0	4.45	—	—	25.7	—	—
K ₂ SO ₄	1/50	4.08	-8.31	4	28.0	-8.95	3
K ₂ SO ₄	1/40	2.65	-40.45	3	27.9	-8.56	4
K ₂ SO ₄	1/30	1.82	-59.10	1	15.9	-38.13	2
K ₂ SO ₄	1/20	2.46	-44.72	2	15.0	-41.63	1

注: K₂SO₄ 施入量按土壤阳离子代换量计算。

2.1.2 施用钾盐降低 ^{137}Cs 从土壤中-植物的转移率的机理

(1) 施用钾盐对春小麦产量的影响

试验结果表明,当施入钾盐的量相当于土壤阳离子代换量 1/30 时,对春小麦的生长发育没有明显的影响,反而使春小麦生物产量比对照和深翻两组分别提高 8.05% 和 16.2%。这主要是随茎叶的生长,施钾处理组茎叶重比其它两组增加 19.74% 和 22.20%,与对照的差异达到显著水平。但是籽粒产量与没有增施钾盐的另外两个处理没有明显差异(见表 6)。这说明增施钾盐措施不但能够在降低农作物 ^{137}Cs 污染方面有很好的效果,同时对春小麦茎叶的生长有一定的促进作用。

(2) 施用钾盐对 ^{137}Cs 在土壤中存在形态的影响

从前面试验的结果来看,施用钾盐对降低植株中 ^{137}Cs 污染水平的当季作物的效果没有第二年、第三年后效好,这可能是与 ^{137}Cs 在土壤中的形态及被固定的程度有关。从土壤中的有效态 ^{137}Cs 含量分析结果表明, ^{137}Cs 在土壤中主要是以非代换性形态存在,占总量的 96% 以上。水溶态 ^{137}Cs 的含量很少,仅占土壤中 ^{137}Cs 含量的 0.019%~0.18%。代换性 ^{137}Cs 含量比水溶态 ^{137}Cs 含量高,占土壤中 ^{137}Cs 含量的 0.66%~5.68%。两年的分析结果没有明显的差异,因此植物根系难以从土壤中吸收 ^{137}Cs 。同时,分析结果还表明,施用钾盐可以大大降低土壤中代换性 ^{137}Cs 的含量,在施用钾盐的第一年,土壤中代换性 ^{137}Cs 含量比对照组降低 72.4%~60.4%;第二年降低 85.4%~69.4%,与对照组的差异达到十分显著水平。研究表明了土壤中代换性 ^{137}Cs 含量与植株中 ^{137}Cs 含量存在十分显著的相关性(见表 7),因此,施用钾盐在降低了土壤中代换性 ^{137}Cs 含量的同时亦降低了植株中 ^{137}Cs 的含量。

从试验用的三种形态的钾盐比较来看,施用硫酸钾处理组的土壤中代换性 ^{137}Cs 含量最低,因此在降低 ^{137}Cs 从土壤-植物的转移、减少植株中 ^{137}Cs 污染方面表现最好,且效果稳定。

表 6 不同措施对春小麦产量的影响/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$

Table 6 Effect of different measures to apply fertilizer
on the output of spring wheat

处理 Treatment	籽粒 Seed	茎叶 Stem	生物产量 Biological mass
对照 (污染表土) CK	6.50	5.47	11.79
翻耕 Rooting	5.60	5.76	10.96
翻耕+施钾盐 Rooting and potassium	6.19	6.55*	12.74
LSD 0.05	1.64	0.90	2.36
LSD 0.01	2.48	1.36	3.59

表 7 ^{137}Cs 在土壤中存在形态Table 7 Forms of ^{137}Cs existing in the soil

处理	土壤	水溶态		代换性	
Treatment	Soil	Soluble ^{137}Cs		Available ^{137}Cs	
	Bq/g	Bq/g	占土壤%	Bq/g	占土壤%
第一年					
First year					
CK	773	0.53	0.069	21.7	2.81
$\text{K}_2\text{SO}_4\text{-1}$	903	0.48	0.053	6.0**	0.66
$\text{K}_2\text{SO}_4\text{-2}$	874	0.17**	0.019	6.6**	0.76
$\text{K}_2\text{CO}_3\text{-1}$	846	0.41**	0.048	6.5**	0.77
$\text{K}_2\text{CO}_3\text{-2}$	878	0.61**	0.069	7.2**	0.82
KCl-1	879	0.28**	0.032	8.6**	0.98
KCl-2	860	0.23**	0.027	6.0**	0.70
第二年					
Second year					
CK	695	1.2	0.18	39.6	5.68
$\text{K}_2\text{SO}_4\text{-1}$	787	0.4	0.05	5.7**	0.73
$\text{K}_2\text{SO}_4\text{-2}$	789	0.5	0.06	5.8**	0.72
$\text{K}_2\text{CO}_3\text{-1}$	788	1.5	0.19	9.6**	1.22
$\text{K}_2\text{CO}_3\text{-2}$	771	1.3	0.17	6.6**	0.86
KCl-1	800	0.7	0.09	12.1**	1.52
KCl-2	784	1.1	0.14	5.9**	0.76

(3) 钾盐对 ^{137}Cs 在植株地上部器官中分配的影响

^{137}Cs 在农作物地上部的分配,主要是在茎叶和颖壳中,籽粒中分配较少^[5,6]。从本试验结果来看, ^{137}Cs 在小麦茎叶与籽粒中的分配比大约为4:1,水稻约为6:1。施用钾盐后会提高 ^{137}Cs 在茎叶中的分配比(见表9)。可以认为,由于钾与铯的竞争,使 ^{137}Cs 从茎叶向籽粒的运转受到抑制,从而改变了茎叶与籽粒的分配比,有利于降低稻谷、小麦籽粒中 ^{137}Cs 的污染水平。

表 8 土壤中代换性 ^{137}Cs 含量与植株中 ^{137}Cs 比活度的相关性Table 8 Correlation between the specific activity of ^{137}Cs in plant and available ^{137}Cs in soil

处理	植株 Bq/g	代换性	植株 Bq/g	代换性
Treatment	Stem	Available	Stem	Available
CK	12.0	2.81	99.6	5.68
$\text{K}_2\text{SO}_4\text{-1}$	1.1**	0.66**	3.0**	0.73**
$\text{K}_2\text{SO}_4\text{-2}$	1.7**	0.76**	8.2**	0.72**
$\text{K}_2\text{CO}_3\text{-1}$	1.8**	0.77**	18.2**	1.22**
$\text{K}_2\text{CO}_3\text{-2}$	1.6**	0.82**	11.2**	0.86**
KCl-1	2.8**	0.98**	15.1**	1.52**
KCl-2	3.3**	0.70**	9.6**	0.76**
相关系数 r		0.9806		0.9835

表 9 钾盐对¹³⁷Cs在植株地上部器官中分配的影响Table 9 Effect of potassium salt on the distribution of ¹³⁷Cs in the upground plant organs

作物 Plant	土壤 Soil	处理 Treatment	茎叶 Stem Bq/g	籽粒 Seed Bq/g	茎叶/籽粒 Stem/Seed
小麦	北京土	CK	29.5	7.4	3.99
Wheat	Beijing soil	K ₂ SO ₄	21.5	2.6	8.27
小麦	秦山土	CK	75.5	17.8	4.24
Wheat	Qinshan soil	K ₂ SO ₄	5	0.6	8.33
水稻	秦山土	CK	25.7	4.45	5.78
Rice	Qinshan soil	K1	28.0	4.08	6.86
		K2	27.9	2.65	10.53
		K3	15.9	1.82	8.74
		K4	15.0	2.46	6.10

2.2 翻耕措施对降低植株中¹³⁷Cs积累的效应

春小麦试验是用 $\varnothing 11\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ 的盆, 每个装土 3.2 kg, 施入 2 g 硫酸铵和 0.8 g 磷酸二氢钾作底肥, 土壤为秦山地区土。¹³⁷Cs的施入方法是: 取 100 g 土与¹³⁷Cs溶液(每盆 $31 \times 10^4\text{ Bq}$) 拌匀, 在装盆时按不同处理的要求施入盆中。试验设 3 个处理: (1) 以污染表土为对照; (2) 模拟翻耕试验是将污染土置于 30 cm 深的土层中; (3) 翻耕与施钾盐配合的处理是将¹³⁷Cs污染的土壤置于 30 cm 深处, 其余土壤与钾盐拌匀后装盆, 钾盐施用量是按土壤阳离子代换量的 1/30 计算。在 1998 年 3 月 11 日播种春小麦, 每盆 10 株。在苗期(两次)及成熟期取样。

从图 2 可见翻耕措施在春小麦苗期可以有效地降低植株中¹³⁷Cs的积累。在第一次取样时(4 月 6 日), 深耕和深耕+施钾盐两组的小麦苗中¹³⁷Cs比活度分别比对照低 81.85% 和 84.68%。第二次取样(4 月 13 日)时, 处理与对照之间的差距缩小, 两个处理组比对照相应降低 58.15% 和 82.82%, 这两次取样的两个处理与对照组的差异均达到十分显著水平。这是由于将¹³⁷Cs污染的土壤翻入到 30 cm 深处, 当植物根系还没有达到污染土层, 植株未能吸收土壤中的¹³⁷Cs, 因此植株中¹³⁷Cs的比活度很低。同时, 深耕+施钾盐措施的去污效果比单纯深耕措施的效果更好。

随着植株的生长发育, 当根系达到深层土壤时, 植株对¹³⁷Cs的吸收随之增加。到成熟期翻耕措施对减少植株中¹³⁷Cs污染的效果变得不明显。从表 10 可以看到, 虽然翻耕措施可以使春小麦茎叶和籽粒中¹³⁷Cs积累比对照相应减少 41.54% 和 20.18%, 但是两者的差异未达到显著水平。而翻耕与施钾盐相结合的效果很好, 可使¹³⁷Cs在籽粒中的积累比对照减少 96.97%, 茎叶减少 92.03%, 差异达到十分显著水平, 再次证明了施用钾盐的效果。

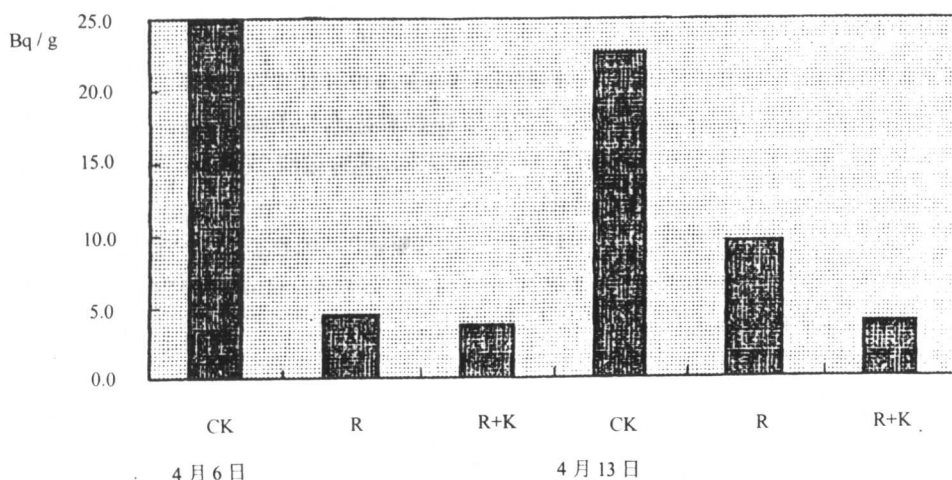


图2 不同处理对春小麦苗期¹³⁷Cs积累的影响

Fig. 2 Effect of different treatment on the accumulation of ¹³⁷Cs in seedling stage of spring wheat

表10 不同措施对¹³⁷Cs在春小麦植株中积累的影响

Table 10 Effect of different measures on the accumulation of ¹³⁷Cs in spring wheat

处理 Treatment	籽粒 Seed			茎叶 Stem		
	Bq/g	Bq/pot	CK±%	Bq/g	Bq/pot	CK±%
CK	17.8	115.7		75.5	411.6	
翻耕 Rooting	11.8	66.5	-42.54	61.5	328.5	-20.18
翻耕+施钾盐 Rooting and potassium salt	0.6	3.5**	-96.97	5**	32.8**	-92.03
LSD 0.05	7.05	60.6		23.5	221.5	
LSD 0.01	10.7	91.8		35.6	335.6	

在浙江省农科院核农所进行的模拟翻耕试验是用 $\varnothing 20\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 的盆,装土11.5 kg,施入底肥(施用量同前)。试验共设5个处理,即把被¹³⁷Cs污染的土壤放入深度为15、20、25、30 cm的土层中,以污染表层土作为对照。¹³⁷Cs施用量为每盆 $37 \times 10^3\text{ Bq}$,每个处理重复4次。供试作物为水稻,分早稻和晚稻两季种植。每盆种4株,在成熟期取样,植株分为茎叶和籽粒两部分,用 γ 谱仪测量样品的¹³⁷Cs活度。

从表11可以看到,把被¹³⁷Cs污染的土壤翻入下层对减少水稻吸收¹³⁷Cs有很好的效果,其减少的幅度在84%~98%之间,转移因数从0.253下降到0.004。对晚稻的效果比早稻更好,处理组水稻植株中¹³⁷Cs的积累比对照组减少94%以上,转移因数从0.425下降到0.011。有试验表明,水稻吸收¹³⁷Cs的高峰期是在苗期^[7,8]。前面的春小麦试验结果又说明了在植株生长的前期,根系没有到达污染土层时,植株中¹³⁷Cs的活度很低。所以,当被¹³⁷Cs污染的土壤被翻耕到下层时,可以避开水稻苗期的吸收高峰,达到减少水稻吸收¹³⁷Cs的目的。在种植晚稻时,由于¹³⁷Cs施入土壤后已经经过了几个月的时间,部分的¹³⁷Cs离子被土壤固

定,因而进一步减少了水稻的吸收。以上两组试验的结果有一定的差异,即水稻试验的结果比春小麦好。这可能与试验的作物不同和污染土层的设计不同有关,应当作进一步的验证。据报道,翻耕措施使 ^{137}Cs 从土壤-植物的转移率大约降低10%~25%^[8],而且认为这一措施更适合于浅根系作物^[7]。这种去污方法曾在西班牙南部 Palomares 地区发生的事故中使用。它的缺点是需要大型机械的投入和堆放污染土壤的场所,因此,只适合于局部的、特定的高放射性地区,而且对沙土不适用。

表 11 翻耕措施对减少水稻吸收 ^{137}Cs 的效果

Table 11 Effect of deep rooting measures on absorption of ^{137}Cs by rice

	翻耕深度		籽粒		茎叶	
	Rooting depth		Seed		Stem	
	cm	Bq/kg	比 CK ± %	转移因数	Bq/kg	比 CK ± %
早稻 Early rice	表层 (CK)	815		0.253	2292	
	15	93**	-88.69	0.029	301**	-86.86
	20	100**	-87.80	0.031	281**	-87.76
	25	126**	-84.53	0.039	359**	-84.32
	30	14**	-98.30	0.004	22**	-99.04
晚稻 Later rice	表层 (CK)	1363		0.425	4735	
	15	79**	-94.18	0.020	238**	-94.97
	20	33**	-97.59	0.011	67**	-98.53
	25	57**	-95.83	0.017	147**	-96.90
	30	35**	-97.45	0.011	133**	-97.18

2.3 植物对土壤净化作用的研究

本试验的目的是试图对污染水平较低的广大地区的土壤进行生物净化。试验是在 ^{137}Cs 污染的土壤上种植禾本科、豆科、菊科、桑科、葫芦科等多种植物,研究它们对 ^{137}Cs 污染土壤的净化能力。结果表明,十字花科的油菜对 ^{137}Cs 有较高的浓集能力,其转移因数为2.31。其次是葫芦科的南瓜,转移因数为1.88。试验用的几种植物的转移因数大小依次排列如下:十字花科>葫芦科>藜科>菊科>茄科>豆科>禾本科,它们对 ^{137}Cs 的转移因数变动在0.05~2.31的范围。考虑植物的净化作用,除了对放射性核素的吸收和积累以外,还应该考虑到对土壤中 ^{137}Cs 的回收率:即单位面积农田上收获的植物中放射性核素的总活度占土壤中该核素总活度的百分数。从表12可见各种植物的转移因数并不高,而且回收率也不高。与裂变产物 ^{90}Sr 比较,葫芦科的西葫芦对 ^{90}Sr 的转移因数为14,小区回收率达到11%,其净化效果比对 ^{137}Cs 的好得多。这是由于 ^{137}Cs 被土壤固定的牢固程度比 ^{90}Sr 高得多, ^{137}Cs 难以被植物吸收,因此植物对它的吸收率和转移因数均比 ^{90}Sr 低得多。可以认为植物净化的方法对于 ^{137}Cs 污染的土壤来说效果不明显。

2.4 铲去表土法的研究

为研究 ^{137}Cs 在土壤中的运移情况,在水稻插秧后,把 ^{137}Cs 溶液随灌水浇灌在土壤中,待水稻成熟后收获,对盆土进行分层取样,测定 ^{137}Cs 在水稻生长过程中从土表向下移动的情

况。结果表明，¹³⁷Cs基本上被表层土壤固定，很难向下移动，有 99% 的¹³⁷Cs留在 1~5 cm 的上层中，仅有 1% 左右向下层移动（见表 13）。

表 12 不同种类的植物对¹³⁷Cs的吸收

Table 12 Absorption of ¹³⁷Cs by different plant

植物名称	科别	转移因数	小区回收率%
Name of plant	Family	Transfer coefficient	Plot recovery
春小麦	禾本科	0.05	0.03
Spring wheat	Grass family		
沙打旺	豆科	0.37	0.20
Erect milkvetch	Pulse family		
马铃薯	茄科	0.40	0.20
Potato	Eggplant family		
苍耳	菊科	1.00	0.60
Cocklebur	Composite family		
饲用甜菜	藜科	1.24	0.70
Beet	Lambs-quarters family		
南瓜	葫芦科	1.88	1.50
Pumpkin	Calabash family		
油菜	十字花科	2.31	1.40
Rape	Mustard family		

表 13 ¹³⁷Cs 在土壤中的移动

Table 13 Movement of ¹³⁷Cs in soil

土壤深度/cm	$n \times 10^3$ Bq/kg	占百分数/%
Depth of soil		
0~5	2068.3	99.0
5~10	5.0	0.24
10~15	5.3	0.25
15~20	10.6	0.51

表 14 落下灰中放射性核素在土壤中的移动

Table 14 Movement of radionuclide from fallout in soil

土壤深度	施入量 Applied amount/Bq · pot ⁻¹					
	426×10 ³		1277×10 ³		2131×10 ³	
	Bq/kg	%	Bq/kg	%	Bq/kg	%
Depth of soil						
cm						
0~7	319×10 ³	100	958×10 ³	99.94	1574×10 ³	99.94
7~14	0	0	255	0.027	469	0.03
14~20	0	0	321	0.033	533	0.03

用放射性落下灰进行的盆栽试验中，同样说明了包括¹³⁷Cs在内的放射性核素 99.9% 以上留在 1~7 cm 土层中（见表 14）。从以上两个试验的结果来看，沉降到土表的¹³⁷Cs一般情况下都积聚在土壤表面，很难向下移动。因此采用刮去被污染的表土的办法，可以有效地降低土壤中的放射性污染水平，从而减少农作物中¹³⁷Cs污染。

3 结 论

(1) 施用钾盐可以有效地降低 ^{137}Cs 从土壤-农作物的转移率,使植株中 ^{137}Cs 积累大大减少。连续几年的试验表明,几种形态的钾盐中以施用硫酸钾的效果最好、最稳定,可使植株中 ^{137}Cs 的比活度下降50%以上,最大幅度可达到90%以上,而且施用后第二年和第三年有很好的后效。对于施用钾盐降低植株中 ^{137}Cs 污染水平的机理研究表明, ^{137}Cs 在土壤中主要是以非代换态形态存在,代换态 ^{137}Cs 仅占土壤中 ^{137}Cs 总量的6%左右。施用钾盐后土壤中代换态 ^{137}Cs 含量降低到1.5%以下,最低可达到0.7%,因此植物难以吸收。当土壤受到 ^{137}Cs 污染时,采取施硫酸钾的方法是降低 ^{137}Cs 从土壤-植物转移率、降低农作物中 ^{137}Cs 污染水平的有效措施。从效果和农业生产成本考虑,钾盐施用量按照土壤阳离子代换量的1/30计算比较适宜。虽然草木灰和褐煤的效果也很好,但是由于它们的成分不固定,因此效果不稳定。

(2) 翻耕土壤对于降低农作物从土壤中吸收 ^{137}Cs 有利,尤其是在苗期,可以使植株中 ^{137}Cs 比活度降低50%以上。但不同作物及栽培条件的影响很大,水稻试验获得使植株中 ^{137}Cs 比活度降低84%以上的结果,而春小麦则仅降低20.18%。该措施对于浅根系作物和短生育期的作物有利。

(3) 由于沉降在表土的 ^{137}Cs 的99%停留在0~5 cm的土层中,很难向下层土壤移动,因此在特定的高放射性地区用铲除表土的方法可以有效地降低土壤的放射性污染水平。翻耕和施用硫酸钾配合,可使春小麦茎叶 ^{137}Cs 的比活度降低92.03%,籽粒降低96.97%,效果十分显著。

(4) 由于 ^{137}Cs 在土壤中被吸附,难以被植物吸收, ^{137}Cs 从土壤-植物的转移因数很低,试验效果最好的十字花科植物的转移因数仅为2.31,而且生物产量也不高,造成对土壤中 ^{137}Cs 的回收量小,净化效果不明显。可以认为生物净化的方法对于 ^{137}Cs 污染土壤不适用。

参 考 文 献

- 1 杨俊诚等. ^{137}Cs 的沉降污染与农业对策国际研究进展. 核农学报, 1997, 11 (增刊): 28~34.
- 2 Н. В. Гулякин. Влияние длительного применения удобрений на накопления радиоактивных продуктов деления в урожае овса. Изв. ТСХ А, 1959, 3: 45~50.
- 3 中国农林科学院原子能所二室. ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 在农作物中的吸收、分布规律研究. 放射医学, 1977 (2): 6~11.
- 4 朱永懿等. 中国对 ^{137}Cs 在农业环境中行为的研究进展. 中国核科技报告, CNIC-01118, 1996.
- 5 朱永懿等. 裂变产物 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 在土壤-植物系统中的行为. 中国核科技报告 CNIC-00696, 1992.
- 6 路子显等. 秦山、大亚湾核电厂周围地区土壤对 ^{137}Cs 吸收的研究. 中国核科技报告, CNIC-00688, 1992.
- 7 IAEA/FAO Technical Report. Guidelines for Agricultural Countermeasures Following an accidental Release of Radionuclides. ISSN 74-1974, 363: 75~85.
- 8 裴同才译. 土壤、作物及食品中的放射性沉积物. 北京: 中国农业出版社, 1995. 58