

含 Cd 磷肥不同施用量对水稻产量及 Cd 累积的影响

区惠平¹, 周柳强¹, 刘昔辉², 黄金生¹, 曾 艳¹, 黄美福¹, 谢如林¹, 谭宏伟^{2*}, 粟学俊³

(1.广西农科院农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 2.广西农科院甘蔗研究所, 南宁 530007; 3.广西农科院水稻研究所, 南宁 530007)

摘要:采用2年大田试验,研究低镉(Cd)磷肥不同施用量对水稻产量及地上部Cd累积的影响。结果表明,施低Cd磷肥显著增加水稻稻谷和稻秆产量,但不同施磷量间稻谷产量差异不显著。随施磷量的增加,稻谷Cd含量呈先增加后下降的趋势,但均在国家粮食卫生控制标准 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 规定内。当施磷(P_2O_5)量为 $63\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,稻谷Cd含量及稻谷、茎叶和地上部Cd累积量最高,显著高于对照;但施磷量增至 $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,稻谷Cd含量与对照相当,而茎叶Cd含量显著下降。水稻对磷肥中Cd的吸收率随施磷量的增加而显著下降。当施磷量低于 $81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水稻地上部对磷肥中Cd的吸收率超过100%。指数回归方程表明,随磷肥进入土壤的Cd含量基本被水稻地上部完全吸收时的磷肥施用量早、晚稻分别为 116.6 、 $174.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此,生产上按当前适宜施磷量施用,既能兼顾水稻产量,又能保障稻谷和土壤生态安全。

关键词:磷肥; 镉; 累积; 水稻

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)02-0231-06 doi:10.11654/jaes.2014.02.004

Yield and Cadmium Accumulation of Rice Following Application of Phosphate Fertilizer Containing Cadmium

OU Hui-ping¹, ZHOU Liu-qiang¹, LIU Xi-hui², HUANG Jin-sheng¹, ZENG Yan¹, HUANG Mei-fu¹, XIE Ru-lin¹, TAN Hong-wei^{2*}, SU Xue-jun³

(1.Agricultural Resources and Environmental Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2.Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 3.Rice Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: Phosphate fertilizers are essential for agriculture production, but there is an increasing concern over the risk of cadmium(Cd) contamination via fertilization. This study evaluated the yield and Cd accumulation of rice plant following different rates of phosphate fertilizer in a two year field experiment. Rice yield was increased by applying phosphate fertilizer, but not by the application rates. However, Cd concentrations in the grains increased firstly and then decreased with phosphate rates, but were still lower than the level of National Food Health Standards. The concentrations and accumulation of Cd in the grains were highest at $63\text{ kg}\text{ P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ of phosphate application rate, which was significantly higher than the control. At $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of phosphate fertilizer, however, Cd concentration in the grains was closed to that of control, and Cd concentrations in the stems and leaves decreased significantly as well. Absorption of Cd in shoots declined with the rates of phosphate fertilizer and the fertilizer rate at which Cd absorption in shoots was 100% was $116.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ for early rice cultivar and $174.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ for late rice cultivar. These results indicate that applying phosphate fertilizer at early rice: $81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and late rice: $63\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ would not only maintain rice yield, but also make grain and soil ecological safety.

Keywords: phosphorus fertilizer; cadmium; accumulation; rice

收稿日期:2013-06-25

基金项目:广西自然科学基金(2012GXNSFBA053062, 2013GXNSFBA019057);农业部科技专项(201203030, 201003014);广西农科院基金(2012YZ20, 2013YQ01, 2013YQ02, 2013YF06);国家自然科学基金(31060087, U1033004);广西农转资金项目(桂科转 1222017-4);国家农转资金项目(2012GB2E100355)

作者简介:区惠平(1983—),女,广东江门人,助理研究员,研究方向为作物营养与生态环境。E-mail:ouhuiping2006@163.com

*通信作者:谭宏伟 E-mail:hwtan@public.nn.gx.cn

镉(Cd)是一种重金属元素,在环境系统中迁移极为活跃^[1],可通过植物吸收经食物链进入人体,严重威胁人类健康,已被公认为是对人类最具威胁的主要有毒重金属之一。水稻是我国重要的粮食作物,在人们生活中占有举足轻重的作用。近来,有关大米Cd含量超标的问题日益突出,在国内外已经引起高度重视。

天然Cd存在于磷矿中,随磷矿的开采、冶炼,施用粗制品磷肥等进入农田,污染土壤。据估计,在人类活动对土壤Cd的贡献中,磷肥占54%~58%,空气沉降占39%~41%,污泥占2%~5%^[2]。人们对磷肥施用的关注已超出原来单纯的农学效应,其潜在Cd的环境污染问题及相应的食品安全与人类健康问题更加备受关注。国外研究表明,长期施用含Cd磷肥将显著增加土壤Cd全量^[3-5]及有效含量^[5],两者间呈显著的剂量效应^[6];施用高Cd磷肥或增施含Cd磷肥均可促进作物Cd累积量增加^[7-8]。说明磷肥中的Cd可对土壤环境以及农产品的Cd安全产生显著影响。

随着环境污染的加剧,我国学者对污染稻田上磷肥施用下水稻Cd累积的影响也开展了相应研究^[9-11],但均忽视磷肥中的Cd对水稻Cd累积的影响。针对未污染稻田上由低Cd磷肥不同施用量诱发的水稻Cd累积更是未见报道。本实验采用田间试验,研究低Cd磷肥不同施用量下水稻地上部茎叶和稻谷对土壤Cd的吸收、分布和累积特征,分析其吸收率,以期为磷肥的合理施用以及水稻生产中控制和减少水稻对土壤Cd的吸收提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

采用大田试验,于2011—2012年在广西武鸣里

建英才村稻田进行。供试水稻品种早、晚稻2011年分别为泸香658和丰两优一号,2012年为良丰优339和Y两优6号。供试土壤为砂页岩发育的水稻土,有机质32.2 g·kg⁻¹,pH(H₂O)7.25,全氮1.55 g·kg⁻¹,全磷1.01 g·kg⁻¹,全钾4.14 g·kg⁻¹,碱解氮128 mg·kg⁻¹,有效磷19.9 mg·kg⁻¹,有效钾132 mg·kg⁻¹,全镉0.107 mg·kg⁻¹。大田所用磷肥2011年早稻为钙镁磷肥,其中P₂O₅含量18%,Cd含量0.065 mg·kg⁻¹。2011年晚稻及2012年早、晚稻均为过磷酸钙,含P₂O₅量14%,Cd含量0.083 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

磷肥施用量以P₂O₅计,以农民习惯磷肥施用量为基础,采用翻倍施用量效仿多年连续累积施用量。共设3个施P₂O₅水平,并用P1、P2和P3表示,其中P1处理为单造当地农民习惯施用磷肥量,P2和P3处理分别为1年和2年累计施用量,以不施磷肥作为对照(P0处理)。氮、磷、钾肥具体施用量和伴随磷肥施用进入稻田的Cd含量见表1。每处理3次重复,随机区组排列。小区面积19.52 m²(4 m×4.88 m),小区四周用高33 cm的铝塑板围起,铝塑板交接口用塑料薄膜密封,以防小区间跑水、蹿水、串肥。早稻于3月28—4月1日播种,4月21日移栽;晚稻于7月5—12日播种,7月30—8月4日移栽,种植密度33兜·m⁻²,每穴2苗。磷肥作为基肥在水稻种植前一次施入,氮肥和钾肥分别用尿素和氯化钾,按基肥:分蘖肥:穗肥比为3:3:4和1:0:1的比例施用。水分管理与病虫害防治与周围大田管理一致。

1.3 取样及分析

在水稻收割前,每小区取6穴(边上3行不动,取生长均匀并有代表性的小块3×2=6穴)平地收获地上部,分茎叶、稻谷二个部位,其中茎叶切短为2~3 cm

表1 水稻N、P₂O₅、K₂O施用量及伴随磷肥施用进入土壤的Cd含量

Table 1 Application rates of N, P₂O₅, K₂O for rice and cadmium inputs to soil via phosphate fertilizer

年份 Year	处理 Treatments	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
		P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	Cd/kg·hm ⁻²	N/kg·hm ⁻²	K ₂ O/kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	Cd/mg·hm ⁻²	N/kg·hm ⁻²	K ₂ O/kg·hm ⁻²
2011	P0	0	0	172.5	121.5	0	0	172.5	108
	P1	81	29.30			63	37.22		
	P2	162	58.59			126	74.43		
	P3	324	117.18			252	148.86		
2012	P0	0	0	169.1	121.5	0	0	172.5	108
	P1	75.6	44.66			63	37.22		
	P2	151.2	89.32			126	74.43		
	P3	302.4	178.63			252	148.86		

后混合均匀,于 105 ℃杀青 30 min,60 ℃烘干粉碎,过 60 目筛备用,稻谷晒干不脱壳,粉碎。用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ (2:1, V/V)湿法消化^[12],石墨炉原子吸收法^[13]测定 Cd 含量。地上部对磷肥中 Cd 的吸收率(%)=(施磷区植株地上部 Cd 累积量-对照区植株地上部 Cd 累积量)/随磷肥施用进入土壤的 Cd 含量。在水稻收获时,全小区分稻秆及稻谷测产。

1.4 数据处理

数据处理、作图、方差分析等采用 Excel 2007 和 DPS 7.05 等软件完成,采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施磷量对水稻产量的影响

由表 2 可以看出,施磷显著增加水稻稻谷和稻秆产量。与对照相比,稻谷产量施磷处理在 2011 年早、晚稻分别提高 10.7%~15.1%和 9.2%~10.7%,2012 年提高 12.1%~18.8%和 11.3%~22.8%,差异达到显著水平($P<0.05$);稻秆产量以 P3 处理最高,早、晚稻分别较 P0 处理显著提高 13.0%和 6.9%(2011 年)以及 18.8%和 23.0%(2012 年)。磷肥施用下,稻谷和稻秆产量 P1 与 P2 处理间均无显著差异($P>0.05$),相近或显著低于 P3 处理。

2.2 施磷量对水稻茎叶和稻谷 Cd 含量的影响

由表 3 可看出,茎叶和稻谷 Cd 含量均低于国家粮食卫生控制标准 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的规定(GB 2762—2005)。施磷显著影响水稻对 Cd 的吸收,且因施用量的不同而有所差异。P1 处理下稻谷 Cd 含量最高,在 2011 年和 2012 年晚稻分别较 P0 处理显著提高 12.1%和 10.5%,较 P3 处理显著提高 17.1%和 7.2%,

与 P2 处理差异不显著($P>0.05$);除了 2011 年早稻外,稻谷中的 Cd 含量 P0 处理均与 P3 处理差异不显著($P>0.05$)。说明 P1 处理显著提高晚稻稻谷对 Cd 的吸收。当施磷量增加至 P3 处理时,稻谷 Cd 含量又显著下降至对照水平。

由表 3 还可看出,施磷量对水稻茎叶中的 Cd 含量也有显著的影响。在 P1 处理下,茎叶中的 Cd 含量与对照差异不显著($P>0.05$)。然而,当磷肥施用量增至 P3 处理时,除了 2011 年晚稻外,茎叶中的 Cd 含量 P3 处理均显著低于 P0 和 P1 处理($P<0.05$)。说明 P3 处理有降低水稻茎叶对 Cd 吸收的趋势。

2.3 施磷量对水稻 Cd 累积量及磷肥中 Cd 吸收率的影响

由表 4 可以看出,稻谷 Cd 累积量 P1 和 P2 处理显著高于对照($P<0.05$),P3 处理相当或显著高于对照;茎叶 Cd 累积量在 2012 年也表现出 P1 和 P2 处

表 3 施磷量对水稻 Cd 含量的影响($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Effects of phosphate fertilizer on Cd contents in rice

年份 Year	处理 Treatments	稻谷 Grains		茎叶 Stems and leaves	
		早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
2011	P0	0.021a	0.056bc	0.050a	0.065b
	P1	0.023a	0.063a	0.051a	0.066ab
	P2	0.023a	0.060ab	0.043b	0.069a
	P3	0.018b	0.054c	0.045b	0.068ab
2012	P0	0.021b	0.051c	0.031a	0.054a
	P1	0.026a	0.057a	0.033a	0.057a
	P2	0.022b	0.055ab	0.032a	0.059a
	P3	0.021b	0.053bc	0.026b	0.042b

表 2 施磷量对水稻产量的影响

Table 2 Effect of phosphate fertilizer on rice yield

稻季 Rice season	处理 Treatments	2011		2012	
		稻谷产量 Grain yield/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	稻秆产量 Straw biomass/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	稻谷产量 Grain yield/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	稻秆产量 Straw biomass/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
早稻 Early rice	P0	7270b	7370c	5752b	7477b
	P1	8048a	7750b	6451a	8277a
	P2	8272a	7948b	6539a	8472a
	P3	8371a	8326a	6831a	8885a
晚稻 Late rice	P0	5047b	5769b	6270c	8765c
	P1	5510a	6070ab	6976b	9605b
	P2	5552a	6145ab	7292ab	10051b
	P3	5588a	6169a	7698a	10784a

注:不同小写字母分别代表处理间差异达到显著水平($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. The same as follow.

理显著高于对照($P<0.05$);除了 2011 年早稻 P0 与 P2 和 P3 处理相当外,施磷均显著提高水稻地上部 Cd 的累积量。可见,在 P1~P2 的范围内,施磷有增加水稻茎叶、稻谷及地上部 Cd 累积量的趋势。

由表 4 还可知,随施磷量的增加,水稻地上部对磷肥中 Cd 的吸收率呈下降趋势。在 P1 处理下,无论是早稻还是晚稻,水稻地上部对磷肥中 Cd 的吸收率最高,为 195.4%~386.8%;在 P2 处理下,早稻和晚稻地上部对磷肥中 Cd 的吸收率平均为 48.8% 和 198.1%;P3 处理下平均为 11.3%和 42.3%。说明磷肥施用量在调控水稻地上部对磷肥中 Cd 的吸收有重要作用,同时暗示地上部对磷肥中 Cd 吸收率的大小可能影响磷肥中 Cd 在土壤中的残留。

为了进一步了解水稻地上部 Cd 累积量与随磷肥进入土壤的 Cd 累积量两者相持衡时的施磷量,本文对施磷量与地上部对磷肥中 Cd 的吸收率进行了回归方程拟合(表 5)。结果表明,两者间关系可用指

数方程进行描述,相关系数均达到极显著水平。按此方程式计算,随磷肥进入土壤的 Cd 基本被水稻地上部完全吸收时的磷肥施用量早、晚稻分别为 116.6、174.6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3 讨论

研究指出,Cd 是生物迁移性极强的重金属,极易被植物尤其水稻吸收并在体内积累,超过一定限度可能会产生毒害而影响正常产量^[14]。本研究中,施磷显著增加稻谷和稻秆产量。说明磷肥中虽然含有一定量的 Cd,但对水稻并无减产作用,试验在田间观察中也并没有发现水稻 Cd 毒害的症状。这可能与随磷肥进入土壤的 Cd 含量较低有关。众多研究表明,低浓度 Cd 对植物生长有积极的“刺激作用”,而较高的 Cd 含量才会对作物产生毒害作用^[15-16]。范中亮等^[17]研究表明,水稻土 Cd 安全临界值为 0.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本试验中稻田土壤 Cd 含量为 0.107 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,伴随磷肥施用进

表 4 施磷量对水稻 Cd 累积量和吸收率的影响

Table 4 Accumulation and absorption of Cd in rice as influenced by phosphate rates

年份 Year	稻季 Rice season	处理 Treatments	Cd 累积量 Cd accumulation/ $\text{mg}\cdot\text{hm}^{-2}$			地上部对磷肥中 Cd 的吸收率 Cd absorption in shoots/%
			稻谷 Grains	茎叶 Stems and leaves	合计 Total	
2011	早稻 Early rice	P0	153.2b	367.8bc	521.0b	
		P1	188.8a	396.4a	585.2a	219.2a
		P2	187.9a	344.9c	532.8b	20.2b
		P3	153.3b	374.8ab	528.1b	6.1b
	晚稻 Late rice	P0	283.2c	372.84b	656.1c	
		P1	346.6a	400.2ab	746.8a	243.9a
		P2	333.2ab	424.6a	757.9a	136.8b
		P3	299.9bc	416.9a	716.8b	40.8c
2012	早稻 Early rice	P0	118.9c	229.4b	348.3d	
		P1	166.1a	269.5a	435.6a	195.4a
		P2	144.3b	273.1a	417.4b	77.4b
		P3	147.7b	230.0b	377.6c	16.4c
	晚稻 Late rice	P0	321.8b	478.5c	800.3d	
		P1	394.8a	549.5b	944.3b	386.8a
		P2	400.4a	592.9a	993.3a	259.3b
		P3	407.0a	458.7c	865.7c	43.9c

表 5 施磷量与地上部对磷肥中 Cd 的吸收率的关系及磷肥中的 Cd 基本被水稻地上部完全吸收时的磷肥施用量

Table 5 Relationship between phosphate rates and Cd absorption in shoot and P application rates at 100% Cd absorbed in shoot

稻季 Rice season	回归方程 Regression equation	r	磷肥中的 Cd 基本被水稻完全吸收时的磷肥施用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Phosphate application rate at 100% Cd absorbed in shoots
早稻 Early rice	$y=429.551\ 4e^{-0.012\ 5x}$	0.924 2**	116.6
晚稻 Late rice	$y=647.682\ 3e^{-0.010\ 7x}$	0.960 8**	174.6

注: $n=6, r_{0.05}=0.811\ 40, r_{0.01}=0.917\ 2$ 。

入土壤的Cd含量最高也仅为 $178\text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表1),相当于 $7.9\times 10^{-5}\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,远低于Cd的安全临界值,故水稻受磷肥中Cd含量的影响较弱,而受磷的影响较大。这与当前生产研究中磷肥促进水稻产量的结论是一致的^[18-19]。由稻谷产量在不同的施磷处理间差异不显著推断,P1水平(早稻 $81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、晚稻 $63\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)是水稻适宜的施磷量。

水稻地上部尤其稻谷中Cd含量的多少直接关系到人类的健康。目前研究显示,水稻地上部对Cd的吸收累积表现为茎>叶>稻谷^[21-22]。这与本试验的结果基本一致。另外,所有处理中稻谷Cd含量均低于国家粮食卫生控制标准,说明施低Cd磷肥不会造成稻谷Cd超标。

研究表明,磷肥影响作物Cd的吸收累积,且因磷肥种类、含Cd量及施用量的不同而不同^[9,23-24]。本研究结果表明,P1处理(早稻 $81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、晚稻 $63\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著增加水稻稻谷Cd含量及稻谷、茎叶和地上部Cd累积量;当磷肥施用量增至 $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上时,稻谷Cd含量降至对照水平,而茎叶Cd含量显著低于对照。说明磷肥对稻谷Cd含量的影响表现出“低促高抑”现象,与Chen等^[24]报道的磷肥对小麦Cd吸收表现出“低抑高促”不同。这可能与所施用的磷肥不同有关,Chen等所用的是磷酸二氢钙,本试验用的是钙镁磷肥和过磷酸钙。当施磷量为 $0.2\text{ g P}_2\text{O}_5\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤,除磷酸氢钙对水稻Cd吸收表现出促进作用外,钙镁磷肥、过磷酸钙、磷酸一铵、磷酸二氢钾等均表现出抑制作用^[9]。

关于磷肥施用量对作物Cd吸收表现“低促”的原因,一方面归因于土壤有效Cd含量在低磷下促进、高磷下抑制^[25],另一方面,低磷肥施用量促进了水稻根系的发育,使根系与生长介质的接触面积增大,从而增多了根系吸收Cd的几率^[26]。相反,过量施用磷肥可诱导土壤pH值和表面电荷的提高从而促进土壤Cd固定^[27],其本身的磷、Cd沉淀也可降低Cd的生物有效性^[28],磷肥尤其钙镁磷肥、过磷酸钙等含Ca磷肥可提高土壤交换性Ca含量,引发作物Ca、Cd吸收竞争从而降低作物Cd吸收^[9]。

水稻对磷肥中Cd的吸收率直接关系到磷肥中Cd在土壤中的残留。本研究结果表明,随磷肥施用量的增加,水稻地上部对磷肥中Cd的吸收率呈下降趋势。在P1处理下,早、晚稻地上部对磷肥中Cd的吸收率均超过100%。说明该施磷量下,除了源于磷肥中的Cd基本上可被水稻地上部带走,不会对土壤造

成Cd残留外,还可促进水稻对源于土壤中Cd的吸收累积。然而,当磷肥施用量由 $126\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增至 $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,2011和2012年晚稻地上部对磷肥中Cd的吸收率分别由136.8%和259.3%显著下降至40.8%和43.9%。说明磷肥施用量在调控水稻地上部对磷肥中Cd的吸收有重要作用,同时暗示磷肥中Cd在土壤中的残留可能随磷肥施用量的增加而增加。指数回归方程表明,磷肥施用带入土壤的Cd含量基本被水稻地上部完全吸收时的磷肥施用量早、晚稻分别为 116.6 、 $174.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,均高于水稻的适宜施磷量(早稻 $81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、晚稻 $63\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。由此推断,按现有适宜施磷量施用,既能兼顾水稻产量、又能保障稻谷、土壤生态安全。

4 结论

施用低Cd磷肥显著增加水稻稻谷和稻秆产量,但不同施磷量间稻谷产量差异不显著,且各处理稻谷、茎叶Cd含量均在国家粮食卫生控制标准规定内;施磷显著影响稻谷、茎叶对土壤Cd的吸收累积,P1处理显著提高晚稻稻谷Cd含量和茎叶、稻谷及地上部Cd累积量,而P3处理显著降低茎叶Cd含量;水稻对磷肥中Cd的吸收率随施磷量的增加而下降;当施磷量低于 $81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水稻稻谷和地上部对磷肥中Cd的吸收率均超过100%。上述结果说明按现有施磷量(早稻 $81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、晚稻 $63\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)施用,既能兼顾水稻产量,又能保障稻谷、土壤生态安全。

参考文献:

- [1] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risk[J]. *Biomaterials*, 2004, 17(5): 549-553.
- [2] 何振立. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1998:129-130.
HE Zhen-li. Pollution and soil chemical balance of the beneficial elements[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1998:129-130.
- [3] McGrath D, Tunney H. Accumulation of cadmium, fluorine, magnesium, and zinc in soil after application of phosphate fertilizer for 31 years in a grazing trial[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(4):548-553.
- [4] Rochayati S, Verloo M, Laing G Du. Availability of cadmium and zinc as affected by the use of reactive phosphate rock, lime, and chicken manure on an Indonesian acidic upland soil under field conditions [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(16):1986-2003.
- [5] Lambert R, Grant C, Sauvé S. Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizer[J]. *Science of the Total*

- Environment*, 2007, 378(3):293-305.
- [6] Jafarnejadi A R, Sayyad G, Homae M, et al. Spatial variability of soil total and DTPA-extractable cadmium caused by long-term application of phosphate fertilizers, crop rotation, and soil characteristics[J]. *Environ Monit Assess*, 2013, 185(5):4087-4096.
 - [7] Cardoso G V, José M E, Pereira F R, et al. Cadmium bioavailability in phosphate fertilizers[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2008, 32: 2871-2875.
 - [8] Pérez A L, Anderson K A. DGT estimates cadmium accumulation in wheat and potato from phosphate fertilizer applications[J]. *The Science of the Total Environment*, 2009, 407(18):5096-5103.
 - [9] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6):1585-1590.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6):1585-1590.
 - [10] 董善辉, 李 军, 赵 梅. 磷对镉污染土壤中水稻吸收积累镉的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41(9):39-42.
DONG Shan-hui, LI Jun, ZHAO Mei. Influence of phosphate application on rice absorbing and accumulation of Cd in Cd polluted paddy soil [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(9):39-42.
 - [11] 甲卡拉铁, 喻 华, 冯文强, 等. 不同磷、钾肥对水稻产量和吸收镉的影响研究[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(4):990-995.
JIA Ka La-tie, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effects of different phosphate and potassium fertilizers on yields and cadmium uptake by paddy rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Science*, 2009, 22(4):990-995.
 - [12] 鲁如坤. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
LU Ru-kun. Routine analysis methods of soil agricultural chemical[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
 - [13] Wang T S, Fang F X, Yang Y X, et al. Determination of cadmium and lead in sugarcane by graphite furnace atomic absorption spectrometer with zeeman correction[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, 12(5):630-631, 638.
 - [14] 熊礼明, 鲁如坤. 镉在水稻体内的分布及其影响因素[J]. *土壤*, 1992(3):138-141, 145.
XIONG Li-ming, LU Ru-kun. Cadmium distribution in rice and its influencing factors[J]. *Soils*, 1992(3):138-141, 145.
 - [15] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5):1863-1868.
HE Jun-yu, WANG Yang-yang, REN Yen-fang, et al. Effect of cadmium on root morphology and physiological characteristics of rice seedlings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1863-1868.
 - [16] Patra J, Lenka M, Panda B B. Tolerance and co-tolerance of the grass *Chloris barbata* Sw. to mercury, cadmium and zinc[J]. *New Phytology*, 1994, 128:165-171.
 - [17] 范中亮, 季 辉, 杨 菲, 等. 不同土壤类型下 Cd 和 Pb 在水稻籽粒中累积特征及其环境安全临界值[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4):792-797.
 - FAN Zhong-liang, JI Hui, YANG Fei, et al. Accumulation characteristics of Cd and Pb in rice grain and their security threshold values in paddy field under different soil types[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4):792-797.
 - [18] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4):795-802.
WANG Wei-ni, LU Jian-wei, LU Ming-xing, et al. Effect of phosphorus fertilizer application and phosphorus use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4):795-802.
 - [19] 王苏影, 潘晓华, 吴建富, 等. 施磷量对双季早、晚稻产量及稻米品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(2):39-43.
WANG Sun-ying, PAN Xiao-hua, WU Jian-fu, et al. Effects of amount P-applied on yield and rice quality of double-cropping rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(2):39-43.
 - [20] 方 辉, 张 颖, 范媛媛, 等. 镉胁迫对水稻收获种子质量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(4):773-775.
FANG Hui, ZHAGN Yin, FAN Yuan-yuan, et al. Effects of cadmium application on the quality of the harvested seeds of rice[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(4):773-775.
 - [21] 赵 雄, 李福燕, 张冬明, 等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11):2236-2240.
ZHAO Xiong, LI Fu-yan, ZHANG Dong-ming, et al. Relationship between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2236-2240.
 - [22] 张法英, 周鸿凯, 吕建慧, 等. 湛江水稻生产环境及其稻米中 Cd 的安全性评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3):510-515.
ZHANG Fa-ying, ZHOU Hong-kai, LÜ Jian-hui, et al. Safety evaluation of cadmium in rice production area: A Case study in Zhanjiang City of Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3):510-515.
 - [23] Iretskaya S N, Chien S H, Menon R G. Effect of acidulation of high cadmium containing phosphate rocks on cadmium uptake by upland rice[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201(2):183-188.
 - [24] Chen S, Sun T H, Sun L N, et al. Influence of phosphate nutritional level on the phytoavailability and speciation distribution of cadmium and lead in soil[J]. *Journal of Environmental Science*, 2006, 18(6):1247-1253.
 - [25] Hong C O, Lee D K, Kim P J. Feasibility of phosphate fertilizer to immobilize cadmium in a field[J]. *Chemosphere*, 2008, 70:2009-2015.
 - [26] 刘文菊, 张西科, 谭俊璞, 等. 磷营养对苗期水稻地上部累积镉的影响[J]. *河北农业大学学报*, 1998, 21(4):28-32.
LIU Wen-ju, ZHANG Xi-ke, TAN Jun-pu, et al. The effect of P in nutrient solution on Cd accumulated by rice shoot in the seedling stage[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1998, 21(4):28-32.
 - [27] Bolan N S, Adriano D C, Duraisamy P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils: I. Effect of phosphate addition[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250(1):83-94.
 - [28] Matusik J, Bajda T, Manecki M. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(3):1332-1339.