

张祥城,黄园园,吴茂前,等. 钾肥用量对冷浸田水稻产量及养分吸收的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(10):57-63.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.10.011

钾肥用量对冷浸田水稻产量及养分吸收的影响

张祥城¹,黄园园¹,吴茂前²,孔祥琼¹,袁彬¹,周继文¹,段中荣³,李永鹏³

(1. 湖北省兴山县耕地质量与肥料管理站,湖北兴山 443700; 2. 湖北省农业科学院植保土肥研究所/

湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心/国家农业环境潜江观测实验站/农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室,湖北武汉 430064;

3. 湖北省兴山县古夫镇农业技术推广中心,湖北兴山 443700)

摘要:以水稻品种宜香 107 为试验材料,通过田间试验研究不同钾肥(K_2O)用量 0、150、225、300 kg/hm^2 (K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3)对水稻产量及构成因素、养分吸收及钾肥利用率的差异,建立水稻钾肥效应方程,计算水稻最高产量及经济最佳施钾量。结果表明:施钾显著提高水稻产量,增产幅度为 10.1%~16.5%,钾肥用量与籽粒产量有极显著的二次曲线关系;施钾对产量构成影响从大到小顺序为每穗实粒数>有效穗数>千粒质量;适量的钾肥施用量可以促进水稻对氮、磷的吸收,提高氮肥、磷肥的利用率;水稻秸秆钾含量占全株 80%以上,籽粒占 13.2%~20.2%,施钾增加了水稻植株中钾的积累量,同时提高了秸秆中钾的分配比例;水稻钾肥利用效率范围为 19.6%~30.7%,以 150 kg/hm^2 处理最高,钾肥偏生产力随钾肥用量的增加而下降。钾肥农学利用率随着钾肥用量的增加呈先提高后降低的趋势。综合考虑提高水稻产量、经济施肥量、钾肥利用效率及维持土壤钾素平衡等因素,建议鄂西山区及同类地区冷浸田的施钾量为 150~225 kg/hm^2 ,且水稻秸秆直接还田是缓解土壤钾素缺乏的有效措施。

关键词:施钾量;水稻产量;养分吸收;钾肥利用率;冷浸田

中图分类号: S511.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)10-0057-07

冷浸田是指长期被水浸渍,造成冷、烂、毒、瘦为主要特征的一类水田,是我国主要的中低产田之一^[1]。水稻是湖北省第一大粮食作物,种植面积和产量分别占全省粮食作物总量的 50% 和 67%,在粮

食生产和消费中占有重要地位^[2]。湖北省冷浸田的面积为 29.5×10^4 hm^2 ,占全省水稻田面积的 14.47%。由于冷浸田长期渍水,土体还原性强,缺乏有效钾成了冷浸田水稻生产的重要障碍因子,也成为提高湖北省粮食产量的主要障碍^[3]。钾是植物必需的大量营养元素之一,增施钾肥是提高水稻产量的有效途径^[4-6]。关于钾肥对水稻产量的影响已有较多报道,但目前尚缺乏对鄂西冷浸田水稻肥料养分吸收、累积及利用方面较为系统的研究。因此,本试验通过田间试验,对冷浸田不同钾肥用量对水稻产量、养分吸收累积及钾肥利用率的影响进行系统研究,明

收稿日期:2020-07-14

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201303089);国家测土配方施肥补贴项目[编号:农办财(2008)54号]。

作者简介:张祥城(1984—),男,湖北宜昌人,农艺师,主要从事农业环境与耕地质量保护工作研究。E-mail:258351435@qq.com。

通信作者:吴茂前,助理研究员,主要从事作物营养与施肥、农业面源污染监测与防治技术研究。E-mail:22391013@qq.com。

[7]唐清杰,严小微,徐靖,等. 海南普通野生稻资源不同生长期耐旱性鉴定与筛选[J]. 福建农业学报,2017,32(2):130-133.

[8]陆岗,蔡庆生,梁耀懋,等. 水稻种质资源苗期耐旱性鉴定初报[J]. 广西农业科学,1998(4):7-8.

[9]孔宪旺,孙明茂. 水稻不同种质苗期耐旱性综合评价[J]. 江西农业学报,2019,31(4):1-7.

[10]黄丽娟. 动态聚类新方法及其最优聚类算法研究[D]. 扬州:扬州大学,2006.

[11]顾世梁. 实现动态聚类全局最优的一种算法[J]. 江苏农学院学报,1996(1):57-65.

[12]陆林花. 一种新的基于遗传算法的动态聚类算法[J]. 计算机仿真,2009,26(7):122-125,158.

[13]姜灵敏. 基于改进遗传算法的动态聚类方法及其应用[J]. 科技管理研究,2005,25(11):217-219.

[14]谢全敏,夏元友. 基于遗传算法的边坡稳定性评价的动态聚类法[J]. 岩土力学,2002,23(2):170-172,178.

[15]陈庭木,方兆伟,王宝祥,等. 非线性回归模型参数估计的轮回选择算法[J]. 江苏农业科学,2019,47(18):253-260.

[16]王宝祥,余剑锋,徐波,等. 水稻种质资源耐旱性鉴定与评价[J]. 北方农业学报,2018,46(5):1-8.

[17]陈庭木,徐大勇,秦德荣,等. 偏相关与通径分析的 EXCELVBA 程序设计[J]. 农业网络信息,2007(3):101-103.

[18]朱旭东. 水稻与陆稻的耐旱性及产量潜力的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

确冷浸田水稻钾肥的适宜用量,以期为鄂西山区钾肥施用提供理论依据,发挥冷浸田的生产潜力、为粮食增产和农业实际生产提供借鉴和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2013 年在湖北省宜昌市兴山县高桥乡龚家桥村三组进行,地处 110°32'E、31°13'W,海拔为 650 m。供试土壤类型为紫色水稻土,土体厚度为 50 cm,耕层厚度 20 cm,耕层质地为沙壤,地力中等,灌排条件一般,位于河谷平坝。前茬为油菜。

试验前采集耕层土壤,测定基础土壤养分状况:pH 值为 7.3,土壤有机质 33.8 g/kg,碱解氮 125 mg/kg,速效磷 9.9 mg/kg,速效钾 30 mg/kg,参照养分分级标准^[7],速效钾为极缺乏水平。供试水稻品种为宜香 107。供试肥料品种分别为尿素(N,46%)、过磷酸钙(P₂O₅,12%)、硫酸钾(K₂O,51%)。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,3 次重复,每个小区面积 24 m²(3 m×8 m)。各小区间做土埂,以防肥水互串。以试验品种为保护行。试验钾肥用量设置 4 个水平(K₀、K₁、K₂、K₃),K₂O 用量分别为 0、150、225、300 kg/hm²。施 N 180 kg/hm²,P₂O₅ 90 kg/hm²;氮肥 40% 作底肥,60% 作为追肥(栽后 7~12 d 施下);磷钾肥全部作底肥一次性施入。基肥均匀撒施后耙田,追肥撒施。

水稻采用育秧移栽的方式,4 月 15 日播种,5 月 30 日移栽。小区面积 24 m²,种植密度按当地习惯,行距 20 cm、株距 15 cm,小区移栽株数为 644 株。移栽当天施基肥,6 月 8 日施分蘖肥,9 月 22 号收获,各小区单收单晒,并单称单独计产。本试验供试作物全生育期生长正常,无明显灾害性因素影响。试验区除草、病虫害及防治按农户常年习惯操作。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 在水稻移栽前采集 0~20 cm 土壤样品,用碱解扩散法分析测定土壤碱解氮含量,用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法测定土壤速效磷含量,用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定土壤速效钾含量,用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量^[7]。

1.3.2 农艺性状的测定 水稻收获前,每个小区取 5 株长势均匀的水稻植株,分别测定株高、有效穗数、千粒质量、谷草比等。

1.3.3 植株干物质质量及氮、磷、钾素的测定 成熟期随机取水稻植株样,把籽粒、秸秆分开,105℃ 杀青 30 min,再在 70℃ 烘干至恒质量,随后称其干物质的质量,并将其磨碎过筛用于水稻氮、磷、钾含量的测定,测定方法采用半微量凯氏定氮法^[7]。

1.4 钾素吸收与利用计算方法

钾素吸收与利用的计算公式^[8]如下:
钾肥利用率 RE_K=(施钾区地上部总吸钾量-不施钾区地上部总吸钾量)/施钾量×100%;
钾肥偏生产力 PFP_K(kg/kg)=施钾区籽粒产量/钾肥施用量;
钾肥农学利用率 KAE_K(kg/kg)=(施钾区籽粒产量-无钾区籽粒产量)/钾肥施用量;

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 统计软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同施钾量对水稻产量的影响

2.1.1 不同施钾量对水稻产量的影响 表 1 表明,施用钾肥可以提高水稻的产量。不同施钾处理水稻产量增幅在 10.1%~16.5% 之间,增产效果达到显著水平(P<0.05),其中 K₂ 增产效果达到极显著水平(P<0.01)。各施钾处理(K₁~K₃)之间的产量略有差异,但是没有达到显著水平。随着施钾量的提高,水稻的产量也提高,施钾量为 225 kg/hm² 时,产量达到最高,为 7 570.4 kg/hm²,相对 K₀ 增幅也达到最高,为 16.5%;但是当施钾量超过 225 kg/hm² 时,产量逐渐下降。说明施用钾肥可以提高水稻产量,但是当钾肥施用过量时会对水稻产量产生不利影响。

表 1 不同施肥量对水稻产量的影响

处理	水稻产量(kg/hm ²)				增产率(%)
	重复 1	重复 2	重复 3	平均	
K ₀	6 587.9	6 220.1	6 683.8	6 497.3Bb	
K ₁	7 553.4	6 908.8	7 008.0	7 156.7ABa	10.1
K ₂	7 774.7	7 210.1	7 726.3	7 570.4Aa	16.5
K ₃	7 406.3	7 151.4	7 024.0	7 193.9ABa	10.7

注:同列数据后不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异显著。表 3、表 6 同。

2.1.2 不同施钾量对水稻经济效益的影响 从表 2 可以看出,水稻收益各处理表现为 K₀<K₁<K₃<K₂,收益最低的是 K₀ 处理,收益最高的是 K₂ 处理,

说明施用钾肥可以增加水稻收益,并且呈现出先增加后下降的趋势。合适的施钾量可以使水稻净收益增收 4.1% ~ 7.5%,当施钾量为达到 300 kg/hm² 时,水稻净收益反而相较不施肥降低 2.2%。说明施用钾肥可以增加水稻收益,但是肥料成本也相应增加,当钾肥施用过量时会导致水稻净收益下降,甚至出现净收益低于不施钾肥的现象。综上所述,在鄂西山区冷浸田水稻施钾量为 150 ~ 225 kg/hm² 时,可以增加稻田净收益。

表 2 不同施钾处理对水稻经济效益的影响

处理	水稻收益 (元/hm ²)	肥料成本 (元/hm ²)	净收益 (元/hm ²)	增收 (元/hm ²)	增幅 (%)
K ₀	17 542.6	1 296.0	16 246.6		
K ₁	19 323.1	2 413.5	16 909.6	663.0	4.1
K ₂	20 440.0	2 972.3	17 467.7	1 221.1	7.5
K ₃	19 423.5	3 531.0	15 892.5	-354.1	-2.2

注: 肥料价格为: N, 4.6 元/kg; P₂O₅, 5.2 元/kg; K₂O, 7.45 元/kg。粮食价格为 2.7 元/kg。

表 3 不同施钾处理对水稻产量构成因子的影响

处理	单株有效穗数 (个)	株高 (cm)	千粒质量 (g)	每穗实粒数 (粒/个)	理论产量 (kg/hm ²)	实际产量 (kg/hm ²)
K ₀	8.8b	90Cc	29.8a	73.2Cc	5 148.8Cc	6 497.3Bb
K ₁	9.7a	105ABb	31.2a	81.7Bb	6 622.1Bb	7 156.7ABa
K ₂	10.0a	115Aa	30.6a	103.9Aa	8 518.0Aa	7 570.4Aa
K ₃	9.7a	105ABb	29.6a	74.2Cc	5 520.0BCbc	7 193.9ABa

2.2 水稻的肥料效应与最佳施钾量的确定

水稻成熟后,小区实收实打,以 3 个重复的平均产量作为小区产量。根据水稻田间试验中不同钾肥用量与产量之间的关系(图 1),用一元二次方程建模,模拟得出产量(y)与施肥量(x)之间的关系方程 $y = -0.019x^2 + 8.3166x + 6474.2$ ($r^2 = 0.9018$),通过模拟方程计算,当施钾量 $x_N = 218.9$ kg/hm² 时,有最大值 $y = 7384.3$ kg/hm²,该值与 K₂ 处理的施钾量(225 kg/hm²)最接近,说明 K₂ 即为供试地区最高产量的施钾量。在经济施钾量方面,按 $x_e = (P_F/P_R - b)/2a$ (其中 P_F 为 K₂O 的养分价格, P_R 为水稻收购价格, $a = -0.019$, $b = 8.3166$) 计算。根据目前市场情况,设定 $P_F = 7.45$ 元/kg, $P_R = 2.70$ 元/kg,计算得出钾肥的经济施肥量为 146.2 kg/hm²,该值与 K₁ 处理的施钾量(150 kg/hm²)最接近,说明 K₁ 即为供试地区最经济产量的施钾量。

2.1.3 不同施钾量对水稻产量构成因子的影响

施用钾肥对水稻产量构成因子产生重要影响,表 3 显示,施用钾肥可以显著提高水稻株高、单株有效穗数、每穗实粒数,并且都呈现出先增加后下降的趋势。其中单株有效穗数、株高、每穗实粒数都以 K₂ 处理最高,分别为 10.0 个、115 cm、103.9 粒/个,与 K₀ 相比分别提高了 13.6%、27.8%、41.9%,其中单株有效穗的增加显著 ($P < 0.05$),株高和每穗实粒数增加极显著 ($P < 0.01$)。钾肥对水稻千粒质量也有影响, K₁、K₂、K₃ 处理分别较 K₀ 增加 4.7%、2.7%、-4.0%,但是差异不显著。水稻构成因子都先随着钾肥用量的增加而增加,当超过一定值后开始下降,表明适宜的钾肥用量可以提高水稻有效穗数、千粒质量和穗实粒数,从而提高水稻产量。施钾对产量构成影响的顺序为有穗实粒数 > 有效穗数 > 千粒质量。

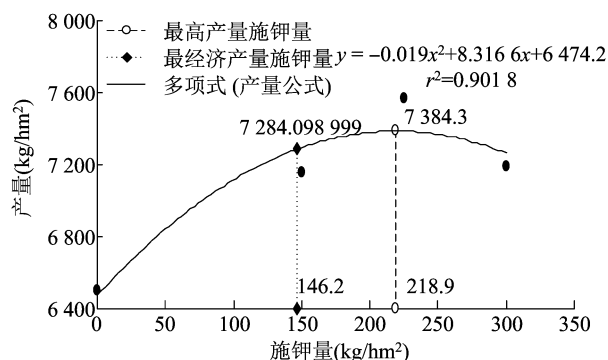


图 1 不同施钾量与产量模拟方程

2.3 不同施钾量对水稻养分吸收的影响

2.3.1 不同施钾量对水稻养分含量的影响 成熟期水稻秸秆养分含量和钾肥施用量有显著关系(图 2),水稻秸秆体内全氮含量随钾肥用量增加而降低,并且水稻秸秆体内氮的含量与施钾量呈显著的负相关性($r^2 = 0.9262$)。而水稻秸秆钾含量与施

钾量呈现显著的正相关性($r^2 = 0.893\ 3$),即水稻植株全钾含量随着钾肥用量的增加而增高。而水稻秸秆全磷含量与施钾量呈现显著的二次曲线关系($r^2 = 0.937\ 1$)。随着钾肥用量的增加,水稻秸秆的全磷含量呈现先增加后降低的趋势,在施钾量为 $150\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,水稻秸秆的磷含量最高。随着钾肥用量的提高,水稻植株体内钾所占的比例也相对增高。这说明施用钾肥可使水稻植株体内氮的含量下降,改变了氮磷钾比例关系,从而有利于水稻的各种生理代谢。

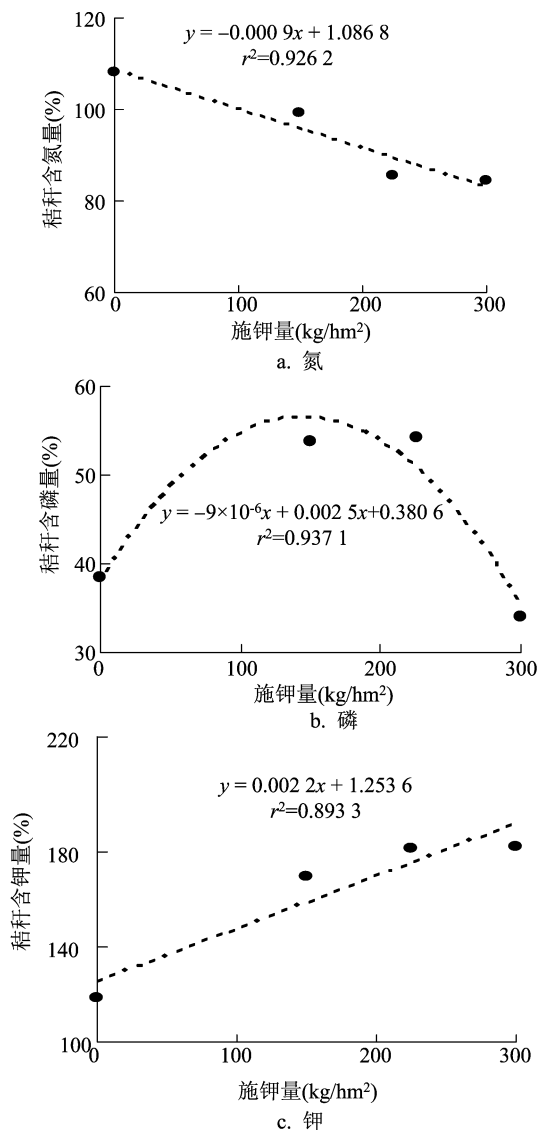


图2 不同施钾量对水稻秸秆养分含量的影响

水稻籽粒氮、磷、钾含量都与钾肥用量呈现显著的二次曲线关系,都随着钾肥用量的增加呈现先增加后降低的趋势(图3)。水稻籽粒氮和磷的含量在钾肥用量为 $150\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时最高,随后降低;籽粒钾含量则在钾肥用量为 $225\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时达到最高。

说明施用钾肥可以调整水稻籽粒质量和氮磷钾的养分配比,适宜的钾肥用量可以降低水稻籽粒中氮的含量,从而改善稻米的品质。

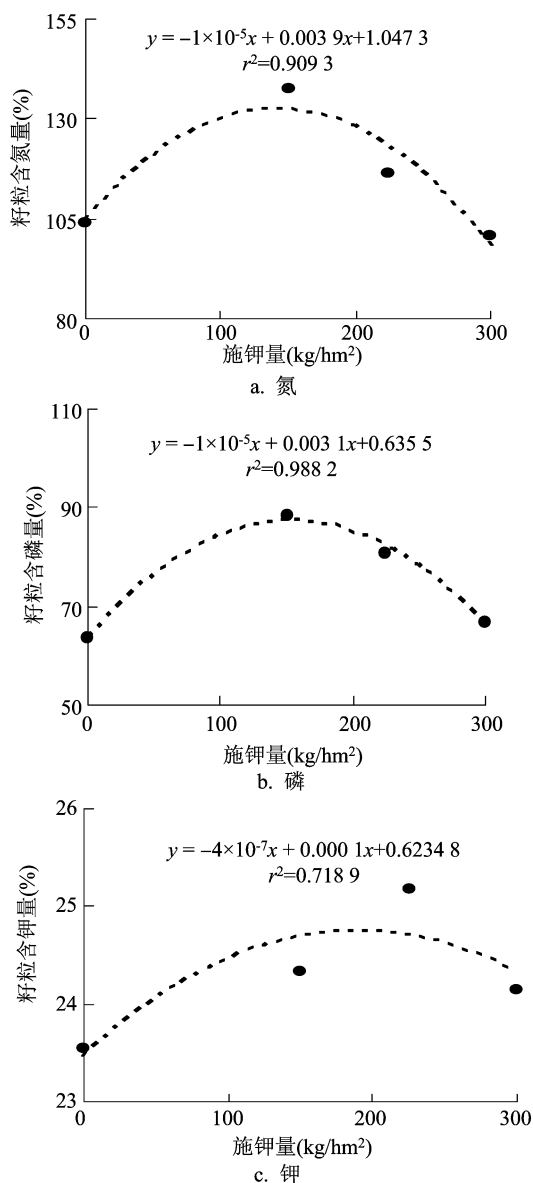


图3 不同施钾量对水稻籽粒养分含量的影响

2.3.2 不同施钾量对水稻氮、磷累积量的影响 水稻氮、磷的累积量与钾肥用量呈现显著的二次曲线关系(图4)。施用钾肥可以增加水稻对氮、磷的吸收,氮的吸收累积量增加了 $2.0\% \sim 30.0\%$,磷的吸收累积量增加了 $13.8\% \sim 58.9\%$ 。当钾肥用量为 $150\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,氮、磷的累积量都达到最大值,分别为 159.6 、 $96.6\ \text{kg}/\text{hm}^2$,较 K_0 处理分别显著增加 30.0% 、 58.9% 。当施钾量超过 $150\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,氮、磷累积量下降。说明适量的钾肥施用量可以促进水稻对氮、磷的吸收,提高氮肥、磷肥的利用率。

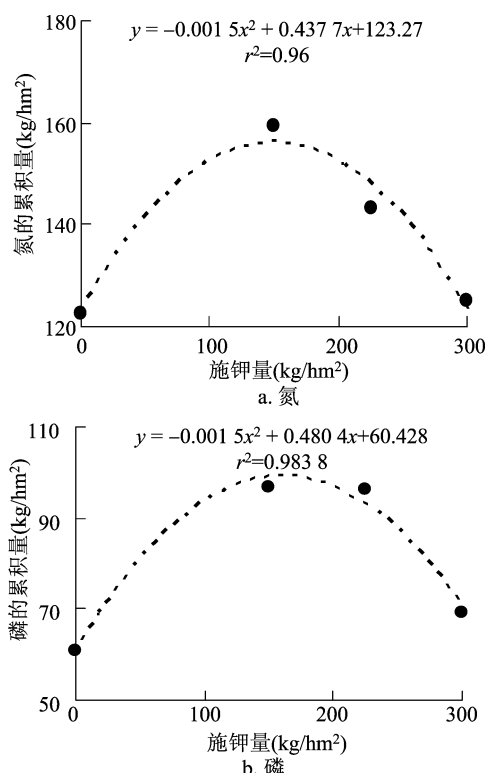


图4 不同施钾量对水稻氮、磷累积量的影响

2.3.3 不同施钾量对水稻钾素养分分配比例、累积量的影响 水稻成熟期秸秆和籽粒的钾素分配比例及累积量因施钾量不同而表现出差异,从分配比例来看(表4),秸秆普遍占到80%以上,籽粒占比在13.2%~20.2%。秸秆钾素分配比例随着钾肥用量的增加而增加。钾素累积量以 K_2 处理最高,比对照提高94.0%,且与其他处理差异显著($P < 0.05$)。与对照相比,钾肥处理并没有提高钾素在籽粒中的分配比例,但是钾肥处理增加了籽粒中钾素累积量,其中以 K_2 处理累积量最高,较对照提高24.8%。水稻植株钾累积量以 K_2 处理最高,较对照提高80.0%。表明适宜的钾肥用量能够提高钾素在籽粒和地上部钾素的累积量,提高钾肥的利用效率。同时水稻秸秆占到钾累积量的80%以上,秸秆还田应该是补充土壤钾素的有效途径。

表4 不同施钾处理对水稻钾素分配比例、累积量的影响

处理	秸秆		籽粒		植株累积量 (kg/hm ²)
	累积量 (kg/hm ²)	分配比例 (%)	累积量 (kg/hm ²)	分配比例 (%)	
K_0	60.6	79.8	15.3	20.2	75.9
K_1	104.5	85.7	17.4	14.3	121.9
K_2	117.5	86.0	19.1	14.0	136.6
K_3	114.2	86.8	17.4	13.2	131.6

2.4 不同施钾量对钾肥利用率的影响

分析水稻钾肥利用效率结果(表5)表明,水稻钾肥利用效率范围为19.6%~30.7%,其中以 K_1 处理最高,说明适量施钾可以提高钾肥利用率,但施钾过量其利用率反而降低。不同施钾处理的钾肥偏生产力呈现出随施钾量的增加而下降的趋势,钾肥用量从150 kg/hm²增加至300 kg/hm²,水稻钾肥偏生产力从47.7 kg/kg下降至24.0 kg/kg。钾肥农学利用率随着钾肥用量的增加呈先提高后降低的趋势, K_2 最高,为4.8 kg/kg, K_3 最低,仅为2.3 kg/kg。钾肥当季利用率与农学利用率不同,随施钾量的增加呈先增后降的趋势,当施钾量超过225 kg/hm²后,钾肥利用率显著下降。

表5 不同施钾处理对钾肥利用率的影响

处理	钾肥利用率 (%)	钾肥偏生产力 (kg/kg)	钾肥农学利用率 (kg/kg)
K_0			
K_1	30.7a	47.7a	4.4a
K_2	27.0a	33.6b	4.8a
K_3	19.6b	24.0c	2.3b

3 讨论和结论

冷浸田土壤速效钾含量较低,是冷浸田中重要的养分限制因子^[9],而施用钾肥是补充土壤钾素的最有效途径^[10]。钾是水稻生长发育所必需的大量营养元素之一,对植物的增产效果明显。已有研究表明,氮、钾之间存在着一定的互作效应,水稻对氮的吸收及所吸收氮形态在一定程度上取决于钾供应;在缺钾稻田,增施氮肥难以增产,必须增施钾肥才能达到增产目的^[11-14]。薛欣欣等研究表明,在钾素极度缺乏田块(试验田块土壤速效钾含量为36 mg/kg)施钾,可以使水稻增产15%~24%^[15]。韦还和等使用甬优12、甬优538水稻品种作为研究材料,结果表明,在基础土壤缺钾条件下(试验田速效钾含量78.45 mg/kg),施钾对水稻增产率分别为9.2%~14.0%、9.8%~15.0%,且以钾肥用量225 kg/hm²处理的产量最高^[16]。本研究结果表明,施钾对水稻有显著的增产效果,增产率为9.2%~15.0%。在一定的钾肥施用量范围内,随钾肥用量的增加,水稻产量相应增加,当钾肥施用量继续增加,水稻产量呈现下降的趋势,这与王强盛等研究^[17]一致。本试验中,当施钾量达到225 kg/hm²

后,水稻产量随施钾量的增加而下降。从经济效益方面分析,适量施钾(150~225 kg/hm²)可以增加水稻收益,净收益增幅在 4.1%~7.5%,增幅显著;过量施钾,净收益会降低。依据水稻产量与施钾量的关系建立一元二次方程模型分析,得出最高产量的施钾量为 218.9 kg/hm²,与实际最高产量处理(K₂)施钾量差异不大。经济施肥量方面,钾肥的经济施用量为 146.2 kg/hm²,与 K₁ 施钾量差异不大。本试验条件下,湖北鄂西地区冷浸田水稻的适宜施钾量为 150~225 kg/hm²。

钾肥的施用在一定程度上可以增加水稻的有效穗数、单株粒数,降低稻谷的空瘪率,提高作物产量^[18-19]。这与本研究相似,适量施入钾肥增强了水稻的分蘖能力,提高了水稻单株成穗率,同时提高了每穗实粒数,从而提高了水稻产量。但施钾量过高时,对产量会产生不利影响。施钾对产量构成影响的顺序为每穗实粒数>有效穗数>千粒质量。

柳金来等研究发现,钾肥用量与水稻植株体内全氮含量呈极显著负相关,与水稻植株全钾含量呈极显著正相关;随着钾肥用量的提高,水稻植株体内钾所占的比例和百分比相对增加;水稻低产时植株体内氮的比例高,而高产时水稻植株体内氮的比例低^[8],这与本研究相似。本试验水稻秸秆中,钾肥用量与全氮含量呈极显著负相关,与全钾含量呈极显著正相关,与全磷含量呈显著二次曲线关系。水稻籽粒氮、磷、钾含量都与钾肥用量呈现显著的二次曲线关系,施用钾肥可以调整水稻籽粒中氮磷钾的养分配比。适宜的钾肥用量可以降低水稻籽粒中氮的含量,而水稻籽粒氮含量与水稻的蒸煮食味品质密切相关。全氮含量的降低可以减少稻谷中蛋白质的含量,从而提高稻米的食味品质^[20]。王跃鹏研究认为,蛋白质含量与稻米的蒸煮食味品质呈显著负相关^[21]。芮闯等认为,蛋白质含量低、胶稠度长、最高黏度和崩解值大、削减值和恢复值较小、糊化温度低的稻米,其蒸煮食味品质好^[22]。

作物养分积累是物质生产的基础。前人研究表明,水稻对氮、钾的吸收存在互作效应^[23-24],钾肥施用过量会导致水稻对氮素吸收和积累量降低^[25]。这与本研究一致,施用钾肥可以增加水稻对氮、磷的吸收,水稻氮、磷的吸收累积量与钾肥用量呈显著的二次曲线关系,当施钾量超过 150 kg/hm² 时,氮、磷累积量下降,说明适量的钾肥施用量可以促进水稻对氮、磷的吸收,提高氮、磷肥的利用率。这

与侯云鹏等的研究^[26]一致,这主要是由于适宜的钾肥用量可以促进水稻叶片叶绿素的合成,提高光合效率,进而提高作物对氮、磷养分的吸收。过量施用钾肥会使叶片的叶绿素含量和光合效率下降,从而影响作物对氮、磷养分的吸收与利用。

水稻钾素的吸收和积累是产量形成的基础,受施钾水平的影响显著。王宜伦等研究表明,钾素供应过量或不足,均不利于春玉米养分吸收和干物质积累,最终影响产量^[27]。郭鑫年等研究发现,水稻秸秆钾素分配比例随着钾肥用量的增加呈先升高后降低的趋势,而钾肥用量能够提高钾素在籽粒和地上部钾素的累积量,降低空秕粒钾素累积量,提高钾肥的利用效率^[28]。本试验结果显示,施钾后籽粒和秸秆中钾元素相对含量升高,不同施钾处理间籽粒、秸秆吸钾量和水稻总吸钾量的变化趋势基本一致,均随钾肥用量的提高而增加,特别是秸秆吸钾量和水稻总吸钾量受钾肥影响较大;但籽粒吸钾量占总吸钾量的比值随钾肥用量提高而降低。其中 K₂ 处理的秸秆、籽粒钾素累积量最高,比 K₀ 分别提高 94.0%、24.7%。水稻地上部钾素总吸收量 K₂ 处理较 K₀ 提高 80.0%,表明适宜的钾肥用量能够提高钾素在籽粒和地上部钾素的累积量。同时水稻秸秆占到钾累积量的 80%,这部分钾素主要以离子形式存在,可以快速释放到土壤中被作物吸收利用^[29],所以秸秆还田应该是补充土壤钾素的有效途径。程文龙等认为,秸秆还田可以替代 1/3 的化学钾肥而对稻油轮作制周年作物的总产量无明显负效应,并且秸秆还田配施钾肥还有利于弥补土壤钾素的亏缺,这对维持土壤养分平衡有重要意义^[30]。顾文杰等研究发现,通过秸秆还田可以提高冷浸田水稻产量,并提高土壤有机碳含量,此外还提高了土壤碱解氮含量、微生物数量和微生物碳含量,改善了土壤的理化性质^[31]。

肥料利用效率是表征合理施肥的重要指标,我国钾肥利用率仅为 30%~35%^[32]。大量研究表明,随着钾肥用量的提高,作物产量和钾吸收量增加,钾肥利用效率降低。本试验中钾肥的利用率较低,和紫色土土层浅薄、土壤质地轻、土壤发育浅、结构差、土壤保水能力低有关,且紫色土土壤饱和渗漏率大(可达 2~3 mm/min),土壤下渗水量大,钾素容易淋失,从而导致肥料利用率低下^[33]。本研究中,钾肥利用率和偏生产力随着钾肥用量的增加呈降低的趋势,钾肥用量为 150 kg/hm² 时,钾肥利

用效率最高,达到 30.7% 左右。钾肥农学利用率表现为随施钾量的增加呈先提高后降低的趋势。因此,钾肥利用效率等指标并不是越高越好,而是在维持较高的目标产量前提下,减少钾肥的损失才具有实际意义。

综上所述,在鄂西山区冷浸田施用钾肥可以提高水稻单株成穗数和实粒数,从而提高水稻的产量,适量施用钾肥可以提高氮素、磷素、钾素吸收累积量并提高其利用率。综合考虑提高水稻产量、经济施肥量、钾肥利用效率及维持土壤钾素平衡等因素,建议鄂西山区及同类地区冷浸田的施钾量为 $150 \sim 225 \text{ kg/hm}^2$,同时水稻秸秆直接还田是缓解土壤钾素缺乏的有效措施。

参考文献:

- [1] 柴娟娟,廖敏,徐培智,等. 我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析[J]. 水土保持学报,2012,26(2):284-288.
- [2] 万丙良,游艾青. 湖北水稻种植业发展对策思考[J]. 农业科技管理,2018,37(2):56-59,66.
- [3] 李清华,王飞,何春梅,等. 福建省冷浸田形成、障碍特性及治理利用技术研究进展[J]. 福建农业学报,2011,26(4):681-685.
- [4] 付谨,郑诗樟,樊俊,等. 几种钾肥对水稻产量、品质及土壤养分的影响[J]. 湖北农业科学,2010,49(8):1826-1830.
- [5] 叶定池,林华,赵佩欧,等. 钾肥施用技术对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 安徽农学通报,2007,13(17):91-92.
- [6] 王强盛,甄若宏,丁艳锋,等. 钾肥用量对优质梗稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(10):1444-1450.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:30-107.
- [8] 柳金来,宋继娟,周柏明,等. 钾肥施用量与土壤肥力和植株养分及水稻产量的关系[J]. 土壤肥料,2003(2):21-23,32.
- [9] 黄兆强. 福建冷浸田的低产因素及其改良利用[J]. 土壤肥料,1996(3):13-15.
- [10] 李清华,王飞,林诚,等. 增施钾肥对冷浸田水稻生理及植株铁吸收累积的影响[J]. 福建农业学报,2015,30(3):243-248.
- [11] 李华,杨肖娥,罗安程. 不同氮源与钾水平对杂交组合及常规稻生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(3):278-284.
- [12] 魏媛媛,杜春颖,刘梦红,等. 施钾量及配比对寒地水稻干物质积累量及产量的影响[J]. 北方水稻,2019,49(5):5-12.
- [13] 廖育林,郑圣先,聂军,等. 不同类型生态区稻-稻种植制度中钾肥效应及钾素平衡研究[J]. 土壤通报,2008,39(3):612-618.
- [14] 董环,娄春荣,王秀娟,等. 氮、钾运筹对设施番茄产量、果实

- 硝酸盐含量及土壤硝态氮含量的影响[J]. 江苏农业学报,2019,35(2):378-383.
- [15] 薛欣欣,李岚涛,鲁剑巍,等. 利用功能叶片钾含量作为水稻钾营养诊断指标的可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(2):492-499.
- [16] 韦还和,孟天瑶,李超,等. 钾肥用量对甬优籼粳杂交稻物质积累及其产量的影响[J]. 作物学报,2016,42(8):1201-1214.
- [17] 王强盛,甄若宏,丁艳锋,等. 钾对不同类型水稻氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2009,35(4):704-710.
- [18] 钱永稳,余媛,张爱平,等. 磷钾肥施用对水稻产量与经济效益的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(26):12845,12905.
- [19] 倪道理,王美娥,袁晓明,等. 不同钾肥施用量对水稻产量和品质的影响[J]. 上海农业科技,2013(6):112-113,122.
- [20] 石吕. 水稻精米蛋白质含量与稻米品质变化的关系[D]. 扬州:扬州大学,2017.
- [21] 王鹏跃. 稻米蛋白质及组成对其蒸煮食味品质影响的研究[D]. 杭州:浙江工商大学,2016.
- [22] 芮闯,刘莹,孙建平. 蛋白质与大米食味品质的相关性分析[J]. 食品科技,2012,37(3):164-167,171.
- [23] 王伟妮,鲁剑巍,何予卿,等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学,2011,25(6):645-653.
- [24] 张国发,尤凤丽. 施钾对寒地水稻氮肥吸收和利用效率的影响[J]. 湖北农业科学,2011,50(2):247-249.
- [25] 陈小琴,周健民,王火焰,等. 氮肥形态及氮钾施用措施对水稻生长和养分吸收的影响[J]. 中国农学通报,2007,23(6):376-382.
- [26] 侯云鹏,杨建,孔丽丽,等. 水稻养分吸收和转运及产量对施钾的响应[J]. 吉林农业大学学报,2018,40(1):17-24.
- [27] 王宜伦,韩燕来,谭金芳,等. 钾肥对砂质潮土夏玉米产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 玉米科学,2008,16(4):163-166.
- [28] 郭鑫蒙,蒙静,田旭东,等. 钾肥用量对水稻钾素分配累积、钾肥利用效率及平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(6):154-160.
- [29] Yu C J, Qin J G, Xu J, et al. Straw combustion in circulating fluidized bed at low-temperature transformation and distribution of potassium[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering,2010,88(5):874-880.
- [30] 程文龙,韩上,武际,等. 连续秸秆还田替代钾肥对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(5):72-78.
- [31] 顾文杰,解开治,徐培智,等. 秸秆还田及腐熟剂对水稻冷浸田理化性状及作物产量的影响[J]. 广东农业科学,2015,42(5):39-42.
- [32] 姜子绍,宇万太. 农田生态系统中钾循环研究进展[J]. 应用生态学报,2006,17(3):545-550.
- [33] 王齐齐,徐虎,马常宝,等. 西部地区紫色土近 30 年来土壤肥力与生产力演变趋势分析[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(6):1492-1499.