

# 双季稻田土壤基础地力和养分利用效率对长期施肥的响应

鲁艳红<sup>1,2</sup> 廖育林<sup>1,2</sup> 聂军<sup>1,2\*</sup> 周兴<sup>1,2</sup> 谢坚<sup>1,2</sup> 杨曾平<sup>1,2</sup>

(1 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙, 410125; 2 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南长沙, 410125)

**摘要:** 研究长期不同施肥对土壤基础地力和氮磷钾养分吸收利用效率的影响, 探明土壤基础地力变化和氮磷钾养分吸收利用效率差异及其相互关系。采集双季水稻种植制度下 33 年长期定位施肥试验的不施肥 (CK)、施氮磷钾肥 (NPK) 和氮磷钾肥配施稻草 (NPKS) 3 个处理的土壤, 设置施肥与不施肥盆栽试验, 监测水稻产量、土壤基础地力产量和基础地力贡献率、水稻氮磷钾养分吸收量、氮磷钾养分利用效率; 研究长期不同施肥对土壤基础地力和氮磷钾养分吸收利用效率的影响, 探讨土壤基础地力变化和氮磷钾养分吸收利用效率差异及其相互关系。结果表明, 早晚稻土壤基础地力产量和基础地力贡献率大小顺序均为 NPKS > NPK > CK, NPKS 处理土壤早晚稻两季平均基础地力产量和基础地力贡献率较 CK 处理土壤分别增加 113.8% 和 93.7%, NPK 处理分别增加 100.7% 和 81.9%。在同一施肥水平下, 早、晚稻均以 NPKS 处理的土壤基础地力较高, 其氮、磷、钾肥偏生产力、土壤养分依存率、氮、磷、钾素收获指数也较高, 但氮、磷、钾肥回收利用率、肥料农学效率、肥料对产量的贡献率则较低。回归分析表明, 氮、磷肥回收利用率、氮、磷、钾肥农学效率、氮、钾素生理利用率均随土壤基础地力贡献率的提高呈显著或极显著降低; 氮、磷、钾肥偏生产力、氮、磷、钾素土壤依存率随土壤基础地力贡献率的提高呈显著或极显著提高。长期施用氮磷钾肥和长期氮磷钾肥配施稻草均能提高土壤基础地力, 以后者效果更显著。在较高基础地力土壤上生产, 可以在保证作物高产稳产的情况下实现减量化施肥, 实现农业生产的可持续性。

**关键词:** 长期施肥; 双季稻田; 土壤基础地力; 养分利用效率

随着我国人口增长和经济的发展, 对粮食的需求也日益增多, 如何保证粮食安全已成为亟待解决的问题。但是, 目前我国耕地仍然面临中低产田面积大、障碍因子多等问题<sup>[1]</sup>, 严重制约了粮食生产潜力的发挥。

基础地力是指在特定立地条件、土壤剖面理化性状、农田基础设施建设水平下, 经过多年水肥培育后, 当季旱地无水肥投入、水田无养分投入时的土壤生产能力<sup>[2]</sup>。长期不同施肥会使土壤基础地力朝向不同方向发展, 中低产田改良过程也是土壤地力培育和提升过程。据估算, 通过低产田改造可实现增加粮食产量 390 亿公斤, 潜力巨大<sup>[3]</sup>。因此, 通过合理施肥提高土壤质量和土地生产力, 调控农田基础地力与肥料高效和作物高产有关的重要过程, 不但可保证作物高产稳产的情况下实现减量化施肥, 而且对挖掘农田生产潜力、增加水稻产量、提高养分利用效率、优

化养分资源管理和实现农业可持续发展具有现实指导意义。施肥尤其是长期施肥制度是水稻增产稳产的重要途径, 也是土壤基础地力培育的重要措施。合理均衡施肥或有机无机肥合理配施能缓慢培育或维持土壤肥力, 而长期非均衡或不施肥则可能导致作物产量下降、土壤养分比例失衡、养分耗竭<sup>[4-5]</sup>。研究表明, 农田基础地力提升对农作物的产量有非常重要的作用, 基础地力越高, 作物产量也越高; 土壤基础地力的提高还对减少化肥的投入, 减少对环境的负担也有重要意义<sup>[6]</sup>。但以往有关长期施肥的研究较多集中在长期施肥对作物养分吸收、养分利用效率和土壤肥力的影响等方面, 从基础地力与作物养分吸收和肥料利用效率相互关系角度的研究还鲜有报道。

目前关于农田基础地力研究大多基于长期定位试验的不施肥处理, 然而长期不施肥处理土壤处于一种长期养分

基金项目: 国际植物营养研究所 (IPNI) 资助项目 (IPNI-HN-18)

作者简介: 鲁艳红 (1974-), 女, 湖北武穴人, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养与作物高效施肥研究

E-mail: luyanhong6376432@163.com

通讯作者: 聂军 (1972-), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究员, 主要从事土壤与施肥原理方面的研究 E-mail: junnie@foxmail.com

消耗状态, 其产量只能反映长期不施肥条件下的土壤基础地力状况, 而不能反映其他施肥措施下农田的实际基础地力状况<sup>[2]</sup>。因此有研究利用裂区法将原有长期施肥小区进行了划分, 如曹承富等在长期定位试验基础上增设多年连续施肥与当年不施肥的处理来研究长期不同施肥对砂姜黑土土壤基础地力的影响<sup>[7]</sup>。该方法可以较为客观地研究长期不同施肥措施下土壤基础地力的变化, 但当前大部分长期定位试验的面积不大, 尤其是我国南方水田长期定位试验, 采用裂区法将对农艺操作带来诸多不便, 也会对长期定位试验造成不可恢复的破坏。

因此, 本文以 33 年 66 季水稻种植后的不同施肥处理土壤为基础, 采用盆栽试验施肥与不施肥的对比盆栽试验, 以当季不施肥产量表示基础地力产量, 以当季不施肥产量与施肥产量的比值表示基础地力贡献率, 能够较为客观准确地表征长期不同施肥模式下的基础地力状况。研究长期不同施肥早晚稻产量和土壤基础地力贡献率的差异, 分析长期不同施肥模式对氮磷钾肥养分吸收利用效率和对土壤氮磷钾养分依存率的差异, 探讨氮磷钾肥养分利用效率、土壤氮磷钾养分依存率与土壤基础地力的相互关系, 阐明长期施肥稻田土壤基础地力变化和氮磷钾养分利用效率及其响应机制, 旨在为双季稻田土壤的地力培育和合理施肥提供基础数据和科学支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

长期定位施肥试验位于湖南省长沙市望城区黄金乡(北纬 28°16'24", 东经 112°49'24" 海拔 100 米), 定位试验开始于 1981 年。供试土壤为第四纪红土发育的水稻土(粉质轻粘土, 土壤分类为普通筒育水耕人为土)。定位试验前 0-15 厘米土壤的主要化学性状为: pH6.6, 土壤有机质 34.7 克/公斤, 全氮 2.05 克/公斤, 全磷 0.66 克/公斤, 全钾 14.1 克/公斤, 碱解氮 151.0 毫克/公斤, 有效磷 10.2 毫克/公斤, 速效钾 62.3 毫克/公斤<sup>[8]</sup>。

试验共设 9 个处理, 每个处理 3 次重复。本研究选择其中 3 个处理土壤进行盆栽试验, 包括: 不施任何肥料(CK)、施氮磷钾化肥(NPK)和氮磷钾化肥配施稻草(NPKS)。在 1981-2013 年期间, 氮肥(N)按早稻 10 公斤/亩和晚稻 12 公斤/亩施入; 磷肥(P)按早稻、晚稻各 2.58 公斤/亩施入; 钾肥(K)按早稻、晚稻各 6.64 公斤/亩施入; 稻草按每年 280 公斤/亩(折合养分 N 2.85 公斤/亩, P 0.37 公斤/亩和 K 7.28 公斤/亩)施入。

盆栽试验于 2014 年在湖南省农业科学院盆栽试验场进行。2013 年晚稻收获后采集长期定位试验 CK、NPK 和 NPKS 三种处理的耕层土壤(0-15 厘米)进行装盆。在长期施肥处理土壤基础上设置常规施肥(施 NPK 化肥, CF)和不施肥(NF)处理, 5 次重复。试验采用的陶瓷钵高 32.0 厘米, 直径 20.0 厘米, 用于盆栽试验的土壤风干过 5 毫米筛, 混合均匀后按每盆 10.0 公斤土装盆, 浸水两天使土壤完全湿润后再施基肥。盆栽试验氮肥(N)按早稻 1.38 克/盆和晚稻 1.60 克/盆施入; 磷肥(P)按早稻、晚稻各 0.35 克/盆施入; 钾肥(K)按早稻、晚稻各 0.89 克/盆施入; 插秧时每盆 3 穴, 化肥品种、水稻品种、农事操作方式和时间与长期定位施肥试验一致<sup>[9-10]</sup>。盆栽试验前 3 处理土壤的基本理化性状见表 1。

### 1.2 样品采集与测定

水稻成熟后每个钵钵单独测产。盆栽试验前采集定位试验 CK、NPK 和 NPKS 三个处理的耕层(0-15 厘米)土样, 用于基本理化性状的测定。早、晚稻成熟期采集植株样品用于测定籽粒和稻草的氮、磷、钾含量。植株氮、磷、钾养分和土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾的含量采用常规分析法测定<sup>[11]</sup>。

### 1.3 数据处理

基础地力产量(公斤/盆)= 不施肥区籽粒产量

基础地力贡献率(%)= 不施肥区籽粒产量 / 施肥区籽粒产量 × 100%

表 1 不同长期施肥处理土壤的基本理化性状

长期施肥处理	有机质 (克/公斤)	全氮 (克/公斤)	碱解氮 (毫克/公斤)	全磷 (克/公斤)	速效磷 (毫克/公斤)	全钾 (克/公斤)	速效钾 (毫克/公斤)
CK	32.75	2.25	106.51	0.57	4.82	13.8	55.6
NPK	35.97	2.51	118.49	1.05	21.25	13.9	104.6
NPKS	38.49	2.96	134.26	1.21	23.36	14.0	128.5

1) CK: 不施任何肥料; NPK: 施氮磷钾化肥; NPKS: 氮磷钾化肥配施稻草, 下同。

肥料贡献率 (%) = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量) / 施肥区籽粒产量 × 100%

籽粒养分吸收量 (公斤/盆) = 籽粒产量 × 籽粒养分含量

地上部某种养分总吸收量 (公斤/盆) = 籽粒产量 × 籽粒某种养分含量 + 秸秆产量 × 秸秆某种养分含量

肥料回收利用率 (%) = (施肥区地上部某种养分吸收量 - 不施肥区地上部某种养分吸收量) / 施肥量 × 100%

肥料农学效率 (公斤稻谷/公斤养分) = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量) / 施肥量

氮(磷/钾)肥料偏生产力 (公斤稻谷/公斤养分) = 施肥区籽粒产量 / 氮(磷/钾)施肥量

氮(磷/钾)素生理利用率 (公斤稻谷/公斤养分) = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量) / (施肥区地上部吸氮(磷/钾)量 - 不施肥区地上部吸氮(磷/钾)量)

土壤氮(磷/钾)素依存率 (%) = 不施肥区地上部吸氮(磷/钾)量 / 施肥区地上部吸氮(磷/钾)量 × 100%

氮(磷/钾)素收获指数 = 籽粒吸氮(磷/钾)量 / 地上部吸氮(磷/钾)量

数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.5 等数据处理系统。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同施肥对土壤基础地力的影响

#### 2.1.1 长期不同施肥对基础地力产量和施肥处理产量的影响

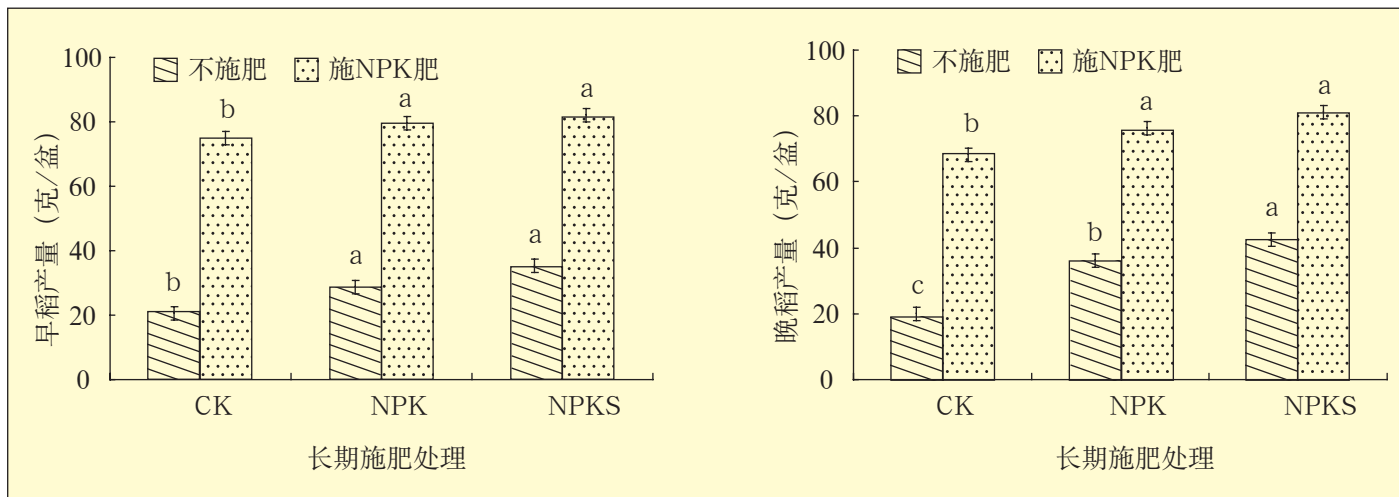
长期不同施肥模式对基础地力产量有显著影响(图 1)。3 个处理的早晚稻基础地力产量(不施肥产量)均表现为: NPKS > NPK > CK。经过 33 年 66 季水稻种植

后, 与 CK 处理相比, NPK 处理早、晚稻基础地力产量分别提高 38.5% 和 88.7%, NPKS 处理分别提高 68.1% 和 123.5%; 且 CK 与 NPK、NPKS 处理间土壤的早晚稻基础地力产量差异均达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。说明长期施 NPK 肥或长期 NPK 肥配施稻草有利于维持和提高土壤基础地力产量, 长期不施肥则导致土壤基础地力产量降低。

施肥处理的早晚稻产量也表现为: NPKS > NPK > CK(图 1), CK 处理与 NPK 和 NPKS 处理间产量差异均达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。说明在相同施肥条件下, 基础地力越高的土壤其作物高产潜力越大。进一步分析发现, 施用相同用量肥料时基础地力低的土壤其早晚稻增产幅度大于基础地力高的土壤, 长期定位试验 CK 处理土壤上施用氮磷钾肥早晚稻产量较不施肥分别提高 265.3% 和 259.4%; NPK 处理土壤上早晚稻分别提高 180.1% 和 110.7%; NPKS 处理土壤上早晚稻分别提高 136.6% 和 89.6%。

#### 2.1.2 长期不同施肥对基础地力贡献率和肥料贡献率的影响

基础地力贡献率是表征土壤基础地力水平高低的另一个指标, 经过 33 年 66 季水稻种植后, 长期不同施肥对红壤性水稻土基础地力贡献率影响有明显差异(图 2)。早晚稻土壤基础地力贡献率均表现为: NPKS > NPK > CK, NPKS、NPK 与 CK 处理间差异达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。与 CK 处理相比, NPK 处理早稻基础地力贡献率增加 8.4 个百分点, 提高 30.5%, NPKS 处理增加 14.9 个百分点, 提高 54.5%; 晚稻 NPK 处理增加 19.7 个百分点, 提高 70.8%, NPKS 处理增加 25.0 个百分点, 提高 90.1%。说明长期氮磷钾肥配合施用或有机无机肥长



采用 Duncan 新复极差法进行多重比较, 不同字母处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 长期不同施肥对土壤基础地力产量和施肥产量的影响



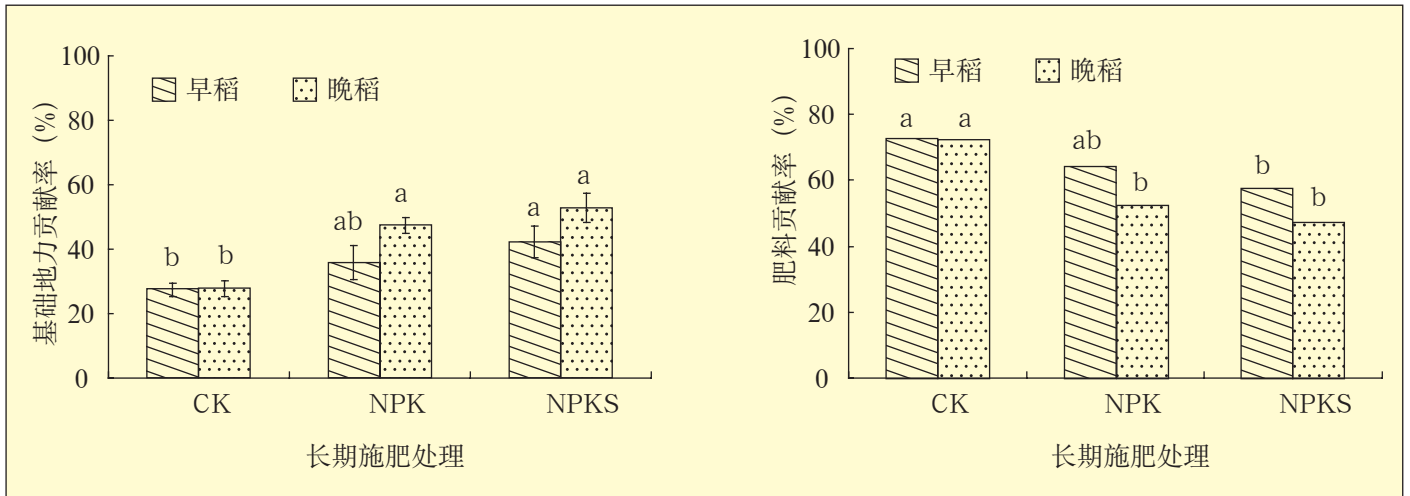


图 2 长期不同施肥对土壤基础地力贡献率和肥料贡献率的影响

期配施有利于土壤基础地力贡献率的维持或提高，而长期不施肥则导致土壤基础地力贡献率降低。

长期不同施肥处理土壤的早晚稻肥料贡献率表现为 CK > NPK > NPKS (图 2)，处理间差异均达显著水平 ( $p < 0.05$ )。CK、NPK 和 NPKS 处理土壤的早稻肥料对产量的贡献率分别为 72.6%、64.3% 和 57.7%，晚稻的肥料贡献率分别为 72.2%、52.6% 和 47.2%。早晚稻肥料对产量的贡献率随土壤基础地力的提高而降低。

## 2.2 长期不同施肥土壤双季水稻氮磷钾养分吸收利用

### 2.2.1 长期不同施肥土壤双季水稻氮素吸收量、利用效率和土壤氮素依存率

长期不同施肥对双季水稻氮素养分吸收积累量、氮素养分利用效率和土壤氮素依存率有明显影响 (表 2)。盆

栽试验条件下无论施肥或不施肥，籽粒吸氮量和地上部吸氮量均表现为 NPKS > NPK > CK。

在施肥量相同条件下，3 个处理土壤的早、晚稻氮肥农学效率均表现为 CK > NPK > NPKS，随土壤基础地力的提高而降低；早、晚稻氮肥偏生产力、土壤氮素依存率表现为 NPKS > NPK > CK，随土壤基础地力的提高而增加；早稻氮素生理利用率在 89.3 - 97.2 公斤 稻谷 / 公斤 N 之间变化，晚稻在 64.0 - 81.7 公斤 稻谷 / 公斤 N 之间变化；早稻氮肥回收利用率在 37.5% - 44.2% 之间变化，均表现为：CK > NPK > NPKS，随土壤基础地力提高有所降低，晚稻氮肥回收利用率在 35.0% - 38.4% 之间变化，CK 和 NPK 处理高于 NPKS 处理，但早晚稻不同基础地力土壤上氮肥回收利用率的差异均没达到显著水平。

在不施肥条件下，早稻氮收获指数在 0.59 - 0.68 之

表 2 长期不同施肥对双季水稻氮养分吸收利用指标的影响

长期施肥处理	盆栽试验施肥处理	籽粒吸氮量 (公斤/盆)	地上部吸氮量 (公斤/盆)	氮素收获指数	氮肥回收利用率 (%)	氮肥农学效率 (公斤/公斤)	氮素生理利用率 (公斤/公斤)	氮肥偏生产力	土壤氮素依存率 (%)
早 稻									
CK	NF	0.23e	0.39e	0.59d	--	--	--	--	--
	CF	0.70b	1.00b	0.71bc	44.2a	39.4a	89.3a	54.3b	38.9b
NPK	NF	0.34d	0.51d	0.66c	--	--	--	--	--
	CF	0.78a	1.03b	0.75a	38.5a	37.4a	97.2a	57.6a	48.9a
NPKS	NF	0.42c	0.62c	0.68c	--	--	--	--	--
	CF	0.83a	1.14a	0.73ab	37.5a	34.1a	91.9a	59.1a	54.7a
晚 稻									
CK	NF	0.19f	0.40d	0.48b	--	--	--	--	--
	CF	0.58c	1.01b	0.58a	38.0a	31.0a	81.7a	42.9b	40.0b
NPK	NF	0.29e	0.53c	0.56a	--	--	--	--	--
	CF	0.70a	1.14a	0.61a	38.4a	24.9b	64.0b	47.5a	46.2ab
NPKS	NF	0.35d	0.60c	0.59a	--	--	--	--	--
	CF	0.65b	1.16a	0.56a	35.0a	23.9b	68.7b	50.6a	51.9a

注：早稻、晚稻同列数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

间变化，晚稻氮收获指数在 0.48 - 0.59 之间变化，且均随土壤基础地力的提高而提高；在相同施肥条件下早稻氮收获指数在 0.71 - 0.75 之间变化，晚稻在 0.56 - 0.61 之间变化，早、晚稻均以较高基础地力土壤上较高。

### 2.2.2 长期不同施肥土壤双季水稻磷素吸收量、利用效率和土壤磷素依存率

双季水稻磷养分吸收利用受长期不同施肥方式影响明显(表 3)。无论施肥与否，3 处理籽粒吸磷量和地上部吸磷量均表现为 NPKS > NPK > CK，且 NPK 和 NPKS 处理与 CK 处理间的差异显著 ( $p < 0.05$ )。

在施相同用量肥料条件下，3 处理土壤的早、晚稻磷肥农学效率均表现为：CK > NPK > NPKS，随土壤基础地力的提高而降低；早、晚稻磷肥偏生产力、土壤磷素依存率随土壤基础地力的提高而增加；早、晚稻均以长期 NPK 处理土壤的磷素生理利用率最高；早稻磷肥回收利用率在 29.4% - 32.0% 之间变化，晚稻磷肥回收利用率在 27.2% - 34.5% 之间变化，均以长期不施肥土壤最高。

在不施肥条件下，早稻磷收获指数在 0.74 - 0.78 之间变化，晚稻氮收获指数在 0.62 - 0.71 之间变化，早稻随土壤基础地力变化不显著，晚稻随土壤基础地力提高而提高。施用相同用量肥料时早稻氮收获指数在 0.80 - 0.86 之间变化，晚稻在 0.73 - 0.76 之间变化，早稻随土壤基础地力提高而降低，晚稻变化规律不明显。早晚稻不同基础地力土壤上施 NPK 肥处理的磷素收获指数均高于相应的不施肥处理。

### 2.2.3 长期不同施肥土壤双季水稻钾素吸收量、利用效率和土壤钾素依存率

由表 4 可见，长期不同施肥对早、晚稻籽粒吸钾量、地上部吸钾量均有显著影响。无论施肥还是不施肥，除早稻籽粒吸钾量外，3 处理土壤的籽粒吸钾量及地上部吸钾量均表现为 NPKS > NPK > CK。

在施相同用量肥料条件下，3 处理土壤的早、晚稻钾肥农学效率均表现为：CK > NPK > NPKS，随土壤基础地力的提高而降低；早、晚稻钾肥偏生产力、土壤钾素依存率表现为：NPKS > NPK > CK，随土壤基础地力的提高而增加；早稻钾素生理利用率在 151.1 - 162.2 公斤稻谷 / 公斤  $K_2O$  之间变化，晚稻在 103.9 - 120.3 公斤稻谷 / 公斤  $K_2O$  之间变化，不同基础地力土壤间的差异均不显著；早稻钾肥回收利用率在 34.3% - 38.5% 之间变化，晚稻在 38.0% - 46.7% 之间变化，早晚稻均表现为：CK > NPK > NPKS，钾肥回收利用率均随土壤基础地力提高而降低。

在不施肥条件下，早稻钾素收获指数在 0.17 - 0.29 之间变化，晚稻钾素收获指数在 0.16 - 0.36 之间变化，早稻以 NPK 处理钾素收获指数较高，晚稻钾素收获指数随土壤基础地力的提高而提高；施用相同用量肥料时，早稻钾收获指数在 0.28 - 0.31 之间变化，晚稻 3 处理钾素收获指数均为 0.23，早、晚稻钾素收获指数随土壤基础地力的变化规律不明显。

表 3 长期不同施肥对双季水稻磷养分吸收利用指标的影响

长期施肥处理	盆栽试验施肥处理	籽粒吸磷量 (公斤/盆)	地上部吸磷量	磷素收获指数	磷肥回收利用率 (%)	磷肥农学效率	磷素生理利用率 (公斤/公斤)	磷肥偏生产力	土壤磷素依存率 (%)
早 稻									
CK	NF	0.05e	0.06f	0.78b	--	--	--	--	--
	CF	0.15b	0.17c	0.86a	32.0a	68.0a	486.4a	93.6b	36.1b
NPK	NF	0.09d	0.12e	0.74c	--	--	--	--	--
	CF	0.18a	0.23b	0.81b	29.5a	64.4a	502.8a	99.3a	54.4a
NPKS	NF	0.11c	0.14d	0.77bc	--	--	--	--	--
	CF	0.20a	0.25a	0.80b	29.4a	58.8a	462.4a	101.9a	58.2a
晚 稻									
CK	NF	0.06f	0.09e	0.62b	--	--	--	--	--
	CF	0.16c	0.21c	0.74a	34.5a	62.0a	411.6a	85.9b	43.2b
NPK	NF	0.09e	0.14d	0.65b	--	--	--	--	--
	CF	0.17b	0.24b	0.73a	27.2b	49.9b	412.6a	95.0a	60.4a
NPKS	NF	0.11d	0.16d	0.71a	--	--	--	--	--
	CF	0.20a	0.27a	0.76a	31.4ab	47.9b	350.3b	101.3a	58.9a

表 4 长期不同施肥对双季水稻钾养分吸收利用指标的影响

长期施肥处理	盆栽试验施肥处理	籽粒吸钾量 (公斤/盆)	地上部吸钾量	钾素 收获指数	钾肥回收 利用率 (%)	钾肥农学效率	钾素生理利用率 (公斤/公斤)	钾肥偏生产力	土壤钾素 依存率 (%)
早 稻									
CK	NF	0.04e	0.25d	0.17b	--	--	--	--	--
	CF	0.17b	0.59b	0.29a	38.5a	51.0a	159.7a	70.2b	42.5b
NPK	NF	0.09c	0.30cd	0.29a	--	--	--	--	--
	CF	0.20a	0.64ab	0.31a	38.4a	48.3a	151.1a	74.5a	47.0ab
NPKS	NF	0.07d	0.35c	0.20b	--	--	--	--	--
	CF	0.18b	0.65a	0.28a	34.3a	44.1a	162.2a	76.4a	54.0a
晚 稻									
CK	NF	0.05d	0.30c	0.16d	--	--	--	--	--
	CF	0.16ab	0.71a	0.23c	46.7a	46.5a	120.3a	64.4b	42.2b
NPK	NF	0.11c	0.39b	0.29b	--	--	--	--	--
	CF	0.17a	0.77a	0.23c	43.0a	37.4b	103.9a	71.2a	50.6ab
NPKS	NF	0.16b	0.44b	0.36a	--	--	--	--	--
	CF	0.18a	0.78a	0.23c	38.0a	35.9b	116.8a	75.9a	57.0a

### 2.3 双季水稻氮磷钾养分利用效率及土壤养分依存率对土壤基础地力贡献率的响应

分析 2 季水稻氮磷钾养分利用效率、土壤养分依存率与早晚稻基础地力贡献率的相关性(表 5)表明,氮、磷、钾肥回收利用率、氮、磷、钾肥农学效率、氮、磷、钾养分生理利用率均随土壤基础地力的提高而降低,氮磷钾肥偏生产力、土壤氮磷钾养分依存率随土壤基础地力的提高而提高。土壤基础地力贡献率随土壤养分含量的增加而提高。其中,土壤基础地力贡献率与氮肥回收利用率、氮肥农学效率、磷肥农学效率、钾肥农学效率、土壤氮素依存

率、土壤磷素依存率、土壤钾素依存率的相关性达到极显著水平( $p < 0.01$ ),与磷肥回收率、氮素生理利用率、钾素生理利用率、磷肥偏生产力、钾肥偏生产力的相关性达显著水平( $p < 0.05$ )。

早晚稻氮肥施用量不同,而早晚稻磷钾肥施用量相同,导致氮肥农学效率和偏生产力与土壤基础地力贡献率拟合方程的决定系数( $R^2$ )与磷、钾肥拟合方程的决定系数不一致(表 5)。进一步分析相同氮肥施用量条件下氮肥农学效率与土壤基础地力贡献率的关系发现,早稻氮肥农学效率( $y$ )与土壤基础地力贡献率( $x$ )拟合方程为:

表 5 养分利用效率、土壤养分依存率(y)与土壤基础地力贡献率(x)的直线回归分析(n=18)

养分利用效率	拟合模型	显著性检验
氮肥回收利用率	$y = -0.2634x + 48.823$	$R^2 = 0.4016^{**}$
磷肥回收利用率	$y = -0.2052x + 38.665$	$R^2 = 0.3178^*$
钾肥回收利用率	$y = -0.1865x + 47.065$	$R^2 = 0.0929$
氮肥农学效率	$y = -0.4816x + 50.529$	$R^2 = 0.6125^{**}$
磷肥农学效率	$y = -0.7424x + 87.36$	$R^2 = 0.827^{**}$
钾肥农学效率	$y = -0.5568x + 65.515$	$R^2 = 0.827^{**}$
氮素生理利用率	$y = -0.6774x + 108.66$	$R^2 = 0.2889^*$
磷素生理利用率	$y = -2.5423x + 538.04$	$R^2 = 0.2061$
钾素生理利用率	$y = -1.2278x + 178.82$	$R^2 = 0.3207^*$
氮肥偏生产力	$y = 0.0325x + 50.746$	$R^2 = 0.0032$
磷肥偏生产力	$y = 0.3456x + 82.696$	$R^2 = 0.3303^*$
钾肥偏生产力	$y = 0.2592x + 62.017$	$R^2 = 0.3303^*$
土壤氮素依存率	$y = 0.5034x + 27.172$	$R^2 = 0.5603^{**}$
土壤磷素依存率	$y = 0.8674x + 18.119$	$R^2 = 0.7902^{**}$
土壤钾素依存率	$y = 0.5461x + 27.629$	$R^2 = 0.5862^{**}$

注: \*\*表示在 1% 水平相关性显著, \*表示在 5% 水平相关性显著。

$y = -0.4296x + 52.061$ ,  $n=9$ ,  $R^2=0.8502^{**}$ , 晚稻拟合方程为:  $y = -0.2965x + 39.272$ ,  $n=9$ ,  $R^2=0.9232^{**}$ ; 早稻氮肥偏生产力 ( $y$ ) 与土壤基础地力贡献率 ( $x$ ) 拟合方程为:  $y = 0.21x + 49.622$ ,  $n=9$ ,  $R^2=0.4084^2$ , 晚稻拟合方程为:  $y = 0.2743x + 35.315$ ,  $n=9$ ,  $R^2=0.7748^{**}$ 。表明在同一施氮水平下, 氮肥偏生产力也随着土壤基础地力的提高显著或极显著提高。

### 3 结论与讨论

长期不同施肥模式对农田土壤基础地力的变化有着重要影响, 长期平衡施肥和长期有机无机肥配合施用有利于土壤基础地力提升, 长期不施肥则会导致土壤基础地力下降。本研究的结果表明经过连续 33 年 66 季水稻长期不同施肥后, 红壤性水稻土基础地力发生明显变化, 长期不施肥 (CK)、长期施 NPK 肥 (NPK) 和长期 NPK 肥配施稻草 (NPKS) 3 个处理土壤的基础地力产量和基础地力贡献率均表现为:  $NPKS > NPK > CK$ 。长期施 NPK 肥或长期 NPK 肥配施稻草均有利于土壤基础地力的提高, 且长期 NPK 肥配施稻草的提升效果更明显。

地力因素是制约粮食单产提高的主要因素之一, 土壤地力水平不但影响不施肥产量 (基础地力产量), 对施肥条件下的产量也有很大影响。本研究表明无论施肥或不施肥, 早晚稻产量均随土壤基础地力的提高而增加。土壤基础地力高作物获得高产的潜力大。目标产量相同时基础地力高的土壤所需施肥量较低, 而基础地力低的土壤对肥料

养分的依赖性较强, 只有在较高施肥水平下才能获得较高的产量。说明通过土壤基础地力的培育和提升可以在达到保证作物产量目的的同时适量降低肥料施用量, 因此, 通过培肥土壤, 提高耕地质量和土地生产力, 实现“藏粮于地”。

通过施肥实现粮食产量高产稳产的同时, 还要兼顾考虑养分资源的优化管理及养分高效利用。长期不同施肥模式对作物养分吸收有重要影响。本研究结果表明长期施 NPK 肥或 NPK 肥配施稻草有利于促进早、晚稻植株氮、磷、钾养分吸收。氮、磷、钾肥回收利用率、农学效率、氮、磷、钾生理利用率均随土壤基础地力的提高而降低, 氮、磷、钾肥偏生产力、土壤氮、磷、钾养分依存率均随土壤基础地力的提高而提高。这表明土壤基础地力越高, 土壤本身氮磷钾养分供应能力越强, 作物对肥料养分的依赖性越小, 因此, 通过多年水肥培育, 土壤基础地力提升到较高水平后可适当减少肥料投入, 同样能达到维持作物高产稳产的目的, 同时提高肥料利用效率。

土壤在长期连续不同施肥过程中基础地力发生变化形成不同地力水平, 因此, 本文研究长期施肥管理措施下土壤基础地力演变过程中或发生变化后的作物氮磷钾养分吸收利用效率对土壤基础地力的响应, 无论对于土壤不同基础地力水平下作物施肥量的确定, 还是基础地力培育和提升适宜程度的衡量均有指导意义; 但对 33 年三种施肥模式下土壤基础地力的动态变化机制, 基础地力定向培育与合理施肥量的关系、土壤基础地力构成的土壤养分有效性时间长短或稳定性等均有待今后进一步研究。

### 参考文献

- [1] 沈仁芳, 陈美军, 孔祥斌, 等. 耕地质量的概念和评价与管理对策 [J]. 土壤学报, 2012, 49 (6):1210-1217.
- [2] 贡付飞, 查燕, 武雪萍, 等. 长期不同施肥措施下潮土冬小麦农田基础地力演变分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(12):120-129.
- [3] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 等. 中国低产田状况及改良策略 [J]. 土壤学报, 2014, 51(4):675-682.
- [4] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (2):543-551.
- [5] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响 [J]. 土壤, 2011, 43(3):336-342.
- [6] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (14):2886-2894.
- [7] 曹承富, 孔令聪, 张存岭, 等. 施肥对砂姜黑土基础肥力及强筋小麦产量、品质的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5):1073-1077.
- [8] 廖育林, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤性水稻土钾素固定的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(1):70-73, 95.
- [9] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(10):3541-3550.
- [10] Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Long-term effect of fertilizer and rice straw on mineral composition and potassium adsorption in a reddish paddy soil [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12 (4):694-710.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.