

南方低产黄泥田与高产灰泥田基础地力的差异

王飞¹, 李清华¹, 林诚¹, 何春梅¹, 朱恬恬²

(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建福州 350013; 2 福建农林大学资源与环境学院, 福建福州 350002)

摘要:【目的】黄泥田为南方红黄壤区广泛分布的低产田。定量评价黄泥田基础地力, 明确与高产灰泥田水稻氮磷钾养分吸收利用的差异, 可为黄泥田改良及水稻施肥提供依据。【方法】采集福建省 20 个县的典型黄泥田 0—20 cm 土壤, 同时采集与其邻近且由同一微地貌单元发育的高产灰泥田土壤, 进行了水稻盆栽试验。试验设施肥 (每盆 N 0.60 g、P₂O₅ 0.24 g、K₂O 0.42 g) 和不施肥两个处理。氮肥采用¹⁵N 丰度 10% 的尿素, 磷肥用磷酸二氢钙, 钾肥用氯化钾。水稻品种为‘中浙优 1 号’, 采用移栽种植, 每盆种植两穴。收获后, 调查籽粒产量, 采集土壤和植株样品, 植株分地上部和根部, 分析了生物量、氮磷钾含量, 土壤分析了全氮含量。植株与土壤同位素氮用 ZHT-03 质谱仪测定¹⁵N% 丰度。计算了土壤基础地力与水稻养分吸收、累积及肥料利用率。

【结果】黄泥田的基础地力经济产量、基础地力地上部生物产量较灰泥田分别低 26.9% 与 23.5%, 相应的基础地力贡献率分别低 14.1 与 9.7 个百分点。基础地力贡献率 (经济产量) 与土壤有机质含量呈极显著正相关, 与土壤容重呈极显著负相关。不论施肥与否, 黄泥田水稻有效穗数均显著低于灰泥田, 且不施肥水稻有效穗数与土壤有机质含量呈极显著正相关, 而与土壤容重呈极显著负相关。施肥条件下, 黄泥田水稻成熟期籽粒、茎叶和根系氮、磷、钾素含量均低于灰泥田, 其中 3 个部位磷素含量较灰泥田分别低 9.6%、38.4% 和 46.3%, 差异均显著, 黄泥田水稻籽粒和茎叶的钾素含量较灰泥田分别低 10.8% 和 18.5%, 差异均显著。施肥下黄泥田水稻成熟期籽粒、茎叶的氮素吸收量较灰泥田分别低 10.8% 和 17.3%, 磷素吸收量分别低 12.5% 和 46.2%, 钾素吸收量分别低 16.6% 和 28.5%, 差异均显著。等量施肥条件下, 黄泥田的水稻氮肥利用率较灰泥田低 4.6 个百分点, 但土壤氮肥残留率增加 3.0 个百分点。【结论】以高产灰泥田为标准, 黄泥田基础地力具有 20% 以上的产量提升潜力。土壤有机质与容重是影响基础地力贡献率与有效穗的重要肥力因子。黄泥田水稻氮肥利用率显著低于灰泥田, 但土壤氮素残留率较高。提高有机质、降低土壤容重是提升基础地力的主攻方向。

关键词: 黄泥田; 灰泥田; 水稻; 基础地力; 养分吸收; 氮肥利用率; 氮肥残留率

Differences of basic soil productivity between yellow-mud and grey-mud paddy fields in southern China

WANG Fei¹, LI Qing-hua¹, LIN Cheng¹, HE Chun-mei¹, ZHU Tian-tian²

(1 Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China;

2 College of Resources and Environment, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: 【Objectives】Yellow-mud paddy field (YPF) is low in basic productivity, and is widely distributed in the red-yellow soil region of southern China. In order to provide a basis for the amelioration of YPF fertility and rice fertilization, we quantitatively evaluated the basic soil productivity and revealed differences in absorption and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium of rice between YPF and high-producing grey-mud paddy field (GPF). 【Methods】A pot culture experiment was conducted using rice cultivar ‘zhongzheyou 1’ as tested materials. The tested soils were collected in the typical YPFs and GPFs nearby having the same micro-geomorphy in twenty counties, Fujian Province, China. Two treatments of applying N 0.60 g/pot, P₂O₅ 0.24 g/pot,

收稿日期: 2018-04-23 接受日期: 2018-09-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200303); 省属公益类科研院所基本科研专项 (2016R1021-2); 国家绿肥产业技术体系 (CARS-22-G-01); 福建省农科院重点创新团队项目 (STIT2017-1-9) 资助。

联系方式: 王飞 E-mail: fjwangfei@163.com

K₂O 0.42 g/pot and no fertilization control (CK) were designed for all the fields. Urea with 10% abundance of ¹⁵N was used for nitrogen fertilizer, calcium dihydrogen phosphate for phosphate fertilizer and potassium chloride for potassium fertilizer. Fertilizers were firstly dissolved and applied. Two column seedlings were transplanted in each pot. After harvest, the grain yield and biomass were investigated, the plants were divided into above ground part and root part, and the NPK contents of plant were analyzed. The basic soil fertility and the NPK contents after harvest were determined. **【 Results 】** Compared with the GPF in the CK, the economic yield and above-ground rice biomass in YPF were decreased by 26.9% and 23.5%, respectively, and the corresponding contribution rate of basic soil productivities (BSP) were decreased by 14.1 and 9.7 percent points, respectively. The contribution rate of BSP to economic yield had a significant positive correlation with soil organic matter content, but a significant negative correlation with soil bulk density. In both treatment and CK, the effective panicles in YPF were significantly lower than those in GPF. The effective panicles had a significant positive correlation with organic matter content but a significant negative correlation with bulk density in CK. Under fertilization, the N, P and K contents in grains, stems and leaves, roots in YPF were all lower than those in GPF at the ripening stage, of which, the P contents in the three parts were significantly decreased by 9.6%, 38.4% and 46.3% in turn, and K contents in grains, stems and leaves were significantly decreased by 10.8% and 18.5%, respectively. Under fertilization at the ripening stage, the N uptakes of rice grains and stem & leaf in YPF were 10.8% and 17.3% lower than those in GPF, the P uptakes were 12.5% and 46.2% lower and K uptakes were 16.6% and 28.5% lower ($P < 0.05$). Under fertilization, N use efficiency (NUE) in YPF was 4.6 percentage points lower than in GPF, but N residual rate in soil was 3.0 percentage points higher. **【 Conclusions 】** The soil organic matter and bulk density are the two most important poverty obstacles in yellow-mud fertility, which affect the contribution of basic soil productivity and the effective panicle number of yield components. Comparing with high-productivity field, the nitrogen use efficiency in yellow-mud field is lower while the nitrogen residual rate in soil is higher. By improving organic matter content and decreasing bulk density, yellow-mud paddy fields have a yield increasing potential of over 20%.

Key words: yellow-mud paddy field; grey-mud paddy field; rice; basic soil productivity; nutrient uptake; nitrogen use efficiency; nitrogen residual rate

我国耕地质量总体不容乐观,中低产田比重大,约40%为中产田,30%为低产田,低产田具有较明显的障碍或限制因子^[1]。农业部《关于全国耕地质量等级情况的公报》^[2]也显示,全国四至六等耕地占耕地总面积的44.8%,七至十等的耕地占耕地总面积的27.9%,这很大程度上制约了我国粮食的持续增产,并影响“良种良法”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^[3]。一般而言,基础地力越高,对作物产量的贡献率越大,产量的稳定性与持续性增加^[4]。通过提高农田土壤基础地力,可以实现“藏粮于地”^[5]。中低产田的重要特征是其基础地力水平低^[6]。黄泥田为南方红壤区广泛分布的一类中低产田,其中福建省黄泥田面积约占全省水稻土面积的30%。该类稻田主要分布于丘陵山区、沿海台地及河谷两侧高阶地。由于

犁底层下上层淋溶下来的还原态铁、锰氧化物多被氧化而淀积,并伴随着水化作用而形成黄色多水氧化铁,使土体染为黄色^[7]。一些研究尝试用不同有机肥提高低产黄泥田水稻产量、改良土壤理化性状,如泥炭土、菇渣及生物有机肥可提高黄泥田土壤胡敏酸、胡敏素等含量^[8];有机物料与化肥配施提高了水稻产量,增加了土壤团聚体稳定性,其中以牛粪与化肥配合施用效果最佳^[9];福建化肥配合翻压紫云英可增产6.5%^[10],湖北黄泥田不同有机肥种类的增肥效果为秸秆>猪粪>绿肥^[11]。然而,对中、低产黄泥田的基础地力与自然条件相近的邻近高产田地力的差距缺少定量评价,其导致的水稻养分吸收利用的差异也不清楚,影响了对该类稻田的定向改良利用。为此,本研究采用配对比较方法,比较了典型黄泥田与高产灰泥田的基础地力以及水稻养分吸收利用差异,以明确黄泥田基础地力的提升空间,为黄泥田定向改良及水稻高效施肥提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

于 2015 年水稻冬闲期 (12 月至翌年 3 月), 在福建省浦城、建阳、建瓯、延平、顺昌、闽清、闽侯、宁化、永安、大田、尤溪、沙县、将乐、周宁、福安、屏南、霞浦、古田、上杭、连城 20 个县 (市) 黄泥田主要分布区域采集 20 对典型黄泥田 (属渗育型水稻土) 与邻近同一微地貌单元内发育的灰泥田 (属潴育型水稻土) 表层土壤 (0—20 cm)。土壤自然风干, 过 2 cm 筛网, 混合均匀, 盆栽备用。采集的土壤分别代表福建省常见的氧化型黄泥田 (剖面构型 A—Ap—P—C), 以及氧化还原型灰泥田、青底灰泥田、乌黄泥田类型 (剖面构型 A—Ap—P—W—C)。

盆栽试验在农业部福建耕地保育观测实验站网室进行。每个土样设两个处理: 1) 不施肥; 2) 施化肥。每塑料桶 (直径 25 cm、高 15 cm) 装土样 5.0 kg, 外套塑料盆 (直径 37 cm、高 27 cm), 共计 80 盆。氮磷钾施肥比例为 N : P₂O₅ : K₂O = 1 : 0.4 : 0.7, 施肥量为大田常规施用量 (N 135 kg/hm²) 的 2 倍, 即每盆施 N 0.60 g、P₂O₅ 0.24 g、K₂O 0.42 g。各处理磷肥全部作基肥施用; 氮肥基肥占 60%, 分蘖肥占 40%; 钾肥全部作分蘖肥用。氮肥用尿素 (¹⁵N, 丰度 10%), 磷肥用磷酸二氢钙, 钾肥用氯化钾。将肥料配成溶液施入。水稻品种为 ‘中浙优 1 号’, 采用移栽种植, 每盆种植两穴。2016 年 7 月 19 日插秧, 8 月 1 日追肥, 10 月 24 日收获。植株与土壤同位素氮用 ZHT-03 质谱仪测定 ¹⁵N% 丰度, 由河北省农林科学院遗传生理研究所测定。其余养分指标均按常规方法测定。黄泥田与灰泥田的主要理化性状如表 1。

1.2 数据处理

基础地力 (g/pot) = 不施肥处理水稻经济产量或生物产量;

基础地力贡献率 = 不施肥水稻产量/施肥处理水

稻产量 × 100%;

肥料农学效率 (g/g) = (施肥处理水稻产量 - 不施肥处理水稻产量) / NPK 施肥量总和。

氮素吸收利用计算方法:

化肥氮素残留率 = 土壤残留来自化肥中的氮 / 化肥施氮量

化肥氮素利用率 = 植株各部位吸收自化肥中的氮素之和 / 化肥施氮量

植株各部位 (或土壤) 来自化肥中的氮 = $W \times a \times (b - c) / (b_1 - c)$

式中: W 为植株 (或土壤) 样品重量, a 为含氮量, b 为 ¹⁵N 丰度; c 为对照组天然 ¹⁵N 丰度; b_1 为肥料 ¹⁵N 丰度。

试验数据采用 Excel 进行处理, 20 个县 (市) 黄泥田与灰泥田的土壤或植株试验数据均值利用 DPS 统计软件中两样本比较模块的配对两处理 t 检验进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 黄泥田和灰泥田基础地力及其贡献率的差异

图 1 显示, 黄泥田基础地力经济产量较灰泥田平均低 8.8 g/盆, 降幅 26.9%, 基础地力地上部生物产量 (籽粒 + 秸秆) 较灰泥田低 16.0 g/盆, 降幅 23.5%, 均达到极显著差异水平 ($P < 0.01$)。基础地力贡献率表现出相似的规律, 从经济产量来看, 灰泥田和黄泥田的水稻基础地力贡献率平均分别为 66.1% 和 52.0%, 黄泥田较灰泥田低 14.1 个百分点; 从地上部生物产量来看, 灰泥田与黄泥田的基础地力贡献率平均分别为 65.7% 和 56.0%, 黄泥田较灰泥田低 9.7 个百分点, 均达到极显著差异水平 ($P < 0.01$)。可以看出, 黄泥田基础地力相对较低, 以灰泥田为标准, 有 20% 以上的产量提升空间。

2.2 黄泥田和灰泥田施肥农学效率的差异

依据籽粒产量计算, 灰泥田与黄泥田的水稻施肥农学效率分别为 13.2 g/g 与 17.5 g/g (图 2), 黄泥

表 1 黄泥田与灰泥田土壤主要理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of yellow-mud paddy field and grey-mud paddy field

土壤 Soil	pH	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	碱解氮 Avail. N (mg/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	物理性粘粒 <0.01 mm clay (%)	容重 Bulk density (g/cm ³)
黄泥田 YPF	5.10 ± 0.26	25.29 ± 7.99	1.61 ± 0.39	0.68 ± 0.25	14.28 ± 5.96	126.4 ± 24.8	22.1 ± 14.8	50.2 ± 17.4	33.32 ± 5.39	1.28 ± 0.16
灰泥田 GPF	5.14 ± 0.27	31.26 ± 8.96	1.89 ± 0.37	0.97 ± 0.44	19.15 ± 4.69	153.8 ± 31.2	51.1 ± 31.8	82.7 ± 47.3	27.58 ± 5.35	1.14 ± 0.15

注 (Note): 各指标为 20 个典型样点均值 ± 标准差 Data is the average ± standard deviation of twenty typical fields; YPF—Yellow-mud paddy field; GPF—Grey-mud paddy field.

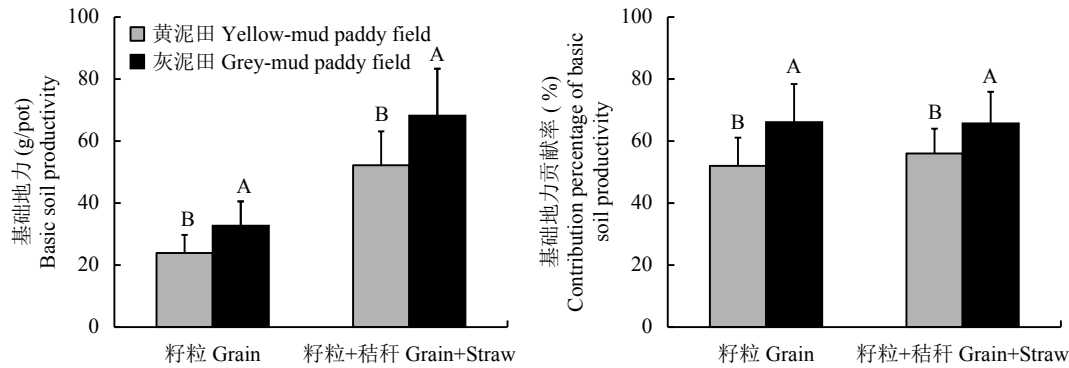


图 1 黄泥田与灰泥田基础地力及基础地力贡献率

Fig. 1 Basic soil productivity and its contribution rates in yellow-mud and grey-mud paddy fields

[注 (Note): 柱上误差线为 20 个土壤的平均值 \pm 标准差; 柱上不同大写字母表示处理间差异达 1% 显著水平。The error bars represent average \pm SD of 20 soils; different capital letters above the bars indicate significantly different between yellow-mud and grey-mud paddy fields at the 1% level.]

田较灰泥田提高 32.6%，差异极显著 ($P < 0.01$)；依据地上部生物产量 (籽粒+秸秆) 计算，灰泥田、黄泥田施肥农学效率分别为 28.0 g/g、32.5 g/g，黄泥田较灰泥田提高 16.1%，差异显著 ($P < 0.05$)。图 3 显示，基础地力籽粒产量与施肥效果呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，说明黄泥田的地上部生物量对氮磷钾肥的依赖程度要高于灰泥田。

2.3 黄泥田和灰泥田水稻收获期经济性状的差异

表 2 显示，施肥条件下，黄泥田水稻成熟期有效穗、每穗实粒数与千粒重均较灰泥田有不同程度的降低，其中有效穗较灰泥田降低 1.1 穗/丛，差异显著 ($P < 0.05$)；不施肥条件下，黄泥田产量构成因子同样均低于灰泥田，其中黄泥田有效穗较灰泥田减少 1.0 穗/丛，千粒重较灰泥田减少 0.53 g，差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。说明不论施肥与否，有效穗是影响黄泥田与灰泥田产量差异的关键性状因子。

2.4 黄泥田和灰泥田水稻成熟期植株养分含量的差异

表 3 表明，施肥后，黄泥田水稻籽粒、茎叶与根系氮素含量均较灰泥田有不同程度的降低，但未达到显著差异水平；不施肥的黄泥田水稻茎叶与根系氮素含量与灰泥田相当，籽粒氮素含量较灰泥田提高 9.6%，差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。无论施肥与否，黄泥田水稻籽粒、茎叶和根系的磷素含量均显著低于灰泥田 ($P < 0.05$)。施肥条件下，黄泥田水稻籽粒、茎叶和根系的磷素含量较灰泥田分别低 9.6%、38.4% 与 46.3%，不施肥条件下比灰泥田分别低 10.2%、24.6% 和 40.0%。施肥条件下，黄泥田水稻籽粒、茎叶与根系的钾素含量均低于灰泥田，其

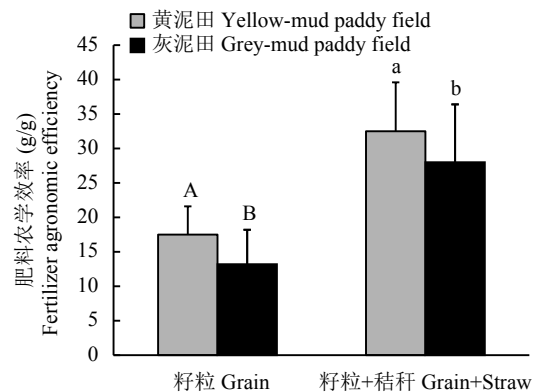


图 2 黄泥田与灰泥田施肥农学效率

Fig. 2 Fertilizer agronomic efficiency in yellow-mud and grey-mud paddy fields

[注 (Note): 柱上误差线为 20 个土壤的平均值 \pm 标准差; 柱上不同小、大写字母表示处理间差异分别达 5% 和 1% 显著水平。The error bars represent average \pm SD of 20 soils; different small and capital letters above the bars indicate significantly different between yellow-mud and grey-mud paddy fields at 5% and 1% levels, respectively.]

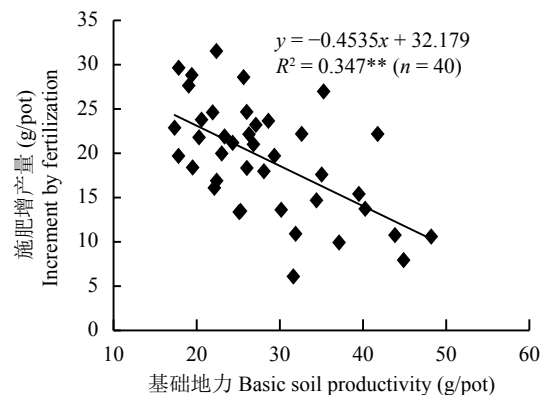


图 3 基础地力籽粒产量与施肥增产量的相关性

Fig. 3 Correlation between basic soil productivity and yield increment of fertilizer

[注 (Note): **— $P < 0.01$.]

表 2 施肥黄泥田与灰泥田水稻产量构成
Table 2 Yield component of rice affected by fertilization under yellow-mud and grey-mud paddy fields

土壤 Soil	施肥 Fertilization			不施肥 No fertilization		
	有效穗 EPN	每穗实粒数 FGN	千粒重 (g) 1000-grain weight	有效穗 EPN	每穗实粒数 FGN	千粒重 (g) 1000-grain weight
黄泥田 YPF	12.3 ± 2.0 b	110.0 ± 12.6 a	22.65 ± 0.73 a	7.9 ± 1.7 b	96.0 ± 12.1 a	22.44 ± 0.85 b
灰泥田 GPF	13.4 ± 2.8 a	118.4 ± 13.4 a	22.82 ± 0.80 a	8.9 ± 2.3 a	97.0 ± 10.9 a	22.97 ± 0.91 a

注 (Note): EPN—Effective panicle number per bunch; FGN—Filled grain number per panicle; YPF—Yellow-mud paddy field; GPF—Grey-mud paddy field. 同列数值后不同小写字母表示黄泥田与灰泥田间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significantly different between yellow-mud and grey-mud paddy fields at 5% level.

表 3 黄泥田与灰泥田水稻植株氮磷钾养分含量
Table 3 Nitrogen, phosphorus and potassium contents of rice plants in yellow-mud and grey-mud paddy fields

养分 Nutrient	土壤 Soil	施肥 Fertilization (g/kg)			不施肥 No fertilization (g/kg)		
		籽粒 Grain	茎叶 Stem & leaf	根系 Root	籽粒 Grain	茎叶 Stem & leaf	根系 Root
N	黄泥田 YPF	16.16 ± 2.07 a	9.19 ± 1.19 a	7.02 ± 1.26 a	14.51 ± 0.96 a	7.84 ± 0.93 a	6.47 ± 0.96 a
	灰泥田 GPF	16.75 ± 1.06 a	9.77 ± 1.94 a	7.23 ± 1.14 a	13.24 ± 1.05 b	7.66 ± 1.70 a	6.09 ± 1.05 a
P	黄泥田 YPF	3.01 ± 0.42 b	1.49 ± 0.59 b	0.95 ± 0.39 b	2.83 ± 0.40 b	1.69 ± 0.71 b	1.08 ± 0.57 b
	灰泥田 GPF	3.33 ± 0.47 a	2.42 ± 0.75 a	1.77 ± 1.06 a	3.15 ± 0.39 a	2.24 ± 0.83 a	1.80 ± 0.95 a
K	黄泥田 YPF	3.72 ± 0.45 b	11.87 ± 2.26 b	3.47 ± 1.40 a	3.83 ± 0.33 b	10.30 ± 3.37 b	2.07 ± 1.09 a
	灰泥田 GPF	4.17 ± 0.36 a	14.57 ± 4.84 a	3.55 ± 1.18 a	4.38 ± 1.15 a	13.58 ± 5.93 a	2.54 ± 1.00 a

注 (Note): YPF—Yellow-mud paddy field; GPF—Grey-mud paddy field. 同列数值后数据后不同小写字母表示黄泥田与灰泥田间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letter in a column indicate significantly different between yellow-mud and grey-mud paddy fields at 5% level.

中籽粒和茎叶的钾素含量分别较灰泥田低 10.8% 与 18.5%，差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)；不施肥处理植株钾素表现出类似趋势，其中籽粒、茎叶的钾素含量分别较灰泥田低 12.6% 和 31.8%，差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.5 黄泥田和灰泥田水稻植株养分累积吸收量差异

图 4 显示，施肥下黄泥田的水稻籽粒、茎叶的氮素吸收量较灰泥田分别降低 10.8% 与 17.3%，差异均显著 ($P < 0.05$)，不施肥下黄泥田的水稻籽粒与茎叶的氮素吸收量较灰泥田分别低 20.5% 和 21.4%，差异均显著 ($P < 0.05$)。而无论施肥与否，黄泥田与灰泥田根系氮素吸收累积基本一致。施肥下黄泥田的水稻籽粒、茎叶与根系的磷素吸收量较灰泥田分别低 12.5%、46.2% 和 50.0%，差异均显著 ($P < 0.05$)，不施肥的分别低 30.0%、37.5% 与 50.0%，差异均显著 ($P < 0.05$)。施肥下黄泥田的水稻籽粒与茎叶的钾素吸收量较灰泥田分别低 16.6% 和 28.5%，不施肥的水稻籽粒与茎叶分别低 35.0% 和 39.5%，差异均显著 ($P < 0.05$)。说明不论施肥与否，黄泥田的水稻氮磷

钾养分吸收累积能力均低于灰泥田，不施肥条件下差异尤为明显。

2.6 黄泥田和灰泥田水稻氮素利用率与土壤氮残留率的差异

从表 4 可以看出，施肥后黄泥田水稻植株自肥料中吸收的氮素较灰泥田低 27.6 mg/pot，相应的水稻氮肥利用率较灰泥田低 4.6 个百分点，差异显著 ($P < 0.05$)。从土壤氮素残留来看，黄泥田土壤来自化肥氮素的残留较灰泥田增加 17.7 mg/pot，土壤氮肥残留率较灰泥田增加 3.0 个百分点，差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 黄泥田基础地力与肥力因子的关系

研究表明，红壤性水稻土基础地力越高，肥料对早晚稻产量的贡献率就越低^[2]，福建历年肥料试验资料统计表明，水稻产量 60%~80% 来自于土壤的基础肥力，高产水稻土一般达 75%~85%^[7]，本研究

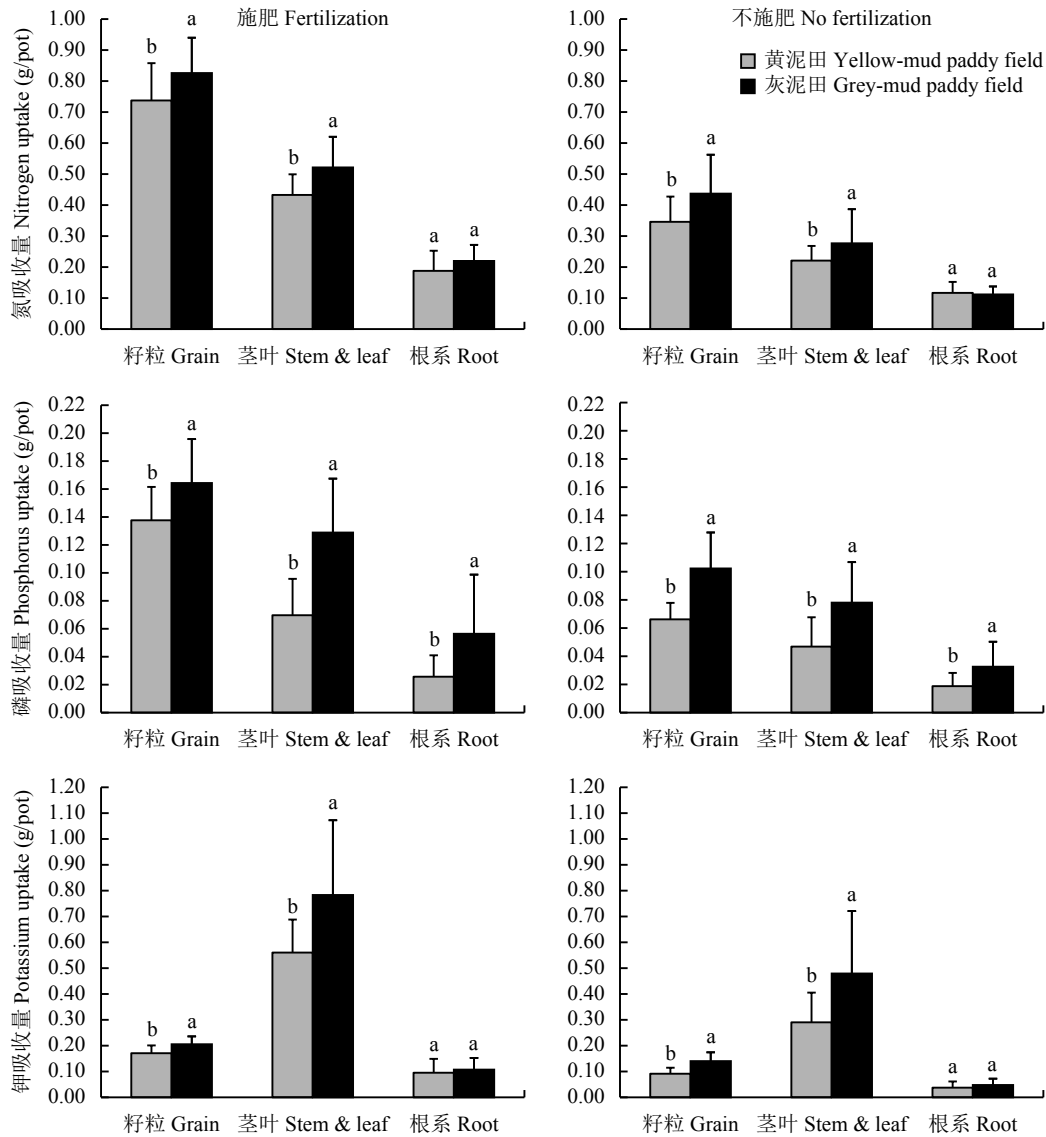


图 4 黄泥田与灰泥田水稻不同部位氮、磷、钾素吸收量

Fig. 4 NPK absorption in different parts of rice with and without fertilization in yellow-mud and grey-mud paddy fields

[注 (Note) : 柱上误差线为 20 个土壤的平均值 ± 标准差; 柱上不同小写字母表示黄泥田与灰泥田差异达 5% 显著水平。The error bars represent average ± SD of 20 soils; different small letters above the bars indicate significantly different between yellow-mud and grey-mud paddy fields at 5% level.]

表 4 不同土壤水稻植株肥料氮吸收量、氮肥利用率及土壤氮素残留率

Table 4 Nitrogen uptake of rice nitrogen use efficiency and residual rate of soil in different paddy fields

土壤 Soil	肥料氮吸收量 Uptake of fertilizer N (mg/pot)				氮肥利用率 (%) NUE	土壤氮素残留 Soil N residue	
	籽粒 Grain	茎叶 Stem & leaf	根系 Root	合计 Total		(mg/pot)	(%)
黄泥田 YPF	160.2 ± 32.3 a	110.1 ± 24.9 b	43.6 ± 16.7 a	313.9 ± 49.8 b	52.3 ± 8.3 b	178.6 ± 38.8 a	29.8 ± 6.5 a
灰泥田 GPF	171.0 ± 32.6 a	124.3 ± 23.6 a	46.2 ± 13.5 a	341.5 ± 53.3 a	56.9 ± 8.9 a	160.9 ± 29.0 b	26.8 ± 4.8 b

注 (Note) : YPF—Yellow-mud paddy field; GPF—Grey-mud paddy field. NUE—N use efficiency. 同列数据后不同小写字母表示黄泥田与灰泥田差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significantly different between yellow-mud and grey-mud paddy fields at 5% level.

也显示, 施肥效果随着基础地力籽粒产量的增加而降低 (图 3), 说明持续提升稻田基础地力可逐步摆脱

对化肥的依赖, 这对于当前水稻化肥减施增效行动意义重大。基础地力通常由单季作物不施肥的产量

获得, 显然这过程周期长且烦琐, 而土壤肥力因子变化是决定基础地力发展方向的基本因素, 因此有必要探索利用肥力因子快速诊断基础地力的便捷方法。本研究条件下, 黄泥田有机质含量较灰泥田平均低 19.1% (表 1), 由表 5 基础地力贡献率与主要肥力因子关系可知, 基础地力贡献率 (经济产量) 与土壤有机质含量呈极显著正相关 ($r = 0.439^{**}$, $n = 40$), 而与土壤容重呈极显著负相关 ($r = -0.451^{**}$, $n = 40$)。从产量构成因子来看, 不施肥条件下, 水稻有效穗数与土壤有机质含量呈极显著正相关 ($r = 0.573^{**}$, $n = 40$), 而与土壤容重呈极显著负相关 ($r = -0.423^{**}$, $n = 40$)。土壤有机质含有植物所需要的多种营养元素, 且对培肥地力和改善土壤质量影响重大, 是评价土壤质量的主要指标和维持农作物高产、稳产的基础^[13-14]。高基础地力的土壤含有较高的有机质和养分含量, 可增加养分的供应能力, 从而提高土壤微生物量和活性^[15]。潮土小麦-玉米轮作的基础地力产量与有机碳库呈显著的正相关, 当有机碳库增加 $C\ 1\ t/hm^2$, 冬小麦与夏玉米基础地力产量分别增加 154 与 132 kg/hm^2 ^[16], 容重与有机质含量也呈良好的关系, 通过有机质调控可有效改善土壤容重^[17]。从全国来看, 我国农田土壤有机质含量总体水平较低, 农田耕层土壤有机碳的平均浓度约为 $10\sim 30\ g/kg$ ^[18-19], 远低于欧、美等发达国家 ($25\sim 40\ g/kg$)^[20]。对黄泥田而言, 该类土壤主要分布在山地丘陵、丘陵倾斜平原, 普遍存在耕层浅薄、土壤质地粘重、土体通气性差、土壤酸性强、保肥性差等特点^[21], 其土壤有机质含量更为缺乏, 是重要的属性障碍, 因此通过跟踪分析土壤有机质含量可为黄泥田基础地力诊断及改良提供依据。相关研究表明, 红壤性水稻土长期施氮磷钾肥或长期氮磷钾肥配施稻草均能提高土壤基础地力, 以长期氮磷钾肥配施稻草的效果更为显著^[22]。福建典型黄泥田连续 32 年化肥与牛粪、秸秆还田配施, 较单施化肥分别增产 12.6% 与 10.2%^[23]。秸秆还田还可提高黄泥田土壤松结合态腐殖质含量和结合态腐殖质总含量, 化肥+油菜秸秆+秸秆腐熟剂是一种良好的低产黄泥田改良措施^[24]。上述有机无机肥配施措施改善了土壤理化性状, 尤其是提高了土壤有机质含量, 增强了土壤养分的供给能力, 使基础地力逐步提高。由此可见, 一方面, 土壤有机质含量可作为反映黄泥田基础地力的重要指标, 另一方面, 南方丘陵山区广泛分布的黄泥田瘠瘦障碍削减应以提升有机质与降低土壤容重为主攻方向, 通过持续培肥, 逐步提升基础地力。值得一提的是, 基

表 5 基础地力贡献率 (y) 与土壤理化性状 (x) 的回归方程及决定系数 ($n = 40$)

Table 5 Correlation between contribution percentages of basic soil productivity (economic yield, y) and soil physical and chemical properties (x)

指标 (x) Index	回归方程 Regression	R^2
有机质 Organic matter	$y = 0.6322x + 41.193$	0.193 ^{**}
全氮 Total N	$y = 10.431x + 40.813$	0.106 [*]
全磷 Total P	$y = 0.2318x + 58.876$	0
全钾 Total K	$y = 0.1604x + 56.388$	0.005
容重 Bulk density	$y = -34.772x + 101.16$	0.203 ^{**}

注 (Note): *— $P < 0.05$, **— $P < 0.01$.

础地力由土壤化学、物理与生物因子指标综合构成, 并受到气象因子等自然条件的影响, 本研究评价了基础地力与主要理化因子的关系, 可能还有其他因子的作用与驱动, 因此黄泥田基础地力还需多指标因子与多年结果综合分析确定。

3.2 黄泥田化肥氮素去向与肥料利用率

本研究通过氮同位素示踪与盆栽试验得出, 黄泥田与灰泥田水稻氮素利用率分别为 52.3% 和 56.9%, 这高于一般农田的氮肥利用率^[25], 主要是由于盆栽试验少了氮淋溶与径流等流失, 而我国农田氮的去向中淋洗损失估计为 2%, 径流损失估计为 5%^[26]。如何提高黄泥田的氮肥利用率是需要关注的问题。本研究表明, 随着基础地力籽粒产量提升, 施肥效果将显著降低, 相关研究也表明, 随着基础地力的提高, 对肥料的依赖越来越少^[4], 即地力提升后施用相对较少的肥料就可达到相同的预期产量, 即肥田省肥, 这意味着在相同的预期目标产量下, 提升地力水平可减少化肥用量。值得一提的是, 本研究在不同地力水平下施用等量的肥料, 尽管黄泥田水稻的肥料农学效率更高, 但氮同位素示踪表明灰泥田的氮肥利用率也显著高于黄泥田, 这主要是由于灰泥田水稻优先吸收了来自肥料中的氮所致 (表 4)。相反, 本研究中黄泥田土壤的氮肥残留率却高于灰泥田。一些研究表明, 高基础地力会降低肥料的利用效率^[27]。这可能与不同背景的土壤理化性状差异有关。有研究表明, 高粘粒土壤抑制土壤氮素矿化^[28], 同时不同肥力红壤性水稻土氮素的矿化作用均随着有机质含量的升高而增强^[29], 黄泥田土质粘重且有机质含量较低, 可能延缓了有机氮的矿化进程从而影响氮素的供应与植株的养分吸收, 同时黄泥田土壤

微生物与植株竞争有限的肥料氮源暂时固持了更多的氮素于土壤中,难以被单季作物吸收利用,从而影响氮肥的利用率,但黄泥田未吸收利用的氮素可能随着硝化作用而导致更多的 NO_3^- -N累积而淋溶或径流损失,相关研究表明不同肥力土壤施肥对小麦土壤硝态氮的累积不同,中等肥力施入尿素对小麦生育期土壤硝态氮含量无影响,而低肥力土壤施尿素使土壤硝态氮含量提高了5.7倍^[30]。黄泥田施氮肥是否增加了硝态氮的淋溶风险有待结合大田试验做进一步研究。

4 结论

与邻近同一微地貌单元发育的高产灰泥田比较,黄泥田水稻基础地力经济产量较灰泥田低26.9%,相应的基础地力贡献率低14.1个百分点;基础地力地上部生物产量较灰泥田低23.5%,相应的基础地力贡献率低9.7个百分点。

施肥条件下,黄泥田植株籽粒、茎叶和根系的磷含量分别较灰泥田显著低9.6%、38.4%与46.3% ($P < 0.05$),籽粒和茎叶钾素含量分别较灰泥田显著低10.8%与18.5% ($P < 0.05$)。水稻成熟期籽粒、茎叶的氮素吸收量较灰泥田分别低10.8%和17.3%,磷素吸收量分别低12.5%和46.2%,钾素吸收量分别低16.6%和28.5%,差异均显著 ($P < 0.05$)。

黄泥田水稻氮肥利用率较灰泥田降低4.6个百分点,但氮素土壤残留率增加3.0个百分点。

基础地力贡献率与土壤有机质含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),而与土壤容重呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。土壤有机质含量与土壤容重是影响基础地力贡献率与产量构成有效穗的重要肥力因子,应通过持续培肥提高土壤有机质含量与降低容重,进而提升基础地力。与灰泥田相比,黄泥田基础地力水平有20%以上的产量提升潜力,其水稻氮磷钾养分吸收累积能力也明显低于灰泥田。

参考文献:

- [1] 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.
Zeng X B, Zhang J B, Wei C F, *et al.* The status and reclamation strategy of low-yield fields in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 675-682.
- [2] 中华人民共和国农业农村部. 关于全国耕地质量等级情况的公报[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201412/t20141217_4297895.htm, 2014-12-17.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Bulletin of statistics for the cultivated land quality grade in China[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201412/t20141217_4297895.htm, 2014-12-17.
- [3] 贡付飞. 长期施肥条件下潮土区冬小麦-夏玉米农田基础地力的演变规律分析[M]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2013.
Fu G F. The basic soil productivity change under long-term fertilizations in winter wheat and summer maize cropping system in Fluvo-aquic soil area[M]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [4] 黄兴成, 石孝均, 李渝, 等. 基础地力对黄壤区粮油高产、稳产和可持续生产的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1476-1485.
Huang X C, Shi X J, Li Y, *et al.* Effect of the inherent soil productivity on high, stable and sustainable yield of grain and oil crops in yellow soil region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(8): 1476-1485.
- [5] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4169-4178.
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Effect of successive fertilization on dynamics of basic soil productivity and soil nutrients in double cropping paddy soils with different fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4169-4178.
- [6] 张佳宝, 林先贵, 李晖. 新一代中低产田治理技术及其在大面积均衡增产中的潜力[J]. 中国科学院院刊, 2011, 26(4): 375-382.
Zhang J B, Lin X G, Li H. A new generation of controlling technology for the medium and low-yield fields and its potential in large-area balanced grain production increase[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2011, 26(4): 375-382.
- [7] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1991.
Fujian Soil Census Institute. Fujian soil [M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 1991.
- [8] 胡诚, 刘东海, 陈云峰, 等. 不同土壤改良措施对低产黄泥田土壤性质及水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (3): 117-121.
Hu C, Liu D H, Chen Y F, *et al.* Effects of different soil melioration practices on soil properties and rice yields in low-yielding yellow clayey land[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (3): 117-121.
- [9] 宓文海, 吴良欢, 马庆旭, 等. 有机物料与化肥配施提高黄泥田水稻产量和土壤肥力[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 103-108.
Mi W H, Wu L H, Ma Q X, *et al.* Combined application of organic materials and inorganic fertilizers improving rice yield and soil fertility of yellow clayey paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(13): 103-108.
- [10] 王飞, 林诚, 林新坚, 等. 连续翻压紫云英对福建单季稻产量与化肥氮素吸收、分配及残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 896-904.
Wang F, Lin C, Lin X J, *et al.* Effects of continuous turnover of *Astragalus sinicus* on rice yield and N absorption, distribution and residue in single-cropping rice regions of Fujian Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 896-904.
- [11] 荣勤雷, 梁国庆, 周卫, 等. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1168-1177.
Rong Q L, Liang G Q, Zhou W, *et al.* Effects of different organic

- fertilization on fertility and enzyme activities of yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1168–1177.
- [12] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 675–682.
- Lu Y H, Liao Y L, Zhou X, *et al.* Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 675–682.
- [13] Marinari S, Mancinelli R, Campiglia E, *et al.* Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy[J]. *Ecological Indicators*, 2006, 6(4): 701–711.
- [14] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1441–1449.
- Xu M G, Zhang X B, Sun N, *et al.* Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1441–1449.
- [15] Tian J, Lu S H, Fan M S, *et al.* Integrated management systems and N fertilization: effect on soil organic matter in rice-rapeseed rotation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372(1–2): 53–63.
- [16] Zha Y, Wu X P, Gong F F, *et al.* Long-term organic and inorganic fertilizations enhanced basic soil productivity in a fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2477–2489.
- [17] 郑存德, 程岩. 有机质对不同容重土壤物理特性的调控研究[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(5): 1929–1934.
- Zheng C D, Cheng Y. Effect of organic matter on regulations of physical properties of soil bulk density[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(5): 1929–1934.
- [18] Sun W J, Huang Y, Zhang W, *et al.* Carbon sequestration and its potential agricultural soils of China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(3): 1154–1157.
- [19] Qin Z, Huang Y, Zhuang Q. Soil organic carbon sequestration potential of cropland in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, 27(3): 711–722.
- [20] Bond-lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579–582.
- [21] 周卫. 低产水稻土改良与管理理论·方法·技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Zhou W. Theories and approaches of amelioration and management of low yield paddy soils[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [22] 廖育林, 鲁艳红, 聂军, 等. 长期施肥稻田土壤基础地力和养分利用效率变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1249–1258.
- Liao Y L, Lu Y H, Nie J, *et al.* Effects of long-term fertilization on basic soil productivity and nutrient use efficiency in paddy soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(5): 1249–1258.
- [23] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1447–1454.
- Wang F, Li Q H, Lin C, *et al.* Effect of different fertilization modes on topsoil organic carbon sequestration and productivity in yellow paddy field of southern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1447–1454.
- [24] 胡诚, 陈云峰, 乔艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 59–66.
- Hu C, Chen Y F, Qiao Y, *et al.* Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil amelioration in low-yielding yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 59–66.
- [25] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 1–7.
- Zhao B Q. Modification of conventional fertilizers for enhanced property and function[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 1–7.
- [26] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259–273.
- Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 259–273.
- [27] 梁涛, 廖敦秀, 陈新平, 等. 重庆稻田基础地力水平对水稻养分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(16): 3106–3116.
- Liang T, Liao D X, Chen X P, *et al.* Effect of paddy inherent soil productivity on nutrient utilization efficiency of rice in Chongqing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(16): 3106–3116.
- [28] 兰婷, 韩勇. 两种水稻土氮初级矿化和硝化速率及其与氮肥利用率的关系[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1154–1161.
- Lan T, Han Y. Relationships of fertilizer-N use efficiency with gross N nitrification and mineralization rates in two different paddy soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1154–1161.
- [29] 贾俊仙, 李忠佩, 车玉萍. 添加葡萄糖对不同肥力红壤性水稻土氮素转化的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(8): 1617–1624.
- Jia J X, Li Z P, Che Y P. Effects of glucose addition on N transformations in paddy soils with a gradient of organic C content in subtropical China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(8): 1617–1624.
- [30] 邵兴芳, 申小冉, 张建峰, 等. 外源氮在中、低肥力红壤中的转化与去向研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (2): 5–11.
- Shao X F, Shen X R, Zhang J F, *et al.* Exogenous nitrogen transformation and fate characteristics under different fertility red soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, (2): 5–11.