

陈 贵,徐再萌,鲁晨妮,等. 不同类型水稻土上籼粳杂交稻氮、磷吸收利用特性[J]. 江苏农业学报,2026,42(2):283-291.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2026.02.007

不同类型水稻土上籼粳杂交稻氮、磷吸收利用特性

陈 贵¹, 徐再萌¹, 鲁晨妮¹, 朱静娜², 胡文凌², 章 斐², 李建强³, 陈 伟⁴

(1.嘉兴市农业科学研究院,浙江 嘉兴 314016; 2.浙江省嘉兴生态环境监测中心,浙江 嘉兴 314003; 3.平湖市植保土肥技术推广中心,浙江 平湖 314200; 4.嘉善县农业农村局,浙江 嘉善 314199)

摘要: 为了探明土壤类型和水稻品种对籼粳杂交稻氮、磷吸收利用特性的影响,本研究以浙江北部地区主要土壤类型和主推籼粳杂交稻品种为研究对象,研究籼粳杂交稻的氮、磷吸收特性,生理利用特性,以及转运特性,并分析了氮、磷吸收利用特性的差异。结果表明,水稻品种间氮吸收量和吸收效率在青紫泥田和小粉田上存在显著差异($P<0.05$),磷吸收量和吸收效率仅在青粉泥田上存在显著差异($P<0.05$)。品种间氮、磷生理利用效率在4种类型土壤上均无显著差异($P>0.05$)。籼粳杂交稻氮吸收量和吸收效率受水稻品种和土壤类型影响达极显著水平($P<0.01$),然而磷吸收量和吸收效率仅受土壤类型极显著影响($P<0.01$)。氮生理利用效率和磷生理利用效率受水稻品种、土壤类型,以及二者交互作用影响不显著($P>0.05$)。氮吸收量、磷吸收量、氮吸收效率、磷吸收效率均与产量呈极显著正相关关系($P<0.01$)。氮吸收效率与叶秆氮转运量呈极显著正相关($P<0.01$),磷吸收效率与叶秆磷转运量呈显著正相关($P<0.05$),但与磷生理利用效率呈极显著负相关($P<0.01$);氮生理利用效率与氮吸收量呈极显著负相关($P<0.01$)。磷生理利用效率与磷吸收量呈极显著负相关($P<0.01$)。综上所述,相对于籼粳杂交稻氮、磷生理利用效率,氮、磷吸收特性不同步,存在较大差异;水稻品种和土壤类型可影响氮吸收,土壤类型影响磷吸收,应因地制宜选择水稻品种;籼粳杂交稻氮、磷吸收量对产量贡献大,而生理利用效率对产量基本无贡献,未来育种重心应更多关注氮、磷吸收量。

关键词: 籼粳杂交稻; 土壤类型; 氮、磷吸收效率; 氮、磷生理利用效率; 相关性

中图分类号: S511.3; S155; S143.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2026)02-0283-09

Nitrogen and phosphorus uptake and utilization characteristics of *indica-japonica* hybrid rice in different types of paddy soils

CHEN Gui¹, XU Zaimeng¹, LU Chenni¹, ZHU Jingna², HU Wenling², ZHANG Fei², LI Jianqiang³, CHEN Wei⁴

(1. Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Jiaxing 314016, China; 2. Zhejiang Jiaxing Eco-environmental Monitoring Center, Jiaxing 314003, China; 3. Pinghu Plant Protection and Soil Fertilizer Technology Promotion Center, Pinghu 314200, China; 4. Jiashan County Agriculture and Rural Affairs Bureau, Jiashan 314199, China)

Abstract: To investigate the effects of paddy soil types and rice cultivars on nitrogen (N) and phosphorus (P) uptake and utilization characteristics in *indica-japonica* hybrid rice, this study focused on the major paddy soil types and leading *indica-japonica* hybrid rice cultivars in northern region of Zhejiang province. The research examined the absorption, physiological utilization efficiency, and translocation characteristics of N and P in *indica-japonica* hybrid rice, and analyzed the variations in N and P uptake and utilization efficiency. The results showed that N uptake and

收稿日期:2025-07-01

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LTGN23D010001);嘉兴市科技计划项目(2024AZ30006)

作者简介:陈 贵(1982-),男,山西万荣人,博士,副研究员,主要从事土壤肥料和养分高效吸收研究。(E-mail)chenzhao2004@163.com

通讯作者:陈 伟,(E-mail)594307302@qq.com

uptake efficiency (N-upE) differed significantly ($P < 0.05$) among rice cultivars in blue-purple paddy soil and powdery paddy soil, whereas P uptake and uptake efficiency (P-upE) showed significant variations ($P < 0.05$) only in bluish silty-clay paddy soil. No significant differences were observed in the physiological utilization efficiency of N and P among cultivars across the four paddy soil types ($P > 0.05$). N uptake and N-upE were significantly affected by both rice cultivar and paddy soil type ($P < 0.01$), whereas P uptake and P-upE were only significantly influenced by paddy soil type ($P < 0.01$). The physiological utilization efficiency of N and P was not significantly influenced by rice cultivar, soil type, or their interaction ($P > 0.05$). A highly significant positive correlation was observed between rice yield and N uptake, P uptake, N-upE, and P-upE ($P < 0.01$). N-upE showed a highly significant positive correlation with leaf-stem N translocation amount (N-trA) ($P < 0.01$), while P-upE was significantly positively correlated with leaf-stem P translocation amount (P-trA) ($P < 0.05$) and showed a highly significant negative correlation with phosphorus physiological utilization efficiency ($P < 0.01$). Nitrogen physiological utilization efficiency (N-PE) was significantly negatively correlated with N uptake ($P < 0.01$). Phosphorus physiological utilization efficiency (P-PE) was significantly negatively correlated with P uptake ($P < 0.01$). In summary, compared to N-PE and P-PE in *indica-japonica* hybrid rice, the uptake characteristics of N and P exhibited asynchronous patterns with significant disparities. The uptake of N can be influenced by rice cultivar and soil type, while P uptake is primarily affected by soil type, highlighting the importance of selecting suitable cultivars based on local conditions. In *indica-japonica* hybrid rice, nitrogen and phosphorus uptake contribute significantly to yield, whereas their physiological utilization efficiency contributes little. Therefore, future breeding efforts should focus more on improving nitrogen and phosphorus uptake.

Key words: *indica-japonica* hybrid rice; soil types; nitrogen and phosphorus uptake efficiency; nitrogen and phosphorus physiological utilization efficiency; correlation

籼粳杂交稻是通过籼稻和粳稻亚种间杂交培育而成的水稻品种,利用籼粳亚种间的强杂种优势,实现产量、抗逆性、品质等性状的协同提升,目前籼粳杂交稻已在浙江、江苏、上海、福建、江西、安徽等地推广种植^[1]。氮和磷是水稻生长发育过程中的两大必需营养元素,对保障中国粮食安全至关重要^[2]。在实际生产中,为了获得高产,过量氮、磷被施入土壤,加之施肥结构不合理,造成氮肥、磷肥利用率下降,相当一部分氮、磷进入环境造成污染^[3]。研究表明,中国农业面源污染的重要原因之一就是农田施肥后氮、磷元素的流失^[4]。如何提高水稻对氮、磷的吸收利用效率,减少氮、磷向环境排放,是当前和今后的热点问题。

水稻对氮、磷的利用效率一般包括吸收效率和生理利用效率,吸收效率通常可定义为作物地上部氮、磷吸收累积量占土壤供氮、供磷量的比例,生理利用效率通常定义为作物体内单位氮或者单位磷生产的谷物产量^[5-6]。前人研究表明,不同基因型水稻品种间氮、磷利用效率存在显著差异。但相关研究多聚焦单一养分(氮或磷),以籼粳杂交稻为对象的联合研究更为匮乏^[7-9],导致不同水稻品种对氮、磷利用效率差异的数据不足。此外,不同土壤类

型的理化与生物学特性差异会影响氮、磷转化过程,进而改变土壤供氮、供磷能力^[10-11],最终调控水稻氮、磷利用效率。目前研究多单独关注不同水稻品种或不同土壤类型对氮、磷利用效率的影响,关于二者交互作用的研究相对薄弱^[9,12-13]。有鉴于此,本研究以浙江省北部地区4个主推籼粳杂交稻品种和区域内主要水稻土类型为研究对象,分析不同类型土壤种植条件下籼粳杂交稻的氮、磷吸收利用效率,明确土壤类型与品种的交互作用及影响因素,为科学施用氮肥、磷肥,提升籼粳杂交稻氮、磷利用效率提供数据支撑和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于2024年水稻季在浙江省嘉兴市秀洲区王江泾镇、南湖区凤桥镇、桐乡市屠甸镇和平湖市新埭街道同步开展。嘉兴市为典型的亚热带季风气候区,年均温度15~16℃,年均降水量1 194 mm,年均湿度80%~85%。试验地土壤类型:秀洲区王江泾镇为青紫泥田,南湖区凤桥镇为黄斑田,桐乡市屠甸镇为小粉田,平湖市新埭街道为青粉泥田。4种类型水稻土占区域内水稻土总面积的60%以上^[14-15],耕层土壤基本理化性质见表1。

表 1 不同类型水稻土耕层土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of topsoil in different paddy soils

土壤类型	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)	pH 值
青紫泥田	1.74	143.00	7.80	69.3	28.1	6.35
黄斑田	2.05	169.00	15.20	72.7	33.3	6.97
小粉田	1.19	89.70	4.94	56.7	20.0	6.62
青粉泥田	1.52	117.00	17.80	94.4	24.7	7.59

1.2 试验设计

以浙江省农业技术推广中心公布的浙江北部地区主推籼粳杂交稻品种为主要供试材料,包括甬优 1540、浙优 18、嘉丰优 2 号、禾香优 1 号。于 2024 年 6 月 26 日(水稻秧龄 27 d)各试验点统一移栽,株行距为 20 cm×25 cm。移栽前 1 d 各试验点统一施基肥,并与耕层土壤混合,7 月 15 日统一追施分蘖肥,8 月 7 日统一施穗肥。各试验点各水稻品种施肥种类和施用量保持一致,氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)用量分别为 195.0 kg/hm²、70.8 kg/hm²和 159.0 kg/hm²,肥料种类为水稻专用配方肥(含 N 量 18%,含 P₂O₅量 8%,含 K₂O 量 18%)和尿素。其中,基肥施 435 kg/hm²水稻专用配方肥,分蘖肥施 120 kg/hm²水稻专用配方肥+79.5 kg/hm²尿素,穗肥施 330 kg/hm²水稻专用配方肥。基肥、分蘖肥、穗肥中氮的施入比例分别为 40%、30%、30%,磷、钾的施入比例均为 49%、14%、37%。各试验点水稻采用小区种植,每个小区面积 24 m²,各水稻品种重复 3 次。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 稻谷产量测定 水稻成熟后从各试验点各小区分别采集具有代表性的 2 m²水稻(避免边际效应),脱粒后晒干称重并计算稻谷单位面积产量。

1.3.2 地上部干物质质量测定 水稻成熟期从各供试点各小区分别采集具有代表性的 5 穴水稻地上部植株样品,105 ℃杀青 30 min,70 ℃烘干称重,并计算干物质累积量。

1.3.3 地上部氮和磷含量测定 将成熟期水稻植株地上部各部位样品磨碎,应用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,通过凯氏定氮法测定氮含量,用钼锑抗比色法测定磷含量。通过氮含量、磷含量和干物质质量计算成熟期水稻地上部氮和磷的吸收量。

1.4 计算公式

氮/磷吸收效率(kg/kg) = 水稻植株地上部氮/

磷累积总量÷土壤供氮/磷量。其中,土壤供氮/磷量 = 施氮/磷量 + 土壤碱解氮/有效磷含量^[5,16]。

氮/磷生理利用效率(kg/kg) = 水稻产量÷水稻植株地上部氮/磷吸收累积量^[6,17]。

叶秆氮/磷转运量(kg/hm²) = 齐穗期叶秆干物质累积量×(水稻齐穗期叶秆氮/磷含量 - 成熟期叶秆氮/磷含量)^[8,18]。

叶秆氮/磷转运效率(%) = (水稻齐穗期叶秆氮/磷含量 - 成熟期叶秆氮/磷含量) ÷ 齐穗期叶秆氮/磷含量 × 100%^[8,18]。

1.5 数据统计

采用 Excel 2019 和 SPSS 17.0 统计软件对试验数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上的产量和干物质累积量

由表 2 可知,同一籼粳杂交稻品种产量在 4 种类型土壤上表现出一定差异,小粉田种植的水稻平均产量分别比青紫泥田、黄斑田、青粉泥田高 9.7%、18.8%、22.5%;同一类型土壤种植的 4 个水稻品种间产量也存在一定差异。青紫泥田上浙优 18 产量显著高于甬优 1540、嘉丰优 2 号、禾香优 1 号($P < 0.05$),黄斑田上甬优 1540、浙优 18、嘉丰优 2 号产量显著高于禾香优 1 号($P < 0.05$),小粉田上浙优 18、嘉丰优 2 号产量显著高于禾香优 1 号和甬优 1540 ($P < 0.05$),青粉泥田上浙优 18 产量显著高于甬优 1540 和禾香优 1 号($P < 0.05$)。方差分析结果表明,水稻品种、土壤类型以及水稻品种和土壤类型交互作用均对产量产生极显著影响($P < 0.01$)。

从表 3 可知,青紫泥田和小粉田上浙优 18 和嘉丰优 2 号成熟期地上部干物质累积量显著高于甬优 1540 和禾香优 1 号($P < 0.05$);黄斑田上浙优 18 地

上部干物质质量显著高于其他 3 个品种 ($P < 0.05$), 增加幅度为 12.4% ~ 22.4%。小粉田上 4 个水稻品种平均干物质质量分别比黄斑田和青粉泥田高 11.0% 和 13.7%。方差分析结果表明, 水稻品种、土壤类型以及水稻品种和土壤类型交互作用均对水稻成熟期地上部干物质质量产生极显著影响 ($P < 0.01$)。

表 2 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上的产量

Table 2 Grain yield of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 产量 (t/hm^2)	13.8b	13.3a	13.9c	12.7b
浙优 18 产量 (t/hm^2)	15.3a	14.2a	16.9a	13.9a
嘉丰优 2 号产量 (t/hm^2)	14.5b	13.5a	17.3a	13.0ab
禾香优 1 号产量 (t/hm^2)	13.8b	12.2b	14.9b	12.2b
平均产量 (t/hm^2)	14.4	13.3	15.8	12.9

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

表 3 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上的干物质质量

Table 3 Dry matter accumulation of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 干物质质量 (t/hm^2)	21.0b	20.5b	20.3b	19.7a
浙优 18 干物质质量 (t/hm^2)	24.1a	23.5a	25.2a	21.2a
嘉丰优 2 号干物质质量 (t/hm^2)	23.1a	20.9b	26.2a	21.2a
禾香优 1 号干物质质量 (t/hm^2)	20.4b	19.2b	21.3b	19.8a
平均干物质质量 (t/hm^2)	22.2	21.0	23.3	20.5

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.2 不同籼粳杂交稻品种成熟期在不同类型土壤上氮、磷的吸收量

由表 4 可知, 青紫泥田上浙优 18, 小粉田上嘉丰优 2 号成熟期地上部氮累积量显著高于甬优 1540 和禾香优 1 号 ($P < 0.05$); 小粉田 4 个水稻品种平均氮吸收量分别比黄斑田和青粉泥田上高 17.9% 和 11.0%。方差分析结果表明, 水稻品种和土壤类型对水稻成熟期地上部氮累积量影响达极显著水平 ($P < 0.01$)。

由表 5 可知, 不同水稻品种成熟期地上部磷累积量仅在青粉泥田上存在显著性差异, 浙优 18 和禾香优 1 号地上部磷累积量显著高于甬优 1540 ($P < 0.05$); 小粉田 4 个水稻品种地上部平均磷累积量

比其他 3 种类型土壤高 12.5% ~ 30.3%。方差分析结果表明, 土壤类型极显著影响籼粳杂交稻成熟期磷吸收量 ($P < 0.01$)。

表 4 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上氮吸收量

Table 4 Nitrogen uptake of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 氮吸收量 (kg/hm^2)	237bc	222a	224c	223a
浙优 18 氮吸收量 (kg/hm^2)	263a	231a	274ab	254a
嘉丰优 2 号氮吸收量 (kg/hm^2)	252ab	236a	306a	242a
禾香优 1 号氮吸收量 (kg/hm^2)	234c	204a	250bc	230a
平均氮吸收量 (kg/hm^2)	246	223	263	237

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

表 5 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上磷吸收量

Table 5 Phosphorus uptake of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 磷吸收量 (kg/hm^2)	45.6a	37.9a	46.7a	33.9b
浙优 18 磷吸收量 (kg/hm^2)	46.3a	41.1a	49.7a	41.0a
嘉丰优 2 号磷吸收量 (kg/hm^2)	43.9a	39.2a	54.4a	37.2ab
禾香优 1 号磷吸收量 (kg/hm^2)	40.4a	37.9a	47.2a	40.0a
平均磷吸收量 (kg/hm^2)	44.0	39.0	49.5	38.0

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.3 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上氮、磷吸收效率

由表 6 可知, 青紫泥田上浙优 18 氮吸收效率显著高于甬优 1540 和禾香优 1 号 ($P < 0.05$), 小粉田上嘉丰优 2 号氮吸收效率显著高于甬优 1540 和禾香优 1 号 ($P < 0.05$); 小粉田上 4 个水稻品种平均氮吸收效率比其他 3 种土壤类型高 46.9% ~ 56.5%。方差分析结果表明, 水稻品种和土壤类型均对籼粳杂交稻氮吸收效率有极显著影响 ($P < 0.01$)。

由表 7 可知, 除青粉泥田外, 其余 3 种类型土壤对籼粳杂交稻品种间磷吸收效率均无显著影响 ($P > 0.05$); 小粉田上 4 个水稻品种平均磷吸收效率分别比青紫泥田、黄斑田和青粉泥田高 24.0%、55.0% 和 87.9%。方差分析结果表明, 土壤类型对籼粳杂交稻磷吸收效率影响达极显著水平 ($P < 0.01$)。

表 6 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上氮吸收效率

Table 6 Nitrogen uptake efficiency of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 氮吸收效率(kg/kg)	0.47bc	0.46a	0.61c	0.46a
浙优 18 氮吸收效率(kg/kg)	0.52a	0.47a	0.75ab	0.53a
嘉丰优 2 号氮吸收效率(kg/kg)	0.50ab	0.48a	0.84a	0.50a
禾香优 1 号氮吸收效率(kg/kg)	0.46c	0.42a	0.68bc	0.48a
平均氮吸收效率(kg/kg)	0.49	0.46	0.72	0.49

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平($P < 0.05$)。

表 7 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上磷吸收效率

Table 7 Phosphorus uptake efficiency of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 磷吸收效率(kg/kg)	0.52a	0.39a	0.58a	0.30b
浙优 18 磷吸收效率(kg/kg)	0.53a	0.42a	0.62a	0.36a
嘉丰优 2 号磷吸收效率(kg/kg)	0.50a	0.40a	0.68a	0.32ab
禾香优 1 号磷吸收效率(kg/kg)	0.46a	0.39a	0.59a	0.35a
平均磷吸收效率(kg/kg)	0.50	0.40	0.62	0.33

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平($P < 0.05$)。

2.4 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上氮、磷生理利用效率

由表 8 可知,相同类型土壤上籼粳杂交稻品种间氮生理利用效率均无显著差异($P > 0.05$);黄斑田和小粉田上 4 个水稻品种平均氮生理利用效率较高。方差分析结果表明,水稻品种、土壤类型以及水稻品种和土壤类型交互作用对籼粳杂交稻氮生理利用效率均无显著影响($P > 0.05$)。

表 8 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上氮生理利用效率

Table 8 Nitrogen physiological utilization efficiency of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 氮生理利用效率(kg/kg)	58.1a	60.5a	62.2a	56.9a
浙优 18 氮生理利用效率(kg/kg)	58.4a	63.8a	61.7a	54.7a
嘉丰优 2 号氮生理利用效率(kg/kg)	57.5a	57.2a	56.9a	54.1a
禾香优 1 号氮生理利用效率(kg/kg)	59.1a	60.4a	60.2a	53.1a
平均氮生理利用效率(kg/kg)	58.3	60.4	60.3	54.7

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平($P < 0.05$)。

由表 9 可知,相同类型土壤上籼粳杂交稻品种间磷生理利用效率无显著差异($P > 0.05$)。方差分析结果表明,水稻品种、土壤类型以及二者交互作用均不能显著影响籼粳杂交稻磷生理利用效率($P > 0.05$)。

表 9 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上磷生理利用效率

Table 9 Phosphorus physiological utilization efficiency of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 磷生理利用效率(kg/kg)	305a	359a	304a	373a
浙优 18 磷生理利用效率(kg/kg)	335a	356a	340a	340a
嘉丰优 2 号磷生理利用效率(kg/kg)	336a	344a	320a	353a
禾香优 1 号磷生理利用效率(kg/kg)	342a	328a	327a	306a
平均磷生理利用效率(kg/kg)	330	347	323	343

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平($P < 0.05$)。

2.5 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上叶秆氮、磷转运量

从表 10 可知,青紫泥田、小粉田、青粉泥田上水稻叶秆氮转运量品种间差异较大,青紫泥田上甬优 1540、嘉丰优 2 号叶秆氮转运量显著高于浙优 18 和禾香优 1 号($P < 0.05$);小粉田上禾香优 1 号叶秆氮转运量显著高于其他 3 个品种($P < 0.05$);青粉泥田上甬优 1540、禾香优 1 号叶秆氮转运量显著高于浙优 18 和嘉丰优 2 号($P < 0.05$)。小粉田上 4 个水稻品种平均叶秆氮转运量比青紫泥田和黄斑田高 38.7%和 26.7%。方差分析结果表明,水稻品种、土壤类型以及二者交互作用均对水稻叶秆氮转运量产生极显著影响($P < 0.01$)。

由表 11 可见,籼粳杂交稻叶秆磷转运量在 4 种类型土壤上均存在显著性差异($P < 0.05$),青紫泥田上禾香优 1 号叶秆磷转运量显著高于甬优 1540 和嘉丰优 2 号($P < 0.05$);黄斑田上浙优 18 叶秆磷转运量显著高于嘉丰优 2 号($P < 0.05$);小粉田上嘉丰优 2 号、禾香优 1 号叶秆磷转运量显著高于甬优 1540 和浙优 18 ($P < 0.05$);青粉泥田上禾香优 1 号叶秆磷转运量显著高于另外 3 个品种($P < 0.05$)。4 种类型土壤上 4 个水稻品种平均叶秆磷转运量差异较小。方差分析结果表明,水稻品种以及水稻品种和土壤类型交互作用对籼粳杂交稻叶秆磷转运量影

响极显著 ($P < 0.01$), 土壤类型对籼粳杂交稻叶秆氮转运量影响显著 ($P < 0.05$)。

表 10 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上叶秆氮转运量

Table 10 Nitrogen translocation in leaves and stems of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 叶秆氮转运量 (kg/kg)	50.7a	52.2a	49.9c	64.4a
浙优 18 叶秆氮转运量 (kg/kg)	43.7b	54.0a	65.7b	43.1b
嘉丰优 2 号叶秆氮转运量 (kg/kg)	51.7a	43.9a	52.4c	44.6b
禾香优 1 号叶秆氮转运量 (kg/kg)	32.1c	44.7a	78.6a	70.0a
平均叶秆氮转运量 (kg/kg)	44.5	48.7	61.7	55.6

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

表 11 不同籼粳杂交稻品种在不同土壤类型上叶秆磷转运量

Table 11 Phosphorus translocation in leaves and stems of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 叶秆磷转运量 (kg/kg)	16.7b	17.2ab	14.6b	15.9b
浙优 18 叶秆磷转运量 (kg/kg)	17.7ab	19.4a	15.9b	13.7b
嘉丰优 2 号叶秆磷转运量 (kg/kg)	16.9b	15.2b	19.9a	14.8b
禾香优 1 号叶秆磷转运量 (kg/kg)	18.7a	18.6ab	21.3a	19.7a
平均叶秆磷转运量 (kg/kg)	17.5	17.6	17.9	16.0

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.6 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上叶秆氮、磷的转运效率

从表 12 可知, 青紫泥田上甬优 1540 叶秆氮转运效率显著高于浙优 18、嘉丰优 2 号、禾香优 1 号 ($P < 0.05$); 黄斑田上禾香优 1 号叶秆氮转运效率显著高于甬优 1540、浙优 18、嘉丰优 2 号 ($P < 0.05$); 小粉田上禾香优 1 号叶秆氮转运效率显著高于甬优 1540 和嘉丰优 2 号 ($P < 0.05$); 青粉泥田上甬优 1540、禾香优 1 号叶秆氮转运效率显著高于浙优 18、嘉丰优 2 号 ($P < 0.05$)。小粉田上 4 个水稻品种平均叶秆氮转运效率比其他 3 种类型土壤高 18.9%~39.6%。方差分析结果表明, 水稻品种、土壤类型以及二者交互作用均对叶秆氮转运效率产生极显著影响 ($P < 0.01$)。

从表 13 可知, 青紫泥田上禾香优 1 号叶秆磷转

运效率显著高于嘉丰优 2 号 ($P < 0.05$); 黄斑田上浙优 18 叶秆磷转运效率显著高于嘉丰优 2 号和禾香优 1 号 ($P < 0.05$); 小粉田上禾香优 1 号叶秆磷转运效率显著高于浙优 18 和嘉丰优 2 号 ($P < 0.05$); 青粉泥田上甬优 1540、禾香优 1 号叶秆磷转运效率显著高于浙优 18 和嘉丰优 2 号 ($P < 0.05$)。小粉田上 4 个水稻品种平均叶秆磷转运效率比青粉泥田高 21.3%。方差分析结果表明, 水稻品种、土壤类型以及二者交互作用均对水稻叶秆磷转运效率产生极显著影响 ($P < 0.01$)。

表 12 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上叶秆氮转运效率

Table 12 Nitrogen translocation efficiency in leaves and stems of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 叶秆氮转运效率 (%)	35.0a	28.0c	35.9bc	38.5a
浙优 18 叶秆氮转运效率 (%)	29.4b	36.0b	42.6ab	22.1b
嘉丰优 2 号叶秆氮转运效率 (%)	28.7b	29.0c	31.1c	20.3b
禾香优 1 号叶秆氮转运效率 (%)	27.1b	42.3a	50.9a	34.1a
平均叶秆氮转运效率 (%)	30.1	33.8	40.2	28.8

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

表 13 不同籼粳杂交稻品种在不同类型土壤上叶秆磷转运效率

Table 13 Phosphorus translocation efficiency in leaves and stems of different *indica-japonica* hybrid rice cultivars grown on different types of soils

项目	土壤类型			
	青紫泥田	黄斑田	小粉田	青粉泥田
甬优 1540 叶秆磷转运效率 (%)	55.3ab	50.0ab	58.0ab	62.1a
浙优 18 叶秆磷转运效率 (%)	51.8ab	58.1a	52.3b	36.5b
嘉丰优 2 号叶秆磷转运效率 (%)	43.4b	45.0b	52.8b	36.7b
禾香优 1 号叶秆磷转运效率 (%)	61.7a	49.1b	69.2a	56.2a
平均叶秆磷转运效率 (%)	53.1	50.5	58.1	47.9

同列数据后不同小写字母表示不同水稻品种间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.7 籼粳杂交稻产量与氮、磷吸收利用特性相关指标的相关性

由表 14 可见, 水稻产量与成熟期干物质质量、氮吸收量、磷吸收量、氮吸收效率、磷吸收效率呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$); 氮吸收效率和磷吸收效率均与成熟期干物质质量、氮吸收量、磷吸收量呈极显著

正相关($P < 0.01$);氮吸收效率和磷吸收效率呈极显著正相关关系($P < 0.01$);氮吸收效率与叶秆氮转运量呈极显著正相关($P < 0.01$);磷吸收效率与叶秆磷转运量呈显著正相关($P < 0.05$),与磷生理利用效率

呈极显著负相关($P < 0.01$)。另外,氮生理利用效率与磷生理利用效率、叶秆氮转运效率呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。

表 14 籼粳杂交稻产量与氮、磷吸收利用特性相关指标的相关性分析结果

Table 14 Correlation analysis between grain yield and traits related to nitrogen and phosphorus uptake and utilization in *indica-japonica* hybrid rice

指标	干物质量	氮吸收量	磷吸收量	氮吸收效率	磷吸收效率	氮生理利用效率	磷生理利用效率	叶秆氮转运量	叶秆磷转运量	叶秆氮转运效率	叶秆磷转运效率
产量	0.884 **	0.703 **	0.631 **	0.784 **	0.737 **	0.241	0.041	0.143	0.182	0.135	0.103
干物质量		0.809 **	0.703 **	1.000 **	0.752 **	0.016	-0.026	0.408 **	0.255	0.233	0.137
氮吸收量			0.660 **	0.809 **	0.596 **	-0.513 **	-0.297 *	0.194	0.271	-0.113	-0.069
磷吸收量				0.703 **	0.931 **	-0.167	-0.736 **	0.212	0.298 *	0.128	0.135
氮吸收效率					0.752 **	-0.163	-0.252	0.408 **	0.255	0.233	0.137
磷吸收效率						0.047	-0.552 **	0.198	0.314 *	0.276	0.257
氮生理利用效率							0.494 **	-0.103	-0.127	0.306 **	0.205
磷生理利用效率								-0.134	-0.229	-0.027	-0.064
叶秆氮转运量									0.468 **	0.625 **	0.428 **
叶秆磷转运量										0.411 **	0.497 **
叶秆氮转运效率											0.724 **

* 表示指标间呈显著相关($P < 0.05$); ** 表示指标间呈极显著相关($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 籼粳杂交稻品种间氮、磷吸收利用效率

诸多研究结果证实,不同基因型水稻品种氮、磷吸收量及吸收效率存在显著差异^[2,9,19]。本研究发现,籼粳杂交稻品种间氮吸收量及吸收效率在青紫泥田和小粉田上存在显著差异($P < 0.05$),而在黄斑田和青粉泥田上无显著差异($P > 0.05$);磷吸收量及吸收效率则仅在青粉泥田上存在显著差异($P < 0.05$)。上述结果表明,不同基因型籼粳杂交稻氮、磷吸收特性确实存在显著差异,但该差异受土壤特性调控,并非绝对存在。这一结论与前期针对常规粳稻的研究结果^[8]基本一致。同时,本研究还发现,同一籼粳杂交稻品种的氮吸收特性与磷吸收特性存在不同步现象,即氮吸收量和吸收效率高的品种,其磷吸收量及吸收效率未必更高,这与王秋菊等^[12]的研究结论基本一致。值得注意的是,本研究中籼粳杂交稻的氮吸收量及吸收效率受品种基因型的影响程度显著大于磷吸收量及吸收效率受品种基因型的影响程度,这可能是由于相较于氮吸收特性,籼粳杂交稻磷吸收特性更具“惰性”,品种间差异本就相对较小。前期科研工

作者多聚焦于水稻氮素的环境效应研究^[7,20-21],随着社会对磷素引发的环境负面影响关注度日益提升^[22-23],在保障氮高效吸收的基础上,如何提高籼粳杂交稻磷吸收效率已成为今后研究需重点关注的方向。已有研究表明,水稻品种间氮、磷养分吸收差异的形成可能与根系形态特征及生理生化特性密切相关,例如根系氧化能力、脱氢酶活性、细胞色素氧化酶活性及根系酸性磷酸酶活性等^[2,9,24]。本研究中不同籼粳杂交稻品种在氮、磷吸收量及吸收效率上存在差异的具体机制,有待后续研究进一步阐明。

本研究结果显示,籼粳杂交稻品种间氮生理利用效率和磷生理利用效率在4种土壤类型上均无显著差异($P > 0.05$),这说明与氮、磷吸收效率相比,籼粳杂交稻氮、磷生理利用效率受籼粳杂交稻不同基因型的影响较小。这与常规粳稻品种间氮素吸收效率和生理利用效率均存在显著差异的结论^[8],以及其他类似研究结论^[25-26]存在一定矛盾。考虑到本研究中涉及籼粳杂交稻品种的数量相对较少,因此,本研究结论需要进行更广泛的验证。同时,本研究结果也表明,与籼粳杂交稻氮、磷吸收效率相比,氮、磷生理利用效率的同步性更好。氮生理利用效率与磷生理利

用效率呈极显著正相关($P < 0.01$)的结论也可对此进行佐证。另外,籼粳杂交稻磷生理利用效率与磷吸收量和磷吸收效率呈极显著负相关($P < 0.01$),与氮吸收量显著呈负相关($P > 0.05$)的结论,以及氮生理利用效率与氮吸收量呈极显著负相关($P < 0.01$)的结论说明,能够影响或者改变籼粳杂交稻氮和磷生理利用效率的生物学和生理生化指标存在差异。导致这种现象的原因可能与氮、磷在水稻体内的转化和生理生化特性有关^[2,27]。值得关注的是,与氮、磷吸收效率相比,籼粳杂交稻氮、磷生理利用效率对产量的贡献不显著($P > 0.05$)。因此,如何进一步提高籼粳杂交稻氮、磷生理利用效率,或者如何增强氮、磷生理利用效率对产量的贡献更需要得到关注。

3.2 籼粳杂交稻氮、磷利用效率与土壤类型的关系

研究者认为,土壤性质对水稻产量及养分吸收特性具有显著影响^[11,28]。本研究发现,籼粳杂交稻氮、磷吸收量与吸收效率均受土壤类型的极显著调控($P < 0.01$),且这两类养分的吸收规律在不同土壤间存在差异。该结论与已有研究结果^[10,12]一致,同时印证了不同土壤在氮、磷供给特性上的固有差异。值得注意的是,本研究涉及的4类土壤中,小粉田的碱解氮与有效磷含量均低于其余3种土壤类型,但其种植的籼粳杂交稻氮、磷吸收量与吸收效率反而更高,磷素相关指标的优势尤为突出。这一现象可能与供试土壤在理化性质及生物学性状上的显著差异密切相关^[14-15],例如土壤机械组成、养分赋存形态及微生物群落结构的不同,会直接影响氮、磷元素在土壤中的转化过程与供给能力^[11,29]。已有研究表明,较低的土壤pH可提高土壤磷酸酶活性,进而促进土壤中磷酸盐的水解^[30]。本研究中小粉田属于渗育土亚类,土壤pH相对偏低,且质地以黏壤土和壤土为主,与其他3种土壤存在明显区别^[14-15]。上述因素的协同作用,可能使小粉田土壤磷酸酶活性维持在较高水平,加速磷酸盐水解以提升磷素有效性,最终促进水稻对磷的吸收。综上,小粉田促进籼粳杂交稻氮、磷高效吸收的具体机制,仍需从土壤物理、化学及生物学特性的协同作用角度开展深入研究。

水稻养分吸收利用除了可能受水稻品种和土壤类型影响外,还可能受品种和土壤类型交互作用的影响^[8,31]。本研究中,不同籼粳杂交稻品种氮吸收量和吸收效率在不同类型土壤上的表现反映了籼粳杂交稻品种和土壤类型对籼粳杂交稻氮吸收量和吸

收效率均有显著影响。这种现象与水稻的品种特性,如根系氧化能力、根系形态、根系分泌物,以及土壤的理化性质和生物学特性紧密相关^[32-33]。本研究中,水稻品种和不同土壤类型交互作用对籼粳杂交稻氮、磷吸收量和吸收效率,以及氮、磷生理利用效率影响不显著的结论与常规粳稻氮吸收量和氮生理利用效率受品种和土壤类型交互作用影响显著的结论^[8]存在一定差异。说明与常规粳稻相比,籼粳杂交稻在养分吸收利用方面受品种和土壤交互因素影响相对较小。

4 结论

籼粳杂交稻氮、磷吸收特性不同步,氮吸收量和吸收效率较高的品种,磷吸收量和吸收效率不一定高。相对于氮、磷吸收量和吸收效率,籼粳杂交稻氮、磷生理利用效率同步性较好;氮、磷吸收和生理利用受水稻品种和土壤类型影响存在一定差异,在实际生产中,应根据需求因地制宜选择水稻品种;籼粳杂交稻氮、磷吸收对产量贡献大,而生理利用效率对产量基本无贡献,未来育种重心应更多关注氮、磷的吸收。

参考文献:

- [1] 张世玺,杨海龙,王剑功,等. 浙江省籼粳杂交稻新品系表现性状综合分析及评价[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(24): 32-37.
- [2] 刘星,邓仕文,陈英龙,等. 水稻氮磷高效吸收与利用的特征及机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 1-11.
- [3] 丁周宇,张娜,舒小伟,等. 栽培措施对水稻氮素吸收利用及稻田尾水氮磷含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2004-2015.
- [4] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [5] MOLL R H, KAMPRATH E J, JACKSON W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(3): 562-564.
- [6] 徐月梅,彭诗燕,孙志伟,等. 不同耐低磷水稻品种的内源激素水平差异及其与产量和磷利用率的关系[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(2): 231-244.
- [7] 徐富贤,熊洪,谢戎,等. 水稻氮素利用效率的研究进展及其动向[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1215-1225.
- [8] 陈贵,张红梅,沈亚强,等. 嘉兴地区不同基因型水稻的氮利用效率研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(11): 1965-1970.
- [9] 白城宇,李秀芳,李传飞,等. 磷高效水稻材料的根系形态结构

- 特征[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(5):1032-1042.
- [10] 于天一,逢焕成,唐海明,等. 不同母质发育的土壤对双季稻产量及养分吸收特性的影响[J]. 作物学报,2013,39(5):896-904.
- [11] 马 军,徐 田,叶 迎,等. 土壤类型与施氮水平耦合对水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 生态学杂志,2021,40(6):1677-1686.
- [12] 王秋菊,常本超,孙 兵,等. 不同类型土壤对水稻产量及养分吸收特性的影响[J]. 作物杂志,2015(3):116-121.
- [13] 陈天祥,杨顺瑛,苏彦华. 基于高氮投入和基因型差异的水稻氮素营养特征[J]. 土壤,2023,55(5):954-963.
- [14] 魏孝孚,吕仁焕,严学芝,等. 浙江土种志[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,1993.
- [15] 吴嘉平,荆长伟,支俊俊. 浙江省县市土壤图集[M]. 长沙:湖南地图出版社,2012.
- [16] 都江雪,柳开楼,黄 晶,等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应[J]. 土壤学报,2021,58(2):476-486.
- [17] 张亚丽,樊剑波,段英华,等. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价[J]. 土壤学报,2008,45(2):267-273.
- [18] 孙 博,吴振洋,秦裕波,等. 吉林省半干旱地区滴灌玉米的磷肥用量研究[J]. 中国土壤与肥料,2025(2):174-182.
- [19] 唐伟杰,陈海元,张所兵,等. 水稻氮素利用相关基因遗传研究进展[J]. 江苏农业学报,2024,40(3):570-576.
- [20] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境,2000,9(1):1-6.
- [21] 刘梦竹,王 锐,冯 源,等. 控释尿素释放周期对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(5):827-834.
- [22] 李 丹,楼 玲,章明奎,等. 杭州湾蔬菜地土壤的磷素积累特点及其淋失临界值[J]. 浙江农业学报,2025,37(2):447-455.
- [23] 沈智达,余秋华,张 斌,等. 磷肥施用量对湖北省直播水稻产量、磷素积累及利用率的影响[J]. 中国水稻科学,2025,39(3):399-411.
- [24] 张 勇,管 菊,赵庆勇,等. 优质粳稻南粳 5818 氮高效机制初探[J]. 江苏农业学报,2024,40(9):1586-1593.
- [25] ZHANG Y L, FAN J B, WANG D S, et al. Genotypic differences in grain yield and physiological nitrogen use efficiency among rice cultivars[J]. *Pedosphere*,2009,19(6):681-691.
- [26] 李 莉,张锡洲,李廷轩,等. 高产磷高效水稻磷素吸收利用特征[J]. 应用生态学报,2014,25(7):1963-1970.
- [27] 蒋伟勤,马中涛,胡 群,等. 缓控释氮肥对水稻生长发育及氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(3):777-784.
- [28] 熊 洪,唐玉明,任道群,等. 不同土壤类型、不同气候条件与水稻产量的关系[J]. 西南农业学报,2004,17(3):305-309.
- [29] 王晓洁,卑其成,刘 钢,等. 不同类型水稻土微生物群落结构特征及其影响因素[J]. 土壤学报,2021,58(3):767-776.
- [30] 王 蕾,邓兰生,涂攀峰,等. 聚磷酸铵水解因素研究进展及在肥料中的应用[J]. 磷肥与复肥,2015,30(4):25-27.
- [31] 唐志强,董立强,李 睿,等. 氮素与土壤类型对水稻秧苗素质及养分吸收的影响[J]. 作物杂志,2018(3):141-147.
- [32] 赵 爽,胡 江,沈其荣. 两个水稻品种根际土壤细菌和氨氧化细菌的群落结构差异[J]. 土壤学报,2010,47(5):939-945.
- [33] 简 燕,朱 坚,彭 华,等. 不同类型水稻土对氮磷养分的吸附解吸特征研究[J]. 湖南农业科学,2020(6):24-30.

(责任编辑:黄克玲)