

太湖地区主栽高产水稻品种对土壤和肥料氮的利用特性研究^①

陈 贵¹, 施卫明^{2*}, 赵国华³, 张红梅¹, 沈亚强¹, 程旺大^{1*}

(1 嘉兴市农业科学研究院农业生态环境研究室, 浙江嘉兴 314016; 2 中国科学院南京土壤研究所面源污染治理技术研发中心, 南京 210008; 3 嘉兴学院生物与化学工程学院, 浙江嘉兴 314001)

摘 要: 在太湖地区宜兴市采用 ¹⁵N 微区示踪试验, 研究了太湖地区推广种植高产水稻武运粳 23 号(W23)和镇稻 11 号(Z11)及育种较早相对低产品种武育粳 3 号(W3)在不同供氮水平下齐穗期前后对土壤氮和肥料氮的吸收累积特性, 土壤氮残留及其环境效应。结果表明: W23 和 Z11 在 N200(N, 200 kg/hm²)和 N270(N, 270 kg/hm²)水平下整个生育期吸收累积 3 种类型氮量(总氮、土壤氮和肥料氮)均显著高于 W3。不同水稻品种齐穗期前吸收累积 3 种类型氮量无显著差异, W23 和 Z11 齐穗期之后对土壤氮和肥料氮的吸收能力均明显强于 W3。特别是肥料氮, 分别比 W3 高 89.3% ~ 134% 和 119% ~ 157%; 施氮量增加促进了 W23 和 Z11 齐穗期前对土壤氮的吸收, 但对不同水稻品种齐穗期后对土壤氮和肥料氮的吸收无明显影响; 不同水稻品种在两种供氮条件下的稻田土壤肥料氮残留(¹⁵N 示踪), 全氮、碱解氮、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 均无明显差异; 在同等施氮条件下, 高产品种 W23 和 Z11 整个生育期稻田氮向环境的排放量低于 W3, 是相对环境友好型水稻品种。

关键词: 太湖地区; 高产水稻; 土壤氮; 肥料氮; 氮残留

中图分类号: S431.11; S431.1

随着社会经济和城镇化建设的迅猛发展, 粮食安全问题越发重要。提高水稻单产始终是解决该问题的核心。太湖地区作为我国主要稻作区之一, 近年来高产水稻已得到推广种植。然而, 不同基因型水稻品种对氮素养分的吸收代谢特性存在明显差异。单玉华等^[1]发现籼稻植株总吸氮量平均比粳稻高 14.1%, 而杂交籼稻和杂交粳稻分别比常规籼稻和常规粳稻高 22.8% 和 16.4%。朴钟泽等^[2]认为不同基因型水稻品种间在氮素吸收总量, 氮素转运利用方面存在显著差异; 孕穗期至黄熟期氮素吸收量在水稻不同基因型间也有着显著差异, 而在生育前期和中期则无明显差异。本课题组前期研究工作表明, 在农户习惯施肥模式下, 太湖地区推广种植高产水稻品种武运粳 23 号(W23)和镇稻 11 号(Z11)与育种年代较早对照品种武育粳 3 号(W3)在齐穗期之前植株吸收累积总氮量无明显差异, 而在齐穗期至成熟期阶段 W23 和 Z11 吸收累积氮素均显著大于 W3^[3]。据此, 提出科学问题: 在传统施肥管理模式下新育高产水稻在不同生育阶段, 特别是齐穗期后对土壤和肥料养分的利用特性以

及水稻收获后土壤氮素养分状况如何? 这是关系优化施肥模式和提高土壤肥力工作中亟待解决的问题。为此, 2012 年在太湖地区宜兴市丁蜀村开展了 ¹⁵N 同位素示踪微区试验, 以期明确在不同氮肥施用量水平下, 产量存在明显差异的水稻品种齐穗期前后对土壤氮和肥料氮的吸收利用差异及其成熟收获后对土壤氮的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

同位素 ¹⁵N 微区试验设于江苏省宜兴市丁蜀镇涓渎村(31°07' ~ 31°37'N, 119°31' ~ 120°03'E)。试验地属北亚热带湿润季风气候, 干湿季明显, 年平均温度 16℃, 年平均日照时数 1 904 h, 年降雨量 1 100 ~ 1 400 mm, 其中 60% ~ 70% 发生在夏季 6 月至 10 月。根据国际粮农组织(FAO)土壤分类系统分类, 该地区土壤类型为滞水潜育人为土, 由湖积物发育而来。试验区耕层土壤(0 ~ 20 cm)理化性状为: 全氮 1.45 g/kg, 有机质 22.7 g/kg, 碱解氮 148.9 mg/kg, 速效磷 27.4 mg/kg,

基金项目: 国家科技支撑项目(2012BAD15B03)、嘉兴市科技计划项目(2014AZ21005)和嘉兴市科技局重点项目(市 2011AZ1018)资助。

* 通讯作者(wmshi@issas.ac.cn; chwd228@yeah.net)

作者简介: 陈贵(1982—), 男, 山西运城人, 博士, 助理研究员, 主要从事水稻氮素营养及生态环境研究。E-mail: chenzhao2004@163.com

速效钾 39.3 mg/ka, pH 5.37。

1.2 试验材料

水稻品种武运粳 23 号(W23)、镇稻 11 号(Z11)、武育粳 3 号(W3)3 个常规粳稻为试验材料。W23 由江苏省常州市武进区农业科学研究所选育, 2010 年通过江苏省审定(编号: 苏审稻 201014)。Z11 由江苏丘陵地区镇江农业科学研究所选育, 2010 年通过江苏省审定(编号: 苏审稻 201015)。W3 由江苏省常州市武进区稻麦育种场和江苏省农科院粮作所联合选育, 1992 年通过江苏审定(编号: 苏种审字第 156 号)。

1.3 试验设计

试验设 3 个氮肥水平(以纯 N 计) 0、200、270 kg/hm², 分别简写为 N0、N200、N270, 其中 N200 代表常规施氮量, N270 代表高施氮量。氮肥分基肥、分蘖肥、穗肥 3 次施入, 施肥比例为 4:3:3。基肥于 2012 年 6 月 19 日水稻移栽前施用, 施用方式为与耕层土壤混合施用; 分蘖肥和穗肥施用日期分别为 7 月 5 日和 7 月 26 日, 施用方式为人工撒施。磷肥为过磷酸钙, 施用量为 75 kg/hm² P₂O₅, 钾肥为氯化钾, 施用量为 130 kg/hm² K₂O, 磷钾肥均以基肥形式于移栽前与耕层土壤充分混合一次性施入。氮肥施用日期见表 1。

3 个水稻品种和 3 个氮水平共计 9 个处理, 各处理 3 次重复, 随机排列。微区面积为 0.5 m², 形状为圆形(直径 0.8 m、高 0.5 m, 材质为 PVC)。微区装置及布置如图 1。¹⁵N 标记尿素丰度为 10%, 购于上海化工研究院。水稻移栽日期为 2012 年 6 月 19 日, 7 月 20 日至 7 月 26 日为中期烤田日期, 目的是为控制无效分蘖及根系纵向生长, 9 月 22 日至 10 月 31 日为灌浆期至成熟期烤田。其他时期均为淹水期, 田面水水位保持在 3~5 cm 左右。微区内水稻种植密度为 24 穴/m², 每穴 2 株。

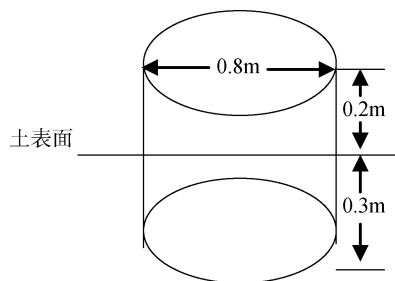


图 1 ¹⁵N 微区布置示意图
Fig. 1 Schematics view of ¹⁵N micro plot

1.4 测定项目与方法

水稻氮累积: 分别在水稻齐穗期和成熟期采集各微区有代表性 4 穴水稻地上部植株样, 其中, 将成熟

期水稻地上部分穗和茎秆两部分, 105℃杀青 30 min 后于 70℃烘至恒重, 称重, 计算干物质累积量。烘干植株磨细后, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解后凯氏定氮法测定水稻植株氮含量, 并计算氮累积量。

水稻植株(或土壤)¹⁵N 丰度: 将凯氏定氮法滴定后含氮液加 9 mol/L H₂SO₄ 后进行水浴浓缩、干燥, 通过 Finnigan-MAT 251 质谱仪测定植株(或土壤)中 ¹⁵N 丰度。

土壤残留氮: 水稻成熟后在各微区利用 5 点法采集 0~20 cm 耕层土壤样品, 充分混匀后, 一部分鲜样测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量, 另一部分土样经自然风干, 磨细分别过 20 目和 100 目筛后测定碱解氮和土壤 ¹⁵N 丰度。

1.5 数据处理和统计方法

地上部(或穗, 或茎秆)氮素累积量=地上部植株干重×植株含氮量(%);

植株积累的氮素(或土壤残留氮)来自肥料氮的比例(%)=(器官或土壤中 ¹⁵N 丰度-0.3663)/(肥料中 ¹⁵N 丰度-0.3663)×100^[4];

环境损失氮 = 施氮量-植物吸收累积肥料氮-耕层土壤残留氮。

文中所有数据均采用 SAS 数据分析软件包进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同水稻品种成熟期氮素吸收累积特性

由表 1 可知, 高产水稻 W23 和 Z11 在常规施氮水平(N200)和高施氮水平(N270)下的产量均显著高于对照品种 W3, 其中, 在 N200 水平下, 比 W3 分别高 27.1% 和 24.4%; 在 N270 水平下, 分别高 27.9% 和 25.6%。W23 和 Z11 整个生育期吸收累积的总氮量均明显大于对照 W3。其中, 在 N200 水平下, W23 和 Z11 分别比 W3 高 20% 和 19.9%; 在 N270 水平下, 分别高 28.3% 和 27.9%, 说明 W23 和 Z11 的氮素吸收能力及其对氮肥响应程度均强于 W3。通过 ¹⁵N 示踪发现, 在两种供氮水平下, W23 和 Z11 整个生育期吸收土壤氮和肥料氮量均显著高于 W3。其中, 在 N200 水平下, 比 W3 分别高 23.8%, 19.8% 和 13.3%, 19.8%; 在 N270 水平下, 分别高 28.4%, 27.8% 和 14.2%, 11.9%。当施氮量 N200 增至 N270 时, 各水稻品种吸收肥料氮量均显著增加, 而吸收土壤氮量则无显著差异。W23 和 Z11 在 N200 和 N270 水平下的肥料利用效率均显著大于 W3。然而, 肥料利用效率随施氮量增加却显著下降, 其中 W23、Z11 和 W3 的下降比例分别为 11.2%、17.4% 和 11.7%。

表 1 不同水稻品种成熟期吸收累积总氮、土壤氮、肥料氮量和氮肥利用率

Table 1 Accumulation of total N, soil-based N, fertilizer-based N and fertilizer N use efficiency in different rice varieties during whole growth stage

施氮水平	品种	产量 (t/hm ²)	氮累积总量 (N, kg/hm ²)	土壤氮量 (N, kg/hm ²)	肥料氮量 (N, kg/hm ²)	氮肥利用率 (%)
N200	W3	7.70 ± 0.07 b	158 ± 11 b	101 ± 10 b	56.6 ± 1.6 d (36.0%)	28.3 ± 0.8 c
	W23	9.79 ± 0.49 a	189 ± 14 a	125 ± 14 a	64.1 ± 2.8 bc (34.0%)	32.1 ± 1.4 b
	Z11	9.58 ± 0.13 a	189 ± 17 a	121 ± 15 a	67.8 ± 2.1 b (36.0%)	33.9 ± 1.1 a
N270	W3	7.82 ± 0.46 b	162 ± 5 b	94 ± 4 b	67.5 ± 1.3 bc (41.7%)	25.0 ± 0.5 d
	W23	10.0 ± 0.31 a	208 ± 14 a	131 ± 13 a	77.1 ± 1.6 a (37.1%)	28.5 ± 0.6 c
	Z11	9.82 ± 0.17 a	207 ± 4 a	132 ± 2 a	75.5 ± 2.5 a (36.4%)	28.0 ± 0.9 c

注：表中括号中数值表示水稻吸收累积肥料氮量占总累积氮量的百分比；表中同列小写字母代表处理间差异达显著水平($P < 0.05$)，下同。

2.2 不同水稻品种齐穗期前氮素吸收累积特性

由表 2 可知，在 N200 和 N270 水平下，高产品种 W23 和 Z11 与对照品种 W3 齐穗期前吸收累积的总氮量无显著差异，但 W23 和 Z11 吸收氮量占总氮累积量的比例低于 W3。各品种间吸收土壤氮和肥料氮量均无明显差异，但在 N270 水平下，W23 和 Z11 吸收总氮量和土壤氮量要高于 W3，分别比 W3 高 12.1%，15.0% 和 15.7%，21.9%，远高于肥料氮增加比例 6.24% 和 5.30%。这说明在 N270 水平下，齐穗期前高产水稻品种对土壤氮的吸收能力可能要强于低产品种。随供氮量增加，水稻齐穗期前总氮累积量呈增加趋势。其中，W23 和 Z11 达显著差异，增

加比例为 19.8% 和 23.8%，而对照 W3 增加比例为 9.38%，未达显著水平。各品种吸收肥料氮量的比例占此时期水稻总累积氮的比例在 N200 和 N270 水平下分别为 40.6% ~ 44.5% 和 42.1% ~ 45.6%，均高于整个生育期的 34.0% ~ 36.0% 和 36.4% ~ 41.7%；吸收肥料氮量占总施氮量分别为 25.9% ~ 28.7% 和 23.7% ~ 25.2%，略低于整个生育期的 28.3% ~ 33.9% 和 25.0% ~ 28.0%。随施氮量增加，水稻吸收肥料氮占总吸收氮量的比例呈增加趋势，而占总施氮量的比例却呈下降趋势。说明，尽管氮肥促进了水稻对肥料氮的吸收累积，但仍使氮肥利用率下降在水稻齐穗期前阶段亦是如此。

表 2 不同水稻品种齐穗期前吸收累积总氮、土壤氮和肥料氮量

Table 2 Accumulation of total N, soil-based N, fertilizer-based N in different rice varieties before rice heading stage

施氮水平	品种	齐穗期前累积氮量 (N, kg/hm ²)	土壤氮量 (N, kg/hm ²)	肥料氮量 (N, kg/hm ²)	肥料氮占施氮量百分比 (%)
N200	W3	128 ± 18 b (81.0%) ¹⁾	75.7 ± 10.0 ab	51.9 ± 7.7 c (40.6%) ²⁾	25.9 ± 3.9 ab
	W23	131 ± 8 b (69.0%)	77.2 ± 8.0 ab	53.4 ± 5.0 c (40.9%)	26.7 ± 2.5 ab
	Z11	130 ± 13 b (68.6%)	72.1 ± 10.3 b	57.5 ± 4.5 bc (44.5%)	28.7 ± 2.3 a
N270	W3	140 ± 12 ab (86.7%)	76.4 ± 7.0 ab	64.1 ± 4.8 ab (45.6%)	23.7 ± 1.8 b
	W23	157 ± 17 a (75.2%)	88.4 ± 13.5 ab	68.1 ± 4.1 a (43.7%)	25.2 ± 1.5 ab
	Z11	161 ± 11 a (77.5%)	93.1 ± 10.4 a	67.5 ± 3.5 a (42.1%)	25.0 ± 1.3 ab

注：1)列括号中数值表示齐穗期前累积氮量占总累积氮量的百分比，2)列括号中数值表示齐穗期前累积肥料氮量占齐穗期前累积氮量的百分比。

2.3 不同水稻品种齐穗期后氮素吸收累积特性

由表 3 可知，在两种供氮水平下，高产品种 W23 和 Z11 齐穗期后的氮素累积量要明显高于对照 W3，且吸收累积氮量占总量的比例亦高于 W3。在 N200 水平下，W23 和 Z11 吸收累积氮量分别比 W3 高 95.7% 和 98.0%；N270 水平下分别高 139% 和 116%。高产品种吸收土壤氮量和肥料氮量亦显著高于低产品种。其中，在 N200 水平下，W23 和 Z11 分别比 W3 高 89.3%，94.1% 和 129%，119%；N270 水平下分别高 134%，102% 和 157%，130%。吸收

肥料氮增加比例大于此阶段总氮增加比例和土壤氮增加比例，这意味着尽管高产水稻品种 W23 和 Z11 在齐穗期之后吸收土壤氮的能力强于 W3，但其吸收肥料氮的能力则更强。尽管齐穗期后吸收肥料氮占此阶段总吸收氮量的比例仅为 16.3% ~ 19.2%。不同水稻品种齐穗期后吸收肥料氮量占总施氮量的比例为 2.35% ~ 5.39%，远低于整个生育期的 28.3% ~ 33.9% 和 25.0% ~ 28.0%。说明，齐穗期后水稻主要以吸收土壤氮素为主，而对肥料氮的吸收量则相对较少。

表 3 不同水稻品种齐穗期后吸收累积总氮、土壤氮和肥料氮量
Table 3 Accumulation of total N, soil-based N, fertilizer-based N in different rice varieties after rice heading stage

施氮水平	品种	齐穗期后累积氮量 (N, kg/hm ²)	土壤氮量 (N, kg/hm ²)	肥料氮量 (N, kg/hm ²)	肥料氮占施氮量百分比 (%)
N200	W3	30.0 ± 11.3 bc (21.2%) ¹⁾	25.3 ± 10.4 bc	4.71 ± 1.56 bc (16.4%) ²⁾	2.35 ± 0.78 bc
	W23	58.7 ± 13.9 a (36.8%)	47.9 ± 14.1 a	10.8 ± 2.8 a (19.2%)	5.39 ± 1.42 a
	Z11	59.4 ± 17.2 a (38.5%)	49.1 ± 15.1 a	10.3 ± 2.1 a (17.7%)	5.15 ± 1.07 a
N270	W3	21.6 ± 4.8 c (10.1%)	18.2 ± 4.4 c	3.48 ± 1.35 c (16.3%)	1.29 ± 0.50 c
	W23	51.6 ± 14.4 a (29.9%)	42.6 ± 13.1 ab	8.96 ± 1.56 a (17.9%)	3.32 ± 0.58 b
	Z11	46.7 ± 3.8 ab (21.7%)	36.7 ± 2.4 ab	8.00 ± 2.30 ab (17.1%)	2.97 ± 0.85 b

注: 1)列括号中数值表示齐穗期后累积氮量占总累积氮量的百分比, 2)列括号中数值表示齐穗期后累积肥料氮量占齐穗期前累积氮量的百分比。

2.4 不同水稻品种成熟期土壤氮素残留特性

由表 4 可知, 在 N200 水平下, 水稻成熟期后肥料氮在土壤中的残留量为 34.5 ~ 39.2 kg/hm², 占施氮量的比例为 17.2% ~ 19.6%; 在 N270 水平下, 肥料氮残留量为 37.7 ~ 45.7 kg/hm², 要高于 N200 水平, 尽管统计上未达显著差异。然而, N270 水平下土壤中肥料氮残留量占总施氮量的比例要略低于 N200 水平, 为 14.0% ~ 16.9%。由此说明, 当施氮量由 N200 增至 N270 时, 肥料氮残留量呈增加趋势, 而占施氮量的比例却呈下降趋势。但高产品种 W23 和 Z11 和对照 W3 的肥料氮残留则无明显差异。在 N270 水平下, W23 和 Z11 的肥料氮残留甚至呈高于对照 W3 趋势。

表 4 不同水稻品种成熟期肥料氮残留量
Table 4 Fertilizer N residue under different rice varieties at maturity

施氮水平	品种	土壤残留氮量 (N, kg/hm ²)	氮残留量占施氮量百分比 (%)
N200	W3	34.5 ± 8.4 a	17.2 ± 4.2 ab
	W23	33.2 ± 7.4 a	16.6 ± 3.7 ab
	Z11	39.2 ± 1.9 a	19.6 ± 0.9 a
N270	W3	37.7 ± 8.7 a	14.0 ± 3.2 b
	W23	42.9 ± 7.7 a	15.9 ± 2.8 ab
	Z11	45.7 ± 6.1 a	16.9 ± 2.3 ab

表 5 说明, 在两种施氮水平下, 高产水稻品种 W23 和 Z11 和对照品种 W3 成熟期后土壤碱解氮、NH₄⁺-N 以及 NO₃⁻-N 含量均无明显差异。另外, 不同施氮水平各水稻品种之间亦无明显差异, 说明在稻田种植系统中, 氮肥施用量对成熟期后土壤氮素残留的影响较小。

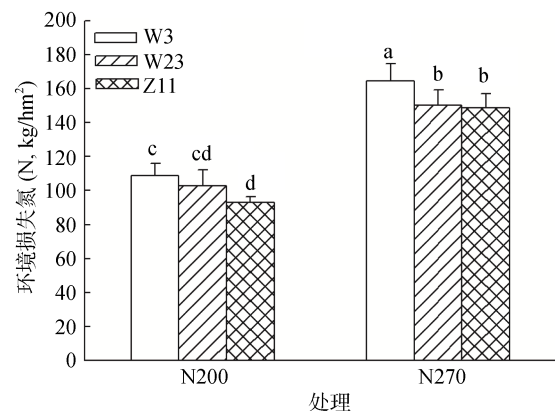
2.5 不同水稻品种种植的环境损失氮特性

种植 W23 和 Z11 稻田的氮素损失总量(氮挥发、硝化-反硝化、渗漏和径流氮损失之和)要低于 W3。

在 N200 水平下, W3 稻田总氮损失量比 W23 高 5.80%, 比 Z11 高 14.6%, 达显著差异水平; 在 N270 水平下, 各水稻品种稻田氮素损失均比 N200 水平下明显增加 46.2% ~ 59.9%。对照品种 W3 比 W23 和 Z11 分别高 8.93% 和 9.72%, 均达显著差异水平(图 2)。这说明在同等施氮条件下太湖地区主栽高产水稻品种稻田氮素损失进入环境量要低于低产水稻品种, 是相对环境友好型水稻品种。

表 5 不同水稻品种成熟期土壤碱解氮和矿质氮含量
Table 5 Contents of alkali-hydrolyzable N and mineral N in soil with different rice varieties at maturity

施氮水平	品种	碱解氮 (N, kg/hm ²)	NH ₄ ⁺ -N (N, kg/hm ²)	NO ₃ ⁻ -N (N, kg/hm ²)
N200	W3	348 ± 26 a	62.4 ± 6.6 a	15.9 ± 1.6 a
	W23	331 ± 26 a	65.3 ± 5.4 a	14.9 ± 0.7 a
	Z11	325 ± 16 a	64.7 ± 6.5 a	14.4 ± 1.5 a
N270	W3	325 ± 17 a	61.6 ± 7.9 a	16.6 ± 1.0 a
	W23	317 ± 14 a	58.0 ± 7.4 a	15.1 ± 1.6 a
	Z11	322 ± 33 a	57.7 ± 6.5 a	15.9 ± 1.6 a



(图中不同小写字母代表处理间差异达显著水平($P < 0.05$), 下同。)

图 2 不同水稻品种稻田氮素环境损失总量

Fig. 2 Total N losses from paddy field to environment under different rice varieties

3 结论与讨论

通过 ^{15}N 示踪试验发现,太湖地区目前推广种植较广水稻品种常规粳稻 W23 和 Z11 整个生育期的氮肥利用效率明显高于育种年代较早的常规粳稻 W3,这表明在同等施氮量条件下,新育水稻品种不仅具有更高的产量,而且对提高氮肥利用效率,减少稻田氮素损失是有利的。这为有些学者认为氮高效水稻能够有效减控稻田氮损失的观点提供了一定的理论基础^[5-7]。分析发现不同水稻品种齐穗期前吸收土壤氮和肥料氮的能力均无明显差异,而齐穗期之后,高产水稻品种 W23 和 Z11 对土壤氮和肥料氮的吸收能力均明显强于 W3,特别是肥料氮。肥料氮施入土壤后,除少部分快速被作物根系吸收利用后,大部分则通过生物固定、分解、化学固定、释放、氮素转化、损失等形式进入土壤氮循环^[8],而作物根系形态特征、生理生化特性均可影响土壤氮循环^[9]。W23 和 Z11 根系在齐穗期之后的活力、根表面积、根系在土壤层中的分布密度、根毛数量以及根系新陈代谢和分泌物能力可能在某些方面优于 W3,致使其能够吸收较多的土壤氮以及相对更多的肥料氮。然而,齐穗期后不同水稻品种吸收肥料氮量所占比例为 16.3%~19.2%,远低于齐穗期之前的 40.6%~45.6%,这可能与齐穗期之后肥料氮在土壤中的存在量有关。研究表明,稻田中各途径氮素损失的主要发生时期主要集中于氮肥施用后的较短时间内,比如氨挥发主要发生在氮肥施用后的 1 周左右时间;硝化-反硝化损失主要发生于中期烤田的水分管理时期和肥料施用后的较短时间内,径流和渗漏也主要发生于施肥后的较短时间内^[10-12]。因此,至齐穗期时土壤中存留肥料氮较少可能是齐穗期后水稻吸收肥料源氮量少的主要原因之一。另一方面,也表明传统的重前轻后施肥措施已不适应新育水稻品种对氮肥吸收的需求,而应当适当调节氮肥的前后施用比例,这样可能更有利于提高氮肥利用效率和保存土壤地力。

随施氮量增加,水稻的氮素利用效率和氮肥利用效率均呈下降趋势^[13-14]。在本研究中,当施氮量由 N200 水平增至 N270 时,各水稻品种的氮肥利用效率均下降,且不同水稻品种的下降比例基本一致,分别为 W3 11.7%、W23 11.2% 和 Z11 17.4%。齐穗期之前不同水稻品种吸收累积肥料氮量随施氮量增加而增加,其中高产水稻 W23 和 Z11 增加比例分别为 27.5% 和 17.4%,W3 增加 23.5%。但对土壤氮而言,W23 和 Z11 随施氮量增加吸收累积土壤氮增加比例分别为 16.8% 和 29.1% 远超 W3 的增加比例 0.92%,这表明高产水稻品种齐穗期之前对氮肥用量增加的

响应程度要高于低产品种,而这种响应主要表现在对土壤氮的吸收累积上。稻田中的有机质含量相对于旱地较高,而土壤氮素中 90% 以上为有机态氮,大多数有机态氮不能直接为水稻吸收利用,必须经过矿化转变为铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)或硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$),才能被水稻吸收利用,而此过程的主要驱动者是微生物^[15-16]。有研究表明,随氮肥用量的增加,作物根际微生物数量增加,微生物多样性也增加^[17-18]。另有研究表明,一定量的氮肥可以促进作物根系分泌物增加,而根系分泌物中乙酸、柠檬酸含量与土壤微生物数量呈极显著相关,琥珀酸含量与土壤微生物数量呈显著正相关^[19]。此据,推断氮肥施用量增加促进高产水稻品种根系分泌物增加,从而增加土壤微生物数量和多样性,促进有机物质分解,增加土壤氮的有效性。齐穗期后随施氮量增加不同水稻品种对土壤氮和肥料氮的响应不明显,这可能与齐穗期后根系生长相对缓慢,且生理功能开始衰弱,加之土壤中氮素含量下降有关^[20]。

本研究发现,尽管高产水稻整个生育期吸收累积总氮量,包括土壤氮和肥料氮,显著大于育种年代较早的低产水稻,然而通过 ^{15}N 示踪发现耕层土壤残留肥料氮素在种植不同水稻品种的地块之间,甚至在不同施肥量间并未达显著差异。另外,通过分析土壤碱解氮以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,再次证明不同水稻品种间以及不同施氮量间无明显差异。研究者认为,太湖地区稻田系统中的氮平衡是一种高投入高产模式,即当氮肥施入稻田后,特别是在过量施肥时大量的氮素损失进入大气和水体,而真正能对水稻生长、产量形成以及增加土壤氮库发挥作用的氮素有限^[21]。Qiao 等^[22]也发现,不同氮肥施用量对成熟期稻田土壤,特别是水稻根系周围土壤的矿质氮含量影响很小。另有报道,长期大量施用化肥氮并不会增加稻田土壤氮含量^[23]。稻田氮素主要通过氨挥发、硝化-反硝化、渗漏和径流形式损失,其中由于 NH_3 挥发和硝化-反硝化而引起的氮素损失量占施氮量的比例最大,我国稻田 NH_3 挥发量占施氮量的比例为 9%~40%,硝化-反硝化的氮素损失量占施氮量比例为 16%~41%^[24-25],而渗漏和径流损失的氮素则相对较小,比例约为 5%~8%左右^[26-27]。因此,不同氮素吸收累积型水稻品种和不同施氮水平下稻田土壤氮残留无明显差异可能是由于稻田氮素各损失途径的综合作用结果。另外,从整个生育期的氮平衡来看,在同等施肥条件下太湖地区主栽高产水稻品种对减控稻田氮损失能够发挥一定作用,相对于育种较早的水稻品种而言是一种环境友好型水稻品种。

参考文献：

- [1] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 等. 不同类型水稻在氮素吸收及利用上的差异[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2001, 4(3): 42–50
- [2] 朴钟泽, 韩龙植, 高熙宗. 水稻不同基因型氮素利用效率差异[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(3): 233–238
- [3] 陈贵, 陈莹, 施卫明. 太湖地区主栽高产水稻的氮素利用特性[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(5): 928–937
- [4] Zanetti S, Hartwig U A, Kessel C, et al. Does nitrogen nutrition restrict the CO₂ response of fertile grassland lacking legumes[J]. *Oecologia*, 1997, 112: 17–25
- [5] Glass A D M, Britto D T, Kaiser B N, et al. The regulation of nitrate and ammonium transport systems in plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 53: 855–864
- [6] Lian X, Wang S, Zhang J, et al. Expression profiles of 10 422 genes at early stage of low nitrogen stress in rice assayed using a cDNA microarray[J]. *Plant Molecular Biology*, 2006, 60: 617–631
- [7] Shi W M, Xu W F, Li S M, et al. Response of two rice cultivars differing in seedling-stage nitrogen use efficiency to growth under low-nitrogen conditions[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326: 291–302
- [8] 朱兆良. 土壤中氮素的转化[J]. 土壤学报, 1963, 11(3): 328–338
- [9] Garnett T, Conn V, Kaiser B N. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants[J]. *Plant Cell and Environment*, 2009, 32: 1 272–1 283
- [10] Hayashi K, Nishimura S, Yagi K. Ammonia volatilization from the surface of a Japanese paddy field during rice cultivation[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52: 545–555
- [11] Xing G X, Shi S L, Shen G Y, et al. Nitrous oxide emissions from paddy soil in three rice-based cropping systems in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64: 135–143
- [12] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 156: 1–11
- [13] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 117–127
- [14] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 835–839
- [15] 周卫军, 王凯荣, 刘鑫. 有机物循环对红壤稻田土壤 N 矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 39–43
- [16] 田小明, 李俊华, 王成, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(3): 481–488
- [17] 罗明, 文启凯, 陈全家, 等. 不同用量的氮磷化肥对棉田土壤微生物区系及活性的影响[J]. 土壤通报, 2000, 31(2): 66–71
- [18] Zhang N L, Wan S Q, Li L H, et al. Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semi arid temperate steppe in northern China[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311: 19–28
- [19] 徐国伟, 常二华, 陈明灿, 等. 水肥耦合对小麦根系及根际微环境的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(21): 4 350–4 353
- [20] 宁书菊, 窦慧娟, 陈晓飞, 等. 水稻生育后期根系氮代谢生理活性变的研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 506–511
- [21] 朱兆良. 农田氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1–6
- [22] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, et al. Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 49: 93–103
- [23] Inthapanya P, Sipaseuth, S P, Sihathep V, et al. Genotype differences in nutrient uptake and utilization for grain yield production of rainfed lowland rice under fertilized and non-fertilized conditions[J]. *Field Crops Research*, 2000, 65: 57–68
- [24] 蔡贵信, 朱兆良. 稻田中化肥氮的气态损失[J]. 土壤学报, 1995, 32(增刊 2): 128–135
- [25] 黄晶晶, 朱波, 林超文, 等. 施氮量和田面水含氮量对紫色土丘陵区稻田氮挥发影响[J]. 土壤, 2014, 46(4): 623–629
- [26] 田玉华, 尹斌, 朱兆良. 稻田氮素淋洗损失研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(12): 2 792–2 794
- [27] 纪雄辉, 郑圣先, 石丽红, 等. 洞庭湖区不同稻田土壤及施肥对养分淋溶损失的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 663–671

Characteristics of Utilization of N Sources From Soil and Fertilizer by Rice Varieties with High Yield in Taihu Lake Area

CHEN Gui¹, SHI Weiming^{2*}, ZHAO Guohua³, ZHANG Hongmei¹,
SHEN Yaqiang¹, CHENG Wangda^{1*}

(1 *Development of Agricultural Ecological Environment, Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Jiaxing, Zhejiang 314016, China*; 2 *Research Center of Non-point Source Pollution Control, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 3 *College of Biological, Chemical Sciences and Engineering, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China*)

Abstract: ¹⁵N micro-plot experiment was conducted in Yixing city of Taihu Lake area to study characteristics of soil and fertilizer N uptake in Wuyunjing 23 (W23), Zhendao 11 (Z11) and Wuyujing 3 (W3) before and after rice heading stage, N residue in soil and environmental N losses. W23 and Z11 were cultivated recently and planted widely as high-grain rice varieties, while W3 was earlier bred with relatively lower yield. The results showed that W23 and Z11 accumulated obviously greater total N, soil N and fertilizer N than W3 did during whole growth stage. There was no difference in accumulations of 3 kinds of N for these rice cultivars before heading stage. W23 and Z11 had stronger ability in absorbing soil and fertilizer N than W3 after heading stage, especially for fertilizer N. The uptake of N from soil by W23 and Z11 was increased by 89.3%–134% and by 119%–157% from fertilizer compared with W3. Increase in N application rate enhanced uptake of N from soil by W23 and Z11 before heading stage, but did not affected N uptake from soil and fertilizer after heading stage. There were no significant differences in soil N residues of fertilizer N detected by ¹⁵N trace method, total N, alkali-hydrolyzable N, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in cultivated soil among various rice varieties at N200 and N270 levels. W23 and Z11 were environment-friendly rice cultivars under the same N application rate due to less N losses into environment compared with W3.

Key words: Taihu Lake area; High-yield rice; Soil N; Fertilizer N; N residue