

不同利用年限不同坡位的红壤水稻田化肥氮去向

尧水红^{1,2}, 张 斌², 胡 锋¹, 程训强²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要: 采用 ^{15}N 微区示踪法研究了不同利用年限、不同坡位的红壤水稻田 N 素的运移特征与去向。试验结果表明: 红壤地区新、老稻田成熟期肥料利用率为 18.71%~29.10%; 残留率在 5.97%~18.73% 之间; 老稻田耕层的土壤 N 素残留高于新稻田, 但新稻田剖面中 15~50 cm 土层 ^{15}N 残留量占总残留量的比率明显要高于老稻田。红壤水稻田肥料损失率高达 52.24%~68.91%。此外, 供试田块各生育期渗漏水中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度均为: 耕层 > 犁底层。

关键词: 水稻田; 利用年限; 坡位; ^{15}N 微区示踪; 氮素去向

中图分类号: S143

水稻是我国南方种植面积最大的粮食作物。水稻产量是解决我国乃至全球粮食问题的重要着眼点。化肥尤其是 N 肥的施用, 在改善土壤肥力、提高农作物产量与质量中起着重要作用; 然而 N 肥又是水体环境的潜在污染物, 极易影响人类健康^[1-4]。因此, N 素在农田生态系统中的转化及去向值得研究。影响土壤中 N 素的转化及去向因素较多, 植物类型^[5]、肥料品种^[5-6]、土壤性质^[6-8]、土壤水热条件等都与其有着密切关系。

土壤水分状况对稻田土壤 N 素转化及损失的影响明显^[9-11]。已有研究表明, 通过水分运移 (如泡田弃水、地表径流和淋溶) 损失的 N 素占总损失量的 7%~23.2%^[1], 变幅较大。因此, 探索土壤水对 N 肥的转化以及对水环境的潜在压力意义重大。

影响稻田土壤水分状况的因素除了灌溉管理外, 还可能与稻田的利用年限和地形部位有关。不同利用年限可能影响土壤水分的渗漏; 而稻田地形位置则可能引起土壤水分运移以及氧化还原条件的差异。但迄今为止, 国内外关于稻田 N 素转化和去向的研究很少考虑土壤水分条件变化和运移的影响。本文利用 ^{15}N 微区示踪法研究红壤稻田不同利用年限和坡位对土壤-作物系统 N 素循环的影响, 旨在为评价红壤小流域

N 素迁移转化特征及其对环境的影响提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

本研究在江西省鹰潭市余江县刘家站垦殖场三分场 (116°5'30"E, 28°5'30"N) 红壤小流域进行。该区属于典型的亚热带季风气候, 具有明显的干湿季节变化, 年降雨量 1700 mm, 其中 50% 集中在 3—7 月。无霜期为 262 天, 平均海拔高度为 45 m。土壤为发育于第四纪红黏土的黏壤老成土^[12] 或称为富铁土^[13]。

1.2 试验设计

试验于 2002 年进行。试验田共 4 块, 分别为位于不同坡位的新、老稻田。老稻田开垦年限超过 20 年, 新稻田开垦年限仅为 7 年。上坡、下坡稻田高差约为 2~3 m。种植制度为稻-稻连作, 早稻品种为金优 402, 晚稻品种为晚粳 923。分别在各田块中设置 6 个 ^{15}N 微区。微区面积为 0.25 m², 由 0.5 m × 0.5 m × 0.55 m 金属框制成, 埋深为 0.5 m。微区间距为 1.5 m, 距离田埂 2 m 以上。随机选取 3 个微区插入深度为 15 cm 薄隔板 2 块, 将微区均分为 3 个取样区 (图 1), 分别供分蘖期、扬花期和灌浆期取样, 另外 3 个微区

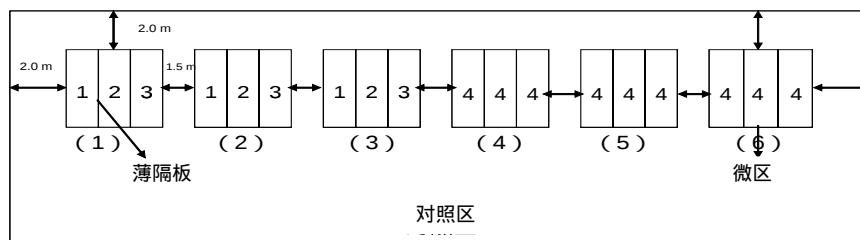


图 1 田间微区与取样区的布置图

Fig. 1 Lay-out of micro-plots and sampling-plots in the experimental paddy fields

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40071044) 资助。

作者简介: 尧水红 (1978—), 女, 江西临川人, 博士研究生, 主要从事土壤生物物理方面的研究。E-mail: shyao@issas.ac.cn

供成熟期取样。

微区外大田为对照区。微区与大田的施肥量一致，N 肥：158.7 kg/hm²，钙镁磷肥：37.5 kg/hm²，氯化钾：187.5 kg/hm²。大田施入的 N 肥为尿素，微区中 N 肥为 20.13% 丰度的 (¹⁵NH₄)₂SO₄。2/3 N 肥作基肥，1/3 N 肥在扬花期追施^[12-13]；P、K 肥均作基肥。种植密度均为每公顷 36 万穴。人工除草，杂草埋入各自微区。

1.3 数据采集与分析

1.3.1 氧化还原电位监测 在每个试验田块中随机选 3 个点，定期用去极化法氧化还原电位测定仪监测耕层 (0~15 cm) 和犁底层 (25 cm 以下) 的氧化还原电位，每次重复 3 次。

1.3.2 样品采集 植株样品：分蘖期、扬花期和灌浆期在取样区内取 3 穴植株，成熟期取出全部 9 穴植株，分别采集穗、茎、叶和根样品。在 70℃ 下烘干植株样，磨碎后过 100 目筛，储存备用。

土壤样品：实验前在微区周围采集耕层土壤。水稻生长期间在采集植株样品之后在取样区内采集耕层土壤样品。水稻成熟期植株样品采集后，分 0~15 cm、15~30 cm、30~50 cm、50~100 cm 层次采集剖面土壤样品。风干土样过 100 目筛，储存备用。

渗漏水样：PVC 管底部 0~5 cm 的管壁上全部均匀地钻上小孔，然后用纱布封住 PVC 管的底部并填充石英砂构成过滤层，埋设方法如图 2 所示。从施肥后 2~3 天开始每隔 2 天从 PVC 管中采集渗漏水样，分别测定水样中的 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 及全 N 的含量。

1.3.3 样品分析和数据处理 土壤基本理化分析以及水样、植株全 N 按常规分析方法^[14]进行。NO₃⁻-N 用岛津紫外分光光度计 UV1240 测定；NH₄⁺-N 用靛酚蓝法测定；全 N 用 Gerhardt vap-45 自动定氮仪测定；测定 ¹⁵N 丰度的样品按陈子元和曹亚澄报道的方法^[17]预处理，¹⁵N 丰度由中国科学院南京土壤研究所

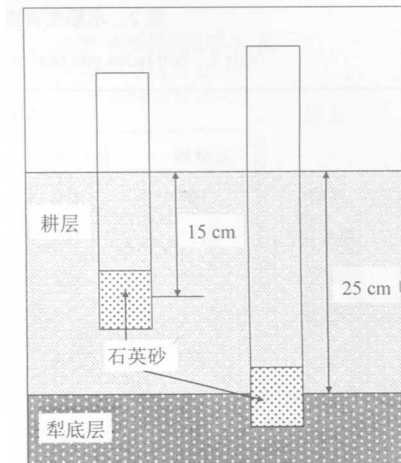


图 2 田间渗漏水采集管 (PVC 管) 埋设图

Fig. 2 Sketch of the apparatus of leachate collecting system (PVC pipe)

MI1305 型质谱仪测定。

不同处理之间进行方差分析 (ANOVA)，差异水平通过最小显著差数法 (LSD) 检验。统计和图件应用 SPSS10.0 和 Origin6.1 软件完成。

2 结果分析

2.1 稻田土壤的基本性质

各田块土壤理化性质如表 1 所示。土壤 pH 值在 5.13~5.72 间，田块间差异较小。土壤有机质、全 N 和有效态 N、P、K 的含量均为上坡老稻田 > 下坡老稻田 > 下坡新稻田 > 上坡新稻田。全 P 和全 K 含量为下坡老稻田 < 下坡新稻田。不同田块间土壤有机质和全 N 含量差异最大，全 P 和全 K 含量差异最小。从总体上看，老稻田的土壤肥力高于新稻田。但不同利用年限影响了各坡位稻田的肥力状况，老稻田土壤肥力为上坡高于下坡，新稻田却是下坡田块较高。

表 1 水稻试验田块的理化性质

Table 1 Soil physico-chemical properties of the experimental paddy fields

田块代码	田块描述	pH (H ₂ O)	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	碱解 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
A ₁	坡上老稻田	5.13	35.1	1.76	0.642	8.14	153.6	21.25	140.0
A ₂	坡下老稻田	5.32	18.7	1.14	0.361	6.25	78.65	20.64	90.03
A ₃	坡上新稻田	5.72	9.35	0.78	0.459	8.72	37.45	10.21	85.09
A ₄	坡下新稻田	5.47	16.3	1.09	0.433	8.63	71.16	10.59	100.0

2.2 不同利用年限和坡位对土壤 Eh 值的影响

水稻不同生育期土壤氧化还原电位变化情况见表 2。随生育期的推进，土壤氧化还原电位 (Eh 值) 大

体呈上升趋势。从总体上看，下坡稻田土壤 Eh 值总是小于上坡稻田，这是因为下坡位的稻田地下水位高，田块受水分状况的影响更容易形成较强的还原条件；

表 2 水稻生育期内各试验田块不同层次的氧化还原电位 (mV)

Table 2 Soil redox potential in soil layers of the experimental plots at different rice growth stages

田块代码	土层	早稻				晚稻			
		分蘖期	扬花期	灌浆期	成熟期	分蘖期	扬花期	灌浆期	成熟期
A1	耕层	167	172	364	590	-66	226	178	470
	犁底层	112	101	29	96	-220	87	24	331
A2	耕层	-27	-22	148	401	-173	-127	71	117
	犁底层	-52	-39	-9	71	-306	-99	-62	45
A3	耕层	93	114	160	364	-84	167	160	411
	犁底层	22	29	112	280	-253	83	-9	27
A4	耕层	-20	21	153	316	-145	74	99	318
	犁底层	-17	-9	101	171	-294	63	-50	307

而下坡老稻田的 Eh 值始终最低,上坡老稻田的值最高,两者平均相差 177 mV,如果以 300 mV 的 Eh 值划分土壤的氧化性和还原性^[18],下坡老稻田土壤在水稻生育期间一直处于较强烈的还原状态。这说明稻田的氧化还原条件不仅受到水分状况的影响,而且还与稻田的利用年限密切相关,利用年限长的老稻田通气条件较利用年限短的新稻田差,因而更易处于较强的还原条件。不同深度对 Eh 值的影响结果表明,犁底层土壤 Eh 值均小于耕层土壤。

2.3 不同利用年限和坡位稻田化肥 N 的利用和转化

2.3.1 各生育期水稻对化肥 N 的利用率 各生育

期水稻对 N 肥 (^{15}N) 的利用率见图 3。随着水稻生育期进程,早、晚稻的 ^{15}N 肥利用率均呈先降低后逐渐增加的趋势。分蘖期水稻植株较小,对 ^{15}N 肥料的利用能力低;但在进入扬花期前又追施了 1/3 的穗肥,因而使扬花期水稻的肥料利用率下降,扬花期后 N 肥利用率逐渐提高,在成熟期达到最高。各时期晚稻 N 肥的利用率均高于早稻(成熟期下坡新水稻田除外)。从不同利用年限对 N 肥利用率影响看(图 3),各时期新水稻田 N 肥的平均利用率均高于老水稻田;不同坡位对 N 肥利用率的影响则均表现为下坡水稻田高于上坡水稻田。

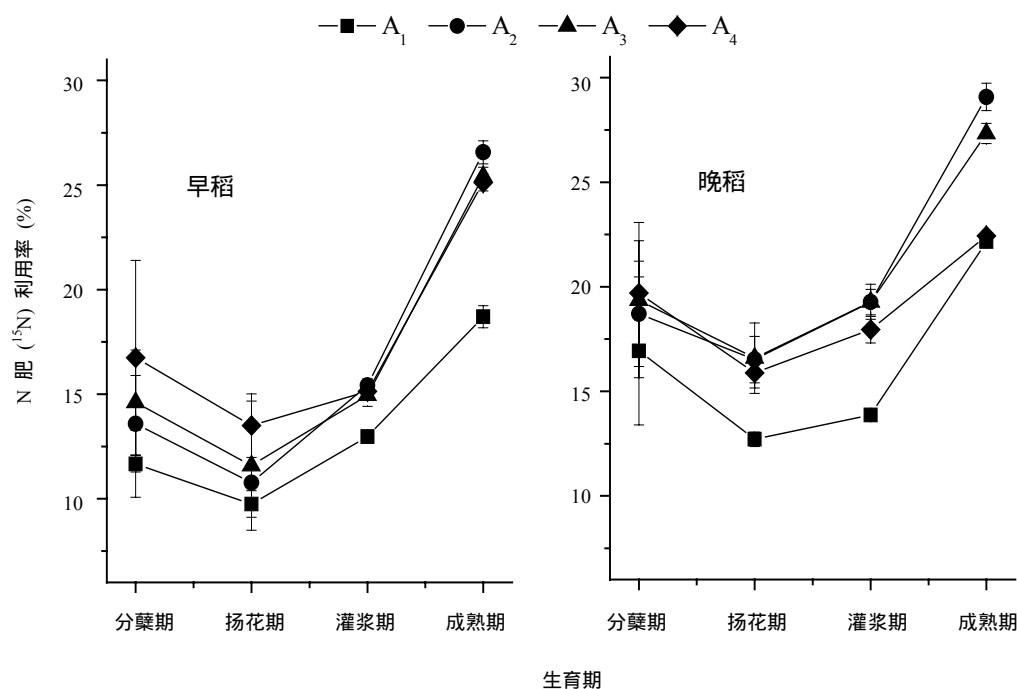
图 3 早、晚稻在各个生育时期的 ^{15}N 利用率Fig. 3 ^{15}N recovery rate from fertilizer by early and late rice at various growth stages

图 4 是成熟期各田块土壤和肥料对水稻植株供 N 的情况。由图 4 所示,下坡稻田在早、晚稻成熟期肥料供 N 量 (F) 均略大于上坡稻田;老稻田在早稻成熟期略小于新稻田,而在晚稻成熟期老稻田却大于新稻田。此外,在不同的生长季节中老稻田的土壤供 N 量 (S) 显著的大于新稻田,因此水稻植株的总吸 N 量老稻田显著的大于新稻田,且植株偏向于土壤 N 的利用。由图 4 还可以看出,老稻田的土壤和肥料两 N 源供 N 比 (S/F: 1.63~2.61) 显著的大于新稻田 (S/F: 1.13~1.58); 但下坡老稻田的两 N 源供 N 比明显小于上坡老稻田,下坡新稻田的两 N 源供 N 比大于上坡新稻田。

2.3.2 土壤中化肥 N 的残留 从表 3 数据可见,上述 4 个供试田块在分蘖期耕层土壤的¹⁵N 残留率为 29.1%~59.5%。随着生育期的延长,植株利用的肥料 N 增加,并因多次田面排水带走了大量的 N 素^[15, 19-20],使 N 肥残留率逐渐减少,至水稻成熟时残留率仅为 5.0%~17.5%。

表 3 红壤水稻田耕层土壤在各生育期时的¹⁵N 残留

Table 3 ¹⁵N residue in cultivated layer of the experiment plots at various rice growth stages

田块代码	早稻耕层土样 ¹⁵ N 残留率 (%)				晚稻耕层土样 ¹⁵ N 残留率 (%)			
	分蘖期	扬花期	灌浆期	成熟期	分蘖期	扬花期	灌浆期	成熟期
A1	42.1b	34.5a	24.6a	13.9a	36.6a	27.5a	20.8a	16.8ab
A2	59.5a	25.4b	16.4b	12.8ab	36.3a	18.6c	18.3b	17.5a
A3	33.2c	15.9c	16.7b	5.0c	33.6b	27.0a	15.8c	9.6c
A4	56.9a	16.1c	11.5c	5.0c	29.1c	26.2ab	14.3cd	8.1cd

注:表中同列字母的不同表示同一生育期内各田块耕层土壤¹⁵N 残留率之间存在显著差异 ($P \leq 0.05$)。

表 4 为早、晚稻成熟期各田块土壤剖面的¹⁵N 残留率以及剖面的各层次中¹⁵N 残留量占总残留量的比率。早稻生长季节降雨量大且频繁,地表径流以及水分的侧渗均可能造成 N 素的损失,因而早稻成熟期新、老稻田耕层土壤的¹⁵N 残留率均明显低于晚稻。由表 4 还可知,土壤中残留的¹⁵N 绝大部分集中在 0~15 cm 的土层,占总残留量的 75.1%~94.3%,而耕层以下的¹⁵N 残留量很低,且随土层深度的加大逐渐降低:15~30 cm 土层¹⁵N 残留量占总残留量的 2.5%~15.8%;30~50 cm 土层¹⁵N 残留量占总残留量的 1.0%~8.9%,至 50 cm 以下土层中的¹⁵N 残留量仅占总残留量的 0.2%~2.5%。此外,从表 4 还可以看出,成熟期老稻田耕层土壤的¹⁵N 残留率总是高于新稻田;但新稻田剖面中 15~50 cm 土层¹⁵N 残留量占总残留量的比率却明显高于老稻田。

2.3.3 化肥 N 的损失 在本试验条件下,红壤水

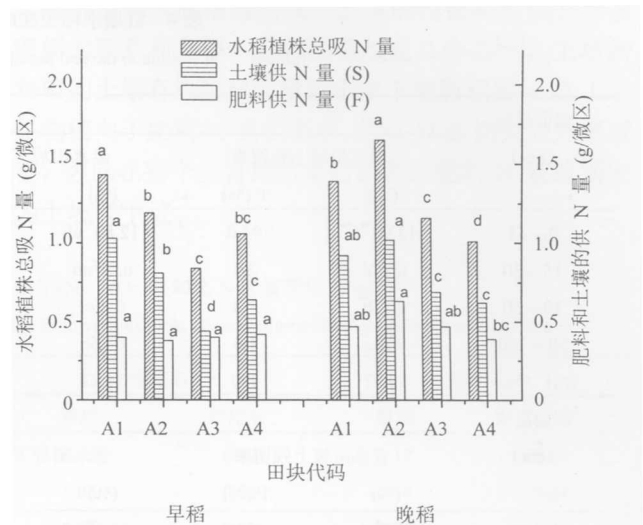


图 4 成熟期土壤和肥料对水稻 N 的供应

Fig. 4 N supply of rice from fertilizer and soil at mature stage

注:图中小写字母的不同表示各田块的水稻植株总吸 N 量或肥料和土壤对植株的供 N 量之间存在显著差异 ($P \leq 0.05$)。

稻田¹⁵N 肥料损失率为 52.24%~68.91% (图 5)。N 肥(¹⁵N)总损失为早稻大于晚稻,新稻田高于老稻田。

众所周知,N 肥的损失途径主要包括氨挥发、硝化-反硝化和渗漏损失等。其中稻田渗漏水也是 N 肥损失的一个潜在途径。表 5 所示为各田块在早、晚稻的生育期内不同深度土层渗漏水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和全 N 浓度变化。由表 5 可知,低丘缓坡上不同利用年限的红壤水稻田中不同深度的渗漏水的这 3 种形态 N 的浓度变化很大。施肥方式、降雨量、地形部位、各田块的氧化还原电位以及土壤的水分状况都共同影响着土壤渗漏水中的各形态 N 浓度的变化^[21]。

早稻生长季节降雨量大且主要集中在施肥后的雨季(5—6月),扬花期与分蘖期之间渗漏水中各形态的 N 变化量要显著的大于灌浆期与扬花期之间的变化量;晚稻生长季节降雨量少且相对较为平均,因此施肥方式对土壤渗漏水中各形态 N 浓度变化的影响就

表 4 红壤水稻田在成熟期时土壤剖面中¹⁵N残留

Table 4 ¹⁵N residue in the soil profile of the paddy field at the rice maturing stage

剖面层次 (cm)	早稻							
	老水田坡上残留率		老水田坡下残留率		新水田坡上残留率		新水田坡下残留率	
	(%)	P (%)	(%)	P (%)	(%)	P (%)	(%)	P (%)
0~15	13.90**a	94.0	12.80**ab	90.0	5.04**c	75.1	5.00**c	83.8
15~30	0.37d	2.5	0.97*ab	6.8	1.06*a	15.8	0.69*c	11.5
30~50	0.27b	1.8	0.29b	2.1	0.60a	8.9	0.24b	4.0
50~100	0.23a	1.6	0.16b	1.1	0.01c	0.2	0.04c	0.7
合计 (%)	14.77	100	14.22	100	6.71	100	5.97	100

剖面层次 (cm)	晚稻							
	老水田坡上残留率		老水田坡下残留率		新水田坡上残留率		新水田坡下残留率	
	(%)	P (%)	(%)	P (%)	(%)	P (%)	(%)	P (%)
0~15	16.8*ab	94.3	17.5**a	93.4	9.64**c	78.8	8.08**d	82.3
15~30	0.74*c	4.2	0.79*c	4.3	1.94*a	15.8	1.15*b	11.7
30~50	0.18c	1.0	0.26bc	1.4	0.55a	4.5	0.33b	3.4
50~100	0.09c	0.5	0.18ab	0.9	0.11bc	0.9	0.25a	2.5
合计 (%)	17.8	100	18.7	100	12.2	100	9.82	100

注：P 代表某一层次的 ¹⁵N 残留量占总残留量的百分比（某一层次的 ¹⁵N 残留量×100/总残留量）。

* 表示同一田块不同土壤剖面层次之间 ¹⁵N 残留率之间的差异（* 代表 P<0.05，** 代表 P<0.01）；表中小写字母的不同表示各田块同一剖面层次土壤 ¹⁵N 残留率之间存在显著差异（P<0.05）。

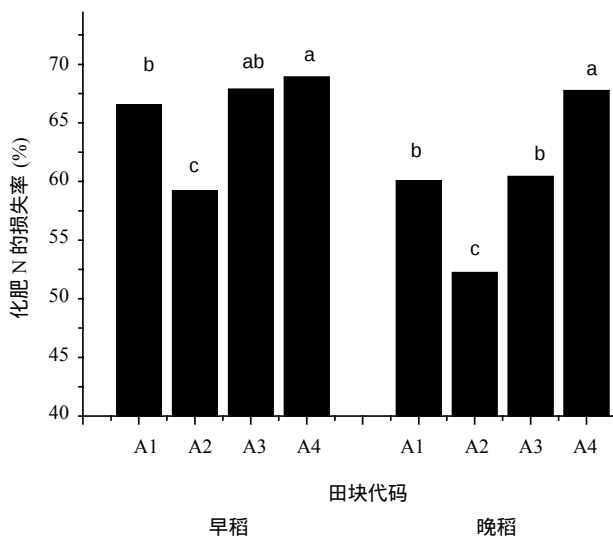


图 5 红壤水稻田成熟期化肥的 ¹⁵N 损失

Fig. 5 Loss of ¹⁵N from the experiment plots at the rice maturing stage

注：图中小写字母的不同表示数据之间存在显著差异（P≤0.05）

较早稻生长季节明显，在本试验中水稻在扬花期时追施 1/3 的 N 肥，因而，在扬花期时渗漏水中的各形态 N 浓度的变化颇多。此外，由于上坡与下坡氧化还原电位以及地下水位的差异，使上坡与下坡渗漏水中的各形态 N 浓度的差值变化总体表现为：老水田 > 新水

田。另由于水分在土壤中的垂直运动，施用 N 肥对当季土壤上层渗漏水中的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、全 N 浓度有较明显的影响，因此供试田块各生育期渗漏水的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度与全 N 一样均为：耕层 > 犁底层。

3 讨论

综上所述，红壤小流域内稻田 N 素迁移除受灌溉管理的影响外，与稻田的利用年限和地形部位有关的土壤基础肥力、土壤保肥性能（物理性状）、土壤的氧化还原状况和气候水文等的差异，最终导致了各供试稻田成熟期化肥 N 的去向各异。

相较于新稻田，利用年限长的老稻田基础肥力高，土壤的供 N 能力强，因此老稻田平均的 N 肥利用率低于新稻田。此外老稻田的犁底层厚且紧实，利于保水保肥、养分不易下渗，所以当早、晚稻成熟时，老稻田耕层土壤的 ¹⁵N 残留率显著地高于新稻田；但新稻田剖面中 15~50 cm 土层 ¹⁵N 残留量占总残留量的比率却显著高于老稻田，这进一步说明了利用年限短的新稻田犁底层尚未形成或者形成的犁底层还较薄，水分养分容易下渗 [6-7]。

不同利用年限可能影响土壤水分的渗漏，但稻田地形位置却可能引起土壤水分运移以及氧化还原条件

的差异,考虑这些因素又为稻田 N 肥的损失途径提供了新的解释。下坡老稻田的地下水位高,在水稻生育期间其一直处于较强烈还原状态,所以 ^{15}N 总损失要小于上坡老稻田;而两块新稻田 Eh 值平均两者相差 55 mV,从氧化还原电位与肥料 N 素损失关系的角度上看,上坡新稻田将大于下坡新稻田,但是 N 肥的 3

个基本去向(作物的吸收、土壤的残留和损失)存在密切的联系和竞争,且作物吸收是其中心^[22],上坡新稻田的土壤有机质值含量远小于下坡新稻田(表 1),作物偏向于肥料 N 素的需求,肥料 N 素损失的几率减小,因此在整个生育期结束后新稻田肥料 N 素总损失为上坡 < 下坡。

表 5 早、晚稻各生育期内试验田块渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和全 N 含量变化 (mg/L)

Table 5 Changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and total N concentration in leachate from various plots at various growth stages of early and late rice

品种	N 形态	田块代码	分蘖期		扬花期		灌浆期	
			耕层	犁底层	耕层	犁底层	耕层	犁底层
早稻	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	A1	4.55	1.41	0.55	0.32	0.17	0.07
		A2	10.7	3.59	1.08	0.06	0.14	0.32
		A3	5.17	2.51	0.27	0.02	0.31	0.00
		A4	4.36	2.44	0.18	0.38	0.48	0.06
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	A1	0.34	0.21	0.18	0.09	0.05	0.06
		A2	0.65	0.22	0.91	0.04	0.33	0.13
		A3	0.94	0.79	0.82	0.15	0.59	0.24
		A4	0.54	0.44	0.51	0.76	0.31	0.03
	全 N	A1	10.81	2.86	3.44	2.36	2.07	1.76
		A2	24.44	6.72	3.58	1.12	1.44	1.24
		A3	15.17	5.93	4.07	0.51	1.74	0.59
		A4	14.01	4.61	2.21	1.44	1.69	0.36
晚稻	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	A1	0.13	0.18	0.20	0.62	0.05	0.16
		A2	0.49	0.53	1.03	0.53	0.04	0.37
		A3	0.88	0.53	0.91	0.34	0.27	0.09
		A4	0.96	0.53	0.04	0.02	0.00	0.01
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	A1	0.33	0.39	0.46	0.37	0.06	0.09
		A2	0.75	0.71	1.05	0.45	0.30	0.26
		A3	1.65	0.45	1.28	0.29	0.57	0.13
		A4	1.35	0.45	0.52	0.42	0.29	0.24
	全 N	A1	1.11	0.98	1.24	1.15	0.58	0.64
		A2	1.81	2.29	1.15	1.08	0.97	0.86
		A3	1.16	1.08	0.75	0.64	0.28	0.15
		A4	2.15	1.08	1.26	1.23	0.79	0.67

参考文献：

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境. 2000, 9 (1): 1-6
- [2] 黄益宗, 冯宗伟, 张福珠. 农田氮损失及其阻控对策研究. 中国科学院研究生院学报, 2002, 17 (2): 49-59
- [3] 张炎, 史军辉, 李磐, 冯耀祖, 马海刚. 农田土壤氮素损失与环境污染. 新疆农业科学, 2004, 41 (1): 57-60
- [4] Li ZP, Zhang TL, Han FX, Felix-henningsen, P. Changes in soil C and N contents and mineralization across a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China. Pedosphere, 2005, 15 (5): 554-562
- [5] 金翔, 韩晓增, 蔡贵信. 黑土-春小麦中三种化学氮肥的去向. 土壤学报, 1999, 36 (4): 448-453
- [6] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 戴平安, 肖剑. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率. 植物营养与肥科学报, 2004, 10 (2): 137-142
- [7] 肖参明, 柯玉诗, 黄继茂, 伦杏娟, 江活逢. 犁底层容重对水稻生长的影响研究. 广东农业科学, 1996 (2): 25-28
- [8] 张杨珠, 吴岳轩, 刘学军, 何勉先, 易最圆, 曾清如. 新辟红壤性稻田不同施肥模式的效应. 湖南农学院学报, 1994, 20 (2): 106-113
- [9] 于天仁. 水稻土的物理化学. 北京: 科学出版社, 1983

- [10] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅. 不同养分和水分管理模式对土壤生态环境影响. 农村生态环境, 2002, 18 (3): 11-15
- [11] 包梅芬, 赵红挺. 水分状况对水稻土某些性质的影响. 土壤, 1994, 26 (4): 204-208
- [12] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy (8th ed). Washington DC: US Department of Agriculture Natural Resource Conservation Service, 1998
- [13] 李庆逵主编. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983
- [14] 赵荣广, 李淑华, 孙维忠, 肖免. 基穗型施肥水稻对肥料氮和土壤氮的吸收利用. 核农学报, 1997, 11 (3): 163-167
- [15] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 吕殿青, Emteryd O. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响. 土壤学报. 2004, 41 (2): 270-277
- [16] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学分析方法. 北京: 科学出版社, 1983: 79-94
- [17] 陈子元, 曹亚澄编. 核技术及其在农业中的应用. 北京: 科学出版社, 1983: 179-193
- [18] 于天仁, 谢建昌, 杨国治. 水稻土中决定氧化还原电位的体系问题. 科学通报, 1959 (6): 205-206
- [19] 朱兆良. 农田生态系统中化肥氮的去向和氮素管理//朱兆良, 文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 37-59, 255-257
- [20] 周根娣, 章家骥, 卢善玲. 上海郊区化肥氮的去向及其污染的调查. 上海农业学报, 1996, 12 (4): 81-84
- [21] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 沈其荣. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应. 土壤, 2005, 37 (2): 113-120
- [22] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考. 生态环境, 2003, 12 (2): 192-197

Fate of Nitrogen Fertilizer in Paddy Fields Different in Cultivation History and Slope Position in a Red Soil Region

YAO Shui-hong^{1,2}, ZHANG Bin², HU Feng¹, CHENG Xun-qiang²

(1 College of Natural Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: ¹⁵N tracing method was used in a field experiment to study movement and fate of nitrogen fertilizer in paddy fields different in cultivation history and slope position. Results showed that at the rice maturing stage, nitrogen fertilizer recovery rate and residue rate in paddy fields either new or old ranged between 18.71% and 29.10%, and between 5.97% and 18.73%. Old paddy fields were higher than new fields in ¹⁵N residue rate, but in the 15 ~ 50 cm layer, it was just the reverse. ¹⁵N loss rate from red soil paddy fields was as high as 52.24 % ~ 68.91%. besides, in terms of concentrations of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in leachate from soil layers of the experiment plots, the layers were in the order of plough layer > plowpan.

Key words: Paddy fields, Cultivation history, Slope position, ¹⁵N tracing method, Fate of nitrogen fertilizer