

稻草还田对土壤氮素和水稻产量的影响^{*}

程励励 文启孝 李 洪

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

研究了稻草与化学氮肥配施对肥料氮的固定、释放及水稻生长的影响。认为在配施一定量的化学氮肥条件下,每666m²施用100—150公斤稻草,对水稻生长不致产生不良的作用。

长期以来,我国农民积累了种、养、积制各种有机肥料的丰富经验。但随着化肥工业的发展和农村经济结构的改革,加之有机肥因其积制、运输和施用较费工时,而绿肥更有与作物争地之弊,因而有机肥的施用量已急剧减少,而代之以秸秆直接还田,因为它省工省力,是一种值得提倡的方法。

前人在秸秆还田方面已做过大量工作,阐明了秸秆分解的生物学过程及其对土壤物理、化学、生物学性质和作物生长的可能影响。但也存在一些不同的意见。例如,有的研究者认为,稻草施用量超过75公斤/666m²时,即使增施化学氮肥,亦将不利于作物生长;另一些研究者则认为,只有极大量施用稻草,才会导致作物减产。在关于施用作物秸秆降低化肥氮的损失的问题上,有的研究者认为秸秆有极大的作用和潜力,而有的研究者则认为,对这方面的作用不能估计过高。有关施用作物秸秆对土壤中化肥氮命运的影响虽已进行了较多工作,但二者配施时整个肥料氮的命运方面的知识却了解很少。本文就稻草与化肥氮配施时,化肥氮的固定和释放、整个肥料氮的命运、以及稻草施用量对水稻生长的影响等方面进行了研究,提供了部分知识。

一、材料和方法

(一)培育试验 供试土壤为黄泥土(采自无锡,母质为黄土状物质),C 15.1gkg⁻¹, N 1.8gkg⁻¹, pH6.8。供试稻草含C 413gkg⁻¹, N 5.7gkg⁻¹, C/N 73.0。¹⁵N标记硫酸铵原子百分超为29.26%,施入¹⁵N量为100mgkg⁻¹。稻草加入量为1%(占土重)。试验设好气、渍水、嫌气3组,各设单施硫酸铵和硫酸铵加稻草两个处理。每个处理称土50克,将硫酸铵或硫酸铵加稻草与土壤均匀混合后,分别移入一容器中。好气条件的加水至田间持水量的80%,容器口用塑料薄膜覆盖;渍水条件的在土面上保持1厘米厚的水层,容器口上盖一表面皿,定期校正水

^{*}张中一同志参加了部分工作。

分。好气条件和渍水条件所用的容器均为150毫升烧杯。嫌气条件与渍水条件同，唯容器改为三角瓶，瓶口塞一橡皮塞，用玻璃管和橡皮管将所有三角瓶串联在一起，定期通氮气，保证试验在嫌气下进行。为避免藻类生长，整个试验在28℃暗室中进行。试验开始后，每个处理定期各取出两个重复，用 $2\text{ mol L}^{-1}\text{ KCl}$ 提取，提去矿质态氮后，测定其残留氮量。

(二)盆栽试验 共进行了三组试验。第一组试验的目的是了解在有水稻生长的条件下化肥N的生物固定和生物固定态N的再矿化。试验处理及方法见前文。

第二组试验的目的是了解稻草与化肥氮配施时肥料氮的命运。供试的三种土壤与第一组试验同。每盆盛土量：白土和夹沙土分别为2.7公斤，红壤性水稻土2.9公斤。 ^{15}N 标记尿素的原子百分超为21.74%，施入氮量为 84 mg kg^{-1} ；稻草按土重的0.13%加入， ^{15}N 标记稻草的原子百分超为64.5%，氮含量 5.2 g kg^{-1} ；非标记稻草， $\text{C}372\text{ g kg}^{-1}$ ； $\text{N}6.2\text{ g kg}^{-1}$ ； $\text{C/N}60.4$ 。每种土壤设对照、 ^{15}N —稻草、 ^{15}N —尿素、 ^{15}N —稻草加尿素和 ^{15}N —尿素加稻草5个处理。白土另加 ^{15}N —硫酸铵、 ^{15}N —硫酸铵加稻草和 ^{15}N —稻草加硫酸铵3个处理。每个处理重复3次。所有处理都加入 $32\text{ mg KH}_2\text{PO}_4/100\text{ g}$ 土，以保证磷钾的正常供应。化肥和稻草都是与土壤均匀混合作基肥。5月28日施入肥料后即泡水，5月30日移栽。供试作物是南京11号中稻，秧龄20天。每盆栽稻3穴，每穴3株。8月28日收获。

第三组试验的目的是了解稻草用量对水稻生长的影响。供试土壤为白土，每盆装土2.7公斤。尿素加入量分0、80、100和 120 mg kg^{-1} 4级，稻草($\text{C}404\text{ g kg}^{-1}$ ， $\text{N}8.4\text{ g kg}^{-1}$ ， $\text{C/N}48.1$)加入量分3级，分别为土重的0.15%、0.30%和0.45%，共计13个处理。每个处理重复3次。供试作物为南京11号中稻，秧龄22天。每盆栽秧3穴，每穴3株。5月17日移栽，8月22日收获。

(三)田间试验 在溧阳新昌农科站进行。供试土壤为红筋白土。稻草施用量分0、100、150公斤/666 m^2 ，尿素加入量分0、9和11公斤/666 m^2 ，共7个处理。每处理重复4次。小区面积为26.6 m^2 ，随机区组排列。各处理均加入10公斤氯化钾/666 m^2 和25公斤过磷酸钙/666 m^2 。氯化钾、过磷酸钙和稻草均作基肥一次施入，尿素50%作基肥，其余25%作发棵肥，25%作穗肥。稻草于6月9日翻压，6月15日施入化肥(基肥)。水稻品种为BG910。6月18日移栽，10月1日收获。

(四)分析方法 有机碳用丘林法，土壤和植株的全氮量用开氏法测定， ^{15}N 用质谱计测定。

二、结 果

(一)矿质态氮的生物固定和再矿化 稻草在不同条件下分解时，其肥料氮的生物固定和再矿化动态(用差值法(稻草加硫酸铵— ^{15}N 处理的残留 ^{15}N 量减去单施硫酸铵— ^{15}N 处理的残留氮量)计得)表明，生物固定态氮量因稻草的分解条件和进程而异，最高时在0.15—0.27%之间(占稻草加入量的%)。好气条件下固定的氮量最多，渍水条件下的次之，嫌气条件下的最少。与好气条件下的相比，嫌气条件下氮素固定量达到最大值的时间也较晚，约为60天，而前者为30天。各处理中生物固定态N的再矿化率亦以好气条件下者为最高，约占最大固定量的38%，嫌气和渍水条件下均很低，在整个试验期中，基本上无再矿化。这些差异看来是由于3种条件下的微生物学过程各不相同所致。

在有水稻生长条件下，施用稻草后化肥氮的生物固定和再矿化过程(已扣除肥料铵被土

壤矿物的固定和释放,但包括土壤有机质对肥料氮的生物固定及其再矿化)表明,3种土壤中的生物固定态氮最大值是相同的,为22—23%(占施入肥料N量的%),唯达到最大值的时间略有不同。和上述培育试验中渍水和嫌气条件下的结果相似,在水稻整个生育期间,生物固定态氮基本上无再矿化。

(二)对化肥氮损失的影响 化学氮肥进入土壤后,由于受氨的挥发、反硝化作用以及淋失等影响,氮素损失很大。人们企图通过有机肥与化学氮肥配合施用以加强生物固定作用达到减少氮素损失的目的。培育试验结果表明,在水田条件下,稻草与¹⁵N—硫铵配合施用,降低了硫铵—N的损失。培育10、20、40和60天,单施硫铵的氮素损失%分别为18.6、18.6、23.6和26.7,而和稻草配施的损失则分别为11.3、14.0、18.4和19.9。但在盆栽试验中,却未能观察到配施稻草的这种作用。这可能是盆栽试验中的土层厚度远大于培育试验,当肥料和干土全层混匀复水植稻时,各处理的氮素损失都很小(0—5.6%)。

(三)对化肥氮利用率的影响 用差值法和示踪法分别计算了化肥氮在单施及与稻草配施

表 1 施用稻草对化肥氮素利用率(%)的影响
(盆栽试验)

		¹⁵ N—尿素	¹⁵ N—尿素 + 稻草	两者差异的 显著性测定 $t_{0.05}=2.78$ $t_{0.01}=4.60$
		¹⁵ N—尿素	¹⁵ N—尿素 + 稻草	
白 土	差值法	87.5±1.6	86.7±0.6	0.81
	示踪法	68.4±0.6	65.2±0.5	7.10**
夹沙土	差值法	79.4±1.0	79.6±1.9	0.16
	示踪法	56.4±0.6	55.8±1.3	0.69
红壤性 水稻土	差值法	81.4±4.7	86.1±3.2	1.43
	示踪法	70.5±1.6	66.1±0.4	4.62**
		¹⁵ N—硫铵	¹⁵ N—硫铵 + 稻草	
		¹⁵ N—硫铵	¹⁵ N—硫铵 + 稻草	
白 土	差值法	87.1±5.3	75.8±1.8	3.51*
	示踪法	64.8±1.7	59.4±1.1	4.60**

时的利用率(表1)。从差值法的结果来看,在3种土壤上,施用稻草对尿素—N的利用率都没有什么影响,仅降低了硫铵—N的利用率。从示踪法的结果看,除了在夹沙土上外,施用稻草都显著的降低了化肥氮的利用率。从稻草氮的利用率来看,化肥氮与稻草配施时均显著地提高了稻草氮的利用率,配施处理水稻吸收的肥料总N量与单施化肥N处理的基本相同(表2)。

(四)对土壤氮素储量的影响 已经知道,各种化学氮肥无论其利用率高,其残留在土壤中的数量均较少,易分解有机氮含量高的有机肥,如紫云英、田菁、桉麻等,固定化肥氮的能力很小,当它们与化肥氮配合施用,表面上看来,虽能提高化肥氮的残留量,但却是以降低其本身残留氮量为代价。稻草之类的植物残体,因其C/N比值高,故有可能提高化学氮肥的残留量。表3结果表明了这一点。由表可见,凡施用稻草者大多能提高化学氮肥的残留量,但其本身的残留氮量也有降低的趋势(表4)。从对土壤氮素储量的贡献看,化学氮肥

表 2 稻草和化肥氮配合施用对水稻
吸收肥料氮(mgN/盆)的影响

土 壤	处 理*	化肥— ¹⁵ N	稻草— ¹⁵ N	总计
白 土	尿 素	165.2±0.7	—	165.2
	硫 铵	158.9±2.9	—	158.9
	稻 草	—	5.46±0.09	5.46
	尿素+稻草	158.1±1.4	6.84±0.20	164.6
夹沙土	硫铵+稻草	147.6±0.7	6.82±0.17	154.4
	尿 素	138.6±2.3	—	138.6
	稻 草	—	4.71±0.05	4.71
	尿素+稻草	136.7±4.7	5.95±0.19	142.6
红壤性 水稻土	尿 素	183.7±3.0	—	183.7
	稻 草	—	5.00±0.05	5.0
	尿素+稻草	174.2±1.4	5.46±0.26	179.7

* N素施入量: 尿素—225.7mgN/盆(白土、夹沙土), 242.85mgN/盆(红壤性水稻土), 硫铵—229.5mgN/盆, 稻草—13.72mgN/盆(白土、夹沙土), 20.12mgN/盆(红壤性水稻土), 尿素+稻草—247.9mgN/盆(白土、夹沙土), 265.7mgN/盆(红壤性水稻土), 硫铵+稻草—251.7mgN/盆。

施用稻草对化肥氮素残留量的影响
(占加入 $^{15}\text{N}\%$)

土 壤	^{15}N —尿素	^{15}N —尿素 + 稻草	两者差异的 显著性测定 $t_{0.05}=2.78$ $t_{0.01}=4.60$
白 土	24.0 ± 1.0	26.3 ± 1.0	2.82*
夹 沙 土	33.0 ± 2.3	36.0 ± 1.3	1.78
红壤性水稻土	24.4 ± 0.3	29.0 ± 1.6	4.90**
	^{15}N —硫酸	^{15}N —硫酸 + 稻草	
白 土	26.3 ± 1.2	32.3 ± 1.4	5.68**

表 4 配施化学氮肥对稻草
— ^{15}N 残留量的影响
(占加入 $^{15}\text{N}\%$)

土 壤	^{15}N —稻草	^{15}N —稻草 + 尿素	两者差异的 显著性测定 $t_{0.05}=2.78$ $t_{0.01}=4.60$
白 土	57.0 ± 6.3	50.4 ± 5.3	1.33
夹 沙 土	69.1 ± 7.2	64.8 ± 2.6	1.05
红壤性水稻土	72.4 ± 1.5	64.4 ± 1.4	6.75**
	^{15}N —稻草	^{15}N —稻草 + 硫酸	
白 土	57.0 ± 6.3	58.9 ± 2.2	0.49

表 5 稻草、化肥氮单施和配合施用时对土壤氮素储量的影响 (mgN/盆)

土 壤	处 理**	激发氮量	残留肥料氮	净残留氮量
白 土	^{15}N —尿素	50.6	54.2	3.6
	^{15}N —硫酸	57.0	60.4	3.4
	^{15}N —稻草	-43.3	10.7	54.0
	尿素 + ^{15}N —稻草	65.3	68.8	3.5
	^{15}N —尿素 + 稻草	50.0	68.8(59.3)*	18.8(8.2)
	硫酸 + ^{15}N —稻草	35.7	85.2	49.5
	^{15}N —硫酸 + 稻草	43.0	85.2(74.2)	42.2(29.9)
夹沙土	^{15}N —尿素	63.8	74.5	10.7
	^{15}N —稻草	-8.5	12.9	21.4
	尿素 + ^{15}N —稻草	47.6	93.3	45.7
	^{15}N —尿素 + 稻草	60.3	93.3(81.2)	33.0(19.6)
红壤性 水稻土	^{15}N —尿素	31.2	59.4	28.2
	^{15}N —稻草	-14.6	14.6	29.2
	尿素 + ^{15}N —稻草	62.3	83.3	21.0
	^{15}N —尿素 + 稻草	54.6	83.3(70.4)	28.7(15.3)

* ()内的数字为化肥氮的数字; ** N素施入量同表2。

在3种土壤中虽均有一定的残留量,但减去激发作用增加的矿质氮量后,其净残留量都较少。稻草和化肥氮配合施用,与单施化学氮肥相比,在白土和夹沙土上,能提高肥料氮的净残留量。但在红壤性水稻土上,由于稻草和化学氮肥配合施用时的激发氮量较化肥N单施的急剧增多,肥料氮的净残留量仍很低(表5)。稻草与化肥N配施为何正激发效应显著增大,原因还不清楚。

(五)对作物产量的影响 由于稻草在腐解过程中将固定一部分矿质态氮,并产生一些毒害物质,因此,施用稻草可能会影响作物产量。盆栽试验中观察到,单施稻草对作物生长的这种不利影响,因土壤而异。在夹沙土和红壤性水稻土上,对稻谷产量并没有明显影响,但在白土上则显著降低了稻谷的产量。而无论哪种土壤上,只需配施一定量的化学氮肥,即可消除这种对产量的不利影响(表6)。

6 施用稻草对稻谷产量(克/盆)的影响
(盆栽试验)

土 壤	对 照	单施稻草	两者差异的 显著性测定 $t_{0.05}=2.73$ $t_{0.01}=4.60$
白 土	15.3±0.3	13.5±0.4	6.56**
夹 沙 土	10.0±0.9	9.1±0.4	1.61
红壤性水稻土	12.4±0.5	12.0±0.4	1.03
^{15}N —尿素 ^{15}N —尿素 + 稻草			
白 土	27.7±1.0	26.5±1.0	0.73
夹 沙 土	19.2±0.3	19.2±0.9	0.22
红壤性水稻土	19.3±1.4	17.1±0.8	2.41
^{15}N —硫酸铵 ^{15}N —硫酸铵 + 稻草			
白 土	26.5±3.1	25.4±0.7	0.60

表 8 稻草和尿素不同用量对稻谷
产量(克/盆)的影响
(盆栽试验)

尿素—N加入量 mg/kg	稻草加入量(占土重%)*			
	0	0.15	0.30	0.45
0	13.3A			
80	24.5B	24.1a	26.4A	25.1A
100	27.8C	28.0ab	28.6AB	29.9B
120	29.5D	29.5bc	32.6C	32.2BC

* 根据新复极差统计, 化肥量相同, 即使稻草加入量不同, 差异也不显著。

失与单施化肥氮处理并无差别, 但这并不意味着秸秆与化肥氮共施不能降低化肥氮的损失, 而只是由于在试验条件下无论化肥氮单施或与秸秆共施时氮素的损失量都很小。培育试验表明, 在氮素易遭受损失的情况下, 配施秸秆可显著降低化肥氮的损失。莫淑勋等的田间微区试验也获得同样的结果, 化肥单施, 其氮素损失为46%, 与秸秆配施的仅32%。然而, 对秸秆减少化肥氮损失的作用似乎不能估计过高。因为, 秸秆的分解需要时间, 即使在适宜的条件下, 固定肥料氮也需20天或更多时间才能达到最大值; 而另一方面, 在施肥初期, 土壤交换位上和田面水中的铵最多, 因而氮素的损失量仍较大。

很多研究者都曾指出, 秸秆与化肥氮配施将降低化肥氮的利用率, 提高其残留率。表1、3中的结果大体上和这些研究者的结果相一致。唯降低和提高的幅度较小, 在夹沙土上甚至无差。异前者可能是由于在本试验条件下土壤—植物系统中肥料氮的损失量较小; 后者则可能是由于该土壤固定态铵的能力特别强所致。研究表明, 在同样条件下, 施肥10天后, 夹沙土中以固定态铵存在的化肥氮占施入化肥氮量的77%, 在白土和红壤性水稻土中则分 (下转第243页)

表 7 稻草和尿素不同用量对
稻谷产量(公斤/666m²)的影响
(田间小区试验)

尿素—N (公斤/666m ²)	稻草加入量(公斤/666m ²)*		
	0	200	300
0	332A	—	—
9	410B	429a	426a
11	446BC	235a	447a

* 根据新复极差统计, 化肥量相同时, 即使稻草加入量不同, 差异也不显著。

田间试验也得到了同样的结果, 即使在土壤肥力很低的板浆白土上, 在配施一定量化肥氮的情况下, 每666m²施100—150公斤稻草(风干重)并不影响水稻的产量(表7)。

在另一组盆栽试验中还观察到, 当土壤配施80mg/kg化学氮肥N时, 即使稻草用量高达土重的0.45%(折合666m², 施风干稻草500公斤), 也不会对水稻产量产生不利影响(表8)。这表明, 在排水良好的土壤上, 在配施化肥N和管理良好的情况下, 稻草用量可以高至每666m²为500公斤。

三、讨 论

C/N比高的作物秸秆分解时将固定相当量的矿质态氮。虽然盆栽试验结果表明, 作物秸秆与化学氮肥共施的处理, 化肥氮的损失

左右，变异相对较小，但有相当一部分高产土壤的速效磷含量较低，如高产的沙土、两合土、淤土，及高产的水稻土、砂姜黑土等。

(四)速效钾

高产土壤的速效钾含量较高(表3)，其含量范围变化在70—200毫克/千克之间，平均为 144.1 ± 45.2 毫克/千克，其中，高产黄潮土速效钾含量较高，平均为 146.5 ± 45.5 毫克/千克，其次是高产的水稻土 140.9 ± 40 毫克/千克，而高产的砂姜黑土速效钾含量较低。可见，耕层土壤的速效钾含量能达到100毫克/千克以上，即有条件成为高产土壤。

(五)代换量

淮阴市的高产土壤的代换量较低，其变化范围在7—33厘摩/千克土之间，平均值仅为 17.6 ± 6.3 厘摩/千克土。其中，高产水稻土的代换量最高，平均为 22.1 ± 9.5 厘摩/千克土，其次为高产的砂姜黑土，其平均值为 21.0 ± 4.8 厘摩/千克土。高产的黄潮土代换量最低，平均仅为 15.3 ± 3.6 厘摩/千克土。有些高产土壤的代换量很低，如高产沙土，其代换量平均仅有 11.5 ± 3.6 厘摩/千克土，高产的两合土代换量也只有 13.6 ± 2.6 厘摩/千克土。高产土壤的代换量一般应在10—20厘摩/千克土左右。

综上所述，培育高产土壤必须重视两项投入：一是劳动投入，即改善土壤环境，搞好农田水利基本建设，平整好土地，使土壤达到遇旱能灌、遇涝能排、遇渍能降，同时搞好林网化，达到沟、渠、路、林配套，创造良好的生态环境；二是肥料投入，大量增施有机肥，实行秸秆还田，合理增施氮、磷、钾化肥及微量元素肥料，以满足农作物的需要，达到高产。

(上接第238页)

别为56%和1%。看来，秸秆与化肥氮配施时，化肥氮的利用率的降低和残留率提高的幅度不但因化肥氮的施用量而异，而且与肥料的施用方法以及土壤的性质等有关。

我们认为，C/N比较窄的有机肥将显著地降低化肥氮的利用率，提高其残留率。但是它们是以有机肥氮利用率的提高和残留率的降低为代价的。从表2、4、5的结果来看，C/N比较宽的秸秆对化肥氮命运的影响基本上也是如此。就其对土壤氮素储量的影响而言，大致印象是，配合施用的处理对土壤氮素储量的影响基本上相当于化学氮肥及稻草二者单独施用时的影响的总和。但由于本试验中化肥氮和稻草氮的施用量相差悬殊，单施和配合施用的处理未必能作严格对比，这个问题还值得作进一步的研究。

矿质态氮的生物固定量和一些有害物质的积累量，包括各种低分子脂肪酸和芳香酸的积累量随还田秸秆量的增加而增多，在决定秸秆还田量时必须考虑到这一因素。虽然，Wang等^[7]和Kuwatsuka等报道了香豆酸和其他酚酸有抑制早稻、豌豆和甘蔗生长的作用，但本工作中风干稻草用量虽达500公斤和80mg/kg的N，并在移栽后一个月内发现有抑制水稻生长的现象，但并未引起稻谷减产。说明毒害物质的积累未必是一个严重的问题——或者因其尚未达到抑制的剂量；或者由于中稻的生育期较长，作物具有一定的调节能力。(参考文献略)