

无机氮对土壤中有有机碳矿化影响的探讨*

朱培立 王志明 黄东迈 余晓鹤 严少华

(江苏省农业科学院土壤肥料研究所, 南京 210014)

摘 要 采用 ^{14}C 同位素示踪恒温密闭培养法, 研究了秸秆和化肥配合施用体系中, 无机氮对 ^{14}C 秸秆碳矿化的影响, 培养期一年。结果表明, 在非石灰性土壤中, 无机氮的施用促进了 ^{14}C 秸秆碳的矿化, 相对增加了土壤固有碳(^{12}C) 的固持, 两者间的互补显示无机氮对土壤总碳矿化的影响不大; 淹水土壤中的 ^{14}C 秸秆碳年矿化率比旱地高, 发现无机氮对 ^{14}C 秸秆碳年矿化率的增加不论在旱地或水田状况是近似的。在石灰性土壤中, 无机氮对 ^{14}C 秸秆碳、土壤固有碳的矿化均起到抑制作用, 没有发现无机氮对有机碳矿化的促进。

对有机肥和无机肥配合施用体系中, 化学氮肥对土壤有机碳转化影响, 以及化学氮肥在土壤有机碳内循环中的作用功能等, 提出了一些新的见解。

关键词 ^{14}C 秸秆, 无机氮, 矿化, 淹水土壤, 旱地

中图分类号 S158

秸秆是土壤有机质的一项主要来源, 是保持和提高土壤肥力的重要物质基础。秸秆碳、氮比值较高, 作为一种含碳丰富的能源物质, 直接施入土壤会刺激微生物迅猛活动而将固持一部分有效氮, 因此, 在秸秆直接还田时, 通常配施一定量无机氮肥, 用以补充土壤速效氮的不足, 至于配施的无机氮对秸秆碳的矿化有何影响, 已有一些研究结果。连续 4 年的试验结果表明, 在潮褐土水浇地和旱地条件下, 施入 2% 的玉米秸, 加氮调节其 C/N 值至 15 时, 加氮对玉米秸的分解率并无显著影响, 而当玉米秸加量在 4% 和 8% 时, 加氮的在 4~5 个月内使玉米秸的分解明显加快, 而以后对秸秆碳的分解影响不大^[1]。在棕黄壤、草甸土上, 秸秆以 8% 的量还田, 无机氮(调节 C/N 为 25) 在 3~5 个月内促进了秸秆碳的矿化, 而之后出现了与之相反的结果, 使秸秆碳的固定量增加^[2]。粉砂壤土上麦秸和氮肥混合(C/N16.5) 培养两个月, 并未发现氮肥会促进麦秸分解, 增施氮肥反稍有减缓麦秸碳分解的趋势^[3]。Puig Gmenz 在 Guelph 砂壤土中的试验结果表明, 按土量 0.17% 的秸秆量还田, 加无机氮后却在 6 周内降低了秸秆碳的分解率^[4]。由于此类研究均是采用差减法进行测算, 秸秆碳、土壤碳不易区分, 无机氮引发土壤碳和氮的激发效应不能单独检出, 从而掩盖了无机氮对秸秆碳矿化的真实作用。为了明确秸秆直接还田时, 无机氮对秸秆碳矿化的影响, 同时亦可检出对土壤固有碳(^{12}C) 矿化的影响, 本研究采用 ^{14}C 同位素示踪技术, 研究非石灰性淹水、旱地土壤以及石灰性土壤中, 无机氮对 ^{14}C 秸秆碳及土壤固有碳矿化的影响, 为改进秸秆直接还田, 以及有机无机肥合理配合施用的技术措施, 提供

* 国家自然科学基金项目(批准号 39770429 和 39830220)

收稿日期: 2000-06-20; 收到修改稿日期: 2000-11-29

有关的理论依据。

1 材料和方法

本研究采用密闭恒温(30℃)培养法进行,供试三种土壤采自江苏省镇江丘陵地区句容市的马肝土(有机质 19.2g kg⁻¹、全氮 1.40g kg⁻¹、< 2 μ m 粘粒 28.2%),溧阳市的板浆白土(有机质 9.37g kg⁻¹、全氮 0.77g kg⁻¹、< 2 μ m 粘粒 12.6%)和江苏北部铜山县的淤土(有机质 17.9g kg⁻¹、全氮 1.27g kg⁻¹、CaCO₃ 58.7g kg⁻¹、< 2 μ m 粘粒 38.8%)。供试有机物料为¹⁴C 全生长期标记的杂交狼尾草(下称¹⁴C 秸秆,有机碳 428g kg⁻¹、全氮 17.5g kg⁻¹、¹⁴C 比强 20.33 μ Cig⁻¹)。棕色培养瓶体积 950ml,每瓶加过 1mm 筛的土壤 100g,¹⁴C 秸秆两个用量为每瓶 0.5g 和 1.0g(处理 0.5, 1.0),加氮的处理(处理 0.5+ N; 1.0+ N),加氮调节两个秸秆用量处理的 C/N 分别为 9 和 13。物料先与土壤充分混均后再加少量水混合。模拟旱地的处理加水至土壤最大持水量的 70%;淹水的处理使土面保持 0.3~ 0.4cm 的水层(马肝土和淤土仅设淹水处理),盖上双层瓶盖,并用电工胶带密封,每处理重复 4 次。矿化出的 CO₂ 用 1mol L⁻¹ NaOH 液吸收,培养期为一年,其间用湿烧法测定总碳和¹⁴C 碳的释放量(每次均测定平行样),土壤固有碳(¹²C)的释放量由总碳释放量减去¹⁴C 碳的释放量而得,板浆白土和淤土测定 11 次,马肝土测定 13 次,间隔天数分别为 6、11、11、11、22、30、30、54、58、68、64d 和 3、4、7、7、7、14、14、21、42、56、70、56、64d。在每次取碱管测定时,并同时更换一支新碱管。

2 结果与讨论

2.1 无机氮对¹⁴C 秸秆碳矿化的影响

¹⁴C 同位素示踪结果表明(表 1),在非石灰性的马肝土和板浆白土中,秸秆与无机氮肥配合施用,无机氮均促进了¹⁴C 秸秆碳的矿化,其中板浆白土的¹⁴C 秸秆碳矿化量增加

表 1 无机氮对¹⁴C 秸秆碳矿化的影响(淹水)

Table 1 Effect of inorganic nitrogen on mineralization of ¹⁴C labeled straw carbon (Submergence)

处理 Treatment	¹⁴ C 年矿化率 Annual mineralization rate		K		T _{1/2}		
	百分数 (%)	增加 Increment (%)	($\times 10^{-3}$ 天 ⁻¹) ($\times 10^{-3}$ d ⁻¹)	增加 ¹⁾ Increment	天 Day	增加(天) Increment (day)	
马肝土	0.5	67.4	-	2.98	-	233	-
	0.5+ N	73.6	9.20	3.38	0.40	205	- 28
板浆白土	0.5	52.9	-	1.98	-	350	-
	0.5+ N	59.3	12.1	2.32	0.34	299	- 51
	1.0	35.9	-	1.15	-	603	-
	1.0+ N	36.1	0.60	1.17	- 0.81	592	- 11
淤土	0.5	57.4	-	2.34	-	296	-
	0.5+ N	55.7	- 0.30	2.23	- 0.11	311	15
	1.0	43.6	-	1.55	-	447	-
	1.0+ N	42.6	- 2.30	1.51	- 0.83	459	12

1) 单位为(10^{-3} d⁻¹)

较多为 12.1%,马肝土增加较少为 9.2%。由于土壤粘粒含量对秸秆的分解具有保护作

用^[5], 马肝土有机质、氮素肥力和粘粒含量较板浆白土高, 因而在粘粒含量较高的马肝土中, 无机氮对¹⁴C 秸秆分解速率的提高相对要小些。但表 1 又显示, 从总体上看, 无论加氮与否, 马肝土中¹⁴C 秸秆碳的年矿化率及矿化速率常数 K 值却又比板浆白土高, 造成这一现象的原因有待进一步的研究。

在无机氮加量相等的条件下, ¹⁴C 秸秆加量为 1.0% 的处理, 其¹⁴C 秸秆碳的年矿化率比加量为 0.5% 处理相对增加较少, 这可能是在该试验中, ¹⁴C 秸秆加量 1.0% 的处理, 加氮后肥料 C/N 值 13 较宽, 在秸秆分解过程中受到氮源不充分的限制, 从而使秸秆有机碳的分解相对减慢, 因此, 在非石灰性土壤中, 加无机氮可以促进秸秆碳的矿化, 促进作用的大小视土壤基本肥力和加氮后肥料 C/N 值的大小而定。

在含 CaCO₃ 的淤土中, 研究结果表明, 无机氮与¹⁴C 秸秆碳施肥时, 无机氮并未增加¹⁴C 秸秆碳的矿化量, 相反, ¹⁴C 秸秆碳的矿化还有降低的趋势。其原因可能是在石灰性土壤中无机氮对¹⁴C 秸秆碳矿化的影响, 除受肥料 C/N 值的影响外, 还由于土壤中游离 CaCO₃ 的存在对有机物质的分解有明显的促进作用^[5,6], 当然影响石灰性土中¹⁴C 秸秆碳矿化的因素是较多的, CaCO₃ 的存在促进了¹⁴C 秸秆碳的矿化, 该土壤粘粒含量较高对秸秆碳的矿化又有保护作用, 因此总体上比较石灰性土和非石灰性土中秸秆矿化作用大小是复杂的, 本研究仅对石灰性土壤中加入无机氮对¹⁴C 秸秆碳矿化的影响进行分析, 认为当土壤中游离 CaCO₃ 对¹⁴C 秸秆碳矿化的促进作用与所加无机氮的促进作用相比相对较大时, 游离 CaCO₃ 对¹⁴C 秸秆碳矿化的促进作用可能就掩盖了无机氮对¹⁴C 秸秆碳矿化的促进作用, 同时, 由于培养瓶体积较大, 相应瓶内土层上的空间亦较大, 为维持微生物分解秸秆所需的氧, 每周需开起瓶盖换气一次, 因此虽然本研究采用的是密闭恒温培养法, 但在淹水条件下, 石灰性土壤中加入氮后仍很易引起氨挥发, 这也可能削弱了加入氮对¹⁴C 秸秆碳矿化的影响。

2.2 无机氮对土壤固有碳矿化的影响

表 2 表明, 无机氮的施用并未促进土壤固有碳的矿化, 相反, 供试的三种土壤, 除淤土¹⁴C 秸秆加量 0.5% 的处理, 加无机氮与未加无机氮的土壤固有碳年矿化量相持平外, 其他的无论¹⁴C 秸秆加量为 0.5% 或 1.0% 的处理, 添加无机氮均使土壤固有碳年矿化率有不同程度的下降, 降幅达 3%~9%, 矿化速率常数 K 值也相应降低, 矿化半减期 ($T_{1/2}$) 延长 3~6 个月, 可以看出, 无机氮与¹⁴C 秸秆碳配合施用, 无机氮对土壤固有碳转化的贡献, 在于相对增加了土壤固有碳的固持, 促进了土壤腐殖化的进程。无机氮对土壤总碳平衡中的作用, 在于促进了¹⁴C 秸秆碳的矿化, 而相对抑制了土壤固有碳的矿化(淹水土壤), 无机氮对土壤总碳矿化的影响, 实质上是对秸秆碳的促进和对土壤固有碳矿化的抑制作用相互补偿, 其值大小近乎于两者的代数和。秸秆两个施用量相比较, 在无机氮的影响下, 0.5% 处理的土壤总碳年矿化率变化并不大, 仅比不加氮的处理提高 2.6% 和 1.2%, 土壤有机质稍有下降的趋势, 这与一些有关研究用常规方法得出的加氮未促进秸秆碳矿化的表观结果相似。加大秸秆还田量, 如秸秆加量为 1.0% 处理的板浆白土, 加无机氮使土壤总碳年矿化率降低 4.6%, 无机氮增加了土壤有机碳的积累, 而淤土加无机氮后, 两个秸秆施用量处理的土壤总碳矿化率分别减少 1.4% 和 4.0%, 无机氮的加入均不同程度

的相对增加了土壤有机碳含量, 由于本研究采用湿浇法测定¹⁴C 和¹³C 的回收率均达 99% 以上, 试验过程中碳的损失可以忽略不计^[7]。这些研究结果初步说明, 无机氮肥和有机肥配合施用体系中, 在适当增施有机肥即使不种作物的条件下, 无机氮肥不仅可以促进有机肥的分解, 且与仅施有机肥的处理相比, 显示最终有利于土壤有机质的增加, 这是对无机氮肥功能的一种新的有益补充, 因为人们常认为无机氮肥是通过植物生物量的增加而使土壤有机质有所提高, 其实, 土壤微生物量碳约占每年投入植物残体和根系渗出物碳量的约 1/2^[8], 在无机氮通过土壤本身微生物量碳的周转也能促进土壤腐殖化进程。

表 2 无机氮对土壤固有碳矿化的影响(淹水)

Table 2 Effect of inorganic nitrogen on mineralization of soil native organic ¹³C (Submerged)

处理 Treatment	¹³ C 年矿化率 Annually mineralization rate of ¹³ C				K	T _{1/2}	¹³ C+ ¹⁴ C 年矿化率 Annually mineralized rate of (¹³ C+ ¹⁴ C)		
	增加 (%) Increment (%)		(× 10 ⁻⁴ 天 ⁻¹) (× 10 ⁻⁴ d ⁻¹)	增 加 ¹⁾ Increment			天 增加 (天) Day Increment (Day)	增加 (%) Increment (%)	
	%						%		
马 肝 土	0.5	18.0	-	4.13	-	1 678	-	26.7	-
	0.5+ N	17.4	- 3.3	3.81	- 0.32	1 819	141	27.4	2.6
板 浆 白 土	0.5	25.2	-	6.53	-	1 061	-	32.9	-
	0.5+ N	23.2	- 7.9	5.70	- 0.83	1 216	155	33.3	1.2
	1.0	37.1	-	1.02 ²⁾	-	679	-	36.6	-
	1.0+ N	33.9	- 8.6	8.91	- 1.21	778	99	34.9	- 4.6
淤 土	0.5	17.3	-	4.58	-	1 264	-	28.5	-
	0.5+ N	17.3	0.0	4.61	0.03	1 503	- 10	23.8	- 1.4
	1.0	22.4	-	5.48	-	1 264	-	28.5	-
	1.0+ N	21.1	- 5.8	5.11	- 0.37	1 356	92	27.3	- 4.0

1) 单位为(× 10⁻³d⁻¹) 2) 为(× 10⁻³天⁻¹)

2.3 淹水和旱地土壤中无机氮对¹⁴C 秸秆碳矿化的影响

表 3 结果表明, 在本试验条件下, 无机氮和秸秆配合施用, 淹水土壤中¹⁴C 秸秆碳的

表 3 淹水和旱地土壤(马肝土)中碳素的年矿化率

Table 3 Annually mineralization rate of organic carbon in submerged and upland soils (Alfisol)

处理 Treatment	年矿化率 Annual mineralization rate				K (d ⁻¹)		T _{1/2} (d)		
	淹水 Submerged		旱地 Upland		淹水 Submerged	旱地 Upland	淹水 Submerged	旱地 Upland	
	增加 (%) Increment (%)	%	增加 (%) Increment (%)	%					
¹⁴ C 秸秆碳	0.5	67.4	-	39.9	-	2.98× 10 ⁻³	1.12× 10 ⁻³	233	619
	0.5+ N	73.6	9.2	43.7	9.5	3.38× 10 ⁻³	1.28× 10 ⁻³	205	541
土壤固有碳	0.5	18.0	-	16.3	-	4.13× 10 ⁻⁴	3.07× 10 ⁻⁴	1678	2 257
	0.5+ N	17.4	- 3.3	16.8	3.1	3.81× 10 ⁻⁴	3.24× 10 ⁻⁴	1 819	2 139
	0.5	26.7	-	19.2	-				
	0.5+ N	27.4	2.62	20.5	6.8				

1) 总碳 = (¹⁴C 秸秆碳矿化量 + 土壤固有碳矿化量) / (¹⁴C 秸秆碳施入量 + 原土壤固有碳量)

年矿化率均比旱地土壤高得多, 但无机氮对 ^{14}C 秸秆碳年矿化率的增加不论在旱地或水田是近似的, 在旱地或淹水土壤中, 加无机氮的处理, ^{14}C 秸秆碳年矿化率与仅施 ^{14}C 秸秆用的处理比增加幅度基本相同为 9.2% 和 9.5%。但对土壤固有碳年矿化率的影响却因土壤水湿状况的不同而不同, 模拟淹水土壤的处理, 无机氮相对抑制了土壤固有碳的矿化, 即增加了土壤固有碳的固持。而模拟旱地土壤的处理, 无机氮却促进了土壤固有碳的矿化, 这可能由于淹水土壤中 ^{14}C 秸秆碳的矿化量显著高于旱地, 在矿化过程中, 微生物活动需要按一定比例同化的无机氮亦较多, 在供氮量相同的条件下, 水田可能由于无机氮的不足, 影响了生物代谢和土壤固有碳的矿化。

2.4 无机氮对 ^{14}C 秸秆碳矿化进程的影响

秸秆碳的矿化进程, 明显地分为快速分解和缓慢分解两个阶段^[9, 10], 秸秆施入土壤, 给土壤微生物提供了充足的碳源, 微生物大量繁殖, 立即进入快速分解阶段, 这时土壤中碳、氮和秸秆中碳、氮均处在矿化和固持作用同时进行的最活跃时期, 微生物分解秸秆时, 一方面利用秸秆中易分解的大量碳源作为能源, 同时将不同程度地同化一部分碳, 在秸秆分解的进程中特别是在其缓慢分解阶段再陆续地缓慢释放出来。我们用 0.5+ N 处理的各培养阶段碳素矿化量与 0.5 处理相应的各培养阶段碳素矿化量的比值“ M ”来说明无机氮对土壤中有机碳矿化进程的影响, $M_{\text{秸}} > 1$, 表明无机氮促进了 ^{14}C 秸秆碳的矿化, $M_{\text{秸}} < 1$, 即无机氮相对降低了秸秆碳的矿化量, 增加了土壤碳的固持。图 1、图 2 结果表明, 在淹水条件下, 培养试验初期秸秆快速分解阶段的两个月中, 肥力水平较低的板浆白土, $M_{\text{秸}} > 1$, 表明加氮促进了 ^{14}C 秸秆碳的矿化, 而肥力水平较高的马肝土, 则有时 $M_{\text{秸}} > 1$, 有时 $M_{\text{秸}} < 1$, 表明加无机氮相对促进和抑制秸秆碳矿化的作用有所波动。而在 56d 后, ^{14}C 秸秆碳开始进入缓慢分解阶段, 直至培养试验结束, 这时两种土壤 $M_{\text{秸}}$ 值始终大于 1, 表明这一时期无机氮持续、稳定地促进了 ^{14}C 秸秆碳的矿化。在旱地条件下, 无机氮对 ^{14}C 秸

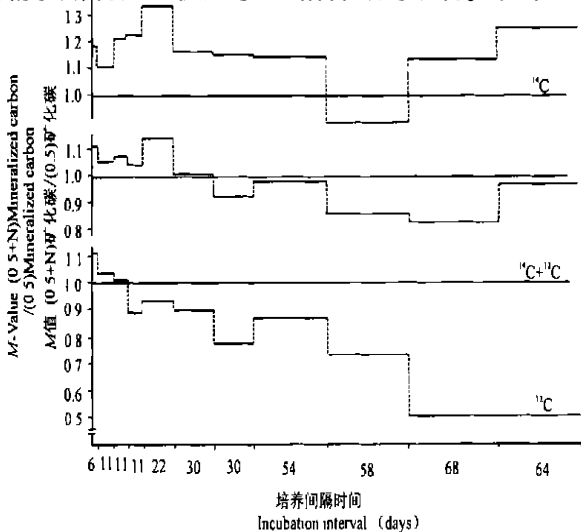


图 1 淹水土壤中无机氮对土壤碳矿化进程的影响(板浆白土)

Fig. 1 Effect of inorganic nitrogen on the mineralization process of soil C in submerged Alfisol

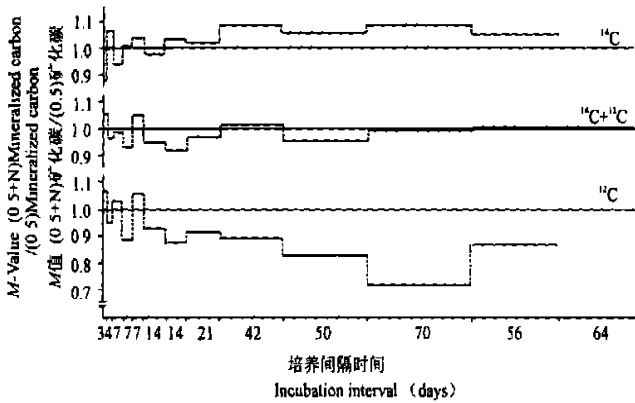


图2 淹水土壤中无机氮对土壤碳矿化进程的影响(马肝土)

Fig.2 Effect of inorganic nitrogen on the mineralization process of soil C in submerged Alfisol

秆碳矿化进程的影响与淹水条件大体相似, 似乎在快速分解阶段, 旱地土壤中 $M_{\text{秸}}$ 值在临界线上线下的波动势较淹水土壤相对稍小而已。无机氮对土壤固有碳矿化进程的影响, 可用 M_{\pm} 来表示, 其结果与秸秆碳矿化进程的影响正好相反, 在板浆白土中, 无机氮仅在培养一个月内促进了土壤固有碳的矿化, 其后一直抑制了土壤固有碳的矿化, 并且 M_{\pm} 值随着培养时间的延长而降低; 而在马肝土中, 培养一个月无机氮对土壤固有碳矿化的影响处在变动之中, 有时 $M_{\pm} > 1$, 有时 $M_{\pm} < 1$, 但在缓慢分解阶段, 加无机氮后亦是一直 $M_{\pm} < 1$ 。可以看出, 无机氮对土壤固有碳和 ^{14}C 秸秆碳矿化进程的影响中, M_{\pm} 和 $M_{\text{秸}}$ 两者间, 一个小于 1, 一个大于 1, 两者是互补的, 因此, 从表观上看无机氮对土壤总碳矿化的影响仅在快速分解阶段促进了土壤碳的矿化, 而在缓慢分解阶段有机碳似呈现微弱的固持, 并不存在促进土壤有机碳矿化的作用。

参 考 文 献

1. 王文山, 王维敏, 张镜清等. 农作物残体在北京农田土壤中的分解. 土壤通报, 1989, 20(3): 113~115
2. 须湘成, 张继宏, 佟国良. 有机物料在不同土壤中腐解残留率的研究. 土壤通报, 1985, 16(1): 21~26
3. 王维敏. 麦秸、氮肥与土壤混合培养时氮素的固定、矿化与麦秸的分解. 土壤学报, 1986, 23(2): 97~104
4. Puig-gimenez M H, Chase F E. Laboratory studies of factors effecting degradation of wheat straw residues in soil. Can. J. Soil Sci. 1984, 64: 9-19
5. 朱培立, 余晓鹤, 艾玉春, 王志明, 朱献玳, 陈炳松. ^{14}C 秸秆在石灰性和非石灰性土壤中的矿化特征. 李生秀主编. 土壤—植物营养研究文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. 95-98
6. 车玉萍, 林心雄. 潮土中有机质的分解与腐殖质积累. 核农学报, 1995, 9(2): 95-101
7. 王志明, 朱培立, 黄东迈. ^{14}C 标记秸秆碳素在淹水土壤中的转化与平衡. 江苏农业学报, 1988, 14(2): 112~117
8. Brookes P C, Jorgensen R G, Jenkinson D S. The ATP content and adenylate energy charge of the soil microbial biomass and the effects of temperature on microbial survival and the mineralization of soil organic matter. In: Intern. Society of Soil Science. ed. Transactions of 14th Inter. Cong. of Soil Sci. Kyoto, Japan Vol III. 1990. 239
9. Zhu Peili, Huang Dongmai, Yu Xiaohu, Li Qingkang, Yu Jie. Mineralization of ^{14}C -labelled straw and goat manure in submerged and upland soils. In: Soil Science Society of China. ed. International Symposium on Paddy Soils (Proceedings). Chinese Academy of Sciences. Soil Science Society of China, Nanjing, 1992

10. 黄东迈, 朱培立, 王志明, 余晓鹤. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑. 土壤学报, 1998, 35(4): 482~ 491

EFFECT OF INORGANIC NITROGEN ON MINERALIZATION OF ORGANIC CARBON ($^{14}\text{C}+^{12}\text{C}$) IN SOIL

Zhu Pei-li Wang Zhi-ming Huang Dong-mai Yu Xiao-he Yan Shao-hua
(*Institute of Soil and Fertilizer, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014*)

Summary

The ^{14}C -tracing technology and isothermally sealed incubation method were used to study effect of inorganic N on mineralization of straw ^{14}C in a combined fertilization system of mineral N and plant residue for one year. Results indicated that in non-calcareous soil, application of inorganic N accelerated mineralization of straw C, but relatively strengthened the immobilization process of indigenous soil C. It might be likely that the increase in the amount of straw C mineralized compensated for the increase in the amount of indigenous C immobilized, hence, inorganic N might have only little effect on mineralization of total organic C in soil. The annual mineralization rate of straw ^{14}C was greater in submerged soil than in upland soils, and the increase in the annual mineralization rate of straw ^{14}C by inorganic N was similar either in submerged soil or in upland soils. In calcareous soil, inorganic N retarded mineralization of both straw ^{14}C and soil native C. Promotion of organic C decomposition by inorganic N was not found in this study.

This paper put forward some new views about the effect of N fertilizer on transformation of organic C, and about the role of N fertilizer in the internal cycling of soil organic C in the combined fertilization system of mineral N and plant residue.

Key words ^{14}C -labeled straw, Inorganic N, Mineralization, Submerged soil, Upland soil