

长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响

马力¹, 杨林章^{1*}, 肖和艾², 殷士学³, 夏立忠¹, 李运东¹, 刘国华^{1,4}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008; 2 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125;

3 扬州大学资源与环境学院, 江苏扬州 225009; 4 南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏南京 225009)

摘要: 为明确长期施肥和秸秆还田对稻田土壤生态系统氮素循环过程的影响, 探索维持稻田土壤长期供氮潜力的途径, 利用始于 1990 年的湖南红壤水稻土长期定位试验, 研究了长期施肥和秸秆还田对水稻土剖面氮素迁移分布和 C/N 的影响, 比较了不同温度下土壤氮素矿化曲线变化和不同施肥方式氮素矿化动态的差异, 分析了氮素累积矿化量与有效积温的关系。结果表明, 长期施肥或秸秆可以促进红壤水稻土氮素的积累, 其主要影响 0—20 cm 土层, 而化肥和秸秆配合施用作用更明显; 长期施氮、磷、钾化肥使土壤 C/N 降低, 而秸秆还田使土壤 C/N 明显升高。在两种温度下的土壤矿质氮含量和累积矿化量曲线比较相似, 10℃ 下土壤矿化速率达到稳定所需的时间要比 30℃ 下长; 30℃ 下不同施肥处理之间的矿化过程存在显著差异, 而 10℃ 下的差异较小, 其在 56 d 内矿化出来的矿质氮是 10℃ 下的近两倍。NP(仅施化肥氮、磷)及 NP+C(施化肥氮、磷+秸秆还田)处理均有较高氮素矿化量, 秸秆还田对土壤氮素矿化的促进作用比仅施化肥明显。在 30℃ 下, 土壤累积矿化量与有效积温的关系较好地符合有效积温方程式(EATM) ($p < 0.01$)。仅施化肥处理和对照方程中的矿化特征常数 k 值相差不大, 而秸秆还田与化肥配施处理方程的 k 值则有增大趋势, NPK+C(施化肥氮、磷、钾+秸秆还田)处理的矿化潜力较大, 且养分供应能力较强; 秸秆配施化肥处理方程中 n 值的绝对值有减小趋势。随着培养时间延长, 秸秆还田配施化肥处理土壤的累积矿化量保持在一个较稳定范围。

关键词: 秸秆还田; 施肥; 水稻土; 氮素; 温度; 矿化

中图分类号: S158.5; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)04-0898-08

Effects of long-term fertilization and straw returning on distribution and mineralization of nitrogen in paddy soils in subtropical China

MA Li¹, YANG Lin-zhang^{1*}, XIAO He-ai², YIN Shi-xue³, XIA Li-zhong¹, LI Yun-dong¹, LIU Guo-hua^{1,4}

(1 Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China;

2 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China;

3 College of Resources and Environment, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

4 College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: To clarify the effects of long-term fertilization and straw returning on nitrogen cycle of paddy soil ecosystem and the ways of maintaining soil nitrogen supplying potentials, a long-term fertilization experiment of paddy soils was setup in Taoyuan country, Hunan province from 1990. Distributions of soil nitrogen and C/N ratio in soil profiles, soil nitrogen mineralization curves and differences under different temperatures, and relationship between cumulative mineralization and effective accumulated temperature were studied. The results show that nitrogen accumulations in soil profiles are significantly improved under the long-term amendments of chemical fertilizer or crop straw, especially in 0–20 cm soil layer, and effects are better with combined application of fertilizer and straw. Curves of soil mineral nitrogen and cumulative mineralization are similar under the two temperatures. Soil minerali-

收稿日期: 2010-09-13 接受日期: 2011-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030640); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-407)资助。

作者简介: 马力(1979—), 男, 安徽阜阳人, 助理研究员, 博士, 主要从事土壤生态系统养分循环与面源污染控制方面的研究。

E-mail: lma@issas.ac.cn * 通讯作者 E-mail: lzyang@issas.ac.cn

zation rates at 10°C may require more time to reach stable state those at 30°C; Compared with the 10°C treatments, significant differences of all treatments are found at 30°C, and nitrogen cumulative mineralization at 30°C during 56 d is about two times of 10°C. Higher cumulative mineralization is found in the NP (chemical N, P) and NP + C (chemical N, P + straw) treatments, demonstrates that a more contributive effect of crop straw and fertilizer than chemical fertilizer only. The relationship between cumulative mineralization and effective accumulated temperature well fit the effective accumulated temperature model (EATM) ($p < 0.01$) in all treatments at 30°C, and the k values are similar to those of EATM in chemical fertilizer treatments and CK, but increasing of k is found in the straw and fertilizer combined treatments. The NPK + C treatment (chemical N, P, K + straw) has higher mineralization potential and nutrient supplying capacity. Decrease of absolute values of n in EATM are found in the straw and fertilizer combined treatments, demonstrates that cumulative mineralization of these treatments maintain a stable range with incubation time.

Key words: straw returning; fertilization; paddy soil; nitrogen; temperature; mineralization

土壤氮素含量和分布与土壤有机物质的形成和分解程度密切相关。有机态氮和矿质氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$)的转化是土壤生态系统中养分循环的重要过程。长期施肥、温度、水分、土壤质地等因素均对土壤氮素的分布转化过程产生显著影响^[1-3]。红壤是我国亚热带地区重要的土壤资源,在长期水耕熟化过程中发育而成的红壤水稻土在南方稻作区分布很广^[4]。在我国许多红壤水稻土分布区,长期施肥是导致农田面源污染和湖泊富营养化的重要因素。随着肥料投入量增加和耕作年限延长,施肥对水稻土氮素养分库转化及稻田生态系统有机养分库的动态平衡均可能有显著影响^[5-7]。对于土壤氮素矿化过程的描述和拟合,一些研究者采用有效积温式,将氮素累积矿化量与温度联系起来^[8-11]。而目前对于长期施肥和温度对水稻土氮素矿化过程影响的研究报道仍然比较缺乏^[12]。虽然土壤氮素一直是农学研究较多的领域,但从土壤养分循环和稻田生态系统角度探讨长期施肥和秸秆还田对土壤氮素的分布和矿化特征的影响,仍是今后的重要研究方向。研究不同因素对土壤氮素矿化过程的影响也一直是评价土壤养分供应能力和土壤生态系统稳定性的重要研究领域^[5-7]。

长期定位试验是研究施肥、耕作、气候等因素对土壤和农业生态系统长期影响的基本手段^[13]。本研究利用始于1990年的湖南桃园地区水稻土长期定位施肥试验,研究长期施肥和秸秆还田过程水稻土氮素的剖面分布变化,采用淹水密闭培养试验,研究不同温度土壤氮素矿化特征,比较不同施肥组合的氮素累积矿化量和矿化率;并将所得氮素累积矿化量数据用有效积温式拟合,以分析不同施肥方式对水稻土氮素矿化潜力的影响,以期明确长期

施肥和秸秆还田对稻田土壤生态系统氮素循环过程的影响,探索稻田土壤的合理施肥方式和维持稻田土壤长期供氮能力的途径,以及土壤养分循环与稻田生态系统稳定性的关系提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于湖南省桃源县的中国科学院桃源农业生态站宝洞峪试验场(111°27' E, 28°55' N),该地属中亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候区,年均温 16.5°C,降水量 1447.9 mm,日照 1531.4 h,太阳辐射 322.6 kJ/cm²,无霜期 283 d,代表区域为我国江南丘陵复合农业生态类型区。供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土^[14],试验前土壤的基础理化性质为:pH(H₂O) 5.74,有机质含量 23.2 g/kg,全氮 1.39 g/kg,全磷 0.604 g/kg,全钾 14.94 g/kg,速效氮 53.4 mg/kg,速效磷 14.7 mg/kg,速效钾 67.7 mg/kg^[15-16]。

1.2 试验设计

长期定位试验开始于1990年,种植制度以早稻-晚稻-绿肥为基础,本研究选用其中的9个处理,完全随机区组设计,3次重复。具体处理如下:1)不施肥对照(CK);2)不施化肥,仅用秸秆还田(CK + C);3)施化学氮肥(N);4)施化学氮肥+秸秆还田(N + C);5)施化学氮、磷肥(NP);6)施化学氮、磷肥+秸秆还田(NP + C);7)施化学氮、钾肥(NK);8)施化学氮、磷、钾肥(NPK);9)施化学氮、磷、钾肥+秸秆还田(NPK + C)。各处理化肥施用量见表1^[15-16],其中处理2、4、6和8收获稻谷的80%(1994年后减为50%)及全部空瘪谷喂猪,猪粪尿还田,稻草和绿肥直接还田;处理1、3、5和7收获稻谷和稻草

表 1 试验设计及各处理施肥量
Table 1 Experimental design and fertilizer application rates of different treatments

编号 Number	代码 Code	施肥量 Fertilizer application rates [kg / (hm ² · a)]			稻秸秆还田 Rice straw returning
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
1	CK	0	0	0	0
2	CK + C	0	0	0	稻秸秆还田 Rice straw returning
3	N	183	0	0	0
4	N + C	183	0	0	稻秸秆还田 Rice straw returning
5	NP	183	90.4	0	0
6	NP + C	183	90.4	0	稻秸秆还田 Rice straw returning
7	NK	183	0	238.6	0
8	NPK	183	90.4	238.6	0
9	NPK + C	183	90.4	238.6	稻秸秆还田 Rice straw returning

全部移出小区,1994年前冬种绿肥,鲜草移出小区,以后不再种绿肥,板田越冬。供试氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。小区面积4.1 m × 8.1 m,各小区之间用水泥田埂分隔,常规管理。

1.3 土壤氮素矿化的淹水密闭培养试验

为比较高温和低温对长期施肥稻田土壤氮素矿化过程的影响,本试验选择10℃和30℃两个温度进行淹水密闭培养试验。称取过0.85 mm筛的新鲜土样5.00 g于21 mm × 200 mm的试管中,先按烘干土与水比例1:1.3加入蒸馏水,使土壤全部湿润并驱出土中空气,再加入5 mL蒸馏水,此时土面有约2~3 cm的水层,形成淹水培养条件,用橡皮塞塞紧瓶口。分别置于恒温生化培养箱中在10℃和30℃下培养,每处理重复3次,并设不加土壤处理作为空白。在培养过程中,每周打开橡皮塞换气一次。在培养第0、3、7、14、21、28、42、56 d,每次取出一组共30个试管,用50 mL 2.0 mol/L的KCl溶液浸提土壤,用连续流动分析仪测定浸提液中的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量,换算成烘干土重,分别计算出10℃和30℃不同时期土壤矿质氮含量和有机氮累积矿化量^[17-20]。矿化曲线的斜率即为矿化速率,单位时间内土壤氮素累积矿化量变化反映了氮素矿化速率的变化。

1.4 土壤氮矿化量的有效积温式

淹水密闭法培养适于研究稻田土壤的氮素矿化过程。在淹水条件下氮矿化量与有效积温的关系可用式(1)表示,该公式为有效积温式(Effective Accumulated Temperature Model, EATM)^[8-10]。

$$Y = k[(T - T_0)D]^n \quad (1)$$

式中:Y为土壤氮累积矿化量(mg/kg),T为培养温度(℃),T₀为有效积温(℃)(吉野等认为15℃为有效温度^[8]),D为培养时间(d);k和n是表征土壤氮矿化特性的常数,当n < 1时,表示前期的矿化速率大于后期;n > 1时,表示后期的矿化速率大于前期。将(1)式两边取对数得:

$$\log Y = \log k + n \log [(T - T_0)D] \quad (2)$$

令T₀ = 15, y = log Y, x = log [(T - T₀)D], a = log k, b = n,则式(2)可转化为直线方程。根据培养过程中测定的氮矿化量和培养时间得到多组数据,可按直线回归方法计算出a和b的值,并计算出矿化特征常数k和n的值。得到不同施肥处理土壤氮素累积矿化量与有效积温的方程式。

1.5 样品采集和测定

土壤样品于2007年11月水稻收获后采集,每个小区用土钻取耕层土壤(0—15 cm)和剖面土壤(0—50 cm)样品。耕层土按对角线法取5个点组成一个混合样品,剖面土样按每10 cm一个层次采取。新鲜耕层土样略微风干后挑去作物根系,过1.8 mm筛并保存于4℃冰箱中,供矿化培养试验使用。剖面土样充分风干后挑去作物根系,用瓷研钵磨细,过0.85和0.15 mm筛,供理化性质分析使用。

土壤有机碳用重铬酸钾容量法^[8],全氮用半微量开氏法^[21],全磷用H₂SO₄-HClO₄消煮—钼锑抗比色法测定^[21],土壤浸提液中的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N用荷兰Skalar流动注射分析仪测定。

试验数据用 SAS(Statistical analysis system) 8.1 数据处理系统和 Excel2007 软件进行处理和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 红壤水稻土氮素剖面分布特征

长期施肥和秸秆还田造成了土壤剖面氮素分布差异。图 1 看出,红壤水稻土剖面全氮含量随土层深度增加逐渐降低,各处理在土壤上层含氮量差异显著,主要反映在 0—20 cm 土层。与 CK 相比,0—20 cm 土层, NPK + C 处理的土壤含氮量提高最显著,其次为 CK + C 和 NPK 处理。说明长期施化肥和秸秆还田均显著促进了红壤水稻土 0—20 cm 土层氮素的累积,而两者配合施用的效果更明显。各处理在 30—50 cm 土层中的氮素含量差异则不明显,说明长期施肥造成的氮素累积主要影响土壤 0—20 cm 土层;同时也表明,在长期水耕熟化过程中,红壤稻田土壤氮素向下层迁移的趋势不明显。

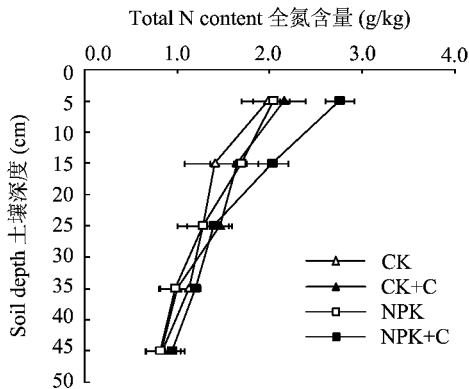


图 1 各处理水稻土剖面氮素分布

Fig. 1 Distribution of total N contents in profile of paddy soils under different fertilizer treatments

长期施肥及秸秆还田还显著影响土壤 C/N 比(图 2)。总体来说,红壤水稻土下层土壤的 C/N 低于上层土壤,但差异并不显著;而在 10—20 cm 土层,CK 和 CK + C 处理的土壤 C/N 明显高于 NPK 和 NPK + C 处理,说明施化肥后该层次土壤中有机的分解程度较高。20—50 cm 土层中, NPK 和 NPK + C 处理的 C/N 仍低于 CK 和 CK + C,说明长期施氮、磷、钾化肥使整个土壤中有机的分解程度有所提高,这可能是由于化肥的施用促进了微生物对有机质的矿化作用,而因秸秆本身具有较高的 C/N,使得秸秆还田后的施氮、磷、钾化肥的土壤 C/N 又有

明显的升高。图 2 还看出,单施秸秆使 0—20、20—40 cm 土层的 C/N 比 CK 及其他处理有明显提高,这是由于秸秆施入带来了分解程度较低的新鲜有机物质所造成。化肥的施用可以促进该部分有机物质的分解,使土壤的 C/N 降低,因此,秸秆还田应与化肥配合施用更有利于土壤氮素的累积,进而提高稻田土壤的养分供应能力。

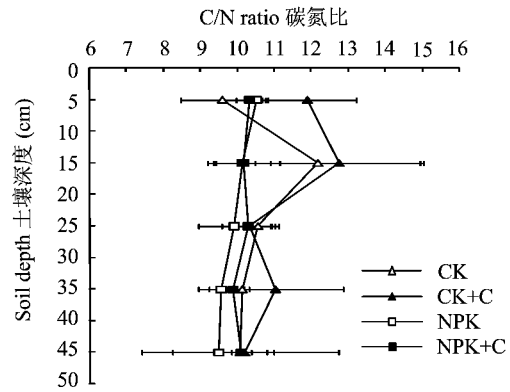


图 2 各处理水稻土剖面 C/N 变化

Fig. 2 Changes of C/N ratio in profile of paddy soils under different fertilizer treatments

2.2 不同温度淹水密闭条件下的氮素矿化特征曲线

图 3、图 4 看出,在两种温度下红壤水稻土矿质氮含量和累积矿化量的曲线比较相似,但仍反映出温度对土壤矿化过程的影响。对两个温度下不同处理的矿化量数据分别进行了二因素有重复方差分析,结果表明,两种温度下,不同施肥处理在不同培养时期的累积矿化量存在显著差异,说明长期施肥同样对红壤水稻土的氮素矿化过程也产生了显著影响,造成不同处理的矿化曲线之间存在显著差异。

10℃ 和 30℃ 条件下,红壤稻田土壤均在培养初期的矿化速率最快,而后逐渐降低,并在一定时期内逐渐达到稳定;10℃ 下,土壤矿化速率达到稳定所需的时间要比 30℃ 下长。培养 7 d 后,30℃ 下各处理土壤矿质氮含量已基本达到较稳定状态,矿化速率降到较低的水平。随培养时间的延长土壤氮素累积矿化量缓慢增加,56 d 后各处理矿化曲线趋于平衡,累积矿化量基本不再增加,矿化速率接近 0,说明 30℃ 下,红壤水稻土淹水培养矿化过程是一个迅速达到平衡并长期保持稳定的过程。而 10℃ 下,各处理土壤矿质氮含量达到稳定则需约 21 d,并且培养后期的矿化曲线仍保持一定斜率,说明仍然有一定的氮素矿化速率。

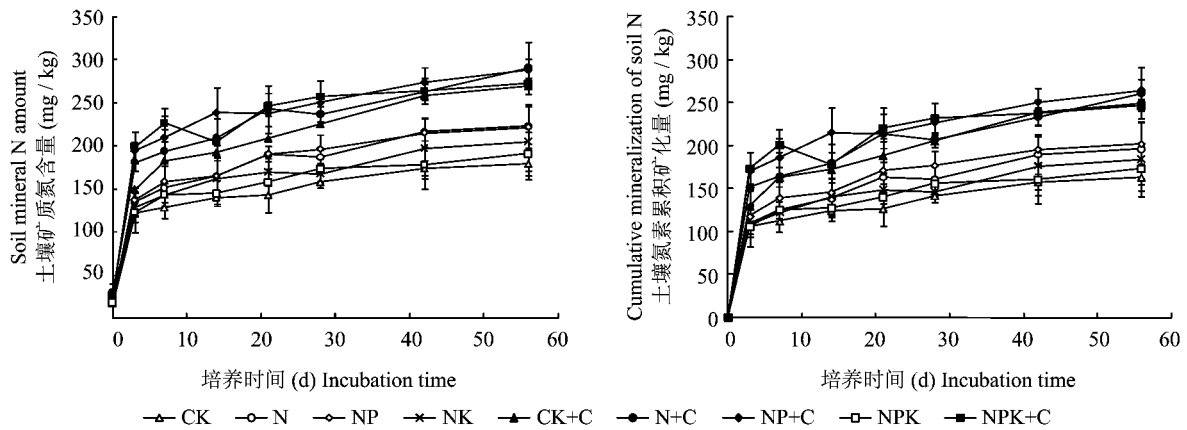


图3 30℃下各处理土壤矿质氮含量和氮素累积矿化量曲线

Fig. 3 Soil mineral nitrogen amount and nitrogen cumulative mineralization curves at 30°C under different fertilizer treatments

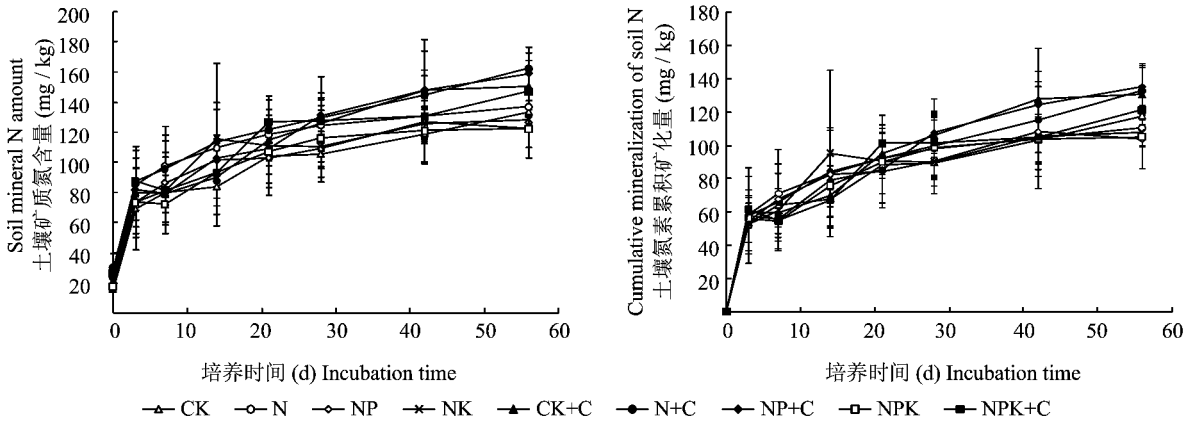


图4 10℃下各处理土壤矿质氮含量和氮素累积矿化量曲线

Fig. 4 Soil mineral nitrogen amount and nitrogen cumulative mineralization curves at 10°C under different fertilizer treatments

30℃下不同施肥处理之间的矿化过程存在显著差异,而10℃下不同施肥处理之间的差异较小,但仍有与30℃下类似的规律。30℃下培养3 d后,各秸秆还田处理在矿化速率最大时的土壤矿质氮含量和累积矿化量高于仅施化肥处理和对照,其中NPK+C处量的累积矿化量最高为173.38 mg/kg,比CK提高了63.38%,说明化肥和秸秆配施可以显著提高土壤氮素的矿化量,有利于提高土壤的养分供应能力。并且CK+C处理的累积矿化量高于NPK处理,说明秸秆还田在红壤水稻土上的影响比仅施化肥明显,无论是仅秸秆还田还是与化肥配施均能明显促进土壤氮素矿化。

图3、图4还看出,30℃下各处理土壤的累积矿化量在不同培养时期均显著高于10℃下的累积矿化量,说明低温影响了土壤微生物的活性,抑制了土

壤有机态氮的矿化过程,使整个土壤释放出来的矿质氮大大降低。30℃下培养56 d的累积矿化量同样是秸秆还田处理高于仅施化肥处理和对照,各处理累积矿化量大小为NP+C>N+C>CK+C>NPK+C>NP>N>NK>NPK>CK。而在10℃下,虽然各处理之间的差异变小,但仍有与30℃下相似的规律。可以发现,化肥氮磷配施及其与秸秆配施均有较高的氮素矿化量,而施钾与否对矿化量的影响不明显。说明可能氮磷配施在红壤水稻土中有利于提高其氮素养分供应能力,与秸秆配施作用更明显,仅秸秆还田的效果优于仅施化肥。各施肥处理土壤氮素矿化曲线变化反映出,长期施肥和秸秆还田对土壤氮素矿化的促进作用很明显,说明土壤氮素养分库容量的增大和养分供应能力的提高,可能对于维持红壤稻田生态的稳定性和提高红壤水稻土

的生产力都是有利的。

2.3 不同处理土壤氮素累积矿化量和矿化率差异

温度是影响土壤氮素矿化的一个主要因素,拟合矿化有效积温式的目的是比较和预测不同施肥条件下土壤氮矿化量与有效积温的关系和受温度影响的程度^[8, 12]。表 2 看出,在 30℃ 条件下,红壤水稻土在 56 d 培养期内的累积矿化量和矿化率显著高于 10℃ 条件,说明作为土壤养分供应的敏感因素,温度对土壤氮素矿化的影响很大。比较不同施肥处理与对照可以发现,施化肥或秸秆还田引起了土壤氮素累积矿化量的显著增加。10℃ 和 30℃ 条件下均为 NP + C 处理的累积矿化量最高,分别比 CK 提高了 15.1% 和 61.95%。可见,温度较高情况下,化肥氮磷配施秸秆对土壤氮素矿化量的提高更大。

表 2 不同处理土壤氮素累积矿化量和矿化率

Table 2 Soil nitrogen cumulative mineralization and mineralization rate under different fertilizer treatments

处理 Treatments	累积矿化量(mg/kg) Cumul. mineralization		矿化率(%) Mineral. rate	
	10℃	30℃	10℃	30℃
	CK	117.4 abA	163.1 cC	6.55 aA
CK + C	130.3 aA	249.0 aAB	6.57 aA	12.55 aA
N	110.4 abA	196.4 bcC	6.09 aA	10.83 abAB
N + C	132.6 aA	260.9 aA	6.30 aA	12.40 aA
NP	103.6 ba	202.3 bBC	5.35 abA	10.45 bAB
NP + C	135.1 aA	264.2 aA	5.43 abA	10.62 bAB
NPK	104.9 ba	173.4 bcC	5.47 abA	9.04 bB
NPK + C	121.0 abA	246.8 aAB	4.82 ba	9.83 bB

注(Note): 同列中不同小、大写字母分别表示差异达 5% 和 1% 显著水平 Different small and capital letters in the same column indicate significant at 5% and 1% level, respectively.

比较仅施化肥和秸秆还田处理可以看出,秸秆还田较仅施化肥对土壤氮素矿化量的提高大,且秸秆与化肥配施的作用优于仅秸秆还田,可见平衡施肥对土壤氮素养分供应能力的提高更有利。从土壤氮素矿化率看出,30℃ 下土壤在 56 d 内矿化出来的矿质氮是 10℃ 下的近 2 倍,同样说明了温度的影响;而不同处理矿化率之间的差异多不显著,说明施肥虽改变了土壤矿化出矿质氮的绝对量,但相对于土壤总氮库的比例并未明显改变,长期施肥可能对土壤氮素循环的稳定性并未产生显著影响。该试验地红壤水稻土系统的养分供应能力仍然维持较稳定的状态,并未因长期施肥而显著累积或过度消耗。可见,水耕熟化条件下,长期施肥和秸秆还田有利于稻田土壤肥力的提高,对于促进土壤养分库的累积和维持稻田生态系统的稳定性有重要作用。

氮素累积矿化量在两种温度下的差值变化可以反映不同规律。图 5 看出,在培养期内每个相同时间段,化肥配施秸秆还田处理的氮素矿化量差值均显著高于其对应的单施化肥处理。而单施化肥处理和秸秆还田处理土壤两种温度下的矿化量差值均显著高于 CK,说明不同施肥方式对氮素矿化过程影响程度通过温度反映出的差异也是显著的。不同施肥处理在培养期内不同时间矿化量差值的变化趋势存在波动,其中 NPK + C 处理在培养 7 d 时矿化量的差值最大。仅从图中很难判断各处理在哪个时期的差异最大,但不同处理包括对照均有随着培养时间延长累积矿化量之间的差值增大的趋势,说明温度对矿化过程的影响程度随时间延长而逐渐增大。从图中反映不出各处理趋于稳定的时间范围,可能在 56 d 培养期内,红壤水稻土在两种温度下仍未达到稳定状态。

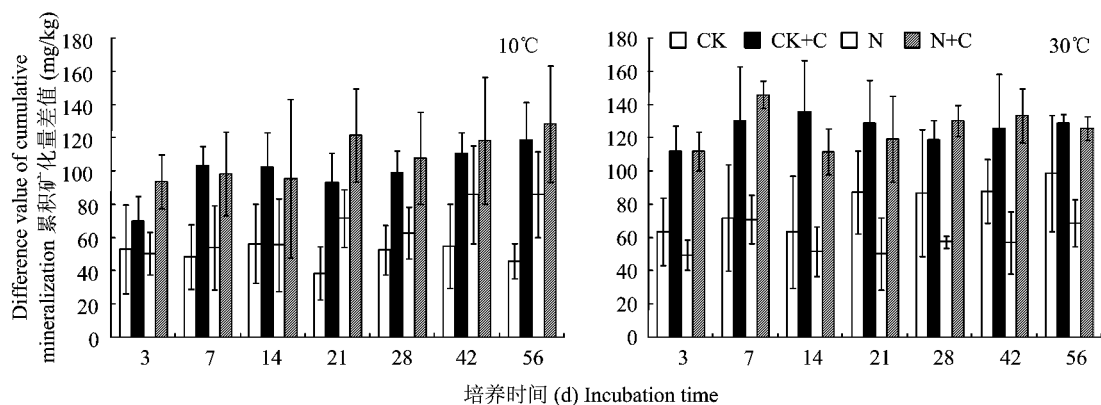


图 5 不同处理两种温度下土壤氮素累积矿化量的差值变化

Fig. 5 Differences of soil nitrogen cumulative mineralization at 10°C and 30°C under different fertilization treatments

2.4 土壤氮素累积氮矿化量与有效积温的关系

从拟合得到的有效积温方程式(表3)看出,不同施肥处理土壤氮素的累积矿化量与有效积温均有极显著的线性关系,可以较好地用矿化有效积温式描述。仅施化肥处理和对照的方程中,k 值相差不大,说明培养开始时的矿化速率相差不大;而秸秆还田与化肥配施处理的方程中,k 值则有增大趋势,其中 NPK + C 处理的 k 值最大,说明这种施肥方式

使土壤矿化初期的矿化速率增大,矿化潜力较大和养分供应能力较强。比较 n 值发现,秸秆配施化肥处理方程中 n 值绝对值有减小趋势,这反映在矿化后期秸秆配施化肥处理土壤氮素累积矿化量曲线上升的趋势有所降低。说明随着培养时间的延长,秸秆还田配施化肥处理土壤的累积矿化量保持在一个较稳定的范围,而仅施化肥土壤的矿化过程要达到稳定状态可能需要更长时间。

表3 不同处理土壤氮矿化量与有效积温方程式

Table 3 Equations of soil nitrogen mineralization and effective accumulated temperature in different fertilizer treatments

处理 Treatment	有效积温方程 EATM	决定系数 R^2	处理 Treatment	有效积温方程 EATM	决定系数 R^2
CK	$Y = 52.94[(T - T_0)D]^{0.16}$	0.9892 **	CK + C	$Y = 53.51[(T - T_0)D]^{0.23}$	0.9926 **
N	$Y = 45.87[(T - T_0)D]^{0.22}$	0.9931 **	N + C	$Y = 66.95[(T - T_0)D]^{0.2}$	0.9879 **
NP	$Y = 55.84[(T - T_0)D]^{0.19}$	0.9952 **	NP + C	$Y = 92.61[(T - T_0)D]^{0.15}$	0.9956 **
NPK	$Y = 55.2[(T - T_0)D]^{0.17}$	0.9931 **	NPK + C	$Y = 106.01[(T - T_0)D]^{0.12}$	0.9781 **

注(Notes): EATM—Effective accumulated temperature model. * * — $P < 0.01$.

3 结论

1) 长期施肥或秸秆还田可以促进红壤水稻土 0—20 cm 土层氮素的积累,施化肥和秸秆均能起到明显作用。随着土壤深度增加,施肥使水稻土 C/N 逐渐降低;长期施化肥氮、磷、钾可能使整个土壤有机质的分解程度提高,使土壤 C/N 降低,而秸秆还田则使土壤 C/N 明显升高。

2) 在 10℃ 和 30℃ 温度下,土壤矿质氮含量和累积矿化量曲线比较相似。10℃ 下土壤矿化速率达到稳定所需的时间长于 30℃。30℃ 下不同施肥处理之间的矿化过程存在显著差异;而 10℃ 下不同施肥处理之间的差异较小。30℃ 下土壤在 56 d 内矿化出来的矿质氮是 10℃ 条件下的近两倍。秸秆还田及其与化肥配施均能明显促进红壤水稻土氮素矿化量的提高。

3) 在 30℃ 下,土壤氮素累积矿化量与有效积温有极显著线性关系。秸秆还田与化肥配施处理有效积温式中 k 值则有增大趋势,NPK + C 处理氮素矿化潜力较大和养分供应能力较强。秸秆配施化肥处理有效积温式中 n 值绝对值有减小趋势。长期施肥和秸秆对红壤稻田土壤氮素循环的稳定性并未产生显著影响。

参考文献:

[1] 李菊梅,王朝辉,李生秀. 有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤

供氮能力方面的意义[J]. 土壤学报,2003,40(2): 232-248.

Li J M, Wang Z H, Li S X. Significance of soil organic matter, total N and mineralizable nitrogen in reflecting soil N supplying capacity[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(2): 232-248.

[2] 李贵才,韩兴国,黄建辉,等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2001,21(7): 1187-1195.

Li G C, Han X G, Huang J H *et al.* A review of affecting factors of soil nitrogen mineralization in forest ecosystems[J]. Acta Ecol. Sin., 2001, 21(7): 1187-1195.

[3] 徐琪,杨林章,董元华,等. 中国稻田生态系统[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 1-8.

Xu Q, Yang L Z, Dong Y H *et al.* Rice field ecosystem in China [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998. 1-8.

[4] 陈惟财,王凯荣,谢小立. 长期不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体中碳、氮分布的影响[J]. 土壤通报, 2009,40(3): 523-528.

Chen W C, Wang K R, Xie X L. Effects on distributions of carbon and nitrogen in a reddish paddy soil under long-term different fertilization treatments[J]. Chin. J. Soil Sci., 2009, 40(3): 523-528.

[5] Cookson W R, Osman M, Marschner P *et al.* Controls on soil nitrogen cycling and microbial community composition across land use and incubation temperature[J]. Soil Biol. Biochem., 2007, 39: 744-756.

[6] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社,1992. 94-96.

Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 94-96.

[7] 徐琪,陆彦椿,刘元昌,等. 中国太湖地区水稻土[M]. 上海:

- 上海科学技术出版社, 1980. 46-52.
- Xu Q, Lu Y C, Liu Y C *et al.* The paddy soil of Taihu Region in China[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980. 46-52.
- [8] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1984. 311-314.
- Wen Q X. The research method of soil organic matter[M]. Beijing: Agricultural Press, 1984. 311-314.
- [9] 蔡贵信, 张绍林, 朱兆良. 测定稻田土壤氮素矿化过程的淹水密闭培养法的条件试验[J]. 土壤, 1979, (6): 234-240.
- Cai G X, Zhang S L, Zhu G L. Experimental conditions for determining the nitrogen mineralization process during anaerobic incubation of paddy soil [J]. Soils, 1979, (6): 234-240.
- [10] Li H L, Han Y, Cai Z C. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu Region of China under anaerobic conditions: dynamics and model fitting[J]. Geoderma, 2004, 115: 161-175.
- [11] 高亚军, 黄东迈, 朱培立, 等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对供氮能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(3): 243-250.
- Gao Y J, Huang D M, Zhu P L *et al.* Long-term impact of different soil management on nitrogen supplying potential in rice-based cropping system[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2000, 6(3): 243-250.
- [12] Leirós M C, Trasar-Cepeda C, Seoanea S *et al.* Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture [J]. Soil Biol. Biochem., 1999, 31: 327-335.
- [13] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(1): 1-9.
- Shen S M. The scientific value of long-term soil fertility experiment [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1995, 1(1): 1-9.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类检索(第三版)[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. 100-106.
- Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, CAS. Keys to Chinese soil taxonomy (3rd ed.) [M]. Hefei: China Science and Technology University Press, 2001. 100-106.
- [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.
- Zhou W J, Wang K R, Liu X. Effects of organic residue cycling on soil nitrogen mineralization characteristics of rice cropping system in red soil region of China[J]. Chin. J. Ecol., 2004, 23(1): 39-43.
- [16] 周卫军. 红壤稻田系统养分循环与 C、N 转化过程[D]. 武汉: 华中农业大学博士学位论文, 2002.
- Zhou W J. Nutritional cycling and transformation processes of carbon and nitrogen in rice cropping system of red soil region of China[D]. Wuhan: PhD dissertation, Huazhong Agricultural University, 2002.
- [17] Standford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1972, 36: 465-472.
- [18] 李生秀, 艾绍英, 何华. 连续淹水培养条件下土壤氮素的矿化过程[J]. 西北农业大学学报, 1999, 27(1): 1-5.
- Li S X, Ai S Y, He H. Soil's nitrogen mineralization process under continuously waterlogged incubation conditions[J]. J. Northwest Agric. Univ., 1999, 27(1): 1-5.
- [19] 李世清, 李生秀. 淹水培养条件下铵态氮肥对土壤氮素的激发效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 361-367.
- Li S Q, Li S X. Priming effect of ammonium nitrogen fertilizer on soil nitrogen under waterlogged condition [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2001, 7(4): 361-367.
- [20] Hart S C, John S M, Davidson A *et al.* Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification[A]. Mickelson S H. Methods of soil analysis, part 2: Microbiology and biochemical properties [M]. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 1994. 1011-1018.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 111-123.
- Lu R K. Analytical method of soil agrochemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 111-123.