

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.032

长期施肥下洞庭湖水稻土氮素矿化及其温度敏感性研究

李文军^{1,2} 杨奇勇³ 杨基峰^{2,4} 肖 焱^{1,2} 黄志刚^{1,2} 彭保发^{1,2}

(1. 湖南文理学院资源环境与旅游学院, 常德 415000; 2. 洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心, 常德 415000;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004; 4. 湖南文理学院化学与材料工程学院, 常德 415000)

摘要: 基于长期定位试验, 设置系列温度(5、15、25、35℃)短期(42 d)淹水培养试验, 以不施肥处理为对照(CK), 研究农户习惯施氮磷钾肥(CF)、施氮钾肥(NK)、均衡施氮磷钾肥(NPK)及氮磷钾肥配施有机肥(HOM)对洞庭湖区水稻土氮素矿化及其温度敏感性的影响。结果表明, 长期不同施肥均显著增加土壤培养42 d累积矿化氮量($P < 0.05$), 其增幅随温度升高由32.7%~80.4%逐渐降至14.9%~59.7%; 与CK处理相比, 施肥土壤氮矿化势(N_0)和可矿化氮比例分别增大22.4%~72.4%和7.8%~39.0% ($P < 0.05$), 25~35℃范围内土壤初期供氮强度(K)和后期矿化速率(n)分别提高2.7%~39.5%和4.0%~21.3%, 该效应均以HOM处理表现最优。5~35℃范围内土壤氮矿化温度敏感系数(Q_{10})和氮矿化活化能(E_a)在长期不同施肥后分别降低9.6%~15.3%和9.2%~22.7% ($P < 0.05$), 其值在不同处理间由大到小均表现为CK、CF、NK、NPK、HOM; 不论施肥与否, 土壤氮素矿化对温度响应最敏感的范围均在5~15℃之间。研究表明, 长期不同施肥后, HOM处理提升土壤氮素矿化能力及降低其温度敏感性的效应更为突出, 是更优的稻田施氮模式。

关键词: 长期施肥; 洞庭湖区; 水稻土; 淹水培养; 氮素矿化; 温度敏感性

中图分类号: S158.5; S147.21⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)11-0261-10

Nitrogen Mineralization and Associated Temperature Sensitivity in Paddy Soils in Dongting Lake Region of China under Long-term Fertilization

LI Wenjun^{1,2} YANG Qiyong³ YANG Jifeng^{2,4} XIAO Ye^{1,2} HUANG Zhigang^{1,2} PENG Baofa^{1,2}

(1. College of Resources and Environment and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China
2. Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economy Zone, Changde 415000, China
3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China
4. College of Chemistry and Materials Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China)

Abstract: Soil nitrogen (N) mineralization is a critical ecological process of N cycling that plays an important role in determining soil N-supplying capacity. Based on a long-term fertilization experiment on paddy field in the Dongting Lake region, China, the responses of organic N mineralization in 0~20 cm soil layer and associated temperature sensitivity to different fertilization were studied. The experiment included five treatments: CK (without fertilization), CF (farmers' practice of applying chemical fertilizer NPK), NK (application of chemical fertilizer NK), NPK (balanced application of chemical fertilizer NPK), HOM (combined application of chemical fertilizer NPK and organic fertilizer). All sampled soils were waterlogged incubated for 42 d at different temperatures (5℃, 15℃, 25℃ and 35℃), and accumulated mineralized N was analyzed. Compared with CK treatment, the accumulated mineralized N produced during 42 d incubation increased significantly ($P < 0.05$) under different fertilization treatments while the increases gradually decreased from 32.7%~80.4% to 14.9%~59.7% along with the increment of temperature. The relationship between cumulative mineralization and effective accumulated temperature well fitted the effective accumulated temperature model (EATM) in all treatments at 25℃ and 30℃, and the values of K and n associated parameters in EATM in all fertilization treatments were higher by 2.7%~39.5% and 4.0%~21.3% than those in CK treatments, respectively, suggesting long-term fertilization presented obvious increased effects on both soil N supplying intensity at initial stage and later N mineralization rate. Moreover, the potentially mineralizable N (N_0) and

收稿日期: 2017-08-08 修回日期: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201297)、湖南文理学院学科骨干人才项目(14XKGG07)、广西区科学研究与技术开发项目(桂科攻1598016-11)和湖南文学学院博士科研启动项目

作者简介: 李文军(1982—),男,副教授,博士,主要从事农田与湿地生态系统土壤碳氮循环及环境效应研究,E-mail: wenjunli0736@163.com

通信作者: 杨奇勇(1976—),男,研究员,博士,主要从事水土资源持续高效利用研究,E-mail: yangqiyong0739@163.com

mineralizable ratio of soil N were significantly ($P < 0.05$) increased by 22.4% ~72.4% and 7.8% ~39.0%, respectively, when fertilization was adopted, and the HOM treatment presented the best results. The values of temperature sensitive coefficient (Q_{10}) of soil N mineralization rate constant was ranged from 1.77 to 2.09 within the temperature range of 5 ~35°C; the values of Q_{10} and activation energy (E_a) for soil N mineralization were significantly ($P < 0.05$) lower in all fertilization treatments than those of no fertilizer treatment, which followed the descending order of CK, CF, NK, NPK and HOM. The Q_{10} value for each treatment was higher from 5°C to 15°C than that from 15°C to 25°C and from 25°C to 35°C, indicating that the most sensitive scope for response of N mineralization to soil temperature was at 5 ~15°C. It can be concluded that HOM treatment presented better effects in improving soil N mineralization capacity, optimizing N mineralization process and decreasing associated temperature sensitivity as compared with any other chemical fertilizer treatment, suggesting combined application of chemical N, P, K and organic fertilizer should be proposed for the rice production in the studied area.

Key words: long-term fertilization; Dongting Lake region; paddy soil; waterlogged incubation; nitrogen mineralization; temperature sensitivity

引言

氮是限制农业生态系统生产力最为重要的营养元素^[1],土壤有机氮矿化向植物提供可利用态氮素,在很大程度上决定着土壤供氮能力,因此深化认识土壤有机氮矿化对优化农业生态系统土壤供氮和阻控氮素环境损失有重要意义^[2]。

在农田生态系统,施肥是调节农田土壤供氮和作物氮素营养的普遍措施^[1,3]。当前,长期施肥对农田土壤氮素矿化的影响因受施肥制度、肥料及土壤特性等差异尚存在较大的差异和不确定性:研究表明,有机肥施用并非总能提升土壤氮素矿化能力,高碳氮比作物秸秆单施或配施化肥可能在短期内抑制土壤有机氮的矿化^[4],或促进土壤无机氮的同化^[5];化肥施用对土壤氮素矿化的影响则更为复杂,单施化肥对土壤氮素矿化可能无明显影响^[6],抑或产生促进^[7]、抑制效应^[8]。这表明关于长期不同施肥措施对土壤氮素矿化的影响效应及机理尚需进行深入研究^[5]。温度是影响土壤氮循环过程的重要环境因子,全球升温背景下,温度变化对土壤氮素矿化的调控效应受到高度重视^[9-10],然而当前对长期施肥影响下农田土壤氮素矿化的温度响应研究却鲜有报道^[11],尤其是缺少长期施肥土壤氮素矿化温度敏感性的研究。洞庭湖区是我国重要的粮区,当前水稻生产中面临着突出的氮肥施用量及环境负荷加剧的生态问题。因此,本研究基于野外长期定位试验和室内培养相结合的方法,研究长期不同施肥影响下洞庭湖区典型水稻土氮素矿化特征及其温度敏感性,为区域水稻土科学施肥及氮素优化管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

国家级稻田肥力与肥料效应长期定位试验监测

点在湖南省汉寿县龙阳镇(111°51'20"E、28°55'48"N),属中亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候区,年均降水量1342.2 mm,多年平均气温16.7°C,全年无霜期274 d,代表江南洞庭湖平原复合农业生态类型区。供试土壤为第四纪红粘土发育形成的潴育型水稻土,俗称红黄泥,是洞庭湖平原区典型的水稻土类型。

1.2 田间试验设计

稻田长期施肥试验始于1986年,实行“早稻-晚稻-冬闲”的耕作制度,本研究选择其中5个处理,各处理小区均按国家土壤肥力长期定位监测标准统一设置为66.7 m²(10 m × 6.67 m),随机排列,未设重复。小区之间设置高出田间水面30 cm、下至犁底层以下5 cm,宽度为25 cm的水泥田埂,并设置排水沟,各小区单灌单排。选取处理信息为:CK(空白不施肥)、CF(农户习惯施氮磷钾肥)、NK(施氮钾肥)、NPK(基于测土配方施氮磷钾肥)、HOM(有机肥与化学氮磷钾肥配施,有机肥氮占总施氮量的60%)。供试肥料为尿素、钙镁磷肥、氯化钾和有机肥(早稻季为紫云英,晚稻季为猪粪)。有机肥和磷肥一次性基施,氮肥按7:3的基追比例施用,钾肥作为追肥施用。各处理除CK和CF外,施氮量均一致,具体施肥信息见文献[12]描述。2013年各处理表层(0~20 cm)土壤基本理化性质见表1。

表1 供试表层土壤基本理化性状

Tab.1 Basic properties of tested soils in 0 ~ 20 cm layer

处理	pH 值 (H ₂ O)	有机碳 质量比/ (g·kg ⁻¹)	全氮 质量比/ (g·kg ⁻¹)	全磷 质量比/ (g·kg ⁻¹)	全钾 质量比/ (g·kg ⁻¹)
CK	6.17	20.14	1.71	0.35	13.82
CF	5.77	20.96	1.83	0.42	14.20
NK	6.08	21.49	1.89	0.32	14.14
NPK	5.79	22.19	1.95	0.45	14.23
HOM	6.14	25.01	2.13	0.49	14.40

1.3 室内培养实验

1.3.1 样品采集及预处理

于 2012 年 11 月晚稻收获后用土钻按“S”形采集各处理小区表层土壤 10~12 个点组成一个混合土样,重复 3 次,获得 3 个混合样品。所采土样迅速带回室内,去除动、植物残体及石砾,风干,碾磨过 2 mm 土筛并混匀后储存备用。

1.3.2 土壤氮素矿化淹水培养

淹水培养是研究土壤氮素矿化的极重要生物学方法,该方法首先由 WARNING 等^[13]提出。淹水培养法较好地模拟淹水土壤水分状况,且不需考虑培养过程中通气及严格的水分控制,故经改进后广泛应用于水稻土氮素矿化研究^[11, 14-15]。本研究测定土壤氮素矿化采用改进的淹水密闭培养-间歇淋洗法^[16],改进之处为土壤由长期培养(培养 217 d)改为短期培养(培养 42 d)。土壤短期培养具备更加简单、迅速和实用的特点^[17],土壤淹水培养下释放的氮素能代表淹水水稻土释放的氮素,从而能较好地反映作物的吸氮情况^[15],且间歇淋洗土壤模拟作物对矿化氮的吸收,及时移去土壤矿化产物,有效克服连续淹水培养下矿化产物的不断累积对矿化酶促反应的抑制及非氨化微生物吸收利用土壤矿化产物而造成矿化累积氮量下降等弊端^[17],更可靠地测定水稻土氮素矿化^[8, 15]。本研究土壤氮素矿化淹水培养-间歇淋洗操作程序如下:称取各处理过 2 mm 筛的风干土样 10 g 分别置于容积为 80 mL 的耐高温塑料离心管中,每个处理设置 3 管,按照土:液比为 1:2.5 的比例向每管沿管壁缓慢加入 25 mL 蒸馏水,轻摇离心管以彻底赶走土壤存留空气并形成稳定的土壤淹水层、加塞并用塑料保鲜膜紧密包裹离心管塞子,保持培养土样始终处于淹水厌氧及密闭状态。随后,将样品放入恒温培养箱中培养,确保培养箱内温度与设定培养温度间最大偏差不高于 0.3℃。综合考虑研究区多年(1950—2010 年)四季气温变化情况^[18]、土壤氮循环微生物活性的温度响应特征^[9]、氮素矿化温度敏感系数计算^[19]等因素,设定各处理土样分别在 5、15、25、35℃ 下独立培养。自培养之日起,分别在 0、3、7、14、21、28、42 d 淋洗。淋洗时,首先向离心管中加入 25 mL 2 mol/L KCl,在转速为 225 r/min 机械摇床上振荡 30 min 后,再以 4 880 r/min 的转速离心 10 min(振荡及离心均属物理操作程序,不会改变土壤养分循环特性及微生物群落结构),将上清液准确转移到 200 mL 容量瓶中;再依次向离心管中加入 50 mL 1 mol/L KCl、50 mL 蒸馏水、25 mL 无氮营养液(配方为 0.002 mol/L CaSO₄·2H₂O, 0.002 mol/L MgSO₄·7H₂O, 0.002 5 mol/L

K₂SO₄, 0.005 mol/L Ca(H₂PO₄)₂·H₂O, 加无氮营养液淋洗土壤旨在平衡土壤其他养分供应以维持土壤微生物活性),每次溶液添加后先用玻璃棒搅拌样品 5 min 再离心 10 min,将每次离心所获上清液倾入容量瓶中,样品淋洗结束后上清液定容至 200 mL,且淋洗后的土样加水至原体积按照前述方法继续培养。多次淋洗土壤可保证土壤矿化氮淋洗充分,且单次淋洗强度较为温和可避免淋洗液浓度过高时对土壤微生物活性产生不利影响^[16]。淹水培养创造适于有机氮矿化的条件,抑制硝化细菌的活动,矿化的最终产物是铵态氮,且在密闭条件下不会发生挥发损失^[17, 20],故淋洗结束后使用流动分析仪(FIA, FOSS Tecator)只测定定容上清液中的 NH₄⁺-N 浓度。间歇淋洗每次所淋洗的氮素是两次淋洗期间的矿化量,其矿化累积量是从培养 0 d 起到给定时间各次矿化量之和^[17]。

1.4 氮素矿化参数的动力学模型拟合

1.4.1 单一级指数模型

不同培养温度下各处理土壤氮素矿化过程用单一级指数模型拟合^[9],该模型在描述土壤氮素矿化动力学特征时应用最为广泛^[14],公式为

$$N_t = N_0(1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

式中 N_t —— t 时间内累积净矿化氮量, mg/kg

N_0 ——氮矿化势, mg/kg

k ——氮素矿化一级反应速率常数, mg/(kg·d)

t ——培养时间, d

在利用式(1)拟合土壤氮素矿化量与培养时间的关系时,对于同一处理土壤而言,不同温度下 N_0 参数取固定值^[9, 19, 21],因为理论上 N_0 表征特定土壤潜在最大可矿化氮数量,其大小不随土壤培养条件改变而变化^[22]。不同培养条件下同一土壤 N_0 取固定值可消除常规单一级指数方程中 N_0 和 k 值均为可变参数且取值结果间相互影响的缺点,拟合获取的 k 值更具有真实性^[22]。 N_0 值采用如下方法确定:另取各处理 3 个重复土壤样品在 30℃(该温度下土壤微生物活性较高^[11]且同田间实际较为吻合^[23])下进行长期(培养 112 d,该培养天数同研究区晚稻生育期时长接近)淹水培养,并于培养 0、3、7、14、21、28、42、56、70、91、112 d 取样淋洗测定土壤矿化氮。土壤培养、矿化氮淋洗及测定均按照 1.3.2 节所述方法操作,不同培养期 NH₄⁺-N 含量的累积过程利用常规单一级指数方程拟合,确定各处理土壤 N_0 取值。

1.4.2 有效积温模型

淹水条件下,氮素矿化量与有效积温的关系亦可用有效积温模型表示^[11],该模型是一个以温度为

主导因素的矿化模型,在我国南方地区及日本水稻土或淹水土壤氮素矿化模拟时应用较多^[24],公式为

$$N_t = K [(T - T_0)t]^n \quad (2)$$

式中 T ——培养温度,℃

T_0 ——基点温度,取 15℃

K 、 n ——土壤氮矿化特征常数, K 值反映培养前期土壤氮矿化强度、 n 值表示培养后期土壤氮素矿化速率

1.5 计算与统计分析

可矿化氮比例 (Mineralizable N ratio, MNR, %) 为

$$M_{NR} = N_o / (1\ 000 T_N) \times 100\% \quad (3)$$

式中 T_N ——土壤全氮质量比, g/kg

土壤氮素矿化与温度之间的关系采用指数模型模拟^[9],国际上一般将温度与表达矿化过程的一级反应速率常数联系起来^[9,19,21]

$$k = \alpha e^{\beta T} \quad (4)$$

式中 α ——基质质量指数,表示温度为 0℃ 时的土壤氮素矿化反应速率常数, mg/(kg·d)

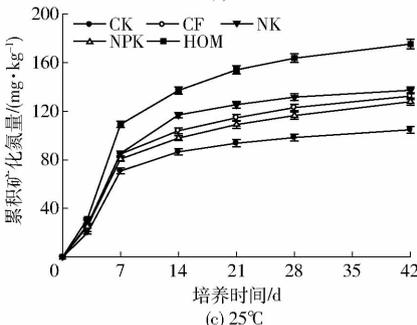
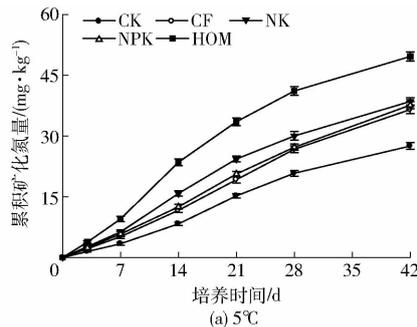
β ——温度反应系数

用温度效应系数 (Q_{10}) 表征氮素矿化一级反应速率常数对温度变化的敏感性,该指标是反映土壤氮有效性对气候变暖响应特征的重要参数^[19,25]。公式为^[26]

$$Q_{10-total} = e^{10\beta} \quad (5)$$

$$Q_{10-partial} = (k_2/k_1)^{10/(T_2-T_1)} \quad (6)$$

式中 $Q_{10-total}$ ——整体培养温度范围 (5 ~ 35℃) 下土壤氮素矿化的温度效应系数



$Q_{10-partial}$ ——培养温度间隔差为 10℃ (5 ~ 15℃、15 ~ 25℃ 和 25 ~ 35℃) 下土壤氮素矿化的温度效应系数
 T_1 、 T_2 ——间隔差为 10℃ 的 2 个培养温度 (T_2 高于 T_1),℃

k_1 、 k_2 ——培养温度为 T_1 、 T_2 下的氮素矿化一级反应速率常数, mg/(kg·d)

土壤氮素矿化所需活化能由阿累尼乌斯方程经形式转换计算^[10]

$$E_a = RT_a \ln(C_e/k) \quad (7)$$

式中 E_a ——土壤氮素矿化所需活化能, kJ/mol

R ——常数,取 8.314 J/(mol·K)

T_a ——热力学温度, K

C_e ——阿累尼乌斯常数, mg/(kg·d)

利用 SigmaPlot 10.0 进行作图并对土壤氮素矿化参数进行模型拟合。利用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析和多重比较 (Duncan 法, $P < 0.05$)。图表中数据的表达形式为“平均值 ± 标准差”。

2 结果与分析

2.1 施肥对土壤氮素矿化特性的影响

2.1.1 土壤氮素矿化动态

在各个培养时段内,土壤累积矿化氮量均随培养温度升高而增加 (图 1)。土壤累积矿化氮量-时间曲线显示,各处理土壤氮素矿化过程基本相同,累积矿化氮量均随培养时间的延长而逐渐增加。在整个培养过程中,各处理累积矿化氮量由大到小顺序总体表现为 HOM、NK、CF 和 NPK、CK。培养初期,

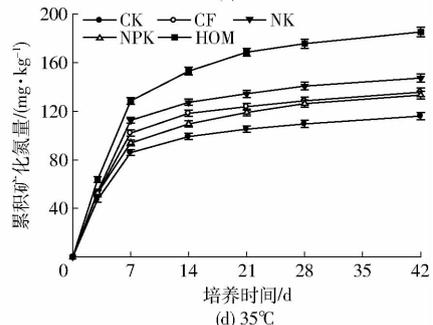
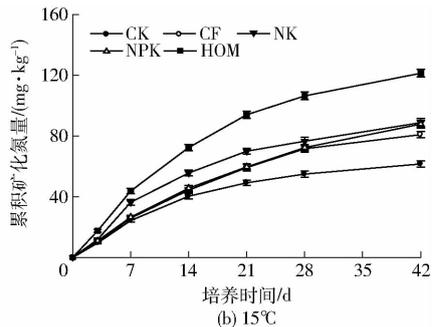


图 1 不同处理土壤氮矿化量累积曲线

Fig. 1 Accumulated curves of mineralized soil N under different treatments

处理间的累积矿化氮量较为接近,随培养时间的延长,其差异总体呈增大趋势。分析不同培养温度下氮素矿化曲线的差异可知,随培养温度升高,各处理矿化曲线在培养初期(培养 7 d 前)趋于陡峭,土壤氮素矿化在更短时间内达到平稳状态,在培养中后期矿化曲线的变化则明显趋缓。

2.1.2 土壤培养 42 d 累积矿化氮、氮矿化势及可矿化氮比例

温度是调控土壤氮素矿化的重要环境因素。表 2 显示,培养 42 d 土壤累积矿化氮量随温度的升高而明显增加,尤其是由 5℃ 升温到 15℃ 和由 15℃ 升温到 25℃ 时,各处理累积矿化氮量增幅均达显著水平($P < 0.05$)。同一温度下,施肥各处理土壤培养 42 d 累积矿化氮量($N_{\min-42}$)均显著高于 CK 处理

($P < 0.05$)。计算得知,在 5、15、25、35℃ 下,施肥处理土壤 $N_{\min-42}$ 值分别较 CK 处理提高 32.7% ~ 80.4%、31.3% ~ 97.1%、22.1% ~ 67.4%、14.9% ~ 59.7%,施肥后土壤 $N_{\min-42}$ 值增幅随温度升高总体呈现降低趋势。单施化肥各处理(CF、NK、NPK 处理)土壤 $N_{\min-42}$ 值较 HOM 处理始终显著降低($P < 0.05$),但其相互间的差异仅只有在 35℃ 培养时 NK 处理 $N_{\min-42}$ 值显著高于 CF 和 NPK 处理。

氮矿化势和可矿化氮比例是表征土壤矿化供氮的重要特征参数,表 2 结果显示, N_o 和 M_{NR} 值在不同处理间均由小到大表现为 CK、NPK、CF、NK、HOM 的顺序。长期施肥均显著提高土壤 N_o 和 M_{NR} 值($P < 0.05$),其提高幅度分别达 22.4% ~ 72.4% 和 7.8% ~ 39.0%。

表 2 不同处理培养 42 d 累积矿化氮量、矿化势和可矿化氮比例

Tab. 2 Accumulated mineralized soil N for incubation of 42 d, potentially mineralizable N and mineralizable N ratio under different treatments

处理	累积矿化氮量/(mg·kg ⁻¹)				矿化势/ (mg·kg ⁻¹)	可矿化氮比例/ %
	5℃	15℃	25℃	35℃		
CK	27.5 ± 0.9 ^{dC}	61.5 ± 3.2 ^{cC}	104.6 ± 11.2 ^{bC}	115.9 ± 2.3 ^{aD}	132.0 ± 2.1 ^D	7.7 ± 0.1 ^D
CF	36.5 ± 2.4 ^{eB}	80.8 ± 3.7 ^{bB}	132.3 ± 2.9 ^{aB}	135.6 ± 5.3 ^{aC}	167.6 ± 4.2 ^C	9.1 ± 0.4 ^B
NK	38.5 ± 1.9 ^{dB}	88.7 ± 2.4 ^{eB}	137.1 ± 5.5 ^{bB}	147.2 ± 5.2 ^{aB}	182.6 ± 5.0 ^B	9.6 ± 0.3 ^B
NPK	37.6 ± 3.7 ^{eB}	87.7 ± 1.5 ^{bB}	127.7 ± 2.3 ^{aB}	133.2 ± 2.8 ^{aC}	161.6 ± 3.8 ^C	8.3 ± 0.2 ^C
HOM	49.6 ± 1.7 ^{eA}	121.2 ± 2.8 ^{bA}	175.1 ± 1.8 ^{aA}	185.1 ± 3.6 ^{aA}	227.6 ± 2.8 ^A	10.7 ± 0.2 ^A

注:同一列不同大写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),同一行中不同小写字母表示不同温度间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.1.3 土壤氮素矿化一级反应速率常数和有效积温模型拟合参数

土壤氮素矿化一级反应速率常数(k)是衡量土壤有机氮素矿化快慢的参数。表 3 显示,固定 N_o 取值后,利用单一级指数方程拟合土壤氮素矿化过程

均有很好的效果(R^2 为 0.83 ~ 0.99, $P < 0.01$)。随温度升高,各处理 k 值均显著增大($P < 0.05$),其变化范围在 0.005 6 ~ 0.110 1 mg/(kg·d) 之间。与 CK 相比,总体上施肥各处理 k 值在 5℃ 和 15℃ 下显著增大($P < 0.05$),却在 25℃ 和 35℃ 下显著降低。

表 3 运用单一级指数方程拟合氮素矿化过程得到的不同温度下土壤氮素矿化速率常数

Tab. 3 Values of soil N mineralization rate constant obtained from fitting of net N mineralization dynamics to one-pool model at different temperatures

处理	5℃		15℃		25℃		35℃	
	$k/(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$	R^2						
CK	0.005 6 ± 0.000 2 ^{dD}	0.98 ***	0.019 3 ± 0.000 2 ^{cD}	0.91 ***	0.065 0 ± 0.000 2 ^{bA}	0.89 ***	0.110 1 ± 0.003 0 ^{aA}	0.90 ***
CF	0.005 8 ± 0.000 2 ^{dCD}	0.99 ***	0.018 8 ± 0.000 1 ^{eE}	0.96 ***	0.059 6 ± 0.002 1 ^{bB}	0.90 ***	0.084 5 ± 0.001 5 ^{aB}	0.83 **
NK	0.006 1 ± 0.000 3 ^{dBC}	0.99 ***	0.019 9 ± 0.000 5 ^{cC}	0.91 ***	0.057 5 ± 0.000 5 ^{bBC}	0.89 ***	0.083 0 ± 0.001 0 ^{aBC}	0.84 **
NPK	0.006 3 ± 0.000 1 ^{dB}	0.99 ***	0.021 0 ± 0.000 2 ^{cB}	0.99 ***	0.057 7 ± 0.001 9 ^{bBC}	0.90 ***	0.080 9 ± 0.000 9 ^{aC}	0.86 **
HOM	0.006 7 ± 0.000 2 ^{dA}	0.97 ***	0.022 5 ± 0.000 1 ^{cA}	0.96 ***	0.056 0 ± 0.002 3 ^{bC}	0.90 ***	0.076 4 ± 0.000 9 ^{aD}	0.88 ***

注:**表示差异显著性达 $P < 0.01$ 水平,***表示差异显著性达 $P < 0.001$ 水平,下同。

有效积温模型对 25℃ 和 35℃ 下土壤氮矿化过程亦有很好的拟合效果(R^2 为 0.91 ~ 0.97, $P < 0.001$) (表 4)。各处理土壤氮素矿化的 K 值和 n 值均随温度升高分别增大和降低,但其数值在同温度下始终是施肥各处理高于 CK 处理。进一步计算

得知,随培养温度升高,施肥各处理 K 值较 CK 处理的增幅均有所降低,增幅由 25℃ 时的 5.0% ~ 39.5% 降至 35℃ 时的 2.7% ~ 21.3%;相反,增温后施肥各处理 n 值较 CK 处理的增幅均有所增加,其增幅由 25℃ 时的 4.0% ~ 8.0% 升至 35℃ 时的

表4 运用有效积温模型拟合25℃和35℃下氮矿化过程得到的氮素矿化特征参数

Tab.4 Values of N mineralization parameters obtained from fitting of net N mineralization dynamics to effective accumulated temperature model at 25℃ and 35℃

处理	25℃			35℃		
	K	n	R ²	K	n	R ²
CK	11.9 ± 0.3 ^D	0.374 3 ± 0.004 7 ^C	0.91 ***	22.5 ± 1.0 ^B	0.253 3 ± 0.007 0 ^D	0.96 ***
CF	13.6 ± 1.0 ^{BC}	0.389 3 ± 0.002 3 ^{AB}	0.93 ***	25.3 ± 0.8 ^A	0.266 3 ± 0.001 2 ^C	0.95 ***
NK	14.3 ± 0.7 ^B	0.390 6 ± 0.002 3 ^{AB}	0.92 ***	26.8 ± 0.7 ^A	0.274 8 ± 0.002 5 ^{BC}	0.94 ***
NPK	12.5 ± 0.2 ^{CD}	0.395 2 ± 0.002 3 ^{AB}	0.94 ***	23.1 ± 1.3 ^B	0.282 9 ± 0.009 5 ^B	0.97 ***
HOM	16.6 ± 0.8 ^A	0.404 1 ± 0.006 3 ^A	0.93 ***	27.3 ± 1.0 ^A	0.307 2 ± 0.005 8 ^A	0.96 ***

5.1% ~ 21.3%。不同处理间 HOM 处理始终具有最高的 K 值和 n 值,其结果显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$);而施化肥处理间, NPK 处理较 NK 和 CF 处理始终具有较低的 K 值和较高的 n 值。

2.2 施肥对土壤氮素矿化温度敏感性的影响

2.2.1 5 ~ 35℃ 范围内土壤氮矿化温度敏感系数和氮矿化活化能

指数模型 $k = \alpha e^{\beta T}$ 能够很好地描述土壤氮素一级矿化速率常数与温度之间的关系(表5,表中 R_1^2 表示指数模型(式(4))拟合决定系数, R_2^2 表示阿累

尼斯方程拟合决定系数)。结果显示,不同处理间 $Q_{10-total}$ 的变化范围在 1.77 ~ 2.09 之间,长期施肥显著影响 $Q_{10-total}$ ($P < 0.05$), $Q_{10-total}$ 仅在 CF 和 NK 处理间差异不显著。不同处理间 $Q_{10-total}$ 由大到小表现为 CK、CF、NK、NPK、HOM,且与 CK 处理相比,长期施肥处理 $Q_{10-total}$ 降低 9.6% ~ 15.3% ($P < 0.05$)。与 HOM 处理相比,单施化肥各处理均显著提升了土壤氮素矿化速率常数的温度敏感性,且该效应以 CF 和 NK 处理较 NPK 处理表现更为突出。表5显示,长期施肥显著降低了土壤氮素矿化

表5 土壤氮素矿化一级反应速率常数的指数模型参数及活化能

Tab.5 Model parameters of exponential function and activation energy for soil N mineralization rate constants fitted by one-pool model

处理	$\alpha / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	β	R_1^2	$Q_{10-total}$	$E_a / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	R_2^2
CK	0.008 6 ± 0.000 3	0.073 8 ± 0.001 2	0.97 *	2.09 ± 0.02 ^A	72.5 ± 1.2 ^A	0.98 *
CF	0.009 6 ± 0.000 5	0.063 4 ± 0.001 2	0.93 *	1.89 ± 0.03 ^B	65.8 ± 1.2 ^B	0.97 *
NK	0.009 7 ± 0.000 2	0.062 7 ± 0.000 4	0.94 *	1.87 ± 0.01 ^B	64.0 ± 0.8 ^{BC}	0.97 *
NPK	0.010 2 ± 0.000 4	0.060 4 ± 0.000 6	0.94 *	1.83 ± 0.01 ^C	62.6 ± 0.9 ^C	0.96 *
HOM	0.010 8 ± 0.000 4	0.057 2 ± 0.000 7	0.93 *	1.77 ± 0.02 ^D	59.1 ± 1.0 ^D	0.95 *

注: * 表示差异显著性达 $P < 0.05$ 水平。

的活化能 ($P < 0.05$),与 $Q_{10-total}$ 变化类似,处理间以 HOM 处理的 E_a 最低,施肥处理 E_a 较 CK 处理降低 9.2% ~ 22.7%。

$Q_{10-total}$ 、 E_a 、 α 间的相关性结果显示(表6), $Q_{10-total}$ 、 E_a 均与 α 具有极显著的负相关关系 ($P < 0.01$), $Q_{10-total}$ 与 E_a 之间则呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$)。说明土壤氮素的基质质量越高,其矿化所需的活化能愈低,对环境升温的敏感性

表6 土壤氮素矿化 $Q_{10-total}$ 、 α 及 E_a 间的 Pearson 相关系数Tab.6 Pearson's correlation coefficients among $Q_{10-total}$, α and E_a for soil N mineralization

指标	$Q_{10-total}$	α	E_a
$Q_{10-total}$	1		
α	-0.971 **	1	
E_a	0.990 **	-0.988 **	1

愈低。

2.2.2 不同温度区间土壤氮素矿化的温度敏感性

以土壤氮素矿化一级反应速率常数为参数计算各处理不同温度区间土壤氮素矿化的 Q_{10} 值 ($Q_{10-partial}$),结果见表7。 $Q_{10-partial}$ 反映温度每升高 10℃,土壤氮素矿化一级速率常数增加的倍数。不同温度区间 $Q_{10-partial}$ 在 1.3 ~ 3.5 之间。当温度每升高 10℃ 时,各处理 $Q_{10-partial}$ 均表现出完全一致的变化规律,即:在 5℃ 升高到 15℃ 最高,15℃ 升高到 25℃ 次之,25℃ 升高到 35℃ 最低,显示该红壤性水稻土氮素矿化对温度响应最敏感的范围在 5 ~ 15℃ 之间。与 CK 处理相比,施肥处理土壤 $Q_{10-partial}$ 在 5 ~ 15℃、15 ~ 25℃、25 ~ 35℃ 均有所降低,平均降低幅度分别达 4.4%、16.2% 和 16.9%。

表 7 不同温度区间土壤氮素矿化的 $Q_{10-partial}$ 结果Tab.7 Values of $Q_{10-partial}$ for soil N mineralization at different temperature ranges

处理	温度/°C		
	5 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 35
CK	3.45 ± 0.06 ^{aA}	3.37 ± 0.06 ^{aA}	1.69 ± 0.04 ^{bA}
CF	3.24 ± 0.07 ^{aB}	3.17 ± 0.10 ^{aB}	1.42 ± 0.05 ^{bBC}
NK	3.26 ± 0.13 ^{aAB}	2.89 ± 0.02 ^{bC}	1.44 ± 0.01 ^{eB}
NPK	3.33 ± 0.03 ^{aAB}	2.75 ± 0.07 ^{bC}	1.40 ± 0.03 ^{eBC}
HOM	3.36 ± 0.10 ^{aAB}	2.49 ± 0.11 ^{bD}	1.36 ± 0.04 ^{bC}

3 讨论

3.1 土壤氮素矿化特性

全球气温升高已成为一个不争的事实,土壤氮素转化所包含的一系列生化过程都受温度影响^[17]。许多研究表明,土壤氮素矿化在适中范围内随温度升高而增加^[27-28]。本研究中培养温度从 5°C 逐渐升温至 35°C 时,土壤累积矿化氮量持续增加,但相对于其它温度,土壤在 5°C 低温下矿化氮量极其有限。分析其原因可能与低温抑制微生物活性及降低复杂有机物质的可溶性有关^[29];相反,适度升温则有利于提升微生物活性及矿化底物的代谢速率^[30]。各温度下各处理土壤培养初始并未发现累积 NH_4^+ -N 有降低现象,这说明土壤无机氮并未发生净固定作用或是在第一次采样淋洗前已快速发生^[27]。各处理土壤在 5°C 和 15°C 下的矿化氮数量虽较低但累积速率相对稳定;在 25°C 和 35°C 下,土壤氮素矿化却迅速达到平衡,之后矿化氮缓慢增加,这与前人的研究结果相类似^[11]。从土壤微生物营养源的角度来看,该现象说明培养初期土壤微生物营养供应充足,环境温度(特别是低温)而不是营养底物成为影响微生物活动的限制因素;相反,随着土壤培养时间延长易矿化底物的不断消耗,营养底物的供应则逐渐成为限制微生物活动的关键因素,这种情形在高温培养下尤为明显^[31]。

在农田生态系统,施肥是调节土壤供氮状况的重要措施。本研究中,长期施肥特别是氮磷钾肥配施有机肥显著提高各温度下土壤累积矿化氮量、氮矿化势及可矿化氮比例,这与秦子娟等^[15]在中性紫色水稻土的研究结果较为一致。这表明长期施肥同步实现提高土壤供氮容量和改善氮素品质,而不施肥土壤底物质量降低在一定程度上弱化其供氮能力^[32]。各施肥处理增加土壤累积矿化氮的效应随温度升高而降低,表明本研究条件下长期不同施肥有利于缓解低温对土壤氮矿化的限制效应,施肥各处理土壤氮矿化速率常数在 5°C 和 15°C 下显著高于

不施肥处理亦证明了这一效应,这在生产实践中有利于改善试验土壤向越冬作物的氮素供应。矿化模型拟合参数是描述土壤氮素矿化特性的重要指标。一阶指数模型拟合结果显示,在 5 ~ 35°C 范围内,氮素矿化一级反应速率常数随温度升高而显著增加,这主要是由升温后土壤易矿化氮库的快速分解所致^[33]。有效积温模型拟合结果显示,施肥各处理土壤的 K 和 n 值在 25°C 和 35°C 下均高于 CK 处理,表明长期施肥改善土壤矿化供氮特性,土壤矿化供氮更为迅速和持久。培养温度由 25°C 升至 35°C,施肥处理土壤的 K 值和 n 值较 CK 处理的增幅分别呈降低和增加趋势,这反映出升温后施肥与不施肥土壤在开始阶段的矿化潜力趋于接近,但施肥土壤后期供氮潜力优势更加突出,矿化过程达到稳定需较长时间^[11],施肥土壤这种氮素释放特征与水稻吸氮更为协调,对提升土壤矿化氮素的作物利用效率有利。评价施肥对土壤矿化供氮能力的影响时,既要考虑土壤矿化供氮快慢也要考虑其矿化潜力^[15]。本研究中,长期实行化学氮磷钾肥配施有机肥在提升土壤矿化供氮容量及改善土壤供氮特性方面具有最优的效果,这应该与施用有机肥直接向土壤补充大量活性氮素和相对单施化肥而言可更优地增强微生物活性、提高水稻残茬氮素还田量等多因素综合影响有关^[12,34]。

3.2 土壤氮素矿化温度敏感性

土壤氮素矿化的温度敏感系数表征适宜温度范围内,温度升高 10°C 时,氮素矿化速率常数增加的倍数^[19]。本研究中,在 5 ~ 35°C 范围内,由式(5)计算出的不同处理间土壤 Q_{10} 值(1.77 ~ 2.09)同 DESSUREAULT-ROMPÉ 等^[29]的研究结果(1.88 ~ 2.06)接近,但明显低于一些高纬地区土壤的 Q_{10} 值(2.46 ~ 3.33)^[35],这表明低纬地区土壤微生物群系可能更加适应较高的环境温度^[10],不同条件下研究结果的差异也可能由矿化底物特性差异所引起^[29]。针对同类型土壤氮素矿化 Q_{10} 的差异,活化能理论认为其由底物质量差异所引起,即:土壤有机物质分解(矿化)的 Q_{10} 取决于酶促反应过程中底物的质量,低质量基质(惰性有机物质)一般具有较高的活化能,其分解(矿化)具有更高的温度敏感性^[32]。但近年来的一些研究表明除土壤氮库质量外,土壤氮库数量亦对 Q_{10} 有重要影响^[10,25],这符合土壤氮素矿化的酶促反应本质,即:底物浓度亦决定氮矿化的速度及其温度敏感性。本研究中, $Q_{10-total}$ 不仅与 E_a 和土壤基质指数(α)存在极显著相关关系(表 6),其亦与土壤全氮含量显著地负相关($R = -0.911$, $P < 0.05$)。先前在相同试验地上开展的工作已发

现长期单施化肥及配施有机肥可有效促进土壤氮素积累,并显著提升其活性^[12],这表明增加氮库容量和改善氮库质量可能是本研究长期施肥后土壤氮素矿化 $Q_{10-total}$ 显著降低的重要原因。

早期的研究常认为土壤氮矿化的 Q_{10} 较为固定,但实际上土壤氮矿化的温度敏感性在时空上具有很大的变异性,固定 Q_{10} 取值并不能有效揭示土壤氮矿化与温度间的动态关系^[9]。本研究发现,在 5 ~ 35℃ 范围内,温度每升高 10℃ 时, $Q_{10-partial}$ 逐渐降低,这与先前的一些研究结果相似^[27-28]。土壤氮素矿化在 5 ~ 15℃ 之间对温度变化最敏感,这与石薇等^[28] 的结果一致,但高俊琴等^[36] 的研究显示若尔盖高寒湿地土壤氮矿化对温度响应最敏感的范围在 15 ~ 25℃ 之间; TIAN 等^[37] 对青藏高原土壤氮矿化的研究结果则显示,林地和灌丛土壤的氮矿化 $Q_{10-partial}$ 由 25℃ 升至 35℃ 时表现最高,而湿草地和干草原土壤氮矿化的 $Q_{10-partial}$ 则分别是土温由 15℃ 升至 25℃ 和由 5℃ 升至 15℃ 时表现最高。这说明不同生态系统土壤氮素矿化对温度变化的敏感程度也有一定差异,其原因可能在于不同条件下参与矿化的有机氮组分和微生物群落存在差异^[10,37],也可能与碳(氮)底物调控微生物活性的有效性不同有关^[38]。

本研究中,不论是以 5 ~ 35℃ 整体温度范围还是以 5 ~ 15℃、15 ~ 25℃ 及 25 ~ 35℃ 不同温度区间计,长期不同施肥后土壤氮矿化速率常数的 Q_{10} 均明显降低,显示长期施肥可有效降低红壤性水稻土氮素矿化的温度敏感性,这有助于控制环境升温背景特别是高温环境下土壤氮素的快速矿化和流失。长期实行化学氮磷钾肥配施有机肥在提升土壤矿化供氮能力及降低氮素矿化温度敏感性方面具有较化肥单施更优的效果,预示在研究区水稻施氮实践中应重视有机肥与化肥的配合施用。单施化肥处理

中,NPK 处理提升土壤 N_0 及其比例的能力虽略弱于 CF 和 NK 处理,但其在平衡土壤前后期矿化供氮分配及弱化氮素矿化对温度变化的敏感性响应方面表现出较后者更好的效应,在生产实践中亦表现出较 CF 和 NK 处理更好的增产稳产效应^[12],说明在当前有机肥投入不足或缺施的条件下,实行基于测土配方的 NPK 平衡施肥可更好地提升资源利用效率,亦可作为研究区可取的施氮模式。

4 结论

(1) 长期不同施肥提升土壤培养 42 d 累积矿化氮量的效应随温度升高而趋于减弱 ($P < 0.05$), 说明施肥对低温 (5 ~ 15℃) 条件下土壤氮矿化具有更加突出的提升效应。施肥后土壤氮矿化势和可矿化氮比例均有显著提高 ($P < 0.05$), 该效应以 HOM 处理表现最优; 长期施肥后土壤初期供氮强度和后期矿化速率均有不同程度提高, 表征施肥土壤供氮更为迅速和持久; 施肥提升土壤初期供氮强度和后期矿化速率的效应随温度升高分别趋于降低和增高, 显示升温后施肥与不施肥土壤初期供氮潜力趋于接近, 但施肥土壤后期供氮潜力提升优势更加趋于突出。

(2) 不论是以 5 ~ 35℃ 整体温度范围还是以 5 ~ 15℃、15 ~ 25℃ 及 25 ~ 35℃ 不同温度区间计, CK 处理土壤氮矿化速率常数的温度敏感系数 (Q_{10}) 均为最高, 说明长期施肥降低土壤氮素矿化的温度敏感性; 不论施肥与否, 土壤氮素矿化均在 5 ~ 15℃ 范围内对温度变化最敏感。

(3) 从不同施肥提升土壤矿化供氮能力、优化供氮过程及降低氮素矿化的温度敏感性效应来看, 长期氮磷钾肥配施有机肥均明显优于化学肥料单施, 表明在研究区水稻生产施氮实践中应重视有机肥与化肥的配合施用。

参 考 文 献

- 1 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 129 - 138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160617&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017.
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 129 - 138. (in Chinese)
- 2 CHAPIN III F S, CHAPIN M C, MATSON P A, et al. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. German: Springer, 2011.
- 3 商放泽, 杨培岭, 任树梅, 等. 施肥模式对日光温室土壤铵态氮和硝态氮的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 73 - 78, 79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120713&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.013.
SHANG Fangze, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of fertilization patterns on NH_4^+-N and $NO_3^- -N$ in solar greenhouse soils[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 73 - 78, 79. (in Chinese)
- 4 LI Tao, GE Xiaoying, HE Chun'e, et al. Mixing alfalfa straw and maize straw to enhance nitrogen mineralization, microbial biomass and enzyme activity: a laboratory study[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(8):1869 - 1874.
- 5 李平, 郎漫, 李煜姗, 等. 不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7):1326 - 1332.

- LI Ping, LANG Man, LI Yushan, et al. Effects of different fertilization on nitrification and mineralization in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1326 – 1332. (in Chinese)
- 6 SALINAS-GARCIA J R, HONS F M, MATOCHA J E, et al. Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by long-term tillage and nitrogen fertilization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25(2): 182 – 188.
- 7 GONG Wei, YAN Xiaoyuan, WANG Jingyan, et al. Long-term application of chemical and organic fertilizers on plant-available nitrogen pools and nitrogen management index[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(7): 767 – 775.
- 8 张玉玲, 张玉龙, 虞娜, 等. 长期不同施肥措施水稻土可矿化氮与微生物量氮关系的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 117 – 121.
- ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, YU Na, et al. Study on relationship between soil mineralizable nitrogen and microbial biomass nitrogen in paddy soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 117 – 121. (in Chinese)
- 9 GUNTIÑAS M E, LETRÓS M C, TRASAR-CEPEDA C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 48(1): 73 – 80.
- 10 LIU Yuan, HE Nianpeng, WEN Xuefa, et al. Patterns and regulating mechanisms of soil nitrogen mineralization and temperature sensitivity in Chinese terrestrial ecosystems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 215(1): 40 – 46.
- 11 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥对红壤性水稻土氮素剖面分布及温度对土壤氮素矿化特性的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 47(2): 286 – 294.
- MA Li, YANG Linzhang, XIAO Heai, et al. Profile distribution and mineralization characteristics of nitrogen in relation to temperature in paddy soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 47(2): 286 – 294. (in Chinese)
- 12 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(3): 488 – 500.
- LI Wenjun, PENG Baofa, YANG Qiyong. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting Lake of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3): 488 – 500. (in Chinese)
- 13 WARNING S A, BREMNER J M. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability [J]. *Nature*, 1964, 201: 951 – 952.
- 14 LI Huiling, HAN Yong, CAI Zucong. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu Region of China under anaerobic conditions: dynamics and model fitting[J]. *Geoderma*, 2003, 115(3 – 4): 161 – 175.
- 15 秦子娟, 张宇亭, 周志峰, 等. 长期施肥对中性紫色水稻土氮素矿化和硝化作用的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3392 – 3400.
- QIN Zixian, ZHANG Yuting, ZHOU Zhifeng, et al. Characteristics of mineralization and nitrification in neutral purple paddy soil from a long-term fertilization experiment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3392 – 3400. (in Chinese)
- 16 LU Hongling, LI Shiqing, JIN Fahui, et al. Effects of soluble organic N on evaluation soil N-supplying capacity[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(7): 860 – 870.
- 17 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 Shengxiu, AI Shaoying, HE Hua. Soil's nitrogen mineralization processes under continuously waterlogged incubation conditions [J]. *Journal of Northwest Agricultural University*, 1999, 27(1): 1 – 5. (in Chinese)
- 18 黄菊梅, 邹用昌, 蔡海朝, 等. 近 60a 来洞庭湖区气温的变化特征[J]. *气象科学*, 2013, 33(4): 457 – 463.
- HUANG Jumei, ZOU Yongchang, CAI Haichao, et al. Change characteristics of the air temperature during the past 60 years over Dongting Lake area[J]. *Journal of Meteorological Sciences*, 2013, 33(4): 457 – 463. (in Chinese)
- 19 STANFORD G, FRERE M H, SCHWANINGER D H. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization[J]. *Soil Science*, 1973, 115(4): 321 – 323.
- 20 SAHRAWAT K L. Nitrogen mineralization in lowland rice soils: the role of organic matter quantity and quality[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2010, 56(3): 337 – 353.
- 21 SIERRA J. Nitrogen mineralization and nitrification in a tropical soil: effects of fluctuating temperature conditions [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9): 1219 – 1226.
- 22 WANG Weijin, SMITH C J, CHEN Deli. Towards a standardised procedure for determining the potentially mineralizable nitrogen of soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(6): 362 – 374.
- 23 LI Wenjun, PENG Baofa, ZHAO Di, et al. Assessing chemical soil tests for predicting nitrogen mineralization in paddy soils of the Dongting Lake region in China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(10): 2419 – 2429.
- 24 ZHU Z L. Mineralization of soil nitrogen [M]//ZHU Z L. Nitrogen in soils of China. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997: 43 – 66.
- 25 KOCH O, TSCHERKO D, KANDELER E. Temperature sensitivity of microbial respiration, nitrogen mineralization, and potential soil enzyme activities in organic alpine soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(4): 497 – 507.
- 26 CUI Pengyuan, FAN Fenliang, YIN Chang, et al. Long-term organic and inorganic fertilization alters temperature sensitivity of potential N₂O emissions and associated microbes[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 93: 131 – 141.
- 27 DALIAS P, ANDERSON J M, BOTTNER P, et al. Temperature responses of net N mineralization and nitrification in conifer forest soils incubated under standard laboratory conditions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(5): 691 – 701.
- 28 石薇, 王景燕, 魏有波, 等. 水热条件对华西雨屏区柳杉人工林土壤氮矿化的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1430 – 1436.

- SHI Wei, WANG Jingyan, WEI Youbo, et al. Effects of water and temperature on soil nitrogen mineralization of *Cryptomeria fortunei* plantations in rainy area of western China[J]. *Journal of Soil Science*, 2014, 45(6): 1430–1436. (in Chinese)
- 29 DESSUREAULT-ROMPÉ J, ZEBARTH B J, GEORGALLAS A, et al. Temperature dependence of soil nitrogen mineralization rate: comparison of mathematical models, reference temperatures and origin of the soils[J]. *Geoderma*, 2010, 157(3): 97–108.
- 30 FIERER N, CRAINE J M, MACLAUCHLAN K, et al. Litter quantity and the temperature sensitivity of decomposition[J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 320–326.
- 31 任秀娥, 童成立, 孙中林, 等. 温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2245–2250.
- REN Xiue, TONG Chengli, SUN Zhonglin, et al. Effects of temperature on organic carbon mineralization in paddy soils with different clay content[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2245–2250. (in Chinese)
- 32 BOSATTA E, AGREN G I. Soil organic matter quality interpreted thermodynamically[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(13): 1889–1891.
- 33 HEUMANN S, BÖTTCHER J. Temperature functions of the rate coefficients of net N mineralization in sandy arable soils. Part I: derivation from laboratory incubations[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(4): 381–389.
- 34 花可可, 朱波, 杨小林, 等. 长期施肥对紫色土汉坡地团聚体与有机碳组分的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 167–173. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141026&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.026.
- HUA Keke, ZHU Bo, YANG Xiaolin, et al. Effects of long-term different fertilization on soil aggregates and organic carbon fractions on sloping upland of purple soil[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 167–173. (in Chinese)
- 35 虎瑞, 王新平, 张亚峰, 等. 温度对生物土壤结皮斑块土壤氮矿化作用的影响[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 522–528.
- HU Rui, WANG Xinping, ZHANG Yafeng, et al. Effects of temperature on soil net nitrogen mineralization under different biological soil crusts in Shapoto, northern China[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(2): 522–528. (in Chinese)
- 36 高俊琴, 欧阳华, 张锋, 等. 若尔盖高寒湿地土壤氮矿化对温度和湿度的响应[J]. *湿地科学*, 2008, 6(2): 229–234.
- GAO Junqing, OUYANG Hua, ZHANG Feng, et al. The response of soil nitrogen mineralization to soil temperature and soil moisture in Zoige alpine wetland[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 229–234. (in Chinese)
- 37 TIAN Yuqiang, OUYANG Hua, GAO Qiong, et al. Responses of soil nitrogen mineralization to temperature and moisture in alpine ecosystems on the Tibetan Plateau[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2(6): 218–224.
- 38 TEKLAY T, ZHENG S, ATTAEIAN B, et al. Temperature and substrate effects on C & N mineralization and microbial community function of soils from a hybrid poplar chronosequence[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(3): 413–421.

~~~~~

(上接第 306 页)

- 14 张利超, 杨伟, 李朝霞, 等. 激光微地貌扫描仪测定侵蚀过程中地表糙度[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 155–162.
- ZHANG Lichao, YANG Wei, LI Zhaoxia, et al. Quantification of soil surface roughness during soil erosion using laser microtopographical scanner[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(22): 155–162. (in Chinese)
- 15 钟美英, 李凤梅. 五华县近 52 年降水统计分析及其最大降水量重现期的估算[J]. *广东水利水电*, 2010(12): 37–40.
- ZHONG Meiyang, LI Fengmei. Statistical analysis of the precipitation during recent 52 years and the estimation of recurrence period for the maximum precipitation in Wuhua County[J]. *Guangdong Water Resource and Hydropower*, 2010(12): 37–40. (in Chinese)
- 16 HUFF F A. Time distribution of rainfall in heavy storms[J]. *Water Resources Research*, 1967(3): 1007–1019.
- 17 MILAN D J, HERITAGE G L, HETHERINGTON D. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32: 1657–1674.
- 18 刘东生. *黄土与环境*[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1–482.
- 19 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988(7): 9–18.
- LIU Yuanbao, ZHU Xianmo, ZHOU Peihua, et al. The laws of hillslope channel erosion occurrence and development on Loess Plateau[J]. *Memoir of NISWC Academia Sinica*, 1988(7): 9–18. (in Chinese)
- 20 陈俊杰, 孙莉英, 刘俊体, 等. 坡度对坡面细沟侵蚀的影响——基于三维激光扫描技术[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(3): 1–5.
- CHEN Junjie, SUN Liying, LIU Junti, et al. Effects of slope gradients on rill erosion: study based on three-dimensional laser technology[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(3): 1–5. (in Chinese)
- 21 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 204–211.
- LIU Xilin, ZHANG Dalin. Temporal-spatial analyses of collapsed gully erosion based on three-dimensional laser scanning[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4): 204–211. (in Chinese)