

洞庭湖区水稻土有机氮矿化的模型模拟

李文军^{1,2*} 曾细妹¹ 彭保发¹ 杨基峰¹ 赵迪¹

(¹湖南文理学院洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心, 湖南常德 415000; ²中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要 有机氮矿化是土壤氮循环的关键过程, 预测土壤有机氮矿化对于评价土壤供氮能力具有重要意义。本研究利用有效积温、双曲线、一阶(One-pool)和二阶(Two-pool)指数模型拟合洞庭湖区典型水稻土有机氮矿化过程, 并分析模型参数与土壤有机氮组分间的关系。结果表明, 洞庭湖区不同发育类型水稻土有机氮矿化表现出明显差异, 各培养时期累积矿化氮量总体上表现为潜育性水稻土>潜育性水稻土>淹育性水稻土。各矿化模型均可对各试验土壤有机氮矿化过程进行有效拟合, 但综合比较模型拟合决定系数(R^2)、均方根误差值及参数取值显示, One-pool 指数模型拟合效果最差, 有效积温模型和双曲线模型次之, Two-pool 指数模型拟合效果最优。各模型拟合的不同土壤间有机氮矿化速率常数变异较小, 与各有机氮组分均无显著相关性($P>0.05$); 不同有机氮组分中, 氨基酸氮和氨态氮与矿化模型中表征土壤有机氮矿化强度或矿化势的各参数始终具显著正相关关系($r=0.755\sim 0.950$, $P<0.05$)。通径分析结果进一步显示, 氨基酸氮是土壤有机氮矿化强度或矿化势变化的最主要决策组分并起直接影响作用。Two-pool 指数模型将土壤可矿化有机氮分为易矿化氮和难矿化氮两类, 相对于其他模型可更为准确地描述研究区水稻土有机氮素的矿化; 固定该模型中两类可矿化有机氮库的矿化速率常数取值, 有助于提升模型实时定量预测土壤矿化供氮的实用性。

关键词 洞庭湖区; 水稻土; 有机氮矿化; 模型拟合; 有机氮组分

Modeling of organic nitrogen mineralization in paddy soils in Dongting Lake region of China. LI Wen-jun^{1,2*}, ZENG Xi-mei¹, PENG Bao-fa¹, YANG Ji-feng¹, ZHAO Di¹ (¹Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, China; ²State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China).

Abstract: Soil organic nitrogen mineralization (SONM) is a critical N cycling process. Quantitative prediction of SONM is essential for assessing soil N supply capacity. In this study, four different mineralization models (*i.e.*, effective accumulated temperature, hyperbolic, One-pool and Two-pool exponential models) were selected to fit SONM process in nine typical paddy soils in Dongting Lake region. The relationships between model parameters and soil organic nitrogen components were analyzed using correlation and path analysis. Results showed that SONM rate substantially varied with soil subtypes. The cumulative mineralized N measured throughout the whole incubation periods generally ranked as Fluvisols > Gleysols > Cambisols. Basing on the coefficients of determination (R^2), root-mean-square error estimations and model fitted parameter values, all the four models could effectively simulate the SONM process, of which Two-pool exponential model consistently had the best fitting effect, followed by hyperbolic, effective accumulated temperature and the One-pool exponential model. Pearson correlation analysis showed that

国家自然科学基金项目(41201297)、湖南省自然科学基金项目(2017JJ3220)、中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0812201239)、湖南文理学院学科骨干人才项目(14XKGG07)和湖南文理学院博士科研启动项目资助。

收稿日期: 2018-07-30 接受日期: 2018-12-16

* 通讯作者 E-mail: wenjunli0736@163.com

model fitted SONM rate constants were insignificantly ($P > 0.05$) correlated with soil organic nitrogen components due to their weak variability. On the contrary, all model parameters of characterizing SONM intensity or potential had significant positive correlations with amino acid N and ammonium N ($r = 0.755-0.950$, $P < 0.05$). Furthermore, amino acid N was the primary organic N component directly affecting soil mineralizable N capacity. Our results suggested that the Two-pool exponential model could simulate SONM process more effectively than others as it could reveal the mineralization processes of soil active and slow pools of mineralizable N simultaneously. Thus, Two-pool exponential model could improve the validity and accuracy of SONM prediction by assigning fixed values for the mineralization rate constants of soil active and slow mineralizable organic N pools.

Key words: Dongting Lake region; paddy soil; organic nitrogen mineralization; model fitting; organic nitrogen component.

氮素是植物生长所必需的营养元素之一,亦是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素(赵阳等, 2013)。土壤供氮能力是农田生态系统初级生产力的主要影响因子,多数条件下非豆科作物一生中吸收的氮素至少有 50%来自于土壤(Li *et al.*, 2014)。土壤氮素主要以有机氮形式存在,多数有机氮只有经过矿化成为无机氮才能被作物吸收利用,有机氮矿化能力在很大程度上决定了土壤氮的可利用性(陈书信等, 2014)。因而,准确定量模拟土壤有机氮矿化过程对于预测土壤氮素供应能力和制定推荐施氮制度具有重要意义(穆兴民等, 1999; 刘青丽等, 2010)。关于土壤有机氮素矿化量的定量研究已有较长的历史,而使用模型模拟土壤有机氮矿化则在最近 30 余年受到较高关注(穆兴民等, 1999), 当前国际上应用较为广泛的有机氮矿化模型是动力学模型和经验模型,前者包括零阶、一阶和混阶动力学等模型,该类模型参数能较好地解释土壤有机氮分解机理,而经验模型(主要为有效积温模型)则较多地考虑了有机氮矿化过程的影响因素及其所起的作用(Benbi *et al.*, 2002)。动力学模型广泛用于好气条件下旱地土壤有机氮的矿化模拟,在水稻土上的应用较少(Li *et al.*, 2003);而有效积温模型则虽然常用于东亚地区水稻土的矿化供氮预测,但有研究表明该模型不一定能真实且也不易直接地反映淹水土壤有机氮矿化的本质(Li *et al.*, 2003)。因此,应用动力学模型和有效积温模型,结合多样化的研究条件,同时模拟水稻土有机氮素矿化过程,比较不同模型预测结果的差异,有助于综合评价模型的优劣性。

土壤有机氮矿化是反映土壤供氮能力的重要生态过程,土壤供氮能力本质上是土壤中不同有机氮组分矿化的综合表现(伍玉鹏等, 2015),土壤有机

氮组分结构显著影响土壤氮素有效性(张玉树等, 2015)。土壤有机氮矿化模型可表示为不同土壤有机氮组分含量及其生物分解性、矿化环境影响因子及矿化持续时间的复合函数(穆兴民等, 1999),当前的大多数研究并未分析有机氮矿化模型参数与有机氮组分间的关系,这限制了模型的实际应用性。建立有机氮矿化模型的主旨之一在于评价土壤有机氮矿化特性及实时预测田间土壤有机氮矿化量(Benbi *et al.*, 2002; Camargo *et al.*, 2004),但其参数值的获取往往依赖于一定时长的培养试验,存在着耗时费力的问题,而有机氮组分的测定则相对简单快速,因而,建立土壤有机氮组分与氮素矿化模型参数间的关联对于理解不同条件下土壤氮素矿化机理和增强模型的实用性均具有重要意义。本研究采集洞庭湖区不同发育类型典型水稻土样品进行淹水生物培养,选用有效积温模型、双曲线模型、一阶指数模型、二阶指数模型对水稻土有机氮矿化过程进行模拟,并分析矿化模型参数与有机氮组分间的关系,旨在为区域水稻土有机氮矿化预测及氮肥高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验选用洞庭湖区隶属于淹育性、潜育性和潜育性 3 种发育类型的水稻土,每种发育类型均包括 3 个不同土种的土壤样本,代表了洞庭湖区多种母质及冲击平原和丘陵等地形长期影响下所形成的典型水稻土。所有采样点均长期实行早稻-晚稻-冬闲的耕作制度及相似的田间管理措施。试验土壤在 2012 年晚稻收获后采集,在每个采样点 0.1 hm^2 代表性范围内随机多点采集 $5 \text{ kg } 0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层土样组成混合样品。采集的混合土样去除肉眼可见石粒

和植物残渣,经风干、过2 mm土筛且充分混匀后常温下贮存待测。供试水稻土发育类型及其基本理化性质信息见表1。

1.2 土壤有机氮矿化淹水培养试验

土壤有机氮的矿化采用改进的长期淹水培养-间歇淋洗法测定(Lu *et al.*, 2008), 该法因只测定样品淋洗液中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)浓度,且无需考虑土壤水分状况,因而广泛应用于水稻土有机氮矿化研究。称取过2 mm筛风干土样10 g置于容积为80 mL的离心管中,加入蒸馏水25 mL,待土样空气完全排出后盖紧离心管盖子,30 °C下淹水密闭恒温培养112天,每种土壤设置3个重复。本研究选择30 °C培养土壤其缘由不仅在于土壤氮矿化微生物在30 °C左右具有较高的生物活性(Guntiñas *et al.*, 2012),亦在于其能较好地代表研究区晚稻(主要商品粮)生长期田间气温的平均状况(Li *et al.*, 2016)。土壤培养112天也同研究区晚稻生育期天数接近。自培养之日起后的第0、3、7、14、21、28、42、56、70、91、112天取各培养样品按照李文军等(2017)所述方法进行淋洗,利用连续流动分析仪测定淋洗液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度并计算土壤矿化氮量。土壤累积矿化氮量为从培养0天起到给定培养时间内各次计算的土壤矿化氮量之和。

1.3 土壤有机氮组份测定

土壤有机氮组份用酸水解法测定(Bremner, 1965),即样品中加入6 mol·L⁻¹的HCl于120 °C下水解12 h后取出冷却、过滤,并用少量蒸馏水多次淋洗残渣,酸解液中酸解氮、氨态氮、氨基糖氮、氨基酸氮含量分别用开氏定氮法、氧化镁蒸馏法、pH 11.2的磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法、茚三酮氧化磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法测定;酸未解氮、氨基糖氮、酸解未知氮含量用差减法求得。

表1 供试水稻土发育分类及基本理化性质

Table 1 Development types and basic properties of the tested paddy soils

土号	亚类	质地	有机碳 (g·kg ⁻¹)	全氮 (g·kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	黏粒 (%)	碳氮比
土1	淹育性水稻土	壤质(粉砂黏壤)	15.60	1.59	4.8	22.3	9.8
土2	淹育性水稻土	壤质(粉壤)	11.86	1.05	5.1	13.7	11.3
土3	淹育性水稻土	粘质(粉黏土)	13.97	1.33	7.4	35.3	10.5
土4	潜育性水稻土	壤质(粉砂黏壤)	21.73	1.96	5.6	19.9	11.1
土5	潜育性水稻土	壤质(黏壤)	19.21	1.96	5.3	21.3	9.8
土6	潜育性水稻土	粘质(粉黏土)	22.56	2.52	5.2	43.1	9.0
土7	潜育性水稻土	粘质(壤黏土)	27.42	2.54	5.3	34.4	10.8
土8	潜育性水稻土	粘质(壤黏土)	26.20	2.50	6.6	40.5	10.5
土9	潜育性水稻土	粘质(粉黏土)	28.43	2.74	6.8	36.1	10.4

土壤质地分类采用国际制标准。

1.4 土壤有机氮矿化模型

1.4.1 有效积温模型

$$N_t = K[(T - T_0)t]^n \quad (1)$$

式中, N_t 为 t 时间内累积净矿化氮量,mg·kg⁻¹; K 、 n 为土壤有机氮矿化特征常数,其中 K 值反映土壤有机氮矿化强度,与土壤有机氮矿化容量有关, n 值表示培养后期土壤氮素矿化速率; T 为培养温度(°C); T_0 为基点温度,取15 °C; t 为培养时间,d。

1.4.2 双曲线模型

$$N_t = N_{0(\text{H})}t/(T_c + t) \quad (2)$$

式中, $N_{0(\text{H})}$ 为双曲线模型拟合确定的土壤有机氮矿化势,mg·kg⁻¹; T_c 为土壤有机氮矿化半衰期;其余符号意义同式(1)。

据式(2)中 T_c 参数取值,可据式(3)计算双曲线模型拟合确定的土壤有机氮矿化速率常数($K_{0(\text{H})}$),mg·kg⁻¹·d⁻¹:

$$K_{0(\text{H})} = \ln 2/T_c \quad (3)$$

为更好描述土壤有机氮矿化特性及便于模型间参数结果的比较,本研究确定使用的双曲线模型参数为 $N_{0(\text{H})}$ 和 $K_{0(\text{H})}$ 。

1.4.3 一阶(One-pool)指数模型

$$N_t = N_{0(\text{E})}(1 - e^{-K_{0(\text{E})}t}) \quad (4)$$

式中, $N_{0(\text{E})}$ 为一阶指数模型拟合确定的土壤有机氮矿化势,mg·kg⁻¹; e 为自然对数的底; $K_{0(\text{E})}$ 为一阶指数模型拟合确定的土壤有机氮矿化速率常数,mg·kg⁻¹·d⁻¹;其余符号意义同式(1)。

1.4.4 二阶(Two-pool)指数模型

$$N_t = N_D(1 - e^{-K_D t}) + N_R(1 - e^{-K_R t}) \quad (5)$$

式中, N_D 和 N_R 分别为土壤易矿化和缓慢矿化有机氮库矿化势,mg·kg⁻¹; K_D 和 K_R 分别为土壤易矿化和缓慢矿化有机氮矿化速率常数,mg·kg⁻¹·d⁻¹;其余符号意义同式(1)和(3)。

1.5 数据统计与分析

采用 SigmaPlot 10.0 软件作图并利用其非线性拟合程序对土壤有机氮矿化过程进行模型拟合。利用 SPSS 16.0 软件分析土壤累积矿化氮与理化性质间的相关性及土壤有机氮组份和有机氮矿化模型参数间的相关性,并基于 SPSS 16.0 软件的通径分析程序计算决定系数和决策系数以量化土壤有机氮组份对模型拟合的土壤可矿化有机氮库的影响。土壤累积矿化氮和有机氮组份含量的表达形式为“平均值±标准误”。

2 结果与分析

2.1 土壤累积矿化氮变化动态及其与理化性质间的相关性

土壤累积矿化氮-培养时间曲线显示(图 1),供试土壤有机氮矿化过程基本相同,累积矿化氮量均随培养时间的延长而逐渐增加,至培养结束时达到最大值;各土壤有机氮矿化曲线均在培养前期较陡,随着平衡状态接近,曲线逐步趋于平缓,表明随着培养时间的延长,单位时间内有机氮矿化的数量将逐渐减少。在培养前期,虽然不同土壤间累积矿化氮量的差异较小,但各土壤均表现出较强的矿化能力,培养 14 天后各土壤累积矿化氮量占培养 112 天累积矿化氮量的比例即高达 43.7%~54.7%。从不同发育类型水稻土累积矿化氮的差异动态变化来看,其数值总体表现为潜育性水稻土>潜育性水稻土>淹育性水稻土的特征,不同培养时段内,潜育性水稻土土样累积矿化氮均值较淹育性水稻土和潜育性水稻土土样均值分别提高 58.9%~68.5%和 14.6%~32.7%,而潜育性水稻土土样均值则又较淹育性水稻土土样均值提高 24.9%~41.0%。

对土壤累积矿化氮与理化性质进行相关分析(表 2),结果显示,不同培养时期测定的土壤累积矿化氮均与土壤有机碳和全氮含量具有极显著正相关关系($r=0.863\sim 0.944, P<0.01$),却与黏粒含量、pH

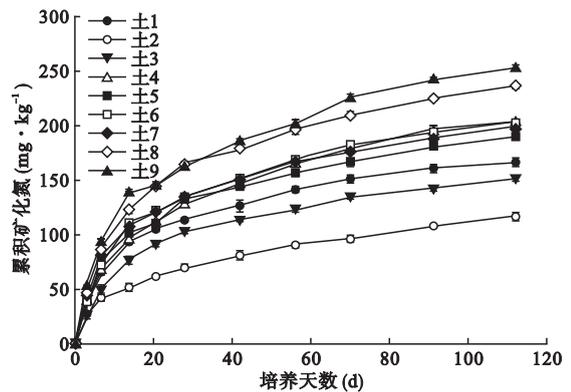


图 1 土壤累积矿化氮-时间动态曲线

Fig.1 Accumulation curves of soil organic nitrogen mineralization

值和碳氮比始终无显著相关关系($P>0.05$)。

2.2 土壤有机氮组份含量

利用 Bremner 酸水解法将土壤有机氮划分为酸解氨基酸氮、氨基糖氮、氨态氮、未知氮、酸未解氮 5 种化学形态。表 3 显示,即使土壤理化性质存在较大差异,各试验土壤均以酸解氮构成土壤氮素的主体,不同土壤酸解氮含量变幅 838.9~2276.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占土壤全氮的比例介于 66.3%~83.1%,而酸未解氮占土壤全氮的比例均值仅达 23.3%。淹育性、潜育性、潜育性水稻土酸解氮含量变化范围分别为 838.9~1215.6、1509.2~1759.2、1684.0~2276.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表现为潜育性水稻土>潜育性水稻土>淹育性水稻土。土壤酸解氮由酸解氨基酸氮、氨基糖氮、氨态氮、未知氮等组分组成,如表 3 显示,各土样酸解氮中氨基酸氮含量最高,氨基糖氮含量最少,氨态氮和未知氮含量介于其间。

2.3 有机氮矿化模型拟合

运用有效积温、双曲线、One-pool 和 Two-pool 指数模型对试验各土样有机氮矿化曲线进行拟合,结果见图 2。可以看出,对于各水稻土而言,有效积温模型对培养初期和后期土壤有机氮矿化的拟合值均高于实测值,但对培养中期土壤有机氮矿化的拟合

表 2 土壤累积矿化氮与理化性质间的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson coefficients between cumulative soil mineralized nitrogen and physicochemical properties

土壤理化性质	土壤累积矿化氮(N_{\min})									
	$N_{\min-3}$	$N_{\min-7}$	$N_{\min-14}$	$N_{\min-21}$	$N_{\min-28}$	$N_{\min-42}$	$N_{\min-56}$	$N_{\min-70}$	$N_{\min-91}$	$N_{\min-112}$
有机碳	0.893**	0.934***	0.912***	0.910***	0.900***	0.924***	0.924***	0.917***	0.920***	0.927***
全氮	0.863**	0.939***	0.944***	0.929***	0.915***	0.933***	0.937***	0.925***	0.923***	0.928***
pH	0.229	0.189	0.269	0.313	0.328	0.316	0.270	0.326	0.304	0.321
黏粒含量	0.469	0.534	0.631	0.663	0.619	0.599	0.589	0.588	0.550	0.566
碳氮比	-0.080	-0.269	-0.373	-0.329	-0.309	-0.281	-0.293	-0.270	-0.243	-0.231

表3 土壤各有机氮组分含量

Table 3 Contents of organic nitrogen components in different tested soils

土号	酸解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)					酸未解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	氨基酸氮	氨基糖氮	氨态氮	未知氮	总和	
土1	599.0±17.4	116.5±15.2	266.0±14.6	234.1±35.1	1215.6±61.4	374.4±61.4
土2	400.0±18.0	94.0±8.2	221.9±24.8	123.1±39.8	838.9±64.1	211.1±64.1
土3	405.4±16.5	61.0±3.9	253.9±8.9	179.3±15.3	899.7±24.6	430.3±24.6
土4	735.4±17.4	117.7±6.9	360.9±7.7	404.2±5.0	1618.2±23.2	341.8±23.2
土5	748.8±28.2	80.4±12.5	356.7±15.6	323.3±37.7	1509.2±50.1	450.9±50.1
土6	703.1±23.6	153.7±23.5	512.3±18.9	390.1±35.3	1759.2±43.2	760.6±43.2
土7	726.6±5.2	170.2±4.8	408.9±7.1	378.3±7.3	1684.0±18.9	856.0±18.9
土8	983.8±8.6	112.0±8.9	458.3±11.2	385.9±4.8	1940.0±13.1	560.0±53.1
土9	1180.9±35.6	150.7±26.0	611.2±26.3	334.1±43.1	2276.9±75.7	463.4±75.7

值又低于实测值;双曲线和 One-pool 指数模型的拟合值在培养初期和后期均低于实测值,在培养中期却又高于实测值,尤以 One-pool 指数模型表现更为明显;而 Two-pool 指数模型的拟合值基本上同实测值吻合。

均方根误差 ($RMSE$) 和拟合决定系数 (R^2) 均是表征模型拟合精度的参数, R^2 值越高、 $RMSE$ 值越低则表明模型的拟合精度越高。如表4显示,有效积温、双曲线、One-pool 和 Two-pool 指数模型均可对土壤有机氮矿化进行有效模拟,模拟精度(以 R^2 值大小表示)均达到 $P < 0.001$ 显著水平。4个模型中,One-pool 指数模型对所有土样有机氮矿化拟合均获得最低的 R^2 值和最高的 $RMSE$ 值,而 Two-pool 指数模型所获 R^2 值最高,同时 $RMSE$ 值最低,说明该 Two-pool 指数模型对供试水稻土有机氮矿化过程拟合效果最佳。

土壤有机氮矿化特性及其所反映的供氮能力差异性也可通过矿化模型拟合参数来体现,表5所示为供试土壤培养112天累积矿化氮 ($N_{\text{min-112}}$) 及各模型的拟合矿化参数结果。双曲线和 One-pool 指数模型参数的物理意义完全相同,但其在同一土样上

表现出的取值却有明显差异,即:同一土样有机氮矿化拟合获得的 $N_{\text{O(H)}}$ 值均高于 $N_{\text{O(E)}}$ 值;相反,同一土样有机氮矿化拟合获得的 $K_{\text{O(H)}}$ 值均小于 $K_{\text{O(E)}}$ 值,这是模型收敛的标志。与各土样 $N_{\text{min-112}}$ 值相比较, $N_{\text{O(E)}}$ 值降低了 7.1% ~ 10.6%,而 $N_{\text{O(H)}}$ 值却提高了 7.9% ~ 11.9%,这显示双曲线模型参数较 One-pool 指数模型参数可更好地反映土壤有机氮矿化的实际。Two-pool 指数模型所拟合的土壤总有机氮矿化势取值由 N_D 和 N_R 加和计算而成,其取值为 137.8 ~ 307.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均高于相同土壤的 $N_{\text{O(H)}}$ 取值,Two-pool 指数模型可同时获得土壤总有机氮、易矿化和缓慢矿化有机氮库的矿化势,更有利于反映土壤有机氮矿化的特性。表5显示,相较于表征土壤有机氮矿化势(或矿化强度)的参数取值,不同土壤间拟合获得的有机氮矿化速率常数(或矿化速率)取值变异系数总体上明显降低,说明即使供试土壤理化性质存在明显差异,有机氮矿化速率常数亦难以真实反映不同土壤间有机氮矿化特性的差异。

2.4 矿化模型参数与土壤有机氮组分相关性

将各模型参数与土壤有机氮组分进行相关性分析,结果见表6。表征土壤有机氮矿化速率(或常

表4 土壤有机氮矿化模型拟合效果指数

Table 4 Evaluation indices of model fitting for soil organic nitrogen mineralization

土号	有效积温模型		双曲线模型		One-pool 指数模型		Two-pool 指数模型	
	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2
土1	6.98	0.983***	4.59	0.992***	9.23	0.970***	1.37	0.999***
土2	1.51	0.998***	5.62	0.972***	8.03	0.949***	1.29	0.999***
土3	7.45	0.977***	3.12	0.996***	6.69	0.982***	1.15	0.999***
土4	6.01	0.991***	5.97	0.991***	11.07	0.969***	1.53	0.999***
土5	8.93	0.978***	6.11	0.989***	10.77	0.969***	3.54	0.997***
土6	8.85	0.982***	5.93	0.991***	11.08	0.972***	2.43	0.999***
土7	7.91	0.984***	6.16	0.989***	11.64	0.966***	1.69	0.999***
土8	9.42	0.984***	6.06	0.993***	12.40	0.973***	2.08	0.999***
土9	8.38	0.989***	10.56	0.981***	16.95	0.955***	3.78	0.998***

***表示 $P < 0.001$ 显著水平,下同。

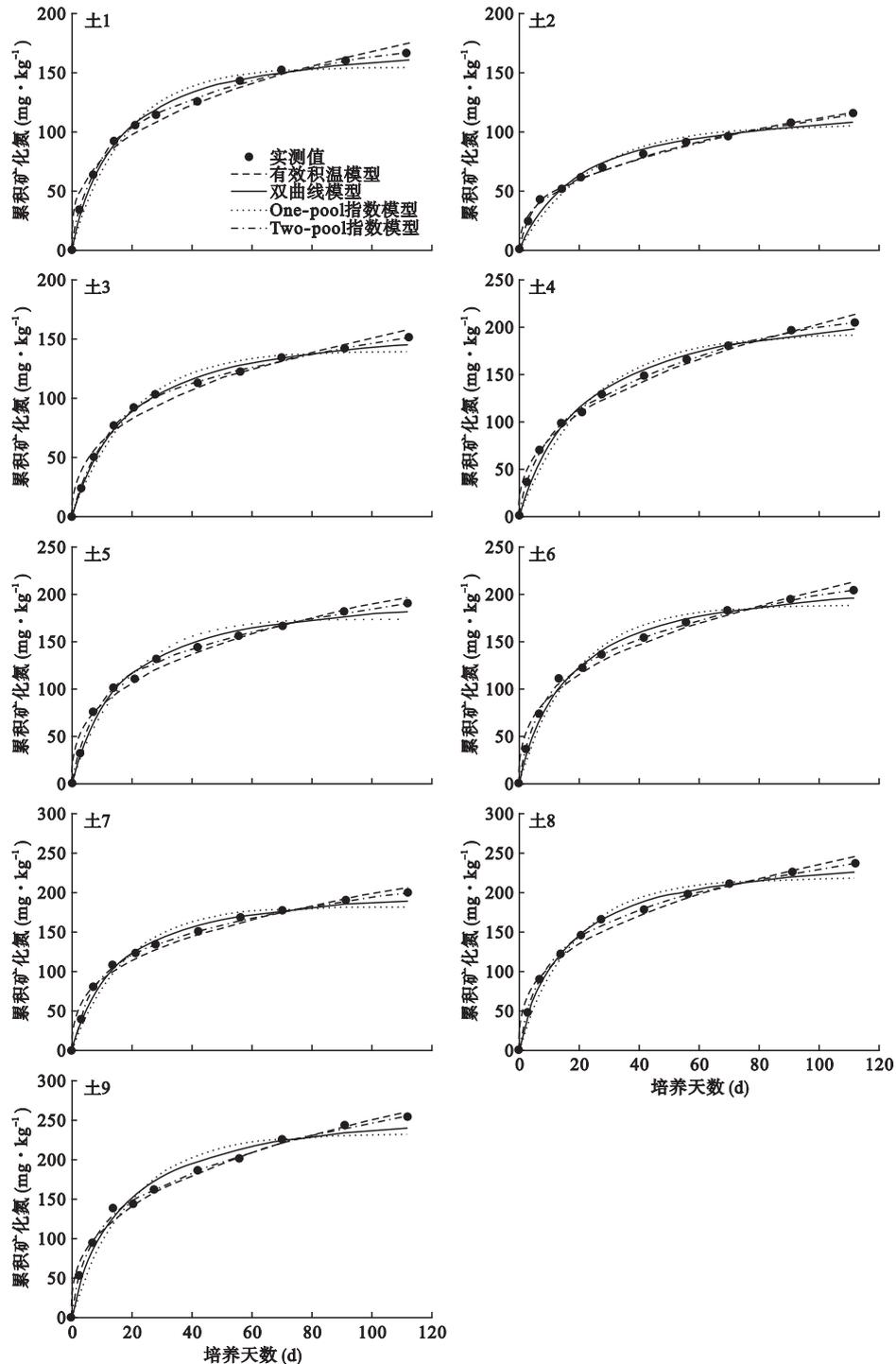


图2 各试验土样有机氮矿化过程的模型拟合比较

Fig.2 Comparisons of models fitted organic nitrogen mineralization process for every tested soil

数)的各模型参数与所有有机氮组分均不具显著相关性($P>0.05$),且无统一的正或负相关关系。相较于模型矿化速率(或常数)参数,各矿化模型中表征土壤有机氮矿化强度或矿化势的参数(K 、 $N_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)}$ 、 N_D 、 N_R)则与各有机氮组分具有更优的相关关系。表6显示,酸未解氮和氨基糖氮亦均与 K 、

$N_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)}$ 、 N_D 、 N_R 无显著正相关关系($r=0.287\sim 0.591$, $P>0.05$),酸解未知氮仅与 N_R 的相关性不显著;而氨基酸氮和氨态氮均与 K 、 $N_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)}$ 、 N_D 、 N_R 具显著相关性($P<0.05$),且氨基酸氮与这些模型参数间具有相对更优的相关性。各动力学模型中由模型固有参数组合表征的土壤可矿化氮初始矿化速

表5 培养112天土壤累积矿化氮和有机氮矿化模型参数拟合结果

Table 5 Results of cumulative mineralized nitrogen for incubation 112 days and mineralization model parameters

土号	$N_{\min-112}$	K	n	$N_{O(H)}$	$K_{O(H)}$	$N_{O(E)}$	$K_{O(E)}$	N_D	K_D	N_R	K_R
土1	165.5	13.6	0.342	181.2	0.047	153.7	0.057	75.7	0.169	110.2	0.016
土2	118.6	6.5	0.387	128.0	0.033	106.0	0.042	36.4	0.298	101.4	0.013
土3	150.2	9.7	0.375	168.1	0.039	139.4	0.050	84.8	0.103	125.8	0.007
土4	202.9	13.6	0.369	225.6	0.039	188.4	0.050	88.3	0.155	151.6	0.013
土5	188.6	14.2	0.353	205.9	0.044	173.6	0.055	90.1	0.151	132.2	0.012
土6	202.5	14.3	0.363	224.5	0.041	188.2	0.052	91.7	0.151	144.6	0.013
土7	198.3	15.9	0.344	214.2	0.047	181.7	0.056	91.2	0.171	137.7	0.013
土8	235.3	18.1	0.351	257.9	0.044	217.5	0.054	107.1	0.157	159.3	0.015
土9	252.1	18.0	0.360	275.5	0.042	232.2	0.051	106.2	0.192	201.4	0.012
变异系数	21.6	27.0	4.1	21.6	10.6	22.0	8.7	24.4	30.8	21.0	2.0

率参数($N_{O(H)} \times K_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)} \times K_{O(E)}$ 、 $N_D \times K_D$ 、 $N_R \times K_R$)亦均与氨基酸氮和氨态氮具极显著相关关系($P < 0.01$),但其与氨基酸氮间的相关性明显高于其与氨态氮间的相关性($P < 0.05$)。

酸解氮中,氨基酸氮、氨态氮和未知氮与模型中表征土壤有机氮矿化强度或矿化势的参数几乎均具有显著的正相关关系,在此基础上,基于通径分析程序的决定系数和决策系数进一步分析这些有机氮组分对模型拟合可矿化有机氮库的综合影响。在通径分析前,先对模型拟合可矿化有机氮库参数进行正态分布检验。本研究采用适合于小样本的 Shapiro-Wilk Test 方法进行正态性检验。检验结果表明,模型拟合参数 K 、 $N_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)}$ 和 N_R 的 Shapiro-Wilk 统计量对应的显著水平 (Sig.) 分别为 0.299、0.951、0.922 和 0.657,其值均大于 0.05,而 N_D 的 Shapiro-

Wilk 统计量对应的显著水平 (Sig.) 则为 0.024,这显示 K 、 $N_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)}$ 和 N_R 值服从正态分布,可对其与土壤有机氮组分间的关系进行通径分析。决定系数是通径分析中自变量对因变量的直接通径系数的平方,表示各自变量对因变量的直接影响程度(胡淑娟等,2017)。表7显示,与氨态氮和未知氮比较,氨基酸氮对 K 、 $N_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)}$ 和 N_R 的决定系数总体上有极明显的提高。从决策系数取值及其变化来看,氨基酸氮对 K 、 $N_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)}$ 和 N_R 的决策系数始终为正值且数值最大,表明氨基酸氮对这些模型参数所表征的土壤有机氮库矿化容量均有促进作用,且为主要决策因素。与氨基酸氮比较,铵态氮对 N_R 决策系数略有降低,但却对 K 值产生一定的限制作用,未知氮亦对 N_R 值产生限制作用。

3 讨论

3.1 土壤有机氮矿化及其模型拟合

淹水培养-间歇淋洗是研究土壤有机氮矿化的重要方法,该法可较好地模拟淹水土壤水分状况,且无需考虑土壤培养过程中通气及严格的水分条件控制,故经改进后已成为测定水稻土有机氮矿化的可靠方法(彭银燕等,2012;秦子娴等,2013)。土壤有机氮矿化是不同性质(数量、活性等)的有机氮库在微生物作用下转化为无机氮库的过程(Benbi *et al.*, 2002),本研究供试土壤有机氮在培养前期和中后期两阶段表现出截然不同的矿化强度特征,这应与土壤有机氮矿化底物有效性和微生物特性的综合影响有关(Dou *et al.*, 1996);在培养初期,土壤淹水促使其中“发酵性微生物”快速繁殖而迅速分解土壤原有易分解有机氮库和土壤风干过程中死亡的微生物残体,进而致使土壤有机氮表现出较高的矿化强度(Inubushi *et al.*, 1985);随着培养时间的不断延长

表6 土壤有机氮组分与矿化模型拟合参数间的 Pearson 相关系数

Table 6 Pearson coefficients between soil organic nitrogen components and mineralization model parameters

模型参数	有机氮组份				
	氨基酸氮	氨基糖氮	氨态氮	未知氮	酸未解氮
K	0.902***	0.591	0.811**	0.819**	0.561
n	-0.466	-0.443	-0.322	-0.528	-0.544
$N_{O(H)}$	0.947***	0.548	0.908***	0.836**	0.457
$K_{O(H)}$	0.429	0.405	0.310	0.507	0.580
$N_{O(E)}$	0.950***	0.558	0.906***	0.837**	0.467
$K_{O(E)}$	0.374	0.307	0.275	0.540	0.565
N_D	0.776*	0.353	0.755*	0.780*	0.558
K_D	-0.128	0.108	-0.173	-0.428	-0.406
N_R	0.912***	0.473	0.906***	0.641	0.287
K_R	0.313	0.457	0.145	0.321	0.057
$N_{O(H)} \times K_{O(H)}$	0.907***	0.582	0.831**	0.825**	0.568
$N_{O(E)} \times K_{O(E)}$	0.901***	0.566	0.834**	0.851**	0.561
$N_D \times K_D$	0.966***	0.681*	0.875**	0.653	0.357
$N_R \times K_R$	0.911***	0.650	0.797*	0.730*	0.278

*, ** 分别表示 $P < 0.05$, 0.01 显著水平。

表 7 土壤有机氮组分与土壤有机氮矿化强度和矿化势模型参数间的决定系数和决策系数

Table 7 Coefficients of determination and decision coefficients between soil organic nitrogen components and models fitted organic nitrogen mineralization intensity and potential

有机氮组份	决定系数				决策系数			
	K	$N_{O(H)}$	$N_{O(E)}$	N_R	K	$N_{O(H)}$	$N_{O(E)}$	N_R
氨基酸氮	0.578	0.353	0.378	0.279	0.796	0.772	0.790	0.684
铵态氮	0.025	0.024	0.017	0.254	-0.282	0.256	0.222	0.659
未知氮	0.167	0.097	0.099	0.008	0.505	0.424	0.428	-0.126

和易矿化有机氮库的耗竭,由土壤原有微生物种群主导分解的难分解有机氮库则在土壤长期供氮中发挥着重要作用,土壤表现出较低且稳定的矿化强度(Paul *et al.*, 1989)。本研究显示,洞庭湖区不同亚类水稻土有机氮矿化供氮量总体上以潜育性水稻土、潜育性水稻土、淹育性水稻土的次序依次降低,该差异应与试验土壤理化性质差异具密切关系。一般认为,当外界环境条件较一致时,不同土壤间矿化氮量差异主要受土壤理化特性的影响(Sahrawat, 2010; Kader *et al.*, 2013)。统计分析结果表明(表 2),试验土壤不同培养期累积矿化氮量均与土壤有机碳、全氮含量呈极显著正相关关系,表明有机碳和全氮含量是控制试验土壤有机氮矿化的重要土壤特性因子。

为了更深入地揭示土壤氮素内循环特征,大量的室内培养结果被用于建立氮素矿化模型。运用矿化模型对土壤矿化氮进行模拟的意义,不仅仅在于揭示土壤氮素矿化过程,还在于从模型的角度去评价土壤供氮能力进而指导农业生产中氮素养分管理(Wang *et al.*, 2004)。虽然当前用于拟合土壤有机氮素矿化过程的模型类别多样,且无统一分类标准,但常用的还是功能模型(杨路华等, 2003)。这其中,基于土壤氮素矿化势参数拟合的模型由于原理清晰,模型简单,易于应用而受到更多关注(杨路华等, 2003)。本研究从模型拟合值与实测值差异、拟合精度以及模型参数取值三方面的评价结果显示,有效积温、双曲线、One-pool 和 Two-pool 指数模型均可用来模拟试验土壤有机氮矿化,但前 3 个模型对土壤有机氮矿化的模拟均存在高估或低估某一时段矿化氮的问题,降低了模型的精度。有效积温模型属经验模型,其应用的前提是设定了土壤培养的基点温度,但考虑到田间条件下土壤温度变化的复杂性,无法运用该模型反映培养温度低于基点温度时的土壤有机氮矿化特征,这限制该模型的广泛应用。相对于有效积温模型,动力学模型的参数在描述土壤有机氮矿化特征时更具实际意义(Benbi *et al.*,

2002; Li *et al.*, 2003), 双曲线和 One-pool 指数模型具有类似且可直接比较的模型参数,二者对土壤有机氮矿化拟合的动态变化趋势也高度一致,但 One-pool 指数模型拟合所得土壤氮素矿化势参数值低于土壤培养结束时实测有机氮累积矿化量值,这与土壤氮矿化理论所描述的土壤氮素矿化势是土壤的供氮容量指标,反映可矿化氮供应潜力(秦子娴等, 2013),其值应大于实测的矿化氮的情形不符,暴露了该模型拟合土壤有机氮矿化过程的另一缺陷(Benbi *et al.*, 2002),因而,利用双曲线模型模拟试验土壤有机氮矿化较 One-pool 指数模型有更大的实用性。

本研究中,Two-pool 指数模型对所有试验土壤有机氮矿化过程具有最优的拟合结果,这与先前一些研究的结果类似(Wang *et al.*, 2004; 姬景红等, 2009)。Two-pool 指数模型是基于土壤总有机氮库由不同分解特性的组分组成的原理而建立的模型,因此利用“多库”模型预测土壤有机氮矿化较“单库”模型更具优越性。Li 等(2003)研究亦发现,在 One-pool 指数模型中以 $1/N_i \sim 1/t$ 作图,实际上呈现出两段线性关系,而不是简单的线性相关,暗示培养过程中土壤有机氮的矿化来源于两个具有不同大小矿化势的有机氮库。Two-pool 指数模型将作物生育期内土壤可矿化有机氮分为易矿化氮和缓慢矿化氮,两类氮库在矿化势和速率上都有差别,易矿化氮库具有较小的矿化势和较大的矿化速率常数(表 4),在土壤培养初期氮矿化过程中发挥着重要作用,而难矿化氮库则对土壤培养中后期有机氮的矿化具有较大贡献。

3.2 基于土壤有机氮组分的土壤有机氮矿化模型参数预测

有机氮矿化模型参数往往通过拟合生物培养矿化氮数据而获得,考虑到生物培养法的时效性,这并不利于模型参数的快速获取,因而建立土壤有机质(氮)功能库与可快速测定有机组分间的关联,更具实用价值(Elliott *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2004)。土

壤有机氮矿化势是表征土壤矿化供氮的重要特征参数,对其的拟合及预测在评价土壤氮素肥力和供应强度对自然和人为活动影响响应的研究方面受到高度重视(Dou *et al.*, 1996; 秦子娴等, 2013),本研究显示,利用土壤有机氮组分可更好地预测矿化模型中表征土壤有机氮矿化强度或矿化势的模型参数而非有机氮矿化速率常数,其主要原因应在于有机氮矿化势(或矿化强度)受土壤自身理化特性影响(Wang *et al.*, 2004),其代表一定数量的可矿化氮,本质上来源于不同性质的有机氮组分;相反,土壤有机氮矿化速率常数被认为是与土壤培养条件(培养温度、湿度、时长等)更具密切关系的模型参数,其数值变化受到更多非土壤特性因素的综合影响(Wang *et al.*, 2004)。事实上,考虑到不同土壤间有机氮矿化速率常数较小的变异性,早期一些研究已提出利用 One-pool 指数或多组分模型预测土壤有机氮矿化时可固定相应有机氮库的矿化速率常数取值(Stanford *et al.*, 1973; Christensen *et al.*, 1998), Wang 等(2003, 2004)进一步研究指出固定有机氮库矿化速率常数取值后并不明显影响 One-pool 和 Two-pool 指数模型对土壤有机氮矿化的拟合精度,且在土壤理化特性差异较大的情形下并未改变不同土壤间有机氮矿化势数值大小的相对顺序。本研究中,试验土壤虽属于不同的发育类型,但经历相似的生物地理气候等现代成土环境和田间管理措施,这在一定程度上易使试验土壤具有接近的有机氮矿化速率常数特征,因而固定双曲线和指数模型中有机氮矿化速率常数取值有助于提升模型预测研究区水稻土有机氮矿化的实用性。

土壤氮素主要以有机氮形式存在,其化学形态及存在状况显著影响土壤氮素的有效性(Yeasmin *et al.*, 2012)。简单相关分析揭示土壤有机氮组分与模型拟合参数间的平行关系,本研究未发现酸未解氮与任一矿化模型参数具有显著相关性($P>0.05$),这与酸未解氮主要以杂环态存在于高度缩合且稳定性较高的腐殖质组分中有直接关系(Schulter *et al.*, 1998)。土壤不同有机氮组分相互间存在一定甚至显著的相关关系,因此简单相关系数未能完全反映有机氮组分与模型所拟合土壤有机氮库矿化强度或矿化势参数间的真正关系(Lu *et al.*, 2009),而基于通径分析计算的决定系数和决策系数则可分别有效量化不同自变量对因变量的相对决定程度和综合作用(袁志发等, 2001; 解小莉等, 2013; 胡淑娟等,

2017)。本研究,通径分析中决定系数和决策系数所反映的量化结果表明,氨基酸氮是影响试验水稻土可矿化有机氮容量变化的主要决策变量,适宜作为预测研究区双季稻轮作水稻土不同性质有机氮库可矿化容量的可靠有机氮组分。

土壤酸解氨基酸在土壤氮素供应和稳定不同生态系统土壤生产力上起着重要作用(李世清等, 2002)。研究显示,相对于其他有机氮组分,氨基酸氮是植物吸收态可矿化氮的主要来源(梁国庆等, 2000)。但有研究指出,土壤不同有机氮组分对可矿化氮的贡献变化与土壤培养时长关系密切,氨基酸氮固然具有较高的生物有效性,但在土壤长期培养时,酸解氨态氮、未知氮等有机氮组分亦可对土壤矿化氮有相当贡献(彭银燕等, 2012; Li *et al.*, 2014)。本研究也发现,酸解氨态氮和未知氮均对提高模型拟合参数 $N_{O(H)}$ 、 $N_{O(E)}$ 数值起到一定辅助作用(表 7)。鉴于土壤中含有较高比例的酸解氨基酸氮、氨态氮及未知氮,且不同有机氮组分可相互转化(Schulten *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2014),因此,不同研究条件下,应结合氨基酸氮及其他特定土壤有机氮组分以有效估算或预测长期培养土壤不同有机氮功能库的可矿化容量。

4 结 论

基于淹水培养的测定结果显示,洞庭湖区不同发育类型水稻土累积矿化氮在不同培养期内总体上依潜育性水稻土、潜育性水稻土、淹育性水稻土的次序而有明显降低。对土壤有机氮矿化过程的模型模拟显示,Two-pool 指数模型对试验土壤有机氮矿化的拟合效应要优于有效积温、双曲线和 One-pool 指数模型,该模型因可同时反映土壤易矿化和难矿化有机氮库的矿化特性,可更为准确地描述洞庭湖区水稻土有机氮的矿化。土壤酸解氨基酸氮、氨态氮和未知氮与矿化模型中表征土壤有机氮矿化强度或矿化势的参数关系密切,但氨基酸氮对土壤有机氮矿化容量变化起主要决策作用。

参考文献

- 陈书信, 王国兵, 阮宏华, 等. 2014. 苏北沿海不同土地利用方式土壤氮矿化季节变化特征. 生态学杂志, **33**(2): 276-282.
- 胡淑娟, 雷晓云, 邢 坤, 等. 2017. 西天山气象因子对融雪期积雪深度影响通径分析. 气象与环境科学, **40**(3): 33-37.
- 姬景红, 张玉龙, 张玉玲, 等. 2009. 灌溉方法对保护地土壤

- 有机氮矿化特性的影响. 土壤学报, **46**(5): 869-877.
- 解小莉, 袁志发. 2013. 决策系数的检验及在育种分析中的应用. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **41**(3): 111-114.
- 李世清, 李生秀, 杨正亮. 2002. 不同生态系统土壤氨基酸氮的组成及含量. 生态学报, **22**(3): 379-386.
- 李文军, 杨奇勇, 杨基峰, 等. 2017. 长期施肥下洞庭湖区水稻土氮素矿化及其温度敏感性研究. 农业机械学报, **48**(11): 261-270.
- 梁国庆, 林 葆, 林继雄, 等. 2000. 长期施肥对石灰性潮土氮素形态的影响. 植物营养与肥料学报, **6**(1): 3-10.
- 刘青雨, 任天志, 李志宏, 等. 2010. 植烟黄壤氮素矿化动态模拟研究. 植物营养与肥料学报, **16**(2): 400-406.
- 穆兴民, 樊小林. 1999. 土壤氮素矿化的生态模型研究. 应用生态学报, **10**(1): 114-118.
- 彭银燕, 黄湘运, 孙 梅. 2012. 长期施肥条件下水稻土有机氮组分及矿化特性研究. 水土保持学报, **26**(5): 173-176.
- 秦子娴, 张宇亭, 周志峰, 等. 2013. 长期施肥对中性紫色水稻土氮素矿化和硝化作用的影响. 中国农业科学, **46**(16): 3392-3400.
- 伍玉鹏, 邓婵娟, 姜炎彬, 等. 2015. 长期施肥对水稻土有机氮组分及氮素矿化特性的影响. 农业环境科学学报, **34**(10): 1958-1964.
- 杨路华, 沈荣开, 覃奇志. 2003. 土壤氮素矿化研究进展. 土壤通报, **34**(6): 569-571.
- 袁志发, 周静芋, 郭满才, 等. 2001. 决策系数-通径分析中的决策指标. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **29**(5): 131-133.
- 张玉树, 张金波, 朱同彬, 等. 2015. 不同种植年限果园土壤有机氮组分变化特征. 生态学杂志, **34**(5): 1229-1233.
- 赵 阳, 张 驰, 赵竑绯, 等. 2013. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤氮素矿化的影响. 生态学杂志, **32**(7): 1690-1697.
- Benbi DK, Richier J. 2002. A critical review of some approaches to modeling nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils*, **35**: 168-183.
- Bremner JM. 1965. Organic forms of soil nitrogen// Black CA. *Methods of Soil Analysis*. Madison Wisconsin USA: American Society of Agronomy.
- Camargo FAO, Gianello C, Tedesco MJ. 2004. Soil nitrogen availability evaluated by kinetic mineralization parameters. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, **35**: 1293-1307.
- Christensen BT, Olesen JE. 1998. Nitrogen mineralization potential of organomineral size separates from soils with annual straw incorporation. *European Journal of Soil Science*, **49**: 25-36.
- Dou ZX, Toth JD, Jabro JD, et al. 1996. Soil nitrogen mineralization during laboratory incubation: Dynamics and model fitting. *Soil Biology & Biochemistry*, **28**: 625-632.
- Elliott ET, Paustian K, Frey SD. 1996. Modelling the measurable or measuring the modellable: A hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractions// Powlson DS, Smith P, Smith JU, et al. eds. *Evaluation of Soil Organic Models Using Existing Long-term Datasets*. Berlin: Springer: 161-179.
- Gutiñas ME, Letrós MC, Trasar-Cepeda C, et al. 2012. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study. *European Journal of Soil Biology*, **48**: 73-80.
- Inubushi K, Wada H, Takai Y. 1985. Easily decomposable organic matter in paddy soil. 6. Kinetics of nitrogen mineralization in submerged soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, **31**: 563-572.
- Kader MA, Sleutel S, Begum SA, et al. 2013. Nitrogen mineralization in subtropical paddy soils in relation to mineralogy, management, pH, carbon, nitrogen and iron contents. *European Journal of Soil Science*, **64**: 47-57.
- Li HL, Han Y, Cai ZC. 2003. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu region of China under anaerobic conditions: Dynamics and model fitting. *Geoderma*, **115**: 161-175.
- Li SX, Wang ZH, Miao YF, et al. 2014. Soil organic nitrogen and its contribution to crop production. *Journal of Integrative Agriculture*, **13**: 2061-2080.
- Li WJ, Peng BF, Zhao D, et al. 2016. Assessing chemical soil tests for predicting nitrogen mineralization in paddy soils of the Dongting Lake region in China. *Journal of Soils and Sediments*, **16**: 2419-2429.
- Lu HL, Li SQ, Jin FH, et al. 2008. Effects of soluble organic N on evaluation soil N-supplying capacity. *Agricultural Sciences in China*, **7**: 860-870.
- Lu HL, Li SQ, Jin FH, et al. 2009. Contributions of organic nitrogen forms to mineralized nitrogen during incubation experiments of the soils on the Loess Plateau. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **40**: 3399-3419.
- Paul EA, Clark FE. 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. San Diego, CA: Academic Press.
- Sahrawat KL. 2010. Nitrogen mineralization in lowland rice soils: The role of organic matter quantity and quality. *Archives of Agronomy and Soil Science*, **56**: 337-353.
- Schulter HR, Schnitzer M. 1998. The chemistry of soil organic nitrogen: A review. *Biology and Fertility of Soils*, **26**: 1-5.
- Stanford G, Frere MH, Schwanninger DH. 1973. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. *Soil Science*, **115**: 321-323.
- Wang WJ, Smith CJ, Chen D. 2003. Towards a standardized procedure for determining the potentially mineralisable organic nitrogen of soil. *Biology and Fertility of Soils*, **37**: 362-374.
- Wang WJ, Smith CJ, Chen D. 2004. Predicting soil nitrogen mineralization dynamics with a modified double exponential model. *Soil Science Society of America Journal*, **68**: 1256-1265.
- Yeasmin S, Mominul Islam AKM, Aminul Islam AKM. 2012. Nitrogen fractionation and its mineralization in paddy soils: A review. *Journal of Agricultural Technology*, **8**: 775-793.

作者简介 李文军,男,1982年生,博士,副教授,主要从事农田土壤碳氮循环及其环境效应研究。E-mail: wenjunli0736@163.com
责任编辑 魏中青