

上海地区水稻土氮素矿化及其模拟*

李慧琳 韩 勇 蔡祖聪

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要 采用改进的培养方法和分析手段研究了上海地区典型水稻土淹水条件下的氮素矿化过程。结果表明矿化量为全 N 的 4.0% ~ 9.4% ($N\ 60\sim\ 241\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$)。通过偏相关分析, 矿化量只表现为与全 N 相关。矿化期间 pH 变化较大且与矿化量直线相关。选择(1)有效积温式; (2)一级反应式(One-pool 模型); (3)两部分一级反应式(Two-pool 模型); (4)带常数项的一级反应式(Special 模型), 对实验结果进行了拟合。非线性拟合表明 Two-pool 模型和 Special 模型最优, 后者体现出温度效应。通过参数分析和实际应用可能性剖析, 认为 Special 模型能对实际情况下的氮素矿化作出更为准确的描述。

关键词 氮素; 水稻土; 淹水矿化; Special 模型

中图分类号 S153.6⁺2

文献标识码 A

目前, 氮肥的大量使用引发了较为严重的环境污染问题, 如何经济合理地使用氮肥正日益受到人们的关注。对此, 了解氮素在土壤-作物体系中循环、转化的复杂过程, 明确氮素的损失机制, 以便采取相应的防治措施是十分必要的。在这些过程中, 首先需要研究的是氮素的矿化过程。因为矿化为作物提供了可利用的氮, 是氮循环过程中最基础的一步。对于氮素的矿化, 国外学者在此方面研究较早, 1972 年建立了描述矿化过程的 One-pool 模型^[1]。随后学者们相继提出了以此为理论基础的 Two-pool 模型^[2]和 Special 模型^[3]。近 30 年来, 对数模型^[4]、抛物线模型^[5]以及双曲线模型^[6]等广泛地运用于不同的氮素矿化模拟中。但这些矿化模型只适用于旱地土壤, 而在我国, 水稻土占耕地面积的 25%, 在淹水条件下的氮素矿化研究应该是相当重要的。但过去的氮素矿化研究所采用的表达式仅限于有效积温式^[7, 8], 这个方程并没有得到国外学者的一致认同。目前的一些研究已经表明, 在研究土壤氮素矿化的淹水培养试验和分析方法中, 大多忽视了硝化和反硝化作用, 因此运用有效积温式并

不一定能真实地反映矿化过程及其特征。本研究目的在于用改进的培养方法和分析手段研究太湖流域上海地区典型水稻土氮素的淹水矿化过程及其特征, 并建立适宜的矿化模型。

1 材料与方法

1.1 土壤样品

供试土壤于 2000 年 4 月采自上海地区六种典型水稻田, 均为 0~15 cm 表层土。土样的采集、分类和基本理化性状见表 1。根据研究的需要, 还分析了有机-无机复合体、微生物 C、微生物 N 的含量。试验前将土风干, 去除动、植物残体和石块等, 磨细过 2 mm 筛备用。

1.2 分析方法

pH 采用玻璃电极测定(KCl 溶液提取, $W_{\text{土}}: W_{\text{液}} = 1: 2.5$); 有机质和全氮测定采用元素分析仪(PERKIN ELMER, Series II, CHNS/O analyzer, 2400, USA); CEC 用乙酸铵法; 有机-无机复合体用相对密度分组法; 微生物 C 和微生物 N 用氯仿熏蒸浸提法, 操作方法按文献[9]。

* 国家重点基础研究发展规划项目“土壤质量演变规律与持续利用”项目(G1990011811)资助

作者简介: 李慧琳(1976-), 女, 博士, 从事氮素在土壤-作物体系内循环过程机理和建模研究。E-mail: lihuilin@issas.ac.cn

收稿日期: 2003-05-04; 收到修改稿日期: 2003-10-22

表 1 供试土样的基本理化性质

Table 1 Chemical and physical properties of the paddy soils (0~ 15 cm) investigated

编号 Soil code	土壤类型 Soil type	有机质 O. M. (g kg ⁻¹)	全 N Total N(g kg ⁻¹)	CEC (cmol _c (100g) ⁻¹)
P	底潜筒育水耕人为土(壤质) ^①	25.8	1.60	14.2
S	普通潜育水耕人为土(粘质) ^②	46.0	2.60	15.4
B	普通筒育水耕人为土(砂壤质,石灰性) ^③	26.3	1.40	15.3
J	底潜筒育水耕人为土(砂壤质,石灰性) ^④	27.3	1.60	15.5
N	普通潜育水耕人为土(粘壤质) ^⑤	23.2	1.40	13.5
F	普通筒育水耕人为土(壤质) ^⑥	23.0	1.50	17.0

编号 Soil code	土壤类型 Soil type	微生物 N Microbial N (g kg ⁻¹)	重组全 N Heavy-fraction N(g kg ⁻¹)	pH
P	底潜筒育水耕人为土(壤质) ^①	0.001	1.40	5.88
S	普通潜育水耕人为土(粘质) ^②	0.022	2.50	4.95
B	普通筒育水耕人为土(砂壤质,石灰性) ^③	0.005	1.20	7.28
J	底潜筒育水耕人为土(砂壤质,石灰性) ^④	0.005	1.20	6.53
N	普通潜育水耕人为土(粘壤质) ^⑤	0.001	1.20	6.01
F	普通筒育水耕人为土(壤质) ^⑥	0.003	1.30	6.31

① Endogleyic Hapli-Stagnic Anthrosol (bam); ② Typic Gley+Stagnic Anthrosol (Clay); ③ Typic Hapli-Stagnic Anthrosol (Calcareous sandy loam); ④ Hapli-Stagnic Anthrosol (Calcareous sandy loam); ⑤ Typic Hapli-Stagnic Anthrosol (Clay loam); ⑥ Typic Hapli-Stagnic Anthrosol (Loam)

1.3 培养试验

采用淹水密闭恒温培养法。称取风干土样 10.000 g, 每种土样称 13 份, 分别放于洁净且不漏气的 12.5 mm × 55 mm 真空瓶中, 加入 10 ml 蒸馏水, 使土层完全浸湿, 盖紧瓶塞, 避免漏气, 防止硝化和反硝化过程的发生。将样品分别置于 35 °C 和 25 °C 恒温箱内培养, 在第 0、1、3、5、7、9、14、28、42、56、70、103、120 天随机取样, 加入 20 ml 1.5 mol L⁻¹ 的 KCl 溶液提取, 振荡 1h, 过滤, 吸取滤液 2~3 ml 于氮素连续流动分析仪中 (San system, Skalar, Netherlands), 测定 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N, 3 次重复。培养期间的 pH 用玻璃电极在第 0、7、14、28、56、103 和 120 天测定。

1.4 模型

矿化就其本质而言, 是土壤中的有机物在微生物活动下分解为无机物的过程, 而微生物分解活动是由酶动力学性质决定的, 遵循一级反应模式, 因此用指数模型来描述矿化具备基本的理论基础。本研究主要运用与动力学一级反应方程式有关的模型, 同时运用有效积温式进行比较。

(1) 有效积温式:

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

Y: 累积矿化氮量 (mg kg⁻¹); T₀: 15 °C; T: 培养温度 (°C); D: 培养时间 (d); k 和 n: 矿化常数。

(2) One-pool 模型:

$$N_t = N_0(1 - e^{-k_0 t}) \quad (2)$$

N_t: 累积矿化氮量 (mg kg⁻¹); N₀: 矿化势; k₀: 一级反应速率, t: 培养时间 (d)。

(3) Two-pool 模型:

$$N_t = N_a(1 - e^{-k_a t}) + N_r(1 - e^{-k_r t}) \quad (3)$$

N_a 和 k_a: 易矿化部分的矿化势和一级反应速率; N_r 和 k_r: 缓慢矿化部分的矿化势和一级反应速率。其余符号意义同方程(2)。

(4) Special 模型:

$$N_t = N_a(1 - e^{-k_a t}) + C_r t \quad (4)$$

C_r: 缓慢矿化部分的矿化常数。其余符号意义同方程(3)。

1.5 统计分析

所有数据的分析和拟合均在 SPSS (SPSS, 10.0) 下进行, 数据用方差分析法, 模型拟合用非线性回归分析, 将累积矿化氮量和培养时间作为方程中的 Y 值和 X 值, 通过非线性回归得到其他参数; 变量之间的相关显著性用 Person 系数和 F 检验。

2 结果与讨论

2.1 矿化量与矿化速率

矿化产生的 NH₄⁺-N 占矿化量的绝大部分, 仅在

培养前和培养的第 1 天检测出少量 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 占矿质 N 的 1/3 左右。仅土样(F) 的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 占矿质 N 的 60%, 这可能与施肥、风干时间和土壤硝化速率等因

素有关。在培养 1d 之后, 该土样的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 降到 5 mg kg^{-1} , 而其它土样仅 2 mg kg^{-1} 左右, 说明淹水厌氧条件下矿化首先产生 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 。

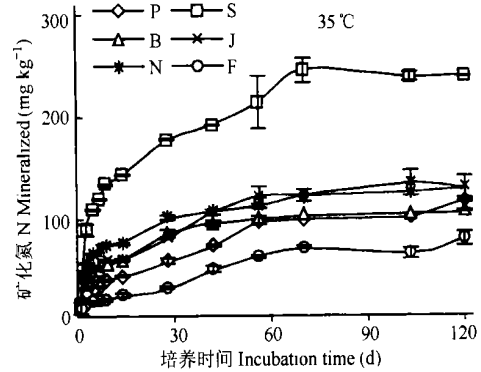
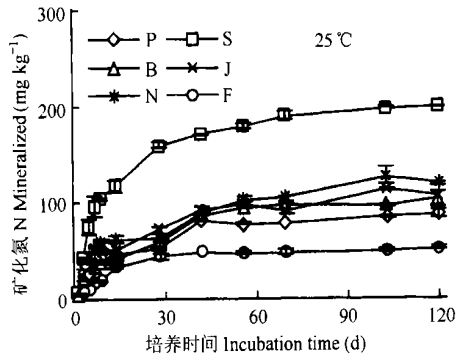


图 1 培养 120 d 的土样矿化量

Fig 1 Cumulative net N mineralization ($\text{N mg kg}^{-1} \text{ soil}$) during 120 d of incubation for six soil samples

培养期间矿化量与时间的关系见图 1。矿化量与时间的平方根 $t^{1/2}$ 成正比 ($R^2 = 0.8663^{***} \sim 0.9672^{***}$)。在 25°C 时。六个土样的矿化率为占全 N 的 $4.0\% \sim 7.7\%$, 在 35°C 时则为 $6.3\% \sim 9.4\%$ 。矿化量因土样和温度不同差别很大, 在相同温度下矿化量最大的土样(S) 可达 240 mg kg^{-1} , 而最小的土样(F) 仅 50 mg kg^{-1} 。在 25°C 和 35°C 两个温度处理之下, 同一土样的矿化量后者为前者的 1.2~ 1.6 倍。

由图 1 可知, 土样(S) 的矿化量明显高于其它五个土样, 几乎为它们的 2 倍, 这应该是土壤理化性质差异的体现。有关矿化量与土壤理化性质关系方面的报道很多, 普遍认为矿化 N 与全 N、全 C、微生物态

N 呈正相关^[10], 与 C:N 直线相关或曲线相关^[11], 与有机-无机复合体中轻、重组分中的含 N 量、含 C 量正相关^[12]。据此, 我们分析了矿化量与全 N、有机质、微生物 N、微生物 C、重组 C、重组 N、CEC 等的关系, 结果发现有显著相关的因子为全 N、有机质、微生物 N、重组 C 和重组 N (表 2), 这与许多研究结果一致。但当将全 N 作为控制因子, 作矿化量与其它因子的偏相关分析时, 均没有达到显著水准, 说明矿化量与这几个因素的相关都是由全 N 引起的。土样(S) 全 N 含量为 2.6 g kg^{-1} , 而其它样品仅为 $1.4 \sim 1.6 \text{ g kg}^{-1}$, 因此它们的矿化量会呈现出类似的差异。本实验表明矿化量与全 N 密切相关, 但却不能验证各组分含氮量对矿化的确切贡献。

表 2 土壤性质与矿化量的相关关系

Table 2 Correlation (R^2) between N mineralized during 120 days incubation and soil properties at two temperatures respectively

性质 Property	矿化量 N mineralized			
	相关系数 Correlation		偏相关系数 Partial Correlation	
	25°C	35°C	25°C	35°C
全 N Total N	0.8409*	0.9082**	0.661*	0.8464**
有机 C Organic C	0.7482*	0.8705**	0.4733	0.2756
重组 C Heavy fraction C	0.7992*	0.8538**	0.1989	0.0562
重组 N Heavy fraction N	0.7293*	0.8336*	0.002	0.0131
微生物 N Microbial N	0.7815*	0.8263*	0.1665	0.0581

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

矿化速率(k) 随培养时间呈现出两个截然不同的过程。在培养 0~ 14 d k 值直线下降, 在第 14 天时已陡然下降到一个分界值, 14 d 之后 k 值变幅缓慢或几乎无变化。对于这种现象, 很多学者认为是

风干效应所致。由于风干土样释放出大量的微生物态 N, 矿化量增大, 反应速率相应增大, 因此在进行分析和模型拟合时应将其扣除。但我们认为, 由于本工作研究的是淹水稻田的 N 矿化, 在实际生产中

稻田需要经历一个由落干到淹水的过程,忽略此部分是不符合实际的,而且也会忽略矿化初期一些少量的轻组分有机N的快速分解和矿化。为了探明风干效应的影响,我们对前14天的矿化量与微生物N量作了相关分析,二者无显著相关,初步说明并不能将前部分矿化量作为风干效应的结果。

2.2 pH变化

以往的好气实验表明pH在培养期间基本无变化,所以普遍认为厌氧下的pH也应无大的变化。在本实验中,我们在第0、7、14、28、56、103、120天测

定样品的pH值,发现其发生了很大变化,且变化趋势与矿化趋势十分类似(图2)。通过回归分析,证明二者之间呈极显著的正相关($R^2 = 0.8654^{***} \sim 0.9746^{***}$),表明在淹水培养这样一个相对封闭的环境中,pH的变化与矿化中 NH_4^+ 的释放量保持一致。

2.3 模型拟合

如表3所示,四个方程的拟合都达到了较好水平。矿化氮与有效积温或培养时间显著相关,将有效积温式与另三个指数式比较,发现后者明显好于前者。表4列出了各方程的参数和预测值。

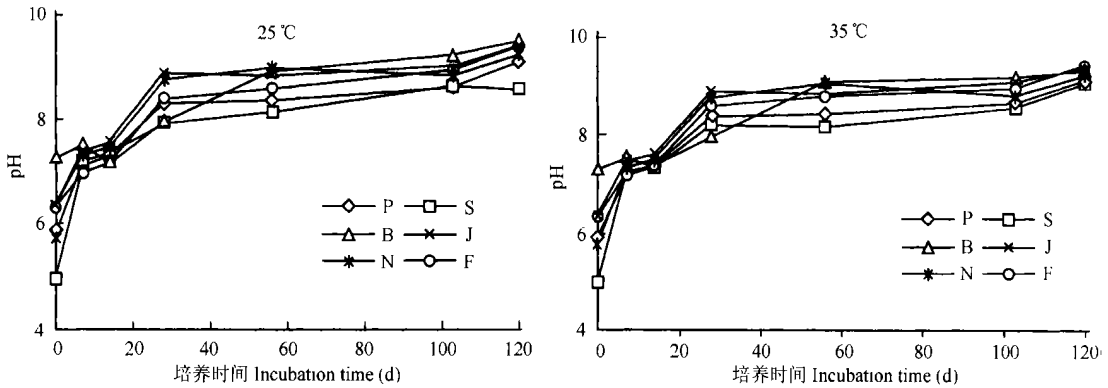


图2 培养期间pH的变化

Fig 2 Change in pH during incubation period under anaerobic conditions

表3 运用有效积温式(EATM)、One pool模型、Two-pool模型和Special模型得到的矿化氮与培养时间之间的决定系数(R^2)

Table 3 Correlation coefficients (R^2) between N mineralized and incubation days using the effective accumulated temperature model(EATM), the one pool, two-pool, and special models at two temperatures

土壤编号 Soil code	模型 Models			
	EATM	One-pool	Two-pool	Special
25 °C				
P	0.883**	0.952***	0.976***	0.964***
S	0.792*	0.976***	0.981***	0.991***
B	0.857**	0.932**	0.972***	0.938**
J	0.800*	0.927**	0.977***	0.960***
N	0.756*	0.848**	0.970***	0.961***
F	0.958***	0.888**	0.962***	0.921**
35 °C				
P	0.944**	0.903**	0.981***	0.952***
S	0.789*	0.909**	0.982***	0.962***
B	0.849**	0.926**	0.987***	0.959***
J	0.891**	0.889**	0.982***	0.939**
N	0.844**	0.889**	0.990***	0.967***
F	0.963**	0.835**	0.971***	0.922**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

表 4 运用有效积温式 (EATM)、One-pool 模型和 Special 模型对矿化动力学进行模拟得到的参数
 Table 4 Estimated parameters of the effective accumulative temperature model (EATM), the one-pool, two-pool, and special models simulating N mineralization dynamics of paddy soils at two temperatures

土壤编号 Soil code	模型参数 Model parameters																					
	120 天矿化氮 N mineralized in 120 days (mg kg ⁻¹)				One-pool				Two-pool				Special									
	EATM		N ₀ ¹⁾ (mg kg ⁻¹)		k ₀ (d ⁻¹)		N ₀ + N _i (mg kg ⁻¹)		N ₀ (mg kg ⁻¹)		k ₀ (d ⁻¹)		N _i (mg kg ⁻¹)		k _i (d ⁻¹)		N _{∞0} (mg kg ⁻¹)		k _{∞0} (d ⁻¹)		C _i (mg kg ⁻¹ d ⁻¹)	
25°C																						
P	88	3.04	0.51	83	0.06	88	20	0.37	68	0.03	65	0.09	0.20									
S	200	5.46	0.56	187	0.08	205	111	0.16	94	0.02	156	0.11	0.40									
B	103	3.29	0.52	99	0.05	105	19	0.68	86	0.03	76	0.07	0.23									
J	109	3.24	0.54	102	0.06	114	31	0.41	83	0.03	70	0.12	0.37									
N	119	3.74	0.53	107	0.07	150	48	0.34	102	0.01	61	0.24	0.58									
F	62	3.76	0.41	58	0.05	66	15	0.64	51	0.02	34	0.14	0.26									
35°C																						
P	118	3.72	0.45	107	0.04	127	25	0.69	102	0.02	50	0.17	0.60									
S	241	10.3	0.44	222	0.10	253	105	0.36	148	0.02	162	0.19	0.78									
B	110	7.00	0.38	102	0.10	109	42	0.45	67	0.04	80	0.17	0.28									
J	132	5.80	0.43	125	0.06	143	39	0.60	104	0.02	75	0.18	0.58									
N	132	10.7	0.34	117	0.13	134	61	0.45	73	0.02	85	0.25	0.43									
F	94	8.01	0.34	83	0.05	100	22	1.05	78	0.02	36	0.37	0.52									

1) 运用 One-pool 模型得到的 N₀ 小于 N_i, N₀ < N_i in the single model

由方程的拟合系数可知,虽然 $Two\text{-}pool$ 模型最优,但它与 $Special$ 模型之间的差别非常小,由两个方程做出的矿化氮预测曲线也几乎完全一致。图3显示黄泥土(N)的实验矿化量与模型预测量。用这两个模型得到的预测量在绝大多数点上重合的,都为最佳拟合;而有效积温式低估了前9天的矿化量,高估了其后的矿化量; $One\text{-}pool$ 模型则得到相反的趋势。

$Two\text{-}pool$ 模型与 $Special$ 模型拟合程度高的现象可用土壤中含有多组分有机质的假说来解释。既然土壤有机质是由降解程度各异的多组分组成,带有多“有机质库”的模型就应该优于只有一类“有机质库”的 $One\text{-}pool$ 模型。我们发现在 $One\text{-}pool$ 模型中以 $1/N_t \sim 1/t$ 作图,实际上呈现出两段线性关系,而不是简单的线性相关,暗示有机氮的矿化是由两个具有不同 N_0 的部分组成,因此将氮素的矿化分为两个部分来模拟是比较恰当的。

不同方程的参数相差很大。在有效积温式中,

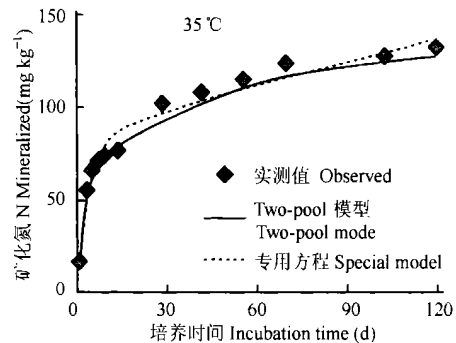
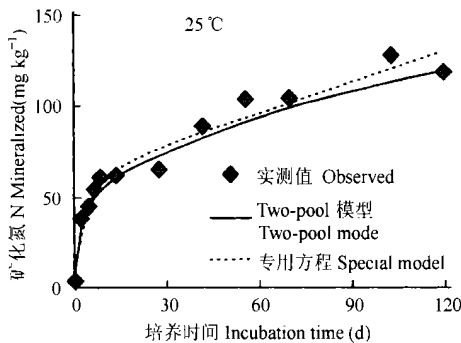


图3 运用 $Two\text{-}pool$ 和 $Special$ 模型对南汇土样(N)矿化氮的拟合

Fig. 3 Comparison of the special and the effective temperature model simulating cumulative mineralized of soil sample N

2.4 温度对矿化的影响

土壤氮素的矿化量,是土壤有机氮的含量和生物可分解性、矿化的水热条件和时间等的函数,在其中,温度被认为是影响矿化的一个主要因素。在表征温度与矿化量的关系方面,一般运用阿累尼乌斯方程(Arrhenius equation)和温度效应系数 Q_{10} 。本实验对二者都进行了验证。在使用阿累尼乌斯方程时,由于使用了 $One\text{-}pool$ 、 $Two\text{-}pool$ 和 $Special$ 模型这三个带有指数项的方程来描述矿化动力学过程,由此得到的 Arrhenius 方程的 E_a 也有较大差别。当用 $One\text{-}pool$ 模型时,土样(P)、(J)、(F)在 35°C 时的 k_0 值小于其在 25°C 时的值,与使用 Arrhenius 方程的理论前提相悖,同样的问题也在使用 $Two\text{-}pool$ 模型时出现,特别是描述缓慢矿化部分时,Arrhenius 方程几

k 值代表矿化强度。各土样间 k 值变异大,且不同温度处理之间也有较大差异。同时,相关分析表明 25°C 时 k 值与矿化氮显著相关, $R^2 = 0.700^*$,而在 35°C 时无此结果。六个土样的 n 值变化不大, $n(25^\circ\text{C}) = 0.5146 \pm 0.0455$, $n(35^\circ\text{C}) = 0.4079 \pm 0.0404$, 仅从参数来看,我们认为有效积温式不易直接反映矿化的本质。在 $One\text{-}pool$ 模型中有 N_0 和 k 两个参数,理论上 N_0 应该大于实验测定的 N_t 值,但实际上 N_0 仅为 N_t 的 $89\% \sim 96\%$, 暴露了这个模型另一方面的局限性。对 $Two\text{-}pool$ 模型而言,它的优越性早已得到肯定^[13]。但在我们的实验中, N_0 ($N_a + N_r$) 仅为 N_t 的 $1.1 \sim 1.3$ 倍,或者与之相等;同时,土样(S)在 25°C 时的 N_a (119 mg kg^{-1}) 大于 N_r (94 mg kg^{-1}), 这与一般结果是相悖的。对 $Special$ 模型而言,参数 C_r 代表了缓慢矿化部分的矿化量与时间呈直线相关而不是指数关系。从它的方程拟合相关系数和参数来看,它同 $Two\text{-}pool$ 模型一样对数据得到了更好的模拟。

乎没有任何意义。只有当用 $Special$ 模型得到的 E_a 值具有普遍意义,并可由此得出六个土样的 Arrhenius 方程: $k_a = 2.15 \times 10^9 \exp(-4.43 \times 10^4 / RT)$ 。式中, k_a 为易矿化部分的反应速率, R 为摩尔气体常数,其值为 8.314 , T 为绝对温度。 Q_{10} 的运用也有类似的结果。一般认为 Q_{10} 等于 $2^{[1]}$,但也有学者认为 Q_{10} 可以等于或小于 $1^{[14]}$,只是缺乏具体的数值。不过这些 Q_{10} 值都是运用 $One\text{-}pool$ 模型得到的。在本研究中当使用 $One\text{-}pool$ 模型和 $Two\text{-}pool$ 模型时, Q_{10} 值都低于以前文献中所报道的为 $1.3 \sim 1.5$,而且不同土样和模型之间 Q_{10} 的差别还比较大,无规律可循。当使用 $Special$ 模型时 Q_{10} 为 1.9 ,与以往的结果比较一致。

Arrhenius 方程不能恰如其分地表达温度与矿化

速率之间的关系说明了对矿化起决定因素的微生物的活动很复杂,不能一概而论。当涉及到具体的土壤矿化与温度关系时,需设三个以上的温度处理才有可能对此有明确的结论。另外,因为 Arrhenius 方程中的 k 值是根据动力学方程计算而来,不同的方程有不同的结果,这在本实验中已经得到体现,其中运用 Special 模型来讨论温度效应是以前没有报道过的,而且运用这个方程得到了唯一有意义的 Arrhenius 方程。文章的结果与讨论的第一部分曾提到同一土样在 35℃ 时的矿化量为 25℃ 时的 1.1~1.6 倍,但 Q_{10} 即两个温度下的反应速率之比却没有与之相符,除了使用 Special 模型得到的 Q_{10} 普遍大于矿化量的增长倍数。Special 模型表现出比较明确的物理意义,即矿化量与时间呈指数关系的快速矿化部分,一旦温度升高,反应速率加快的幅度将大于矿化总量的增加,从而使得缓慢矿化部分起了一个缓冲作用。所以,在有关温度效应的研究时,需同时考虑温度范围和动力学方程。

3 结 论

由于前人在淹水厌氧培养中都只是运用有效积温式进行描述,对此,我们从理论和实际情况来比较有效积温式和 Special 模型。首先,有效积温式的概念建立在土壤氮的释放量主要受土壤温度影响的基础之上,它所反映的是 15℃ 以上有效积温与矿化的关系,似乎难以体现土壤矿化的一些本质特征;而 Special 模型直观地给出了土壤中不同性质的两类有机物在微生物活动下的矿化过程和特征。其次,模型拟合表明 Special 模型对土样的拟合程度普遍高于有效积温式。从矿化特征来看,有效积温式中的 k 值仅与 25℃ 下的全 N 相关,而 Special 模型中的 C_r 、 N_a 与矿化量、全 N、有机质、微生物 N 均有不同程度的相关性,尤其 C_r 值与矿化量达极显著相关 ($R^2 = 0.999$),说明运用 Special 模型能较好地预测矿化量。最后,从模型的实际运用而言,由于田间温度不可能保持恒定,运用有效积温式时需要记载每天的温度;而运用 Special 模型可利用淹水培养实验确定方程中的三个参数,再结合实际淹水时间就可较为准确地预测田间条件下的矿化氮量。

本实验的目的是通过实验室模拟淹水条件下的氮素矿化,将得到的经验式运用于水旱轮作下的氮素循环模拟中的有机氮矿化子模块。在前期工作中,已通过实验和田间试验证明好气状况下太湖流

域水稻土的矿化符合 Special 模型^[15],本实验又初步证实了淹水条件下的氮矿化同样可用 Special 模型来模拟。从本次实验中得到的参数将和好气实验的参数一起应用于确定性的氮素使用指导模型,并通过田间实验加以修正。

参 考 文 献

- [1] Stanford G, Smith S L. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1972, 36: 465~470
- [2] Rasiah V. Comparison of pedotransfer functions to predict nitrogen mineralization parameters of one pool and two pool models. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26 (11/12): 1873~1884
- [3] Cabrera M L. Modeling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 63~66
- [4] Narteh L T, Sahrawat K L. Ammonium in solution of flooded west African soils. *Geoderma*, 2000, 95: 205~214
- [5] Dou Z X, John D T, Jalal D J. Soil nitrogen mineralization during laboratory incubation: Dynamics and model fitting. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, 28: 625~632
- [6] Donald R C, Mohammad B B. Nitrogen mineralization in soils from Michigan's saginaw valley and Thumb region. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29: 2355~2363
- [7] 朱兆良,蔡贵信,徐银华,等.太湖地区水稻土的氮素矿化及土壤供氮量的预测. *土壤学报*, 1984, 21(1): 29~36. Zhu Z L, Cai G X, Xu Y H, *et al.* Nitrogen mineralization and prediction of nitrogen availability of Taihu region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21(1): 29~36
- [8] 陶勤南,吴良欢,方萍.稻田土壤氮矿化速率的研究. *土壤学报*, 1993, 30(3): 237~244. Tao Q N, Wu L H, Fang P. Study on mineralization rate of nitrogen in paddy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(3): 237~244
- [9] 鲁如坤主编.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业科技出版社,2000. 24~26, 116~119, 231~233. Lu R K. ed. *Analytic Method of Soil and the Agriculture Chemistry* (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Technical Publication, 2000. 24~26, 116~119, 231~233
- [10] Janssen B H. Nitrogen mineralization in relation to C/N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil*, 1996, 181: 39~45
- [11] Sollins P, Spycher G, Glassman C A. Net nitrogen mineralization from light and heavy fraction of forest soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 1984, 16: 31~37
- [12] Richter J, Nuske A, Habenicht W. Optimized N-mineralization parameters of beess soils from incubation experiments. *Plant and Soil*, 1982, 68: 379~388
- [13] Lindemann W C, Cardenas M. Nitrogen mineralization potential and nitrogen transformations of sludge amended soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48: 1072~1077
- [14] Ireneo J M, Iwao W, Grace B M, *et al.* Nitrogen mineralization in tropical wetland rice soils. I. Relationship with temperature and soil

properties. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1996, 42(2): 229- 238

cycle in double-cropping systems in the Chinese Taihu Region. Pro-

[15] Han Y, Roeleke M, Cai Z C. A deterministic model of the nitrogen

ceedings of the 12th World Fertilizer Congress, Beijing, China, 2001

NITROGEN MINERALIZATION IN PADDY SOILS OF SHANGHAI REGION UNDER ANAEROBIC CONDITIONS: DYNAMICS AND MODEL FITTING

Li Huilin Han Yong Cai Zucong

(*State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract The processes and characteristics of nitrogen mineralization in paddy soils of the Shanghai Region were studied with 120 days anaerobic incubation at 25 °C and 35 °C. Results showed that the organic nitrogen mineralized amounted to 4.0% to 9.4% of total N (60 to 241 mg kg⁻¹) and the mineral nitrogen was only correlated with total N (partial correlation analysis). pH changed greatly and was related to the mineral nitrogen contents during the mineralization. Temperature was one of the main factors influencing the mineralization of nitrogen. Four models, (1) effective cumulated temperature model; (2) a one-component, first order exponential model (one-pool model); (3) a two-component, first order exponential model (two-pool model) and (4) a two-component, mixed first and zero order exponential model including a constant term (special model), were fitted to the observed mineral N vs incubation days using a non-linear regression procedure. The two-pool model and the special model gave the best fits amongst the four models. The special model was the unique one that could appropriately reflect the responses of organic nitrogen mineralization to incubation temperature in all studied paddy soils. All results showed the special model made the best prediction of nitrogen mineralization under flooded conditions.

Key words Paddy soil; Nitrogen mineralization; Anaerobic incubation; Model simulation