

稻田土壤氮矿化速率的研究

陶勤南 吴良欢 方萍

(浙江农业大学, 310029)

摘 要

稻田土壤氮在淹水密闭培养 12 周内的矿化累积曲线采用预培期算法(包括干土效应)的有效积温式精度明显优于扣除预培期算法(扣除干土效应)。用预培期算法求得的矿化参数 $K > 0, 0 < n < 1$ 。矿化速率是土壤氮矿化过程的特征值,有效积温 105°C 时的矿化速率 (Y'_{105}) 与土壤氮矿化能力及矿化氮有效性均密切相关。稻田晚发性取决于土壤氮后期的矿化速率,有效积温 840°C 时的矿化速率 (Y'_{840}) 愈大,后四周矿化量愈多,晚发性愈强。

关键词 矿化氮,矿化速率,矿化特征值,矿化氮有效性,有效积温式

矿化速率是稻田供氮能力的重要课题之一。有效积温式 $Y = K[(T - T_0)D]^n$ 常能较好地描述矿化过程^[1-5],由于对式中 K, n 值有不同的计算方法^[3,4],同一分土样的淹水密闭培养数据有时会得出互相矛盾的结论^[3]。本研究通过对不同计算方法的比较,选定合理的计算方法对矿化速率进行讨论。

一、材料和方法

(一) 供试土样及产量数据 土样采自本组统一设计在浙江进行的 25 个肥料定位试验无肥区的耕作层(包括囊水型及非囊水型土壤),理化性状见表 1。早稻产量数据为每个试验点无肥区三次重复的平均值。

(二) 淹水密闭培养试验^[4] 称取过 20 目筛的风干土样 10g,每种土样称 14 份,分别放于 $10 \times 180\text{mm}$ 的试管中,徐徐加入 10ml 蒸馏水,使土层全部浸湿,并尽量驱赶土中空气,用橡皮塞密封管口,置于 $30 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的生化培养箱中,每周换气一次,并驱出土中空气,分别于淹水后第 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 周用扩散法测定土壤代换性 NH_4^+-N 量,各土样每次测定 2 管,取平均值。样品测定同时作空白试验及 NH_4^+-N 标准溶液的回收率测定。

(三) 有效积温式中 K, n 值的计算方法 1. 预培期法:按蔡贵信等^[4]的方法,将包括 210°C 预培期(作为干土效应期)在内的从第 1 周到第 12 周共 7 组配对数据求 K, n 值。2. 扣除预培期法:按高家骅等^[3]用过的的方法,用第 3 周起实测矿化量减去 210°C 预培期矿化量后的剩余值共 5 组配对数据计算 K, n 值。

表 1 供试土壤的理化性状(烘干基)
Table 1 Physical and chemical properties of the soils used
(on an oven-dried basis)

土号 Soil No.	地 点 Locality	土 壤 Soil	有机质 (%) O. M.	全氮 (%) Total N	碱解氮 (mg/100g soil) Alkali hydrolyzable-N	粘粒 ($<1\mu\text{m}$) (%) Clay	pH 值
1	镇海鄞隘	青紫泥	4.67	0.245	22.7	25.9	5.69
2	奉化肖镇	泥质田	4.76	0.266	22.7	21.8	5.47
3	奉化班溪	泥砂田	3.69	0.175	10.1	6.5	5.03
4	奉化溪口	山地黄泥田	3.97	0.218	20.5	14.6	6.73
5	鄞县邱隘	青紫泥	4.76	0.278	22.7	25.9	5.54
6	余姚马诸	小粉田	3.45	0.188	16.1	12.6	5.68
7	武义柳城	泥质田	4.59	0.270	22.8	13.7	5.17
8	江山坛石	焦化黄泥砂田	3.53	0.175	15.5	15.7	5.66
9	江山石门	泥砂田	2.78	0.134	14.0	11.5	5.64
10	江山农科所	泥砂田	3.03	0.142	15.2	12.5	7.21
11	嘉兴双齐	青紫泥	3.81	0.206	16.8	12.8	6.52
12	嘉兴七星	黄斑壤	3.55	0.172	15.3	12.8	6.86
13	嘉善枫南	黄心青紫泥	3.86	0.166	15.6	12.8	6.52
14	嘉善惠民	黄斑壤	3.55	0.172	15.3	12.8	6.86
15	嘉善凤桐	黄斑壤	3.55	0.169	15.2	11.8	6.62
16	嘉善四塘	黄心青紫泥	3.28	0.166	14.5	11.8	6.03
17	嘉善四塘	黄心青紫泥	3.65	0.200	16.7	12.8	6.15
18	嘉善大云	黄斑壤	3.55	0.209	16.1	12.9	6.05
19	嘉善罗星	黄斑壤	2.65	0.149	14.3	9.7	6.45
20	嘉善里泽	黄心青紫泥	3.60	0.188	15.1	11.8	6.20
21	嘉善洪溪	黄心青紫泥	3.45	0.160	14.0	10.8	6.06
22	嘉善大舜	黄化青紫泥	3.43	0.143	14.3	11.8	6.22
23	安吉塘浦	培泥砂田	3.84	0.197	18.1	7.5	5.35
24	富阳大源	泥质田	3.55	0.175	17.5	14.7	7.98
25	余杭亭址	小粉田	2.88	0.116	13.4	11.8	5.60

注: 有机质用油浴加热 $-K_2Cr_2O_7$ 法; 全氮用浓硫酸消煮, 扩散法定氮; 碱解氮用碱解法; pH 值用水浸提-电位法; 机械分析用吸管法。

二、试验结果

(一) 两种计算方法精度的比较

表 2 两种计算 K 与 n 值的方法比较Table 2 Comparison between the two methods for calculating K and n values

土号 Soil No.	预培期法(不扣干土效应计算) Calculation deducting dried effect				扣除预培期法(扣除干土效应后计算) Calculation without deducting dried			
	K 值	n 值	平均相对误差 ^a	相关系数 r^b	K 值	n 值	平均相 对误差	相关系数 r^b
1	5.5442	0.2228	2.5	0.9855**	5.73×10^{-5}	1.1815	68.2	0.9115*
2	9.0114	0.1569	2.3	0.9791**	1.324×10^{-3}	1.2717	50.3	0.9336**
3	2.3542	0.2570	2.9	0.9732**	0.0664	0.6095	8.9	0.9739**
4	1.3601	0.4063	14.3	0.8916**	4.7003	0.0902	9.8	0.5721
5	11.3038	0.1017	6.2	0.7040	0.9230	3.565×10^{-4}	179.1	0.0002
6	6.1618	0.1808	5.7	0.9726**	3.949×10^{-3}	1.0500	34.5	0.9869**
7	2.9813	0.3132	8.3	0.8893**	0.3325	0.4386	17.0	0.8691*
8	6.3726	0.1765	4.8	0.9520**	4.363×10^{-3}	1.0510	36.5	0.9100*
9	3.9707	0.1977	1.7	0.9709**	3.082×10^{-3}	1.0447	23.3	0.9610**
10	2.6757	0.2342	12.6	0.8301*	2.8337	0.0503	18.9	0.1792
11	3.8978	0.2471	3.2	0.9828**	0.1899	0.5320	11.5	0.9578**
12	2.1128	0.2873	6.3	0.9406**	0.4900	0.3905	11.5	0.8912*
13	2.6629	0.2310	5.7	0.9523**	0.0125	0.8620	22.7	0.9408**
14	1.7316	0.2907	6.3	0.9031**	1.0562	0.2598	7.4	0.8938*
15	2.4542	0.2754	3.3	0.9871**	0.2144	0.4918	6.7	0.9798**
16	2.3090	0.2950	6.8	0.9412**	6.093×10^{-3}	1.0356	45.4	0.8886*
17	2.3042	0.3012	3.2	0.9866**	0.03083	0.8279	6.9	0.9880**
18	4.3564	0.2313	4.0	0.9760**	8.138×10^{-3}	1.0159	22.5	0.9568**
19	1.6757	0.2614	4.1	0.9715**	5.064×10^{-3}	0.9674	11.8	0.9354**
20	2.9944	0.2468	4.7	0.9625**	0.0416	0.7151	37.2	0.9927**
21	1.9481	0.2920	3.5	0.9740**	0.0230	0.7919	19.4	0.9447**
22	2.4682	0.2570	5.4	0.9695**	0.0132	0.8955	33.1	0.9123*
23	5.6913	0.1655	3.1	0.9624**	0.0422	0.6338	40.4	0.8903*
24	1.5884	0.3300	7.4	0.9575**	0.4045	0.3967	15.0	0.8834*
25	2.2184	0.2593	3.7	0.9603**	2.774×10^{-3}	1.0594	22.9	0.9588**
平均 (\bar{x})			5.28	0.9596 ^c			30.44	0.9306 ^c
标准差 (s)								
标准误 ($S\bar{x}$)			0.60	0.3883 ^c			6.94	0.5864 ^c

注: a. 平均相对误差 = $\sum_{i=1}^n \left| \frac{Y - \hat{Y}}{\hat{Y}} \right| \% / n$

b. r 是 $\log Y$ 与 $\log[(T - T_0)D]$ 的相关系数。

c. r 平均值的求算: 先将各个 r 值取反正切双曲函数变换, 求平均值后再取正切双曲函数变换的 r 值。

* 为 $p < 0.05$ 相关显著; ** 为 $p < 0.01$ 相关极显著。

两种计算方法的结果见表2。用预培期算法得到的 n 值介于 0.1017—0.4063 之间, 极差仅 0.3046。扣除预培期算法的 n 值不仅有增大趋势, 极差也大, 最小的几乎等于零, 最大的达 1.2717, 有 8 个土样的 n 值大于 1。预培期算法的误差较扣除预培期法小得多, 平均相对误差缩小 5.77 倍(30.44/5.28), 标准误差小 11.57 倍(6.94/0.60)。有效积温与矿化量测定值的相关性亦以预培期算法为好, 下文以预培期算法作进一步分析。

(二) 矿化速率是稻田氮矿化过程的特征值

设 i 为培养周数, 每周有效积温为 105°C , 则有效积温式可改写为 $Y_i = K[105i]^n$,

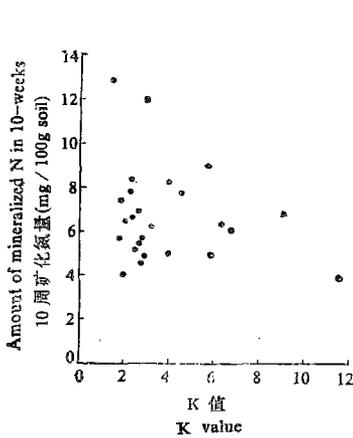


图 1 10 周矿化氮量 (Y_{12-2}) 与 K 值的关系
Fig.1 The relationship between the amount of N mineralized during 10-weeks incubation and the K value

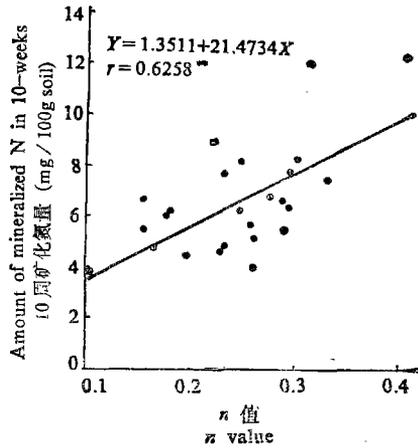


图 2 10 周矿化氮量 (Y_{12-2}) 与 n 值的关系
Fig.2 The relationship between the amount of N mineralized during 10-weeks incubation and the n value

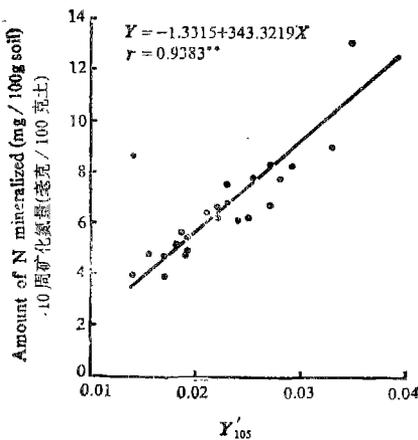


图 3 10 周矿化氮量 (Y_{12-2}) 与有效积温 105°C 时矿化速率 (Y'_{105}) 的关系
Fig.3 The relationship between the amount of N mineralized during 10-weeks incubation and the mineralization rate at effective accumulated temperature of 105°C

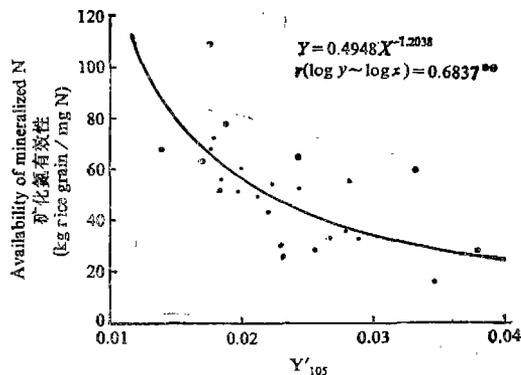


图 4 矿化氮有效性与有效积温 105°C 时矿化速率 (Y'_{105}) 的关系
Fig.4 The relationship between the availability of mineralized N and the mineralization rate at effective accumulated temperature of 105°C

按蔡贵信等^[4]的方法以 210°C 有效积温 (即 $i = 2$) 作为干土效应矿化量 (Y_2), 则扣除干土效应后的矿化量可表示为 $Y_{i-2} = K[105i]^n - Y_2$ 。 Y_{12-2} 即为第 2 周到第 12 周的累积矿化量, 本文用 Y_{12-2} 作为该土壤矿化能力的指标。经统计 Y_{12-2} 与 K 值无相关(图 1), 与 n 值的相关系数为 0.6258 (图 2), 虽达极显著水平, 但 r^2 仅 0.3916, 说明 Y_{12-2} 的取值 60% 受 n 值以外的其他因素的影响, 单凭 n 值不足以估计矿化能力。有效积温式的一阶导数 $Y' = Kn[(T - T_0)]^{n-1}$ 的农化意义是当有效积温累计至某度时, 该度有效积温可使有机氮矿化为铵态氮的数量, 可称之为矿化速率, 以 Y'_e 表示, 下标 e 为有效积温。矿化速率的大小由 K, n 值共同决定, 它与该土壤的矿化能力指标 Y_{12-2} 有极高的相关性。图 3 表明有效积温 105°C 时的矿化速率 Y'_{105} 与矿化能力指标 Y_{12-2} 的相关系数高达 0.9383**, $r^2 = 0.8804$, 说明在干土效应的预培期中即可预测该土壤的矿化能力。若以无肥区早稻产量 (kg/亩) 与 Y_{12-2} 的商表示土壤矿化氮的有效性, 则 Y'_{105} 与之有很好的相关性(图 4)。

三、讨 论

(一) 预培期计算法精度高的理论依据

K, n 值是试验数据取对数变换转化为 $Y = b_0 + bx$ 形式的线性回归后求得的。 b_0, b 及某一测定值 Y_0 偏差的方差依次为:

$$D(b_0) = \sigma^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{\sum(x - \bar{x})^2} \right] \quad (1)$$

$$D(b) = \frac{\sigma^2}{\sum(x - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$D(Y_0 - \hat{Y}) = \sigma^2 \left[1 + \frac{1}{N} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum(x_0 - \bar{x})^2} \right] \quad (3)$$

(1)、(2)、(3) 式中 N 为试验数据的个数, σ^2 为剩余方差, \bar{x} 为有效积温数值 x 的平均数, $\sum(x - \bar{x})^2$ 为 x 的平方和。由(1)、(2)、(3)式可知, N 与 $\sum(x - \bar{x})^2$ 愈大, σ^2 愈小, 则上述三种方差愈小, 精度愈高。扣除预培期后造成三种方差增大的原因为: (1) N 减少, 由 7 降为 5; (2) $\sum_3^7 (x - \bar{x})^2 < \sum_3^7 (x - \bar{x})^2 + \sum_1^2 (x - \bar{x})^2$; (3) 测定值的数据结构式为 $Y = m + \varepsilon$, 其中 m 为理论真值, ε 为遵循正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 的随机误差。受 $\sum \varepsilon = 0$ 条件约束, ε 必然有正值与负值, 两测定值相减, 即 $Y_2 - Y_1 = (m_2 + \varepsilon_2) - (m_1 + \varepsilon_1) = (m_2 - m_1) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$, $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ 必然使随机误差增大或减小, 从而使 σ 增大。

有效积温式的数学模型为 $Y = \kappa[(T - T_0)D]^n + \varepsilon$ 。矿化参数 K, n 分别是 κ 与 n 的无偏估计, 计算值 \hat{Y} 是测定值的平均值 $E(Y)$ 的无偏估计, 所以从预培期计算法求得的有效积温式中扣除干土效应 Y_2 来表示矿化量 Y_{i-2} 具有统计学理论上的严密性。

(二) 参数 n 的取值范围

有机氮矿化过程是生物活动的结果,是由酶动力学性质决定的,不少学者用动力学一级反应方程描述矿化过程^[6-10,12,13],其曲线形状如图 5 中的曲线 A,有极限 D。在 12 周

矿化过程中不少土样的矿化量尚未趋近于 D 而只达 C。C 以前的曲线段与动力学一级反应之间有较大的模型差异,其拟合效果往往不如有效积温式。C 以前曲线段有效积温式的特征是 $K > 0$, $0 < n < 1$,它的一阶导数 $Y' = Kn[(T - T_0)D]^{n-1}$ 中的指数 $n - 1 < 0$,随矿化时间延长矿化速率逐渐趋近于零如曲线 A' 所示。因此有效积温式可视为衍生于动力学一级反应曲线的经验公式,同样可用酶学理论解释。有些土样用扣除预培期计算法求得的 n 值大于 1,曲线形状如 B 所示,其一阶导数的指数 $n - 1 > 0$,曲线形状如 B' 所示。曲线 B' 表示矿化速率随淹培时间延长而增大,显然与常识不符。以上分析说明以动力学一级反应为理论根据而衍生出的有效积

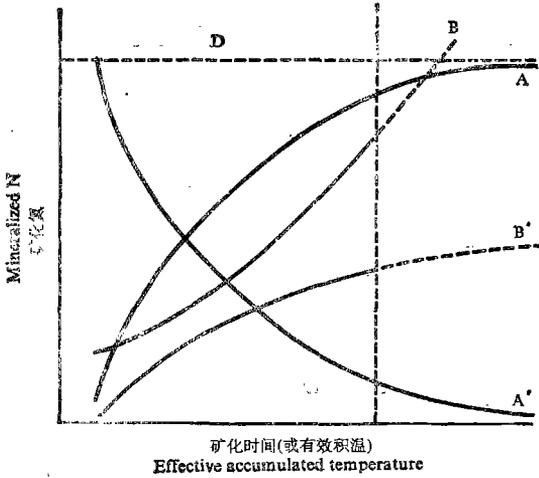


图 5 土壤氮矿化曲线示意图

Fig.5 The sketch map of mineralization curve of N in soils

温式的 n 值不会超出 $0 < n < 1$ 范围,从本文及有关资料^[3]看出 $n > 1$ 是选用不恰当的计算方法所致。

(三) 矿化速率与稻田晚发性的关系

稻田晚发性是水稻生产中常见现象,与水稻生育中后期土壤氮素矿化有关。从数学角度看 $n > 1$ 表示矿化速率随淹培时间延长而增大,即水稻中后期单位有效积温矿化氮

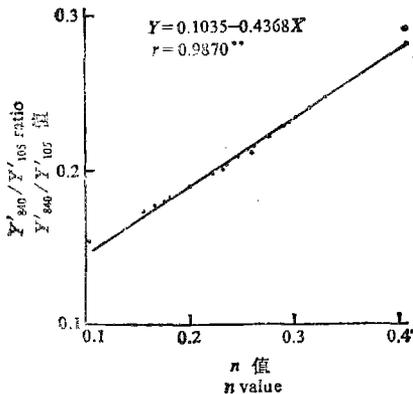


图 6 矿化速率比值 (Y'_{840}/Y'_{105}) 与 n 值的关系
Fig.6 The relationship between the N mineralization rate (Y'_{840}/Y'_{105}) and the n value

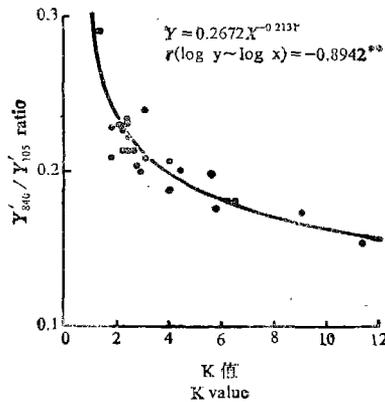


图 7 矿化速率比值 (Y'_{840}/Y'_{105}) 与 K 值的关系
Fig.7 The relationship between the ratio of N mineralization rate (Y'_{840}/Y'_{105}) and the K value

量比生育前期多, 与动力学一级反应理论及测定数据均不相符, 因此不宜用 n 大于或小于 1 作为判断晚发性依据。如以有效积温 105°C 及 840°C 时的矿化速率分别代表水稻生长前期及后期的矿化速率, n 值对前后期矿化速率的比值 (Y'_{840}/Y'_{105}) 有一定影响, 两者相关系数高达 0.9870^{**} (图 6), 但从回归方程看出 n 值增减 0.1, Y'_{840}/Y'_{105} 只变动 0.04368。由于 n 值最小为 0.1017, 最大为 0.4063, Y'_{840}/Y'_{105} 也只是变化于 0.1479—0.2810 之间, 最大相差只有 13.31%, 而且由图 7 可见 Y'_{840}/Y'_{105} 与 K 值也有极显著的负相关, 因此只用 n 值来表示晚发性是不够的。事实上不同土壤的晚发性有很大差异, 反映出后期矿化出来的铵态氮量必然相差较大, 我们试以淹培第 8 周到第 12 周矿化出的氮量 (Y_{12-8}) 作为晚发性指标, 则有效积温 840°C 时的矿化速率与后四周矿化量 Y_{12-8} 间的相关系数高达 0.9977^{**} (图 8), $r^2 = 0.9954$, 说明了矿化速率对后期矿化量的重要影响。在 25 个土样中 Y'_{840} 最大的达 $0.0102\text{mg}/100\text{g}$ 土, 最小的为 $2.7226 \times 10^{-3}\text{mg}/100\text{g}$ 土, 相差 3.75 倍, 这才可以说明不同土样间晚发性的巨大差异。

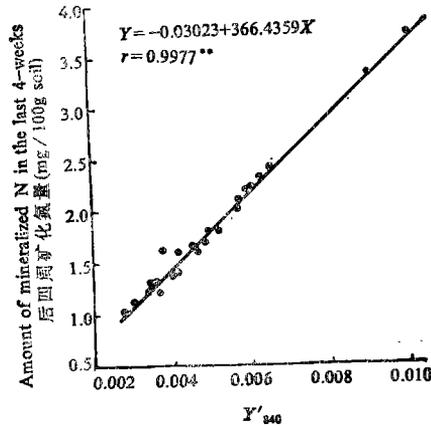


图 8 有效积温 840°C 至 1260°C 之间的后四周矿化氮量与有效积温 840°C 时矿化速率 (Y'_{840}) 的关系

Fig.8 The relationship between the amount of N mineralized during the last 4-weeks incubation (effective accumulated temperature 840°C — 1260°C) and the mineralization rate at effective accumulated temperature of 840°C

参 考 文 献

1. 朱兆良, 1986: 土壤氮素的矿化和供应。中国土壤学会土壤农业化学专业委员会、土壤生物及生物化学专业委员会编, 我国土壤氮素研究工作的现状和展望, 14—27 页, 科学出版社。
2. 汪寅虎, 姜素珍, 顾永明, 1983: 上海郊区青紫泥土壤供氮量的预测研究。土壤学报, 第 20 卷 3 期, 262—271 页。
3. 高家骅, 章云, 黄东迈, 吴敬民, 潘德谱, 1984: 稻田土壤矿化类型与氮肥效应。土壤学报, 第 21 卷 4 期, 341—349 页。
4. 蔡贵信, 张绍林, 朱兆良, 1979: 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。土壤, 第 6 期, 234—240 页。
5. 出井嘉光, 1975: 水田における有機物の集積と分解。日本土壤肥科学雜誌, 第 46 卷 7 号, 251—254 页。

6. 山本富三、久保田忠一,1986: 速度論的解析による水田土壤の窒素無機化特性。日本土壤肥科学雑誌,第 57 卷第 5 号,481—486 頁。
7. 山本富三、久保田忠一、真鍋尚義,1986: 速度論的方法による水稻生育期間中の土壤窒素無機化量の推定。日本土壤肥科学雑誌,第 57 卷第 5 号,487—492 頁。
8. 上野正夫、安藤豊、藤井弘志、佐藤俊夫,1988: 水稻の理想的な窒素吸収パターンと土壤窒素無機化量の関係。日本土壤肥科学雑誌,第 59 卷第 3 号,316—319 頁。
9. 安藤豊、庄子貞雄,1986: 水田土壤中の地力窒素の發現と施用窒素の土壤中への固定について——速度論的解析例。日本土壤肥科学雑誌,第 57 卷第 1 号,1—7 頁。
10. 安藤豊、藤井弘志、佐藤俊夫、荒垣憲一、中西政則、佐藤之信,1989: 沖積土壤の地力窒素の無機化モデルについて。日本土壤肥科学雑誌,第 60 卷第 1 号,1—7 頁。
11. 鬼崎豊、吉野喬、前田乾一,1975: 稲作期における土壤窒素の有効化過程。日本土壤肥科学雑誌,第 46 卷第 7 号,255—259 頁。
12. 藤井弘志、安藤豊、佐藤俊夫、荒垣憲一、中西政則、佐藤之信,1989: 山形県庄内地域(グライ土壤)の地力窒素の無機化について。日本土壤肥科学雑誌,第 60 卷第 1 号,8—14 頁。
13. Ponnampereuma F. N., 1965: The Mineral Nutrition of the Rice Plant. Johns Hopkins Press, Baltimore, Maryland, pp. 295—328.

STUDY ON MINERALIZATION RATE OF NITROGEN IN PADDY SOILS

Tao Qinnan, Wu Lianghuan and Fang Ping

(Zhejiang Agricultural University, 310029)

Summary

The study carried out by the submerged incubation method and field experiments showed that the mineralization rate could be used as a characteristic value of nitrogen mineralization in paddy soils. The results obtained are summarized as follows:

1. Effective accumulated temperature empirical model ($Y = K[(T - T_0)D]^n$) obtained without deducting the dried soil effect during 12-week incubation period was better than that with deducting the dried soil effect. The empirical model without deducting dried soil effect had a higher precision, and its mineralization parameter $K > 0$ and $0 < n < 1$.

2. The mineralization rate Y' ($Y' = Kn[(T - T_0)D]^{n-1}$) might be the characteristic value of nitrogen mineralization. A highly positive correlation existed between the mineralization rate at effective accumulated temperature of 105°C (Y'_{105}) and mineralization power, and Y'_{105} was closely negatively related to the availability of mineralized N. The amount of N mineralized during the last 4-weeks incubation period (effective accumulated temperature of 840—1260°C) was determined by Y'_{840} . The higher the Y'_{840} , the more the N was mineralized in the late period.

Key words Mineralization nitrogen, Mineralization rate, The characteristic value of nitrogen mineralization, The availability of mineralized nitrogen, Effective accumulated temperature empirical model