

# 可溶性有机氮在评价土壤供氮能力中的作用与效果

卢红玲<sup>1,2</sup>, 李世清<sup>1,3</sup>, 金发会<sup>1,3</sup>, 邵明安<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院水利部水土保持研究所/西北农林科技大学, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039; <sup>3</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 【目的】淹水培养法提取态可溶性有机氮在评价土壤供氮能力方面具有重要意义。【方法】通过研究黄土高原物理化学性质差异较大的 10 种农田土样起始可溶性有机氮 (SON)、矿质氮 ( $N_{\min}$ ) 及间歇浸提长期淹水培养期间可溶性有机氮、铵态氮累积量、易矿化和难矿化氮素矿化势 (分别  $N_D$  和  $N_R$  表示) 及其与作物吸氮量的关系, 分析 SON 在评价土壤供氮能力中的作用与效果。【结果】供试土样起始 SON 平均为  $23.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 是起始可溶性总氮的 28.8%、全氮的 2.4%。淹水培养提取态可溶性氮 (TSN) 中, SON 所占比例更高, 几乎与铵态氮相当。经过 217 d 淹水培养, 浸提出的 SON 平均为  $118.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占 TSN 累积量的 46.4%。 $N_D$  与全氮关系密切: 在不包括与包括 SON 时, 二者的相关系数分别为 0.92 ( $P < 0.01$ ) 和 0.88 ( $P < 0.01$ )。不同土壤  $N_D$  和易矿化氮矿化速率 ( $K_D$ ) 差别很大, 干湿砂质新成土和黄土正常新成土的  $N_D$  小于土垫旱耕人为土。考虑 SON 后  $K_D$  值减小, 而难矿化氮矿化速率 ( $K_R$ ) 增加。【结论】淹水培养期间铵态氮累积量是评价可矿化氮的较好指标, 不仅适宜于第一季作物, 而且也适用于连续两季作物; SON 累积量不能单独作为反映可矿化氮的指标, 但用  $N_D$  反映土壤可矿化氮潜势时, 包括 SON 后更加准确; TSN 在一定程度上能够反映土壤可矿化氮。铵态氮和 TSN 累积量及  $N_D$  在反映两季作物土壤可矿化氮时效果更好, 包括 SON 后 TSN 及  $N_D$  在评价土壤供氮持久性时更具意义。

**关键词:** 淹水培养; 氮素矿化; 可溶性有机氮; 土壤可矿化氮

## Effect of Soluble Organic Nitrogen on Evaluating Soil N-Supplying Capacity

LU Hong-ling<sup>1,2</sup>, LI Shi-qing<sup>1,3</sup>, JIN Fa-hui<sup>1,3</sup>, SHAO Ming-an<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources/ University of Northwest Agriculture and Forest, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; <sup>3</sup>College of Natural Resources and Environment, University of Northwest Agriculture and Forest, Yangling 712100, Shaanxi)

**Abstract:** 【Objective】It is important to study the soluble organic nitrogen (SON) extracting in water-logged incubation for evaluating soil N-supplying capacity. 【Method】Soil initial SON and mineral nitrogen ( $N_{\min}$ ), cumulative soluble organic nitrogen and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in leaching solution during water-logged incubation, mineralization potentials of both decomposable nitrogen ( $N_D$ ) and resistant nitrogen ( $N_R$ ), and their correlations with crop N-uptake of 10 kinds of farmland soils with different physical and chemical properties on the Loess Plateau were investigated. Effect of SON on evaluating soil N-supplying capacity was studied. 【Result】The results showed that mean content of initial SON ( $23.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) of 10 soils was 28.8% of initial total soluble nitrogen (TSN) and 2.4% of total nitrogen (TN). The percent of cumulative SON in leaching TSN during incubation was higher than 28.8% and as high as the percent of cumulative  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ . After 217 days water-logged incubation, the mean cumulative SON content was  $118.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 46.4% of cumulative TSN.  $N_D$  had close correlation with TN, the correlation coefficients were 0.92 ( $P < 0.01$ , without SON) and 0.88 ( $P < 0.01$ , with SON), respectively. N mineralization potential ( $N_D$ ) and mineralization rate constant ( $K_D$ ) were different with the soil types.

收稿日期: 2007-06-29; 接受日期: 2007-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90502006)

作者简介: 卢红玲(1979-), 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 研究方向为土壤化学。Tel: 029-87012352; E-mail: luhl\_2003@163.com。通讯作者李世清(1963-), 男, 甘肃秦安人, 教授, 博士, 研究方向为土壤-植物氮素营养。Tel: 029-87016171; E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

$N_D$  of Los-Orthic Entisols and Ust-Sandiic Entisols were lower than that of Eum-Orthrosols.  $K_D$  decreased and the mineralization rate constant of resistant materials ( $K_R$ ) increased when considering SON. 【Conclusion】 Cumulative  $NH_4^+$ -N is a good evaluating index of soil N-supplying not only for the first season crop, but also for two successive season crops.  $N_D$  is more correct in revealing the potential mineralizable nitrogen when SON was regarded as mineralized N, although cumulative SON alone is not a good index for the potential of mineralizable nitrogen. And cumulative TSN could also be taken as an index for the potential mineralizable nitrogen to some extent. Cumulative  $NH_4^+$ -N, TSN and  $N_D$  are satisfactory indexes for the potential mineralizable nitrogen, especially in estimating the potential mineralizable nitrogen of the soil for two successive season crops. And cumulative TSN and  $N_D$  in evaluating the permanence of soil N-supply has better effects when SON was included.

**Key words:** Water-logged incubation; Nitrogen mineralization; Soil organic nitrogen; Soil N-supplying capacities

## 0 引言

【研究意义】土壤可溶性有机氮 (SON) 是指土壤中能够被水或盐溶液浸提出的有机氮素<sup>[1]</sup>。SON 是土壤氮素中活跃的组分之一。一方面它是土壤有效氮, 可以直接或经过转化后被作物吸收利用<sup>[2,3]</sup>, 另一方面, 它的移动性相对较强, 可随水分运移而发生径流或淋溶损失, 引起环境污染<sup>[4-7]</sup>。【前人研究进展】长期以来, 在土壤有机氮矿化研究中, 多集中于可溶性无机氮, 而忽略了对土壤 SON 及其变化规律的研究。Smith<sup>[8]</sup>于 1980 年研究指出, 在用通气培养法估测可矿化氮时, 如果不考虑洗出的 SON, 所得结果实质上是错误的。已有研究表明, 土壤中 SON 库和无机氮库的大小相近<sup>[1]</sup>, 因此确定土壤中 SON 的含量以及在有机氮矿化过程中对可矿化氮的贡献就显得非常重要。Jones 等<sup>[9]</sup>研究认为, SON 在氮素矿化过程中具有更重要地位, 发现不溶性有机氮向小分子 SON 的转化是土壤供氮的主要限制因子之一。【本研究切入点】因此, 要准确评价土壤有机氮矿化能力, 在测定培养期间可浸取矿质氮变化量的同时, 应同时测定浸提液中 SON 的含量。过去虽然对黄土高原土壤氮素矿化过程及供

氮能力进行了大量研究, 但考虑 SON 的相关研究较少, 迄今未见文献报道。【拟解决的关键问题】本研究采用淹水培养法对黄土高原具有代表性的 10 种土壤进行了 217 d 的培养, 讨论在淹水培养条件下土壤氮素矿化过程中 SON 的变化及其对矿化氮和作物吸氮量的影响程度, 为准确测定和评价该地区土壤有机氮矿化能力提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验选用黄土高原 10 种主要农业土壤, 选取范围从黄土高原北部的陕西省神木县至黄土高原南部的陕西关中地区, 参见文献<sup>[10]</sup>。采样深度为 0~20 cm, 采样时间为 2005 年 6 月底至 7 月初。每个采样点选定田块后, 多点采集, 组成混合土样。土样运回实验室后迅速过 6 mm 筛, 充分混匀。部分风干, 用作盆栽试验和测定土壤基本性质; 部分土样以鲜土保存用作测定微生物量氮等。培养试验同时用鲜土及风干土进行, 以比较土壤风干过程对氮素矿化的影响。本论文仅涉及用风干土进行的培养试验。供试土样基本理化性质见表 1。

表 1 供试土样基本理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of soils in experiment

土样 编号 No.	土壤类型 Soil type	有机碳 OC (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN (g·kg <sup>-1</sup> )	微生物 量碳 B <sub>C</sub> (μg·g <sup>-1</sup> )	微生物 量氮 B <sub>N</sub> (μg·g <sup>-1</sup> )	矿质氮		有效磷 Available P (μg·g <sup>-1</sup> )	CaCO <sub>3</sub> (%)	pH (H <sub>2</sub> O)
						$N_{min}$ (μg·g <sup>-1</sup> )	$NO_3^-$ -N			
1	干湿砂质新成土 Ust-Sandiic Entisols	6.56	0.82	168.3	36.9	76.0	7.5	27.06	4.31	8.0
3	干湿砂质新成土 Ust-Sandiic Entisols	4.12	0.50	122.3	30.4	50.8	6.7	13.04	8.30	8.3
6	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	7.31	0.82	185.3	22.2	17.9	6.6	4.88	10.38	8.4
7	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	6.45	1.02	162.6	22.6	39.2	6.8	12.14	8.96	8.1
9	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	12.10	1.02	166.8	19.3	81.3	8.1	6.55	10.24	8.3
11	筒育干润均腐土 Hap-Ustic Isohumisols	4.91	0.81	63.0	8.4	16.9	6.6	13.89	9.89	8.3
13	土垫旱耕人为土 Eum-Orthrosols	14.84	1.64	442.4	59.8	24.7	10.0	17.00	12.50	8.3
17	土垫旱耕人为土 Eum-Orthrosols	6.56	1.26	364.1	56.3	20.4	7.2	16.43	7.77	8.2
22	土垫旱耕人为土 Eum-Orthrosols	9.52	1.58	318.4	38.2	139.9	8.2	190.71	9.50	7.8
25	土垫旱耕人为土 Eum-Orthrosols	11.70	1.47	299.2	45.6	64.9	6.4	22.07	7.44	8.2

## 1.2 淹水培养

淹水培养采用 Keeney 和 Bremner 提出的改进方法<sup>[11]</sup>。称取过 2 mm 孔筛的风干土样 12.00 g, 置于 80 ml 离心管, 每种土壤装 39 管, 每管加入 25 ml 去离子水, 加塞、密闭, 在温度为 40℃ 的恒温培养箱内培养, 培养 0、4、7、14、21、35、49、70、91、119、147、182、217 d 分别进行浸提, 收集并测定可矿化氮。每次浸提矿化氮后, 对每种土壤取 3 管 (相当于重复 3 次), 将离心管内土壤风干, 用于测定有机氮组分, 其它离心管中加入 25 ml 去离子水同前继续培养。

浸提时, 首先加入 25 ml 2 mol·L<sup>-1</sup> KCl, 振荡 30 min, 离心, 将上清液转移到 200 ml 容量瓶中; 加 50 ml 1 mol·L<sup>-1</sup> KCl, 搅拌 1 min, 离心, 将上清液转移到上述容量瓶中; 加 50 ml 去离子水, 同前处理; 最后加 25 ml 无氮营养液 (配方为 0.002 mol·L<sup>-1</sup> CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 0.002 mol·L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.005 mol·L<sup>-1</sup> Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O, 0.0025 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 同前搅拌浸提, 浸提液均转移至容量瓶, 最后定容至 200 ml。定容后测定浸提液中的铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 及 SON。

## 1.3 盆栽试验

盆栽试验共 10 个土样, 土壤进行淋洗处理后, 以冬小麦和夏玉米为供试作物, 进行连续两茬作物盆栽试验, 3 次重复, 共 30 盆。

**1.3.1 小麦盆栽试验** 以内径 10.3 cm、高 20 cm 的硬质 PVC 管自制盆钵为试验钵, 并配有底盆 (相当于小型米氏盆)。每盆装土 1.9 kg, 每个土样装 3 盆, 共 30 盆。装土过程中轻轻压实, 装好后, 土表离盆口 1.5~2.0 cm 左右。

装土后, 用去离子水淋洗起始硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)。直至土样的淋洗液与硝试粉试剂作用不产生颜色, 即为淋洗完全。淋洗土壤起始 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的目的在于排除石灰性土壤主要矿质氮, 即 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 对作物吸氮量的干扰, 以保证作物吸氮量能够充分反映土壤潜在供氮能力。小麦于 2005 年 10 月 19 日播种, 供试品种为小偃 22, 每盆播 10 粒。出苗后及时间苗, 每盆定苗 8 株。结合灌水在作物苗期加入无氮营养液 (配方同前), 以保证除氮以外的其它养分不成为作物生长养分限制因子, 无氮营养液按每千克土中加入 0.15 g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计。作物生长期间以去离子水补充水分, 每次灌水前, 先将渗入到底盆的溶液返回原盆, 再适当加水。

为保证小麦安全越冬, 于 2005 年 12 月 4 日为盆栽试验小麦搭置简易塑料小拱棚。次年开春天气转暖后, 将棚拆去。于 2006 年 5 月 18 日作物成熟期收获

盆栽小麦地上部分。收获后立即烘干, 称重, 分析地上部氮素含量。

**1.3.2 玉米盆栽试验** 在小麦收获后紧接播种夏玉米, 让作物充分利用土壤潜在氮素。夏玉米播种时间为 2006 年 6 月 2 日, 供试夏玉米品种为沈单 10 号, 每盆播种 3 粒种子, 二叶展开后及时间苗, 每盆定苗 2 株。管理、收获同小麦盆栽试验。

## 1.4 分析方法、精密仪器和试剂规格

浸提液中铵态氮采用连续流动分析仪 (德国布朗卢比公司, AA3 型) 测定; 浸提液中可溶性总氮 (TSN): 采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法测定<sup>[12]</sup>, 其中氧化剂采用 0.15 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaOH (西安化学试剂厂) 和 3% 的 K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> (上海爱建德固赛引发剂有限公司) 配比, 样品与氧化剂等体积混合, 高压锅 123℃ 氧化 30 min, 然后用紫外分光光度计 (上海天美科学仪器有限公司, UV2300 双光束) 测定; 浸提液中 SON: 可溶性总氮和铵态氮含量之差即为土壤 SON 的含量。试验中所用试剂均为分析纯。

为检验碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法与连续流动分析仪对硝态氮测定结果的一致性, 分别吸取硝态氮、铵态氮浓度为 0、1、2、4、6、8、10 mgN·L<sup>-1</sup> 的硝酸钾和硫酸铵标准溶液 10 ml, 采用碱性过硫酸钾氧化法 123℃ 氧化 30 min 后用紫外分光光度计测定硝态氮; 同时采用 AA3 测定氧化后溶液中的硝态氮浓度。两种方法测得两组数据的相关系数为 0.996, 对两组数据用 SAS 统计软件进行方差分析发现,  $P=0.9727$ , 表明两组数据间无显著差异, 即碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法测定的 TSN 与将该溶液硝化后采用 AA3 测定的结果一致。

## 1.5 数据统计分析

用 SAS 软件进行相关性分析和方差分析, SIGMAPLOT 软件进行模型拟合。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同土样水溶性氮库的差异

供试土样初始矿质氮 (N<sub>min</sub>) 和可溶性有机氮 (SON) 的测定结果见图 1。从图 1 可知, SON 含量以 11 号筒育干润均腐土最低, 为 8.1 mg·kg<sup>-1</sup>; 以 22 号菜地土垫早耕人为土最高, 为 57.4 mg·kg<sup>-1</sup>; 供试土壤平均 SON 为 23.9 mg·kg<sup>-1</sup>; 起始 N<sub>min</sub> 含量也以 11 号土最低, 为 23.4 mg·kg<sup>-1</sup>; 22 号土最高, 为 148.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 供试土壤平均为 60.6 mg·kg<sup>-1</sup>。初始可溶性总氮 (total soluble nitrogen, TSN) 是 SON 与 N<sub>min</sub> 的总

和 (TSN=SON+N<sub>min</sub>)，SON 是初始可溶性总氮的 18.0%~38.9%，平均 28.8%；SON 是全氮的 0.9%~6.6%，平均为 2.4%。相关分析表明，SON 与 TSN 和全氮的相关系数分别为 0.89 ( $P<0.01$ ) 和 0.38 ( $P>0.5$ )，表明 SON 与 TSN 呈极显著相关，SON 是 TSN 的重要组成部分；但与全氮相关性不显著，说明 SON 含量高低并不完全取决于全氮含量，可能与土壤有机氮组成，特别是 C/N 比有关。从黄土高原北部到南部，尽管全氮呈增加趋势 (图 1)，但 SON 和 N<sub>min</sub> 的变化缺乏规律性；22 号菜地土垫早耕人为土由于大量施用有机肥，从而导致 SON 含量最高；而其它土壤近年几乎没有施用过有机肥。

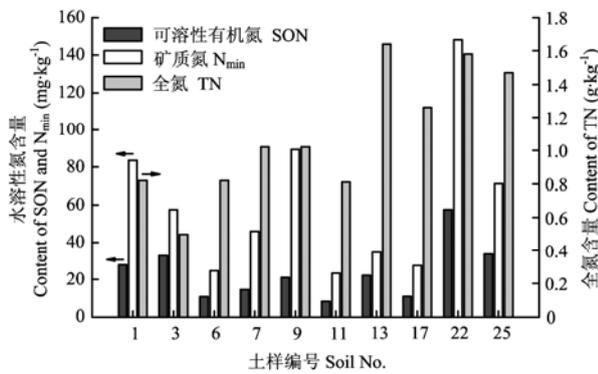


图 1 10 种土样水溶性氮库的差异  
Fig. 1 Differences of soluble nitrogen pools of 10 soils

## 2.2 不同土样有机氮矿化过程及矿化氮累积量的差异

淹水培养抑制了硝化细菌的活动，创造了适合土壤有机氮矿化的条件，矿化终产物为铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)。本试验的测定结果同样表明，在提取液中检测不出硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)。矿化产物 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在中性密闭条件下不会挥发损失。淹水培养条件虽然与旱地土壤水分条件有显著差异，但在表征土壤供氮能力上与通气培养具有异曲同工之效，仍然可用来表征土壤供氮能力<sup>[20]</sup>。因此该法因培养条件易控制，同时还可抑制氮挥发及反硝化作用而备受重视。用此法对黄土高原 10 种主要农业土壤进行了 217 d 培养，以培养时间 (d) 为横坐标，铵态氮累积量 (mg·kg<sup>-1</sup>) 为纵坐标作图，获得不包括 SON 的矿化曲线 (图 2-a)。将铵态氮累积量与相应培养时间的 SON 累积量相加，可获得包括 SON 的矿化曲线 (图 2-b)。由图 2-a 可见，不同土壤类型其矿化容量明显不同，依次为土垫旱耕人为土 > 干湿砂质新成土 ~ 黄土正常新成土 > 筒育干润均腐土，从黄土高原南部到北部依次呈下降趋势；按照矿化快慢可以将矿化过程分为 3 个阶段：0~35 d 为快速矿化阶段，35~147 d 为稳定矿化阶段，147 d 后矿化速率下降为缓慢矿化阶段，182 d 后几乎不产生铵态氮。培养期间 217 d NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 累积量与全氮有明显正相关关系，相关系数为 0.81 ( $P<0.01$ )；铵态氮累积量占全氮含量的 9.9%~21.3%，平均为 12.8%。

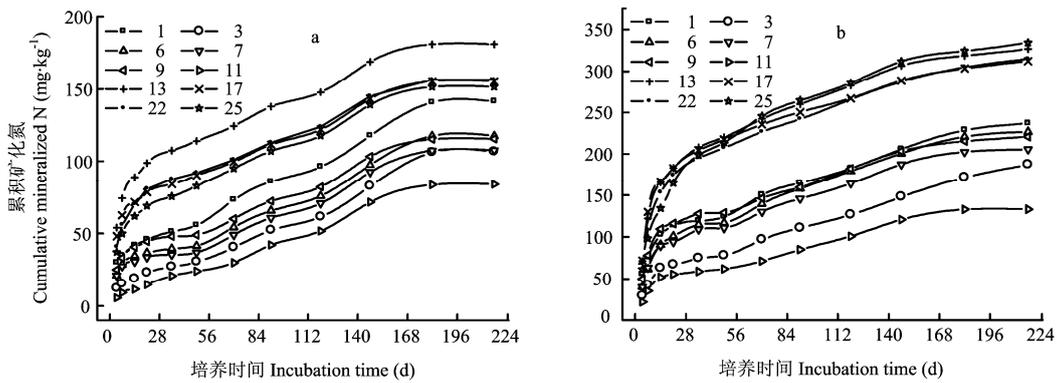


图 2 217 d 淹水培养累积矿化曲线(a: 不包括 SON; b: 包括 SON)  
Fig. 2 Curves of cumulative mineralized nitrogen of 217 days water-logged incubation (a: without SON; b: with SON)

包括 SON 后 (图 2-b)，矿化氮累积量与全氮的相关性增加，其相关系数为 0.86 ( $P<0.01$ )；矿化氮累积量是全氮的 16.5%~37.4%，平均 24.0%。可见，

包括 SON 后，矿化氮占全氮的比例几乎比不包括 SON 增加 1 倍。对比图 2-a 和图 2-b 发现，考虑 SON 后并没有改变不同土壤类型矿化容量的差异顺序，仍然以

筒育干润均腐土最低;但包括 SON 后不同土壤类型矿化氮累积量间的差异更大,而同一类型土壤间的差异变小。不包括 SON,不同土壤铵态氮累积量间的差异在培养 14 d 后基本达到稳定,而包括 SON 后,矿化氮累积量间的差异在培养到 35 d 后才达到稳定。

表 2 列出了 10 个土样 217 d 淹水培养溶解性氮累积量。从土壤类型平均看,淹水培养 217 d,浸提出的 SON<sub>C</sub> (Cumulative SON) 为 118.1 mg·kg<sup>-1</sup>,占浸提总溶解性氮累积量 (TSN<sub>C</sub>) (即 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与 SON 累积量之和) 的 37.0%~54.6%,平均 46.4%。不同土壤培养

217 d 后,干湿砂质新成土、黄土正常新成土、筒育干润均腐土和土垫早耕人为土的铵态氮累积量分别为 123.9、113.5、84.0 和 161.1 mg·kg<sup>-1</sup>; TSN<sub>C</sub> 累积量分别为 211.8、217.8、133.3 和 321.9 mg·kg<sup>-1</sup>; SON<sub>C</sub> 分别为 87.9、104.3、49.3 和 160.8 mg·kg<sup>-1</sup>,分别占全氮的 13.3%、10.9%、6.1%和 10.8%。对于这 4 类土壤,其 SON<sub>C</sub>、TSN<sub>C</sub> 和 SON 都是土垫早耕人为土显著高于其它 3 类,筒育干润均腐土最低,而干湿砂质新成土和黄土正常新成土差异不显著。

### 2.3 不同土壤氮素矿化参数的差异

表 2 217 d 淹水培养不同土样的浸提溶解性氮

Table 2 Cumulative mineralized nitrogen with 217 days water-logged incubation

土样编号 Soil No.	土壤类型 Soil type	溶解性铵态氮累积量 Cumulative NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg·kg <sup>-1</sup> )	总溶解性氮 累积量 TSN <sub>C</sub> (mg·kg <sup>-1</sup> )	可溶性有机氮 累积量 SON <sub>C</sub> (mg·kg <sup>-1</sup> )	可溶性有机氮累积 量所占比例 SON <sub>C</sub> /TSN <sub>C</sub> (%)
1	干湿砂质新成土 Ust-Sandiic Entisols	141.4 d	236.8 c	95.4	40.3
3	干湿砂质新成土 Ust-Sandiic Entisols	106.5 h	186.9 e	80.4	43.0
6	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	117.5 f	226.8 cd	109.3	48.2
7	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	107.5 g	205.7 d	98.1	47.7
9	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	115.5 e	220.9 c	105.4	47.7
11	筒育干润均腐土 Hap-Ustic Isohumisols	84.0 i	133.2 f	49.3	37.0
13	土垫早耕人为土 Eum-Orthrosols	181.0 a	326.5 a	145.4	44.5
17	土垫早耕人为土 Eum-Orthrosols	155.5 b	312.2 ab	156.8	50.2
22	土垫早耕人为土 Eum-Orthrosols	156.5 b	314.8 b	158.3	50.3
25	土垫早耕人为土 Eum-Orthrosols	151.8 c	334.1 ab	182.5	54.6
标准差 SD		29.3	71.1	46.6	-
平均 Mean		131.7	249.8	118.1	46.4

同列包含相同字母的表示差异不显著 Means with the same letter are not significantly different in the same column

大量研究发现,双组分矿化模型具有一定的理论基础,能够较好的描述土壤有机氮矿化过程<sup>[13]</sup>。该模型将土壤中参与矿化的有机氮分成易矿化氮和难矿化氮两个组分,二者的矿化率常数不同。当某一矿化氮组分(特别是难矿化氮组分)趋向于无限大,矿化速率趋向于零时,表示该组分几乎不能被矿化。其模型为:

$$N_m = N_D [1 - \exp(-k_D t)] + N_R [1 - \exp(-k_R t)]$$

式中, N<sub>m</sub> 为矿化氮累积量, N<sub>D</sub>、N<sub>R</sub> 分别为易矿化氮和难矿化氮矿化势, k<sub>D</sub>、k<sub>R</sub> 分别为易矿化氮和难矿化氮的矿化速率常数。本文采用此模型对培养期间累积矿化氮的模拟结果见表 3。

从表 3 可见,不同土壤其易矿化氮矿化势 N<sub>D</sub> 和矿化速率差别很大,干湿砂质新成土和黄土正常新成

土的易矿化氮含量小于土垫早耕人为土,而矿化速率大于土垫早耕人为土。对于易矿化氮和难矿化氮两个组分, k<sub>D</sub> 明显大于 k<sub>R</sub>; 包括 SON 后, N<sub>D</sub> 显著增加,平均增加量几乎与 SON<sub>C</sub> 平均值相当;而 k<sub>D</sub> 减小, k<sub>R</sub> 增加,这一结果揭示, SON 是重要的易矿化氮库,但包括这一部分氮后,其矿化速率减小,即矿化难度相对增加。

从模型拟合结果看, N<sub>D</sub> 与全氮关系密切: 不包括 SON 时, N<sub>D</sub> 是全氮含量的 2.1%~5.0%, 平均 3.5% (11 号土除外), 与全氮相关系数为 0.92 (P<0.01); 包括 SON 后, N<sub>D</sub> 占到全氮含量的 9.5% (5.0%~13.3%), 与全氮仍呈极显著正相关, 相关系数为 0.88 (P<0.01)。双组分模型在对全氮含量较高 (>1 g·kg<sup>-1</sup>) 的土垫早耕人为土氮素矿化过程的拟合效果相对较好,

表 3 有机氮矿化过程双组分模型拟合

Table 3 Simulation results by using two-pool first order exponential model of organic nitrogen mineralization

土样编号 Soil No.	不包括 SON Without SON					包括 SON With SON				
	$N_D(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$k_D(\text{d}^{-1})$	$N_R(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$k_R(\text{d}^{-1})$	SEE	$N_D(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$k_D(\text{d}^{-1})$	$N_R(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$k_R(\text{d}^{-1})$	SEE
1	30.4	0.598	366.3(E)	0.002(E)	4.9	91.0	0.215	350.2	0.003	5.0
3	10.7	0.912	2968337.2(E)	0.000(E)	5.0	52.8	0.190	442292.1(E)	0.000(E)	3.4
6	24.7	0.437	887937.1(E)	0.000(E)	5.4	79.4	0.170	277.7(E)	0.004(E)	5.2
7	21.8	0.637	1214.3(E)	0.000(E)	5.4	76.4	0.190	236.2(E)	0.004(E)	5.5
9	31.4	0.362	314.3(E)	0.002(E)	5.0	99.7	0.181	258.3(E)	0.003(E)	6.0
11	180.9(E)	0.003(E)	84.6	0.000	5.0	40.5	0.206	282.5(E)	0.002(E)	5.9
13	81.6	0.253	164.3	0.005	3.9	160.7	0.154	219.4	0.007	4.9
17	63.2	0.331	192.7	0.003	4.2	167.9	0.157	208.3	0.006	5.7
22	64.9	0.224	183.1	0.003	4.4	157.2	0.141	249.3	0.005	3.2
25	51.8	0.279	174.0	0.004	4.0	128.3	0.136	237.1	0.010	3.7

标 E 者表示拟合值与实际不符; SEE 模型的估计标准误差

Simulating values with "E" mean not agree with real values; SEE: Standard error estimate of model

而对全氮含量较低 ( $<0.85 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 的其它 3 类土壤拟合效果相对较差, 尤其在包括 SON 时这种差异更加明显。根据文献报道<sup>[14]</sup>, 这种情况下  $N_D$ 、 $N_R$  和  $k_D$ 、 $k_R$  只是纯粹的数学拟合结果, 而不能表示严格意义的土壤氮素矿化势和矿化速率常数。对于土垫旱耕人为土, 不包括 SON 时 ( $N_D+N_R$ )/ $N_m$  的比值为 1.52, 包括 SON 后, 其比值降到 1.19。在实际培养试验中, 培养 147 d 后土壤进入缓慢矿化阶段, 第 182~217 天期间的 35 d 内矿化氮量很少, 则 ( $N_D+N_R$ )/ $N_m$  比值高达 1.52, 显然与实际不符。而包括 SON 后, 模型拟合结果更接近于实际情况。在不包括 SON 时, 干湿砂质新成土 (3 号土) 和黄土正常新成土 (6 号和 7 号) 中的部分土壤  $N_R$  趋于无限大, 其对应的  $k_R$  趋于零, 说明这 3 个土壤中的难矿化氮组分很难发生矿化。在包括 SON 后, 仅有干湿砂质新成土 3 号土壤的  $N_R$  趋于无限大, 其对应  $k_R$  为零。而土垫旱耕人为土无论包括 SON 与否, 其  $N_R$  均相对较小,  $k_R$  相对较大, 不同土壤类型间的这种差异, 显然与土壤有机氮特征有关。干湿砂质新成土和黄土正常新成土所处地气候干旱, 土壤质地较粗, 有机氮矿化强烈, 年同化输入的新鲜有机质较少, 易矿化氮相对较少。而土垫旱耕人为土所处地气候湿润, 土壤质地较细, 土壤有机氮矿化相对较弱, 年同化输入的新鲜有机质较多, 易矿化氮相对较高。因此, 在包括 SON 后, 能够反映更持续的土壤供氮能力。筒育干润均腐土全氮和有机氮含量低, 采用此模型拟合时效果相对较差。

## 2.4 对包括与不包括 SON 确定土壤供氮能力指标的评价

作物既吸收利用土壤有效氮库中的无机氮, 又大量吸收利用从土壤有机氮库中矿化出的矿化氮。因此, 要客观全面评价土壤氮素供应状况, 确定可行的供氮指标, 必须综合考虑土壤矿质氮和可矿化氮两部分。对旱地土壤, 土壤起始矿质氮主要是硝态氮, 铵态氮含量低而稳定, 而用淹水培养法测定可矿化氮时, 不包括硝态氮。盆栽试验中作物吸氮量同时受起始硝态氮和可矿化氮的影响, 难以准确评价淹水培养法是否能够有效估计土壤可矿化氮。因此, 为了准确评价在包括和不包括 SON 时淹水培养法在估计土壤供氮能力方面的作用和效果, 以淋洗起始硝态氮后的盆栽试验作物吸氮量为参比, 对其进行评价, 即仅评价土壤可矿化氮库的大小。盆栽试验作物吸氮量见表 4。从表 4 可知, 第一季小麦吸氮量变化在  $0.020\sim 0.057 \text{ g/pot}$ , 平均为  $0.038 \text{ g/pot}$ , 连续两季冬小麦和夏玉米总吸氮量变化在  $0.049\sim 0.138 \text{ g/pot}$ , 平均为  $0.095 \text{ g/pot}$ , 第一季和两季作物吸氮量分别占每盆铵态氮累积量的 15.4% 和 38.3%; 占  $\text{TSN}_c$  的 8.3% 和 20.6%, 占全氮的 2.0% 和 4.9%。本研究连续两季作物吸氮量所占矿化无机氮累积量的比例基本与付会芳等<sup>[15]</sup> 研究结果一致, 作物吸氮量大约等于矿化无机氮的 2/5。

以作物吸氮量作为参比进行相关分析, 是评价实验室测定可矿化氮指标优劣的有效手段。因此, 为了准确评价本试验中用淹水培养法获得的几种指标在反

表 4 经淋洗盆栽作物吸氮量及作物吸氮量占累积矿化氮和全氮的比例

Table 4 N uptake by crop and the percent of N uptake in cumulative mineralized N and total N

土样编号 Soil No.	吸氮量		吸氮量/铵态氮累积量		吸氮量/总溶解性氮累积量		吸氮量/总氮	
	N uptake (g/pot)		N uptake/ Cumulative NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (%)		N uptake/TSN <sub>C</sub> (%)		N uptake/TN (%)	
	小麦 Wheat	小麦玉米 Wheat & maize	小麦 Wheat	小麦玉米 Wheat & maize	小麦 Wheat	小麦玉米 Wheat & maize	小麦 Wheat	小麦玉米 Wheat & maize
1	0.057	0.138	21.6	52.3	12.9	31.2	3.7	9.0
3	0.027	0.068	13.5	34.0	7.7	19.4	2.9	7.3
6	0.031	0.067	14.2	30.6	7.3	15.9	2.0	4.4
7	0.041	0.091	20.5	45.5	10.7	23.8	2.2	4.8
9	0.031	0.073	14.4	34.0	7.5	17.8	1.6	3.8
11	0.020	0.049	13.0	31.1	8.2	19.6	1.3	3.2
13	0.051	0.133	15.3	40.0	8.5	22.2	1.7	4.4
17	0.039	0.101	13.7	35.4	6.8	17.6	1.7	4.4
22	0.046	0.136	15.8	46.6	7.8	23.2	1.6	4.6
25	0.034	0.095	12.1	33.7	5.58	15.30	1.2	3.5
平均 Mean	0.038	0.095	15.4	38.3	8.3	20.6	2.0	4.9

映土壤可矿化氮上的可靠性，与盆栽试验作物吸氮量进行相关分析，结果见表 5。其中 SON<sub>C</sub> 表示培养期间（即培养 217 d）水溶性有机氮累积量，TSN<sub>C</sub> 表示培养期间中水溶性氮累积量，TN 表示土壤全氮；N<sub>D</sub> 和 N<sub>R</sub> 分别表示易矿化和难矿化氮矿化势，N<sub>D</sub> 和 N<sub>R</sub> 又分不包括 SON 和包括 SON 两种情况。与作物吸氮量进行相关分析不包括表 4 中标 E 的相应结果。相关分析表明，只有培养期间铵态氮累积量与第一季作物吸氮量呈显著正相关（ $r=0.74^*$ ， $P=0.014$ ），其余指标均未达显著水平；各指标与两季作物总吸氮量的相关性明显提高，其中铵态氮累积量、TSN<sub>C</sub>、全氮、不包括及包括 SON 时的 N<sub>D</sub> 均与作物吸氮量达到极显著或显著水平，其中又以铵态氮累积量的相关系数最大，其次为包括 SON 时的 N<sub>D</sub> 及 TSN<sub>C</sub>。总体看，铵态氮累积量仍然是评价可矿化氮的较好指标，不仅适宜于

第一季作物，而且也适用于连续两季作物；SON<sub>C</sub> 不能单独作为反映可矿化氮指标，但用 N<sub>D</sub> 反映土壤可矿化氮潜势时，包括 SON 后更加准确；TSN<sub>C</sub> 在一定程度上也能够反映土壤可矿化氮，铵态氮累积量、TSN<sub>C</sub> 及 N<sub>D</sub> 在反映两季作物土壤可矿化氮时效果更好。

不同培养时间的矿化氮累积量在反映土壤可矿化氮时的效果不同。不同培养期间矿化氮累积量与作物吸氮量的相关分析见表 6。由表 6 可知，在任何培养期间铵态氮累积量与小麦和玉米两季作物总吸氮量相关性比单季小麦吸氮量的相关性高，说明单季小麦吸氮量不足以充分评价铵态氮累积量反映土壤可矿化氮的效果；包括 SON 后，任何培养期间矿化氮累积量与第一季作物吸氮量相关性减小，大部分不显著，但与两季作物吸氮量的相关系数显著增加，均达显著水平。

表 5 各供氮能力评价指标与盆栽试验作物吸氮量的相关分析

Table 5 Correlation analysis of N uptake by crop with different evaluation indexes of soil N-supplying

	铵态氮累积量 Cumulative NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TSN <sub>C</sub>	SON <sub>C</sub>	TN	不包括 SON 的矿化势		包括 SON 的矿化势	
					Potential without SON		Potential with SON	
					N <sub>D</sub>	N <sub>R</sub>	N <sub>D</sub>	N <sub>R</sub>
与小麦吸氮量相关系数 ( $r$ )	0.74*	0.58	0.42	0.47	0.48	0.76	0.58	0.67
Coefficient with N uptake by wheat								
置信度 Probability ( $P$ )	0.014	0.082	0.228	0.167	0.186	0.140	0.078	0.220
与小麦玉米吸氮量相关系数 ( $r$ )	0.84**	0.71*	0.57	0.63*	0.67*	0.79	0.72*	0.53
Coefficient with N uptake by wheat & maize								
置信度 Probability ( $P$ )	0.002	0.020	0.084	0.050	0.049	0.112	0.020	0.360

表 6 淋洗盆栽作物吸氮量与矿化氮累积量的相关系数

Table 6 Correlation coefficient of crop nitrogen uptake with cumulative mineralized nitrogen

培养时间 Incubation time (d)	不包括 SON Without SON		包括 SON With SON	
	小麦 Wheat	小麦玉米 Wheat & maize	小麦 Wheat	小麦玉米 Wheat & maize
4	0.70*	0.79**	0.71*	0.81**
7	0.65*	0.76**	0.61*	0.72*
14	0.64*	0.76**	0.62*	0.73*
21	0.64*	0.77**	0.59	0.73*
35	0.63*	0.77**	0.55	0.69*
49	0.62*	0.77**	0.54	0.69*
70	0.68*	0.80**	0.56	0.70*
91	0.68*	0.80**	0.56	0.69*
119	0.68*	0.81**	0.56	0.69*
147	0.69*	0.81**	0.56	0.69*
182	0.74**	0.84**	0.77**	0.86**
217	0.74**	0.85**	0.77**	0.86**

\*\*表示  $P < 0.01$ ; \* 表示  $P < 0.05$

\*\* Represents the significant difference at 0.01 levels; \* Represents the significant difference at 0.05 levels

这进一步说明, SON 比铵态氮的有效性差。以上结果进一步证明了包括 SON 后, 提取态可溶性氮(即包括 SON 的矿化氮累积量)能反映土壤更持久的供氮能力。虽然土壤氮素矿化过程经过有机氮转化为 SON 这一中间过程, 但 SON 仍然不是作物能吸收的主要氮素形态, 该组分需要经过进一步矿化转化为矿质态氮后才能被作物吸收利用。

### 3 讨论

植物吸收法<sup>[16]</sup>由早在 1923 年提出的幼苗吸收法逐步得到改进。目前常用的方法是无氮区(或不施氮盆栽试验)全生长期作物吸氮量法<sup>[17]</sup>, 其基本假设是在没有外源氮素供应的自然条件下, 作物吸氮量等于土壤矿化氮量与播种前后根层矿质氮变化之和。植物吸收法确定的土壤矿化氮量能够综合反映特定的土壤-作物-环境下各种因素的影响, 常被用来作为评价其它方法的参比标准方法。淹水培养法是在厌气条件下培养土壤并测定所释放的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。淹水培养法最早由 Waring 和 Bremner<sup>[18]</sup>于 1964 年提出, 他们在总结好气培养法的缺点及前人工作的基础上, 首次提出了 30℃ 两周淹水培养法。该法测定的结果与通气培养矿化氮之间高度相关。这个方法的优点在于不必考虑通气及严格的水分控制, 方法简单, 只需测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  即可。1966 年, Keeney 和 Bremner<sup>[19]</sup>进一步改进了淹

水培养法。Bremner 等<sup>[11,19]</sup>提出在淹水条件下, 40℃ 恒温进行培养, 这种方法有许多优点胜过好气培养法: ①只需要测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ; ②可以省略在培养过程中保持最适宜的水分和防止水分损失的问题; ③在给定期限内比好气条件有更多的氮素被矿化; ④由于不必关心硝化作用的最适温度, 可以使用较高的温度, 因此能更迅速的矿化。但它仍然存在一定缺陷, 即需要颇长的培养时间和专门的培养设备。之后, 通过不断改进, 逐步形成了淹水间歇浸提长期培养法<sup>[20]</sup>。

淹水培养法首先在稻田土壤上应用, 直到 1982 年美国土壤学会建议同时在旱地土壤上应用以后, 这种方法在旱地上的研究日益增多。后来许多土壤工作者采用淹水培养法测定旱地土壤的可矿化氮, 并对照盆栽试验、大田试验作物的吸氮量和产量, 均获得了很高的相关性<sup>[21]</sup>, 经过多年的试验研究, 淹水培养法已成为一个可靠测定土壤供氮能力的方法。本研究同样证明, 在培养期间矿化产生的铵态氮累积量仍然是评价可矿化氮的较好指标, 不仅适宜于第一季作物, 而且也适用于连续两季作物, 特别是与两季作物吸氮量的关系更加密切。但在过去的所有淹水培养中, 没有考虑所淋溶出的 SON。现在愈来愈多的研究发现, SON 在土壤供氮能力方面具有重要作用, 而且在培养期间随矿质氮被淋洗出。杨绒等<sup>[22]</sup>测得黄土高原钙积干润均腐土、土垫旱耕人为土和筒育干润均腐土的

SON 含量平均占可溶性总氮的 62.7%, 占全氮的 3.43%; 本研究发现, 对相应土壤类型, SON 平均占可溶性总氮的 28.8%, 占全氮的 2.4%。可见, 两次研究中, SON 占全氮的比例比较接近, 占可溶性总氮的比例差异较大, 产生这种现象的原因主要在于土壤全氮及 SON 相对稳定, 而溶解性矿质氮变化较大。总体上看, SON 是可溶性总氮的重要组成部分, 在研究土壤供氮能力时不应忽视这部分氮素, 但这部分氮素有效性快慢如何? 是在当季作物上有效还是在下季作物上有效? SON 是否可单独作为供氮指标? 这些方面是值得研究的问题, 但对这方面的研究很少。本研究表明, SON 不能单独作为反映可矿化氮的指标, 但用  $N_D$  反映土壤可矿化氮潜势时, 包括 SON 后更加准确; 可溶性总氮在一定程度上也能够反映土壤可矿化氮。在任何培养时期, 矿化氮累积量与小麦和玉米两季作物总吸氮量相关性比单季小麦吸氮量的相关性高, 说明单季小麦吸氮量还不足以用来评价矿化氮累积量反映土壤可矿化氮的效果; 包括 SON 后, 任何培养期间提取态可溶性氮与第一季作物吸氮量相关性减小, 大部分不显著, 但与两季作物吸氮量的相关性增加, 均达显著水平, 说明 SON 比铵态氮的有效性差。以上结果证明了包括 SON 后, 培养期间提取态可溶性氮利于反映土壤更持久的供氮能力, 同时也说明 SON 的有效性较缓慢。

## 4 结论

4.1 SON 与提取态可溶性总氮呈显著正相关关系 ( $r=0.89$ ,  $P<0.01$ ), 是溶解性氮库的重要组成部分; 但与全氮相关不显著。在浸提淹水培养浸提态氮素中, SON 占有较高比例, 几乎与铵态氮含量相当。

4.2 双组分氮素矿化模型拟合结果表明, 易矿化氮矿化势 ( $N_D$ ) 与全氮呈极显著正相关关系, 不包括 SON 时相关系数为 0.92, 包括 SON 时为 0.88, 均达极显著水平。考虑 SON 后易矿化氮量显著增加, 但矿化速率减小, 而难矿化氮矿化速率增加。这一结果揭示, SON 是重要的易矿化氮库, 但包括这一部分氮后, 其矿化速率减小, 即矿化难度相对增加。

4.3 淹水培养期间铵态氮累积量仍然是评价可矿化氮的较好指标, 不仅适宜于第一季作物, 而且也适用于连续两季作物; SON 累积量不能单独作为反映可矿化氮的指标, 但用  $N_D$  反映土壤可矿化氮潜势时, 包括 SON 后更加准确; 提取态可溶性氮在一定程度上也能够反映土壤可矿化氮, 铵态氮累积量、提取态可溶

性氮及  $N_D$  在反映两季作物土壤可矿化氮时效果更好。说明 SON 比铵态氮的有效性差, 在包括 SON 后提取态可溶性氮及  $N_D$  在反映土壤供氮持久性上效果更好。

## References

- [1] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, Goulding K W T, Fortune S, Gaunt J L, Poulton P R, Wakefield J A, Webster C P, Wilmer W S. Soluble organic nitrogen in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 374-387.
- [2] 周建斌, 陈竹君, 郑险峰. 土壤可溶性有机氮及其在氮素供应及转化中的作用. *土壤通报*, 2005, 36(2): 244-248.  
Zhou J B, Chen Z J, Zheng X F. Soluble organic nitrogen in soil and its roles in the supply and transformation of N. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(2): 244-248. (in Chinese)
- [3] 杨 绒, 周建斌, 赵满兴. 土壤中可溶性有机氮含量及其影响因素研究. *土壤通报*, 2007, 38(1): 15-18.  
Yang R, Zhou J B, Zhao M X. Contents of soluble organic nitrogen in soil and its influencing factors. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 15-18. (in Chinese)
- [4] Perakis S S, Hedin L O. Fluxes and fates of nitrogen in soil of an unpolluted old-growth temperate forest, southern Chile. *Ecology*, 2001, 82(8): 2245-2260.
- [5] Perakis S S, Hedin L O. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature*, 2002, 415: 416-419.
- [6] 黄银燕, 陈绍红, 杨 靖. 农业土壤中可溶性有机氮的研究. *安徽农业科学*, 2003, 31(4): 602-605.  
Huang Y Y, Chen S H, Yang J. Study on soluble organic nitrogen of farmland soil. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, 31(4): 602-605. (in Chinese)
- [7] 刘 艳, 周国逸, 刘菊秀. 陆地生态系统可溶性有机氮研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 573-577.  
Liu Y, Zhou G Y, Liu J X. Advances in studies on dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 573-577. (in Chinese)
- [8] Smith J L, Schnabel R R, McNeal B L, Campbell G S. Potential errors in the first-order model for estimating soil nitrogen mineralization potentials. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 996-1000.
- [9] Jones D L, Shannon D, Murphy D V, Farrar J. Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(5): 749-756.

- [10] 金发会, 李世清, 卢红玲, 李生秀. 石灰性土壤供氮能力几种生物测定方法的评价研究. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1422-1431.  
Jin F H, Li S Q, Lu H L, Li S X. Estimation of the biological methods on assessing soil nitrogen-supplying capacity in calcareous soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(7): 1422-1431. (in Chinese)
- [11] Keeney D R, Bremner J M. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agronomy Journal*, 1966, 58: 498-503.
- [12] 杨 绒, 赵满兴, 周建斌. 过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量的影响条件研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 107-111.  
Yang R, Zhao M X, Zhou J B. Effects of different conditions on the determination of total nitrogen in solution by persulfate oxidation method. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest (Natural Science Edition)*, 2005, 33(12): 107-111. (in Chinese)
- [13] Nuske A, Richter J. N-mineralization in löss-parabrownearthes: incubation experiments. *Plant and Soil*, 1981, 59: 237-247.
- [14] Dou Z X, Toth J D, Jabro J D, Fox R H, Fritton D D. Soil nitrogen mineralization during laboratory incubation: dynamics and model fitting. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 625-632.
- [15] 付会芳, 李生秀. 土壤氮素矿化与土壤供氮能力. II. 矿化氮量与作物吸氮量的关系. 西北农业大学学报, 1992, 20(增刊): 53-58.  
Fu H F, Li S X. Soil nitrogen mineralization and soil N-supplying capacities. II. The relationship between mineralized N and plant uptake N. *Acta Universitatis Agriculturalis Boreali-Occidentalis*, 1992(Suppl.): 53-58. (in Chinese)
- [16] 闫德智, 王德建. 土壤供氮能力研究方法进展. 土壤, 2005, 37(1): 20-24.  
Yan D Z, Wang D J. Methods for studying soil nitrogen supply capacity. *Soils*, 2005, 37(1): 20-24. (in Chinese)
- [17] 周鸣铮. 土壤肥力测定与测土施肥. 北京: 农业出版社, 1988: 96-106.  
Zhou M Z. *Measures of Soil Fertility and Fertilization According to Soil Test*. Beijing: Agricultural Press, 1988: 96-106. (in Chinese)
- [18] Warning S A, Bremner J M. Ammonium production in soil under water-logged conditions as an index of soil nitrogen availability. *Nature*, 1964, 201: 951-952.
- [19] Keeney D R, Bremner J M. A chemical index of soil nitrogen availability. *Nature*, 1966, 211: 892-893.
- [20] 付会芳, 李生秀. 土壤氮素矿化与土壤供氮能力. I. 旱地土壤氮素矿化两种培养方法之比较. 西北农业大学学报, 1992, 20(增刊): 48-52.  
Fu H F, Li S X. Soil nitrogen mineralization and soil N-supplying capacities. I. Comparison of two incubation methods for measuring dryland soil nitrogen mineralizations. *Acta Universitatis Agriculturalis Boreali-Occidentalis*, 1992, 20(Suppl.): 48-52. (in Chinese)
- [21] 叶优良, 李生秀. 石灰性土壤起始  $\text{NO}_3^-$ -N 对土壤供氮能力测定方法的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 310-317.  
Ye Y L, Li S X. Influence of initial nitrate-nitrogen on methods of measuring soil nitrogen supplying capacity in calcareous soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3): 310-317. (in Chinese)
- [22] 杨 绒, 严德翼, 周建斌, 汪文霞, 马勤安. 黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性. 生态学报, 2007, 27(4): 1397-1403.  
Yang R, Yan D Y, Zhou J B, Wang W X, Ma Q A. Soluble organic nitrogen (SON) in different soils on the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1397-1403. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)