

对间隙淋洗长期通气培养条件下黄土高原土壤供氮能力的评价

卢红玲^{1,2}, 李世清^{1,3*}, 金发会^{1,3}, 邵明安¹

(1 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; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采用间隙淋洗长期通气培养法, 通过对黄土高原物理化学性质差异较大的 10 种农田土样起始矿质氮、起始提取态总氮、起始可溶性有机氮, 以及培养期间淋洗矿质氮、淋洗总氮、可溶性有机氮含量及其与作物吸氮量关系的研究, 分析并评价黄土高原主要农田土壤氮素矿化能力以及包括和不包括培养淋洗可溶性有机氮对土壤供氮能力的影响。结果表明, 供试土样起始可溶性有机氮平均为 $N\ 23.9\ \text{mg/kg}$, 是起始提取态总氮的 28.8%, 土壤全氮的 2.4%。在通气培养淋洗总氮中, 可溶性有机氮所占比例不高, 经过 217 d 通气培养, 淋洗出的可溶性有机氮平均为 $N\ 28.8\ \text{mg/kg}$, 占淋洗总氮量的 19.8%。相关分析表明, 淋洗可溶性有机氮量与第 1 季作物吸氮量相关不显著, 但与连续 2 季作物总吸氮量显著相关。淋洗矿质氮、淋洗总氮与两季作物总吸氮量的相关系数明显高于与第一季作物吸氮量的相关系数; 与第一季作物吸氮量达显著相关水平, 与连续两季作物吸氮量达极显著相关水平。总体上看, 可溶性有机氮和土壤全氮、土壤微生物氮不能作为反映短期可矿化氮的指标; 间隙淋洗通气培养淋洗液中淋洗矿质氮、淋洗总氮是评价可矿化氮的较好指标, 不仅适宜于第一季作物, 而且也适用于对连续两季作物土壤供氮能力的评价。

关键词: 间隙淋洗长期通气培养; 可溶性有机氮; 氮素矿化; 土壤供氮能力

中图分类号: S153.6 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2008)06-1083-09

Evaluation of soil N-supplying capacity on the Loess Plateau under long-term alternate leaching aerobic incubation conditions

LU Hong-ling^{1,2}, LI Shi-qing^{1,3*}, JIN Fa-hui^{1,3}, SHAO Ming-an¹

(1 The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, and Ministry of Water Resources / Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The long-term alternate leaching aerobic incubation is the most important method for evaluating soil N supplying capacity. Initial mineral N (N_{\min}), extractable total soluble N and soluble organic nitrogen (SON), mineral N (MNL = $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4^+\text{-N}$), total soluble N (TNL = SON + MNL) and cumulative SON leached during aerobic incubation, and their correlations with crop N-uptake of 10 types of farmland soils with different physical and chemical properties on the Loess Plateau were investigated. Soil N mineralizable capability and effect of mineralized N with or without SON on soil N-supplying capacity was studied. The results showed that mean content of initial SON ($N\ 23.9\ \text{mg/kg}$) across 10 soils was 28.8% of initial total soluble nitrogen and 2.4% of total soil N. After 217d's aerobic leaching incubation, the mean cumulative SON content was $N\ 28.8\ \text{mg/kg}$, 19.8% of cumulative TNL. Correlation analysis results showed that

收稿日期: 2007-11-12 接受日期: 2008-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(90502006); 西北农林科技大学创新团队项目资助。

作者简介: 卢红玲(1979—), 女, 湖南宁乡人, 博士研究生, 主要从事土壤化学方面研究。E-mail: luhl-2003@163.com

* 通讯作者 Tel: 029-87016171, E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

cumulative SON had significant correlation with N-uptake of two successive season crops while no significant correlation with the first season crop. With or without SON, TNL and MNL were significantly correlated with crop N-uptake, and the correlation with N-uptake of two successive season crops was stronger than that with N-uptake of the first season crop. Furthermore, a significant correlation ($P < 0.01$) was observed between TNL, MNL and N-uptake of two successive season crops. In summary, MNL and TNL could be used as indices for potential mineralizable N, which are not only suitable for the first season crop but also suitable in evaluating soil N-supplying capacity for two successive season crops; while SON, total soil N and soil microbe N were not good indices for soil potential mineralizable N in short-term.

Key words: long-term alternate leaching aerobic incubation; nitrogen mineralization; soluble organic nitrogen; soil N-supplying capacity

土壤氮素矿化量不仅取决于有机氮含量及其组成,而且取决于矿化过程中的水、热、通气条件和微生物活性。35℃间隙淋洗通气培养法通过创造适于微生物作用的最佳水热条件,使有机氮在培养期间充分矿化成为作物可吸收利用的氮素,得到的矿化氮量与作物吸氮量具有较好的相关性,成为研究土壤供氮能力的常用方法^[1-2]。付会芳等^[3]采用此方法研究发现,作物吸氮量大约等于土壤矿化氮的2/5,等于土壤中起始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和作物生长期间矿化氮之和的2/3。前人研究发现,在培养试验中采用盐溶液淋洗模拟作物吸氮时,淋洗液中常包括一部分可溶性有机氮(Soluble organic N, SON),这部分氮是土壤有机氮的活跃组分之一^[4-5]。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^[6-8];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^[9-12]。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,而忽略了对土壤中SON及其变化规律的研究。Smith等^[4]指出,在用通气培养法估测可矿化氮时,如果不考虑淋洗出的SON,所得结果实质上是错误的。已有研究表明,土壤中SON库和无机氮库大小相近^[6],因此确定土壤中SON含量以及在有机氮矿化过程中对可矿化氮的贡献显得尤为重要。David等^[13]认为,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,SON在氮素矿化过程中具有重要地位。因此,要准确评价土壤有机氮矿化能力,不仅应测定培养期间可溶性矿质氮,而且应同时测定淋洗液中的SON^[4-5]。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,但考虑到SON的相关研究相对较少。为此,以具有代表性的黄土高原10种农田土壤为供试土壤,通过217 d间隙淋洗长期通气培养,研究在通气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,为准确测定和评价该地区土壤有机氮矿化能力提供一定科学依据。

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,采样深度为0—20 cm,采样时间自2005年6月底至7月初^[14]。每个采样点选定田块后,多点采集,组成混合土样。土样采回后迅速过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土壤微生物量氮等,供试土样基本理化性质见表1。

1.2 试验内容

1.2.1 通气培养 采用Stanford & Smith^[1-2]提出的间隙淋洗通气培养法。称取过2 mm孔筛风干土样15 g与粒径为1~2 mm的等量石英砂混合,加入少量去离子水,用玻璃棒搅拌使其形成良好粘结的土砂混合物,小心移入预先用玻璃棉垫好的50 mL聚丙烯淋洗管(一次性注射器)后,再将5 g石英砂铺在淋洗管上部,以免淋洗时土粒飞溅。装好后轻震几次,先用100 mL 0.01 mol/L CaCl_2 溶液分4次(每次25 mL)淋洗土壤中起始矿质氮,接着加入25 mL无氮营养液[0.002 mol/L $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.002 mol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.005 mol/L $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 0.0025 mol/L K_2SO_4],多余的无氮营养液在80 KPa负压下抽去后,用聚乙烯薄膜封住培养管顶端,薄膜上用针扎小孔以保证通气,然后置于温度为35℃恒温培养箱内培养,于培养4、7、14、21、35、49、70、91、119、147、182、217 d时分别进行淋洗, CaCl_2 淋洗液接收在100 mL容量瓶中,定容后测定溶液中的硝、铵态氮及SON含量,由此确定在培养期间土壤产生的矿化氮量。每个处理均重复3次。

表 1 供试土样基本理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of soils in the experiment

土样号 Soil No.	土壤 类型 Soil type	有机碳 OC (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	微生物量碳 B _C (mg/kg)	微生物量氮 B _N (mg/kg)	矿质氮 N _{min} (mg/kg)		可溶性 有机氮 SON(mg/kg)	有效磷 Avai. P (mg/kg)	CaCO ₃ (%)	pH (H ₂ O)
						NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N				
1	USE	6.56	0.82	168.3	36.9	76.0	7.5	27.9	27.1	4.31	8.0
2	USE	4.12	0.50	122.3	30.4	50.8	6.7	32.9	13.04	8.30	8.3
3	LOE	7.31	0.82	185.3	22.2	17.9	6.6	10.7	4.9	10.38	8.4
4	LOE	6.45	1.02	162.6	22.6	39.2	6.8	14.5	12.1	8.96	8.1
5	LOE	12.10	1.02	166.8	19.3	81.3	8.1	20.9	6.6	10.24	8.3
6	HUI	4.91	0.81	63.0	8.4	16.9	6.6	8.1	13.9	9.89	8.3
7	EO	14.84	1.64	442.4	59.8	24.7	10.0	22.1	17.0	12.50	8.3
8	EO	6.56	1.26	364.1	56.3	20.4	7.2	10.8	16.4	7.77	8.2
9	EO	9.52	1.58	318.4	38.2	139.9	8.2	57.4	190.7	9.50	7.8
10	EO	11.70	1.47	299.2	45.6	64.9	6.4	33.6	22.1	7.44	8.2

USE:干湿砂质新成土 Ust-sandiic entisols; LOE:黄土正常新成土 Los-orthic entisols; HUI:筒育干润均腐土 Hap-ustic isohumisols; EO:土垫旱耕人为土 Eum-orthosols.

1.2.2 盆栽试验 同时以 10 种土样进行盆栽试验。对供试土壤进行淋洗处理后,以冬小麦和夏玉米为供试作物,连续进行 2 茬作物盆栽试验,3 次重复,共 30 盆。盆栽试验在移动遮雨棚内进行。除降雨时用移动遮雨棚遮挡雨水及随雨水而来的氮素外,其余时间均将遮雨棚移开,有效防止了大气湿沉降氮的影响。

小麦盆栽试验:以内径 10.3 cm、高 20.0 cm 的硬质聚氯乙烯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(NO₃-N),直至土样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 NO₃-N 的目的在于排除石灰性土壤主要矿质氮,即 NO₃-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,供试冬小麦(*Triticum aestivum* L.)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他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 P₂O₅ 确定。作物生长期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。盆栽小麦于 2006 年 5 月 18 日作物成熟期收获地上部分。收获后立即烘干,称重,分析地上部氮素含量。

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(*Zea Mays* L.)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。

1.3 测定项目与方法

提取的矿质氮(硝、铵态氮):采用连续流动分析仪(德国布朗卢比公司,AA3 型)测定。提取的可溶性总氮(矿质氮+可溶性有机氮):采用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度计法测定^[15],其中氧化剂为 0.15 mol/L 的 NaOH(西安化学试剂厂)和 3% 的 K₂S₂O₈(上海爱建德固赛引发剂有限公司)混合液,样品与氧化剂等体积混合,在高压锅中于 123℃ 下氧化 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。淋洗液中可溶性有机氮:即为淋洗总氮与矿质氮含量之差。试验中所用试剂均为分析纯。

为了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 N 0、1、2、4、6、8、10 mg/L 的硝酸钾和硫酸铵标准溶液 10 mL,2 次重复,采用碱性过硫酸钾氧化法在 123℃ 下氧化 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。结果发现 2 种方法测得 2 组数据间回归方程为 $y = 1.020x - 0.038$ (x 为 AA3 测定的硝态氮浓度, y 为连续流动分析仪测定的硝态

氮浓度),相关系数为 0.99($n = 28$),对 2 组数据用 SAS 统计软件进行方差分析发现, P 值为 0.97,表明 2 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提取态总氮与将该溶液硝化后采用 AA3 测定结果一致。

对试验结果采用 SAS 和 EXCEL2007 软件进行相关性分析和方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同土样培养前起始水溶性氮库的差异

从表 1 可知,SON 含量以 6 号筒育干润均腐土最低,为 8.1 mg/kg,以 9 号菜地土垫旱耕人为土最高,为 57.4 mg/kg,供试土壤平均 SON 为 23.9 mg/kg。起始矿质氮(N_{\min})含量也以 6 号土最低,为 23.4 mg/kg,9 号土最高,为 148.1 mg/kg,供试土壤平均为 60.6 mg/kg。起始 SON 是可溶性总氮的 28.8%(18.0%~38.9%),是土壤全氮的 2.4%(0.9%~6.6%)。相关分析发现,SON 与初始提取态总氮(N_{\min} 与 SON 之和)和全氮的相关系数分别为 0.89($P < 0.01$)和 0.38($P > 0.05$),表明 SON 与初始提取态总氮呈极显著相关,是其重要组成部分;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及土壤中是否施有机肥等有关。从黄土高原北部到南部,尽管全氮呈增加趋势,但 SON 和 N_{\min} 的变化缺乏规律性;9 号菜地土垫旱耕人为土由于大量施用有机肥,从而导致 SON 含量最高;而其他土壤近年几乎没有施用过有机肥。

2.2 不同土样有机氮矿化过程及矿化氮累积量的差异

通气培养创造了有利于硝化细菌的活动条件,因此土壤中有机氮在经微生物作用转化为能被作物吸收的硝、铵态氮,以硝态氮为主。用间隙淋洗长期通气培养法对黄土高原 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,矿化产物硝、铵态氮(矿化氮)累积量(mg/kg)为纵坐标作图,获得不包括 SON 的矿化曲线(图 1a);将矿化产物硝、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 1b)。

图 1a 看出,不同类型土壤有机氮矿化容量存在显著差异($F = 3.57$, $P = 0.03$),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,其相应平均值为 141.4(a)、113.7(ab)、94.6(ab)和 57.0 mg/kg(b) (不同字母表示差异达 0.05 显著水平)。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;35~182 d 为稳定矿化阶段;182 d 后形成的硝、铵态氮很少,矿化速率下降,为缓慢矿化阶段。经过 217 d 培养,硝、铵态氮累积量是全氮的 7.0%~17.7%(平均为 10.4%),与全氮的相关系数为 0.61($P = 0.06$)。在土样起始矿质氮中,硝态氮占 71.2%~94.5%(平均 87.8%),在淋洗液中,硝态氮占矿质氮比例有所减少,为 46.6~86.2%(平均 73.4%)。

包括 SON 后(图 1b),矿化氮累积量与全氮的相关性增加,达显著水平,其相关系数为 0.67($P = 0.03$)。矿化氮累积量是全氮的 8.0%~21.3%,平均 13.0%,矿化氮占全氮比例比不包括 SON 增加 2.6%。对比图 1a 和 b 发现,考虑 SON 后并没有改变不同类型土壤氮矿化容量的差异顺序,氮矿化容量仍存在显著差异($F = 4.93$, $P < 0.01$),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。其相应平均值分别为 181.9(a)、138.5(a)、117.4(ab)和 64.5 mg/kg(b) (不同字母表示差异达 0.05 显著水平),仍然以土垫旱耕人为土最高,筒育干润均腐土最低。与图 1a 不同的是,在包括 SON 后,培养 182 d 后,矿化速率没有明显减缓趋势。

对图 1 中矿化曲线求导,可获得氮素矿化速率 [mg/(kg·d)] 随时间的变化曲线(图 2)。从图 2a 看出,培养前 35 d 为矿化速率急剧下降阶段,除 9 号菜地土垫旱耕人为土外,在此阶段矿化速率从 1.48~3.95 mg/(kg·d) 降到 0.30~0.74 mg/(kg·d),培养 182 d 后矿化速率下降至平均 0.05 mg/(kg·d)。同样,包括 SON 的矿化速率在前 35 d 下降迅速(图 2b),从 4.53~1.66 mg/(kg·d) 降到 0.30~0.85 mg/(kg·d),培养 35 d 后矿化速率基本稳定。从图 1 和图 2 可以看出,9 号菜地土垫旱耕人为土氮矿化容量和矿化速率远高于其他土样:不论包括 SON 与否,其 217 d 累积矿化氮是其他 9 个土样平均值的 2 倍;培养前 70 d 的矿化速率常数是其他土样的 2~3 倍,但到培养后期,矿化速率与其他土样相近,这可能与 9 号菜地土壤大量施用易矿化有机肥有关。

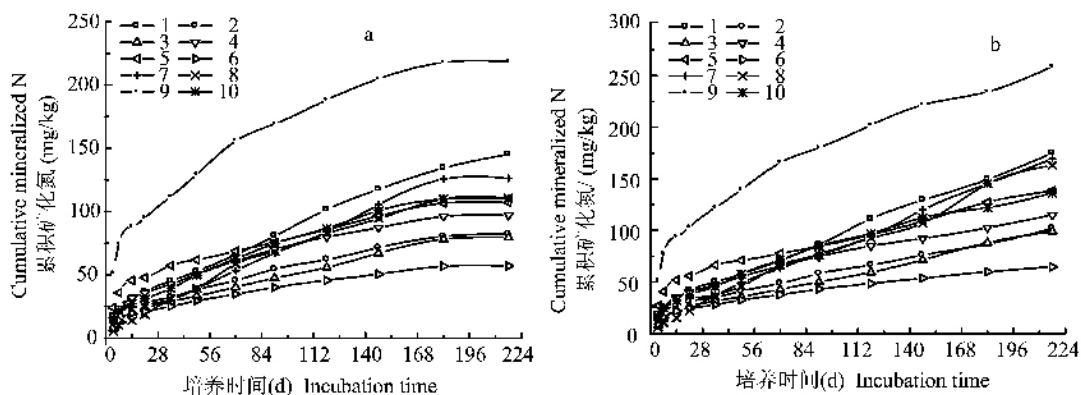


图1 通气培养 217 d 的矿化氮累积矿化曲线 (a :不包括 SON ; b :包括 SON)

Fig.1 Curves of cumulative mineralized nitrogen of 217 d aerobic incubation (a : without SON ; b : with SON)

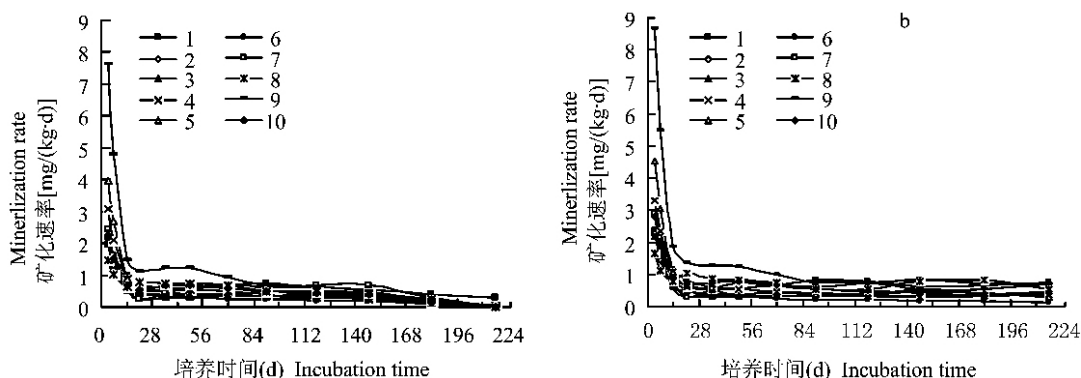


图2 通气培养 217d 的土壤氮素矿化速率曲线 (a :不包括 SON ; b :包括 SON)

Fig.2 Curves of mineralization rate of 217d aerobic incubation (a : without SON ; b : with SON)

经过 217 d 的培养,10 个土样平均淋洗矿质氮 (MNL)和淋洗总氮 (TNL)分别为 113.4 和 142.1 mg/kg,分别占土壤全氮 (TN)的 10.9%和 13.6%(表 2)。从土壤类型平均看,干湿砂质新成土、黄土正常新成土、筒育干润均腐土和土垫旱耕人为土淋洗矿质氮累积量分别为土壤全氮的 17.1%、9.9%、7.0%和 9.5%;淋洗总氮分别为土壤全氮的 20.9%、12.3%、8.0%和 12.2%。217 d 通气培养淋洗的 SON 累积量 (Cumulative SON leached, SON_C) 平均 28.8 mg/kg,占淋洗总氮的 11.6%~32.2%,平均 19.8%。干湿砂质新成土、黄土正常新成土、筒育干润均腐土和土垫旱耕人为土 SON_C 分别为 24.8、22.8、7.5 和 40.5 mg/kg,是土壤全氮的 3.8%、2.4%、0.9%和 2.8%。在这 4 类土壤中,淋洗矿质氮、淋洗总氮和 SON_C 均以土垫旱耕人为土最高,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 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矿质氮,又大量吸收利用从土壤有机氮库中矿化出的矿质氮。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。起始矿质氮容易确定,关键是准确评价可矿化氮。旱地土壤起始矿质氮主要为硝态氮,铵态氮含量低而稳定,用间隙淋洗通气培养法测定可矿化氮时,仍以硝态氮为主。盆栽试验中作物吸氮量同时受起始硝态氮和可矿化氮影响,难以准确评价间隙淋洗通气培养法是否能够有效估计旱地土壤可矿化氮。因此,为准确评价在包括和不包括 SON 时间隙淋洗通气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,作物吸氮量及其占累积矿化氮和土壤全氮的比例。从表 3 可知,第一季小麦吸氮量变化在 0.020~0.057 g/pot,平均为 0.038 g/pot,连续两季冬小麦和夏玉米总吸氮量变化在 0.049~0.138 g/pot,平均为 0.095 g/pot。第一季和连续两季作物吸氮量

表 2 间隙淋洗通气培养 217d 不同土样的淋洗溶解性氮

Table 2 Cumulative leached soluble nitrogen of 217d alternative leaching aerobic incubation

土样编号 Soil No.	矿质态氮 累积量 MNL (mg/kg)	溶解总氮 累积量 TNL (mg/kg)	可溶性有机氮 累积量 SONC (mg/kg)	SON 所占 淋洗总氮比例 SONC/TNL (%)	淋洗溶解性氮占 土壤全氮比例(%) Percentage		
					MNL/TN	TNL/TN	SON _c /TN
1	145.1 b	175.1 b	29.9	17.1	17.7	21.3	3.7
2	82.3 ef	101.9 de	19.6	19.3	16.5	20.4	3.9
3	79.6 fg	99.0 ef	19.4	19.6	9.7	12.1	2.4
4	97.0 cd	115.0 cd	18.0	15.7	9.5	11.3	1.8
5	107.2 bc	138.2 b	31.0	22.4	10.5	13.5	3.0
6	57.0 g	64.5 f	7.5	11.6	7.0	8.0	0.9
7	126.5 bed	169.5 bc	43.0	25.4	7.7	10.3	2.6
8	110.6 de	163.2 bc	52.6	32.2	8.8	13.0	4.2
9	218.3 a	258.9 a	40.6	15.7	13.8	16.4	2.6
10	110.3 bed	136.2 bc	25.9	19.0	7.5	9.3	1.8
平均值 Avg.	113.4	142.1	28.8	19.8	10.9	13.6	2.7
标准差 SD	44.5	54.0	13.6	5.8	3.8	4.5	1.0

注 (Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column means significant at 5% level.

表 3 经淋洗盆栽作物吸氮量及其占累积矿化氮和全氮的比例

Table 3 Crop N uptake and the percentage of N uptake in cumulative mineralized N and total soil N

土样编号 Soil No.	作物吸氮量 N uptake (g/pot)		作物吸氮量/淋洗矿质氮 N uptake/MNL (%)		作物吸氮量/淋洗总氮 N uptake/TNL (%)		作物吸氮量/土壤全氮 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	21.1	51.0	17.5	42.3	3.7	9.0
2	0.027	0.068	17.5	44.1	14.1	35.6	2.9	7.3
3	0.031	0.067	20.9	45.2	16.8	36.3	2.0	4.4
4	0.041	0.091	22.7	50.5	19.2	42.6	2.2	4.8
5	0.031	0.073	15.6	36.6	12.1	28.4	1.6	3.8
6	0.020	0.049	19.1	45.8	16.9	40.5	1.3	3.2
7	0.051	0.133	22.0	57.3	16.4	42.8	1.7	4.4
8	0.039	0.101	19.2	49.7	13.0	33.7	1.7	4.4
9	0.046	0.136	11.3	33.4	9.5	28.2	1.6	4.6
10	0.034	0.095	16.6	46.4	13.4	37.5	1.2	3.5
平均 Avg.	0.038	0.095	18.6	46.0	14.9	36.8	2.0	4.9
标准差 SD	0.011	0.032	3.5	7.0	2.9	5.5	0.8	1.8

分别占每盆淋洗矿质氮的 18.6% 和 46.0% ; 占淋洗总氮的 14.9% 和 36.8% , 是土壤全氮的 2.0% 和 4.9% 。本研究连续两季作物吸氮量所占矿质氮累积量的比例基本与付会芳等研究结果一致^[3] , 作物吸氮量大约等于间隙淋洗长期通气培养期间累积矿质氮的 2/5。

为了准确评价本试验中用间隙淋洗通气培养法

获得的几种指标在反映土壤可矿化氮上的可靠性, 将土样全氮、初始矿质氮、提取总氮、可溶性有机氮 SON、微生物量氮和培养期间淋洗的矿质氮、淋洗总氮、淋洗可溶性有机氮 SON_c 与盆栽试验作物吸氮量进行相关分析。结果(表 4)表明, 全氮与两季作物吸氮量显著相关, 微生物量氮与第一季作物相关性接近显著水平, 与连续两季作物吸氮量达显著正

表 4 各供氮能力评价指标与盆栽试验作物吸氮量的相关分析(r)

Table 4 Correlation analysis of crop N uptake with different evaluation indices of soil N-supplying capacity

项目 Item	土壤全氮 TN	初始矿质氮 Initial mineral N	初始提取总氮 Initial total soluble N	初始 SON Initial SON	微生物量氮 Microbe N	淋洗矿质氮 Mineral N leached	淋洗总氮 Total N leached	淋洗 SON SON leached
小麦吸氮量 Wheat N uptake	0.48 (0.43)	0.34 (0.25)	0.35 (0.26)	0.34 (0.54)	0.63 (0.63)	0.70* (0.91**)	0.73* (0.86**)	0.61 (0.58)
小麦玉米吸氮量 Wheat and Maize N uptake	0.64* (0.55)	0.49 (0.25)	0.51 (0.29)	0.24 (0.34)	0.72* (0.76*)	0.83** (0.93**)	0.87** (0.91**)	0.70* (0.67*)

注(Note): 括号中为删除 9 号土样的相关分析结果 Values in parenthesis were correlation coefficients without using No. 9 soil.

相关,与有关报道^[14,16]一致;培养前土样的提取态氮与作物吸氮量均无显著相关关系,主要是因为盆栽试验的土样经过预先淋洗处理已提取水溶性氮,导致这部分氮对后来的盆栽作物吸氮量没有影响。培养过程中的淋洗态氮与作物吸氮量的相关性显著提高,除淋洗 SON 与第一季作物吸氮量相关不显著外,淋洗矿质氮、淋洗总氮均与第一季、连续两季作物吸氮量达显著或者极显著相关性;各指标与两季作物总吸氮量的相关性明显提高,其中培养期间淋洗矿质氮、淋洗总氮与连续两季作物吸氮量达到极显著相关。总体上看,淋洗 SON 和土壤全氮不能作为反映短期可矿化氮的指标;培养期间淋洗矿质氮、淋洗总氮是评价可矿化氮的较好指标,不仅适宜于第一季作物,而且也适用于对连续两季作物土壤供氮能力的评价。

从表 1 和图 1、2 可知,9 号杨凌菜地土样初始硝态氮和 SON 含量较高,其矿化容量、矿化速率亦远高于其他土样。因此,同时进行了包括 9 号土样和除去 9 号土样时各供氮指标与作物吸氮量的相关分析。结果表明,除去 9 号土样后,作物吸氮量与培养期间获得的淋洗矿质氮、淋洗总氮等指标相关性明显提高,均达极显著相关水平(表 4)。9 号土样对以上相关系数影响的主要原因可能在于:进行盆栽试验淋洗硝态氮时,9 号土样中大量 SON 同时被淋洗,降低了盆栽试验期间有机氮矿化量,从而对作物吸氮量的增加相对有限;而其他土样初始 SON 含量不高,因而对盆栽试验期间土壤有机氮矿化量及作物吸氮量影响相对较小。同时 9 号土样中过量的有效磷对盆栽试验作物硝态氮吸收产生一定的颀颀作用。

不同培养期间矿化氮累积量与作物吸氮量的相关分析(表 5)表明,不同培养时间矿化氮累积量在

反映土壤可矿化氮时的效果不同。在任何培养期间硝铵态氮累积量与小麦和玉米两季作物总吸氮量的相关性比与第一季小麦吸氮量的相关性高,说明第一季小麦吸氮量不足以充分评价培养期间矿质氮累积量反映土壤可矿化氮的效果。包括 SON 后,培养期间矿化氮累积量与作物吸氮量相关性显著程度没有变化,在培养 182 d 后与第一季作物吸氮量、培养 91 d 后与连续两季作物吸氮量的相关性才达显著水平,表明包括 SON 后的短期通气培养不能用来预报土壤供氮能力;也进一步说明了矿化产生的 SON 对作物的有效性比矿质氮差。SON 虽然占淋洗液中可

表 5 作物吸氮量与矿化氮累积量的相关系数

Table 5 Correlation coefficient of crop nitrogen uptake with cumulative mineralized nitrogen

培养期 Incubation period (d)	不包括 SON Coefficient without SON		包括 SON Coefficient with SON	
	小麦 Wheat	小麦 + 玉米 Wheat & Maize	小麦 Wheat	小麦 + 玉米 Wheat & Maize
0—4	0.30	0.46	0.30	0.46
0—7	0.28	0.44	0.27	0.43
0—14	0.29	0.43	0.31	0.45
0—21	0.31	0.46	0.33	0.48
0—35	0.32	0.47	0.34	0.49
0—49	0.35	0.52	0.38	0.55
0—70	0.42	0.59	0.44	0.61
0—91	0.48	0.65*	0.49	0.66*
0—119	0.56	0.71*	0.57	0.73*
0—147	0.61	0.77**	0.63	0.79**
0—182	0.67*	0.81**	0.69*	0.83**
0—217	0.70*	0.83**	0.73*	0.86**

注(Note): *, ** 分别表示差异达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平。

*, ** represents significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

溶性总氮的 1/5,但对作物特别是第一季小麦吸氮量的影响并不大,必须经过进一步转化后才能被作物有效吸收利用。

3 讨论

植物吸收法^[17]评价土壤供氮能力由早在 1923 年提出的幼苗吸收法逐步得到改进。目前常用的方法是以无氮区(或不施氮盆栽试验)全生长期作物吸氮量为参比^[18],其基本假设是在没有外源氮素供应的自然条件下,作物吸收氮量等于土壤矿化氮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在特定土壤、作物、环境下各种因素的综合影响,常被用来作为评价其他实验室测定方法的参比标准方法。

有效氮指在根区内易被植物根系吸收的化学形态氮,它在土壤供氮过程中占有重要地位。农业生产中,有效氮主要来自肥料、生物固氮以及由作物残茬和土壤有机质中有机氮矿化而产生的矿质氮。在大部分土壤和气候条件下,有相当数量的土壤有机氮在作物生长期间被矿化。

Smith 等^[4]等选择 0.01 和 0.05 mol/L 两种浓度、80 和 100 mL 两种体积的 CaCl₂ 淋洗培养土样,发现体积为 100 mL 浓度为 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 溶液淋洗矿质氮和 SON 的效果最佳;另有研究认为,35℃好氧微生物活性最佳。巨晓棠等^[5]亦发现,35℃和 20℃通气培养产生的硝铵态氮和 SON 中,硝态氮的含量对温度最敏感,其次为 SON,在两种温度下铵态氮的产生量差异不大。

付会芳等^[3]采用 35℃ 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 溶液间隙淋洗通气培养法,获得不同培养期间的累积矿化氮。与盆栽作物吸氮量进行对比,发现培养 3d 和 10d 的累积矿化氮与盆栽黑麦草和田间小麦吸氮量显著正相关,10 d 后随淋洗次数的增加,相关性下降。而本研究中发现,随培养时间的延长,累积矿化氮与作物吸氮量的相关性增加,产生这种区别的原因是付会芳等在盆栽和田间种植作物前未除去土壤的初始矿质氮,主要是硝态氮。硝态氮作为速效氮很快被作物吸收,从而作物吸氮量与前期矿化氮相关性高;而本试验中盆栽作物种植前进行了淋洗硝态氮的前处理除去了初始硝态氮对作物吸氮量的影响。李生秀^[19]亦曾报道,作物吸氮量与土壤初始硝态氮有很好的-一致性。由此可知,本试验中以淋洗土壤起始硝态氮后作物吸氮量作为对照能更准确地反映土壤有机氮矿化能力。

Smith 等^[4]用华盛顿 2 个农地偏酸性土壤试验得出,0.01 mol/L 的 CaCl₂ 溶液浸提土样初始 SON 为 13.3 ± 0.7 mg/kg,11 周的间隙淋洗通气培养淋洗 SON 为 45.3 ± 13.2 mg/kg,培养期间淋洗 SON 是淋洗总氮的(41.5 ± 11.1)%,是土壤全氮的(7.6 ± 3.4)%。巨晓棠等^[5]以中国北方长期不同培肥定位试验偏碱性土壤为研究对象,采用间隙淋洗通气培养法培养 19 周,其中未施肥土壤培养期间共淋洗 SON 平均 8.5 ± 0.8 mg/kg,是淋洗总氮的(13.4 ± 4.9)%,是土壤全氮的(0.4 ± 0.1)%。本研究中,土样初始 SON 为 23.9 ± 7.5 mg/kg,31 周培养淋洗 SON 为 28.8 ± 6.8 mg/kg,培养期间淋洗 SON 是淋洗总氮的(19.8 ± 2.9)%,土壤全氮的(2.7 ± 0.5)%。若除去施用有机肥的 9 号菜地土样,则初始 SON 和培养期间淋洗 SON 为 20.2 ± 4.9 mg/kg 和 25.9 ± 6.9 mg/kg,淋洗 SON 占淋洗总氮和土壤全氮的比例分别为(20.3 ± 3.0)%和(2.7 ± 0.6)%。对比可知,Smith 等^[4]所用偏酸性土样培养期间淋洗的 SON 含量较高,占淋洗总氮比例也比国内北方偏碱性土样高;而本研究中 SON 淋洗量比巨晓棠等^[5]所研究土样稍高,但淋洗出的 SON 占淋洗总氮的比例较接近。

本研究同时揭示,在采用 Stanford 等提出的间隙淋洗通气培养法估计黄土高原石灰性土壤供氮能力时,以培养期间累积的矿化氮评价土壤可矿化氮,可以不考虑培养期间淋洗出的 SON,这一结果与 Smith 等^[4]的研究有所不同。其原因可能与黄土高原石灰性土壤培养期间可浸取的 SON 远低于欧洲土壤有关,但这一看法仍需进一步研究。

4 结论

1) 间隙淋洗通气培养 217 d 淋洗液中累积的 SON 虽然占可溶性总氮的 1/5,但对作物特别是第一季小麦吸氮量的影响并不大,表明 SON 不是作物能利用的主要有效氮素形态。

2) 培养期间淋洗 SON 累积量与第一季作物吸氮量相关性不显著,但与连续两季作物吸氮量显著相关。而培养期间淋洗总氮、淋洗矿质氮与第一季作物吸氮量达显著相关水平,与连续两季作物吸氮量达极显著相关;各指标与两季作物总吸氮量的相关系数明显高于与第一季作物的相关系数。总体上看,SON 和土壤全氮不能作为反映短期可矿化氮的指标;间隙淋洗长期通气培养获得的淋洗矿质氮和淋洗总氮是评价可矿化氮的较好指标,不仅适宜于

第一季作物,而且也适于对连续两季作物土壤供氮能力进行评价。

参考文献:

- [1] Stanford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1972, 36: 465-472.
- [2] Stanford G, Legg J O, Smith S J. Soil nitrogen availability evaluation based in nitrogen mineralization potential of soils and uptake of labeled nitrogen by plants[J]. Plant Soil, 1973, 39: 113-124.
- [3] 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[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1992, (S1): 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 [J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.), 1992, (S1): 53-58.
- [4] Smith J L, Schnabel R R, McNeal B L *et al.* Potential errors in the first-order model for estimating soil nitrogen mineralization potentials [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 996-1000.
- [5] 巨晓棠, 边举秀, 刘学军, 等. 旱地土壤氮素矿化参数与氮素形态的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(3): 251-259.
Ju X T, Bian X J, Liu X J *et al.* Relationship between soil nitrogen mineralization parameter with several nitrogen forms[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2000, 6(3): 251-259.
- [6] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A *et al.* Soluble organic nitrogen in agricultural soil[J]. Biol. Fert. Soils, 2000, 30: 374-387.
- [7] 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[J]. 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[J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(2): 244-248.
- [8] 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[J]. 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[J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(1): 15-18.
- [9] Steven S. Perakis, Lars O Hedin. Fluxes and fates of nitrogen in soil of an unpolluted old-growth temperate forest[J]. Ecology, 2001, 82(8): 2245-2260.
- [10] Perakis S S, Hedin L O. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds[J]. Nature, 2002, 415: 416-419.
- [11] 黄银燕, 陈绍红, 杨靖. 农业土壤中可溶性有机氮的研究[J]. 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[J]. J. Anhui Agric. Sci., 2003, 31(4): 602-605.
- [12] 刘艳, 周国逸, 刘菊秀. 陆地生态系统可溶性有机氮研究进展[J]. 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[J]. Chin. J. Ecol., 2005, 24(5): 573-577.
- [13] David L J, David S, Daniel V Murphy *et al.* Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils[J]. Soil Biol. Biochem., 2004, 36(5): 749-756.
- [14] 金发会, 李世清, 卢红玲, 等. 石灰性土壤供氮能力几种生物测定方法的评价研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1422-1431.
Jin F H, Li S Q, Lu H L *et al.* Estimation of biological methods on assessing soil nitroge-supplying capacity in calcareous soil[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(7): 1422-1431.
- [15] 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[J]. 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 different of total nitrogen in solution by persulfate oxidation method [J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.), 2005, 33(12): 107-111.
- [16] 王成, 王钊英, 李世清, 等. 作物生长期间土壤可矿化氮的变化规律研究[J]. 新疆农业科学, 2003, 40(5): 320-323.
Wang C, Wang Z Y, Li S Q *et al.* Study on the variety of mineralize-nitrogen during the crop growing in the soil[J]. Xinjiang Agric. Sci., 2003, 40(5): 320-323.
- [17] 闫德智, 王德建. 土壤供氮能力研究方法进展[J]. 土壤, 2005, 37(1): 20-24.
Yan D Z, Wang D J. Methods for studying soil nitrogen supply capacity[J]. Soils, 2005, 37(1): 20-24.
- [18] 周鸣铮. 土壤肥力测定与测土施肥[M]. 北京: 农业出版社, 1988. 96-106.
Zhou M Z. Measures of soil fertility and fertilization according to soil tes[M]. Beijing: Agricultural Press, 1988. 96-106.
- [19] 李生秀. 关于土壤供氮指标的研究 I. 对几种测定土壤供氮能力方法的评价[J]. 土壤学报, 1990, 27(3): 233-240.
Li S X. Studies on the indices of soil nitrogen supplying capacities: I. Evaluation of some methods for determining mineralized and mineralizable nitrogen in soils[J]. Acta Pedol. Sin., 1990, 27(3): 233-240.