

烟田土壤测土施氮方法优化研究^①

郇威威^{1,2}, 徐勇贤³, 王力^{3*}, 钱玘³, 王玉洁^{1,2,4}, 王一柳^{1,2}, 陈小琴^{1,2}, 卢殿君^{1,2}, 王火焰^{1,2*}, 周健民^{1,2}

(1 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 中国科学院大学南京学院, 南京 211135; 3 云南省烟草公司玉溪市澄江分公司, 云南澄江 652500; 4 河南省烟草公司洛阳市公司, 河南洛阳 471000)

摘要: 本文以对氮素供应极其敏感的烟叶为对象, 选用全国多种植烟土壤, 通过培养试验、盆栽试验并结合田间试验结果, 对烟田土壤测土施氮方法进行优化。结果表明, 有氧培养条件下, 土壤铵态氮增加量与 pH 呈显著负相关, 而硝态氮增加量则与 pH 呈显著正相关; 总无机氮的增加量主要与土壤氮基础肥力指标呈正相关。增温和延长培养时间均有利于厌氧条件下土壤铵态氮的积累, 将厌氧培养时损失的初始硝态氮考虑在内, 厌氧培养与有氧培养反映的土壤供氮能力总体较为一致。一定条件下, 通过培养方法获得的土壤无机氮较单一基础土壤氮指标更能准确反映土壤的供氮能力。采用逐步回归的方法, 获得了基于碱解氮和无机氮两个参数的烟叶吸氮量公式: 烟叶吸氮量(mg/kg)=37+0.3×碱解氮+0.7×无机氮, 该公式的精度优于其他所有单一土壤氮指标。通过与田间当季适宜施氮量的比较分析, 提出了田间烟叶测土施氮的简化公式: 烟田推荐施氮量(kg/hm²)=135-1.07×土壤基础供氮指标, 其中土壤基础供氮指标=0.3×碱解氮+0.7×无机氮。该公式有望为未来烟田测土施氮提供有效的方法依据。

关键词: 植烟土壤; 测土施氮方法; 碱解氮; 无机氮; 施氮量

中图分类号: S146 **文献标志码:** A

Optimization of Soil Testing for Nitrogen Fertilization in Tobacco Fields

HUAN Weiwei^{1,2}, XU Yongxian³, WANG Li^{3*}, QIAN Pi³, WANG Yujie^{1,2,4}, WANG Yiliu^{1,2}, CHEN Xiaoqin^{1,2}, LU Dianjun^{1,2}, WANG Huoyan^{1,2*}, ZHOU Jianmin^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China; 3 Chengjiang Branch, Yuxi City Company, Yunnan Tobacco Company, Chengjiang, Yunnan 652500, China; 4 Luoyang City Company, Henan Tobacco Company, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: This study focused on tobacco plant, which is highly sensitive to N supply, and utilized various tobacco-growing soils from across the country. Through incubation experiments, pot and field experiments, a soil testing method for N fertilization in tobacco fields was optimized. The results showed that under aerobic conditions, the increase in soil ammonium nitrogen was significantly negatively correlated with pH, while nitrate nitrogen was significantly positively correlated with pH. The increase in total inorganic nitrogen was primarily positively correlated with multiple soil N availability indicators. Both increasing temperature and extending incubation time favored the accumulation of ammonium nitrogen under anaerobic conditions. When accounting for initial nitrate nitrogen lost during anaerobic incubation, the anaerobic and aerobic methods generally reflected consistent soil N supply capacities. Inorganic nitrogen obtained under specific incubation conditions more accurately reflected the N supply capacity of different soils compared to single common N indicators. Using stepwise regression, a formula for tobacco leaf N uptake based on alkali-hydrolyzable nitrogen and inorganic nitrogen was derived: Tobacco leaf N uptake (mg/kg soil)=37+0.3×alkali-hydrolyzable nitrogen+0.7×inorganic nitrogen. This formula outperformed all other single soil N indicators. By comparing with the appropriate field N application rates, a simplified formula for soil testing-based N fertilization in tobacco fields was proposed: Recommended N application rate for tobacco fields (kg/hm²)=135-1.07×soil baseline N supply indicator,

①基金项目: 云南省烟草公司科技计划一般项目(yxyc2024014)和中国烟草总公司河南省公司重点科技项目(2021410000240017)资助。

* 通信作者(hywang@issas.ac.cn; 6131748@qq.com)

作者简介: 郇威威(1991—), 男, 河南兰考人, 博士研究生, 主要从事烟草养分管理方面研究。E-mail: huanweiwei@issas.ac.cn

where soil baseline N supply indicator=0.3×alkali-hydrolyzable nitrogen+0.7×inorganic nitrogen. This formula is expected to provide an effective methodological basis for future soil testing-based N fertilization in tobacco fields.

Key words: Tobacco-growing soil; Soil testing for nitrogen fertilization; Alkali-hydrolyzable nitrogen; Inorganic nitrogen; Nitrogen application rate

现代农业生产中,如何通过合理施肥实现作物优质高产、养分资源高效利用,并最大限度减少化肥面源污染,仍是当前我国农业可持续发展亟待解决的瓶颈问题^[1-2]。测土施肥是实现合理施肥的重要技术手段之一。对于多种矿质营养元素,我国已经建立了相应的测土施肥方法及其评价指标体系^[3-4]。但这些常规土壤养分测定方法的结果及其指标体系在多数情况下还只是一个大致的参考。生产实践中,仅依据这些土壤养分测定的结果,不同的土壤-作物系统还难以确定最佳施肥量,通常还需要结合作物品种的需肥特性和相应田间的肥效试验结果来进一步优化^[5-8]。

不同类别的养分中,对于土壤中库存量大且不容易损失的磷钾及多种中微量元素来说,由于作物养分吸收大部分依赖于土壤养分的供应,根据测土得到的有效养分数据反映的土壤养分丰缺水平,就可以推荐施肥用量^[9]。但对于容易损失且土壤中形态转化极为复杂的土壤氮素而言,测土施氮显得更难,尤其是将土壤有效氮的含量准确折算成当季的化肥氮用量更具挑战性^[10]。

充足的氮素供应对于大多数作物的高产稳产非常关键,生产实践中多数作物过量施用氮肥的情况较为普遍。对于氮需求较高或者氮肥投入量比较高的作物,土壤基础氮供应占比下降,氮肥分次施用也较为普遍^[11]。土壤氮素肥力是否充足可以依据作物长势调整追肥施氮量来实现,此时测土施氮的作用相对较小。但有些作物对土壤氮素的供应非常敏感,氮素供应过多或过少,对其产量,尤其是品质的影响非常大,这样的作物测土施氮的作用非常重要^[12-14]。另外,随着施肥技术的轻简化发展,一次性施肥有可能成为多种作物的主流施肥技术发展方向^[15]。一次性施肥需要在基肥施用时就明确作物当季的适宜施氮量,这时准确测土给出适宜的氮肥用量就极其重要。

烟叶是对氮素供应非常敏感的经济作物。理想的烟叶氮素供应是生长前期氮素供应充足,早发快长,后期氮素供应尽快降下来,有利于烟叶成熟落黄,从而产出高质量烤烟。供氮不足会导致烟叶产量和烟碱含量下降,而供氮过多会长成黑暴烟,严重影响烟叶品质^[16]。生产实践中,常有由种植其他作物改种烤烟的田块,因土壤氮素肥力过高,导致出现黑暴烟而

使烟农损失严重的情况。对此,迫切需要通过准确测土,确定适宜的烟叶施氮量,甚至明确一些田块是否适宜植烟。另外,随着人口老龄化的加速,烟叶常规的多次施肥方法费工费力,实现一次性施肥也是烟农的期望^[17-18]。而一次性施肥也需要解决如何测土确定氮肥用量的问题。

关于土壤供氮潜力评估的研究已有很多文献报道,最广泛应用的实验室方法包括土壤肥力指标法和生物培养法^[19-22]。其中,土壤碱解氮、速效氮和无机氮是反映土壤氮素供应能力的3种常见氮形态。具体而言,碱解氮包括部分铵态氮、硝态氮和易水解有机氮;速效氮主要由铵态氮、硝态氮和亚硝态氮组成;无机氮则是指铵态氮和硝态氮。这些基于土壤氮形态的施肥推荐方法,在农业生产实践中被证明能够更好地反映土壤中氮素的可用性,减少了化肥用量,同时保持或提高了作物产量和肥料利用效率,在实际应用中具有适用性和科学指导价值^[23-24]。但这些研究主要针对常规大田作物。尽管烟叶的土壤施肥技术已经从依赖经验的估测,发展到化学分析,再到土壤-植株系统模型的运用,但仍然存在不少挑战^[25-26]。成功测定烟田土壤氮素含量并给出准确氮肥用量推荐的方法尚不成熟。目前,我国主要烟区多数以当地烟草公司的统一推荐用量和烟农种植经验相结合的方式来确定具体烟田肥料用量,仍然存在很大的随意性和经验性。

本研究以对土壤氮素供应极其敏感的烟叶为模式植物,探讨多种植烟土壤中氮的矿化特征,分析土壤各指标(尤其与氮相关指标)和盆栽条件下烟叶氮吸收之间的关系,结合植烟土壤田间适宜施氮量的比对,探讨烟叶测土推荐氮肥用量的方法及其主要影响因素。以期准确评估植烟土壤氮素供应能力,实现烟叶氮肥准确定量推荐,助力烟叶产质量提升以及烟叶一次施肥技术的发展,并为其他作物的测土推荐氮肥用量提供参考依据。

1 材料与amp;方法

1.1 供试土壤

选取我国主要烟叶生产区(云南、贵州、四川、河南)10个中烟基地单元代表性烟田的土壤为研究对

象: 云南省玉溪市澄江县(YN-CJ)和通海县(YN-TH); 贵州省六盘水市水城区阿戛镇盐井村(GZ-YJ); 四川省米易县坪山村(SC-PS)和白马镇(SC-BM), 会理县团山村(SC-TS)和黎溪镇(SC-LX), 攀枝花市仁和区平

地镇(SC-PD); 河南省洛阳市宜阳县石村(HN-SC)和高村(HN-GC)。土壤样品均采自 0~20 cm 的耕作层, 去除根系、石砾等杂物后自然风干, 磨碎过 20 目 (0.85 mm)筛后备用。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性状
Table 1 Chemical properties of soils tested

编号	采样点	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	铵态氮 (mg/kg)	硝态氮 (mg/kg)	速效氮 (mg/kg)	碱解氮 (mg/kg)
1	YN-CJ	7.95	45.0	2.12	2.02	4.1	14.3	35.5	49.8	150.0
2	YN-TH	7.68	26.7	1.75	1.97	13.6	14.1	51.1	65.2	144.8
3	GZ-YJ	4.61	26.2	1.24	0.78	11.6	22.7	59.6	82.3	106.3
4	SC-PS	4.56	29.5	1.31	1.65	16.3	70.6	55.7	126.2	150.6
5	SC-BM	5.58	26.4	0.92	0.94	9.8	34.9	6.1	41.0	95.9
6	SC-TS	7.35	9.5	0.51	0.41	3.8	11.7	3.3	15.0	21.9
7	SC-LX	4.9	18.0	0.72	0.91	9.6	28.5	41.1	69.5	91.4
8	SC-PD	7.64	8.1	0.83	0.65	3.1	5.1	32.5	37.6	43.0
9	HN-SC	7.06	13.9	0.71	0.39	14.7	7.8	11.5	19.3	48.2
10	HN-GC	7.73	13.3	0.63	0.36	12.3	6.0	17.5	23.5	36.0

1.2 试验设计

1.2.1 土壤氮矿化培养试验 为了解不同类型土壤在田间不同水分条件下有机氮矿化为无机氮的动态规律, 将供试土壤分别在有氧(60% 田间持水量)和厌氧(淹水)条件下进行培养。有氧培养: 称取 100 g 风干土壤, 置于 500 mL 塑料培养瓶中, 各土壤按 60% 田间持水量加入去离子水, 培养瓶用 Parafilm 膜封口, 膜上扎 8 个小孔, 置于 25 °C 恒温暗箱中进行培养; 每处土壤设 3 个重复。培养过程中, 每隔 48 h 揭开封口膜 30 min, 并补充损失的水分。分别在培养第 7、14、21、28 和 35 天进行取样。

厌氧培养: 称取 10 g 风干土壤至 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 去离子水, 密封后置于 25 °C 与 40 °C 恒温暗箱中避光培养。25 °C 下每个样品设 3 个重复, 于培养 14 d 后取样测定; 40 °C 下每个样品设 6 个重复, 于培养 7 d 和 14 d 分别取样测定。

1.2.2 土壤氮有效性烟叶盆栽试验 为了解不同植烟土壤对烟叶的实际供氮能力, 利用供试土壤开展盆栽试验。试验采用上口直径 25 cm、高 35 cm 的钵。每钵装过 20 目筛的风干土 5.00 kg。以基肥与土壤混合的方式施用磷钾肥, 磷肥为磷酸二氢钙(P_2O_5 , 80 mg/kg), 钾肥为硫酸钾(K_2O , 330 mg/kg)。每钵栽一种一株烟苗, 品种为云烟 87, 设置 4 次重复。2022 年 6 月 30 日移植, 温室大棚自然光温下生长, 适时浇水和除草, 生长 80 d 后一次性收获。

1.3 取样与测定方法

有氧培养试验在试验设计取样时间, 从培养瓶中采集新鲜土壤样品 2.00 g(通过称重法计算平均含水量), 置于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 2 mol/L KCl 溶液, 振荡提取 1 h 后过滤, 滤液直接上机测定铵态氮和硝态氮浓度。厌氧培养试验 7、14 d 后, 直接向各离心管中加入 20 mL 4 mol/L KCl 溶液, 振荡 1 h 后过滤, 滤液直接上机测定铵态氮浓度。

盆栽试验在收获时, 每株烟叶分根、茎和叶片进行全株采样。用蒸馏水清洗各部位样品, 去除根系上的土壤及茎叶表面的杂质。样品装袋置于烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒重。样品称重后磨碎, 供分析使用。采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮法对烟叶各部位样品进行消煮, 测定植株全氮含量。

土壤基本理化性质测定参照《土壤农业化学分析方法》^[27]。碱解氮采用碱解扩散滴定法测定; 有效磷采用碳酸氢钠浸提-比色法测定; 速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计法测定; 土壤全氮和全磷采用硫酸和高氯酸消煮法处理, Smartchem 200 全自动化学分析仪进行测定; 全钾采用氢氟酸和高氯酸消煮法处理, 火焰光度计法测定; 有机质采用低温外加热法进行测定; pH 用电极测定(土水质量比为 1:2.5)。各培养土样提取液中铵态氮和硝态氮含量, 以及植物样品消解液中氮含量均采用 Smartchem 200 全自动化学分析仪(Smartchem 200, Westco Co., Italy)进行测定。

1.4 数据处理与分析

$$\text{土壤无机氮(mg/kg)} = \text{土壤铵态氮} + \text{土壤硝态氮} \quad (1)$$

$$\text{土壤矿化氮量(mg/kg)} = \text{培养后土壤无机氮含量} - \text{培养前土壤无机氮含量} \quad (2)$$

$$\text{整株烟叶氮吸收量(g/株)} = \text{叶片氮含量} \times \text{叶片干物质量} + \text{茎部氮含量} \times \text{茎干物质量} + \text{根部氮含量} \times \text{根干物质量} \quad (3)$$

$$\text{烟叶吸氮量(N, mg/kg 土)} = \text{整株烟叶氮吸收量} / \text{盆栽土重} \quad (4)$$

采用 Excel 2019 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理和统计分析。采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较, 显著性水平设为 $P < 0.05$ 。此外, 运用局部线性回归法对数据进行深入分析, 并利用 Origin 2024 软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 有氧培养过程中土壤无机氮的动态变化

土壤无机氮主要包括铵态氮和硝态氮, 是植物根系从土壤溶液中能直接吸收利用的主要氮源, 其含量高直接反映土壤氮的供应水平。土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 活性很强, 容易因微生物利用而被同化, 或因氨挥发、淋溶、硝化反硝化等途径损失, 也会因土壤中有机氮的矿化而增加。在土壤无机氮因植物吸收或损失而减少的情况下, 土壤有机氮矿化是无机氮的重要来源, 这也是不同土壤供氮潜力的差异所在^[28]。为了解不同土壤的供氮能力, 培养试验是一个重要手段^[3, 22, 29]。本研究土壤有氧培养过程中铵态氮含量变化如图 1 所示。

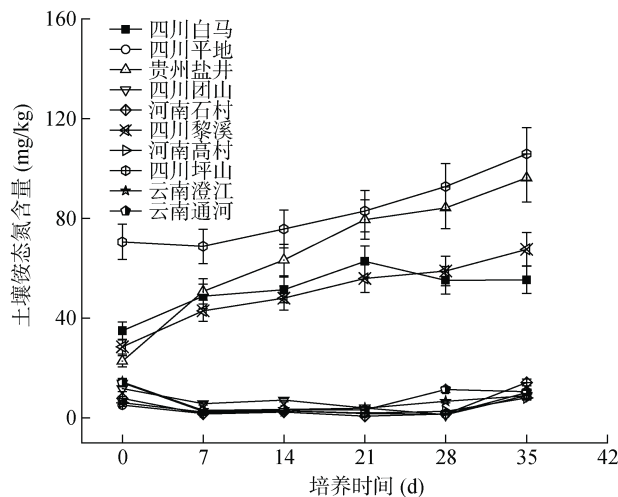


图 1 有氧培养条件下不同植烟土壤铵态氮含量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of ammonium nitrogen contents in different tobacco-growing soils under aerobic cultivation condition

不同土壤铵态氮含量随培养时间延长变化差异较大(图 1)。贵州盐井, 四川坪山、黎溪和白马这 4 处土壤不仅培养初始铵态氮含量较高, 平均为 39.2 mg/kg; 而且培养 35 d 过程中铵态氮持续增加, 第 35 天平均含量为 81.2 mg/kg; 平均增加速率为 1.31 mg/(kg·d)。其余 6 处土壤初始铵态氮含量较低, 平均为 9.9 mg/kg; 培养 35 d 过程中铵态氮先有所下降, 其后稍有回升, 第 35 天平均含量仅为 10.1 mg/kg; 35 d 培养过程中铵态氮含量整体基本未增加。将有氧条件下各植烟土壤铵态氮的增加量与表 1 中土壤其他理化性质进行相关性分析, 发现有氧培养条件下, 土壤铵态氮的增加量与 pH 呈显著负相关($P < 0.01$), 与土壤初始无机氮和速效氮含量呈一定的正相关, 而与其他指标无显著相关性(表 2)。铵态氮增加较高的 4 处土壤的 pH 平均为 4.9, 为强酸性土壤, 而其余 6 处土壤 pH 平均为 7.6, 属于弱碱性土壤。说明低 pH 未抑制有氧条件下土壤有机氮的矿化, 但显著抑制了土壤铵态氮的硝化作用。低 pH 土壤的硝化作用较弱, 其保氮能力较强, 导致土壤样品在前茬作物种植后直到本试验采集样品时仍然保有较高的土壤硝态氮和速效氮的积累, 这可能是有氧条件下土壤铵态氮增加量与土壤初始硝态氮及速效氮含量呈一定正相关的原因。

有氧培养条件下土壤硝态氮的变化也因不同植烟土壤而异(图 2)。云南澄江(pH 7.95)和通河(pH 7.69)两处植烟土壤初始硝态氮含量较高, 在培养 7 d 时快速增加, 其后随培养时间延长呈波动趋势, 但均显著高于其他植烟土壤。四川平地土壤(pH 7.64)初始硝态氮含量也较高, 且随培养时间延长呈小幅缓慢上升趋势。而贵州盐井(pH 4.61)和四川坪山(pH 4.56)、黎溪(pH 4.90)3 种强酸性土壤尽管初始硝态氮含量也较高, 但随培养时间延长呈波动甚至下降趋势, 说明低 pH 强烈抑制了硝化作用, 而且这些土壤中可能还存在一定的反硝化脱氮作用。其余四川白马(pH 5.58)和团山(pH 7.35), 以及河南石村(pH 7.06)和高村(pH 7.73)4 种土壤的初始硝态氮含量相对较低, 但随培养时间延长呈缓慢上升趋势。将有氧培养条件下土壤硝态氮的增加量与土壤性质作相关性分析, 发现有氧培养条件下, 土壤硝态氮的增加量与土壤 pH 呈显著正相关, 与土壤有机质、全氮和碱解氮含量也呈一定的正相关(表 2)。有氧培养 35 d 后各土壤硝态氮净含量与土壤全氮、碱解氮和有机质均呈显著正相关, 而与 pH 并无显著相关性。说明不同地区土壤有氧培养后硝态氮总量主要取决于和氮供应潜力相关的基础肥力, 而 pH 则主要影响硝态氮的短期增长速率。较低

表 2 不同植烟土壤在有氧、厌氧培养后无机氮增加量与基础理化性状的相关性

Table 2 Correlations between the increase of inorganic nitrogen and the basic chemical properties of soils from different regions under aerobic and anaerobic incubation

	pH	SOM	TN	AHN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	AN	δNH ₄ ⁺ -N	δNO ₃ ⁻ -N	δAN	αNH ₄ ⁺ -N	βNH ₄ ⁺ -N
pH	1											
SOM	-0.161	1										
TN	0.105	0.874**	1									
AHN	-0.242	0.931**	0.888**	1								
NH ₄ ⁺ -N	-0.749**	0.390*	0.164	0.491**	1							
NO ₃ ⁻ -N	-0.429**	0.451**	0.568**	0.649**	0.398*	1						
AN	-0.702**	0.503**	0.441**	0.683**	0.831**	0.841**	1					
δNH ₄ ⁺ -N	-0.874**	0.109	-0.047	0.158	0.422**	0.537**	0.574**	1				
δNO ₃ ⁻ -N	0.759**	0.484**	0.628**	0.389*	-0.416**	-0.152	-0.336*	-0.721**	1			
δAN	-0.509**	0.653**	0.557**	0.626**	0.215	0.609**	0.496**	0.714**	-0.036	1		
αNH ₄ ⁺ -N	-0.013	0.798**	0.780**	0.798**	0.194	0.343*	0.323*	-0.049	0.575**	0.507**	1	
βNH ₄ ⁺ -N	-0.02	0.869**	0.861**	0.869**	0.133	0.480**	0.369*	0.037	0.585**	0.634**	0.913**	1

注: SOM, 有机质; TN, 全氮; AHN, 碱解氮; NH₄⁺-N, 铵态氮; NO₃⁻-N, 硝态氮; AN, 速效氮; δNH₄⁺-N, 有氧培养 35 d 铵态氮变化量; δNO₃⁻-N, 有氧培养 35 d 硝态氮变化量; δAN, 有氧培养 35 d 速效氮变化量; αNH₄⁺-N, 40 °C 厌氧培养 14 d 铵态氮变化量; βNH₄⁺-N, 25 °C 厌氧培养 14 d 铵态氮变化量。*、** 分别表示相关性达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。

pH 尽管不利于短期培养条件下硝态氮的积累, 但低 pH 土壤采样前在田间积累的硝态氮含量可能并不低, 因而土壤实际硝态氮含量与土壤 pH 并无必然的相关性。

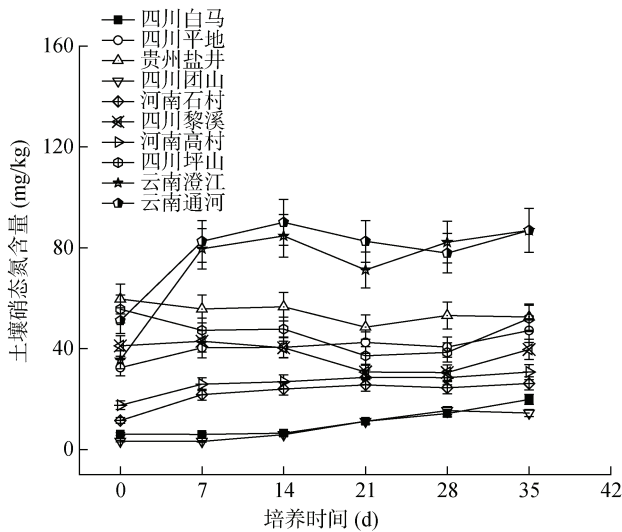


图 2 有氧培养条件下不同植烟土壤硝态氮含量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in nitrate nitrogen contents of different tobacco-growing soils under aerobic cultivation condition

土壤无机氮为铵态氮和硝态氮之和, 有氧培养条件下其动态变化也是铵态氮和硝态氮变化趋势叠加的结果。4 种酸性高铵土壤中无机氮的变化主要因铵态氮的增加而上升, 而云南两种碱性土壤则因较强硝化作用导致的硝态氮增加而增加。四川坪山和贵州盐井这 2 处酸性土壤培养第 35 天的无机氮含量最高,

分别为 158.0 和 149.0 mg/kg; 其次为云南的两处碱性土壤以及四川白马和黎溪的弱酸性土壤, 其无机氮含量为 75.2~107.0 mg/kg; 其他 4 种弱碱性土壤因初始铵态氮和硝态氮含量不高, 硝化作用不强, 有氧培养 35 d 后的无机氮含量处于 23.3~57.3 mg/kg(图 3)。相关分析结果表明, 有氧条件下, 培养 35 d 土壤无机氮的增加量主要与土壤有机质、初始硝态氮、碱解氮、无机氮和全氮呈显著正相关(表 2); 各土壤无机氮净含量与所有土壤氮相关指标以及有机质均呈一定的正相关, 而与土壤 pH 呈显著负相关。这些结果说明, 有氧培养条件下, 土壤无机氮的含量主要与土壤基础

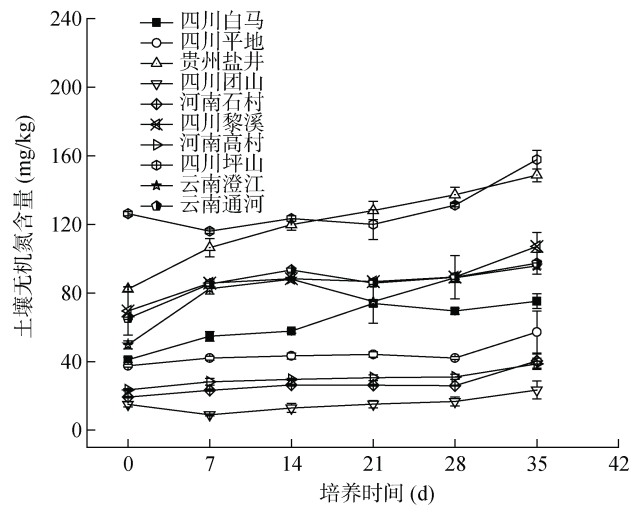


图 3 有氧培养条件下不同植烟土壤无机氮含量的动态变化

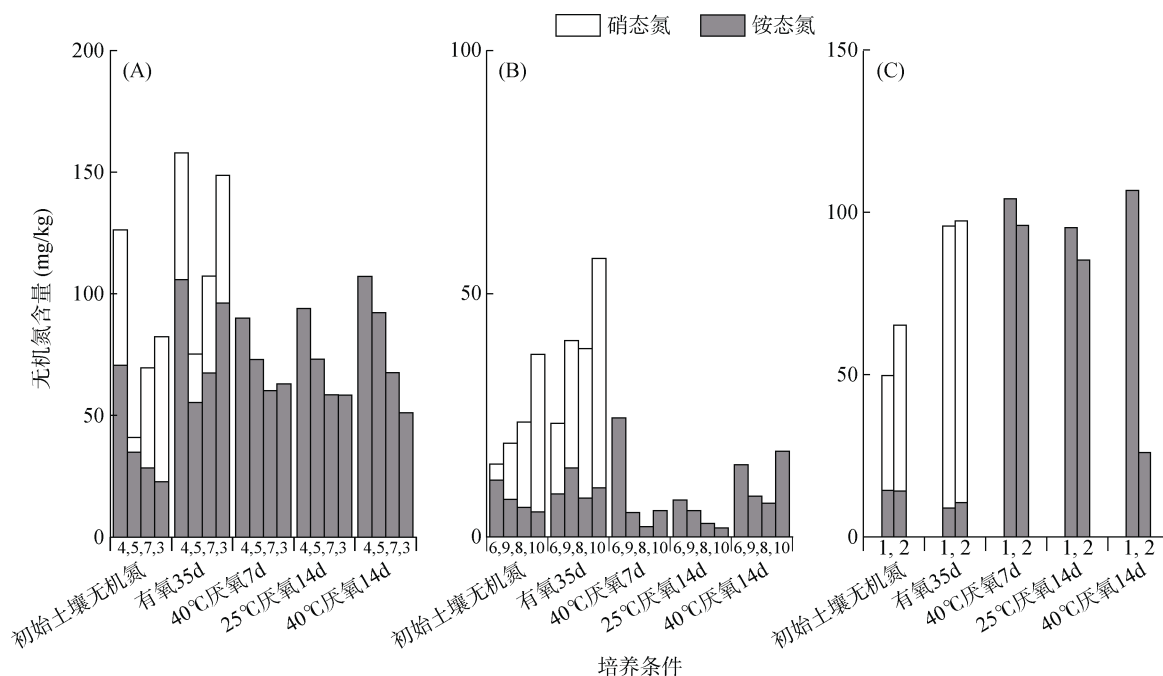
Fig. 3 Dynamic changes of inorganic nitrogen contents in different tobacco-growing soils under aerobic cultivation condition

肥力有关, 而较低土壤 pH 可能因其抑制氨挥发和硝化作用而有利于土壤无机氮的增加。

2.2 厌氧条件下土壤铵态氮的变化及其与有氧条件下无机氮的差异

淹水条件下的厌氧培养被广泛用于评估土壤有机氮的矿化潜力^[30-32]。因为淹水条件下, 有机氮矿化产生的铵态氮难以进一步转化为硝态氮,

从而易于积累, 可以直接通过培养期间铵态氮的积累量来反映土壤有机氮的矿化潜力^[33]。本研究对供试土壤进行了 3 种厌氧培养处理, 分别为多数研究通用的 40 °C 条件下 7 d 和 14 d 培养, 以及 25 °C 条件下 14 d 培养处理。各土壤 3 种厌氧培养条件下铵态氮含量及其与有氧培养条件下 35 d 的无机氮结果如图 4 所示。



(1. 云南澄江; 2. 云南通河; 3. 贵州盐井; 4. 四川坪山; 5. 四川白马; 6. 四川团山; 7. 四川黎溪; 8. 四川平地; 9. 河南石村; 10. 河南高村)

图 4 不同植烟土壤有氧、无氧培养条件下土壤无机氮含量

Fig. 4 Inorganic nitrogen contents in different tobacco-growing soils under aerobic and anaerobic incubation conditions

不同培养条件下, 各土壤铵态氮的平均值大小顺序为: 初始(21.6 mg/kg) < 有氧 35 d(38.6 mg/kg) < 40 °C 厌氧 7 d(46.4 mg/kg) < 25 °C 厌氧 14 d(48.2 mg/kg) < 40 °C 厌氧 14 d(55.8 mg/kg)。结果表明, 相较于好氧条件, 厌氧环境以及厌氧条件下的增温与延长培养时间, 均更有利于土壤铵态氮的积累。但有所不同的是, 对于一些供氮能力较低的土壤(如四川平地 and 团山以及河南石村和高村植烟土壤, 图 4B), 厌氧条件下会有一定量铵态氮的净损失。这说明淹水培养可能不适用于评价低供氮潜力土壤的有机氮矿化能力。不同厌氧条件培养后土壤铵态氮含量与有氧培养 35 d 后无机氮含量的线性相关系数表现为: 25 °C 厌氧 14 d ($R^2=0.596$) > 40 °C 厌氧 7 d ($R^2=0.539$) > 40 °C 厌氧 14 d ($R^2=0.445$)(图 5)。说明较低温度或较短时间厌氧培养的铵态氮与有氧培养的无机氮结果具有更高的相似性。

不同土壤厌氧条件下铵态氮的变化规律与有氧条件下的变化规律总体较为相似。在有氧培养中, 铵态氮增加较多的 4 种酸性高铵土壤(贵州盐井, 四川坪山、黎溪和白马), 在厌氧培养下同样表现出较高的铵态氮增量。在铵态氮平均增量最高的处理(40 °C 厌氧培养 14 d)中, 这 4 种土壤铵态氮含量较培养前平均增加了 40.3 mg/kg(图 4A)。有氧培养条件下铵态氮增加较少的 6 种偏碱性土壤, 在厌氧培养条件下表现为两类, 一类是四川平地、团山和河南石村、高村 4 处植烟土壤, 与有氧培养条件下相似(图 4B), 基本没有铵态氮的净释放, 与初始铵态氮含量相比甚至有轻微的下; 而云南澄江和通河植烟土壤, 在淹水条件下表现出显著的铵释放, 其在 40 °C 厌氧培养 14 d 时土壤铵增加量显著高于其他 8 处植烟土壤(图 4C)。线性相关分析表明(表 2), 不同厌氧培养条件下, 土壤有机氮的矿化(铵态氮的增加)与土壤全氮、有机

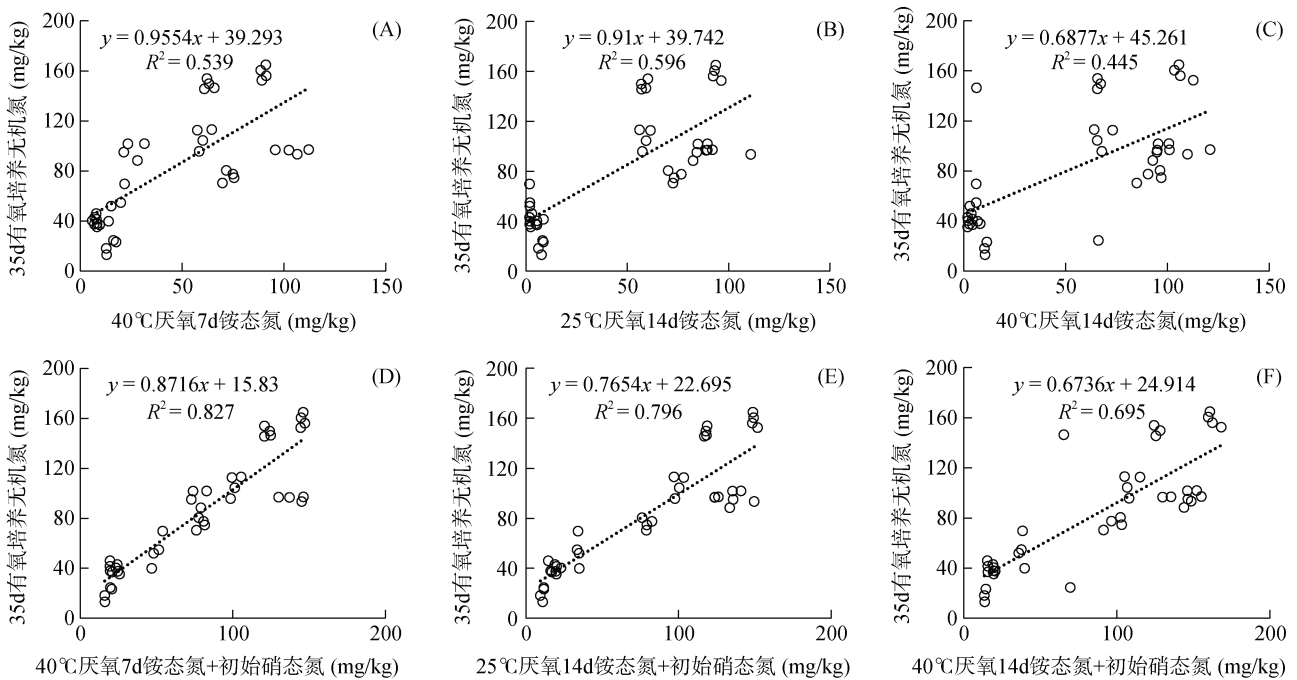


图 5 不同植烟土壤有氧、无氧培养条件下土壤无机氮的相关性

Fig. 5 Correlations between soil inorganic nitrogen contents in tobacco-growing soils under aerobic and anaerobic incubation conditions

质、碱解氮、硝态氮和无机氮呈显著正相关，而与 pH 和铵态氮等指标无显著相关。

厌氧培养条件下，土壤初始无机氮会通过反硝化作用而损失，因此培养过程中铵态氮的变化主要用以评估土壤有机氮的矿化能力，但这并不能完全反映初始土壤的实际供氮潜力。因此，将厌氧培养条件下土壤铵态氮含量与初始土壤硝态氮含量相加，可能更能准确反映初始土壤的供氮能力。将 3 种厌氧培养条件下土壤铵态氮含量与土壤初始硝态氮含量相加后，分别与 35 d 有氧培养的无机氮含量作相关性分析，其线性方程的决定系数由 0.445~0.596 显著提升至 0.695~0.827(图 5)。说明如果将厌氧培养中损失的硝态氮考虑在内，则无论是厌氧培养还是有氧培养，所测得的土壤供氮能力总体是比较一致的。

2.3 土壤氮相关指标与盆栽烟叶吸氮量的相关性

测土施氮的基本思路是测定作物种植前基础土壤与氮相关的指标，依据指标指示的氮肥力高低确定合理的氮肥用量。大田作物的氮肥推荐多是依据种植前耕层土壤中速效氮 (KCl 提取的铵态氮和硝态氮的总和) 含量折算成化肥氮，以作物需要的氮肥总量扣除土壤供氮量进行折算^[34-36]。烟叶种植中的氮肥推荐主要依据当地施肥习惯和经验，并结合土壤碱解氮含量和烟叶需氮特性，总体上以经验性为主。为建立较为准确的烟田土壤测土施氮方法，需要对不同土壤氮指标的指示能力进行评估。不同植烟土壤的实际供

氮能力可以通过不添加外源氮肥条件下的盆栽烟叶实际吸氮量来反映。将植烟土壤的氮相关指标与盆栽烟叶的吸氮量进行相关性分析，结果如图 6 所示。基础土壤指标中，速效氮与烟叶吸氮量的相关性最高 ($R^2=0.722$, 图 6A)，其次为碱解氮 ($R^2=0.663$, 图 6B)，而其他指标如全氮、硝态氮和铵态氮的相关性均低于二者。除基础指标外，经 35 d 有氧培养的土壤无机氮量与烟叶吸氮量线性方程的决定系数最高 ($R^2=0.810$, 图 6C)，40 °C 厌氧培养 7 d 和 14 d，以及 25 °C 厌氧培养 14 d 的土壤无机氮与烟叶吸氮量线性方程的决定系数分别为 0.727、0.585 和 0.711(图 6D, 图 6F, 图 6E)。结果表明，相较于厌氧培养和基础土壤指标，较长时间的有氧培养更能准确反映土壤氮的有效性；而 3 种厌氧培养条件下，则以较短时间培养的代表效果更好，较高温度下较长时间培养的效果最差。考虑到厌氧培养下硝态氮的损失，将培养后的铵态氮与基础土壤硝态氮相加，再与烟叶吸氮量进行相关分析。40 °C 厌氧培养 7、14 d 以及 25 °C 厌氧培养 14 d 的线性方程决定系数分别提升至 0.846、0.715 和 0.766(图 6G, 6I, 6H)，较未纳入硝态氮时相关性显著提升。综上，一定条件下通过培养方法获得的土壤无机氮量较单一基础土壤氮指标更能准确反映土壤的供氮潜力，但厌氧培养条件的结果需要考虑初始土壤硝态氮含量，且厌氧培养的时间和温度对结果均有显著影响。

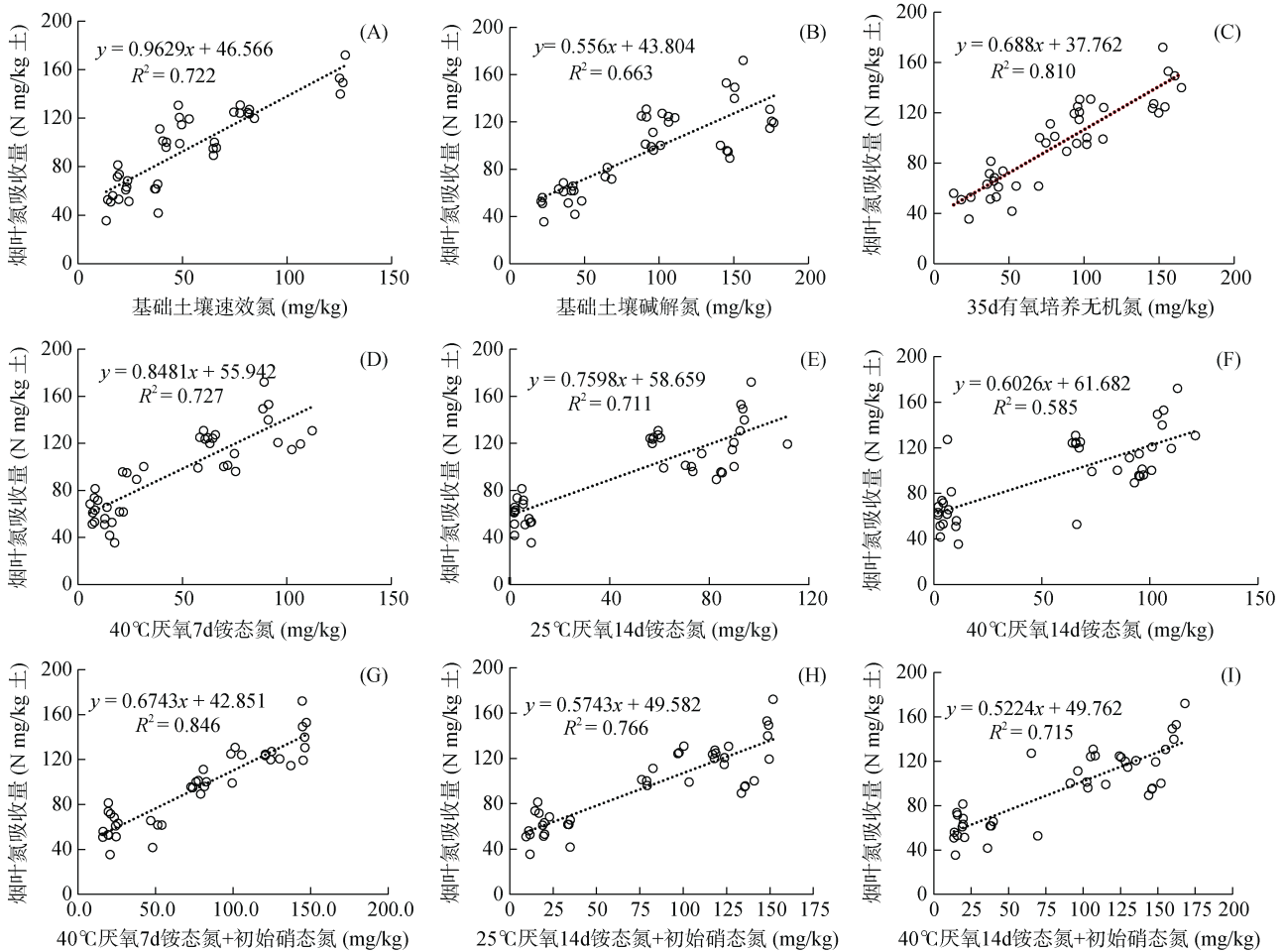


图 6 土壤氮相关指标与盆栽烟叶吸氮量的相关性

Fig. 6 Correlations between nitrogen indices in tobacco-growing soils and nitrogen uptake of pot-cultivated tobacco leaves

实际应用中, 无论是 有氧培养还是厌氧培养, 过程都耗时耗力, 难以作为测土施氮中可广泛采用的方法^[23, 37]。能否在常规土壤氮相关指标的基础上建立方便又较准确的烟叶测土施氮方法是本研究需要探讨的问题。采用逐步回归的方法, 以盆栽烟叶氮吸收量(换算为 mg/kg 土)为因变量, 基础土壤全氮、碱解氮、铵态氮、硝态氮以及无机氮含量作为自变量, 通过模型的自动计算优化, 最终确定碱解氮和无机氮两项因素保留在回归公式中: 烟叶吸氮量(mg/kg 土)=37+0.255×碱解氮+0.696×无机氮。精简后的公式为: 烟叶吸氮量(mg/kg 土)=37+0.3×碱解氮+0.7×无机氮。以精简后的公式计算的各土壤供氮量与烟叶吸氮量的线性方程决定系数达到了 0.875 (图 7), 远高于图 6 中各指标与烟叶氮吸收量线性方程的决定系数。说明精简后的公式较其他所有单一指标能更准确反映植烟土壤中氮的有效性。由于碱解氮测定过程中加了还原剂^[27], 其结果中也包含了速效的硝态氮和铵态氮。精简的方程也可以表达为: 烟叶吸氮量(mg/kg 土)=37+0.3×碱解氮中非速效氮部分+1.0×无机氮。以

上结果说明, 盆栽试验中, 烟叶吸收的氮绝大部分来源于全部速效氮和部分非速效但可被碱解提取的土壤氮。田间条件下可以将土壤基础供氮量也确定为: 土壤基础供氮量=0.3×碱解氮+0.7×无机氮。

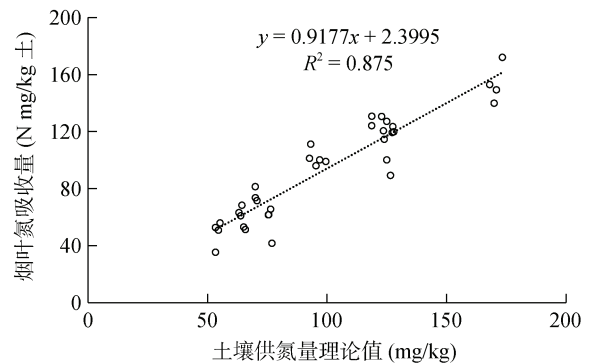


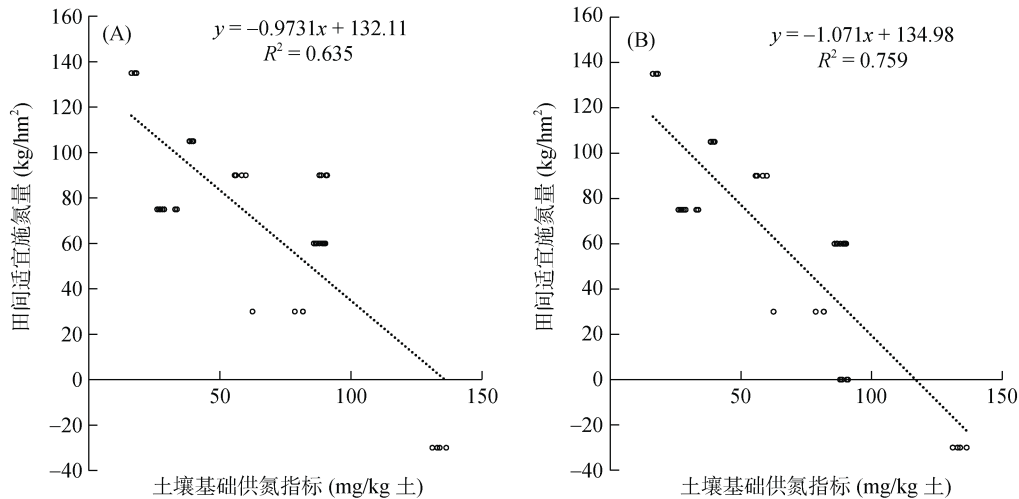
图 7 土壤供氮量理论值与烟叶氮吸收量之间的回归分析
Fig. 7 Regression analysis between theoretical soil nitrogen supply and nitrogen uptake in tobacco leaves

2.4 植烟土壤有效供氮土体估算及测土施氮方法的优化

依据盆栽试验获得的土壤基础供氮量公式, 如

何给出烟田适宜施氮量推荐仍是需要解决的问题。本研究采用的 10 处植烟土壤, 当季都设置了相应的不同氮肥用量的田间试验, 部分土壤(如四川坪山)的未施氮处理发生了烟叶氮素供应过量, 导致烟株长成黑暴烟的情况。黑暴烟的特点是生长非常旺盛, 叶色浓绿甚至墨绿, 采收期无法落黄, 烘烤

后的烟叶呈黑褐色而无经济价值。长出黑暴烟的土壤因氮供应过量, 需要氮素一定的耗竭后才适宜种烟, 这种土壤的适宜施氮量应定为负值。10 处植烟土壤田间当季适宜的施氮量与土壤基础供氮指标($0.3 \times \text{碱解氮} + 0.7 \times \text{无机氮}$)之间的线性关系如图 8 所示。



(图 A 为 10 种植烟土壤; 图 B 为排除贵州较特殊土壤后的 9 种植烟土壤。土壤基础供氮指标(mg/kg 土)= $0.3 \times \text{碱解氮} + 0.7 \times \text{无机氮}$)

图 8 田间当季适宜的施氮量与土壤基础供氮指标之间的线性关系

Fig. 8 Linear relationship between optimal in-season nitrogen application rate and basic soil nitrogen supply indices

10 处植烟土壤中, 四川坪山红壤不施氮处理出现严重黑暴烟, 将其适宜施氮量设定为 -30 kg/hm^2 (即要先耗竭该量的氮才适宜种烟); 四川黎溪红壤肥力也较高, 其适宜施氮量仅为 30 kg/hm^2 。这两处红壤前茬是其他作物, 可能施用了较多的氮肥并残留到了烟季, 因而其适宜施氮量非常低, 甚至残留氮过高已经不适宜种烟。四川团山和平地均为紫色土, 其基础肥力差, 试验得到的当季适宜施氮量分别为 135 和 105 kg/hm^2 。其他土壤的适宜施氮量为 $60 \sim 90 \text{ kg/hm}^2$, 基本属于正常范围。但贵州盐井土壤的基础肥力并不低, 其适宜施氮量仍需要 90 kg/hm^2 , 这主要与当季雨水较多、土壤氮的淋失较大有关^[24, 38-39]。因而在图 8B 中将这一特殊土壤排除在外, 得到的线性方程决定系数显著提高, 且更能反映常规烟田的情况。依据图 8B 中的线性方程, 进行转换后得到田间烟叶推荐施氮量的简单公式为: 烟田推荐施氮量(kg/hm^2)= $135 - 1.07 \times \text{土壤基础供氮指标}$, 其中土壤基础供氮指标= $0.3 \times \text{碱解氮} + 0.7 \times \text{无机氮}$ 。根据公式计算出 10 处植烟土壤的推荐施氮量, 与田间得出的适宜施氮量进行比较, 发现除贵州土壤推荐施氮量较实际适宜施氮量偏低 52.5 kg/hm^2 外, 其他土壤的偏差都在 $15 \sim 30 \text{ kg/hm}^2$ 范围内, 平均偏差为 21 kg/hm^2 。说明本研究得出的通过测定基础土壤碱解氮和无机氮含量

来推荐烟叶适宜施氮量的公式有较好的应用潜力。

从上述烟田推荐施氮量的公式可以看出, 一方面, 烟田土壤推荐施氮量最高基本不能高于 135 kg/hm^2 , 因为烟叶正常产量条件下, 烟株吸氮量多为 $60 \sim 105 \text{ kg/hm}^2$, 只有在施入的氮肥损失率极高或者施用方法非常不当的情况下才会需要施用高量氮肥。另一方面, 根据该公式可以判断田块是否适合种烟, 当烟田推荐施氮量为 0 时, 对应的土壤基础供氮指标为 126 mg/kg 。如果换算成单一的碱解氮指标, 按照本研究中 10 处植烟土壤碱解氮与速效氮的比值处于 $1.2 \sim 3.5$, 平均为 2, 即 $0.3 \times \text{碱解氮} + 0.7 \times 0.5 \text{ 倍碱解氮} = 126 \text{ mg/kg}$, 可以得到碱解氮平均为 194 mg/kg (不同土壤范围为 $143 \sim 252 \text{ mg/kg}$) 时施氮量为 0。以类似的方法, 换算成单一的无机氮指标, 可以得到无机氮平均为 97 mg/kg (不同土壤范围为 $72 \sim 119 \text{ mg/kg}$) 时施氮量为 0。因此, 既可以根据土壤基础供氮指标, 也可以根据单一的碱解氮或者无机氮指标, 对田块是否适合种植烟叶做出初步的判断。当计算的烟叶推荐施氮量接近 0, 甚至为负值时, 该田块一旦再施氮肥, 将增大再出现无价值黑暴烟的风险。

由于本研究采用的土壤类型和区域差异非常大, 一些区域性的因素如当地的气候和水管理措施会影响土壤的温度和水分含量, 温度和水分对土壤氮的

转化和损失有直接的影响^[40-42]。如雨水较多、烟季土壤温度较低的贵州和云南,以及基础肥力和土壤保氮能力较差的紫色土,推荐的施氮量较实际适宜施氮量会偏低;而河南的两处土壤,以及四川的两处红壤,因其保肥性比较好,以及有可能亚耕层土壤对烟叶氮有一定的贡献,推荐的施氮量较实际适宜施氮量会有所偏高。另外,由于本研究田间多数采用的是云烟87,对于需氮量高于云烟87的其他品种,用本文提出的公式计算的推荐施氮量也可能会偏低。未来针对不同区域进行细分,开展相应的研究,有望得到更加适合各烟区土壤的烟叶测土推荐施氮量方法,以及判断田块是否因基础氮素过高而不适合种植烟叶的依据。

3 结论

1) 有氧培养条件下,土壤铵态氮增加量与土壤pH呈显著负相关,而硝态氮增加量则与pH呈显著正相关。pH主要影响硝态氮的短期增长速率,与田间条件下土壤实际硝态氮含量并无必然的相关性。有氧培养条件下,土壤无机氮增加量主要与有机质和多种形态氮等基础肥力指标呈显著正相关。厌氧条件下增温和延长培养时间均有利于土壤铵态氮的积累,如果将厌氧培养时损失的硝态氮考虑在内,厌氧培养与有氧培养反映的土壤供氮能力总体保持一致。

2) 一定条件下通过培养方法获得的土壤无机氮量较单一基础土壤氮指标更能准确反映土壤的供氮能力。采用逐步回归方法获得基于碱解氮和无机氮两个参数的烟叶吸氮量公式为:烟叶吸氮量(mg/kg土)= $37+0.3 \times \text{碱解氮}+0.7 \times \text{无机氮}$,该公式较其他所有单一指标能更准确反映植烟土壤中氮的有效性。

3) 基于10处植烟土壤田间当季适宜的施氮量与土壤基础供氮指标之间的线性关系提出的田间烟叶推荐施氮量的简单公式为:烟田推荐施氮量(kg/hm²)= $135-1.07 \times \text{土壤基础供氮指标}$ 。其中,土壤基础供氮指标= $0.3 \times \text{碱解氮}+0.7 \times \text{无机氮}$ 。该公式有望为未来烟田测土施氮提供有效的方法依据。

参考文献:

- [1] 李君,张云贵,刘青丽,等. 冕宁烤烟推荐施肥关键参数试验研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(2): 80-85.
- [2] 安志装,索琳娜,刘宝存. 我国农业面源污染研究与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1422-1436.
- [3] 徐翎清,李佳佳,常晓,等. 土壤氮矿化相关机理的研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(34): 97-101.
- [4] 李文卿,陈顺辉,曾文龙,等. 氮肥施用与烤烟氮素营养关系研究[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(4): 38-41.
- [5] 王维,陈建军,吕永华,等. 烤烟氮素营养诊断及精准施肥模式研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 77-84.
- [6] 张明发,田峰,邓小华,等. 精准施肥对土壤性状和烟叶质量的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(S1): 186-190.
- [7] 马敬东,聂卫波,冯正江,等. 施肥时机对土壤水氮转移转化规律的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 236-246.
- [8] 郭迎新,王琛,王红叶,等. 施肥管理对洱海流域烤烟产质量及氮磷养分径流损失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(11): 101-109.
- [9] 陈新平,李志宏,王兴仁,等. 土壤、植株快速测试推荐施肥技术体系的建立与应用[J]. 土壤肥料, 1999(2): 6-10.
- [10] 张泽. 基于GIS的土壤氮素分区管理与施肥模型建立研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [11] 郁燕,彭显龙,刘元英,等. 前氮后移对寒地水稻根系吸收能力的影响[J]. 土壤, 2011, 43(4): 548-553.
- [12] 张春红,邱慧珍,何秀成,等. 施氮水平对甘肃烤烟烟碱、钾含量及经济效益的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(5): 65-69.
- [13] 薛刚,杨志晓,张小全,等. 不同氮肥用量和施用方式对烤烟生长发育及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(6): 98-102.
- [14] 刘青丽,陈阜,张云贵,等. 我国西南烟区典型植烟土壤烤烟氮素的吸收规律[J]. 作物学报, 2013, 39(3): 486-493.
- [15] 刘晓伟,陈小琴,王火焰,等. 根区一次施氮提高水稻氮肥利用效率的效果和原理[J]. 土壤, 2017, 49(5): 868-875.
- [16] 李春俭,张福锁,李文卿,等. 我国烤烟生产中的氮素管理及其与烟叶品质的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 331-337.
- [17] 王火焰,周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J]. 土壤, 2013, 45(5): 785-790.
- [18] 姜超强,王火焰,卢殿君,等. 一次性根区穴施尿素提高夏玉米产量和养分吸收利用效率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 146-153.
- [19] 吕珊兰,杨熙仁,张耀东,等. 山西土壤氮矿化势与供氮量的预测[J]. 中国农业科学, 1996(1): 21-26.
- [20] 马宏瑞,赵之重. 青海农区钙层土氮矿化势和供氮速率常数估测[J]. 青海大学学报(自然科学版), 1997, 15(2): 25-27.
- [21] 张恒,王晶君,石俊雄. 贵州省主要植烟黄壤氮素矿化潜力研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 324-330.
- [22] 王伟,于兴修,刘航,等. 农田土壤氮矿化研究进展[J]. 中国水土保持, 2016(10): 67-71.
- [23] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤氮素矿化及预测[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2241-2245.
- [24] 高真真,段卫东,胡坤,等. 温度和水分对典型香型烟区植烟土壤氮素矿化的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 442-450.

- [25] 张方方, 马宁博, 岳善超, 等. 基于不同方法的汉中盆地稻麦轮作土壤供氮能力评价[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 3996-4009.
- [26] 周方, 席奇亮, 张思琦, 等. 豫中烟区水肥一体化条件下烤烟临界氮浓度稀释曲线与氮素营养诊断研究[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(1): 58-66.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [28] 彭显龙, 刘洋, 于彩莲, 等. 寒地稻田土壤氮素矿化特征的研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(4): 702-709.
- [29] 赵琦齐, 沈玉娟, 李平, 等. 温度对太湖湖滨带不同水分梯度土壤氮矿化的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(6): 147-150.
- [30] Stanford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(3): 465-472.
- [31] Sharifi M, Zebarth B J, Burton D L, et al. Evaluation of laboratory-based measures of soil mineral nitrogen and potentially mineralizable nitrogen as predictors of field-based indices of soil nitrogen supply in potato production[J]. Plant and Soil, 2007, 301(1): 203-214.
- [32] Ros G H, Temminghoff E J M, Hoffland E. Nitrogen mineralization: A review and meta-analysis of the predictive value of soil tests[J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62(1): 162-173.
- [33] 蒋竹青, 彭辉. 基于文献计量学分析土壤氮素矿化研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 975-987.
- [34] 武俊喜. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤供氮能力的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [35] 杨江龙. 土壤有效氮测定方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [36] 杜建军, 王新爱, 王夏晖, 等. 旱地土壤氮素、有机质状况及与作物吸氮量的关系[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(1): 11-15.
- [37] Bushong J T, Norman R J, Ross W J, et al. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(19/20): 2799-2813.
- [38] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 温度和湿度对我国内蒙古羊草草原土壤净氮矿化的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2472-2476.
- [39] Stanford G, Epstein E. Nitrogen mineralization-water relations in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(1): 103-107.
- [40] 黄容, 谢一平, 陈玉蓝, 等. 水分条件对不同类型土壤氮矿化及酶活性的影响[J]. 土壤, 2022, 54(5): 950-957.
- [41] 邹亚丽, 韩方虎, 耿丽英, 等. 温度和湿度对紫花苜蓿土壤氮矿化的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(4): 101-107.
- [42] 王帘里, 孙波. 温度和土壤类型对氮素矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 583-591.

(责任编辑: 毛小芳)