

水分对不同栽培年限日光温室土壤氮矿化的影响

王士超,陈竹君,周建斌,赖春香

(西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:采用室内短期(84 d)好气培养法评价了不同水分供应水平下(田间持水量的60%、80%及100%,分别用60FC、80FC和100FC表示)陕西杨凌地区不同栽培年限(种植前、种植第二年及种植第三年)日光温室土壤(0~20 cm及20~40 cm土层)氮素矿化特性。结果表明:随着日光温室栽培年限的延长,0~20 cm土层累积净矿化氮量显著增加,且随栽培年限的增加,20~40 cm土层氮矿化势呈增加的趋势;土壤水分含量由60FC增加到80FC,土壤累积矿化氮量呈增加趋势,但当含水量达到100FC时,土壤累积矿化氮量降低。回归分析结果表明,土壤有机质含量每增加 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,60FC、80FC、100FC土壤含水量条件下土壤氮矿化势分别增加 1.62 、 $1.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.57\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤全氮含量每增加 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤氮矿化势分别增加 28.93 、 $33.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $27.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此,建议日光温室蔬菜栽培中应综合考虑温室年限及灌溉量对土壤氮素矿化过程的影响。

关键词:日光温室;土壤含水量;氮素矿化;栽培年限

中图分类号:S153.6⁺1 **文献标志码:**A

Effects of moisture on nitrogen mineralization in soils under solar greenhouses in different cultivation years

WANG Shi-chao, CHEN Zhu-jun, ZHOU Jian-bin, LAI Chun-xiang

(College of Natural Resources & Environment/Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712700, China)

Abstract: Aerobic laboratory incubation method (84 day) was conducted to evaluate the effects of different soil moisture (60%, 80%, and 100% of field capacity) on nitrogen (N) mineralization in 0~20 and 20~40 cm soil layers of different utilization age (0, 2 a, and 3 a) in the solar greenhouses in Yangling, Shanxi. Results showed that the net N mineralization in the 0~20 cm of soil layers increased with the cultivating history, and also increased with soil moisture in the 20~40 cm of soil layers. The net N mineralization increased steadily when the soil moisture increased from 60FC to 80FC, while decreased when the soil moisture reached 100FC. The regression analysis indicated that N mineralization potential (N_0) of soils at 60, 80, and 100% of field capacity was increased by 1.62, 1.88, and 4.57 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ when soil organic matter was increased by $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; and when total N was increased by $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, the N_0 of soils at 60, 80, and 100% of field capacity was increased by 28.93, 33.42, and 27.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Therefore, the effects of irrigation rate and cultivation history on N mineralization should be considered as factors for solar greenhouse vegetable N fertilizer management.

Keywords: solar greenhouse; soil moisture; soil N mineralization; cultivation years

近年来,我国设施农业的面积已从 $0.53\times 10^4\text{ hm}^2$ (1980年)增加到 $410.9\times 10^4\text{ hm}^2$ (2015年),其中设施蔬菜的面积已达 $386\times 10^4\text{ hm}^2$,且仍以每年10%的速度增加^[1-2],设施栽培已成为不少地区调

整农业产业结构的主要产业,其中日光温室栽培在我国北方地区设施栽培中占有重要地位。

日光温室栽培下过量施肥问题突出,其中以过量施用氮肥问题尤为严重^[3]。一些地区日光温室

蔬菜栽培每年氮肥用量已超过 $2\ 700\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是蔬菜需求量的 3~5 倍^[4-5]。过量施用氮肥导致土壤硝态氮大量累积^[6], 引起地下水硝酸盐含量超标, 增加了温室气体 N_2O 释放等。因此, 日光温室栽培下如何合理施用氮肥, 是这一集约化程度较高的栽培方式下养分管理研究的重要问题。

土壤中的氮素约 95% 以上以有机态形式存在, 而作物吸收的氮素主要为矿质氮^[7]。因此, 土壤有机氮的矿化特性及影响因素与其氮素供应密切相关^[8-12]。影响土壤氮素矿化的因子很多, 包括土壤有机质含量、水分^[13-19]、温度^[20] 和土壤类型等。国内外在这一方面已进行了大量的研究, 而已有的研究主要集中在农田土壤、林地^[21-22] 和草地^[23], 对日光温室蔬菜土壤氮矿化的研究相对较少。

日光温室栽培下大量施用有机肥, 土壤有机质含量明显高于一般农田土壤, 且随栽培年限的增加, 土壤有机质含量逐渐增加^[24-26]。另外, 日光温室栽培下土壤的水热条件也与一般农田存在很大的差别。因此, 研究水分对不同年限日光温室土壤氮矿化的影响, 对这一栽培系统氮素管理具有重要的理论和现实意义。

为此, 本研究以陕西杨凌日光温室中不同栽培年限的土壤为对象, 采用室内培养法研究了水分对日光温室不同栽培年限土壤氮素矿化的影响, 旨在为日光温室蔬菜生产中合理施用氮肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西杨凌农业高新技术示范区大寨、五泉 2 个乡镇, 属大陆性季风气候, 海拔 520 m, 年均降水量约 620 mm, 集中于 7~9 月, 年均温为 12.9°C , 土壤为壤土。定点取样的日光温室建于 2009、2010 年, 单个温室面积多在 $350 \sim 700\ \text{m}^2$ 之

间。种植的蔬菜品种为番茄, 一般每年 10 月份左右定植, 第二年 6 月底拉秧; 番茄产量多在 $100 \sim 180\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均为 $145\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[27-28]。

由于建棚时将原农田土壤的表层土移走用于堆砌保温土墙, 因此, 新建温室表层土壤养分含量较低。其中有机质 $8.3\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.59\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、硝态氮 $21.2\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $11.5\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和速效钾 $149\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。生产中有机肥用量高, 施用有机肥以鸡粪和牛粪为主, 少数农户施用猪粪、沼渣及羊粪, 每年施用量为 $142\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。化肥氮、磷及钾肥用量分别为 690 、 $720\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 及 $759\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中氮肥、钾肥部分作基肥施用, 其余的作追肥分次 (5~7 次) 施用, 磷肥和有机肥作基肥于整地前一次施入。日光温室肥料用量详见表 1。

1.2 试验设计

供试土壤: 选择 3 个 2009 年新建日光温室土壤作为研究对象, 于种植前、种植第二年和第三年后 (2009、2011 年和 2012 年), 每年 6 月下旬在种植的蔬菜收获后, 分别采 0~20 cm 及 20~40 cm 两层次土壤样品, 每个温室取 3 个点, 同一土层混合组成一个土样。剔除番茄根茬, 样品风干后过 1 mm 筛, 用于培养试验。供试土壤的基本理化性质见表 2。

试验方案: 试验设栽培年限和土壤湿度两个研究因素, 其中土壤湿度水平为田间持水量的 60%、80% 及 100% (60FC、80FC、100FC) 3 个水平, 栽培年限包括 0 年 (0 a)、2 年 (2 a) 和 3 年 (3 a) 3 个水平, 共组成 9 个处理, 每个处理重复 3 次。

称取过 1 mm 孔筛的风干土样 $100.0\ \text{g}$ 于 $300\ \text{ml}$ 的塑料瓶中, 用封口膜封口, 置于 25°C 恒温培养箱中培养。每 3~4 天称重 1 次, 补加损失的水分。分别在培养的第 0、3、7、14、28、42、56、70 天及 84 天, 从每个处理的各个重复中取出 $5.0\ \text{g}$ 新鲜土样, 测定土壤矿质氮含量。

表 1 日光温室养分投入情况/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$

Table 1 Nutrient inputs from manure and chemical fertilizer in solar greenhouses

栽培年限 Year	有机肥 Manure			化肥 Chemical fertilizer			总和 Total		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
第一年 First year	1332	1022	1003	621	738	834	1953	1760	1837
第二年 Second year	886	688	707	933	959	1145	1819	1647	1852
第三年 Third year	769	590	705	766	790	1106	1535	1380	1811

表 2 供试土壤理化性质

Table 2 The physical and chemical properties of soils used

土层深度/cm Soil layer	栽培年限 Year	pH 值 pH value	有机质/(g · kg ⁻¹) Soil organic matter	全氮/(g · kg ⁻¹) Total N	速效磷/(mg · kg ⁻¹) Available P	速效钾/(mg · kg ⁻¹) Available K
0~20	种植前(0 a) Before planting	8.51±0.02A	8.7±0.6B	0.76±0.01B	9.0±2.3B	144.2±5.9A
	第二年(2 a) Second year	8.14±0.25BA	14.1±1.5AB	1.05±0.07A	101.2±8.3A	286.6±71.1B
	第三年(3 a) Third year	7.98±0.21B	26.5±3.9A	1.69±0.24A	139.1±11.6A	423.9±61.6C
20~40	种植前(0 a) Before planting	8.60±0.08A	6.3±0.4A	0.64±0.10A	8.7±1.4B	135.2±7.9A
	第二年(2 a) Second year	8.06±0.22B	12.1±1.3A	0.99±0.01A	36.4±2.5A	136.0±15.2A
	第三年(3 a) Third year	8.11±0.24B	19.3±5.7A	1.25±0.42A	61.2±13.5A	185.6±41.3A

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 $P<0.01$ 显著水平。

Note: Values followed by the different letters in a column are significant difference at $P<0.01$ level.

1.3 测定项目与方法

土壤矿质氮:称取 5.0 g 新鲜土样,加入 50 ml $1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液,振荡 1 h 后过滤,滤液冷冻保存。测定前将滤液解冻,用连续流动分析仪测定 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 之和即为土壤矿质氮(N_{min})的含量。根据培养结束后与起始时土壤无机氮含量之差计算土壤氮素表观矿化量。

土壤氮素表观矿化量=培养后无机氮含量—培养前无机氮含量

土壤氮矿化过程用单因素指数模型模拟:

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

式中, N_t 是培养时间 t 时氮矿化量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); N_0 是矿化势($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), k_0 为矿化速率常数。

1.4 数据处理

用 SAS for Windows(version 8.0)进行方差分析、显著性测验,用 Sigmaplot(version 12.0)绘制图形。

2 结果与分析

2.1 水分对不同栽培年限日光温室土壤铵态氮含量的影响

图 1A 显示,随着培养时间的延长,耕层(0~20 cm)土壤铵态氮含量均呈先增加后降低的趋势,在培养第 1 周达到最大值后均有不同幅度的下降;土壤铵态氮含量随栽培年限的增加而明显增加。不同水分处理培养 14 天后同一年限处理土壤铵态氮含量的差异变小。同时,土壤铵态氮含量随含水量升高的变化差异较小。20~40 cm 土层土壤铵态氮含量的变化趋势与耕层基本一致,且同一年限处理

土壤铵态氮含量均低于 0~20 cm 土层。

2.2 水分对不同栽培年限日光温室土壤硝态氮含量的影响

从图 2 可以看出,耕层 0~20 cm 土层各处理土壤累积硝态氮量均随培养时间延长呈增加趋势,3 个栽培年限的温室土壤累积硝态氮量均随含水量升高而增加,但含水量增加到 100FC 时,土壤硝态氮含量反而下降。在 60FC~100FC 范围内矿化 84 d 后土壤中硝态氮含量大小顺序为 3 a>2 a>0 a。培养结束后,3 a 土壤硝态氮含量达 $156.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (60 FC)、 $172.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (80 FC)、 $186.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (100 FC),分别比 2 a、0 a 处理高出 88.24%、72.69%、79.32% 和 40.74%、56.79%、64.25%。20~40 cm 土层土壤硝态氮含量变化趋势与耕层(0~20 cm)土壤一致。

2.3 水分对不同栽培年限日光温室土壤氮矿化量的影响

图 3 显示,随着培养时间的延长,耕层(0~20 cm)土壤累积矿化氮量呈增加趋势,且栽培年限越长,土壤累积矿化氮量越高。种植前,60FC、80FC 及 100FC 处理土壤累积矿化氮量分别为 17.60、24.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 19.06 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;与种植前相应水分水平相比,2 a 温室 60FC、80FC 及 100FC 处理土壤累积净矿化氮量分别提高了 2.55、1.89 倍和 1.90 倍,3 a 温室土壤累积净矿化氮量分别提高了 2.96、2.51 倍和 3.06 倍。

不同含水量同一栽培年限土壤相比,随着土壤含水量的增加,土壤累积矿化氮量随之增加,但当含水量为 100FC 时,累积矿化氮量反而降低。土壤

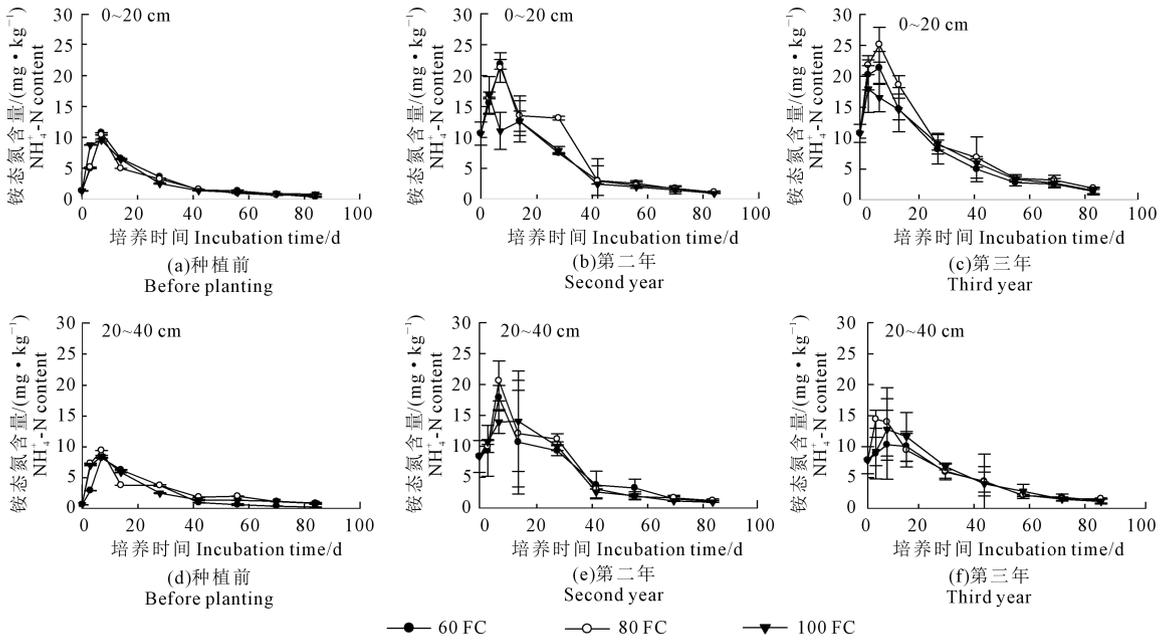


图 1 不同水分和栽培年限条件下土壤铵态氮含量的变化

Fig.1 Changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration from different soils in solar greenhouse under different soil moisture and cultivation year treatments

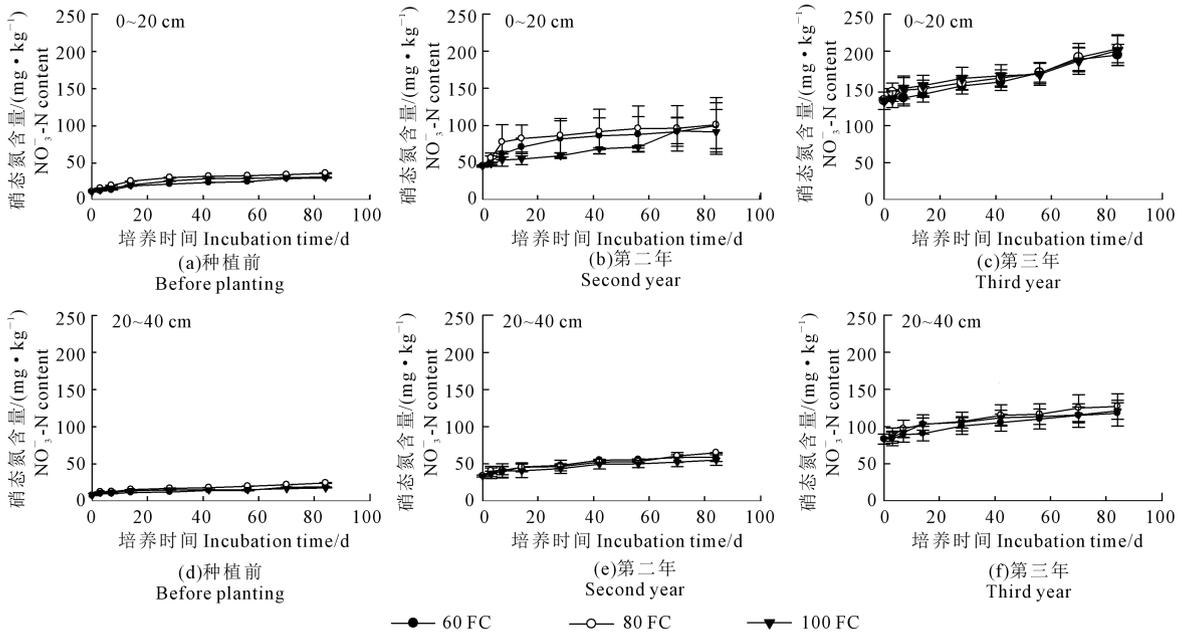


图 2 不同水分和栽培年限条件下土壤硝态氮含量的变化

Fig.2 Changes in $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration from different soils in solar greenhouse under different soil moisture and cultivation year treatments

含水量为 60FC 时, 0 a、2 a 和 3 a 处理土壤累积净矿化氮量分别为 17.06、44.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 52.10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 80FC 时, 0 a、2 a 和 3 a 处理土壤累积净矿化氮量分别提高了 42.32%、2.54% 和 17.16%; 100FC 时, 0 a、2 a 和 3 a 处理土壤累积净矿化氮量分别较 80FC 降低了 21.49%、21.29% 和 4.52%, 土壤含水量和栽培年限对累积净矿化氮量呈正交互作用, 但未

达到显著水平 ($P > 0.05$)。20~40 cm 土壤累积矿化氮量的变化趋势与耕层土壤基本一致。同一栽培年限温室 20~40 cm 土层土壤累积矿化氮量均低于 0~20 cm 土层。

2.4 土壤氮素矿化模型

从表 3 可以看出, 耕层 (0~20 cm) 土壤氮矿化势 N_0 随温室蔬菜栽培年限延长而增加。2 a 和 3 a

温室土壤氮素矿化势与种植前相比差异均达到了显著水平。就 k_0 值而言,处理间差异不大。土壤含水量由 60FC 增加到 80FC 时,同一年限处理土壤氮矿化势随之增加。而 80FC 增加到 100FC 时,土壤氮矿化势反而减小。除 2 a 外,同一年限不同含水量土壤氮矿化势差异均达到显著水平。

20~40 cm 土层土壤氮矿化势的变化趋势与耕

层基本一致,但当土壤含水量相同时,2 a 处理与种植前相比土壤氮矿化势差异未达到显著水平,且同一年限不同含水量处理间差异均不显著。相同年限和含水量处理土壤氮矿化势表现为:0~20 cm > 20~40 cm,说明年限长的温室土壤供氮潜力也大,适宜的含水量(80FC)能促进土壤氮矿化过程,含水量(100FC)过高会抑制土壤氮素矿化。

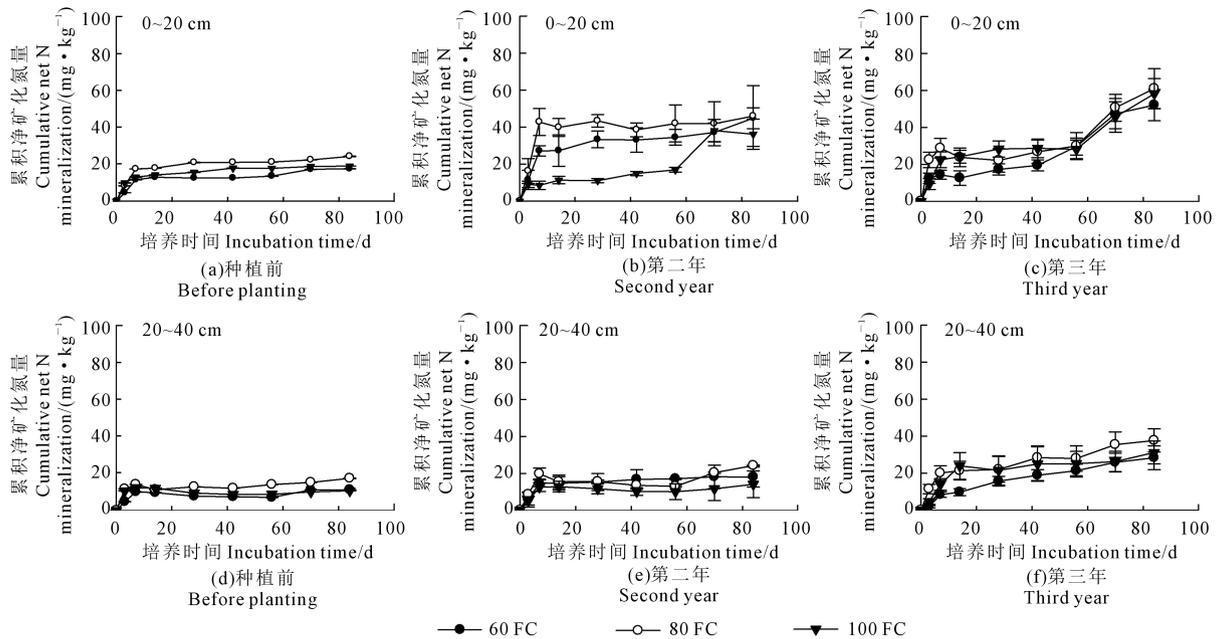


图 3 不同水分和栽培年限条件下土壤累积矿化氮量的变化趋势

Fig.3 The cumulative N mineralization from different soils in solar greenhouse under different soil moisture and cultivation year treatments

表 3 用单因素指数模型拟合的不同含水量土壤氮矿化参数

Table 3 Estimated parameters using the single model of N mineralization at different moistures

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	60 FC		80 FC		100 FC	
		$N_0/(mg \cdot kg^{-1})$	k_0	$N_0/(mg \cdot kg^{-1})$	k_0	$N_0/(mg \cdot kg^{-1})$	k_0
0~20	种植前(0 a) Before planting	14.83±1.17Cb	0.17	21.83±2.18Ca	0.18	17.49±1.96Cb	0.21
	第二年(2 a) Second year	36.59±5.61Ba	0.14	42.72±8.17Ba	0.25	34.25±6.80Ba	0.18
	第三年(3 a) Third year	50.85±3.41Ab	0.17	65.32±4.87Aa	0.14	51.74±1.48Ab	0.13
20~40	种植前(0 a) Before planting	9.18±1.83Ba	0.34	13.81±2.19Ba	0.22	10.27±2.78Ba	0.24
	第二年(2 a) Second year	17.01±3.21Ba	0.19	17.42±2.47Ba	0.33	11.91±2.47Ba	0.29
	第三年(3 a) Third year	30.53±5.74Aa	0.13	31.02±8.33Aa	0.11	26.69±6.38Aa	0.10

注:不同大写字母代表同一含水量不同年限土壤氮矿化势差异显著($P<0.05$),不同小写字母代表不同含水量同一年限土壤氮矿化势差异显著($P<0.05$)。 N_0 为土壤氮矿化势, k_0 为矿化速率常数。

Note: Different capital letters in the table above in the same moisture of different cultivation year treatment indicate significant differences at the 5% level (Duncan's multiple comparison test); Different lowercase letters in the same cultivation year of different moisture treatment indicate significant differences at the 5% level. N_0 — soil nitrogen mineralization potential; k_0 — constant of nitrogen mineralization potential.

2.5 土壤氮矿化势与有机质、全氮含量的关系

由图4可以看出,不同土壤含水量条件下土壤氮矿化势与有机质及全氮含量呈极显著正相关关系,土壤含水量为80FC时,土壤氮矿化势大于60FC和100FC处理。从回归模型的结果来看,土壤有机

质含量每增加 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,60FC、80FC、100FC 土壤含水量条件下土壤氮矿化势分别增加 1.62 、 $1.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤全氮含量每增加 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤氮矿化势分别增加 28.93 、 $33.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $27.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

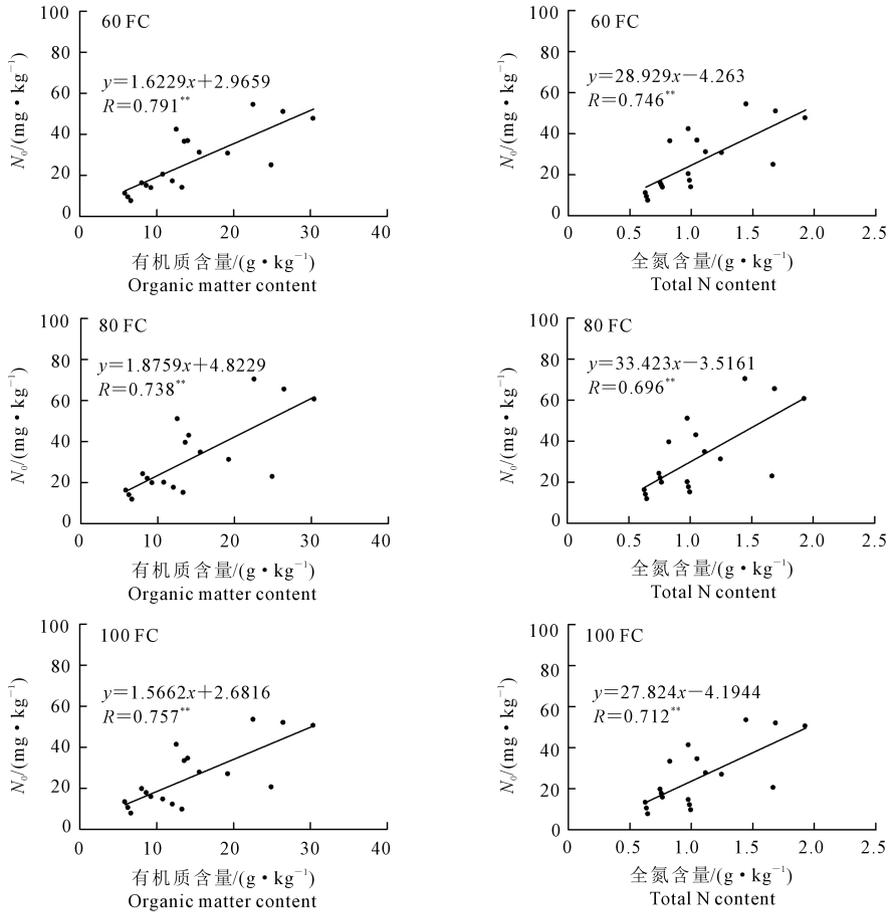


图4 土壤氮素矿化势(N_0)与有机质、全氮含量的关系

Fig.4 The relationships between soil nitrogen mineralization potential (N_0) and organic matter, total N in soils

3 讨论

3.1 含水量对土壤氮矿化的影响

本研究表明,室内培养条件下随着含水量的增加,土壤累积矿化氮量呈增加趋势,但当含水量达到100FC时,氮矿化累积量反而降低。由单因素指数模型对土壤累积矿化氮量拟合得到土壤氮矿化势的结果也可以看出,在80FC处理下0~20 cm土层土壤氮矿化势均显著高于60FC和100FC处理。其他学者研究也表明,土壤含水量为85FC时,土壤矿化氮量达到峰值^[29];土壤含水量为80~100FC时,土壤净氮矿化率与含水量呈负相关关系^[30]。这与土壤微生物活动最适宜的土壤含水量为田间持水量的60%~80%有关^[26]。当含水量超过一定范

围时,土壤厌氧微生物作用增强,还会使无机氮以气体形式损失。因此,在日光温室栽培中控制适宜的水分供应,不仅对作物生长有利,也会促进土壤有机氮的矿化作用,增加土壤有效氮的供应。

我国日光温室栽培中不仅存在“大肥”问题(过量施肥),还存在“大水”问题(过量灌水)^[31]。据罗勤等在陕西杨凌日光温室的研究^[32],温室小型西瓜整个生育期灌溉量在农户常规灌水量基础上减量20%处理,土壤0~20 cm和20~50 cm土层水分含量均已达到或超过田间持水量,说明当地温室过量灌溉问题突出。过量灌溉导致养分淋溶损失。同时,由本研究结果看,水分含量过高,也会对土壤氮素矿化作用产生抑制,进而影响作物氮素供应。因此,应有效控制日光温室水分的供应。

3.2 栽培年限对土壤氮矿化的影响

本研究发现,随日光温室栽培年限的增加,土壤矿化氮量明显增加。这是由于日光温室蔬菜栽培条件下,长期大量施用有机肥,导致温室土壤有机质和全氮含量提高。我们对该研究区域 170 多个新建日光温室施肥状况的调查发现,氮、磷、钾肥投入量分别为 690 、 720 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 745 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均严重过量,其中磷、钾肥施用量超过磷、钾肥推荐量 118% 和 103%^[33],说明新建日光温室存在养分过量投入问题。随着种植年限的增加,土壤养分累积量也随之增加。种植三年后,0~100 cm 土壤硝态氮累积量超过了种植前的 5 倍^[24]。本研究中,种植第二年和第三年温室土壤 0~20 cm 土层有机质和全氮含量分别较种植前提高了 62.06%、38.16% 和 205.59%、122.37%。高佳佳等^[27]对研究区域日光温室土壤养分定点监测的结果也证明,栽培年限长的温室土壤有机质和全氮含量高于年限短的温室。栽培 13 a 的温室土壤全氮含量可比种植前提高 2 倍^[34]。由于土壤有机质和全氮含量与氮矿化势呈极显著正相关关系,因此,随栽培年限的增加,温室土壤净矿化氮量和氮矿化势明显提高。我们的研究同时发现,栽培年限长的温室 20~40 cm 土层土壤氮矿化势也明显增加。这与日光温室栽培大量施用有机肥,导致有机物向土壤下层移动有关。

随日光温室栽培年限的增加,土壤氮矿化量明显增加。因此,在日光温室氮素管理中,对种植年限长的温室,应适当降低氮肥的施用,以避免氮素的过量投入。虽然本研究中土壤含水量和栽培年限对累积净矿化氮量的交互作用未达显著水平,但对栽培年限长的温室,由于土壤养分特别是硝态氮累积量高,控制水分的供应,也是提高温室氮素利用率、减少氮素损失的途径之一。

4 结 论

土壤水分含量由田间持水量的 60% 增加到 80%,土壤累积矿化氮量呈增加趋势,但当含水量达到田间持水量的 100% 时,土壤矿化氮量反而降低。随日光温室栽培年限的增加,土壤矿化氮量明显增加;栽培年限长的温室 20~40 cm 土层土壤氮矿化势也明显增加。虽然本研究中土壤含水量和栽培年限对累积净矿化氮量的交互作用未达到显著水平,但对栽培年限长的温室,由于土壤养分特别是硝态氮累积量高,生产中应有效控制水分供应,避免过量灌水影响有机氮的矿化及带来的氮素淋失问题。

参 考 文 献:

- [1] 郭世荣,孙锦,束胜,等. 我国设施园艺概况及发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2012, 18 :1-14.
- [2] 彭澎,梁龙,李海龙,等.我国设施农业现状、问题与发展建议[J].北方园艺,2019,(5):161-168.
- [3] 郭文龙,党菊香,吕家珑,等. 不同年限蔬菜大棚土壤性质演变与施肥问题的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1) :86-89.
- [4] Song H, Guo J H, Ren T, et al. Increase of soil pH in a solar greenhouse vegetable production system[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(6):2074-2082.
- [5] Fan Z B, Lin S, Zhang X M, et al. Conventional flooding irrigation causes an over use of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production[J]. Agricultural Water Management, 2014, 144:11-19.
- [6] Ju X, Liu X, Zhang F, et al. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of china [J]. A Journal of the Human Environment, 2004, 33 (6) : 300-305.
- [7] 刘芳. 小麦吸收肥料氮和土壤氮的探讨[J]. 核农学报, 1994, 5 (2) : 81-84.
- [8] Güleriyüz G, Kirmizi S, Arslan H, et al. Alterations of the nitrogen mineralization rates in soils of forest community depending on the ski run construction (mount uludag, bursa, turkey)[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(1):53-61.
- [9] Kai Z, Xiaoniu X, Qin W. Characteristics of n mineralization in urban soils of hefei, east China [J]. Pedosphere, 2010, 20(2) :236-244.
- [10] Mohanty S, Nayak A K, Kumar A, et al. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil of rice - rice system under long term application of chemical fertilizers and farmyard manure [J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 58(2013):113-121.
- [11] 李紫燕,李世清,李生秀. 黄土高原典型土壤有机氮矿化过程[J]. 生态学报, 2008, 28(10) : 4940-4950.
- [12] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1990.
- [13] Sleutel S, Moeskops B, Huybrechts W, et al. Modeling soil moisture effects on net nitrogen mineralization in loamy wetland soils [J]. The Society of Wetland Scientists, 2008, 28(3) :724-734.
- [14] 陈伏生,甘露,刘义,等. 温度、水分和森林演替对中亚热带丘陵红壤氮素矿化影响的模拟实验[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7) : 1529-1535.
- [15] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(2) :302-311.
- [16] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(2) :339-347.
- [17] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, et al. Drying and rewetting effects on c and n mineralization and microbial activity in surface and sub-surface california grassland soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9) :2281-2289.
- [18] Borken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on c and n mineralization and fluxes in soils [J]. Global Change Biology, 2009, 15(4) : 808-824.

- [19] Noah F, Joshua P S. Effects of dry-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34:777-787.
- [20] Patil R H, Laegdsmand M, Olesen J E, et al. Effect of soil warming and rainfall patterns on soil n cycling in northern europe [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(1-2):195-205.
- [21] Miller A, Schimel J, Meixner T, et al. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12):2195-2204.
- [22] Muhr J, Franke J, Borken W. Drying - rewetting events reduce c and n losses from a norway spruce forest floor [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(8):1303-1312.
- [23] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2184-2188.
- [24] 白新禄, 高佳佳, 陈竹君, 等. 新建日光温室土壤养分平衡与累积特性[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (2): 1-5.
- [25] 关焱, 宇万太, 李建东. 长期施肥对土壤养分库的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 131-137.
- [26] Ros G H, Hanegraaf M C, Hoffland E, et al. Predicting soil n mineralization; Relevance of organic matter fractions and soil properties [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(8):1714-1722.
- [27] Gao J J, Bai X L, Zhou B, et al. Soil nutrient content and nutrient balances in newly-built solar greenhouses in northern china [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(1):63-72.
- [28] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 等. 西安市郊区日光温室大棚番茄施肥现状及土壤养分累积特性[J]. *土壤通报*, 2006, 37(2): 287-290.
- [29] Hu R, Wang X P, Pan Y X, et al. The response mechanisms of soil N mineralization under biological soil crusts to temperature and moisture in temperate desert regions [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 66:66-73.
- [30] Li Y, Liu Y H, Wang Y L, et al. Interactive effects of soil temperature and moisture on soil N mineralization in a *Stipa krylovii* grassland in Inner Mongolia China [J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(5): 571-580.
- [31] 张晓敏. 日光温室水热状况及灌溉制度研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [32] 罗勤, 陈竹君, 雷金繁, 等. 水肥减量对日光温室小型西瓜产量品质及土壤水分状况的影响[J]. *北方园艺*, 2014, (9): 48-53.
- [33] 王士超, 白新禄, 陈竹君, 等. 日光温室土壤养分平衡及其累积特性[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(7): 1091-1098.
- [34] Zhao M Q, Shi Y, Chen X, et al. Soil nitrogen accumulation in different ages of vegetable greenhouses [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 8:21-25.

(上接第 123 页)

- [18] 常庆瑞, 安韶山, 刘京, 等. 陕北农牧交错带土地荒漠化本质特性研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(4): 518-523.
- [19] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(16): 4306-4316.
- [20] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139-151.
- [21] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [22] 张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(12): 3094-3101.
- [23] 周正虎, 王传宽, 张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6694-6702.
- [24] 许明祥, 王征, 张金, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5405-5415.
- [25] 郭正刚, 张自和, 肖金玉, 等. 黄土高原丘陵沟壑区紫花苜蓿品种间根系发育能力的初步研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1007-1012.
- [26] 张国盛, 黄高宝, 张仁陟, 等. 种植苜蓿对黄绵土表土理化性质的影响[J]. *草业学报*, 2003, 12(5): 88-93.
- [27] 张金, 许明祥, 王征, 等. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2721-2727.
- [28] 李占斌, 周波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 312-318.
- [29] 张森, 刘福德, 刘庆, 等. 黄河三角洲不同湿地群落氮磷化学计量特征及其生境适应策略[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(11): 2983-2989.
- [30] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [31] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J]. *自然资源学报*, 2016, 31: 1881-1891.
- [32] Hamer U, Pothast K, Burneo J I, et al. Nutrient stocks and phosphorus fractions in mountain soils of Southern Ecuador after conversion of forest to pasture [J]. *Biogeochemistry*, 2013, 112(1-3): 495-510.
- [33] Bui E N, Henderson B L. C : N : P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors [J]. *Plant & Soil*, 2013, 373(1-2): 553-568.
- [34] Fan H B, Wu J P, Liu W F, et al. Linkages of plant and soil C : N : P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. *Plant & Soil*, 2015, 392(1-2): 127-138.