

设施土壤有机氮组分及番茄产量对水氮调控的响应

吴汉卿，杜世宇，王丹阳，薛飞，张玉玲，邹洪涛，张玉龙，虞娜*

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业农村部东北耕地保育重点实验室/土肥资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866)

摘要:【目的】酸解铵态氮和酸解氨基酸氮是土壤有机氮的主要组分, 可表征土壤的供氮能力, 并在氮素矿化、固定、迁移以及为植物生长供氮过程中起到至关重要的作用。研究水、氮调控下设施土壤有机氮组分和番茄产量的相互关系, 为评价设施土壤肥力变化和制定科学合理的水、氮管理措施提供科学依据。【方法】田间定位试验在沈阳农业大学的温室内进行了5年, 供试作物为番茄, 栽培垄上覆盖薄膜, 打孔移栽番茄幼苗, 膜下滴灌。定位试验三个氮肥处理为施N 75、300、525 kg/hm², 记为N₁、N₂和N₃; 三个灌水量为25、35和45 kPa灌水下限(灌水始点土壤水吸力), 记为W₁、W₂和W₃, 共9个肥水处理组合。在试验第五年番茄生长期(2016年4—8月)调查了番茄产量及其构成, 在休闲期(2016年9月)测定0—10、10—20和20—30 cm土层土壤有机氮组分、有机碳和全氮含量。【结果】9个处理中, 土壤全氮、有机碳和除酸解氨基酸氮外的有机氮组分含量均随土层深度的增加而降低, 且0—10、10—20和20—30 cm土层间含量差异显著($P < 0.05$)。三个土层中酸解总氮占土壤全氮的66.0%、64.6%和55.2%, 是土壤有机氮的主要存在形态。土壤酸解总氮中各组分含量及其所占比例的大小顺序为酸解氨基酸氮、酸解铵态氮>酸解未知态氮>酸解氨基糖氮。灌水下限和施氮量对番茄产量及单果重的影响均达极显著水平($P < 0.01$), 水氮交互效应也达显著水平($P < 0.05$)。休闲期土壤酸解铵态氮与番茄产量间显著负相关($P < 0.05$)。番茄产量W₁N₂(25 kPa + N 300 kg/hm²)、W₂N₁(35 kPa + N 75 kg/hm²)和W₁N₁(25 kPa + 75 kg/hm²)处理间差异不显著。【结论】灌水和施氮量及其交互效应对各土层土壤全氮、酸解总氮、酸解铵态氮和酸解氨基酸氮的影响均达到极显著水平($P < 0.01$), 而对土壤有机碳的影响不显著($P > 0.05$)。相同施氮量下, 0—30 cm土层酸解铵态氮和0—20 cm土层酸解氨基酸氮含量均在土壤水吸力维持在35~6 kPa范围内达最高值, 此土壤水分含量下的0—20 cm土层酸解氨基酸氮含量在施N 75 kg/hm²时达到最大值。从节水减氮和番茄产量的角度考虑, 控制土壤水吸力不低于35 kPa、每季随水施N 75 kg/hm²为供试番茄生产条件下最佳的水、氮组合量。

关键词:酸解铵态氮; 酸解氨基酸氮; 膜下滴灌; 土壤水吸力; 供氮水平; 番茄产量

Response of soil organic nitrogen fractions and tomato yield to irrigation and nitrogen fertilization in greenhouse

WU Han-qing, DU Shi-yu, WANG Dan-yang, XUE Fei, ZHANG Yu-ling, ZOU Hong-tao, ZHANG Yu-long, YU Na*
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation of Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

Abstract:【Objectives】Acidolysable ammonium N (AN) and acidolysable amino acid N (AAN) are the dominated forms of soil organic nitrogen, which play key roles in the processes of soil nitrogen metabolism and nitrogen supply for plant growth. The effect of long-term irrigation and nitrogen fertilization on the AN and AAN contents was investigated, to evaluate soil nitrogen supply ability and provide reference for scientific water and nutrient management in greenhouse.【Methods】A five-year's tomato field experiment was conducted in the greenhouse of Shenyang Agricultural University. The field was mulched with plastic film and drip irrigation

收稿日期: 2018-05-31 接受日期: 2018-09-02

基金项目: 国家自然基金项目(41401322); 国家重点研发计划项目课题(2016YFD0300807); 国家科技支撑计划(2015BAD23B01); 农业部东北耕地保育重点实验室开放基金课题(2015NYBKFT-01)资助。

联系方式: 吴汉卿 E-mail: wuhanqing920705@163.com; *通信作者虞娜 E-mail: sausoilyn@163.com

pipes were loaded under the film. The treatment included three nitrogen rates of 75 kg/hm² (N₁), 300 kg/hm² (N₂) and 525 kg/hm² (N₃), and three irrigation rate, in which the irrigation amounts were controlled in soil water tension ranges of 25–6 kPa (W₁), 35–6 kPa (W₂) and 45–6 kPa (W₃). The yield and yield components of tomato were investigated in August 2016. The contents of soil organic nitrogen fractions, total nitrogen (TN) and organic carbon (SOC) in 0–10 cm, 10–20 cm and 20–30 cm soil depths were determined in the fallow period (September, 2016). **【Results】** The proportions of acidolysable N (AHN) in 0–10, 10–20 and 20–30 cm deep of soil were 66.0%, 64.6% and 55.2%, respectively. The contents of TN, SOC and all soil organic nitrogen fractions, except acidolysable amino sugar N (ASN), decreased with the increasing of soil depths, and the differences of contents among the three soil depths were significant at 5% level. The content and the proportion of each fraction in the AHN was in order of AAN, AN > acidolysable unknown N (UN) > ASN. Under the same N application rate, the contents of AN in 0–30 cm soil depths and the contents of AAN in 0–20 cm soil depths were both the highest in the irrigation treatment of W₂. Moreover, the contents of AAN in 0–10 and 10–20 cm soil depths were also the highest in the W₂N₁ treatment (35 kPa + 75 kg/hm²). The single effect of irrigation and nitrogen rate on tomato yield and yield components were extremely significant ($P < 0.01$), and their interaction was also significant ($P < 0.05$). AN content during the fallow period had a significant negative correlation with tomato yield. There were no significant differences in tomato yield among the treatments of W₁N₂ (25 kPa + 300 kg/hm²), W₂N₁ (35 kPa + 75 kg/hm²) and W₁N₁ (25 kPa + 75 kg/hm²). **【Conclusions】** Irrigation and nitrogen fertilization significantly influence the contents of total nitrogen, acidolysable nitrogen, acidolysable amino acid nitrogen and acidolysable ammonium nitrogen in the soil ($P < 0.01$), but not on soil organic carbon contents. Significant interaction of irrigation and fertilization is existed at the same time. In the view of water-saving and nitrogen-reducing with high tomato yield, keeping soil water suction in range of 35–6 kPa, and applying N of 75 kg/hm² is the optimum combination of irrigation and nitrogen fertilization in tomato production inside greenhouse.

Key words: acidolysable ammonium N; acidolysable amino acid N; fertigation under plastic film; soil water suction; nitrogen rate; tomato yield

土壤有机态氮约占土壤中全氮 90% 以上，其形态、结构和有效性对土壤氮素固持、矿化以及供氮潜力具有重要意义^[1-2]。水、氮是作物生长的必需因素，在设施条件下，传统粗放的水肥管理加上特殊的设施环境(室内高温高湿、缺少雨水淋洗)，导致水、氮利用效率低，土壤供氮潜力不足等问题较为突出^[3-4]。在特定的水氮调控下，土壤有机氮组分直接或间接影响微生物活性和氮素有效性，进而影响土壤供氮潜力和作物产量。为此，明确休耕期设施土壤有机氮组分和番茄产量对水氮调控的响应特征，对于准确评价设施土壤的供氮能力具有重要意义。

目前，国内外学者关于不同土壤类型和不同施肥条件下土壤有机氮组分含量、分布特征及其影响因素的研究已有较多报道，但多数集中在农田、森林和草地生态系统，且由于土壤、气候类型及肥料管理模式等差异，研究结果存在较大差异^[5-6]。单施化肥仅增加酸解铵态氮，施加有机肥显著提高土壤有机氮含量，化肥有机肥配施会增加酸解氨基糖氮

和酸解氨基酸氮，降低酸解铵态氮，有利于提高土壤氮素供应能力，且酸解氨基酸氮、酸解未知态氮和酸解铵态氮是土壤活性氮的主要贡献因子^[5,7-8]。不同灌溉方式对酸解氨基酸氮、酸解氨基糖氮和酸解铵态氮占全氮的比例影响显著，滴灌和渗灌均高于沟灌^[9]。氮添加能够降低土壤酸解氨基酸氮含量，增加酸解氨基糖氮含量；增加降雨量能够降低酸解铵态氮含量，增加酸解氨基糖氮含量；同时增加氮沉降量和降雨量会提高氮素利用率和土壤供氮潜力^[10]。水氮调控显著影响作物产量、吸氮量和氮素利用率^[11]。

综上，施肥和水分是影响农田、森林和草地土壤氮素有效性的关键因子，亦会影响有机氮组分的含量及分布特征，而二者是否对设施土壤氮素有效性存在耦合效应，尚缺少深入系统的研究。基于连续五年设施番茄的田间试验，研究水氮调控下设施土壤有机氮组分和番茄产量的变化行为及相互关系，阐明不同水氮调控的土壤供氮潜力，为评价设施土壤肥力水平和制定科学合理的水氮调控措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验始于 2012 年, 在沈阳农业大学科研基地新建日光温室内开展, 因初期土壤板结且肥力低, 在使用试验地第一、二年的春季整地时均匀施牛粪 (22.5 t/hm², 鲜重), 同时考虑定位试验化肥施入的负面影响及实际生产现状, 每年整地前施用膨化鸡粪 (26.4 t/hm², 鲜重)。每年 4~8 月采用相同的试验方案开始番茄定位试验, 其余时间土地休闲 (棚膜覆盖状态), 以减少连茬对番茄生长的影响。2012 年定植前, 各小区间用埋深 60 cm 的塑料布做防渗透隔离处理, 防止小区间水分、养分的运移。埋设过程中表土和底土分层放置、分层回填。供试土壤类型为棕壤, 始建前为荒地, 0—30 cm 土壤理化性质为: 土壤有机质 10.9 g/kg、容重 1.56 g/cm³、pH 值 7.0、全氮 1.4 g/kg、碱解氮 59.5 mg/kg、速效磷 26.3 mg/kg、速效钾 88.8 mg/kg。

试验采用 2 因素 (施氮量和灌水下限) 3 水平随机区组设计, 共设 9 个处理, 分别为 W₁N₁、W₁N₂、W₁N₃、W₂N₁、W₂N₂、W₂N₃、W₃N₁、W₃N₂、W₃N₃。其中 N₁、N₂、N₃ 对应的施氮量分别为 75、300、525 kg/hm² (依据作物基本需氮量、当地习惯施氮量及其间隔梯度), W₁、W₂、W₃ 对应的灌水下限分别为 25、35 和 45 kPa (依据蔬菜适宜的土壤水分能量指标, 灌水始点土壤水吸力), 灌水上限为土壤水吸力 6 kPa (土壤田间持水量对应的土壤水吸力)^[12]。整个番茄生长季根据张力计读数指示灌溉, 灌水总量和单次灌水量如表 1 所示。每个处理 4 次重复, 小区面积 2.5 m², 每小区番茄 16 株。

试验所用有机肥为膨化鸡粪, 有机质平均含量 261.2 g/kg。化肥分别为尿素、过磷酸钙 (P₂O₅ 220 kg/hm²) 和硫酸钾 (K₂O 300 kg/hm²)。各处理有机肥、磷肥和钾肥用量一致, 有机肥、全部磷肥、1/3 氮肥和 1/3 钾肥作为底肥施入, 其余氮钾肥分别于第一和第二穗果膨大期随滴灌均分追施。灌溉采用膜下滴灌, 各小区分层埋设张力计指示土壤水分变化、确定灌水时间和单次灌水量。番茄定植时浇灌定植水, 再浇一次缓苗水后, 进行水分处理。记录定植和缓苗水的用量, 灌水上限 (土壤水吸力 6 kPa) 为土壤田间持水量 (0.349 cm³/cm³), 灌水下限土壤含水量由设计土壤水吸力值算出, 即当 20 cm 土层张力计读数 (早 8:00) 达到灌溉下限土壤吸力值时, 依据该观测值, 使用试验地 0—30 cm 土壤水分特征曲线

表 1 番茄生长期不同处理单次灌水和总灌水量

Table 1 Single and total irrigation amount during tomato growth period in different treatments

Treatment	Irrigation low limit (kPa)	单次灌水量 Single irrigation amount (m ³ /hm ²)	总灌水总量 Total irrigation amount (m ³ /hm ²)
W ₁ N ₁	25	96.46	2508.0
W ₁ N ₂	25	99.96	2499.0
W ₁ N ₃	25	99.44	2486.0
W ₂ N ₁	35	109.68	1974.2
W ₂ N ₂	35	104.56	1882.0
W ₂ N ₃	35	112.93	2145.6
W ₃ N ₁	45	111.30	1780.8
W ₃ N ₂	45	115.26	1844.2
W ₃ N ₃	45	111.68	1786.8

计算体积含水量:

$$\theta = 0.5205 (1 + 6382.43h^{11.501})^{-0.0094} \quad (1)$$

$$r = 0.995, \quad P < 0.01$$

式(1)中, h 为土壤水吸力 (kPa), θ 为土壤体积含水量 (m³/m³)。

再依据下式计算各小区单次灌水量:

$$Q (\text{m}^3) = (Q_f - Q_l) \times H \times R \times S \quad (2)$$

式(2)中, Q 为单次灌水水量 (m³/小区), Q_f 和 Q_l 分别为灌水上限和灌水下限下的土壤含水量 (m³/m³); H 为计划湿润层厚度 (m), 取 H=0.3 m; R 为土壤湿润比, 取 R=0.5; S 为小区面积 (m²)。记录 2016 年整个生长季张力计的读数、灌水量和番茄产量。

1.2 样品采集与测定方法

在试验第五年的休耕期 (2016 年 9 月 1 日), 利用五点混合法采集 0—10、10—20 和 20—30 cm 土层样品。土样经自然风干后, 过 100 目筛 (0.15 mm), 分别测定有机氮组分、全氮和有机碳含量。

土壤有机氮组分采用 Bremner 法^[13]测定。其中酸解总氮用凯氏法测定; 酸解铵态氮用加 MgO—凯氏蒸馏法测定; 酸解铵态氮+酸解氨基糖氮用 pH 为 11.2 的磷酸盐-硼砂缓冲液蒸馏法测定; 酸解氨基酸氮用茚三酮氧化后磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法测定。非酸解氮、酸解氨基糖氮以及酸解未知态氮均由差减法求得。土壤全氮和有机碳均使用元素分析仪 (Elementar VARIO EL III) 测得。

1.3 统计分析

采用 SPSS 21.0 和 DPS 7.05 等软件进行数据统

计分析,采用随机区组设计进行双因素方差分析,Duncan法进行多重比较,Origin 9.3进行绘图。

2 结果与分析

2.1 设施土壤氮对水氮调控的响应

从表2可以看出,土壤有机碳、全氮和酸解总氮含量均随土层深度增加而降低,不同土层间差异显著($P < 0.05$)。方差分析结果表明,0—30 cm各土层灌水下限和施氮量单一效应及水氮交互效应对土壤全氮和酸解总氮的影响均达到极显著水平($P < 0.01$),而对土壤有机碳的影响并不明显($P > 0.05$)。水分单一效应对不同土层全氮含量影响各异,而氮肥单一效应统计表明0—10 cm的N₁显著低于其余二个水平,而在10—20 cm和20—30 cm均表现为随氮肥用量增加,全氮含量显著降低的趋势。灌水下限、施氮量和水氮交互对不同土层土壤碳氮比的规律不一。总体上,酸解总氮含量远大于非酸解氮含量。方差分析表明,除20—30 cm土层灌水下限对非酸解氮影响不显著外,灌水下限、施氮量及水氮交互效应对各土层土壤非酸解氮均有极显著影响($P < 0.01$)。灌水下限单一因素下,0—30 cm土层酸解总氮含量均表现为W₂>W₃>W₁($P < 0.01$);施氮量单一因素下,0—30 cm土层酸解总氮含量均表现为N₂施氮水平下最低。0—10 cm土层酸解总氮在不同灌水下限下表现为N₃水平最高的特点。0—30 cm土层酸解总氮均表现为N₂水平下,W₂最高;N₃水平下,W₃最高的变化特征。

2.2 设施土壤酸解氮各组分含量及其在酸解总氮中的分配比例对水氮调控的响应

不同水、氮处理设施大棚土壤酸解氮各组分含量及其在酸解总氮中分配比例大小顺序为酸解氨基酸氮、酸解铵态氮>酸解未知态氮>酸解氨基糖氮,除酸解氨基糖氮外,总体上随着土层加深而降低。酸解铵态氮和酸解氨基酸氮占土壤有机氮组分的绝大部分,是有机氮的主要存在形式(图1)。

各层土壤有机氮组分含量双因素方差分析结果(表3)表明,除灌水下限对20—30 cm土层酸解氨基糖氮含量的影响不显著外($P > 0.05$),其余各土层灌水下限、施氮量及水氮交互对各土层酸解铵态氮、酸解氨基糖氮和酸解氨基酸氮含量的影响均达极显著水平($P < 0.01$)。相同施氮量下,酸解铵态氮随灌水下限的增加总体上呈先增加后降低的趋势,最高值均出现在W₂水平下。相同灌水下限下,N₃处理

酸解铵态氮显著高于N₁和N₂。相同施氮量下,0—20 cm土层酸解氨基酸氮随灌水下限的增加呈现先增加后降低趋势,酸解氨基酸氮含量最高值也出现在W₂,其中W₂N₁最大。除施氮量对0—10 cm土层土壤酸解未知态氮影响不显著及水氮交互效应对0—10 cm和20—30 cm土层土壤酸解未知态氮含量的影响显著外,其余各土层灌水下限、施氮量及水氮交互效应对酸解未知态氮影响均达极显著水平($P < 0.01$)。

2.3 设施番茄产量及构成对水氮调控的响应

如表4所示,灌水下限和施氮量对番茄产量的影响均达极显著水平($P < 0.01$),水氮交互效应对其影响达显著水平($P < 0.05$)。灌水下限单一效应表明,W₁显著高于W₂和W₃,且W₂和W₃差异不显著。W₁和W₃灌水下限下,番茄产量随施氮量的增加均呈现先增后降的变化,W₂下则先降后增。施氮量单一效应表明,随施氮量增加其产量降低,N₁和N₂之间差异不显著,均显著高于N₃水平。相同施氮下,在W₁下,设施番茄产量随灌水下限增加而减少,W₂和W₃下则呈现出先减少后增加。水氮交互影响以W₁N₂处理产量最高,与W₂N₁和W₁N₁处理间差异均不显著。设施番茄单果重与产量表现出类似规律。

2.4 设施土壤有机氮组分与全氮、有机碳和番茄产量对水氮调控响应的偏相关分析

偏相关分析中将土壤碳氮比作为控制变量(表5),结果表明土壤全氮和有机碳与酸解氨基酸氮均不相关;全氮与非酸解氮偏相关达到显著水平($P < 0.05$),有机碳与之不相关。全氮和有机碳与酸解铵态氮、酸解氨基酸氮、酸解未知态氮和酸解总氮间的偏相关系数均达到极显著性水平($P < 0.01$)。各有机氮组分中,仅酸解铵态氮含量与番茄产量间的零阶相关系数达到5%显著负相关。此外,土壤全氮和有机碳二者之间的相关性也达到极显著水平($r_{\text{zero}} = 0.928^{**}$, $r_{\text{partial}} = 0.966^{**}$),酸解铵态氮和酸解氨基酸氮之间呈极显著正相关($r_{\text{zero}} = 0.858^{**}$, $r_{\text{partial}} = 0.865^{**}$)。

3 讨论与结论

土壤全氮和有机碳均是反映土壤供氮潜力的重要指标^[14]。土壤有机氮组分因其形态、结构和微生物分解难易程度不同,导致有机氮各组分对土壤全氮、有机碳的贡献也不同^[15]。本研究表明,设施不同水氮调控下,各土层全氮含量均差异显著,且不同

表 2 不同水氮调控处理土壤各层次全氮、有机碳、碳氮比、酸解总氮和非酸解氮含量

Table 2 Contents of total N, organic C, C/N ratio, acidolysable and non-acidolysable N at various soil depths under different irrigation and nitrogen fertilization treatments

土层(cm) Soil layer	处理 Treatment	全氮(g/kg) Total N	有机碳(g/kg) Soil organic C	碳氮比 C/N ratio	酸解总氮(mg/kg) Acidolysable N	非酸解氮(mg/kg) Nonhydrolysable N
0—10	W ₁ N ₁	1.90 bc	17.03	8.97 bc	1099.53 b	656.37 c
	W ₁ N ₂	2.25 a	16.84	7.48 d	1029.57 c	956.84 a
	W ₁ N ₃	2.27 a	18.73	8.24 cd	1103.01 b	911.54 b
	W ₂ N ₁	1.67 d	18.16	10.87 a	1148.51 a	407.67 g
	W ₂ N ₂	2.02 b	17.90	8.85 bc	1162.02 a	671.41 d
	W ₂ N ₃	1.73 cd	16.96	9.81 ab	1164.20 a	189.11 e
	W ₃ N ₁	1.82 cd	18.49	10.17 ab	1096.31 b	598.61 f
	W ₃ N ₂	1.77 cd	19.44	10.97 a	1083.94 b	468.64 e
	W ₃ N ₃	2.00 b	18.02	9.00 bc	1170.33 a	570.62 d
	灌水 Water (W)	**	ns	**	**	**
	施氮 Nitrogen (N)	**	ns	*	**	**
	W × N	**	ns	*	**	**
10—20	W ₁ N ₁	1.47 cd	15.08	10.30	774.55 e	619.39 e
	W ₁ N ₂	1.40 e	12.66	9.05	720.54 f	564.11 d
	W ₁ N ₃	1.50 c	18.17	12.11	886.54 c	474.21 b
	W ₂ N ₁	1.43 de	15.71	10.96	966.25 ab	380.93 e
	W ₂ N ₂	1.43 de	14.63	10.22	948.78 b	375.34 e
	W ₂ N ₃	1.28 f	13.87	10.86	825.32 d	246.62 c
	W ₃ N ₁	1.71 a	14.70	8.59	973.70 a	656.31 d
	W ₃ N ₂	1.58 b	17.07	10.80	759.92 e	689.39 a
	W ₃ N ₃	1.40 e	16.84	12.04	886.83 c	345.57 d
	灌水 Water (W)	**	ns	ns	**	**
	施氮 Nitrogen (N)	**	ns	ns	**	**
	W × N	**	ns	ns	**	**
20—30	W ₁ N ₁	0.75 g	10.80	14.47	450.35 e	204.16 d
	W ₁ N ₂	1.01 de	8.67	8.57	388.98 f	486.32 d
	W ₁ N ₃	1.06 de	11.42	10.83	554.64 c	315.11 f
	W ₂ N ₁	1.13 c	11.21	9.89	562.78 bc	492.75 d
	W ₂ N ₂	1.39 b	12.94	9.29	594.64 a	659.68 b
	W ₂ N ₃	1.00 e	11.04	11.07	483.56 d	333.10 g
	W ₃ N ₁	1.55 a	11.80	7.62	578.56 ab	846.94 a
	W ₃ N ₂	0.89 f	10.953	12.36	408.66 f	338.49 e
	W ₃ N ₃	1.09 cd	10.862	9.96	572.02 bc	314.56 c
	灌水 Water (W)	**	ns	ns	**	ns
	施氮 Nitrogen (N)	**	ns	ns	**	**
	W × N	**	ns	**	**	**

注 (Note) : N₁—75 kg/hm²; N₂—300 kg/hm²; N₃—525 kg/hm²; W₁—25—6 kPa; W₂—35—6 kPa; W₃—45—6 kPa。同列数据后不同字母表示同一土层中处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$) Values followed by different letters indicate significant difference among treatments in the same layer according to Duncan's test ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—不显著 Not significant.

土层全氮和有机碳含量差异显著。土壤全氮和有机碳含量相对稳定, 但施肥、灌溉是影响其含量在土壤中消长的主要因素。设施土壤温度高, 湿度大,

微生物活性增强, 土壤有机氮的矿化程度也相应提高, 设施条件特殊的水、气、热环境对土壤全氮的影响更为明显。本研究中 0—30 cm 土层中灌水下

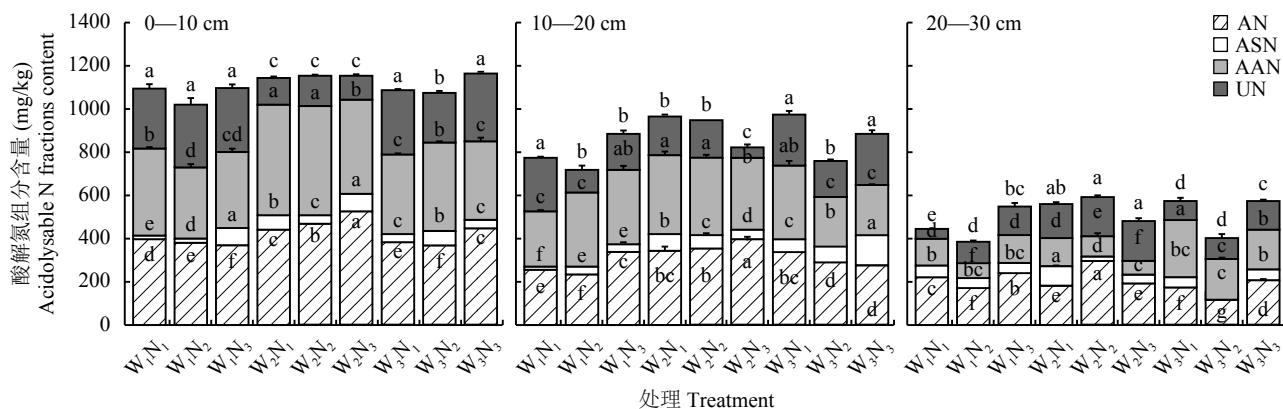


图 1 不同灌溉施肥组合下设施土壤 0—30 cm 土层酸解氮组分含量

Fig. 1 Contents of acidolysable nitrogen fractions in 0—30 cm layer of soil under different irrigation and fertilization treatments

[注 (Note) : N₁—75 kg/hm²; N₂—300 kg/hm²; N₃—525 kg/hm²; W₁—25—6 kPa; W₂—35—6 kPa; W₃—45—6 kPa. AN—酸解铵态氮 Acidolysable ammonium N; ASN—酸解氨基糖氮 Acidolysable amino sugar N; AAN—酸解氨基酸氮 Acidolysable amino acid N; UN—酸解未知态氮 Acidolysable unknown N. 方柱上不同字母表示同一组分不同处理间差异显著 ($P<0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference among treatments for the same nitrogen fraction according to Duncan's test ($P<0.05$).]

表 3 不同水氮调控下设施土壤有机氮组分含量双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA analysis to contents of soil organic nitrogen fractions under different irrigation and nitrogen fertilization treatments

土层 (cm) Soil layer	变量 Variable	酸解铵态氮 Acidolysable ammonium N	酸解氨基糖氮 Acidolysable amino sugar N	酸解氨基酸氮 Acidolysable amino acid N	酸解未知态氮 Acidolysable unknown N
0—10	灌水 Water (W)	**	**	**	**
	施氮 Nitrogen (N)	**	**	**	ns
	W × N	**	**	**	*
10—20	灌水 Water (W)	**	**	**	**
	施氮 Nitrogen (N)	**	**	**	**
	W × N	**	**	**	**
20—30	灌水 Water (W)	**	ns	**	**
	施氮 Nitrogen (N)	**	**	**	**
	W × N	**	**	**	*

注 (Note) : *— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ns—不显著 Not significant.

限、施氮量和水氮交互对土壤全氮均有极显著影响, 这说明适当合理的水氮配合有利于调控土壤全氮含量。研究表明, 施肥显著影响土壤全氮和有机碳, 且有机无机肥配施可维持土壤供氮能力并提高作物产量^[16—17]; 水分影响土壤全氮和有机碳含量表现为随灌水量增加呈抛物线变化^[18]。本研究中灌水下限、施氮量和水氮交互对土壤有机碳影响均不显著, 这可能是由于试验设计本身为不同灌水和施氮处理, 而对土壤有机碳含量的影响未达显著差异。本研究表明, 控制土壤碳氮比, 除土壤全氮、有机

碳与酸解氨基糖氮含量、土壤有机碳与非酸解氮含量之间零阶和偏相关均不显著外 ($P>0.05$), 全氮与非酸解氮间偏相关达显著水平 ($P<0.05$), 土壤有机碳与全氮、酸解总氮及组分之间偏相关达到极显著正相关 ($P<0.01$)。有研究表明, 不同施肥措施土壤全氮和有机碳之间显著相关^[19]; 有机碳与全氮、酸解铵态氮极显著相关, 全氮与酸解总氮、酸解铵态氮、非酸解氮极显著相关^[20], 这与本文研究结果相一致, 说明水氮调控下土壤全氮、有机碳与有机氮组分间联系紧密。

表4 不同灌溉施肥组合处理下设施番茄产量及单果重
Table 4 Yield and single fruit weight of tomato under different irrigation and fertilization treatments

处理 Treatment	产量 ($\times 10^3$ kg/hm 2) Yield	单果重 (g/fruit) Fruit weight
W ₁ N ₁	140.88 ± 4.58 a	166.50 ± 4.23 b
W ₁ N ₂	141.32 ± 14.36 a	185.91 ± 14.46 a
W ₁ N ₃	116.74 ± 5.35 b	151.94 ± 3.74 bcd
W ₂ N ₁	138.23 ± 1.06 a	164.67 ± 2.37 bc
W ₂ N ₂	105.54 ± 1.93 b	145.38 ± 2.07 cd
W ₂ N ₃	107.97 ± 2.74 b	134.19 ± 1.84 d
W ₃ N ₁	119.36 ± 3.37 b	162.70 ± 2.65 bc
W ₃ N ₂	124.45 ± 3.78 ab	162.21 ± 6.65 bc
W ₃ N ₃	116.75 ± 4.54 b	150.42 ± 0.44 bcd
W ₁	132.98 ± 6.15 a	168.11 ± 6.65 a
W ₂	117.25 ± 5.35 b	148.08 ± 4.57 b
W ₃	120.19 ± 2.27 b	158.44 ± 2.88 a
N ₁	132.83 ± 3.78 a	164.62 ± 1.69 a
N ₂	123.77 ± 6.74 a	164.50 ± 7.48 a
N ₃	113.82 ± 2.62 b	145.51 ± 3.09 b
灌水 Water (W)	**	**
施氮 Nitrogen (N)	**	**
W × N	*	*

注 (Note) : N₁—75 kg/hm 2 ; N₂—300 kg/hm 2 ; N₃—525 kg/hm 2 ; W₁—25~6 kPa; W₂—35~6 kPa; W₃—45~6 kPa。同列数据后不同字母表示同一土层中处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments in the same soil layer according to Duncan's test ($P < 0.05$)。*— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$ 。

有研究表明, 土壤全氮和有机碳可以增强根际微生物代谢活动, 促进根系发育, 进而为作物生长

提供所需养分, 从而达到增产效果^[21]。本研究表明, W₁ 和 W₃ 水平下, 番茄产量随施氮量增加呈抛物线变化, 这说明水氮调控对番茄增产可能存在阈值, 超过阈值, 番茄会减产, 这与王鹏勃等^[22]的研究结果相一致。本研究番茄最高产量为 W₁N₂ 处理, 但与 W₂N₁、W₁N₁ 等处理间差异不显著, 从节水节肥角度来看, 适当减少灌溉量对产量无显著影响。因此, 本试验控制灌水下限 35 kPa 和施氮量 75 kg/hm 2 可兼顾产量和节水节肥, W₂N₁ 处理可作为最优水氮模式。

有机氮是土壤氮素的主要存在形态, 各有机氮组分及其分配比例也常因施肥、灌溉、土壤类型等不同而有所差异^[23~24]。本研究表明, 不同水氮调控下, 设施土壤酸解氮各组分含量及其在酸解总氮中的分配比例差异显著, 而明确酸解氮各组分含量及占酸解总氮的比例有利于探明土壤氮素转化对水肥条件的响应特征。这是因为土壤水肥条件影响着土壤有机质矿化和腐殖化过程, 进而使酸解氮各组分含量产生差异。而设施农业生态系统其独特的水气热条件及灌溉管理模式也会导致不同形态土壤有机氮组分的重新分配。本研究表明, 土壤酸解有机氮含量大于非酸解氮含量, 以 0~10 cm 土层含量最高。各处理土壤酸解氮各组分含量及其占酸解总氮比例的大小顺序为酸解氨基酸氮、酸解铵态氮 > 酸解未知态氮 > 酸解氨基糖氮, 这与前人研究结果相一致^[25], 说明即使在不同的农业生态系统, 土壤有机氮组分的分布特征仍然存在一定的共性。而不同灌溉方法对保护地土壤有机氮组分的研究表明, 酸解氮各组分的含量和分配比例大小顺序为酸解未知态氮 > 酸解铵态氮 > 酸解氨基酸氮 > 酸解氨基糖氮^[9]。这与本研究结果并不一致, 这可能是水氮交互作用在土壤有机氮组分分配中起到重要作用。

酸解铵态氮和酸解氨基酸氮是设施土壤中最主

表5 土壤有机氮组分与全氮、有机碳和番茄产量的偏相关分析 (r)

Table 5 Partial correlation analysis of soil organic nitrogen fractions with soil total nitrogen, organic carbon and tomato yield

有机氮组分 Organic N fraction	全氮 Soil total N (n = 27)	有机碳 Soil organic C (n = 27)	番茄产量 Tomato yield (n = 9)
酸解铵态氮 Acidolysable ammonium N	0.780**	0.803**	-0.686*
酸解氨基糖氮 Acidolysable amino sugar N	0.127 ^{ns}	0.205 ^{ns}	-0.232 ^{ns}
酸解氨基酸氮 Acidolysable amino acid N	0.802**	0.827**	-0.300 ^{ns}
酸解未知态氮 Acidolysable unknown N	0.607**	0.588**	0.204 ^{ns}
酸解总氮 Acidolysable N	0.901**	0.926**	0.540 ^{ns}
非酸解氮 Nonhydrolysable N	0.421*	0.290 ^{ns}	0.246 ^{ns}

注 (Note) : *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—不显著 Not significant.

要的有机氮形态，酸解铵态氮和酸解氨基酸氮是土壤易矿化有机态氮的源和库，与土壤的供氮能力密不可分^[26]。本研究中，酸解铵态氮和酸解氨基酸氮含量和分配比例最高(图1)。土壤酸解铵态氮(0—30 cm土层)和酸解氨基酸氮(0—20 cm土层)均在W₂(35 kPa)灌水水平下达到峰值。这可能是由于灌溉通过调控土壤水分、通气和热量状况影响着土壤微生物活动进而决定有机氮转化过程。本研究通过监测番茄生长季土壤水吸力变化而控制灌水，番茄生长期中灌水较为频繁，且灌水周期的变化均伴随着土壤干湿交替过程的产生，一方面会增加土壤微生物死亡量，使得土壤有效氮的含量增加；另一方面土壤干湿交替过程影响土壤中氧含量，从而直接影响土壤微生物活性，进而影响土壤有机氮转化，且在干旱后复湿润过程中土壤微生物量迅速上升。Bardgett等^[27]研究表明，作物生长过程中吸收的氮源主要就是土壤可溶性氮中占优势的酸解氨基酸氮。适中的灌水下限(35 kPa)也有利于番茄对氮的吸收，因此，同样的供氮水平下，休耕期设施土壤酸解铵态氮含量与番茄产量间达到显著负相关，这从另一个角度反应出高产水肥处理下，番茄生长季对土壤中酸解氨基酸氮的吸收量大于同等供氮水平下其他水分处理。

本研究结果表明，除20—30 cm土层灌水下限对土壤酸解氨基糖氮影响不显著外，灌水下限、施氮量及水氮交互对各土层土壤有机氮各组分含量及其在酸解总氮中的分配比例均达显著或极显著影响(表3)。Stanford等^[28]研究表明，灌水量的增加能显著提高土壤养分的有效性，一定土壤含水量范围内土壤氮素矿化与土壤含水量呈显著正相关。研究表明，土壤环境条件会直接或间接影响土壤微生物数量、活性、群落结构以及功能多样性，进而影响土壤有机氮的转化、运移过程^[29-30]。而在不同水氮调控下设施土壤微生物活动还有待进一步研究。Wang等^[31]研究表明，合理的水氮管理能有效提升土壤水氮利用率、氮素矿化、作物吸氮量和干物质累积量。综上，在设施生产系统中，水氮调控对土壤有机氮组分含量及其在酸解总氮中分配比例、全氮含量和番茄产量均有较为显著的影响，合理的水氮管理对设施土壤供氮能力和产量的提升具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] Mulvaney R L, Khan S A, Hoeft R G, et al. A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(4): 1164–1172.
- [2] Zhang Y L, Xu W J, Duan P P, et al. Evaluation and simulation of nitrogen mineralization of paddy soils in Mollisols area of Northeast China under waterlogged incubation[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171022.
- [3] Li Y M, Sun Y X, Liao S Q, et al. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 186: 139–146.
- [4] Mahajan G, Singh K G. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1–2): 202–206.
- [5] Kwon H Y, Hudson R J M, Mulvaney R L. Characterization of the organic nitrogen fraction determined by the Illinois soil nitrogen test[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3): 1033–1043.
- [6] 丛耀辉, 张玉玲, 张玉龙, 等. 黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 457–467.
Cong Y H, Zhang Y L, Zhang Y L, et al. Soil organic nitrogen components and their contribution to mineralizable nitrogen in paddy soil of the black soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 457–467.
- [7] Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Content and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 739–745.
- [8] 郝小雨, 马星竹, 高中超, 等. 长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4707–4716.
Hao X Y, Ma X Z, Gao Z C, et al. Variation characteristics of fractions of active nitrogen and organic nitrogen under different long-term fertilization practices in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4707–4716.
- [9] 姬景红, 张玉龙, 黄毅, 等. 灌溉方法对保护地土壤有机氮组分及剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 99–104.
Ji J H, Zhang Y L, Huang Y, et al. Effect of different irrigation methods on forms and profile distribution of soil organic nitrogen in protected field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 99–104.
- [10] Tian J H, Wei K, Condon L M, et al. Effects of elevated nitrogen and precipitation on soil organic nitrogen fractions and nitrogen-mineralizing enzymes in semi-arid steppe and abandoned cropland[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417(1–2): 217–229.
- [11] Gao N, Liu Y, Wu H Q, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on yield, nitrogen uptake, and recovery of two successive Chinese cabbage crops as assessed using ¹⁵N isotope[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 215(27): 117–125.
- [12] 马建辉, 叶旭红, 韩冰, 等. 膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体分布特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3561–3571.
Ma J H, Ye X H, Han B, et al. Effects of different controlled irrigation low limits on the size distribution of soil aggregates with drip irrigation under film mulching in a greenhouse soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(18): 3561–3571.
- [13] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[M]. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 1238–1255.

- [14] Jiang Q, Li Q, Wang X, et al. Estimation of soil organic carbon and total nitrogen in different soil layers using VNIR spectroscopy: Effects of spiking on model applicability[J]. *Geoderma*, 2017, 293: 54–63.
- [15] Spargo J T, Cavigelli M A, Alley M M, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen fractions with duration of no-tillage management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1624–1633.
- [16] Yang J, Gao W, Ren S. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvo-aquic soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151: 67–74.
- [17] Zhang W, Xu M, Wang B, et al. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84(1): 59–69.
- [18] 俞华林, 张恩和, 王琦, 等. 灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田土壤有机碳、全氮和籽粒产量的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 227–233.
Yu H L, Zhang E H, Wang Q, et al. Effects of irrigation and N supply levels on soil organic carbon, total nitrogen and grain yield of spring wheat on no-tillage farmland with standing stubble[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 227–233.
- [19] Shahid M, Nayak A K, Kumar A, et al. Carbon and nitrogen fractions and stocks under 41 years of chemical and organic fertilization in a sub-humid tropical rice soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170: 136–146.
- [20] 张永全, 寇长林, 马政华, 等. 长期有机肥与氮肥配施对潮土有机碳和有机氮组分的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 584–589.
Zhang Y Q, Kou C L, Ma Z H, et al. Effects of long term combination application of organic manure and nitrogen fertilizer on organic carbon and organic nitrogen forms of fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3): 584–589.
- [21] 刘顺, 盛可银, 刘喜帅, 等. 陈山红心杉根际土壤有机碳、氮含量及根际效应[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1957–1964.
Liu S, Sheng K Y, Liu X S, et al. Contents of soil organic carbon and nitrogen forms in rhizosphere soil of *Cunninghamia lanceolata* and the rhizosphere effect[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(7): 1957–1964.
- [22] 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 314–323.
Wang P B, Li J M, Ding J J, et al. Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(2): 314–323.
- [23] Sekhon K S, Singh J P, Mehla D S. Long-term effect of manure and mineral fertilizer application on the distribution of organic nitrogen fractions in soil under a rice-wheat cropping system[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2011, 57(7): 705–714.
- [24] Wang S R, Jiao L X, Jin X C, et al. Characteristics of organic nitrogen fractions in sediments of the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze river area in China[J]. *Water and Environment Journal*, 2009, 26(4): 473–481.
- [25] 罗如熠, 张世熔, 徐小逊, 等. 黑河下游湿地土壤有机氮组分剖面的分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 956–964.
Luo R Y, Zhang S R, Xu X X, et al. Profile distribution characteristics of soil organic nitrogen fractions in the lower reaches of the Heihe River wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4): 956–964.
- [26] Lu H L, Li S Q, Jin F H, et al. Contributions of organic nitrogen forms to mineralized nitrogen during incubation experiments of the soils on the Loess Plateau[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(21–22): 3399–3419.
- [27] Bardgett R D, Streeter T C, Bol R. Soil microbes compete effectively with plants for organic nitrogen inputs to temperate grasslands[J]. *Ecology*, 2003, 84(5): 1277–1287.
- [28] Stanford J, Epstein E. Nitrogen mineralization-water relations in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1974, 38(1): 289–299.
- [29] Clark L A, Roberts T L, Slaton N A. Estimation of mineralizable nitrogen from ¹⁵N-labelled crop residues using alkaline-hydrolyzable nitrogen methods[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(4): 1243–1248.
- [30] Rothrock M J, Cook K L, Warren J G, et al. Microbial mineralization of organic nitrogen forms in poultry litters[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(5): 1848–1857.
- [31] Wang Y, Janz B, Engedal T, et al. Effect of irrigation regimes and nitrogen rates on water use efficiency and nitrogen uptake in maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 179: 271–276.