

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.029

暗管排水和有机肥施用下滨海设施土壤氮素行为特征

侯毛毛^{1,2} 陈竞楠³ 杨 祁³ 林志远¹ 金 秋⁴ 钟凤林¹

(1. 福建农林大学园艺学院, 福州 350002; 2. 现代设施农业福建省高校工程研究中心, 福清 350300;

3. 福建农业职业技术学院园艺园林学院, 福州 350119; 4. 南京水利科学研究所, 南京 210029)

摘要: 为揭示暗管排水和微生物有机肥施用下滨海设施土壤氮素的归趋和转化机制, 设计了暗管排水结合有机肥处理(S-OF)、暗管排水结合无机肥处理(S-IF)和无机肥处理(CK), 以葡萄和油菜间作栽培为模型系统, 观测土壤总氮含量在垂直剖面上的分布、耕层土壤矿质态氮含量和有机态氮含量的变化及其与土壤理化性质的相关性。结果表明: 暗管排水和微生物有机肥共同驱动下, 土壤容重有所降低, 孔隙度升高; 暗管排水促使耕层土壤总氮向深层土壤迁移, 相比S-IF, S-OF处理耕层土壤总氮的降低幅度较小; 滨海设施土壤耕层的总氮80%以上以有机态形式存在, 矿质态氮所占比例很小, S-OF处理有利于试验后期土壤矿质态氮含量的提升; 耕层土壤矿质态氮含量与土壤有机质、总有机碳含量呈极显著正相关。暗管排水和微生物有机肥施用有利于改善滨海设施土壤结构, 提高耕层土壤有机质和总有机碳含量, 促进土壤有机态氮向矿质态氮的转化, 本研究结果可为滨海设施土壤改良和水肥决策提供科学依据。

关键词: 设施土壤; 氮素; 暗管排水; 微生物有机肥; 归趋

中图分类号: S274.1; S144 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0259-08

Behavior of Coastal Greenhouse Soil Nitrogen as Influenced by Subsurface Drainage and Organic Fertilizer

HOU Maomao^{1,2} CHEN Jingnan³ YANG Qi³ LIN Zhiyuan¹ JIN Qiu⁴ ZHONG Fenglin¹

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2. Engineering Research Center of Fujian University of Modern Facilities Agriculture, Fuqing 350300, China

3. College of Horticulture and Forest, Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350119, China

4. Institute of Water Conservancy Science of Nanjing, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aiming to reveal the fate and transformation mechanism of soil nitrogen under coastal facilities cultivation, three treatments, including subsurface drainage combined with microbial organic fertilizer application (S-OF), subsurface drainage combined with inorganic fertilizer application (S-IF) and inorganic fertilizer application without subsurface drainage (CK) were designed. The model system was grape and rape intercropping cultivation. The distribution of soil total nitrogen in vertical profile, the changes of mineral and organic nitrogen in tillage layer and their correlation with soil physical and chemical properties were observed. The results showed that soil bulk density was decreased and soil porosity was increased under the combination of subsurface drainage and microbial organic fertilizer application; subsurface drainage promoted the transfer of total nitrogen from topsoil to deep soil, and the reduction rate of total nitrogen in topsoil of S-OF treatment was smaller than that of S-IF treatment; more than 80% of total nitrogen in topsoil existed in the organic form, and the proportion of mineral nitrogen was very small, S-OF was beneficial to the increase of mineral nitrogen content in the later stage of the experiment; the mineral nitrogen content in plough layer soil was positively correlated with soil organic matter and total organic carbon. Subsurface drainage and application of microbial organic fertilizer were conducive to improving the soil structure in coastal land, increasing the content of organic

收稿日期: 2019-07-22 修回日期: 2019-09-23

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2016J05069)、现代设施农业福建省高校工程研究中心开放基金项目(G2-KF1808)和中国博士后科研基金面上项目(2018M630723)

作者简介: 侯毛毛(1989—),男,副教授,博士,主要从事农业水土工程研究,E-mail: xiaohouboshi@126.com

通信作者: 钟凤林(1979—),男,教授,博士,主要从事设施植物栽培研究,E-mail: zhong591@fafu.edu.cn

matter and total organic carbon in tillage soil, and promoting the transformation of soil organic nitrogen to mineral form. The conclusions can provide scientific basis for the improvement of coastal greenhouse soil and the decision-making of irrigation and fertilization.

Key words: greenhouse soil; nitrogen; subsurface drainage; microbial organic fertilizer; fate

0 引言

开发滨海农区已成为缓解农业用地压力、转变农业发展方式的新途径,如江苏省开发了如东滨海园区,浙江省建设了宁波杭州湾新区,旨在充分利用滨海地区得天独厚的土地资源,将滨海具有耕作潜力的区域打造成粮仓。然而,滨海地区的土壤盐分含量高、结构密实、容重大、孔隙度低、通气性较差,需要经过改良后才能农用^[1]。暗管排水因不占用耕地、方便机械化操作而成为滨海地区土壤改良的首选^[2]。研究表明,暗管排水虽会造成一定的养分流失,但在去除土壤盐分、降低地下水位和改善土壤理化性质等方面发挥了重要作用^[3-4]。其他土壤改良方法还包括生物改良(通过菌剂或微生物有机肥实现)、客土法、施用土壤改良剂等^[5-9]。目前,利用暗管排水改良土壤、同时结合微生物有机肥栽培在滨海地区农业生产上应用广泛。

一些滨海农区搭建简易设施用于生产果蔬,这使得滨海设施土壤既具备滨海土壤本身的特点,又具备集约化栽培和肥料高投入的设施土壤特性,但现阶段对滨海设施土壤认识十分有限。在暗管排水和微生物有机肥施用等土壤改良措施下,设施土壤中的营养元素尤其是“生命元素”氮素如何迁移和

转化尚不明晰。本研究以滨海农区设施条件下葡萄和油菜间作栽培为模型系统,观测暗管排水和微生物有机肥作用下土壤氮素的剖面分布和形态,分析氮素含量和形态与土壤主要指标间的响应关系,揭示滨海设施土壤氮素的归趋和转化机制,以期为改良滨海土壤、制定科学施肥策略提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2015年3月—2018年4月在浙江省慈溪市杭州湾现代农业园区(北纬30°10',东经121°13')进行。试验地属于亚热带,气候温和且四季分明。1961—2010年宁波市年平均气温为16.4℃。7月气温最高,平均温度28℃;1月最低,平均温度4.7℃。无霜期230~240 d,年平均日照时数1 850 h。试验地年均降雨量为1 480 mm,3—4月春雨季节地下水位较高,达到60~120 cm;5—6月梅雨季节地下水位约为120 cm;7—8月相对较低,地下水位约为150~300 cm。试验地土壤深厚,0~100 cm土壤盐分含量为1%~4%,部分严重的地区达到20%~30%。试验前0~20 cm土壤翻耕均匀,于2015年3月2日测定0~40 cm土壤基本理化性质,结果如表1所示。

表1 土壤基本理化性质

Tab. 1 Soil physical and chemical properties

土层深度/ cm	pH 值	含水率/ %	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	总碳质量 分数/%	总氮质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铵态氮质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态氮质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0~20	8.1	22.2	652	1.61	0.42	2.11	62.1
20~40	8.4	23.1	748	1.55	0.35	2.25	55.7

1.2 试验设计

试验设计3个不同处理,即暗管排水结合有机肥处理(S-OF)、暗管排水结合无机肥处理(S-IF)和无暗管排水的无机肥处理(CK)。每个处理试验面积约为540 m²(18 m×30 m),3次重复,即每个重复面积为180 m²(6 m×30 m)。对于暗管排水处理(S-OF、S-IF),使用4根排水管(图1所示为S-OF、S-IF处理的1个重复)。排水管道在0.8 m深的土壤中,为了使排水更高效,排水管道采用6 m的间距。排水管道是由聚氯乙烯制成的双壁波纹管,管上均匀分布细小排水孔,管道上覆盖无纺布。每根管道的长度为30 m、直径75 mm。土壤回填前,在管道

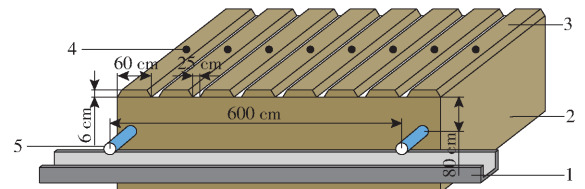


图1 田间布置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

1. 排水沟 2. 土壤 3. 垄 4. 采样点 5. 排水管

周围预先填充干秸秆。试验田旁开挖排水沟(图1),砂浆抹面。土壤起垄栽培,为幼苗创造适宜的生长环境。垄高6 cm,宽60 cm,相邻两垄间的距离为25 cm。CK除了无暗管排水外,试验小区分布

与 S-OF、S-IF 处理相同。

以葡萄品种“荣明 5 号”和油菜品种“油研 57 号”为植物试材。每垄种植 1 行葡萄,每 2 行葡萄之间种植 1 垄油菜。即对于 1 个处理中的 1 次重复(图 1),有 4 垄葡萄和 4 垄油菜间作栽培。葡萄行距为 170 cm,株距 150 cm。葡萄移栽和油菜首次播种日期均为 2015 年 3 月 14 日。植物生长的水分来

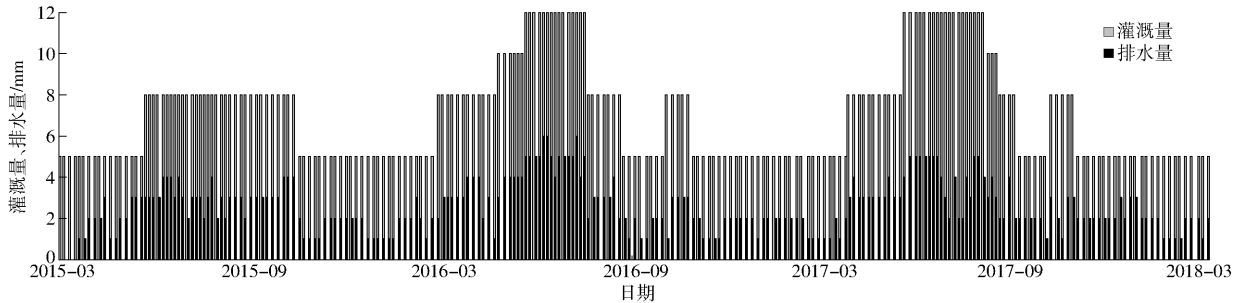


图 2 试验期间作物灌溉量和排水量

Fig. 2 Irrigation amounts for crops during experimental period

本试验所用有机肥为天津葡萄研究所生产的“生物肥一号”,肥料中的活菌数为 1×10^7 个/g, N、 P_2O_5 、 K_2O 质量分数分别为 3.5%、2% 和 1.5%,施用与 0~20 cm 土壤混合均匀。为了使无机肥处理的 N、 P_2O_5 和 K_2O 总施用量与有机肥处理相同,以 N、 P_2O_5 、 K_2O 质量比为 3.5:2:1.5 施无机肥。无机肥中的 N、 P_2O_5 和 K_2O 分别来源于 NH_4NO_3 、 $Ca_3(PO_4)_2$ 和 K_2SO_4 。有机肥和无机肥均按照当地习惯施用,4、6、10 月左右施肥,对应葡萄各生育期。3 个试验年的具体施肥日期和用量如表 2 所示。

表 2 施肥时间和施肥量

Tab. 2 Fertilization date and amount

年份	日期	施氮量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	施磷量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	施钾量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)
2015	3 月 10 日	70	40	30
	5 月 28 日	60	34	26
	10 月 17 日	210	120	90
2016	4 月 13 日	80	46	34
	6 月 6 日	70	40	30
	10 月 20 日	210	120	90
2017	4 月 7 日	80	46	34
	6 月 2 日	70	40	30
	10 月 18 日	210	120	90
2018	3 月 22 日	80	46	34

1.3 指标测定

2015 年 12 月 15 日起每隔 3 个月按照 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~80 cm 用土钻取剖面土壤,采样时间为 16:00—18:00。每垄设置 1 个取样点,则每个处理的每次重复共有 8 个取样点,如图 1 所示。同一土层 8 个取样点采集的土壤

源主要依赖于灌溉,灌溉方式为滴灌,滴灌定额为 $180 m^3/hm^2$,各处理灌溉时间和灌溉量均相同。实际试验中,葡萄和油菜共用一套滴灌系统,为保证各垄间水分供应量一致,灌溉时所有阀门同时开启,仅考虑葡萄需水规律,试验期间灌溉量和排水量变化过程如图 2 所示。除施肥外,各处理除草和施药等其他田间管理方法也均相同,没有提供额外的光、热或 CO_2 。

混合均匀后作为 1 个重复,测定不同土层土壤中的总氮含量、耕层(0~20 cm)土壤中的矿质态氮含量及耕层土壤电导率(EC)、含水率、容重、有机质含量、pH 值、总有机碳含量和孔隙度等基本指标(容重和孔隙度由 8 个采样点分开测定取均值作为 1 次重复)。剖面土壤总氮变化规律选择 2016 年 3 月 15 日、2017 年 3 月 15 日和 2018 年 3 月 15 日作为典型分析,主要由于该时间点位于两次施肥之间且上一年度施肥行为已全部完成。肥料氮素平衡中,土壤残留肥料氮素量为各处理土壤总氮含量与同等条件下不施氮处理土壤总氮含量的差值。此外,选择试验末期(2018 年 3 月 15 日)土壤基本理化指标与氮素指标进行相关分析,用于揭示氮素归趋和转化机制。

总氮含量采用凯氏法测定,矿质态氮含量采用 $0.5 mol/L K_2SO_4$ 浸提(水土体积比 4:1)测定,含水率采用 TDR 型土壤水分速测仪(英国 Delta-t 公司),pH 值和 EC 分别用酸度计和电导率仪测定,容重和孔隙度采用环刀法测定,有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,总有机碳含量利用 Vario MARCO cube 元素分析仪(德国 Elementar 公司)进行测定^[10-13]。

1.4 数据分析

显著性和相关性分析(Duncan's multiple range test)采用 SPSS 17.0 软件^[14-15]。

2 结果与分析

2.1 设施土壤总氮的剖面分布

滨海设施土壤总氮含量(质量比)总体上随土层深度呈下降趋势(图 3)。除 2016 年(图 3a)外,

耕层土壤总氮含量均以CK最高,2017年和2018年分别达到0.41、0.39 g/kg。S-OF和S-IF处理耕层土壤总氮含量低于CK,说明暗管排水造成一定的耕层土壤总氮流失。相同暗管排水布设条件下,S-OF处理耕层土壤总氮含量高于S-IF处理,这主要由于无机肥中的无机态养分更易溶于水并随灌溉水淋失到土壤深层,2017年20 cm以下土层(图3b)和2018年40 cm以下土层(图3c)的总氮含量观测结

果可支持该推断。

20~40 cm和40~60 cm土层总氮含量仍以CK处于较高水平,但S-OF和S-IF处理间总氮含量差异没有明显规律。深层土壤(60~80 cm)总氮含量以S-IF处理最高,S-OF处理次之,CK最低,这一规律在2017年和2018年尤为明显,说明暗管排水对无机肥施用下土壤总氮纵向迁移的影响最为显著,也说明无机肥施用下采用暗管排水容易存在氮

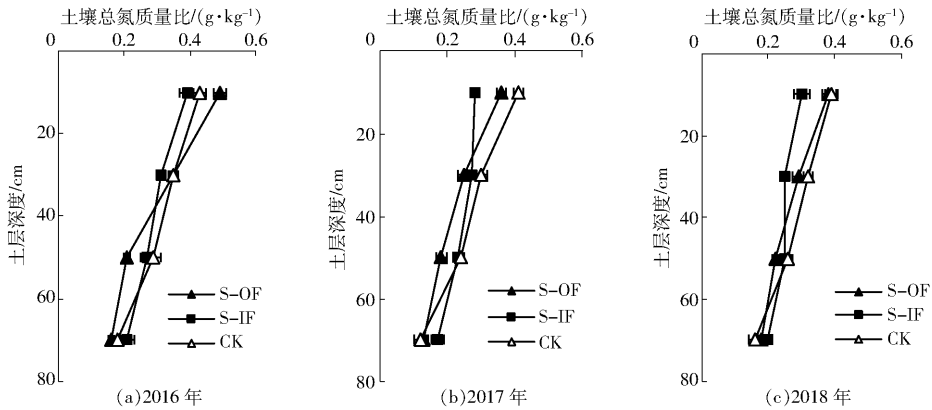


图3 不同处理2016—2018年土壤总氮含量的剖面分布

Fig. 3 Profile distributions of total nitrogen during 2016—2018

流失风险。

2.2 耕层土壤矿质态氮和有机态氮的变化规律

耕层土壤矿质态氮质量比为50.1~87.2 mg/kg,有机态氮质量比为213.1~434.5 mg/kg,矿质态氮和有机态氮占总氮的平均比例分别为17.1%和82.9%,说明滨海设施土壤耕作层氮素主要以有机态存在(图4)。从3个试验年的变化趋势看,矿质态氮含量总体上呈波动性上升规律,而有机态氮含量出现一定程度的降低,说明耕作过程促使部分有机态氮转化为矿质态。试验初期,受不同处理施肥种类差异的影响,S-IF处理土壤矿质态氮含量较

高,而S-OF处理土壤有机态氮含量较高。但随着试验推进,从第2个试验年开始(540 d),S-OF处理土壤矿质态氮释放能力逐渐增强,具体表现为试验末期(990~1 080 d)S-OF处理土壤矿质态氮含量明显高于S-IF处理,这表明S-OF处理有利于后期土壤矿质态氮含量的提升。土壤有机态氮总体上以S-OF处理处于较高水平,CK次之,S-IF处理相对较低。试验结束时,S-OF处理土壤矿质态氮含量较S-IF处理和CK分别提高22.9%和12.0%,有机态氮含量较S-IF处理和CK分别提高25.4%和12.2%。

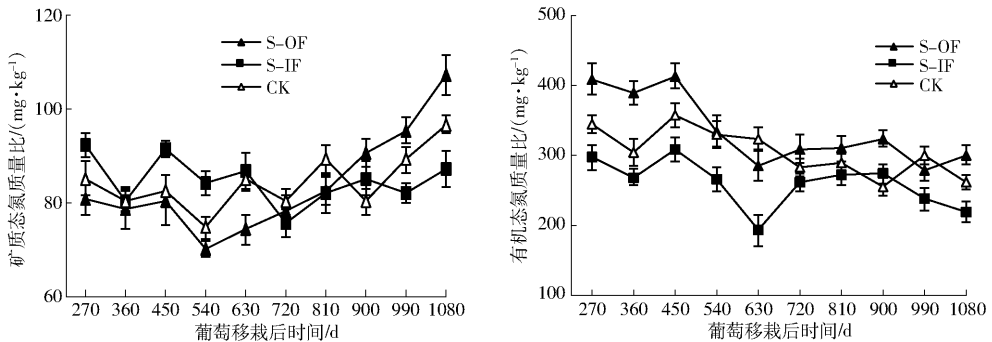


图4 不同处理耕层土壤矿质态氮和有机态氮含量的动态变化曲线

Fig. 4 Dynamics of mineral nitrogen and organic nitrogen under different treatments

矿质态氮是作物吸收的主要氮素形态,以矿质态氮含量作为土壤供氮能力的主要考察指标可知,S-OF处理土壤供氮能力呈波动性升高规律,在试验后期上升尤为明显。相比之下,试验前后S-IF

处理土壤矿质态氮供给能力变化不大,仅出现小幅下降。

2.3 肥料氮素平衡分析

施入的肥料氮素中,16.6%~22.5%残留于

0~20 cm 土层中,14.1%~19.6% 残留于 20~40 cm 土层中,9.0%~14.5% 残留于 40~60 cm 土层中,43.4%~59.5% 被植株吸收及流失(图 5,图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著)。肥料氮素随土层深度增加呈下降趋势。0~20 cm 与 20~40 cm 土层均以 CK 处理肥料氮素残留量最高,但与 S-OF 处理之间差异并不显著($p > 0.05$)。40~60 cm 土层肥料氮素残留量以 CK 最高,且显著高于 S-OF 和 S-IF($p < 0.05$)。总体来看,CK 处理 0~60 cm 土壤中肥料氮的残留量处于较高水平,S-OF 处理次之,而 S-IF 处理最低,S-OF 和 S-IF 处理土壤残留肥料氮差异可能由于 S-IF 处理肥料带入的可溶性氮含量高于 S-OF,这部分可溶性氮更容易迁移和再分布。植物吸收及流失的肥料氮素量以 S-IF 最高,S-OF 次之,CK 最低,三者存在显著差异($p < 0.05$)。

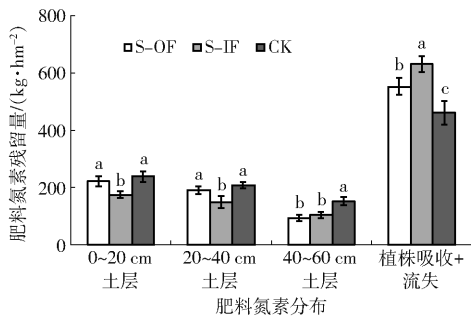


图 5 不同处理肥料氮素平衡

Fig. 5 Balance of applied fertilizer N

2.4 耕层土壤理化性质

耕层土壤 pH 值由大到小依次为 S-OF、S-IF、

CK,而土壤 EC 规律与之相反(表 3),这可能由于无暗管排水的对照处理 CK 耕层土壤储存了更多肥料中的盐基离子,造成 pH 值下降而 EC 升高。不同处理耕层土壤容重以 S-OF 最低,为 1.45 g/cm³,显著低于 S-IF 和 CK 处理($p < 0.05$)。土壤孔隙度以 S-OF 处理最高,达到 45.3%;S-IF 次之,为 42.3%;CK 处理土壤孔隙度显著低于其他处理($p < 0.05$),仅为 39.3%。本研究中 S-IF 处理耕层土壤容重显著低于 CK 处理,孔隙度显著高于 CK,表明暗管排水对改良耕层土壤结构有明显效果;而同样是暗管排水下的有机肥处理 S-OF 耕层土壤容重和孔隙度的观测结果优于无机肥处理 S-IF,这说明 S-OF 处理对土壤结构的改善是暗管排水和微生物有机肥共同驱动的结果。耕层土壤有机质含量和总有机碳含量均以 S-OF 处理最高,分别为 3.7% 和 8.4 g/kg,且显著高于其他处理($p < 0.05$)。S-IF 和 CK 处理之间土壤有机质含量和总有机碳含量的差异均不显著($p > 0.05$)。

2.5 土壤氮素与土壤理化性质的相关分析

土壤矿质态氮含量与土壤含水率呈显著正相关($r = 0.676$),说明适宜的土壤水分有利于氮素矿化,但有机态氮含量和含水率的关系并不明显。矿质态氮含量和有机态氮含量均与有机质含量呈极显著正相关($p < 0.01$),相关系数分别达到 0.981 和 0.956。类似地,矿质态氮含量和有机态氮含量与总有机碳含量呈极显著($p < 0.01$)正相关,相关系数分别为 0.942 和 0.905。此外,矿质态氮含量和有机态氮含量之间存在极显著的正相关关系,这可能

表 3 不同处理对耕层土壤理化指标的影响

Tab. 3 Effects of different treatments on soil physical and chemical properties

处理	pH 值	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	含水率/%	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙度/%	有机质质量 分数/%	总有机碳质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
S-OF	(7.70 ± 0.08) ^a	(401.3 ± 16.8) ^c	(23.2 ± 0.29) ^a	(1.45 ± 0.02) ^c	(45.3 ± 0.90) ^a	(3.70 ± 0.24) ^a	(8.40 ± 0.41) ^a
S-IF	(7.40 ± 0.08) ^b	(450.3 ± 15.5) ^b	(22.2 ± 0.37) ^b	(1.53 ± 0.03) ^b	(42.3 ± 1.24) ^b	(3.00 ± 0.16) ^b	(7.10 ± 0.24) ^b
CK	(7.13 ± 0.12) ^c	(494.7 ± 13.1) ^a	(21.4 ± 0.50) ^b	(1.61 ± 0.02) ^a	(39.3 ± 0.94) ^c	(3.20 ± 0.16) ^b	(7.33 ± 0.45) ^b

注:同一列不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著。

表 4 矿质态氮含量和有机态氮含量与各影响因子的相关分析

Tab. 4 Correlation analysis between mineral nitrogen, organic nitrogen and environmental factors

	矿质态氮含量	有机态氮含量	pH 值	电导率	含水率	容重	孔隙度	有机质含量	总有机碳含量
矿质态氮含量	1	0.982 **	0.637	-0.248	0.676 *	-0.217	0.217	0.981 **	0.942 **
有机态氮含量		1	0.580	-0.301	0.609	-0.273	0.274	0.956 **	0.905 **
pH 值			1	-0.719 *	0.995 **	-0.705 *	0.704 *	0.752 *	0.798 **
电导率				1	-0.655	0.997 **	-0.997 **	-0.351	-0.416
含水率					1	-0.636	0.635	0.781 *	0.821 **
容重						1	-1.000 **	-0.329	-0.396
孔隙度							1	0.329	0.397
有机质含量								1	0.976 **
总有机碳含量									1

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

由于矿质态氮来源于有机态氮中的可矿化氮部分,土壤有机态氮含量越高,可矿化氮库容越大。

3 讨论

农田生态系统中,氮素是作物生长发育的关键限制因子,作物和微生物之间存在对土壤氮素的激烈竞争^[16]。因此,氮素是各类型土壤和作物的科学研究热点^[17-18]。根据溶质运移理论和土壤水动力学理论研究的结果表明,暗管排水下硝态氮浓度在剖面土壤上变化剧烈,以0~40 cm浓度最高,40~60 cm急剧降低,60~80 cm浓度较小,铵态氮浓度在垂直方向上变化不大^[19]。本研究中2017、2018年和2016年相比,总氮含量随土层深度逐渐下降但并未出现年际间的剧烈波动,这可能由于本研究土壤中的氮素主要呈有机态存在,迁移能力不强,因此在垂直剖面上变化缓慢。但暗管排水还是造成耕层土壤总氮向深层次土壤迁移,以S-IF处理最为明显,该结果也印证了大部分前人研究结论。

本研究中S-OF处理耕层土壤矿质态氮含量前期较低但后期逐渐增加,这印证了叶协锋等^[20]的研究结果。大量研究表明,施肥可明显增加土壤氮矿化量、矿化率和矿化势,增强土壤供氮能力^[21-23]。微生物有机肥施入后,若土壤微生物群落发生改变,嗜温微生物数量和活性增强,会提高易矿化氮库容,增加有机肥氮素的矿化量^[24]。暗管排水对耕层土壤矿质态氮含量的影响存在一定争议。有研究认为暗管埋设改良土壤通气性,提高土壤温度,促进土壤有机质分解转化,提高养分的矿化量,从而提升耕层土壤矿质态氮含量^[25-26],也有研究认为排水的增加导致耕层土壤易溶解的矿质养分下降^[4,27]。本试验末期,CK处理耕层土壤矿质态氮含量高于S-IF处理,而S-OF处理矿质态氮含量高于CK,而这说明暗管排水会造成矿质态氮的流失,但较长时间的微生物有机肥施用有利于土壤固定或释放一部分矿质态氮,维持耕层土壤矿质态氮水平。

暗管排水和微生物有机肥相结合有利于改善土壤容重和孔隙度,改良土壤结构。暗管排水改良土壤结构的机理是暗管排水创造了干湿交替的环境,促使土壤颗粒脱水重组微团聚体,同时排水后的土壤胶体从溶胶状态转化为凝胶状态,促进土壤结构化,提高了土壤孔隙率、非毛管孔隙度^[28-29]。而微生物有机肥改良土壤结构的机理主要考虑菌丝对土

壤颗粒的附着作用。本研究S-IF和CK、S-OF和S-IF处理土壤结构参数的显著差异表明了暗管排水和微生物有机肥相结合较单一使用暗管排水或单一施用微生物有机肥有更好的土壤改良效果。

本研究中,矿质态氮和有机质含量呈正相关,主要由于土壤有机质含量越高,可矿化氮含量越高,矿质态氮的释放潜力越大。但有研究表明,矿质态氮含量和有机质含量不一定成比例,因为有机质反映了可矿化氮的库容,但不能反映实际矿化量^[30]。另一方面,本研究中S-OF处理土壤总有机碳含量的显著增加印证了前人研究结论。一般认为,施用有机肥是增加土壤碳库的重要途径^[31]。大量研究表明,施用有机肥或有机无机配施可以提高土壤高、中、低活性有机碳含量和储量^[32-34]。YANG^[35]的研究表明,长期不施肥或单施用化肥土壤总有机碳含量分别下降了18%和17%。此外,暗管排水和微生物有机肥对土壤结构的作用也可能是S-OF处理高有机碳含量的影响因素^[36]。本研究矿质态氮和有机碳含量之间高度正相关关系与张景等^[37]的研究结论一致,其研究表明,有机碳和氨氮、硝氮含量之间均呈显著正相关,用有机碳含量指示土壤肥力指标有重要意义。

本研究探讨了暗管排水和微生物有机肥施入下总氮含量的剖面分布、耕层土壤不同形态氮素的数量变化,并分析了矿质态氮含量、有机态氮含量与土壤基本理化指标的相关性,研究结果可为滨海土壤改良和水肥决策提供科学依据。但本试验并未观测植株中的肥料氮素量,这使得在肥料氮素平衡分析时无法区分植株氮和流失氮,后续试验中应当补充研究。

4 结论

(1)暗管排水促使耕层土壤总氮向深层土壤迁移,相比S-IF,S-OF处理可在一定程度上抑制耕层土壤总氮流失。

(2)滨海设施土壤总氮中80%以上以有机态形式存在,矿质态氮所占比例很小,S-OF处理有利于试验后期土壤矿质态氮含量的提升。

(3)与其他处理相比,S-OF处理更有利于改良土壤结构,S-OF处理对土壤容重和孔隙度的改善是暗管排水和微生物有机肥共同驱动的结果。

(4)耕层土壤矿质态氮和有机态氮含量均与土壤有机质、总有机碳含量呈极显著正相关。

参 考 文 献

- [1] 陈诚,罗纨,贾忠华,等. 江苏沿海滩涂农田高降渍保证率暗管排水系统布局[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12):122-129.
CHEN Cheng, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Subsurface drainage system layout to meet high assurance rate of waterlogging

- control in coastal mud-flat farmlands in Jiangsu [J]. Transactions of the CASE, 2017,33(12):122-129. (in Chinese)
- [2] 王秋菊,刘峰,常本超,等. 三江平原低湿地水田土壤理化特性及暗管排水效果[J]. 农业工程学报, 2017,33(14):138-144. WANG Qiuju, LIU Feng, CHANG Benchao, et al. Soil physiochemical properties and subsurface pipe drainage effect of paddy field in low wetland of Sanjiang plain [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14):138-144. (in Chinese)
- [3] 于淑会,刘金铜,李志祥,等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12):1664-1672. YU Shuhui, LIU Jintong, LI Zhixiang, et al. Mechanism of saline-alkali lands improvement of subsurface pipe drainage systems and agro-ecosystem response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012,20(12):1664-1672. (in Chinese)
- [4] HOU Maomao, LIN Zhiyuan, CHEN Jingnan, et al. Optimization on the buried depth of subsurface drainage under greenhouse condition based on entropy evaluation method[J]. Entropy, 2018, 20(11):e20110859.
- [5] 刘雅辉,王秀萍,李强,等. 淤泥质滨海重盐土低成本快速脱盐技术研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1):168-171. LIU Yahui, WANG Xiuping, LI Qiang, et al. Study on rapid desalting of muddy coastal heavy solonchack with low cost[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(1):168-171. (in Chinese)
- [6] 田冬,桂丕,李化山,等. 不同改良措施对滨海重度盐碱地的改良效果分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(11):2366-2372. TIAN Dong, GUI Pi, LI Huashan, et al. Effect of different measures on improvement of seashore saline alkali land [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(11):2366-2372. (in Chinese)
- [7] 高亮,谭德星. 酵素菌生物有机肥在潍坊滨海盐土上的应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2016(12):218-219,229. GAO Liang, TAN Dexing. Study on application effects of BYM biological organic fertilizer in coastal saline soil of Weifang [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(12):218-219,229. (in Chinese)
- [8] 何伟,韩飞,关瑞,等. 滨海盐碱地不同施肥模式对棉花氮磷养分配积和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018,32(3):295-300. HE Wei, HAN Fei, GUAN Rui, et al. Effects of different fertilization models on nitrogen, phosphorus accumulation and yield of cotton in coastal saline-alkali soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(3):295-330. (in Chinese)
- [9] 李品芳,杨永利,兰天,等. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7):149-156. LI Pinfang, YANG Yongli, LAN Tian, et al. Physicochemical properties and water holding characteristics of Tianjin coastal saline soil improved by foreign soil [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(7):149-156. (in Chinese)
- [10] HOU Maomao, ZHU Lüdan, JIN Qiu, et al. Surface drainage and mulching drip-irrigated tomatoes reduces soil salinity and improves fruit yield[J]. PLOS ONE, 2016, 11(5):0154799.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2005.
- [12] ZHONG Fenglin, HOU Maomao, HE Bizhu, et al. Assessment on the coupling effects of drip irrigation and organic fertilization based on entropy weight coefficient model[J]. PeerJ, 2017, 5(10):3855.
- [13] 张俊丽,SIKANDER K T,温晓霞,等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18):192-199. ZHANG Junli, SIKANDER K T, WEN Xiaoxia, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. Transactions of the CASE, 2012, 28(18):192-199. (in Chinese)
- [14] HOU Maomao, SHAO Xiaohou, JIN Qiu, et al. A N-15 tracing technique-based analysis of the fate of fertilizer N: a 4-year case study in eastern China[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(1):74-83.
- [15] HOU Maomao, ZHONG Fenglin, JIN Qiu, et al. Fate of nitrogen-15 in the subsequent growing season of greenhouse tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill) as influenced by alternate partial root-zone irrigation[J]. RSC Advances, 2017, 7(55):34392-34400.
- [16] PETER M V, GREGORY A, DOUGLAS T, et al. The Mauna Loa environmental matrix: foliar and soil nutrients [J]. Oecologia, 1992, 89(3):372-382.
- [17] 屈莎,李振海,邱春霞,等. 基于开花期氮素营养指标的冬小麦籽粒蛋白质含量遥感预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12):186-193. QU Sha, LI Zhenhai, QIU Chunxia, et al. Remote sensing prediction of winter wheat grain protein content based on nitrogen nutrition index at anthesis stage[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(12):186-193. (in Chinese)
- [18] 张彦群,王建东,赵月芬,等. 滴灌冬小麦不同施氮量下光合-气孔导度耦合模拟和验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10):124-130. ZHANG Yanqun, WANG Jiandong, ZHAO Yuefen, et al. Simulation and verification of photosynthesis-stomatal conductance coupled model under different nitrogen application rates in winter wheat with drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(10):124-130. (in Chinese)
- [19] 杨琳,黄介生,李大文,等. 控制排水条件下土壤氮素的运移[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(11):1063-1066. YANG Lin, HUANG Jiasheng, LI Dawen, et al. Experimental study on nitrogen transport and transformation of condition drainage[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009,18(11):1063-1066. (in Chinese)
- [20] 叶协锋,李志鹏,于晓娜,等. 腐熟有机肥在烤烟生长期田间养分矿化释放特征的研究[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(3):80-86.

- YE Xiefeng, LI Zhipeng, YU Xiaona, et al. Study on release of nutrients from mineralized organic fertilizer during flue-cured tobacco growth period[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2017, 23(3):80-86. (in Chinese)
- [21] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(12):2336-2347.
- GAI Xiapu, LIU Hongbin, ZHAI Limei, et al. Effects of long-term additional application of organic manure or straw incorporation on soil nitrogen leaching risk[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(12):2336-2347. (in Chinese)
- [22] 张健男,谢洪宝,孙闯. 有机肥料的合理增施对土壤性质影响研究综述[J]. *中国农学通报*, 2018, 37(27):124-129.
- ZHANG Jiannan, XIE Hongbao, SUN Yan. Effect of rational application of organic fertilizer on soil properties: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(27):124-129. (in Chinese)
- [23] 徐阳春,沈其荣. 有机肥和化肥长期配合施用对土壤及不同粒级供氮特性的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1):87-92.
- XU Yangchun, SHEN Qirong. Influence of long-term combined application of manure and chemical fertilizer on supplying characteristics of nitrogen in soil particle fractions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1):87-92. (in Chinese)
- [24] 李玲玲,李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3):749-757.
- LI Lingling, LI Shutian. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3):749-757. (in Chinese)
- [25] 潘智,黄平,蒋代华,等. 暗管排水治理渍害田初探[J]. *热带亚热带土壤科学*, 1993, 2(2):88-92.
- PAN Zhi, HUANG Ping, JIANG Daihua, et al. Amelioration of waterlogging paddy field by closed drainage[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 1993, 2(2):88-92. (in Chinese)
- [26] 陈士平,戴红霞. 暗管排水改造山区冷浸田的效果[J]. *浙江农业科学*, 2000(2):59-60.
- CHEN Shiping, DAI Hongxia. Effect of underwater drainage on cold soaking in mountain areas [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2000(2):59-60. (in Chinese)
- [27] BAO Tengfei, HUANG Wenbing, CHEN Xiadong, et al. The effect of subsurface drainage system on soil condition and tomato quality[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2013, 11(2):331-335.
- [28] 艾天成,李方敏. 暗管排水对涝渍地耕层土壤理化性质的影响[J]. *长江大学学报(自科版)农学卷*, 2007, 4(2):4-5,8.
- AI Tiancheng, LI Fangmin. Effect of subsurface drainage on physical and chemical properties of cultivated strata on waterlogged land[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition) Agricultural Science Volumn*, 2007, 4(2):4-5,8. (in Chinese)
- [29] 范业宽,蔡烈万,徐华壁. 暗管排水改良渍害型水稻土的效果[J]. *土壤肥料*, 1989(2):9-12.
- FAN Yekuan, CAI Liewan, XU Huabi. Effect of underwater drainage on improving waterlogged paddy soil [J]. *Soil Fertilizer*, 1989(2):9-12. (in Chinese)
- [30] 李菊梅,王朝辉,李生秀. 有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2):232-238.
- LI Jumei, WANG Chaohui, LI Shengxiu. Significance of organic matter, total N and minerable nitrogen in reflecting soil N supplying capacity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2):232-238. (in Chinese)
- [31] 梁太波,赵振杰,刘青丽,等. 增施有机肥对烟田土壤有机碳组分特征及CO₂排放的影响[J]. *烟草科技*, 2017, 50(12):8-13.
- LIANG Taibo, ZHAO Zhenjie, LIU Qingli, et al. Effects of organic manure on soil organic carbon composition and CO₂ emission in tobacco planting field [J]. *Tobacco Science and Technology*, 2017, 50(12):8-13. (in Chinese)
- [32] MURUGAN K, RADHA P, NGANGOM B, et al. Evaluating the plant growth promoting ability of thermotolerant bacteria and cyanobacteria and their interactions with seed spice crops[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 164:94-101.
- [33] 李传章,高利娟,李吉进,等. 不同有机肥对新建蔬菜大棚土壤的不同形态有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *浙江农业学报*, 2013, 25(5):1079-1085.
- LI Chuazhang, GAO Lijuan, LI Jijin, et al. Impact of different organic fertilizers on different forms of organic carbon and carbon pool management index in a newly-built greenhouse vegetable soil [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensi*, 2013, 25(5):1079-1085. (in Chinese)
- [34] 李喜凤,杨小妮,罗艳君,等. 生物炭及有机肥对苹果园土壤有机碳组分及果树生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(4):617-624.
- LI Xifeng, YANG Xiaoni, LUO Yanjun, et al. Effect of combination of biochar and organic fertilizers on soil organic carbon fractions, growth and yield of apple orchard[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(4):617-624. (in Chinese)
- [35] YANG J M. Simulating the effect of long-term fertilization on maize yield and soil C/N dynamics in northeastern China using DSSAT and CENTURY-based soil model[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, 95(1):287-303.
- [36] 张家春,刘盈盈,贺红早,等. 土壤团聚体与有机碳固定关系研究进展[J]. *福建农业学报*, 2016, 31(3):319-325.
- ZHANG Jiachun, LIU Yingying, HE Hongzao, et al. Research progress in the relationship between soil aggregates and organic carbon fixation [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(3):319-325. (in Chinese)
- [37] 张景,蒋新革,何介南,等. 森林土壤有机碳含量与不同形态氮含量的相关性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(7):114-118.
- ZHANG Jing, JIANG Xin'ge, HE Jienan, et al. Relationship between forest soil organic carbon content and nitrogen content with different forms[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(7):114-118. (in Chinese)