

配施紫云英对不同类型水稻土溶解性有机碳氮淋溶及损失的影响

杨静, 郭文圻, 杨文浩, 周碧青, 邢世和

引用本文:

杨静, 郭文圻, 杨文浩, 周碧青, 邢世和. 配施紫云英对不同类型水稻土溶解性有机碳氮淋溶及损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 351–359.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0583>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响

全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 周伟

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1406–1415 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0401>

生物炭对北京郊区砂土持水力和氮淋溶特性影响的土柱模拟研究

王燕, 庞卓, 贾月, 王庆海, 刘文菊, 谢祖彬, 郑瑞伦

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1820–1828 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0124>

秸秆还田条件下剖面土壤溶解性有机碳含量及其组分结构的变化

李彬彬, 武兰芳

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1567–1577 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1021>

硝化抑制剂阻控养殖肥液灌溉土壤氮素淋失

杨涵博, 赖睿特, 张克强, 沈丰菊, 李佳佳, 高文萱, 罗艳丽, 王凤

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1751–1758 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1572>

紫云英还田对早稻直播稻田温室气体排放的影响

聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 刘章勇, 朱波

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2334–2341 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0195>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨静, 郭文圻, 杨文浩, 等. 配施紫云英对不同类型水稻土溶解性有机碳氮淋溶及损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 351–359.

YANG J, GUO W Q, YANG W H, et al. Effects of the co-application of Chinese milk vetch and chemical fertilizer on the leaching and loss of dissolved organic carbon and nitrogen in different paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 351–359.



开放科学 OSID

配施紫云英对不同类型水稻土溶解性有机碳氮淋溶及损失的影响

杨静¹, 郭文圻², 杨文浩³, 周碧青³, 邢世和^{3*}

(1. 丽水学院, 浙江 丽水 323000; 2. 福建省龙岩环境监测中心站, 福建 龙岩 361000; 3. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要:为探讨配施紫云英对不同类型稻田土壤溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)和溶解性有机氮(Dissolved organic nitrogen, DON)含量的影响程度,阐明稻田土壤DOC和DON的淋溶特性,本研究以亚热带3种典型水稻土(黄泥田、灰黄泥田和灰泥田)为研究对象,通过田间试验,探讨等氮磷钾条件下单施化肥(CK)和紫云英配施化肥(cmv)处理对不同水稻土DOC和DON的动态变化、淋溶特性及损失的影响。结果表明,不同土壤类型水稻土DOC和DON的淋溶特性有所不同。3种供试水稻土中,灰泥田水稻土DOC淋溶损失量最大,其CK处理DOC淋溶损失量较灰黄泥田和黄泥田分别显著提高24.09%和72.15%,cmv处理淋溶损失量较灰黄泥田和黄泥田分别显著提高16.53%和40.55%;而黄泥田水稻土DON淋溶损失量最大,其CK处理淋溶损失量较灰黄泥田和灰泥田分别显著提高18.93%和37.01%,cmv处理3种不同类型水稻土DON淋溶损失量无显著差异。配施紫云英可显著降低水稻土DON的淋溶损失量,每季水稻中cmv处理黄泥田、灰黄泥田和灰泥田DON淋溶损失量较CK处理分别降低了24.67%、14.88%和13.54%;黄泥田cmv处理DOC较CK处理提高了19.19%,而灰黄泥田和灰泥田2种施肥处理无显著差异。供试稻田中DOC和DON在土层间的淋溶具有一定的延迟性,且DOC的延迟时间大于DON。灰色关联分析表明,在土壤性质中有机质是影响水稻土DOC淋溶损失的重要因素,孔隙度是DON淋溶损失的重要影响因素。不同类型水稻土DON的淋失早于DOC,且DON在黄泥田中淋溶损失较高,而DOC在灰泥田中淋溶损失较高;在等氮磷钾的条件下,配施紫云英可减少水稻土DON的淋溶损失,而低肥力水稻土DOC的淋溶损失量有所增加。

关键词:紫云英; 水稻土; 溶解性有机碳; 溶解性有机氮; 淋溶特性

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0351-09 doi:10.11654/jaes.2023-0583

Effects of the co-application of Chinese milk vetch and chemical fertilizer on the leaching and loss of dissolved organic carbon and nitrogen in different paddy soils

YANG Jing¹, GUO Wenqi², YANG Wenhao³, ZHOU Biqing³, XING Shihe^{3*}

(1. Lishui University, Lishui 323000, China; 2. Fujian Provincial Longyan Environment Monitoring Central Station, Longyan 361000, China; 3. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In this study, we sought to investigate the effects of the application of Chinese milk vetch on the concentrations of dissolved organic carbon(DOC) and dissolved organic nitrogen(DON) in paddy soil, and to elucidate the leaching characteristics of DOC and DON. We used three typical soils(yellow, yellow podzolic, and gray paddy soils) used to cultivate rice in a subtropical region to investigate the effects of single chemical fertilizer application(CK) and combined Chinese milk vetch and chemical fertilizer(cmv) treatment on the

收稿日期:2023-07-20 录用日期:2023-10-24

作者简介:杨静(1992—),女,福建南平人,博士研究生,从事可溶性碳氮与环境生态研究。E-mail:yangjing_0305@163.com

*通信作者:邢世和 E-mail:fafuxsh@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41671490);福建农林大学科技创新项目(KFb22073XA, KFb22121XA)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(41671490); The Science and Technology Innovation Fund Project of Fujian Agriculture and Forestry University(KFb22073XA, KFb22121XA)

migration characteristics and leaching of DOC and DON in different paddy soils through field experiments. The results revealed differences among the three assessed paddy soil types with respect to the leaching characteristics of DOC and DON. The loss of DOC through leaching was found to be highest in gray paddy soil, with leaching loss under the CK treatment being 24.09% and 72.15% higher than that from the yellow podzolic and yellow paddy soils, respectively, whereas cmv treatment significantly increased by 16.53% and 40.55%, respectively. The largest loss of DON via leaching was detected in the yellow paddy soil, in which loss under the CK treatment was 18.93% and 37.01% higher than that from yellow podzolic and gray paddy soils, respectively. However, we detected no significant differences in the leaching loss of DON among the three different paddy soil types treated with cmv. Compared with the CK treatment, we detected reductions of 24.67%, 14.88%, and 13.54% in the leaching loss of DON in the cmv-treated yellow, yellow podzolic, and gray paddy soils, respectively, and we found no significant differences between the two fertilization treatments in the plaster field. We also established that the leaching of DOC and DON through the soil layers of the assessed paddy fields was characterized by a delayed progression, and that the rate of DON leaching was greater than that of DOC. Grey correlation analysis revealed that organic matter was the most important factor associated with DOC leaching loss in paddy soils, whereas soil porosity was the most important factor determining the loss of DON through leaching. On the basis of our findings in this study, we established that the leaching of DON from different types of paddy soil occurs earlier than that of DOC, and that the leaching loss of DON was higher in yellow paddy soil fields, whereas the loss of DOC was higher in gray paddy soil fields. Co-application of Chinese milk vetch was found to reduce the leaching loss of DON in paddy fields, whereas the loss of DOC through leaching in low-fertility paddy soil increases under conditions of equivalent amounts of nitrogen, phosphorus, and potassium.

Keywords: Chinese milk vetch; paddy soil; dissolved organic carbon; dissolved organic nitrogen; leaching characteristic

溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)和溶解性有机氮(Dissolved organic nitrogen, DON)是指可利用真空杯、渗滤仪等采集的原位土壤溶液或自然淋洗液中的有机碳、氮^[1-2]。其中DOC是重要的碳通量因子^[3],影响着土壤微生物的生长繁殖、污染物及养分的迁移,在土壤碳循环中起着重要作用^[4-5];DON对环境变化敏感,更新周期短,部分DON还可直接被植物根系吸收利用^[6]。DOC和DON的移动性较强,在耕层土壤中的吸附率仅分别为19.4%和20.0%,可通过地表径流或随重力水向深层土壤运移^[7]。研究表明DOC和DON的淋溶是非农业生态系统土壤碳氮损失的重要途径之一,而农业生态系统中主要关注于无机氮^[8]。因此,研究农田生态系统中DOC和DON的动态变化和迁移特性,对防控土壤碳氮损失具有重要意义。

DOC和DON的淋溶损失与土壤属性密切相关,且受到人为干扰的影响。土壤属性对DOC和DON的影响主要体现在土壤质地、结构及其剖面等方面。土壤质地越轻^[9],砂粒含量越高^[10],溶解性有机质越容易被淋失,且DOC和DON淋失量随土壤深度增加而减小^[11-12]。氮肥的施用是影响土壤DOC和DON损失的主要人为因素,但不同的研究结果不尽相同。Sorren-ti等^[13]研究表明堆肥可提供易溶性有机物,施用后显著增加了土壤DOC和DON的形成量和累计淋失量。陶武辉^[14]研究表明向土壤施加有机物料后土壤DOC/DON较不添加有机物料明显提高。陈裴裴等^[15]研究

表明常规施肥处理雷竹林渗漏水DOC的淋失量显著高于减量有机肥,而常规施肥处理DON的淋失量则低于减量有机肥。在酸性黏土中施用粪肥并未改变DOC的淋失量,而显著增加DON的淋失量^[16];施用生物炭及生物炭配施鸡粪均可降低土壤中DOC的淋失,且炭施用比例越高,DOC淋失越少^[17-18]。然而,周志红等^[19]的研究结果却表明低量生物炭的施用可降低黑钙土和紫色土氮素淋失;但高量生物炭的施用却可增加黑钙土和紫色土氮素淋失量。因此,不同土壤类型及不同种类肥料对土壤DOC和DON淋失的影响不同。

紫云英(*Astragalus sinicus* L.)作为我国南方最常见的豆科绿肥,施用后可改善土壤理化性质、培肥地力、提高水稻的产量和品质^[20]。研究表明紫云英腐解后能够产生大量的DOC和DON^[13],可随着重力水向下淋失,影响地下水水质,对人类健康产生一定的安全风险。然而,有关紫云英配施化肥处理对DOC和DON含量的影响程度如何,是否会增加水稻土DOC和DON的淋失风险,以及在不同类型水稻土中的淋失风险是否存在差异等问题尚有待进一步研究。黄泥田水稻土、灰黄泥田水稻土和灰泥田水稻土是福建省分布面积较大的水稻土壤类型,分别属于低肥力、中肥力和高肥力水稻土。因此,本研究以福建省的黄泥田、灰黄泥田和灰泥田3种不同类型水稻土为研究对象,通过田间试验,研究单施化肥和紫云英配施化肥对不同类型水稻土DOC、DON动态变化及其淋溶

特性的影响,阐明不同类型水稻土 DOC 和 DON 的淋溶损失量及其差异,揭示土壤性质对 DOC 和 DON 淋溶损失的影响,为防控稻田 DOC、DON 的淋失以及合理施肥等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于福建省闽侯县白沙镇的福建省农业科学院试验基地(26°13'31"N, 119°04'10"E),属中亚热带季风气候,年均降水量1 351 mm,年日照数1 813 h,年均温度19.5℃,无霜期311 d。供试土壤类型为发育于中性岩红壤坡积物和河流冲积物的3种不同类型水稻土,即低肥力的黄泥田、中肥力的灰黄泥田和高肥力的灰泥田,地形部位分别为低丘上部、低丘中下部及紧邻低丘的宽谷盆地。水稻品种为II 673,属于再生稻。水稻的栽培管理与当地一致。试验区耕层土壤理化性质见表1。

1.2 试验设计

田间试验设置单施化肥(对照,CK)和紫云英+化肥(cmv)两种施肥处理,每个小区面积12 m²(3 m×4 m),每个处理设置3个重复,采取随机区组排列。在各个试验小区中分别布设两组连接带盖不锈钢管的砂滤管,砂滤管长度为20 cm,埋设深度分别为0~20、20~40 cm和40~60 cm。CK处理化肥施用量为尿素481.7 kg·hm⁻²、过磷酸钙900 kg·hm⁻²和氯化钾300 kg·hm⁻²,其中过磷酸钙作为基肥全部施用,尿素和氯化钾作为基肥50%(紫云英翻压后第9 d)和分蘖肥50%(紫云英翻压后第25 d)分两次施用。cmv处理施用的紫云英品种为闽紫7号,含水量为90%,紫云英干基中有机质含量752.8 g·kg⁻¹、全碳(C)含量436.63 g·kg⁻¹,全氮(N)含量30.94 g·kg⁻¹,全磷(P)含量5.91 g·kg⁻¹,全钾(K)含量32.47 g·kg⁻¹;采用等量氮磷钾-异地翻压方式施用,紫云英施用量(以鲜质量计)为30 000 kg·hm⁻²,氮、磷和钾不足部分用尿素、氯化钾

和过磷酸钙补齐,各处理氮磷钾施用量见表2;紫云英于盛花期作为基肥一次性翻压,配施化肥的施用方法与对照相同;水稻于紫云英翻压后10 d移栽,其栽培过程管理与当地保持一致。

表2 试验处理与施肥量

Table 2 Experimental treatments and fertilization rates					
土壤类型 Soil type	处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer type	施用量 Application rate (kg·hm ⁻²)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
黄泥田	CK	化肥	225.02	108.00	180.00
	cmv	化肥	132.20	90.27	82.59
		紫云英	92.82	17.73	97.41
灰黄泥田	CK	化肥	225.02	108.00	180.00
	cmv	化肥	132.20	90.27	82.59
		紫云英	92.82	17.73	97.41
灰泥田	CK	化肥	225.02	108.00	180.00
	cmv	化肥	132.20	90.27	82.59
		紫云英	92.82	17.73	97.41

1.3 样品采集

根据紫云英翻压回田的腐解规律及水稻生育期,采样时间设为紫云英翻压后5、10、17、24、38、59、80、101 d和122 d,整个试验期间共进行9次水样采集。在各采样时间前2 d利用电动水样采集器将砂滤管中的渗滤液抽干,定期抽取稻田淹水层(0 cm)水样品和不同深度(0~20、20~40、40~60 cm)土壤渗滤液样品,装入聚乙烯塑料瓶中密封后带回实验室。为了防止因降雨导致各处理小区间淹水层的串渗,在试验期间内存在连续降水量(超过50 mm)时各试验小区淹水层向外排水5 cm。

1.4 测定项目与方法

采集的水溶液样品立即用0.45 μm滤膜过滤,利用配置有总氮检测器的总有机碳分析仪(Shimadzu,日本,TOC-L CPH)测定水样中的DOC和溶解性总氮(Total dissolved nitrogen,TDN)含量,借助连续流动注射分析仪(Systea,意大利,Flowsys)测定水样中的溶解性无机氮(Dissolved inorganic nitrogen, DIN,包含

表1 试验区耕层土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of topsoil in the test area									
土壤类型 Soil type	质地 Texture	黏粒含量 Clay content/%	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity/%	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
黄泥田	壤质黏土	51.98±0.59b	1.41±0.02a	49.12±2.51a	6.15±0.05a	11.85±0.44c	0.59±0.01c	6.59±0.63b	69.03±3.12b
灰黄泥田	壤质黏土	51.17±1.73b	1.32±0.03b	49.30±1.00a	5.53±0.06b	17.65±0.42b	0.96±0.04b	10.43±0.36a	96.65±6.38a
灰泥田	黏土	61.32±3.46a	1.01±0.03c	52.90±0.40a	5.60±0.05b	20.54±0.31a	1.04±0.05a	5.19±0.49b	31.07±0.92c

注:不同小写字母表示不同土壤类型在P<0.05水平差异显著,表中所列数据为平均值±标准误。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between soil types at the P<0.05 level, and data presented in the table are means ± standard error.

NH_4^+ , NO_3^- 和 NO_2^- 含量, 采用差减法 ($\text{DON} = \text{TDN} - \text{DIN}$) 计算获得 DON 含量。未能及时测定的水样置于 4°C 恒温冰箱中短期保存。

1.5 数据统计分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 20 软件进行数据处理, 使用 Sigmaplot 14.0 软件作图。由于研究过程中发现紫云英翻压 59 d 后渗滤液样品中 DON 浓度均低于检出限 ($1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 故本文仅显示并计算 5~59 d 的相关数据。因水稻难以吸收利用 20~60 cm 土层渗滤液中的养分, 故将 20~60 cm 土层渗滤液中的 DOC 和 DON 视为稻田碳氮淋溶损失的部分^[21]。土壤 DOC 和 DON 的损失量参考 Nie 等^[22]描述的公式进行计算:

$$\text{DOC}_{\text{leaching}} = \sum_0^{122} C_{\text{SDOC}} \times V_{\text{water}} = \sum_0^{122} C_{\text{SDOC}} \times \frac{B_s \times S \times S_h \times M_w}{W_p}$$

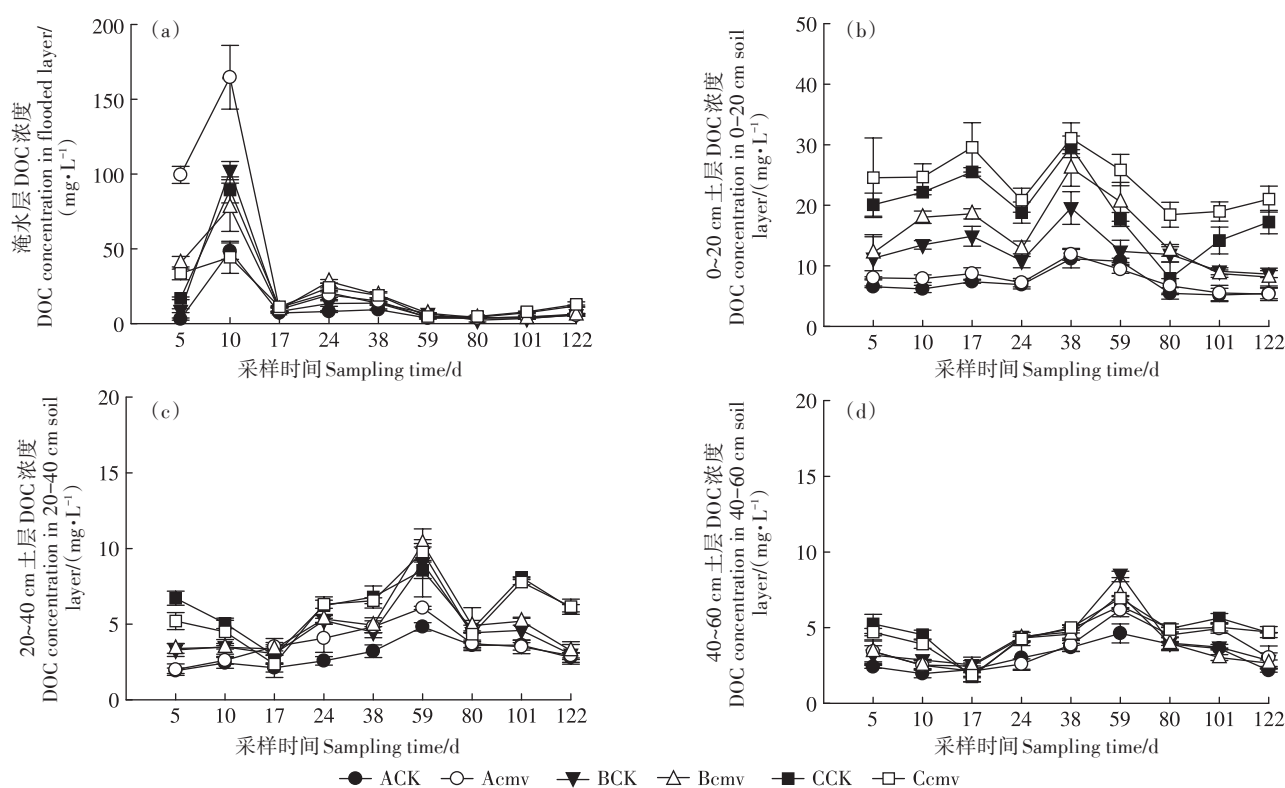
$$\text{DON}_{\text{leaching}} = \sum_0^{59} C_{\text{SDON}} \times V_{\text{water}} = \sum_0^{59} C_{\text{SDON}} \times \frac{B_s \times S \times S_h \times M_w}{W_p}$$

式中: $\text{DOC}_{\text{leaching}}$ 和 $\text{DON}_{\text{leaching}}$ 分别为溶解性有机碳淋溶损失量和溶解性有机氮淋溶损失量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; C_{SDOC} 和 C_{SDON} 为土壤渗滤液中溶解性有机碳质量浓度和溶解性有机氮质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V_{water} 为土壤溶液体积, m^3 ; S 表示面积, hm^2 ; S_h 为土层厚度, cm ; B_s 为土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; M_w 为土壤含水量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; W_p 为渗滤液溶液密度。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下供试水稻土 DOC 的淋溶特性及其差异

3 种供试水稻土不同土层 DOC 质量浓度达到峰值的时间具有一定差异 (图 1), 淹水层 DOC 质量浓度于紫云英翻压后 10 d 和 24 d 达到峰值, 0~20 cm 土层 DOC 质量浓度于紫云英翻压后 17 d 和 38 d 达到峰值, 20~40 cm 与 40~60 cm 土层 DOC 质量浓度均于 59 d 达到峰值。3 种不同类型水稻土 DOC 质量浓度具有一定差异, 淹水层不同取样期 DOC 质量浓度的均值差异表现为黄泥田 > 灰黄泥田 > 灰泥田, 但不同类型水稻土间无显著差异; 而 0~60 cm 土壤层次中 DOC 质



A: 黄泥田, B: 灰黄泥田, C: 灰泥田; CK 单施化肥处理, cmv: 紫云英配施化肥处理。下同。

A: yellow paddy field, B: yellow podzolic paddy soil, C: grey paddy soil; CK: single fertilizer treatment, cmv: Chinese milk vetch combined chemical fertilizer treatment. The same below.

图 1 不同施肥处理水稻土溶解性有机碳动态变化

Figure 1 Dynamic changes of dissolved organic carbon under different treatments in different paddy soils

量浓度的均值差异表现为灰泥田>灰黄泥田>黄泥田,灰泥田DOC均值差异较灰黄泥田和黄泥田显著提高118.16%~155.46%和137.99%~286.21%。3种供试水稻土不同施肥处理的DOC质量浓度也具有一定差异。水稻生育期内cmv处理黄泥田各层次(淹水层、0~20、20~40、40~60 cm土层)DOC质量浓度均值较CK处理有明显增加,分别增加了244.37%、8.80%、18.02%、20.60%;在灰黄泥田中淹水层、0~20 cm和20~40 cm层次cmv处理DOC质量浓度均值较CK处理分别增加了18.98%、23.01%和8.39%,在40~60 cm土层中则减少了7.20%;而灰泥田0~20 cm土层cmv处理DOC质量浓度均值较CK处理增加24.10%,但淹水层、20~40 cm和40~60 cm层次则较CK处理分别减少9.29%、3.74%和5.31%。可见,随着紫云英翻压后时间的推移,3种供试水稻土DOC均具有向下淋溶的趋势,且不同层次间具有一定的延迟性;3种供试水稻土中,灰泥田的DOC存在较大的淋溶风险,而紫云英配施化肥可显著增加黄泥田DOC淋溶损失的风险。

2.2 不同施肥处理下供试水稻土DON的淋溶特性及其差异

3种供试水稻土不同层次渗滤液DON含量存在明显差异(图2)。淹水层DON质量浓度于紫云英翻压后10 d和24 d达到峰值,0~20 cm土层DON质量浓度于紫云英翻压后17 d和38 d达到峰值,20~40 cm与40~60 cm土层DON质量浓度均于24 d达到峰值。就不同类型稻田土壤而言,土壤渗滤液DON质量浓度也具有一定的差异。水稻生育期试供水稻土淹水层DON质量浓度均表现为灰黄泥田>灰泥田>黄泥田,不同类型水稻土间无显著差异;0~20 cm层次DON质量浓度表现为灰泥田>灰黄泥田>黄泥田,灰泥田和灰黄泥田DON均值较黄泥田显著增加了308.37%和84.44%;而20~40 cm和40~60 cm层次DON质量浓度则表现为黄泥田>灰黄泥田>灰泥田,20~40 cm和40~60 cm层次黄泥田DON均值差异较灰泥田显著提高36.87%和150.52%,而黄泥田与灰黄泥田间无显著差异。两种施肥处理供试水稻土DON质量浓度也具有一定差异。5~59 d cmv处理供试水稻土各层次(淹水层、0~20、20~40 cm和40~60 cm)的DON质量浓度均值均低于CK处理,较CK处理分别降低了55.24%~72.68%、21.09%~36.05%、21.46%~34.00%和4.75%~35.78%。可见,随紫云英翻压后时间的推移,供试水稻土DON有向下淋溶的趋势,3种

供试水稻土中黄泥田的DON淋溶风险最大,紫云英配施化肥具有缓减DON淋溶损失的趋势。

2.3 不同施肥处理供试水稻土DOC、DON的淋溶损失

紫云英翻压后3种供试水稻土DOC和DON的淋溶损失量存在明显差异(图3)。不同施肥处理3种供试水稻土DOC淋溶损失量表现为灰泥田>灰黄泥田>黄泥田。灰泥田CK处理,DOC淋溶损失量较灰黄泥田和黄泥田分别显著提高24.09%和72.15%;cmv处理,分别显著提高16.53%和40.55%。不同类型水稻土2种施肥处理DOC淋溶损失量具有一定差异,黄泥田cmv处理DOC淋溶损失量较CK处理显著提高19.19%,而灰黄泥田和灰泥田2种施肥处理DOC的淋溶损失量无显著差异。不同施肥处理下3种供试水稻土DON淋溶损失量表现为黄泥田>灰黄泥田>灰泥田,黄泥田CK处理DON淋溶损失量较灰黄泥田和灰泥田显著提高18.93%和37.01%,cmv处理3种不同类型水稻土DON淋溶损失量无显著差异。不同类型水稻土2种施肥处理DON淋溶损失量具有显著差异,黄泥田、灰黄泥田和灰泥田cmv处理DON淋溶损失量较CK处理分别显著降低了24.67%、14.88%和13.54%。可见,不同类型水稻土中,DOC淋溶损失以高肥力灰泥田水稻土较高,而DON淋溶损失量则以低肥力黄泥田较高;紫云英配施化肥处理可降低供试水稻土DON淋溶损失,但黄泥田DOC淋溶损失量有所提高。

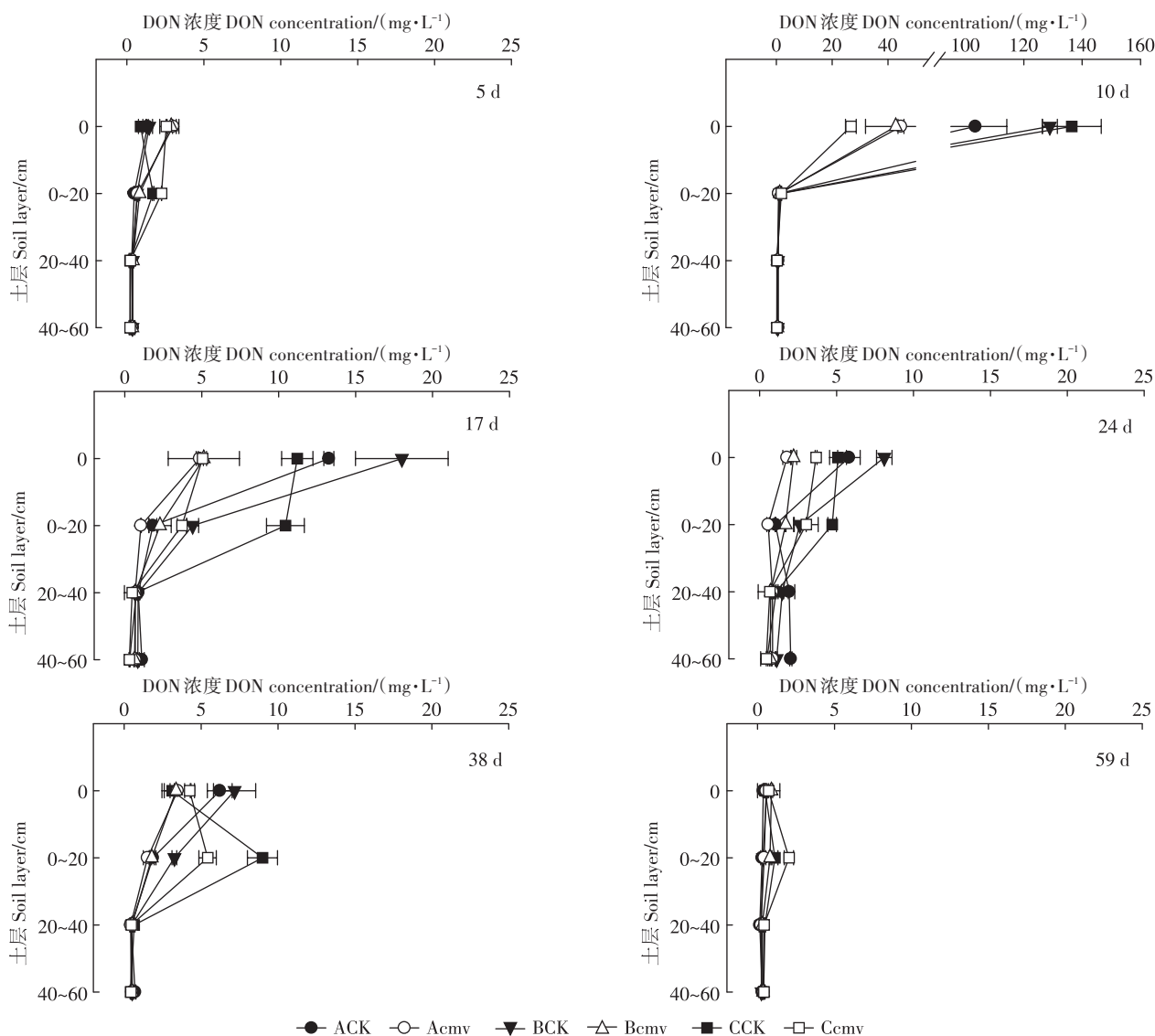
2.4 不同施肥处理供试水稻土DOC、DON淋溶损失的影响因素

采用灰色关联分析模型探讨不同处理水稻土DOC和DON淋溶损失量与紫云英施用量和土壤相关性质的关系(表3),揭示水稻土DOC和DON淋溶损失的影响因子。结果表明,土壤有机质与DOC淋溶损失量的关联系数为0.873,在所有可能的影响因子中与DOC淋溶损失量的关联度最高,其次为黏粒含量,关联系数为0.749。土壤非毛管孔隙度对水稻土DON淋溶损失量的影响较为显著,关联系数为0.793,其次为容重和pH,关联系数分别为0.752和0.746。可见,在土壤性质中水稻土DOC淋溶损失量主要受有机质的影响,而DON淋溶损失量主要受孔隙度的影响。

3 讨论

3.1 不同类型水稻土DOC和DON的淋溶损失差异

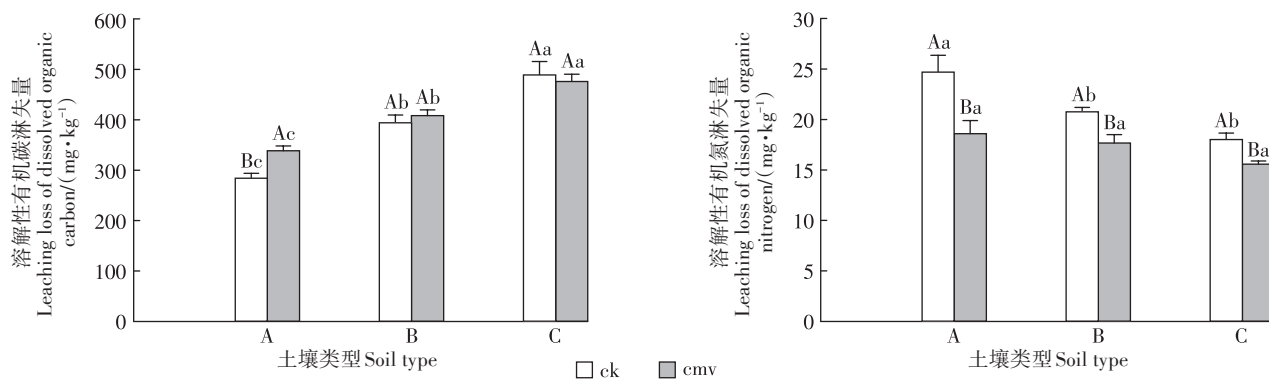
不同类型水稻土DOC和DON的淋失风险具有一



由于59 d之后渗滤液中溶解性有机氮的浓度低于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,因此图中数据未体现。
Since dissolved organic nitrogen concentration in leachate after 59 d is less than $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the data in the figure is not reflected

图2 不同处理水稻土溶解性有机氮动态变化

Figure 2 Dynamic changes of dissolved organic nitrogen under different treatments in different paddy soils



不同大写字母代表不同施肥处理间的差异显著性,不同小写字母代表不同土壤类型间的差异显著性。
Different capital letters represent the significance in different fertilization treatments, and different lowercase letters represent the significance in different soil types.

图3 不同处理水稻土溶解性有机碳氮淋溶损失量

Figure 3 Leaching loss of dissolved organic carbon and nitrogen under different treatments in different paddy soils

表3 水稻土溶解性有机碳氮淋溶损失量与影响因子的灰色关联分析

Table 3 Grey correlation analysis of leaching loss of dissolved organic carbon and nitrogen in paddy soil and influencing factors

DOC			DON		
影响因子 Influencing factor	关联系数 Correlation coefficient	排序 Sort	影响因子 Influencing factor	关联系数 Correlation coefficient	排序 Sort
有机质	0.873	1	非毛管孔隙度	0.793	1
黏粒	0.749	2	容重	0.752	2
淹水层 DOC	0.696	3	pH	0.746	3
紫云英施用量	0.652	4	有机质	0.665	4
非毛管孔隙度	0.575	5	淹水层 DON	0.628	5
容重	0.555	6	黏粒	0.623	6
pH	0.554	7	紫云英施用量	0.599	7

定差异,2种施肥方式 DOC 淋溶损失风险在高肥力的灰泥田最大,而 DON 的淋溶损失风险则在低肥力的黄泥田最大,这与3种供试水稻土的性质以及 DOC 和 DON 的质量浓度密切相关。研究表明高肥力水稻土的 DOC 中易分解的小分子 DOC 百分比含量较其他稻田土壤相对丰富^[23],而土壤对小分子量 DOC 组分的吸附相对较弱,且吸附后的生物稳定性差^[24],导致高肥力的灰泥田溶液中 DOC 含量增加,随重力水的作用向下淋失,从而增加淋溶损失风险。此外,高肥力水稻土 DOC 的低生物降解率导致 DOC 的消耗降低,也增加了 DOC 淋失的来源^[23]。本研究灰色关联分析结果表明水稻土 DOC 的淋溶损失量主要受有机质含量的影响(表3)。供试的高肥力灰泥田水稻土有机质含量分别是灰黄泥田和黄泥田的1.16倍和1.73倍,DOC 淋失的来源大,从而导致高肥力的灰泥田水稻土 DOC 淋溶损失较大。韩成卫等^[25]的研究也发现在同一 DOC 质量浓度条件下高肥力水稻土的 DOC 淋溶风险高于低肥力水稻土。稻田土壤中 DON 分子量小,迁移性强,易在重力水的作用下产生淋溶损失。本研究灰色关联分析结果表明水稻土 DON 淋溶损失量主要受非毛管孔隙度的影响(表3)。土壤中水流的运移通道主要靠的是大孔隙,70%~85%的水分运动源于大孔隙的贡献^[26]。水分在土壤剖面中的垂直运动是氮素向下淋溶的必要条件,因此土壤大孔隙的存在会加速氮素向深层土壤淋溶^[27],本研究供试黄泥田中非毛管孔隙度是灰黄泥田和灰泥田的2.24倍和1.27倍,有利于 DON 随土壤水向下淋溶,增加黄泥田 DON 的淋溶损失。

3.2 不同施肥处理水稻土 DOC 和 DON 的淋溶损失差异

施肥方式可通过影响土壤养分状况、微生物活

性、DOC 和 DON 分子量等,进一步影响土壤 DOC 和 DON 的淋溶损失风险。本研究中紫云英配施化肥较单施化肥处理可显著增加黄泥田 DOC 淋溶损失风险,而有效减缓各肥力稻田 DON 的淋溶损失风险。这是因紫云英配施化肥较单施化肥处理对稻田有着更大的碳投入(两种处理间的施碳量差值为1 519.23 kg·hm⁻²),促进土壤溶液中 DOC 含量增加,提高了土壤 DOC 的淋溶损失的来源。而本研究结果表明2种不同施肥处理间灰黄泥田和灰泥田 DOC 的淋溶损失量无显著差异,究其原因可能与土壤有机质含量有关(表3)。汤宏等^[28]研究表明高肥力的麻沙泥水稻土 DOC 主要来源于土壤自身含有的有机质分解。本研究中供试灰泥田和灰黄泥田有机质含量较高(表1),不同施肥处理后土壤原有有机质的分解均产生大量的 DOC。化肥尤其是氮肥和磷肥的施用可促进稻田土壤有机质的激发效应,生成大量的 DOC^[29],增加 DOC 的淋溶损失来源,而翻压紫云英后增加了对高肥力土壤的有机碳组分的损耗^[30],从而导致2种施肥处理间 DOC 淋溶损失差异不显著。在等氮处理条件下,由于施用的尿素为小分子 DON,施用于土壤后可直接快速增加溶液中小分子 DON(酰胺类化合物)含量,从而导致单施化肥处理的水稻土 DON 更易于淋失;而紫云英较化肥(尿素)释放 DON 所需的时间长^[31],且紫云英翻压至土壤后,促进稻田土壤芳香性和疏水性的大分子 DON 含量增加,使其易被土壤固持,减少其淋失风险^[32]。此外,有研究表明向土壤中大量翻压绿肥可以短期内提升土壤 C/N,增加土壤的 DON 吸附潜力^[33],进而降低了供试稻田土壤中 DON 的淋溶损失。

3.3 水稻土 DOC 和 DON 的淋溶速率差异

稻田土壤中 DOC 和 DON 分子量小,流动性强,易随下渗水淋溶迁移。本研究结果表明,随着紫云英翻压后时间的推移不同类型水稻土 DOC 和 DON 均有向下淋溶的趋势,且不同层次间具有一定的延迟性(图1、图2)。本研究中供试水稻土均为黏土和壤质黏土,质地较为黏重,比表面积和电荷密度较大,有利于土壤吸附滤液中的 DOC 和 DON,减缓其向下淋溶的速度^[34]。随着紫云英翻压后时间的推移,同一供试水稻土中 DOC 和 DON 的淋失速率存在一定差异。淹水层和0~20 cm 土层渗滤液中 DOC 与 DON 质量浓度随紫云英翻压时间的延长表现出相似的变化趋势,但20~60 cm 土层中 DON 含量则优先于 DOC 达到峰值。这可能与 DOC 和 DON 组分的亲-疏水性和分子量有

关。一方面,土壤溶液中亲水性化合物N含量较高,而疏水性化合物主要是富含C的化合物,而土壤对富含氮素的亲水组分的吸附能力弱于疏水组分,导致SON比SOC更易从土壤中淋失^[7,16]。另一方面,土壤DOC主要由碳水化合物、长链脂肪族化合物和蛋白质等组成,其芳香度达19.9%^[35];而土壤DON则以氨基酸、氨基糖等小分子化合物为主,其各组分的粒径远低于DOC相应粒径^[36],故推断DOC组分的平均分子量通常高于DON。土壤对DOC和DON中较大分子量组分的吸附力,吸附能力随着分子量增加而增加^[24]。有研究发现小分子量和亲水性化合物不易被土壤吸附,吸附后易出现解吸以及被大分子量和疏水性化合物替代吸附的情况^[37],使供试水稻土中DOC和DON淋失不同步,即DON更易随渗滤水向下淋溶,导致供试水稻土20~60 cm土层中DON含量优先于DOC达到峰值。此外,在淋溶发生时,稻田中表层土壤养分向下淋失过程中,下层土壤对淋溶DOC的吸附截留后再解吸附的现象^[35],以及土壤中存在优先吸附DOC并将DON释放于土壤溶液的现象^[38],也导致了其与DON的淋失速率具有一定差异。

4 结论

(1)不同土壤类型水稻土中,高肥力灰泥田的DOC淋溶损失风险较大,而低肥力黄泥田水稻土的DON淋溶损失风险较大。

(2)在等氮磷钾的条件下,较单施化肥,紫云英配施化肥有助于减缓稻田内DON的损失,但黄泥田DOC的淋溶损失量有所增加;因此,在实际生产中,采用紫云英改善土壤肥力的同时,翻压量应充分考虑其不同土壤中的生态效应。

(3)供试水稻土中DOC和DON的淋溶有所差异,DON较DOC更易随渗滤水向下淋溶,且DOC淋溶损失量与土壤有机质密切相关,而DON淋溶损失量与土壤孔隙度密切相关。

参考文献:

- [1] JONES D L, HEALEY J R, WILLETT V B, et al. Dissolved organic nitrogen uptake by plants: an important N uptake pathway[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(3): 413–423.
- [2] 丁咸庆, 柏菁, 项文化, 等. 不同浸提剂处理森林土壤溶解性有机碳含量比较[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 518–524. DING X Q, BAI Q, XIANG W H, et al. Comparison of dissolved organic carbon contents in forest soils extracted by different agents[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 518–524.
- [3] RITSON J P, CROFT J K, CLARK J M, et al. Sources of dissolved organic carbon (DOC) in a mixed land use catchment (Exe, UK)[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 165–175.
- [4] KAISER K. Dissolved organic phosphorus and sulphur as influenced by sorptive interactions with mineral subsoil horizons[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3): 489–493.
- [5] WORRALL F, BURT T P, ROWSON J G, et al. The multi-annual carbon budget of a peat-covered catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 4084–4094.
- [6] NSHOLM T, KIELLAND K, GANETEG U. Uptake of organic nitrogen by plants[J]. *New Phytologist*, 2009, 182(1): 31–48.
- [7] 赵满兴, 周建斌, 延志莲. 不同土层土壤对可溶性有机氮、碳的吸附特性研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1328–1332. ZHAO M X, ZHOU J B, YAN Z L. Adsorption characteristics of soluble organic carbon and nitrogen in different layer of cultivated soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(6): 1328–1332.
- [8] HUSSAIN M Z, ROBERTSON G P, BASSO B, et al. Leaching losses of dissolved organic carbon and nitrogen from agricultural soils in the upper US midwest[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 734: 139379.
- [9] 杨佳波, 曾希柏. 水溶性有机物在土壤中的化学行为及其对环境的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 206–211. YANG J B, ZENG X B. Behavior and environmental impact of soil dissolved organic matter[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(5): 206–211.
- [10] VINTHER F P, HANSEN E M, ERIKSEN J R. Leaching of soil organic carbon and nitrogen in sandy soils after cultivating grass-clover swards[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2006, 43(1): 12–19.
- [11] SIEMENS J, KAUPENJOHANN M. Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2002, 165(6): 675–681.
- [12] SOLINGER S, MATZNER K E. Controls on the dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen in a central European deciduous forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 55(3): 327–349.
- [13] SORRENT I G, TOSELLI M. Soil leaching as affected by the amendment with biochar and compost[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 226: 56–64.
- [14] 陶武辉. 施肥对黄土高原水土蚀风蚀交错区植物产量及土壤矿质氮、水溶性有机碳/氮的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009. TAO W H. The effect of fertilizer on the plant yield, mineral nitrogen, DOC and DON in wind-water erosion crisscross region on the loess plateau[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2009.
- [15] 陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等. 不同施肥对雷竹林渗漏水中可溶性有机碳、氮流失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1303–1310. CHEN P P, WU J S, ZHENG X L, et al. Effects of different fertilization treatments on loss of dissolved organic carbon and nitrogen in seepage water under *Phyllostachy praxox* stand[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1303–1310.
- [16] LONG G Q, JIANG Y J, SUN B, et al. Seasonal and inter-annual variation of leaching of dissolved organic carbon and nitrogen under long-term manure application in an acidic clay soil in subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015(146): 270–278.
- [17] 邢英, 李心清, 房彬, 等. 生物炭添加对两种类型土壤DOC淋失影响[J]. *地球与环境*, 2015, 43(2): 133–137. XING Y, LI X Q, FANG B, et al. Effect of biochar addition on DOC leaching from two different

- types of soils[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(2):133-137.
- [18] BOHARA H, DODLA S, WANG J J, et al. Influence of poultry litter and biochar on soil water dynamics and nutrient leaching from a very fine sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 189:44-51.
- [19] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, 39(2):278-284. ZHOU Z H, LI X Q, XING Y, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2):278-284.
- [20] 吕玉虎, 潘兹亮, 王琴. 翻压紫云英后化肥用量对稻田养分动态变化及产量效应的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3):174-178. LV Y H, PAN Z L, WANG Q. Effects of different amount of chemical fertilizer usage under ploughing down milk vetch on the yield and the dynamics of soil nutrients in rice field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3):174-178.
- [21] 石敏, 肖伟华, 王春梅, 等. 施肥与灌溉对黑土区稻田氮素渗漏淋溶的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1):42-49. SHI M, XIAO W H, WANG C M, et al. Influence of fertilization and irrigation on nitrogen percolation leaching in black soil region[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(1):42-49.
- [22] NIE S A, ZHAO L X, LEI X M, et al. Dissolved organic nitrogen distribution in differently fertilized paddy soil profiles: implications for its potential loss[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 262:58-64.
- [23] 禹洪双, 刘勤, 陈武荣, 等. 3种不同类型水稻土溶解性有机碳生物降解特性研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(12):29-32. YU H S, LIU Q, CHEN W R, et al. Biodegradation of dissolved organic carbon derived from three kinds of paddy soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(12):29-32.
- [24] GU B, SCHMITT J, CHEN Z, et al. Adsorption and desorption of different organic matter fractions on iron oxide[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(2):219-229.
- [25] 韩成卫, 李忠佩, 刘丽, 等. 溶解性有机碳在红壤水稻土中的吸附及其影响因素[J]. 生态学报, 2008(1):445-451. HAN C W, LI Z P, LIU L, et al. Adsorption of dissolved organic carbon on paddy soils of subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(1):445-451.
- [26] 牛新胜, 张翀, 巨晓棠. 华北潮土冬小麦-夏玉米轮作包气带氮素淋溶机制[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1):53-65. NIU X S, ZHANG C, JU X T. Mechanism of nitrogen leaching in fluvo-aquic soil and deep vadose zone in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1):53-65.
- [27] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7):103-110. SHANG F Z, YANG P L, LI Y K, et al. Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7):103-110.
- [28] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1):240-246. TANG H, SHEN J L, ZHANG Y Z, et al. Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1):240-246.
- [29] 唐美玲, 魏亮, 祝贞科, 等. 稻田土壤有机碳矿化及其激发效应对磷添加的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3):857-864. TANG M L, WEI L, ZHU Z K, et al. Responses of organic carbon mineralization and priming effect to phosphorus addition in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3):857-864.
- [30] 赵海超, 刘景辉, 赵宝平, 等. 施肥对不同肥力春玉米田土壤溶解性有机质的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(8):1286-1291. ZHAO H C, LIU J H, ZHAO B P, et al. Effect of fertilization on soil dissolved organic matter under different yield levels of spring corn[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(8):1286-1291.
- [31] 王建红, 曹凯, 张贤. 紫云英腐解对土壤速效养分动态变化和单季稻产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(3):587-592. WANG J H, CAO K, ZHANG X, et al. Effects of Chinese milk vetch decomposing on soil available nutrient dynamic changes and yields of single season rice[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 25(3):587-592.
- [32] 常单娜. 我国主要绿肥种植体系中土壤可溶性有机物特性研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2015. CHANG D N. Characteristics of soil dissolved organic matter in main green manure plantation systems in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [33] 周国朋, 曹卫东, 白金顺, 等. 多年紫云英-双季稻下不同施肥水平对两类水稻土有机质及可溶性有机质的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21):4096-4106. ZHOU G P, CAO W D, BAI J S, et al. Effects of different fertilization levels on soil organic matter and dissolved organic matter in two paddy soils after multi-years' rotation of Chinese milk vetch and double-cropping rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21):4093-4106.
- [34] 李晓月, 郑险峰, 周建斌. 不同质地小麦根际土壤有机碳、氮含量及特性研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(3):610-613. LI X Y, ZHENG X F, ZHOU J B, et al. Contents and characteristic of organic carbon and nitrogen in wheat rhizosphere with different soil textures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3):610-613.
- [35] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. 土壤学报, 2003(5):724-730. NI J Z, XU J M, XIE Z M, et al. Contents of WSOC and characteristics of its composition under different fertilization systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003(5):724-730.
- [36] 吉恒宽, 吴月颖, 符佩娇, 等. 热带滨海区不同土地利用背景下土壤溶解性有机氮的组成与粒径分布特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3):525-535. JI H K, WU Y Y, FU P J, et al. Composition and size distribution characteristics of soil dissolved organic nitrogen under different land use types in tropical coastal areas[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(3):525-535.
- [37] 黄倩, 吴靖霆, 陈杰, 等. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(3):446-452. HUANG Q, WU J T, CHEN J, et al. Adsorption of dissolved organic carbon (DOC) on soil: a review[J]. *Soils*, 2015, 47(3):446-452.
- [38] 肖胜生, 房焕英, 余小芳, 等. 土壤中流驱动下可溶性有机碳迁移的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(3):155-161. XIAO S S, FANG H Y, YU X F, et al. Advances of the migration of dissolved organic carbon driven by interflow[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(3):155-161.

(责任编辑:叶飞)