

不同覆盖作物对砂姜黑土剖面硝态氮动态的影响

徐静怡, 张中彬, 王玥凯, 赵馨雅, 孙海军, 郭自春, 彭新华

引用本文:

徐静怡, 张中彬, 王玥凯, 赵馨雅, 孙海军, 郭自春, 彭新华. 不同覆盖作物对砂姜黑土剖面硝态氮动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2281–2290.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响

李彦, 孙翠平, 井永苹, 罗加法, 张英鹏, 仲子文, 孙明, 薄录吉, 刘兆辉

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1386–1394 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0316>

大气臭氧胁迫对稻季土壤Cd生物有效性的影响

王亚波, 魏思雨, 孙月, 党婷婷, 尹微琴, 王圣森, 王小治

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1462–1469 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0254>

氮高效转基因水稻OsNRT2.3b对土壤氨氧化细菌群落多样性的影响

魏琳琳, 杨殿林, 侯萌瑶, 倪士, 李刚, 修伟明, 王慧, 赵建宁

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1149–1159 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0116>

季铵盐改性秸秆阻控养殖肥液灌溉土壤氮淋失

张理胜, 赵迪, 薄录吉, 张克强, 王凤

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2582–2588 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1028>

长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐静怡, 张中彬, 王玥凯, 等. 不同覆盖作物对砂姜黑土剖面硝态氮动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2281–2290.

XU J Y, ZHANG Z B, WANG Y K, et al. Effects of different cover crops on nitrate dynamics in Shajiang black soil profile [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2281–2290.

不同覆盖作物对砂姜黑土剖面硝态氮动态的影响

徐静怡^{1,2}, 张中彬², 王玥凯^{2,3}, 赵馨雅^{2,4}, 孙海军^{1*}, 郭自春², 彭新华^{2,3}

(1. 南京林业大学林学院/南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 海南大学热带作物学院, 海口 570228)

摘要:为探究不同覆盖作物整个生育期内[覆盖作物播种后(2021年11月5日)、营养生长期(2022年3月12日)和生殖生长期(2022年5月5日)]砂姜黑土剖面中硝态氮的动态变化,本研究在安徽省龙亢农场典型砂姜黑土区设置压实(Compacted, C)与不压实(Non-compacted, NC)处理,并裂区设置冬季休闲(Con)、苜蓿(Alf)、油菜(Rap)、萝卜+毛茛子混播(Rhv)4个处理,动态监测0~120 cm土层中土壤硝态氮含量、储量和植株地上地下生物量及其氮素积累量。结果表明:整个覆盖作物生长季, Alf、Rap、Rhv处理土壤硝态氮含量持续下降,各处理0~120 cm土层平均分别下降43.3%、53.9%、57.5%。营养生长期与生殖生长期3个覆盖作物处理(除生殖生长期不压实条件下 Rhv 处理)硝态氮储量均较 Con 处理降低($P<0.05$),且营养生长期的平均降幅(压实52.7%,不压实60.7%)高于生殖生长期(压实40.2%,不压实35.6%)。营养生长期,不压实条件下 Alf 处理土壤硝态氮储量是 Rap 和 Rhv 处理的1.41倍($P<0.05$)。生殖生长期,压实与不压实条件下3个覆盖作物处理土壤硝态氮储量间无显著差异。营养生长期, Alf 处理地上部生物量和氮素积累量低于 Rap 处理($P<0.05$),地下部生物量和氮素积累量低于 Rhv 处理($P<0.05$);但生殖生长期, Alf 处理地上部和地下部氮素积累量均显著高于 Rap 和 Rhv 处理($P<0.05$)。相关分析表明,土壤中硝态氮储量与覆盖作物生物量以及氮素积累量呈负相关($P<0.05$),表明覆盖作物对氮的吸收利用是土壤硝态氮下降的主要原因。综上,与 Con 处理相比, Alf、Rap 和 Rhv 处理均可以有效降低土壤剖面中残余硝态氮,但 Alf 处理在前期生长缓慢,降低土壤剖面硝态氮的能力低于 Rap 与 Rhv 处理。因此,在砂姜黑土区种植油菜或萝卜+毛茛子更有利于降低覆盖作物生长期的硝态氮淋溶风险。

关键词:砂姜黑土;覆盖作物;土壤硝态氮;生物量;植株氮素累积

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)10-2281-10 doi:10.11654/jaes.2023-0026

Effects of different cover crops on nitrate dynamics in Shajiang black soil profile

XU Jingyi^{1,2}, ZHANG Zhongbin², WANG Yuekai^{2,3}, ZHAO Xinya^{2,4}, SUN Haijun^{1*}, GUO Zichun², PENG Xinhua^{2,3}

(1. College of Forestry/Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The objective of this study was to evaluate the effects of different cover crops on reducing nitrate (NO_3^- -N) accumulation along the soil profile of Shajiang black soil throughout the growth period (2021.11 after sowing; 2022.03 during the nutritional growth period; and 2022.05 during the reproductive growth period). Four treatments, including winter fallow (Con), alfalfa (Alf), oilseed rape (Rap), and mixed radish and hairy vetch (Rhv), were conducted under both compacted (C) and non-compacted (NC) conditions at Longkang farm,

收稿日期:2023-01-12 录用日期:2023-05-06

作者简介:徐静怡(1998—),女,山东德州人,硕士研究生,从事覆盖作物与氮素累积研究。E-mail: xujingyi921@163.com

*通信作者:孙海军 E-mail: hjsun@njfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41771264, 31972518);中国科学院青年创新促进会项目(2021311)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41771264, 31972518); The Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2021311)

Anhui Province. The dynamics of the soil NO_3^- -N content and NO_3^- -N storage were measured along the 0–120 cm soil profile by interval sampling. The aboveground and belowground crop biomasses and their nitrogen accumulation were also determined. Our results showed that the NO_3^- -N content along the 0–120 cm soil profile continuously decreased by 43.3%, 53.9%, and 57.5% under the Alf, Rap, and Rhv treatments, respectively, throughout the growing season. During the nutritional and reproductive growth periods, the soil NO_3^- -N storage was significantly reduced in all three cover crop treatments compared with that in the Con treatment under both compacted and non-compacted conditions (except the Rhv treatment in the non-compacted soil during the reproductive growth period, $P<0.05$), with a higher average reduction during the nutritional growth period (compacted: 52.7% and non-compacted: 60.7%) than that during the reproductive growth period (compacted: 40.2% and non-compacted: 35.6%). During the nutritional growth period, the soil NO_3^- -N storage in the Alf treatment was 1.4 times higher than those in the Rap and Rhv treatments under the non-compacted condition ($P<0.05$). Meanwhile, during the reproductive growth period, soil NO_3^- -N storage showed no significant difference among the three cover crop treatments under both compacted and non-compacted conditions. The aboveground biomass and N accumulation in the Alf treatment were significantly lower than those in the Rap treatment during the nutritional growth period ($P<0.05$), and the belowground biomass and N accumulation were significantly lower than those in the Rhv treatment ($P<0.05$). However, both the aboveground and belowground N accumulation in the Alf treatment were significantly higher than those in the Rap and Rhv treatments during the reproductive growth period ($P<0.05$). The significantly negative correlations between the soil NO_3^- -N storage and N accumulation of cover crops indicated that nitrogen uptake by cover crops might be the main reason for the decrease in soil nitrate ($P<0.05$). In conclusion, the cover crops, including Alf, Rap, and Rhv, could effectively reduce NO_3^- -N accumulation in the soil profile as compared with the Con treatment. Owing to the slow growth of Alf in the early stage, its ability to reduce soil NO_3^- -N was lower than those of Rap and Rhv. Therefore, planting Rap and Rhv is more conducive to reducing the risk of soil nitrate nitrogen leaching in Shajiang black soil throughout the growth periods of cover crops.

Keywords: Shajiang black soil; cover crops; soil nitrate nitrogen; biomass; plant N accumulation

施用氮肥是维持作物高产稳产的关键措施^[1],氮肥中的氮素多以矿物态形式存在,其进入土壤后能够快速被植物吸收利用。但是,硝态氮转化快、易淋溶损失,导致氮肥平均利用率仅有 39%^[2]。黄淮海平原是我国重要的粮食主产区^[3],氮肥过量施用致使该地区硝态氮在土壤剖面中累积加剧,地下水污染风险增加^[4–5]。陈肖如等^[6]研究发现,1978—2019 年华北平原 2 m 深包气带农田土壤硝态氮累积存储量占氮肥投入量的 14%。因此,如何通过环境友好的种植管理模式吸收土壤中残余氮素、降低土壤中硝态氮累积,进而优化土壤氮素管理,对促进农业可持续发展有重要的指导意义。

覆盖作物是在粮食或经济作物生产间隙种植,为了减少或避免土壤在时间或空间上裸露而不是为了收获而种植的作物^[7]。种植覆盖作物可以实现改善土壤结构和水力特性、增加土壤有机质、提高土壤生物多样性、降低土壤硝态氮累积等多方面的效益,是实现农业可持续发展的重要途径之一^[8]。在粮食或经济作物收获后,立即种植生长速度快、根系发达的覆盖作物是降低土壤中硝态氮含量的重要措施^[4]。覆盖作物主要通过其根系不断向深层土壤生长,大量吸收残留在土壤剖面中的硝态氮以用于自身生长发育,从而降低土壤中硝态氮的累积和淋溶风险^[9]。

Garba 等^[10]收集了 516 组数据,分析发现在经济作物种植前,覆盖作物处理较休闲处理土壤矿物态氮储量下降 25%。覆盖作物吸收土壤残余硝态氮的能力与其根系特征、生物量、生长时期密切相关,Hirsh 等^[9]和巨昇容等^[11]发现根系深度与地上部分生物量及作物吸收硝态氮的能力呈正相关。张继宗等^[12]发现作物吸氮速率随生育期变化,且不同作物变化规律不同:甜玉米种植 30 d 后吸氮速率较之前迅速增加,而高丹草、红叶苋菜、空心菜、小麦种植 30 d 后吸氮速率缓慢增加,且吸氮量显著低于甜玉米。不同种类覆盖作物吸收土壤中硝态氮的能力具有一定差异。豆科作物可以通过固氮细菌共生从大气中获取并固定氮素,因此与非豆科作物相比,豆科作物吸收土壤中硝态氮的效果有所减弱^[13]。Thapa 等^[14]通过 Meta 分析发现非豆科覆盖作物处理比休闲处理减少了 56% 的土壤硝态氮淋失,减少量显著高于豆科覆盖作物。覆盖作物的种植方式也会影响其吸收土壤中硝态氮的效果,Gaimaro 等^[15]研究发现将多种覆盖作物混合播种比单一播种某种覆盖作物吸收土壤中硝态氮的能力更强。而 Antoine 等^[16]研究发现,豆科与十字花科覆盖作物混合播种降低土壤中硝态氮的效果与单独播种十字花科覆盖作物相同,土壤中矿物态氮均减少了 59%。此外土壤类型和气候条件也可能影响覆盖作物对土

壤剖面中硝态氮的吸收利用。Nouri 等^[17]的研究表明,与休闲处理相比,种植覆盖作物使老成土、软土、有机土、始成土和新成土的硝态氮淋溶分别下降 77%、37%、78%、77% 和 42%,却可能增加了淋溶土的硝态氮淋溶;同时也有研究发现覆盖作物降低硝态氮淋溶的效果随降雨量的增加而逐渐降低^[18]。综上所述,覆盖作物对土壤硝态氮累积的消减作用在国内外已被认可,其作用效果受到多种因素的影响。但是目前,对于不同生育期不同覆盖作物对土壤硝态氮动态变化的影响研究相对较少。因此本研究观测了砂姜黑土区不同覆盖作物在播种后、营养生长和生殖生长期对土壤硝态氮动态变化的影响,结果对指导华北平原农业生产具有重要意义。

砂姜黑土是黄淮海地区重要的土壤类型之一,具有黏粒含量高、有机质含量低等特点,加上长期不合理的耕作,导致其土壤结构退化、耕层变薄、犁底层压实,从而影响了土壤硝态氮迁移转化以及作物吸收利用^[19]。赵允格等^[20]的研究表明,压实导致土壤残留硝态氮增加,土壤硝态氮淋溶减少;但是 Parvin 等^[21]则发现,压实增加了土壤硝态氮淋溶。本项目组前期的研究表明在典型砂姜黑土区种植覆盖作物可以有效缓解土壤压实,改善土壤导水导气性,促进作物根系生长^[22],然而在典型砂姜黑土区压实与不压实条件下不同覆盖作物处理土壤硝态氮在整个生育期内的动态变化尚未明确。因此,本研究选取安徽龙亢农场典型砂姜黑土,研究在压实和不压实条件下 3 种覆盖作物处理(苜蓿、油菜、萝卜+毛茛子混播)和休闲处理的土壤剖面中硝态氮含量随时间的动态变化,筛选更有效吸收硝态氮的覆盖作物种类,以期对砂姜黑土氮素管理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究区位于安徽省怀远县龙亢农场(33°32' N, 115°59' E),属暖温带半湿润季风气候区。常年年均气温 14.8℃,年均降雨量约 900 mm;本次试验覆盖作物生长季(2021 年 11 月—2022 年 5 月)降雨量为 355 mm。该区域土壤类型为河湖相石灰性沉积物发育的砂姜黑土,其砂粒(>0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)含量分别为 80、541、379 g·kg⁻¹。试验开始前耕层(0~20 cm)土壤容重为 1.50 g·cm⁻³,有机碳 8.14 g·kg⁻¹,全氮 0.88 g·kg⁻¹,全磷 0.45 g·kg⁻¹,全钾 14.48 g·kg⁻¹,碱解氮 64.62 mg·kg⁻¹,速效磷

21.22 mg·kg⁻¹和速效钾 144.58 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验始于 2017 年秋季,种植模式为冬季覆盖作物(10 月—次年 5 月)—夏季玉米(6—10 月)轮作。试验采用裂区设计,主区为不压实(Non-compacted, NC)和压实(Compacted, C) 2 个处理,副区为休闲(Con, 不种覆盖作物)、苜蓿(Alf)、油菜(Rap)、萝卜+毛茛子混播(Rhv) 4 个处理,每个处理重复 3 次,各小区面积 70 m²(10 m×7 m)。其中,压实与不压实处理仅在 2017 年试验初始时实施 1 次。压实处理土壤采用 7 400 kg 四驱大型农业机械(凯特迪尔 KAT1504 轮式拖拉机,前轮胎型号 14.9-26,后轮胎型号 18.4-38,功率 150 kW)以轮迹平排的方式连续碾压 3 遍;不压实处理利用深松机间隔疏松土壤,深松深度 35 cm。

此外,为便于播种,每季作物种植前需以小型旋耕机浅旋(5~10 cm)一次,然后人工播种覆盖作物或玉米。为平衡土壤肥力,覆盖作物与休闲处理分别于 2017 年(N 60 kg·hm⁻², P₂O₅ 45 kg·hm⁻²)和 2018 年(N 30 kg·hm⁻²)施用少量化肥,2019、2020 年和 2021 年不施肥;玉米每季施基肥,N、P₂O₅ 和 K₂O 分别为 100、60 kg·hm⁻²和 90 kg·hm⁻²,追施氮肥(N)80 kg·hm⁻²。每年 5 月玉米种植前,人工刈割覆盖作物地上部,并移出田块,地下部根系还田;其后,播种玉米(株行距 30 cm×60 cm),10 月玉米收获后,地上部秸秆移除,根茬还田。各处理其余田间管理一致。

1.3 土壤采集与测定

各处理剖面土壤样品采集 3 次,时间分别为:覆盖作物播种后(2021 年 11 月 5 日)、营养生长期(2022 年 3 月 12 日)和收获期(2022 年 5 月 5 日)。用土钻采集 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120 cm 7 个土层土样,每个小区随机选 2 个样点混合成一个土样。通过紫外分光光度法测定新鲜土壤硝态氮含量^[23]。

覆盖作物收获后(2022 年 5 月 7 日)立即采集土壤原状环刀样品(100 cm³),采样深度分别为 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~50 cm。105℃下烘干测定土壤容重,并计算土壤硝态氮储量^[6]。

$$F = \sum \frac{C_i \times Z_i \times D_i}{10}$$

式中: F 为土壤硝态氮储量,kg·hm⁻²; C_i 为各层土壤硝态氮含量,mg·kg⁻¹; Z_i 为各土层厚度,cm; D_i 为各层土壤容重,g·cm⁻³。

1.4 覆盖作物样品采集与测定

在营养生长期(2022年3月14日)和生殖生长期(2022年5月6日)采集覆盖作物植株样品。每个小区选择长势均匀的0.5 m×0.5 m样方采样,测定地上、地下(0~40 cm土层)部分生物量。植物样于105℃杀青,80℃烘干至质量恒定,粉碎过筛后用元素分析仪测定植物样本中氮含量,计算覆盖作物地上和地下部分氮素累积量^[24]。

1.5 数据处理

采用SPSS 25.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并用Duncan法进行多重比较。相关分析采用Pearson双变量相关分析。采用Origin 2022进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖作物处理土壤剖面硝态氮含量和储量动态变化

压实和不压实条件下,与覆盖作物播种季(2021年11月)相比,营养生长期(2022年3月)Con处理平均每个土层中土壤硝态氮含量先升高35.6%,生殖生长期(2022年5月)又下降30.1%。而Alf、Rap、Rhv处理土壤硝态氮含量持续下降,各处理0~120 cm土层平均分别下降了43.3%、53.9%、57.5%。

不压实条件下,覆盖作物播种季,0~40 cm土层Rap和Rhv处理土壤硝态氮含量较Con处理分别降低了42.7%和38.3% ($P<0.05$,图1a)。100~120 cm土层各覆盖作物处理土壤硝态氮含量均低于Con处理 ($P<0.05$,图1a)。营养生长期,与Con处理相比,各覆盖作物处理显著降低了0~120 cm各土层中土壤硝态氮含量;10~20 cm土层Alf处理的土壤硝态氮含量高于Rap和Rhv处理 ($P<0.05$,图1b)。生殖生长期,10~20 cm土层Alf、Rap和Rhv处理土壤硝态氮含量较Con处理分别降低37.2%、32.0%和25.2% ($P<0.05$,图1c);40~60 cm土层Alf处理土壤硝态氮含量较Con处理降低了44.0% ($P<0.05$,图1c)。

压实条件下,覆盖作物播种季0~20 cm土层Rap、Rhv处理土壤硝态氮含量大于Con与Alf处理 ($P<0.05$,图1d)。营养生长期,相较于Con处理,Alf、Rap和Rhv处理均降低了0~60 cm各土层土壤硝态氮含量,100~120 cm土层Alf与Rhv处理土壤硝态氮含量下降了83.5%和73.5% ($P<0.05$,图1e)。生殖生长期,0~10 cm土层Rap处理土壤硝态氮含量较Con处理下降了42.5% ($P<0.05$,图1f),10~20 cm土层Rap、Rhv处理土壤硝态氮含量均较Con处理分别下降40.4%

和49.9% ($P<0.05$,图1f)。

与不压实条件相比,覆盖作物播种季压实减少了Con处理0~40 cm土层与Alf处理0~40 cm和60~80 cm土层硝态氮含量,各处理平均降幅为42.9%和39.6% ($P<0.05$)。营养生长期压实减少了Con处理60~80 cm土层土壤硝态氮含量,平均减幅为55.7% ($P<0.05$)。生殖生长期压实增加了Rap处理20~40 cm土层土壤硝态氮含量,增幅为47.7% ($P<0.05$)。

不压实条件下,覆盖作物播种季,Rap与Rhv处理0~120 cm深度土壤硝态氮储量较Con处理分别降低了27.2%和30.5% ($P<0.05$,图2a)。营养生长期,与Con处理相比,3个覆盖作物处理土壤硝态氮储量降幅均达到显著水平,平均降幅为60.7%。Alf处理土壤硝态氮储量($72.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为Rap($50.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、Rhv($50.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的1.44倍 ($P<0.05$,图2b)。生殖生长期,与Con处理相比,Alf和Rap处理土壤硝态氮储量显著降低,降幅分别为39.0%和38.4% ($P<0.05$,图2c)。

压实条件下,覆盖作物播种季,Rhv处理土壤硝态氮储量为 $93.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,为Alf处理的1.70倍 ($P<0.05$,图2a)。营养生长期,与Con处理相比,3个覆盖作物处理土壤硝态氮储量降幅均达到显著水平,平均降幅为52.7% ($P<0.05$,图2b)。生殖生长期,压实处理下Alf、Rap和Rhv土壤硝态氮储量较Con处理平均降低了40.2% ($P<0.05$,图2c)。

与不压实土壤相比,压实降低了覆盖作物播种季Con与Alf处理和营养生长期Alf处理土壤硝态氮储量 ($P<0.05$,图2a、2b)。

2.2 不同覆盖作物处理地上、地下部生物量

覆盖作物生长季,压实和不压实条件下Alf、Rap和Rhv处理生殖生长期地上部生物量较营养生长期(图3a和图3b)平均增加了4.92、3.68倍和4.13倍。两个采样时期,压实和不压实条件下,Rap处理地上部生物量都高于Alf和Rhv处理 ($P<0.05$)。与不压实条件相比,压实降低了营养生长期Alf(26.0%)和Rap(27.1%)以及生殖生长期Rap(15.9%)的地上部生物量 ($P<0.05$)。

覆盖作物生长季,压实和不压实条件下,Alf、Rap和Rhv处理生殖生长期地下部生物量较营养生长期(图3c、图3d)平均增加了2.34、0.31倍和0.42倍。营养生长期,压实和不压实条件下,Rap和Rhv处理的地下部生物量均高于Alf处理 ($P<0.05$);相反,在生殖生长期Alf处理地下部生物量高于Rap和Rhv处理 ($P<0.05$)。压实条件下Alf处理的地下部生物量在营

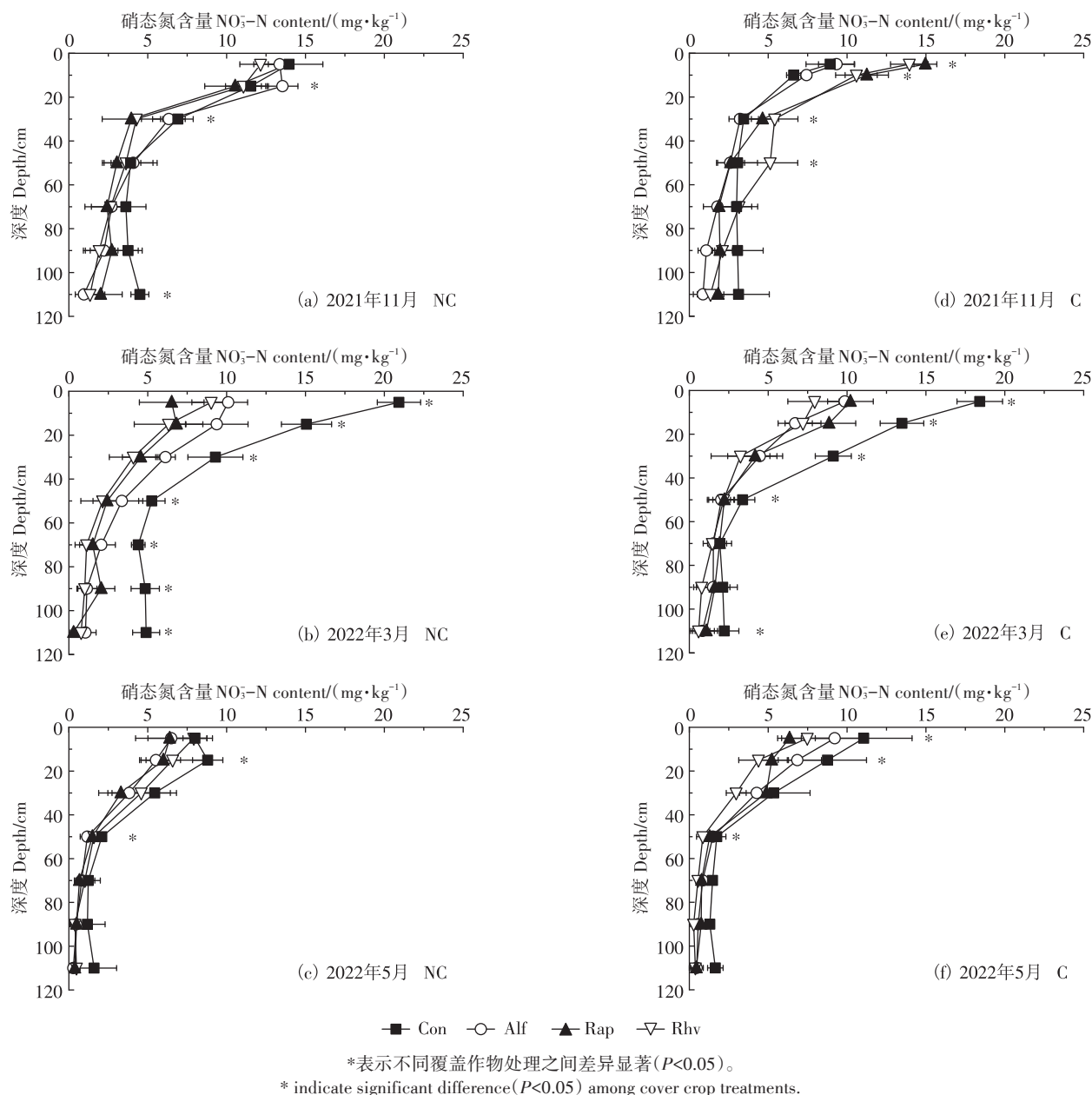


图1 不同压实水平下覆盖作物对土壤剖面硝态氮含量动态的影响

Figure 1 Effects of cover crop treatments on dynamic changes of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil profiles under different compaction levels

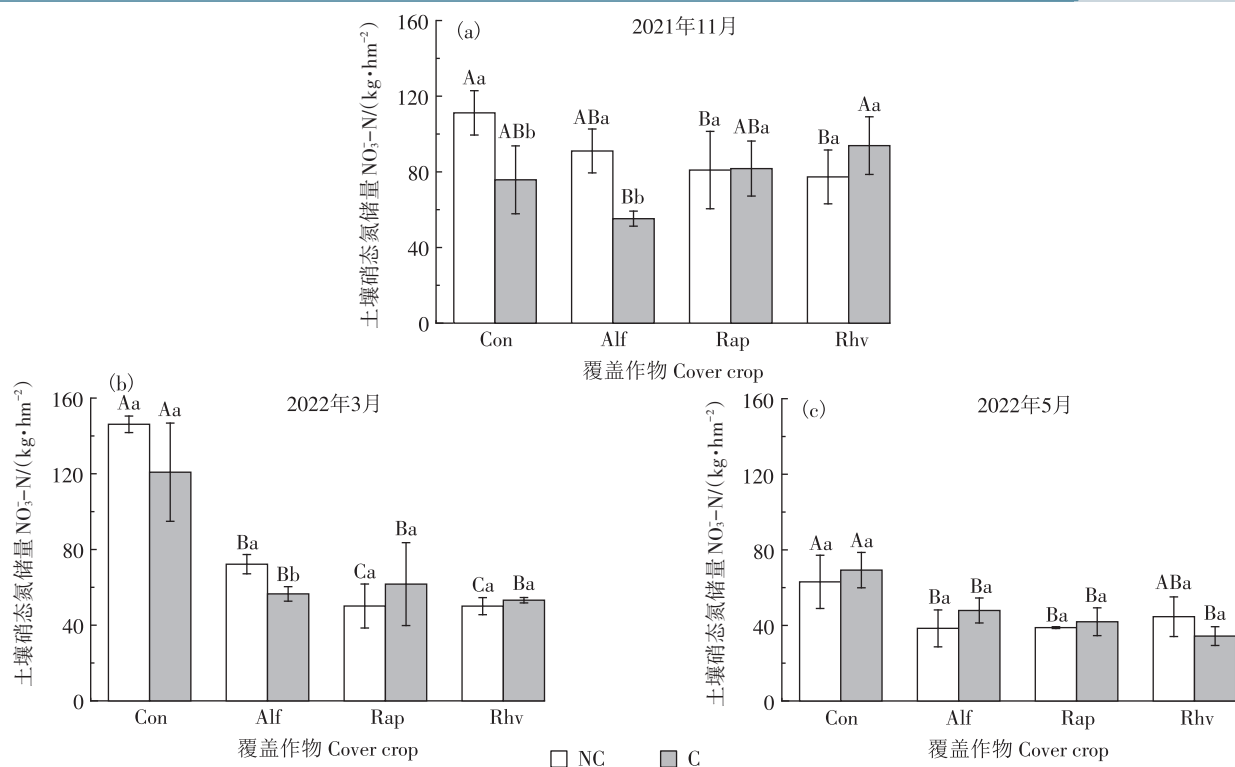
养生长期低于不压实条件(24.3%, $P < 0.05$),但在生殖生长期却高于不压实条件(14.7%, $P < 0.05$)。与不压实相比,压实减少了Rap处理营养生长期(12.6%)和生殖生长期(21.0%)阶段的地下部生物量和Rhv处理生殖生长期(18.7%)的地下部生物量($P < 0.05$)。

2.3 不同覆盖作物处理地上、地下部氮素累积量

覆盖作物生长季,压实和不压实条件下,Alf、Rap和Rhv处理生殖生长期地上部氮素累积量较营养生长期分别平均增加了2.90、1.59倍和1.53倍。营养生长期,压实和不压实条件下,Rap处理的地上部氮素累

积都高于Alf和Rhv处理($P < 0.05$,图4a)。生殖生长期,压实和不压实条件下地上部氮素累积量从大到小为Alf>Rap>Rhv($P < 0.05$,图4b)。与不压实条件相比,压实显著降低了营养生长期Alf(25.0%)和Rhv(15.1%)处理以及生殖生长期Rhv(17.6%)处理的地上部氮素累积($P < 0.05$)。

覆盖作物生长季,压实和不压实条件下,Alf处理生殖生长期地下部氮素累积较营养生长期平均增加75.2%,Rap和Rhv的氮素累积却分别降低了10.5%和54.9%。营养生长期,压实和不压实条件下,Rhv的地



不同大写字母代表相同压实处理不同覆盖作物之间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母代表相同覆盖作物不同压实处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。
Different uppercase letters indicate significant difference($P < 0.05$) among cover crop treatments under the same soil compaction treatment. Different lowercase letters indicate significant difference($P < 0.05$) between the compacted and non-compacted treatments under the same cover crop treatment. The same below.

图2 不同压实水平下覆盖作物对土壤剖面硝态氮储量动态的影响

Figure 2 Effects of cover crop treatments on dynamic changes of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil profiles under different compaction levels

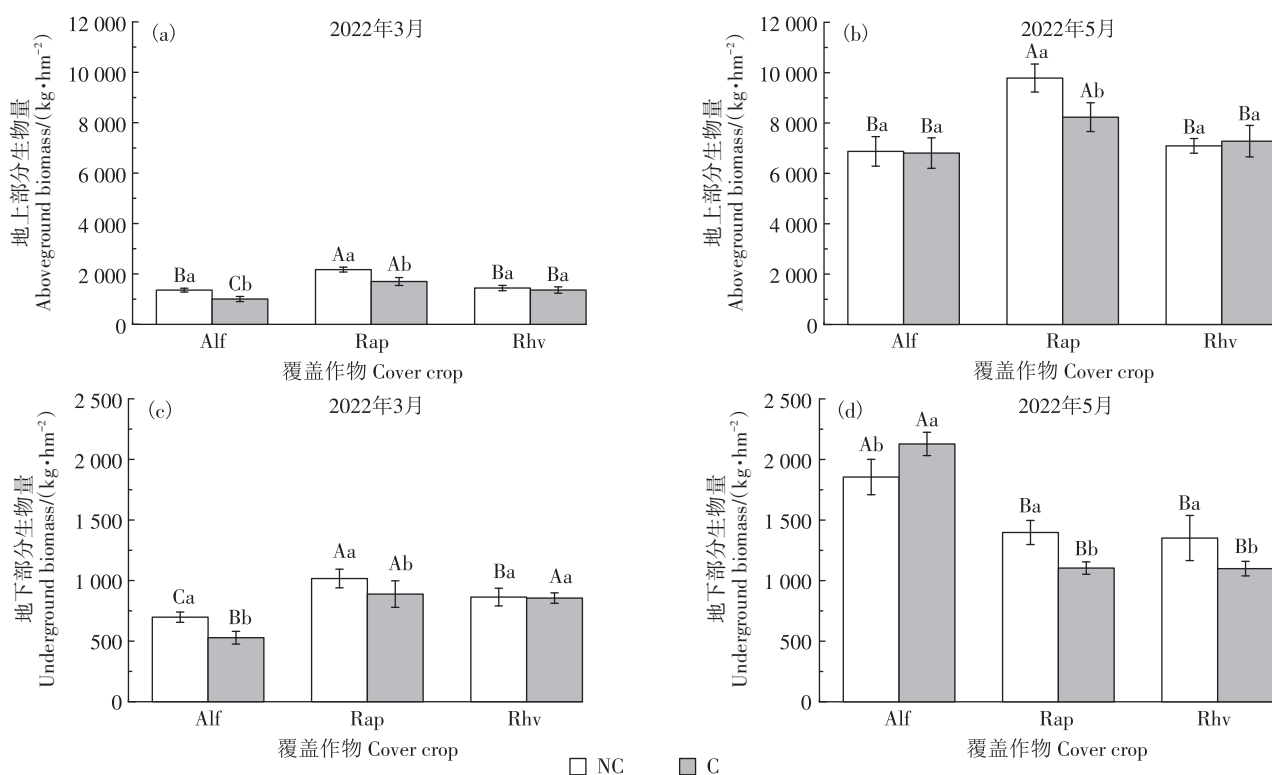


图3 不同压实和覆盖作物处理下地上和地下部分生物量

Figure 3 Above ground and underground biomass of different cover crop in compacted and non-compacted soil treatments

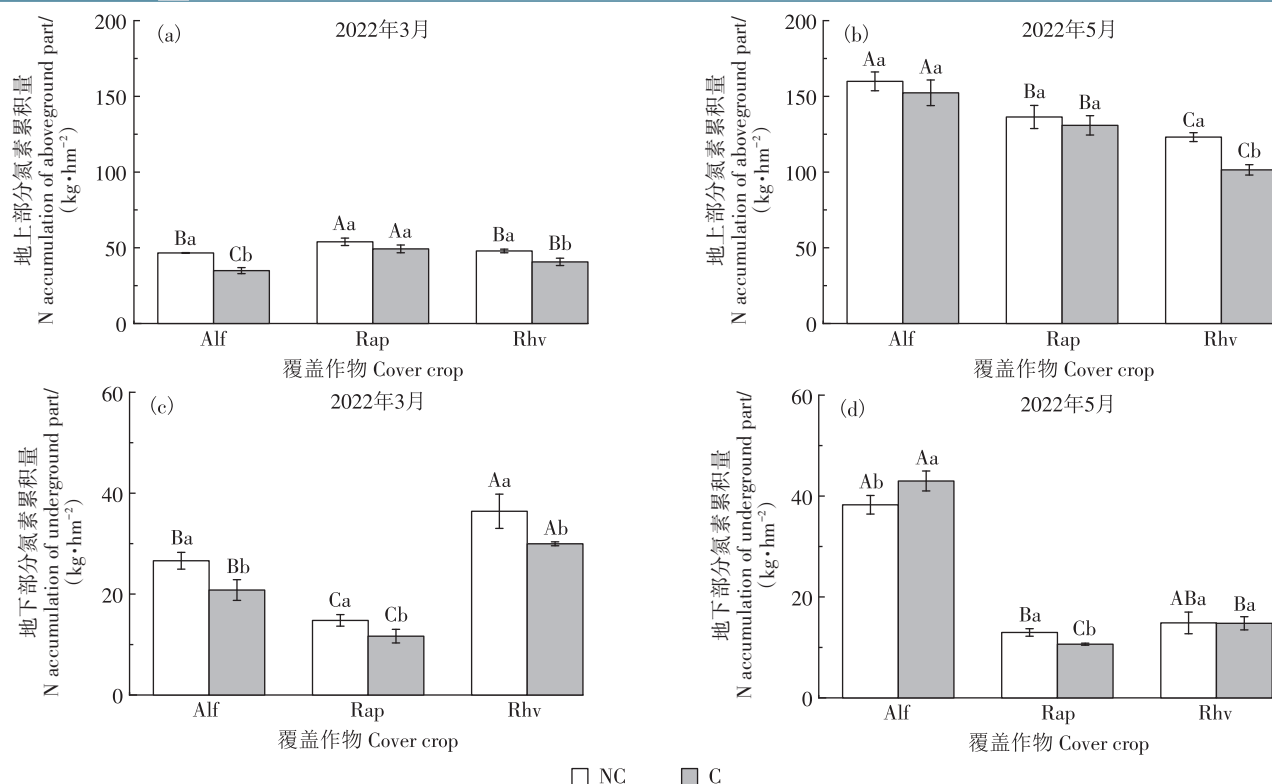


图4 不同压实和覆盖作物处理下植株地上和地下部分氮素积累量

Figure 4 N accumulation of above ground and underground parts of different cover crop in compacted and non-compacted soil treatments

下部分氮素积累量均高于Rap和Alf的地下部分氮素累积($P<0.05$,图4c)。在生殖生长期Alf地下部氮素累积高于Rhv和Rap($P<0.05$,图4d)。营养生长期,压实处理下Alf、Rap、Rhv的地下部氮素积累量均低于不压实处理(21.8%、21.1%、17.7%, $P<0.05$)。生殖生长期,与不压实处理相比,压实处理下Alf的地下部氮素累积增加(12.3%, $P<0.05$),Rap地下部氮素累积降低(17.9%, $P<0.05$)。

2.4 不同覆盖作物处理土壤硝态氮储量与生物量、氮素积累量的相关性

将覆盖作物全生育期各小区0~120 cm深度范围

内土壤硝态氮储量与覆盖作物生物量和氮素积累量指标进行相关性分析发现(表1):土壤硝态氮储量与覆盖作物地上部分生物量、地下部分生物量、总生物量、总氮素积累量在0.01水平上呈负相关关系,与覆盖作物地上部分氮素积累量在0.05水平上呈负相关关系。其中覆盖作物地上部分生物量、总生物量与土壤硝态氮储量的相关性最强(-0.69)。

3 讨论

本研究发现覆盖作物处理在营养生长期和生殖生长期较休闲处理均显著降低土壤剖面中硝态氮储

表1 土壤硝态氮储量与覆盖作物生长指标的相关性

Table 1 The correlations between soil nitrate nitrogen storage and cover crops growth index

指标 Index	覆盖作物小区土壤硝态氮储量 Soil nitrate nitrogen storage in cover crop plots (0~120 cm)
地上部分生物量 Aboveground biomass	-0.69**
地下部分生物量 Underground biomass	-0.50**
总生物量 Total biomass	-0.69**
地上部分氮素积累量 N accumulation of aboveground	-0.63*
地下部分氮素积累量 N accumulation of underground	0.06
总氮素积累量 Total N accumulation	-0.58**

注:*、**分别表示在0.05和0.01水平上(双侧)显著相关。

Note:* and ** indicate a significant level at the $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

量。Lapierre等^[25]也报道了覆盖作物可以有效降低土壤中硝态氮的储量。本研究相关分析结果发现土壤硝态氮储量与覆盖作物生物量和氮素累积量呈负相关关系($P<0.01$),这与Blesh等^[26]的研究结果一致。且本研究覆盖作物在营养生长期和生殖生长期地上及地下部分生物量之和分别超过了 $1\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,地上及地下部分氮素累积量之和都分别超过 $55\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $110\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,这些结果表明覆盖作物自身生长吸收土壤氮素是导致土壤硝态氮储量显著低于休闲处理的主要原因^[27]。覆盖作物降低土壤硝态氮的另一方面原因可能是覆盖作物根系及其分泌物可以改善微生物活性,从而提升土壤硝态氮的微生物同化,利于降低土壤中硝态氮含量^[28-29]。Muhammad等^[30]发现覆盖作物处理较休闲处理可以将土壤微生物碳和氮分别提高42%和51%,Romero等^[31]的研究表明新鲜有机物的输入可以大幅度提高硝态氮的微生物同化,因此种植覆盖作物导致的微生物同化作用增强也可能导致土壤硝态氮下降。本研究也发现生殖生长期覆盖作物吸收土壤残余硝态氮的能力较营养生长期明显减弱,这可能与覆盖作物整个生育期对氮素需求量不同有关。段玉等^[32]研究发现油菜在苗期-快速生长期-生长后期对氮素吸收经历慢-快-慢的变化过程;段淑辉等^[33]将萝卜作为填闲作物,发现土壤中硝态氮含量先迅速降低后变缓。本实验结果表明覆盖作物可以有效降低土壤残余硝态氮,其效果表现为营养生长期优于生殖生长期。

值得关注的是,不压实条件下,营养生长期苜蓿处理土壤剖面硝态氮储量显著大于油菜、萝卜+毛苕子处理。这可能是由于在营养生长初期苜蓿生长缓慢,地上和地下部分总的生物量小于油菜和萝卜+毛苕子。虽然苜蓿地上和地下部分氮素累积总量已经高于油菜,接近萝卜+毛苕子,但是苜蓿是豆科作物,可以固定大气中的氮素^[34],因而减弱对土壤中残余硝态氮的吸收,从而导致土壤中残留硝态氮高于油菜和萝卜+毛苕子处理。Garba等^[10]报道了豆科覆盖作物处理土壤中硝态氮储量大于芸苔类非豆科覆盖作物,Tribouillois等^[35]进一步证明非豆科作物单作与豆科、非豆科作物混播处理的土壤残余无机氮含量接近,均低于豆科作物单独种植。本试验中毛苕子虽然也是豆科作物,但萝卜吸收土壤残余硝态氮能力较强^[36],因此萝卜+毛苕子混播处理的土壤残留硝态氮储量与油菜处理无显著差异。覆盖作物生殖生长期压实和不压实条件下覆盖作物处理土壤剖面硝态氮储量

无显著差异。在生殖生长期苜蓿长势较好,生物量迅速累积,地上和地下部氮素累积总量明显高于油菜和萝卜+毛苕子处理,苜蓿从土壤中吸收的氮素较营养生长期明显增加;另外,油菜、萝卜和毛苕子都是一年生作物,在进入生殖生长后吸收土壤氮素的能力减弱,生殖生长期地下部氮素累积量也较营养生长期出现降低的趋势。在砂姜黑土区,3月份降雨量增加,由于此时苜蓿处理土壤剖面硝态氮累积量较高,其剖面硝态氮随水分向土壤更深层或地下水淋溶的风险也高于油菜和萝卜+毛苕子处理^[37]。综上所述,豆科覆盖作物苜蓿在营养生长期吸收土壤残余硝态氮的能力弱于油菜和萝卜+毛苕子,但在生殖生长期,苜蓿、油菜和萝卜+毛苕子降低土壤硝态氮的效果是一致的。因此,根据覆盖作物生长季对土壤剖面硝态氮的影响,综合其生物量积累及不同发育阶段吸收氮素的表现,为降低砂姜黑土区硝态氮累积和淋溶风险,选择油菜、萝卜+毛苕子混播作为覆盖作物更为适宜。

本研究发现压实降低了覆盖作物播种期休闲处理以及播种期和营养生长期苜蓿处理的土壤硝态氮储量。Yi等^[38]发现压实增加了土壤硝态氮的淋溶,Parvin等^[21]通过模型模拟发现硝态氮的淋溶随压实程度的增加而增加。压实降低土壤蒸发和土壤持水能力,增加了土壤排水,这可能是导致压实土壤中的硝态氮含量下降的原因之一。此外,压实可以降低土壤有机氮的矿化,增加土壤有机质含量和微生物对氮的固定,从而降低土壤中的硝态氮含量^[39]。但是,压实对油菜和萝卜+毛苕子处理土壤硝态氮无显著影响,这表明不同覆盖作物处理土壤硝态氮储量对压实的响应并不一致,其原因尚有待进一步研究。

4 结论

(1)在典型砂姜黑土区开展的田间实验表明,种植覆盖作物能显著降低1.2 m深度土壤硝态氮储量,但其效果在不同生育期不同。与休闲处理相比,压实和不压实条件下,营养生长期覆盖作物处理土壤硝态氮储量平均分别下降52.7%和60.7%,而生殖生长期覆盖作物处理土壤硝态氮储量平均分别下降40.2%和35.6%。

(2)营养生长期,不压实土壤中,苜蓿处理土壤硝态氮储量($72.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于油菜和萝卜+毛苕子混播处理($50.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $50.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$);压实土壤中,3种覆盖作物处理硝态氮储量无显著差异。压实实施5 a后仍对覆盖作物地上或地下生物量有显著影

响,同时压实也降低了苗期和营养生长期苜蓿处理土壤硝态氮储量,但对油菜和萝卜+毛苕子混播处理土壤硝态氮储量无显著影响。

(3)综合覆盖作物整个生育期降低土壤剖面硝态氮的能力,与苜蓿相比,油菜或萝卜+毛苕子混播是砂姜黑土区更适宜降低土壤硝态氮累积和淋溶风险的覆盖作物类型。

参考文献:

- [1] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 1-13. JU X T, ZHANG C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 1-13.
- [2] YU X, KEITEL C, ZHANG Y, et al. Global meta-analysis of nitrogen fertilizer use efficiency in rice, wheat and maize[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 338: 108089.
- [3] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1370-1380. WANG Y K, GUO Z C, ZHANG Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil (Vertisol)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6): 1370-1380.
- [4] HIRSH S M, DUKER S W, GRAYBILL J, et al. Scavenging and recycling deep soil nitrogen using cover crops on mid-Atlantic, USA farms [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309: 107274.
- [5] 温美娟, 郑伟, 赵志远, 等. 不同施肥与间套绿肥对果园水热特征及硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1119-1128. WEN M J, ZHENG W, ZHAO Z Y, et al. Effects of different fertilizer treatments combined with green manure intercropping on water and thermal properties and nitrate accumulation in soils of apple orchard[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1119-1128.
- [6] 陈肖如, 李晓欣, 胡春胜, 等. 华北平原农田关键带硝态氮存储与淋失量研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1546-1557. CHEN X R, LI X X, HU C S, et al. Nitrate storage and leaching in the critical zone of farmland in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1546-1557.
- [7] 刘晓冰, 宋春雨, HERBERT S J, 等. 覆盖作物的生态效应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 365-368. LIU X B, SONG C Y, HERBERT S J, et al. Ecological effects of cover crops[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 365-368.
- [8] 蹇述莲, 李书鑫, 刘胜群, 等. 覆盖作物及其作用的研究进展[J]. 作物学报, 2022, 48(1): 1-14. JIAN S L, LI S X, LIU S Q, et al. Research advances of cover crops and their important roles[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(1): 1-14.
- [9] HIRSH S M. Deep soil nitrogen capture and recycling by early-planted, deep-rooted cover crops[D]. Washington: College Park, University of Maryland, 2018.
- [10] GARBA I I, FAY D, APRIANI R, et al. Fallow replacement cover crops impact soil water and nitrogen dynamics in a semi-arid subtropical environment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 338: 108052.
- [11] 巨昇容, 闵炬, 董刚强, 等. 不同种类休闲作物阻控设施菜地氮磷淋溶效果及机制研究[J/OL]. 土壤学报: 1-12[2023-04-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220609.1832.008.html>. JU S R, MIN J, DONG G Q, et al. Effects and mechanisms of different kinds of catch crops on reducing nitrogen and phosphorus leaching loss in protected vegetable field[J]. *Acta Pedologica Sinica*: 1-12 [2023-04-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220609.1832.008.html>.
- [12] 张继宗, 刘培财, 左强, 等. 北方设施菜地夏季不同填闲作物的吸氮效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2663-2667. ZHANG J Z, LIU P C, ZUO Q, et al. Nitrogen uptake by different catch crops in facility vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2663-2667.
- [13] 刘颖, 张佳蕾, 李新国, 等. 豆科作物氮素高效利用机制研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 476-482. LIU Y, ZHANG J L, LI X G, et al. Research progress on nitrogen efficient utilization mechanism of leguminous crops[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(3): 476-482.
- [14] THAPA R, MIRSKY S B, TULLY K L. Cover crops reduce nitrate leaching in agroecosystems: a global meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2018, 47(6): 1400-1411.
- [15] GAIMARO J, TIMLIN D, TULLY K. Comparison of cover crop monocultures and mixtures for suppressing nitrogen leaching losses[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107348.
- [16] ANTOINE C, LIONEL A, HELENE T, et al. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 254: 50-59.
- [17] NOURI A, LUKAS S, SINGH S, et al. When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28: 4736-4749.
- [18] ZHAO X, CHRISTIANSON L E, HARMEL D, et al. Assessment of drainage nitrogen losses on a yield-scaled basis[J]. *Field Crops Research*, 2016, 199: 156-166.
- [19] 刘卫玲, 程思贤, 李娜, 等. 深松(耕)时期与方式对砂姜黑土耕层养分和冬小麦、夏玉米产量的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(3): 8-16. LIU W L, CHENG S X, LI N, et al. Effects of time and pattern of deep tillage on topsoil nutrient content, yield of winter wheat and summer maize in lime concretion black soil[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(3): 8-16.
- [20] 赵允格, 邵明安. 模拟降雨条件下成垄压实对硝态氮迁移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 45-49. ZHAO Y G, SHAO M A. Study on nitrogen movement under localized compaction and ridge tillage by use of artificial rainfall[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 45-49.
- [21] PARVIN N, COUCHENEY E, GREN M, et al. On the relationships between the size of agricultural machinery, soil quality and net revenues for farmers and society[J]. *Soil Security*, 2022, 6: 100044.
- [22] ZHANG Z B, YAN L, WANG Y K, et al. Bio-tillage improves soil physical properties and maize growth in a compacted Vertisol by cov-

- er crops[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(2): 324–337.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 49–56. LU R K. Analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 49–56.
- [24] 秦艳青, 李春俭, 赵正雄, 等. 不同供氮方式和施氮量对烤烟生长和氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 436–442. QIN Y Q, LI C J, ZHAO Z X, et al. Effects of rates and methods of N application on growth and N uptake of flue-cured tobacco[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 436–442.
- [25] LAPIERRE J, MACHADO P V F, DEBRUYN Z, et al. Cover crop mixtures: a powerful strategy to reduce post-harvest surplus of soil nitrate and leaching[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 325: 107750.
- [26] BLESCH J, DRINKWATER L E. The impact of nitrogen source and crop rotation on nitrogen mass balances in the Mississippi River basin[J]. *Ecological Applications*, 2013, 23(5): 1017–1035.
- [27] 吉艳芝. 填闲作物阻控设施蔬菜土壤硝态氮累积和淋失的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2010. JI Y Z. Catch crop control soil nitrogen accumulation and leaching in greenhouse[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010.
- [28] 李青梅, 张玲玲, 刘红梅, 等. 覆盖作物多样性对猕猴桃园土壤微生物群落功能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 351–359. LI Q M, ZHANG L L, LIU H M, et al. Effects of cover crop diversity on soil microbial community functions in a kiwifruit orchard[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 351–359.
- [29] 左明雪, 孙杰, 徐如玉, 等. 丛枝菌根真菌与有机肥配施对甜玉米根际土壤氮素转化及氮循环微生物功能基因的影响[J]. 福建农业学报, 2020, 35(9): 1012–1025. ZUO M X, SUN J, XU R Y, et al. Effects of AMF and organic fertilizer on N-transformation and microbial N-cycling genes in rhizosphere soil of sweet corn field[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35(9): 1012–1025.
- [30] MUHAMMAD I, WANG J, SAINJU U M, et al. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: a meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2021, 381: 114696.
- [31] ROMERO C M, ENGEL R, CHEN C, et al. Microbial immobilization of nitrogen-15 labelled ammonium and nitrate in an agricultural soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(2): 595–602.
- [32] 段玉, 张君, 景宇鹏, 等. 河套灌区麦后复种饲料油菜养分吸收规律及施肥效应[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(6): 848–854. DUAN Y, ZHANG J, JING Y P, et al. NPK absorption, fertilizing effect of wheat/silage rape multiple cropping in Hetao irrigation area[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(6): 848–854.
- [33] 段淑辉, 李帆, 钟越峰, 等. 填闲作物对植烟土壤残留氮素累积利用的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(8): 1308–1312. DUAN S H, LI F, ZHONG Y F, et al. Effects of catch crops on residual nitrogen utilization of tobacco-planted soil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2013, 44(8): 1308–1312.
- [34] 王静, 刘晓静, 郝凤, 等. 不同氮效率紫花苜蓿各生育期氮利用特征研究[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2461–2469. WANG J, LIU X J, HAO F, et al. Study on nitrogen utilization characteristics of alfalfa with different nitrogen efficiency in different growth periods[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(11): 2461–2469.
- [35] TRIBOUILLOIS H, COHAN J P, JUSTES E. Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling[J]. *Plant and Soil*, 2016, 401(1): 347–364.
- [36] WANG F, WEIL R R. The form and vertical distribution of soil nitrogen as affected by forage radish cover crop and residual side-dressed N fertilizer[J]. *Soil Science*, 2018, 183(1): 22–33.
- [37] 夏梦洁, 马乐乐, 师倩云, 等. 黄土高原旱地夏季休闲期土壤硝态氮淋溶与降水年型间的关系[J]. 中国农业科学, 2018, 51(8): 1537–1546. XIA M J, MA L L, SHI Q Y, et al. The relationship of NO_3^- -N leaching and rainfall types during summer fallow in the loess plateau dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(8): 1537–1546.
- [38] YI J, HU W, BEARE M, et al. Treading compaction during winter grazing can increase subsequent nitrate leaching by enhancing drainage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 221: 105424.
- [39] BRELAND T A, HANSEN S. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 655–663.