



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

黄土高原半干旱区尾菜高量埋压抑制土壤氮淋溶的研究

巴音, 张光全, 薛伟, 杜玉明, 李凤民

引用本文:

巴音, 张光全, 薛伟, 杜玉明, 李凤民. 黄土高原半干旱区尾菜高量埋压抑制土壤氮淋溶的研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 434–444.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0066>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土壤活性氮动态变化及氮素可利用性对紫云英翻压量的响应

程会丹, 鲁艳红, 聂军, 朱启东, 聂鑫, 曹卫东, 高雅洁, 廖育林

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 448–456 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0250>

氮肥施用对四川紫色土矿质态氮淋失特征及春玉米产量的影响

刘明鹏, 徐开未, 肖华, 陈晓辉, 彭丹丹, 卢俊宇, 陈远学

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 88–98 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0655>

秸秆还田深度对春玉米农田土壤有机碳、氮含量和土壤酶活性的影响

王峥宇, 廉宏利, 孙悦, 马梓淇, 田平, 齐华, 姜英

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 636–646 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0378>

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 545–555 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

长期不同培肥对苏打盐碱地稻田土壤盐碱指标和养分含量的影响

肖扬, 黄立华, 杨易, 黄金鑫, 刘伯顺, 杨靖民

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 126–134 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0032>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

巴音, 张光全, 薛伟, 等. 黄土高原半干旱区尾菜高量埋压抑制土壤氮淋溶的研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 434–444.

BA Y, ZHANG G Q, XUE W, et al. Investigation on nitrogen leaching control in the semi-arid area of Loess Plateau restrained by surface soil covering and massive burying of vegetable waste[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 434–444.

黄土高原半干旱区尾菜高量埋压抑制土壤氮淋溶的研究

巴音¹, 张光全², 薛伟^{1,3}, 杜玉明⁴, 李凤民^{1*}

(1. 兰州大学生态学院/干旱农业生态研究所, 兰州 730000; 2. 榆中县农业技术推广中心, 甘肃 榆中 730100; 3. 甘肃榆中金羊自然生态农场, 兰州 730000; 4. 内蒙古自治区环境监测总站乌海分站, 内蒙古 乌海 016000)

摘要:为明确尾菜高量埋压带来的土壤氮淋溶风险,本研究设计了不同尾菜埋压厚度和表层覆土厚度的组合试验,分析不同土层水分和无机氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)时空变化特征。结果表明:埋压尾菜厚度0.2~0.6 m、表层覆土厚度0.1~0.3 m时,试验前10 d,表层土壤水分快速增加,较对照提高了40%~110%,尾菜向深层土壤补水深度最大为1.6 m;试验开始土壤无机氮以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 增加为主,下移深度仅为0.6 m,试验第83天时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 快速积累,最大下移深度为0.8 m,土壤无机氮主要集中于耕作层,尾菜层上、下0.1 m土壤无机氮含量是当地高产玉米农田的1.0~3.5倍。当尾菜埋压厚度达到3.0 m、表层覆0.4 m黄土时,尾菜向深层土壤补水深度为5.0 m, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 下移深度为1.5 m,试验第194天时 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 增加不显著,与对照无显著差异,尾菜层上、下0.1 m土壤无机氮含量是当地高产玉米农田的3.5~4.2倍。研究表明在黄土高原半干旱地区,采用覆土埋压法将尾菜高量还田可以显著增加土壤水分和无机氮固存量,尾菜厚度、表面覆土厚度与土壤水分、土壤无机氮累积量和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈正相关,与土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈负相关,无机氮并未随土壤水分向深层土壤淋溶。

关键词:尾菜;高量埋压;土壤水分; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; $\text{NO}_3^-\text{-N}$;氮淋溶

中图分类号:X71

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)02-0434-11

doi: 10.13254/j.jare.2022.0066

Investigation on nitrogen leaching control in the semi-arid area of Loess Plateau restrained by surface soil covering and massive burying of vegetable waste

BA Yin¹, ZHANG Guangquan², XUE Wei^{1,3}, DU Yuming⁴, LI Fengmin^{1*}

(1. Institute of Arid Agricultural Ecology, Department of Ecology and Environmental Science, College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Yuzhong Agricultural Technology Distribution Center, Yuzhong 730100, China; 3. Jinyang Natural Ecological Farm of Yuzhong, Gansu, Lanzhou 730000, China; 4. Wuhai Substation of General Environmental Monitoring Station of Inner Mongolia Autonomous Region, Wuhai 016000, China)

Abstract: In order to ascertain the probability of nitrogen leaching ensuing in a field, subsequent to the incorporation of massive vegetable waste, a test design incorporating both the parameter for thicknesses of the buried vegetable waste and surface-soil covering was constructed to analyze the temporal variation characteristics of soil moisture and inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$) at different soil depths. When the thickness of the buried vegetable waste and surface-soil covering was 0.2–0.6 m and 0.1–0.3 m, respectively, the moisture of the soil surface increased rapidly in the first 10 days, which was 40%–110% higher than the control. The maximum depth at which the buried vegetable waste improved the soil moisture was found to be 1.6 m. At the beginning of the test, the soil inorganic nitrogen was mainly increased by $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and the downward movement depth was only 0.6 m. On the 83rd day after the test, rapid accumulation of

收稿日期:2022-02-15 录用日期:2022-05-09

作者简介:巴音(1983—),男,内蒙古达拉特旗人,博士研究生,研究方向为农业生态。E-mail:1239027353@qq.com

张光全与巴音同等贡献

*通信作者:李凤民 E-mail:fmli@lzu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(32001129);甘肃省农业生态环境保护专项新技术(新设备)研发推广项目(RWS-NYSTZZ202102)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (32001129); Research and Promotion Project of Special New Technology (New Equipment) for Agricultural Ecological Environment Protection in Gansu Province(RWS-NYSTZZ202102)

NO_3^- -N was observed, with a maximum downward movement depth of 0.8 m. The soil inorganic nitrogen was mainly distributed within the tillage depth, and its content level was 1.0–3.5 times higher than that of a high-yield maize field. When the thickness of the buried vegetable waste reached 3.0 m and the surface layer was covered with 0.4 m thick loess, the vegetable waste replenished water in the soil to 5.0 m depth, and NH_4^+ -N moved down to a depth of 1.5 m. Furthermore, the increase of NO_3^- -N was insignificant when compared with that of the control on the 194th day after the test. The fertilizer efficiency level of soil inorganic nitrogen was 3.5–4.2 times that of a high-yield maize farmland. In the semi-arid Loess Plateau, the incorporation of massive vegetable waste in the field by surface-soil covering and buried pressure method can significantly increase the content of soil moisture and inorganic nitrogen. The thickness of vegetable waste and surface-soil covering are positively correlated with soil moisture, soil inorganic nitrogen accumulation, and NH_4^+ -N content, while negatively correlated with NO_3^- -N. The inorganic nitrogen does not leach into the deep soil with infiltrating soil water.

Keywords: vegetable waste; massive burying; soil moisture; NH_4^+ -N; NO_3^- -N; nitrogen leaching

根据联合国粮农组织(FAO)统计,蔬菜在收获、贮存、加工(含包装)和运输过程中产生的蔬菜废弃物(即尾菜)比例分别为15%、8%、25%和17%,蔬菜商品损失率超过30%^[1-2]。尾菜现已成为我国第四大类农业废弃物,占全国种植业废弃物总量的9.1%^[3]。甘肃是我国高原夏菜主产区和最大的“北菜南运、西菜东调”集散中心,2018年其尾菜产生量高达 1.089×10^7 t,流通环节尾菜产生量约 6.00×10^6 t^[4]。尾菜具有产生量大、含水量高、极易腐烂、资源密度和能量密度较低等特点,工厂化处理成本较高^[5],致使大部分尾菜被当作垃圾随意丢弃或堆弃到环境中,易给空气、水体和人居环境带来严重污染^[6-7]。在过去的10余年,甘肃对现有尾菜处理技术进行了全面改进、创新,虽然提出了饲料化、肥料化、基料化、原料化和能源化等各种利用技术方案^[7-8],但是截至2021年,全省尾菜资源化综合利用率不足46%。因此,探索低成本、高效率尾菜资源化利用途径,对于解决高原夏菜产生的尾菜污染及促进蔬菜产业高质量发展意义重大。

高原夏菜主要种植在海拔1 500~3 300 m黄土覆盖的丘陵和盆地^[9],由于该地区常年干旱少雨(年均降雨量小于400 mm)且土壤贫瘠(有机质含量低于1%)^[10],土壤生产力低而不稳,导致大量土地闲置、撂荒。尾菜一般含水率在90%左右,以干基质计算,N、P、K平均含量分别达到3.50%、0.54%、3.12%,有机质平均含量在80%以上,其营养成分与常用的天然有机肥料相当^[11-12],资源化利用潜力巨大。为了将尾菜养分最大限度封存于土壤,采用覆土埋压法将尾菜高量返还低质农田,既可增加土壤水分、培肥地力,又能解决环境污染问题。已有研究表明尾菜一般不含有毒有害物质^[13],直接还田可以显著提高土壤肥力^[14],实现作物增产^[15-16],而且比沤肥还田排放更少的温室气体^[17]。同时尾菜还田处理成本较低,操作简单,便

于基层人员推广实施,是黄土高原半干旱地区尾菜污染治理和资源化利用的理想备选方案。

针对黄土高原地区旱作农田不同施肥和覆盖处理的试验表明,土壤水分运移能显著影响 NO_3^- -N在土壤剖面的分布^[18]。大量粮食作物秸秆还田研究结果显示,通常20份以上的碳才能固定一份氮($m_c/m_N \geq 20$)^[19],C/N较高的大田作物秸秆(>40)还田表现出较强的土壤固氮能力,可以减小氮淋溶风险^[20-22]。尾菜含水率高,C/N相对较小,一般介于6.7~22.4^[23],尾菜高量还田后会向土壤释放大量水分和无机氮(NH_4^+ -N和 NO_3^- -N),使土壤氮素过剩,增加深层土壤无机氮含量,进而增加氮淋溶风险。但也有研究报道,在黄土高原半干旱地区以C/N(22.2)较高的甘蓝尾菜为研究对象,还田量为 $37.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,0.6 m深土壤无机氮含量减少,土壤氮淋溶风险降低^[24]。尾菜的C/N与尾菜类型有关,其中茎叶类尾菜C/N较小,通常小于10,在黄土高原半干旱地区,将茎叶类尾菜高量还田是否会发生土壤氮淋溶情况尚不清楚。本研究分析黄土高原地区土壤水分和无机氮时空变化规律,探讨茎叶类尾菜高量埋压、还田对土壤氮淋溶风险的影响,旨在为培肥土壤、提高作物产量、实现尾菜资源化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地区概况

试验地位于甘肃省“高原夏菜”最大的主产区及蔬菜集散地榆中县,是典型的黄土高原半干旱区,属温带大陆性气候,年平均气温6.6℃,年极端最高气温35.8℃,年极端最低气温-27.2℃,无霜期100~140 d。全年降水量300~400 mm,降雨不均衡,冬春干旱,约60%的降雨集中在7—9月,年均潜在蒸散发量1 343.1 mm。试验区土壤类型为黑麻土(Calcic Kastanozem,

FAO Taxonomy and Ustorthents, USDA Taxonomy), 包括37%黏粒(Clay, <0.002 mm), 59%粉粒(Silt, 0.002~0.05 mm)以及4%砂粒(Sand, 0.05~2 mm)。土壤有机碳含量3.6~9.7 g·kg⁻¹, pH 8.4~8.8, 容重为1.22~1.33 g·cm⁻³。标准小区试验在榆中县中连川乡中连川村甘肃省旱地农业生态野外科学观测研究站(104°26′49″E, 36°02′27″N, 海拔2 318 m)开展, 中型试验在榆中县金崖镇金崖村(104°06′10″E, 35°00′41″N, 海拔1 938 m)开展。

1.2 试验设计

2020年7月—2021年9月开展标准小区试验, 选取0.2 hm²撂荒地, 设置3个尾菜厚度和3个覆土厚度处理组合, 尾菜厚度分别为0.2 m(C1)、0.4 m(C2)和0.6 m(C3), 覆土厚度分别为0.1 m(T1)、0.2 m(T2)和0.3 m(T3), 同时设置全土(QT)和全菜(QC)0.6 m厚两个对照。每个处理3个重复, 共计33个试验小区, 每个小区面积为5 m×5 m, 采取完全随机区组设计。利用1辆小型挖掘机将撂荒地整理成0、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 m和0.9 m深度的方形小区, 四周筑垄防止雨水流入。2020年9月—2021年8月开展中型试验(ZX), 选取0.07 hm²荒地, 使用1辆挖掘机和1辆装载机平整场地, 四周修筑边墙, 截面为梯形(坝顶1.0 m×坝底4.0 m×高4.0 m), 由黄土夯实而成, 试验场设置3个分区, 设计埋压尾菜厚度3.0 m和表层覆土0.4 m, 同时设置全土对照。根据尾菜类型混匀装车, 称质量后直接运至试验场, 由挖掘机将尾菜均匀平铺在试验小区, 捡出尾菜中掺杂的包装袋、尼龙绳等, 然后表面覆盖黄土, 标准小区试验和中型试验分别在2 d和3 d内完成尾菜覆土埋压工作。尾菜主要由附近10 km范围内蔬菜冷鲜库当日产生, 包括娃娃菜(*Brassica pekinensis* R.)、花菜(*Brassica oleracea* var. *botrytis* Linnaeus)、芹菜(*Apium graveolens* L.)和茼蒿(*Lactuca sativa* L.)等。

各试验小区用土钻(钻头直径为0.05 m, 长度为0.2 m)随机选取3个重复, 每层土样均匀混合并过2.0 mm筛, 采集鲜土样。标准小区试验采样深度为尾菜层下1.6 m, 尾菜层上层和下层0.2 m以内每0.1 m采集1个样品, 其他均为0.2 m采集一个样品。中型试验采样范围为尾菜层上层覆土和下层10.0 m深, 上层每0.1 m采集一个土样, 尾菜层下层2.0 m以内每0.5 m采集一个土样, 2.0 m以下每1.0 m采集1个土样。标准小区试验土壤无机碳(NH₄⁺-N和NO₃⁻-N)在试验开始时测定背景值, 然后在第1个月内平均每

10 d采集一次土壤样品, 最后分别在2020年10月12日和2021年4月21日采样, 共采集6次土壤样品。中型试验分别在2020年9月28日、12月10日和2021年4月10日采集土壤样品, 共采集3次。土壤水分采样范围和时间与土壤样品采集时间对应一致, 根据降水量、土壤水分变化情况适当增加采样频次。

1.3 测定指标与方法

测定指标主要有无机氮(NH₄⁺-N和NO₃⁻-N)和土壤水分。称取20.0 g鲜土置于250 mL的塑料瓶中, 然后加入100 mL 0.5 mol·L⁻¹的K₂SO₄溶液, 置于摇床上200 r·min⁻¹振荡1 h, 然后将溶液过滤后冷冻保存于50 mL的离心管中, 最后使用流动分析仪(SAN++连续流动分析仪, 荷兰Skalar)测定土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量; 土壤水分采用铝盒烘干法测定。

土壤无机氮含量为土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量之和。标准小区和中型试验场土壤无机氮累积量计算分别采用试验第274天和第194天的土壤无机氮含量数据。尾菜处理的土壤无机氮净累积量为尾菜处理土壤无机氮累积量减去全土对照土壤无机氮累积量。土壤无机氮累积量按照以下公式计算^[25]:

$$M = \sum C_i \times B \times D_i \times 0.1 \quad (1)$$

式中: M 为单位面积的土壤无机氮累积量, t·m⁻²; C_i 为第 i 层土壤无机氮的含量, g·kg⁻¹; B 为土壤容重, g·cm⁻³, 取试验地2.0 m深均值, 为1.2 g·cm⁻³; D_i 为第 i 层土壤厚度, cm, 标准小区试验土壤无机氮累积量计算深度为尾菜层下层1.6 m, 中型试验场土壤无机氮累积量计算深度为尾菜层下层5.0 m。

1.4 数据处理

本研究中, 数据处理使用Microsoft Excel 2003、SPSS 26软件, 图表制作使用Origin 2017。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面水分时空变化

由图1可以看出, 在标准小区试验开始时, 覆土厚度为0.1 m(T1)的尾菜处理组(C1、C2、C3)土壤剖面水分与对照QT基本一致。第10天时, 不同处理土壤剖面水分达到了最大值, 为16%~22%, 较对照QT提高40%~110%, 剖面水分随着尾菜厚度的增加而增加, 补水深度达到1.6 m时, 土壤剖面水分平均增加了25%。在试验的第20天时, 土壤剖面水分没有明显变化。第32天时, 受降雨影响, 尾菜处理组和对照QT处理的土壤剖面水分分布出现了差异, 尾菜层上层土壤水分均增加了10%左右, 土壤水分在25%以

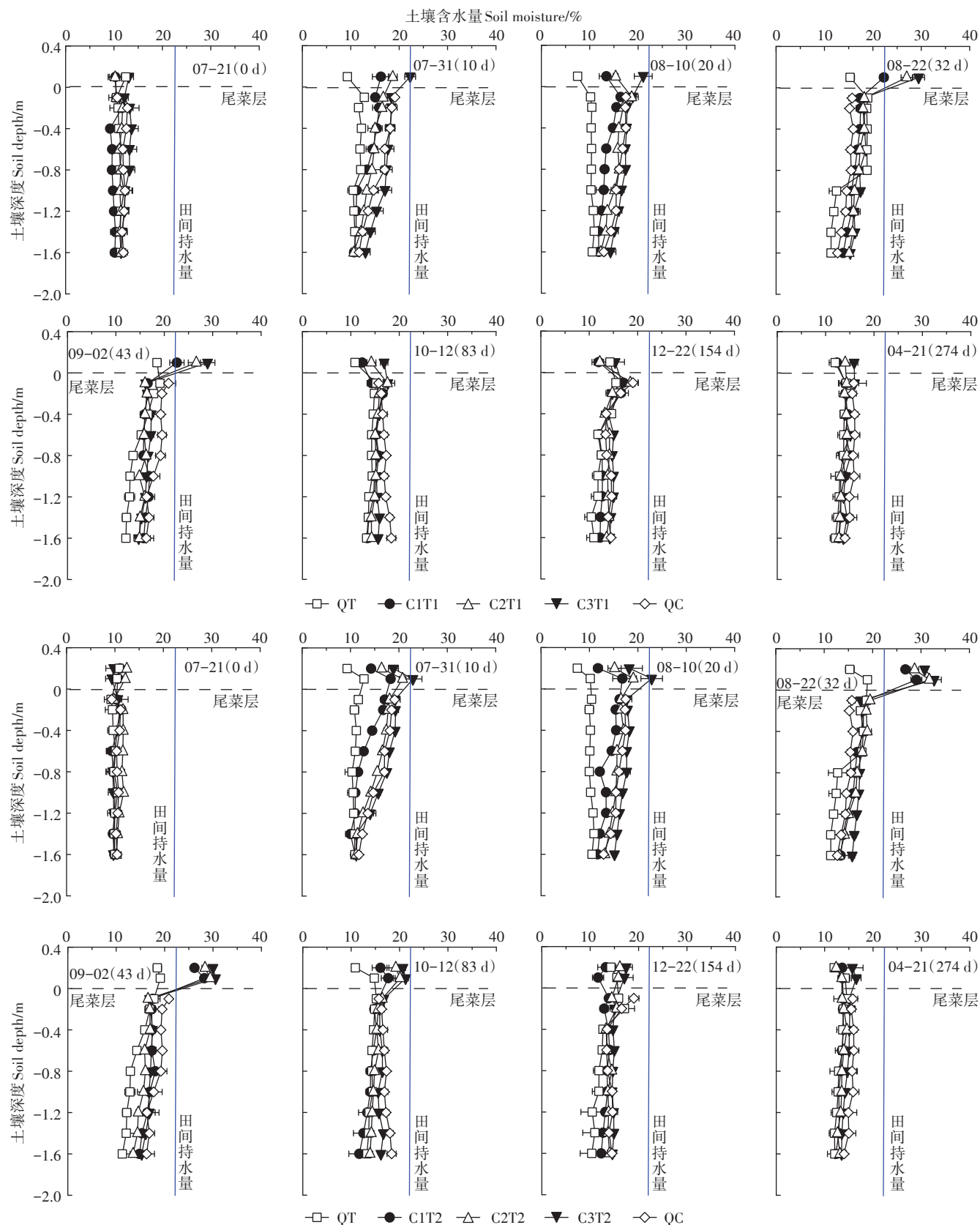
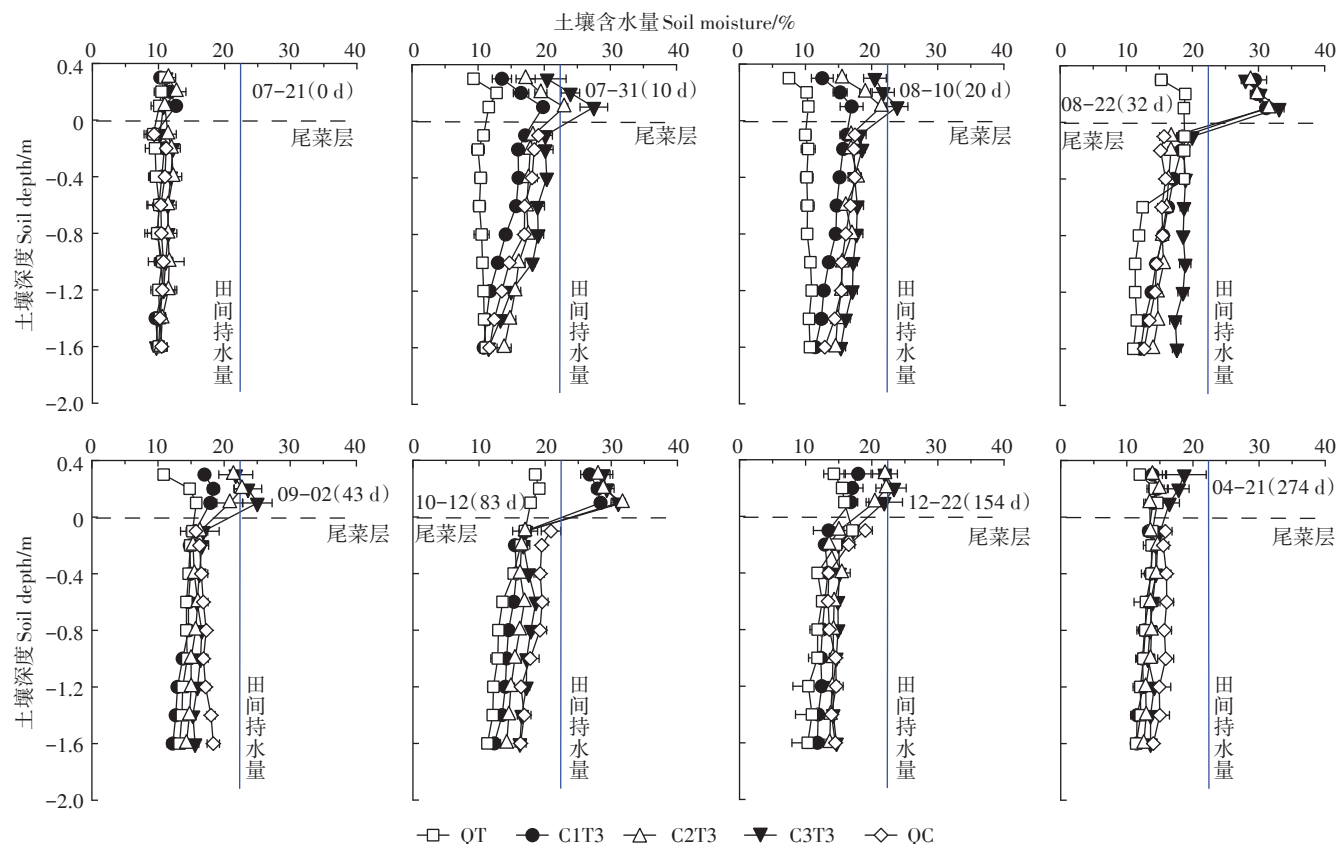


图1 标准小区试验尾菜层(C1-0.2 m、C2-0.4 m、C3-0.6 m)上层(T1-0.1 m、T2-0.2 m、T3-0.3 m)和下层(1.6 m)土壤水分时空变化

Figure 1 Space-time changes of soil moisture in topsoil (T1-0.1 m, T2-0.2 m, T3-0.3 m) and subsoil (1.6 m) of vegetable waste layer (C1-0.2 m, C2-0.4 m, C3-0.6 m) in the plot test



续图1 标准小区试验尾菜层(C1-0.2 m、C2-0.4 m、C3-0.6 m)上层(T1-0.1 m、T2-0.2 m、T3-0.3 m)和下层(1.6 m)土壤水分时空变化

Continued figure 1 Space-time changes of soil moisture in topsoil(T1-0.1 m,T2-0.2 m,T3-0.3 m) and subsoil(1.6 m) of vegetable waste layer(C1-0.2 m,C2-0.4 m,C3-0.6 m) in the plot test

上,高于土壤田间持水量(22.2%)和对照QT土壤水分(18.5%),而尾菜层下层土壤剖面水分无明显变化。当试验进行至第43天后,除了对照QC处理土壤剖面水分有所增加外,其他处理土壤剖面水分开始减少。覆土厚度为0.2 m(T2)和0.3 m(T3)时,尾菜处理组土壤剖面水分时空变化规律与覆土厚度0.1 m(T1)基本一致,但是随着覆土厚度增加,土壤剖面水平平均增加了8%。由图2可以看出,在试验开始后3~51 d,试验场内出现积水,第73天时,表面积水基本消退,第238天时,尾菜层上层土壤含水量仍高于田间持水量(21.9%),下层土壤含水量虽然有所增加,但是一直低于田间持水量,尾菜补水深度最大达到尾菜层下层土壤5.0 m处。覆土埋压法高量还田尾菜会显著增加土壤水分,主要发生在试验开始前期(12±3) d内,土壤水分增加量和补水深度与埋压尾菜厚度呈正相关,同时覆土埋压尾菜可以提高覆土表层土壤持水能力。

2.2 土壤剖面无机氮时间变化

如图3a所示,表层覆土厚度为0.1 m(T1)时,随

时间推移,尾菜处理组(C1、C2、C3)尾菜层上层和下层0.1 m土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈先升高后降低趋势,峰值出现在试验第32天。随着尾菜埋压厚度的增加,其上、下层0.1 m土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量也同时增加,上层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量低于下层。从图3c和图3e可知,随着覆土厚度增加,尾菜层上层和下层0.1 m土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有所增加,其峰值出现时间延迟,C2处理组(T1、T2、T3)尾菜层上层和下层0.1 m土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量峰值出现在第83天,C3处理组(T1、T2、T3)出现在第274天及以后。如图3b所示,在试验开始第10天,覆土0.1 m(T1)尾菜处理组(C1、C2、C3)尾菜层上层和下层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均较低,与对照QT无显著差异,第83天时,尾菜层上、下层0.1 m土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量有明显增加趋势,上层0.1 m土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显高于下层,含量随着尾菜埋压厚度的增加而减少。如图3d和图3f所示,覆土0.2 m(T2)、0.3 m(T3)与覆土0.1 m(T1)土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化规律相同,覆土厚度与尾菜层上、下层0.1 m土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈负相关。如图4所示,当埋压尾菜厚度达到3.0 m、覆土厚度增加至0.4 m、

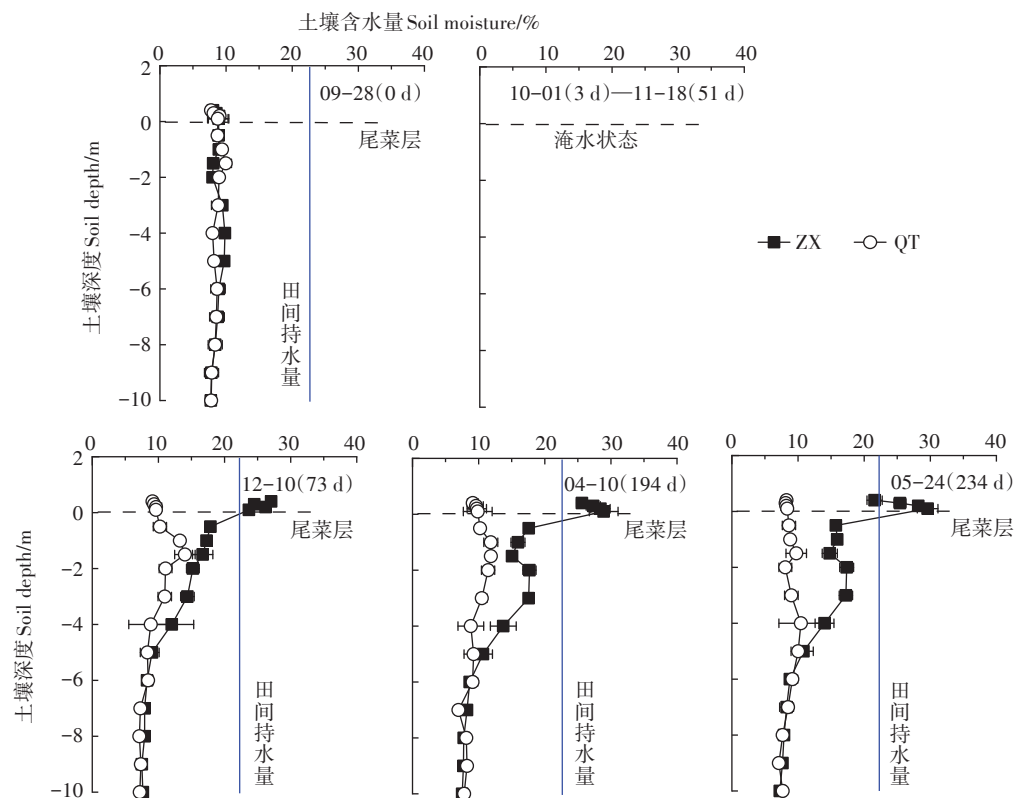


图2 中型试验尾菜层(3.0 m)上层(0.4 m)和下层(10.0 m)土壤水分时空变化

Figure 2 Space-time changes of soil moisture in topsoil(0.4 m) and subsoil(10.0 m) of vegetable waste layer(3.0 m) in the middle scale test

试验进行至第194天时,土壤无机氮仍以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 增加为主, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 无明显变化。高量尾菜埋压还田可以明显提高尾菜层上层和下层土壤无机氮含量,前期83 d内以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 增加为主,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与尾菜厚度和覆土厚度呈正相关,上层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量低于下层。土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量增加主要发生在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值以后,土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量与尾菜埋压厚度和覆土厚度呈负相关,表层土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量大于深层。

2.3 土壤剖面无机氮空间变化

从图5a和图5b可以看出,在标准小区试验进行至第274天时,尾菜埋压厚度为0.2 m(C1)处理组(T1、T2、T3)的土壤剖面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要集中分布在尾菜层下层土壤0.4 m以内,尾菜埋压厚度为0.4 m(C2)处理组(T1、T2、T3)和0.6 m(C3)处理组(T1、T2、T3)的土壤剖面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要集中分布在尾菜层下层土壤0.8 m以内。尾菜埋压厚度为0.2 m和0.4 m处理组土壤剖面 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 主要分布在尾菜层以下0.6 m内,尾菜厚度为0.6 m处理组土壤剖面 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 主要分布在0.4 m以内。表层覆土厚度未对土壤剖面无机氮分布深度产生明显影响。从图5c和图5d可以看出,尾菜埋

压厚度达到3.0 m、覆土厚度为0.4 m、在试验第194天时,其土壤剖面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 入渗深度主要集中在尾菜层下层1.5 m深, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量垂直分布与对照差别不大。土壤剖面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分布深度与埋压尾菜厚度呈正相关, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 分布深度与埋压尾菜厚度呈负相关,土壤剖面无机氮分布深度与表层覆土厚度无显著相关。

2.4 土壤无机氮累积量的变化

如图6a所示,当尾菜埋压厚度为0.2~0.6 m、覆土厚度为0.1~0.3 m和尾菜埋压厚度为3.0 m、覆土厚度为0.4 m时,土壤无机氮净累积量随埋压尾菜厚度和覆土厚度增大而增加。埋压尾菜厚度为0.2 m(C1),覆土厚度为0.1(T1)、0.2 m(T2)和0.3 m(T3)时,土壤无机氮净累积量分别为 0.56 、 0.73 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.86 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。埋压尾菜厚度为0.4 m(C2),覆土厚度为0.1(T1)、0.2 m(T2)和0.3 m(T3)时,土壤无机氮净累积量分别为 0.94 、 1.16 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 1.33 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;埋压尾菜厚度为0.6 m(C3),覆土厚度为0.1(T1)、0.2 m(T2)和0.3 m(T3)时,土壤无机氮净累积量分别为 1.25 、 1.81 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 2.29 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。中型试验场(ZX)尾菜埋压厚度为3.0 m、覆土厚度为0.4 m时,土壤无机氮净累积量为

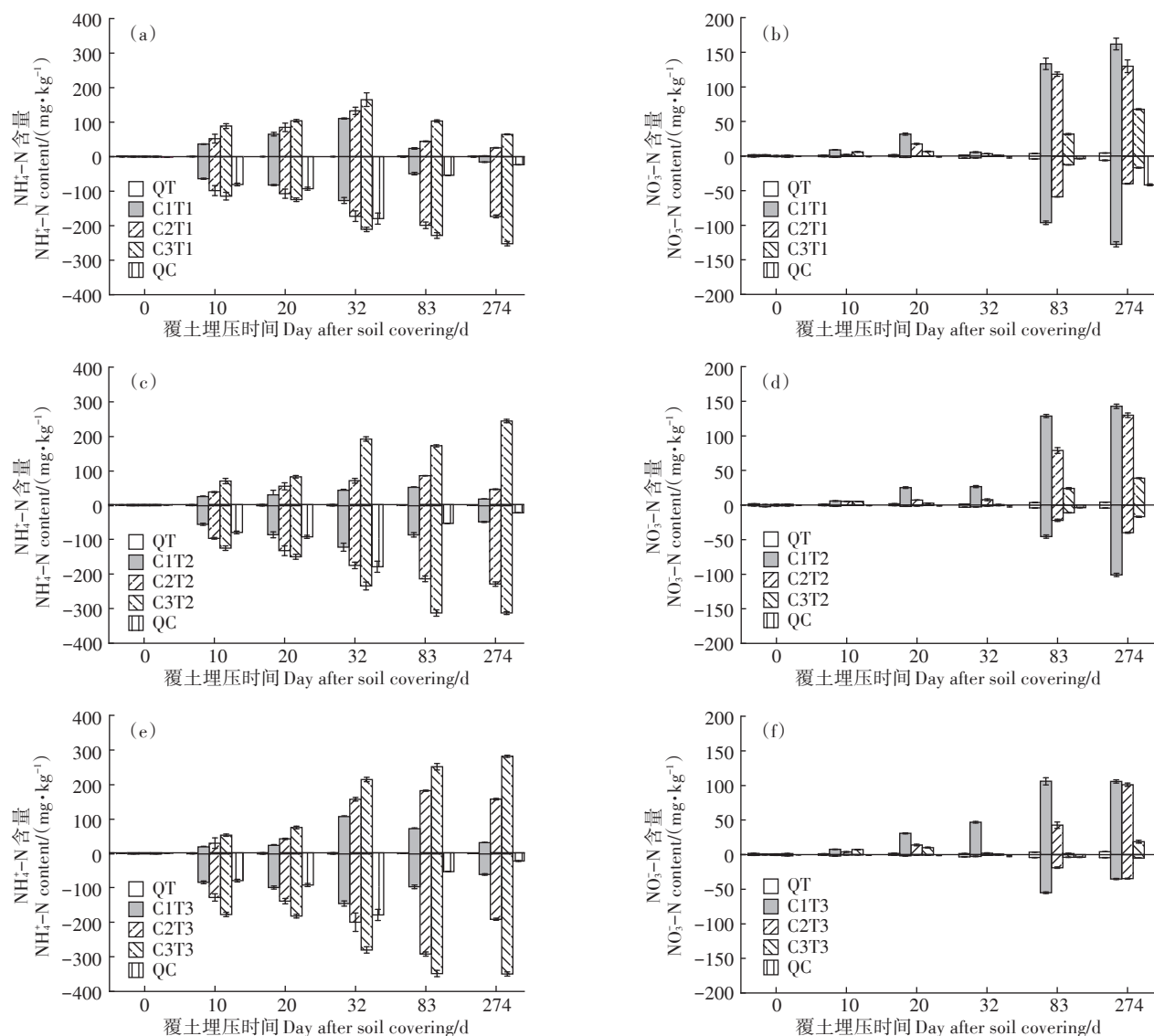


图3 标准小区试验尾菜层(C1-0.2 m、C2-0.4 m和C3-0.6 m)上层和下层0.1 m土壤无机氮(NO_3^- -N和 NH_4^+ -N)含量时间变化

Figure 3 Time changes of inorganic nitrogen (NO_3^- -N and NH_4^+ -N) content in upper and lower 0.1 m of vegetable waste layer (C1-0.2 m, C2-0.4 m, and C3-0.6 m) in the plot test

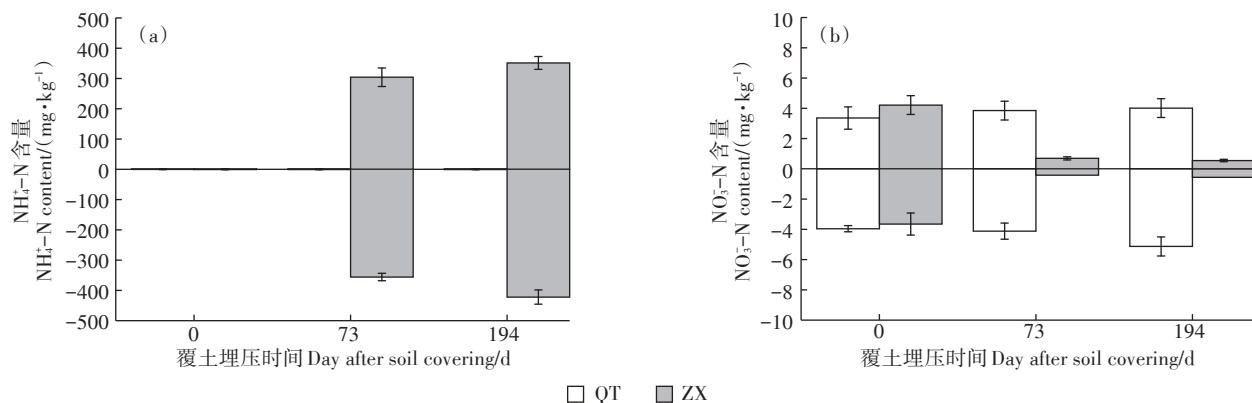
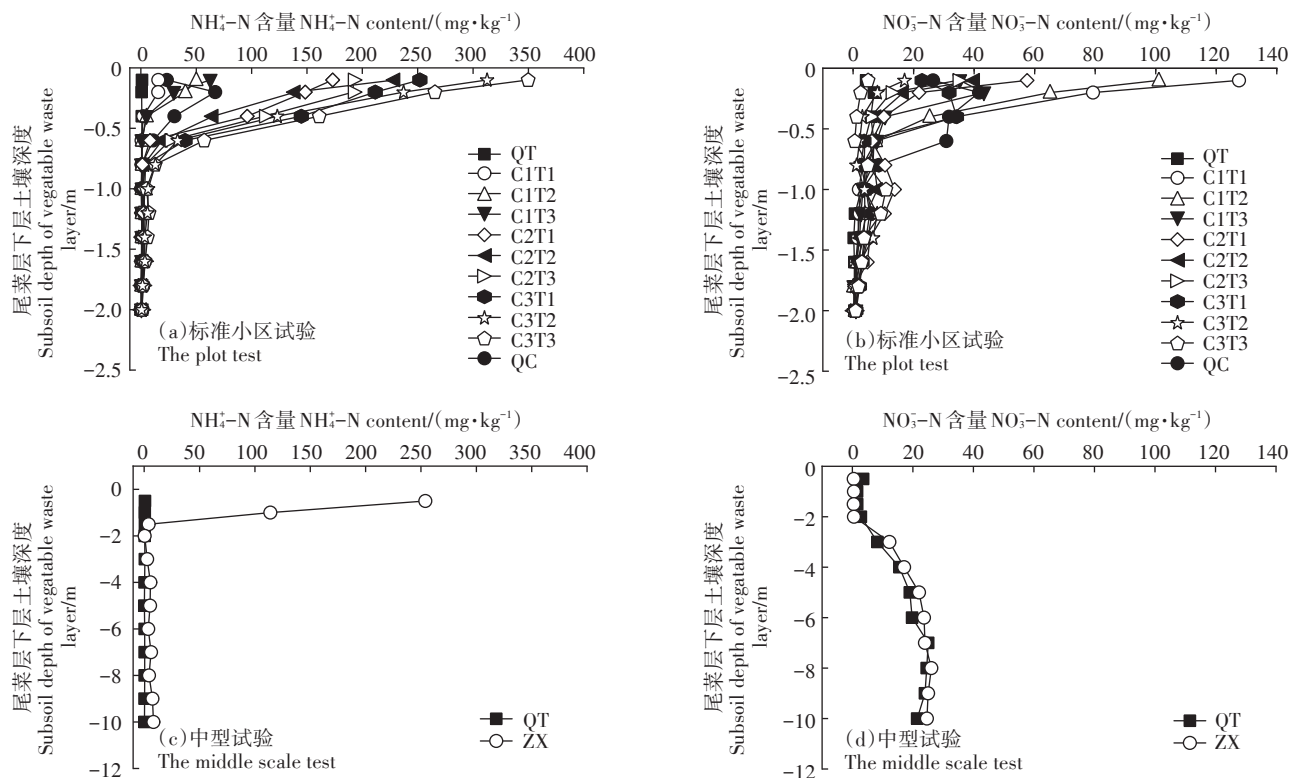
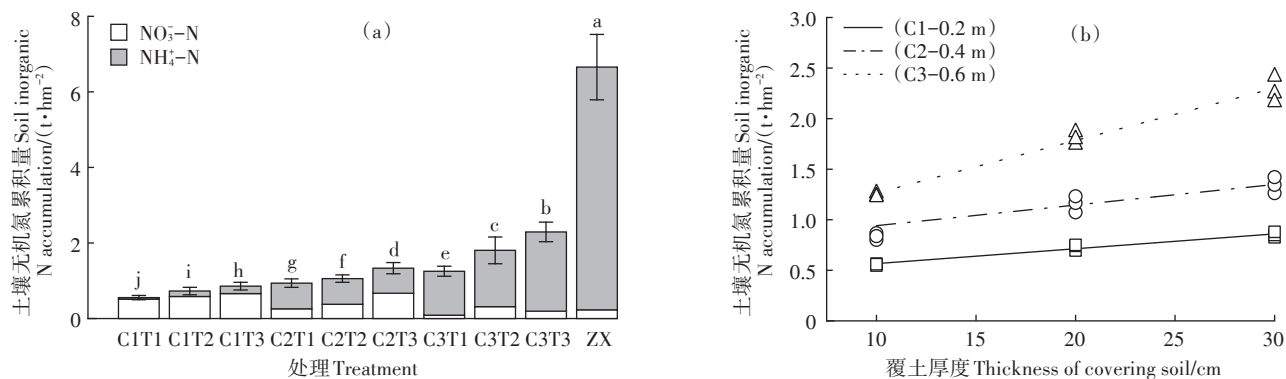


图4 中型试验尾菜层上层和下层0.1 m土壤无机氮(NO_3^- -N和 NH_4^+ -N)含量时间变化

Figure 4 Time changes of inorganic nitrogen (NO_3^- -N and NH_4^+ -N) content in the upper and lower soil layers 0.1 m of the vegetable waste layer in the middle scale test

图5 尾菜层下层土壤无机氮($\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$)空间分布Figure 5 Spatial distribution of inorganic nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$) in beneath the vegetable waste layer图6 土壤无机氮($\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$)累积量(a)及其与覆土厚度线性拟合(b)Figure 6 Cumulative amount of soil inorganic nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$)(a) and its linear fitting with thicknesses of covering soil(b)

6.45 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。土壤无机氮净累积量与覆土厚度呈显著正相关($r=0.78, P<0.05$)(图6b)。

3 讨论

3.1 尾菜高量还田对土壤水分时空变化的影响

试验结果显示,埋压尾菜厚度0.2~0.6 m、覆土厚度0.1~0.3 m时,尾菜层上层和下层土壤含水量在试验开始10 d内快速增加,随后受土壤蒸发作用影响开始降低。由于尾菜含水率较高、C/N较低、糖类和半

纤维素等可溶性碳水化合物含量较高,尾菜高量还田后可以在几日内完成碳水化合物、蛋白质和脂肪水解,释放大量水分^[26]。尾菜埋压厚度与土壤水分呈正相关,随着尾菜和覆土厚度的增加,尾菜层上层土壤水分增加明显大于下层,甚至远高于田间持水量,而下层土壤含水量小于田间持水量。当尾菜厚度达到3.0 m、覆土厚度为0.4 m时,试验开始第3天试验场表面产生积水现象,第12天时积水量达到最大,尾菜层上层土壤水分超出饱和含水量,而下层土壤含水量虽

有所增加,但均低于田间持水量。这可能主要是由于尾菜覆土埋压后,尾菜层使其上、下层土壤毛管作用受阻,形成了毛管阻滞型覆盖层和阻隔层,明显提高了尾菜层上层土壤持水能力^[27],其持水能力远高于单层土的田间持水量,甚至可以超出土壤饱和含水量,进而减少水分下渗风险^[28]。尤其在试验第32天,受降雨影响,这一现象更为突出。覆土埋压尾菜对其下层土壤补水深度和补水量非常有限,埋压尾菜厚度0.2~0.6 m和3.0 m时,补水深度分别可以达到1.6 m和5.0 m,土壤最大含水量分别为19.5%和16.7%。甘肃榆中县大气潜在蒸发量为1 343.1 mm,多年平均降水量为300~400 mm,潜在蒸发量远高于多年的平均降水量,土壤水分长期处于亏缺状态,具有较大蓄水空间。黄土高原土层厚度一般为50~150 m,地下水埋藏较深,无上行补给的可能^[29]。在黄土高原半干旱地区,尾菜高量还田提高了上层土壤蓄水能力,有助于减少水分下渗,可避免降水和尾菜释放水分向深层土壤渗漏问题。

3.2 尾菜高量还田对土壤无机氮含量时间变化的影响

研究表明,在微生物的作用下,尾菜覆土埋压后,首先矿化出 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可以进一步被硝化为 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ ^[30]。土壤胶体普遍带负电荷,虽然阳离子 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容易被土壤吸附固定,但土壤吸附容量有限,当吸附达到饱和后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 也会向深层土壤淋溶迁移,甚至可进入地下水。细砂粒和粉粒占优势的黄绵土撂荒地,土壤有机质含量较低,有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附,研究发现黄土台塬土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最大吸附容量为 $862.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[31],而在试验期间,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最大值为 $419.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。负离子 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 难以被土壤颗粒吸附,是土壤氮素最活跃的形态,是氮淋溶的主要方式。土壤硝化作用较强的黄土高原地区有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 转化^[32], $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 易随水迁移,受土壤水分运动和变化影响较大。土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的淋溶损失必须具备两个条件:一是土壤中有累积的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 可供淋失;二是要有 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 迁移载体的下渗水分。埋压尾菜厚度0.2~0.6 m、覆土厚度0.1~0.3 m时,在试验前10 d土壤剖面水分以增加为主,在试验进行至第83天时,土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量有所增加,但此时土壤剖面水分开始明显减少。尾菜埋压厚度为3.0 m、覆土厚度为0.4 m、试验进行至第194天时,土壤无机氮仍然以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主。在干旱少雨的半干旱黄土高原地区,尾菜覆土埋压后,当土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 转化、增加时,在大气蒸腾拉力作用下,土壤剖面水分开

始减少, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 随土壤水分向表层土壤累积,不会发生氮淋溶。

3.3 尾菜高量还田对土壤无机氮含量空间分布的影响

一般表层土壤硝化作用要强于深层土壤,表层土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 更容易转化为 $\text{NO}_3^+\text{-N}$,同时受土壤水分蒸发的影响, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 向表层土壤富集,因而尾菜层下层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于上层土壤,尾菜层下层土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量要远低于上层土壤。本试验结果进一步验证了在黄土高原地区甘蓝尾菜还田降低深层土壤无机氮含量、减少淋溶风险的结果^[24]。埋压尾菜厚度为0.2~0.6 m、覆土厚度为0.1~0.3 m时,尾菜补水深度可达到1.6 m,而在试验进行至第274天时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 在尾菜层下层土壤中的分布深度基本一致,主要集中于尾菜层下层土壤0.8 m范围内,表明尾菜覆土埋压后释放的无机氮并未随土壤水分下渗而发生淋溶。当尾菜埋压厚度达到3.0 m、覆土厚度0.4 m时,其土壤水分下渗深度最大为5.0 m,在试验进行至第194天时,尾菜层下层土壤无机氮主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 增加为主, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 入渗深度只有1.5 m,其下层土壤剖面 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量无变化,与埋压尾菜厚度0.2~0.6 m的试验结果相一致。在黄土高原半干旱地区,尾菜覆土埋压还田可以补充深层土壤水分,无机氮主要集中在浅层土壤,有利于后期玉米、小麦等浅根系作物根系吸收利用。

3.4 尾菜高量还田对土壤无机氮累积量的影响

土壤无机氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$)是植物可吸收和利用的主要氮源,对植物生长和作物产量具有极为重要的影响^[33]。不同厚度的尾菜覆土埋压后,在其降解矿化过程中会发生兼氧、厌氧和好氧微生物反应,进而显著影响土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的含量及比例。土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的累积量与尾菜埋压厚度和表面覆土厚度呈正相关。尾菜覆土、埋压会显著提高土壤无机氮含量,土壤无机氮净累积量与覆土厚度呈显著正相关($r=0.78, P<0.05$),埋压尾菜厚度对土壤无机氮净累积量的影响显著大于覆土厚度。黄土高原半干旱地区高产玉米农田土壤无机氮含量一般在 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右^[34-35],当埋压尾菜厚度为0.2、0.4 m和0.6 m、覆土厚度为0.1~0.3 m,其尾菜层上、下层0.1 m土壤无机氮含量分别为132.3~300.4、97.8~354.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是高产玉米农田土壤无机氮含量的1.0~3.5倍。当尾菜厚度达到3.0 m、覆土厚度为0.4 m时,尾菜层上、下层0.1 m土壤无机氮含量分别可达到351.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和422.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是高产玉米农田土壤无机氮含量的

3.5~4.2倍。从土壤无机氮净累积量来看,尾菜埋压厚度为0.2、0.4 m和0.6 m,覆土厚度为0.1~0.3 m时,尾菜覆土埋压分别相当于施入尿素 $1.2\sim 1.8$ 、 $2.0\sim 2.9$ $t\cdot hm^{-2}$ 和 $2.7\sim 4.9$ $t\cdot hm^{-2}$;尾菜埋压厚度3.0 m、表面覆土厚度0.4 m时,土壤无机氮净累积量等同于施尿素 13.3 $t\cdot hm^{-2}$ 。在黄土高原半干旱地区,尾菜高量还田有利于改善土壤缺N状况,可极大地减少工业氮肥投入。

4 结论

(1)覆土埋压尾菜可以显著提高土壤水分,尾菜层上层土壤含水量远大于下层,上层土壤水分甚至高于饱和含水量,尾菜覆土埋压显著提高了表层土壤持水能力,减少水分向深层土壤下渗,进而阻碍了无机氮向深层土壤淋溶。

(2)尾菜覆土埋压试验前期,土壤剖面水分大量增加,此时土壤无机氮以 NH_4^+-N 增加为主,土壤 NH_4^+-N 未随土壤水分向深层土壤下移。当土壤 NO_3^-N 开始增加时,土壤剖面水分开始减少,有效抑制了土壤 NO_3^-N 向深层土壤淋洗。

(3)在黄土高原半干旱地区,采用覆土埋压法进行尾菜高量还田可以大幅增加表层土壤无机氮固存量,是尾菜资源化利用和培肥地力的有效途径。

参考文献:

- [1] GUSTAVSSON J, CEDERBERG C, SONESSON U. Global food losses and food waste[J]. *Worlds Agriculture Forestry & Fisheries*, 2011.
- [2] 左壮. 蔬菜废弃物厌氧消化产酸特性及回流调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. ZUO Z. Anaerobic acidification of vegetable waste and recirculation control[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [3] 李金文, 沈根祥, 钱晓雍, 等. 蔬菜初级加工废弃物产生现状与实证分析——以上海市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(11): 87-91, 104. LI J W, SHEN G X, QIAN X Y, et al. Produce of vegetable waste during primary processing in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(11): 87-91, 104.
- [4] 甘肃省农业生态环境保护管理站. 深入推进尾菜处理利用 促进蔬菜产业健康发展[J]. 甘肃农业, 2019(4): 15-19. Gansu Agricultural Ecological Environment Protection Management Station. Further promote the treatment and utilization of vegetable waste and advance the healthy development of vegetable industry[J]. *Gansu Agriculture*, 2019(4): 15-19.
- [5] 薛颖昊, 徐志宇, 张明明, 等. 我国蔬菜秸秆无害化处理技术优化探讨[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(10): 75-83. XUE Y H, XU Z Y, ZHANG M M, et al. Discussion on optimization for harmless disposal technology of vegetable straw[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(10): 75-83.
- [6] SINGH A, KUILA A, ADAK S, et al. Utilization of vegetable wastes for bioenergy generation[J]. *Agricultural Research*, 2012, 1(3): 213-222.
- [7] SAHOO A, SARKAR S, LAL B, et al. Utilization of fruit and vegetable waste as an alternative feed resource for sustainable and eco-friendly sheep farming[J]. *Waste Management*, 2021, 128: 232-242.
- [8] 吴文辉, 朱为静, 朱凤香, 等. 蔬菜废弃物还田资源化利用潜力分析[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(10): 2018-2023. WU W H, ZHU W J, ZHU F X, et al. Potential analysis of resource utilization of vegetable waste[J]. *Journal Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(10): 2018-2023.
- [9] 高京印. 兰州市榆中盆地地球水化学特征与地温场分析[J]. 甘肃地质学报, 2000, 9(2): 43-49. GAO J Y. Hydrochemical features and geothermal field analysis of Yuzhong Basin, Lanzhou City[J]. *Acta Geologica Gansu*, 2000, 9(2): 43-49.
- [10] DENG H L, XIONG Y C, ZHANG H J, et al. Maize productivity and soil properties in the Loess Plateau in response to ridge-furrow cultivation with polyethylene and straw mulch[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 3090.
- [11] 马彦霞, 王晓巍, 张玉鑫, 等. 甘肃省尾菜资源化利用现状及对策[J]. 甘肃农业科技, 2017(6): 56-60. MA Y X, WANG X W, ZHANG Y X, et al. Current situation and countermeasures of vegetable waste utilization in Gansu[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2017(6): 56-60.
- [12] 魏程程, 王英琪, 杨宏志. 尾菜厌氧消化处理研究进展[J]. 农产品加, 2018, 10(19): 71-74. WEI C C, WANG Y Q, YANG H Z. Research progress of anaerobic digestion treatment of vegetable wastes[J]. *Farm Products Processing*, 2018, 10(19): 71-74.
- [13] 何宗均, 梁海恬, 李峰. 天津地区蔬菜种植废弃物产生情况初步调查[J]. 中国农学通报, 2017, 33(21): 33-37. HE Z J, LIANG H T, LI F. The quantity of vegetable waste in Tianjin: A preliminary investigation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(21): 33-37.
- [14] 吴文辉, 朱为静, 朱凤香, 等. 蔬菜废弃物还田量及配施菌剂对土壤腐殖质组成的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 182-192. WU W H, ZHU W J, ZHU F X, et al. Effects of returning varying amounts of vegetable waste to fields and combined application of decomposing agents on soil humus composition[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 182-192.
- [15] 吴文辉. 蔬菜废弃物不同还田方式对番茄生长及土壤环境的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. WU W H. The effect of different return ways of vegetable waste on tomato growth and soil environment[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [16] 刘银环. 尾菜直接还田试验模式初报[J]. 甘肃农业, 2020(7): 89-90. LIU Y H. Preliminary report on the experimental model of returning tail vegetables directly to the field[J]. *Gansu Agriculture*, 2020(7): 89-90.
- [17] 杨岩. 蔬菜废弃物堆肥和原位还田研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015. YANG Y. Compost and returning in situ of vegetable wastes[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2015.
- [18] DONG Q, DANG T H, GUO S L, et al. Effects of mulching measures on soil moisture and N leaching potential in a spring maize planting

- system in the southern Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213:803–808.
- [19] 雷宝坤, 刘宏斌, 陈安强, 等. 长期定位施肥对土壤的碳氮共济效应情景分析[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(10):1567–1573. LEI B K, LIU H B, CHEN A Q, et al. Scenario analysis on effects of long-term fertilization on soil carbon and nitrogen codependency[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10):1567–1573.
- [20] 盖霞普. 华北平原不同有机物料投入对农田碳氮协同转化及环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. GAI X P. Effects of input of different organic materials on co-transformation of carbon and nitrogen and environment in farmland in North China Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [21] JIN K, SLEUTEL S, NEVE S D, et al. Nitrogen and carbon mineralization of surface-applied and incorporated winter wheat and peanut residues[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2008, 44(4):661–665.
- [22] 李世清, 李生秀. 有机物料在维持土壤微生物体氮库中的作用[J]. *生态学报*, 2001, 21(1):136–142. LI S Q, LI S X. Effects of organic materials on maintaining soil microbial biomass nitrogen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1):136–142.
- [23] 莫舒颖. 蔬菜残株堆肥化利用技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009. MO S Y. Study on technique of vegetable residues compost[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [24] 胡国平. “高原夏菜”剩余物资源状况及其还田效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. HU G P. Vegetable residues resource and effect of waste vegetable return to field at plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [25] 张邦喜, 范成五, 李国学, 等. 氮肥运筹对黄壤坡耕地作物产量和土壤无机氮累积量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(1):1–9. ZHANG B X, FAN C W, LI G X, et al. Effects of nitrogen application regime on yield and residual nitrogen in yellow sloping soil[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2019(1):1–9.
- [26] SCHROYEN M, VERVAEREN H, RAES K, et al. Modelling and simulation of anaerobic digestion of various lignocellulosic substrates in batch reactors: Influence of lignin content and phenolic compounds II [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2018, 134:80–87.
- [27] 张文杰, 耿潇. 垃圾填埋场毛细阻滞型腾发封顶工作机理及性能分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(3):274–279. ZHANG W J, GENG X. Performance and mechanism of capillary-barrier evapotranspiration cover of landfills[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(3):274–279.
- [28] YANG H, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. A study of infiltration on three sand capillary barriers[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(4):629–643.
- [29] 张露. 黄土高原土壤水分状况研究进展[J]. *农业科学*, 2017, 7(6):412–420. ZHANG L. Study advances of soil moisture regime on the Loess Plateau[J]. *Hans Journal of Agricultural Science*, 2017, 7(6):412–420.
- [30] POHLAND F G, KIM J C. In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors[J]. *Water Science & Technology*, 1999, 40(8):203–210.
- [31] 姜桂华. 铵态氮在土壤中吸附性能探讨[J]. *长安大学学报(建筑与环境科学版)*, 2004, 21(2):32–34, 38. JIANG G H. Discussion about $\text{NH}_4^+\text{-N}$ adsorptive ability in soils[J]. *Journal of Chang'an University(Arch. & Envir. Science Edition)*, 2004, 21(2):32–34, 38.
- [32] 张苗苗. pH对土壤硝化作用和氨氧化微生物的影响及其作用机理[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. ZHANG M M. Effects of pH on nitrification and ammonia oxidizers in soils and the underlying mechanisms[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [33] 陈森, 李玮, 陈歆, 等. 菜地土壤氮素迁移转化研究进展[J]. *中国瓜菜*, 2017, 30(8):1–6. CHEN M, LI W, CHEN X, et al. Research progress on transfer and transformation of soil nitrogen in vegetable field[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2017, 30(8):1–6.
- [34] 刘思涵. 黄土丘陵区梯田土壤质量演变及培肥效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. LIU S H. Study on soil quality evolution of terrace cropland and its fertilizing effect on the hilly Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [35] 杨封科, 何宝林, 张国平, 等. 土壤培肥与覆膜垄作对土壤养分、玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3):893–905. YANG F K, HE B L, ZHANG G P, et al. Impacts of different soil fertility improvement practices with film mulched ridge-furrow tillage on soil nutrient content, maize yield, and water use efficiency in northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3):893–905.