DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.009
阮国杰，胡琪，师倩，等. 残膜对土壤氮排放和氮肥利用效率的影响[J].水土保持学报，2024，38(2)：398-405.
RUAN Guojie，HU Qi，SHI Qian，et al. Effect of plastic film residue on soil nitrogen emissions and nitrogen utilization of soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2024，38(2)：398-405.

残膜对土壤氮排放和氮肥利用效率的影响

阮国杰[1]，胡 琪[2]，师 倩[1]，高晓东[3,4]，李昌见[3,4]
(1.甘肃林业职业技术学院，甘肃 天水 741020；2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 721000；
3.中国科学院水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；4.西北农林科技大学
旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西 杨凌 712100)

摘 要：[目的] 为探明不同残膜量对氮素利用效率及损失的影响。**[方法]** 试验设置 5 个不同残膜量(0，180，360，720，1 440 kg/hm^2)和 2 种残膜类型(聚乙烯和生物降解残膜)，通过盆栽试验，研究不同残膜含量对土壤全氮、氮素气态损失、氮肥利用效率及番茄生长等指标的影响。**[结果]** 随着残膜含量的增加，土壤氨气和氧化亚氮的累积排放量呈先增大后减小的趋势，当残膜含量达到 720 kg/hm^{2}时，氨气累积挥发量显著减少 11.31%～13.70%，氧化亚氮累积排放量减少 4.74%～5.13%；土壤中氮素残留量无显著差异。当残膜含量低于 180 kg/hm^{2}时，地膜残留促进番茄的生长；当残膜含量高于 180 kg/hm^{2}时，地膜残留抑制番茄的生长。低残膜含量对氮肥利用效率无显著影响，当含量高于 360 kg/hm^{2}时，氮肥利用效率与残膜含量呈负相关关系。通过综合分析，土壤残膜含量应控制在 180 kg/hm^{2}内才不会对作物生长造成不利影响。此外，由于可降解地膜的降解特性，其对植株氮素吸收和氮肥利用效率的不利影响弱于聚乙烯残膜。**[结论]** 降解地膜替代聚乙烯地膜具有一定的可行性。

关键词： 残膜；番茄；产量；气态损失；氮肥利用效率
中图分类号：S143.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242-(2024)02-0398-08

Effect of Plastic Film Residue on Soil Nitrogen Emissions and Nitrogen Use Efficiency

RUAN Guojie[1]，HU Qi[2]，SHI Qian[1]，GAO Xiaodong[3,4]，LI Changjian[3,4]
(1.*Gansu Forestry Polytechnic*，*Tianshui*，*Gansu* 741020，*China*；
2. *College of Water Resources & Architectural Engineering*，*Northwest A&F University*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*；
3. *Institute of Soil and Water Conservation*，*Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*；4. *Ministry of Education*，*Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*，*Northwest A&F university*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*)

Abstract：[Objective] The aim of this study is to investigate the effects of different residue amounts on nitrogen utilization efficiency and losses. **[Methods]** The experiment involved five different residue amounts (0，180，360，720，1 440 kg/hm^2) and two types of residues (polyethylene and biodegradable residues). Through pot experiments，the study examined the impact of different residue contents on soil total nitrogen，nitrogen gas losses，nitrogen fertilizer utilization efficiency，and tomato growth indicators. **[Results]** The research indicates that with an increase in residue content，the cumulative emissions of ammonia and nitrous oxide in the soil show a trend of first increasing and then decreasing. When the residue content reaches 720 kg/hm^2，the cumulative ammonia emission significantly decreases by 11.31% to 13.70%，and nitrous oxide emission decreases by 4.74% to 5.13%. There was no significant difference in nitrogen residue in the soil. When the residue content is below 180 kg/hm^2，the residue promotes tomato growth；when the residue content is above 180 kg/hm^2，it inhibits tomato growth. Low residue content has no significant effect on

收稿日期：2023-07-01 **修回日期：**2023-07-27 **录用日期：**2023-08-15 **网络首发日期(**www.cnki.net**)：**2023-10-10
资助项目：国家重点研发计划项目“黄土高原旱作适水改土与产能提升技术模式及应用”(2021YFD1900700)；国家自然科学基金青年科学基金项目“可降解地膜对旱地农田水－碳－氮循环关键过程的影响机制”(52209069)；唐仲英基金会项目
第一作者：阮国杰(1975—)，男，博士，主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail：499791890@qq.com
通信作者：李昌见(1988—)，男，博士，副教授，硕士生导师，主要从事农田生态环境修复研究。E-mail：lichangjian@nwafu.edu.cn

nitrogen fertilizer utilization efficiency. However, when the content is higher than 360 kg/hm^2, nitrogen fertilizer utilization efficiency shows a negative correlation with residue content. Through comprehensive analysis, it is suggested that soil residue content should be controlled within 180 kg/hm^2 to avoid negative effects on crop growth. Furthermore, due to the degradable nature of biodegradable residues, their adverse effects on nitrogen absorption by plants and nitrogen fertilizer utilization efficiency are weaker than those of polyethylene residues. [**Conclusion**] Therefore, replacing polyethylene residues with biodegradable residues is considered feasible.

Keywords: plastic film residue; tomato; yield; loss of gaseous; nitrogen fertilizer use efficiency

Received: 2023-07-01　**Revised**: 2023-07-27　**Accepted**: 2023-08-15　**Online**(www.cnki.net): 2023-10-10

地膜覆盖可以有效提高作物产量和水分利用效率[1-3]，已成为应对粮食短缺问题的重要农业生产措施。然而，目前普遍采用的聚乙烯地膜回收难度大，且难以降解，自然条件下长期残留在土壤中[4]。生物降解地膜被认为是最具潜力的聚乙烯地膜替代品之一[5]，但在覆膜期内无法完全降解，也会随着农耕措施进入土壤中[6]。随着覆膜年限和覆盖面积的逐年增加，土壤中残膜含量不断累积，造成耕地质量下降、温室气体排放增加、作物减产等一系列问题，对农业生产和农田生态环境造成负面影响[7]。

地膜残留对土壤结构、水分状况及作物生长均造成一定的影响，其影响程度与土壤残膜含量密切相关[8]。残膜含量过低时，可直接堵塞土壤孔隙，导致土壤孔隙急剧下降，降低土壤入渗性能。有研究[9-10]表明，当残膜含量在 0～300 kg/hm^2 范围内，残膜以阻滞水分入渗为主，从而增加表层土壤含水率；但当残膜含量过高时，土壤大孔隙比例增加，尤其是含量超过 450 kg/hm^2 时，残膜对水分的阻滞效应减弱，产生优先流，从而增加深层土壤含水量[10]。此外，残膜含量过高直接阻碍作物根系生长，进而抑制作物对水分和养分的吸收，最终造成作物减产。相关研究[8]表明，土壤残膜含量低于 200 kg/hm^2 对番茄产量无显著影响，但当含量超过 400 kg/hm^2 时，番茄产量显著降低。因此，合理选择覆膜种类及控制残膜量对农业可持续发展具有重要意义。

氮素是作物生长所必需的大量元素，直接影响作物生长和产量[11-12]。传统种植中氮素流向主要包括 3 个方面：(1)作物吸收；(2)土壤残留[13]；(3)以其他途径损失[14]，如氨气挥发、氧化亚氮排放和氮气排放等。其中，氨气挥发和氧化亚氮排放是氮素损失的主要途径，分别占全球农用氮总量的 1%～47% 和 3.5%～4.5%[15]。残膜在土壤中形成“隔膜”效应，通过物理屏障直接阻碍作物对氮素的吸收与利用；同时，残膜改变土壤结构[12-14]，影响作物根系的生长[15]，并且根际微生物群落也受到一定影响[16]，从而间接影响氧化亚氮排放和氨气挥发，进而改变氮素的转化途径，最终对农田生态环境和作物氮吸收利用产生不利影响。目前，关于残膜对农业生产影响的研究主要集中于土壤环境和作物生长发育方面，关于残膜尤其是降解残膜对作物氮素吸收利用与损失途径的影响还鲜有报道。因此，本文以目前蔬菜中种植面积较大、地膜使用率较高的番茄[17]为研究对象，研究不同残膜种类和含量对番茄生长和氮素损失及利用的影响，旨在为地膜残留农田氮素高效利用以及增产增效提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2022 年 4 月 29 日至 8 月 10 日在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室节水灌溉试验站大棚内开展(108°04′E，34°17′N)，海拔 521 m。试验采用 2 种残膜，分别为聚乙烯和生物降解地膜，生物降解地膜的主要原料为聚乳酸(PLA)和聚乙二酸－对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)，2 种地膜厚度均为 0.008 mm。试验前将 2 种地膜裁剪成边长为 5 cm 的正方形碎片待用。供试土壤取自杨凌郊区表层(0－30 cm)，质地为粉黏壤土。田间持水量为 23.90%，土壤容重为 1.32 g/cm^3，土壤有机质为 4.17 g/kg，总氮含量为 0.33 g/kg，速效磷含量为 1.44 mg/kg，速效钾含量为 101.30 mg/kg，pH 为 7.21。土壤去除大粒径杂质后，经风干、碾磨、过 2 mm 筛等步骤(确保土壤均一性)处理后备用。

1.2　试验设计与处理

本研究采用盆栽模拟试验，试验设置 8 个处理，即 BT1，添加 180 kg/hm^2 生物降解残膜；BT2，添加 360 kg/hm^2 生物降解残膜；BT3，添加 720 kg/hm^2 生物降解残膜；BT4，添加 1 440 kg/hm^2 生物降解残膜；PT1，添加 180 kg/hm^2 聚乙烯残膜；PT2，添加 360 kg/hm^2 聚乙烯残膜；PT3，添加 720 kg/hm^2 聚乙烯残膜；PT4，添加 1 440 kg/hm^2 聚乙烯残膜；不添加残膜作为对照处理(CK)。每个处理 15 个重复，其中 9 盆

用于测定生物量及氮素吸收，开花坐果期、果实膨大期和成熟期各3盆；3盆用于监测温室气体排放；3盆用于监测土壤氨挥发，共计135个盆栽。每盆种植1株番茄，品种为“宝凯”。番茄种植前将36 kg土壤与相应比例的残膜在含水量为20%田间持水量条件下均匀混合，随后分层装入底部开孔、口径为440 mm、下口径为330 mm、高450 mm的花盆中，填装容重为1.30 g/cm^3。填装完成后，将土壤含水率调整至田间持水量的75%，再进行番茄苗移栽，待盆栽编号后进行随机放置。含水率调整过程中，将N含量为46%的尿素(0.24 g/kg)、P_2O_5含量为16%过磷酸钙(0.13 g/kg)、K_2O含量为52%硫酸钾(0.21 g/kg)溶解于水中进行基肥施加。此外，为满足番茄后期生长发育的需要，果实膨大期每盆追施40 g水溶肥(N含量46%)。此外，设置1个不施肥处理。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 *样品采集与测定* 根据番茄成熟情况，分别于第1穗果、第2穗果、第3穗果基本成熟时取样，测定每株番茄产量；并在生育期末收集番茄地上部分，采用自来水进行清洗后将各器官(根、茎、叶和果实)分离，在105 ℃条件下杀青0.5 h，再在75 ℃条件下烘至恒重，测量番茄地上部分干重。称重结束后，对各器官进行粉碎过0.25 mm筛，测定各器官全氮含量。

试验开始前和番茄收获后分别采集土壤样品，经过风干、研磨和过筛处理后，测定其全氮含量。植株和土壤全氮含量采用凯氏法消解[18]，采用AA3型连续流动分析仪(Auto Analyzer 3－AA3，德国)测定。植株氮素吸收相关指数计算公式为：

$$O=\sum_{i=1}^{n}(C_i\times M_i) \tag{1}$$

$$P=\sum_{i=1}^{n}O_i \tag{2}$$

$$\mathrm{NUE}=\frac{(P_w-P_n)}{N}\times 100\% \tag{3}$$

式中：O为各部分氮素累积量(g)；C_i为各部分全氮浓度(g/g)；M_i为各部分干物质量(g)；P为植株氮素累积量(g/株)；NUE为氮肥利用效率(%)；P_w为施氮处理番茄地上部分氮积累量(g)；P_n为不施氮处理番茄地上部分氮积累量(g)；N为施氮量(g)。

1.3.2 *土壤氨气挥发测定* 采用通气法测定土壤氨气(NH_3)排放[17]，施用基肥和追肥后当天即开始采集，施肥后1周内每天收集1次，1周后每10天收集1次，灌水后加测1次。NH_3收集装置由直径为15 cm的聚氯乙烯塑料管制成，装置高度10 cm。用15 mL磷酸甘油溶液浸泡厚为2 cm、直径为15 cm的海绵，将2层海绵置于装置中，其中上层的海绵位置与装置顶部平行，以防止空气中的NH_3影响试验结果，下层的海绵距地面10 cm，用于收集土壤中的挥发性氨，2片海绵间距为1 cm。

试验开始前，在距离番茄根部7 cm处放置NH_3收集装置，试验开始后在取样日的17:00收集下层海绵，立即浸入装有300 mL浓度为1 mol/L氯化钾溶液的取样瓶中，在振荡机上振荡1 h后，过滤取上层清液，用连续流动分析仪(Auto Analyzer 3－AA3，德国)测定溶液中铵根离子的含量。上层海绵每3～7天更换1次。土壤NH_3挥发速率计算公式为：

$$Q=\frac{M}{A\times D}\times 0.01 \tag{4}$$

式中：Q为氨挥发速率[mg/(m^2·d)]；M为通气法单个装置平均每次测得的氨量(NH_3—N，mg)；A为捕获装置的横截面积(m^2)；D为每次连续捕获的时间(d)。

1.3.3 *土壤氧化亚氮采集与测定* 采用静态暗箱法测定氧化亚氮(N_2O)排放量[19]。静态箱箱体由直径为15 cm、高为30 cm的PVC管制成，为防止采样时箱内气体受大气温度和光照的影响，在箱外包裹1层2 mm厚的保温锡箔海绵。静态箱底座在试验开始前即楔入盆栽中，底座边缘与桶上缘相切。底座内部设有凹槽，采集期提前将凹槽内注入清水，收集气体时液封，保证静态箱内部密闭，不与外界发生气体交换。为保证静态箱内气体均匀性，顶部安装微型风扇。施用基肥和追肥后的1周内，每2天采集1次气体，1周后每10天采集1次气体，采集时间为每日上午8:00—12:00，采样间隔时间为10 min，单次采集气体量为50 mL，气体采集完成后在48 h内用气象色谱分析仪(7890B，德国)测定N_2O浓度。采集气体的同时，记录气体采集前后静态箱内温度。气体排放通量计算公式为：

$$F=\rho\times h\times\frac{273}{273\times T}\times\frac{d_s}{d_t} \tag{5}$$

式中：F为气体排放通量[mg/(m^2·h)]；ρ为标准状态下气体密度(g/cm^3)；h为静态箱高度(m)；d_s/d_t为箱内气体浓度的变化率[mg/(m^3·h)]；T为静态箱内温度平均值(℃)。

N_2O累积排放量计算公式为：

$$Y=\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_i+F_{i+1})}{2}\times t\times 24 \tag{6}$$

式中：F_i为第i次测定N_2O排放通量[mg/(m^2·h)]；F_{i+1}为下一次测定N_2O排放通量[mg/(m^2·h)]；t为2次测定的时间间隔(d)；n为计算期间测定次数。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel对试验数据进行整理、分

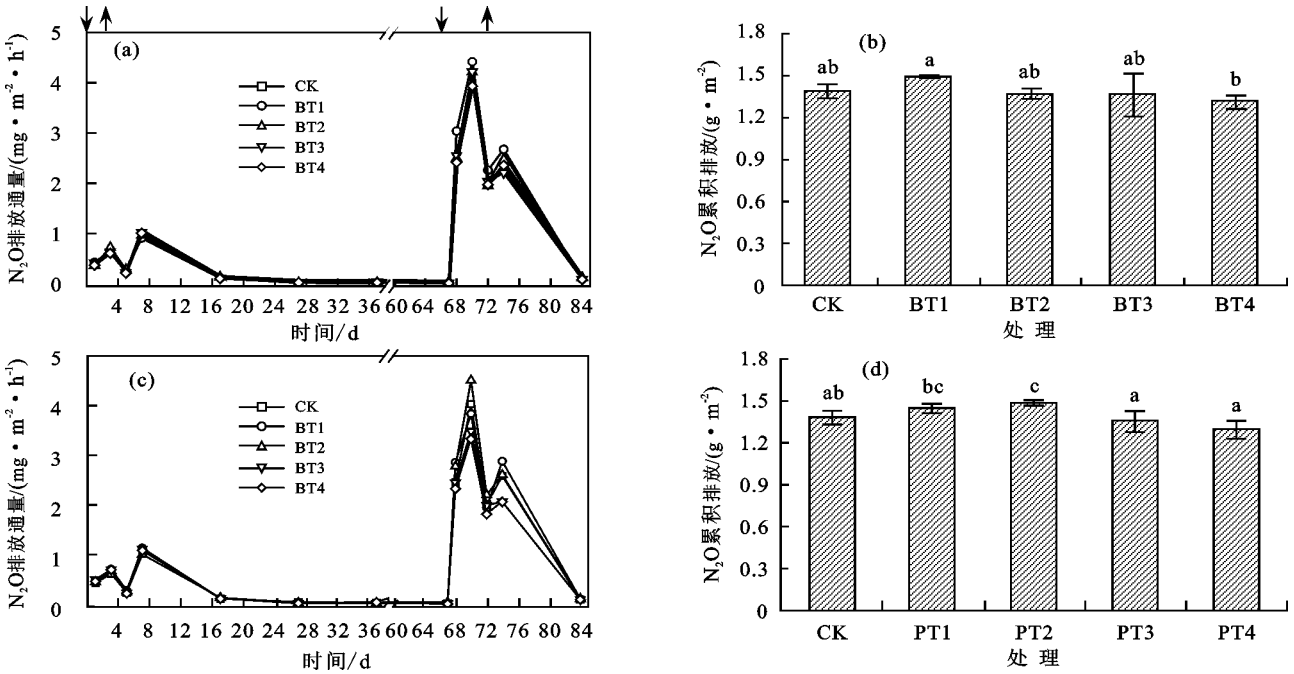
析；采用 SPSS 20.0 软件进行方差分析，采用 Duncan 法进行多重比较，差异显著性水平为 0.05；采用 Origin 2021 软件对分析结果进行可视化。

2　结果与分析

2.1　残膜对 N_2O 排放与 NH_3 挥发的影响

由图 1 可知，整个番茄生育期 2 种残膜处理对 N_2O排放通量的影响均随时间呈现相同的变化趋势。施肥和施肥后首次灌水的 2 天内出现峰值，随着时间的推移，排放通量逐渐降低并趋于平稳，且施加基肥和追肥后 N_2O 排放通量均呈双峰型变化。

整个番茄生育期降解地膜残膜处理 N_2O 排放通量变化范围为0.06～4.48 mg/(m^2 · h)，聚乙烯残膜处理 N_2O 排放通量变化范围为 0.05～4.53 mg/(m^2 · h)。整个生育期内，降解地膜各处理间 N_2O 累积排放量无显著性差异，约为1.38 g/m^2。聚乙烯残膜处理 N_2O 累积排放量随残留量的增加呈先增大后减小的趋势，且在 360 kg/hm^{2}残留量达到最大值，较 CK 处理增加 7.60%。不同残膜处理土壤 NH_3 挥发规律及累积挥发量见图 2。



注：↓表示施用基肥和追肥；↑表示施肥后首次灌水。下同。

图 1　不同残膜处理 N_2O 排放通量和累积排放量

Figure 1　The N_2O emission flux and cumulative N_2O emissions of different film residue treatments

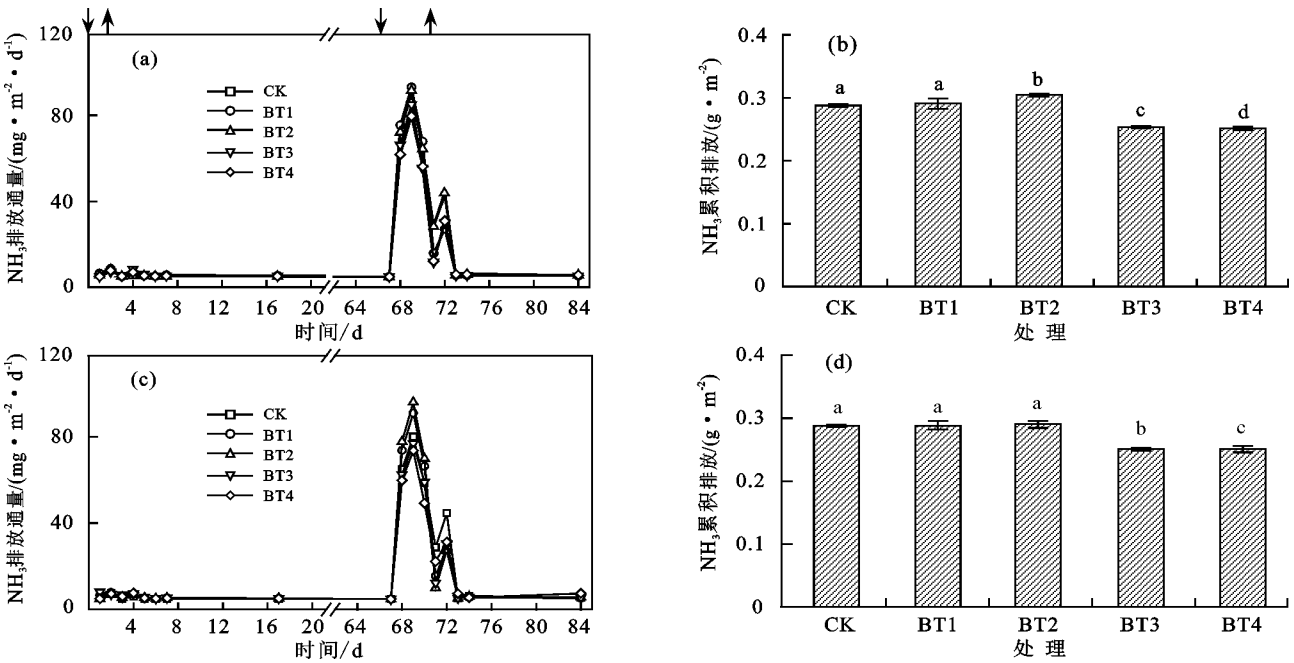


图 2　不同残膜处理土壤 NH_3 挥发规律及累积挥发量

Fig. 2　The NH_3 emission flux and cumulative NH_3 emissions of different film residue treatments

由图 2 可知，2 种残膜处理条件下 NH_3 挥发主要发生在施肥后，且挥发量在施肥后随时间推移均呈先增加后减小的趋势，持续时间为 8 天左右，其峰值出现在施肥后第 2～3 天。整个番茄生育期，降解残膜处理 NH_3 挥发量介于 5.10～82.22 mg/(m^2·d)，聚乙烯膜处理介于 4.43～69.23 mg/(m^2·d)。施加基肥后 NH_3 挥发量出现轻微波动，但各处理间无明显差异；追肥后 NH_3 挥发量剧烈增加，且在第 3 天达到峰值，在峰值处生物降解地膜处理 NH_3 挥发量表现为 BT1＞BT2＞BT3＞CK＞BT4，聚乙烯膜处理为 PT2＞PT1＞CK＞PT3＞PT4。整个番茄生育期，降解残膜处理 NH_3 累积挥发量在残膜含量为 360 kg/hm^2 时达到最大。BT2 处理 NH_3 累积挥发量较 CK 处理增加 5.60%；聚乙烯地膜处理含量＜360 kg/hm^2 对 NH_3 累积挥发量无显著影响，当含量超过 360 kg/hm^2 时，显著降低 NH_3 累积挥发。PT3 和 PT4 处理较 CK 处理降低 13.21%～13.80%(p＜0.05)。当残膜量相同时，生物降解地膜处理的 NH_3 累积挥发量较聚乙烯膜处理增加 0.01～0.14 mg/m^2，但差异不显著。

2.2 残膜对番茄生长及植株吸氮量的影响

不同处理番茄植株干物质量见图 3。当残膜含量为 180 kg/hm^2 时，2 种残膜处理对番茄生物量的累积起到促进作用，全株总生物量较 CK 处理分别增加 1.43%和 2.87%。当残膜含量高于 180 kg/hm^2 时，总生物量随残膜含量的增加逐渐减小，当残膜含量为 1 440 kg/hm^2 时，BT4 处理较 CK 显著降低17.21%；PT4 处理较 CK 处理显著降低 17.11%。不同残膜种类处理全株生物量表现为聚乙烯地膜处理小于可降解地膜处理，但相同残膜含量处理间干物质量差异不显著。不同处理器官生物量的差异以茎和叶最为显著，其次为根，果实干物质量无显著差异。

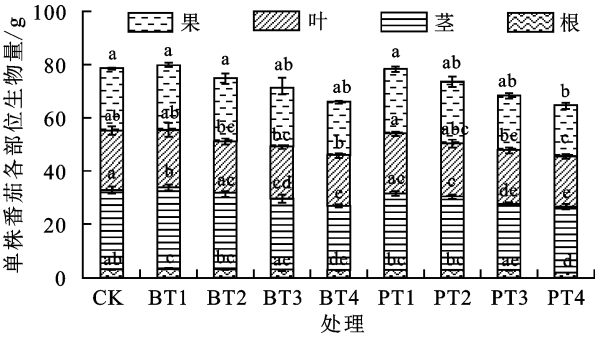


图 3 不同残膜处理对番茄生物量的影响

Fig. 3 Effects of different film residual treatments on the tomato biomass

不同残膜处理番茄各器官氮吸收量见表 1。番茄各部位氮吸收量表现为果＞叶＞茎＞根，且植株各器官氮吸收量随残膜含量增加均呈逐渐减小的趋势。可降解地膜和聚乙烯地膜处理残膜含量为 180 kg/hm^2 时均促进番茄对土壤氮的吸收，较 CK 处理分别增加 1.58%和 12.69%；残膜含量为 1 440 kg/hm^2 时，较 CK 分别减少 5.80%和 22.80%。相同残膜含量条件下，聚乙烯地膜处理植株氮吸收量较降解地膜处理减少 12.00%～21.00%，表明高浓度聚乙烯残膜残留(＞180 kg/hm^2)对植株氮吸收的抑制作用强于降解地膜。

表 1 不同残膜处理对番茄各部位吸氮量的影响

Table 1 Effects of different film residual treatments on nitrogen uptake for tomato parts g/plant

处理	根	叶	茎	果	全株
CK	0.237±0.010ab	0.600±0.050a	0.305±0.014abc	0.752±0.067ab	1.890±0.030ab
BT1	0.272±0.014c	0.545±0.053ab	0.304±0.023abc	0.833±0.026a	1.950±0.050ab
BT2	0.246±0.019bc	0.493±0.020bc	0.273±0.008ab	0.789±0.048ab	1.800±0.070b
BT3	0.217±0.021ae	0.500±0.026bc	0.314±0.048bc	0.743±0.086ab	1.780±0.080b
BT4	0.197±0.016ad	0.448±0.046bc	0.289±0.016abc	0.740±0.179a	1.670±0.010ac
PT1	0.251±0.016bc	0.613±0.090a	0.328±0.022c	0.918±0.232a	2.110±0.340a
PT2	0.224±0.010abe	0.477±0.064bc	0.301±0.020abc	0.891±0.086a	1.890±0.070ab
PT3	0.214±0.015ae	0.426±0.048c	0.264±0.008a	0.758±0.020ab	1.660±0.020ac
PT4	0.178±0.006d	0.455±0.041bc	0.221±0.019d	0.605±0.046b	1.460±0.050c

注：表中数值为平均值±标准误(n=3)；不同小写字母表示该部位各处理间差异显著(p＜0.05)。

2.3 残膜对氮肥流向及氮肥利用效率的影响

不同处理土壤—番茄植株系统中氮肥的利用、残留和气态损失各不相同(表 2)。当残膜含量在 0～180 kg/hm^2 时，土壤中氮素残留量较对照组略有降低。聚乙烯地膜处理土壤氮残留量大于生物降解地膜，但处理间无显著差异。对于气态氮损失量占施肥量的比例而言，PT1 处理最高，较 PT4 处理显著增加 0.25%。氮肥利用效率随残膜含量的增加呈先升高后降低的趋势；当残膜含量介于 0～180 kg/hm^2 时，聚乙烯残膜和可降解残膜氮肥利用效率较 CK 处理分别提高 12.30%和 1.60%；当残膜含量为 1 440 kg/hm^2 时，聚乙烯残膜和可降解残膜氮肥利用效率较 CK 处理分别降低 10.80%和 22.59%。整体分析发现，当残膜含量＞360 kg/hm^2 时，聚乙烯地膜氮肥利

用效率低于生物降解地膜，表明高残膜含量条件下降解地膜可以减弱残膜对氮肥利用效率的不利影响。

表 2　不同残膜处理土壤－番茄植株系统中氮肥流向

Table 2　Nitrogen flow in soil－tomato plant system under different film residual treatments

处理	单株产量/g	单株气态氮损失量/mg		氮素残留量/($g \cdot kg^{-1}$)	占施肥量的比例/%		氮肥利用率/%
		NH_3	N_2O		气态氮损失	土壤氮固存	
CK	232.8±3.5ab	43.8±0.2a	0.21±0.01abcd	10.6±0.3a	0.347±0.026a	77.9±2.4a	13.06±0.27ab
BT1	244.6±8.3b	44.2±1.3a	0.23±0d	10.4±0.2a	0.350±0.010a	76.7±1.7a	13.27±0.46ab
BT2	236.5±19.6abc	46.2±0.4b	0.21±0.01abcd	10.6±0.3a	0.366±0.003b	78.2±2.5a	12.26±0.43a
BT3	219.2±6.1cd	38.5±0.3c	0.21±0.02abc	10.8±0.6a	0.306±0.002c	79.5±4.5a	12.28±0.77a
BT4	201.3±5.6d	37.9±0c	0.20±0.01a	10.9±0.7a	0.301±0c	80.4±5.5a	11.65±0.10ac
PT1	242.8±9.9ab	43.9±1.0a	0.22±0bcd	10.4±0.5a	0.348±0.008a	76.8±3.8a	14.66±2.66b
PT2	232.8±19.6abc	44.1±0.8a	0.23±0cd	10.7±0.4a	0.350±0.007a	79.2±3.5a	13.02±0.51ab
PT3	204.6±10.1cd	38.1±0.4c	0.21±0.01ab	10.9±0.9a	0.302±0.003c	80.9±3.4a	11.42±0.28ac
PT4	190.7±11.9d	37.8±0.8c	0.20±0.10a	11.0±0.5a	0.300±0.006c	81.8±3.6a	10.11±0.38c

3　讨 论

3.1　残膜对土壤氮损失的影响

土壤中的残膜改变了农田水土环境[20]，影响农田土壤 NH_3 挥发。有研究[21]表明，残膜破坏土壤连续性，使水分纵向传输受阻，进而增大浅层土壤含水量，同时残膜阻滞硝态氮和铵态氮在土壤中的迁移，降低硝态氮和铵态氮淋失的风险。随着残膜含量的增加，土壤容重随之增加，使得土壤通气性变差，在一定程度上降低土壤中的空气流通，刺激氨氧化，导致土壤中 NH_4^+—N 含量降低[22]。而 NH_3 的挥发与土壤中 NH_4^+—N 和土壤体积含水量呈正相关关系[23]。本研究中残膜显著影响土壤 NH_3 挥发，所有处理的 NH_3 挥发峰值出现时间一致，这是由于试验中肥料的 NH_4^+—N 初始值较低，施用后不断分解，释放大量的 NH_4^+—N，使 NH_3 挥发量出现峰值。但生物降解地膜处理 NH_3 累计挥发量略高于聚乙烯膜，这可能是由于随着试验周期的进行，生物降解地膜逐渐降解成更小的碎片，阻塞土壤孔隙，从而降低土壤通气性，促进土壤反硝化作用，增加土壤 NH_4^+—N 含量，进而增加 NH_3 排放。同时，本研究发现，NH_3 挥发量随着残膜含量的增加先增加后减小，这种变化趋势除与 NH_4^+—N 含量及土壤含水量有关外，可能还与地膜残片对气体排放的阻碍作用有关。大量的地膜残片在土壤中形成“隔膜”作用，阻断气体及水分运输通道，因此残膜含量升高时 NH_3 挥发受到抑制。

研究[24]表明，N_2O 的产生与土壤的硝化和反硝化作用有关，而这一过程取决于土壤含水量、NH_4^+ 含量、NO_3^- 含量和微生物种类等因素。本研究中，随着残膜含量的升高，N_2O 排通量呈先增加后减小的趋势。在残膜含量较低时，土壤中的 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量充足，硝化作用和反硝化作用活跃，产生较多的 N_2O[25]。但当残膜含量较高时，土壤大孔隙含量增加，形成优先流，降低表层土壤含水率，进而减弱反硝化作用，降低 N_2O 的排放。此外，长期残膜作用可能降低土壤中硝态氮含量，破坏碳氮循环相关的微生物群落结构，无法产生大量的 N_2O，这也是导致 N_2O 排放量降低的原因[12,16]。

3.2　残膜对番茄生长的影响

地膜在土壤中不易降解，残留在土壤中影响作物根系的发育，进而影响根系吸收水分和养分的能力，最终影响作物的生长与产量[10]。本研究中当残膜含量为 0～180 kg/hm^2 时，番茄植株干物质量较无残膜处理略微增加，但无显著差异，当含量超过 0～180 kg/hm^2 时，干物质量随残膜含量增加而减小。这主要是由于残膜作为一种隐藏碳源，可以增加有机碳含量，为番茄提供养分。在残膜含量较低时，对根系生长发育的影响较小，残膜释放有机碳对番茄根系生长的促进作用强于抑制作用，因此低含量残膜对番茄生长具有一定的促进作用；反之，当残膜积累超过一定含量后，残膜释放有机碳对番茄根系生长的促进作用则弱于抑制作用，进而抑制番茄的生长[8]。胡琦等[10]研究同样表明，只有残膜含量超过 150 kg/hm^2 才显著影响作物生长，且随残膜含量的增加，干物质累积量呈逐渐减小的趋势；杨彩霞等[8]研究残膜含量对番茄生长的影响发现，番茄开花坐果期前期，残膜含量在 0～400 kg/hm^2 时，番茄的株高、茎粗显著升高，且植株地上和地下部分干物质量有所上升，当残膜含量高于 400 kg/hm^2，番茄生长受到抑制。由于生物降解残膜和聚乙烯残膜的降解特性不同，二者对番茄生长的影响也略有不同。相同残膜含量下，番茄植株干物质累积量表现为生物降解地膜＞聚乙烯膜。主要是由于随着时间的推移，生物降解地膜的破裂程度较聚乙烯膜更高，番茄主根能够穿破生物降解地膜，减少残膜的“隔膜”作用，降低残膜赋存对番茄生长及氮素吸收的不利影响[26]。

3.3　残膜对氮素吸收和氮肥利用效率的影响

残膜的存在影响根系的生长状况，进而影响番茄

的养分吸收和产量。本研究表明,当残膜含量超过180 kg/hm^{2}时,番茄植株氮吸收总量表现出降低趋势,表明地膜残留抑制番茄对氮素的吸收,这与前人[27]研究结果一致。主要是由于残膜的存在影响根系的生长发育。根系作为一种不定形营养器官,首先感受土壤环境的变化并作出响应[28]。当有残膜时,土壤通气性降低,不利于根系呼吸,同时残膜依附在根系表面,阻碍根系对氮素的吸收,导致植株生物量和氮素的累积受到抑制[29]。其次,番茄全株氮吸收总量、生物量和产量表现为生物降解地膜大于聚乙烯膜。这可能是由于随着时间的推移,生物降解地膜的破裂程度较聚乙烯膜更高,番茄主根能够穿破生物降解地膜,减少残膜的"隔膜"作用,进而降低残膜富集对其生长及氮素吸收的不利影响。残膜通过影响氮素吸收过程,进一步影响氮肥利用效率。由于残膜的富集直接阻碍氮素吸收,这也必将导致氮肥利用效率降低。但是相同残膜量条件下,生物降解地膜残留处理氮肥利用效率高于聚乙烯膜地膜残留处理,这主要是因为随着时间的推移,生物降解地膜更容易降解,降低对土壤水分运动的阻碍,进而减轻对番茄根系生长和氮素吸收的抑制作用。

因此,为了保护好农田的生态环境,促进绿色农业的可持续发展,必须提高聚乙烯地膜的回收力度。虽然本研究结果表明,可降解地膜可以在一定程度上代替聚乙烯地膜,但是需要进一步加快可降解地膜的降解速率,进而降低对作物生长和氮肥利用效率的影响。

4 结 论

(1)2种类型的残膜均改变土壤气态氮损失规律,当残膜含量较低时,土壤中以NH_3和N_2O形式的气态氮损失量略有增加,但当残膜含量达到720 kg/hm^{2}时,气态氮损失量显著降低,且可降解地膜气态氮损失量低于聚乙烯地膜。

(2)当残膜含量介于0~180 kg/hm^{2}时可以提高氮肥利用效率;当残膜含量>360 kg/hm^{2}时,降低氮肥利用效率。在残膜含量为1 440 kg/hm^{2}时,聚乙烯残膜和可降解残膜氮肥利用效率分别降低10.80%和22.59%,且聚乙烯地膜氮肥利用效率低于生物降解地膜,表明聚乙烯残膜对番茄氮肥利用效率的抑制作用更强。

(3)可降解地膜在一定程度上可以代替聚乙烯地膜,但需要进一步加快可降解地膜的降解速率,降低对作物生长和氮肥利用效率的影响。

参考文献:

[1] WANG L, LI X G, GUAN Z H, et al. The effects of plastic-film mulch on the grain yield and root biomass of maize vary with cultivar in a cold semiarid environment [J].Field Crops Research,2018,216:89-99.

[2] YAN C R, HE W Q, TURNER N C. Plastic-film mulch in Chinese agriculture: Importance and problems[J]. World Agriculture,2014,4:32-36.

[3] GAO D W, LI Z, WANG H, et al. An overview of phthalate acid ester pollution in China over the last decade: Environmental occurrence and human exposure[J]. Science of the Total Environment,2018,645:1400-1409.

[4] 冯欢,何文清,张凤华,等.生物降解地膜性能及对棉花产量的影响评价研究[J].生态环境学报,2019,28(3):580-586.
FENG H, HE W Q, ZHANG F H, et al. Study on the performance of biodegradable film and its influence on cotton yield[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019,28(3):580-586.

[5] QI Y, YANG X, PELAEZ A M, et al. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J].Science of the Total Environment,2018,645: 1048-1056.

[6] SINTIM H Y, BARY A I, HAYES D G, et al. In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils[J].Science of the Total Environment,2020,727:e138668.

[7] 胡灿,王旭峰,陈学庚,等.新疆农田残膜污染现状及防控策略[J].农业工程学报,2019,35(24):223-234.
HU C, WANG X F, CHEN X G, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(24):223-234.

[8] 杨彩霞,马娟娟,孙西欢,等.不同残膜量对番茄生长发育和产量的影响[J].节水灌溉,2020(7):24-27.
YANG C X, MA J J, SUN X H, et al. Effects of different residual film amount on growth and yield of tomato [J].Water Saving Irrigation,2020(7):24-27.

[9] 王志超,李仙岳,史海滨,等.农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J].农业机械学报,2015,46(5):101-106,140.
WANG Z C, LI X Y, SHI H B, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil Structure[J]. Water Saving Irrigation, Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46 (5):101-106,140.

[10] 胡琦,李仙岳,史海滨,等.残膜污染对滴灌玉米土壤水分和根冠生长的影响[J].中国环境科学,2023,43(6):1-11.
HU Q, LI X Y, SHI H B, et al. Effects of residual plastic film pollution on soil water content and root-shoot growth of maize under drip irrigation condition [J].China Environmental Science,2023,43(6):1-11.

[11] 张学科,李惠霞,张倓,等.滴灌条件下水氮减量对番茄氮素利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(3):45-50.
ZHANG X K, LI H X, ZHANG T, et al. Effects of

different water and nitrogen levels on nitrogen use efficiency under drip irrigation[J].Journal of Irrigation and Drainage,2018,37(3):45-50.

[12] QI Y, BERIOT N, GORT G, et al. Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties[J]. Environmental Pollution, 2020, 266:e115097.

[13] QI R, JONES D L, LI Z, et al. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review[J]. Science of the Total Environment, 2020,703:e134722.

[14] KOSKEI K, MUNYASYA A N, WANG Y B, et al. Effects of increased plastic film residues on soil properties and crop productivity in agro-ecosystem[J].Journal of Hazardous Materials,2021,414:e125521.

[15] HU Q, LI X, GONCALVES J M, et al. Effects of residual plastic-film mulch on field corn growth and productivity[J]. Science of the Total Environment, 2020, 729:e138901.

[16] SHI Z, XIONG L, LIU T, et al. Alteration of bacterial communities and co-occurrence networks as a legacy effect upon exposure to polyethylene residues under field environment[J].Journal of Hazardous Materials, 2022,426:e128126.

[17] 吕宏菲,马星霞,杨改河,等.秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(4):513-522.
LV H F, MA X X, YANG G H, et al. Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat-maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2020,28(4):513-522.

[18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1981:42-264.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M].Beijing: China Agricultural Publishing House,1981:42-264.

[19] LI C, XIONG Y, HUANG Q, et al. Impact of irrigation and fertilization regimes on greenhouse gas emissions from soil of mulching cultivated maize (*Zea mays* L.) field in the upper reaches of Yellow River, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259:e120873.

[20] HODSON M E, DUFFUS-HODSON C A, CLARK A, et al. Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates[J].Environmental Science and Technology, 2017, 251: 4714-4721.

[21] 王春颖,毛晓敏,赵兵.层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J].农业工程学报,2010,26(11):61-67.
WANG C Y, MAO X M, ZHAO B. Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition[J].Transactions of the CSAE,2010,26(11):61-67.

[22] 张丹,刘宏斌,马忠明,等.残膜对农田土壤养分含量及微生物特征的影响[J].中国农业科学,2017,50(2):310-319.
ZHANG D, LIU H B, MA Z M, et al. Effect of residual plastic film on soil nutrient contents and microbial characteristics in the farmland[J].Scientia Agricultura Sinica,2017,50(2):310-319.

[23] CAMERON K C, DI H J, MOIR J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review[J]. Annals of Applied Biology,2013,162(2):145-173.

[24] WANG Y, HU C, MING H, et al. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in soil profile under a winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J].PLoS One,2014,9(6):e98445.

[25] 郝小雨,高伟,王玉军,等.有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1073-1085.
HAO X Y, GAO W, WANG Y J, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N_2O emission from greenhouse vegetable soil[J].Plant Nutrition and Fertilizer Science,2012,18(5):1073-1085.

[26] CAO J, CHEN P, LI Y, et al. Effect of plastic film residue on vertical infiltration under different initial soil moisture contents and dry bulk densities[J]. Water, 2020,12(5):e1346.

[27] 黄泽春,屠乃美,朱宗第,等.大田期烤烟根系生长与分布研究[J].中国烟草学报,2012,18(1):35-39.
HUANG Z C, TU N M, ZHU Z D, et al. Study on root growth and distribution of fluecured tobacco during field period[J]. Acta Tabacaria Sinica,2012,18(1):35-39.

[28] 贾志红,易建华,孙在军.不同覆盖物对烤烟根温及生长和生理特性的影响[J].应用生态学报,2006,17(11):2075-2078.
JIA Z H, YI J H, SUN Z J, et al. Effects of different mulches on rhizosphere temperature growth and physiological properties of flue-cured tobacco[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006,17(11):2075-2078.

[29] 王艳丽,刘国顺,丁松爽,等.磷用量对烤烟根系及其与地上部关系的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1440-1446.
WANG Y L, LIU G S, DING S S, et al. Effects of phosphorus fertilizer on the root system and its relationship with the aboveground part of flue-cured tobacco[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(5):1440-1446.