

DNDC 模型和 TOPSIS 法联合确定生物降解地膜覆盖农田合理施氮量

冷旭^{1,2}, 李仙岳^{1,2}, 郭宇^{1,2}, 丁宗江^{1,2}

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;

2.高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古工程研究中心,呼和浩特 010018)

摘要:为明确干旱区最优覆盖地膜类型和施氮制度,于内蒙古河套灌区木垒滩节水试验站进行为期 2 年的不同类型地膜覆盖农田不同施氮量试验。在高氮水平(传统施氮 336 kg/hm²)下设置 3 种覆膜处理,包括塑料地膜(PFM3)、生物降解地膜(BFM3)和无膜覆盖处理(NFM3);同时在生物降解地膜覆盖下设立 3 个施氮水平,包括中氮(BFM2,276 kg/hm²)、低氮(BFM1,216 kg/hm²)和不施氮(BFM0,0 kg/hm²),共 6 个处理。利用 2 年观测的产量、吸氮量和氮淋失量对 DNDC 模型进行率定和验证,并基于改进的 TOPSIS 方法对地膜类型和施肥制度进行优化。结果表明:DNDC 模型对地膜覆盖及氮肥调控下作物生长与氮素迁移较为敏感,产量、吸氮量与氮淋失量模拟的 EF 与 R^2 均大于 0.83,NRMSE 均小于 20%,能够为作物生产力与资源利用进行预测和评估。随施氮量增加,所有覆膜处理的氮淋失量呈线性增加,当施氮量增加至 106 kg/hm²时,氮肥利用率达到峰值;当施氮量增加至 256 kg/hm²时,覆膜处理的产量不再发生明显变化,同时生物降解地膜的净收益也达到最大值;但其成本高,导致净收益比塑料地膜降低 6.84%,比无膜覆盖处理提高 3.17%。塑料地膜和生物降解地膜覆盖下的氮淋失量、氮肥利用率和产量无明显差异,均大于无膜覆盖处理,平均提高 8.22%~26.69%。利用改进的 TOPSIS 法对产量、氮淋失量、残膜量、氮肥利用率和净收益 5 个方面进行综合评价,选出在生物降解地膜覆盖下施用氮肥 231~256 kg/hm²是干旱地区较合理的覆膜施氮制度。

关键词: DNDC 模型; 干旱区; 生物降解地膜; TOPSIS; 综合评价

中图分类号: S158.5; S626.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)04-0325-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.040

Determining the Reasonable Nitrogen Application Amount in Farmland Under Biodegradable Film Mulching Based on DNDC and TOPSIS Models

LENG Xu^{1,2}, LI Xianyue^{1,2}, GUO Yu^{1,2}, DING Zongjiang^{1,2}

(1.College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018; 2. High Efficiency Water-saving Technology and Equipment and Soil Water Environment Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018)

Abstract: In order to clarify the optimal film mulching type and nitrogen application system in arid areas, a two-year film mulching farmland fertilization experiment was conducted at Muleitan Water-saving Experimental Station in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. Three mulching treatments were set at high nitrogen level (conventional nitrogen application 336 kg/hm²), including plastic film (PFM3), biodegradable film (BFM3) and no film mulching (NFM3); at the same time, three nitrogen levels were set up under biodegradable film mulching, including medium nitrogen (BFM2: 276 kg/hm²), low nitrogen (BFM1: 216 kg/hm²) and no nitrogen (BFM0: 0 kg/hm²), making up to a total of six treatments. The DNDC model was calibrated and verified by the observed values of two-year yield, nitrogen uptake and leaching, and the film type and fertilization system were optimized based on the improved TOPSIS method. The results showed that the DNDC model was sensitive to crop growth and nitrogen migration under different film mulching and nitrogen regulations. The simulated EF and R^2 of yield, nitrogen uptake and leaching were greater than 0.83,

收稿日期:2021-11-23

资助项目:中央引导资金项目(2020ZY0023);内蒙古科技计划项目(2022YFHH0039);国家自然科学基金项目(52079064,51969024);中国科学院“西部之光”人才培养计划项目

第一作者:冷旭(1995—),男,硕士研究生,主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究。E-mail:704995900@qq.com

通信作者:李仙岳(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用研究。E-mail:lixianyue80@126.com

NRMSE were less than 20%, which could predict and evaluate crop productivity and resource utilization. With the increase of nitrogen application amount, the nitrogen leaching of each mulching treatment increased linearly. When nitrogen application amount increased to 106 kg/hm², nitrogen use efficiency reached the peak; when the nitrogen application amount increased to 256 kg/hm², the yield of mulching treatments did not change significantly. At the same time, the net income of BFM reached the maximum, but the cost of biodegradable film was high, which resulted in a net income of 6.84% lower than PFM and 3.17% higher than NFM. There was no significant difference in nitrogen leaching, use efficiency and yield between biodegradable film mulching and plastic film mulching, which were significantly higher than no film mulching, and the average increase from 8.22% to 26.69%. The improved TOPSIS method was used to comprehensively evaluate the yield, nitrogen leaching, use efficiency, residual film amount, and net income. The results showed that the application of 231 to 256 kg/hm² nitrogen fertilizer was the most reasonable fertilization system under biodegradable film mulching in arid areas.

Keywords: DNDC model; arid area; biodegradable film; TOPSIS; comprehensive evaluation

目前粮食安全问题被全世界所关注,而扩大粮食种植面积和提高粮食单产水平是其重要的解决方案^[1]。但在种植面积不能增加的情况下,农民为了提高产量增加收益,盲目过量施肥^[2],导致大量的资源浪费,氮肥利用率降低,并伴随着地下水污染、水体富营养化等问题^[3]。另外,连续多年覆盖塑料地膜,造成严重的“白色污染”,导致农膜残片在土层中累积,破坏土体结构,作物产量下降^[4]。尽管生物降解地膜价格稍贵,但其是解决该问题的主要措施。诸多学者^[5-6]对生物降解地膜和塑料地膜覆盖的效果进行大量研究表明,生物降解地膜随作物生育期推进,通过光照、土壤微生物活动等因素发生破损并自行降解,并对产量影响较小,且最终分解为水和二氧化碳,可有效改善地膜残留问题;张景俊^[7]研究发现,生物降解地膜和塑料地膜覆盖下全生育期 0—20 cm 土层平均地温仅相差 0.73 ℃,无明显差异,但比无膜覆盖处理分别提高 7.74% 和 10.90%;且土壤含水量随地膜破损程度加大而降低,0—20 cm 土层含水率比塑料地膜覆盖降低 0.93%~7.35%;李仙岳等^[8]研究指出,在作物生长前期,生物降解地膜与塑料地膜覆盖土层硝态氮含量无显著差异,在生长末期土层硝态氮含量比塑料地膜覆盖降低 28.84%,但比无膜覆盖处理提高 20.46%,且随着施氮量增加土层硝态氮含量增加;同时 Chen 等^[9]通过调节生物降解地膜覆盖下的施氮量发现,施 280 kg/hm² 氮肥比 210,140 kg/hm² 在 0—100 cm 土层硝态氮浓度分别提高 0.018,0.037 mg/cm³。

虽然在不同覆膜条件和施肥制度对作物生长与土壤氮环境变化的影响已有大量研究,但在制定适宜的覆膜施氮制度时,资金、时间和劳动力的投入制约着试验结果的精度,同时没有综合考虑产量、环境、经济效益以及不同地区的特点,导致所制定的最优方案失真。作物生长模型能更方便获取作物生长变化过

程,如 DNDC (denitrification-decomposition model, 脱氮—分解作用)模型可模拟不同时期地膜覆盖率变化和施氮量改变对作物生长的影响^[3],能够实现对生物降解地膜覆盖及氮肥调控下的作物生长模拟,但该模型并没有对地膜类型进行优化,也没有考虑到成本收益和环境影响等内容,缺乏对其的综合评价。而改进的 TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)方法^[10]是根据有限的评价对象与理想化目标的接近程度进行排序的方法,是在现有对象中进行相对优劣的评价,可实现多指标多目标决策分析,并克服传统 TOPSIS 法在确定指标权重因子时主观因素的影响,具有较高的科学性与合理性,目前主要在土地利用合理性、节水改造效益和排灌方案优化等方面大量应用^[11]。基于改进的 TOPSIS 法与 DNDC 耦合模型确定适宜的地膜类型和施氮制度是一种高效、经济且合理的手段,但这方面的研究目前相对较少。因此,本研究主要通过构建、率定和验证不同覆膜及不同施氮量条件下 DNDC 作物生长模型,再设置不同情景获得其主要指标,并基于改进的 TOPSIS 法考虑产量、氮淋失量、残膜量、氮肥利用率和净收益 5 个方面进行综合评价,提出干旱区生物降解膜覆盖下优化的施氮量,以期为生物降解地膜推广及氮肥高效利用奠定理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验设计

试验于 2016—2017 年在内蒙古河套灌区木垒滩节水试验站(106°56′30″E,40°31′48″N)进行。该地区春秋季节时间较短,夏季较为炎热。年均气温 7.6 ℃,年均降水量少,仅为 144.5 mm;年均蒸发量较大,为 2 397.6 mm;5—9 月内积温高,为 3 100 ℃;昼夜温差大,为 14.5 ℃。试验田块土壤为粉砂壤土,质地均匀;地下水埋深较大,均在 6 m 以下。体积田间持水率为

36.89%,平均容重 1.49 g/cm³,电导率为 305.2 μS/cm。0—30 cm 土层总氮、有机质质量比和 pH 分别为 0.78,6.3 g/kg 和 8.1,速效磷、速效钾、速效氮质量比分别为 11.22,126.9,58.32 mg/kg。

玉米在每年的 5 月 1 日进行播种,并于同年 9 月 20 日进行收获。种植密度为 55 555 株/hm²。试验在高氮水平(常规施氮 336 kg/hm²)下设置 3 种覆膜处理,包括塑料地膜(PFM3)、生物降解地膜(BFM3)

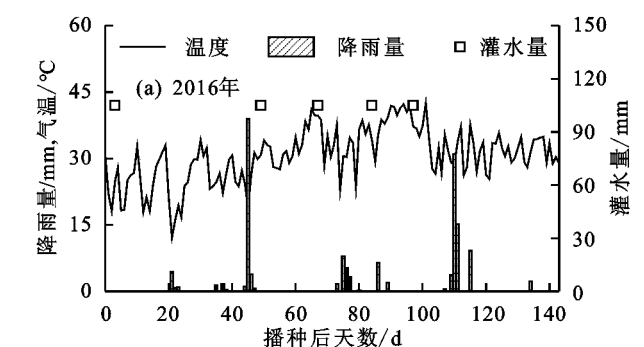


图 1 2016 年和 2017 年作物生育期气温、降雨量和灌溉量

1.2 测定指标与方法

田间渗漏量:分别在膜上与膜间选择 50 cm 土层深度为耕作层的下边界,在边界上下(40—60 cm)安装土壤张力计,监测该土层的基质势,并根据非饱和流动的达西定律计算相应土层的下边界通量。

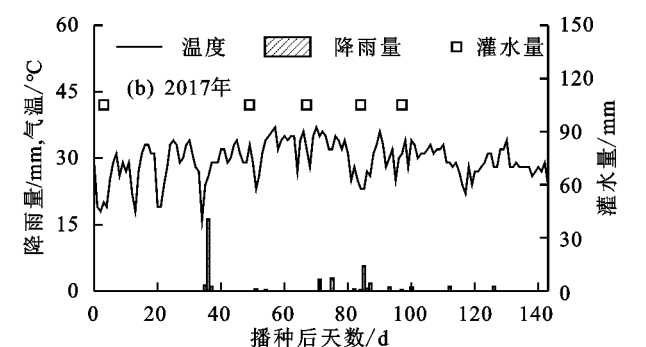
硝态氮淋失量:采用由 210 cm 长、11 cm 粗的 PVC 管制成的田间淋溶管^[2]测定膜上与膜间土壤剖面 50 cm 的氮淋失量,其中顶部 30 cm 高于地表,土层下 50~140 cm 管壁均匀打孔,底部预留 40 cm 用于收集土层 50 cm 深度以下的渗漏液。每次灌水和降雨后 3~5 天内采集渗漏液,并清空管内残留的水样,采用双波长比色法测定膜上与膜间淋溶水样中平均硝态氮浓度,乘以相应的水通量来计算硝态氮淋失量。

地膜破损率:各小区随机选取 3 个固定的地膜观测区,将相机固定在地膜观测区上方 40 cm 处,并在区域边界放直尺作参照物,每次拍摄 3 张照片,将照片导入 AutoCAD 2008(Autodesk, Inc)进行处理,计算破损率与覆盖率^[2]。

作物吸氮量与产量:各处理在收获时随机取 5 株玉米,放入干燥箱内以 105 °C 的温度杀青 30 min,再以 80 °C 的温度将植株干燥至质量恒定,粉碎过筛,采用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮—蒸馏法测定作物吸氮量^[3]。同时各处理随机连续选取 10 株玉米,自然风干脱粒后考种,测量并计算每公顷产量。

投入成本与收入:根据市场调研得知,种子 600 元/hm²,生物降解地膜 1 500 元/hm²,塑料地膜 600 元/hm²,塑料地膜清理费 150 元/hm²,水费 1 350 元/hm²,打药及其他 480 元/hm²;复合肥 2.6 元/kg,尿素 1.8 元/kg,玉米收购价 1.92 元/kg。

和无膜覆盖处理(NFM3);同时在生物降解地膜覆盖下设立 3 个施氮水平,包括中氮(BFM2,276 kg/hm²)、低氮(BFM1,216 kg/hm²)和不施氮(BFM0,0 kg/hm²),共 6 个处理,每个处理重复 3 次,用田埂分割出 18 个小区随机排列。根据当地灌水经验,共灌水 5 次,每次灌水 105 mm,总灌水量为 525 mm。各处理的灌溉制度相同,灌水时间及生育期的气象变化情况见图 1。



塑料地膜不易降解且难清理,残留的碎片随覆盖年限增加呈线性增长,牛文全等^[12]研究发现其函数关系为 $y=5.5460x+47.8400(R^2=0.871\ 0)$,减产率同样呈线性增加($y=0.0418x+0.4114,R^2=0.982\ 7$)^[13],本试验根据该经验公式计算了连续覆盖塑料地膜 10 年后残膜量为 103.30 kg/hm²,减产率达 4.73%;而当连续覆盖塑料地膜 52 年后残膜量为 336.23 kg/hm²,此时由残膜累积导致的玉米减产率(14.47%)将大于该地区由地膜覆盖技术引起的增产率(14.24%)。

氮肥利用率计算公式为:

$$P_U=(U_N-U_0)/F_N\times 100\% \quad (1)$$

式中: U_N 为施氮区植株吸氮量(kg/hm²); U_0 为未施氮区吸氮量(kg/hm²); F_N 为施氮区施肥纯氮投入量(kg/hm²)。

1.3 DNDC 模型

DNDC 模型(denitrification-decomposition model, 脱氮—分解作用模型)由美国新罕布什尔大学陆地海洋空间研究中心开发研制,是一种基于过程的农业生态系统碳和氮生物地球化学模型,用于评价管理实践对产量或环境风险的影响,已在全球使用监测数据得到良好的验证^[14]。模型的原理和数据库构建在李仙岳等^[3]和 Leng 等^[14]的研究中得到详细介绍。由图 2 可知,塑料地膜全生育期几乎不发生降解,而生物降解地膜在播种后 43~44 天出现大量裂缝、破损,在播种后 60,86,116,143 天,覆盖率分别为 82.06%,71.42%,55.4%和 29.74%(试验覆膜时,地膜之间的裸露区域宽 10 cm,因此每平方米初始覆膜率约为 89%)。

1.4 模型评价

玉米产量、吸氮量和氮淋失量的模拟值与实测值

采用一致性指数(EF)、决定系数(R^2)和标准均方根误差(NRMSE)3 个指标进行评价。当 NRMSE 直接

近 0, EF 与 R^2 值接近 1, 说明模拟值与实测值吻合, 模型的精确度较高。

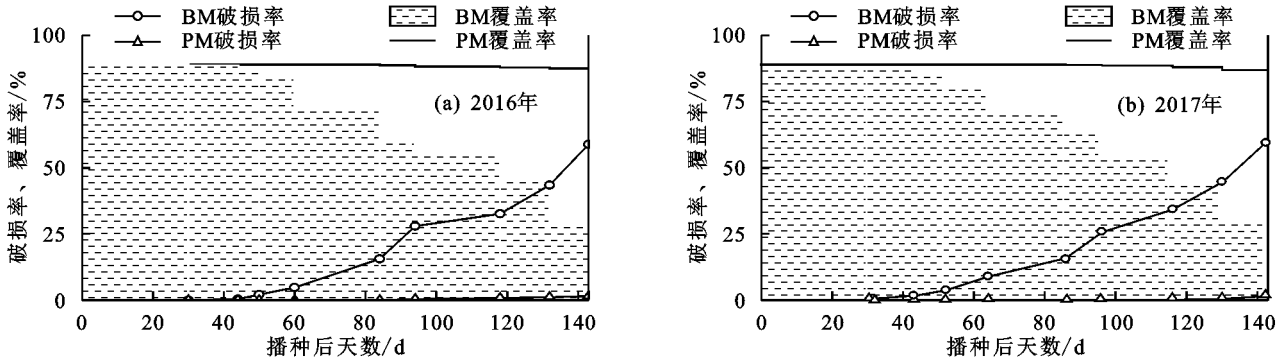


图 2 玉米生育期生物降解地膜和塑料地膜的覆盖率与破损率

$$EF=1-\sum_{i=1}^n(S_i-M_i)^2/\sum_{i=1}^n(S_i-S_m)^2 \quad (2)$$
$$R^2=[\sum_{i=1}^n(M_i-M_m)(S_i-S_m)/\sqrt{\sum_{i=1}^n(M_i-M_m)^2\sum_{i=1}^n(S_i-S_m)^2}]^2 \quad (3)$$

$$NRMSE=\sqrt{\sum_{i=1}^n(M_i-S_i)^2/n}/M_m \quad (4)$$

式中: S_i 、 M_i 分别为模拟值与观测值; S_m 、 M_m 分别为模拟值与观测值的均值; n 为观测个数。

1.5 不同地膜覆盖下氮肥调控综合效应评价

采用改进的 TOPSIS 评价方法对不同施氮量进行综合评价,通过计算评价对象与绝对正理想解和绝对负理想解之间的距离,确定反映不同覆膜条件下不同施氮量的综合效应评价价值(R_i)。具体步骤为:

- (1)建立标准化决策矩阵 X^* :
- $$X^*=(x_{ij}^*)_{m\times n};x_{ij}^*=x_{ij}/\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2},$$
$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n \quad (5)$$
- (2)计算各评价指标熵值 H_j :
- $$H_j=-(\sum_{i=1}^m f_{ij}\ln f_{ij})/\ln m;f_{ij}=x_{ij}^*/\sum_{i=1}^m x_{ij}^*,$$
$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n \quad (6)$$
- (3)计算各评价指标权重 ω_j :
- $$\omega_j=(1-H_j)/(n-\sum_{i=1}^n H_j);\sum_{i=1}^n \omega_j=1,$$
$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n \quad (7)$$
- (4)建立加权决策矩阵 X :
- $$X=(r_{ij})_{m\times n};r_{ij}=\omega_j\times x_{ij}^*,$$
$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n \quad (8)$$
- (5)计算矩阵 X 的正理想解向量 X^+ 和负理想解向量 X^- :
- $$X^+=(r_1^+,r_2^+,r_3^+,\cdots,r_m^+) \quad (9)$$

$$X^-=(r_1^-,r_2^-,r_3^-,\cdots,r_m^-) \quad (10)$$

(6)计算各评价单元与正理想解 D_i^+ 和负理想解 D_i^- 的欧式距离:

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (X^+-x_{ij}^*)^2},$$
$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n \quad (11)$$

$$D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (X^--x_{ij}^*)^2},$$

$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n \quad (12)$$

(7)计算各评价单元与最优值的相对接近度(合理度 R_i):

$$R_i=D_i^-/(D_i^++D_i^-)\times 100\%,i=1,2,\cdots,m \quad (13)$$

式中: m 为评价对象的个数; n 为评价指标的个数。

(8)按相对接近度大小排序, R_i 越接近 100%,表示第 i 个评价单元越接近最优水平,合理度越高; R_i 值越小,表示第 i 个评价单元水平越差,合理度越低。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理, Origin 9.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 DNDC 模型率定与验证

利用玉米产量、吸氮量和氮淋失量的试验数据对 DNDC 模型进行参数率定(2016 年)与验证(2017 年)。结果显示,DNDC 模型对不同类型地膜覆盖及不同施氮量条件下氮素迁移模拟精度较高,模拟氮淋失量与吸氮量的决定系数(R^2)在 0.92~0.99 范围内,一致性指数(EF)在 0.83~0.99 范围内,标准均方根误差(NRMSE)在 6.58%~19.28% 范围内(表 1)。同时产量的模拟值与观测值有较高的拟合精度, EF 与 R^2 均大于 0.93,NRMSE 均小于 10%。由于模型不能考虑重茬、病虫害等自然因素和种植密度等人为因素,难以将现实中不确定因素考虑齐全,故模拟值与实测值存在一定差异,但在合理误差范围内。从模拟效果与各项验证指标来看,DNDC 模型能拟合出覆膜和氮肥调控条件下玉米生长及氮素迁移的动态变化规律,可用于该地区生物降解地膜覆盖农田作物生产力与资源利用的预测和评估。

2.2 氮淋失量及利用效率对覆膜类型和施氮量的响应

玉米根系主要集中分布在 0—50 cm 土层,因此土壤深层的氮素不能被作物吸收利用。而 DNDC 模型可以很好地估算出 50 cm 以下的氮淋失量。通过

情景模拟可知,当施氮量较低时,不同地膜覆盖氮淋失量均较少。比如,仅施用基肥(56 kg/hm²)情景下,塑料地膜覆盖(PFM)比生物降解地膜覆盖(BFM)和无膜覆盖(NFM)氮淋失量分别提高 0.13%和 10.57%;当施氮量增加到 456 kg/hm²时,PFM 相比 BFM 和 NFM 处理氮淋失量分别提高 0.07%和 26.69%,且相比氮量为 56 kg/hm²,施氮量为 456

kg/hm²时 PFM、BFM 和 NFM 氮淋失量分别提高 606.54%,606.15%和 516.28%(图 3a)。可见,随施氮水平提高,不同地膜覆盖下的氮淋失量均呈线性增长(BFM: $y=0.621x-23.588,R^2=0.9804$;PFM: $y=0.6215x-23.294,R^2=0.9811$;NFM: $y=0.4753x-12.617,R^2=0.9796$),且 BFM 与 PFM 处理的氮淋失量无明显差异,均远大于 NFM 处理。

表 1 DNDC 模型的率定和验证

年份	处理	氮淋失量			吸氮量			产量		
		R^2	EF	NRMSE/%	R^2	EF	NRMSE/%	R^2	EF	NRMSE/%
2016	BFM0	0.99	0.99	15.91	0.99	0.99	8.50	0.99	0.93	7.52
	BFM1	0.96	0.95	14.50	0.99	0.98	7.10			
	BFM2	0.98	0.95	15.47	0.97	0.97	7.35			
	BFM3	0.99	0.99	7.65	0.96	0.95	9.24			
	PFM3	0.99	0.95	13.73	0.96	0.96	8.85			
	NFM3	0.97	0.94	17.05	0.98	0.98	6.58			
2017	BFM0	0.99	0.99	17.25	0.99	0.98	15.57	0.94	0.93	8.28
	BFM1	0.88	0.87	16.63	0.97	0.94	14.95			
	BFM2	0.92	0.83	19.28	0.99	0.98	9.75			
	BFM3	0.94	0.88	18.73	0.99	0.98	8.83			
	PFM3	0.96	0.91	16.23	0.99	0.98	8.54			
	NFM3	0.93	0.89	17.22	0.97	0.94	15.81			

不同地膜覆盖处理的氮肥利用率随施氮量增加先呈上升趋势(图 3b),均在施 106 kg/hm²氮肥时达到峰值。由于生物降解地膜破损,促进硝化反应,此时 BFM 的氮肥利用率比 PFM 处理提高 0.58%,且比 NFM 处理提高 10.11%。继续增加施氮量,不同地膜覆盖处理的氮肥利用率均呈线性下降(BFM: $y=-0.0972x+66.89,R^2=0.9905$;PFM: $y=-0.0951x+66.507,R^2=0.9904$;NFM: $y=-0.0826x+59.102$,

$R^2=0.9927$)。当施氮量为 456 kg/hm²时,BFM 的氮肥利用率比 PFM 处理降低 0.65%,但比 NFM 处理提高 8.22%,而 PFM、BFM 和 NFM 处理施 456 kg/hm²氮肥与施 106 kg/hm²氮肥相比氮肥利用率分别降低 56.88%,57.41%和 56.66%。可见,施用过量氮肥利用效率明显下降,不但增加农民的支出,还造成资源浪费,环境污染。从资源利用角度来看,表现为塑料地膜>生物降解地膜>无膜处理。

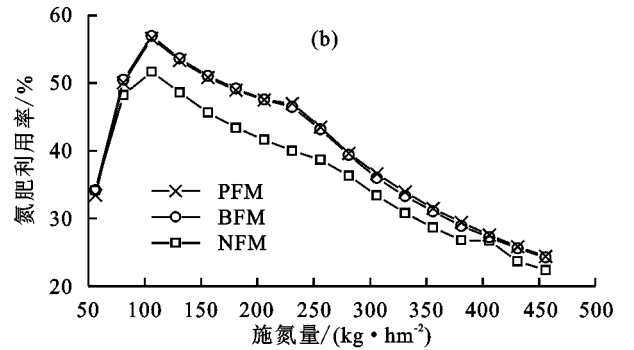
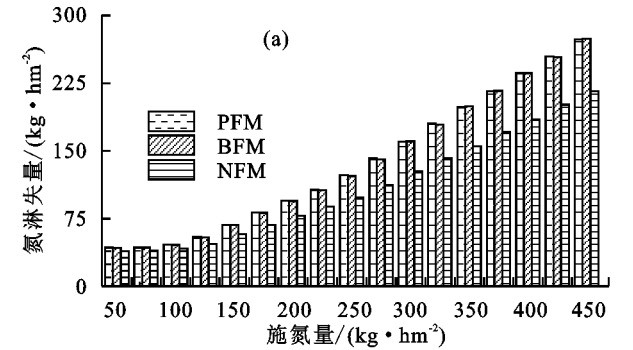


图 3 不同处理的氮淋失量和氮肥利用率

2.3 覆膜类型和施氮量对产量的影响

不同地膜覆盖处理的作物产量随施氮量增加呈先快速上升后趋于稳定并缓慢降低趋势(表 2)。BFM、PFM 和 NFM 处理分别在施氮量分别为 281,331,406 kg/hm²时产量达到峰值,但仅比施氮量为 256 kg/hm²时产量分别提高 0.30%,1.17%和 0.39%,且继续增加施氮量,产量不再提高。在生物降解地膜覆盖下获得最大

产量的施氮水平下(281 kg/hm²),PFM 比 BFM 处理产量仅提高 2.64%,但比 NFM 处理提高 12.71%。

产量与施氮量存在阈值效应,相比施氮量为 56 kg/hm²时,3 种覆膜处理的最大产量平均提高 241.33%,同时 BFM 与 PFM 处理的产量较相近,均明显高于 NFM。然而连续多年覆盖塑料地膜造成农膜在土壤中累积,影响作物—土壤系统,导致作物减产。在施氮量

为 281 kg/hm²时,连续覆盖 10 年塑料地膜(PFM₁₀)和连续覆盖 52 年塑料地膜后(PFM₅₂)处理的产量分别比 BFM 处理分别降低 2.55%和 12.51%;与 NFM 处理相比,PFM₁₀处理的产量提高 7.37%,而 PM₅₂处理的产量降低 3.60%。从对产量的影响来看,表现为覆盖 1 年塑料地膜>生物降解地膜>连续覆盖 10 年塑料地膜>无膜>连续覆盖 52 年塑料地膜处理。

2.4 覆膜类型和施氮量对经济效益的影响

地膜覆盖明显提高玉米产量和经济收益,但成本也随之增加。BFM 处理在施氮量为 281 kg/hm²时收益最大,与 PFM 处理相比毛收益仅降低 2.24%(表 3),因为尽管生物降解地膜覆盖不用残膜回收成本,但生产成本低,导致净收益反而降低 6.84%。BFM 与 NFM 处理相比,毛收益和净收益分别提高 10.18%和 3.17%;与 PFM₁₀和 PFM₅₂处理相比,毛收益分别提高 2.62%和 14.30%;净收益分别提高-1.11%和 13.22%。NFM 处理在施氮量为 406 kg/hm²时毛收益最大,施氮量为 281 kg/hm²时净收益最大。可见,无地膜覆盖处理下,随施氮量增加毛收益增长速度慢于成本增加速度,导致净收益降低,但远高于 PFM₅₂处理。从对经济影响来看,表现为覆盖 1 年塑料地膜>连续覆盖

10 年塑料地膜>生物降解地膜>无膜>连续覆盖 52 年塑料地膜处理。

表 2 不同类型地膜覆盖和不同施氮量对作物产量的影响
单位:kg/hm²

施氮量	生物降解地膜	塑料地膜			无膜
		覆盖 1 年	覆盖 10 年	覆盖 52 年	
56	3392.81	3422.44	3260.56	2927.21	3025.87
81	5227.43	5259.93	5011.14	4498.82	4670.28
106	6624.76	6674.26	6358.57	5708.49	5935.01
131	7449.32	7514.93	7159.47	6427.52	6772.08
156	8144.66	8219.08	7830.32	7029.78	7321.81
181	8828.06	8878.37	8458.42	7593.67	7823.71
206	9451.76	9578.15	9125.10	8192.19	8296.06
231	10864.15	11205.57	10675.55	9584.12	8807.09
256	11366.53	11666.59	11114.76	9978.43	9845.51
281	11400.14	11661.05	11109.48	9973.70	10346.50
306	11321.70	11772.53	11215.69	10069.04	10366.90
331	11323.56	11803.57	11245.26	10095.59	10342.09
356	11377.42	11777.49	11220.41	10073.29	10350.06
381	11314.77	11780.36	11223.15	10075.74	10361.71
406	11387.29	11765.88	11209.35	10063.36	10387.31
431	11341.44	11655.18	11103.89	9968.68	10368.84
456	11383.48	11650.96	11099.87	9965.07	10366.85

表 3 不同处理的成本和收益

施氮量/ (kg·hm ⁻²)	塑料地膜						生物降解地膜			无膜		
	覆盖 1 年		覆盖 10 年		覆盖 52 年		成本/元	毛收益/元	净收益/元	成本/元	毛收益/元	净收益/元
	成本/元	毛收益/元	成本/元	毛收益/元	成本/元	毛收益/元						
56	3700	6571.08	2871.08	6260.28	5620.24	1920.24	4450	6514.20	2064.20	2950	5809.67	2859.67
81	3745	10099.07	6354.07	9621.39	8637.73	4892.73	4495	10036.67	5541.67	2995	8966.94	5971.94
106	3790	12814.58	9024.58	12208.45	8418.45	10960.30	4540	12719.54	8179.54	3040	11395.22	8355.22
131	3835	14428.67	10593.67	13746.18	9911.18	12340.84	4585	14302.69	9717.69	3085	13002.39	9917.39
156	3880	15780.63	11900.63	15034.21	11154.21	13497.18	4630	15637.75	11007.75	3130	14057.88	10927.88
181	3925	17046.47	13121.47	16240.17	12315.17	14579.85	4675	16949.88	12274.88	3175	15021.52	11846.52
206	3970	18390.05	14420.05	17520.19	13550.19	15729.00	4720	18147.38	13427.38	3220	15928.44	12708.44
231	4015	21514.69	17499.69	20497.06	16482.06	18401.51	4765	20859.17	16094.17	3265	16909.61	13644.61
256	4060	22399.85	18339.85	21340.34	17280.34	19158.59	4810	21823.74	17013.74	3310	18903.38	15593.38
281	4105	22389.22	18284.22	21330.20	17225.20	19149.50	4855	21888.27	17033.27	3355	19865.28	16510.28
306	4150	22603.26	18453.26	21534.12	17384.12	19332.56	4900	21737.66	16837.66	3400	19904.45	16504.45
331	4195	22662.85	18467.85	21590.90	17395.90	19383.53	4945	21741.24	16796.24	3445	19856.81	16411.81
356	4240	22612.78	18372.78	21543.19	17303.19	19340.72	4990	21844.65	16854.65	3490	19872.12	16382.12
381	4285	22618.29	18333.29	21548.45	17263.45	19345.42	5035	21724.36	16689.36	3535	19894.48	16359.48
406	4330	22590.49	18260.49	21521.95	17191.95	19321.65	5080	21863.60	16783.60	3580	19943.64	16363.64
431	4375	22377.95	18002.95	21319.47	16944.47	19139.87	5125	21775.56	16650.56	3625	19908.17	16283.17
456	4420	22369.84	17949.84	21311.75	16891.75	19132.93	5170	21856.28	16686.28	3670	19904.35	16234.35

2.5 不同类型地膜覆盖及氮肥调控的综合评价

利用 DNDC 模型模拟不同类型地膜覆盖和不同施氮量处理的产量、氮淋失量、氮肥利用率和净收益,并基于改进的 TOPSIS 法评估地膜类型和施氮量的合理度。结果显示,不同地膜覆盖下均在施氮量为 106 kg/hm²时氮肥利用率最高,氮淋失量较少,但产

量和净收益较低(图 4)。随施氮量增加,尽管不同类型地膜覆盖处理的产量和净收益迅速上升,但是氮淋失量增加,氮肥利用率降低,从而合理度呈下降趋势。当施氮量为 231~256 kg/hm²时,BFM 和 PFM 处理的合理度再次达到峰值,且同一地膜覆盖下施用 231,256 kg/hm²氮肥的合理度无明显差异。该施氮

条件下比施用 106 kg/hm² 氮肥的合理度与氮肥利用率分别降低 0.43%~1.57% 和 16.98%~24.21%, 但产量、净收益和氮淋失量依次提高 63.99%~74.80%, 93.91%~108.00% 和 131.56%~168.53%, 继续增加施氮量合理度呈下降趋势。对于农民, 如果优先考虑产量、收益和环境时, 得到地膜覆盖下最优施氮量为 231~256 kg/hm²。在该施氮水平下, 均为 PFM 处理的合理度最高(图 4)。而 BFM 与 PFM 处理相比,

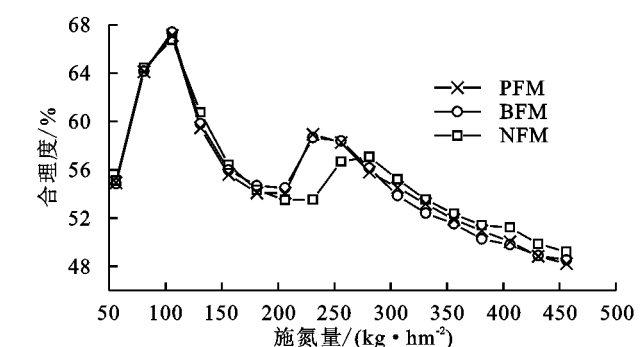


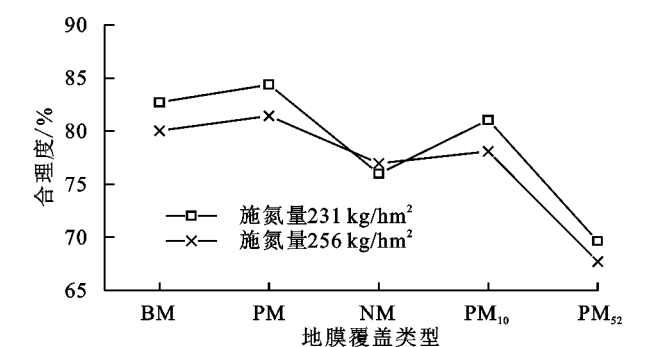
图 4 不同施氮量与不同地膜覆盖的综合评价

3 讨论

3.1 施氮量对产量、氮淋失、NUE 和收益的影响

施氮量增加提高土层硝态氮含量, 增加作物吸氮量, 促进作物生长, 进而提高产量。但作物对氮素吸收的能力有限, 过量施用氮肥, 作物不再有明显的生长变化。本研究发现, 当施氮量增加至 256 kg/hm² 时, 产量上升至平台值, 继续增加施氮量, 产量不再提高, 甚至出现缓慢降低趋势。这是因为硝态氮含量增加导致土层溶质势较高, 进而抑制水分吸收, 吸氮量和光合能力不再提高^[2-3]。Xue 等^[15] 研究发现, 施氮量从 0 增加到 300 kg/hm² 时, 蓖麻籽产量持续增加, 但当施氮量增加到 400 kg/hm² 时, 蓖麻籽产量明显降低, 减产 7.24%。同时土层中的硝态氮易随水分迁移, 硝态氮浓度越高, 淋失量越大。Chen 等^[9] 利用 HYDRUS 模型模拟生物降解地膜覆盖下土壤氮平衡发现, 当施氮量从 210 kg/hm² 增加至 280 kg/hm², 硝态氮含量增加 33.63%, 氮淋失量增加 30.02%。本研究也发现, 氮淋失量与施氮量存在线性关系, 其函数关系式为 $y = 0.621x - 23.588$, $R^2 = 0.9804$ 。随着施氮量增加, 氮素以气体形式的挥发同样增加, 巨晓棠等^[16] 研究发现, 施氮量增加至 360 kg/hm² 时, 氮挥发损失增加至 7.20%, 导致 NUE 降低。因此, NUE 与氮淋失量呈相反的变化趋势, 随施氮量增加而下降。Yin 等^[17] 研究发现, 当施氮量由 160 kg/hm² 增加至 240 kg/hm², NUE 降低 21.63%。净收益与产量相关, 在控施氮条件下, 净收益随产量增加而增加, 而当过量施氮时产量增加创造的收益低于施氮量增加所需要的成本, 因此本研究发现, 随施氮量增加, 净收益呈先上升后下降的趋

合理度平均仅降低 1.90%, 但与 NFM 处理相比, 合理度提高 6.39%。随着塑料地膜覆盖年限增加, 合理度明显下降, 连续覆盖 10 年 (PFM₁₀) 和 52 年 (PFM₅₂) 平均分别降低 4.00% 和 17.20%。在连续覆盖 52 年后, 合理度已比 NFM 处理降低 10.20%。综合考虑经济、生态和社会三方面, 从可持续发展角度来看, 在生物降解地膜覆盖下施 231~256 kg/hm² 氮肥是干旱地区最合理的覆膜施氮制度。



势, 在种植花椰菜、小麦、棉花和烤烟等作物上, 均得到相似的结论^[18-19]。

3.2 不同地膜覆盖对产量、氮淋失、NUE 和收益的影响

地膜覆盖切断土壤与大气的连接, 减少土壤水分挥发, 提高土壤温度, 为作物营造良好的生长环境起到增产作用, 本研究发现, 塑料地膜比无膜覆盖产量提高 12.71%。但塑料地膜不易降解, 可在土壤中存留约 200 年, 且随着覆盖年限增加, 残膜量增加, 造成减产^[20]。诸多学者^[21-22] 研究发现, 生物降解地膜是塑料地膜理想的替代品。随着生物降解地膜的破损, 恢复土壤与大气之间的气体传输通道, 蒸散增加, 保温效果减弱, 产量也有一定下降, 但并不显著。李仙岳等^[3] 研究发现, 生物降解地膜比塑料地膜产量仅降低 3.97%, 与本研究结果一致。同时, 地膜也减少氮素以气体形式损失, 刘小娥^[23] 研究发现, 地膜覆盖后氨气挥发减少 90.00%, 因此土层中硝态氮含量和氮淋失量也高于无膜处理, 分别提高 24.66% 和 26.25%^[2]。生物降解地膜在降解破损后, 不仅增加氮素挥发, 还使降雨入渗量增加, 氮淋失量也随之上升^[9], BFM 氮淋失量与 PFM 无明显差异。地膜覆盖处理的 NUE 同样无明显差异, 均显著高于 NFM。虽然不覆膜处理减少人工和地膜成本的投入, 但产量低, 因此净收益低于覆膜处理。

3.3 施肥制度优化与不同地膜评价

科学的施肥制度与覆盖适宜的地膜能够保证较高的产量与氮肥利用率, 并减少农业生产中氮素与残膜导致的面源污染^[2]。Zhang 等^[24] 利用 DNDC 模型模拟估算可接受的产量和氮淋失量, 确定玉米临界施氮量为 150~240 kg/hm²。然而选取适宜的覆盖地

膜、制定合理的施氮制度,不能仅考虑某一方面最优,现有研究多是单纯考虑增产效果、氮淋失或经济效益等单一指标作为约束条件,为了简化问题,往往忽略经济、生态和社会 3 方面的协调和统一,选取的最优方案容易失真。需根据研究对象的目标与需求侧重点,通过建立多目标、多情景模型来得到 3 方面综合最优方案。严富来等^[25]利用灰色关联度分析法对于物质累积、产量、籽粒氮素累计和水氮利用率进行综合评价发现,最优施氮量为 300 kg/hm²,但由于其试验处理较少,施氮制度寻优的精度有所不足。而借助模型软件,能比较经济、高效地掌握作物生长发育和土壤氮迁移过程,再利用评价方法能更精准地提出最优施氮量。因此,本试验利用 DNDC 模型进行多情景模拟,并结合改进的 TOPSIS 法对产量、氮淋失量、残膜量、氮肥利用率和净收益 5 个指标进行综合评价,从生态、社会和经济 3 方面选出,在生物降解地膜覆盖下施用氮肥 231~256 kg/hm²,是干旱地区最合理的覆膜施肥制度。

4 结论

(1)DNDC 模型对不同类型地膜覆盖及不同施氮量条件下氮淋失量、吸氮量和产量的模拟精度较高, EF 与 R^2 均大于 0.83,NRMSE 均小于 20%,该模型可用于干旱区生物降解地膜覆盖作物生产力与资源利用的预测和评估。

(2)随施氮水平提高,不同地膜覆盖下的氮淋失量均呈线性增长;当施氮量增加至 106 kg/hm²时,氮肥利用率最大,继续增加施氮量呈线性下降;当施氮量增加至 281 kg/hm²时,生物降解地膜覆盖下的产量和净收益达到峰值。与塑料地膜覆盖相比,产量、氮淋失量、氮肥利用率无明显差异,均显著高于无膜覆盖处理,且净收益提高 3.17%。

(3)连续 52 年覆盖塑料地膜后,由残膜累积导致的玉米减产率将大于由地膜覆盖技术引起的增产率,进而收益也随之下落。利用改进的 TOPSIS 法对产量、氮淋失量、残膜量、氮肥利用率和净收益 5 个方面进行综合评价,选出在生物降解地膜覆盖下施用氮肥 231~256 kg/hm²是干旱地区最合理的覆膜施氮制度。

参考文献:

- [1] 郭亮.世界粮食安全现状及粮食供求展望[J].世界农业,2015(1):17-23.
- [2] 李仙岳,冷旭,张景俊,等.干旱区降解地膜覆盖农田硝态氮迁移与利用特征研究[J].农业机械学报,2020,51(7):294-303.
- [3] 李仙岳,冷旭,张景俊,等.北方干旱区降解膜覆盖农田玉米生长和氮素利用模拟及优化[J].农业工程学报,2020,36(5):113-121.
- [4] Li C, Moore-Kucera J, Lee J, et al. Effects of biodegradable mulch on soil quality[J].Applied Soil Ecology, 2014,79(1):59-69.
- [5] 谷晓博,李援农,杜娅丹.生物降解地膜促进冬油菜养分吸收减少土壤硝态氮累积[J].农业工程学报,2016,32(10):90-97.
- [6] Shen L X, Zhang Y M, Lan Y C, et al. Effects of degradable films with different degradation cycles on soil temperature, moisture and maize yield[J].International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019,12(3):36-44.
- [7] 张景俊.不同可降解地膜的降解特性及其覆盖下的水—热—盐—氮变化特征研究[D].内蒙古:内蒙古农业大学,2017.
- [8] 李仙岳,丁宗江,闫建文,等.沙区降解地膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究[J].农业机械学报,2018,49(7):261-270.
- [9] Chen N, Li X Y, Šimůnek J, et al. The effects of biodegradable and plastic film mulching on nitrogen uptake, distribution, and leaching in a drip-irrigated sandy field[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2020, 292:e106817.
- [10] 方崇,张春乐,陆明本.基于熵权的 TOPSIS 模型在右江灌区节水改造效益综合评价中的应用[J].节水灌溉,2011(2):52-54,65.
- [11] 冷旭.干旱区生物降解地膜覆盖玉米农田追施氮肥制度研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [12] 牛文全,邹小阳,刘晶晶,等.残膜对土壤水分入渗和蒸发的影响及不确定性分析[J].农业工程学报,2016,32(14):110-119.
- [13] 毕继业,王秀芬,朱道林.地膜覆盖对农作物产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(11):172-175.
- [14] Leng X, Li X Y, Chen N, et al. Evaluating the effects of biodegradable film mulching and topdressing nitrogen on nitrogen dynamic and utilization in the arid cornfield[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258:e107166.
- [15] Xue X R, Mai W X, Zhao Z Y, et al. Optimized nitrogen fertilizer application enhances absorption of soil nitrogen and yield of castor with drip irrigation under mulch film[J].Industrial Crops and Products,2017,95:156-162.
- [16] 巨晓棠,刘学军,张福锁.冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J].中国农业科学,2002,35(11):1361-1368.
- [17] Yin M H, Li Y N, Xu Y B. Comparative effects of nitrogen application on growth and nitrogen use in a winter wheat/summer maize rotation system[J].Journal of Integrative Agriculture,2017,16(9):2062-2072.

[10] Zamanian K, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y. Nitrogen fertilization raises CO₂ efflux from inorganic carbon: A global assessment[J]. Global Change Biology, 2018, 24(7): 2810-2817.

[11] Li C H, Li Y, Tang L S, et al. The effects of long-term fertilization on the accumulation of organic carbon in the deep soil profile of an oasis farmland[J]. Plant and Soil, 2013, 369(1/2): 645-656.

[12] Apesteguia M, Plante A F, Virto I. Methods assessment for organic and inorganic carbon quantification in calcareous soils of the Mediterranean region[J]. Geoderma Regional, 2018, 12(1): 39-48.

[13] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75(4): 529-538.

[14] 高奇奇, 张玮, 马立晓, 等. 采样深度和计算方法影响保护性耕作土壤碳氮储量的评估结果[J]. 中国农业气象, 2021, 42(1): 1-12.

[15] Monger H C, Gallegos R A. Biotic and abiotic processes and rates of pedogenic carbonate accumulation in the southwestern United States-relationship to atmospheric CO₂ sequestration[C]. Paper Presented at the Workshop on Global Climate Change and Pedogenic Carbonates. Tunis, Tunisia, 1997.

[16] Barreto M S C, Ramlogan M, Oliveira D M S, et al. Thermal stability of soil organic carbon after long-term manure application across land uses and tillage systems in an oxisol[J/OL]. Catena, 2021, 200. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105164.

[17] 陈春兰, 陈安磊, 魏文学, 等. 长期施肥对红壤稻田剖面土壤碳氮累积的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 14-20.

[18] Chapin FSIII, Mastson P A, Mooney H A. Terrestrial production process, in principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer-Verlag New York, 2002.

[19] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615-1621.

[20] 荣井荣, 李晨华, 王玉刚, 等. 长期施肥对绿洲农田土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 592-597.

[21] Du Z L, Angers D A, Ren T S, et al. The effect of no-till on organic C storage in Chinese soils should not be overemphasized: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 236(1): 1-11.

[22] 邱琛, 韩晓增, 陈旭, 等. CT 扫描技术研究有机物料还田深度对黑土孔隙结构影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 98-107.

[23] 孟祥宇, 冉成, 刘宝龙, 等. 秸秆还田配施氮肥对东北黑土稻区土壤养分及水稻产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(3): 167-172.

[24] Landi A, Mermut A R, Anderson D W. Origin and rate of pedogenic carbonate accumulation in Saskatchewan soils, Canada[J]. Geoderma, 2003, 117(1/2): 143-156.

[25] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 施入不同土层的秸秆腐殖化特征及对玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 563-570.

[26] Leifeld J, Franko U, Schulz E. Thermal stability of soil organic matter responds to long-term fertilization practices[J]. Biogeosciences Discussions, 2006, 3(2): 309-320.

[27] 陈涛, 郝晓晖, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 1(7): 1494-1500.

(上接第 332 页)

[18] 张娜, 徐文修, 李兰海, 等. 施氮量对滴灌冬小麦冠层垂直结构特征、粒叶比及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2491-2498.

[19] 陈梦妮, 李永山, 王慧, 等. 不同施氮量对棉花花铃期的生长特性与产量及经济效益的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(4): 449-454.

[20] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 覆膜年限及灌水方法对河套灌区农膜残留的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 159-165.

[21] Gu X B, Li Y N, Du Y D. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 171: 42-50.

[22] Wang Z H, Wu Q, Fan B H, et al. Effects of mulching biodegradable films under drip irrigation on soil hydrothermal conditions and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 477-485.

[23] 刘小娥. 地膜覆盖对半干旱区玉米地土壤氮素循环和肥料氮去向的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.

[24] Zhang Y T, Wang H Y, Liu S, et al. Identifying critical nitrogen application rate for maize yield and nitrate leaching in a Haplic Luvisol soil using the DNDC model [J]. Science of the Total Environment, 2015, 514: 388-398.