DOI: 10. 11686/cyxb2025443 http://cyxb. magtech. com. cn
银敏华, 常文静, 银建新, 等. 基于减排效应的苜蓿草地种植模式与氮肥管理优化研究. 草业学报, 2026, 35(10): 61－78.
YIN Min-hua, CHANG Wen-jing, YIN Jian-xin, *et al*. Optimization of alfalfa pasture planting patterns and nitrogen fertilizer management to reduce greenhouse gas emissions. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(10): 61－78.

基于减排效应的苜蓿草地种植模式与氮肥管理优化研究

银敏华[1], 常文静[1], 银建新[2], 段丫丫[1], 李海燕[1], 王彦彪[1], 康燕霞[1*], 马彦麟[1], 王亚玉[1], 齐广平[1]
(1. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 浙江省质量科学研究院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 在全球温室气体排放总量中, 农业生产是重要的贡献源。苜蓿作为全球种植面积最大的人工牧草, 虽具备根瘤固氮能力, 但在以高产优质为目标的集约化生产中常施用一定量的外源氮肥, 其温室气体排放效应不容忽视。优化种植管理模式是减少苜蓿草地温室气体排放的有效途径。本研究通过设置3种种植模式[传统平作(FP)、垄覆生物降解地膜(BM)、垄覆普通地膜(PM)]、2种氮肥类型[(尿素(U)、控释氮肥(C)]和4种施氮水平(0、80、160、240 kg·hm^{-2}), 系统分析了种植模式与氮肥管理对苜蓿草地CO_2、CH_4和N_2O排放的影响。结果表明, 苜蓿草地为CO_2、N_2O净排放源和CH_4吸收汇。与施用尿素相比, 施用控释氮肥能显著降低CO_2和N_2O的累积排放量, 并提高CH_4的累积吸收量。苜蓿草地CO_2、N_2O累积排放量和CH_4累积吸收量均随施氮水平提高呈增加趋势, 且表现为PM>BM>FP。BM和PM的苜蓿产量较FP分别平均提高43. 56%和30. 07%, 施用控释氮肥的苜蓿产量较施用尿素平均提高8. 46%, 施用160 kg·hm^{-2}控释氮肥结合垄覆生物降解地膜(BMC_2)的苜蓿产量最高(24. 83 t·hm^{-2}), 较不覆膜不施氮处理提高97. 11%。施用控释氮肥的全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)分别较施用尿素平均降低12. 26%和15. 04%。BM的GWP较PM处理平均降低15. 28%, 较FP处理平均提高15. 12%, GHGI较PM和FP平均分别降低11. 84%和17. 18%。综上, 在本研究条件下, 施用160 kg·hm^{-2}控释氮肥结合垄覆生物降解地膜(BMC_2处理)是甘肃引黄灌区及类似生态区苜蓿草地增产减排的推荐种植管理模式。

关键词: 控释氮肥; 生物降解地膜; 温室气体排放; 种植管理模式; 苜蓿

Optimization of alfalfa pasture planting patterns and nitrogen fertilizer management to reduce greenhouse gas emissions

YIN Min-hua[1], CHANG Wen-jing[1], YIN Jian-xin[2], DUAN Ya-ya[1], LI Hai-yan[1], WANG Yan-biao[1], KANG Yan-xia[1*], MA Yan-lin[1], WANG Ya-yu[1], QI Guang-ping[1]
1. *College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Zhejiang Institute of Quality Sciences, Hangzhou* 310018, *China*

Abstract: Agricultural production is a significant contributor to global greenhouse gas emissions. Alfalfa (*Medicago sativa*) is the world's most widely cultivated forage crop, and it fixes nitrogen *via* its root nodules. However, in

收稿日期: 2025-10-23; 改回日期: 2026-01-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(52069001, 52269009和52469007), 甘肃农业大学第五批"伏羲青年英才"项目(Gaufx-05Y11), 甘肃农业大学青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2023-12), 甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0020)和甘肃农业大学"西北旱区特色作物水土资源高效利用创新"学科团队建设专项(GAU-XKTD-2022-09)资助。
作者简介: 银敏华(1987－), 女, 山西忻州人, 副教授, 博士。E-mail: yinmh@gsau. edu. cn
*通信作者 Corresponding author. E-mail: yanxiakang@gsau. edu. cn

intensive production systems targeting high yields and quality, this crop is often supplied with nitrogen fertilizers, and this impacts greenhouse gas emissions. Optimizing planting management practices is an effective approach to mitigate greenhouse gas emissions from alfalfa fields. In this study, we analyzed the effects of planting patterns and nitrogen management on CO_2, CH_4, and N_2O emissions from alfalfa fields. We conducted a field experiment to analyze the effects on greenhouse gas emissions of three planting patterns (flat planting, FP; ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over the ridge, BM; ridge-furrow planting with plastic film mulching over the ridge, PM), two types of nitrogen fertilizer (urea, U; controlled-release nitrogen fertilizer, C), and four nitrogen application levels (0, 80, 160, 240 kg·ha^{-1}). The results show that alfalfa fields served as a net source of CO_2 and N_2O emissions and a sink for CH_4 absorption. Compared with application of urea, application of controlled-release nitrogen fertilizer significantly reduced cumulative CO_2 and N_2O emissions while increasing cumulative CH_4 uptake. Cumulative CO_2 emissions, N_2O emissions, and CH_4 uptake all increased with increasing nitrogen application levels, with the largest increases in the PM treatment, followed by the BM treatment, and then the FP treatment. Alfalfa yields in the BM and PM treatments were 43.56% and 30.07% higher, respectively, than that in the FP treatment. Alfalfa yields were 8.46% higher in the controlled-release nitrogen fertilizer treatments than in the urea treatments. The highest yield (24.83 t·ha^{-1}) was in the treatment combining 160 kg·ha^{-1} controlled-release nitrogen fertilizer and biodegradable mulch film on ridges, representing a 97.11% increase compared with the yield in the unmulched, nitrogen-free treatment. The global warming potential (GWP) and greenhouse gas emission intensity (GHGI) were 12.26% and 15.04%, lower, respectively, in the controlled-release nitrogen fertilizer treatment than in the urea treatment. The GWP in the BM treatment was 15.28% lower than that in the PM treatment, and 15.12% higher than that in the FP treatment. The lowest GHGI was in the BM treatment, and was 11.84% lower than that in the PM treatment and 17.18% lower than that in the FP treatment. In summary, under these conditions, application of 160 kg·ha^{-1} controlled-release nitrogen fertilizer combined with ridge-covered biodegradable mulch (BMC_2 treatment) is the recommended cropping management system for increasing alfalfa yields and reducing greenhouse gas emissions in the Gansu Yellow River irrigation district and similar ecological zones.

Key words: controlled-release nitrogen fertilizer; biodegradable film; greenhouse gas emission; planting and management pattern; alfalfa

温室气体大量排放是全球气候变暖的驱动源[1],已引起国际社会的广泛关注。三大温室气体中,CH_4和N_2O的百年尺度全球增温潜势分别是CO_2的25和298倍[2]。据统计,20%的CO_2、70%的CH_4和90%的N_2O源于农业生产活动,其排放量占全球温室气体排放总量的比例到2050年将增加至50%以上[3]。在农业生产中,普遍存在重生产轻生态的现象。不合理的作物种植管理措施在制约农业生态系统生产潜力发挥的同时,也会导致温室气体大量排放[4]。因此,探究作物适宜的种植管理模式以协同提升生产与生态效益,对推动农业转型升级和绿色高质量发展具有重要意义。

氮是植物生长发育必需的大量营养元素,在蛋白质、核酸、叶绿素等关键生物分子合成中发挥着关键作用[5]。施用氮肥是保障农业高效生产和国家粮食安全的关键[6]。然而,施氮过量会引发多重生产与生态问题,如作物品质下降、养分资源浪费、生产成本增加及土壤酸化、水体富营养化、温室气体加剧排放等[7]。为此,国内外学者聚焦氮素高效利用,从氮肥类型选择、施肥技术改进、水氮协同管理和农艺措施优化等方面开展了系列研究。研究发现,缓控释氮肥、稳定性肥料(添加硝化/脲酶抑制剂)及水溶性氮肥(如聚磷酸铵、硝酸铵钙)等通过物理包膜、化学转化或生物活化等机制,能有效减少氨挥发与硝态氮淋失,显著提升作物氮素利用率[8]。与传统撒施相比,深施、条施、穴施及水肥一体化等改进施肥方式通过将肥料集中施于作物根系附近或结合灌溉精准供给,可显著降低氮素挥发、淋溶和径流损失,在降低氮肥用量和生产成本的同时,促进根系生长发育,提升作物产量和品质,有助于节本增效和环境友好[9-10]。水氮协同是基于实时监测水氮环境,动态管理水氮投入,利用水氮耦合技术实

现氮素资源高效利用，在促进作物稳产提质的同时节水减氮，兼顾经济与生态效益[11]，已广泛应用于多种粮经作物[12-13]。作为重要的农艺措施，垄作覆膜已成功应用于干旱半干旱地区农业生产。与传统平作相比，垄作覆膜种植具有诸多优点，可通过改变微地形增加地表面积，提高太阳辐射接收量；加大昼夜温差，促进作物生长。此外，垄作覆膜还具有集雨、减蒸和保墒等功能。研究表明，普通地膜覆盖后残膜会显著改变土壤入渗特性，造成土壤水分再分布失衡，导致作物根系发育及水肥吸收受阻[14]。生物降解地膜具有明显的亲环境特性，且其覆盖效应与普通地膜无显著差异[15]。

综上，国内外学者在优化作物种植施氮模式方面开展了大量研究，但主要集中于玉米[16]（*Zea mays*）、水稻[17]（*Oryza sativa*）、马铃薯[18]（*Solanum tuberosum*）等一年生作物，对多年生牧草特别是苜蓿（*Medicago sativa*）的研究较为缺乏，关于优化种植施氮模式对苜蓿草地温室气体排放效应的研究更是少见。苜蓿是全球栽培面积最大的优质豆科牧草，具有高产、优质、抗逆性强、改善土壤肥力等多维生产生态效益[19]，但其特有的固氮能力也进一步增加了氮素利用的复杂性。外源氮素可能抑制苜蓿根瘤固氮，改变土壤碳氮循环的微生物过程（如硝化/反硝化作用），进而对温室气体排放产生不同于非豆科作物的影响[20]。目前，关于不同氮肥类型与用量对苜蓿－土壤系统温室气体排放的调控过程及机理尚缺乏量化研究。苜蓿具有较强的生物固氮能力，但在高集约化生产体系中，其固氮量往往难以完全满足高产优质苜蓿生长的全周期氮素需求，尤其在生长旺盛期或刈割后再生阶段，土壤氮素供应易出现阶段性短缺[21]。甘肃引黄灌区日照充足、昼夜温差大，种植苜蓿具有得天独厚的优势，已发展成为中国优质苜蓿主产区[22]。该区域土壤的固有速效氮含量普遍偏低，高频刈割生产导致氮素持续输出，仅依赖根瘤固氮易导致土壤氮库耗竭和产量下降[23]。因此，为实现生产生态协同提升，在苜蓿实际生产中常施用适量氮肥。鉴于此，本研究系统分析了种植模式、氮肥类型和施氮水平对苜蓿草地温室气体排放特性的影响，旨在：1）解析种植施氮模式对苜蓿草地 CO_2、CH_4 和 N_2O 排放影响的规律性与差异性；2）量化不同种植施氮模式下苜蓿草地的全球增温潜势和温室气体排放强度；3）获得甘肃引黄灌区及相似生态区苜蓿草地减排的优化种植施氮策略。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2023 和 2024 年 4－9 月在甘肃景泰川电力提灌水资源利用中心灌溉试验站（37°12′ N，104°05′ E，海拔 1572 m）开展。试验区属温带干旱大陆性气候，多年平均日照时数、辐射量、无霜期和蒸发量分别为 2652 h、6.18×10^5 J·cm^{-2}、191 d 和 2761 mm。苜蓿生育期间日平均气温和降水总量在 2023 年分别为 8.6 ℃和 201.66 mm，在 2024 年分别为 12.28 ℃和 279.87 mm（图 1）。试验地耕层土壤容重 1.61 g·cm^{-3}、pH 值 8.11，田间持水量 24.10%（体积含水量），有机质、全氮和速效氮含量分别为 6.09 g·kg^{-1}、1.62 g·kg^{-1} 和 74.51 mg·kg^{-1}。

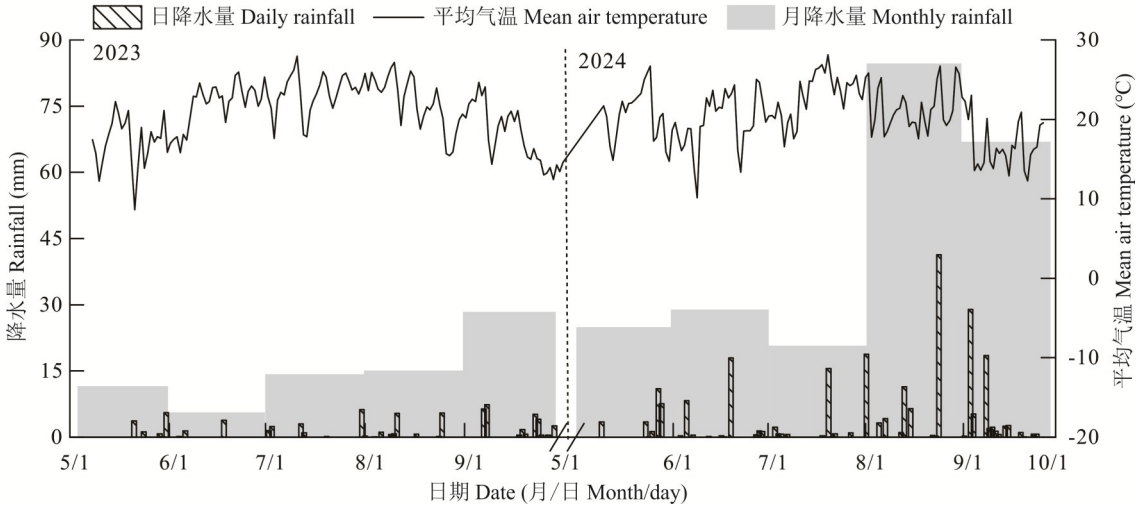


图 1　苜蓿生长期间降水与气温分布

Fig. 1　Rainfall and air temperature distributions during alfalfa growth period

1.2 试验设计

供试品种为“陇东紫花苜蓿”(简称苜蓿)。于2021年4月条播,播种前10 d平整土地,播种量为22.5 kg·hm^{-2}。试验采用完全随机区组设计,设置种植模式、氮肥类型和施氮水平3个因素(表1)。种植模式(图2)包括传统平作(FP),垄覆生物降解地膜(BM,山东天壮环保科技有限公司生产,诱导期90 d)和垄覆普通地膜(PM,兰州金土地塑料制品有限公司生产)。两种地膜的幅宽和厚度均分别为100 cm和0.008 mm。氮肥类型包括控释氮肥[C,山东金正大生态工程集团股份有限公司生产,氮(nitrogen)的质量分数为30%,于每年苜蓿返青前一次性基施]和尿素(U,甘肃刘化集团有限责任公司,氮的质量分数46.4%,按6∶2∶2分别于每年苜蓿第一茬返青前、第一茬和第二茬刈割后施入)。施氮水平包括0、80、160和240 kg·hm^{-2}。试验共21个处理,每个处理重复3次,小区面积为42.9 m^2(5.5 m×7.8 m)。灌水施肥采用滴灌水肥一体化方式。垄作和平作小区的滴灌带间距分别为40和60 cm,滴头设计流量为2 L·h^{-1}。各小区输水管上安装有阀门和水表(精度0.001 m^3),用于控制灌水量。磷肥(过磷酸钙,P_2O_5质量分数16%)和钾肥(氯化钾,K_2O质量分数60%)各50 kg·hm^{-2}作为基肥于每年第一茬苜蓿返青前一次性施入。灌水及其他田间管理措施同当地苜蓿草地。苜蓿3茬刈割时间分别为2023年6月20日、7月29日和9月12日,以及2024年6月5日、7月28日和9月25日。

图3为两年生长季中,各处理苜蓿草地NO_3^--N和NH_4^+-N含量的平均值。施用控释氮肥条件下,土壤硝态氮和铵态氮含量分别为8.86～17.06 mg·kg^{-1}、2.36～6.21 mg·kg^{-1};施用尿素条件下,土壤硝态氮和铵态氮含量分别为10.33～20.78 mg·kg^{-1}、2.28～6.23 mg·kg^{-1}。

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

种植模式 Cropping patterns	氮肥运筹 Nitrogen fertilizer management		
	氮肥类型 Nitrogen fertilizer types	施氮水平 Nitrogen application levels (kg·hm^{-2})	三茬施用比例 Application rate among three crops
平作 Flat planting (FP)	尿素 Urea (U)	80 (U_1)	6∶2∶2
		160 (U_2)	6∶2∶2
		240 (U_3)	6∶2∶2
	控释氮肥 Controlled release nitrogen fertilizer (C)	80 (C_1)	1∶0∶0
		160 (C_2)	1∶0∶0
		240 (C_3)	1∶0∶0
	不施氮肥 No nitrogen fertilization (N_0)	0 (N_0)	—
垄覆生物降解地膜种植 Ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridge (BM)	尿素 Urea (U)	80 (U_1)	6∶2∶2
		160 (U_2)	6∶2∶2
		240 (U_3)	6∶2∶2
	控释氮肥 Controlled release nitrogen fertilizer (C)	80 (C_1)	1∶0∶0
		160 (C_2)	1∶0∶0
		240 (C_3)	1∶0∶0
	不施氮肥 No nitrogen fertilization (N_0)	0 (N_0)	—
垄覆普通地膜 Ridge-furrow planting with plastic film mulching over ridge (PM)	尿素 Urea (U)	80 (U_1)	6∶2∶2
		160 (U_2)	6∶2∶2
		240 (U_3)	6∶2∶2
	控释氮肥 Controlled release nitrogen fertilizer (C)	80 (C_1)	1∶0∶0
		160 (C_2)	1∶0∶0
		240 (C_3)	1∶0∶0
	不施氮肥 No nitrogen fertilization (N_0)	0 (N_0)	—

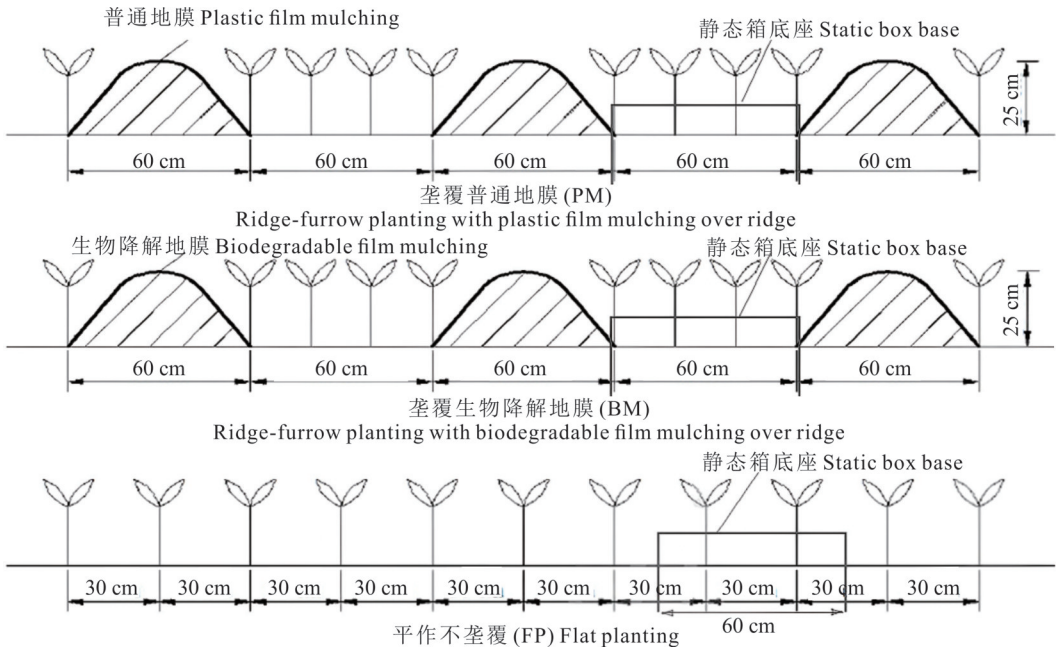


图 2　苜蓿种植模式

Fig. 2　Alfalfa cropping pattern

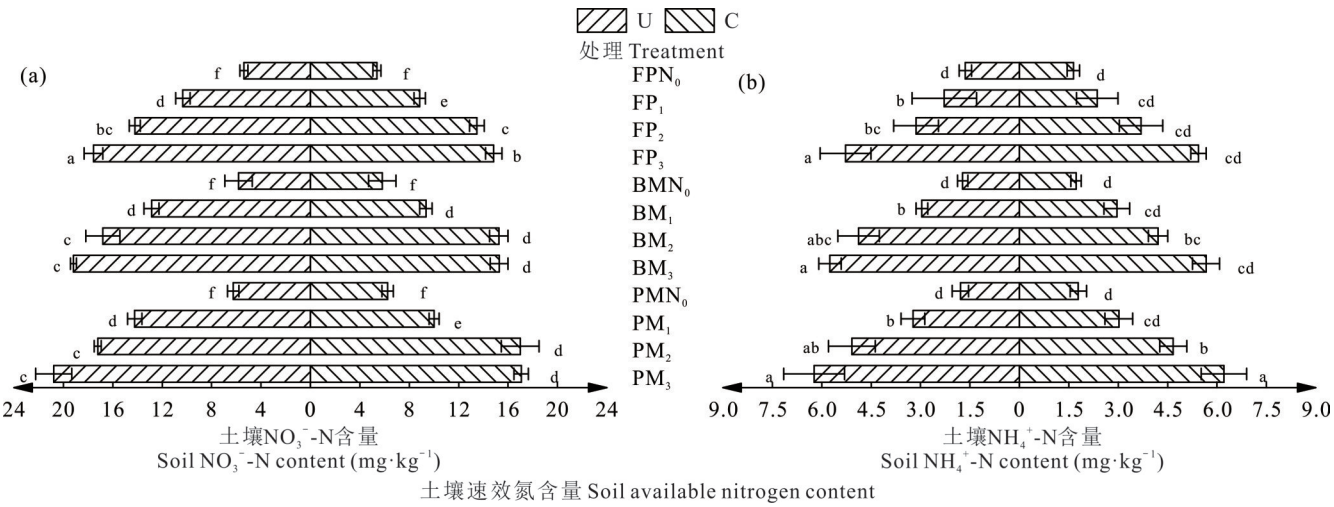


图 3　土壤速效氮含量

Fig. 3　Soil available nitrogen content

(a)代表两年各处理下土壤 NO_3^--N 含量平均值;(b)代表两年各处理下土壤 NH_4^+-N 含量平均值;误差条表示 95% 置信区间。不同的小写字母表示处理组间存在显著差异($P<0.05$),处理组为 FPN_0、FP_1、FP_2等之间,U 代表施用尿素,C 代表施用控释氮肥。下同。(a) represents the average soil NO_3^--N content under each treatment over the two years; (b) represents the average soil NH_4^+-N content under each treatment over the two years. Error bars indicate 95% confidence intervals. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). Processing groups include FPN_0, FP_1, FP_2, etc. U represents the application of urea, C represents the application of controlled-release nitrogen fertilizer. The same below.

1.3　测定项目与方法

每年第一茬苜蓿返青后,采用密闭式静态箱和气相色谱仪(岛津气相色谱仪 GC-2010 Pro,苏州)每隔 15 d 收集并测定土壤 CO_2、CH_4和 N_2O。静态箱规格为 60 cm×60 cm×60 cm(TA-FC 静态箱,北京天安联合科技有限公司),底座规格为 60 cm×60 cm×15 cm,地下部分插入苜蓿地 10 cm。采集气体时将静态箱放在底座上部加水密封的水槽中。左侧装有气体采集和风扇电线接口,箱内左上部和右下部各安装 12 V 小风扇混匀气体,风扇外接蓄电池供电。采集气体时,将静态箱置于底座上,其余时间移除静态箱,确保箱内外光照、温度和湿度一致。气体

采集时间为上午9:00－11:00,在第0、10、20、30 min于采集接口用50 mL注射器来回抽动采集40 mL气体,立即带回实验室测定。

1.3.1 CO_2、CH_4和N_2O排放通量(f,mg·m^{-2}·h^{-1})

$$f=\rho\times H\times\frac{dc}{dt}\times\frac{273}{273+T}\times 60 \quad (1)$$

式中:ρ为标准状况下温室气体密度,kg·m^{-3};T为采样时密闭箱内平均温度(℃);H为采样箱高度,m;c为温室气体体积混合比,dc/dt为采样时密闭箱内气体浓度变化率,mg·m^{-2}·min^{-1}。

当f为正值时,表示排放气体;反之,表示吸收气体。

1.3.2 CO_2、CH_4和N_2O累积排放量(M,kg·hm^{-2}):

$$M=\sum[(f_{i+1}+f_i)\times 0.5]\times(d_{i+1}-d_i)\times 24/100 \quad (2)$$

式中:i为采样次数;f_i为第i次采样时该温室气体的排放通量;f_{i+1}指下一次采样的通量;$d_{i+1}-d_i$为采样间隔天数;100为单位转换系数。

1.3.3 全球增温潜势(global warming potential,GWP,kg CO_2-eq·hm^{-2}):

$$GWP=M(CO_2)+M(CH_4)\times 25+M(N_2O)\times 298 \quad (3)$$

式中:$M(CO_2)$为测定期CO_2累计排放量,kg·hm^{-2};$M(CH_4)$为测定期CH_4累计排放量,kg·hm^{-2};$M(N_2O)$为测定期N_2O累计排放量,kg·hm^{-2}。

1.3.4 苜蓿产量 在每茬苜蓿初花期采用鲜草和干鲜比结合的方法测定产量。在每个小区对角线中心处选取1 m×1 m样方,各处理刈割后称取苜蓿鲜重M_1(kg);在大样方旁随机选取50 cm×50 cm小样方,刈割后称取牧草鲜重M_2(g),然后将小样方鲜草装入信封,放入烘箱中105 ℃杀青30 min,75 ℃烘干至恒重,待冷却后称取干质量M_3(g),M_3/M_2即为苜蓿干鲜比。每茬苜蓿干草产量之和即为年产量。

苜蓿产量(Y,kg·hm^{-2})计算公式为:

$$Y=(M_1+M_2)\times 1000/M_2 \quad (4)$$

1.3.5 温室气体排放强度(greenhouse gas intensity,GHGI,kg CO_2-eq·kg^{-1}):

$$GHGI=GWP/Y \quad (5)$$

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2021软件整理数据,Origin 2021软件绘图,IBM SPSS Statistics 27.0软件进行主成分分析。采用单因素和Duncan法进行方差分析和多重比较。采用双因素方差分析进行交互效应分析,显著性水平为$P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 种植模式与氮肥管理对苜蓿草地CO_2排放的影响

2.1.1 CO_2排放通量 CO_2排放通量(106.24～818.68 mg·m^{-2}·h^{-1})随苜蓿生育期推进呈先升高后降低趋势,随建植年限增加呈下降趋势(图4)。施用控释氮肥条件下,PM与BM的CO_2排放通量较FP平均升高36.83%和20.08%,C_1、C_2和C_3的CO_2排放通量较N_0分别平均升高12.39%、19.55%和35.06%。施用尿素各处理的CO_2排放通量较施用控释氮肥平均升高13.43%,其中PM与BM较FP平均升高30.79%和13.26%,U_1、U_2和U_3较N_0分别平均升高22.45%、38.16%和56.27%。所有处理中,FPN_0的CO_2排放通量(2年平均为268.37 mg·m^{-2}·h^{-1})最低,PMU_3的CO_2排放通量(2年平均为523.14 mg·m^{-2}·h^{-1})最高。

2.1.2 CO_2累积排放量 除种植模式、氮肥类型及施氮水平三者交互作用和2023年施氮水平与氮肥类型交互作用对苜蓿草地CO_2累积排放量影响不显著($P>0.05$)外,其余单因素和交互作用均显著影响CO_2累积排放量($P<0.05$,表2)。CO_2累积排放量表现为施用控释氮肥低于施用尿素,随施氮水平提高呈增加趋势,且BM与PM高于FP(图5)。施用控释氮肥条件下,C_1、C_2和C_3的CO_2累积排放量较N_0分别平均升高13.64%、21.05%和35.83%,PM与BM的CO_2累积排放量较FP分别平均升高36.32%和20.67%。施用尿素条件下,U_1、U_2和U_3的

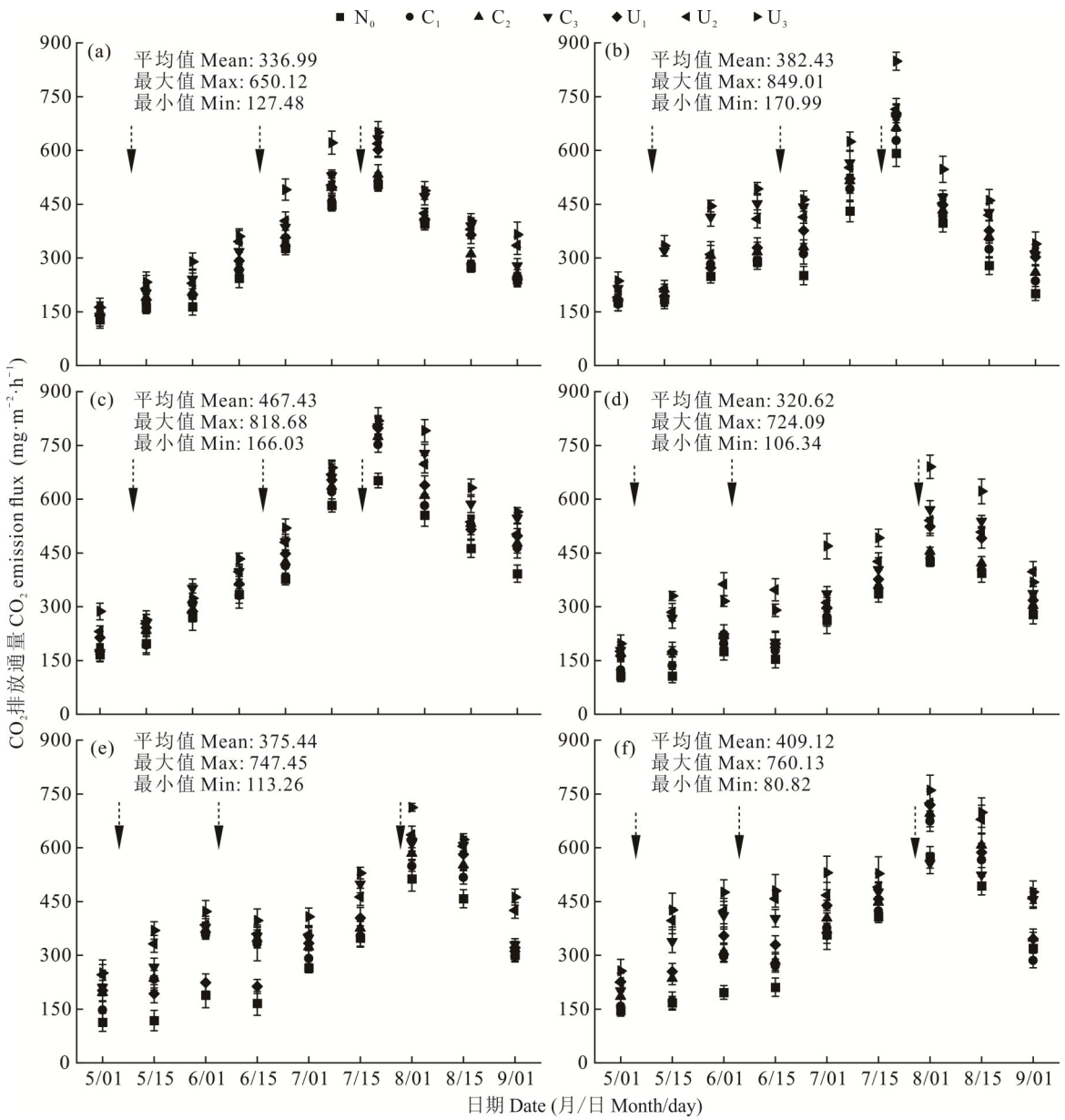


图 4　种植模式与氮肥管理对苜蓿草地 CO_2 排放通量的影响

Fig. 4　Effects of planting pattern and nitrogen management on CO_2 emission flux in alfalfa grassland

误差条和圆点分别表示 95% 置信区间和排放通量，虚线箭头表示施肥事件。(a)、(b)和(c)分别表示 2023 年传统平作、垄覆生物降解地膜和垄覆普通地膜；(d)、(e)和(f)分别表示 2024 年传统平作、垄覆生物降解地膜和垄覆普通地膜。下同。Error bars and dots represent 95% confidence intervals and emission fluxes, respectively, and the dashed arrow indicates the application of urea fertilizer. (a), (b) and (c) represent flat planting, ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridge, and ridge-furrow planting with plastic film mulching over ridge, respectively, in 2023; (d), (e) and (f) represent flat planting, ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridge, and ridge-furrow planting with plastic film mulching over ridge, respectively, in 2024. The same below.

CO_2 累积排放量较 N_0 分别平均升高 23.85%、40.70% 和 58.44%，PM 与 BM 的 CO_2 累积排放量较 FP 分别平均升高 30.64% 和 13.20%。所有处理中，PMU_3 的 CO_2 累积排放量最高(2 年平均为 1.65 t·hm^{-2})，且 PMC_3、BMU_3 和 BMC_2 的 CO_2 累积排放量较 PMU_3 分别平均降低 12.76%、7.87% 和 30.15%。

2.2　种植模式与氮肥管理对苜蓿草地 CH_4 排放的影响

2.2.1　CH_4 排放通量　　CH_4 整体表现为净吸收，且随苜蓿生育期推进呈先升高后降低趋势，随建植年限延长呈降低趋势(图 6)。施用控释氮肥条件下，PM 与 BM 的 CH_4 吸收通量较 FP 分别平均降低 35.93% 和 20.98%，C_1、C_2 和 C_3 的 CH_4 吸收通量较 N_0 分别平均升高 24.74%、71.22% 和 40.07%。施用尿素各处理的 CH_4 吸收通量较

表2 不同种植模式与氮肥管理下苜蓿草地CO_2累积排放量的方差分析

Table 2 Analysis of variance for cumulative CO_2 emissions in alfalfa grasslands under different planting patterns and nitrogen managements

年份 Year	P	L	T	P×L	P×T	L×T	P×L×T
2023	455.30**	108.44**	178.25**	5.28*	1.41*	0.71ns	0.18ns
2024	232.63**	377.10**	238.99**	2.59*	13.61**	28.50*	0.58ns

注：P代表种植模式，L代表施氮水平，T代表氮肥类型。**、*和ns分别表示$P<0.01$、$P<0.05$和$P>0.05$。下同。

Note: P represents planting pattern, L represents nitrogen application level, and T represents nitrogen fertilizer type. **, * and ns denote $P<0.01$, $P<0.05$ and $P>0.05$, respectively. The same below.

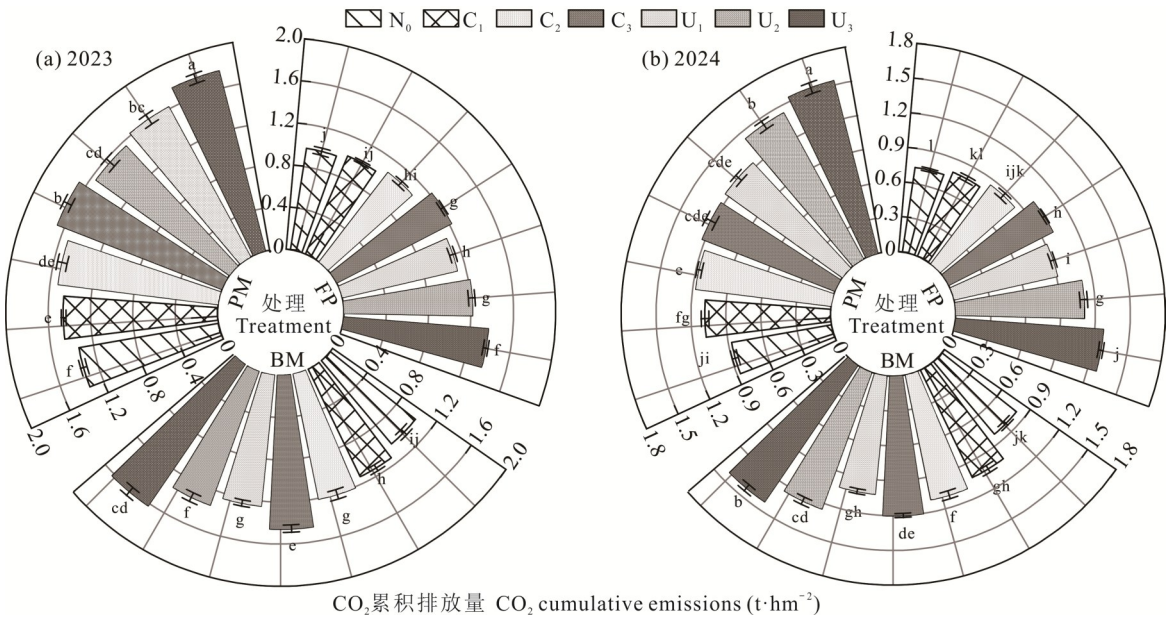


图5 种植模式与氮肥管理对苜蓿草地CO_2年累积排放量的影响

Fig. 5 Effects of planting pattern and nitrogen management on annual cumulative CO_2 emission in alfalfa grassland

FM代表不覆膜处理，BM代表覆生物降解膜处理，PM代表覆普通地膜处理。下同。FM denotes non-film treatment, BM denotes treatment with biodegradable film, and PM denotes treatment with conventional plastic film. The same below.

施用控释氮肥平均升高6.91%，其中PM与BM较FP分别平均降低12.52%和6.67%，U_1、U_2和U_3较N_0分别平均升高28.96%、50.26%和32.41%。所有处理中，FPC_2的吸收通量(2年平均为0.0566 mg·m^{-2}·h^{-1})最高，PMN_0的吸收通量(2年平均为0.0224 mg·m^{-2}·h^{-1})最低。

2.2.2 CH_4累积吸收量 除种植模式、氮肥类型和施氮水平三者交互作用及2024年种植模式与氮肥类型交互作用对苜蓿草地CH_4累积吸收量影响不显著($P>0.05$)外，其余单因素和交互作用均显著影响CH_4的累积吸收量($P<0.05$，表3)。苜蓿草地CH_4累积吸收量表现为施用控释氮肥高于施用尿素，随施氮水平提高呈先增加后降低趋势，且BM与PM低于FP(图7)。施用控释氮肥条件下，C_1、C_2和C_3的CH_4累积吸收量较N_0分别平均升高23.96%、67.61%和37.93%，PM与BM的CH_4累积吸收量较FP分别平均降低34.98%和20.24%。施用尿素条件下，U_1、U_2和U_3的CH_4累积吸收量较N_0分别平均升高27.59%、43.31%和28.49%，PM与BM的CH_4累积吸收量较FP分别平均升高14.83%和7.65%。所有处理中，FPC_2的CH_4累积吸收量(2年平均为1.78 kg·hm^{-2})最高。

2.3 种植模式与氮肥管理对苜蓿草地N_2O排放的影响

2.3.1 N_2O排放通量 N_2O排放通量随苜蓿生育期推进呈先升高后降低趋势，随建植年限延长呈上升趋势(图8)。施用控释氮肥条件下，PM与BM的N_2O排放通量较FP分别平均升高25.13%和9.11%，C_1、C_2和C_3的

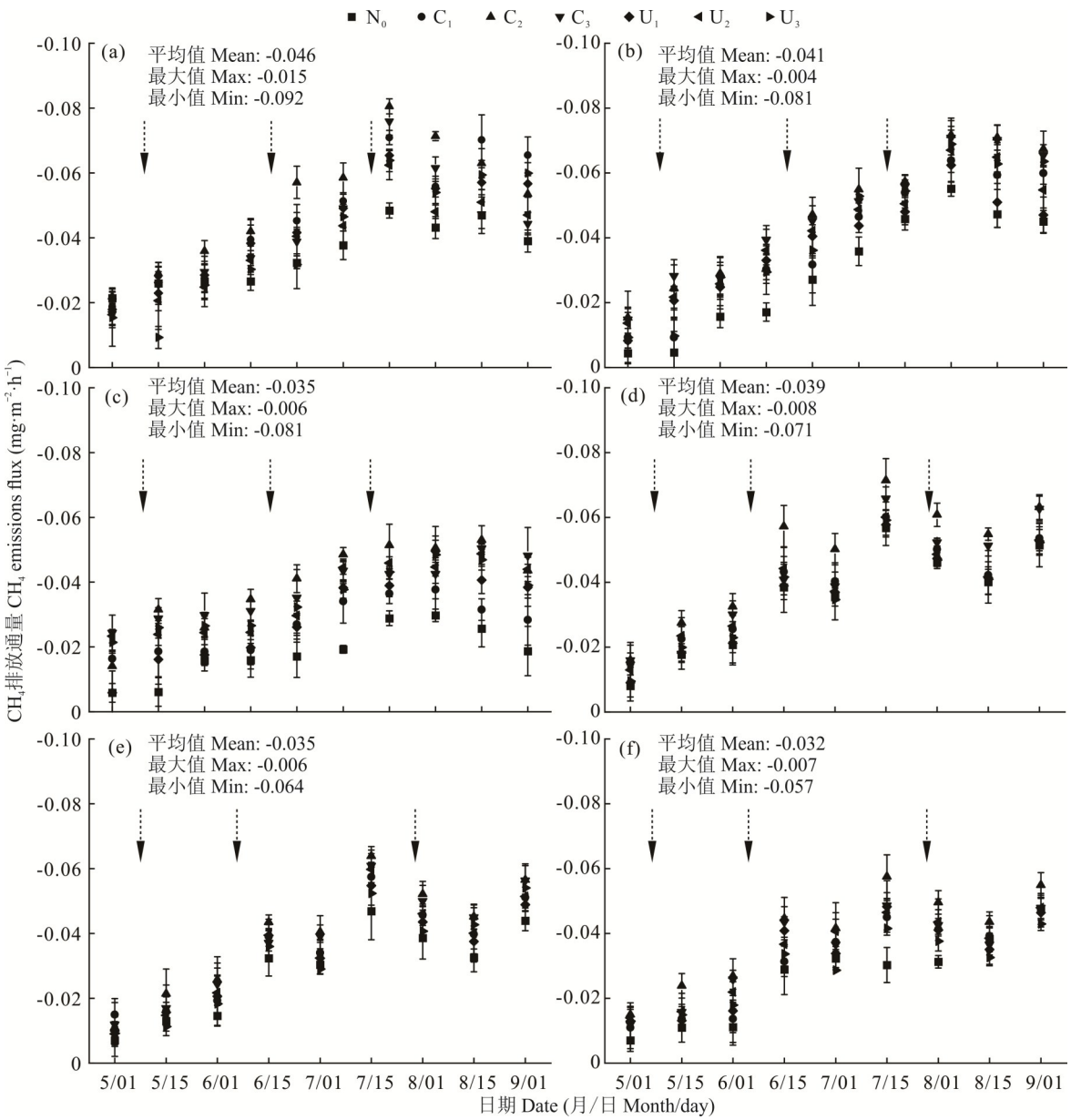


图 6　种植模式与氮肥管理对苜蓿草地 CH_4 排放通量的影响

Fig. 6　Effects of planting pattern and nitrogen management on CH_4 emission flux in alfalfa grassland

负值代表 CH_4 呈吸收态。Negative values indicate that CH_4 is in the absorbed state.

表 3　不同种植模式与氮肥管理下苜蓿草地 CH_4 累积吸收量的方差分析

Table 3　Analysis of variance for cumulative CH_4 absorption in alfalfa grasslands under different planting patterns and nitrogen managements

年份 Year	P	L	T	P×L	P×T	L×T	P×L×T
2023	222.38**	207.56**	8.60*	57.26**	52.76**	37.24**	1.72ns
2024	65.79**	65.82**	31.27**	6.49*	1.05ns	9.45**	1.28ns

N_2O 排放通量较 N_0 分别平均升高 4.82%、12.23% 和 21.49%。施用尿素条件下，N_2O 排放通量在每茬追肥后明显升高，较施用控释氮肥平均升高 24.61%，其中 PM 与 BM 较 FP 分别平均升高 24.08% 和 10.01%，U_1、U_2 和 U_3 较 N_0 分别平均升高 21.93%、34.96% 和 63.31%。所有处理中，FPN_0 的排放通量（2 年平均为 0.04582 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$）最低，$PMU_3$ 的排放通量（2 年平均为 0.0892 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$）最高。

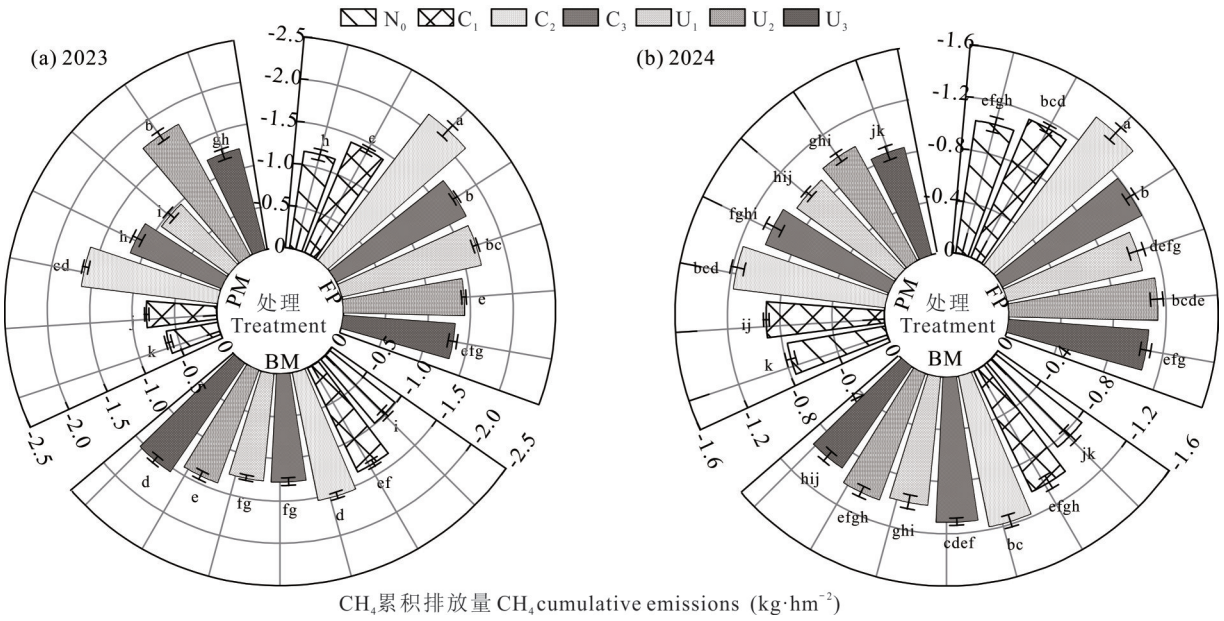


图7 种植模式与氮肥管理对苜蓿草地CH_4年累积排放量的影响

Fig. 7 Effects of planting pattern and nitrogen management on annual cumulative CH_4 emission in alfalfa grassland

2.3.2 N_2O累积排放量 种植模式、氮肥类型和施氮水平单因素及施氮水平与氮肥类型的交互作用均显著影响N_2O累积排放量(表4)。N_2O累积排放量表现为施用控释氮肥低于施用尿素,随施氮水平提高呈增加趋势,且BM与PM高于FP(图9)。施用控释氮肥条件下,C_1、C_2和C_3的N_2O累积排放量较N_0分别平均升高5.56%、11.41%和20.01%,PM与BM的N_2O累积排放量较FP分别平均升高21.31%和6.73%。施用尿素条件下,U_1、U_2和U_3的N_2O累积排放量较N_0分别平均升高21.78%、34.24%和61.47%,PM与BM的N_2O累积排放量较FP分别平均升高23.12%和9.45%。所有处理中,PMU_3的N_2O累积排放量(2年平均为2.82 kg·hm^{-2})最高,且PMC_3、BMU_3和BMC_2的N_2O累积排放量较PMU_3分别平均降低25.18%、9.22%和38.83%。

2.4 种植模式与氮肥管理对苜蓿草地综合温室效应的影响

2.4.1 全球增温潜势 苜蓿草地全球增温潜势(GWP)表现为施用控释氮肥小于施用尿素,随施氮水平升高呈增加趋势,且PM和BM大于FP(图10)。施用控释氮肥条件下,C_1、C_2和C_3的GWP较N_0分别平均升高12.31%、19.36%和34.21%,PM和BM的GWP较FP分别平均升高19.55%和36.29%。施用尿素条件下,U_1、U_2和U_3的GWP较N_0分别平均升高22.73%、38.03%和56.22%,FP的GWP较PM和BM分别平均降低13.12%和30.52%。

2.4.2 温室气体排放强度 苜蓿产量随施氮水平增加先增加后降低,且BM与PM显著高于FP(图11)。施用控释氮肥条件下,C_2的苜蓿产量在2023年较N_0、C_1和C_3分别平均提高54.21%、24.20%和11.77%,在2024年较N_0、C_1和C_3分别平均提高50.83%、21.67%和12.71%;BM与PM的苜蓿产量在2023年较FP分别平均提高43.56%和30.07%,在2024年较FP分别平均提高31.49%和17.05%;BMC_2处理的苜蓿产量最高。施用尿素条件下,苜蓿产量在2023和2024年分别为13.34~21.06 t·hm^{-2}和15.62~24.14 t·hm^{-2},BMU_2处理的苜蓿产量(两年平均为22.60 t·hm^{-2})最高,较FPN_0、BMN_0的和FPU_2分别平均显著提高77.18%、43.49%和30.33%。同一施氮水平和种植模式下,施用控释氮肥较施用尿素可平均提高苜蓿产量8.46%,BMC_2处理的苜蓿产量最优。

苜蓿草地温室气体排放强度(GHGI)表现为施用控释氮肥低于施用尿素,随施氮水平升高呈先降低后升高趋势,且BM小于PM和FP(图12)。施用控释氮肥条件下,BM的GHGI较PM和FP分别平均降低21.84%和14.56%,C_2的GHGI较N_0、C_1和C_3分别平均降低22.26%、14.73%和21.45%。施用尿素条件下,BM的GHGI较PM和FP分别平均降低12.50%和9.28%,U_2的GHGI较N_0、U_1和U_3分别平均降低3.11%、5.99%和16.01%。所有处理中,BMC_2的GHGI(两年平均为0.49 kg CO_2-eq·kg^{-1})最小。

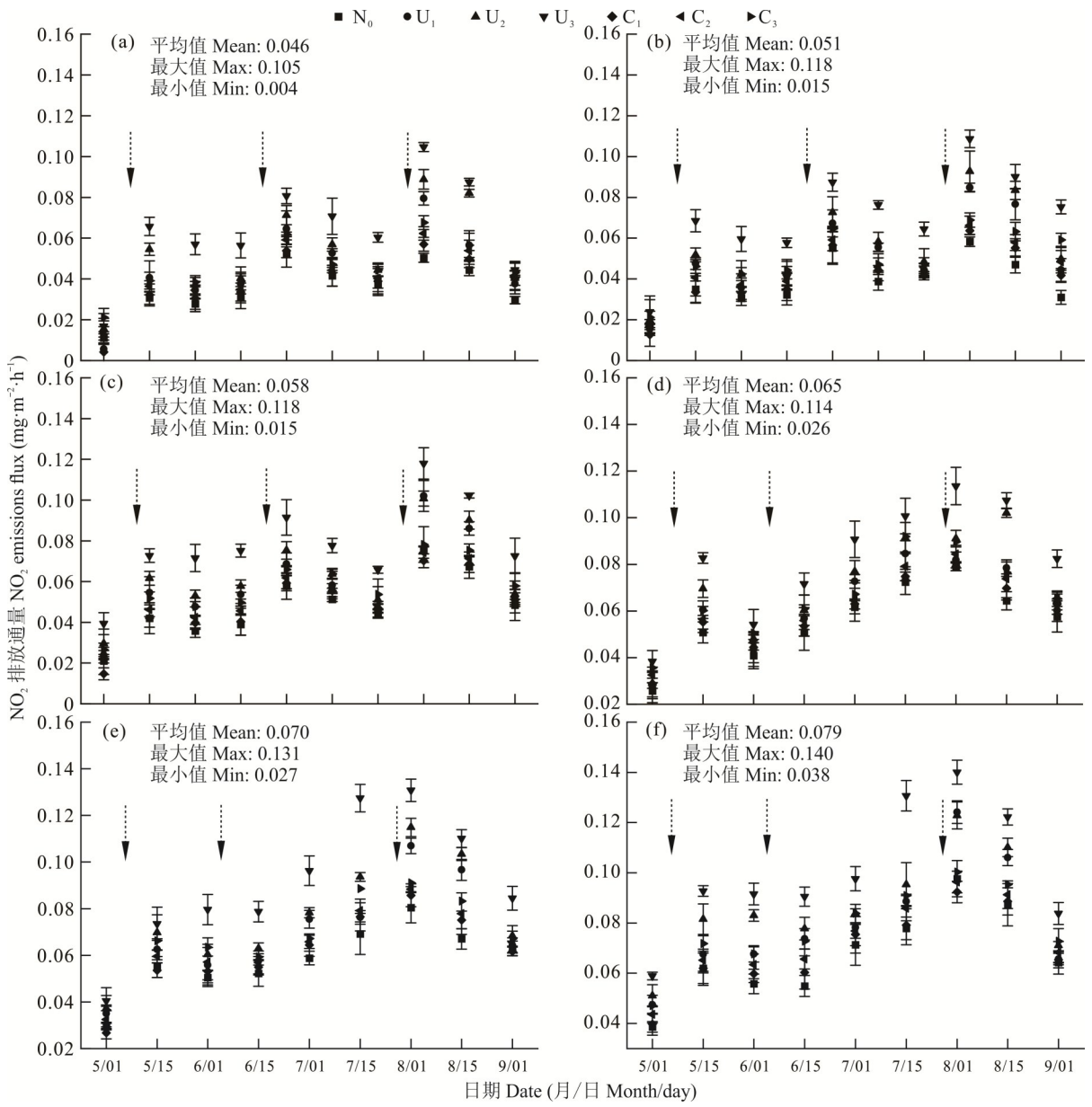


图 8　种植模式与氮肥管理对苜蓿草地 N_2O 排放通量的影响

Fig. 8　Effects of planting pattern and nitrogen management on N_2O emission flux in alfalfa grassland

表 4　不同种植模式与氮肥管理下苜蓿草地 N_2O 累积排放量的方差分析

Table 4　Analysis of variance for cumulative N_2O emissions in alfalfa grasslands under different planting patterns and nitrogen managements

年份 Year	P	L	T	P×L	P×T	L×T	P×L×T
2023	33.61**	131.28**	44.03**	0.04ns	0.17ns	10.92*	0.51ns
2024	82.33**	229.04**	84.36**	4.48ns	0.14ns	17.24**	0.15ns

3　讨论

3.1　种植模式与氮肥管理对苜蓿草地温室气体排放的影响

与非豆科作物不同，苜蓿强大的固氮能力与深根系特性会改变根际微域的碳氮循环过程及外源氮输入的温室效应。

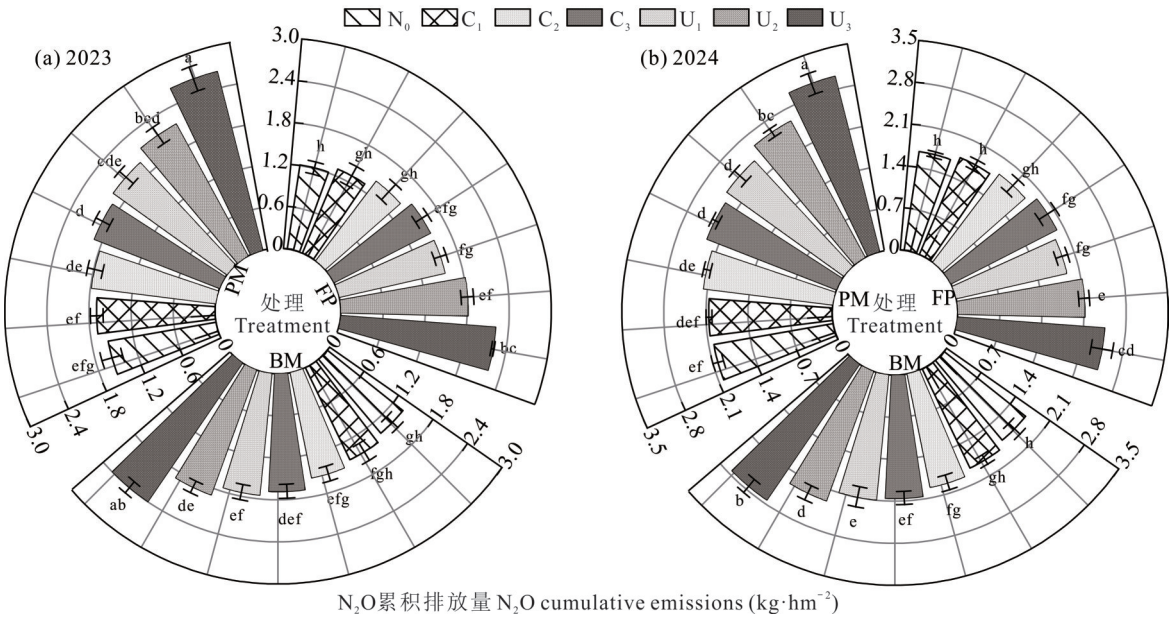


图9 种植模式与氮肥管理对苜蓿草地N_2O年累积排放量的影响

Fig. 9 Effects of planting pattern and nitrogen management on annual cumulative N_2O emission in alfalfa grassland

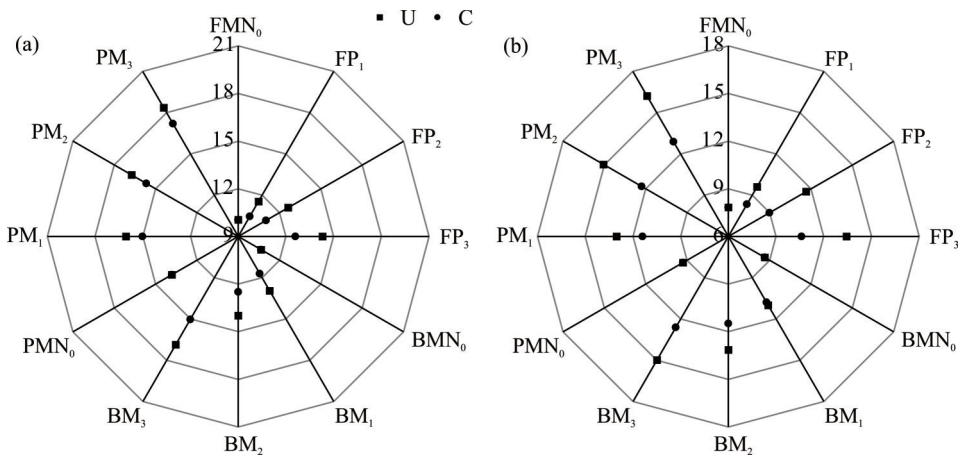


图10 种植模式与氮肥管理对苜蓿草地全球增温潜势的影响

Fig. 10 Effects of planting pattern and nitrogen management on global warming potential in alfalfa grassland

图中坐标轴为全球增温潜势(kg CO_2-eq·hm^{-2})。(a)代表2023年种植模式与氮肥管理对苜蓿草地全球增温潜势的影响,(b)代表2024年种植模式与氮肥管理对苜蓿草地全球增温潜势的影响。The coordinate axes in the figure represent global warming potential (kg CO_2-eq·ha^{-1}). (a) represents the impact of cropping patterns and nitrogen fertilizer management on the global warming potential (GWP, kg CO_2-eq·ha^{-1}) of alfalfa grasslands in 2023. (b) represents the impact of cropping patterns and nitrogen fertilizer management on the global warming potential (GWP, kg CO_2-eq·ha^{-1}) of alfalfa grasslands in 2024.

3.1.1 CO_2排放　土壤CO_2排放主要源于牧草根系的自养呼吸、微生物分解有机质的异养呼吸、土壤动物呼吸及土壤含碳物质的氧化作用,其中自养呼吸和异养呼吸对土壤CO_2排放贡献较大[24]。种植模式与氮肥管理通过调控土壤微环境,影响土壤微生物群落结构与活性,从而调控土壤CO_2排放。与Zhang等[25]在辽宁针对玉米的研究结果一致,本研究发现,垄覆普通地膜和垄覆生物降解地膜的苜蓿草地CO_2排放通量较传统平作显著升高36.83%和20.08%。这主要是由于覆膜能提高土壤温度,增强微生物活性,加速有机质分解。然而,Zhao等[26]在新疆棉(*Gossypium hirsutum*)田研究发现,地膜覆盖会降低土壤CO_2排放。这可能与地膜覆盖方式有关。在Zhao等[26]的研究中,全田2/3面积覆盖地膜,形成了较为连续的气体阻隔层,显著抑制了土壤—大气间的气体交换;而本试验采用垄作覆膜方式,地膜仅覆盖垄体,土壤CO_2可通过垄沟区域自由排放。苜蓿深根系在覆膜条件下呼吸

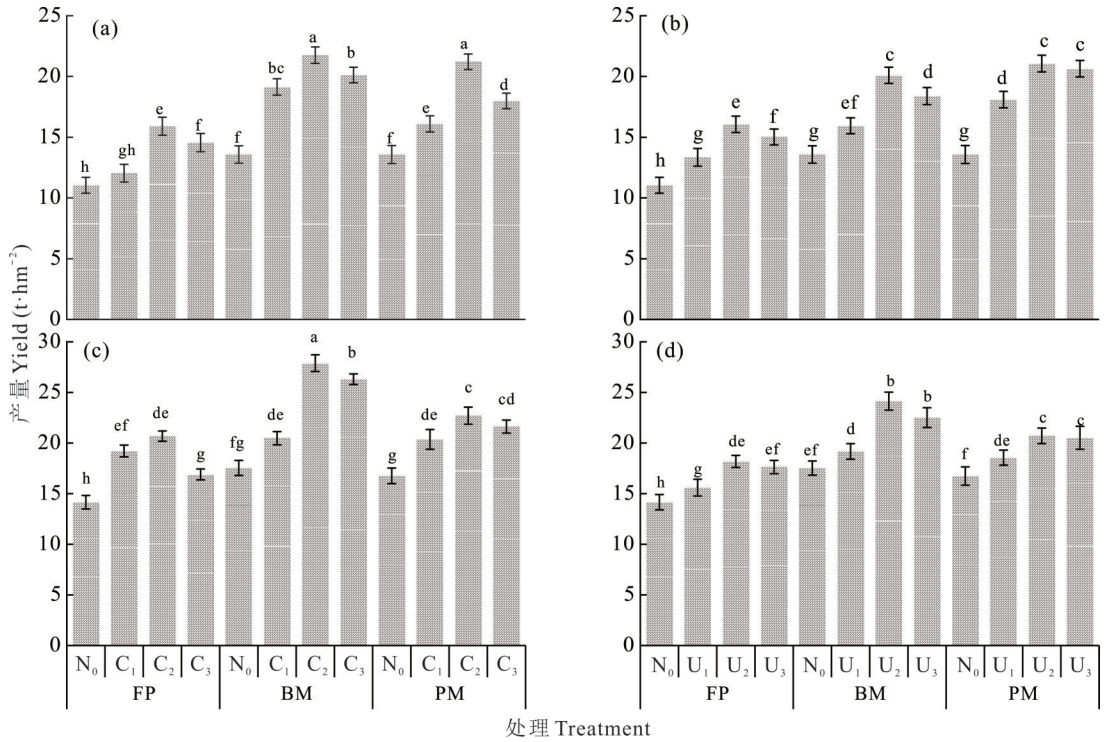


图 11　种植模式与氮肥管理对苜蓿产量的影响

Fig. 11　Effects of planting pattern and nitrogen management on alfalfa yields

(a)和(c)分别代表 2023 和 2024 年施用控释氮肥的苜蓿产量；(b)和(d)分别代表 2023 和 2024 年施用尿素的苜蓿产量。(a) and (c) represent alfalfa yields with controlled-release nitrogen fertilizer applied in 2023 and 2024, respectively; and (b) and (d) represent alfalfa yields with urea applied in 2023 and 2024.

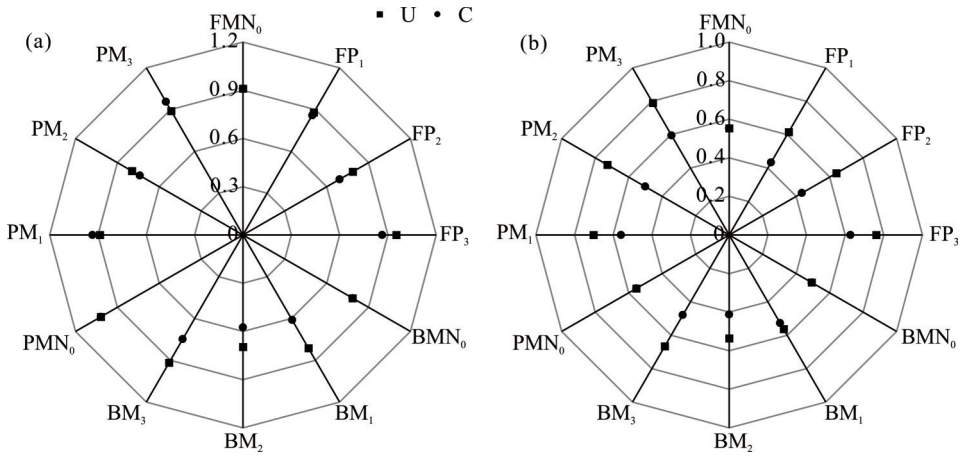


图 12　种植模式与氮肥管理对苜蓿草地温室气体排放强度的影响

Fig. 12　Effects of planting pattern and nitrogen management on greenhouse gas intensity in alfalfa grassland

图中坐标轴为温室气体排放强度[kg(CO_2-eq·kg^{-1})]。(a)代表 2023 年种植模式与氮肥管理对苜蓿草地温室气体排放强度的影响，(b)代表 2024 年种植模式与氮肥管理对苜蓿草地温室气体排放强度的影响。The coordinate axes in the figure represent the greenhouse gas intensity (GHGI) [kg (CO_2-eq·kg^{-1})]. (a) represents the impact of cropping patterns and nitrogen fertilizer management on the greenhouse gas intensity (GHGI) of alfalfa grasslands in 2023. (b) represents the impact of cropping patterns and nitrogen fertilizer management on the greenhouse gas intensity (GHGI) of alfalfa grasslands in 2024.

活性增强，同时，根瘤固氮过程消耗的光合产物及其分泌物可能改变根际微生物的碳源供应，共同驱动草地 CO_2 排放[27]。本研究还发现，施用控释氮肥的土壤 CO_2 排放量较施用尿素显著降低 11.84%，且随施氮水平提高呈增加趋势。这与 Chi 等[28]在北京针对玉米的研究结果一致。施用外源氮肥会增加土壤养分供给，促进根系呼吸与根冠生长，从而增加土壤 CO_2 排放。控释氮肥可平稳供应氮素，维持较为稳定的土壤养分平衡，降低微生物对土

壤有机碳的分解[29]。相比之下,尿素属速效氮肥,养分溶解、释放迅速,施用后会导致局部氮浓度大幅度增加,刺激土壤微生物新陈代谢,并可能引起土壤pH波动和脲酶活性升高,进一步促进CO_2排放[30]。

3.1.2 CH_4吸收　旱地农田生态系统是大气CH_4的重要吸收汇。这主要取决于产甲烷菌生成作用与甲烷氧化菌消耗作用的相对强度[31]。甲烷氧化菌是土壤中唯一以CH_4为碳源和能源的微生物,可通过氧化消耗土壤CH_4,不仅减少CH_4排放,还能氧化吸收扩散进入土壤的CH_4[32]。本研究发现,施用控释氮肥的苜蓿草地CH_4累积吸收量较施用尿素提高7.43%。这与Lan等[33]在苏州针对水稻-小麦(*Triticum aestivum*)系统的研究结果一致。这主要与两种氮肥的氮素释放特性有关。控释氮肥的缓释机制可提供持续稳定低浓度的有效氮,维持甲烷氧化菌活性并促进CH_4氧化;而尿素的快速水解导致局部土壤铵态氮浓度短期内激增,高浓度NH_4^+直接抑制甲烷氧化菌关键酶(如甲烷单加氧酶)活性[34]。本研究还发现,土壤CH_4吸收量随施氮水平提高呈先增加后降低趋势。这与李晓莎等[35]在陕西针对玉米的研究结果一致。控释氮肥提供的稳定低浓度铵态氮,可能通过维持更活跃的Ⅰ型甲烷氧化菌群落,促进CH_4的氧化吸收。相反,尿素脉冲式铵态氮可能更有利于铵耐受性强但氧化效率低的Ⅱ型甲烷氧化菌生长,整体降低系统的CH_4氧化能力[36]。适量添加氮素可提升甲烷氧化菌的代谢活性,增强CH_4氧化能力,但高氮水平下过量NH_4^+会通过直接竞争酶结合位点,或经硝化作用降低土壤pH,间接抑制甲烷氧化菌[37]。但Li等[38]在浙江针对竹林(*Bambusoideae*)研究发现,氮添加会降低土壤CH_4吸收。这可能与作物类型有关,苜蓿属豆科作物,其固氮特性可能导致低氮添加时刺激根系活动提高甲烷氧化菌活性[39],同时强氮吸收力延缓土壤铵态氮积累,当高氮超出缓冲能力后,铵态氮抑制效应占主导[40]。竹林由于缺乏固氮与氮缓冲能力,任何程度的氮添加均会抑制甲烷吸收。本研究发现,垄作覆膜的苜蓿草地CH_4吸收量较传统平作降低7.65%~34.98%,且垄覆普通地膜的CH_4吸收量低于垄覆生物降解地膜。但杨睿等[41]在陕西针对玉米的研究发现,覆膜较不覆膜可增加土壤CH_4吸收总量。苜蓿深根系会加剧覆膜缺氧(尤其深层),抑制甲烷氧化,同时垄沟覆膜可提高土壤含水量、降低氧气含量[42],为产甲烷菌创造厌氧环境,降低CH_4吸收量。生物降解地膜逐渐降解后保墒功能减弱,可缓解甲烷产生。玉米浅须根系使土壤缺氧限于表层,且干旱区覆膜的水分增益主导CH_4吸收增加[43]。

3.1.3 N_2O排放　种植模式和氮肥管理与土壤N_2O排放密切相关。本研究发现,不同氮肥类型与施氮水平的苜蓿草地均表现为N_2O净排放,且施用控释氮肥的N_2O排放量较施用尿素平均降低17.95%。这可能是由于控释氮肥的氮素释放特性与苜蓿氮素需求规律更匹配,可更有效地被苜蓿吸收利用,减少反硝化过程所需的氮源。但Soares等[44]在巴西针对甘蔗(*Saccharum officinarum*)的研究发现,施用控释氮肥的N_2O排放量高于尿素。这可能与施用的控释氮肥类型有关。本研究采用聚合物包膜控释氮肥,释氮速率平稳(90 d),可有效抑制硝化-反硝化作用,减少氮峰值,降低N_2O排放[40];而Soares等[44]采用硫包衣尿素,其在热带雨季高温强降水环境下快速崩解(<30 d),硫包衣释氮及大量降水形成的厌氧环境,迫使反硝化菌加速产生N_2O。这种差异与控释机理有关。硫包衣尿素通过在颗粒表面形成硫包膜控制氮素释放,释放性能受包膜物质组成、厚度和温度影响显著[45]。然而,聚合物包膜技术是在硫包衣基础上引入聚乙烯等聚合物材料,进一步优化成膜性能,可有效弥补硫包衣在包膜完整性和控释稳定性方面的不足[46]。添加外源氮可能会改变根系分泌物的质与量,从而影响反硝化菌活性和N_2O排放。控释氮肥平稳的氮素供应与苜蓿根瘤固氮节律更吻合,可有效减少土壤矿质氮的盈余,从而降低反硝化菌利用的底物浓度[47]。

种植模式通过调节土壤水热状况和氮素转化过程,调控硝化与反硝化作用强度,影响土壤N_2O排放。本研究发现,PM与BM的苜蓿草地N_2O累积排放量较FP分别平均显著提高23.12%和9.45%。与Chen等[48]在江苏针对大蒜(*Allium sativum*)的研究结果类似。覆盖材料的热学特性显著影响土壤N_2O排放,普通地膜较传统平作能更有效地维持土壤温度,促进土壤有机氮矿化,增强硝化与反硝化微生物活性,导致更高的N_2O排放。生物降解膜在覆盖初期具有与普通地膜相当的保温效应,但随着地膜逐渐降解,其保温效应逐渐降低,由此产生的低温效应可抑制土壤N_2O排放[49]。然而,郭康军等[50]在沈阳针对马铃薯的研究结果正好相反。这可能是因为苜蓿草地的尿素分茬施用,使活性氮集中于覆膜营造的高温高湿表层土壤,显著增强了硝化与反硝化作用[51];而郭康军等[50]采用一次性深施基肥,使氮素避开高风险环境,分布于温湿度相对稳定的深层土壤,加之覆膜的隔水效应,有

效抑制土壤N_2O排放。

3.2　种植模式与氮肥管理对苜蓿草地综合温室效应的影响

土壤温室气体排放是多种环境因子下土壤有机质分解和植物根系吸收共同作用的结果。旱作农田GWP主要源于N_2O排放，而CH_4吸收对农田GWP的抵消量较少。本研究发现，土壤全球增温潜势（GWP）表现为施用尿素显著高于控释氮肥，且随施氮水平提高呈增加趋势。温室气体排放强度（GHGI）表征单位作物产量的温室气体排放量，是评估农业生产环境效益的重要指标之一[52]。本研究发现，BM的GHGI较PM和FP分别平均降低21.84%和14.56%。这与Chen等[53]在陕西针对玉米－小麦轮作系统的研究结论类似。尽管覆盖生物降解地膜会增加土壤CO_2和N_2O排放，但能有效提高土壤CH_4吸收量和苜蓿产量，最终有效降低GHGI。氮肥类型和施氮水平也显著影响GHGI。本研究发现，施用控释氮肥且在施氮量为160 kg·hm^{-2}时GHGI最低。与Cheng等[54]在内蒙古针对玉米和Wang等[55]在北京针对生菜（*Lactuca sativa*）的研究结论类似。控释氮肥通过减少氮素淋失与抑制土壤硝化及反硝化作用强度，在保障作物氮素供应的同时，可显著降低土壤N_2O排放并减少土壤残留氮。此外，控释氮肥平稳的氮素供应特性有助于维持稳定的土壤碳氮平衡态势[56]。这种平衡不仅有利于维持甲烷氧化菌活性，促进土壤对CH_4的氧化吸收，同时降低微生物对土壤原生有机碳的矿化需求，进而减少CO_2释放。本研究表明，控释氮肥结合垄覆生物降解地膜（BMC_2）可同时实现苜蓿增产与减排。这与胡国辉等[17]（水稻）、Chen等[16]（玉米）及孙梦媛等[57]（马铃薯）的研究结论一致。此外，土壤物理特性、微生物群落结构及土壤酶活性也是影响温室气体排放的重要因素，后续将深入解析各因素对苜蓿增产减排的作用机理，同时通过优化温室气体观测方案，特别是在灌水、降水、施肥等关键期增加监测频次，进一步精确量化种植施氮模式对苜蓿草地温室气体排放的调控过程。

4　结论

1）不同种植模式与氮肥管理下，苜蓿草地表现为CO_2和N_2O净排放源及CH_4吸收汇。随苜蓿建植年限增加，CO_2排放量和CH_4吸收量呈降低趋势，N_2O排放量呈升高趋势。

2）苜蓿草地CO_2和N_2O累积排放量表现为PM＞BM＞FP，CH_4累积吸收量表现为PM＜BM＜FP。与尿素相比，施用控释氮肥可显著降低CO_2及N_2O排放通量及累积排放量，且随施氮水平提高呈增加趋势，控释氮肥能增强CH_4吸收通量与累积吸收量，且在C_2施氮水平下最大。

3）施用控释氮肥较施用尿素可使苜蓿产量平均提高8.46%，覆盖生物降解膜和覆盖普通地膜的苜蓿产量较传统平作分别平均提高43.56%和30.07%，BMC_2处理的苜蓿产量最高。

4）苜蓿草地温室气体全球增温潜势（GWP）表现为PM＞BM＞FP，施用控释氮肥显著低于施用尿素，且随施氮水平提高显著增加。温室气体排放强度（GHGI）表现为BM低于PM和FP，施用控释氮肥显著低于施用尿素，且随施氮水平提高呈现先降低后升高趋势。

在本研究条件下，施用160 kg·hm^{-2}控释氮肥＋垄覆生物降解地膜可同时实现高产与减排，是甘肃引黄灌区及类似生态区苜蓿生产适宜的种植管理模式。

参考文献 References：

[1] Lee H, Romero J. IPCC, 2023: Climate change 2023: synthesis report//Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023.

[2] Hu T H, Xiong K N, Wang J. Intercropping peanut under forests can reduce soil N_2O emissions in karst desertification control. Forests, 2023, 14(8): 1652.

[3] Searchinger T, Waite R, Hanson C, *et al*. Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050. Washington, DC: World Resources Institute, 2019.

[4] Liu T Q, Li S H, Guo L J, *et al*. Advantages of nitrogen fertilizer deep placement in greenhouse gas emissions and net ecosystem economic benefits from no-tillage paddy fields. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121322.

[5] Sakuraba Y, Chaganzhana, Mabuchi A, *et al*. Enhanced *NRT1. 1/NPF6. 3* expression in shoots improves growth under nitrogen deficiency stress in *Arabidopsis*. Communications Biology, 2021, 4: 256.

[6] Bolo P, Muna M M, Kinyua M, *et al*. Nitrogen and phosphorus mineralization and their corresponding monetary values under long-term integrated soil fertility management practices. Journal of Sustainable Agriculture and Environment, 2024, 3(2): e12100.

[7] Wu P, Fu L, Li H, *et al*. Suitable fertilizer application depth can increase nitrogen use efficiency and maize yield by reducing gaseous nitrogen losses. Science of the Total Environment, 2021, 781: 146787.

[8] Verma K K, Song X P, Degu H D, *et al*. Recent advances in nitrogen and nano-nitrogen fertilizers for sustainable crop production: a mini-review. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10: 111.

[9] Dekyi D, Zeng K, Yin B, *et al*. Eliminaing NH_3, NO and N_2O emissions simultaneously in a wheat field by urea point placement. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(6): 18－26.
德吉卓玛, 曾科, 尹斌, 等. 尿素穴施削减麦田NH_3挥发、NO和N_2O排放. 中国土壤与肥料, 2024(6): 18－26.

[10] Saravanakumar S. Integrated nitrogen management in rice (*Oryza sativa*) under system rice intensification. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2020, 90(5): 843－846.

[11] Huang P, Zhang J B, Zhu A N, *et al*. Coupled water and nitrogen (N) management as a key strategy for the mitigation of gaseous N losses in the Huang-Huai-Hai Plain. Biology and Fertility of Soils, 2014, 51(3): 331－342.

[12] Wei T B, Chai Q, Wang W M, *et al*. Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(3): 428－444.
魏廷邦, 柴强, 王伟民, 等. 水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应. 中国农业科学, 2019, 52(3): 428－444.

[13] Li X Y, Ding Z J, Yan J W, *et al*. Interaction effect and model of water and nitrogen under degradable film mulching in dripirrigated sandy farmland. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 261－270.
李仙岳, 丁宗江, 闫建文, 等. 沙区降解膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究. 农业机械学报, 2018, 49(7): 261－270.

[14] Liu Z H, Cai L, Zhao X L, *et al*. Effect of decomposition of polyethylene residue film on soil water infiltration. China Environmental Science, 2022, 42(12): 5768－5774.
刘子涵, 才璐, 赵小丽, 等. 聚乙烯残膜破碎过程对土壤水分入渗的影响. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5768－5774.

[15] Belyaeva O, Ward G, Wijesinghe T, *et al*. Influence of soil organic matter, fertilizer formulation and season on fertilizer nitrogen use efficiency in temperate pastures. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2024, 129: 133－150.

[16] Chen N Y, Li X Y, Shi H B, *et al*. Assessment and modeling of maize evapotranspiration and yield with plastic and biodegradable film mulch. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108474.

[17] Hu G H, Wang J K, Wang Y L, *et al*. Effects of biodegradable film mulching on nitrogen use efficiency and yield of machine-transplanted rice. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5): 977－986.
胡国辉, 王久坤, 王亚梁, 等. 生物可降解膜覆盖对机插水稻氮素利用及产量的影响. 生态环境学报, 2020, 29(5): 977－986.

[18] Huang Y L, Qin R Z, Wei H H, *et al*. Plastic film mulching application improves potato yields, reduces ammonia emissions, but boosts the greenhouse gas emissions in China. Journal of Environmental Management, 2024, 353: 120241.

[19] Yin M H, Ma Y L, Kang Y X, *et al*. Effects of nitrogen application on alfalfa yield and quality in China－A Meta-analysis. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(9): 36－49.
银敏华, 马彦麟, 康燕霞, 等. 氮素添加对中国苜蓿产量与品质效应的Meta分析. 草业学报, 2022, 31(9): 36－49.

[20] Xia X, Gong Z P. Research advance on the relationship between nitrogen and Leguminous nitrogen fixation. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(1): 79－88.
夏玄, 龚振平. 氮素与豆科作物固氮关系研究进展. 东北农业大学学报, 2017, 48(1): 79－88.

[21] Zhang Y L, Hu Z Z, Zhao H X, *et al*. Effect of the seeding-year clipping on the biomass and regrowth rate of grass-legume mixed grassland. Acta Agrestia Sinica, 2004(4): 308－312.
张永亮, 胡自治, 赵海新, 等. 刈割对混播当年生物量及再生速率的影响. 草地学报, 2004(4): 308－312.

[22] Zhang Y Y, Wang B, Wang T F, *et al*. Effects of intercropping triticale with alfalfa on system yield, resource utilization, and alfalfa seed yield. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(8): 43－53.

张译尹，王斌，王腾飞，等．苜蓿种子田间作小黑麦对饲草产量、水分利用及苜蓿种子产量的影响．草业学报，2025，34(8)：43－53.

[23] Tao X S，Yan Y E，Zhou X L. Study on the soil properties of desert grassland in the edge of Jingtai oasis. Pratacultural Science，2009，26(6)：29－34.
陶雪松，闫月娥，周晓雷．景泰绿洲边缘荒漠草地土壤特征研究．草业科学，2009，26(6)：29－34.

[24] Huang Y X，Yang Y，Zhang P，*et al*. Review on soil microbes regulating ecosystem carbon sink function. Acta Ecologica Sinica，2025，45(17)：8297－8310.
黄云鑫，杨阳，张鹏，等．土壤微生物调控生态系统碳汇功能研究进展．生态学报，2025，45(17)：8297－8310.

[25] Zhang W W，Gu J，Zhang Y Z，*et al*. Effects of PBAT/PLA biodegradable film mulching on greenhouse gas emissions in rain-fed maize farmland of Northeast China. Science of the Total Environment，2024，957：177725.

[26] Zhao Z M，Shi F X，Guan F C. Effects of plastic mulching on soil CO_2 efflux in a cotton field in northwestern China. Scientific Reports，2022，12：4969.

[27] Xu K，Wu X D，Xie Y Z，*et al*. Main factors controlling soil CO_2 efflux from alfalfa fields of different standing ages in an arid area. Ecology and Environmental Sciences，2013，22(10)：1671－1677.
徐坤，吴旭东，谢应忠，等．干旱区不同种植年限苜蓿人工草地土壤CO_2排放的主要影响因素．生态环境学报，2013，22(10)：1671－1677.

[28] Chi Y B，Yang P L，Ren S M，*et al*. Finding the optimal fertilizer type and rate to balance yield and soil GHG emissions under reclaimed water irrigation. Science of the Total Environment，2020，729：138954.

[29] Tian S Z，Liu Z，Wang B W，*et al*. Balancing the use of maize residues for soil amendment and forage. Plant，Soil and Environment，2016，62(11)：490－496.

[30] Anderson C R，Peterson M E，Frampton R A，*et al*. Rapid increases in soil pH solubilise organic matter，dramatically increase denitrification potential and strongly stimulate microorganisms from the Firmicutes phylum. PeerJ，2018，6：e6090.

[31] Deng X W，Yang J J，Chen H，*et al*. Advances in the research of methane oxidation in forest soils. Ecology and Environmental Sciences，2012，21(3)：577－583.
邓湘雯，杨晶晶，陈槐，等．森林土壤氧化(吸收)甲烷研究进展．生态环境学报，2012，21(3)：577－583.

[32] Liu J L，Chen X P，Zhan A，*et al*. Methane uptake in semiarid farmland subjected to different mulching and nitrogen fertilization regimes. Biology and Fertility of Soils，2016，52(7)：941－950.

[33] Lan T，Zhang H，Han Y，*et al*. Regulating CH_4，N_2O，and NO emissions from an alkaline paddy field under rice-wheat rotation with controlled release N fertilizer. Environmental Science and Pollution Research，2021，28(14)：18246－18259.

[34] Parthiban K O，Karthigeyan C，Saravanan N，*et al*. Influence of nutrients on oxidation of low-level methane by mixed methanotrophic consortia. Environmental Science and Pollution Research，2016，23(20)：4346－4357.

[35] Li X S，Yue S C，Li S Q，*et al*. Effect of film mulching and nitrogen fertilizer on CH_4 absorption of rainfed spring maize farmland. Agricultural Research in the Arid Areas，2017，35(4)：1－9，53.
李晓莎，岳善超，李世清，等．覆膜和氮肥用量对雨养春玉米农田甲烷吸收的影响．干旱地区农业研究，2017，35(4)：1－9，53.

[36] Shrestha P M，Frenzel P，Conrad R，*et al*. Effect of nitrogen fertilization on methane oxidation，abundance，community structure，and gene expression of methanotrophs in the rice rhizosphere. The ISME Journal，2010，4(12)：1545－1556.

[37] Zhang L H，Yuan F H，Bai J H，*et al*. Phosphorus alleviation of nitrogen-suppressed methane sink in global grasslands. Ecology Letters，2020，23(5)：821－830.

[38] Li Q，Peng C H，Zhang J B，*et al*. Nitrogen addition decreases methane uptake caused by methanotroph and methanogen imbalances in a Moso bamboo forest. Scientific Reports，2021，11(1)：5578.

[39] Al-barakah F N，Mridha M A. Symbiotic nitrogen fixation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) by *Sinorhizobium meliloti* at Al-qassim regions，Saudi Arabia. Pakistan Journal of Botany，2016，48(1)：345－348.

[40] Wang X Y，Gao Y Z. Advances in the mechanism of cereal/legume intercropping promotion of symbiotic nitrogen fixation. Chinese Science Bulletin，2020，65(2)：142－149.
王旭燕，高永卓．禾本科/豆科间作促进豆科共生固氮的机制研究进展．科学通报，2020，65(2)：142－149.

[41] Yang R，Zheng J，Fan J L，*et al*. Effects of different film mulching methods on greenhouse gas emissions and yield of dryland summer maize. Agricultural Research in the Arid Areas，2020，38(4)：285－292，302.
杨睿，郑静，范军亮，等．覆膜方式对旱作夏玉米产量和温室气体排放的影响．干旱地区农业研究，2020，38(4)：285－

292, 302.

[42] Yu X J, Chai J L, Xu C L, *et al*. Effects of different planting methods on growth of alfalfa and weeds in Gannan alpine region. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(4): 791-801.
鱼小军, 柴锦隆, 徐长林, 等. 覆膜种植对甘南高寒区苜蓿生长和杂草数量的影响. 中国农业科学, 2016, 49(4): 791-801.

[43] Yoshiura C A, Venturini A M, Braga L P, *et al*. Responses of low-cost input combinations on the microbial structure of the maize rhizosphere for greenhouse gas mitigation and plant biomass production. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 683658.

[44] Soares J R, Cantarella H, Vargas V P, *et al*. Enhanced-efficiency fertilizers in nitrous oxide emissions from urea applied to sugarcane. Journal of Environmental Quality, 2015, 44(2): 423-430.

[45] Xie W Y, Zhou H P, Yang Z X, *et al*. Effects of different slow controlled-release fertilizers on grain yield and nitrogen fate in continuous spring maize production. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 207-214.
解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 不同缓控释氮肥对连作春玉米产量及氮肥去向的影响. 水土保持学报, 2019, 33(3): 207-214.

[46] Yang J G, Zou G Y, Liu B C. Review and prospect for development of new-type fertilizers in China over past decade. Modern Chemical Industry, 2024, 44(11): 6-11.
杨俊刚, 邹国元, 刘宝存. 我国新型肥料发展近十年回顾与展望. 现代化工, 2024, 44(11): 6-11.

[47] Wang X X, Cao B, Liang H S, *et al*. Combined appilcation of controlled-release nitrogen fertilizer and water-soluble fertilizer to reduce N_2O emission in greenhouse soil. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(12): 2084-2094.
王学霞, 曹兵, 梁红胜, 等. 控释氮肥与水溶肥配施减少设施土壤N_2O排放的机理. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2084-2094.

[48] Chen Q, Hu N J, Zhang Q, *et al*. Effects of biodegradable plastic film mulching on the global warming potential, carbon footprint, and economic benefits of garlic production. Agronomy, 2024, 14(3): 504.

[49] Li N, Qi W, Jiang C X, *et al*. Effects of plastic film mulching on soil respiration and its sensitivity to temperature and water content. Environmental Technology & Innovation, 2024, 36: 103780.

[50] Guo K J, Hou Y F, Wang L W, *et al*. Study on the optimal nitrogen application rate with N_2O emission reducing and yield increasing under mulching in potato field based on DNDC model. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(9): 1658-1664.
郭康军, 侯玉芳, 王立为, 等. 基于DNDC模型覆膜马铃薯N_2O减排增产的优化施氮量研究. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1658-1664.

[51] Wu K K, Zhang Z, Feng L S, *et al*. Effects of corn stalks and urea on N_2O production from corn field soil. Agronomy, 2021, 11(10): 2009.

[52] Wang W, Guo L P, Li Y C, *et al*. Greenhouse gas intensity of three main crops and implications for low-carbon agriculture in China. Climatic Change, 2014, 128(12): 57-70.

[53] Chen H, Liu J J, Zhang A F, *et al*. Effects of straw and plastic film mulching on greenhouse gas emissions in Loess Plateau, China: A field study of 2 consecutive wheat-maize rotation cycles. Science of the Total Environment, 2017, 579(2): 814-824.

[54] Cheng Z P, Bai L F, Wang Z, *et al*. Strip-till farming: combining controlled-release blended fertilizer to enhance rainfed maize yield while reducing greenhouse gas emissions. Agronomy, 2024, 14(1): 136.

[55] Wang X X, Cao B, Zhou Y P, *et al*. Effects of long-term controlled-release urea on soil greenhouse gas emissions in an open-field lettuce system. Plants, 2024, 13(8): 1071.

[56] Xu L, Xue D, Sun J Y, *et al*. Effects of nitrogen addition on carbon components in the ombrotrophic peatland, southwestern Hubei, China. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(3): 412-421.
徐玲, 薛丹, 孙嘉悦, 等. 氮添加对鄂西南贫营养型泥炭地碳组分的影响. 应用与环境生物学报, 2025, 31(3): 412-421.

[57] Sun M Y, Liu J H, Zhao B P, *et al*. Effects of full-film mulching and ridging planting on the rainfed potato growth and soil characteristics. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 262-276.
孙梦媛, 刘景辉, 赵宝平, 等. 全覆膜垄作种植对旱作马铃薯生长和土壤特性的影响. 水土保持学报, 2018, 32(5): 262-276.