文章编号:1000-7601(2025)05-0148-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.15

垄沟覆膜和施磷对紫花苜蓿地土壤-植物-微生物系统生态化学计量的影响

徐秋韵[1],周伟迪[1,2],韩成龙[3],谷艳杰[1],李凤民[4]

(1. 青海大学农牧学院,青海 西宁 810016;2. 青海大学农林科学院,青海 西宁 810016;
3. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室,青海 西宁 810016;
4. 南京农业大学农学院,江苏 南京 210095)

摘 要:2011—2016 年,在甘肃省榆中县中连川村,以紫花苜蓿人工草地为研究对象,采用裂区随机区组设计,设置平作不覆膜和垄沟覆膜 2 种覆膜方式及 4 个施磷处理(P0:不施磷,P1:施磷 9.73 kg·hm^{-2},P2:施磷 19.3 kg·hm^{-2}和 P3:施磷 28.9 kg·hm^{-2}),期间每年采集土壤和地上部植物样品以分析土壤-植物-微生物系统碳、氮、磷含量及其生态化学计量变化特征。研究结果表明:(1)除高磷处理(P3)外,垄沟覆膜土壤碳、氮含量,C∶N、C∶P 和N∶P 以及微生物量碳(MBC)、C∶N和 C∶P 分别比平作不覆膜平均提高了 39.3%、27.1%、13.5%、55.3%、49.8%、57.6%、39.6%和 43.3%;垄沟覆膜土壤有效磷含量比平作不覆膜处理平均降低 13.9%。(2)平作不覆膜条件下,土壤碳含量和 C∶N、植株氮含量、MBC、C∶N 和 C∶P 随施磷量增加而增加,垄沟覆膜条件下随施磷量的增加呈先增加后降低趋势。(3)平作不覆膜条件下,P1、P2 和 P3 处理植株 C∶N 和微生物量氮(MBN)分别比 P0 处理降低了2.94%、7.02%、11.5%和 8.62%、11.5%、19.1%;垄沟覆膜条件下,P1 处理植株 C∶N 和 MBN 分别比 P0 处理降低了 10.0%和 24.3%,而 P3 处理植株 C∶N 和 MBN 分别比 P1 和 P2 处理提高了 8.20%、5.93%和 27.4%、9.92%。(4)与 P0 处理相比,施磷后土壤、植物和微生物量磷(MBP)含量分别提高了 67.2%~164.0%、14.0%~34.3%、19.2%~87.0%,土壤 C∶P和 N∶P、植物 C∶P 和 N∶P 以及微生物量N∶P分别降低了 29.5%~51.5%、30.1%~54.3%、13.2%~28.3%、6.71~19.8%、29.1%~52.7%。(5)随种植年限延长, 至 2016 年,土壤碳、氮含量和 C∶N、植株 N∶P 以及微生物量 C∶P较 2011 年分别累计增加 49.3%、33.9%、11.3%、77.6%和 126.0%,而植株磷含量累计降低 51.3%。分析表明,垄沟覆膜条件下施磷量过高导致苜蓿和土壤微生物生长受氮缺乏限制,并加快土壤有机质分解,不利于维持黄土高原半干旱区紫花苜蓿生长和土壤肥力。因此,当垄沟覆膜条件下施磷量高于 22.7 kg·hm^{-2}时应供应适量氮肥。

关键词:垄沟覆膜;施磷;紫花苜蓿;土壤-植物-微生物系统;生态化学计量

中图分类号:S365; S154.4 **文献标志码**:A

Effects of ridge and furrow mulching and phosphorus application on the ecological stoichiometry of soil-plant-microorganism system in alfalfa field

XU Qiuyun[1], ZHOU Weidi[1,2], HAN Chenglong[3], GU Yanjie[1], LI Fengmin[4]

(1. *College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai* 810016, *China*;
2. *Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai* 810016, *China*;
3. *State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining, Qinghai* 810016, *China*;
4. *College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*)

Abstract: From 2011 to 2016, the alfalfa artificial grassland was used as the research object in Zhonglianchuan village, Yuzhong County, Gansu Province. The randomized block of split-plot design was used. Two mulching methods (no mulching with flat planting and mulching with ridge and furrow) and four phosphorus application gradients (P0: no P applied, P1: apply 9.73 kg·hm^{-2} phosphorus, P2: apply 19.3 kg·hm^{-2} phosphorus, and P3: apply 28.9 kg·hm^{-2} phosphorus) were set up. During the period, soil and aboveground plant samples

收稿日期:2024-12-23 **修回日期**:2025-06-11

基金项目:国家自然科学基金(31960625);青海省科技计划自然科学基金青年项目(2020-ZJ-969Q)

作者简介:徐秋韵(1996-),女,广东清新人,硕士研究生,研究方向为作物高产措施及高产机理。E-mail: xuqiuyun1996@163.com

通信作者:谷艳杰(1986-),女,内蒙古赤峰人,博士,副教授,主要从事作物高产措施及其养分资源高效利用研究。E-mail: guyanjie@126.com

were collected every year to analyze the C, N, and P content of the soil-plant-microorganism system and their ecological stoichiometric characteristics. The results showed that, (1) In addition to high P treatment (P3), plastic film mulch with ridge and furrow averagely increased soil C, N, C∶N, C∶P, N∶P, soil microbial biomass C contents, C∶N, and C∶P by 39.3%, 27.1%, 13.5%, 55.3%, 49.8%, 57.6%, 39.6%, and 43.3%, respectively, compared to no mulching with flat planting. Soil available P under mulching with ridge and furrow averagely decreased by 13.9%, compared to no mulching with flat planting. (2) Soil C, C∶N, plant N, soil microbial biomass C, C∶N, and C∶P increased with increasing P levels in no mulching with flat planting but increased initially and then decreased with the increasing P levels under mulching with ridge and furrow. (3) Plant C∶N and soil microbial biomass nitrogen (MBN) in P1, P2 and P3 treatments decreased by 2.94%, 7.02%, 11.5% and 8.62%, 11.5%, 19.1%, respectively, compared to P0 in no plastic film mulch with flat planting. Plant C∶N and MBN in P1 treatment decreased by 10.0% and 24.3% respectively compared to P0, while in P3 treatment increased by 8.20%, 5.93% and 27.4%, 9.92%, respectively, compared to P1 and P2 under mulching with ridge and furrow. (4) P fertilization respectively increased soil, plant, and soil microbial biomass P by 67.2% to 164.0%, 14.0% to 34.3%, and 19.2% to 87.0%, and respectively decreased soil C∶P and N∶P, plant C∶P and N∶P, and soil microbial biomass N∶P by 29.5% to 51.5%, 30.1% to 54.3%, 13.2% to 28.3%, 6.71% to 19.8%, and 29.1% to 52.7%. (5) With the extension of planting years, by 2016, soil C, N, C∶N, plant N∶P, and soil microbial biomass C∶P had cumulatively increased by 49.3%、33.9%、11.3%、77.6% , and 126.0%, respectively compared to 2011, while plant phosphorus content had cumulatively decreased by 51.3%. In summary, the growth of alfalfa and soil microorganisms was limited by N deficiency under mulching with ridge and furrow and a high amount of P fertilizer. This management practice accelerated the decomposition of soil organic matter, which was not conducive to maintaining the growth of alfalfa and soil fertility in the semi-arid region of the Loess Plateau. Therefore, when the amount of P applied under mulching with ridge and furrow is higher than 22.7 kg · hm^{-2}, appropriate nitrogen fertilizer should be supplied.

Keywords: ridge and furrow mulching; phosphorus application; *Medicago sativa* L.; soil-plant-microorganism system; ecological stoichiometry

土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其化学计量比是衡量土壤肥力的重要指标,能够间接反映植物营养状况[1-2]。C、N、P 生态化学计量特征可反映生物体与其所处环境间能量和元素的平衡关系,对于理解生态系统养分循环和养分限制至关重要[3-6]。然而,土地利用、生物生存环境、土壤养分供应等变化,都会对植物和微生物生态化学计量比产生影响[1,7-8]。研究显示,当土壤养分供应较好时,微生物生物量 C∶N∶P 是恒定的[9]。在全球尺度,土壤微生物生物量 C∶N∶P 约为 60∶7∶1[10],C、N、P 生态化学计量比的不平衡会严重影响生态系统的结构、功能和生物的生长繁殖[3,11]。土壤-植物-微生物生物量 C、N、P 含量及其化学计量间存在较强的关联性,系统研究各要素间的关系对于了解生态系统养分循环和能量流动具有重要意义[7,12-13]。

黄土高原半干旱区属于我国典型生态脆弱区,生态系统退化和水土流失极为严重[14]。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)具有生物固氮、耐寒旱和增加植被覆盖等优点,在该区植被恢复和土壤侵蚀控制中应用广泛[15]。然而,紫花苜蓿需水量高,当地有限且不稳定的降水以及贫瘠的土壤条件成为限制苜蓿生长的主要因素[16]。垄沟覆膜能够改善土壤水热条件,提高土壤养分有效性,进而提升作物产量[16-17]。但是,土壤 P 素移动性差、生物有效性低,严重影响植物生长和代谢过程[15]。豆科植物生物固氮作用对磷素的强烈需求也会导致植物磷限制[18-19]。施磷肥是提高土壤磷有效性的有效措施,但会导致营养元素供应不平衡,进而对土壤-植物-微生物生物量生态化学计量比和土壤养分循环产生影响,甚至造成新的养分限制[7,9,20-21]。比如,不施磷肥时土壤微生物生长主要受 C 和 P 限制,而施磷肥后则受 C 和 N 限制[9]。以往的研究对黄土高原半干旱区紫花苜蓿人工草地土壤质量和水温、植物养分、产草量等的关系进行了阐述[16,22-23]。但总体而言,将土壤-植物-微生物作为连续体进行系统研究,探讨该区紫花苜蓿人工草地生态系统 C、N、P 生态化学计量特征及其相互关系仍需进一步探索。综上所述,垄沟覆膜和施磷影响土壤物理、化学和生物属性,从而引起生态系统养分循环和化学计量特征的相互反馈[20,22-23]。明确垄沟覆膜和施磷对紫花苜蓿人工草地土壤-植物-微生物生物量 C、N、P 含量及其生态化学计量特征的影响,有助于了解

苜蓿人工草地生态系统的养分循环和养分限制状况,以期为黄土高原半干旱区紫花苜蓿人工草地农业管理措施和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄土高原西部的甘肃省兰州市榆中县中连川村(104°25′E,36°02′N,海拔约 2 400 m)。该试验区地处黄土丘陵沟壑区,属温带半干旱气候,年均气温 6.5℃,最高温出现在 7 月份(约 19.0℃),最低温出现在 1 月份(约-8.0℃)。该区降水少且年际、年内降水量波动大,年均降水量约 315 mm(1999—2016 年)。土壤为黑麻土(石灰性栗钙土)[15]。试验布设前 0~20 cm 土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验布设前 0~20 cm 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of 0~20 cm soil before the start of the experiment

指标 Indicator	单位 Unit	数值 Value
有机碳 Soil organic carbon(SOC)	$g \cdot kg^{-1}$	5.280
全氮 Total nitrogen(TN)	$g \cdot kg^{-1}$	0.335
全磷 Total phosphorus(TP)	$g \cdot kg^{-1}$	0.655
有效磷 Available phosphorus(AP)	$mg \cdot kg^{-1}$	5.210
pH		8.79
碳氮比 C∶N		15.8
碳磷比 C∶P		1013.0
氮磷比 N∶P		64.3

1.2 试验设计

以当地紫花苜蓿品种‘陇中’为供试材料,采用裂区随机区组设计,设置 2 个覆膜处理作为主区(NM:平作不覆膜,M:垄沟覆膜),4 个磷梯度作为副区(P0:不施磷,P1:施磷 9.73 $kg \cdot hm^{-2}$,P2:施磷 19.3 $kg \cdot hm^{-2}$,P3:施磷 28.9 $kg \cdot hm^{-2}$)[24]。试验共设置 8 个处理,3 次重复,共计 24 个小区(图 1)。每个试验小区长 10 m,宽 3 m。垄宽 30 cm,高 15 cm,沟为“V”型沟(沟宽=0)。试验所用磷肥为过磷酸钙($CaP_2H_4O_8$)。2011 年 6 月 29 日,将 75 $kg \cdot hm^{-2}$尿素和上述各磷量的一半(因 2011 年是苜蓿种植的第一年,苜蓿产草量较低,需磷量较小,因此 2011 年施加的磷肥量仅为处理磷水平的 50%,2012—2016 年根据处理磷水平施加磷肥),混合后均匀撒施于每个小区并翻入耕作层。以 15 $kg \cdot hm^{-2}$的密度行播,同时起垄覆膜。2012—2016 年,除磷肥外未投入其他任何形式的肥料。当地属于雨养农业区,无灌溉,人工去除杂草。

1.3 样品采集

当地紫花苜蓿人工草地每年刈割 2 次,植物和土壤样品分别于 2011—2016 年期间每年苜蓿第二次刈割的盛花期(10 月中旬)采集,并于当年测定各项指标。除去边缘行,每个小区随机选取 3 株苜蓿,贴地面刈割后剪成约 3 cm 长的小段,混合均匀后采用四分法取约 200 g 左右装入档案袋,杀青、烘干,使用电子研磨仪(ZM 200,德国)研磨成细粉状,测定植株 C、N、P 含量。每个小区随机取 6 钻(直径 6 cm)0~20 cm 土壤样品,其中垄和沟(行间和种植行)分别取 3 钻,分别混匀。去除土壤中残根和植物残体等杂质,过 2 mm 孔径筛后分为两部分。一部分保存于 4 ℃,用于测定土样含水量(烘干法)、土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBP)。另一部分置于室内阴凉处风干,用于测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和有效磷(AP)。

1.4 指标测定

土壤 SOC 和苜蓿植株碳含量均采用重铬酸钾-外加热容量法测定,土壤 TN 采用浓 H_2SO_4消煮-凯氏定氮法测定,土壤 AP 采用 0.5 $mol \cdot L^{-1}$ $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定[1,13,21]。苜蓿样品用浓 H_2SO_4-H_2O_2消煮后,分别采用凯氏定氮法和钼锑抗比色法测定氮、磷含量[13, 23]。土壤样品采用氯仿熏蒸-K_2SO_4溶液浸提,使用 TOC 分析仪(Multi N/C 3100,德国)测定浸提液中的碳、氮含量;采用氯仿熏蒸-$NaHCO_3$溶液浸提,使用钼锑抗比色法测定浸提液中的磷含量。熏蒸与未熏蒸样品中碳、氮、磷含量的差值分别除以提取系数0.45、0.54 和 0.40 即为土壤 MBC、MBN 和 MBP 含量[5,9,18]。

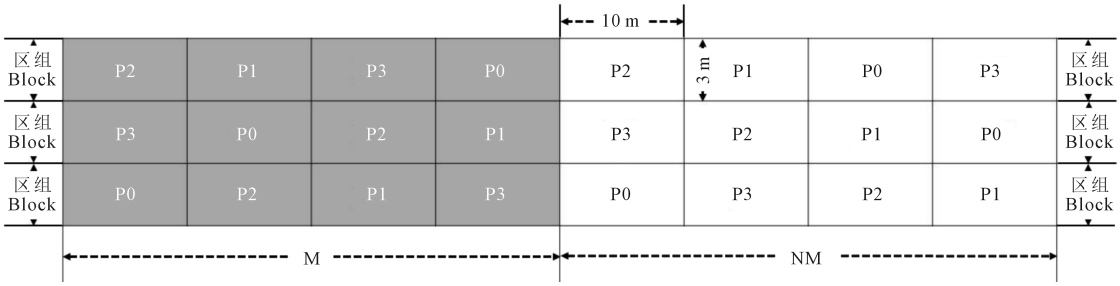
1.5 数据分析与作图

采用 Genstat 21th 软件进行数据分析。种植年限、覆膜方式和磷梯度对土壤-植物-微生物量 C、N、P 含量及其生态化学计量比的影响采用混合线性模型进行分析,其中种植年限、覆膜方式和磷梯度以及三者之间的交互作用作为固定因子,区组作为随机因子,使用 Wald 检验评估模型参数的显著性,分析结果中 *df* 代表自由度,*F* 值代表 Wald 统计量。*,**,***分别代表 $P \leq 0.05$,$P \leq 0.01$ 和 $P \leq 0.001$ 水平不同处理间差异显著性。n.s.代表响应变量在处理间无显著差异。采用 Origin 9.8 作图。Pearson 相关系数用来评价变量间的相关程度。图中的所有数据均为 3 个重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 垄沟覆膜和施磷对土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比的影响

由图 2 可见,苜蓿种植后期 NMP3 和 M 处理土壤 SOC 含量高于初始值,所有处理土壤 TN 含量在

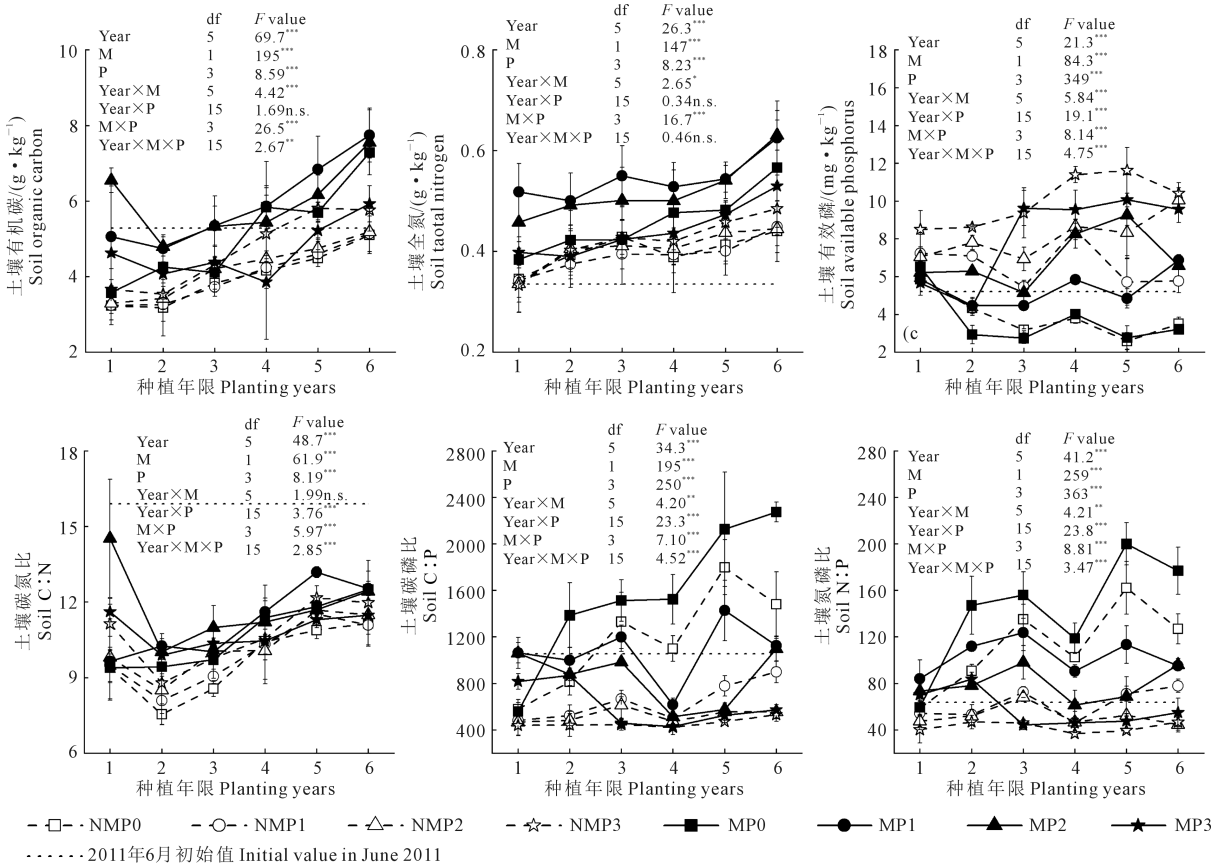


注:NM 代表平作不覆膜,作为垄沟覆膜的对照;M 代表垄沟覆膜。P0 代表不施磷,作为不同磷梯度的对照;P1 代表施磷 9.73 kg · hm^{-2};P2 代表施磷 19.3 kg · hm^{-2};P3 代表施磷 28.9 kg · hm^{-2}。

Note: NM represents no mulching with flat planting, which is used as control for mulching with ridge and furrow. M represents mulching with ridge and furrow. P0: No P applied, which is used as control for different P levels; P1: 9.73 kg · hm^{-2} P application; P2: 19.3 kg · hm^{-2} P application; P3: 28.9 kg · hm^{-2} P application.

图 1　试验设计

Fig.1　Experimental design



注:NMP0:平作不覆膜不施磷;NMP1:平作不覆膜施磷 9.73 kg · hm^{-2};NMP2:平作不覆膜施磷 19.3 kg · hm^{-2};NMP3:平作不覆膜施磷 28.9 kg · hm^{-2};MP0:垄沟覆膜不施磷;MP1:垄沟覆膜施磷 9.73 kg · hm^{-2};MP2:垄沟覆膜施磷 19.3 kg · hm^{-2};MP3:垄沟覆膜施磷 28.9 kg · hm^{-2}。* 代表 $P<0.05$ 水平差异显著,** 代表 $P<0.01$ 水平差异显著,*** 代表 $P<0.001$ 水平差异显著,n.s. 代表处理间差异不显著。误差棒为标准差。下同。

Note: NMP0: No mulching with flat planting and no P applied; NMP1: No mulching with flat planting and 9.73 kg · hm^{-2} P applied; NMP2: No mulching with flat planting and 19.3 kg · hm^{-2} P applied; NMP3: No mulching with flat planting and 28.9 kg · hm^{-2} P applied; MP0: Mulching with ridge and furrow and no P applied; MP1: Mulching with ridge and furrow and 9.73 kg · hm^{-2} P applied; MP2: Mulching with ridge and furrow and 19.3 kg · hm^{-2} P applied; MP3: Mulching with ridge and furrow and 28.9 kg · hm^{-2} P applied. * indicates significant differences at $P<0.05$ level, ** indicates significant differences at $P<0.01$ level, *** indicates significant differences at $P<0.001$ level, n.s. indicates no significant difference between treatments. The error bars are the standard deviation. The same below.

图 2　垄沟覆膜和施磷下不同种植年限紫花苜蓿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征

Fig.2　Soil C, N, P, and their ecostoichiometric characteristics of alfalfa field in different planting years under mulching with ridge and furrow and phosphorus application

6 a 中均高于初始值,而所有处理土壤 C∶N 则低于初始值。除苜蓿种植的前两年外,P2 和 P3 处理土壤 AP 含量高于初始值,P0 处理土壤 C∶P 和 N∶P 高于初始值。种植年限、覆膜方式、磷梯度以及覆膜方式和磷梯度间的交互作用对土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比均具有显著影响。除第 1 年外,土壤 SOC、TN 和 C∶N 均随苜蓿种植年限延长逐渐增加。土壤 AP、C∶P 和 N∶P 在不同种植年限间呈波动变化。

除 P3 处理外,M 处理土壤 SOC 和 TN 显著高于 NM。NM 处理土壤 SOC 随施磷量的增加而显著增加,M 处理土壤 SOC 和 TN 随施磷量的增加呈先增加后降低趋势。土壤 AP 在 NM 和 M 处理中随施磷量的增加而显著增加(第 1 年和第 2 年 M 处理除外);且 NM 处理土壤 AP 显著高于 M 处理(第 1 年 P0、第 3 年 P3 和第 5 年 P2 处理除外)。M 处理土壤 C∶N 显著高于 NM 处理,尤其是 P0、P1 和 P2 处理。NM 处理土壤 C∶N 随施磷量的增加而显著升高(第 4 年除外);M 处理土壤 C∶N 随施磷量的增加呈先升高后降低趋势。M 处理显著提高土壤 C∶P和 N∶P(第 3~6 年 P3 处理除外);施磷显著降低土壤 C∶P 和 N∶P(第 1 年 M 处理除外)。

2.2 垄沟覆膜和施磷对植株碳、氮、磷含量及其生态化学计量比的影响

由图 3 可知,不同种植年限间苜蓿植株碳、氮、磷含量及其生态化学计量比均具有显著差异。第 2 年植株碳含量略高于其他年份,其余年份间差异不显著。植株氮含量、C∶N 和 C∶P 在不同种植年限间波动较大。植株磷含量随种植年限的延长呈逐渐降低趋势,植株 N∶P 随种植年限的延长呈逐渐升高趋势。

M 处理植株碳含量在第 1 年和第 2 年显著高于 NM 处理,而在第 3 年显著低于 NM 处理。M 处理显著降低第 1 年和第 2 年植株 N 含量。NM 处理植株氮含量随施磷量的增加而显著升高,第 1 年除外;M 处理植株氮含量随施磷量的增加呈先升高后降低趋势。第 2~6 年,植株磷含量随施磷量的增加而显著增加。M 处理显著提高了第 1 年和第 2 年植株 C∶N。NM 处理植株 C∶N 随施磷量的增加而显著降低,M 处理植株 C∶N 随施磷量的增加呈先降低后升高趋势。施磷显著降低了植株 C∶P 和 N∶P(第 1 年 NM 处理植株 N∶P 除外)。

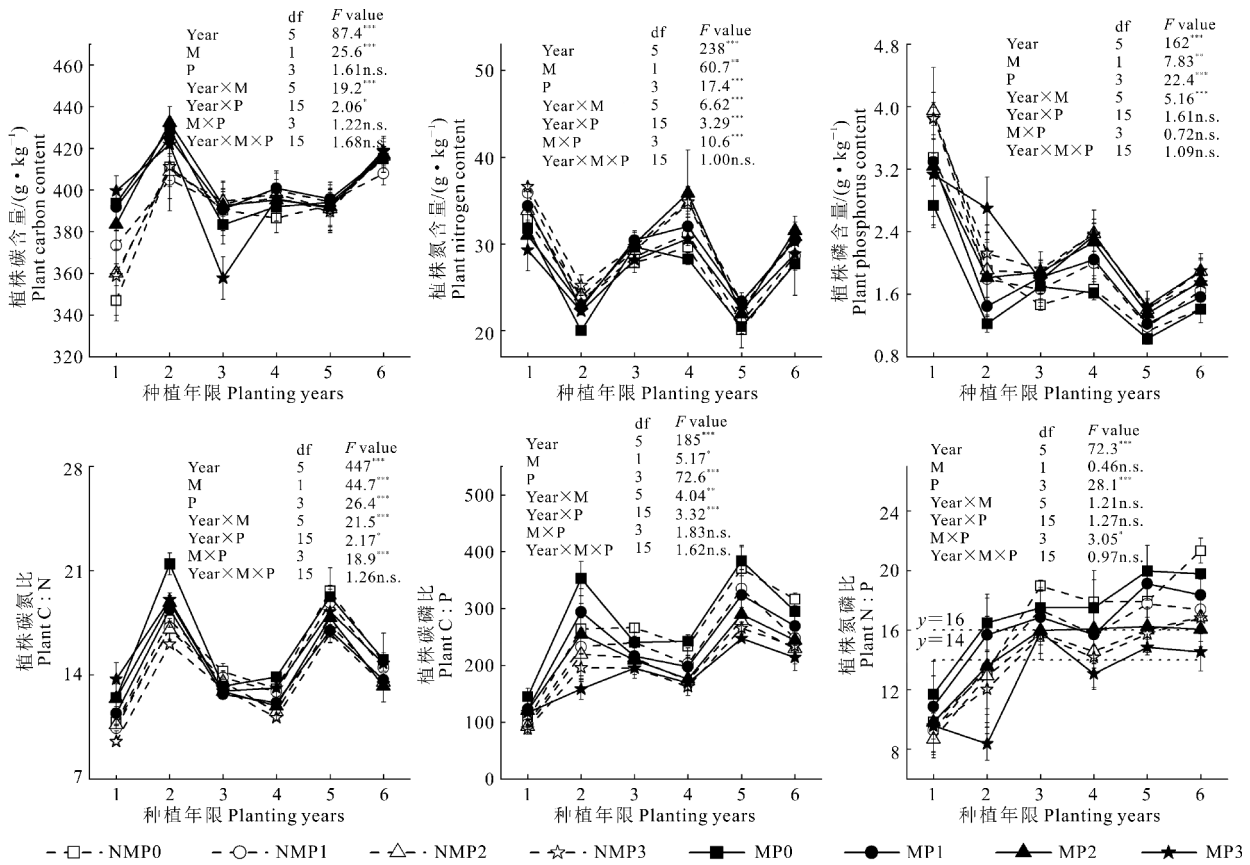


图 3 垄沟覆膜和施磷下不同种植年限紫花苜蓿植株碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征

Fig.3 Plant C, N, P, and their ecological stoichiometric characteristics of alfalfa in different planting years under mulching with ridge and furrow and phosphorus application

2.3　垄沟覆膜和施磷对土壤微生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量比的影响

土壤微生物量 C、N、P 含量及其生态化学计量比在不同种植年限间差异显著且波动较大,其中 MBP 含量在第 3~6 年呈先增加后降低趋势,土壤 MBC∶MBP 呈逐年增加趋势(图 4)。

M 处理显著提高了土壤 MBC(第 4~6 年 P3 处理除外)。NM 处理 MBC 随施磷量的增加而显著升高,M 处理 MBC 随施磷量的增加呈先升高后降低趋势。M 处理显著提高了 P0 和 P3 处理 MBN。NM 处理 MBN 随施磷量的增加而显著降低(第 5 年除外);M 处理 MBN 随施磷量的增加呈先降低后升高趋势。垄沟覆膜和施磷均显著提高了土壤 MBP。垄沟覆膜显著提高了 P0、P1 和 P2 处理土壤 MBC∶MBN 和 MBC∶MBP。NM 处理 MBC∶MBN 和 MBC∶MBP 随施磷量的增加而显著升高,第 4 年和第 5 年 MBC∶MBP 除外;M 处理 MBC∶MBN 和 MBC∶MBP 随施磷量的增加呈先升高后降低趋势。MBN∶MBP 随施磷量的增加而显著降低。

2.4　土壤、植物和微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量比的相关关系

从图 5 的 Pearson 相关分析结果可以看出,SOC 与 MBC 和 MBN、土壤 C∶N、植株 C∶N 和 C∶P 以及土壤微生物量 C、N、P 化学计量比(MBC∶MBN、MBC∶MBP 和 MBN∶MBP)之间存在正相关关系,TN 与 MBC、土壤 C∶N、MBC∶MBN 和 MBC∶MBP 之间存在正相关关系。土壤 AP 与土壤-植株 C∶P 和 N∶P 以及 MBN∶MBP 呈负相关关系,植株氮和磷含量与除 MBC∶MBN 之外的土壤-植物-微生物量 C、N、P 化学计量比之间呈负相关关系,土壤 MBP 与土壤-植物-微生物量 C∶P 和 N∶P 之间呈负相关关系。植株氮、磷含量与土壤 MBC、MBN 显著负相关。土壤 MBC 与土壤 C∶N、植株 C∶N 和 C∶P 以及土壤微生物量 C、N、P 化学计量比之间呈正相关关系,土壤 MBN 与土壤 C∶N 和 C∶P、植株 C∶N、C∶P 和 N∶P 以及 MBC∶MBP 和 MBN∶MBP 之间呈正相关关系。

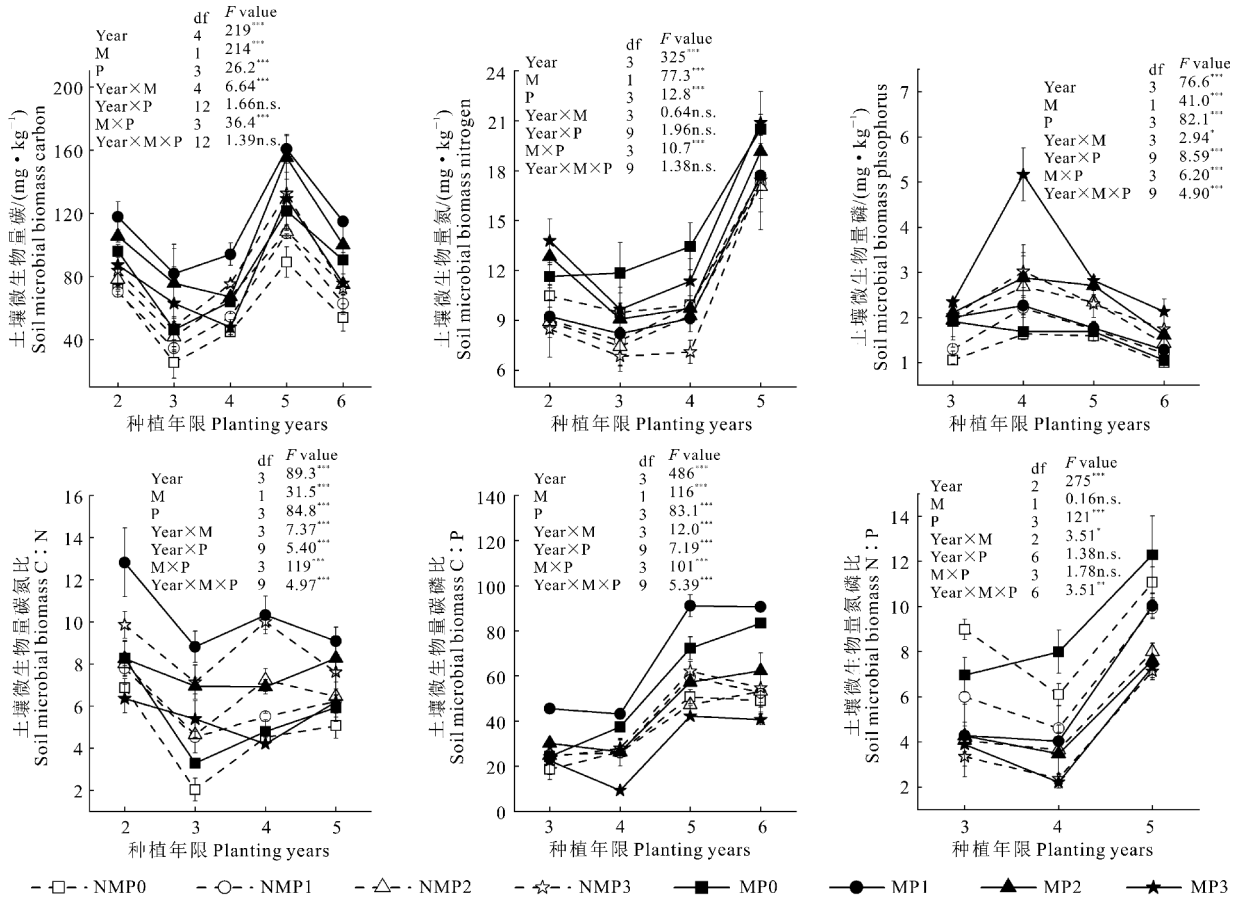
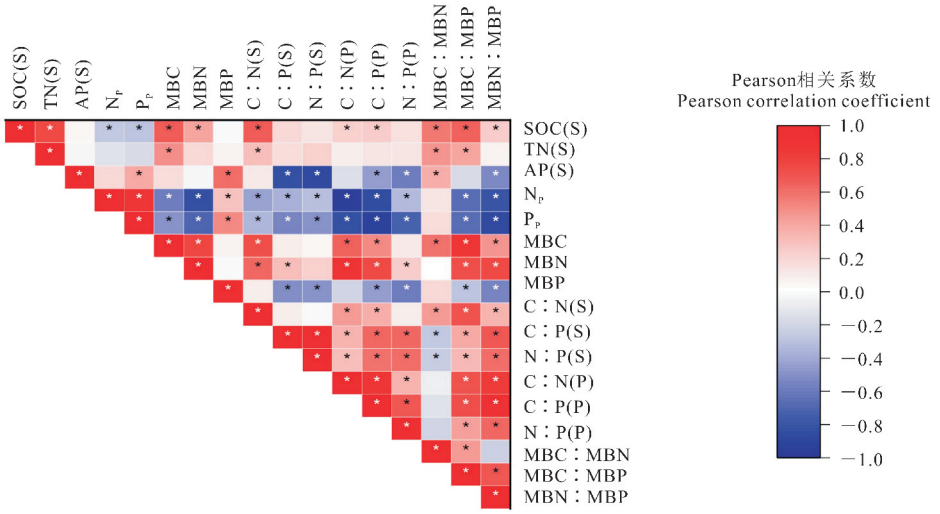


图 4　垄沟覆膜和施磷下不同种植年限紫花苜蓿地土壤微生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征

Fig.4　Soil microbial biomass C, N, P, and their ecological stoichiometric characteristics of alfalfa field in different planting years under mulching with ridge and furrow and phosphorus application



注：N_P 和 P_P 分别为植株的氮和磷含量。其余指标标有（S）的为土壤数据，标有（P）的为植株数据。

Note: N_P and P_P represent the nitrogen and phosphorus content of the plant, respectively. The remaining indicators marked with (S) are soil data, and those marked with (P) are plant data.

图 5 土壤-植物-微生物量碳、氮、磷含量与其生态化学计量比间的 Pearson 相关系数

Fig.5 Pearson correlation coefficients among soil-plant-microbial biomass C, N and P, and their ecological stoichiometric ratios

3 讨 论

3.1 施肥和田间管理对土壤、紫花苜蓿植株和微生物量碳、氮、磷含量的影响

土壤碳和氮含量主要取决于有机质输入（植物残体、根际沉积）与输出（微生物分解、淋溶）之间的平衡[21,24]。土壤 SOC 和 TN 含量逐年增加，可能与苜蓿凋落物、根系和土壤微生物分泌物输入有关，也可能是由于土壤团聚体的物理保护降低了有机质的分解速率[1,19]。紫花苜蓿生物固氮作用也是土壤 TN 含量逐年增加并高于初始值的原因[15]。黄土高原半干旱区降水时空分布不均，影响作物生长及其对土壤磷素的吸收利用，使得土壤 AP 含量在不同种植年限间波动明显[14-15]。土壤微生物量的差异反映微生物对养分的需求与土壤养分供应之间的关系[13]。更多的植物残体和根系分泌物输入，可能是垄沟覆膜和施磷提高土壤 MBC 的原因[2,5]。在养分贫瘠的生态系统中，微生物生物量中某种营养元素相对较高意味着这种元素对植物具有很强的限制[25]。本研究中，垄沟覆膜土壤 MBN 高于平作不覆膜，表明垄沟覆膜加剧了氮素对苜蓿生长的限制。平作不覆膜不施磷以及垄沟覆膜不施磷或施高磷处理土壤 MBN 较高，说明这些处理中氮缺乏严重影响了苜蓿生长。因此，施磷能够缓解氮缺乏对苜蓿生长的影响，这可能与苜蓿生物固氮过程需要大量磷供应有关[18]。但垄沟覆膜下施磷量过高反而加剧苜蓿氮限制，这是元素供应不平衡导致的结果。研究发现，低土壤磷有效性严重限制土壤微生物生物量和活性[26]。本研究中，施磷提高土壤磷有效性，使得土壤 MBP 随施磷量增加而增加。

我们以往的研究显示，苜蓿产草量逐年增加，直至种植的第 6 年有所下降[27]，而植株磷含量随种植年限的变化趋势则刚好相反。苜蓿生长高峰期需要大量核酸、核糖体等物质，元素稀释作用使得苜蓿体内磷含量逐年降低，在种植第 6 年产草量下降时植株磷含量有所上升。植株磷含量随施磷量和土壤磷有效性增加而增加，表明黄土高原半干旱区紫花苜蓿生长受到土壤磷有效性低的限制[28]。

3.2 施肥和田间管理对土壤、紫花苜蓿植株和微生物量碳、氮、磷生态化学计量比的影响

土壤 C∶N 可用来判断土壤微生物生长是否受碳或氮限制：比值≥30 和≤20 时，微生物生长分别受氮源和碳源限制，而比值为 25 时对微生物生长最有利[13]。本研究中，土壤 C∶N 明显低于 20，表明黄土高原半干旱区土壤微生物生长严重受能源不足的影响，也反映了该区土壤的贫瘠状况。土壤碳周转与土壤养分有效性以及微生物养分需求有关，而微生物在 SOC 动态中发挥重要作用[4,21]。一般来说，土壤 C∶N 与有机质分解速度成反比，即土壤 C∶N 越高其分解速度越慢，微生物可固持氮，造成土壤氮有效性降低；土壤 C∶N 越低其分解速度越快，超过微生物生长需要的氮素会被释放到土壤

中,土壤氮有效性增加,但土壤全氮含量降低[4,13,20]。在本研究中,土壤 C∶N 逐年升高并逐渐趋于初始值,也说明土壤 C、N 储量逐年积累。垄沟覆膜和施磷提高土壤 C∶N,土壤有机质分解缓慢,有助于土壤 C、N 含量的提升,也可能与有机质输入速率高于分解速率有关[9]。而垄沟覆膜施高磷处理土壤 C∶N 降低,意味着土壤有机质分解加快,进而降低土壤 SOC 和 TN,不利于土壤肥力的维持。土壤 C∶P 能够表征土壤磷有效性,比值低说明土壤磷有效性较高,比值高表明土壤微生物与植物竞争有效磷[20,25]。垄沟覆膜提高土壤 C∶P,土壤磷有效性降低,微生物与苜蓿竞争土壤有效磷。因此,垄沟覆膜处理土壤 AP 含量低于平作不覆膜,这与该处理较高的苜蓿产草量对土壤磷素的吸收有关。施磷降低土壤 C∶P,提高土壤磷有效性,有利于苜蓿吸收土壤磷素。土壤 N∶P 可以作为养分限制的预测指标[13,20]。垄沟覆膜提高土壤 N∶P,表明垄沟覆膜有利于提高土壤氮含量,同时促进苜蓿对土壤磷素的吸收。施磷降低土壤 N∶P,说明相对于提高的土壤磷含量,施磷会导致苜蓿生长受氮缺乏的限制。另外,不施磷处理土壤 C∶P 和 N∶P 高于初始值,表明黄土高原半干旱区种植紫花苜蓿应投入适量磷肥,以缓解土壤有效磷缺乏对苜蓿生长的影响。

植物 C∶N 可以反映植物对氮的利用效率[29-30]。本研究中施磷提高平作不覆膜处理植株氮含量,垄沟覆膜处理植株氮含量随施磷量的增加而先增加后降低,植株 C∶N 对施磷的响应呈现与植株氮含量完全相反的趋势,表明施磷能够提高苜蓿对氮的利用效率,而垄沟覆膜施高磷处理苜蓿对氮的利用效率降低。植物 N∶P 作为判断陆地生态系统养分限制的指标,可用来指示土壤 N、P 养分的相对有效性[2,10,12,20]。N∶P 阈值假说认为,植物 N∶P<14 指示植物生长受氮限制;N∶P>16 指示受磷限制;N∶P 介于 14 和 16 之间时植物生长受氮或磷限制,或者受到两者的共同限制[31]。苜蓿种植初期(第 1~2 年),植株 N∶P<16 表明苜蓿生长受氮缺乏限制。种植 3 年之后,不施磷或施低磷处理植株 N∶P>16 表明苜蓿生长受磷限制;高磷处理植株 N∶P<14 或介于 14 和 16 之间,表明苜蓿生长受氮限制或氮、磷共同限制。如图 6 所示,平作不覆膜和垄沟覆膜处理苜蓿植株 N∶P 均随施磷量增加而显著降低。当植株 N∶P<14 时,平作不覆膜和垄沟覆膜处理施磷量分别为>25.6 kg·hm^{-2}和>22.7 kg·hm^{-2},表明平作不覆膜施磷量高于 25.6 kg·hm^{-2}时苜蓿生长受氮缺乏限制,垄沟覆膜施磷量高于 22.7 kg·hm^{-2}时苜蓿生长受氮缺乏限制。因此,施磷能够有效缓解磷缺乏对苜蓿生长的影响。垄沟覆膜条件下施磷量大于 22.7 kg·hm^{-2}时应配施氮肥以降低氮缺乏对苜蓿生长的限制,但适宜的氮肥施用量还需设置施肥梯度试验进一步研究。同时,垄沟覆膜处理苜蓿受氮缺乏限制的施磷量低于平作不覆膜,这也表明垄沟覆膜能够提高土壤磷有效性。此外,植株 N∶P 逐年增加,这可能是由于苜蓿生物固氮作用在一定程度上减缓了氮缺乏对苜蓿生长的影响,土壤 TN 含量逐年增加也表明了这一点。

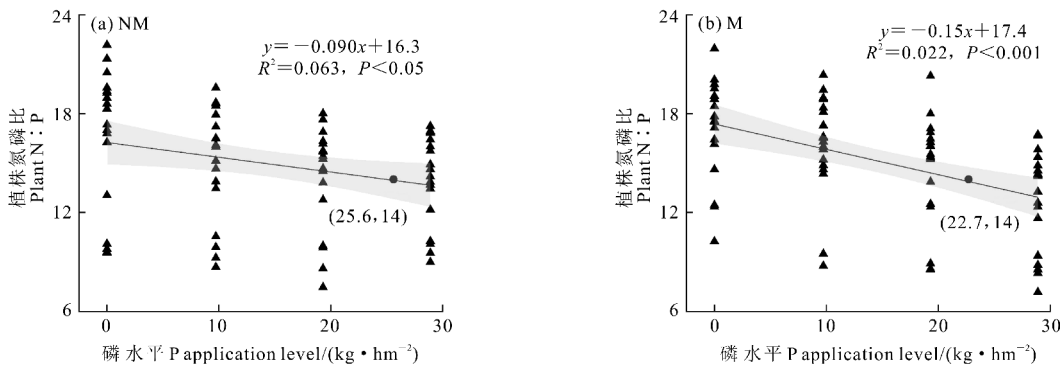


图 6　2 种覆膜方式下紫花苜蓿植株氮磷比与磷施用水平之间的关系

Fig.6　Relationships between N∶P and P application levels of alfalfa plants under two mulching methods

土壤微生物对土壤养分变化敏感,微生物量及其化学计量比能够指示土壤养分状况,用来判断养分限制状况[5-6,11]。本研究中,施磷降低 MBN∶MBP,导致土壤微生物生长受氮限制[9]。不施磷或施低磷较高的 MBN∶MBP 表明,土壤微生物生长可能受磷限制[8]。土壤 MBC∶MBP 可以指示微生物矿化土壤有机质释放磷或从土壤中吸收固持磷,比值越小表明微生物矿化土壤有机质释放磷的潜力较大,补充土壤有效磷库;比值越大表明微生物同化土壤有效磷,与植物竞争有效磷[32]。在全球尺

度,土壤 MBC∶MBP 约为 59.5[10]。本研究中该比值为44.0,低于全球平均水平,说明垄沟覆膜和施磷能够明显改善黄土高原半干旱区土壤磷的有效性。垄沟覆膜提高了 MBC∶MBP,说明垄沟覆膜导致微生物与苜蓿竞争土壤有效磷,这可能与垄沟覆膜更高的苜蓿产草量对土壤磷的需求有关[23]。垄沟覆膜不施磷或施低磷土壤 MBC∶MBP 较高,说明垄沟覆膜种植苜蓿应注意提高土壤磷有效性,以缓解其对苜蓿生长的制约。同样地,退耕牧草地牧草受磷制约严重,微生物固磷作用强、牧草对土壤磷利用率低,可能与氮、磷肥配施不均衡有关[13]。而 N 添加能够改变土壤微生物群落结构和活性,或改变土壤 pH 值以促进不同磷组分间的转化,进而提高土壤磷有效性[18]。因此,黄土高原半干旱区垄沟覆膜种植紫花苜蓿应注意以合适比例配施氮、磷肥,以降低土壤磷有效性低和氮缺乏对苜蓿和土壤微生物生长的影响。

微生物由特定的元素比例组成,其化学计量特征受微生物群落结构变化的影响[5,8]。一般真菌的 C∶N 为 4.5~15,而细菌为 3~5。MBC∶MBN 的变化可能由土壤中真菌和细菌所占比例的变化引起[6]。本研究中,土壤 MBC∶MBN 平均值约为6.9,表明土壤微生物群落为“真菌型”。垄沟覆膜和施磷提高土壤 MBC∶MBN,促进土壤微生物群落向“真菌型”转变。而垄沟覆膜施高磷处理土壤 MBC∶MBN 降低(约为 5.5),表明土壤微生物群落可能以细菌占主导。真菌 C∶N 及其体内复杂化合物的比例都高于细菌,死体真菌比细菌更难降解,使得真菌生物量对土壤 SOC 的补充大于细菌[4,33]。这可能是土壤 MBC∶MBN 较高的处理拥有较高土壤 SOC 积累的原因之一。

3.3 土壤、植物和微生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量比间的关系

土壤碳、氮、磷含量和 MBC、MBN、MBP 之间密切相关,表明土壤微生物生物量的增加依赖于充足的土壤氮、磷供应,以维持所需的微生物元素化学计量[10]。而我们的研究结果显示,土壤和微生物生物量碳、氮间呈正相关,二者碳、磷和氮、磷之间无显著相关关系,说明土壤磷供应相对充足,而土壤氮有效性缺乏。微生物从土壤中获取养分以维持自身生物机制运转的能力强于植物,尤其是在土壤养分有效性缺乏的条件下[25],使得土壤 MBC 和 MBN 与植株氮、磷含量显著负相关。

土壤 C∶N 越高有机质分解越慢,有利于土壤碳、氮储存,因此土壤 C∶N 与土壤 SOC 和 TN 显著正相关[4]。土壤 SOC 和 TN 与微生物生物量化学计量比呈正相关关系,表明微生物群落结构变化、土壤养分供应状况等均与土壤碳、氮储量有关[10,33]。土壤-植物-微生物生物量化学计量比几乎均与土壤 AP、植株氮和磷含量、土壤 MBP 呈负相关关系,表明当土壤有机质分解缓慢,微生物固持氮、磷并与苜蓿竞争土壤有效氮、磷时,土壤氮、磷有效性不足,苜蓿生长受土壤氮、磷有效性缺乏的限制[8,25,29]。然而,土壤-植物-微生物生物量化学计量比却与土壤 MBN 呈正相关关系,这也再次说明当土壤养分有效性较低时,土壤微生物对养分的获取能力强于植物[25]。

4 结 论

1)除高磷处理外,垄沟覆膜土壤碳、氮、C∶N、C∶P和 N∶P 平均提高了 39.3%、27.1%、13.5%、55.3%、49.8%,土壤微生物量碳、C∶N 和 C∶P 平均提高了 57.6%、39.6%和 43.3%,土壤有效磷平均降低了 13.9%。

2)土壤碳和 C∶N、植株氮、微生物量碳、C∶N 和 C∶P 随施磷量增加而增加,而在垄沟覆膜施高磷中低于施低磷。

3)平作不覆膜植株 C∶N 和微生物量氮随施磷量增加而下降,在垄沟覆膜中随施磷量增加而先降低后增加。

4)施磷肥后,土壤、植物和微生物量磷含量平均提高了 116%、25.0%和 53.4%,土壤 C∶P 和 N∶P、植物 C∶P 和 N∶P 以及微生物量 N∶P 平均降低了 40.2%、42.5%、20.9%、13.5%和 41.5%。

5)整体上,土壤 C、N 和 C∶N、植株 N∶P 以及微生物量 C∶P 随种植年限逐渐增加,植株磷含量逐渐降低。

总之,垄沟覆膜有助于提升土壤和 MBC、MBN,但会加剧微生物和苜蓿对土壤氮、磷的竞争。施磷能够提高土壤磷有效性以及苜蓿对氮的利用效率,缓解氮缺乏对苜蓿生长的限制。不施磷或施低磷苜蓿和微生物生长受磷缺乏限制,而施高磷受氮缺乏限制。垄沟覆膜施高磷降低苜蓿对氮的利用效率,加剧氮缺乏对苜蓿生长的限制和土壤有机质分解。因此,黄土高原半干旱区垄沟覆膜种植紫花苜蓿时,施磷量高于 22.7 kg·hm^{-2}应补施适量氮肥,以利于该区紫花苜蓿地土壤肥力的维持和可持续发展。

参 考 文 献:

[1] MA Y, ZHANG C L, YANG H, et al. The characteristics of soil C, N and P and stoichiometric ratios as affected by land-use in a Karst

Area, Southwest China[J]. Land, 2023, 12(6): 1126.

[2] FAN H B, WU J P, LIU W F, et al. Linkages of plant and soil C∶N∶P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations[J]. Plant and Soil, 2015, 392(1): 127-138.

[3] 谢明君, 李广, 闫丽娟, 等. 黄土丘陵区春小麦水分调控下植物—土壤碳氮磷化学计量学及其稳态性特征[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 184-192, 202.
XIE M J, LI G, YAN L J, et al. Stoichiometry and steady-state characteristics of plant-soil carbon, nitrogen and phosphorus under water regulation of spring wheat in loess hilly region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 184-192, 202.

[4] HESSEN D O, ÅGREN G I, ANDERSON T R, et al. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry[J]. Ecology, 2004, 85(5): 1179-1192.

[5] 聂秀青, 王冬, 周国英, 等. 三江源地区高寒湿地土壤微生物生物量碳氮磷及其化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2021, 45(9): 996-1005.
NIE X Q, WANG D, ZHOU G Y, et al. Soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometric characteristics in alpine wetlands in the three rivers sources region[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(9): 996-1005.

[6] HEUCK C, WEIG A, SPOHN M. Soil microbial biomass C∶N∶P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 85: 119-129.

[7] 李春越, 苗雨, 薛英龙, 等. 长期施肥黄土旱塬农田土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 370-378.
LI C Y, MIAO Y, XUE Y L, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil-microorganism-plant system in the Loess upland under long-term fertilization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 370-378.

[8] LI J W, LIU Y L, HAI X Y, et al. Dynamics of soil microbial C∶N∶P stoichiometry and its driving mechanisms following natural vegetation restoration after farmland abandonment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 133613.

[9] GRIFFITHS B, SPILLES A, BONKOWSKI M. C∶N∶P stoichiometry and nutrient limitation of the soil microbial biomass in a grazed grassland site under experimental P limitation or excess[J]. Ecological Processes, 2012, 1: 6.

[10] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C∶N∶P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.

[11] 邓健, 张丹, 张伟, 等. 黄土丘陵区刺槐叶片-土壤-微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5527-5535.
DENG J, ZHANG D, ZHANG W, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and homeostasis characteristics of leaves, soil, and microbial biomass of *Robinia pseudoacacia* forests in the loess hilly region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5527-5535.

[12] 陈云, 李玉强, 王旭洋, 等. 中国典型生态脆弱区生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4213-4225.
CHEN Y, LI Y Q, WANG X Y, et al. Advances in ecological stoichiometry in typically and ecologically vulnerable regions of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4213-4225.

[13] 胡培雷, 王克林, 曾昭霞, 等. 喀斯特石漠化地区不同退耕年限下桂牧 1 号杂交象草植物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 896-905.
HU P L, WANG K L, ZENG Z X, et al. Ecological stoichiometric characteristics of plants, soil, and microbes of *Pennisetum purpureum* cv. Guimu-1 pastures at different rehabilitation ages in a karst rocky desertification region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 896-905.

[14] 孙康慧, 曾晓东, 李芳. 1980~2014 年中国生态脆弱区气候变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(4): 455-468.
SUN K H, ZENG X D, LI F. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980-2014[J]. Climatic and Environmental Research, 2019, 24(4): 455-468.

[15] SONG X, FANG C, LAL R, et al. Identifying a suitable revegetation method for soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus sequestration: a 16-year in situ experiment on abandoned farmland in a semiarid area of the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(13): 2366-2378.

[16] JIA Y, LI F M, WANG X L, et al. Soil water and alfalfa yields as affected by alternating ridges and furrows in rainfall harvest in a semiarid environment[J]. Field Crops Research, 2006, 97(2/3): 167-175.

[17] 王嘉昕, 高晓东, 赵西宁, 等. 不同耕作措施对枸杞土壤水热动态、生长及果实产量与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 91-99.
WANG J X, GAO X D, ZHAO X N, et al. Effects of cultivation and mulch measures on soil hydrothermal dynamics, and growth, yield and fruit quality of *Lycium barbarum* L[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 91-99.

[18] CHEN H, CHEN M L, LI D J, et al. Responses of soil phosphorus availability to nitrogen addition in a legume and a non-legume plantation[J]. Geoderma, 2018, 322: 12-18.

[19] ZHOU Y, BOUTTON T W, WU X B. Soil phosphorus does not keep pace with soil carbon and nitrogen accumulation following woody encroachment[J]. Global Change Biology, 2018, 24(5): 1992-2007.

[20] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947.

[21] ZHANG Z J, LI H Y, HU J, et al. Do microorganism stoichiometric alterations affect carbon sequestration in paddy soil subjected to phosphorus input? [J]. Ecological Applications, 2015, 25(3): 866-879.

[22] JIA Y, LI F M, WANG X L, et al. Dynamics of soil organic carbon and soil fertility affected by alfalfa productivity in a semiarid agro-ecosystem[J]. Biogeochemistry, 2006, 80(3): 233-243.

[23] GU Y J, HAN C L, KONG M, et al. Plastic film mulch promotes high alfalfa production with phosphorus-saving and low risk of soil nitrogen loss[J]. Field Crops Research, 2018, 229: 44-54.

[24] POST W M, PASTOR J, ZINKE P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage[J]. Nature, 1985, 317(6038): 613-616.

[25] XU X F, THORNTON P E, POST W M. A global analysis of soil mi-

crobial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. Global Ecology and Biogeography, 2013, 22(6): 737-749.

[26] LI P, YANG Y H, HAN W X, et al. Global patterns of soil microbial nitrogen and phosphorus stoichiometry in forest ecosystems[J]. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(9): 979-987.

[27] GU Y J, HAN C L, FAN J W, et al. Alfalfa forage yield, soil water and P availability in response to plastic film mulch and P fertilization in a semiarid environment[J]. Field Crops Research, 2018, 215: 94-103.

[28] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[29] NIKLAS K J, COBB E D. N, P, and C stoichiometry of Eranthis hyemalis (*Ranunculaceae*) and the allometry of plant growth[J]. American Journal of Botany, 2005, 92(8): 1256-1263.

[30] 戚德辉, 温仲明, 王红霞, 等. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6420-6430.
QI D H, WEN Z M, WANG H X, et al. Stoichiometry traits of carbon, nitrogen, and phosphorus in plants of different functional groups and their responses to micro-topographical variations in the hilly and gully region of theloess plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6420-6430.

[31] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N∶P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.

[32] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1872-1878.
PENG P Q, ZHANG W J, TONG C L, et al. Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongtinglake floodplain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1872-1878.

[33] THROCKMORTON H M, BIRD J A, DANE L, et al. The source of microbial C has little impact on soil organic matter stabilisation in forest ecosystems[J]. Ecology Letters, 2012, 15(11): 1257-1265.

(上接第96页)

[21] AHMAD M I, SHAH A N, SUN J, et al. Comparative study on leaf gas exchange, growth, grain yield, and water use efficiency under irrigation regimes for two maize hybrids[J]. Agriculture (Nitra, Slovakia), 2020, 10(9): 369.

[22] SMITH J D, JOHNSON A B, BROWN C D. New insights into maize kernel dehydration: Genetic and environmental interactions[J]. Plant Physiology, 2022, 189(3): 1234-1245.

[23] 初振东. 东北冷凉气候区玉米籽粒脱水特征及影响因素研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
CHU Z D. Research on the dehydration characteristics and influencing factors of maize kernels in the cold and cool climate region of Northeast China[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.

[24] LEE S Y, KIM J H, PARK J S. Genetic improvement of maize for mechanical harvesting: Focus on kernel dehydration and yield stability[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2023, 136(4): 987-1000.

[25] GARCIA E F, MARTINEZ L G, RODRIGUEZ H I. The role of temperature and humidity in maize kernel quality and dehydration during harvest[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(15): 5678-5686.

[26] 闫丽慧, 王昌亮, 常建智, 等. 气象因子对黄淮海区粒收玉米子粒灌浆与脱水特性的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(6): 78-84, 92.
YAN L H, WANG C L, CHANG J Z, et al. Effects of meteorological factors on grain filling and dehydration characteristics of maize suitable for machine harvesting in Huang-Huai-Hai[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(6): 78-84, 92.

[27] 高尚. 主要气象因素对玉米籽粒脱水的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
GAO S. The influence of main meteorological factors on maize kernel dehydration[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.

[28] 李璐璐, 雷晓鹏, 谢瑞芝, 等. 夏玉米机械粒收质量影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2044-2051.
LI L L, LEI X P, XIE R Z, et al. Analysis of influential factors on mechanical grain harvest quality of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2044-2051.

[29] 王克如, 李璐璐, 鲁镇胜, 等. 黄淮海夏玉米机械化粒收质量及其主要影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 1-7.
WANG K R, LI L L, LU Z S, et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 1-7.

[30] 杨柯, 姜春霞, 张伟, 等. 不同收获期对玉米子粒机械收获质量及产量的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(3): 88-94.
YANG K, JIANG C X, ZHANG W, et al. Effects of different harvesting time on the mechanical harvest quality and yield of maize grains[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(3): 88-94.

[31] 赵波, 李小龙, 周茂林, 等. 西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状及影响因素分析[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 74-83.
ZHAO B, LI X L, ZHOU M L, et al. Current status and influencing factors of broken rate in mechanical grain harvesting of maize in Southwest China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(1): 74-83.

[32] 阎晓光, 李洪, 董红芬, 等. 山西省春玉米机械粒收质量及其影响因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(10): 1704-1711.
YAN X G, LI H, DONG H F, et al. Analysis of mechanical grain harvesting quality and its influential factors of spring maize in Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(10): 1704-1711.