

灌枝覆盖和氮添加对荒漠草地土壤理化性质及牛枝子叶功能性状的影响

蔺雄奎¹, 南万璐¹, 董月唯¹, 李志刚^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草牧业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要:【目的】研究覆盖和氮添加下荒漠草地土壤理化性质和豆科植物叶功能性状以及它们之间的关系, 有助于提高豆科植物生长发育, 为改善荒漠草地的植物生长提供有效的管理措施。【方法】以灌木柠条(*Caragana intermedia*)的枝条为覆盖材料, 设4种覆盖模式为主区, 即灌枝覆盖样地面积的0% (F0)、30% (F30)、50% (F50)和70% (F70); 设置4种尿素添加处理为副区即N0[0 g/(m²·a)], N10[10 g/(m²·a)], N20[20 g/(m²·a)], N40[40 g/(m²·a)], 测定了土壤理化性质和牛枝子(*Lespedeza potaninii*)叶功能性状。【结果】随着覆盖的增加, 土壤水分提高, 土壤温度降低, 有机质含量呈现先增加后降低的趋势, 以F30最高; 速效磷和全磷含量分别在F30、F50较F0相比均下降, 但覆盖对土壤pH和碱解氮无显著影响。氮添加总体上会降低土壤水分和pH值, 提高碱解氮、速效磷、全磷的含量, 对土壤温度和全氮无影响。与F0相比, 覆盖会显著增加牛枝子叶长、叶宽以及叶面积。相同覆盖处理下叶绿素含量和比叶面积随氮添加量增大而增加, 而叶面积和F70处理中叶宽随氮添加量增大均减小。氮添加对不同覆盖下叶长和长宽比无影响。相关分析表明叶长、叶宽以及叶面积与土壤温度呈负相关, 与土壤含水量和pH呈正相关。此外, 叶绿素与土壤pH值呈负相关, 与碱解氮呈正相关, 碱解氮还与比叶面积呈正相关。【结论】灌枝覆盖改善了土壤水分条件, 利于牛枝子叶片的生长。而氮添加不利于叶片的增大, 但有助于提高叶片叶绿素含量, 从而提高了植物光合速率以及对资源的获取能力。

关键词:覆盖; 氮添加; 土壤理化性质; 叶功能性状; 牛枝子

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)02-0160-10

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2025.02.018



受全球气候变化、过度放牧及氮沉降等因素的影响, 我国乃至全球干旱半干旱地区草地灌木的数量明显增加, 并呈持续扩张的趋势^[1]。特别是自20世纪70年代起, 为缓解我国荒漠草地退化, 抗逆性强的旱生灌木柠条被广泛应用于干旱半干旱地区的生态修复

工程, 而大面积、高密度的种植模式进一步加剧了草地水分的亏缺和不平衡, 导致草地退化加剧^[2-3]。以毛乌素沙地南缘荒漠草地为例, 该地区约有30%的草地面积种植柠条, 人为大面积引入柠条导致多年后该地区草地土壤水分亏缺、沙化严重、土壤有机碳显著降低^[2,4]。目前, 灌木去除的方法主要有化学试剂法、机械清除法以及火烧^[5-7]。然而, 长时间或多频次使用这些方法防止灌木扩张, 反而会导致土地裸露面积增加和土壤肥力的降低, 还可能会增加外来物种入侵的机率^[8]。近年来的研究表明, 柠条平茬直接覆盖或者粉碎后覆盖可以显著改善该地区草地的土壤水分条件^[9-10], 但国内外利用灌木枝条覆盖改良干旱区草地土壤的应用研究相对较少, 而在果园、森林和菜园

收稿日期:2024-02-28; **修回日期:**2024-04-24

基金资助:宁夏重点研发项目(2021BEB04002; 2021BEG03010); 宁夏自然科学基金项目(2022AAC05013)

作者简介:蔺雄奎(1997-), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生。

E-mail: lxx52y@sina.com

*通信作者, 研究方向为草地恢复与管理、草地微生物生态学。E-mail: lizg001@sina.com

中开展林木枝条覆盖,改良土壤的研究报道较多,为灌木枝条覆盖改良草地提供了经验与理论依据。根据这些报道,林木枝条粉碎覆盖(长度一般 $<2\text{ cm}$)^[11]、简单破碎后覆盖(长度一般 $10\sim30\text{ cm}$)^[12]或是不经任何处理直接覆盖(长度 1 m 左右)^[13]均可以起到有效保持土壤水分的作用。因此,通过灌木枝条覆盖改善荒漠草地土壤水分的同时,还可以激发微生物活性,有助于促进荒漠草地地表凋落物的分解,进而提高土壤有机碳和养分含量,有利于草地植物以及植物叶片的生长。

叶片功能性状是指植物叶片在形态结构、生理特性和功能方面所表现出的重要特性,是评估植物适应不同环境条件的能力和实现对资源有效利用潜力的重要指标。叶片功能性状包括叶绿素、比叶面积、叶干物质、叶长、叶宽等特性。叶片功能性状的变化能够反映出植物的营养状况,例如叶绿素在捕获和转换光能方面发挥着重要作用,叶绿素含量越高植物的光合能力越强。王洁茹等^[14]的研究发现不同类型植物的叶功能性状对环境因子的响应策略也有所不同,多年生叶主要受土壤全磷和全氮的影响,而影响一年生植物的关键因子是容重和全磷含量。叶片还被认为是地球上微生物的生长环境之一,这些微生物主要分布在叶片的表皮和内部组织中,对植物氮供应和生长发挥着重要的作用^[15]。然而,草原植物叶片功能性状对灌枝覆盖的响应至今鲜见研究报道。

氮沉降已是当前全球变化的重要问题之一,但氮素依然是干旱半干旱地区草地生态系统生产力的主要限制因子^[16]。有研究表明可通过优势植物叶片功能性状的变化预判草地群落生产力^[17]。不同植物性状对氮添加变化的响应因其物种特性而异。例如氮添加导致达乌里胡枝子比叶面积增加,但对芦苇影响较小^[18]。通常在灌木丛、草地以及荒漠等低养分的土壤中,植物表现为独特的适应策略,使它们在恶劣环境中更具有优势并维持生存^[19]。研究还发现植物的功能性状变化与土壤养分的相关关系,受氮限制的植物在氮添加后其功能性状的可塑性会变强^[20]。因此,持续的氮沉降或氮添加对草地叶片性状的研究仍值得继续关注

豆科植物是草原的优势或主要植物,是具有生物固氮作用特性的一类植物,其与根瘤形成的固氮系统

能够将大气环境中的游离氮在固氮酶的作用下转化形成可利用氮的形式供植物以及微生物使用,对土壤肥力的提高有着至关重要的作用^[21]。与人为施肥相比,豆科植物固氮提供的氮成本低、环保性更好^[22]。牛枝子(*Lespedeza potaninii*)作为宁夏荒漠草地中的优势种,在中度干旱区域具有较强的抗旱性^[23]。然而,对干旱或半干旱区叶功能性状的研究主要集中在禾本科植物。如胡梦瑶等^[24]的研究发现,水分是限制半干旱地区针茅叶片发展的一个重要因素,植物可通过调节自身叶功能性状以适应干旱胁迫。还有研究发现,氮添加会增加荒漠草地中禾本科植物叶面积和叶氮含量,降低叶干物质含量^[25]。但是对荒漠草地豆科植物的功能性状的研究相对较少,特别是在灌枝覆盖及外源肥料添加改变荒漠草地土壤水热及化学特性的条件下,牛枝子叶功能性状对比的响应尚不清楚。据此,本研究以宁夏荒漠草地优势豆科植物牛枝子为研究对象,分析灌木枝条覆盖和氮添加对牛枝子叶功能性状的影响,揭示牛枝子叶功能性状的响应规律,以期对荒漠草地的可持续管理提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

研究区选在毛乌素沙地南缘荒漠草地灌丛化严重的盐池县,地理坐标 $106^{\circ}3'\sim107^{\circ}47'\text{ E}$, $37^{\circ}4'\sim38^{\circ}10'\text{ N}$ 。研究区属典型中温带大陆性季风气候,干旱少雨,多风沙。近30年年均降水量为 293.1 mm ,各月平均气温 $-13.0\sim22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最高温度 $34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年无霜期 165 d ,年平均风速 1.8 m/s 。研究区植被类型主要为荒漠草地,但柠条种植面积占草地面积的 31.78% ,草本植物主要有沙芦草(*Agropyron mongolicum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、草木犀状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)等。样地设在盐池县宁夏大学四墩子试验站,试验地土壤类型为风沙土, $0\sim20\text{ cm}$ 土壤 pH 值 $8.51\sim8.86$,土壤有机碳 $1.25\sim3.32\text{ g/kg}$,全氮 $0.11\sim0.24\text{ g/kg}$,全磷 $1.17\sim1.88\text{ g/kg}$ 。所选试验样地常年处于过度放牧中,草地沙化严重。

1.2 试验设计

在2020年4月,选择平坦的、未生长柠条的退化

荒漠草地作为样地,在临近有柠条生长的草地平茬其枝条用于试验覆盖。采用二因素裂区试验设计,主区为枝条的4种覆盖度:以不覆盖枝条的样地为对照,即F0,其余分别用灌枝平铺覆盖整个样地面积的30%、50%和70%(分别对应F30、F50和F70),枝条长度约为70~100 cm。覆盖好后使用LAI-2200C植被冠层分析仪(Li-COR Inc.,美国)对枝条覆盖面积进行测量与调整。副区设立4个氮添加水平: $N0[0\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$, $N10[10\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$, $N20[20\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$, $N40[40\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$,所施肥料为尿素,每年分2次施加。除第1年在4月份(枝条覆盖前)和6月施入,之后每年都在6和8月(研究区雨季)均匀的撒入试验样地。试验共设计了 $4\times 4=16$ 个处理,每个处理4次重复,总共64个试验小区,试验小区面积为 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$,小区间距离2 m,区组间3 m。并在每个样地中放置了一根用于监测0~5 cm土层温度的水银温度计。

在2023年8月中旬植物生长季节,用直径5 cm的土钻从每个实验小区采用五点取样法收集表层0~5 cm的新鲜土壤,充分混匀后过,剔除样品中混杂的石头以及植物的粗根,并过2 mm土筛。将所取土壤样品分成2个子样品,其中一部分自然风干后用于分析土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、全磷(TP)、速效磷(AP)以及pH,另外一部分鲜土用于测量土壤含水量。在每个试验样地中随机选择最新鲜、无卷曲、无病虫害的牛枝子叶片5~10片,使用便携式叶绿素荧光仪PAM-2500测定叶绿素含量。并将所测叶片采摘后放入盛有冰袋的泡沫箱中,运送到实验室进行其余叶功能性状的测定。在进行土壤和植物样品收集时对每个样地中温度计进行观测和记录。

1.3 指标测定与方法

参照鲍氏旦土壤农化分析^[26],进行土壤理化性质分析。在采集土壤的同时,取二分之一铝盒新鲜土后称重,然后放入烘箱中105℃烘干至恒重后再称重,根据烘土前后质量差进行土壤含水量(SWC)的计算。量取50 mL去离子水和称取10 g土(水土比为5:1)于塑料瓶中,置于恒温振荡仪中震荡30 min后将浑浊液静置成透明色,然后用pH计(PHS-3C)进行测定。土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法—外加加热法进行测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法;碱解氮(AN)采用碱解扩散法进行测定;全磷(TP)采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$

法进行测定;速效磷(AP)采用 0.5 mol/L NaHCO_3 法进行测定。叶的性状指标包括叶面积(LA)、叶长(LL)、叶宽(LW)、比叶面积(SLA)、叶绿素以及长宽比,这些指标与植物叶片对资源的获取、光合代谢以及植物生长密切相关,是植物功能性状常被研究的指标^[27-28]。其中,叶面积、叶长和叶宽均利用Li-3100C叶面积仪测定,测量后将叶片60℃烘48 h至恒质量,用分析天平进行称重。比叶面积计算公式为:

$$\text{SLA}=\text{LA}/\text{LM}$$

式中:LA为叶面积,LM为叶干质量。

1.5 数据统计与分析

采用R4.3.1和Rstudio进行数据分析,ggplot2包进行图形的绘制。并使用双因素方差分析(two-way ANOVA)比较覆盖、氮添加及其交互作用对土壤理化性质和牛枝子叶功能性状的影响。用Duncan检验比较不同枝条覆盖度间和不同覆盖度处理下氮添加间的差异。用Spearman相关分析法检验不同处理下的叶片功能性状与土壤因子之间的关系。

2 结果与分析

2.1 灌枝覆盖和氮添加对土壤理化性质的影响

二因素方差分析显示(表1),灌枝覆盖对土壤温度、含水量、有机质、全磷和速效磷有显著影响($P<0.05$),氮添加对土壤含水量、pH、有机质、碱解氮、全磷和速效磷有显著影响($P<0.05$),而灌枝覆盖 $\times$ 氮添加仅对土壤有机质含量存在显著影响($P<0.05$)。

单因素方差分析表明(表2),随着灌枝覆盖度增加,土壤温度显著降低而土壤水分含量显著升高($P<0.05$),说明灌枝抑制了蒸发,改善了土壤水分条件;土壤有机碳含量仅在F30处理下显著高于F0($P<0.05$),但速效磷在F30处理下显著低于F0($P<0.05$)。同一灌枝覆盖度下,氮添加对土壤温度和全氮均无显著影响,但土壤碱解氮含量随氮添加量的增加显著增加($P<0.05$)。对于其他土壤理化指标,同一灌枝覆盖度下总体亦呈现出随氮添加量增加而增加的趋势。此外,结合二因素方差分析,所有土壤理化性质指标中,只有F30N20和F30N40下的土壤有机质含量最高,其他指标对互作无显著响应,说明以上2种灌枝覆盖和氮添加组合模式可能对土壤微环境调控最佳,从而利于土壤有机质的提升。

表 1 覆盖和氮添加对土壤理化性质的二因素方差分析

Table 1 Two-factor variance analysis of the effect of shrub shelter and N addition on soil physical and chemical

土壤理化性质	覆盖	氮添加	覆盖×氮添加
土壤温度	11.292***	1.004	0.400
土壤含水量	26.324***	5.705**	0.960
pH 值	0.549	9.661***	1.084
有机质	8.104***	4.528**	2.240*
全氮	1.599	0.287	1.318
碱解氮	2.219	12.762***	0.724
全磷	4.245**	4.388**	0.506
速效磷	3.859*	5.073**	1.038

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

表 2 灌枝覆盖和氮添加对土壤理化性质的影响 (平均值±标准误)

Table 2 Effects of shrub branchshelter and nitrogen addition on soil physio-chemical properties (mean±SE)

覆盖 / %	氮添加 / ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	土壤温 度 / $^{\circ}\text{C}$	土壤含水量 / %	pH 值	有机质 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
F0	N0	29.63±1.66 ^a	3.60±0.16 ^a	9.03±0.05 ^a	2.58±0.35 ^b	0.56±0.09 ^a	7.61±0.37 ^b	0.56±0.09 ^{ab}	6.03±0.52 ^b
	N10	29.66±0.64 ^a	3.33±0.15 ^{ab}	8.97±0.04 ^{ab}	2.91±0.16 ^{ab}	0.49±0.12 ^a	8.53±1.1 ^{ab}	0.49±0.12 ^b	6.86±1.28 ^{ab}
	N20	30.00±1.93 ^a	2.86±0.47 ^b	8.98±0.05 ^{ab}	3.01±0.13 ^a	0.59±0.16 ^a	8.90±0.21 ^{ab}	0.59±0.16 ^{ab}	7.24±1.15 ^{ab}
	N40	29.50±2.05 ^a	3.28±0.44 ^{ab}	8.94±0.05 ^b	2.68±0.28 ^{ab}	0.68±0.04 ^a	9.08±1.31 ^a	0.68±0.04 ^a	8.13±0.60 ^a
	均值±标准差	29.70±1.50 ^A	3.27±0.41 ^C	8.98±0.06 ^A	2.79±0.28 ^B	0.58±0.12 ^A	8.53±0.98 ^A	7.07±1.15 ^A	0.58±0.12 ^A
F30	N0	26.19±2.15 ^a	4.14±0.08 ^a	9.03±0.04 ^a	3.01±0.38 ^b	0.33±0.07 ^a	8.75±1.24 ^{ab}	0.33±0.07 ^a	6.24±0.38 ^b
	N10	29.00±1.57 ^a	3.90±0.45 ^{ab}	9.05±0.06 ^a	2.95±0.24 ^b	0.36±0.16 ^a	8.09±1.10 ^b	0.36±0.16 ^a	7.29±0.16 ^a
	N20	27.63±2.29 ^a	3.44±0.40 ^b	8.94±0.04 ^b	3.43±0.16 ^a	0.44±0.15 ^a	10.28±1.49 ^a	0.44±0.15 ^a	7.13±0.87 ^a
	N40	28.65±1.33 ^a	3.99±0.43 ^{ab}	8.91±0.06 ^b	3.45±0.21 ^a	0.41±0.17 ^a	10.72±1.31 ^a	0.41±0.17 ^a	7.27±0.56 ^a
	均值±标准差	27.87±2.02 ^B	3.87±0.43 ^B	8.98±0.07 ^A	3.21±0.33 ^A	0.39±0.14 ^A	9.46±1.60 ^A	6.98±0.67 ^A	0.39±0.14 ^B
F50	N0	26.25±2.05 ^a	4.71±0.34 ^a	9.05±0.06 ^a	2.69±0.22 ^b	0.43±0.23 ^a	8.26±0.85 ^b	0.43±0.23 ^a	6.22±0.40 ^a
	N10	26.63±2.63 ^a	4.18±0.54 ^a	9.01±0.05 ^{ab}	3.13±0.28 ^a	0.48±0.13 ^a	8.64±0.90 ^{ab}	0.48±0.13 ^a	6.34±1.78 ^a
	N20	26.31±1.3 ^a	4.13±0.67 ^a	8.99±0.07 ^{ab}	3.20±0.31 ^a	0.60±0.19 ^a	10.14±0.69 ^a	0.60±0.19 ^a	6.44±1.55 ^a
	N40	26.19±2.79 ^a	4.10±0.30 ^a	8.93±0.07 ^b	2.59±0.28 ^b	0.65±0.11 ^a	10.06±1.52 ^a	0.65±0.11 ^a	6.20±0.71 ^a
	均值±标准差	26.34±2.04 ^C	4.28±0.50 ^A	8.99±0.07 ^A	2.90±0.37 ^B	0.54±0.18 ^A	9.28±1.27 ^A	6.30±1.12 ^B	0.54±0.18 ^A
F70	N0	25.19±1.71 ^a	4.58±0.33 ^a	9.02±0.02 ^a	2.74±0.38 ^a	0.44±0.30 ^a	7.08±0.71 ^c	0.44±0.30 ^a	6.63±0.67 ^b
	N10	26.88±2.03 ^a	4.53±0.45 ^a	9.00±0.03 ^a	2.82±0.34 ^a	0.44±0.24 ^a	7.88±1.60 ^{bc}	0.44±0.24 ^a	7.21±1.16 ^b
	N20	26.29±2.16 ^a	4.40±0.44 ^a	9.01±0.06 ^a	2.80±0.24 ^a	0.50±0.17 ^a	9.84±1.31 ^{ab}	0.50±0.17 ^a	7.04±0.24 ^b
	N40	25.56±2.75 ^a	4.02±0.10 ^a	8.97±0.05 ^a	2.88±0.23 ^a	0.74±0.04 ^a	10.17±1.80 ^a	0.74±0.04 ^a	8.52±0.51 ^a
	均值±标准差	25.98±2.07 ^C	4.38±0.39 ^A	9.00±0.04 ^A	2.81±0.28 ^B	0.53±0.23 ^A	8.74±1.85 ^A	7.35±0.98 ^{AB}	0.53±0.23 ^A

注: 同列不同小写字母表示同一覆盖度下某一指标在不同氮添加量间差异显著 ($P < 0.05$), 同列不同大写字母表示某一指标平均在 4 种灌枝覆盖度间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 灌枝覆盖和氮添加对牛枝子叶功能性状的影响

二因素方差分析表明, 灌枝覆盖和氮添加对叶面积和叶宽均有显著影响 ($P < 0.05$) (图 1-A, 图 1-B),

且覆盖还对叶长有显著影响 ($P < 0.05$) (图 1-C), 而氮添加对叶绿素和比叶面积有显著影响 ($P < 0.05$) (图 1-D), 灌枝覆盖和氮添加对牛枝子叶功能性状无交互

效应($P<0.05$)(图 1-E,图 1-F)。单因素方差分析表明,与无灌枝覆盖F0相比,牛枝子叶面积、叶长以及叶宽的平均值随着灌枝覆盖度的增加而增加($P<0.05$),表明灌枝覆盖由于改善了微环境,从而促进了牛枝子叶片的生长。同一灌枝覆盖度下,与N0相比,N20或N40显著增加了0—50%覆盖下叶绿素含量

($P<0.05$),但叶面积随氮添加水平的增加呈现降低的趋势,以N40显著最低($P<0.05$),说明适度氮添加利于促进植物叶片叶绿素合成。N20和N40显著降低了70%覆盖下牛枝子的叶宽($P<0.05$),其余覆盖下氮添加均无显著影响;但与N0相比,N20显著增加了各覆盖处理下牛枝子的比叶面积($P<0.05$)。

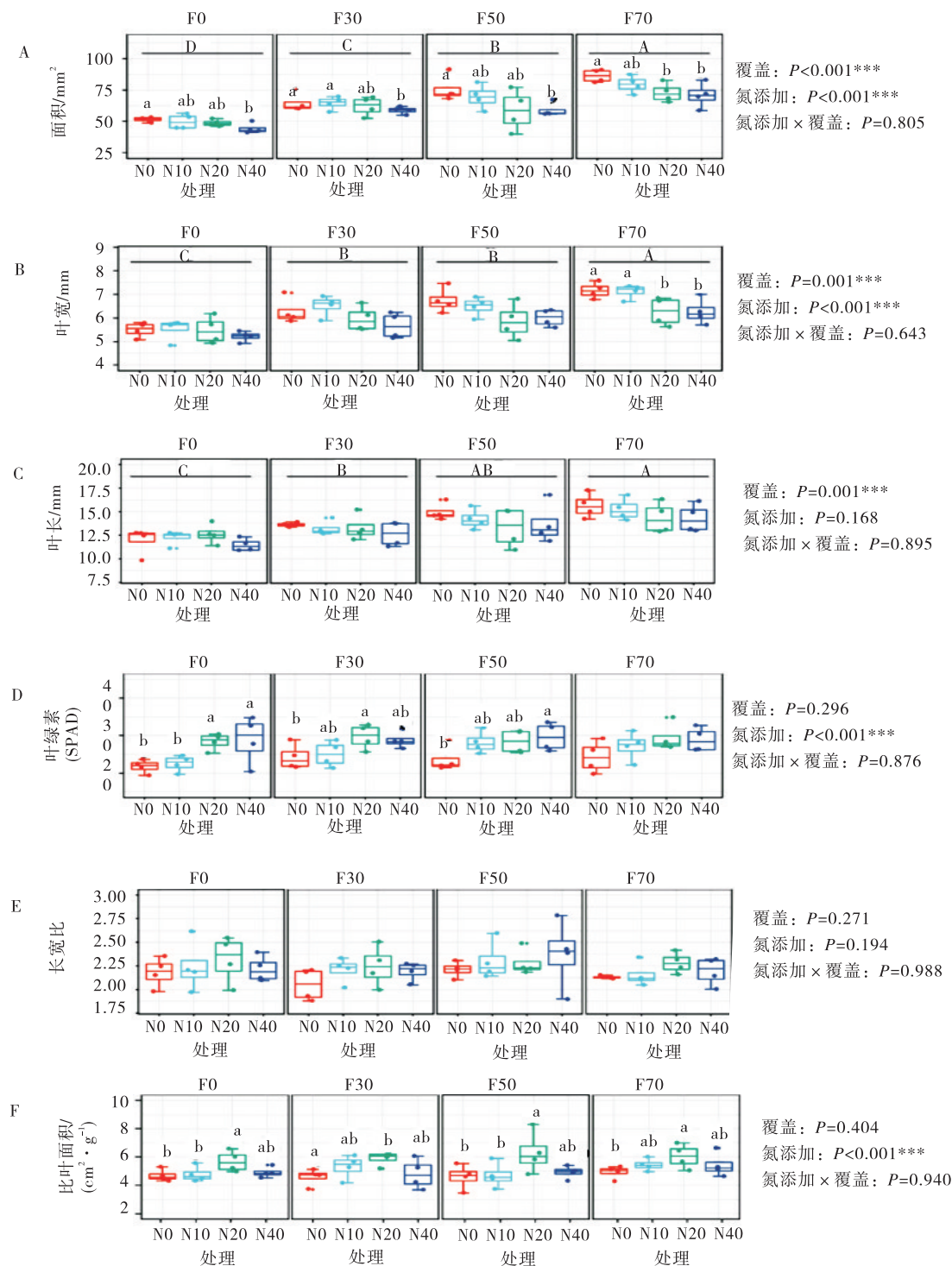


图 1 灌枝覆盖和氮添加对牛枝子叶功能性状的影响

Fig. 1 The effects of shrub branch shelter and nitrogen addition on leaf functional traits of *Lespedeza potaninii*

2.3 土壤理化性质与牛枝子叶功能性状之间的关系

牛枝子叶绿素含量与土壤碱解氮呈显著正相关($P < 0.05$),与 pH 值呈显著负相关($P < 0.05$),表明土壤氮素可以显著促进牛枝子叶绿素的合成,但 pH 值过高会抑制叶绿素合成;叶面积、叶宽以及叶长与土壤含水量和 pH 值呈显著正相关($P < 0.05$),与土壤温度呈显著负相关($P < 0.05$);比叶面积仅与碱解氮呈显著正相关($P < 0.05$);长宽比与土壤理化性质指标均无显著相关性($P > 0.05$)(图 2)。

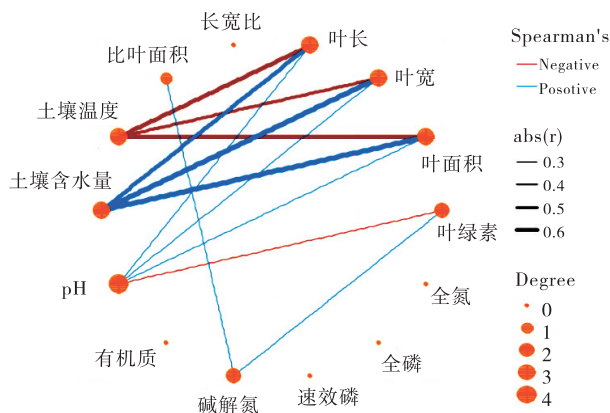


图 2 土壤理化性质与牛枝子叶功能性状间关系分析
Fig. 2 Analysis of the relationships between soil physico-chemical properties and leaf functional traits of *Lespedeza potaninii*

3 讨论

3.1 灌枝覆盖和氮添加对土壤理化性质的影响

惠施佳等^[29]的研究结果表明,秸秆、地膜以及碎麦等覆盖形式能够通过抑制水分蒸发起到改善土壤水分的作用,这与笔者用枝条覆盖在荒漠草地中的研究相类似,而且土壤温度在枝条覆盖下表现出下降但土壤水分呈上升的趋势,充分说明灌枝覆盖也具有降低土壤温度和抑制土壤蒸发的作用。杨天杰等^[30]的研究结果还表明,与无枝条覆盖相比,粉碎的林木枝条覆盖对 0~5 cm 土层中有机质以及氮的增加有积极作用。值得注意的是,本研究中过高密度的灌枝覆盖(覆盖度 > 50%)反而不利于土壤中有机质积累,但 30% 覆盖度的灌枝枝条显著促进了荒漠草地土壤有机质含量的提升,说明过高的灌枝覆盖可能抑制植物的光合作用,进而阻碍了植物的生长和向土壤输入有机质。因此,不同覆盖下有机质的变化不仅受水热的影响,还受植物生长的共同调节。

此外,江涛等^[31]的研究结果表明,4 种不同的有机物覆盖(杂草、稻草、玉米秸秆、粉碎枝条)在干旱季节不仅能够提高土壤水分和 pH 值,还对土壤中的速效养分具有促进作用。本研究结果表明,覆盖下土壤氮、磷养分变化并不大,可能是完整的柠条枝条在短期内相对较难分解,分解速率较慢,故而对土壤养分的供应十分有限。因此,枝条覆盖对于草地养分的影响还需要长期监测进行探讨。然而,氮添加显著增加了硝态氮和氨态氮含量,氮添加对土壤中全氮的含量基本无影响,却这也与大多数学者的研究结果一样^[32-34],说明化学氮素的添加主要是提高了土壤速效氮素的含量。因为氮肥的添加后导致土壤含氮底物增多,以微生物为主导的氮矿化和硝化过程将会被触发,引得土壤中氮素的周转速率发生变化,更多的氮以速效氮的形式在土壤中积累^[35]。此外,随着氨态氮向硝态氮转变的过程中,硝化作用会释放大量的 H^+ ,引起土壤进一步酸化^[36-37],使得土壤中稳定性磷的溶解能力增强,这可能也是本研究中速效磷含量随着氮添加量增加而升高的原因之一。此外,氮添加还能增加土壤中微生物生物量,进而促进土壤中稳定磷的活化^[38],这可能是本研究中速效磷含量随着氮添加量增加而升高的另一原因。

在本研究中,荒漠草地的土壤水分含量随氮添加呈现降低的趋势,这可能是外源性氮的输入促进了地上植物的生长,加速了植物的光合和蒸腾作用,进而导致土壤中的水利用效率增加所致^[39]。特别是在 30% 灌枝覆盖可能对土壤水热及光合有效辐射具有最佳的调控作用,致使植物快速利用氮素并加速生长,并向草地输入丰富的凋落物,最终促进了草地土壤有机质的提升^[40],这可能也是 F30N20 和 F30N40 下的土壤有机碳含量高的原因。另外,氮添加还可抑制氧化酶的活性,降低微生物呼吸,从而减少对有机质的分解^[41]。虽然在 50%~70% 覆盖下,氮添加均对土壤有机质无显著影响,这也表明在未来氮沉降或氮添加背景下高密度枝条覆盖具有维持荒漠草地有机质含量温度的作用,而有机质在维持土壤特性和功能发挥着重要作用,可视为土壤退化的判断依据^[42]。因此,枝条覆盖和氮添加对有机质的积累具有积极的作用。

3.2 灌枝覆盖和氮添加对牛枝子叶功能性状的影响

叶片是外界环境与植物进行水气交换的重要器官,可通过调节自身形态结构以适应外界环境的变化。比如在水分受限的环境中,小叶片植物在干旱条件下更具有优势^[43]。本研究中,覆盖下水分的提高对牛枝子叶长、叶宽和叶面积有着积极的影响,这说明牛枝子可通过缩小叶片形状以适应干旱环境。之前的研究表明耐旱物种对水分利用和叶片水势的调节要求较低,能够更好地控制叶片的相对水分含量,并且将其维持在较为稳定和适宜的水平,这种调节能力使得耐旱物种能够更好地适应干旱胁迫^[44]。以往的研究还发现半湿润区域比半干旱地区植物叶片具有较高的比叶面积^[45-46],而本研究中未发现比叶面积与土壤水分呈显著相关关系,表明覆盖下土壤水分条件改善并不影响比叶面积。与之类似的还有叶绿素以及长宽比,均对枝条覆盖下水分变化的响应较弱。有研究表明高比叶面物种更适宜在资源丰富的环境中生长^[46]。而本研究中牛枝子比叶面积与碱解氮含量呈正相关,但是覆盖并未对土壤碱解氮产生影响,这可能是覆盖下叶片比叶面积保持不变的重要原因。因此,在干旱的荒漠草地中,牛枝子叶片生长受到水分的限制,土壤水分条件的改善能使其叶片大型化。当土壤重新恢复原始干旱状态后,由于大叶片植株的光合和蒸腾作用能力较强,导致牛枝子适应干旱的能力变差,增加了叶片衰老的风险。

与枝条覆盖不同的是,氮添加促进了荒漠草地牛枝子叶片叶绿素含量,这与之前研究结果一致^[47]。叶绿素作为判断光合强弱的重要参数,对氮的变化非常敏感^[48]。尤其是在低氮环境中,植物为了优化氮的分配促进光合利用效率,植物会将更多的氮投入生物能量代谢中,以维持电子传递。相比之下,用于叶绿素和光合作用蛋白的氮分配将被减少,以控制过量电子产生^[49]。因此,外源性氮的输入能够将多的氮分配给叶绿素,导致叶片的叶绿素含量增高。本研究还发现,氮添加有助于增加牛枝子的比叶面积。根据生境偏好,物种在对氮供应增加时叶面积的反应越大,说明其对富含氮的喜好程度越高^[50],比叶面积越高,植物对氮(尤其是氨态氮)的吸收能力越强^[51]。叶长、叶宽和叶面积的扩大能够为植物提供更多的光合作用区域,增强捕获光能的能力。另外,氮添加引起的土

壤酸化产生的毒害作用不利用根系对养分以及水分的吸收,因而对叶面积产生了负面影响^[52]。总的来讲,叶绿素和叶面积均与植物光合有关的叶的功能性状,氮添加下植物捕获光能的面积较少,却增加了叶绿素含量来维持叶片光合生产能力。

3.3 土壤理化性质与叶功能性状间的关系

本研究中叶长、叶宽、叶面积均与土壤温度、土壤含水量呈显著相关关系,表明荒漠草地牛枝子叶片生长受到土壤水热的影响。换句话说覆盖可通过改善土壤水热条件促进牛枝子叶片的生长,使叶片大型化。但是随着氮添加量的增加,土壤酸化导致叶长、叶宽与叶面积降低,说明土壤酸化过程中不利于叶片的生长。本研究还发现叶绿素含量提高也受土酸化的影响,另外还与氮添加过程碱解氮的积累有关。这说明氮素添加通过调节土壤pH和提高土壤氮的可利用性,从而促进植物叶绿素合成,利于植物光合^[53]。有研究表明,比叶面积越大的植物,获取资源的能力越强^[54-55]。根据相关分析,比叶面积与碱解氮呈正相关,并随氮添加量的增加而增加。因此,氮添加过程中能够增强牛枝子对氮素的获取能力。

4 结论

灌枝覆盖通过降低土壤温度而抑制蒸发,提高了土壤水分,但对土壤其他理化因子的影响不大。而氮添加会降低荒漠草地土壤的含水量和pH值,但对土壤有机质、碱解氮、全磷以及速效磷具有积累效应,却对土壤全氮无影响。灌枝覆盖能够扩大叶片长度、宽度、叶面积,使牛枝子叶片变大,这主要与灌枝覆盖下土壤水分条件的改善有关。不同的是,叶面积随氮添加量的增加而降低,且与土壤pH值呈正相关,说明氮素添加引起的土壤酸化不利于叶片生长。但氮添加引起的土壤酸化有利于植物叶绿素的积累,能够促进植物的光合速率。同时,氮添加还会提高植物比叶面积,表明牛枝子在氮添加过程中获取资源的能力在增强。

参考文献:

- [1] 闫宝龙,吕世杰,王忠武,等. 草地灌丛化成因及其对生态系统的影响研究进展[J]. 中国草地学报,2019,41(2): 95-101.
- [2] 赵亚楠,杜艳艳,马彦平,等. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入

- 过程中土壤有机碳变化及其空间格局预测[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1927—1935.
- [3] 赵亚楠, 于露, 周玉蓉, 等. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1305—1315.
- [4] 吴旭东, 宋乃平, 潘军. 不同沙地生境下柠条灌丛化对草地土壤有机碳含量及分布的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 115—121.
- [5] Killgore A, Jackson E, Whitford W G. Fire in Chihuahuan Desert grassland: Short-term effects on vegetation, small mammal populations, and faunal pedoturbation[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(11): 1029—1034.
- [6] Wang G, Li J, Ravi S, *et al.* Post-fire Redistribution of Soil Carbon and Nitrogen at a Grassland — Shrubland Ecotone[J]. Ecosystems, 2019, 22(1): 174—188.
- [7] Wilcox B P, Birt A, Fuhlendorf S D, *et al.* Emerging frameworks for understanding and mitigating woody plant encroachment in grassy biomes[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2018, 32: 46—52.
- [8] Daryanto S, Fu B, Zhao W, *et al.* One-hundred years after shrub encroachment: Policy directions towards sustainable rangeland—use [J]. Land Use Policy, 2019, 84: 71—78.
- [9] 李志刚, 谢应忠. 翻埋与覆盖林木枝条改善宁夏沙化土壤性质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 174—181.
- [10] 张茹, 李建平, 彭文栋, 等. 柠条枝条覆盖对宁夏荒漠草原土壤水热及补播牧草生物量的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(4): 58—67.
- [11] 李传友, 熊波, 张莉, 等. 桃园残枝粉碎还田改善土壤理化性状提高桃品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 161—167.
- [12] 李洪兵, 赵西宁, 王娟, 等. 生草和树枝覆盖对果园土壤持水性能的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 136—141.
- [13] Morreale S J, Sullivan K L. Community-level enhancements of biodiversity and ecosystem services [J]. Frontiers of Earth Science, 2010, 4(1): 14—21.
- [14] 王洁茹, 石文凯, 吴会峰, 等. 晋北典型针叶人工林叶功能性状特征及其与土壤因子的关系[J]. 西北植物学报, 2023, 43(5): 835—845.
- [15] Zhu Y, Peng J, Chen C, *et al.* Harnessing biological nitrogen fixation in plant leaves[J]. Trends in Plant Science, 2023, 28(12): 1391—1405.
- [16] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? [J]. Biogeochemistry, 1991, 13(2): 87—115.
- [17] Ivanova L A, Zolotareva N V, Ronzhina D A, *et al.* Leaf functional traits of abundant species predict productivity in three temperate herbaceous communities along an environmental gradient[J]. Flora, 2018, 239: 11—19.
- [18] 管雅君, 王绍妍, 陈志飞, 等. 施氮磷肥对黄土丘陵区典型草地优势种光谱特征的影响[J/OL]. 草地学报, 1—11 [2024-04-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20240202.1504.002.html>.
- [19] Akram M A, Wang X, Shrestha N, *et al.* Variations and driving factors of leaf functional traits in the dominant desert plant species along an environmental gradient in the drylands of China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 897: 165394.
- [20] 卢笑玥, 赵雪, 徐莉萍, 等. 氮磷添加对黄土丘陵区撂荒草地优势植物功能性状的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(3): 49—59.
- [21] Nagata T. The Legume Root Nodule: From Symbiotic Nitrogen Fixation to Senescence[J]. In Tech, 2012, 29: 34438.
- [22] Bahulikar R A, Chaluvadi S R, Torres-Jerez I, *et al.* Nitrogen Fertilization Reduces Nitrogen Fixation Activity of Diverse Diazotrophs in Switchgrass Roots[J]. Phytobiomes Journal, 2021, 5(1): 80—87.
- [23] 王占军, 季波, 纪童, 等. 5种豆科牧草抗旱性研究与评价[J]. 草业学报, 2023, 32(10): 187—199.
- [24] 胡梦瑶, 张林, 罗天祥, 等. 西藏紫花针茅叶功能性状沿降水梯度的变化[J]. 植物生态学报, 2012, 36(2): 136—143.
- [25] 孙一梅, 田青, 郭爱霞, 等. 放牧和氮添加对半干旱沙质草地优势种糙隐子草及群落功能性状的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(3): 563—571.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]北京: 中国农业出版社, 2000: 25—86.
- [27] 段媛媛, 宋丽娟, 牛素旗, 等. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 28—36.
- [28] 刘容, 李振华, 张馨馨, 等. 干旱胁迫下不同形态氮素对多年生黑麦草生长、叶片生理和草坪质量的影响[J]. 草原与草坪, 2022, 42(3): 45—53.
- [29] 惠施佳, 张金霞. 不同覆盖方式和灌水定额对河西绿洲

- 食葵农田土壤水热、养分和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 212—223.
- [30] 杨天杰, 王孝芳, 胡红菊, 等. 梨树枝条粉碎覆盖对梨园土壤养分和微生物组的影响[J/OL]. 土壤学报, 1—14 [2024 - 04 - 22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20230526.1314.006.html>.
- [31] 周江涛, 吕德国, 秦嗣军. 不同有机物覆盖对冷凉地区苹果园土壤水温环境及速效养分的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2551—2556.
- [32] Chen H, Gurmesa G A, Zhang W, *et al.* Nitrogen saturation in humid tropical forests after 6 years of nitrogen and phosphorus addition: hypothesis testing [J]. *Functional Ecology*, 2016, 30(2): 305—313.
- [33] 邓健, 赵雪, 卢笑玥, 等. 半干旱草地土壤团聚体氮磷转化相关酶活性对氮添加的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6539—6549.
- [34] 赵芳草, 陈鸿飞, 王一昊, 等. 盐渍化草地根际土壤理化性质对降水改变和氮添加的响应[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2430—2437.
- [35] Schleuss P, Widdig M, Heintz—Buschart A, *et al.* Stoichiometric controls of soil carbon and nitrogen cycling after long—term nitrogen and phosphorus addition in a mesic grassland in South Africa [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2019, 135: 294—303.
- [36] Tu L, Niu S. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition [J]. *Environmental research letters*, 2015, 10(2): 24019.
- [37] 陈天, 程瑞梅, 沈雅飞, 等. 氮添加对三峡库区马尾松人工林土壤团聚体有机氮组分和氮矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2601—2609.
- [38] 韩冰, 耿依仪, 邓艳芳, 等. 氮添加对青藏高原高寒草甸土壤磷组分的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2721—2728.
- [39] Liang X, Zhang T, Lu X, *et al.* Global response patterns of plant photosynthesis to nitrogen addition : A meta—analysis [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3585—3600.
- [40] 汪梦寒, 闫雨欣, 李富翠, 等. 不同形式氮添加对草甸草原土壤磷素含量和碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(7): 1793—1801.
- [41] Yang K, Zhu J, Gu J, *et al.* Effects of continuous nitrogen addition on microbial properties and soil organic matter in a *Larix gmelinii* plantation in China [J]. *Journal of forestry research*, 2018, 29(1): 85—92.
- [42] Obalum S E, Chibuike G U, Peth S, *et al.* Soil organic matter as sole indicator of soil degradation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(4): 176.
- [43] Vinya R, Malhi Y, Brown N, *et al.* Functional coordination between branch hydraulic properties and leaf functional traits in miombo woodlands : implications for water stress management and species habitat preference [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(5): 1701—1710.
- [44] Da Sois L, Mencuccini M, Castells E, *et al.* How are physiological responses to drought modulated by water relations and leaf economics' traits in woody plants? [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 291: 108613.
- [45] Soheili F, Naji H R, Heydari M, *et al.* Climatic differentiation: Variability in leaf functional and stoichiometry traits among different woody species in semi—arid forests [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 48: e02759.
- [46] Li S, Wang H, Gou W, *et al.* Leaf functional traits of dominant desert plants in the Hexi Corridor, Northwestern China : Trade—off relationships and adversity strategies [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 28: e01666.
- [47] Carroll D A, Hansen N C, Hopkins B G, *et al.* Leaf temperature of maize and Crop Water Stress Index with variable irrigation and nitrogen supply [J]. *Irrigation Science*, 2017, 35(6): 549—560.
- [48] Mu X, Chen Q, Chen F, *et al.* A RNA—Seq Analysis of the Response of Photosynthetic System to Low Nitrogen Supply in Maize Leaf [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(12): 2624.
- [49] Mu X, Chen Q, Chen F, *et al.* Within—Leaf Nitrogen Allocation in Adaptation to Low Nitrogen Supply in Maize during Grain—Filling Stage [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 699.
- [50] Moreau D, Milard G, Munier—Jolain N. A plant nitrophily index based on plant leaf area response to soil nitrogen availability [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(4): 809—815.
- [51] Grassein F, Lemauiel—Lavenant S, Lavorel S, *et al.* Relationships between functional traits and inorganic nitrogen acquisition among eight contrasting European grass species [J]. *Ann Bot*, 2015, 115(1): 107—115.
- [52] 陈雨岑, 陈冠陶, 王宇, 等. 10年模拟氮沉降对苦竹林根

- 际与非根际土壤铝组分的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1368—1374.
- [53] 门璐, 何奕成, 李婷婷, 等. 高寒草甸植物叶绿素对氮添加梯度的非线性响应[J]. 草地学报, 2023, 31(6): 1622—1631.
- [54] 杨晶, 张倩, 方青慧, 等. 不同放牧管理模式下高寒草甸共有优势种叶片功能性状比较[J]. 草原与草坪, 2021, 41(6): 15—22.
- [55] 卢笑玥, 赵雪, 徐莉萍, 等. 氮磷添加对黄土丘陵区撂荒草地优势植物功能性状的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(3): 49—59.
- [54] 杨晶, 张倩, 方青慧, 等. 不同放牧管理模式下高寒草甸

Effects of shrub shelter and nitrogen addition on soil physicochemical properties and leaf functional traits of *Lespedeza potanini* in desert grassland

LIN Xiong-kui¹, NAN Wan-lu¹, DONG Yue-wei¹, LI Zhi-gang^{1,2*}

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Centre, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of shrub shelter and nitrogen addition on soil physicochemical properties and leaf functional traits of legumes in desert grassland and their relationships, it is helpful to improve the understanding of the growth and development of legumes, and provide effective management measures for improving plant growth in desert grassland. [Method] Therefore, we used shrub caragana as the sheltering material, and set up four covering modes, namely 0% (F0, no branches), 30% (F30), 50% (F50) and 70% (F70). The four nitrogen supplemental levels were 0 g/(m²·a) (N0), 10g/m²a (N10), 20 g/(m²·a) (N20), and 40 g/(m²·a) (N40). [Result] With the increase of mulch, soil moisture increased, soil temperature decreased, organic matter content increased first and then decreased, and F30 was the highest; The content of available phosphorus and total phosphorus decreased in F30 and F50, respectively, compared with that in F0, but soil pH and alkali—hydrolyzed nitrogen were not significantly affected by mulching. N addition can decrease soil moisture and pH, increase the content of alkali—hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and total phosphorus, and has no effect on soil temperature and total nitrogen. Compared with F0, mulching significantly increased cotyledon l length, leaf width and leaf area. Under the same mulch, the chlorophyll content and specific leaf area increased with the nitrogen addition, while the leaf area and the middle width of F70 treatment decreased with the nitrogen addition. Nitrogen addition had no effect on leaf length and length-width ratio under different mulch. According to correlation analysis, leaf length, leaf width and leaf area were negatively correlated with soil temperature, and positively correlated with soil water content and pH. In addition, chlorophyll was negatively correlated with soil pH, positively correlated with alkali—hydrolytic nitrogen, and positively correlated with specific leaf area. [Conclusion] Irrigated branch mulching improved the soil water condition and was beneficial to the growth of the leaves of bough. The addition of nitrogen is not conducive to the growth of leaves, but helps to increase the chlorophyll content of leaves to improve the photosynthetic rate and resource acquisition ability of plants.

Key words: shrub shelter; nitrogen addition; soil physical and chemical properties; leaf functional traits; *Lespedeza potaninii*

(责任编辑: 靳奇峰)