

DOI: 10.11686/cyxb2024178

http://cyxb.magtech.com.cn

刘淑琪, 崔东, 刘文新, 等. 短期氮、水添加和刘割对苦豆子型退化草地植物群落特征与土壤理化性质的影响. 草业学报, 2025, 34(3): 41-55.

LIU Shu-qi, CUI Dong, LIU Wen-xin, et al. Effects of short-term nitrogen addition, watering, and mowing on plant community characteristics and soil physicochemical properties in *Sophora alopecuroides* degraded grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 41-55.

短期氮、水添加和刘割对苦豆子型退化草地植物群落特征与土壤理化性质的影响

刘淑琪^{1,2,3}, 崔东^{1,2*}, 刘文新^{1,2}, 杨海军^{2,4}, 杨延成^{1,2}, 江智诚^{1,2}, 闫江超^{1,2}, 刘江慧^{1,2}

(1. 伊犁师范大学资源与生态研究所, 新疆伊宁 835000; 2. 伊犁师范大学资源与环境学院, 新疆伊宁 835000; 3. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁沈阳 110866; 4. 云南大学生态与环境学院, 云南昆明 650000)

摘要: 在全球气候变化和人为活动加剧影响草地生态系统的背景下, 新疆干旱半干旱区毒害草入侵面积日益增加, 生物多样性迅速丧失, 草地退化严重, 威胁着草地生态系统的健康。研究氮沉降、降水变化和刘割对苦豆子型退化草地植物群落特征与土壤理化性质的影响, 对未来草地生态系统的可持续管理有理论和实践意义。本研究在以苦豆子为单优物种的退化草原开展了控制试验, 共设置8个处理: 对照(CK), 氮添加, 水添加, 刘割, 氮、水添加交互, 氮添加、刘割交互, 水添加、刘割交互以及氮、水添加、刘割三因子交互, 分析植物物种多样性、初级生产力、株高、盖度、土壤理化性质的变化规律以及苦豆子植被特征与土壤理化因子的关系。结果表明: 氮添加增加了苦豆子生物量, 刘割显著降低了苦豆子生物量和株高。氮添加, 氮水交互, 氮添加、刘割交互和氮、水添加、刘割三因子交互处理显著增加了土壤硝态氮含量, 氮、水添加和刘割三因子交互处理显著增加了土壤铵态氮含量。通过冗余分析和回归分析表明土壤有机质、全氮、全磷、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 显著影响苦豆子密度。氮添加可以增加土壤无机氮的含量, 刘割在一定程度上可以抑制苦豆子的生长, 水添加和其他因子交互作用比单独水添加对植物和土壤的影响效果显著, 该结果可为苦豆子型退化草地的治理恢复提供新的见解。

关键词: 苦豆子; 生物多样性; 生物量; 土壤养分; 土壤盐分

Effects of short-term nitrogen addition, watering, and mowing on plant community characteristics and soil physicochemical properties in *Sophora alopecuroides* degraded grassland

LIU Shu-qi^{1,2,3}, CUI Dong^{1,2*}, LIU Wen-xin^{1,2}, YANG Hai-jun^{2,4}, YANG Yan-cheng^{1,2}, JIANG Zhi-cheng^{1,2}, YAN Jiang-chao^{1,2}, LIU Jiang-hui^{1,2}

1. Institute of Resources and Ecology, Yili Normal University, Yining 835000, China; 2. College of Resources and Environment, Yili Normal University, Yining 835000, China; 3. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 4. College of Ecology and Environment, Yunnan University, Kunming 650000, China

Abstract: In the context of global climate change and intensified human activities affecting grassland ecosystems, the increasing area of invasion by poisonous weeds in the arid and semi-arid regions of Xinjiang is threatening the health of grassland ecosystems through rapid loss of biodiversity and serious grassland degradation. The study of the effects of nitrogen deposition, precipitation change, and mowing on plant community characteristics and soil

收稿日期: 2024-05-14; 改回日期: 2024-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(32260272)和第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0405)资助。

作者简介: 刘淑琪(1996-), 女, 河南新乡人, 在读博士。E-mail: 1298583898@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: cuidongw@126.com

physicochemical properties of *Sophora alopecuroides* degraded grassland has theoretical and practical significance for sustainable management of this grassland ecosystem in the future. This study conducted a controlled experiment on degraded grasslands with *S. alopecuroides* as a single dominant species. We set up a total of eight treatments. The eight treatments were: CK (no nitrogen, no water, no mowing), nitrogen addition (N treatment), water addition (W treatment), mowing (M treatment), nitrogen-water interaction (NW treatment), nitrogen-mowing interaction (NM treatment), water-mowing interaction (WM treatment), nitrogen-water-mowing interaction (NWM treatment). We analyzed the variation in plant species diversity, primary productivity, plant height, vegetation cover, soil physicochemical properties, and the relationship between vegetation characteristics of *S. alopecuroides* and soil physicochemical factors. The results indicated that: nitrogen addition significantly increased the biomass of *S. alopecuroides*, while mowing significantly decreased the biomass and height of *S. alopecuroides*. Nitrogen addition in the N, NW, NM and NWM treatments significantly increased soil nitrate nitrogen content, and the NWM treatment significantly increased soil ammonium nitrogen content. Redundancy analysis and regression analysis showed that soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, Ca^{2+} and HCO_3^- significantly affected the density of *S. alopecuroides*. Nitrogen addition increased the content of inorganic nitrogen in soil. Mowing inhibited the growth of *S. alopecuroides* to some extent. The interaction effect of water addition and other factors was more significant than that of water addition alone on plants and soil. The results provide new insight for the management and restoration of *S. alopecuroides* degraded grassland.

Key words: *Sophora alopecuroides*; biodiversity; biomass; soil nutrients; soil salinity

全球草地面积约占地球陆地面积的40.5%,草地生态系统具有生物多样性保护、气候调节等重要作用^[1-2]。然而,全球约有49%的草地出现不同程度的退化,草地生态系统恢复问题迫在眉睫^[3-4]。中国拥有世界第二大草地资源,草地面积2.65亿 hm^2 ,草原综合植被盖度达50.32%。近期研究表明,中国90%的草地都出现了不同程度的退化^[5],新疆32.1%的草地出现退化^[6]。有学者认为长期过度放牧是导致草原植被大面积退化的主要原因之一^[7-8]。目前,毒杂草在草原的大肆蔓延,也成为草地退化的主要表现形式之一,毒草治理已经成为新疆退化草地恢复治理中的重要一环^[9]。人类活动和未来气候变化都可能会增加毒杂草适生区面积^[10]。刈割是我国北方草地的主要利用方式之一,刈割不仅通过非选择性生物量去除直接影响生物生产力^[11],还通过允许植物有较长的时间来发展其复杂的性状^[12]和影响土壤动物多样性^[13]间接影响植物生产力。此外,不同的刈割制度也会影响土壤含水率、全碳、全磷、硝态氮和铵态氮^[14]。围栏封育可能会导致植被组成的显著变化^[15]。围封草地植物以不同的方式响应环境变化^[16]。降水量和氮沉降调控着土壤水分和氮有效性,影响着植物资源利用策略,从而会直接影响植被群落结构^[17-18]。水和氮是调节植物生长的两大重要资源^[19-21]。在半干旱草原生态系统中,水分作为生物活性的主要制约因素之一^[22],降水格局的变化可以改变土壤水分有效性^[23],影响土壤养分性质和土壤养分循环^[24-25]。大气氮沉降引起的氮富集可以刺激植物生长,也会降低物种丰富度^[26-28]。硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)是植物吸收氮的两种主要形式。降水变化与大气氮沉降同时发生,可能对土壤水分和氮有效性产生交互影响。一方面,降水在土壤N淋溶和矿化中起着重要作用^[29]。另一方面,缓解氮素限制可以刺激植物生长,增加光合和蒸腾作用,进而影响土壤水分。降水变化和N沉降对地上地下草地生态系统的交互影响可能比单一因素的影响更为复杂^[30]。因此有必要针对西北地区敏感生态系统开展相关的研究。

苦豆子(*Sophora alopecuroides*)是一种具有很强入侵性的毒害草,它已经成为新疆放牧草地危害最严重的草地毒害草之一^[9]。目前在伊犁托乎拉苏山地草原上苦豆子危害十分严重,大面积可食的禾草被苦豆子取代。而且,在全球气候变化的背景下,苦豆子危害面积还在不断扩大。苦豆子型退化草地物种多样性、初级生产力的变化以及土壤肥力提升等问题值得研究。近期相关研究以新疆伊犁山地草原为模型系统,探究了放牧条件下不同

扩散阶段苦豆子群落养分特征和土壤因子之间的相互关系^[31],但围封条件下刈割扰动和生境资源变化对苦豆子型退化草原植物多样性、生产力与土壤理化性质影响的研究鲜少报道。本研究旨在探讨苦豆子严重危害草地围封后进行氮素、水添加以及刈割干扰对苦豆子型退化草地群落多样性、草地生产力和土壤理化性质的影响。本研究提出了以下假设:1)氮、水添加会降低植物物种多样性,增加地上生产力,增加土壤硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)含量;刈割会降低地上生产力和土壤养分含量。2)氮、水添加会促进苦豆子生长,刈割会抑制苦豆子生长。由于地处干旱区,该系统土壤N和水是限制植物生长的主要因子。因此研究该生态系统在刈割扰动和生境资源变化条件下物种多样性、初级生产力与土壤理化性质的关系可为苦豆子型退化草地的恢复治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁州伊宁县托乎拉苏草原,距伊宁市约 40 km,属于典型的山地草原地区,研究区草地优良牧草已被毒害草(苦豆子)代替,禾本科植物盖度下降 50%~90%,草地退化程度为重度退化(图 1)。研究区属于温带大陆性气候半干旱地区,年均气温 9.0~11.1 °C,年平均降水 250.0~551.7 mm,年平均蒸发量 1621 mm。海拔为 900~1700 m,无霜期 163 d。研究区位于 44°07'20" N,81°31'21" E,苦豆子以单优群落的形式分布,群落内伴生植物主要有大翅蓟(*Onopordum acanthium*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)等。



图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

A: 青绿状态下苦豆子群落 *S. alopecuroides* community in the green state; B: 苦豆子群落开花 *S. alopecuroides* flowering period; C: 苦豆子群落结果 Seed setting stage of *S. alopecuroides*; D: 苦豆子多年生根系 *S. alopecuroides* roots; E: 苦豆子无性繁殖根系 *S. alopecuroides* asexual reproduction roots.

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 在研究区域内选取地势较为平坦、苦豆子危害严重的草地为试验样地。于 2023 年采用网围栏建立生长季禁牧试验区,面积为 31 m×41 m。试验区设置 8 区组,每区组设置 7 个 3 m×5 m 样方,即 8 个处理 7 个重复(N:氮添加;W:水添加;M:刈割;NW:氮、水添加;NM:氮添加、刈割;WM:水添加、刈割;NWM:氮、

水添加、刈割;CK:不刈割、不浇水、不施氮),共计56个小区,每个试验小区面积15 m²,隔离带为1 m。使用的氮肥为尿素(CH₄N₂O),N添加量根据N沉降临界负荷^[32-33],添加量为10 g·m⁻²·a⁻¹,融水后均匀施撒到样地中。增水处理采用人工浇水的方式在每次自然降水后,按照当次降水量的10%进行灌溉^[34-35],增加的降水量通过气象站记录的数据计算得出。在优势物种苦豆子开花时进行刈割,刈割留茬高度为2 cm。

1.2.2 取样测定 于2023年7月底进行群落特征调查,计测永久样方(0.5 m×0.5 m)的物种数、密度、盖度、高度以及生物量。将植物分类装入信封袋内带回实验室,并置于60 °C干燥箱(101-AB,天津)烘干72 h至恒重,称取植物干重。以植被地上生物量作为群落地上初级生产力(primary productivity, PP)的估计。土壤样品使用5点采样法取样,采样深度为0~20 cm,将每个样方土样混合,每个样方取适量土样用于土壤理化性质的测定,共计56个土壤样品。将带回的土壤样品风干处理后进行研磨,测定pH、电导率、总盐、盐分离子(Na⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻)、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾以及铵态氮、硝态氮的含量。

植物群落调查:物种数,在0.5 m×0.5 m样方中鉴别植物物种;密度,在0.5 m×0.5 m样方中数出每种植物的数量;盖度,目测植物垂直投影的面积占地面的比例;高度,每个样方中的每种植物各选取3株测量自然高度,选取平均值;生物量,所有植物烘干后,将所有物种干重相加得到群落生物量。

土壤样品按照《土壤农化分析》^[36]进行测定。有机质采用外加热法测定;全氮采用高氯酸硫酸消化法测定;全磷采用酸溶、钼锑抗比色法测定;全钾采用酸溶、原子吸收法测定;硝态氮、铵态氮采用0.01 mol·L⁻¹氯化钙浸提的方法测定;速效磷采用碳酸氢钠浸提、钼锑抗比色法测定;速效钾采用乙酸铵浸提、原子吸收法测定;pH采用梅特勒-托利多FiveEasy Plus pH计(瑞士)测定。用HANNA H1 2315电导率仪(意大利)测定电导率值。土壤离子组成测定方法:CO₃²⁻和HCO₃⁻采用双指示剂中和法,SO₄²⁻采用EDTA容量法,Cl⁻采用硝酸银滴定法,Ca²⁺和Mg²⁺采用EDTA络合滴定法,K⁺通过火焰光度法,Na⁺用差减法,总盐用干渣法测定,CO₃²⁻未检测到。

1.3 数据计算与统计分析

1.3.1 物种多样性

$$H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中:H'为Shannon-Wiener指数;S为样方内的物种数;P_i=N_i/N,N_i为样方中物种i的个体数,N为样方中全部物种个体数。

1.3.2 统计分析 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(least-significant difference, LSD)比较不同处理物种多样性、初级生产力和土壤理化性质的差异。以上方差分析利用R“multcomp Package”完成。为比较不同样本之间群落结构的相似性,采用非度量多维尺度分析(non-metric multi-dimensional scaling, NMDS)比较不同处理下的植被群落。NMDS分析采用R“iNEXT Package”和“vegan Package”完成。用PERMANOVA分析不同处理是否对植物物种有显著影响。用Pearson相关系数表征土壤有机质、全氮、全磷、全钾、铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾、电导率、全盐和离子间的相关性。相关性分析采用R“corrplot Package”完成。将土壤有机质、全氮、全磷、全钾、铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾、电导率、全盐、Na⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、pH,这18项土壤环境指标与植物群落特征进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),以揭示植被群落对各土壤环境因子的响应。冗余分析采用R“vegan Package”完成。以上分析和制图均在R(v. 4.3.1, 2023)中完成。

2 结果与分析

2.1 氮、水添加和刈割对植物群落特征的影响

退化草原不同处理间植被群落相对丰度如图2a所示。氮添加(N)、氮×水添加(NW)、氮添加×刈割(NM)、水添加×刈割(WM)和氮添加×水添加×刈割(NWM)处理的优势种均由苦豆子和扁穗雀麦(*Bromus catharticus*)组成。刈割(M)处理的优势种由苦豆子、扁穗雀麦和狗尾草(*Setaria viridis*)组成。水添加(W)处理和对照(CK)的优势种由苦豆子、扁穗雀麦和多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)组成。非度量多维排序(NMDS)分析结果表明(图2b),压力指数(stress index)为0.179,<0.2,说明模型的拟合效果较好,可以进行数据的解释。

不同处理间的植被群落结构均有重叠,表明群落结构具有高相似性(PERMANOVA: $F=0.97$; $R^2=0.12$; $P=0.53$)。按功能群分为以下 7 类(表 1),莎草科、禾本科、豆科、柽柳科、唇形科、苋科、菊科。

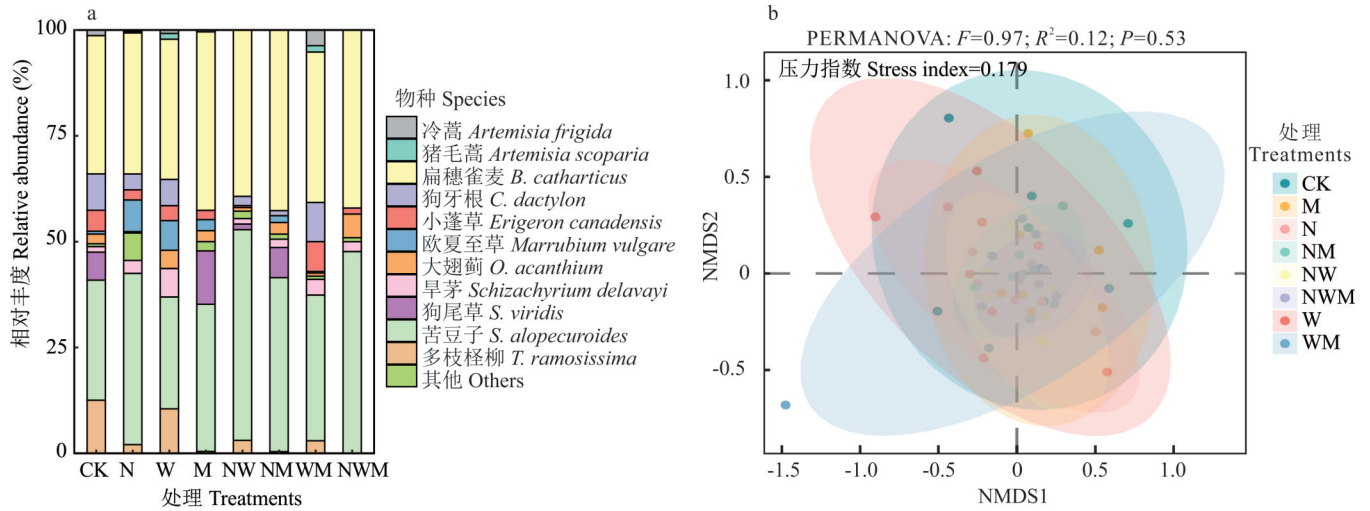


图 2 不同处理物种组成和植被群落非度量多维度分析

Fig. 2 Species composition and non-measured multi-dimensional analysis of plant communities under different treatments

表 1 不同处理草地物种生物量

Table 1 Biomass of grassland species under different treatments ($g \cdot m^{-2}$)

功能群 Functional groups	物种 Species	N	W	M	NW	NM	WM	NWM	CK
豆科 Fabaceae	苦豆子 <i>S. alopecuroides</i>	467.61	331.94	81.05	460.47	116.89	85.21	83.64	327.49
	苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
柽柳科 Tamaricaceae	多枝柽柳 <i>T. ramosissima</i>	1.67	3.15	0.38	4.12	0.33	1.72	0.00	9.67
禾本科 Poaceae	扁穗雀麦 <i>B. catharticus</i>	38.91	34.90	35.76	25.87	34.61	37.27	33.76	39.68
	狗牙根 <i>C. dactylon</i>	0.69	0.97	0.00	0.32	0.22	0.97	0.00	0.88
	旱茅 <i>S. delavayi</i>	0.11	0.35	0.00	0.03	0.09	0.12	0.06	0.05
	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	3.13	0.00	1.14	0.00
	狗尾草 <i>S. viridis</i>	0.00	0.00	1.21	0.03	5.18	0.00	0.00	2.44
菊科 Asteraceae	大翅蓟 <i>O. acanthium</i>	1.13	17.94	7.46	1.69	7.81	7.36	15.26	8.90
	冷蒿 <i>A. frigida</i>	0.34	0.27	0.00	0.00	0.00	3.27	0.00	0.45
	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	0.07	0.49	0.11	0.01	0.00	1.77	0.00	0.00
	乳苣 <i>Lactuca tatarica</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
	小蓬草 <i>E. canadensis</i>	0.19	0.81	0.84	0.16	0.00	1.48	0.46	2.94
	野苣荬 <i>Lactuca serriola</i>	0.00	0.00	3.10	0.00	0.25	1.91	0.00	0.33
	苍耳 <i>Xanthium strumarium</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03
唇形科 Lamiaceae	欧夏至草 <i>M. vulgare</i>	5.10	6.71	1.35	0.00	0.49	0.14	0.00	0.70
	薄荷 <i>Mentha canadensis</i>	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
苋科 Amaranthaceae	角果藜 <i>Ceratocarpus arenarius</i>	0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	猪毛菜 <i>Kali collinum</i>	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
莎草科 Cyperaceae	薹草 <i>Carex</i> spp.	0.18	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00

不同处理间的群落初级生产力均不相同(图 3a),N 处理后植被群落初级生产力最高,说明氮添加能增加生产力,但增加效果不显著,单独增水对生产力无显著影响,与 CK 生产力几乎相同;M、NM、WM 和 NWM 处理的生产力与 CK 对比大幅减少。NW 处理的株高显著高于对照(图 3b),M、WM、NWM 处理的植被盖度显著低于对照

(图 3c), 与 CK 对比, NW 和 NWM 处理 Shannon 指数显著降低(图 3d)。与 CK 对比, N 和 NW 处理苦豆子生物量显著增加, M、NM、WM 和 NWM 处理苦豆子生物量显著减少(图 3e), 说明氮添加可以促进苦豆子的生长, 资源充足条件下, 苦豆子会进一步扩散。刈割在一定程度上可以抑制苦豆子的生长。与 CK 对比, M、NM、WM 和 NWM 处理苦豆子株高显著减少(图 3f)。与 CK 对比, WM 和 NWM 处理苦豆子盖度显著减少(图 3g), 不同处理苦豆子密度无显著变化(图 3h)。

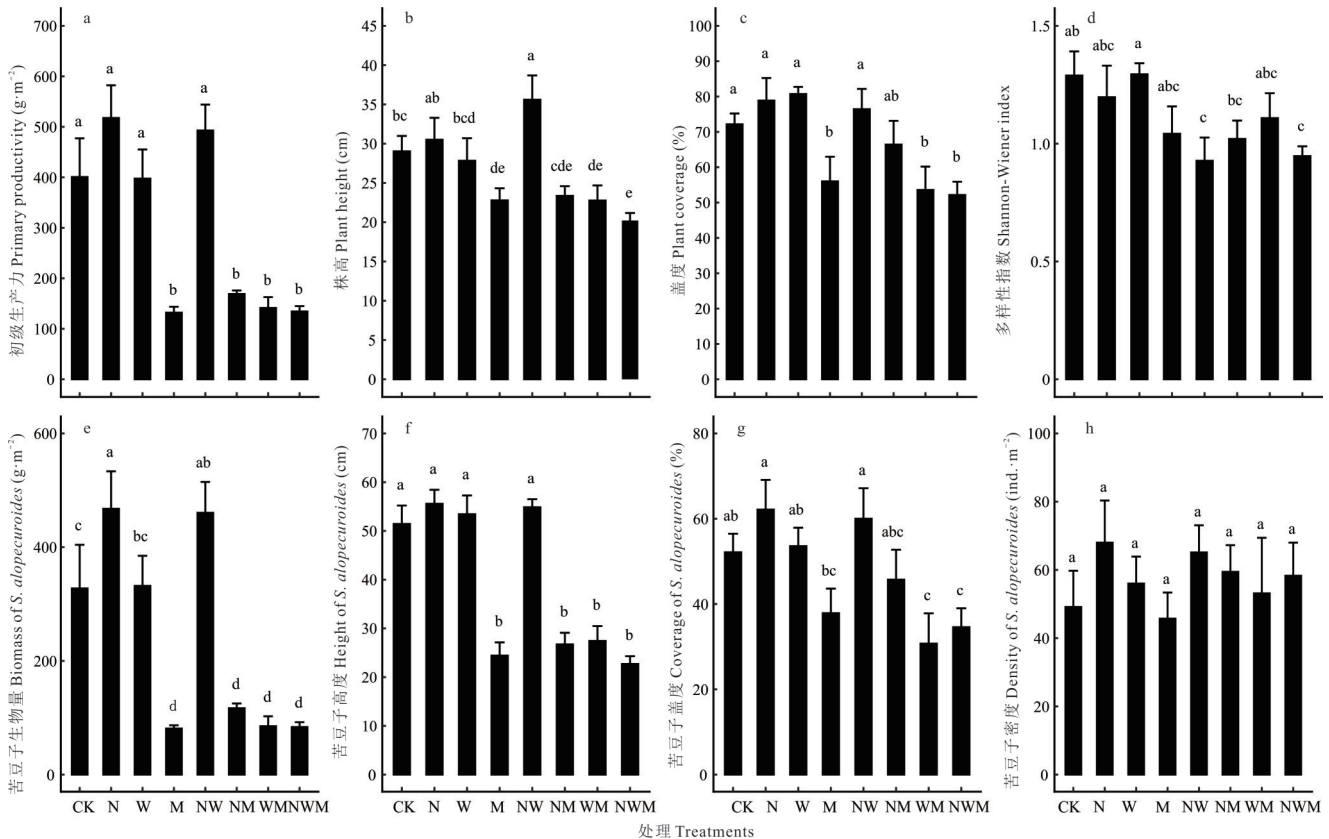


图 3 不同处理对苦豆子型退化草地初级生产力、株高、盖度和多样性指数以及苦豆子生物量、株高、盖度和密度的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on primary productivity, plant height, plant coverage, and diversity index of *S. alopecuroides* degraded grassland and on biomass, plant height, coverage and density of *S. alopecuroides*

图中数据为平均值±标准误差, 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Data in the figure are means±standard error, and different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.2 氮、水添加和刈割对土壤理化性质的影响

为了解土壤理化因子之间的关系, 对其进行了相关分析(图 4)。土壤 pH 与硝态氮(nitrate nitrogen, NN)之间呈极显著负相关($P < 0.001$)。硝态氮与铵态氮(ammonia nitrogen, AN)之间呈极显著正相关($P < 0.001$)。全氮(total nitrogen, TN)与 pH 之间呈显著负相关($P < 0.01$), 与土壤有机质(soil organic matter, SOM)、全磷(total phosphorus, TP)之间呈极显著正相关($P < 0.001$), 与速效钾(available potassium, AK)之间呈显著正相关($P < 0.05$)。全磷与有机质、全钾(total potassium, TK)之间呈极显著正相关($P < 0.001$)。有机质与全氮的相关性最大。电导率(electrical conductivity, EC)与 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 之间呈显著正相关。全盐(total salt, TS)与 SO_4^{2-} 、EC、 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 之间呈显著正相关。 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 之间呈显著正相关。 K^{+} 与 Na^{+} 之间呈显著正相关。 HCO_3^{-} 与 Cl^{-} 之间呈显著正相关。

不同处理对土壤养分的影响如图 5 所示, 各处理有机质、速效磷含量无显著差异(图 5a, g), 刈割(M)处理全氮含量与氮(N)处理有显著差异(图 5b)。对照全磷含量与刈割(M)处理有显著差异(图 5c)。氮×水×刈割

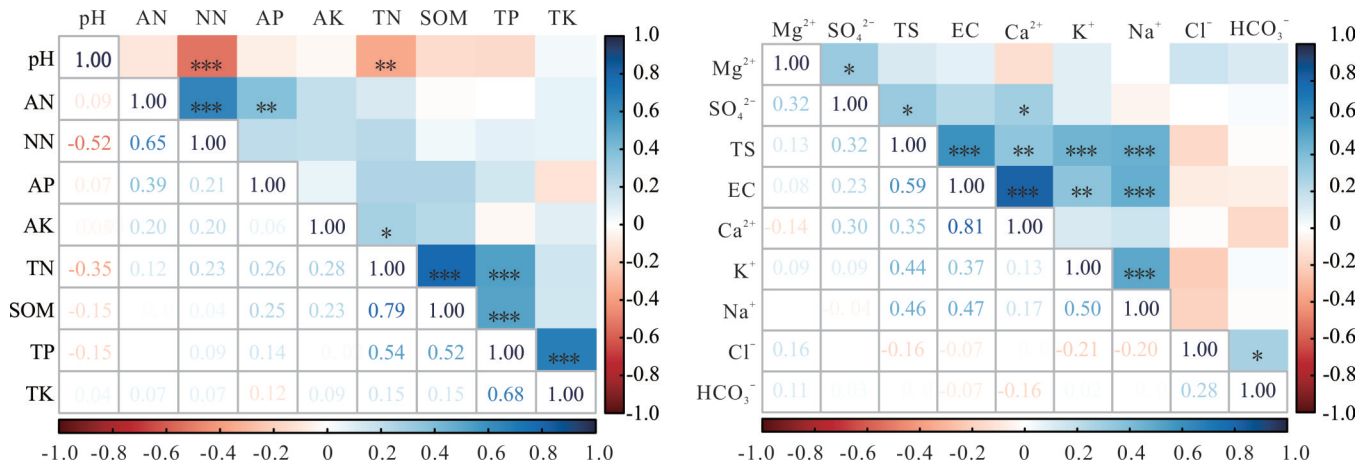


图4 土壤理化因子之间的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis among soil physicochemical factors

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; NN: 硝态氮 Nitrate nitrogen; AN: 铵态氮 Ammonia nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; TS: 全盐 Total salt; EC: 电导率 Electrical conductivity. 下同 The same below. *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$.

(NWM)处理全钾含量与刈割(M)处理和氮(N)处理有显著差异(图5d)。氮(N)处理、氮×水(NW)处理、氮×刈割(NM)处理、氮×水×刈割(NWM)处理硝态氮含量与对照(CK)、水(W)处理、刈割(M)处理、水×刈割(WM)处理有显著差异(图5e)。氮×水×刈割(NWM)处理铵态氮含量与对照(CK)有显著差异(图5f)。氮×刈割(NM)处理速效钾含量与刈割(M)处理有显著差异(图5h)。各处理pH值均在8左右(图5i)。

不同处理对土壤盐分的影响如图6所示,氮(N)处理、氮×水(NW)处理、水(W)处理HCO₃⁻含量与对照(CK)均有显著差异(图6a)。氮(N)处理Cl⁻含量与对照(CK)有显著差异(图6b)。水(W)处理SO₄²⁻含量与对照(CK)有显著差异(图6c)。氮(N)处理、氮×水(NW)处理、氮×刈割(NM)处理、氮×水×刈割(NWM)处理Ca²⁺含量与对照(CK)有显著差异(图6d)。对照(CK)Mg²⁺含量与刈割(M)处理、水(W)处理有显著差异(图6e)。氮(N)处理K⁺含量与其他处理之间均有显著差异(图6f)。8个处理中,水(W)处理Na⁺含量最高(图6g),氮(N)处理全盐含量最高(图6h)。氮(N)处理、氮×水(NW)处理、氮×刈割(NM)处理和氮×水×刈割(NWM)处理电导率与对照(CK)有显著差异(图6i)。

2.3 土壤理化因子对植物群落特征的影响

对植物初级生产力、平均株高、盖度和多样性指数以及苦豆子生物量、株高、盖度和密度与土壤理化因子进行RDA排序,由图7a可知,RDA前2排序轴共累积解释了总体变异的87.30%,土壤SOM、TN、TP对植物初级生产力(PP)、Shannon多样性指数(H')、植被平均高度(PAH)、植被平均盖度(PAC)以及苦豆子生物量(BI)、株高(SPAH)、盖度(SPAC)和密度(DE)影响显著($P < 0.01$,图8a)。由图7b可知,RDA前2排序轴共累积解释了总体变异的87.53%,土壤Ca²⁺、HCO₃⁻含量对植物初级生产力(PP)、Shannon多样性指数(H')、植被平均高度(PAH)、植被平均盖度(PAC)以及苦豆子生物量(BI)、株高(SPAH)、盖度(SPAC)和密度(DE)影响显著($P < 0.01$,图8b)。

为了进一步了解土壤理化因子对苦豆子生物量、高度、盖度以及密度的影响,根据RDA排序结果分析苦豆子的生物量、高度、盖度和密度与土壤SOM、TN、TP、Ca²⁺和HCO₃⁻的线性关系,苦豆子生物量、株高与土壤SOM、TN、TP、Ca²⁺无显著关系($P > 0.05$)(图9a, b, e, f, i, j, m, n),苦豆子生物量与土壤HCO₃⁻含量有显著关系($P < 0.05$,图9q),苦豆子株高与土壤HCO₃⁻含量无显著关系($P > 0.05$,图9r);苦豆子盖度与土壤TN、TP和HCO₃⁻有显著关系($P < 0.05$)(图9g, k, s),苦豆子盖度与土壤SOM和Ca²⁺无显著关系($P > 0.05$)(图9c, o),苦豆子密度与土壤SOM、TN、TP、Ca²⁺和HCO₃⁻有显著关系($P < 0.05$)(图9d, h, l, p, t)。

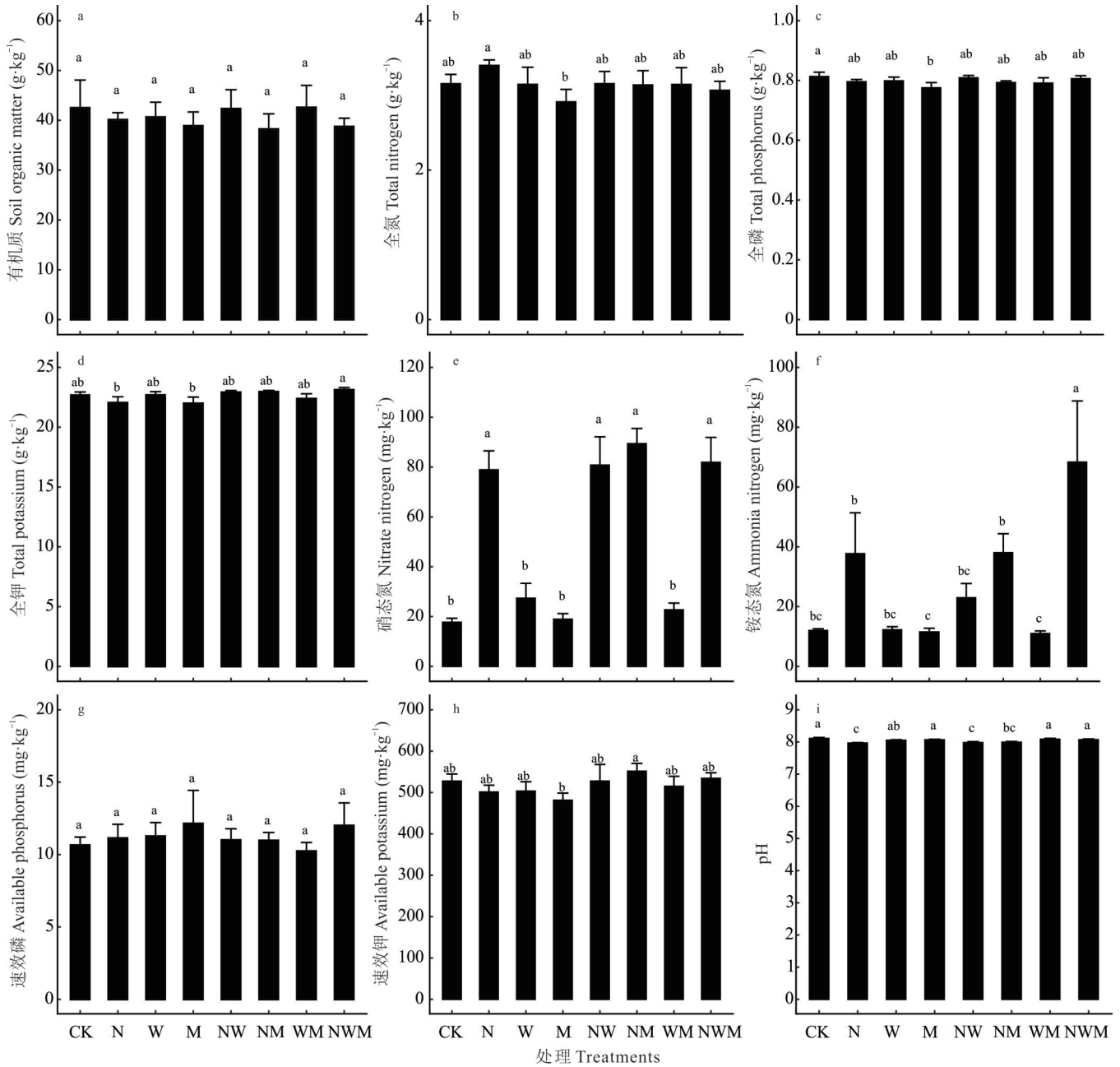


图5 不同处理对土壤养分的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil nutrients

3 讨论

3.1 氮、水添加和刈割对植物群落特征的影响

氮添加能解除土壤养分缺乏的限制作用,在提高生产力的同时减少植物的光资源获得,导致物种多样性下降^[37],因而对于塑造群落多样性格局、提高初级生产力有重要作用。本研究与上述研究结果不一致,其原因可能是对于光照强和时长充足的地区在提高生产力的同时光资源的获取在各物种之间未形成竞争关系。土壤水分和氮有效性增加了植物群落的生产力,水在各种生物化学过程中充当反应物,是土壤与植物之间运输矿质养分、植物组织之间运输养分和光合产物的介质^[38-39]。因此,在水限制系统中加水可增加养分吸收和运输,促进植物生理和生长发育^[40-41]。增水还可以通过促进凋落物分解^[42]和矿化^[40]来提高植物生产力,从而改善土壤养分有效性。在本研究的增水处理中,草地增水并未显著地增加草地生产力,造成此结果的原因可能是试验开展时间较短,增

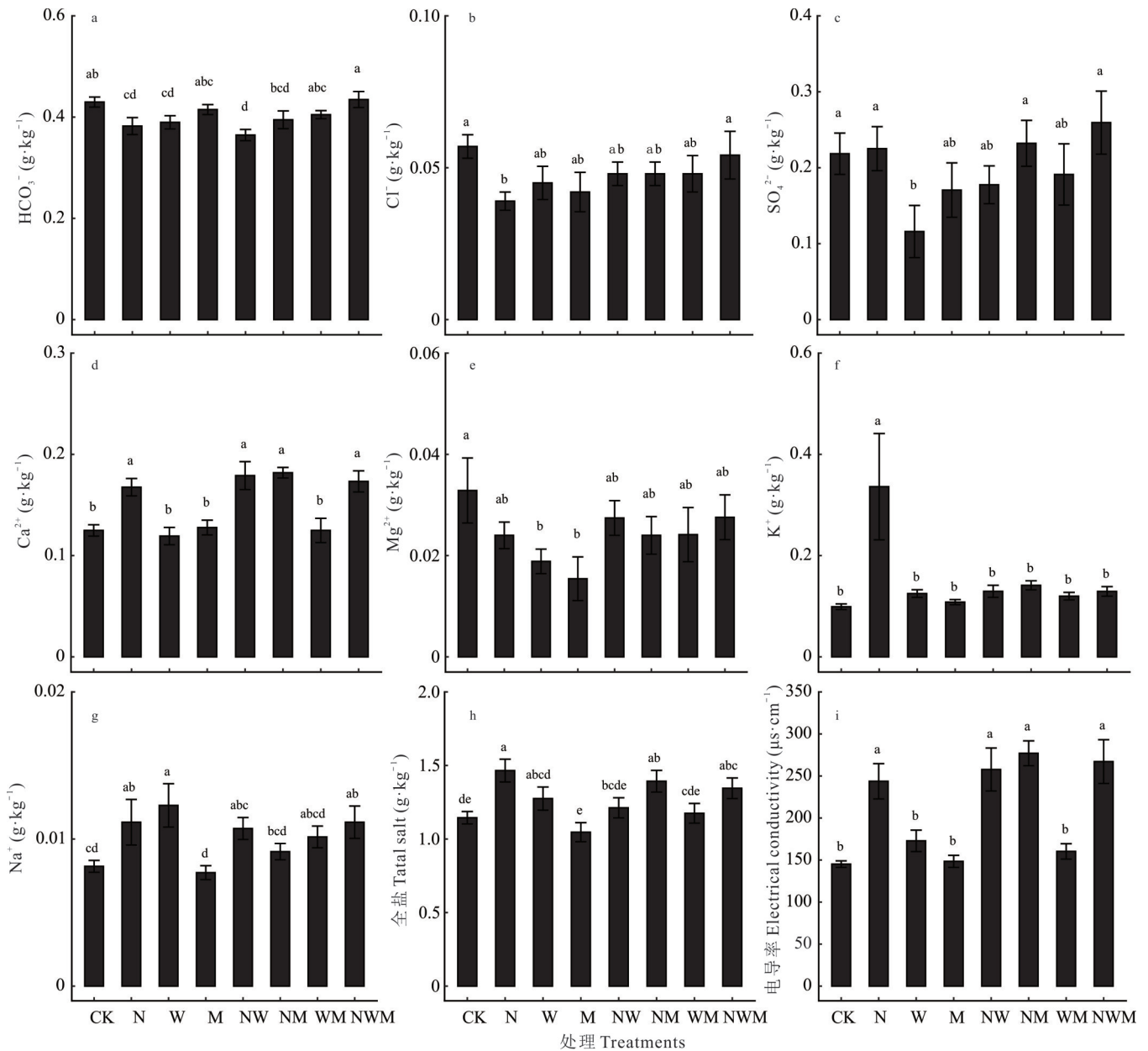


图 6 不同处理对土壤盐分的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on soil salinity

水是否能显著增加干旱区草地生产力还需长期试验进行验证。本研究结果与假设 1 不太一致。氮元素对于植物组织结构蛋白和酶蛋白的合成是必不可少的^[43-45]。已知在氮限制系统中施氮可促进植物二氧化碳同化^[46]、组织形成^[47]和叶片生产^[45]。在本试验中,氮水添加后优势种(苦豆子)获得了较高的生物量,在改善的水氮条件下并刈割围封干扰后多枝怪柳和扁穗雀麦也成为优势种,对整个草原生态系统群落多样性以及生产力的提高有显著贡献。刈割对植物群落特征和初级生产力的影响不同。本研究发现刈割降低了 Shannon 多样性指数,这与卢彦达等^[48]对草甸草原羊草群落物种多样性研究结果一致。不刈割地上生产力要显著高于刈割地上生产力,本研究结果还表明刈割可以显著降低优势种苦豆子的生物量和植被高度,这与曹贺颖^[14]对草甸草原植物群落特征研究结果一致。上述结果也支持了假设 2。

3.2 氮、水添加和刈割对土壤理化性质的影响

降水增加直接改变土壤含水量,间接影响土壤氮素有效性与氮矿化作用^[49]。降水变化通过影响土壤氮转化过程来影响土壤氮有效性^[50],从而间接影响土壤全碳、全氮含量^[51-52]。氮沉降增加可降低土壤 pH^[53],增加土壤硝

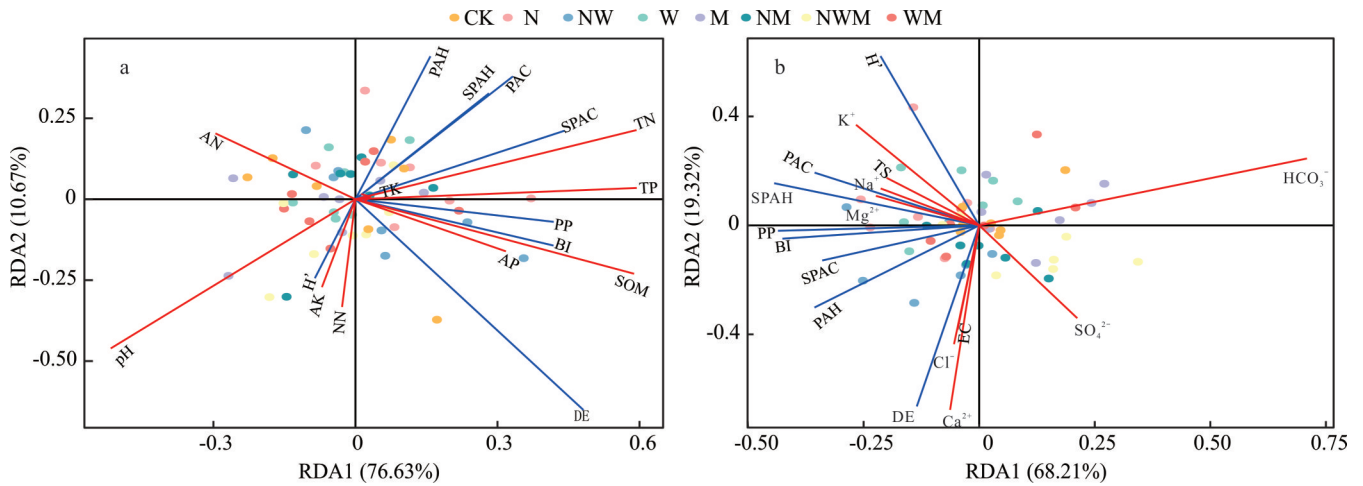


图7 植物群落特征和土壤理化因子的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis of plant community characteristics and soil physicochemical factors

PP: 初级生产力 Primary productivity; PAH: 植被平均高度 Plant average height; PAC: 植被平均盖度 Plant average coverage; BI: 苦豆子生物量 Biomass of *S. alopecuroides*; SPAH: 苦豆子株高 Plant height of *S. alopecuroides*; SPAC: 苦豆子盖度 Coverage of *S. alopecuroides*; DE: 苦豆子密度 Density of *S. alopecuroides*.

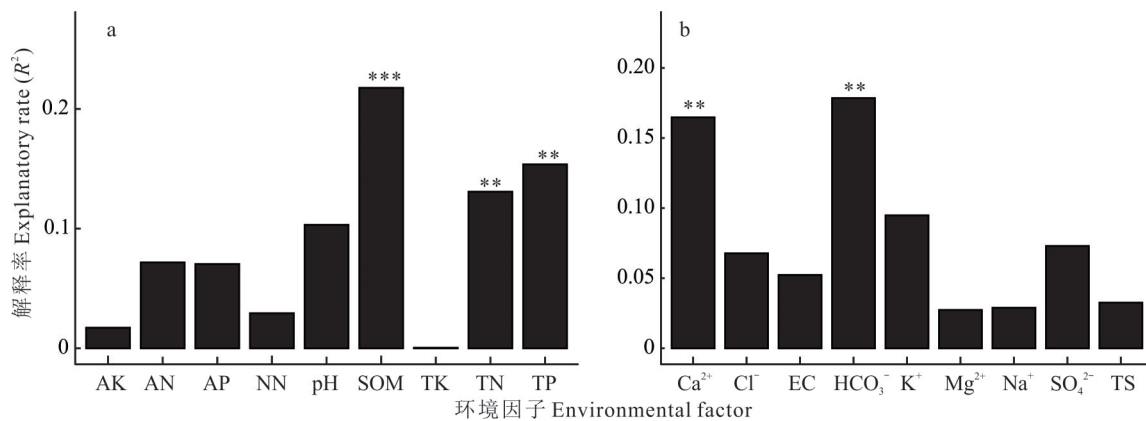


图8 环境因子解释率排序

Fig. 8 Ranking of environmental factors explanatory rate

a: 土壤养分解释率排序 Soil nutrient explanatory rate ranking; b: 土壤盐解释率排序 Soil salt explanatory rate ranking; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$.

态氮、铵态氮含量^[54],提高氮矿化潜力^[55],加速土壤中交换性盐基离子的耗竭^[56]。本研究结果发现氮、氮×水、氮×刈割、氮×水×刈割这4个含氮处理的土壤硝态氮、铵态氮含量明显高于其他处理。这与其他学者研究结果一致^[54]。这也与本研究假设1一致。童永尚等^[57]研究发现氮添加显著提高了土壤电导率、有机质、速效磷、全氮、全磷含量。赵芳草等^[35]的研究结果表明盐渍化土壤根际与非根际土壤理化性质对增加降水及降水改变与氮添加交互作用的响应不敏感。本研究结果则表明氮添加处理显著提高了土壤电导率。氮×水、氮×刈割、水×刈割、氮×水×刈割处理并未显著增加有机质、全氮、全磷含量,原因可能是氮添加处理、增水处理和刈割处理的交互作用对土壤理化性质的影响很可能相互抵消。另有研究发现,氮添加可增加土壤中植物角质层的积累和烷基碳占比,进而增加有机碳稳定性^[58],将含氮化合物氧化成 NO_3^- 并向环境中释放 H^+ ^[59],这些 H^+ 可置换土壤中的碱性阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+),进而导致土壤酸化。本研究发现氮添加(N)处理、氮×水(NW)处理、氮×刈割(NM)处理、氮×水×刈割(NWM)处理土壤 Ca^{2+} 含量和电导率显著高于其他4个处理;在氮添加处理下 K^+ 含量显著高于其他处理,全盐含量与其他处理相比最高。综上所述,本研究表明在蒸发量极高的干旱区草原进行氮添加会增加土壤盐分含量。在刈割(M)处理下,土壤TN、TP、TK、AK、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和全盐含量都低于其他处理。造

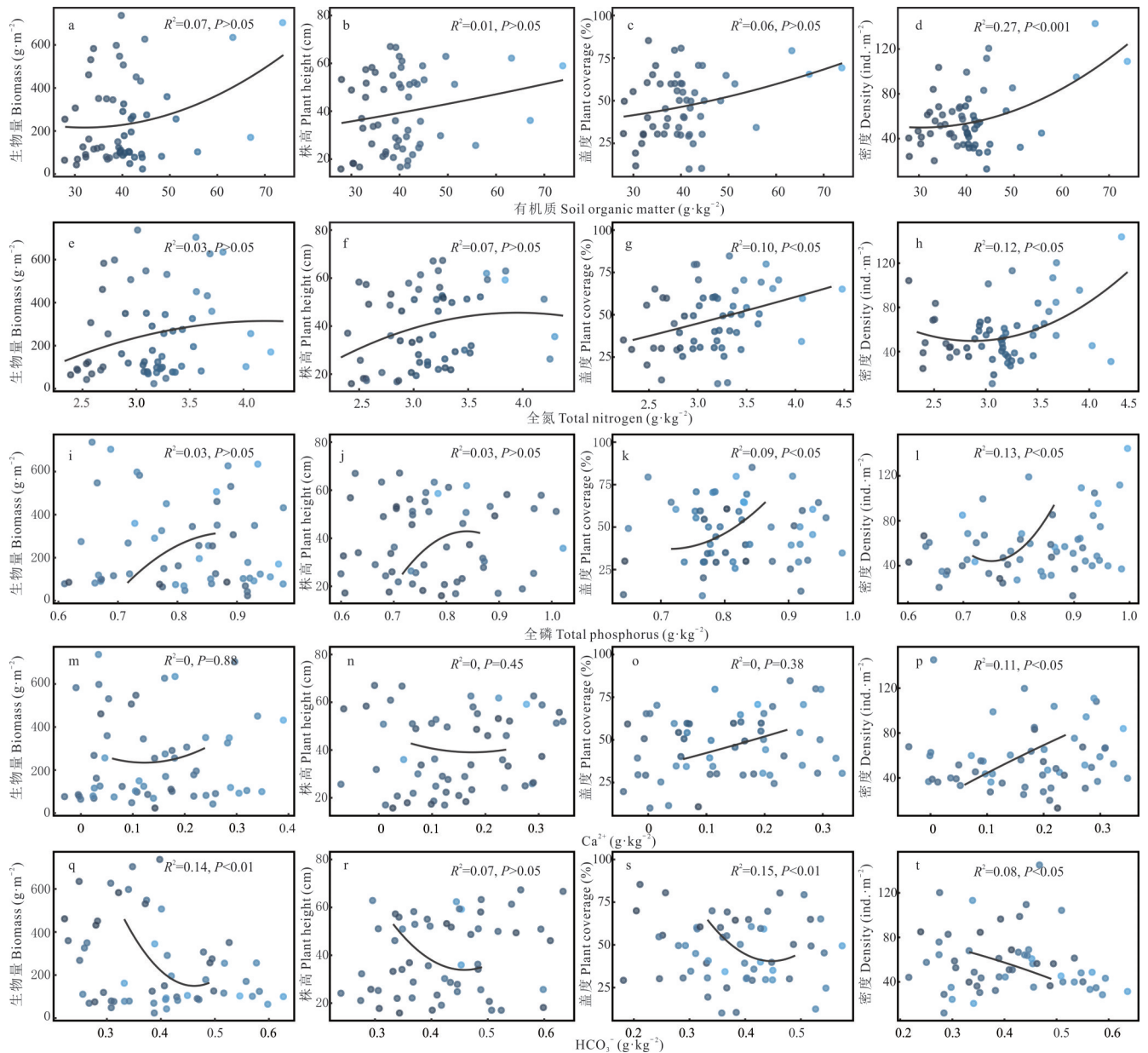


图9 苦豆子生物量、株高、盖度和密度与土壤理化因子的关系

Fig. 9 Relationship between biomass, plant height, coverage and density of *S. alopecuroides* and soil physicochemical factors

成此结果的原因可能是在刈割处理之后,植被补偿生长所需要的土壤养分要高于未刈割草地。这与本研究假设1一致。

3.3 土壤理化因子与植物群落特征的关系

植被—土壤系统是一个密不可分的整体,其相互间协同变化的作用机理维持着生态系统的动态稳定。土壤有机质作为土壤养分的主要指标,其含量直接影响土壤肥力状况,进而影响植物生长发育水平及多样性^[60],干旱气候条件下有机质能提高土壤持水能力^[61]。本研究中,土壤SOM、TN、TP对植物群落特征影响显著。有研究发现,高寒草甸退化草地土壤有机质、全氮以及全磷与植物群落生物量存在不同程度的正相关关系^[62]。本研究结果与其一致。植物生长发育受土壤环境条件制约,土壤盐分是干旱区植物多样性的主要影响因子^[61]。本研究发现,土壤HCO₃⁻、Ca²⁺对植物群落特征影响显著。有研究发现,Na⁺和SO₄²⁻对植物多样性有显著影响^[63],本研究结果与其不一致,其原因可能是样区植物物种差异性,样区优势种以及其他植物所需的营养成分不同。此外,苦豆子密度与土壤SOM、TN、TP、HCO₃⁻和Ca²⁺呈显著线性关系,这意味着土壤养分和盐分离子运移在调控植物生长

方面十分重要。本研究分析了植物群落特征对土壤养分和盐分的短期响应。然而,植物—土壤相互作用的长期响应机制仍需要进一步研究。

4 结论

综上所述,氮添加可以显著增加苦豆子生物量,刈割可以显著降低苦豆子生物量,说明在资源充足条件下,苦豆子会进一步扩散。刈割在一定程度上可以抑制苦豆子的生长,并且降低氮添加对植物多样性带来的负面影响。氮添加可以增加苦豆子型退化草地可利用氮(铵态氮和硝态氮)的含量,并改变土壤盐分离子的组成。苦豆子密度与土壤有机质、全氮、全磷、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 有显著相关性。本研究主要评估了短期内氮、水添加和刈割对地上植物群落特征和土壤理化因子的影响,氮、水添加和刈割对地下土壤生物的影响及地上植物群落和土壤因子变化对土壤生物的级联效应有待进一步研究,以便更好地理解环境变化下影响整个苦豆子型退化草地生态系统变化的机制,从而制定更适合干旱区草原生态的草地管理措施。

参考文献 References:

- [1] Suttie J M, Reynolds S G, Batello C. Grasslands of the world. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.
- [2] O'Mara F P. The role of grasslands in food security and climate change. *Annals of Botany*, 2012, 110(6): 1263—1270.
- [3] Gibbs H K, Salmon J M. Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, 2015, 57: 12—21.
- [4] Lark T J, Spawn S A, Bougie M, *et al.* Cropland expansion in the United States produces marginal yields at high costs to wildlife. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4295.
- [5] Wang D L, Wang L, Xin X P, *et al.* Systematic restoration for degraded grasslands: Concept, mechanisms and approaches. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2532—2540.
王德利, 王岭, 辛晓平, 等. 退化草地的系统性恢复: 概念、机制与途径. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2532—2540.
- [6] Zhou W, Yang H, Huang L, *et al.* Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 303—313.
- [7] Ash A J, Corfield J P, Mcivor J G, *et al.* Grazing management in tropical savannas: utilization and rest strategies to manipulate rangeland condition. *Rangeland Ecology & Management*, 2011, 64(3): 223—239.
- [8] Long R J, Dong S K, Hu Z Z. Grassland degradation and ecological restoration in Western China. *Grassland and Turf*, 2005(6): 3—7.
龙瑞军, 董世魁, 胡自治. 西部草地退化的原因分析与生态恢复措施探讨. *草原与草坪*, 2005(6): 3—7.
- [9] Wang J L. Research on species diversity and integrated control technology of poisonous weeds in Xinjiang grazing grassland. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
王军亮. 新疆放牧草地毒害草种属多样性与综合防控措施研究. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [10] Huang R J, Zhang C Y, Wen Y T, *et al.* Predicting the habitats of *Achnatherum inebrians* in China under current (1970—2000) and future climate conditions. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(10): 2712—2720.
黄睿杰, 张春艳, 温雨婷, 等. 当前(1970—2000)与未来气候变化情境下中国醉马苳草潜在分布预测. *草地学报*, 2022, 30(10): 2712—2720.
- [11] Catorci A, Cesaretti S, Malatesta L, *et al.* Effects of grazing vs mowing on the functional diversity of sub-Mediterranean productive grasslands. *Applied Vegetation Science*, 2014, 17(4): 658—669.
- [12] Catorci A, Cesaretti S, Gatti R, *et al.* Trait-related flowering patterns in submediterranean mountain meadows. *Plant Ecology*, 2012, 213(8): 1315—1328.
- [13] Kőrösi Á, Szentirmai I, Batáry P, *et al.* Effects of timing and frequency of mowing on the threatened scarce large blue butterfly—a fine-scale experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 196(1793): 24—33.
- [14] Cao H Y. Effects of mowing on plant community characteristics, soil physicochemical properties and greenhouse gas flux in meadow steppe in Inner Mongolia. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023.
曹贺颖. 刈割对内蒙古草甸草原植物群落特征、土壤理化性质及温室气体通量的影响. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- [15] Bardgett R D, Wardle D A. Herbivore-mediated linkages between aboveground and belowground communities. *Ecology*, 2003, 84(9): 2258—2268.

- [16] Lafage D, Maugenest S, Bouzillé J B, *et al.* Disentangling the influence of local and landscape factors on alpha and beta diversities: opposite response of plants and ground-dwelling arthropods in wet meadows. *Ecological Research*, 2015, 30(6): 1025–1035.
- [17] Niu S L, Wu M Y, Han Y, *et al.* Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 144–155.
- [18] Zhang J F, Xu Y Q. Responses of plant biomass and net primary production to nitrogen fertilization and increased precipitation in re-grassed croplands in Duolun County of Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(2): 192–200.
张金凤, 徐雨晴. 水氮添加对内蒙古多伦县退耕还草地生物量、生产力及其分配的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(2): 192–200.
- [19] Li Q, Jiang Y, Liang W J, *et al.* Long-term effect of fertility management on the soil nematode community in vegetable production under greenhouse conditions. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(1): 111–118.
- [20] Yang H J, Li Y, Wu M Y, *et al.* Plant community responses to nitrogen addition and increased precipitation: the importance of water availability and species' traits. *Global Change Biology*, 2011, 17(9): 2936–2944.
- [21] Xu Z, Wan S, Ren H, *et al.* Effects of water and nitrogen addition on species turnover in temperate grasslands in northern China. *PLoS One*, 2012, 7(6): e39762.
- [22] Collins S L, Sinsabaugh R L, Crenshaw C, *et al.* Pulse dynamics and microbial processes in aridland ecosystems. *Journal of Ecology*, 2008, 96(3): 413–420.
- [23] Peng S S, Piao S L, Shen Z H, *et al.* Precipitation amount, seasonality and frequency regulate carbon cycling of a semi-arid grassland ecosystem in Inner Mongolia, China: a modeling analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178/179: 46–55.
- [24] Borken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 808–824.
- [25] Johnson L, Kuske R, Carney D, *et al.* Increased temperature and altered summer precipitation have differential effects on biological soil crusts in a dryland ecosystem. *Global Change Biology*, 2012, 18(8): 2583–2593.
- [26] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science*, 2004, 303(5665): 1876–1879.
- [27] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*, 2008, 451(7179): 712–715.
- [28] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, *et al.* Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30–59.
- [29] Schimel D S, Braswell B H, Parton W J. Equilibration of the terrestrial water nitrogen, and carbon cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94(16): 8280–8283.
- [30] Sun X, Zhang X, Zhang S, *et al.* Soil nematode responses to increases in nitrogen deposition and precipitation in a temperate forest. *PLoS One*, 2013, 8(12): e82468.
- [31] Cui D. Study on the ecological stoichiometric characteristics of plant and soil in different diffusion stages of *Sophora alopecuroides* population in Yili river valley. Urumqi: Xinjiang University, 2018.
崔东. 伊犁河谷苦豆子种群不同扩散阶段的植物与土壤生态化学计量学特征研究. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [32] Duan L, Hao J M, Xie S D, *et al.* Estimating critical loads of sulfur and nitrogen for Chinese soils by steady state method. *Environmental Science*, 2002, 23(2): 7–12.
段雷, 郝吉明, 谢绍东, 等. 用稳态法确定中国土壤的硫沉降和氮沉降临界负荷. *环境科学*, 2002, 23(2): 7–12.
- [33] Xu Z W, Li M H, Niklaus E Z, *et al.* Plant functional diversity modulates global environmental change effects on grassland productivity. *Journal of Ecology*, 2018, 106(5): 1941–1951.
- [34] Zhu W W, Wang P, Xu Y X, *et al.* Soil enzyme activities and their influencing factors in a desert steppe of northwestern China under changing precipitation regimes and nitrogen addition. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(3): 309–320.
朱湾湾, 王攀, 许艺馨, 等. 降水量变化与氮添加下荒漠草原土壤酶活性及其影响因素. *植物生态学报*, 2021, 45(3): 309–320.
- [35] Zhao F C, Chen H F, Wang Y H, *et al.* Response of rhizosphere soil properties to changed precipitation and nitrogen addition in a salinized grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2430–2437.
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. *草地学报*, 2022, 30(9): 2430–

2437.

- [36] Bao S D. Soil analysis in agricultural chemistry. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [37] Tilman D. Resource competition and community structure. Princeton: Princeton University Press, 1982.
- [38] DeMalach N, Zaady E, Kadmon R. Contrasting effects of water and nutrient additions on grassland communities: A global meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(8): 983–992.
- [39] Suonan J, Lu X W, Li X N, *et al.* Nitrogen addition strengthens the stabilizing effect of biodiversity on productivity by increasing plant trait diversity and species asynchrony in the artificial grassland communities. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1301461.
- [40] Kozlowski T T. Water deficits and plant growth. New York: Academic Press, 1968.
- [41] Patrick L, Cable J, Potts D, *et al.* Effects of an increase in summer precipitation on leaf, soil, and ecosystem fluxes of CO₂ and H₂O in a sotol grassland in Big Bend National Park, Texas. *Oecologia*, 2007, 151(4): 704–718.
- [42] Wang X, Xu Z, Lv X, *et al.* Responses of litter decomposition and nutrient release rate to water and nitrogen addition differed among three plant species dominated in a semi-arid grassland. *Plant and Soil*, 2017, 418: 241–253.
- [43] Lawlor D W. Photosynthesis, productivity and environment. *Journal of Experimental Botany*, 1995, 46: 1449–1461.
- [44] Lea P J, Morot-Gaudry J F. Plant nitrogen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
- [45] Lemaire G, Khaity M, Onillon B, *et al.* Dynamics of accumulation and partitioning of N in leaves, stems and roots of lucerne (*Medicago sativa* L.) in a dense canopy. *Annals of Botany*, 1992, 70(5): 429–435.
- [46] Theobald J C, Mitchell R A, Parry M A, *et al.* Estimating the excess investment in ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in leaves of spring wheat grown under elevated CO₂. *Plant Physiology*, 1998, 118(3): 945–955.
- [47] Lawlor D W, Young A T. Photosynthesis by flag leaves of wheat in relation to protein, ribulose bis phosphate carboxylase activity and nitrogen supply. *Journal of Experimental Botany*, 1989, 40(1): 43–52.
- [48] Lu Y D, Feng J, Shao Z, *et al.* Responses of plant communities, species composition, and diversity to mowing and long-term grazing in the Songnen meadow steppe. *Pratacultural Science*, 2024, 41(2): 271–283.
卢彦达, 丰吉, 邵泽, 等. 松嫩草甸草原植物群落物种组成和多样性对刈割和长期放牧的响应. *草业科学*, 2024, 41(2): 271–283.
- [49] Ren Y L. Effects of precipitation change on inorganic nitrogen and net nitrogen mineralization rate at a plantation of Mongolian pine. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(6): 925–932.
任艳林. 降水变化对樟子松人工林土壤无机氮和净氮矿化速率的影响. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(6): 925–932.
- [50] Yan Z Q, Qi Y C, Peng Q, *et al.* Advances in the effects of simulated precipitation and nitrogen deposition on grassland biomass. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1165–1170.
闫钟清, 齐玉春, 彭琴, 等. 模拟降水和氮沉降增加对草地生物量影响的研究进展. *草地学报*, 2017, 25(6): 1165–1170.
- [51] Wu X D, Jiang Q, Ren X B, *et al.* Effects of precipitation on carbon, nitrogen and microbial characteristics of biological soil crusts in a desert steppe of Northern China. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2021, 30(7): 34–43.
吴旭东, 蒋齐, 任小玢, 等. 降水水平对荒漠草原生物土壤结皮碳、氮和微生物的影响. *草业学报*, 2021, 30(7): 34–43.
- [52] Yang Y, Zhang N, Jiang L L, *et al.* Effects of simulated precipitation on soil edaphic physicochemical factors and microbial community characteristics in Bird Island of Qinghai Lake on the Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(5): 1043–1052.
杨阳, 章妮, 蒋莉莉, 等. 青海湖高寒草地土壤理化性质及微生物群落特征对模拟降水的响应. *草地学报*, 2021, 29(5): 1043–1052.
- [53] Liu X C, Zhang S T. Nitrogen addition shapes soil enzyme activity patterns by changing pH rather than the composition of the plant and microbial communities in an alpine meadow soil. *Plant and Soil*, 2019, 440: 11–24.
- [54] Wei X X, Wu J Q, Li G, *et al.* Response of soil nitrogen components to nitrogen addition in wet meadow in the Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 677–683.
魏星星, 吴江琪, 李广, 等. 青藏高原湿草甸土壤氮组分对氮添加浓度的响应. *草地学报*, 2021, 29(4): 677–683.
- [55] Xiao L, Liu G B, Li P, *et al.* Direct and indirect effects of elevated CO₂ and nitrogen addition on soil microbial communities in the rhizosphere of *Bothriochloa ischaemum*. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(11): 3679–3687.
- [56] Liu H Y, He P, Cai J P, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil pH and electric conductivity in a typical grassland

- of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 85–91.
- 刘贺永, 何鹏, 蔡江平, 等. 模拟氮沉降对内蒙古典型草地土壤 pH 和电导率的影响. *土壤通报*, 2016, 47(1): 85–91.
- [57] Tong Y S, Zhang C P, Dong Q M, *et al.* Effects of different forms of nitrogen addition on soil physical and chemical properties and microbial community structure of perennial alpine cultivated grassland. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3595–3604.
- 童永尚, 张春平, 董全民, 等. 不同形态氮添加对多年生高寒栽培草地土壤理化性质和微生物群落结构的影响. *环境科学*, 2024, 45(6): 3595–3604.
- [58] Feng X J, Simpson A J, Schlesinger W H, *et al.* Altered microbial community structure and organic matter composition under elevated CO₂ and N fertilization in the duke forest. *Global Change Biology*, 2010, 16(7): 2104–2116.
- [59] Long M, Wu H H, Smith M D, *et al.* Nitrogen deposition promotes phosphorus uptake of plants in a semi-arid temperate grassland. *Plant and Soil*, 2016, 408: 475–484.
- [60] Yang L X, Chen S F, An J J, *et al.* Relationships among community diversity and soil organic matter, total nitrogen under different vegetation types in the Gully Region of Loess Region. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(2): 291–298.
- 杨丽霞, 陈少锋, 安娟娟, 等. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究. *草地学报*, 2014, 22(2): 291–298.
- [61] Chenchou H. Edaphic factors controlling the distribution of inland halophytes in an ephemeral salt lake “Sabkha ecosystem” at North African semi-arid lands. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 660–671.
- [62] Luo Y Y, Meng Q T, Zhang J H, *et al.* Species diversity and biomass in relation to soil properties of alpine meadows in the eastern Tibetan Plateau in different degradation stages. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1298–1305.
- 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1298–1305.
- [63] Cui Q, He T H, Quan X S, *et al.* Effects of soil salinity characteristics on plant community in Ordos salt marsh wetland. *Journal of Salt Lake Research*, 2022, 30(1): 25–32.
- 崔乔, 何彤慧, 全晓塞, 等. 鄂尔多斯盐沼湿地土壤盐分特征对植物群落的影响. *盐湖研究*, 2022, 30(1): 25–32.