

DOI:10.11686/cyxb2024098

<http://cyxb.magtech.com.cn>

本转林, 金慧兴, 吴晓娟, 等. 河西走廊绿洲区灌溉和施氮肥下苜蓿生殖期叶片养分特性及其与种子产量的关联. 草业学报, 2025, 34(1): 94—106.

BEN Zhuan-lin, JIN Hui-xing, WU Xiao-juan, *et al.* Leaf nutritional traits of alfalfa at the reproductive stage and their correlations with seed yield under different irrigation and nitrogen fertilization levels in the oasis area of the Hexi Corridor. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1): 94—106.

河西走廊绿洲区灌溉和施氮肥下苜蓿生殖期 叶片养分特性及其与种子产量的关联

本转林, 金慧兴, 吴晓娟, 牟乐, 张娇娇, 韩云华, 杨惠敏*

(兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:灌溉和施肥是提高苜蓿种子生产力的重要管理措施, 进一步阐明其影响种子产量形成的机制有助于水肥管理措施优化。苜蓿生殖期叶片养分特性与种子产量的关系尚不明确。研究不同灌溉[全生育期充分灌溉(W_1)、轻度亏水(W_2)和轻度亏水(W_3), 以及现蕾期和结荚期亏水(W_4)、返青期和结荚期亏水(W_5)、返青期和现蕾期亏水(W_6)]和施氮肥(10 和 40 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别以 N_1 和 N_2 表示)下, 苜蓿生殖生长期叶片养分含量、重吸收效率及其与种子产量的关系。结果表明: 1) 随灌溉量减少和生育时期推进, 生殖期绿叶 N、P 含量降低; 亏缺灌溉下绿叶养分含量不低于 W_3 甚至 W_2 ; 现蕾期和结荚期 N_2 下绿叶养分含量显著高于 N_1 。生殖期枯叶 N、P 含量随灌溉量减少和生育时期推进呈升高趋势; 亏缺灌溉下现蕾期枯叶 N 含量低于 $W_1\sim W_3$, 而结荚期和成熟期高于 W_1 甚至 W_2 ; 成熟期 N_2 下枯叶 N 含量高于 N_1 , 而结荚期 N_2 下 P 含量较高。2) 随灌溉量减少和生育时期推进, 生殖期叶片养分重吸收效率降低; 亏缺灌溉下现蕾期养分重吸收效率高于 $W_1\sim W_3$, 结荚期和成熟期不低于 W_3 ; 现蕾期 N_2 下 N 重吸收效率高于 N_1 , 其他时期相反, 而各时期 N_2 下 P 重吸收效率较高。3) W_3 下种子产量低于 W_1 和 W_2 , 特定时期亏缺灌溉下种子产量不低于 W_1 甚至 W_2 , W_6 下最高; N_2 下种子产量显著高于 N_1 。4) 种子产量与结荚期绿叶 N、P 含量、养分重吸收效率极显著正相关, 与枯叶养分含量显著负相关。因此, 灌溉和施氮肥对苜蓿生殖期叶片养分含量有显著影响, 并表现出生育时期特异性。结荚期养分重吸收能增强种子形成所需养分的供应能力。综合来看, 全生育期轻度亏水或返青期和现蕾期亏水而结荚期充分灌溉下施氮肥 40 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时可获得较高苜蓿种子产量。

关键词:河西走廊; 苜蓿; 调亏灌溉; 种子生产; 养分重吸收

Leaf nutritional traits of alfalfa at the reproductive stage and their correlations with seed yield under different irrigation and nitrogen fertilization levels in the oasis area of the Hexi Corridor

BEN Zhuan-lin, JIN Hui-xing, WU Xiao-juan, MU Le, ZHANG Jiao-jiao, HAN Yun-hua, YANG Hui-min*

College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: Irrigation and fertilization are important measures to improve alfalfa seed productivity. Understanding the mechanisms of seed yield formation will be helpful for optimizing water and fertilizer management. The relationships between leaf nutrient characteristics at the reproductive growth stage and the seed yield of alfalfa remain unclear. We investigated leaf nutrient contents and nutrient resorption efficiencies in alfalfa plants at the reproductive stage, and

收稿日期: 2024-03-26; 改回日期: 2024-06-17

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFD1300801)和国家牧草产业技术体系—青藏高原牧草栽培岗位科学家(CARS-34)资助。

作者简介: 本转林(1998—), 女, 甘肃天水人, 在读硕士。E-mail: 220220901030@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: huimyang@lzu.edu.cn

their relationships with seed yield, under different irrigation and nitrogen (N) fertilization conditions. Six irrigation treatments were set up comprising differing rates of irrigation at re-greening in spring, budding and podding growth stages. The irrigation treatments were: full irrigation (450, 150 mm at each irrigation, W_1); mild water deficit (360, 120 mm at each irrigation, W_2) and moderate water deficit (270, 90 mm at each irrigation, W_3); 300 mm irrigation allocated 150, 75 and 75 mm, respectively, at re-greening, budding and podding stages (W_4); 300 mm irrigation allocated 75, 150 and 75 mm, respectively, at re-greening, budding and podding stages (W_5); and 300 mm irrigation allocated 75, 75 and 150 mm, respectively, at re-greening, budding and podding stages (W_6). The N fertilization treatments were $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (N_1) or $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (N_2) applied at re-greening. N and P contents of green and senescent leaves were measured at budding, podding stages and at crop maturity to allow calculation of N and P resorption. It was found that: 1) With decreasing irrigation and advancing growth stages, there were decreases in the N and phosphorus (P) contents in green leaves at the reproductive growth stage. The nutrient contents of green leaves were not lower in W_4 and W_5 than in W_3 or even W_2 . The nutrient contents in green leaves at the budding and podding stages were significantly higher in N_2 than in N_1 . The N and P contents in senesced leaves at the reproductive growth stage increased as irrigation decreased and growth stages advanced. The N content of senesced leaves at the budding stage was lower in W_4 and W_5 than in W_1 – W_3 , but the N content of senesced leaves at the podding and maturity stages was higher in W_4 and W_5 than in W_1 and even W_2 . The N content of senesced leaves at the maturity stage was higher in N_2 than in N_1 , and the P content at the podding stage was higher. 2) The leaf nutrient resorption efficiency during the reproductive growth stage decreased with decreasing irrigation and advancing growth stages. Nutrient resorption efficiency at the budding stage was higher in W_4 and W_5 than in W_1 – W_3 , but that at the podding and maturity stages was similar in W_4 , W_5 , and W_3 . The N resorption efficiency at the budding stage was higher in N_2 than in N_1 , but higher in N_1 than in N_2 at the other stages. The P resorption efficiency was higher in N_2 than in N_1 during the whole reproductive growth period. 3) The seed yield was numerically highest in W_2 and numerically lowest in W_3 with other treatments intermediate. Hence W_2 separated statistically only from W_3 and W_4 , while W_3 separated statistically only from W_1 and W_2 . The seed yield under deficit irrigation was not lower than that in W_1 or even W_2 . The seed yield was higher in N_2 than in N_1 . 4) Seed yield was positively correlated with the N and P contents of green leaves and with nutrient resorption efficiencies at the podding stage, and negatively correlated with the nutrient contents of senesced leaves. Therefore, irrigation and N fertilization significantly affected the leaf nutrient contents during the reproductive growth stage of alfalfa, and their effects varied depending the growth stage. Nutrient resorption at the podding stage increased the supply of nutrients for seed formation. In conclusion, the highest alfalfa seed yield was obtained when N fertilizer was applied at $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ under slight water deficit during the whole growth period, or under deficit irrigation at the re-greening and budding stages plus full irrigation at the podding stage.

Key words: Hexi Corridor; alfalfa; regulated deficit irrigation; seed production; nutrient resorption

河西走廊绿洲是我国西北干旱区重要的粮食生产、畜牧业和牧草种子生产基地,但降水稀少、风沙频发、土地沙化严重等问题限制了该地区的农牧业发展潜力。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是多年生豆科牧草,营养丰富,饲用价值高,粗蛋白含量可达 25%,是世界上种植面积最大的牧草^[1]。近年来,随种植业结构不断优化调整,我国苜蓿种植面积不断增大,饲草产量和品质不断提升^[2],对优质苜蓿种子的需求也越来越高。2019 年全国苜蓿种子田面积为 3.4 万 hm^2 ,生产种子 1.4 万 t ^[3]。但我国苜蓿种子生产还存在诸多问题,产量和质量不能满足大面积苜蓿种植的需求,导致苜蓿种子的进口量激增。与 2008 年相比,2021 年种子进口量增长超过 100 倍。尽管进口苜蓿种子规模增长迅速,但进口苜蓿品种的生长和返青表现受种植地区气候条件限制,无法持续发挥其品种优势^[4],

因此提高自主苜蓿种子生产力迫在眉睫^[5]。优化水肥管理是提高种子产量和质量的有效途径,对不同气候和土壤条件地区(如河西走廊)的苜蓿水肥管理开展深入研究并进行种子生产技术优化将极大地提高苜蓿种子生产力,促进畜牧业发展和生态恢复。

水分对种子生产的影响是生理性的。无论是种子萌发、营养生长还是种子发育时的生殖生长,均需充足的水分供应,否则容易引起繁殖器官的败育和种子发育不良,从而影响种子产量和质量^[6]。灌溉不仅是苜蓿饲草生产的重要调控手段,也是种子生产的重要管理途径。海涛等^[7]在齐齐哈尔的研究发现,孕蕾期、结荚期和秋后各灌溉一次(每次 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$),能取得较高的苜蓿种子产量,可高达 $1290 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。孙洪仁等^[8]发现,盛花期和结荚期是加强管理获得苜蓿种子高产的最佳时期,此时灌溉可使新生枝条生长更快,避免结荚期种子形成水分胁迫。李雪峰等^[9]认为,在现蕾至初花期灌水可形成较高苜蓿种子产量,结荚期灌水可以补充种子所需水分,有利于提高种子产量和质量。调亏灌溉可通过控制不同生长阶段的水分补给^[10]来节约用水、提高水分利用效率和生产力,成为苜蓿饲草生产中重要的灌溉管理方式。与充分灌溉相比,调亏灌溉需要较少的灌溉水,但可获得更高的水分生产力。王田涛等^[11]认为,苜蓿分枝期对水分最敏感,其次为现蕾期和开花期,保证这些时期的用水能促进营养生长,提高饲草产量和品质。但是,不同降水和土壤持水力地区的苜蓿种子生产灌溉管理策略(包括灌溉量和调亏时期)还有待进一步研究。

养分重吸收(nutrient resorption)是植物将衰老组织中的部分养分重新分配到其他生长活跃组织(如绿叶)中的过程,是重要的养分保留机制,减少了植物对外源养分供给的依赖。养分重吸收增强了植物对贫瘠环境或因逆境导致的养分获取困难环境的适应能力^[12],是植物适应逆境、提高生产力的重要机制。组织通过重吸收获得养分消耗的能量可能高于根系从土壤中获得同量养分所消耗的能量,因此,在土壤肥沃的地方,衰老叶中剩余养分较多(重吸收率较低),重吸收效率(resorption efficiency)较高,而在贫瘠土壤中则养分重吸收更充分^[13]。除了遗传背景外,植物养分重吸收还受土壤养分、水分供应、温度等多种因素的影响^[14]。研究发现,土壤养分供应较高时,N重吸收效率(nitrogen reabsorption efficiency, NRE)和P重吸收效率(phosphorus reabsorption efficiency, PRE)较低^[15];土壤水分增多可导致NRE降低而对PRE无显著影响,可能与水分较多改变了土壤速效养分浓度有关^[16]。因此,土壤养分状况的改变对调节叶片养分重吸收意义重大。不同于营养生长期,植物生殖生长期的物质倾向于更多地向生殖器官(如花、果实)分配,必然形成特异的养分重吸收策略。但是,植物生殖期叶片养分重吸收特性及其与种子生产的关联尚不明确。

河西走廊是我国重要的苜蓿饲草和种子生产基地,灌溉和施肥措施有效改善了干旱、土壤沙化贫瘠等影响下的苜蓿饲草和种子生产。彭岚清^[17]在河西走廊的研究发现,灌水次数和施肥量与苜蓿种子产量有一定的互作关系,适当减少灌水次数有利于提高种子产量,施肥量对种子质量的影响因灌水次数的不同而不同,低灌水次数与低施肥量有利于提高种子发芽率并降低硬实率。陈冬冬^[18]发现,灌溉次数对紫花苜蓿种子产量具有极显著影响,各施肥量处理下均以3次灌溉时种子产量最高,灌溉次数过多引起严重倒伏,限制了种子生产。方国杰^[19]发现,不同灌溉下种子产量及质量差异显著,充分灌溉下种子产量可达 $960 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而调亏灌溉没有大幅降低种子产量及质量。但河西走廊绿洲区苜蓿种子生产的灌溉和施肥管理策略还有待优化。以紫花苜蓿为对象,研究了不同灌溉和施氮肥处理下生殖生长期叶片养分含量、重吸收规律及其与种子产量的关联,可为河西走廊绿洲区和类似条件地区苜蓿种子节水减肥高效生产提供理论依据和借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省张掖市甘州区兰州大学甘州草种创新野外试验站($100^{\circ}30'35'' \text{ E}$, $38^{\circ}45'33'' \text{ N}$, 海拔 1571 m),属温带大陆性气候。日最高温度 38.6°C ,最低温度 -28.7°C ,平均温度 7.8°C 。年均降水量为 130 mm,年均蒸发量 2100 mm,无霜期 169 d。该区典型土壤为砂质壤土,试验地土地平整后覆盖 30 cm 客土。播种前,取 0~60 cm 深度的土壤样品,测得基本养分特征见表 1。

表 1 试验样地土壤基本养分状况

Table 1 Basic soil nutrient status in test plots

土层深度 Soil depth (cm)	硝态氮 Nitrate N (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium N (mg·kg ⁻¹)	全氮 Total N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
0~10	1.196	0.532	332	1.517	0.731	116
10~20	0.510	0.522	200	0.955	0.735	71
20~30	0.542	0.430	116	0.664	0.596	86
30~60	0.723	0.507	12	0.604	0.561	94

1.2 试验设计

试验为双因素裂区试验。灌溉处理为主区,设 6 个灌溉水平:全生育期充分灌溉(100%, W_1)、轻度亏水(80%, W_2)、中度亏水(60%, W_3),以及现蕾期和结荚期灌水 50% 而返青期充分灌溉(W_4)、返青期和结荚期灌水 50% 而现蕾期充分灌溉(W_5)、返青期和现蕾期灌水 50% 而结荚期充分灌溉(W_6)。参考当地苜蓿灌溉量,在返青期、现蕾期或结荚期灌水 150 mm,定为 100%,其他灌溉水平以此为准进行控制(表 2)。施氮肥为副区,使用肥料为尿素($N \geq 46\%$),设 2 个施氮水平:10 kg·hm⁻²(N_1)和 40 kg·hm⁻²(N_2)。在返青期施入氮肥,同时施入 180 kg·hm⁻²磷肥(粒状过磷酸钙, $P_2O_5 \geq 12\%$)和 120 kg·hm⁻²钾肥(硫酸钾镁, $K_2O \geq 24\%$)。试验共 12 个处理,每个处理 3 次重复,共 36 个小区。小区大小为 3.5 m×5.0 m,横向每个相同水分处理小区间隔为 1.0 m,不同水分横向小区间隔 2.0 m,纵向每个小区间隔 2.0 m,出水口间隔 3.0 m。苜蓿品种为赛特,于 2022 年 4 月播种,播量为 6.0 kg·hm⁻²,深度 1.0 cm,行距 40.0 cm,株距 15.0 cm。播种前,基施 15 t·hm⁻²有机肥和 450 kg·hm⁻²磷酸二铵。2023 年进行灌溉和施肥处理,适时取样测定。

表 2 灌溉和施肥处理设计

Table 2 Experimental design for irrigation and fertilization treatments

处理 Treatment	灌水时间及灌溉量 Irrigation time and amount (mm)				施肥时间及施氮量 Fertilization time and N application amount (kg·hm ⁻²)
	返青期 Green-returning stage	现蕾期 Budding stage	结荚期 Podding stage	总灌水量 Total irrigation amount	返青期 Green-returning stage
W_1	150	150	150	450	10 (N_1)
W_2	120	120	120	360	
W_3	90	90	90	270	
W_4	150	75	75	300	40 (N_2)
W_5	75	150	75	300	
W_6	75	75	150	300	

1.3 取样与指标测定

1.3.1 叶片养分含量和重吸收效率 在苜蓿现蕾期(返青期灌溉)、结荚期(返青期和现蕾期灌溉)、成熟期(返青期至结荚期灌溉)采集叶片样品。选择自然衰老、颜色枯黄、无病虫害斑痕、未自然脱落但轻轻抖动整株时能掉落下来的叶片作为衰老枯叶,选择颜色深绿、完全伸展、健康无病虫害伤痕、叶腋处的三出复叶作为成熟绿叶。每小区采集足量叶片。将所采集的绿叶和枯叶在 105 ℃下杀青 10 min,65 ℃烘干 48 h;将烘干的叶片样品粉碎,过 1 mm 筛后待测。用凯氏定氮法^[14]测定叶片全氮含量,用钼锑抗比色法测定全磷含量^[16]。

叶片养分重吸收效率(leaf nutrient reabsorption efficiency, NuRE)根据以下公式^[14]计算:

$$NuRE(\%) = \frac{Nu_{gr} - Nu_{sen}}{Nu_{gr}} \times 100$$

式中: Nu_{gr} 表示成熟绿叶养分含量; Nu_{sen} 表示衰老枯叶养分含量。此外, Nu_{sen} 可表征叶片养分重吸收度, Nu_{sen} 越小, 则养分重吸收度越大。

1.3.2 种子产量 当大多数(80%左右)苜蓿种子达到完全成熟状态(果皮呈现深褐色)时, 选择晴朗无风的上午, 采用人工刈割的方式收获。每小区随机选取3条1.0 m样段, 刈割后晾晒干燥, 然后经人工脱粒、去除杂质, 再将种子晾晒至可以保存状态(种子含水量约12%~13%), 称重并计算种子产量。

1.4 数据处理和统计分析

利用Excel 2019汇总整理数据, 利用IBM SPSS Statistics 19进行数据统计分析。通过一般线性模型三因素方差分析(multivariate ANOVA)方法评估灌溉、施氮肥、生育时期及交互作用对叶片养分特性的影响, 利用双因素方差分析法分析灌溉、施氮肥及交互作用对种子产量的影响。利用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析灌溉或施氮肥对叶片养分特性、种子产量的影响差异, 利用Duncan多重比较法分析不同生育时期叶片养分特性差异。利用Pearson相关法分析叶片养分特性间的相关关系。利用线性模型 $y = ax + b$ 分析种子产量与生殖期叶片养分特性的相关关系, 并进行二元回归分析。利用Origin 2022进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 生殖期叶片全氮含量

除施氮肥(N)和生育时期(T)互作对苜蓿枯叶全氮含量(N_{sen})无显著影响外, W、N、T及其交互作用显著影响($P < 0.01$)绿叶全氮含量(N_{gr})和 N_{sen} (表3)。

表3 灌溉、施氮肥和生育时期对苜蓿叶片养分特性和种子产量的影响

Table 3 Effects of irrigation, N application and growth stage on leaf nutrient characteristics and seed yield of alfalfa

因素 Factor	效应 Effect	N_{gr}	P_{gr}	N_{sen}	P_{sen}	NRE	PRE	种子产量 Seed yield
灌溉	<i>F</i>	107.53	18.53	19.52	23.06	26.14	15.35	10.20
Irrigation (W)	<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
施氮肥	<i>F</i>	7.08	4.73	30.73	9.56	23.75	18.77	42.59
N application (N)	<i>P</i>	0.009	0.032	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001
生育时期	<i>F</i>	2377.20	562.93	1181.30	1989.60	1134.70	1179.90	—
Growth stage (T)	<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	—
W×N	<i>F</i>	7.49	4.10	18.23	6.71	19.50	15.22	4.06
	<i>P</i>	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.008
W×T	<i>F</i>	27.76	13.09	20.61	22.96	17.75	38.23	—
	<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	—
N×T	<i>F</i>	51.51	1.91	2.42	1.99	6.62	4.11	—
	<i>P</i>	<0.001	0.133	0.096	0.140	0.002	0.020	—
W×N×T	<i>F</i>	13.12	4.06	9.01	3.84	8.17	7.09	—
	<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	—

N_{gr} : 绿叶全氮含量 Green leaves total N content; P_{gr} : 绿叶全磷含量 Green leaves total P content; N_{sen} : 枯叶全氮含量 Senesced leaves total N content; P_{sen} : 枯叶全磷含量 Senesced leaves total P content; NRE: 氮重吸收效率 Nitrogen resorption efficiency; PRE: 磷重吸收效率 Phosphorus resorption efficiency. —: 无数据 No data. 下同 The same below.

随灌溉量减小, N_{gr} 降低; 除成熟期 W_6 , 特定时期亏缺灌溉下 N_{gr} 低于 W_2 , 但差异不显著; 亏缺灌溉下, 现蕾期和结荚期 W_4 下 N_{gr} 较高, 而成熟期 W_6 下较高。随生育时期推进, N_{gr} 呈降低趋势, 现蕾期 $W_1 \sim W_5$ 下 N_{gr} 显著高于结荚期和成熟期, W_6 下显著高于结荚期, 但与成熟期无显著差异。现蕾期和结荚期 N_2 下 N_{gr} 显著高于 N_1 , 而成熟期

则相反。现蕾期 N_1 、 N_2 下 N_{gr} 显著高于其他两个时期；随生育时期推进， N_1 下 N_{gr} 先降低后升高，而 N_2 下则呈降低趋势（图1）。

随灌溉量减少，结荚期 N_{sen} 升高，现蕾期和成熟期无显著变化；特定时期亏缺灌溉下现蕾期 N_{sen} 显著低于 $W_1 \sim W_3$ ，成熟期则无显著差异；亏缺灌溉下，现蕾期 W_5 、结荚期 W_6 和成熟期 W_4 的 N_{sen} 最高。随生育时期推进， N_{sen} 呈升高趋势，但 W_1 、 W_2 下结荚期最低，成熟期显著高于其他两个时期。现蕾期和结荚期不同施氮量间 N_{sen} 无显著差异，成熟期 N_1 下显著高于 N_2 。随生育时期推进， N_{sen} 呈升高趋势，成熟期 N_1 、 N_2 下显著高于现蕾期和结荚期（图1）。

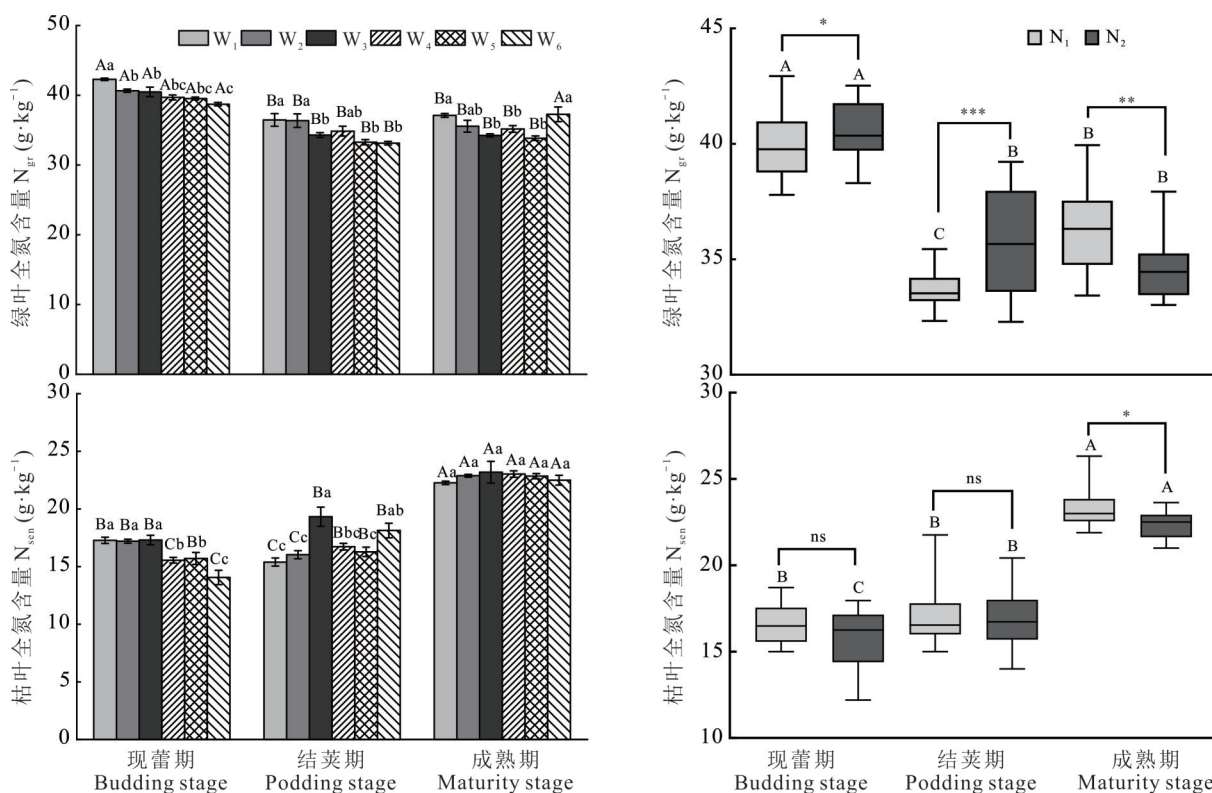


图1 灌溉和施氮肥处理下不同生育时期苜蓿叶片全氮含量

Fig. 1 Total N content in alfalfa leaves at different growth stages under irrigation and N application

不同大写字母表示同一灌溉或施氮肥处理下不同生育时期间差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示同一生育时期不同灌溉处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different capital letters indicate significant differences among different growth stages under the same irrigation or N application ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different irrigation treatments at the same growth stage ($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$. ns: 无显著差异 No significant difference. N_{gr} : Total nitrogen content of green leaves; N_{sen} : Total nitrogen content of senesced leaves. 下同 The same below.

2.2 生殖期叶片全磷含量

除施氮肥(N)和生育时期(T)互作对苜蓿绿叶和枯叶全磷含量(P_{gr} 和 P_{sen})无显著影响外，W、N、T及其交互作用均对其影响显著($P < 0.05$ ，表3)。

随灌溉量减少， P_{gr} 呈降低趋势；特定时期亏缺灌溉下现蕾期和结荚期 P_{gr} 低于 W_3 ，成熟期高于 W_3 ；亏缺灌溉下，现蕾期和结荚期 W_4 下 P_{gr} 最高而 W_6 最低，而成熟期则相反。 W_1 、 W_3 和 W_4 在不同生育时期间 P_{gr} 无显著差异，结荚期 W_2 下显著高于现蕾期，结荚期 W_5 下显著低于其他两个时期，成熟期 W_6 下显著高于其他两个时期。现蕾期和成熟期不同施肥量间 P_{gr} 无显著差异，结荚期 N_2 下显著高于 N_1 。 N_2 下不同生育时期间 P_{gr} 无显著差异，而 N_1 下成熟期显著高于结荚期（图2）。

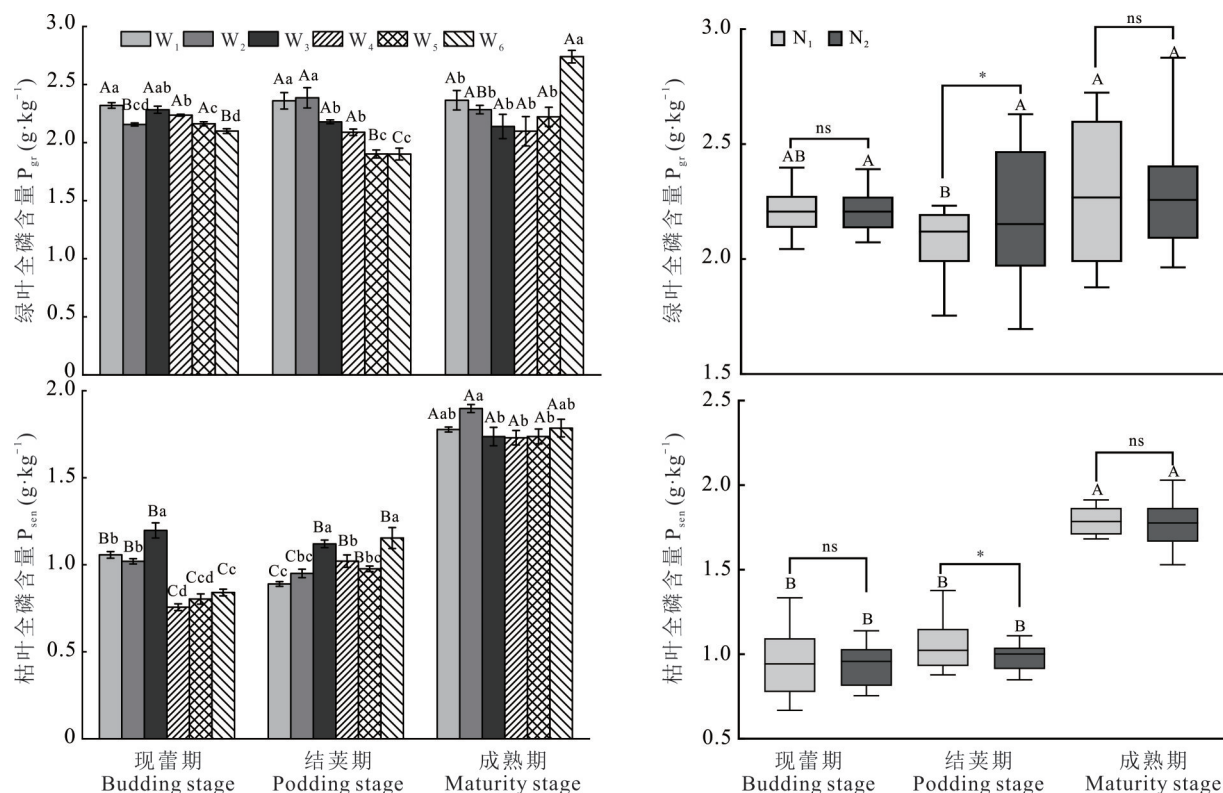


图2 灌溉和施氮肥处理下不同生育时期苜蓿叶片全磷含量

Fig. 2 Total P content in alfalfa leaves at different growth stages under irrigation and N application

P_{gr} : Total phosphorus content of green leaves; P_{sen} : Total phosphorus content of senesced leaves. 下同 The same below.

现蕾期和结荚期 W_3 下 P_{sen} 最高而成熟期最低; 特定时期亏缺灌溉下现蕾期 P_{sen} 显著低于 $W_1 \sim W_3$, 结荚期则高于 W_2 , 成熟期不高于 W_3 ; 亏缺灌溉下, 各生育时期 W_6 下 P_{sen} 均最高。随生育时期推进, P_{sen} 呈升高趋势, W_3 下现蕾期与结荚期间无显著差异, 其余灌溉处理下不同生育时期均有显著差异。现蕾期和成熟期不同施肥量间 P_{sen} 无显著差异, 结荚期 N_1 下显著高于 N_2 。随生育时期推进, P_{sen} 呈升高趋势, 成熟期显著高于现蕾期和结荚期(图2)。

2.3 生殖期叶片氮、磷重吸收效率

灌溉、施氮肥、生育时期及其交互作用均显著影响苜蓿叶片氮和磷重吸收效率(NRE 和 PRE) ($P < 0.05$, 表3)。

随灌溉量减少, NRE 降低; 特定时期亏缺灌溉下 NRE 高于 W_3 ; 现蕾期和成熟期 W_6 下 NRE 最高, 结荚期 W_4 最高; 随生育时期推进, NRE 降低。成熟期不同施肥量间 NRE 无显著差异, 现蕾期 N_2 下显著高于 N_1 , 结荚期则相反; 随生育时期推进, 不同氮处理下 NRE 均降低(图3)。

随灌溉量减少, PRE 下降; 特定时期亏缺灌溉下现蕾期 PRE 显著高于 $W_1 \sim W_3$, 成熟期不高于 W_2 和 W_3 ; 亏缺灌溉下, 现蕾期和结荚期 W_4 下 PRE 最高而 W_6 最低, 成熟期则相反。随生育时期推进, PRE 呈降低趋势, 但 $W_1 \sim W_3$ 下结荚期最高, $W_4 \sim W_6$ 下现蕾期最高。现蕾期和成熟期不同施肥量间 PRE 无显著差异, 结荚期 N_2 下极显著高于 N_1 。随生育时期推进, 不同氮处理下 PRE 均降低(图3)。

2.4 生殖期叶片氮、磷含量和重吸收效率间的相关关系

苜蓿生殖期绿叶和枯叶氮(N_{gr} 和 N_{sen})、磷含量(P_{gr} 和 P_{sen})、重吸收效率(NRE 和 PRE)间存在显著的相关性(表4)。 N_{gr} 与 P_{gr} 、NRE、PRE 极显著正相关($P < 0.01$), 与 N_{sen} 和 P_{sen} 极显著负相关($P < 0.01$)。 P_{gr} 与 P_{sen} 极显著正相关($P < 0.01$), 与其他叶片养分特性间相关性不显著。 N_{sen} 与 P_{sen} 极显著正相关($P < 0.01$), 与 NRE、PRE 极显著负相关($P < 0.01$)。 P_{sen} 与 N_{sen} 极显著正相关($P < 0.01$), 与 NRE、PRE 极显著负相关($P < 0.01$)。 NRE 与 PRE 极显著正相关($P < 0.01$)。

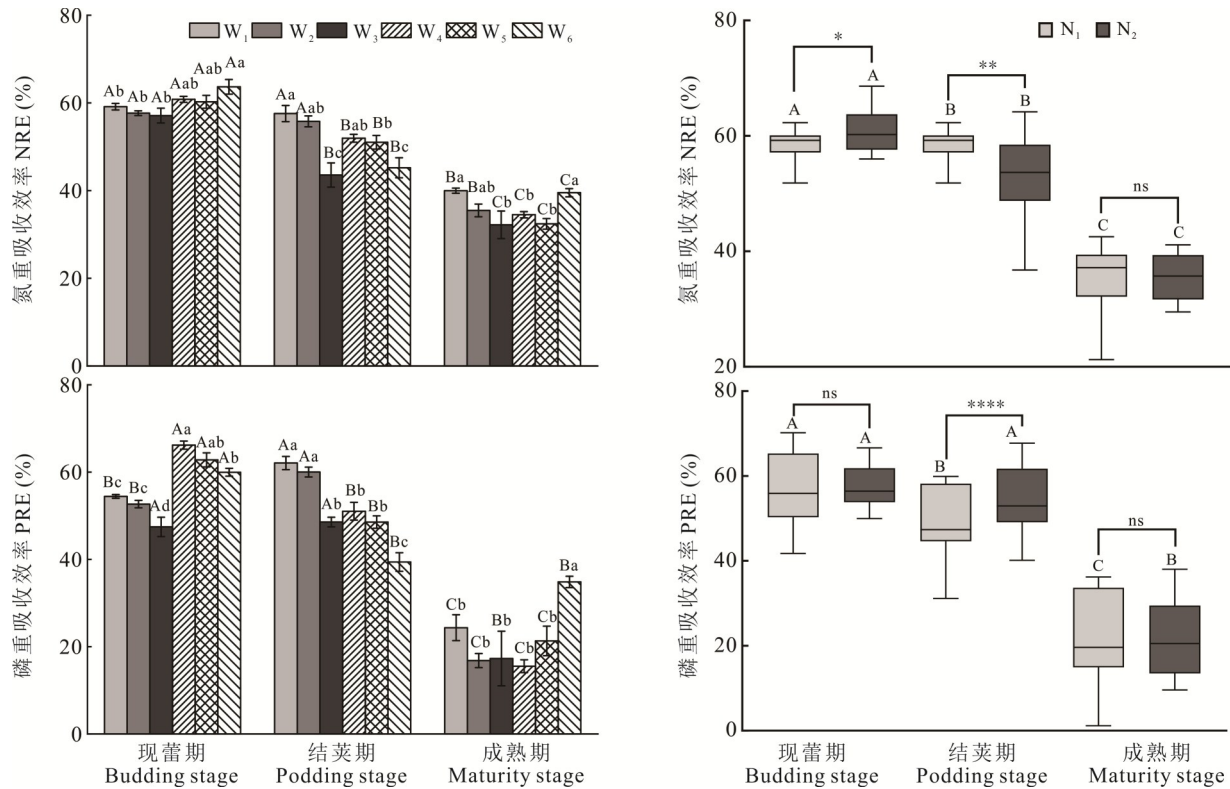


图3 灌溉和施氮肥处理下不同生育时期叶片氮磷重吸收效率

Fig. 3 Leaf N and P resorption efficiency at different growth stages under irrigation and N application

NRE: Nitrogen resorption efficiency; PRE: Phosphorus resorption efficiency. ****, $P<0.0001$.

2.5 种子产量

灌溉和施氮肥及其交互作用显著影响苜蓿种子产量($P<0.05$,表3)。W₃下种子产量显著低于W₁和W₂,W₂最高,为441.6 kg·hm⁻²。特定时期亏缺灌溉下种子产量不低于W₁并呈高于W₃的趋势,W₆下最高,为359.6 kg·hm⁻²。N₂下种子产量为400.7 kg·hm⁻²,显著高于N₁(图4)。

2.6 种子产量与生殖期叶片养分特性的相关关系

种子产量只与结荚期叶片养分特性显著相关($P<0.05$),与其余时期叶片养分特性相关性不显著(表5)。结荚期N_{gr}、P_{gr}、氮重吸收效率(NRE)和磷重吸收效率(PRE)与种子产量极显著正相关($P<0.01$),P_{sen}与种子产量显著负相关($P<0.05$),N_{sen}可能与种子产量显著负相关($P=0.051$)。种子产量与结荚期叶片养分特性间存在二次项关系(图5)。随结荚期N_{gr}、NRE增大,种子产量呈上升趋势;随结荚期P_{gr}和PRE增大,种子产量先降低后升高,当P_{gr}为2.17 g·kg⁻¹、PRE为47.3%时种子产量最低;随结荚期N_{sen}和P_{sen}增大,种子产量降低。

3 讨论

3.1 灌溉和施氮肥对生殖期苜蓿养分含量的影响

在本研究中,全生育期充分灌溉(W₁)下N_{gr}最高,P_{gr}也有相似的变化趋势(除结荚期外)。主要原因可能是土壤水分供应的增加加快了养分的释放和移动,促进了苜蓿对N、P的吸收^[20]。特定时期亏缺灌溉对N_{gr}、P_{gr}有显著影响,但不同生育时期变化不一致,现蕾期和结荚期时W₄(50%灌溉+返青期充分灌溉)下较高,而成熟期时W₆

表4 苜蓿生殖期叶片氮、磷含量和重吸收效率间的相关性

Table 4 Correlations between N, P contents in alfalfa leaves and resorption efficiency during the reproductive growth

指标 Index	N _{gr}	P _{gr}	N _{sen}	P _{sen}	NRE
P _{gr}	0.351**				
N _{sen}	-0.366**	0.141			
P _{sen}	-0.346**	0.243**	0.918**		
NRE	0.650**	0.026	-0.943**	-0.866**	
PRE	0.476**	0.074	-0.900**	-0.938**	0.905**

**： $P<0.01$.

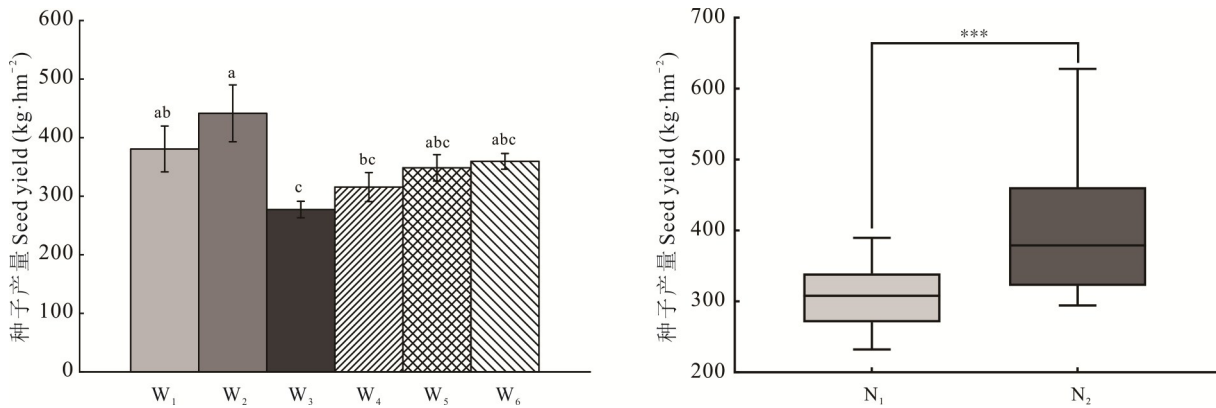


图4 灌溉和施氮肥处理下苜蓿种子产量

Fig. 4 Alfalfa seed yield under irrigation and N application

不同小写字母表示不同灌溉处理间差异显著($P<0.05$)。***表示不同施氮肥处理间在 $P<0.001$ 水平差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among different irrigation treatments ($P<0.05$). *** indicates a significant difference at $P<0.001$ between different N application treatments.

表5 苜蓿种子产量与生殖期叶片养分含量、重吸收效率的相关性

Table 5 Correlations between alfalfa seed yield and leaf nutrient content , resorption efficiency during the reproductive growth

叶片养分特性 Leaf nutrient characteristics	生育时期 Growth stage	种子产量 Seed yield	
		相关系数 Correlation coefficient	P
N_{gr}	现蕾期 Budding stage	0.210	0.219
	结荚期 Podding stage	0.629	<0.001
	成熟期 Maturity stage	−0.050	0.773
P_{gr}	现蕾期 Budding stage	−0.208	0.224
	结荚期 Podding stage	0.513	0.001
	成熟期 Maturity stage	0.070	0.685
N_{sen}	现蕾期 Budding stage	0.094	0.587
	结荚期 Podding stage	−0.327	0.051
	成熟期 Maturity stage	−0.204	0.232
P_{sen}	现蕾期 Budding stage	−0.079	0.647
	结荚期 Podding stage	−0.353	0.035
	成熟期 Maturity stage	0.213	0.213
NRE	现蕾期 Budding stage	−0.004	0.982
	结荚期 Podding stage	0.490	0.002
	成熟期 Maturity stage	0.092	0.593
PRE	现蕾期 Budding stage	0.027	0.874
	结荚期 Podding stage	0.468	0.004
	成熟期 Maturity stage	0.055	0.749

(50%灌溉+结荚期充分灌溉)下最高。W₄下现蕾期和W₆下成熟期的前一次灌溉都是充分灌溉,因此,绿叶养分含量变化可能也与水分供应充足促进养分吸收有关。此外,亏缺灌溉下 N_{gr} 和 P_{gr} 并不低于全生育期中度亏水(W₃)甚至轻度亏水灌溉(W₂),尤其成熟期时甚至高于W₃。说明适度的亏缺灌溉对养分吸收无显著影响但耗水更少。

从现蕾期开始,苜蓿由营养生长转为生殖生长,生殖器官逐渐形成并发育成熟,将更多的养分转移到生殖器官,则营养器官养分含量降低^[21]。在本研究中, N_{gr} 随苜蓿生长而逐渐降低,与刘文兰^[22]的研究结果一致。此外,试验区土壤相对贫瘠、不能满足苜蓿持续生长对更多养分的需求,可能也导致了 N_{gr} 降低。但是 P_{gr} 没有显著的变

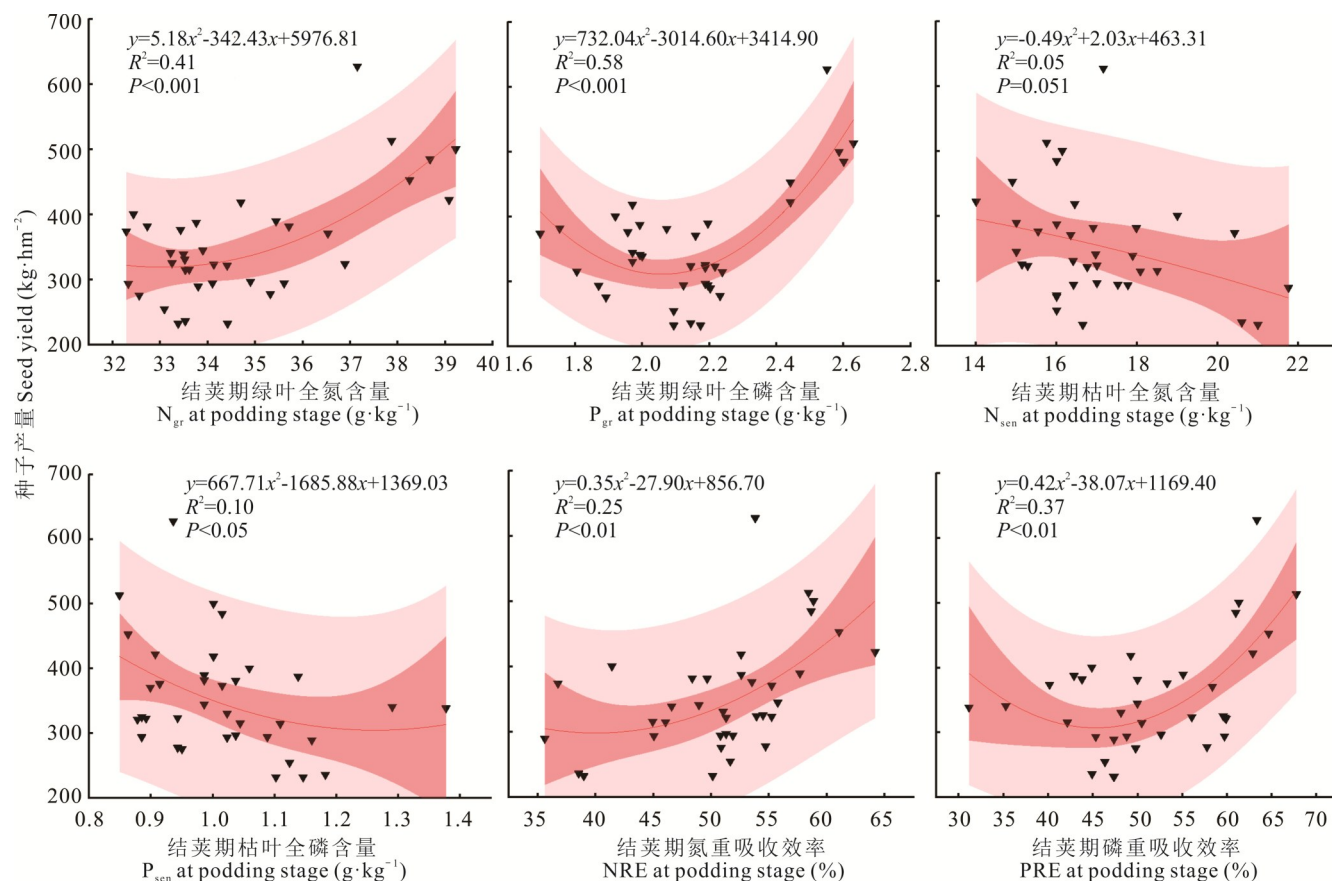


图5 苜蓿种子产量与结荚期叶片养分特性的相关关系

Fig. 5 Correlation relationship between alfalfa seed yield and leaf nutrient characteristics at the podding stage

化,可能与土壤P的释放和移动相对困难的特性有关^[23]。

生物固氮和土壤N是豆科作物的主要氮源,而肥料氮可补充土壤N库^[24]。在本研究中,现蕾期和结荚期N₂下N_{gr}高于N₁,成熟期则相反。生殖生长早期(如现蕾期),叶片营养生长仍强烈受到氮肥的显著影响;生殖生长后期(如成熟期),更多N向生殖器官分配,且高氮肥下分配到营养体的N在“稀释效应”下,N_{gr}反而更小。相对于养分重吸收而言,土壤速效养分更容易满足活跃组织生长的需求,缓解养分亏缺^[25-26]。施氮肥能一定程度提高P_{gr},可能通过酸化土壤促进结合态P的释放,提高土壤P供应^[23]。本研究中,在结荚期N₂下P_{gr}高于N₁,而其他时期无差异。现蕾期时,苜蓿营养生长仍活跃,高氮肥导致“稀释效应”强烈;生殖生长后期,养分倾向于向生殖器官分配。二者最终导致这两个时期高低氮肥下P_{gr}差异不明显。

3.2 灌溉和施氮肥对生殖期苜蓿叶片养分重吸收的影响

土壤水分供应可影响土壤N、P供应或相对限制性的变化^[27],调节植物养分重吸收^[28-29]。在本研究中,NRE和PRE随灌溉量增加而升高,一方面可能是现蕾期后苜蓿生物固氮能力下降,生殖生长期苜蓿对养分较高需求得不到充分满足,另一方面较高水分供应增强了“稀释效应”,因此,更多养分从衰老组织(包括衰老叶)向活跃组织(如绿叶)转移^[30]。N_{sen}和P_{sen}随灌溉量减少而呈升高趋势,说明低水分供应下通过重吸收机制进行的养分转移更加不充分,也反向证实了这个结果。此外,较高供水时,P重吸收成本降低^[31],可能也导致了PRE升高。特定时期亏缺灌溉对叶片养分重吸收有显著影响,在不同时期NRE、PRE变化不一致。如成熟期W₆下NRE较高,现蕾期W₄下PRE较高。可能与该时期前一次灌溉为充分灌溉、“稀释效应”强且养分向生殖器官倾斜分配有关。在本研究中,叶片NRE和PRE与N_{gr}呈显著正相关,与N_{sen}和P_{sen}呈显著负相关,但与P_{gr}无关,说明N、P在植物体内存在协同作用,然而P_{gr}在P重吸收中的角色不确定,可能与植物生殖器官生长对P的偏好有关^[21]。随苜蓿生长,N_{sen}和P_{sen}升高,尤其成熟期显著高于其他时期,与NRE、PRE变化正相反,二者也显著负相关。说明生殖生长后

期衰老叶N、P转出更不完全,可能与生殖生长后期苜蓿叶片生理功能的减弱有关。

一般地,植物重吸收消耗的能量高于根系从土壤中直接获得相同量养分需要的能量^[32]。因此,土壤养分供应充足时,枯叶中剩余养分较多,养分重吸收效率较低。在本研究中,现蕾期N₂下苜蓿叶片NRE高于N₁而结荚期相反。土壤N供应增大导致“稀释效应”增强,改变了源—库关系,需更多N向绿叶或活跃组织转移^[33],从而提高了现蕾期NRE。结荚期N₂下PRE较高可能也是类似原因。施氮肥不仅增大N库,还能协同增大P库,需更多衰老组织P向绿叶转移,从而促进叶片P重吸收,导致P_{sen}较低而PRE较高^[30]。

3.3 灌溉量和调亏灌溉对苜蓿种子产量的影响

灌溉是苜蓿种子生产中的重要管理手段,通过调节土壤水分供应来影响生殖生长从而获得高额优质的种子生产。水分供应过多可能会导致苜蓿徒长、倒伏,供应不足则可能会引起分枝不足、生殖器官败育和种子发育不良等,从而导致种子产量降低^[34]。在本研究中,供水相对充足(W₁和W₂)下苜蓿种子产量显著高于W₃下,但W₂下种子产量呈高于W₁的趋势,说明轻度亏缺灌溉更好地满足了苜蓿正常生长所需,既避免徒长和倒伏,又保证能形成足够的分枝和小花数,同时避免了较严重水分胁迫导致的生殖器官败育,最终形成了较高的种子产量^[35]。此外,特定时期亏缺灌溉下种子产量低于W₁,但差异不显著,且W₆(返青期和现蕾期50%灌溉+结荚期充分灌溉)下种子产量较高,说明一定时期进行亏缺灌溉与充分灌溉交替模式也可兼顾营养生长和生殖生长,且早期适度缺水比后期缺水更有利于种子产量形成。轻度水分胁迫主要可引起植物体内营养物质分配模式的改变,促进同化物从营养器官向生殖器官分配^[36],从而提高种子产量。

3.4 苜蓿种子产量与生殖期叶片养分特性的相关性

植物不同生长阶段对养分的需求有差异,对养分的敏感程度和吸收能力也不同,对应的养分特性和功能也表现出生长阶段特异性^[37]。一般地,较高的叶片养分(如N、P)含量表明生长所需养分充足,生物量积累充分,因而生物产量和种子产量较高。在本研究中,结荚期N_{gr}、P_{gr}与种子产量极显著正相关,证实了这一点。但N_{gr}、P_{gr}在中间水平时,种子产量却处于最低水平。在养分不足时,较大比例养分倾向于分配到生殖器官以完成生活史;而在养分相对充足(中间水平)且均衡供应时,营养体生长所需养分得到更大程度保证,种子产量形成反而受到限制^[38]。养分重吸收从另一个途径为活跃组织(如绿叶、生殖器官)的生理活动提供了养分支持,因此,较大养分重吸收效率和重吸收度(如较低枯叶养分含量)可能是形成更高种子产量的结果之一^[39]。在本研究中,种子产量与结荚期N_{sen}、P_{sen}显著负相关而与NRE、PRE极显著正相关,说明苜蓿叶片养分重吸收为种子的形成提供了强有力支持。此外,种子产量与叶片养分特性的相关性仅在结荚期显著,可能与不同生长阶段的生长重心差异有关。现蕾期至结荚期前主要仍以营养生长为重心,大部分碳水化合物等用于根系、叶片和分枝等营养生长,同时进行生殖器官建成;而结荚期后主要进行生殖生长,物质和能量更多地向果荚、籽粒转移^[40]。

4 结论

在不同灌溉量灌溉和调亏灌溉以及施氮肥处理下,苜蓿种子产量与结荚期绿叶养分含量、养分重吸收效率正相关,与枯叶养分含量负相关。结荚期养分供应是种子产量形成的关键之一,而生殖期养分重吸收能增强种子形成所需养分的供应能力。不同灌溉和施肥措施通过调节养分吸收(部分体现为绿叶和枯叶养分含量)来影响种子的生长发育和最终产量。在河西走廊绿洲区和类似条件地区,全生育期轻度亏水或返青期和现蕾期亏灌而结荚期充分灌溉下施氮肥40 kg·hm⁻²时可获得较高苜蓿种子产量。

参考文献 References:

- [1] Avci M A, Özköse A, Ahmet T. Determination of yield and quality characteristics of alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties grown in different locations. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 2013, 12(4): 487—490.
 - [2] Sun Z H, Zhao J J, Xu H T, *et al.* Analysis of the situation of China's alfalfa industry in 2019. *Dairy Cows of China*, 2019, 10: 58—60.
- 孙志华, 赵俊金, 许海涛, 等. 2019年我国苜蓿产业形势分析. *中国奶牛*, 2019, 10: 58—60.

- [3] National Animal Husbandry Station. China grassland industry statistics 2019. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
全国畜牧总站. 中国草业统计 2019. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [4] Mao P S, Sun M, Sun S J. Research on theory and technology of alfalfa seed production in Northern China. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2023(11): 26–30.
毛培胜, 孙铭, 孙守江. 我国北方地区苜蓿种子生产的理论与技术研究进展. 黑龙江畜牧兽医, 2023(11): 26–30.
- [5] Lu X S, He Q. Genetic diversity for chinese alfalfa cultivars and landraces. Grassland of China, 1997(6): 2–7.
卢欣石, 何琪. 中国苜蓿品种资源遗传多样性研究. 中国草地, 1997(6): 2–7.
- [6] Li Q F, Wang F. Meteorological analysis for seed production in Northern China. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001, 15(5): 93–96.
李青丰, 王芳. 北方牧草种子生产的气候条件分析. 干旱区资源与环境, 2001, 15(5): 93–96.
- [7] Hai T, Wang Z F, Wang J H, *et al.* The effects of irrigation on the yield and quality of alfalfa seed. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2003, 7: 47–48.
海涛, 王增法, 王军华, 等. 灌溉对紫花苜蓿种子产量和质量的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2003, 7: 47–48.
- [8] Sun H R, Liu G R, Zhang Y J, *et al.* Water requirement, water consumption, water requirement rate, water consumption rate and water use efficiency of alfalfa. Pratacultural Science, 2005, 22(12): 24–29.
孙洪仁, 刘国荣, 张英俊, 等. 紫花苜蓿的需水量、耗水量、需水强度、耗水强度和水分利用效率研究. 草业科学, 2005, 22(12): 24–29.
- [9] Li X F, Wang H, Li W J, *et al.* Study on soil water dynamic characteristic of irrigation alfalfa seed. Xinjiang Agricultural Sciences, 2006, 43(6): 520–523.
李雪锋, 王辉, 李卫军, 等. 灌溉产种苜蓿地土壤水分动态特征的研究. 新疆农业科学, 2006, 43(6): 520–523.
- [10] Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agricultural Water Management, 2009, 96(9): 1275–1284.
- [11] Wang T T, Shi S L, Zhang E H, *et al.* Effects of irrigation and nitrogen fertilization on hay yield and water use efficiency of *Medicago sativa*. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(7): 1301–1306.
王田涛, 师尚礼, 张恩和, 等. 灌溉与施氮对紫花苜蓿干草产量及水分利用效率的影响. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1301–1306.
- [12] Lü X T, Freschet G T, Flynn D F, *et al.* Plasticity in leaf and stem nutrient resorption proficiency potentially reinforces plant-soil feedbacks and microscale heterogeneity in a semi-arid grassland. Journal of Ecology, 2012, 100(1): 144–150.
- [13] Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: Are there general patterns? Journal of Ecology, 1996, 84(4): 597–608.
- [14] Huang J Y, Zhu X G, Yuan Z Y, *et al.* Changes in nitrogen resorption traits of six temperate grassland species along a multi-level N addition gradient. Plant and Soil, 2008, 306: 149–158.
- [15] Lü X T, Han X G. Nutrient resorption responses to water and nitrogen amendment in semi-arid grassland of Inner Mongolia, China. Plant and Soil, 2010, 327: 481–491.
- [16] An Z, Niu D C, Wen H Y, *et al.* Effects of N addition on nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometric characteristics in *Stipa bungeana* of steppe grasslands in the Loess Plateau, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(8): 801–807.
安卓, 牛得草, 文海燕, 等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及C:N:P化学计量特征的影响. 植物生态学报, 2011, 35(8): 801–807.
- [17] Peng L Q. Effect of irrigation times and fertilization rates on the yield and quality of alfalfa seed in yellow river irrigated region of Gansu China. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
彭岚清. 灌水次数与施肥量对甘肃引黄灌区紫花苜蓿种子产量及质量的影响. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [18] Chen D D. Effects of irrigation frequency and application of phosphate diamine on alfalfa seed production in the Yellow River irrigated region. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
陈冬冬. 灌溉次数和磷酸二铵施量对甘肃引黄灌区紫花苜蓿种子生产的影响. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [19] Fang G J. Effects of different irrigation treatments on alfalfa (*Medicago sativa* L.) seed yield and quality in arid area of Northwest China. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
方国杰. 西北旱区不同灌溉处理对紫花苜蓿种子产量及品质的影响. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [20] Lu J Y, Duan B H, Yang M, *et al.* Research progress in nitrogen and phosphorus resorption from senesced leaves and the influence of ontogenetic and environmental factors. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(4): 178–188.

- 陆姣云, 段兵红, 杨梅, 等. 植物叶片氮磷养分重吸收规律及其调控机制研究进展. 草业学报, 2018, 27(4): 178—188.
- [21] Himelblau E, Amasino R M. Nutrients mobilized from leaves of *Arabidopsis thaliana* during leaf senescence. Journal of Plant Physiology, 2001, 158(10): 1317—1323.
- [22] Liu W L. Responses of botanical features and stoichiometric traits of alfalfa leaf to plant density and phosphorus supply. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- 刘文兰. 紫花苜蓿叶片植物学特征及化学计量特征对植株密度和磷素供给的响应. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [23] Yang M, Yang H M. Utilization of soil residual phosphorus and internal reuse of phosphorus by crops. PeerJ, 2021, 9: e11704.
- [24] Gong Z P, Ma C M, Jin X J, *et al.* Estimating effect of planting soybean on profit and loss of soil nitrogen. Journal of Nuclear Agriculture Sciences, 2010, 24(1): 125—129.
- 龚振平, 马春梅, 金喜军, 等. 种植大豆对土壤氮素盈亏影响的估算. 核农学报, 2010, 24(1): 125—129.
- [25] Wright I J, Westoby M. Nutrient concentration, resorption and lifespan: leaf traits of Australian sclerophyll species. Functional Ecology, 2003, 17(1): 10—19.
- [26] Wang X L, Wang J. Key techniques of field management for alfalfa seed production. Inner Mongolia Prataculture, 2004, 16(1): 59.
- 王晓力, 王静. 紫花苜蓿种子生产田间管理关键技术. 内蒙古草业, 2004, 16(1): 59.
- [27] Yang M F. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across plant species in the arid to semi-humid regions, North China. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- 杨明飞. 我国北方干旱至半湿润区分布的植物叶碳氮磷化学计量特征研究. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [28] Reed S C, Townsend A R, Davidson E A, *et al.* Stoichiometric patterns in foliar nutrient resorption across multiple scales. New Phytologist, 2012, 196(1): 173—180.
- [29] Killingbeck K T. Inefficient nitrogen resorption in genets of the actinorhizal nitrogen fixing shrub *Comptonia peregrina*: Physiological ineptitude or evolutionary tradeoff? Oecologia, 1993, 94(4): 542—549.
- [30] Lu J Y, Yang M, Liu M G, *et al.* Leaf stoichiometry and resorption of N and P in lucerne at different growth stages under different water supplies. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(5): 501—511.
- [31] Renteria L Y, Jaramillo V J. Rainfall drives leaf traits and leaf nutrient resorption in a tropical dry forest in Mexico. Oecologia, 2011, 165(1): 201—211.
- [32] Fu W H. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and nutrient reabsorption characteristics of different functional groups plants in typical grassland on the Loess Plateau. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- 傅文慧. 黄土高原典型草原不同功能群植物叶片碳氮磷化学计量及养分重吸收特征. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [33] Rejmánková E. Nutrient resorption in wetland macrophytes: Comparison across several regions of different nutrient status. New Phytologist, 2005, 167(2): 471—482.
- [34] Bradford K. Water stress and the water relations of seed development: A critical review. Crop Science, 1994, 34(1): 1—11.
- [35] Askarlan M, Hampton J G, Hill M J. Effect of row spacing and sowing rate on seed production of lucerne (*Medicago sativa* L.) cv. Grasslands Oranga. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1995, 38(3): 289—295.
- [36] Sheaffer C C, Martin N P, Lamb J F, *et al.* Leaf and stem properties of alfalfa entries. Agronomy Journal, 2000, 92(4): 733—739.
- [37] Pugnaire F I, Chapin F S. Controls over nutrient resorption from leaves of evergreen Mediterranean species. Ecology, 1993, 74(1): 124—129.
- [38] Douglas D A. The balance between vegetative and sexual reproduction of *Mimulus primuloides* (Scrophulariaceae) at different altitude in California. Journal of Ecology, 1981, 69: 295—310.
- [39] Tully K L, Wood T E, Schwantes A M, *et al.* Soil nutrient availability and reproductive effort drive patterns in nutrient resorption in *Pentaclethra macroloba*. Ecology, 2013, 94(4): 930—940.
- [40] Shi Y Y, Zhang F J, Xu X, *et al.* Effects of temperature increase on nitrogen, phosphorus and potassium nutrient uptake and yield of soybean in the Ningxia Yellow River irrigation area. Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(11): 32—37, 45.
- 史云云, 张峰举, 许兴, 等. 增温对宁夏引黄灌区大豆氮磷钾养分吸收利用和产量的影响. 安徽农业科学, 2021, 49(11): 32—37, 45.