

# 水氮调控对苜蓿与无芒雀麦混播草地 生长和辐射利用的影响

汪爱霞, 齐广平, 银敏华, 康燕霞, 马彦麟, 汪精海, 贾琼, 唐仲霞, 姜渊博

(甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**针对我国内陆干旱区人工草地生产管理粗放及气候资源利用不充分等问题,探究合理的牧草种植与水氮供应模式,以充分挖掘区域牧草的生产潜力。采用3年生(2018年播种)紫花苜蓿(简称‘苜蓿’)和无芒雀麦,分析种植模式(苜蓿与无芒雀麦混播,D1;无芒雀麦单播,D2)、施氮量(低氮量N1:60 kg·hm<sup>-2</sup>;高氮量N2:120 kg·hm<sup>-2</sup>)和灌水量(以灌水下限占田间持水量 $\theta_f$ 的百分比计,分枝期均充分灌水(75%~85% $\theta_f$ ),现蕾和初花期轻度亏水W1:65%~75% $\theta_f$ 、中度亏水W2:55%~65% $\theta_f$ 、重度亏水W3:45%~55% $\theta_f$ ,灌水上限均为85% $\theta_f$ )对牧草叶面积指数(LAI)、干物质累积量、累积截获光合有效辐射量(CIPAR)、辐射利用效率(RUE)、产量(Y)、耗水量( $ET_a$ )、水分利用效率(WUE)和氮肥偏生产力( $PPF_N$ )的影响。结果表明:(1)牧草LAI和干物质累积量均随灌水量和施氮量的增加呈增大趋势,随生育时期的推进,LAI先快速增大后缓慢增大或减小,干物质累积量先快速增大后缓慢增大。(2)灌水和施氮均能促进牧草CIPAR增加,W1N2较W1N1处理增加6.38%,W1N1较W3N1处理增加15.82%;施氮量与牧草RUE呈正相关关系,灌水量与混播牧草RUE呈正相关关系,与单播牧草RUE则基本呈负相关关系。(3)灌水量和施氮量的增加可提升牧草产量,W1N2处理牧草产量最大,混播和单播分别为26 050.73 kg·hm<sup>-2</sup>和12 186.10 kg·hm<sup>-2</sup>;灌水量的增加会减小水分利用效率,W1较其他处理减小2.05%~8.16%;施氮量的增加会减小氮肥偏生产力,N2较其他处理减小9.68%~46.42%。(4)混播牧草的LAI、干物质累积量、CIPAR、RUE、WUE和 $PPF_N$ 较单播分别提高132.62%、112.93%、49.27%、45.34%、88.76%和111.55%。综上可知,苜蓿与无芒雀麦混播结合轻度亏水(现蕾和初花期灌水下限为65%~75% $\theta_f$ )和较高的施氮量(120 kg·hm<sup>-2</sup>)可显著提升牧草生物量、光合辐射利用效率和水氮利用效率。

**关键词:**混播牧草;水氮调控;干物质累积量;辐射利用效率

**中图分类号:**S54;S812.4 **文献标志码:**A

## Effects of water and nitrogen regulation on growth and radiation utilization of alfalfa and *Bromus inermis* Leysis. mixed cropping grassland

WANG Aixia, QI Guangping, YIN Minhua, KANG Yanxia, MA Yanlin,

WANG Jinghai, JIA Qiong, TANG Zhongxia, JIANG Yuanbo

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** To solve the problems of extensive production management of artificial grassland and insufficient utilization of climatic resources in inland arid areas of China, a reasonable pattern of forage planting, water and nitrogen supply was employed to fully explore the production potential of regional forage. Triennial (sown in 2018) alfalfa (referred to as ‘alfalfa’) and *Bromus inermis* Leysis. were used to analyze planting patterns (alfalfa and *Bromus inermis* Leysis. mixed: D1; *Bromus inermis* Leysis. single: D2), nitrogen application (low N1: 60 kg·hm<sup>-2</sup>; high N2: 120 kg·hm<sup>-2</sup>) and irrigation amount on forage leaf area index (LAI), dry matter accumulation, cumulative interception of photosynthetically active radiation (CIPAR), radiation use efficiency (RUE), yield (Y), water consumption ( $ET_a$ ) water use efficiency (WUE) and nitrogen partial factor productivity ( $PPF_N$ ). The irrigation a-

收稿日期:2022-04-26

修回日期:2022-08-31

基金项目:国家自然科学基金(51969003,52069001);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-20);甘肃省高校创新基金项目(2020B-131);甘肃省青年科技基金计划(20JR5RA011);甘肃农业大学水利水电工程学院科研团队建设专项(Gaucwky-01)

作者简介:汪爱霞(1994-),女,甘肃岷县人,硕士研究生,研究方向为旱区水资源利用。E-mail:2807680900@qq.com

通信作者:银敏华(1988-),女,山西忻州人,讲师,主要从事旱区水土资源高效利用研究。E-mail:yinmh@gsau.edu.cn

mount was measured using percentage of the lower limit of irrigation to the field water holding capacity  $\theta_f$ , with adequate irrigation (75% to 85%  $\theta_f$ ) at the branching stage, mild water deficit W1 of 65% to 75%  $\theta_f$ , moderate water deficit W2 of 55% to 65%  $\theta_f$ , and severe water deficit W3 of 45% to 55%  $\theta_f$  at the budding and first flowering stage, and the upper limit of irrigation was 85%  $\theta_f$ . The results showed that: (1) The *LAI* and dry matter accumulation of forage grass increased with the increase of irrigation and nitrogen application. With the advance of growth period, *LAI* increased rapidly first and then slowly increased or decreased. Dry matter accumulation increased rapidly first and then increased slowly. (2) Both irrigation and N application promoted the accumulation of photosynthetically active radiation interception in forage. Compared with W1N1 treatment, W1N2 increased by 6.38%, W1N1 increased by 15.82% when comparing with W3N1 treatment. And the amount of N application was positively correlated with the *RUE* of forage grass, and the amount of irrigation was positively correlated with the *RUE* of mixed forage grass, while the opposite was true for unicast forage. (3) The increase of irrigation and nitrogen application increased forage yield. Of which W1N2 treatment reached the maximum forage yield, with mixed and unicast yields of 26 050.73 kg · hm<sup>-2</sup> and 12 186.10 kg · hm<sup>-2</sup>, respectively. While the increase of irrigation reduced water use efficiency, W1 was 2.05% to 8.16% smaller than other treatments. And the increase of nitrogen application reduced the partial productivity of nitrogen fertilizer, N2 was 9.68% to 46.42% smaller than other treatments. (4) Compared with *Bromus inermis* Leysis, respectively, the *LAI*, dry matter accumulation, *CIPAR*, *RUE*, *WUE* and *PPN* of mixed forage increased by 132.62%, 112.93%, 49.27%, 45.34%, 88.76% and 111.55%, respectively. Alfalfa mixed with *Bromus inermis* Leysis. combined with mild water deficit (lower limit of irrigation 65%~75%  $\theta_f$ ) and higher N application (120 kg · hm<sup>-2</sup>) significantly improved forage biomass and radiation use efficiency.

**Keywords:** mixed forage; water and nitrogen regulation; dry matter accumulation; radiation use efficiency

草原生态系统是我国最大的陆地生态体系,也是我国北方最大的生态屏障<sup>[1]</sup>,在生态环境可持续发展中发挥着重要作用。近年来,由于过度放牧和气候变化等影响,草原“三化”问题严峻,草畜矛盾日益突出。建植人工草地具有生产力高、灵活性高、可规模化生产等多重优势,已成为优质牧草的主要来源<sup>[2]</sup>。目前,人工草地建植以豆科与禾本科牧草混播为主。紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 是豆科牧草的典型代表,具有生长期长、耐贫瘠、蛋白含量高特点<sup>[3]</sup>;无芒雀麦 (*Bromus inermis* Layss.) 是禾本科牧草的典型代表,具有生命力强、饲口性好、营养丰富等特点<sup>[4]</sup>。苜蓿与无芒雀麦混播表现出众多优越性,如适应性强、营养均衡、资源利用率高<sup>[5]</sup>。

我国内陆干旱区气候干燥、土壤贫瘠,在全球气候变暖的背景下,水分和氮素是牧草生长及产量形成的主要限制因子<sup>[6-7]</sup>,保证水分和氮素的供应便成为提高牧草产量和改善其品质的必要措施。有研究表明,节水灌溉处理作物干物质累积量均高于相应的淹灌处理<sup>[8]</sup>,说明一定程度的水分亏缺可提高牧草光合能力并维持牧草产量<sup>[9]</sup>;施用氮肥能增强根系对水肥的吸收能力,维持其较高的渗透调节功能,改善植株水分状况,促进光合产物形成<sup>[10-11]</sup>,从而增加牧草产量和营养成分含量<sup>[12]</sup>。

研究表明,水分和氮肥是影响叶面积指数的主要因子<sup>[13]</sup>,干旱无肥会限制作物叶面积指数及地上部生物量的形成<sup>[14]</sup>,而作物冠层吸收的辐射比例随着叶面积指数增大而增加<sup>[15]</sup>;且叶面积指数是苜蓿与禾本科间作模式下对产量贡献率最大的光能利用因子<sup>[16]</sup>。此外,Liu等<sup>[3]</sup>探究了调亏灌溉与苜蓿干物质累积量、叶面积指数和辐射利用效率之间的关系,表明辐射利用效率对水分胁迫很敏感,比累积截获光合有效辐射对牧草累积量的影响更大;另有研究表明,氮素亏缺会显著减小牧草叶面积指数、累积截获光合有效辐射量和辐射利用效率<sup>[17]</sup>。可见,水氮对牧草生物量、叶面积和辐射利用均有一定的影响,尽管作物根系吸收水分和养分是两个相对独立的过程,但两者在作物生长中既相辅相成又相互制约,过多或过少均会对作物生长产生不利影响<sup>[18-19]</sup>。

目前,关于牧草水氮调控的研究主要为水分、氮素及水氮互作对牧草生理生长、产量品质的影响,对辐射利用效率的研究多集中于粮食作物(玉米<sup>[20]</sup>、小麦<sup>[21]</sup>和水稻<sup>[22]</sup>)以及大尺度下其时空变化对生态环境的影响,较少涉及水氮调控下牧草对光合有效辐射的响应。本文从辐射利用的角度出发,探究水氮调控和种植模式对牧草叶面积指数、干物质累积量和辐射利用效率的影响,并分析水氮

调控下牧草产量、耗水量以及水氮利用的变化特征,旨在为高效利用水肥光热资源以充分发挥区域人工牧草的生产潜力提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2020 年 5—10 月在甘肃省张掖市肃南裕固族自治县明花乡(98°49′50″E,38°40′36″N)进行。该地区海拔 1 368 m,年均日照时数 3 034 h,多年平均降水量和蒸发量分别为 90 mm 和 1 731 mm,年均气温 7.3℃,无霜期 131 d。气象数据(图 1)由小型智慧型农业气象站测定。试验地土壤质地为砂壤土,田间持水量为 33.0%(体积含水率),0~100 cm 土层土壤平均容重和 pH 值分别为 1.44 g·cm<sup>-3</sup> 和 7.4,全氮、速效钾和速效磷含量分别为 0.21、0.17 g·kg<sup>-1</sup> 和 3.16 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

供试苜蓿为清水紫花苜蓿(简称‘苜蓿’),无芒雀麦为卡尔顿无芒雀麦,均由甘肃农业大学草业学院提供。灌水采用喷灌(灌水量由各小区支管安装的水表控制),喷头为蝶形喷头(由大禹节水公司提供),喷射半径 2~3 m,喷头流量 0.2 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,布置在小区中央。苜蓿与无芒雀麦均于 2018 年 5 月播种(3 a 生牧草),采用条播,播深 2 cm,行距 0.3 m,每个小区播种 17 行,小区之间设保护行。所有小区

的除草、打药等田间管理措施一致。

参考该地区生产实践以及其他学者研究,确定本试验种植模式、灌水水平和施氮水平 3 个因素(表 1)。种植模式为紫花苜蓿与无芒雀麦同行混播(D1,播种比例 1:1,播种量均为 15 kg·hm<sup>-2</sup>)、无芒雀麦单播(D2,播种量为 30 kg·hm<sup>-2</sup>);灌水水平以控制土壤体积含水率占田间持水率  $\theta_f$  的百分数表示,灌水上限均为 85%  $\theta_f$ ,灌水下限分别为 65%  $\theta_f$  (W1,轻度亏水)、55%  $\theta_f$  (W2,中度亏水)和 45%  $\theta_f$  (W3,重度亏水),在苜蓿现蕾期和初花期进行水分调控(苜蓿和无芒雀麦生育时期不同,以苜蓿为准),其余生育时期充分灌水(75%~85%  $\theta_f$ ),计划湿润层 80 cm,各处理的灌水量见表 2;施氮水平设低氮量 60 kg·hm<sup>-2</sup> (N1)和高氮量 120 kg·hm<sup>-2</sup> (N2),采用尿素 CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> (N 质量分数为 46.4%),第一茬在分枝期施肥,第二茬和第三茬在上一茬刈割后施肥,三茬间施肥比例为 5:3:2,共 12 个处理,设 3 次重复,合计 36 个小区。试验采用完全随机区组设计,小区面积为 25 m<sup>2</sup> (5 m×5 m)。三茬牧草皆于苜蓿初花期刈割(分别对应无芒雀麦的孕穗期~初花期、孕穗期和拔节期)。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶面积指数和光合有效辐射 在中午太阳天顶角低于 60°时,使用 AccuPAR-LP80 植物冠层分析仪测定叶面积指数(LAI)和光合有效辐射(PAR),

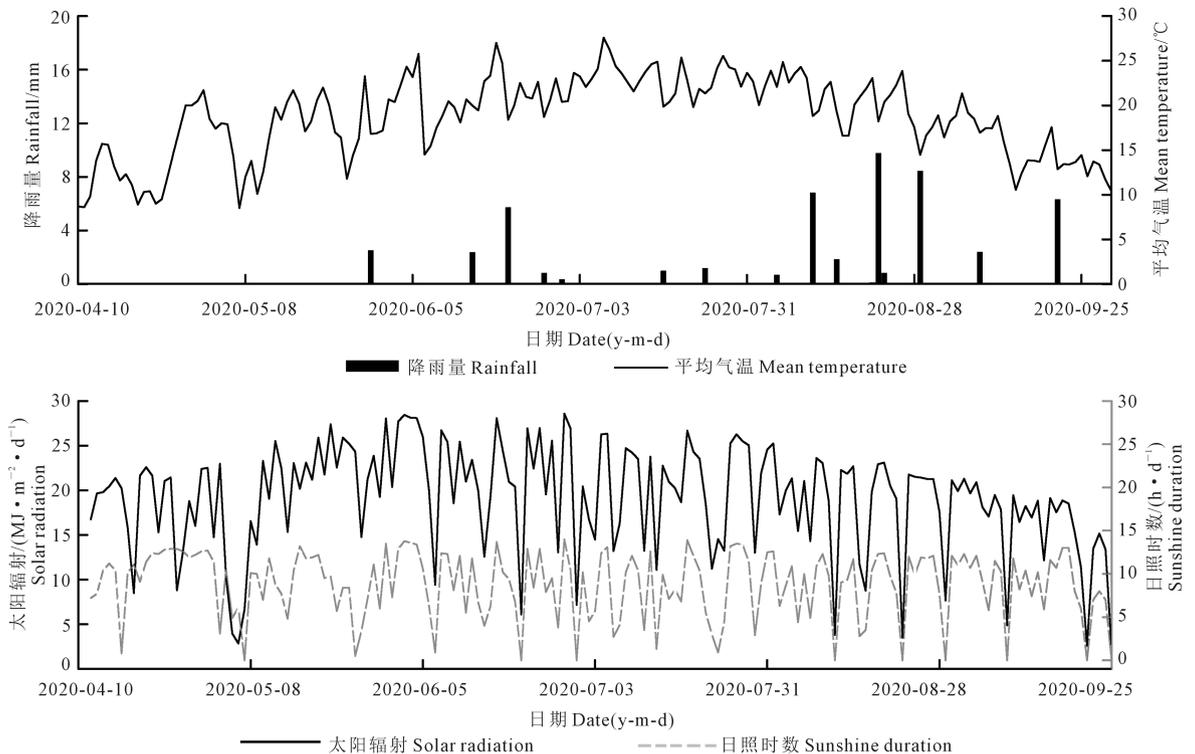


图 1 试验期间研究区气象特征

Fig.1 Meteorological characteristics of the study area during the experiment

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	种植模式 Planting pattern	水分调亏 Water deficit	灌水下限(占田间持水率 $\theta_f$ 的百分数) Low irrigation limit(Percentage of $\theta_f$ )/%			施氮水平 Nitrogen level /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
			分枝期 Branching stage	现蕾期 Squaring stage	初花期 Initial flowering stage	
			D1W1N1	D1	W1	
D1W1N2	75	65	65			120(N2)
D1W2N1	W2	75	55			55
D1W2N2		75	55		55	120(N2)
D1W3N1		W3	75		45	45
D1W3N2	75		45		45	120(N2)
D2W1N1	D2		W1	75	65	65
D2W1N2		75		65	65	120(N2)
D2W2N1		W2		75	55	55
D2W2N2			75	55	55	120(N2)
D2W3N1			W3	75	45	45
D2W3N2		75		45	45	120(N2)

表2 各处理的灌溉定额

Table 2 Irrigation quota for each treatment

处理 Treatment	灌溉定额 Annual irrigation /( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	处理 Treatment	灌溉定额 Annual irrigation /( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )
D1W1N1	4532.12	D2W1N1	4025.50
D1W1N2	5407.62	D2W1N2	4257.48
D1W2N1	3916.30	D2W2N1	3722.36
D1W2N2	4516.31	D2W2N2	3957.42
D1W3N1	3549.75	D2W3N1	3199.67
D1W3N2	3949.71	D2W3N2	3525.37

每个小区至少测3次。每茬牧草按时间序列测定5次,第一茬分别在2022年5月12日、5月19日、5月26日、6月3日和6月11日测定;第二茬分别在2022年6月26日、7月3日、7月11日、7月22日和8月2日测定;第三茬分别在2022年8月26日、9月2日、9月9日、9月16日和9月23日测定。

1.3.2 牧草干物质积累量和产量 每茬牧草从分枝期开始每7~10 d测定一次生物量,每个小区随机选择1 m<sup>2</sup>样方,距地面5 cm处刈割,测其鲜质量,将所取样品放入烘箱,105℃杀青0.5 h,75℃烘48 h至恒重,冷却后称其干质量。

1.3.3 光合有效辐射 光合有效辐射分量( $FPAR$ ,  $\text{umol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和冠层截获光合有效辐射量( $IPAR$ ,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )的计算公式如下:

$$FPAR = \frac{P_{\text{up}} - P_{\text{bottom}}}{P_{\text{up}}} \quad (1)$$

$$IPAR = 0.47SR(1 - e^{-kLAI}) \quad (2)$$

$$k = -\frac{\ln t}{LAI} \quad (3)$$

$$t = 1 - FPAR \quad (4)$$

式中, $P_{\text{up}}$ 、 $P_{\text{bottom}}$ 分别为冠层上部(植株上方10 cm

处)和底部(近地面)光合有效辐射( $\text{umol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $SR$ 为太阳辐射( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $k$ 为冠层消光系数; $t$ 为透光率(%); $LAI$ 为叶面积指数。

累积截获光合有效辐射量( $CIPAR$ ,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )是一段时间内每日 $IPAR$ 值的总和。

1.3.4 牧草辐射利用效率 牧草辐射利用效率计算公式如下:

$$RUE = Y/CIPAR \quad (5)$$

式中, $RUE$ 为辐射利用效率( $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ); $Y$ 为牧草产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

1.3.5 牧草耗水量 牧草耗水量( $ET_a$ )计算公式如下:

$$ET_a = I + P + S - \Delta W - D \quad (6)$$

式中, $I$ 和 $P$ 分别为试验期间总灌水量(mm)和有效降水量(mm); $S$ 为地下水补给(忽略不计)(mm); $\Delta W$ 为土壤贮水变化量(mm); $D$ 为深层渗漏量(忽略不计)。

1.3.6 牧草水分利用效率 牧草水分利用效率( $WUE$ ,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )计算公式如下:

$$WUE = Y/ET_a \quad (7)$$

式中, $Y$ 为牧草产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $ET_a$ 为耗水量( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

1.3.7 牧草氮肥偏生产力 牧草氮肥偏生产力( $PF P_N$ ,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )计算公式如下:

$$PF P_N = Y/F \quad (8)$$

式中, $Y$ 为牧草产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $F$ 为施氮量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

## 1.4 数据分析

试验数据用Microsoft Excel 2019进行计算,Origin 9.0作图,SPSS Statistics 24进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮调控下牧草叶面积指数变化特征

由表 3 可知,灌水量和施氮量对牧草 *LAI* 影响极显著( $P<0.01$ ),其交互作用对牧草 *LAI* 影响不显著( $P>0.05$ )。牧草叶面积指数与干物质累积量呈正相关(表 4)。由不同水氮调控对牧草 *LAI* 的影响(图 2)可知,混播和单播牧草叶面积指数均随生育期的推进表现为先快速增大后缓慢增大或减小。第一茬和第二茬牧草 *LAI* 远大于第三茬,分别较第三茬平均增大 83.56% 和 68.17%;前两茬之间差异

不显著,且随施氮量和灌水量的增加而增大。混播牧草的 *LAI* 为 1.37~11.65;灌水量相同,  $N_2$  较  $N_1$  处理 *LAI* 增大 6.20%~12.27%;施氮量相同,  $W_1$  较  $W_2$  和  $W_3$  处理 *LAI* 分别增大 11.22%~20.55% 和 29.19%~39.63%。单播牧草的 *LAI* 为 0.57~5.98;灌水量相同,  $N_2$  较  $N_1$  处理 *LAI* 增大 8.74%~23.21%;  $W_1$  较  $W_2$  和  $W_3$  处理 *LAI* 分别增大 21.10%~29.71% 和 58.59%~77.43%。混播和单播牧草均在  $W_1N_2$  处理下 *LAI* 达到最大,前者为 11.65,后者为 5.98。可见,混播模式下较高的水分和氮素供应有利于提高牧草 *LAI*。

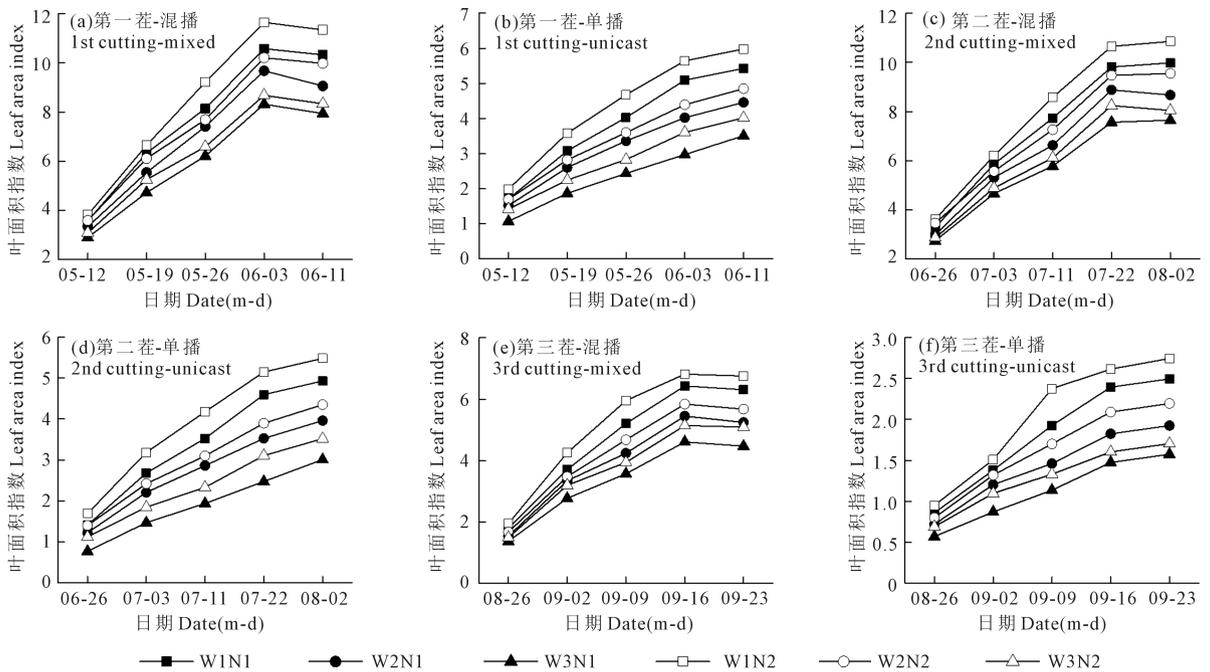


图 2 水氮调控对牧草叶面积指数的影响

Fig.2 Effect of water and nitrogen regulation on leaf area index of forage

表 3 水氮调控下牧草 *LAI*、干物质累积量、*CIPAR* 和 *RUE* 的方差分析

Table 3 Analysis of variance of *LAI*, dry matter, *CIPAR* and *RUE* of forage under water and nitrogen regulation

处理 Treatment	茬次 Cutting	<i>LAI</i>		干物质 Dry matter		<i>CIPAR</i>		<i>RUE</i>		
		D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	
W	第一茬 First cutting	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
N		*	*	*	*	ns	*	ns	ns	
W×N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
W	第二茬 Second cutting	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
N		*	*	*	*	ns	*	ns	ns	
W×N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
W	第三茬 Third cutting	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
N		*	*	*	*	*	*	ns	ns	
W×N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

注: \*\* 表示存在极显著性差异( $P<0.01$ ), \* 表示存在显著性差异( $P<0.05$ ), ns 表示差异不显著( $P>0.05$ )。下同。

Note: \*\* indicates a highly significant difference ( $P<0.01$ ), \* indicates a significant difference ( $P<0.05$ ), and ns indicates no significance difference ( $P>0.05$ ). The same below.

表 4 各因子之间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between the factors

因子 Factor	LAI	干物质 Dry matter	CIPAR	RUE
LAI	1.000			
干物质 Dry matter	0.926 **	1.000		
CIPAR	0.735	0.490	1.000	
RUE	-0.472	-0.236	-0.451	1.000

## 2.2 水氮调控下牧草干物质累积特征

由表 3 可知,灌水量和施氮量对牧草干物质累积量影响极显著( $P < 0.01$ ),其交互作用对干物质累积量的影响不显著( $P > 0.05$ )。由不同水氮调控下牧草干物质累积量变化情况(图 3)可知,混播和单播牧草干物质累积量随生育期推进先快速增大后缓慢增大。第一茬牧草干物质累积量最大,第二茬和第三茬分别较其减小 7.45% 和 57.62%。混播牧草干物质累积量大于单播,平均增加 112.93%。此外,干物质累积量随着灌水量和施氮量的增加而增大。混播模式下同一灌水水平, N2 较 N1 处理干物质累积量增加 7.40%~18.90%;施氮水平相同, W2 较 W1 处理减小 5.07%~10.68%, W3 较 W1 处理减小 17.54%~22.21%。单播模式下同一灌水水平, N2 较 N1 处理干物质累积量增加 4.58%~49.21%;施氮水平相同, W2 较 W1 处理减小 5.19%~15.58%, W3 较 W1 处理减小 13.93%~26.83%。可见,增加灌水量和施氮量均能促进牧草干物质累积,且豆禾混播牧草干物质累积量远大于禾本科单播。

## 2.3 水氮调控对牧草光合有效辐射的影响

2.3.1 累积截获光合有效辐射量 由表 3 可知,灌水量对牧草 CIPAR 影响极显著( $P < 0.01$ ),施氮量仅对单播牧草 CIPAR 影响极显著( $P < 0.01$ ),其交互作用对牧草 CIPAR 影响不显著( $P > 0.05$ )。由水氮调控对不同生长季牧草 CIPAR 的影响(图 4)可知,第一茬牧草 CIPAR 最大,较第二茬和第三茬分别增大了 17.40% 和 59.35%,第三茬较第二茬减幅增大。混播牧草 CIPAR 远大于单播,混播牧草平均 CIPAR 为 252.16~310.68  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,单播为 136.57~238.67  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,混播较单播平均增大 49.27%。灌水量和施氮量增加均能促进牧草 CIPAR 增加。混播模式下,灌水量相同时, W1N2 较 W1N1 处理 CIPAR 三茬平均增大 6.38%, W2N2 较 W2N1 处理三茬平均增大 4.29%, W3N2 较 W3N1 处理三茬平均增大 5.72%;施氮量相同时, W1N1 分别较 W2N1 和 W3N1 处理 CIPAR 三茬平均增大 7.75% 和 15.82%, W1N2 分别较 W2N2 和 W3N2 处理三茬平均增大 9.92% 和 16.54%。单播模式下,灌水量相同时,

W1N2 较 W1N1 处理 CIPAR 三茬平均增大 1.03%, W2N2 较 W2N1 处理三茬平均增大 17.19%, W3N2 较 W3N1 处理三茬平均增大 11.75%;施氮量相同时, W1N1 分别较 W2N1 和 W3N1 处理 CIPAR 三茬平均增大 25.02% 和 58.43%, W1N2 分别较 W2N2 和 W3N2 处理三茬平均增大 17.68% 和 54.23%。

2.3.2 辐射利用效率 由表 3 可知,灌水量和施氮量对混播牧草 RUE 影响不显著( $P > 0.05$ ),灌水量仅对单播牧草 RUE 影响极显著( $P < 0.01$ ),其交互作用对混播和单播牧草 RUE 影响均不显著( $P > 0.05$ )。水氮调控对不同生长季牧草 RUE 的影响如图 5 所示,第二茬牧草 RUE 最大,较第一茬和第三茬牧草分别增大 8.53% 和 36.21%。混播牧草 RUE 高于单播,混播牧草平均 RUE 为 2.40~2.78  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,单播为 1.58~2.09  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,混播较单播三茬平均增大 45.34%。混播模式下,灌水量相同时, W1N2 较 W1N1 处理三茬平均 RUE 增大 5.37%, W2N2 较 W2N1 处理增大 5.91%, W3N2 较 W3N1 处理增大 9.55%;施氮量相同时, W1N1 分别较 W2N1 和 W3N1 处理 RUE 三茬平均增大 0.83% 和 10.09%, W1N2 分别较 W2N2 和 W3N2 处理平均增大 0.33% 和 5.90%。单播模式下,灌水量相同时, W1N2 较 W1N1 处理三茬平均 RUE 增大 2.72%, W2N2 较 W2N1 处理减小 3.33%, W3N2 较 W3N1 处理增大 3.04%;施氮量相同时, W1N1 分别较 W2N1 和 W3N1 处理 RUE 三茬平均减小 12.36% 和 22.07%, W1N2 分别较 W2N2 和 W3N2 处理 RUE 三茬平均减小 6.88% 和 22.30%。可见,施氮量与牧草 RUE 呈正相关关系,灌水量仅与混播牧草 RUE 呈正相关关系。

## 2.4 水氮调控对牧草水氮利用效率的影响

水氮调控对牧草的产量、耗水量、水分利用效率和氮肥偏生产力的影响如表 5 所示,由表 5 可知,水分和氮素单因子对牧草产量、耗水量、水分利用效率和氮肥偏生产力影响极显著( $P < 0.01$ ),水氮交互因子除对氮肥偏生产力影响极显著外,对其余指标影响均表现为不显著( $P > 0.05$ )。增加灌水量和施氮量均有利于提高牧草产量并增大耗水量, W1N2 处理牧草产量和耗水量均为最大,混播和单播草地产量分别为 26 050.73  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 12 186.10  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,耗水量分别为 6 436.56  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和 5 514.15  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ;但灌水量增大不利于提高牧草水分利用效率, W1N1 水分利用效率较 W2N1、W3N1 处理混播和单播分别减小 2.05%、2.24% 和 2.5%、6.03%, W1N2 较 W2N2、W3N2 处理混播和单播分别减小 2.88%、6.03%

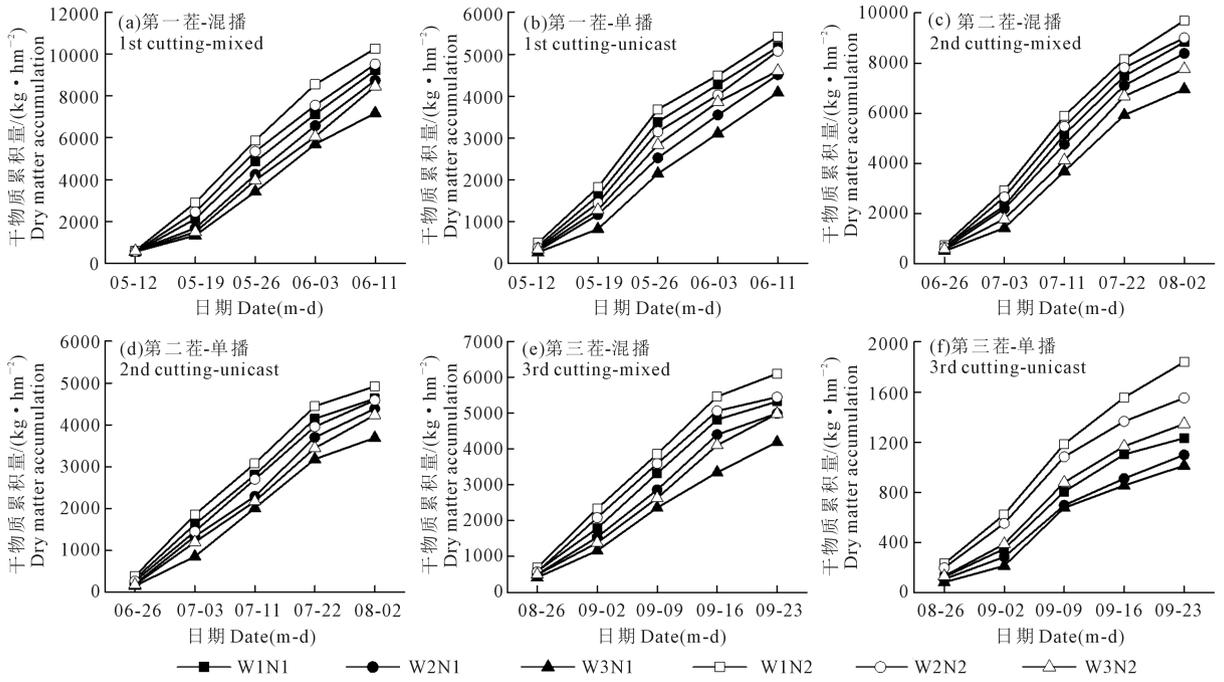
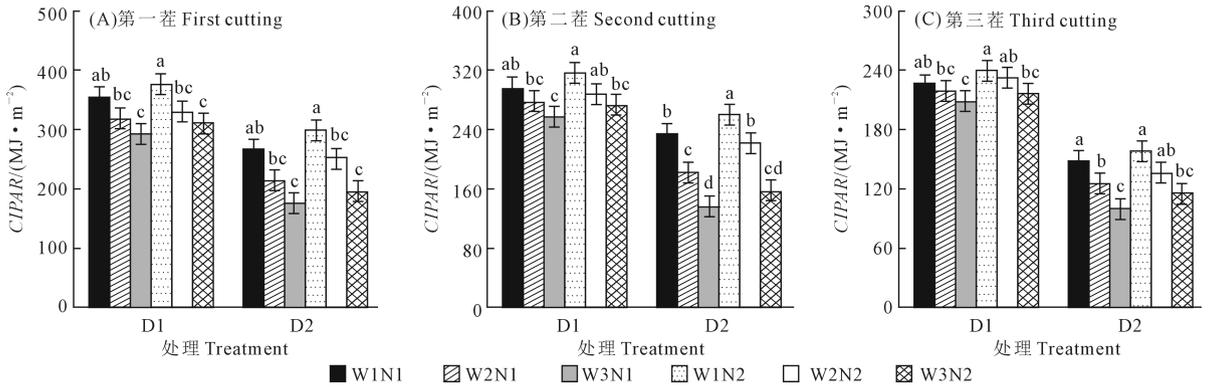


图 3 水氮调控对牧草干物质积累量的影响

Fig.3 Effect of water and nitrogen regulation on dry matter accumulation in forage



注:不同小写字母表示同一种植模式下处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note; Different lowercase letters indicate significant differences between treatments under the same planting mode ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 4 水氮调控对牧草累积截获光合有效辐射量的影响

Fig.4 Effect of water and nitrogen regulation on the cumulative interception of photosynthetically active radiation by forage

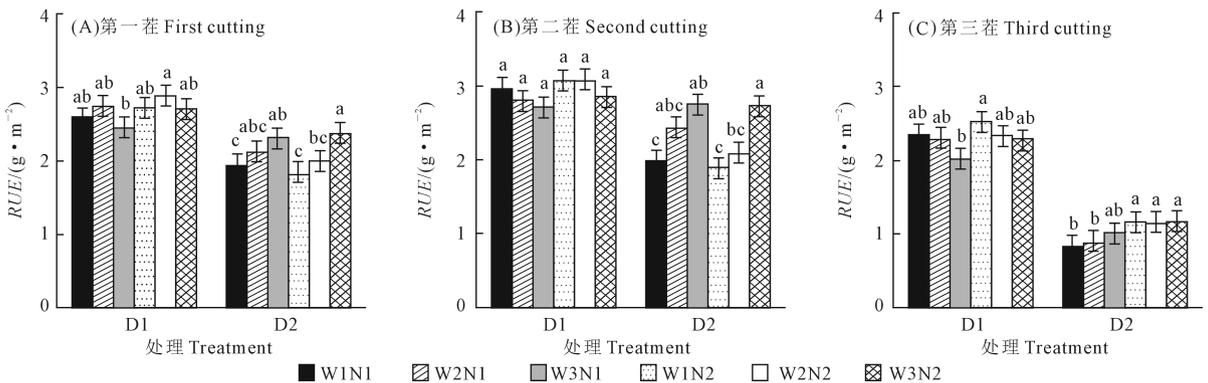


图 5 水氮调控对牧草辐射利用效率的影响

Fig.5 Effect of water and nitrogen regulation on radiation use efficiency of forage

表 5 水氮调控对牧草产量、耗水量、水分利用效率和氮肥偏生产力的影响

Table 5 Effect of water and nitrogen regulation on forage yield, water consumption, water use efficiency and nitrogen partial productivity

处理 Treatment	产量 Yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	ET <sub>a</sub> /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	WUE /(kg·m <sup>-3</sup> )	PPFN <sub>N</sub> /(kg·kg <sup>-1</sup> )
D1W1N1	23281.93b	5421.25c	4.29b	388.03a
D1W1N2	26050.73a	6436.56a	4.05d	217.09d
D1W2N1	21517.43c	4910.24d	4.38ab	369.74b
D1W2N2	23772.98b	5698.65b	4.17c	198.11e
D1W3N1	18324.82e	4090.63e	4.40a	305.41c
D1W3N2	21203.20d	4805.14d	4.41a	275.85f
W	**	**	**	**
N	**	**	**	**
W×N	ns	ns	ns	**
D2W1N1	11036.45b	5055.53b	2.18c	183.94a
D2W1N2	12186.10a	5514.15a	2.20c	101.55d
D2W2N1	10001.38c	4482.06bcd	2.23bc	166.69b
D2W2N2	11219.38b	4702.77c	2.33ab	93.49de
D2W3N1	8792.68d	3878.85e	2.32ab	146.54c
D2W3N2	10188.07c	4284.23d	2.37a	84.90e
W	**	**	**	**
N	**	**	*	**
W×N	ns	ns	ns	**

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments( $P<0.05$ ).

和 8.16%、7.17%;施氮量的增加会显著减小牧草的氮肥偏生产力,W1N2 较 W1N1 处理混播和单播分别减小 44.05%和 44.79%,W2N2 较 W2N1 处理混播和单播分别减小 46.42%和 43.91%,W3N2 较 W3N1 处理混播和单播分别减小 9.68%和 42.06%。综上所述可知,轻亏水高量氮有利于牧草产量的提升,重亏水有利于提高牧草水分利用效率,低量氮有利于增加牧草氮肥偏生产力。

## 3 讨论

### 3.1 水氮调控下牧草叶面积指数变化特征

叶面积指数(LAI)可反映牧草群体生长状况,其值与牧草养分积累和产量息息相关。在一定范围内,LAI 越大,作物接受太阳辐射的区域越大,作物的光合作用越强烈,合成的有机物就越多<sup>[23]</sup>,即作物产量与 LAI 呈线性正相关。然而,当 LAI 到达一定临界值后,会使田间郁闭,光合效率减弱,作物产量下降<sup>[24]</sup>。本研究中,除个别茬次外,LAI 与牧草干物质累积量呈线性正相关,进一步说明 LAI 对于牧草产量的重要性,这与陈彦云等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。有研究表明,增加灌水量和添加氮素对提高 LAI 均有促进作用<sup>[26]</sup>,与本研究得出适宜的水氮供

应有助于提高牧草 LAI 的研究结果一致,可能是因为水分和养分的增加促进了作物根部的生长,使其将更多营养物质输送到地上部分,进而促进作物茎叶的生长,达到“根深叶茂”的效果。与本研究不同,王全九等<sup>[27]</sup>针对棉花开展研究得出,最大叶面积指数随施氮量和耗水量的增大先增大后减小,主要原因可能是本试验未设置充分灌溉和较高的施氮处理,水氮供应未达到限制值。

### 3.2 水氮调控下牧草干物质累积特征

干物质累积量是反映牧草生长速率的重要指标,除受牧草品种、土壤质地影响外,土壤养分和水分对牧草干物质的累积也起着决定性作用<sup>[28]</sup>。因此,水氮调控一定程度上影响牧草干物质累积量与累积速率。水氮不足会降低干物质累积速率,从而导致干物质累积量减少,这是因为水分和氮素亏缺会抑制牧草叶片的扩张和光合能力<sup>[29]</sup>。施用适量的氮肥能提高作物根系吸水能力和根系活性,促进作物吸收土壤养分,有利于植株株高、茎粗、叶片等增加,从而提高牧草产量<sup>[30]</sup>。研究表明,合理的水氮供应能使燕麦产量达到最高<sup>[31]</sup>,马铃薯产量随水肥施用量的增大表现为先增大后减小,当灌水量为 1 036.27 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,施氮量为 241.05 kg·hm<sup>-2</sup>时马铃薯产量达到最大<sup>[32]</sup>。本研究表明,轻度亏水结合高施氮量处理牧草干物质累积量最大,这与张忠学等<sup>[33]</sup>得出中等水平施氮灌水处理可以使玉米干物质累积量达到最高和冯福学等<sup>[34]</sup>得出燕麦种植较佳的水氮管理模式是中量灌水高量施氮的结果一致。随着生育时期的推进,牧草干物质累积速率先迅速增大,后缓慢减小,现蕾期牧草干物质累积速率最大,其主要原因是牧草的茎叶生长在营养生长阶段完成<sup>[3]</sup>,这与本研究结果相似。可见,适宜的水氮供应是提高牧草干物质累积量的有效途径。

### 3.3 水氮调控对牧草光合有效辐射的影响

光合有效辐射(PAR)是绿色植物进行光合作用时,能使叶绿素分子呈激发状态的光谱能量。光合作用作为地球上最重要的化能反应之一,直接或间接影响作物的各项生长发育功能,从而影响作物的产量及其农艺生理性状<sup>[35]</sup>。土壤水分和养分通过影响作物地上部分的生长,间接影响冠层截获光合有效辐射量(IPAR),从而影响累积截获光合有效辐射量(CIPAR)和辐射利用效率(RUE)。RUE 反映了相对截光水平的牧草干物质累积程度,是了解作物生长和产量的重要指标。研究表明,随着灌水量增加,苜蓿 CIPAR 和 RUE 均正向增加,可能是因为苜蓿在水分胁迫下将大量光合同化物输送到根部,

导致地上部分生物量减小,从而降低  $RUE^{[36]}$ 。本研究表明,增加灌水量和施氮量均能促进牧草 *CIPAR*,这与姚青青等<sup>[37]</sup>得出增施氮肥可提高棉花冠层累积截获光合有效辐射量和马冬青等<sup>[38]</sup>得出水分亏缺会限制冠层光能截获能力,减小 *CIPAR* 的研究结果基本一致。此外,本研究表明,混播牧草  $RUE$  随灌水量和施氮量增大而增大,但随灌水量的增大变化不显著,这与高阳等<sup>[39]</sup>得出的水分和氮素均能促进玉米-大豆间作系统的光能利用效率的结果一致。单播牧草  $RUE$  随着灌水量的增大而减小,随施氮量变化不显著,这与李华龙等<sup>[40]</sup>得出的水分亏缺会减小小麦辐射利用效率有所不同。其原因可能是单播无芒雀麦较混播牧草叶量少,尽管累积截获光合有效辐射量较高,但其产量低,故增大灌水量并不能有效提高无芒雀麦的辐射利用效率。

### 3.4 水氮调控对牧草水氮利用效率的影响

合理的水、氮用量是保证作物高产的关键因子,充分了解水分和氮素对牧草产量及其水、氮利用效率的影响,可采取相应措施有效提高这两个指标。产量的大小直接影响牧草水分利用效率和氮肥偏生产力。尹光华等<sup>[41]</sup>研究表明,水氮因子对水分利用效率有交互作用,其对水分利用效率的影响表现为正效应。本研究发现,随着灌水量的增加,牧草的氮肥偏生产力增加,但水分利用效率有所降低,这与王振华等<sup>[42]</sup>和 Ayars 等<sup>[43]</sup>研究结果一致。可能是因为水分亏缺导致土壤气体的扩散受到限制,从而降低了作物的养分利用效率和土壤含氧量;同时,水分亏缺限制了牧草的光合作用,从而使叶片膨胀和光合作用减弱,光合产物相应减少,从而使牧草减产,氮肥偏生产力减小。有研究发现,氮素添加有利于牧草产量的形成,一定程度上提高了牧草产量和灌溉水利用效率<sup>[44-45]</sup>,但显著减小了氮肥偏生产力,这与本研究得出的较高施氮量会提高牧草水分利用效率和减小氮肥偏生产力的结论相似。可见,当氮肥施用量过高,氮肥偏生产力会显著降低,导致氮素资源严重浪费,氮素添加通过降低种群稳定性和种间异质性显著降低了生态系统稳定性<sup>[46]</sup>,因此,合理控制草原氮素输入可减少土壤氮素流失,降低氮素对环境质量的不利影响。

## 4 结 论

1) 牧草  $LAI$  随灌水量和施氮量的增加而增大,且随生育时期推进,先快速增大后缓慢增大或减小;混播牧草叶面积指数较单播平均提高 132.62%。

2) 牧草干物质累积量随灌水量和施氮量的增

加而增大,随生育时期推进,干物质累积量先快速增大后增速减缓;混播牧草的干物质累积量较单播平均增加 112.93%。

3) 灌水和施氮均能促进牧草 *CIPAR* 增加,混播牧草较单播增大 49.27%;施氮量与牧草  $RUE$  呈正相关关系,灌水量与混播牧草  $RUE$  呈正相关关系,与单播牧草则基本呈负相关关系。

4) 灌水量和施氮量的增加可提升牧草产量,而灌水量的增加会减小水分利用效率,施氮量的增加会减小氮肥偏生产力。

5) 苜蓿与无芒雀麦混播结合轻度亏水(现蕾和初花期灌水下限:65%~75%  $\theta_f$ )与高氮量(120 kg · hm<sup>-2</sup>)施肥有助于提高牧草叶面积指数、干物质累积量、光合有效辐射、辐射和水氮利用效率,是适于内陆干旱区人工牧草种植的水氮管理模式。

### 参 考 文 献:

- [1] 辛良杰,李秀彬,谈明洪,等. 2000—2010 年内蒙古防沙带草地 NPP 的变化特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 585-591.  
XIN L J, LI X B, TAN M H, et al. Spatial and temporal variability in grassland Net Primary Production (NPP) in the Inner Mongolia sand-control belt from 2000 to 2010[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 585-591.
- [2] 那佳,黄立华,张璐,等. 我国东北草地生产力现状及可持续发展对策[J]. 中国草地学报, 2019, 41(6): 152-164.  
NA J, HUANG L H, ZHANG L, et al. The current situation of grassland productivity and strategy for sustainable development innortheast grassland of China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(6): 152-164.
- [3] LIU M G, MU L, LU Y X, et al. Forage accumulation and radiation use of alfalfa under deficit irrigation[J]. Crop Science, 2021, 61(3): 2190-2202.
- [4] 郝峰,徐柱,李平,等. 无芒雀麦农艺性状遗传多样性研究[J]. 草业科学, 2011, 28(5): 769-776.  
HAO F, XU Z, LI P, et al. Genetic diversity of *Bromus inermis* on agronomic traits[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(5): 769-776.
- [5] 谢开云,张英俊,李向林,等. 无芒雀麦和紫花苜蓿在(1:1)混播中的竞争与共存[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3767-3778.  
XIE K Y, ZHANG Y J, LI X L, et al. Competition and coexistence of alfalfa (*Medicago sativa* L.) and smooth brome (*Bromus inermis* Layss.) in mixture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18): 3767-3778.
- [6] 高亚敏. 气候因素对科尔沁草地北部牧草生长发育的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 412-419.  
GAO Y M. Effects of climatic factors on herbage growth in thenorth Horqin grassland[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 412-419.
- [7] 谢开云,李向林,何峰,等. 单播与混播下紫花苜蓿与无芒雀麦生物量对氮肥的响应[J]. 草业学报, 2014, 23(6): 148-156.  
XIE K Y, LI X L, HE F, et al. Response of alfalfa and smooth brome to nitrogen fertilizer in monoculture and mixed grasslands[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(6): 148-156.
- [8] 周明耀,赵瑞龙,顾玉芬,等. 水肥耦合对水稻地上部分生长与生理性状的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 38-43.

- ZHOU M Y, ZHAO R L, GU Y F, et al. Effects of water and nitrogen coupling on growth and physiological characteristics of overground part of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(8): 38-43.
- [9] 张静鸽, 田福平, 苗海涛, 等. 水分胁迫及复水过程 4 种牧草形态及其生理特征表达[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 193-201.
- ZHANG J G, TIAN F P, MIAO H T, et al. Expressions of morphological and physiological features of 4 forage species under water stress and re-watering process[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 193-201.
- [10] 张志亮, 张富仓, 郑彩霞, 等. 土壤水分与氮营养对果树幼苗生长和水分传导的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 46-51.
- ZHANG Z L, ZHANG F C, ZHENG C X, et al. Effects of soil water and nitrogen nutrition on growth and hydraulic conductivity of fruit tree seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 46-51.
- [11] 尹丽, 刘永安, 谢财永, 等. 干旱胁迫与施氮对麻疯树幼苗渗透调节物质积累的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 632-638.
- YIN L, LIU Y A, XIE C Y, et al. Effects of drought stress and nitrogen fertilization rate on the accumulation of osmolytes in *Jatropha curcas* seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 632-638.
- [12] 梁志霞, 宋明清, 曾馥平, 等. 氮素和刈割对桂牧 1 号杂交象草光合作用、产量和品质的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2008-2014.
- LIANG Z X, SONG T Q, ZENG F P, et al. Effects of nitrogen fertilization and cutting on the photosynthesis, yield, and quality of *Pennisetum purpureum* cv. Guimu-1[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2008-2014.
- [13] 魏永华, 何双红, 徐长明. 控制灌溉条件下水肥耦合对水稻叶面积指数及产量的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(4): 500-505.
- WEI Y H, HE S H, XU C M. Influence of water-fertilizer coupling on rice LAI and yield under the condition of controlling irrigation[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2010, 26(4): 500-505.
- [14] 闫春娟, 王文斌, 孙旭刚, 等. 水肥互作对大豆生理特性、根瘤固氮及产量的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(2): 229-233.
- YAN C J, WANG W B, SUN X G, et al. Effect of water-fertilizer interaction on physiological characteristics, nitrogen fixation and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2011, 30(2): 229-233.
- [15] 李义博, 陶福祿. 提高小麦光能利用效率机理的研究进展[J]. 中国农业气象, 2022, 43(2): 93-111.
- LI Y B, TAO F L. Research progress on the mechanism of high light use efficiency in wheat [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(2): 93-111.
- [16] 蔺芳, 刘晓静, 童长春, 等. 基于产量效应的间作紫花苜蓿/禾本科牧草光能利用特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2963-2976.
- LIN F, LIU X J, TONG C C, et al. Characteristics of light energy utilization of intercropping alfalfa/gramineae forage based on yield effect [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 2963-2976.
- [17] 马韬, 曾文治, 伍靖伟, 等. 不同施氮量下盐渍农田向日葵冠层生长与辐射利用规律[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 292-303.
- MA T, ZENG W Z, WU J W, et al. Sunflower canopy development, radiation absorption and use efficiency at different nitrogen application rates in saline fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 292-303.
- LI D, FANG H J, WANG D, et al. Coupling mechanism of herbage-water-nitrogen fertilizer in abandoned farmland in meadow steppe[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(13): 2691-2702.
- [19] 王佳. 陕北山地枣树涌泉根灌调亏灌溉制度与水肥耦合效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- WANG J. Regulated deficit irrigation schedule and water fertilizer coupling about mountain jujube of surge-root irrigation on northern Shaanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [20] 廖亮林. 顾及散射辐射的中国陆地生态系统 GPP 模拟与分析[D]. 福州: 福州大学, 2017.
- LIAO L L. Impact of diffuse radiation on GPP simulation of terrestrial ecosystem in China[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.
- [21] NARAYANAN S, AIKEN R M, VARA PRASAD P V, et al. Water and radiation use efficiencies in sorghum [J]. Agronomy Journal, 2013, 105(3): 649-656.
- [22] 谢小萍, 李亚春, 杭鑫, 等. 气温对太湖蓝藻复苏和休眠进程的影响[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 818-824.
- XIE X P, LI Y C, HANG X, et al. The effect of air temperature on the process of cyanobacteria recruitment and dormancy in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4): 818-824.
- [23] 王培娟, 谢东辉, 张佳华, 等. BEPS 模型在华北平原冬小麦估产中的应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 148-153.
- WANG P J, XIE D H, ZHANG J H, et al. Application of BEPS model in estimating winter wheat yield in North China Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 148-153.
- [24] 邵惠芳, 刘志宏, 崔登科, 等. 基于氮素效应的烤烟叶面积指数动态模拟[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1276-1286.
- SHAO H F, LIU Z H, CUI D K, et al. Dynamic simulation of leaf area index of tobacco based on nitrogen effect [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1276-1286.
- [25] 陈彦云, 贾倩民, 陈科元, 等. 宁夏盐池干旱风沙区六种牧草的生产性能及光合特性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 111-115.
- CHEN Y Y, JIA Q M, CHEN K Y, et al. The productive performance and photosynthetic characteristics of six forages in arid sandy area of Yanchi, Ningxia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(5): 111-115.
- [26] 李若帆, 马娟娟, 孙西欢, 等. 不同水肥管理模式下糯玉米水氮利用及熵权 TOPSIS 综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 111-120.
- LI R F, MA J J, SUN X H, et al. Comprehensive evaluation of water and nitrogen utilization of waxy corn based on entropy weight TOPSIS model under different water and fertilizer treatments [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 111-120.
- [27] 王全九, 王康, 苏李君, 等. 灌溉施氮和种植密度对棉花叶面积指数与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 300-312.
- WANG Q J, WANG K, SU L J, et al. Effect of irrigation amount, nitrogen application rate and planting density on cotton leaf area index and yield [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 300-312.
- [28] 马晓东, 钟小莉, 桑钰. 干旱胁迫下胡杨实生幼苗氮素吸收分配与利用[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7508-7519.
- MA X D, ZHONG X L, SANG Y. Characteristics of nitrogen absorp-

- tion, distribution, and utilization by *Populus euphratica* seedlings under drought stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7508-7519.
- [29] 徐慧敏, 邵景侠, 李秧秧. 小麦旗叶叶脉特征对水氮供应的响应及其与叶水力生理功能的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1636-1646.
- XU H M, SHAO J X, LI Y Y. Responses of flag-leaf vein traits to nitrogen and water supplies and their correlations with leaf hydraulic-physiological function in wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1636-1646.
- [30] 李璇. 干旱对大豆根系生育的影响及灌溉缓解效应研究进展[J]. *草业学报*, 2019, 28(4): 192-202.
- LI W. Research progress in understanding the effects of drought on growth of the soybean root system and the efficiency of irrigation [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(4): 192-202.
- [31] 李振松, 李向林, 万里强. 水氮耦合对科尔沁沙地燕麦生产性能的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(4): 145-152.
- LI Z S, LI X L, WAN L Q. Effect of water-nitrogen coupling on oat production performance in Horqin sandy land [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(4): 145-152.
- [32] 李文证, 尹娟, 马国成. 水肥耦合对马铃薯干物质生产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2016(10): 15-19, 24.
- LI W Z, YIN J, MA G C. The effect of water and fertilizer coupling on dry-matter production of potato [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(10): 15-19, 24.
- [33] 张忠学, 刘明, 齐智娟. 喷灌条件下水氮用量对玉米氮素吸收转运的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 299-308.
- ZHANG Z X, LIU M, QI Z J. Effect of water nitrogen dosage on nitrogen absorption and transformation of maize under sprinkler irrigation condition [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 299-308.
- [34] 冯福学, 慕平, 赵桂琴, 等. 西北绿洲灌区饲用燕麦耗水特性及产量变化对水氮耦合的响应[J]. *草业学报*, 2017, 26(8): 74-84.
- FENG F X, MU P, ZHAO G Q, et al. Water consumption characteristics and yields of fodder oat under different irrigation and nitrogen fertilization regimes in the northwest oasis irrigation area [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(8): 74-84.
- [35] 李强. 升温、水分和氮肥对稻麦轮作系统产量及温室气体排放的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- LI Q. Effects of warming, moisture and nitrogen fertilizer on the yield and greenhouse gases emission of rice-wheat rotation system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [36] 乔子楣, 刘敏国, 杨惠敏. 高寒地区灌溉对建植当年紫花苜蓿产量、水分和光能利用效率的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(3): 86-93.
- QIAO Z M, LIU M G, YANG H M. Effects of irrigation on yields, water and light efficiencies of first year alfalfa in the alpine region [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(3): 86-93.
- [37] 姚青青, 孙绘健, 罗静, 等. 减施氮肥运筹对棉花冠层光合有效辐射及产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2020, 57(8): 1404-1410.
- YAO Q Q, SUN H J, LUO J, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction regulation on cotton canopy photosynthetic effective radiation and yield [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2020, 57(8): 1404-1410.
- [38] 马冬青, 佟玲, 吴宣毅, 等. 不同种植密度和土壤水分条件下大田玉米冠层光结构分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 259-265.
- MA D Q, TONG L, WU X Y, et al. Analysis of canopy light structure of maize with different planting density and soil water conditions [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 259-265.
- [39] 高阳, 申孝军, 杨林林, 等. 不同水氮处理对玉米-大豆间作群体内作物光能截获、竞争和利用的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 815-822.
- GAO Y, SHEN X J, YANG L L, et al. Effects of water and nitrogen on interception, competition and utilization of radiation in a maize-soybean intercropping system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 815-822.
- [40] 李华龙, 婁子荷, 蒋腾聪, 等. 水分胁迫对冬小麦冠层辐射截获率和利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 226-237.
- LI H L, DOU Z H, JIANG T C, et al. Influences of soil water stress on solar radiation interception and use efficiency of winter wheat canopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 226-237.
- [41] 尹光华, 刘作新, 李桂芳, 等. 水肥耦合对春小麦水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 156-158, 162.
- YIN G H, LIU Z X, LI G F, et al. Water use efficiency of water and fertilizer coupling on spring wheat [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 156-158, 162.
- [42] 王振华, 陈潇洁, 吕德生, 等. 水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 66-75.
- WANG Z H, CHEN X J, LYU D S, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19): 66-75.
- [43] AYARS J E, PHENE C J, HUTMACHER R B, et al. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory [J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 42(1): 1-27.
- [44] 马彦霞, 张玉鑫, 王晓巍. 河西绿洲区大棚甘蓝产量、品质和养分吸收对不同水肥组合的响应[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 270-276.
- MA Y X, ZHANG Y X, WANG X W. Response of yield, quality and nutrients absorption of greenhouse cabbage to different combinations of water and fertilizer in Hexi oasis [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 270-276.
- [45] SADRAS V O, RODRIGUEZ D. Modelling the nitrogen-driven trade-off between nitrogen utilisation efficiency and water use efficiency of wheat in eastern Australia [J]. *Field Crops Research*, 2010, 118(3): 297-305.
- [46] OGLE S M, MCCARL B A, BAKER J, et al. Managing the nitrogen cycle to reduce greenhouse gas emissions from crop production and biofuel expansion [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(8): 1197-1212.