品种与施肥对次生盐碱地牧草光合特性的影响

陈科元¹, 贾倩民¹, 陈彦云^{1,2}, 刘秉儒¹, 韩润燕³, 李旺霞⁴

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学 生命科学学院, 宁夏 银川 750021; 3. 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021;

4. 西部生态与生物资源开发联合研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 通过正交设计 $L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 在宁夏盐池次生盐碱地进行草地建植试验, 探讨牧草品种、有机肥、NPK 肥及苦豆子秸秆对牧草光合特性的影响。结果表明: 正交设计方法得到提高净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、水分利用效率 (WUE)、叶绿素含量及降低胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的最佳组合为草木樨 (*Melilotus officinalia*) + 有机肥 $36 t \cdot hm^{-2}$ + NPK (N $165 kg \cdot hm^{-2}$, P $135 kg \cdot hm^{-2}$ 和 K $135 kg \cdot hm^{-2}$) + 秸秆 $15 t \cdot hm^{-2}$, 这与 P_n 、 G_s 、 WUE 、叶绿素含量最高及 C_i 最低的处理 15 相一致, 证实了正交设计结果的可靠性; 4 个因素对蒸腾速率 (Tr)、 P_n 、 G_s 及 C_i 的影响程度大小均为品种 > 有机肥 > NPK > 秸秆, 对 WUE 及叶绿素含量的影响程度大小为品种 > NPK > 有机肥 > 秸秆; 品种和有机肥对 P_n 、 Tr 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量影响极显著 ($P < 0.01$), NPK 对 P_n 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量影响极显著 ($P < 0.01$), 对 Tr 和 C_i 影响显著 ($P < 0.05$), 苦豆子秸秆对 P_n 和 WUE 影响极显著 ($P < 0.01$); 豆科的 P_n 、 Tr 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量显著大于禾本科 ($P < 0.05$), 草木樨的 P_n 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量显著高于紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 和沙打旺 (*Astragalus adsurgens*), 禾本科披碱草 (*Elymus cylindricus*) 的 P_n 、 WUE 及叶绿素含量显著高于扁穗冰草 (*Agropyron cristatum*) 和蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum* Keng); 相关分析表明, P_n 与 Tr 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 C_i 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

关键词: 牧草品种; 次生盐碱地; 光合特性; 有机肥; N、P、K 肥; 苦豆子秸秆

中图分类号: S156.5; S661.2 文献标志码: A

Effects of varieties and fertilization on the photosynthetic characteristics of forages in secondary saline-alkali land

CHEN Ke-yuan¹, JIA Qian-min¹, CHEN Yan-yun^{1,2}, LIU Bing-ru¹, HAN Run-yan³, LI Wang-xia⁴

(1. Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. College of Life Science, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of the Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

4. United Center for Ecology Research and Bioresource Exploitation in Western China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To compare the effects of species, organic manure, NPK and sophora alopecuroides straw on leaf photosynthetic characteristics, an artificial pasture planting in Ningxia in arid sandy area using $L_{18}(6^1 \times 3^6)$ orthogonal test was implemented. The results showed that the optimal combination to enhance net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), water use efficiency (WUE), chlorophyll content and intercellular CO_2 concentration (C_i) was to use *Melilotus officinalia* + organic manure $36 t \cdot hm^{-2}$ + NPK (N $165 kg \cdot hm^{-2}$, P $135 kg \cdot hm^{-2}$ and K $135 kg \cdot hm^{-2}$) + straw $15 t \cdot hm^{-2}$. The combination was consistent with the Treatment 15 that had the highest P_n , G_s , WUE , chlorophyll content and lowest C_i . The influencing effects on transpiration rate (Tr), P_n , G_s , C_i were in the order of species > organic manure > NPK > straw and WUE , and for chlorophyll content, the order was species > NPK > organic manure > straw. The effects of species and organic manure on P_n , transpiration rate, G_s , WUE and chlorophyll content were

收稿日期: 2014-03-05

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAC07B03); 国家重点基础研究发展计划(973 计划: 2012CB723206)

作者简介: 陈科元(1989—), 男, 宁夏银川人, 在读硕士, 主要从事植物生态学研究。E-mail: 13581678@qq.com。

通信作者: 陈彦云(1965—), 男, 宁夏平罗人, 研究员, 主要从事植物生理研究与教学工作。E-mail: nxchenyy@163.com。

highly significant ($P < 0.01$), and those of NPK on P_n , G_s , WUE and chlorophyll content were highly significant ($P < 0.01$) but significant ($P < 0.05$) on transpiration and rate C_i . Effects of straw on P_n and WUE were highly significant ($P < 0.01$). Legume was significantly ($P < 0.05$) higher in P_n , Tr , G_s , WUE and chlorophyll content than gramineae. *Melilotus suaveolens* had stronger productive performance than *Medicago sativa* and *Astragalus adsurgens*, and *Elymus cylindricus* had higher P_n , WUE and chlorophyll content than *Agropyron cristatum* and *Agropyron mongolicum* Keng. P_n had highly significant positive correlations with Tr , G_s , WUE and chlorophyll content and significant negative correlation with C_i ($P < 0.01$).

Keywords: forages varieties; secondary saline-alkali land; photosynthetic characteristics; organic manure; fertilizer N, P and K; *Sophora alopecuroides* straw

全球盐渍化土地约 1×10^9 hm^2 , 占陆地总面积的 7%, 我国盐渍化土地约 3.7×10^7 hm^2 , 占现有耕地的 25%^[1-2], 土壤盐渍化面积的不断扩大大已成为一个世界性的问题^[3]。土壤中高浓度的盐分会使植物生长及光合能力受到抑制, 降低作物产量甚至提前衰亡^[4-5]。近年来, 随着人口的不断增长, 天然草地逐渐被开垦为农田, 而宁夏盐池县降水量少, 土壤养分贫瘠, 地下水含盐量高, 加之不合理的灌溉, 致使大面积土地产生次生盐渍化^[6-7]。改良和利用盐碱地, 可缓解人口与土地的矛盾, 对推动当地经济和社会的可持续发展具有重要意义^[8-9]。用表面水流冲刷表土盐分是改良盐碱地的有效方法, 但宁夏盐池水资源缺乏, 且地下水的含盐量及矿化度较高, 不宜用灌溉方式来改良次生盐碱地。施肥、覆盖措施以及种植耐盐作物是盐碱地改良的新方向^[10-13]。国内外研究表明, 有机肥可改善土壤结构, 增加土壤养分及蓄水保墒能力, 可有效改良盐碱地^[14-16], 同时可提高植物的光合能力, 增加作物产量^[17]。另外, 秸秆也是改善土壤理化性状、提高土地生产力的良好肥料^[18-20]。本试验通过正交设计对牧草种类、有机肥、化肥及秸秆安排试验, 研究不同种类与施肥对牧草光合特性的影响, 旨在得出该地区种植草地的最佳方案, 为改良盐碱地及全面发展草产业提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区东部盐池县(106°30' ~ 107°47' E, 37°04' ~ 38°10' N), 该县南靠黄土高原, 北与毛乌素沙漠相连, 属于典型大陆性气候, 年均气温 7.7℃, 极端最高和最低气温分别为 38.1℃ 和 -29.6℃, 是干草原向荒漠的过渡地带。年均降水量约 280 mm, 蒸发量约 2 710 mm, 年均无霜期 165 d。试验地为弃耕次生盐碱地, 灌溉用水为地下水, 含盐量及矿化度高, 水质较差。土壤类型为风沙土,

表层(0~20 cm)土壤含水量 5.62%, pH 值 9.15, 全盐含量 0.31%, 有机质含量 5.33 $g \cdot kg^{-1}$ 。

表 1 正交试验因素水平设计

Table 1 The factors and levels in orthogonal test

处理 Treatment	种类 Species(A)	有机肥 Organic manure(B)	氮磷钾 NPK(C)	秸秆 Straw(D)
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₂
2	A ₁	B ₂	C ₂	D ₁
3	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃
4	A ₂	B ₁	C ₂	D ₁
5	A ₂	B ₂	C ₃	D ₃
6	A ₂	B ₃	C ₁	D ₂
7	A ₃	B ₁	C ₁	D ₂
8	A ₃	B ₂	C ₂	D ₁
9	A ₃	B ₃	C ₃	D ₃
10	A ₄	B ₁	C ₃	D ₃
11	A ₄	B ₂	C ₁	D ₂
12	A ₄	B ₃	C ₂	D ₁
13	A ₅	B ₁	C ₃	D ₁
14	A ₅	B ₂	C ₁	D ₃
15	A ₅	B ₃	C ₂	D ₂
16	A ₆	B ₁	C ₂	D ₃
17	A ₆	B ₂	C ₃	D ₂
18	A ₆	B ₃	C ₁	D ₁

1.2 试验设计

采用多因素混合正交设计 $L_{18}(6^1 \times 3^6)$, 因素水平设计见表 1。共 4 个因素, 因素 A 为牧草品种, 6 个水平依次为扁穗冰草 (*Agropyron cristatum*) (A₁)、蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum* Keng) (A₂)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) (A₃)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) (A₄)、草木樨 (*Melilotus officinalia*) (A₅) 和披碱草 (*Elymus cylindricus* Franch.) (A₆)。因素 B 为有机肥, 3 个水平依次为 12 $t \cdot hm^{-2}$ (B₁)、24 $t \cdot hm^{-2}$ (B₂) 和 36 $t \cdot hm^{-2}$ (B₃)。因素 C 为 NPK 配比 (N:P:K = 11:9:9), 3 个水平依次为低肥配比 (N 55 $kg \cdot hm^{-2}$ 、P 45 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 K 45 $kg \cdot hm^{-2}$) (C₁)、中肥配比 (N 165

kg·hm⁻²、P 135 kg·hm⁻²和 K 135 kg·hm⁻²)(C₂)和高肥配比(N 275 kg·hm⁻²、P 225 kg·hm⁻²和 K 225 kg·hm⁻²)(C₃)。因素 D 为秸秆,3 个水平依次为 5 t·hm⁻²(D₁)、15 t·hm⁻²(D₂)、25 t·hm⁻²(D₃),共 18 个处理,重复 3 次,小区面积 25 m²(5 m×5 m)。

1.3 施肥及播种管理

2012 年 4 月 16 日施入基肥,有机肥和秸秆在土壤翻耕前,一次性均匀撒于地表,然后翻入土中。氮肥按总 N 量的 30%作为基肥,返青后追肥 70%,磷肥和钾肥作为种肥,播种时采用沟内条施。有机肥为羊粪,秸秆为当地加工厂的苦豆子秸秆,氮肥为尿素(N 46%),磷肥为磷酸二铵(N 16%、PO₄ 46%),钾肥为硫酸钾(K₂O 50%)。于 2012 年 6 月 2 日播种,禾本科播种量 15 kg·hm⁻²,豆科播种量 30 kg·hm⁻²,均采用条播,行距 30 cm。试验期间采用相同的管理措施,常规除草,禁止放牧。

1.4 测定内容与与方法

于 2013 年 7 月 6 日,用英国 PP-Systems 公司生产的 CIRAS-2 型光合仪,在上午 9:00~11:30 各小区选择向阳、无病虫害、且保持完整的 3 个成熟叶片,测定叶片光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*)、胞间 CO₂ 浓度(*Ci*)等指标,同时用 SPAD-502 叶绿素仪测定相对叶绿素含量(*Chl*),水分利用效率(*WUE*)计算公式为: $WUE = Pn/Tr$ 。

1.5 数据分析

用 Excel 2003 进行数据统计,用 SPSS18.0 进行方差分析,并用 Duncan 法进行多重比较,利用 Pearson 相关系数进行相关性评价。

2 结果与分析

2.1 品种与施肥对净光合速率的影响

用 Duncan 法对表 2 中 18 个处理的净光合速率进行方差分析,因素间 F 检验表明(表 3),4 个因素对净光合速率的影响都达到极显著水平($P < 0.01$),根据极差 *R* 和公式 $R' = d \times R \times M^{0.5}$ (*d* 为折算系数, *M* 为因素水平重复数)计算同水平等价极差 $R'^{[21]}$ 。同水平等价极差 R' 大小为 $A > B > C > D$, 综合比较得出,各因素影响程度为 $A > B > C > D$ 。因素内多重比较结果(表 2)得知,因素 A 各个水平的均值大小为 $A_5 > A_4 > A_3 > A_6 > A_2 > A_1$,除 A_1 与 A_2 外,其它各水平差异显著($P < 0.05$)。因素 B 均值大小为 $B_3 > B_2 > B_1$,各水平差异显著($P < 0.05$),随有机肥的增加净光合速率越大。因素 C 均值大小为 $C_2 > C_3 > C_1$,各水平差异显著($P < 0.05$)。因素 D 均值大小为 $D_2 > D_3 > D_1$,各水平差异不显著($P > 0.05$)。因此得出净光合速率的最优组合为 $A_5B_3C_2D_2$,与净光合速率最高的组合 $A_5B_3C_2D_2$ (处理 15)完全一致,证实了正交设计结果的可靠性。

表 2 不同处理的光合特性与叶绿素含量

Table 2 Photosynthetic characteristics and chlorophyll content with different treatments

处理 Treatment	净光合速率 <i>Pn</i> /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 <i>Tr</i> /($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 <i>Ci</i> /($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	气孔导度 <i>Gs</i> /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用效率 <i>WUE</i> /($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	叶绿素含量 Chlorophyll content /%
1	8.82 ± 0.11	2.82 ± 0.03	252.28 ± 3.07	86.34 ± 1.05	3.13 ± 0.04	33.44 ± 0.41
2	9.23 ± 0.31	2.85 ± 0.10	225.34 ± 7.65	102.26 ± 3.47	3.24 ± 0.11	35.80 ± 1.22
3	9.93 ± 0.30	2.95 ± 0.09	195.39 ± 5.88	122.71 ± 3.69	3.37 ± 0.10	38.16 ± 1.15
4	9.23 ± 0.38	2.91 ± 0.12	217.45 ± 8.94	95.73 ± 3.94	3.17 ± 0.13	35.30 ± 1.45
5	10.25 ± 0.18	2.96 ± 0.05	205.72 ± 3.56	137.23 ± 2.38	3.46 ± 0.06	37.19 ± 0.64
6	9.51 ± 0.12	2.98 ± 0.04	222.18 ± 2.69	93.50 ± 1.13	3.19 ± 0.04	33.10 ± 0.40
7	14.87 ± 0.33	3.75 ± 0.08	173.95 ± 3.82	139.22 ± 3.05	3.97 ± 0.09	44.83 ± 0.98
8	16.15 ± 0.27	3.98 ± 0.07	186.32 ± 3.12	155.46 ± 2.60	4.06 ± 0.07	48.10 ± 0.81
9	18.53 ± 0.59	4.20 ± 0.13	220.49 ± 7.05	169.69 ± 5.42	4.41 ± 0.14	51.37 ± 1.64
10	18.96 ± 0.67	4.12 ± 0.15	201.51 ± 7.10	156.34 ± 5.51	4.60 ± 0.16	45.64 ± 1.61
11	18.83 ± 0.74	4.10 ± 0.16	193.58 ± 7.63	163.69 ± 6.45	4.59 ± 0.18	45.90 ± 1.81
12	22.56 ± 0.58	4.56 ± 0.12	160.64 ± 4.10	186.04 ± 4.75	4.95 ± 0.13	47.74 ± 1.22
13	21.38 ± 0.51	4.01 ± 0.10	176.42 ± 4.18	190.09 ± 4.50	5.33 ± 0.13	53.28 ± 1.26
14	22.42 ± 1.12	4.03 ± 0.20	178.61 ± 8.89	191.82 ± 9.55	5.56 ± 0.28	53.70 ± 2.67
15	27.96 ± 0.39	4.52 ± 0.06	136.79 ± 1.92	229.55 ± 3.22	6.19 ± 0.09	56.12 ± 0.79
16	10.77 ± 0.42	2.76 ± 0.11	215.37 ± 8.37	104.02 ± 4.04	3.90 ± 0.15	38.67 ± 1.50
17	11.92 ± 0.26	2.93 ± 0.07	186.26 ± 4.12	132.62 ± 2.93	4.07 ± 0.09	43.73 ± 0.97
18	10.65 ± 0.49	2.99 ± 0.14	208.82 ± 9.62	116.32 ± 5.36	3.56 ± 0.16	40.20 ± 1.85

2.2 品种与施肥对蒸腾速率的影响

对蒸腾速率进行因素间方差分析(表3),由 F 和 P 值可知,因素 A、B 对蒸腾速率影响极显著($P < 0.01$),因素 C 影响显著($P < 0.05$),因素 D 影响不显著($P > 0.05$),同水平等价极差 R' 大小为 $A > B > C > D$,因此得出,各因素影响程度为 $A > B > C > D$ 。因素内多重比较得知,因素 A 均值大小为 $A_4 > A_5 > A_3 > A_2 > A_6 > A_1$,各豆科显著高于各禾本科($P < 0.05$),其中 A_4 与 A_5 差异不显著,两者均显著高于 A_3 ($P < 0.05$)。因素 B 均值大小为 $B_3 > B_2 > B_1$,其中 B_1 与 B_2 差异不显著,两者与 B_3 差异显著($P < 0.05$),表明有机肥第 3 水平明显提高了蒸腾速率。因素 C 均值大小为 $C_2 > C_3 > C_1$, C_2 与 C_3 差异不显著,与 C_1 差异均显著($P < 0.05$)。因素 D 均值大小为 $D_1 > D_2 > D_3$,各水平差异不显著。由于因素 D 对蒸腾速率影响不显著,因此可忽略因素 D 的多重比较结果,得出蒸腾速率的最优组合为 $A_4B_3C_2D_x$ ($x = 1, 2, 3$),与蒸腾速率最高的组合 $A_4B_3C_2D_1$ (处理 12)

相一致。

2.3 品种与施肥对胞间 CO_2 浓度的影响

对胞间 CO_2 浓度进行因素间方差分析,结果见表 4,因素 A 对胞间 CO_2 浓度影响极显著($P < 0.01$),因素 B 和 C 影响显著($P < 0.05$),因素 D 影响不显著($P > 0.05$)。同水平等价极差 R' 大小为 $A > B > C > D$,因此,各因素的影响程度为 $A > B > C > D$ 。因素间方差分析表明,因素 A 均值大小为 $A_5 < A_4 < A_3 < A_6 < A_2 < A_1$, A_5 与其它水平差异显著($P < 0.05$)。因素 B 均值大小为 $B_3 < B_2 < B_1$, B_3 与 B_2 差异不显著,与 B_1 差异显著($P < 0.05$)。因素 C 均值大小为 $C_2 < C_3 < C_1$, C_2 与 C_3 差异不显著,与 C_1 差异显著($P < 0.05$)。因素 D 均值大小为 $D_2 < D_1 < D_3$,各水平间差异不显著,由于因素 D 对胞间 CO_2 浓度的影响不显著,因此可忽略因素 D 的多重比较结果,胞间 CO_2 浓度较低的最优组合为 $A_5B_3C_2D_x$ ($x = 1, 2, 3$),与胞间 CO_2 浓度最低的组合 $A_5B_3C_2D_2$ (处理 15)相一致。

表 3 净光合速率和蒸腾速率的方差分析及极差

Table 3 The variance analyses and ranges of P_n and T_r

水平 Levels	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$				蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$				
	A	B	C	D	A	B	C	D	
1	9.33e	14.01c	14.18c	14.87a	2.87c	3.40b	3.45b	3.55a	
2	9.66e	14.80b	15.98a	15.32a	2.95c	3.48b	3.60a	3.52a	
3	16.52c	16.52a	15.16b	15.14a	3.98b	3.70a	3.53ab	3.51a	
4	20.12b				4.26a				
5	23.92a				4.19a				
6	11.11d				2.89c				
R	14.59	2.51	1.80	0.45	1.39	0.30	0.15	0.04	
R'	9.35	3.20	2.29	0.57	0.89	0.38	0.19	0.05	
F	311.05	28.06	23.18	10.31	120.14	12.86	3.24	0.57	
P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	0.57	

注: R 为极差, R' 为同水平等价极差,同列不同小写字母间表示差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: R and R' are the range of the same factor. Values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ level and hereinafter.

2.4 品种与施肥对气孔导度的影响

各处理气孔导度的因素间方差分析结果见表 4, F 检验结果表明,因素 A、B 和 C 对气孔导度影响极显著($P < 0.01$),因素 D 影响不显著($P > 0.05$),同水平等价极差 R' 大小为 $A > B > C > D$,综合分析得出,各因素影响程度为 $A > B > C > D$ 。多重比较结果得知,因素 A 均值大小为 $A_5 > A_4 > A_3 > A_6 > A_2 > A_1$,除 A_1 与 A_2 、 A_2 与 A_6 差异不显著外($P > 0.05$),其它各水平差异显著($P < 0.05$)。因素 B 均值大小为 $B_3 > B_2 > B_1$, B_2 与 B_3 差异不显著,两者与

B_1 差异显著($P < 0.05$),表明有机肥第 2、3 水平明显提高了气孔导度。因素 C 均值大小为 $C_3 > C_2 > C_1$, C_2 与 C_3 差异不显著,两者与 C_1 差异显著($P < 0.05$)。因素 D 均值大小为 $D_3 > D_1 > D_2$,各水平差异不显著。由于因素 D 对气孔导度影响不显著,因此可忽略因素 D 的多重比较结果,得出气孔导度的最优组合为 $A_5B_3C_3D_x$ ($x = 1, 2, 3$),与气孔导度最高的组合 $A_5B_3C_2D_2$ (处理 15)相比,只有因素 C 不一致,而 C_2 与 C_3 差异不显著,说明正交实验结果是可靠的。

表 4 胞间 CO₂ 浓度和气孔导度的方差分析及极差Table 4 The variance analyses and ranges of *C_i* and *G_s*

水平 Levels	胞间 CO ₂ 浓度 <i>C_i</i> /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)				气孔导度 <i>G_s</i> /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)				
	A	B	C	D	A	B	C	D	
1	224.34a	206.16a	204.90a	195.83a	103.77e	128.62b	131.81b	140.98a	
2	215.12ab	195.97ab	190.32b	194.17a	108.82de	147.18a	145.51a	140.82a	
3	193.59c	190.72b	197.63ab	202.85a	154.79c	152.97a	151.45a	146.97a	
4	185.24c				168.69b				
5	163.94d				203.82a				
6	203.48bc				117.65d				
<i>R</i>	60.40	15.45	14.58	8.68	100.05	24.35	19.64	6.15	
<i>R'</i>	38.70	19.68	18.57	11.05	64.11	31.01	25.01	7.83	
<i>F</i>	12.44	3.25	4.55	2.85	122.07	25.16	16.18	2.32	
<i>P</i>	<0.01	<0.05	0.02	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	0.11	

2.5 品种与施肥对水分利用效率的影响

各处理水分利用效率的因素间方差分析结果见表 5, *F* 检验表明, 4 个因素对水分利用效率的影响都达到了极显著水平 ($P < 0.01$), 同水平等价极差 *R'* 大小为 $A > C > B > D$, 综合 *F* 值及 *P* 值得出, 各因素影响程度为 $A > C > B > D$ 。因素内多重比较得知, 因素 A 均值大小为 $A_5 > A_4 > A_3 > A_6 > A_2 > A_1$, 除 A_1 与 A_2 差异不显著外 ($P > 0.05$), 其它各水平差异显著 ($P < 0.05$), 豆科的水分利用效率均显著

高于禾本科 ($P < 0.05$)。因素 B 均值大小为 $B_3 > B_2 > B_1$, B_3 与 B_2 差异不显著, 与 B_1 差异显著 ($P < 0.05$)。因素 C 均值大小为 $C_2 > C_3 > C_1$, C_2 与 C_3 差异不显著, 两者与 C_1 差异显著 ($P < 0.05$)。因素 D 均值大小为 $D_3 > D_2 > D_1$, D_3 与 D_2 差异不显著, 与 D_1 差异显著 ($P < 0.05$)。水分利用效率的最优组合为 $A_5B_3C_2D_3$, 与水分利用效率最高的组合 $A_5B_3C_2D_2$ (处理 15) 相比, 因素 D 不一致, 而 D_3 与 D_2 差异不显著, 因此水分利用效率的正交实验结果是可靠的。

表 5 水分利用效率和叶绿素含量的方差分析及极差

Table 5 The variance analyses and ranges of WUE and chlorophyll content

水平 Levels	水分利用效率 <i>WUE</i> /($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)				叶绿素含量 Chlorophyll content/%			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	3.24e	4.03b	4.00b	4.05b	35.80d	41.86b	41.86b	43.40a
2	3.28e	4.16ab	4.25a	4.19ab	35.20d	44.07a	43.62a	42.85a
3	4.15c	4.27a	4.21a	4.22a	48.10b	44.45a	44.90a	44.12a
4	4.71b				46.43b			
5	5.69a				54.37a			
6	3.84d				40.87c			
<i>R</i>	2.45	0.24	0.25	0.17	19.17	2.59	3.04	1.27
<i>R'</i>	1.57	0.31	0.32	0.22	12.28	3.30	3.87	1.62
<i>F</i>	155.85	6.08	12.22	8.67	93.26	6.44	6.45	0.13
<i>P</i>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.88

2.6 品种与施肥对叶绿素含量的影响

各处理叶绿素含量的因素间方差分析结果见表 5, *F* 检验结果表明, 因素 A、B 和 C 对叶绿素含量影响极显著 ($P < 0.01$), 因素 D 影响不显著 ($P > 0.05$), 同水平等价极差 *R'* 大小为 $A > C > B > D$, 因此, 各因素影响程度为 $A > C > B > D$ 。多重比较结果得知, 因素 A 均值大小为 $A_5 > A_3 > A_4 > A_6 > A_1 > A_2$, 除 A_1 与 A_2 、 A_3 与 A_4 差异不显著外 ($P > 0.05$),

其它各水平差异显著 ($P < 0.05$), 豆科牧草均显著高于禾本科。因素 B 均值大小为 $B_3 > B_2 > B_1$, B_2 与 B_3 差异不显著, 两者与 B_1 差异显著 ($P < 0.05$)。因素 C 均值大小为 $C_3 > C_2 > C_1$, C_2 与 C_3 差异不显著, 两者与 C_1 差异显著 ($P < 0.05$)。因素 D 均值大小为 $D_3 > D_1 > D_2$, 各水平差异不显著。忽略影响不显著的因素 D 的多重比较结果, 得出叶绿素含量的最优组合为 $A_5B_3C_3D_x$ ($x = 1, 2, 3$), 与叶绿素含量最高

的组合 A₅B₃C₂D₂(处理 15)基本一致。

2.7 牧草光合参数与叶绿素含量的相关关系

相关分析表明(表 6),净光合速率与蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率及叶绿素含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与胞间 CO₂ 浓度呈极显著负相关

($P < 0.01$)。蒸腾速率与气孔导度、水分利用效率及叶绿素含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与胞间 CO₂ 浓度极显著负相关($P < 0.01$)。胞间 CO₂ 浓度与气孔导度、水分利用效率及叶绿素含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。

表 6 光合参数与叶绿素含量的相关关系

Table 6 The correlation analyses of photosynthetic parameters and chlorophyll content

指标 Index	净光合速率 P_n	蒸腾速率 T_r	胞间 CO ₂ 浓度 C_i	气孔导度 G_s	水分利用效率 WUE
蒸腾速率 T_r	0.938**				
胞间 CO ₂ 浓度 C_i	-0.704**	-0.572**			
气孔导度 G_s	0.966**	0.901**	-0.732**		
水分利用效率 WUE	0.967**	0.851**	-0.676**	0.951**	
叶绿素含量 Chl	0.925**	0.883**	-0.620**	0.947**	0.937**

3 讨论

光合作用是植物物质生产的基础,在物质生产过程中的能量吸收、固定、分配与转化中起到重要作用^[22]。4个因素对 P_n 、 T_r 、 G_s 及 C_i 的影响程度大小均为品种 > 有机肥 > NPK > 秸秆,对 WUE 及叶绿素含量的影响程度大小为品种 > NPK > 有机肥 > 秸秆,其中牧草品种的影响程度都达到极显著水平($P < 0.01$)。各豆科牧草的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量均显著大于禾本科,草木樨的 P_n 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量显著高于紫花苜蓿和沙打旺,禾本科披碱草的 P_n 、 WUE 及叶绿素含量显著高于扁穗冰草和蒙古冰草。有机肥对 P_n 、 T_r 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量影响极显著($P < 0.01$),对 C_i 影响显著($P < 0.05$),有机肥 36 t·hm⁻²的 P_n 均值较高,表明大量有机肥的施入,提高了土壤肥力,使植物的光合作用显著增强,这与杨玉玲等^[23]的研究相同。NPK 对 P_n 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量影响极显著($P < 0.01$),对 T_r 和 C_i 影响显著($P < 0.05$),NPK 中肥配比的 P_n 显著大于高、低肥配比, T_r 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量显著高于低肥配比,表明合理的 N、P、K 配施可改善作物的水分状况,提高气孔调节能力和光合速率,这与张岁岐和山仑^[24]研究相似。秸秆对 P_n 和 WUE 影响极显著($P < 0.01$), P_n 均值各水平间差异不显著($P > 0.05$),而秸秆 25 t·hm⁻²的 WUE 与 15 t·hm⁻²差异不显著,显著高于 5 t·hm⁻²,表明合理的秸秆还田提高了牧草的水分利用效率。

正交设计方法得到 P_n 、 C_i 、 G_s 、 WUE 及叶绿素含量的最优组合与 P_n 、 G_s 、 WUE 、叶绿素含量最高及 C_i 最低的组合处理 15 基本一致,证实了正交设计

结果的可靠性。为节约资源,对差异不显著的水平选择较低的施肥量,综合得出光合能力最佳的组合为草木樨 + 有机肥 36 t·hm⁻² + NPK(N 165 kg·hm⁻²、P 135 kg·hm⁻²和 K 135 kg·hm⁻²) + 秸秆 15 t·hm⁻²。造成植物光合能力下降的自身因素可分为气孔因素和非气孔因素,如果 P_n 和 G_s 变化与 C_i 变化的趋势一致,说明 P_n 下降是受气孔因素限制;如果 P_n 和 G_s 变化与 C_i 变化的趋势相反,则说明 P_n 下降是受非气孔因素限制^[17]。本研究的相关分析表明, P_n 、 G_s 与 C_i 呈极显著负相关($P < 0.01$),说明牧草较低的光合能力不是由 G_s 下降使 CO₂ 供应减少所致,而是由于非气孔因素阻碍了 CO₂ 的利用,造成 CO₂ 的积累。因此,合理的施肥处理可降低非气孔因素对光合作用的限制,从而提高作物的光合能力。

参考文献:

- [1] 杜利霞,董宽虎,杨桂英,等.不同盐碱化草地对披碱草光合生理特性的影响[J].草业学报,2011,20(5):49-56.
- [2] Tester M, Davenport R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants[J]. Annals of Botany, 2003,91(5):503-527.
- [3] Cinatl J, Morgenstern B, Bauer G, et al. Glycyrrhizin, an active component of liquorice roots, and replication of SARS-associated coronavirus[J]. The Lancet, 2003,361(9374):2045-2046.
- [4] 陈静波,阎君,张婷婷,等.四种暖季型草坪草对长期盐胁迫的生长反应[J].草业学报,2008,17(5):30-36.
- [5] Brugnoli E, Bjorkman O. Growth of cotton under continuous salinity stress: influence on allocation pattern, stomatal and non-stomatal components of photosynthesis and dissipation of excess light energy[J]. Planta, 1992,187(3):335-347.
- [6] 潘萍,赵涛.宁夏土壤盐渍化的动态变化及控制途径[J].宁夏农林科技,2001,(5):38-39.
- [7] 韦丽军,卞莹莹,宋乃平.宁夏盐池县草场退化因素分析[J].水

- 土保持通报,2007,27(1):122-125.
- [8] 何三强,石春太,陈昕,等.盐池扬黄灌区土壤次生盐渍化发生现状及对策[J].宁夏农林科技,2004,(2):39-40.
- [9] 马红彬,谢应忠.宁夏中部干旱带草地生态农业体系建设研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):180-184.
- [10] 彭红春,李海英,沈振西,等.利用人工种草改良柴达木盆地弃耕盐碱地[J].草业学报,2003,12(5):26-30.
- [11] 赵银,柴琦,陈盈盈,等.盐渍化土壤改良措施的作物生产效应[J].草业科学,2009,26(4):55-58.
- [12] 李彬,王志春,孙志高,等.中国盐碱地资源与可持续利用研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):154-158.
- [13] 任崑,罗廷彬,王宝军,等.新疆生物改良盐碱地效益研究[J].干旱地区农业研究,2005,22(4):211-214.
- [14] 杜连凤,刘文科,刘建玲.三种秸秆有机肥改良土壤次生盐渍化的效果及生物效应[J].土壤通报,2005,36(3):309-312.
- [15] Marathe R A, Bharambe P R, Sharma R, et al. Soil properties of Vertisol and yield of sweet orange (*Citrus sinensis*) as influenced by integrated use of organic manures, inorganic and bio-fertilizers[J]. Indian journal of agricultural sciences, 2009,79(1):3-7.
- [16] 刘虎俊,王继和,杨自辉,等.干旱区盐渍化土地工程治理技术研究[J].中国农学通报,2005,21(4):329-333.
- [17] 王晓娟,贾志宽,梁连友.不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):419-425.
- [18] 徐萌,张玉龙,黄毅,等.秸秆还田对半干旱区农田土壤养分含量及玉米光合作用的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):153-156.
- [19] 高飞,贾志宽,路文涛,等.秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分,玉米生长及光合特性的影响[J].生态学报,2011,31(3):777-783.
- [20] Singh B, Malhi S S. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment[J]. Soil and Tillage Research, 2006,85(1):143-153.
- [21] 苑玉凤.正交试验结果的分析[J].统计与决策,2006,(5):138-139.
- [22] 葛莹,常杰,陈增鸿,等.青冈(*Quercus glauca*)净光合作用与环境因子的关系[J].生态学报,1999,19(5):683-688.
- [23] 杨玉玲,刘文兆,王俊,等.配施钾肥,有机肥对旱地春玉米光合生理特性和产量的影响[J].西北农业学报,2009,18(3):116-121.
- [24] 张岁岐,山仑.植物水分利用效率及其研究进展[J].干旱地区农业研究,2002,20(4):1-5.

(上接第 195 页)

- [9] Gelly M, Recasens I, Girona J, et al. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2004, 84(6):561-568.
- [10] 程福厚,李绍华,孟昭清,等.调亏灌溉条件下鸭梨营养生长、产量和果实品质反应的研究[J].果树学报,2003,20(1):22-26.
- [11] 于红梅,李子忠,龚元石.传统和优化水氮管理对蔬菜地土壤氮素损失与利用效率的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):54-59.
- [12] 陈日远,刘厚诚,宋传珍,等.氮素营养对芥蓝生长和品质的影响[J].农业工程学报,2005,21(Z2):143-146.
- [13] 高俊凤.植物生理学试验技术[M].西安:世界图书出版公司,2000.
- [14] 朱云娜,王中华,张治平,等.金雀异黄素和环鸟苷酸调控离体葡萄果实花青苷积累[J].园艺学报,2010,37(4):517-524.
- [15] 刘润海,范茂攀,汤利,等.云南省水稻生产中肥料偏生产力分析[J].云南农业大学学报,2012,27(1):117-122.
- [16] 杨红.水肥耦合对辣椒生长发育和品质的影响[D].贵阳:贵州大学,2008.
- [17] 隋岩,冯志文,王翠玲,等.水肥耦合对设施草莓生长、产量品质及水分利用效率的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2011,42(3):369-375.
- [18] 王军,黄冠华,郑建华.西北内陆旱区不同沟灌水肥对甜瓜水分利用效率和品质的影响[J].中国农业科学,2010,43(15):3168-3175.
- [19] 虞娜,张玉龙,黄毅,等.温室滴灌施肥条件下水肥耦合对番茄产量影响的研究[J].土壤通报,2003,34(3):179-183.