

宁夏种植甘草 $\delta^{13}\text{C}$ 组成与水分利用的关系

胡海英¹, 梁新华², 伏晓昭¹, 王 兴³, 谢应忠¹

(1.宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学生命科学学院, 宁夏 银川 750021;

3.宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;)

摘 要:以宁夏盐池退耕还草地人工种植乌拉尔甘草(以下统称甘草)为研究对象,比较研究了甘草叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成、叶片相对含水量、脯氨酸含量、叶绿素含量等指标及其相互关系。结果表明:(1)自然降水条件下不同处理土壤含水量显著低于灌溉条件下的土壤含水量($P<0.05$),甘草叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、水分利用效率、叶片相对含水量显著大于灌溉条件下的相应值($P<0.05$),脯氨酸含量和叶绿素含量则呈相反变化趋势;(2)野生甘草与自然降水条件下种植甘草之间的生境土壤含水量、 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率无显著差异,与灌溉条件下种植甘草之间的各项指标差异显著;(3)同一水分条件下2 a生和3 a生甘草之间的脯氨酸含量和叶绿素含量差异显著($P<0.05$),其他指标差异不显著;(4)甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水量、脯氨酸含量、叶绿素含量呈显著负相关,与叶片相对含水量呈显著正相关。综上可知,甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值可同时反映甘草植株和土壤的水分状况。自然降水条件下,人工种植甘草与野生甘草一样具有高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和水分利用效率,在研究区,甘草可在无灌溉条件地区大面积种植。

关键词:乌拉尔甘草; $\delta^{13}\text{C}$ 值; 土壤水分; 水分利用效率

中图分类号:S567.7⁺1 **文献标志码:**A

The relationship between $\delta^{13}\text{C}$ value and water utilization of cultivated liquorice (*Glycyrrhiza uralensis*) in Ningxia

HU Hai-ying¹, LIANG Xin-hua², FU Xiao-zhao¹, WANG Xing³, XIE Ying-zhong¹

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

Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Incubation Base of State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological

Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: This study investigated the relationship between leaf $\delta^{13}\text{C}$ value, relative water content, proline and chlorophyll content of cultivated liquorice (*G. uralensis*) under various water situations in Yanchi County, Ningxia. The results showed that: (1) Soil water content in all soil layers under irrigation was significantly higher than that under natural rainfall condition ($P<0.05$). Also, leaf $\delta^{13}\text{C}$ value, water use efficiency, and relative water content were significantly higher than that under irrigation, however, proline and chlorophyll content showed reverse results; (2) There was no significant difference in soil water content, $\delta^{13}\text{C}$ value, and water-use efficiency between wild liquorice and cultivated ones under non-irrigation conditions, but significant difference between wild liquorice and irrigated ones; (3) Under the same water conditions, there was significant difference in proline and chlorophyll contents between 2 a and 3 a of liquorice but not in other indexes; (4) The leaf $\delta^{13}\text{C}$ value was negatively correlated with soil moisture content, proline and chlorophyll contents, but positively correlated with relative leaf water content. In conclusion, the leaf $\delta^{13}\text{C}$ value can reflect the water status of both plants and the soil it grows in. Like wild liquorice, cultivated ones have higher $\delta^{13}\text{C}$ value and water-use efficiency to adapt to the natural conditions. Therefore, liquorice can be planted on a large scale without irrigation conditions in the study area.

Keywords: *Glycyrrhiza uralensis*; $\delta^{13}\text{C}$ value; soil moisture; water use efficiency

在降水量少、蒸发强烈、土壤含水量低的干旱、半干旱地区,土壤水分依旧是影响植物生长和发育的最重要的环境因素之一。因此,植物能否适应当地的极限环境条件,最主要还是要看它们能否很好地协调碳同化和水分耗散之间的关系。植物水分利用效率(water use efficiency, WUE)能够很好地衡量和解析这种相关性^[1-2]。当水分不足时,植物会关闭部分气孔,使通过气孔进入叶片的 CO_2 减少,引起植物叶内 CO_2 浓度(C_i)下降,植物对 CO_2 的识别能力必然降低,从而使叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高。 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 WUE 呈正相关,高 $\delta^{13}\text{C}$ 值对应高 WUE,许多试验证实了两者之间具有很强的相关性^[3-5],目前测定植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值成为鉴定植物 WUE 的一种常规方法,推算的 WUE 其实就是单位气孔导度所能同化的碳量,可以用来表征植物对环境变化所产生的生理响应。张正斌等^[6-7]提出植物必须具有水分高效利用和抗旱性的双重能力,充分利用生长季节的一定有限降水,才能够生存和高产。因此了解植物 WUE,探明植物水分利用特征不仅为生长在水分为限制因子的区域估计水分平衡提供思路,还能为荒漠化地区植被恢复的物种选择、种植策略、人工管理等提供实践应用支持。

乌拉尔甘草(*Glycyrrhiza rualensis* L,下文简称甘草, Liquorice)是一种用途广泛的资源植物,也是人类开发利用最早的物种之一。其地下根茎是传统的大宗中草药,地上茎、叶、花果是荒漠畜牧业优良天然牧草^[8],而且以其强大的地下根系和对风沙、盐碱等恶劣环境的适应性,有效发挥着保护生态环境的重大作用。宁夏盐池被誉为“中国甘草之乡”,该地区累计发展人工种植甘草 56 600 hm^2 ,成为全国最大的甘草种苗培育基地^[9]。但是近几年受市场价格和管理成本等多重影响,人工甘草产区面积骤缩,灌溉栽培技术粗放,病虫害肆虐,产量与品质不佳等诸多问题存在。尤其是随着气候变化和水资源日益匮乏,大面积种植甘草势必存在如何用水问题,不同水分条件下甘草 WUE 存在何种差异,如何适应土壤水分变化,是目前需要解决的关键问题。针对此,本文在宁夏盐池县退耕还草地选择不同水分来源的人工栽培甘草,利用稳定碳同位素技术,比较研究不同生境栽培甘草的 WUE 以及适应土壤水分变化特征,提出有效水分利用建议,为荒漠化地区人工种植甘草的栽培策略、水资源利用和管理提供研究资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏吴忠市盐池县($106^{\circ}30' \sim 107^{\circ}41'E, 37^{\circ}04' \sim 38^{\circ}10'N$),该地区属中温带大陆性气候,为典型半干旱地区,年平均气温 8.1°C ,年降水量在 250~350 mm,年际变化幅度高达 30%以上。降雨主要集中在 6~9 月,约占全年降水量的 60%以上,年蒸发量达 2 710 mm,约为降水量的 5~7 倍,年均无霜期为 165 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年有效积温为 $2\ 945^{\circ}\text{C}$ 左右,年日照时数为 2 867 h,全年太阳辐射总量为 $140\text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。土壤类型主要以灰钙土和风沙土为主。

1.2 试验材料与设计

在宁夏盐池县高沙窝镇所辖退耕还草地乌拉尔甘草野生分布区和人工种植基地,选择封育草地补播的 2 a 生和 3 a 生野生甘草为对照 1(CK1)和对照 2(CK2),利用自然降水栽培种植 2 a 生和 3 a 生甘草分别为处理 1(T1)和处理 2(T2),利用灌溉水栽培种植 2 a 生和 3 a 生甘草分别为处理 3(T3)和处理 4(T4),共有 6 个试验样地,每个试验样地设 3 个重复,即分为 3 个试验小区,每小区面积为 223 m^2 ,各试验样地气候、地势及土壤质地相近,年均降水量 337.95 mm。栽培种植甘草定植密度为 10 000~12 000 株 $\cdot 667\text{m}^{-2}$ 。人工灌溉甘草种植试验区 6~7 月每月灌水定额为 $30 \sim 40\text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,8 月灌水定额为 $20 \sim 30\text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,全年抽水漫灌 3~4 次水。

1.3 样品采集

在 2016 年甘草旺盛生长期同期采集植物及土壤样品。植物样品采集:在各试验小区随机选取 10 株长势相似植株,采集叶片混合成 1 份样品,装在干燥信封中冷藏保存带回实验室待测,3 次重复。土壤样品采集:在每个试验小区按对角线 5 点法采集 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 土壤剖面样品,相同层次 5 点混合为 1 个样品,装入铝盒带回实验室待测,3 次重复。

1.4 样品分析

1.4.1 植株样品分析 叶片相对含水量(RWC)采用生物量差减法,游离脯氨酸(Pro)采用酸性茚三酮法,叶绿素含量采用 95%乙醇浸提法^[10]分别测定。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定分析:将甘草叶片用去离子水洗净后于 70°C 恒温条件下烘干 72 h,用球磨仪粉碎并过 100 目筛后密封保存于 1 mL 离心管,寄送至深圳市华科精信检测科技有限公司稳定同位素实验室用 DELTA V Advantage 同位素比率质谱仪(Isotope

Ratio Mass Spectrometer)测定样品碳同位素比值,样品在元素分析仪中高温燃烧后生成 CO_2 ,质谱仪通过检测 CO_2 的 ^{13}C 与 ^{12}C 比率,并与国际标准物(Pee Dee Belnite 或 PDB,一种海洋中的贝壳化石,其 ^{13}C 含量为 1.124%)比对后,根据公式: $\delta^{13}\text{C} = (R_p - R_s) / R_s (R_p, R_s$ 分别表示植物组织样品和标准化石 PDB 的 $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$) 计算出样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

1.4.2 土壤样品分析 土壤含水量采用烘干差减法测定。

1.5 数据统计和分析

数据用平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SE)表示。采用 SAS 软件对试验结果进行单因素方差分析,利用 IBM SPSS 22.0 软件进行相关性统计分析,处理间采用 LSD 法进行多重比较。用 Excel 2007 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同生境土壤含水量的差异分析

图 1 结果表明,自然降雨条件下 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 各土层土壤平均含水率分别为 6.38%、5.49%、3.71%、2.99%,随着土层深度增加土壤含水量逐渐降低,深层 60~80 cm 的含水量只有 3%左右,显著低于其他土层。人工灌溉下各土层平均值分别为 13.50%、14.18%、16.22%、17.6%,土壤含水量随着深度的增加而增加,深层 60~80 cm 的含水量达到 18%左右。人工灌溉显著增加了土壤含水量。自然降水条件下,野生甘草(CK1、CK2)与人工栽培甘草(T1、T2)0~20 cm 剖面土壤含水量有显著差异,其它各剖面差异不显著。

2.2 不同水分条件下甘草 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成与 WUE

如图 2a 所示,不同水分来源条件下,各生境的甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -25.91‰ ~ -27.31‰ 之间,属于 C_3 植物,自然降水各处理(CK1、CK2、T1、T2)与灌溉条件下 2 个处理(T3、T4)甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间有显

著差异($P<0.05$);在自然降水条件下,野生甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值(-26.33‰)略高于人工栽培甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值(-26.67‰),但两者之间差异不显著;而同种水分条件下的 2 a 生与 3 a 生甘草之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著差异($P>0.05$)。

植物体在光合作用过程中会对 ^{13}C 进行选择吸收,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的高低主要取决于光合途径的差异,而植物 CO_2 的同化过程与植物水分利用(主要是蒸腾作用)之间是相互偶联的,因此通过测定植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以估算长期的 WUE^[11]。借鉴严昌荣^[11]关于植物 WUE 推算公式: $WUE = 13.712 + 0.354 \delta^{13}\text{C}$,估算不同处理甘草的 WUE,如图 2b 所示,自然降水条件下各处理甘草的 WUE 显著高于人工灌溉甘草;野生甘草与人工栽培甘草之间的 WUE 差异不显著,但降水条件下栽培甘草(T1、T2)显著高于灌溉下栽培甘草(T3、T4)的 WUE;同种水分条件下 2 a 生与 3 a 生甘草之间的 WUE 无显著差异($P>0.05$)。

2.3 不同水分条件下甘草叶片 RWC 和脯氨酸的变化特征

植物 RWC 可以反映植物的水分亏缺^[12],而且在干旱环境中植物普遍存在着水分亏缺。如图 3a 所示,甘草在不同的水分条件下水分亏缺程度差异显著,自然降水条件下各处理(CK1、CK2、T1、T2)甘草叶片 RWC 均值与灌溉条件下各处理(T3、T4)甘草 RWC 均值之间有显著差异($P<0.05$),且在自然降水条件下野生甘草和栽培甘草叶片 RWC 之间亦差异显著($P<0.05$),灌溉条件下生长年限之间的 RWC 无显著差异,但降水条件与灌溉条件之间栽培甘草的 RWC 差异显著($P<0.05$)。

植物叶片游离脯氨酸含量的积累可以反映植物应对水分亏缺的能力,研究表明^[13-16],在适宜水分条件下,植物的游离脯氨酸含量随着时间推移变化不大,但干旱胁迫条件下,随着时间变化其游离脯

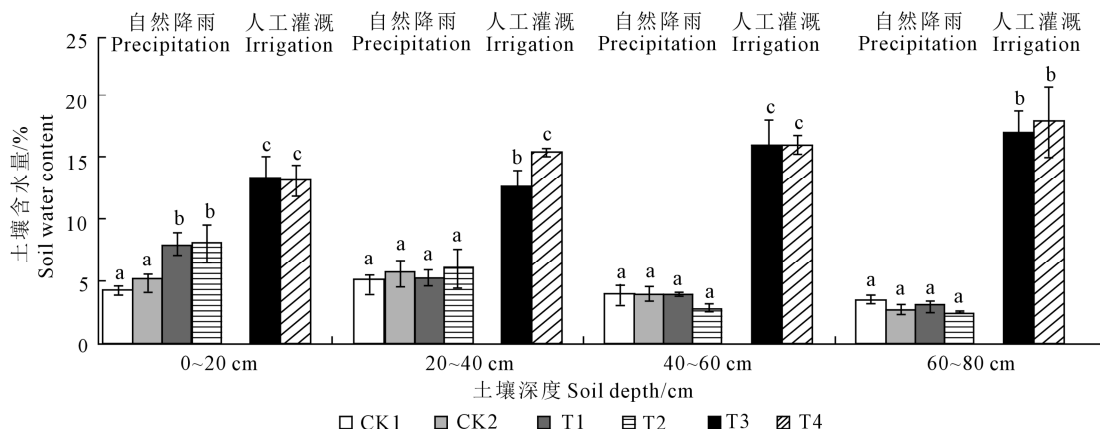


图 1 不同生境土壤含水量变化特征

Fig.1 Soil moisture content of different soil layers in different habitats

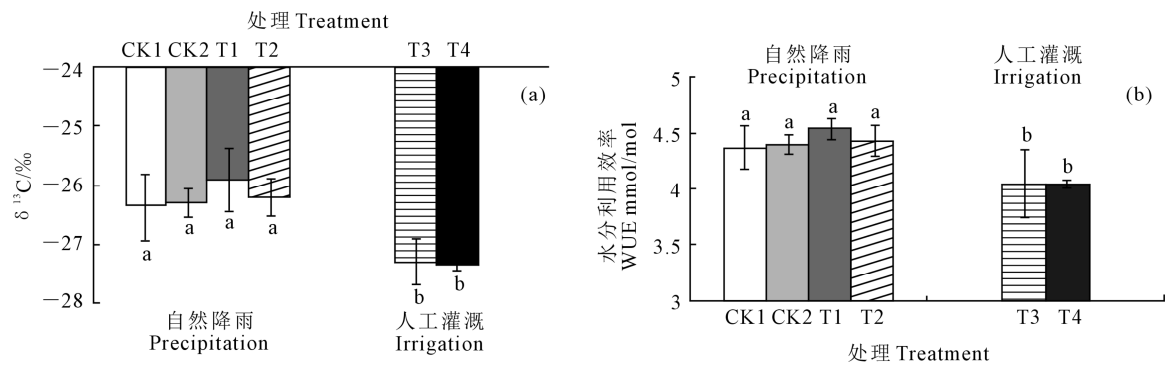


图 2 不同水分条件对甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE 的影响

Fig. 2 Effect of moisture conditions on the $\delta^{13}\text{C}$ value and WUE in leaves of liquorice

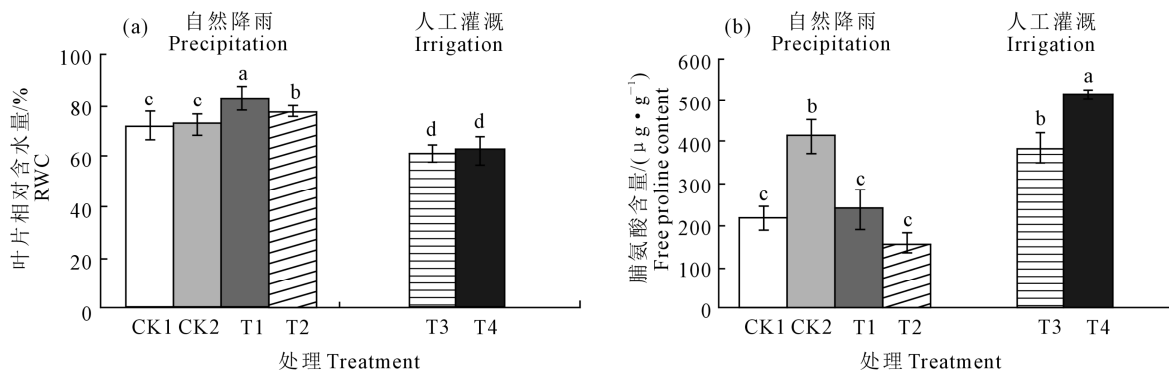


图 3 不同水分条件对甘草叶片 RWC 和脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effect of moisture conditions on relative water content and proline content of liquorice

氨酸含量明显呈现先上升后下降的趋势。如图 3b 所示,自然降水条件下各处理(CK1、CK2、T1、T2)甘草脯氨酸含量均值为 $150.39\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,灌溉条件下各处理(T3、T4)甘草脯氨酸含量均值为 $451.87\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,两者之间呈显著差异($P<0.05$),野生甘草(CK1、CK2)脯氨酸含量均值($317.33\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)与栽培甘草各处理(T1、T2、T3、T4)脯氨酸含量均值($326.14\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)之间未呈现差异,自然降水条件下栽培甘草的脯氨酸含量显著低于灌溉条件下的。可见,各处理甘草叶片 RWC 和脯氨酸含量会随着土壤水分改变而发生变化。

2.4 不同水分条件下甘草叶片叶绿素含量的变化特征

植物叶片中光合色素含量的高低在很大程度上反映了植物的生长状况和叶片的光合能力,可以指示植物对水分胁迫的敏感性^[17]。如表 1 所示,不同生境中甘草叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a/b 值及叶绿素含量均呈显著性差异($P<0.05$)。自然降水条件下的各处理(CK1、CK2、T1、T2)甘草的叶绿素 a 均值($1.17\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、叶绿素 b 均值($0.63\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)及叶绿素总含量均值($1.79\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)显著低于灌溉条件下各处理(T3、T4)甘草的叶绿素 a 均值($2.08\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、叶绿素 b 均值($1.25\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)及叶绿素总含量均值($3.33\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$);而叶绿素 a/b 值的变化则相反。自然降水条件下栽培甘草与野生甘草

之间的叶绿素各组分含量无显著差异,而灌溉条件下不同生长年限之间的叶绿素各组分含量有显著差异($P<0.05$)。可见,土壤水分条件也是影响甘草光合色素含量的主要因子,其能够维持叶绿素 a/b 稳定的比值。说明甘草叶片在自然降水条件下虽然总叶绿素含量下降,但因叶绿素 a/b 值提高,因此可以维持较稳定的光能吸收、传递、转换功能,进而可以为光合作用顺利进行提供保障。

2.5 甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水量、WUE、脯氨酸含量、叶绿素等指标间的相关性

从以上结果分析发现,不同生境中甘草因土壤含水量的不同而表现出 $\delta^{13}\text{C}$ 值、RWC、脯氨酸含量、叶绿素含量等指标的显著差异,将甘草各项指标进行相关性分析,发现甘草 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 RWC 极显著正相关,与脯氨酸含量、叶绿素含量、叶绿素 a 含量显著负相关,与土壤含水量极显著负相关,相关系数分别为 0.978、-0.804、-0.799、-0.775、-0.929;RWC 与脯氨酸含量、叶绿素 a 含量显著负相关,与叶绿素含量、土壤含水量极显著负相关,相关系数分别为 -0.756、-0.812、-0.836、-0.861;叶绿素含量与土壤含水量显著正相关,相关系数为 0.813。从这些相关性可以看出,甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值能够同时反映植株与土壤的水分状况,与植物光合及渗透调节也有一定的联系。

表 1 不同水分条件下甘草叶绿素及其组分含量变化

Table 1 Changes of total chlorophyll content and its components in liquorice leaves under different moisture conditions					
水分来源 Water source	处理 Treatment	叶绿素 a Chla/(mg · L ⁻¹)	叶绿素 b Chlb/(mg · L ⁻¹)	叶绿素 a/b Chla/b	叶绿素总量 Chl/(mg · g ⁻¹)
自然降水 Precipitation	CK1	1.59±0.33c	0.68±0.18bc	2.38±0.25a	2.27±0.50bc
自然降水 Precipitation	CK2	1.18±0.16d	0.47±0.07c	2.54±0.11a	1.65±0.22de
自然降水 Precipitation	T1	1.25±0.31d	0.49±0.14c	2.56±0.12a	1.73±0.45de
自然降水 Precipitation	T2	0.86±0.18e	0.81±0.70bc	2.66±0.15a	1.36±0.21e
人工灌溉 Irrigation	T3	2.31±0.54a	1.59±0.75a	1.56±0.28c	3.90±1.29a
人工灌溉 Irrigation	T4	1.84±0.15bc	0.91±0.20bc	2.08±0.28b	2.75±0.34bc

注：同列数据后不同小写字母代表不同处理差异达显著水平($P<0.05$)。

Note: Data with different lowercase letters in the same column means significantly different ($P<0.05$) .

表 2 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水量、RWC、脯氨酸含量、叶绿素等指标间的相关性分析

Table 2 Correlation between the $\delta^{13}\text{C}$ values and the soil water contents, the relative leaf water contents, the proline content, and the content of chlorophyll								
项目 Item	$\delta^{13}\text{C}$	RWC	脯氨酸含量 Proline contents	叶绿素含量 Chl	叶绿素 a 含量 Chl a	叶绿素 b 含量 Chl b	土壤含水量 Soil moisture contents	叶绿素 a/b Chl a/b
$\delta^{13}\text{C}$	1							
RWC	0.978 **	1						
脯氨酸含量 Proline contents	-0.804 *	-0.756 *	1					
叶绿素含量 Chl	-0.799 *	-0.836 **	0.634	1				
叶绿素 a 含量 Chl a	-0.775 *	-0.812 *	0.759 *	0.892 **	1			
叶绿素 b 含量 Chl b	-0.613	-0.641	0.323	0.856 **	0.531	1		
土壤含水量 Soil moisture contents	-0.929 **	-0.861 **	0.857 **	0.813 *	0.784 *	0.626	1	
叶绿素 a/b Chl a/b	0.385	0.406	-0.089	-0.595	-0.174	-0.919 **	-0.396	1

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关(双侧)；* * 表示在 0.01 水平上显著相关(双侧)。

Note: * and * * indicate significant correlation at $P=0.05$ and $P=0.01$ levels, respectively.

3 结论与讨论

研究表明^[18],干旱可提高植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE,而灌溉则降低植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE,而且 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤水分呈现很好的负相关关系^[19]。甘草是典型的 C_3 植物,本研究中,甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随土壤含水量的增加而减少,且两者之间呈极显著负相关,这一结果与前人研究结果一致^[5,19-22]。自然降水条件下栽培甘草与野生甘草之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著差异,但土壤含水量大的灌溉地栽培甘草 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于降水条件下的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,相应地栽培甘草在灌溉条件下的 WUE 显著低于自然降水条件下的 WUE。由于植物生长年龄影响根系的类型和分布深度,导致不同年龄的植物具有不同的水分利用效率^[6],在本文中,相同水分条件下 2 a 生与 3 a 生野生和栽培甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 WUE 并无显著差异。可见,利用自然降水的栽培甘草具有高的水分利用效率,与野生甘草一样能够节约并有效地利用土壤水分,并在一定可利用水分条件下最大程度地固定碳,这是对干旱土壤环境的长期适应结果。

同一植物生长在不同的环境中,通常可以用其叶片 RWC 来指示环境水分亏缺程度,而且植物 RWC 可以直观地反映植物的抗脱水性,RWC 越高,

抗脱水性就越强^[12],本研究结果显示,甘草叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片 RWC 呈极显著正相关,土壤含水量与叶片 RWC 呈极显著负相关,说明叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以同时反映出环境和植物体本身水分的亏缺程度,当甘草叶片水分不足时,通过气孔调节保持膨压稳定,维持植物正常的代谢活动,可见,在不同水分条件下甘草能通过调节气孔导度达到合适的 WUE。赵则海等^[23]研究表明 3 a 生栽培甘草的净光合速率、表观量子效率和水分利用效率等参数与野生甘草最接近,种植 3 a 的栽培甘草已基本具备了野生甘草的光合能力。本研究区野生甘草植被生长相对稀疏,但是在栽培种植条件下,甘草植被呈现出植株高大、浓密的外观,说明当生长环境条件变好时,其光合能力可能是调节甘草 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE 变化的主要因子。叶绿素是植物吸收太阳能进行光合作用的重要物质,在光合作用中起到接受和转换能量的作用,在一定范围内,叶绿素含量越高,光合越强,就能制造更多的光合产物^[24]。本研究中甘草叶绿素 a 及叶绿素含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间具有一定负相关关系,而与土壤含水量之间呈显著正相关。这进一步说明,水分条件的改变引起了光合色素的变化,进而引起光合功能的改变,从而影响到甘草 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE 的变化。

当植物受环境胁迫(干旱、水涝、冷害等)时脯氨酸会大量累积,以维持细胞一定的含水量和渗透势,从而增强植物的抗逆能力。本研究发现不同土壤含水量条件下的甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与脯氨酸含量呈显著负相关,与马剑英等^[20]研究认为荒漠植物红砂脯氨酸含量与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈正相关关系不同,说明脯氨酸含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值对土壤含水量变化生理适应机制因物种不同而不同。自然降水条件下,甘草已处于一定时期的干旱胁迫(0~80 cm 剖面平均土壤含水量为 $4.65\% \pm 0.46\%$),唐晓敏等^[14-15]研究认为,随着干旱胁迫时间的延长,脯氨酸含量均呈先上升后下降并趋于稳定的变化态势。因此,自然降水条件下,栽培甘草和野生甘草一样,其脯氨酸含量处在较稳定的状态,脯氨酸积累值与唐晓敏^[14]研究结果相近。而在有灌溉条件的生境中,由于土壤水分过多,土壤渍水阻断根系的氧气供应,妨碍有氧呼吸,使得甘草处于水分过多的胁迫,因此,甘草的脯氨酸含量在短期内积累增加,极显著高于自然降水条件下甘草的脯氨酸含量,可见,甘草应对水分条件变化具有明显的渗透调节敏感性和适应能力。

综上所述,土壤水分仍然是栽培甘草 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要影响因子,甘草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值不仅能够指示甘草长期 WUE,也能够指示环境水分亏缺程度。以自然降水为主要水分来源的人工种植甘草与野生甘草一样具有较高的 WUE,通过自身强大根系,以一定的生理适应机制来防止体内水分散失,可见,甘草会以较强的碳同化能力和节水型生理对策来适应干旱,且适度的干旱胁迫,有利于甘草生长量的积累和品质的提高^[23-24]。因此,在干旱半干旱荒漠草原地区,要根据退耕地的水分环境条件,合理布设药用甘草种植面积,不提倡利用地下水漫灌,应科学利用自然降水规律,创新甘草栽培管理模式,节约用水的同时有效提高甘草的产量和品质。在退化草场植被恢复过程中,应选择如甘草这种 WUE 高、不依赖表层水稳定生存、且具有生态经济价值的野生乡土牧草,能够以高的水分利用效率和抗旱能力来维持稳定的群落结构。今后的研究重点将把植物的水分利用效率与抗旱性结合起来,从而综合有效地筛选出水分高效利用和耐旱性强的乡土优势植物,并研究制定如何以较少的耗水获得更多绿色产出的种植策略。

参考文献:

[1] 胡化广,张振铭,吴生才,等.植物水分利用效率及其机理研究进

展[J].节水灌溉,2013,(3):11-15.

- [2] 米娜,温学发,蔡福,等.季节性干旱对千烟洲人工林水分利用效率的影响[J].林业科学,2014,50(12):24-31.
- [3] 曹生奎,冯起,司建华,等.植物水分利用效率研究方法综述[J].中国沙漠,2009,29(5):853-858.
- [4] 陈拓,冯虎元,徐世建,等.荒漠植物叶片碳同位素组成及其水分利用效率[J].中国沙漠,2002,22(3):288-291.
- [5] 刘莹,李鹏,沈冰,等.采用稳定碳同位素法分析白羊草在不同干旱胁迫下的水分利用效率[J].生态学报,2017,37(9):3055-3064.
- [6] 张正斌,徐萍,董宝娣,等.水分利用效率—未来农业研究的关键问题[J].世界科技研究与发展,2005,27(1):52-61.
- [7] Condon A G, Richards R A, Rebertzke G J. Improving water - use efficiency and crop yield[J]. Crop Science, 2002, 42(1): 122-132.
- [8] 郑云枫,魏娟花,冷康,等.甘草属 *Glycyrrhiza* L. 植物资源化学及利用研究进展[J].中国现代中药,2015,17(10):1096-1108.
- [9] 汪光孝.中国甘草之乡—宁夏盐池[J].农村百事通,2012,(20):59-60.
- [10] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [11] 严昌荣,韩兴国,陈灵芝.六种木本植物水分利用效率及其小生境关系研究[J].生态学报,2001,21(11):1952-1956.
- [12] 李善家,苏培玺,张海娜,等.荒漠植物叶片水分和功能性状特征及其相互关系[J].植物生理学报,2013,49(2):153-160.
- [13] 胡小文,王彦荣,武艳培.荒漠草原植物抗旱生理生态学研究进展[J].草业学报,2004,13(3):9-15.
- [14] 唐晓敏,王文全,马春英.长期水分胁迫下甘草叶片的抗旱生理响应[J].河北农业大学学报,2008,31(2):16-20.
- [15] 马宗仁,郭博.短芒披碱草和老芒麦在水分胁迫下游离脯氨酸积累的研究 I.植物的抗旱性与脯氨酸积累能力关系的标准[J].中国草地学报,1991,(4):12-16.
- [16] 马成仓,高玉葆,李清芳,等.内蒙古高原荒漠区几种锦鸡儿属(*Caragana*)优势植物的生理生态适应特性[J].生态学报,2007,27(11):4643-4650.
- [17] 米海莉,许兴,李树华,等.水分胁迫对牛心朴子、甘草叶片色素、可溶性糖、淀粉含量及碳氮比的影响[J].西北植物学报,2004,24(10):1816-1821.
- [18] Morecroft M D, Woodward F I. Experimental investigation on the environmental determination of $\delta^{13}\text{C}$ at different altitude[J]. Journal of Experimental Botany, 1990, 41(231):1303-1308.
- [19] 苏波,韩兴国,李凌浩,等.中国东北样带草原区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率对环境梯度的响应[J].植物生态学报,2000,24(6):648-655.
- [20] 马剑英,陈发虎,夏敦胜,等.荒漠植物红砂叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与生理指标的关系[J].应用生态学报,2008,19(5):1166-1171.
- [21] 马飞,姬明飞,陈立同,等.油松幼苗对干旱胁迫的生理生态响应[J].西北植物学报,2009,29(3):548-554.
- [22] 张怡,罗晓芳,沈应柏.干旱胁迫下四倍体刺槐幼苗水分利用效率及稳定碳同位素组成的研究[J].西北植物学报,2009,29(7):1460-1464.
- [23] 赵则海,曹建国,王文杰,等.不同生长年限栽培甘草与野生甘草光合特性对比研究[J].草业学报,2005,14(3):111-116.
- [24] 叶菊,蔺海明,邱黛玉,等.几种甘草(*Glycyrrhiza*)光合特性、形态特征及生物量比较[J].中国沙漠,2014,34(2):456-463.